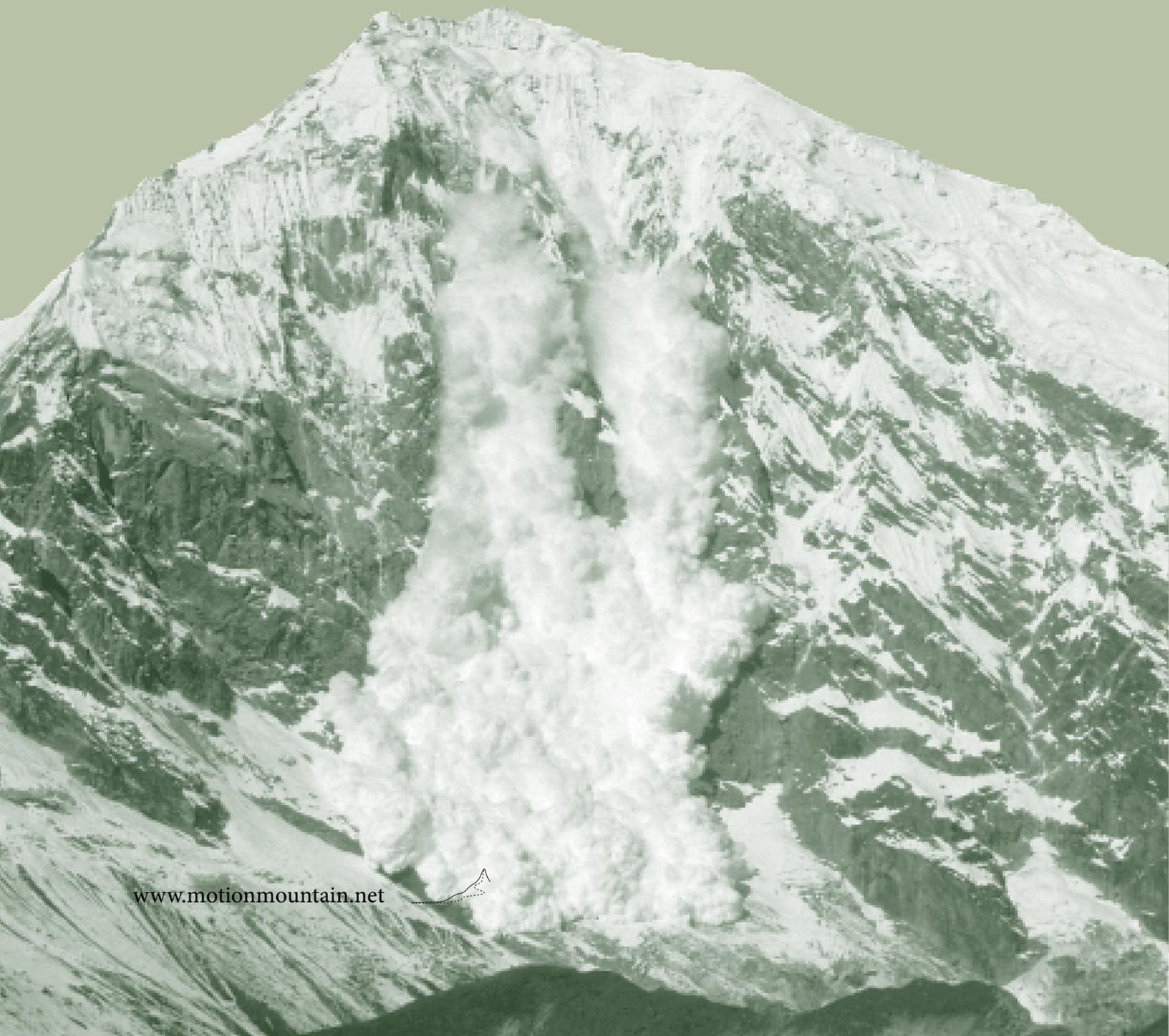


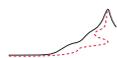
Christoph Schiller

LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'AVENTURE DE LA PHYSIQUE – VOL. II

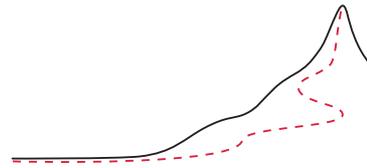
LA RELATIVITÉ





Christoph Schiller

LA MONTAGNE MOUVEMENT



L'Aventure de la Physique
Volume II

La Relativité

Traduit de l'anglais par Benoît CLENET

23^e édition, disponible gratuitement sur
www.motionmountain.net

Editio vicesima tertia.

Proprietas scriptoris © Christophori Schiller
secundo anno Olympiadis vicesimae nonae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.
Imitatio prohibita sine auctoris permissione.
Non licet pecuniam expetere pro aliquo, quod
partem horum verborum continet ; liber
pro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Vingt-troisième édition.

Copyright © 2009 Christoph Schiller,
deuxième année de la 29^e Olympiade.

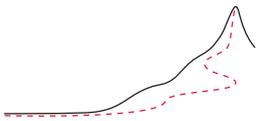


Ce fichier pdf est distribué sous licence Creative Commons
Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 3.0 Allemagne
dont le texte peut être consulté en intégralité sur la page
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/deed.fr,
avec la restriction supplémentaire que toute reproduction,
distribution et utilisation, partielle ou totale, dans *n'importe quel*
produit ou service, qu'il soit commercial ou non, n'est pas autorisée
sans le consentement écrit du détenteur du droit d'auteur.
Toute personne est libre de consulter, enregistrer et imprimer
ce fichier pdf pour son usage personnel, et de le diffuser par
des moyens électroniques, mais uniquement sous sa forme originale
et de manière entièrement gratuite.

À Britta, Esther et Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.



PRÉFACE

« Primum movere, deinde docere* »
Antiquité

Ce livre s'adresse à toute personne curieuse de la nature et du mouvement. La curiosité portant sur la manière dont se meuvent les gens, les animaux, les choses, les images et l'espace nous entraîne dans de multiples aventures. Ce volume présente les meilleures d'entre elles dans le domaine de la relativité. Par la vitesse de la lumière c , la relativité restreinte impose une limite aux vitesses de l'énergie ; la relativité générale circonscrit la force par la force maximale $F \leq c^4/4G$. On montre que dans le cadre de ces deux domaines, toutes les équations découlent de ces limitations. Cette manière simple, intuitive et inhabituelle d'appréhender la relativité et la cosmologie devrait récompenser la curiosité de chaque lecteur – qu'il soit étudiant ou professionnel.

Dans la structure de la physique moderne, indiquée sur la [Figure 1](#), la relativité recouvre deux domaines importants. Le présent volume – le deuxième d'une collection qui en compte six – propose un tour d'horizon de la physique ; il résulte d'une triple aspiration que j'ai poursuivie depuis 1990 : présenter le mouvement d'une manière simple, moderne et vivante.

Afin d'être *simple*, le texte se focalise sur les concepts, tout en donnant aux mathématiques le niveau minimum nécessaire. La priorité est donnée à la compréhension des concepts de la physique plutôt qu'à l'utilisation des formules dans les calculs. Tout ce texte est à la portée d'un étudiant qui accède au premier niveau universitaire.

Afin d'être *moderne*, ce texte est enrichi par les nombreux joyaux – aussi bien théoriques qu'empiriques – qui parsèment la littérature scientifique.

Afin d'être *vivant*, ce texte tente de surprendre le lecteur autant que possible. Lire un livre de physique générale, ce devrait être comme assister à un spectacle de magie. Nous observons, nous nous étonnons, nous n'en croyons pas nos yeux, nous réfléchissons, et finalement nous comprenons le truc. Lorsque nous observons la nature, nous faisons souvent cette même expérience. C'est pourquoi chaque page propose au moins une surprise ou une provocation qui mettra la sagacité du lecteur à l'épreuve. Un grand nombre de défis intéressants sont proposés.

La devise de ce texte, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, une phrase célèbre sur la pédagogie due à Hartmut von Hentig, se traduit ainsi : « Fortifier les hommes, clarifier les choses ». Clarifier les choses nécessite du courage, puisque changer les habitudes de pensée engendre la peur, souvent masquée par la colère. Mais en surpassant nos peurs

* « D'abord émouvoir, ensuite enseigner ». Dans les langues modernes, ce type mentionné de *mouvement* (celui du cœur) est souvent appelé *motivation* : ces deux termes sont issus de la même racine latine.

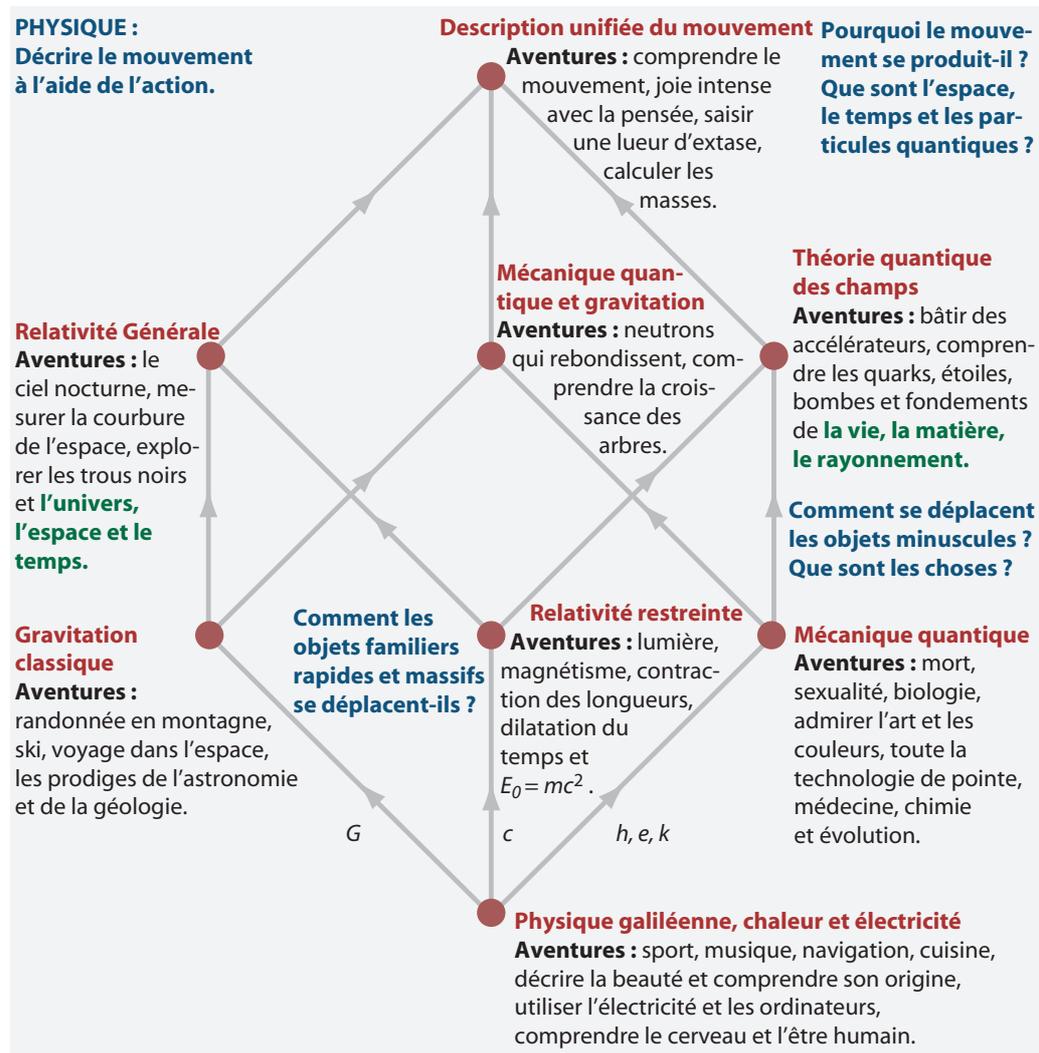


FIGURE 1 Une carte complète de la physique : les connexions sont définies par la vitesse de la lumière c , la constante de la gravitation G , la constante de Planck h , la constante de Boltzmann k et la charge élémentaire e .

nous gagnons en force. Nous ressentons alors des émotions intenses et enivrantes. Toutes les grandes aventures de la vie – et explorer le mouvement en est une – mènent à cela.

Munich, 10 Janvier 2009.

REMERCIEMENT

Je remercie Benoît Clénet pour sa traduction de ce volume. Sa patience, son énergie et son professionnalisme sont exemplaires.

CONSEIL AU LECTEUR

D'après mon expérience d'enseignant, je connais une méthode d'apprentissage qui est toujours parvenue à transformer des élèves en échec en élèves gagnants : si vous lisez un livre pour l'étudier, résumez chaque section que vous lisez, *dans vos propres termes, à voix haute*. Si vous n'y arrivez pas, lisez la section une nouvelle fois. Recommencez jusqu'à ce que vous puissiez résumer clairement ce que vous avez lu avec vos propres mots, à voix haute. Vous pouvez le faire tout seul dans votre chambre, ou avec des amis, ou tout en marchant. Si vous faites cela avec tout ce que vous lisez, vous réduirez votre temps d'apprentissage et de lecture de manière significative. De surcroît, vous prendrez beaucoup plus de plaisir à apprendre avec des bons ouvrages et détesterez nettement moins les mauvais manuels. Les prodiges de cette méthode peuvent même l'utiliser tout en écoutant un cours, à voix basse, évitant ainsi de prendre constamment des notes.

COMMENT UTILISER CE LIVRE ?

Le texte en vert, que l'on trouve dans un grand nombre de notes en marge, signale un lien sur lequel on peut cliquer dans un lecteur pdf. Ces liens en vert sont soit des références bibliographiques, des notes de bas de page, des références croisées vers d'autres pages, des solutions aux défis ou des pointeurs vers des sites Web.

Les indices et solutions des *défis* sont donnés dans l'annexe. Les défis sont classés ainsi : niveau recherche (r), difficile (d), niveau étudiant standard (s) et facile (e). Les défis des types r, d ou s pour lesquels aucune solution n'a encore été incorporée dans le livre sont marqués (pe).

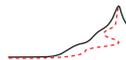
APPEL À CONTRIBUTION

Ce texte est et demeurera librement téléchargeable depuis Internet. En échange, envoyez-moi s'il vous plaît un bref courriel à fb@motionmountain.net, à propos des questions suivantes :

- Qu'est-ce qui n'était pas clair ?
- Quelle histoire, sujet, énigme, image ou film n'avez-vous pas compris ?
- Qu'est-ce qui devrait être amélioré ou corrigé ?

Défi 1 s

Vous pouvez également ajouter votre retour directement sur www.motionmountain.net/wiki. Au nom de tous les lecteurs, merci par avance pour votre collaboration. Si votre contribution est particulièrement pertinente, et si vous le souhaitez, votre nom sera mentionné dans les remerciements, ou bien vous recevrez une récompense, ou les deux. Mais par-dessus tout, très bonne lecture !



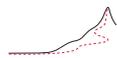


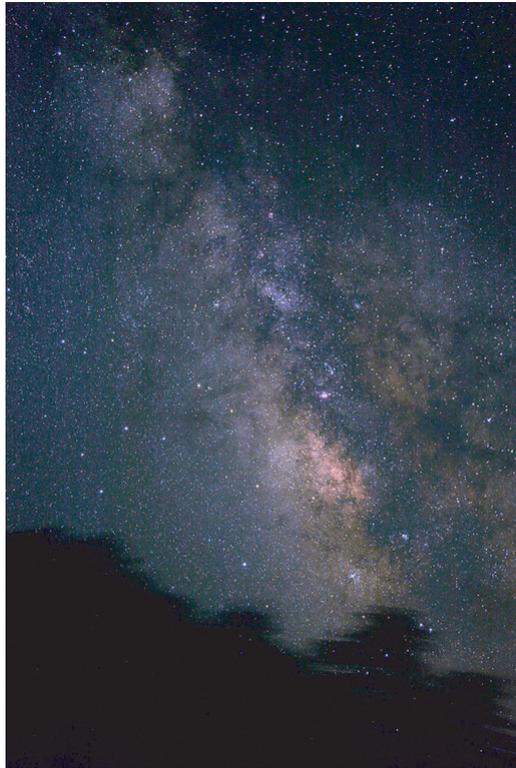
TABLE DES MATIÈRES

- 15 1 VITESSE MAXIMALE, OBSERVATEURS AU REPOS ET MOUVEMENT DE LA LUMIÈRE
- Pouvons-nous jouer au tennis en utilisant une pulsation laser en guise de balle et des miroirs comme raquettes ? 20 • La relativité restreinte en quelques lignes 24 • Accélération de la lumière et effet Doppler 26 • La différence entre la lumière et le son 29 • Pouvons-nous tirer plus vite que notre ombre ? 30 • La composition des vitesses 32 • Les observateurs et le principe de relativité restreinte 33 • Qu'est-ce que l'espace-temps ? 37 • Pouvons-nous voyager dans le passé ? – Temps et causalité 39
- 41 **Curiosités de la relativité restreinte**
- Plus vite que la lumière : jusqu'où pouvons-nous voyager ? 41 • Synchronisation et voyage dans le temps – une mère peut-elle rester plus jeune que sa propre fille ? 41 • Contraction des longueurs 44 • Images relativistes – aberration et effet Doppler 47 • Quelle est la meilleure place dans un bus ? 50 • À quelle vitesse pouvons-nous marcher ? 51 • La vitesse de l'ombre est-elle plus grande que la vitesse de la lumière ? 51 • La parallèle à une parallèle n'est pas parallèle – la rotation de Thomas 54 • Une histoire sans fin – température et relativité 55
- 56 **Mécanique relativiste**
- La masse en relativité 56 • Pourquoi le jeu du billard relativiste est plus difficile 58 • La masse est de l'énergie concentrée 59 • Collisions, objets virtuels et tachyons 62 • Systèmes de particules – absence de centre de masse 64 • Pourquoi la plupart des mouvements sont-ils si lents ? 65 • L'histoire de la formule de l'équivalence masse-énergie de De Pretto et Einstein 65 • Quadri-vecteurs 66 • Quantité de mouvement relativiste 69 • Quadriforce 71 • La rotation en relativité 71 • Mouvement ondulatoire 73 • Action d'une particule libre – comment les choses bougent-elles ? 74 • Transformations conformes – pourquoi la vitesse de la lumière est-elle constante ? 75
- 77 **Observateurs en accélération**
- Accélération pour des observateurs inertiels 79 • Référentiels accélérés 80 • Horizons des événements 84 • L'accélération modifie la couleur 86 • La lumière peut-elle aller plus vite que c ? 86 • Qu'est-ce que la vitesse de la lumière ? 87 • Limites sur la longueur des corps solides 88
- 90 **La relativité restreinte en quatre propositions**
- La vitesse de la lumière a-t-elle pu fluctuer ? 90 • Que se passe-t-il près de la vitesse de la lumière ? 91
- 92 2 RELATIVITÉ GÉNÉRALE : GRAVITATION, VITESSE MAXIMALE ET FORCE MAXIMALE
- Force maximale – toute la relativité générale dans une formule 93 • Les limites d'une force et d'une puissance maximales 94 • L'évidence expérimentale 97 • En déduire la relativité générale 98 • L'espace-temps est courbé 103 • Conditions de validité des limites de la force et de la puissance 105 • Expériences de pensée et paradoxes sur la force limite 105 • Expériences de pensée sur la puissance limite et le flux limite de masse 111 • La vérité se cache 114 • Une compréhension intuitive de la relativité générale 115 • Une perception intuitive de la cosmologie 118 • Défis expérimentaux pour le troisième millénaire 119 • Un résumé de la relativité générale 120 • Remerciements 121

- 123 3 LES IDÉES NOUVELLES SUR L'ESPACE, LE TEMPS ET LA GRAVITÉ
 Repos et chute libre 123 • Qu'est-ce que la gravité ? – Une deuxième réponse 124 •
 Ce que les marées nous enseignent à propos de la gravité 128 • Espace courbe et ma-
 telas 130 • Espace-temps courbe 132 • La vitesse de la lumière et la constante gra-
 vitationnelle 134 • Pourquoi une pierre jetée en l'air retombe-t-elle sur la Terre ? –
 Les géodésiques 136 • La lumière peut-elle tomber ? 139 • Curiosités et défis amu-
 sants sur la gravitation 140 • Qu'est-ce que le poids ? 145 • Pourquoi les pommes
 tombent-elles ? 146
- 148 4 MOUVEMENT EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE – LUMIÈRE COURBÉE ET FLUC-
 TUATION DU VIDE
- 148 Champs faibles
 Les effets Thirring 149 • Gravitomagnétisme 150 • Ondes gravitationnelles 154
 • Fléchissement de la lumière et des ondes radio 162 • Décalage temporel 164
 • Conséquences sur les orbites 164 • L'effet géodésique 167 • Curiosités et défis
 amusants sur les champs faibles 168
- 169 Comment la courbure est-elle mesurée ?
 Courbure et espace-temps 173 • Courbure et mouvement en relativité générale 175
 • Gravitation universelle 176 • La métrique de Schwarzschild 177 • Curiosités et
 défis amusants sur la courbure 177
- 178 Universalité des observateurs – Mathématiques plus profondes
 La courbure de l'espace-temps 178 • La description de la quantité de mouvement,
 de la masse et de l'énergie 179 • Action de Hilbert – Comment les choses tombent-
 elles ? 181 • Les symétries de la relativité générale 182 • Équations du champ d'Ein-
 stein 183 • Supplément sur la force limite 186 • Retrouver la gravitation univer-
 selle 187 • Retrouver la relativité générale linéarisée 187 • Comment calculer la
 forme des géodésiques 188 • La masse en relativité générale 190 • La gravité est-
 elle une interaction ? 190 • L'essence de la relativité générale 192 • Gymnastique
 de Riemann 192 • Curiosités et défis amusants sur la relativité générale 195
- 196 5 POURQUOI POUVONS-NOUS CONTEMPLER LES ÉTOILES ? – LE MOUVEMENT
 DANS L'UNIVERS
 Quelles étoiles pouvons-nous admirer ? 196 • Que voyons-nous la nuit ? 199 •
 Qu'est-ce que l'Univers ? 204 • La couleur et le mouvement des étoiles 205 • Les
 étoiles brillent-elles toutes les nuits ? 208 • Une brève histoire de l'Univers 210
 • L'histoire de l'espace-temps 214 • Pourquoi le ciel est-il noir la nuit ? 219 •
 L'Univers est-il ouvert, fermé ou situé entre les deux ? 221 • Pourquoi l'Univers
 est-il transparent ? 223 • Le Big Bang et ses répercussions 223 • Le Big Bang fut-il
 un Big Bang ? 224 • Le Big Bang fut-il un événement ? 224 • Le Big Bang fut-il un
 commencement ? 225 • Le Big Bang implique-t-il une création ? 226 • Pourquoi
 pouvons-nous voir le Soleil ? 226 • Pourquoi les couleurs des étoiles sont-elles diffé-
 rentes ? 228 • Existe-t-il des étoiles sombres ? 229 • Toutes les étoiles sont-elles dif-
 férentes ? – Lentilles gravitationnelles 230 • Quelle est la forme de l'Univers ? 232
 • Qu'y a-t-il derrière l'horizon ? 233 • Pourquoi y a-t-il des étoiles dans tous les
 recoins du ciel ? – L'inflation 233 • Pourquoi y a-t-il si peu d'étoiles ? – Le contenu
 en énergie et en entropie de l'Univers 234 • Pourquoi la matière est-elle amassée
 en grumeaux ? 235 • Pourquoi les étoiles sont-elles si petites par rapport à l'Uni-
 vers ? 236 • Les étoiles et les galaxies sont-elles en train de s'éloigner les unes des
 autres ou est-ce l'Univers qui se dilate ? 236 • Y a-t-il plus d'un Univers ? 236 •
 Pourquoi les étoiles sont-elles figées ? – Bras, étoiles et principe de Mach 236 • Au

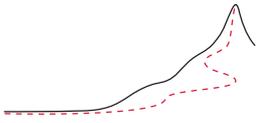
- repos dans l'Univers 238 • La lumière attire-t-elle la lumière ? 239 • La lumière se désintègre-t-elle ? 239
- 241 6 TROUS NOIRS – L'ÉTERNELLE CHUTE
 Pourquoi étudier les trous noirs ? 241 • Horizons 241 • Orbites 245 • Entropie et cheveux 247 • Les trous noirs comme sources d'énergie 249 • Curiosités et défis amusants concernant les trous noirs 251 • La genèse et la quête des trous noirs 254 • Singularités 256 • Un petit quiz : l'Univers est-il un trou noir ? 257
- 258 7 L'ESPACE DIFFÈRE-T-IL DU TEMPS ?
 L'espace et le temps peuvent-ils être mesurés ? 260 • L'espace et le temps sont-ils indispensables ? 261 • Les courbes fermées de genre temps existent-elles ? 261 • La relativité générale est-elle locale ? – L'argument du trou 262 • La Terre est-elle creuse ? 263 • L'espace, le temps et la masse sont-ils indépendants ? 264
- 266 8 LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE EN DIX POINTS – UN RÉSUMÉ POUR LE PROFANE
 La précision de cette description 267 • Recherches en relativité générale et en cosmologie 269 • Se pourrait-il que la relativité générale soit différente ? 270 • Les limites de la relativité générale 272
- 274 A UNITÉS, MESURES ET CONSTANTES
 Unités naturelles de Planck 277 • Autres systèmes d'unités 279 • Curiosités et défis amusants sur les unités 280 • Précision et exactitude des mesures 286 • Constantes physiques fondamentales 287 • Nombres utiles 292
- 294 BIBLIOGRAPHIE
- 320 INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS
- 329 CRÉDITS
 Remerciements 329 • Crédits photographiques 330





LA RELATIVITÉ

Dans notre apprentissage du mouvement des objets, l'aventure de la randonnée et d'autres expériences nous conduisent à découvrir qu'il y a une vitesse maximale dans la nature, et que deux événements qui se produisent en même temps pour un observateur peuvent ne pas l'être pour un autre. Nous découvrons que l'espace vide peut se courber, vibrer et s'agiter, nous constatons qu'il existe une force maximale dans la nature, et nous comprenons pourquoi nous pouvons contempler les étoiles.



CHAPITRE 1

VITESSE MAXIMALE, OBSERVATEURS AU REPOS ET MOUVEMENT DE LA LUMIÈRE

« Fama nihil est celerius* »

Page 274

LA LUMIÈRE est indispensable pour une description précise du mouvement. Une ligne ou une trajectoire donnée d'un mouvement est-elle droite ? Pour le savoir, nous devons l'inspecter sur toute sa longueur. En d'autres termes, nous faisons usage de la lumière pour définir la rectitude. Comment pouvons-nous décider qu'une surface est plane ? Nous l'inspectons sous tous les angles**, encore une fois en utilisant la lumière. Comment observons-nous le mouvement ? À l'aide de la lumière. Comment mesurons-nous une longueur avec une très grande précision ? Avec la lumière. Comment mesurons-nous le temps avec une très grande précision ? Avec la lumière : autrefois c'était la lumière du Soleil qui était utilisée, de nos jours c'est la lumière des atomes de césium.

La lumière est primordiale parce qu'elle représente l'étalon de mesure pour le *mouvement non perturbé*. La physique aurait évolué beaucoup plus rapidement si, à une certaine époque reculée, la propagation de la lumière avait été reconnue comme étant l'exemple parfait du mouvement.

Mais la lumière est-elle réellement un phénomène lié au mouvement ? Ce problème était déjà soulevé dans la Grèce antique, à partir d'une simple réalité quotidienne : l'*ombre*. Les ombres démontrent que la lumière est une entité qui se déplace, émanant d'une source lumineuse, et avançant en lignes droites***. La conclusion évidente

* « Rien n'est plus rapide que la rumeur. » Cette citation familière est une version simplifiée de la sentence de Virgile : *fama, malum qua non aliud velocius ullum*. « La renommée, de tous les maux le plus véloce. » Tiré de l'*Énéide*, livre IV, vers 173 et 174.

** Remarquez qu'observer une surface plane sous tous les angles n'est pas suffisant pour cela : une surface qu'un rayon lumineux caresse tout le temps sur toute sa longueur dans toutes les directions n'est pas nécessairement plane. Pouvez-vous en donner un exemple ? Nous avons besoin d'autres méthodes pour vérifier la planéité à l'aide de la lumière. Pouvez-vous en citer une ?

Défi 2 s

*** À chaque fois qu'une source produit des ombres, les entités émises sont appelées *rayons* ou *rayonnements*. Excepté la lumière, d'autres exemples de rayonnements furent découverts par le truchement des ombres : les *rayons infrarouges* et les *rayons ultraviolets*, qui, avec la lumière visible, émanent de la plupart des sources lumineuses, et les *rayons cathodiques*, qui s'avèrent être associés au mouvement d'une nouvelle particule, l'*électron*. Les ombres conduisirent également à la découverte des *rayons X*, qui se révélèrent être une nouvelle fois une variante de la lumière, dans le domaine des hautes fréquences. Les *rayons ionisants* furent aussi découverts via leurs ombres : ils sont constitués d'atomes ionisés en mouvement. Les trois variantes de la radioactivité, à savoir les *rayons α* (noyaux d'hélium), les *rayons β* (encore des électrons) et les *rayons γ* (rayons X de haute énergie) produisent également des ombres. Toutes ces découvertes furent réalisées entre 1890 et 1910 : ces années représentent la « période rayonnante » de la physique.

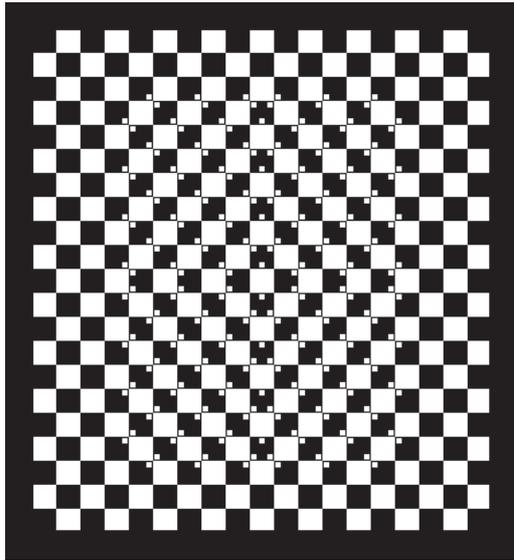


FIGURE 2 Comment vérifiez-vous si les lignes sont courbées ou droites ?

Réf. 1

que la lumière met un certain temps pour voyager de la source jusqu'à la surface où l'ombre se manifeste avait déjà été formulée par le penseur grec Empédocle (v. 490 à v. 430 AV. J.-C.).

Défi 3 s

Nous pouvons confirmer ce résultat avec un autre argument plus subtil, mais toujours simple. La vitesse peut être mesurée. Donc la *vitesse parfaite*, qui est utilisée comme étalon implicite pour les mesures, doit posséder une valeur finie. Une vitesse standard infinie ne pourrait pas du tout permettre de réaliser des mesures. Dans la nature, les entités les plus légères se déplacent avec les vitesses les plus élevées. La lumière, qui est vraiment légère*, est un candidat tout désigné pour le mouvement à vitesse parfaite mais finie. Nous allons bientôt confirmer ce point.

Une vitesse finie pour la lumière signifie que tout ce que nous voyons représente une information issue du *passé*. Quand nous contemplons les astres, le Soleil ou notre chéri(e), nous voyons toujours une image du passé. Dans un sens, la nature nous empêche de profiter de l'instant présent – nous devons par conséquent apprendre à tirer profit du passé.

Page ??

La vitesse de la lumière est élevée. C'est pour cela qu'elle ne fut pas mesurée avant 1676, bien que de nombreux savants, y compris Galilée, aient tenté en vain de le faire auparavant. La première méthode de mesure fut élaborée par l'astronome danois Ole Rømer** alors qu'il étudiait les orbites de Io et des autres satellites galiléens de Jupiter.

* L'auteur fait ici un jeu de mots : « Light, which is indeed light... », le mot *light* désigne à la fois la lumière et la légèreté. [N.D.T.]

** Ole Christensen Rømer (Aarhus 1644 – Copenhague 1710) était un astronome danois. Il fut le précepteur du Dauphin à Paris, à l'époque de Louis XIV. L'idée de la mesure de la vitesse de la lumière était due pour ainsi dire à l'astronome italien Giovanni Domenico Cassini, dont Rømer fut l'assistant. Rømer continua ses expériences de mesure jusqu'en 1681, date à laquelle il dut quitter la France, comme tous les protestants (de même que Christiaan Huygens), ainsi donc son œuvre fut interrompue. De retour au Danemark, un incendie ravagea toutes ses notes manuscrites concernant ses mesures. Par conséquent, il ne put continuer

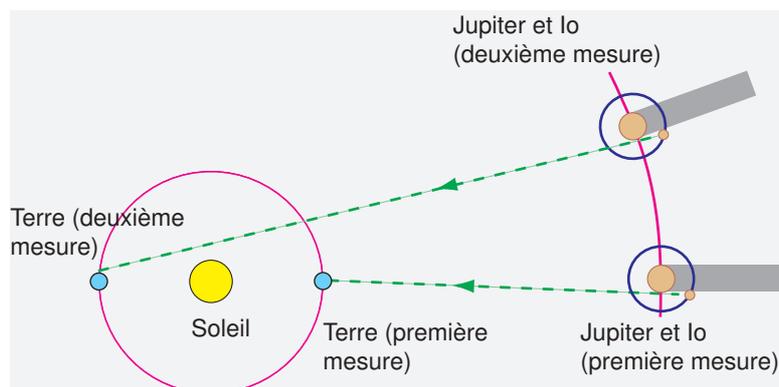


FIGURE 3 La méthode de Rømer pour mesurer la vitesse de la lumière.

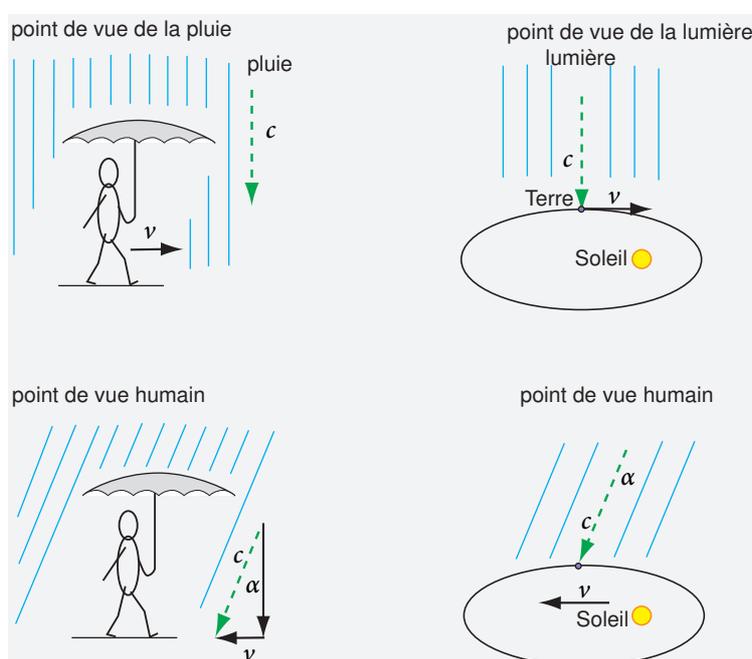


FIGURE 4 La méthode de la pluie pour mesurer la vitesse de la lumière.

Il obtint une grandeur incorrecte pour la vitesse de la lumière parce qu’il utilisait une valeur fautive pour leur distance à la Terre. Cependant, cela fut rapidement corrigé par ses pairs, notamment par Newton lui-même. Vous devriez pouvoir deviner sa méthode à partir de la Figure 3. Depuis cette époque, on savait que la lumière met un petit peu plus de 8 minutes pour voyager du Soleil à la Terre. Cela fut confirmé d’une manière élégante cinquante ans plus tard, en 1726, par l’astronome James Bradley. Étant anglais, Bradley songea à utiliser la « méthode de la pluie » pour évaluer la vitesse de la lumière.

Comment pouvons-nous mesurer la vitesse de la pluie qui tombe ? Nous marchons

à améliorer la précision de sa méthode. Plus tard, il devint un important dirigeant et réformateur de l’État danois.

Défi 4 s

Page 103

Réf. 2

rapidement avec un parapluie, mesurons l'angle α sous lequel la pluie semble tomber, et enfin mesurons notre propre vitesse v . Comme indiqué sur la Figure 4, la vitesse c de la pluie est alors donnée par

$$c = v / \tan \alpha . \quad (1)$$

La même expérience peut être faite avec la lumière. Nous avons uniquement besoin de mesurer l'angle sous lequel la lumière provenant d'une étoile située au-dessus de l'orbite terrestre parvient à la Terre. Puisque la Terre est en mouvement par rapport au Soleil et donc par rapport à l'étoile, cet angle n'est pas droit. Cet effet est appelé l'*aberration* de la lumière, l'angle est plus facilement décelé en comparant les mesures réalisées à six mois d'intervalle. La valeur de cet angle est de $20,5''$, de nos jours il peut être mesuré avec une précision atteignant cinq chiffres décimaux. Sachant que la vitesse de la Terre autour du Soleil est $v = 2\pi R/T = 29,7 \text{ km/s}$, la vitesse de la lumière doit donc être $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}^*$. C'est une valeur ahurissante, particulièrement lorsqu'elle est comparée à la vitesse la plus élevée jamais atteinte par un objet conçu par l'homme, à savoir les sondes Voyager, qui traversent l'espace à $52 \text{ Mm/h} = 14 \text{ km/s}$, la croissance des enfants, environ 3 nm/s , ou la croissance des stalagmites dans les grottes, environ $0,3 \text{ pm/s}$. Nous commençons à comprendre pourquoi la mesure de la vitesse de la lumière est une science à part entière.

La première mesure *précise* de la vitesse de la lumière fut réalisée en 1849 par le physi-

* Les parapluies n'étaient pas courants en Grande-Bretagne en 1726, ils devinrent d'usage commun un peu plus tard, après avoir été introduits de Chine. La partie de l'histoire concernant le parapluie est inventée de toutes pièces. En réalité, Bradley eut son idée pendant qu'il naviguait sur la Tamise, lorsqu'il remarqua que, sur un navire en déplacement, le vent apparent avait une direction différente de celle qu'il avait sur la terre ferme. Il avait observé 50 étoiles durant de nombreuses années, particulièrement Gamma Draconis, et pendant ce temps il avait été intrigué par le *signe* de l'aberration, qui était *opposée* à l'effet qu'il était en train de vérifier, à savoir la parallaxe stellaire. Toutes deux, la parallaxe et l'aberration pour une étoile située au-dessus de l'écliptique, lui font décrire une petite ellipse au cours d'une année terrestre, bien que les sens de rotation soient différents. Pouvez-vous deviner pourquoi ?

Défi 5 s

Par ailleurs, il découle de la relativité restreinte que la formule (1) est fautive, et que la formule exacte est

Défi 6 s

$c = v / \sin \alpha$: pouvez-vous voir pourquoi ?
Pour déterminer la vitesse de la Terre, nous devons d'abord préciser sa distance au Soleil. La méthode la plus simple est celle due au penseur grec Aristarque de Samos (v. 310 à v. 230 av. J.-C.). Nous mesurons l'angle entre la Lune et le Soleil à l'instant où la Lune est exactement à son premier ou dernier quartier. Le cosinus de cet angle fournit le rapport entre la distance à la Lune (déterminée, par exemple, par la méthode de la page 121) et la distance au Soleil. L'explication est laissée en exercice au lecteur.

Défi 7 s

Réf. 3

L'angle en question est presque un angle droit (lequel produirait une valeur infinie pour la distance), et des instruments fiables sont nécessaires pour le mesurer avec précision, comme Hipparque l'avait remarqué dans une ample discussion sur ce problème autour de 130 av. J.-C. La mesure précise de l'angle ne devint réalisable qu'à la fin du dix-septième siècle, lorsqu'il fut établi qu'il valait $89,86^\circ$, fournissant un rapport de distance d'environ 400. Aujourd'hui, grâce aux mesures radar des planètes, la distance au Soleil est connue avec une précision invraisemblable de 30 mètres. Les variations de la distance de la Lune peuvent même être mesurées au centimètre près. Pouvez-vous deviner comment cela est réalisable ?

Page 289

Défi 8 s

Réf. 4

Aristarque détermina également les rayons du Soleil et de la Lune comme étant des multiples de celui de la Terre. Aristarque fut un savant exceptionnel : il fut le premier à proposer le système héliocentrique, et probablement le premier à proposer que les étoiles étaient d'autres soleils lointains. Pour ces idées, plusieurs de ses contemporains suggérèrent qu'il devait être condamné à mort pour impiété. Lorsque le moine et astronome polonais Nicolaus Copernicus (1473–1543) proposa à nouveau le système héliocentrique deux mille ans plus tard, il ne mentionna pas le nom d'Aristarque, même s'il tenait cette idée de lui.

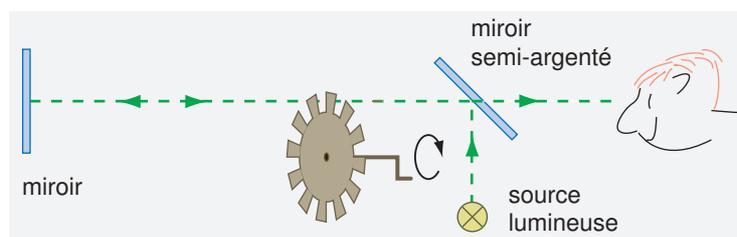


FIGURE 5 Dispositif de Fizeau permettant de mesurer la vitesse de la lumière. (© AG Didaktik und Geschichte der Physik, Universität Oldenburg)

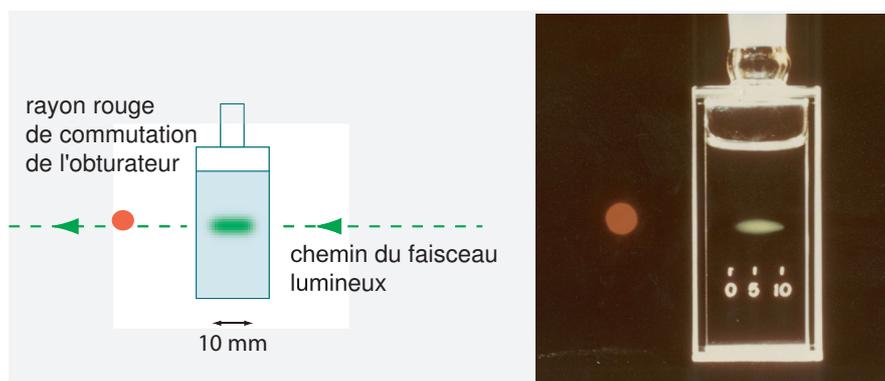


FIGURE 6 Photographie d'une pulsation lumineuse se déplaçant de la droite vers la gauche à travers une bouteille d'eau laiteuse, graduée en millimètres. (photographie © Tom Mattick)

ancien français Hippolyte Fizeau (1819–1896). Par rapport à la valeur actuelle, la sienne n'était plus grande que de 5 % seulement. Il envoya un rayon lumineux en direction d'un miroir éloigné et mesura le temps que la lumière prit pour revenir. Comment Fizeau mesura-t-il ce temps sans l'aide d'aucun appareil électrique ? En réalité, il utilisa les mêmes principes que ceux qui sont utilisés pour mesurer les vitesses des munitions, la réponse est partiellement donnée dans la Figure 5. (À quelle distance le miroir devait-il être placé ?) Une reconstitution moderne de son expérience, réalisée par Jan Frercks, a atteint une précision de 2 %. Aujourd'hui l'expérience est beaucoup plus simple ; dans le chapitre sur l'électrodynamique, nous découvrirons comment mesurer la vitesse de la lumière en utilisant deux ordinateurs de mesure, tournant sous UNIX ou Linux et reliés par un câble.

La vitesse de la lumière est si élevée qu'il est même difficile de démontrer qu'elle est finie. Peut-être que la manière la plus élégante de prouver cela est matérialisée par la photographie d'une pulsation lumineuse traversant notre champ de vision, de la même

Page 49

Défi 9 s

Réf. 5

Page 28

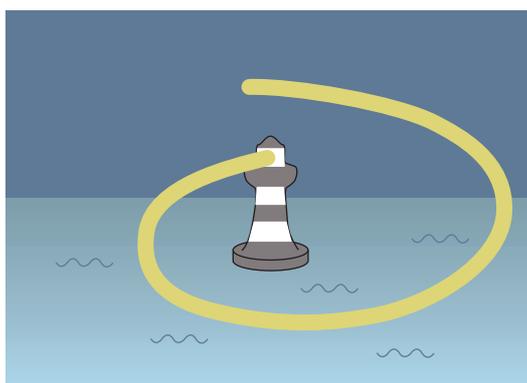


FIGURE 7 Une conséquence de la finitude de la vitesse de la lumière.

manière que nous pouvons photographier une voiture qui roule ou une balle de fusil qui traverse les airs. La **Figure 6** montre la première photographie de ce type, produite en 1971 avec un appareil photographique reflex standard du marché, un obturateur ultra-rapide conçu par les photographes et, plus remarquablement, sans une seule pièce d'équipement électronique. (Quelle est la rapidité qu'un tel obturateur doit avoir ? Comment pourriez-vous construire un tel obturateur ? Et comment pourriez-vous vous assurer qu'il s'ouvre bien au bon instant ?)

Réf. 6

Défi 10 s

Une vitesse finie pour la lumière implique aussi qu'un faisceau lumineux en rotation rapide se comporte comme indiqué sur la **Figure 7**. Dans la vie quotidienne, la vitesse élevée de la lumière et la rotation lente des phares rendent cet effet difficilement perceptible.

Défi 11 s

En résumé, la lumière se déplace extrêmement rapidement. Elle est beaucoup plus rapide que l'éclair, comme vous pourriez le vérifier vous-même. Un siècle de mesures de plus en plus précises de cette vitesse a mis au jour la valeur moderne

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s.} \quad (2)$$

En fait, cette valeur est dorénavant fixée avec *exactitude*, par définition, et le mètre a été défini par rapport à c . Le **Tableau 1** donne un aperçu de ce que nous savons aujourd'hui à propos du mouvement de la lumière. Deux propriétés étonnantes furent découvertes à la fin du dix-neuvième siècle. Elles constituent les fondements de la relativité restreinte.

Réf. 7

POUVONS-NOUS JOUER AU TENNIS EN UTILISANT UNE PULSATION LASER EN GUISE DE BALLE ET DES MIROIRS COMME RAQUETTES ?

« Et nihil est celerius annis*.
Ovide, *Les Métamorphoses*. »

Nous savons tous qu'afin de lancer une pierre le plus loin possible nous devons courir au moment de la lancer. Nous savons instinctivement que dans ce cas précis la vitesse de la pierre par rapport au sol est plus élevée. Toutefois, au grand étonnement de tout

* « Rien n'est si prompt que la fuite des années. » Livre X, vers 520.

TABLEAU 1 Propriétés du mouvement de la lumière.

OBSERVATIONS SUR LA LUMIÈRE

La lumière peut se déplacer dans le vide.
 La lumière transporte de l'énergie.
 La lumière possède une quantité de mouvement : elle peut frapper des corps.
 La lumière possède un moment cinétique : elle peut tourner autour des corps.
 La lumière traverse de la lumière sans perturbation.
 La lumière dans le vide se déplace toujours plus vite que n'importe quel corps matériel.
 La vitesse de la lumière, sa véritable vitesse de signal, est la vitesse précurseur. [Page 104](#)
 Dans le vide, sa valeur est de 299 792 458 m/s.
 La vitesse propre de la lumière est infinie. [Page 41](#)
 Les ombres peuvent se déplacer sans restriction sur leur vitesse.
 La lumière se déplace en ligne droite lorsqu'elle se trouve loin de la matière.
 La lumière de forte intensité est une onde.
 Les rayons lumineux ne sont que des approximations lorsqu'on néglige la longueur d'onde.
 Dans la matière, la vitesse de signal et la vitesse de l'énergie de la lumière sont inférieures à celle dans le vide.
 Dans la matière, la vitesse de groupe des pulsations lumineuses peut être nulle, positive, négative ou infinie.

le monde, les expériences montrent que la lumière émise par une ampoule en mouvement possède la même vitesse que celle émise par une ampoule au repos. La lumière n'est jamais plus rapide que la lumière (dans le vide), tous les rayons lumineux possèdent la même vitesse. Nombre d'expériences spécialement conçues ont confirmé ce résultat avec une grande précision. La vitesse de la lumière peut être mesurée avec une précision meilleure que 1 m/s, malgré tout, pour des vitesses d'ampoules supérieures à 290 000 000 m/s, aucune différence n'a été relevée. (Pouvez-vous deviner quelles ampoules étaient utilisées ?)

Réf. 8

Défi 12 s

Dans la vie courante, nous savons qu'une pierre arrive plus rapidement si nous courons vers elle. À nouveau, pour la lumière aucune différence n'a été mesurée. Toutes les expériences montrent que la célérité de la lumière possède la *même valeur* pour tous les observateurs, même s'ils se déplacent les uns par rapport aux autres ou par rapport à la source lumineuse. La vitesse de la lumière est de ce fait la norme parfaite et idéale pour la mesure*.

Page 80

* Une autre expression équivalente pour la vitesse de la lumière est la « vitesse radar » ou la « vitesse radio », nous verrons ci-dessous pourquoi elles s'appliquent également.

De même, la vitesse de la lumière n'est pas très éloignée de celle des neutrinos. La démonstration la plus spectaculaire en fut faite par l'observation d'une supernova en 1987, lorsque le flash lumineux et la bouffée de neutrinos arrivèrent à 12 secondes d'intervalle l'un de l'autre. (Nous ne savons pas si l'écart est dû à des vitesses différentes ou à un point de départ différent, concernant les deux flashes.) Quel est le premier chiffre pour lequel les deux valeurs de vitesses pourraient différer, sachant que la supernova était située à $1,7 \cdot 10^5$ années-lumière ?

Défi 13 s

Réf. 9

Des expériences montrent également que la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions de l'espace, jusqu'à au moins 21 chiffres dans la précision. D'autres données, prises lors de sursauts de rayons



FIGURE 8 Albert Einstein.

Réf. 11 Il existe un deuxième ensemble de pièces à conviction expérimentales pour la
 Page 40 constance de la vitesse de la lumière. Chaque appareil électromagnétique, telle une brosse
 à dents électrique, montre que la vitesse de la lumière est constante. Nous découvrirons
 que les champs magnétiques ne pourraient être issus de courants électriques, comme ils
 le font chaque jour dans n'importe quel moteur et dans n'importe quel haut-parleur, si la
 vitesse de la lumière n'était pas constante. C'est effectivement de cette manière que cette
 constance fut déduite pour la première fois, par plusieurs chercheurs. Ce n'est qu'après
 avoir compris cela que le physicien suisse et allemand Albert Einstein* montra que cette
 constance est également en accord avec le mouvement des corps, comme nous le verrons
 dans cette section. La correspondance entre les brosses à dents électriques et la relativité
 Page 40 sera décrite dans le chapitre sur l'électrodynamique. (Pour plus d'informations sur les
 conséquences directes de la relativité sur la conception des machines, lisez l'ouvrage inté-
 Réf. 13 ressant de van Bladel.) En termes simples, si la vitesse de la lumière n'était pas constante,
 des observateurs seraient capables de se déplacer à cette vitesse. Puisque la lumière est

gamma, montrent que la vitesse de la lumière est indépendante de la fréquence, jusqu'à au moins 20 chiffres
 Réf. 10 dans la précision.

* Albert Einstein (n. Ulm 1879, d. Princeton 1955) fut un des plus grands physiciens ayant existé. Il publia
 trois articles fondamentaux en 1905, un concernant le mouvement brownien, un autre sur la relativité res-
 treinte, et un à propos du concept de quanta de lumière. Chaque article était digne d'un prix Nobel, mais
 Page 65 il reçut le prix uniquement pour le dernier de ceux-ci. C'est également en 1905 qu'il démontra la formule
 célèbre $E_0 = mc^2$ (publiée au début de 1906), probablement stimulé par une idée de Olinto De Pretto.
 Bien qu'Einstein fût un des fondateurs de la théorie quantique, il se retourna plus tard contre celle-ci. Sa
 célèbre discussion avec son ami Niels Bohr a néanmoins permis d'éclaircir ce domaine dans ses aspects les
 plus déroutants. Il expliqua l'effet Einstein-de Haas qui démontrait que le magnétisme est dû à des mouve-
 ments à l'intérieur des matériaux. En 1915 et 1916, il publia son plus important accomplissement : la théorie
 générale de la relativité, une des réalisations les plus élégantes et extraordinaires de la science.

Étant juif et célèbre, Einstein constituait une cible favorite pour les attaques et la discrimination du mouve-
 ment national-socialiste (le parti nazi [N.D.T.]), et il émigra aux États-Unis en 1933. Il ne fut pas seulement
 Réf. 12 un grand physicien, mais également un grand intellectuel; son recueil de réflexions concernant des sujets
 extérieurs à la physique vaut la peine d'être lu.

Toute personne intéressée pour suivre les pas d'Einstein devrait savoir qu'il publia de nombreux articles,
 et que plusieurs d'entre eux étaient erronés. Il voulut alors corriger ses résultats dans des articles postérieurs,
 et il commit encore une fois des erreurs dans ceux-ci. Cela se produisit si fréquemment qu'il se tourna lui-
 même en dérision à ce propos. Einstein formula sa célèbre définition d'un génie comme étant une personne
 qui fait le plus grand nombre possible d'erreurs dans le temps le plus court possible.

une onde, de tels observateurs pourraient observer une onde à l'arrêt. Cependant, l'électromagnétisme interdit de telles possibilités. Par conséquent, les observateurs ne peuvent pas atteindre la vitesse de la lumière.

En résumé, la vitesse v de n'importe quel système physique dans la nature (c'est-à-dire n'importe quelle masse ou énergie localisée) est limitée par

$$v \leq c. \quad (3)$$

Cette relation est à la base de la relativité restreinte. En réalité, la théorie complète de la relativité restreinte est contenue en elle. Einstein regrettait souvent que cette théorie fût baptisée « Relativitätstheorie » ou « théorie de la relativité », il aurait préféré le nom de « Invarianztheorie » ou « théorie de l'invariance », mais ne parvint pas à modifier l'appellation.

Réf. 14

La constance de la vitesse de la lumière est en parfaite contradiction avec la mécanique galiléenne, et prouve que cette dernière est *fausse* aux vitesses élevées. À basse vitesse cette description demeure correcte, parce que l'erreur est imperceptible. Mais si nous désirons une description valide pour *toutes* les vitesses, nous devons mettre de côté la mécanique galiléenne. Par exemple, lorsque nous jouons au tennis, nous tirons profit du fait qu'en frappant la balle de la bonne façon nous pouvons augmenter ou diminuer sa vitesse. Mais avec la lumière c'est impossible. Même si nous prenons un avion et poursuivons un rayon lumineux, celui-ci s'éloignera toujours de nous avec la même vitesse. La lumière ne se comporte pas comme les véhicules. Si nous accélérons un autobus que nous sommes en train de conduire, les voitures de l'autre côté de la route passent avec des vitesses de plus en plus élevées. Pour la lumière, il n'en est *pas* ainsi : elle nous frôle toujours avec la *même* vitesse*.

Pourquoi ce résultat paraît-il presque incroyable, alors que les mesures le démontrent sans ambiguïté ? Prenez deux observateurs O et Ω (prononcez « oméga ») se déplaçant avec une vitesse relative v , comme deux voitures sur des voies opposées dans la rue. Imaginez qu'à l'instant où ils passent l'un près de l'autre, un flash lumineux est émis par une ampoule en O. Ce flash lumineux se déplace le long des positions $x(t)$ pour O et le long des positions $\xi(\tau)$ (prononcez « xi de tau ») pour Ω . Puisque la vitesse de la lumière est la même pour tous les deux, nous avons

$$\frac{x}{t} = c = \frac{\xi}{\tau}. \quad (4)$$

Cependant, dans la situation décrite, nous avons évidemment $x \neq \xi$. En d'autres termes, la constance de la vitesse de la lumière implique que $t \neq \tau$, c'est-à-dire que *le temps est différent pour des observateurs se déplaçant relativement l'un par rapport à l'autre*. Le temps n'est donc pas unique. Ce résultat déconcertant, qui a été confirmé expérimentalement à de nombreuses reprises, fut formulé clairement pour la première fois en 1905 par Albert Einstein. Bien que beaucoup de personnes aient eu connaissance de l'invariance de c , seul le jeune Einstein eut l'audace d'affirmer que le temps est dépendant de

Défi 14 e

Réf. 15

Réf. 9

* En réalité, même avec la précision actuelle des mesures de $2 \cdot 10^{-13}$, nous ne pouvons discerner une quelconque variation de la vitesse de la lumière avec la vitesse de l'observateur.

l'observateur, et d'en affronter les conséquences. Faisons-en autant.

Réf. 11 Déjà en 1895, le débat sur le point de vue concernant cette invariance avait été baptisé *théorie de la relativité* par Henri Poincaré*. Einstein dénomma la description du mouvement sans la gravitation la théorie de la *relativité restreinte*, et la description du mouvement incluant la gravitation, la théorie de la *relativité générale*. Ces deux domaines sont pleins de résultats fascinants qui défient l'intuition. En particulier, ils montrent que la physique galiléenne, qui est valable dans la vie quotidienne, est fautive aux vitesses élevées.

Réf. 18, Réf. 19 La vitesse de la lumière est une vitesse limite. Nous insistons sur le fait que nous ne parlons pas de la situation où une particule se déplace plus rapidement que la lumière *dans la matière*, mais plutôt où elle est plus lente que la vitesse de la lumière *dans le vide*. Se déplacer plus vite que la vitesse de la lumière dans la matière est possible. Si la particule est chargée, cette situation donne naissance au *rayonnement Čerenkov*. Il est l'analogue de l'onde en forme de V générée par un bateau à moteur sur la mer ou de l'onde de choc en forme de cône autour d'un avion qui brise le mur du son. Le rayonnement Čerenkov est fréquemment observé, par exemple il est la cause de la couleur bleue de l'eau dans les réacteurs nucléaires. À ce propos, la vitesse de la lumière dans la matière peut être très lente : au centre du Soleil, elle est estimée à approximativement 10 km/an seulement, et dans certains matériaux, on la mesure même en laboratoire comme étant aussi petite que 0,3 m/s. Par la suite, lorsque nous mentionnerons l'expression « vitesse de la lumière », nous voudrions sous-entendre qu'il s'agit de la vitesse de la lumière dans le vide. La vitesse de la lumière dans l'air est inférieure, d'une fraction de pourcentage seulement, à celle dans le vide, ainsi donc dans la plupart des cas la différence peut être négligée.

LA RELATIVITÉ RESTREINTE EN QUELQUES LIGNES

Réf. 20 La vitesse de la lumière est constante pour tous les observateurs. Nous pouvons ainsi, à l'aide de la **Figure 9**, déduire toutes les relations entre ce que deux observateurs distincts mesurent. Elle montre deux observateurs se déplaçant avec une vitesse constante l'un par rapport à l'autre dans l'espace-temps, où le premier d'entre eux envoie un signal lumineux vers le second, à partir duquel il est réfléchi en direction du premier. Puisque la vitesse de la lumière est constante, la lumière est le seul outil permettant de comparer les coordonnées d'espace et de temps de deux observateurs éloignés. Deux horloges éloignées (comme deux bâtons éloignés d'un mètre) ne peuvent être comparées, ou synchronisées, qu'en utilisant la lumière ou des signaux radio. Puisque la vitesse de la lumière est constante, les trajets lumineux (émis dans une direction donnée) sont parallèles dans de tels diagrammes.

Défi 15 s Une vitesse relative constante entre deux observateurs implique qu'un facteur k constant relie les coordonnées de temps des événements. (Pourquoi cette relation est-elle linéaire ?) Si un signal lumineux part à l'instant T selon l'horloge du premier observa-

* Henri Poincaré (1854–1912) fut un grand physicien et mathématicien français. Il fut un des hommes les plus prolifiques de son époque, faisant progresser la relativité, la théorie quantique et de nombreuses disciplines des mathématiques.

L'introduction la plus admirable et la plus élémentaire à la relativité reste celle donnée par Albert Einstein lui-même, par exemple dans *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, Vieweg, 1997, ou dans *The Meaning of Relativity*, Methuen, London, 1951. Il a fallu un siècle pour que des ouvrages presque aussi ma-

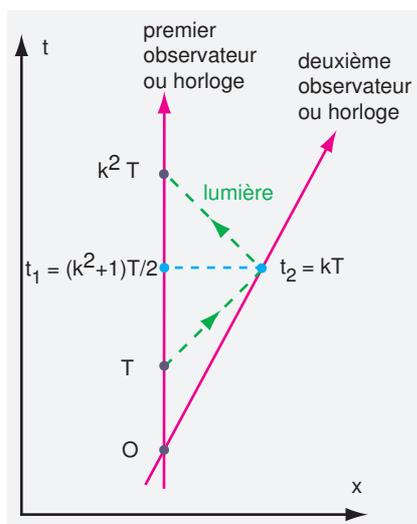


FIGURE 9 Un dessin contenant l'essentiel de la relativité restreinte.

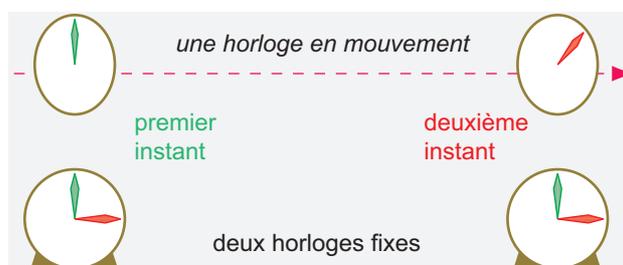


FIGURE 10 Des horloges en mouvement avancent lentement.

teur, il parvient au second à l'instant kT , et alors revient au premier au temps k^2T . Le dessin montre que

$$k = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \quad \text{ou} \quad \frac{v}{c} = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1} . \tag{5}$$

Page 26 Ce facteur apparaîtra à nouveau dans l'effet Doppler*.

La figure montre également que la coordonnée de temps t_1 attribuée par le premier observateur à l'instant auquel la lumière est réfléchie est différente de la coordonnée t_2 attribuée par le deuxième observateur. Le temps est en fait différent pour deux observateurs en mouvement relatif. La Figure 10 illustre cette conséquence.

Le *facteur de dilatation du temps* entre les deux coordonnées de temps est déduit de la Figure 9 en comparant les valeurs de t_1 et t_2 ; il est donné par

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma(v) . \tag{6}$$

Réf. 16, Réf. 17 gnifiques paraissent, tel que celui de Taylor et Wheeler.

* L'explication de la relativité qui utilise ce facteur k est souvent appelée le *k-calculus*.

Défi 17 e Les intervalles de temps pour un observateur en mouvement sont *raccourcis* de ce facteur γ , le facteur de dilatation du temps est toujours plus grand que 1. Dit autrement, *les horloges en mouvement avancent plus lentement*. Pour les vitesses de la vie courante l'effet est imperceptible. C'est pourquoi nous ne décelons pas d'écarts de durées dans la vie quotidienne. Néanmoins, la physique galiléenne n'est pas correcte pour des vitesses proches de celle de la lumière. Le même facteur γ apparaît aussi dans la formule $E = \gamma mc^2$, que nous déduirons ci-dessous. L'expression (5) ou (6) représente le seul bagage mathématique nécessaire en relativité restreinte : tous les autres résultats en dérivent.

Si un signal lumineux est envoyé à partir du second observateur et est réfléchi, celui-ci formulera la même conclusion : pour lui, la première horloge se déplace, et, toujours pour lui, l'horloge en mouvement avance plus lentement. *Chacun des observateurs remarque que l'autre horloge avance plus lentement*. La situation est semblable à celle de deux hommes comparant le nombre d'échelons entre deux échelles identiques qui ne sont pas parallèles. Un homme sur l'une des échelles observera toujours que les échelons de l'autre échelle sont plus courts. Pour emprunter une autre analogie, prenez deux individus s'éloignant l'un de l'autre : chacun d'entre eux remarque que l'autre devient de plus en plus petit au fur et à mesure que la distance augmente.

Naturellement, beaucoup de gens ont tenté de trouver des arguments pour contourner cette étrange conséquence qui veut que le temps soit différent d'un observateur à l'autre. Mais personne n'a réussi, et les résultats expérimentaux confirment cette conclusion. Jetons un œil sur certains d'entre eux.

ACCÉLÉRATION DE LA LUMIÈRE ET EFFET DOPPLER

Page 86 La lumière *peut* être accélérée. N'importe quel miroir réalise cela ! Nous verrons dans le chapitre sur l'électromagnétisme que la matière a aussi le pouvoir de *courber* la lumière, et donc de l'accélérer. Toutefois, il ressortira que toutes ces méthodes modifient uniquement la *direction* de propagation, aucune d'entre elles ne possède l'aptitude à modifier la *vitesse* de la lumière dans le vide. En résumé, la lumière est un exemple d'un mouvement qui ne peut pas être stoppé. Il existe seulement quelques autres exemples. Pouvez-vous en citer un ?

Défi 18 s Que se passerait-il si nous pouvions accélérer la lumière à des vitesses plus importantes ? Pour que cela soit possible, la lumière devrait être constituée de particules ayant une masse non nulle. Les physiciens nomment de telles particules des particules *massives*. Si la lumière avait une masse, il serait nécessaire de distinguer la « vitesse de l'énergie sans masse » c de la vitesse de la lumière c_L , qui serait plus petite et qui dépendrait de l'énergie cinétique de ces particules massives. La vitesse de la lumière ne serait pas constante, mais la vitesse de l'énergie sans masse le serait toujours. Les particules massives de lumière pourraient être capturées, immobilisées et stockées dans une boîte. De telles boîtes rendraient l'éclairage électrique inutile, elles seraient suffisantes pour emmagasiner une certaine quantité de lumière du jour à l'intérieur et pour la relâcher, lentement, pendant la nuit suivante, peut-être après lui avoir communiqué une impulsion pour l'accélérer*.

* A ce propos, la lumière massive aurait également des modes de polarisation *longitudinale*. C'est en contradiction avec les observations, qui démontrent que la lumière est polarisée exclusivement *transversalement* à la direction de propagation.

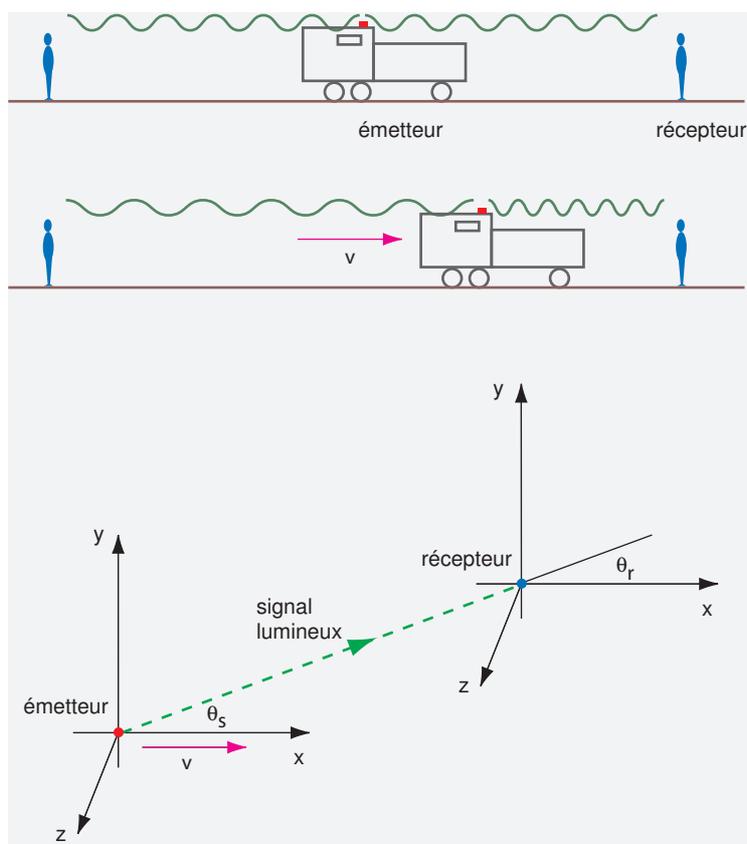


FIGURE 11 Le dispositif permettant l'observation de l'effet Doppler.

Réf. 21, Réf. 22

Les physiciens ont testé l'éventualité de l'existence de la lumière massive avec suffisamment de précision. Les observations délimitent maintenant toute (particule de) lumière massive possible à moins de $1,3 \cdot 10^{-52}$ kg à partir des expériences réalisées sur Terre, et à moins de $4 \cdot 10^{-62}$ kg à partir d'arguments astrophysiques (lesquels sont un brin moins solides). En d'autres termes, la lumière n'a pas de poids, la lumière reste la lumière.

Mais que se passe-t-il lorsque de la lumière frappe un miroir *en mouvement*? Si la vitesse de la lumière ne varie pas, quelque chose d'autre doit le faire. Cette situation est semblable à celle d'une source lumineuse en mouvement par rapport au récepteur : celui-ci observera une *couleur différente* de celle observée par l'émetteur. C'est l'*effet Doppler*. Christian Doppler* fut le premier à étudier le décalage en fréquence dans le cas des ondes sonores – le changement bien connu dans la tonalité du sifflement entre des trains s'approchant et s'éloignant – et à extrapoler ce concept au cas des ondes lumineuses. Comme nous le verrons plus tard, la lumière est (aussi) une onde, et sa couleur est déterminée par sa fréquence ou, de manière équivalente, par sa longueur d'onde λ . Comme la tonalité

* Christian Andreas Doppler (n. Salzbourg 1803, d. Venise 1853) était un physicien autrichien. Doppler étudia l'effet qui porte son nom pour le son et la lumière. En 1842, il prédit (correctement) qu'un jour nous serions capables de tirer profit de cet effet pour mesurer le mouvement des astres éloignés en observant leurs couleurs.

qui change pour des trains en mouvement, Doppler comprit qu'une source lumineuse en mouvement entraîne que la couleur qui est perçue par le récepteur est différente de la couleur émise à la source. Un raisonnement géométrique élémentaire, et la conservation du nombre de maxima et minima, conduit au résultat

Défi 19 e

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_s} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta_r\right) = \gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta_r\right). \quad (7)$$

Dans cette expression, les variables v et θ_r sont définies sur la Figure 11. La lumière d'une source qui s'approche est ainsi décalée vers le bleu, tandis que celle d'une source qui s'éloigne est décalée vers le rouge. La première observation de l'effet Doppler pour la lumière fut réalisée par Johannes Stark* en 1905, en étudiant la lumière émise par des atomes en mouvement. Toutes les expériences postérieures ont confirmé le décalage en couleur calculé, dans les limites des erreurs de mesure. Les dernières vérifications ont trouvé un accord à deux parties près par million. Au contraire des ondes sonores, un changement de couleur est également relevé lorsque le mouvement est *transversal* par rapport au signal lumineux. Donc, une baguette jaune en mouvement rapide à travers le champ de vision aura un bord d'attaque bleu et un bord de fuite rouge avant qu'il se trouve au point le plus proche de l'observateur. Les couleurs résultent d'une combinaison du décalage Doppler longitudinal (du premier ordre) et du décalage Doppler transversal (du second ordre). À un angle particulier $\theta_{\text{non décalé}}$ les couleurs demeureront identiques. (Comment le décalage en longueur d'onde apparaîtra-t-il dans le cas purement transversal ? Quelle est l'expression de $\theta_{\text{non décalé}}$ par rapport à v ?)

Réf. 23

Défi 20 s

Le décalage de couleur est utilisé dans de nombreuses applications. Presque tous les corps solides sont des miroirs pour les ondes radio. De nombreux immeubles possèdent des portes qui s'ouvrent automatiquement quand nous nous en approchons. Un minuscule capteur situé au-dessus de la porte détecte l'arrivée d'une personne. Il le fait généralement en mesurant l'effet Doppler des ondes radio qu'il émet et qui sont réfléchies par la personne qui approche. (Nous verrons plus tard que les ondes radio et la lumière sont deux manifestations du même phénomène.) Donc les portes s'ouvrent à chaque fois que quelque chose s'avance vers elles. Le radar de la gendarmerie utilise également l'effet Doppler, cette fois pour mesurer la vitesse des véhicules**.

Page 80

L'effet Doppler permet également de mesurer la vitesse des sources lumineuses. En fait, il est communément utilisé pour évaluer la vitesse des astres lointains. Dans ces situations, le décalage Doppler est souvent caractérisé par la variable z du *décalage vers*

* Johannes Stark (1874–1957) découvrit en 1905 l'effet Doppler optique dans les rayons ionisants et, en 1913, l'éclatement et le décalage de raies spectrales dans des champs électriques, que nous appelons aujourd'hui effet Stark. Pour ces deux découvertes il reçut en 1919 le prix Nobel de physique. Il quitta sa chaire de professeur en 1922 et devint un peu plus tard un fervent nazi. En tant que membre du parti nazi à partir de 1930, il fut reconnu pour ses critiques hostiles des déclarations des autres personnes sur la nature, uniquement pour des raisons idéologiques. Il fut ensuite méprisé à juste titre par la communauté académique partout dans le monde.

Défi 21 s

** À quelle vitesse un feu de signalisation rouge apparaît-il comme étant vert ?

le rouge, définie à l'aide de la longueur d'onde λ ou de la fréquence f par

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_S}{f_R} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1. \quad (8)$$

Défi 22 s Pouvez-vous imaginer comment le nombre z est déterminé ? Les valeurs caractéristiques de z pour des sources lumineuses situées dans le ciel s'échelonnent de $-0,1$ à $3,5$, mais des valeurs plus élevées, allant jusqu'à plus de 10 , ont aussi été relevées. Pouvez-vous

Défi 23 s déterminer les vitesses correspondantes ? Pourquoi peuvent-elles être si élevées ?

En résumé, à chaque fois que nous tentons de modifier la *vitesse* de la lumière, nous ne parvenons en fait qu'à modifier sa *couleur*. C'est l'effet Doppler.

Page 139 Nous savons grâce à la physique classique que, lorsque de la lumière frôle une masse importante telle qu'une étoile, elle est déviée. Est-ce que cette déviation conduit à un

Défi 24 s décalage Doppler ?

LA DIFFÉRENCE ENTRE LA LUMIÈRE ET LE SON

L'effet Doppler pour la lumière est beaucoup plus important que l'effet Doppler pour le son. Même si l'on ne savait pas encore que la vitesse de la lumière est constante, cet effet à lui tout seul *prouverait* que le temps est différent pour des observateurs en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre. Pourquoi ? Le temps est ce que nous lisons sur notre montre. Afin de déterminer si une autre montre est synchronisée avec la nôtre, nous regardons les deux montres à la fois. En bref, nous avons besoin d'utiliser des signaux lumineux pour synchroniser des horloges. Maintenant, toute variation dans la couleur de la lumière se déplaçant d'un observateur à un autre implique nécessairement que leurs montres avancent différemment, et donc que le temps est *différent* pour chacun d'entre eux. Une autre façon de voir cela est de remarquer qu'une source lumineuse est aussi une horloge – égrenant très rapidement ses « tic-tac ». Donc si deux observateurs voient des couleurs différentes à partir de la même source, ils mesurent des nombres différents d'oscillations pour la même horloge. En d'autres termes, le temps est différent pour des observateurs se déplaçant l'un par rapport à l'autre. En réalité, l'équation (5) implique que la relativité découle pleinement de l'effet Doppler pour la lumière. (Pouvez-vous confirmer que la relation entre des fréquences dépendant de l'observateur et le temps dépendant de l'observateur n'est pas vérifiée dans le cas de l'effet Doppler pour le son ?)

Défi 25 s

Pourquoi le comportement de la lumière implique-t-il la relativité restreinte, alors que celui du son dans l'air ne le fait pas ? La réponse est que la lumière est une limite pour le mouvement de l'énergie. L'expérience montre qu'il existe des avions supersoniques, mais qu'il n'y a pas de fusées supraluminiques. En d'autres termes, la limite $v \leq c$ est valide uniquement si c représente la vitesse de la lumière, et non si c est la vitesse du son dans l'air.

Malgré tout, il existe au moins un système dans la nature pour lequel la vitesse du son est en fait une vitesse limite pour l'énergie : la vitesse du son est la vitesse limite pour le mouvement des *dislocations* dans les solides cristallins. (Nous discuterons de ce détail plus loin.) Par conséquent, la théorie de la relativité restreinte est également valide pour de telles dislocations, entraînant ainsi que la vitesse de la lumière est remplacée à chaque fois par la vitesse du son ! Les dislocations vérifient les transformations de Lorentz, mon-

Page ??

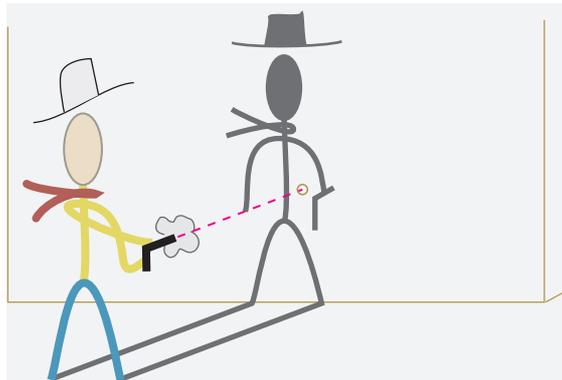


FIGURE 12 Lucky Luke.

Réf. 25 trant la contraction des longueurs et obéissant à la célèbre formule de l'énergie $E = \gamma mc^2$. Dans tous ces effets, la vitesse du son c joue le même rôle pour les dislocations que la vitesse de la lumière pour les systèmes physiques en général.

Si la relativité restreinte est fondée sur l'hypothèse que rien ne peut voyager plus vite que la lumière, alors ce postulat doit être soigneusement vérifié.

POUVONS-NOUS TIRER PLUS VITE QUE NOTRE OMBRE ?

« Quid celerius umbra ?* »

Défi 26 e Pour que Lucky Luke puisse accomplir l'exploit de la Figure 12, sa balle de revolver doit voyager plus vite que la vitesse de la lumière. (Qu'en est-il de sa main ?) Afin d'imiter Lucky Luke, nous pourrions emprunter la plus grande quantité utile d'énergie disponible, en la prélevant directement d'une centrale électrique, et accélérer les « balles » les plus légères qui puissent être manipulées, à savoir les électrons. Cette expérience est exécutée chaque jour dans des accélérateurs de particules tels que l'anneau du Large Electron Positron, le LEP, de 27 km de circonférence, situé pour partie en France et pour partie en Suisse, près de Genève. Là, 40 MW de puissance électrique (la même quantité que celle consommée par une petite ville) accélèrent des électrons et des positrons à des énergies gigantesques de 16 nJ (104,5 GeV) chacun, et leur vitesse est mesurée. Le résultat est indiqué sur la Figure 13 : même avec ces moyens impressionnants, il est impossible de faire voyager des électrons plus vite que la lumière. (Pouvez-vous imaginer une manière de mesurer l'énergie et la vitesse séparément ?) La relation vitesse-énergie de la Figure 13 est une conséquence de la vitesse maximale, et elle sera déduite plus loin. Cela, ainsi que de nombreuses observations similaires, montre donc qu'il existe une *limite* à la vitesse des objets. Des corps (et du rayonnement) ne peuvent pas se déplacer à des vitesses supérieures à la vitesse de la lumière**. L'exactitude de la mécanique galiléenne

* « Qu'est-ce qui est plus rapide que l'ombre ? » Une devise souvent rencontrée sur les cadrans solaires.

** Il y a toujours des gens qui refusent d'accepter ces résultats, de même que la théorie de la relativité qui en découle. Chaque physicien devrait prendre plaisir à participer, au moins une fois dans sa vie, à une conversation avec l'une de ces personnes. (Étrangement, aucune femme n'a été signalée comme faisant partie de ce groupe d'individus.) Cette expérience peut être faite, par exemple, sur Internet, dans le forum de discussion

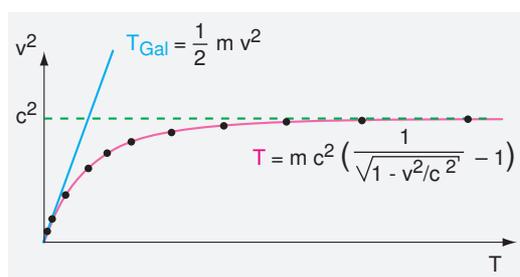


FIGURE 13 Valeurs expérimentales (points) pour la vitesse v des électrons en fonction de leur énergie cinétique T , comparée à la prédiction de la physique galiléenne (bleu) et à celle de la relativité restreinte (rouge).

fut considérée comme étant normale durant plus de trois siècles, de telle façon que personne n'avait songé à la mettre en défaut, mais lorsque ce fut finalement le cas, comme dans la Figure 13, elle se révéla fausse.

Les gens les plus frustrés par cette limite sont les ingénieurs en informatique : si la vitesse de la lumière était plus élevée, il serait possible de concevoir des microprocesseurs plus rapides et donc des ordinateurs plus puissants, ce qui permettrait, par exemple, des progrès plus rapides dans la construction d'ordinateurs qui assimilent et utilisent notre langue.

L'existence d'une vitesse limite s'oppose à la mécanique galiléenne. En réalité, elle signifie que, pour des vitesses proches de celle de la lumière, disons environ 15 000 km/s ou plus, l'expression $mv^2/2$ n'est plus égale à l'énergie cinétique T de la particule. En fait, de telles vitesses élevées sont plutôt courantes : de nombreuses familles en trouvent un exemple dans leur foyer. Calculez tout simplement la vitesse des électrons à l'intérieur d'un poste de télévision, étant donné que le transformateur électrique intégré génère 30 kV.

Défi 28 s

L'observation de la vitesse de la lumière comme une vitesse *limite* pour les objets est facilement comprise comme étant une conséquence de son *invariance*. Des corps qui peuvent être au repos dans un référentiel donné se déplacent évidemment plus lentement que la vitesse maximale (de la lumière) dans ce référentiel. Maintenant, si quelque chose se déplace plus lentement qu'autre chose, pour *un* observateur, il en sera également de même pour tous les autres observateurs. (Essayer d'imaginer un monde dans lequel cela ne serait pas le cas est intéressant : des choses amusantes se produiraient, par exemple des corps s'interpénétrant les uns les autres.) Puisque la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, aucun objet ne peut se déplacer plus vite que la lumière, pour tous les observateurs.

Défi 29 d

Nous comprenons que la vitesse maximale est la vitesse des entités *dénuées de masse*. Les ondes électromagnétiques, incluant la lumière, sont les seules entités connues qui peuvent voyager à la vitesse maximale. Les ondes gravitationnelles aussi sont présumées atteindre cette vitesse. Bien que la vitesse des neutrinos ne puisse pas être distinguée expérimentalement de la vitesse maximale, des expériences récentes suggèrent qu'ils doivent posséder une masse minuscule.

Réf. 28

Réf. 27 sci.physics.relativity. Voyez aussi le site Web <http://www.crank.net>. Ces cinclés sont des personnages fascinants, surtout parce qu'ils enseignent l'importance de la *précision* dans le langage et dans le raisonnement, ce qu'ils négligent tous, sans aucune exception. Des rencontres avec plusieurs d'entre eux ont été une source d'inspiration pour ce chapitre.

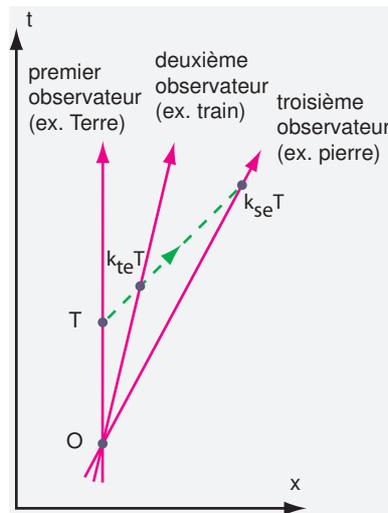


FIGURE 14 Comment déduire la composition des vitesses.

Défi 30 e
Défi 31 r

Inversement, si un phénomène existe dont la vitesse est la vitesse limite pour un observateur, alors cette vitesse limite doit nécessairement être la même pour tous les observateurs. La relation entre la propriété de vitesse limite et l'invariance selon l'observateur est-elle valide en général dans la nature ?

LA COMPOSITION DES VITESSES

Si la vitesse de la lumière est une limite, aucune tentative pour la dépasser ne peut aboutir. Cela implique que, lorsque des vitesses sont composées, comme lorsque nous jetons une pierre tout en courant, les valeurs ne peuvent pas être simplement additionnées. Si un train roule à la vitesse v_{tT} par rapport à la Terre, et que quelqu'un jette une pierre à l'intérieur de celui-ci avec une vitesse v_{pt} par rapport au train dans la même direction, il est généralement présumé comme évident que la vitesse de la pierre relativement à la Terre est donnée par $v_{pT} = v_{pt} + v_{tT}$. En réalité, le raisonnement et les mesures indiquent chacun un résultat différent.

Défi 32 e

L'existence d'une vitesse maximale, juxtaposée à la Figure 14, implique que les facteurs k doivent vérifier $k_{pT} = k_{pt}k_{tT}^*$. Alors, nous avons juste à insérer la relation (5) entre chaque facteur k et la vitesse respective, pour obtenir

$$v_{pT} = \frac{v_{pt} + v_{tT}}{1 + v_{pt}v_{tT}/c^2}. \quad (9)$$

Défi 33 e
Page 59, page 40
Réf. 22

Celle-ci est appelée *formule de la composition des vitesses*. Le résultat n'est jamais supérieur à c et est toujours inférieur à l'addition naïve des vitesses**. L'expression (9) a été confirmée par chacune des millions de situations dans lesquelles elle a été contrôlée. Vous devez vérifier qu'elle se réduit à l'addition naïve pour les valeurs de la vie quotidienne.

* En prenant le logarithme (népérien) de cette équation, nous pouvons définir une quantité, la *rapidité*, qui

LES OBSERVATEURS ET LE PRINCIPE DE RELATIVITÉ RESTREINTE

La relativité restreinte est fondée sur un principe élémentaire :

▷ *La vitesse maximale du transport de l'énergie est la même pour tous les observateurs.*

Réf. 30 Ou, comme Hendrik Lorentz* préférait le dire, par l'équivalent :

▷ *La vitesse v d'un système physique est limitée par*

$$v \leq c \quad (10)$$

pour tous les observateurs, où c est la vitesse de la lumière.

Réf. 31 Cette indépendance de la vitesse de la lumière par rapport à l'observateur fut vérifiée avec une grande précision par Michelson et Morley** en 1887 et les années suivantes.

Réf. 32 Elle a été confirmée dans toutes les expériences qui ont suivi ; la plus précise à ce jour, qui a atteint une précision de 10^{-14} , est indiquée dans la Figure 15.

Page 40 En réalité, la relativité restreinte est également confirmée par toutes les expériences de précision qui furent réalisées *avant* qu'elle ait été formulée. Vous pouvez même la vérifier chez vous. La manière de le faire est indiquée dans la section concernant l'électrodynamique.

L'existence d'une vitesse limite possède plusieurs conséquences intéressantes. Pour les explorer, laissons le reste de la physique galiléenne telle quelle***. La vitesse limite est la vitesse de la lumière. Elle est constante pour tous les observateurs. Cette invariance implique que :

mesure la vitesse et qui est additive.

Réf. 29 ** Nous pouvons également déduire les transformations de Lorentz directement de cette expression.

* Hendrik Antoon Lorentz (n. Arnhem 1853, d. Haarlem 1928) fut, avec Boltzmann et Kelvin, un des physiciens les plus importants de son époque. Il déduisit ce que l'on appelle les transformations de Lorentz et la contraction de Lorentz à partir de l'équation de Maxwell pour le champ électrodynamique. Il fut le premier à comprendre, bien avant que la théorie quantique ne confirme cette idée, que les équations de Maxwell pour le vide décrivent aussi la matière et toutes ses propriétés, à partir du moment où des particules ponctuelles chargées en mouvement – les électrons – sont incluses. Il montra cela en particulier pour la dispersion de la lumière, pour l'effet Zeeman, pour l'effet Hall et pour l'effet Faraday. Il formula la description correcte de la force de Lorentz. En 1902, il reçut le prix Nobel de physique, en association avec Pieter Zeeman. En dehors de la physique, il joua un rôle actif dans l'internationalisation des échanges scientifiques. Il contribua également à la création des structures les plus édifantes construites par l'homme sur la Terre : les polders du Zuyderzée.

** Albert Abraham Michelson (n. Strzelno 1852, d. Pasadena 1931) était un physicien prussien, polonais puis américain, il se vit décerner le prix Nobel de physique en 1907. Michelson baptisa le dispositif qu'il avait inventé un *interféromètre*, un terme toujours employé aujourd'hui. Edward William Morley (1838–1923), chimiste américain, était un ami et un collaborateur de longue date de Michelson.

Page 84 *** Ce point est essentiel. Par exemple, la physique galiléenne établit que seul le mouvement *relatif* est physique. Elle exclut également diverses manières mathématiquement possibles, pour obtenir une vitesse de la lumière constante, qui contrediraient l'expérience quotidienne.

L'article original d'Einstein de 1905 débute à partir de deux principes : la constance de la vitesse de la lumière et l'équivalence entre tous les observateurs inertiels. Ce dernier principe avait déjà été formulé en 1632 par Galilée, seule l'invariance de la vitesse de la lumière était nouvelle. Malgré ce fait, la nouvelle théorie fut baptisée – par Poincaré – d'après l'ancien principe, au lieu de l'appeler « théorie de l'invariance », comme Einstein l'aurait souhaité.

Réf. 14

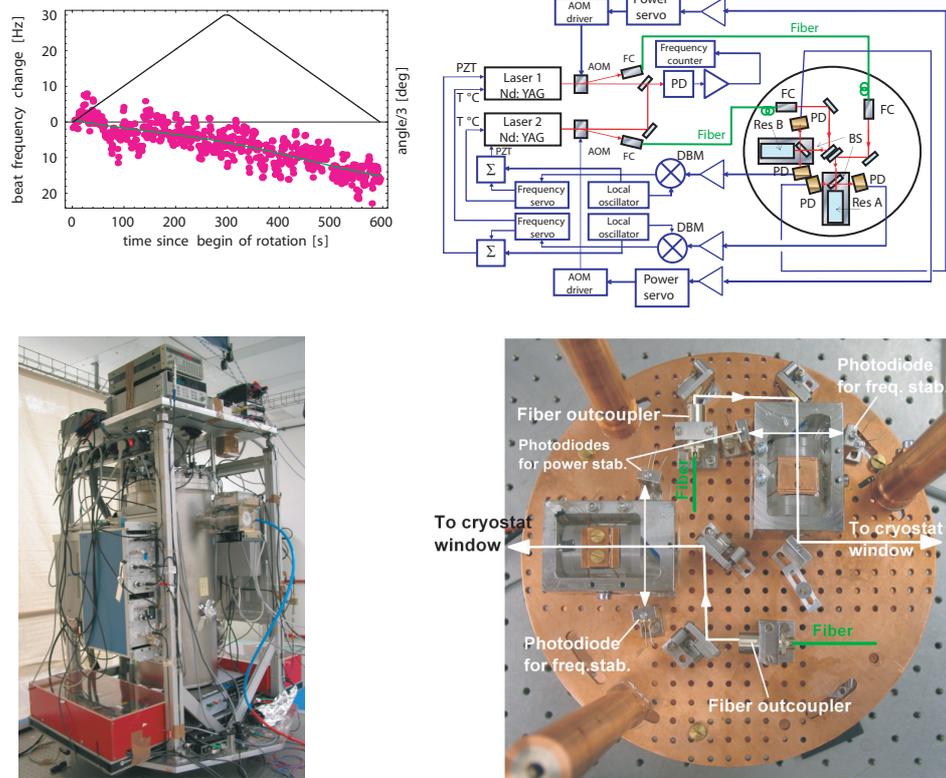


FIGURE 15 Le résultat, le schéma et l'installation du cryostat de l'expérience de Michelson-Morley la plus précise réalisée jusqu'à ce jour. (© Stephan Schiller)

- Dans une pièce fermée flottant librement dans l'espace, il n'y a aucune manière de dire quelle est la vitesse de cette pièce.
- Il n'y a aucune notion de repos (ou d'espace) absolu : le repos (comme l'espace) est un concept dépendant de l'observateur*.
- Le temps dépend de l'observateur, il n'est pas absolu.

Des conclusions plus intéressantes et plus précises peuvent être esquissées lorsque deux conditions supplémentaires sont adoptées. Premièrement, nous étudions des situations où la gravitation peut être négligée. (Si ce n'est pas le cas, nous avons besoin de la relativité *générale* pour décrire le système.) Deuxièmement, nous supposons également que les données concernant les corps étudiés – leur vitesse, leur position, etc. – peuvent être recueillies sans les perturber. (Si ce n'est pas le cas, nous avons besoin de la *théorie quantique* pour décrire le système.)

Pour déduire la manière *précise* selon laquelle les différents intervalles de temps et les longueurs mesurés par deux observateurs sont reliés entre eux, nous allons franchir une étape supplémentaire simplificatrice. Nous commencerons avec une situation dans laquelle les interactions ne jouent aucun rôle. En d'autres termes, nous allons commencer avec la *cinématique relativiste* des corps se déplaçant sans subir de perturbation.

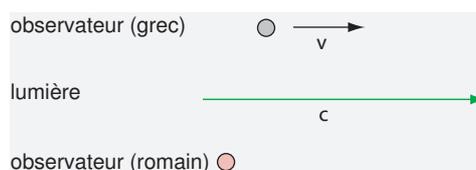


FIGURE 16 Deux observateurs inertiels et un rayon lumineux.

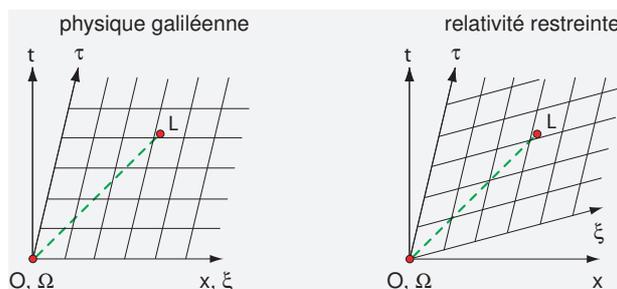


FIGURE 17 Diagrammes d'espace-temps pour la lumière vue par deux observateurs distincts utilisant les coordonnées (t, x) et (τ, ξ) .

Si quelqu'un observe un corps libre de toute influence qui voyage le long d'une ligne droite avec une vitesse constante (ou qui demeure au repos), alors nous qualifions cet observateur d'*inertiel*, et les coordonnées utilisées par celui-ci de *référentiel d'inertie*. Chaque observateur inertiel est lui-même en mouvement uniforme. Des exemples d'observateurs (ou de référentiels) inertiels incluent donc – en *deux* dimensions – ceux qui se déplacent sur une surface de glace, sans frottements, ou sur le plancher d'un train ou d'un bateau avançant uniformément. Pour un exemple complet – dans les *trois* dimensions spatiales – nous pouvons prendre celui d'un cosmonaute voyageant dans un vaisseau spatial à partir du moment où les moteurs sont éteints. Les observateurs inertiels en trois dimensions pourraient aussi être décrits comme *flottant librement*. Ils ne sont donc pas si communs. Des observateurs non inertiels sont beaucoup plus courants. Pouvez-vous le confirmer ? Les observateurs inertiels sont les observateurs les plus simples, et ils forment un ensemble particulier :

Défi 35 e

- Deux observateurs inertiels quelconques se déplacent avec une vitesse constante l'un par rapport à l'autre (tant que la gravité n'exerce aucune influence, comme supposé ci-dessus).
- Tous les observateurs inertiels sont équivalents : ils décrivent le monde avec les mêmes équations. Parce qu'elle implique l'absence d'espace et de temps absolus, cette formulation fut appelée *principe de relativité* par Henri Poincaré. Toutefois, l'*essence* de la relativité concerne l'existence d'une vitesse limite.

Pour voir comment les longueurs et les intervalles de temps mesurés varient d'un observateur à l'autre, nous choisissons deux observateurs inertiels, un Romain qui utilise des coordonnées x, y, z et t , et un Grec qui utilise des coordonnées ξ, ν, ζ et τ^* , et qui se

* Prononcez « xi », « upsilon », « zeta » et « tau ». Les désignations, correspondances et prononciations de toutes les lettres grecques sont expliquées dans l'[Annexe A](#).

déplacent avec une vitesse relative \mathbf{v} . Les axes sont choisis de telle manière que la vitesse pointe dans la direction des x . La constance de la vitesse de la lumière dans toutes les directions, pour deux observateurs quelconques, signifie que pour le mouvement de la lumière les différentielles de coordonnées sont reliées par

$$0 = (cdt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2 = (cd\tau)^2 - (d\xi)^2 - (d\eta)^2 - (d\zeta)^2. \quad (11)$$

Supposez également qu'un stroboscope au repos pour l'observateur grec, donc avec $d\xi = 0$, produise deux flashes séparés par un intervalle de temps $d\tau$. Pour l'observateur romain, le stroboscope se déplace avec une vitesse v , de telle façon que $dx = vdt$. En introduisant cela dans l'expression précédente, et en supposant que la linéarité et l'indépendance de la direction de la vitesse s'appliquent en général, nous trouvons que les intervalles sont reliés par

Défi 36 e

$$\begin{aligned} dt &= \gamma(d\tau + vd\xi/c^2) = \frac{d\tau + vd\xi/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{avec} \quad v = dx/dt \\ dx &= \gamma(d\xi + vd\tau) = \frac{d\xi + vd\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ dy &= d\eta \\ dz &= d\zeta. \end{aligned} \quad (12)$$

Ces expressions décrivent comment les longueurs et les durées mesurées par des observateurs distincts sont reliées entre elles. À des vitesses relatives v qui sont petites comparées à la vitesse de la lumière, tel que cela se produit dans la vie quotidienne, les durées sont essentiellement identiques, le *facteur de dilatation* ou *correction relativiste* ou *contraction relativiste* γ est alors ajusté à la valeur 1 dans un but pratique. En revanche, pour des vitesses *proches* de celle de la lumière les mesures des deux observateurs donnent des valeurs différentes. Dans ces cas, l'espace et le temps *s'entremêlent*, comme indiqué sur la [Figure 17](#).

Défi 37 s

Les expressions (12) sont également étranges sur un autre plan. Lorsque deux observateurs se regardent l'un et l'autre, chacun d'eux prétend mesurer des intervalles plus courts que l'autre. En d'autres mots, la relativité restreinte montre que le gazon situé de l'autre côté d'une clôture est toujours *plus court* – si nous roulons à vélo le long de la clôture et si l'herbe est inclinée. Nous allons bientôt explorer ce résultat bizarre plus en détail.

Défi 38 s

Le facteur de dilatation γ est égal à 1 pour la plupart des situations concrètes de la vie courante. La plus grande valeur que des êtres humains aient pu atteindre est environ $2 \cdot 10^5$, la plus grande valeur observée dans la nature est environ 10^{12} . Pouvez-vous imaginer où on peut les rencontrer ?

Une fois que nous savons comment les *tranches* d'espace et de temps varient, nous pouvons aisément déduire comment les *coordonnées* varient. Les figures 16 et 17 montrent que la coordonnée x d'un événement L est la somme de deux intervalles : la coordonnée

ξ et la distance entre les deux origines. En d'autres termes, nous avons

$$\xi = \gamma(x - vt) \quad \text{et} \quad v = \frac{dx}{dt}. \quad (13)$$

En utilisant l'invariance de l'intervalle d'espace-temps, nous obtenons

$$\tau = \gamma(t - xv/c^2). \quad (14)$$

Réf. 33
Page 53

Henri Poincaré appela ces deux relations les *transformations de Lorentz de l'espace et du temps* d'après leur découvreur, le physicien hollandais Hendrik Antoon Lorentz*. Dans une des découvertes les plus admirables de la physique, en 1892 et 1904, Lorentz déduisit ces relations à partir des équations de l'électrodynamique, dans lesquelles elles étaient implicitement contenues, attendant d'être découvertes, depuis 1865**. Cette année-là James Clerk Maxwell avait publié ces équations dans le but de décrire tous les phénomènes électriques et magnétiques. Toutefois, ce fut Einstein qui comprit le premier que t et τ , de même que x et ξ , sont aussi corrects l'un que l'autre et donc qu'ils sont des descriptions de l'espace et du temps aussi valides l'une que l'autre.

Les transformations de Lorentz décrivent le changement de point de vue d'un référentiel inertiel à un autre en mouvement. Ce changement de point de vue est appelé une *poussée* (de Lorentz). Les formules (13) et (14) de la poussée sont cruciales pour les deux théories de la relativité, la restreinte et la générale. En réalité, les mathématiques de la relativité restreinte ne seront pas plus difficiles que cela : si vous savez ce qu'est une racine carrée, alors vous pouvez étudier la relativité restreinte dans toute sa splendeur.

Réf. 34

De nombreuses formules alternatives pour d'autres transformations ont été explorées, telles que des expressions dans lesquelles l'accélération relative entre les deux observateurs est prise en compte, comme la vitesse relative. Toutefois, elles ont toutes dû être écartées après avoir comparé leurs prédictions aux données expérimentales. Avant de jeter un coup d'œil sur ces expériences, nous allons continuer avec quelques déductions logiques issues des relations de transformation.

QU'EST-CE QUE L'ESPACE-TEMPS ?

“ Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbstständigkeit bewahren***. ”

Hermann Minkowski.

Les transformations de Lorentz nous disent quelque chose d'important : l'espace et le temps sont deux aspects de la même entité de base. Ils « se mélangent » de différentes

* Pour plus d'informations à propos de Hendrik Antoon Lorentz, voyez la page 33.

** La même découverte avait été annoncée en premier lieu en 1887 par le physicien allemand Woldemar Voigt (1850–1919), Voigt – prononcez « Fohgt » – fut également l'initiateur de l'effet Voigt et du tenseur de Voigt. En 1889, l'Irlandais George F. Fitzgerald trouva également ce résultat de manière indépendante.

*** « Dorénavant l'espace en tant que tel et le temps en tant que tel devront complètement tomber en désuétude et seule une forme d'association des deux préservera leur indépendance. » Cette célèbre phrase constitua le début du discours de Minkowski de 1908 à l'assemblée de la Gesellschaft für Naturforscher und Ärzte.

manières pour des observateurs distincts. Ce fait est généralement exprimé en disant que le temps est la *quatrième dimension*. Cela semble raisonnable parce que l'entité élémentaire commune – appelée *espace-temps* – peut être définie comme étant l'ensemble de tous les événements, ceux-ci étant décrits par quatre coordonnées dans le temps et l'espace, et parce que l'ensemble de tous les événements possède les propriétés d'une variété*. (Pouvez-vous entériner cela ?)

Défi 39 s

En d'autres termes, l'existence d'une vitesse maximale dans la nature nous oblige à introduire une variété d'espace-temps pour sa description. Dans la théorie de la relativité restreinte, la variété de l'espace-temps est caractérisée par une propriété élémentaire :

Réf. 35

l'*intervalle d'espace-temps* di entre deux événements proches, défini comme suit

$$di^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2 dt^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right), \quad (15)$$

est indépendant de l'observateur (inertiel). Un tel espace-temps est aussi appelé espace-temps de Minkowski, d'après Hermann Minkowski**, le professeur d'Albert Einstein. Il fut le premier, en 1904, à définir le concept d'espace-temps et à comprendre son utilité et son importance.

L'intervalle d'espace-temps di de l'équation (15) possède une interprétation simple. C'est le temps mesuré par un observateur en mouvement entre l'événement (t, x) et l'événement $(t + dt, x + dx)$, ce que l'on appelle le *temps propre*, multiplié par c . Si nous omettons le facteur c , nous pouvons le désigner plus simplement comme étant le temps de sa montre-bracelet.

Nous *vivons* dans un espace-temps de Minkowski, si on peut le dire ainsi. L'espace-temps de Minkowski existe indépendamment des choses. Et, bien que des systèmes de coordonnées puissent être différents d'un observateur à l'autre, l'entité sous-jacente, l'espace-temps, est toujours *unique*, même si l'espace et le temps ne le sont pas eux-mêmes.

De quelle manière l'espace-temps de Minkowski diffère-t-il de l'espace-temps galiléen, cette combinaison de l'espace et du temps quotidiens ? Les deux espace-temps sont des variétés, c'est-à-dire des ensembles continus de points, ils possèdent tous les deux trois dimensions d'espace et une de temps, et les deux variétés ont la topologie de la sphère trouée. (Pouvez-vous confirmer ce point ?) Les deux variétés sont plates, c'est-à-dire exemptes de toute courbure. Dans les deux cas, l'espace est ce qui est mesuré avec une règle ou avec un rayon lumineux, et le temps est ce qui est lu sur une horloge. Dans les deux cas, l'espace-temps est fondamental, il est et demeure à la fois l'*arrière-plan* et le *conteneur* des objets et des événements.

Défi 40 s

La différence centrale, en réalité la seule, est que l'espace-temps de Minkowski, au contraire de la situation galiléenne, *mélange* l'espace et le temps, et qu'il le fait, en particulier, de manière différente pour des observateurs ayant des vitesses différentes, comme indiqué sur la [Figure 17](#). C'est pourquoi le temps est un concept dépendant de l'observateur.

Page ??

* Le mot « variété » est défini dans l'Annexe ??.

** Hermann Minkowski (1864–1909) était un mathématicien allemand. Il avait développé des idées proches de celles d'Einstein, mais ce dernier le devança. Minkowski développa alors le concept d'espace-temps. Il décéda brutalement à l'âge de 44 ans.

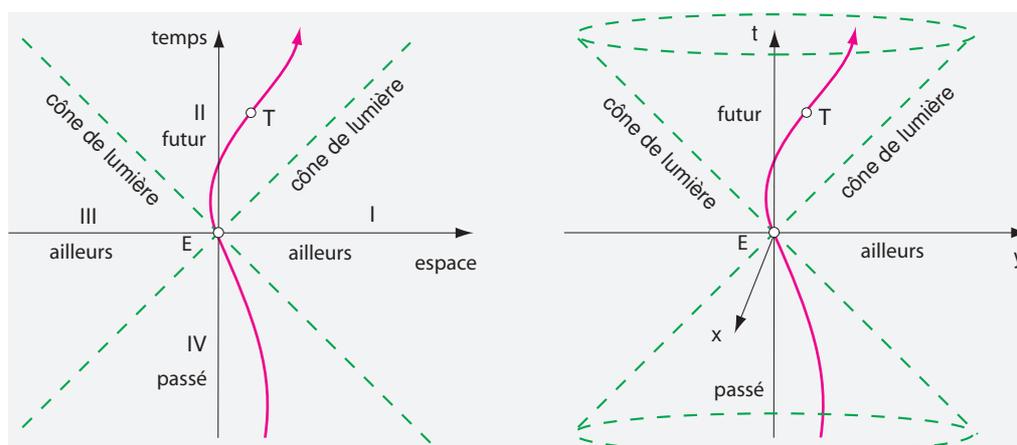


FIGURE 18 Un diagramme d'espace-temps pour un objet T en mouvement vu par un observateur inertiel O dans le cas d'une et de deux dimensions spatiales.

La vitesse maximale dans la nature nous oblige donc à décrire le mouvement à l'aide de l'espace-temps. C'est intéressant, parce que dans l'espace-temps, pour le dire en termes simples, *le mouvement n'existe pas*. Le mouvement n'existe que dans l'espace. Dans l'espace-temps, rien ne bouge. Pour chaque particule ponctuelle, l'espace-temps contient une ligne d'univers. En d'autres mots, au lieu de nous demander pourquoi le mouvement existe, nous pouvons de manière équivalente nous demander pourquoi l'espace-temps est quadrillé par des lignes d'univers. À ce niveau, nous sommes toujours loin de répondre à l'une ou l'autre de ces questions. Ce que nous pouvons faire est d'explorer *comment* le mouvement a lieu.

POUVONS-NOUS VOYAGER DANS LE PASSÉ ? – TEMPS ET CAUSALITÉ

Nous savons que le temps est différent pour des observateurs distincts. Le temps permet-il malgré tout d'ordonner les événements ? La réponse donnée par la relativité est un franc « oui et non ». Certains ensembles d'événements ne sont pas naturellement ordonnés par le temps, d'autres ensembles le sont. Cela est mieux perçu sur un diagramme d'espace-temps.

En clair, deux événements peuvent être ordonnés uniquement si l'un des événements est la *cause* de l'autre. Mais cette dépendance ne peut s'appliquer que si les événements échangent de l'énergie (c'est-à-dire par l'intermédiaire d'un signal). En d'autres termes, une relation de cause à effet entre deux événements implique que de l'énergie ou des signaux puissent voyager depuis un événement jusqu'à l'autre. Par conséquent, la vitesse reliant les deux événements ne doit pas être plus grande que la vitesse de la lumière. La Figure 18 montre que l'événement E situé à l'origine du système de coordonnées ne peut être influencé que par les événements situés dans le quadrant IV (le *cône de lumière du passé*, lorsque toutes les dimensions d'espace sont prises en compte), et peut lui-même influencer uniquement les événements situés dans le quadrant II (le *cône de lumière du futur*). Les événements des quadrants I et III n'influencent pas et ne sont pas influencés par l'événement E. Le cône de lumière définit la frontière entre les événements qui *peuvent*

être ordonnés par rapport à leur origine – à savoir ceux à l'intérieur des cônes – et ceux qui *ne le peuvent pas* – ceux à l'extérieur des cônes, se produisant partout ailleurs pour tous les observateurs. (Certains appellent tous les événements qui se produisent ailleurs le *présent*.) Donc, le temps ordonne les événements seulement en *partie*. Par exemple, pour deux événements qui ne sont pas causalement reliés, leur ordre temporel (ou leur simultanéité) dépend de l'observateur !

En particulier, le cône de lumière du passé fournit l'ensemble complet des événements qui peuvent influencer ce qui se passe à l'origine. Nous disons que l'origine est *causalement reliée* au seul cône de lumière du passé. Cette affirmation reflète le fait que n'importe quelle influence entraîne un transport d'énergie, et donc ne peut pas voyager plus vite que la vitesse de la lumière. Remarquez que la relation de cause à effet est un concept invariant : tous les observateurs sont d'accord pour dire qu'elle s'applique ou non à deux événements donnés. Pouvez-vous le confirmer ?

Défi 41 s

Un vecteur situé à l'intérieur du cône de lumière est dit de *genre temps*, un sur le cône de lumière est dit de *genre lumière* ou *nul*, et un à l'extérieur du cône est dit de *genre espace*. Par exemple, la *ligne d'univers* d'un observateur, c'est-à-dire l'ensemble de tous les événements qui façonnent son histoire passée et future, se compose uniquement d'événements de genre temps. Le temps est la quatrième dimension, elle étend l'espace à l'espace-temps et ainsi « complète » cette dernière. Elle représente la pertinence d'une quatrième dimension pour la relativité restreinte, ni plus ni moins.

La relativité restreinte nous enseigne donc que la causalité et le temps peuvent être définis *uniquement* parce que les cônes de lumière existent. Si le transport de l'énergie à des vitesses supérieures à celle de la lumière existait, le temps ne pourrait pas être défini. La causalité, c'est-à-dire la possibilité d'un ordonnancement (partiel) des événements pour tous les observateurs, est due à l'existence d'une vitesse maximale.

Défi 42 s

Si la vitesse de la lumière pouvait être surpassée d'une certaine manière, le futur pourrait influencer le passé. Pouvez-vous confirmer cette idée ? Dans de telles situations, nous observerions des effets *acausaux*. Cependant, il existe un phénomène quotidien qui nous dit que la vitesse de la lumière est en réalité maximale : notre mémoire. Si le futur pouvait influencer le passé, nous serions également capables de *nous souvenir* du futur. Pour le dire d'une autre manière, si le futur pouvait influencer le passé, le deuxième principe de la thermodynamique ne pourrait pas être valide et notre mémoire ne pourrait pas fonctionner*. Il n'existe aucune autre information, qu'elle soit glanée dans la vie quotidienne ou dans les expériences, qui fournisse une quelconque évidence pour que le futur puisse influencer le passé. En d'autres termes, *le voyage dans le passé est impossible*. Nous révélerons plus tard comment cette situation changera dans la théorie quantique. De façon intéressante, le voyage dans le futur *est possible*, comme nous allons le voir bientôt.

* Un autre résultat, qui est lié, devient petit à petit une vérité notoire. Même si l'espace-temps avait une forme non triviale comme celle d'une topologie cylindrique avec des courbes de genre temps fermées, nous ne serions toujours pas capables de voyager dans le passé, contrairement à ce que de nombreux romans de science-fiction suggèrent. Cela a été clairement établi par Stephen Blau dans un récent article très pédagogique.

Réf. 36

CURIOSITÉS DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

PLUS VITE QUE LA LUMIÈRE : JUSQU' OÙ POUVONS-NOUS VOYAGER ?

Jusqu'à quelle distance de la Terre pouvons-nous voyager, sachant que le voyage ne devrait pas durer plus longtemps que l'espérance de vie, disons 80 ans, et sachant que nous pouvons utiliser une fusée dont la vitesse peut approcher la vitesse de la lumière aussi près que l'on veuille ? Étant donné le temps t que nous sommes prêts à passer dans une fusée, étant donné la vitesse v de la fusée et en supposant avec optimisme qu'elle puisse accélérer et ralentir durant une quantité infinitésimale de temps, la distance d que nous pouvons parcourir est donnée par

$$d = \frac{vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (16)$$

Cette distance d est déjà plus grande que ct pour $v > 0,71c$, et, si nous choisissons v assez grand, elle augmente au-delà de toute limite ! En d'autres termes, la relativité ne limite *pas* la distance que nous pouvons parcourir durant une vie entière, et pas même la distance que nous pouvons effectuer en une seule seconde. Nous pourrions, en principe, sillonner l'univers tout entier en moins d'une seconde. Dans des situations telles que celles-ci, il est raisonnable d'introduire le concept de *vitesse propre* w , définie comme

$$w = d/t = \frac{v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma v. \quad (17)$$

Comme nous venons de le voir, la vitesse propre n'est *pas* limitée par la vitesse de la lumière, en réalité la vitesse propre de la lumière est elle-même infinie*.

SYNCHRONISATION ET VOYAGE DANS LE TEMPS – UNE MÈRE PEUT-ELLE RESTER PLUS JEUNE QUE SA PROPRE FILLE ?

Une vitesse maximale implique que le temps est différent pour des observateurs distincts qui se déplacent l'un par rapport à l'autre. Donc nous devons être prudents sur la manière de synchroniser des horloges qui sont éloignées, même si elles sont au repos l'une par rapport à l'autre dans un référentiel d'inertie. Par exemple, si nous avons deux montres identiques indiquant la même heure, et si nous transportons l'une d'entre elles le temps d'une promenade et que nous revenons, elles indiqueront des heures différentes à la fin. Cette expérience a été en réalité accomplie plusieurs fois et a entièrement confirmé la prédiction de la relativité restreinte. Le décalage temporel pour une

* En utilisant la vitesse propre, la relation donnée dans l'équation (9) pour la composition de deux vitesses $\mathbf{w}_a = \gamma_a \mathbf{v}_a$ et $\mathbf{w}_b = \gamma_b \mathbf{v}_b$ se simplifie en

$$w_{s\parallel} = \gamma_a \gamma_b (v_a + v_{b\parallel}) \quad \text{et} \quad w_{s\perp} = w_{b\perp}, \quad (18)$$

où les signes \parallel et \perp désignent respectivement la composante dans la direction de \mathbf{v}_a et la composante perpendiculaire à celle-ci. Nous pouvons en réalité exprimer toute la relativité restreinte en termes de quantités « propres ».

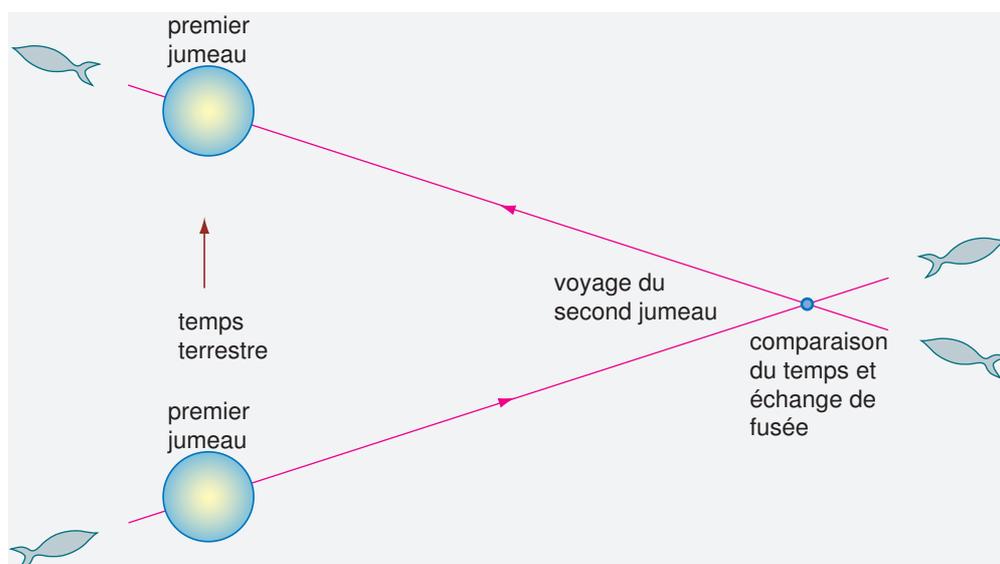


FIGURE 19 Le paradoxe des jumeaux.

personne ou une montre dans un avion effectuant une boucle autour de la Terre, à environ 900 km/h, est de l'ordre de 100 ns – ce qui n'est pas vraiment perceptible dans la vie quotidienne. En fait, le retard est facilement évalué à partir de l'expression

$$\frac{t}{t'} = \gamma . \quad (19)$$

Le corps humain est une horloge, il témoigne d'un temps écoulé, généralement appelé l'âge, par divers changements dans sa forme, son poids, la couleur des cheveux, etc. Si une personne part pour un long voyage rapide, à son retour elle sera *moins* âgée qu'une seconde personne qui est restée dans sa maison (inertielle).

La plus célèbre illustration en est le fameux *paradoxe des jumeaux* (ou *paradoxe des horloges*). Un jumeau audacieux saute dans une fusée relativiste qui quitte la Terre et voyage durant de nombreuses années. Très loin de la Terre, il bondit dans une autre fusée relativiste empruntant le chemin inverse et revenant au bercail. Ce voyage est illustré sur la Figure 19. À son retour, il remarque que son frère jumeau resté sur Terre est beaucoup plus âgé que lui-même. Pouvez-vous expliquer ce résultat, particulièrement l'asymétrie entre les deux frères ? Ce résultat a également été confirmé lors de nombreuses expériences.

Réf. 40

La relativité restreinte confirme donc, sous une forme étonnante, la devise bien connue que les voyages forment la jeunesse. Cependant, le prix à payer pour conserver sa jeunesse est que toutes les choses autour de nous changent vraiment beaucoup plus rapidement que si nous restions au repos par rapport à notre environnement.

Le paradoxe des jumeaux peut aussi être perçu comme une confirmation de la possibilité de voyager dans le futur. À l'aide d'une fusée ultra-rapide qui revient à son point de départ, nous pouvons parvenir à un temps local que nous n'aurions jamais pu atteindre au terme de notre vie en restant chez nous. Hélas, nous ne pouvons *jamais* revenir dans

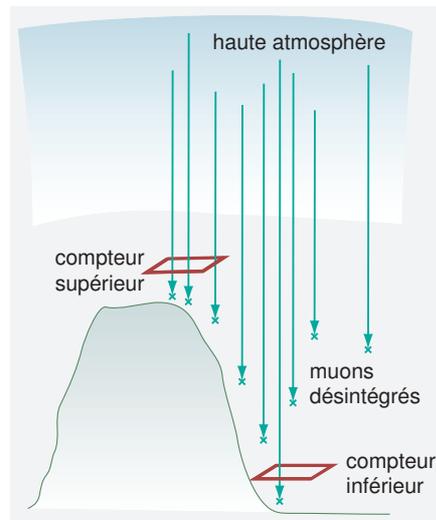


FIGURE 20 Les muons sont plus nombreux que prévu lorsqu'ils parviennent au sol parce que le voyage ultra-rapide entretient leur jeunesse.

le passé*.

- Page ?? Une des expériences les plus simples confirmant la jeunesse prolongée des voyageurs ultra-rapides a trait au comptage des muons. Les muons sont des particules qui sont perpétuellement formées dans la haute atmosphère par des rayons cosmiques. Les muons *au repos* (par rapport à l'horloge qui prend la mesure) possèdent une demi-vie limitée à $2,2 \mu\text{s}$ (ou de 660 m, à la vitesse de la lumière). Après ce laps de temps, la moitié des muons sont désintégrés. Cette demi-vie peut être mesurée en utilisant de simples compteurs à muons. En plus, il existe des compteurs spécifiques qui ne comptent que les muons voyageant à une certaine vitesse comprise dans un intervalle, disons de $0,9950c$ à $0,9954c$. Nous pouvons mettre l'un de ces compteurs spécifiques au sommet d'une montagne et en mettre un autre plus bas dans la vallée, comme indiqué sur la Figure 20.
- Réf. 42 La première fois que cette expérience fut réalisée, la différence de hauteur était de 1,9 km. La traversée de cette distance dans l'atmosphère à la vitesse mentionnée prend environ $6,4 \mu\text{s}$. Avec la demi-vie donnée ci-dessus, un calcul naïf révèle que seulement 13 % environ des muons observés au sommet devraient parvenir au site inférieur. Pourtant, nous observons qu'environ 82 % des muons arrivent jusqu'en bas. L'explication de ce résultat est fournie par la dilatation relativiste du temps. En réalité, à la vitesse mentionnée, les muons ressentent une différence temporelle d'uniquement $0,62 \mu\text{s}$ pendant le trajet du sommet de la montagne jusqu'à la vallée. Ce temps plus court fait que le nombre de muons perdus est beaucoup plus petit que s'il n'y avait pas dilatation du temps. Qui plus est, le pourcentage mesuré confirme la valeur donnée par la prédiction du facteur de dilatation du temps γ , aux erreurs expérimentales près, comme vous pourriez le vérifier. Un effet similaire est observé lorsque des muons relativistes sont produits dans des accélérateurs.
- Défi 45 s
- Défi 46 s

Réf. 41 * Il y a même des ouvrages spécifiques sur le voyage dans le temps, tel le texte très approfondi de Nahin. Remarquez que le concept du voyage dans le temps doit être clairement défini, sinon nous n'aurions aucune objection à formuler à l'employé qui appelle sa chaise de bureau une machine à voyager dans le temps, sous le prétexte que rester assis dessus lui permet d'aller dans le futur.

La dilatation de la demi-vie a également été relevée pour de nombreux autres systèmes qui se désintègrent, tels que les pions, les atomes d'hydrogène, les atomes de néon et divers noyaux, confirmant invariablement les prédictions de la relativité restreinte. Puisque tous les corps dans la nature sont constitués de particules, l'« effet jouvence » des hautes vitesses (généralement dénommé « dilatation du temps ») s'applique aux corps de toutes les tailles. En réalité, il n'a pas seulement été observé pour des particules, mais également pour des lasers, des émetteurs radio et des horloges.

Réf. 22

Si le mouvement conduit à la dilatation du temps, une horloge située à l'équateur, filant sans cesse tout autour de la Terre, devrait avancer plus lentement qu'une située aux pôles. Toutefois, cette prédiction, qui fut postulée par Einstein lui-même, est incorrecte. L'accélération centrifuge entraîne une réduction de l'accélération gravitationnelle qui compense exactement l'augmentation due à la vitesse. Ce récit peut servir à rappeler qu'il faut être prudent lorsqu'on applique la relativité restreinte à des situations prenant en compte la gravitation. La relativité restreinte est applicable uniquement lorsque l'espace-temps est plat, et non pas quand la gravité est présente.

Réf. 43

En bref, une mère *peut* rester plus jeune que sa fille. Nous pouvons aussi conclure qu'il nous est impossible de synchroniser des horloges au repos l'une par rapport à l'autre simplement en marchant, horloge en main, d'un lieu à un autre. La manière appropriée pour ce faire est d'échanger des signaux lumineux. Pouvez-vous décrire comment ?

Défi 47 s

Une définition précise de la synchronisation nous permet de qualifier de simultanés deux événements éloignés. De plus, la relativité restreinte montre que la simultanéité dépend de l'observateur. Toutes les expériences réalisées jusqu'à présent confirment ce point.

Pendant, le désir de cette mère n'est pas facile à satisfaire. Imaginons qu'elle soit accélérée dans un vaisseau spatial s'éloignant de la Terre à 10 m/s^2 pendant dix ans, puis ralentie de 10 m/s^2 durant dix autres années, puis accélérée pendant dix années supplémentaires en direction de la Terre, et finalement ralentie pendant les dix dernières années dans le but de débarquer saine et sauve sur notre planète. Cette mère a mis 40 ans pour réaliser ce voyage. Elle s'est éloignée à 22 000 années-lumière de sa planète natale. À son retour sur Terre, 44 000 années se sont écoulées. Tous cela semble fantastique, jusqu'à ce que nous réalisons que la quantité nécessaire de carburant, même pour le moteur le plus efficace que l'on puisse imaginer, est si considérable que la masse restituée au retour du voyage n'est que d'une seule partie pour $2 \cdot 10^{19}$. Cette quantité nécessaire de carburant n'existe pas sur Terre.

Défi 48 e

CONTRACTION DES LONGUEURS

La longueur d'un objet mesurée par un observateur attaché à cet objet est appelée sa longueur propre. En accord avec la relativité restreinte, la longueur mesurée par un observateur inertiel passant à proximité est toujours plus petite que sa longueur propre. Ce résultat découle directement des transformations de Lorentz.

Défi 49 e

Pour une Ferrari roulant à 300 km/h ou 83 m/s, la longueur est réduite de 0,15 pm : c'est moins que le diamètre d'un proton. Vue depuis le Soleil, la Terre se déplace à 30 km/s, ce qui donne une contraction de sa longueur de 6 cm. Aucun de ces effets n'a jamais été mesuré. Mais des effets plus significatifs le pourraient. Explorons-en quelques exemples.

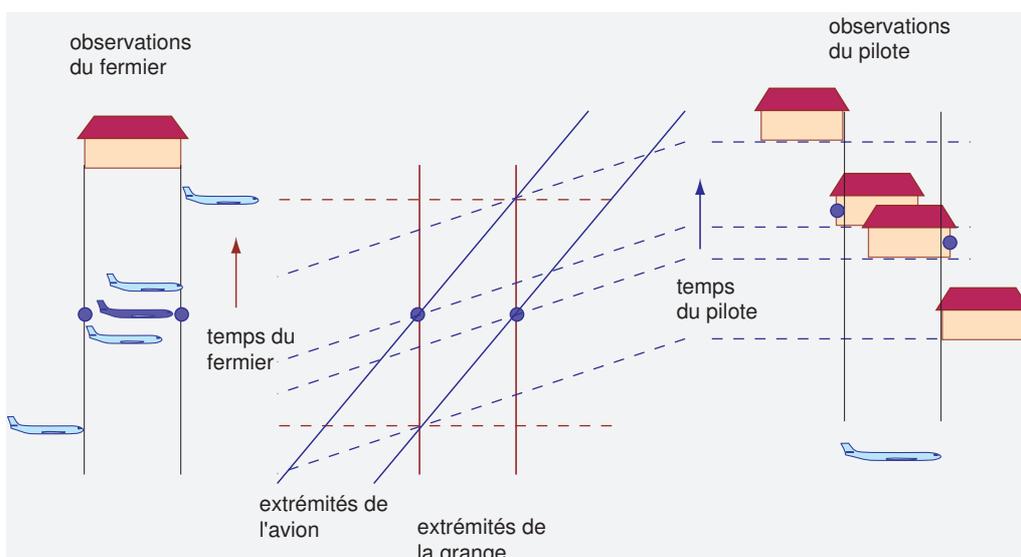


FIGURE 21 Les observations du pilote et du propriétaire de la grange.



FIGURE 22 Les observations du creuseur de pièges et du surfeur des neiges, telles qu'elles sont publiées (par erreur) dans la littérature.

Imaginez qu'un pilote vole en traversant une grange dotée de deux portes, une à chaque extrémité. L'avion est légèrement plus long que la grange, mais se déplace si rapidement que sa longueur, contractée par la relativité, est plus courte que la longueur de la grange. Le fermier peut-il fermer la grange (au moins pendant un court instant) avec l'avion entièrement situé à l'intérieur ? La réponse est oui. Mais pourquoi le pilote ne peut-il pas dire la chose suivante : par rapport à lui, la grange est contractée, par conséquent l'avion ne peut être contenu tout entier dans celle-ci ? La réponse est indiquée sur la Figure 21. Pour le fermier, les portes se ferment (et se rouvrent) au même moment. Pour le pilote, ce n'est pas le cas. Pour le fermier, le pilote est dans l'obscurité durant un court instant ; pour le pilote, la grange n'est jamais sombre. (Ce n'est pas entièrement vrai : pouvez-vous en développer les détails ?)

Défi 50 s

Nous explorons maintenant quelques variantes du cas général. Un surfeur des neiges ultra-rapide peut-il tomber dans un trou qui est un petit peu plus court que sa planche ? Imaginez-le surfer si rapidement que le facteur de contraction des longueurs $\gamma = d/d'$ soit de 4*. Pour un observateur sur le sol, la planche de surf est quatre fois plus courte et, lorsqu'elle passe au-dessus du trou, elle chutera dedans. En revanche, pour le surfeur, c'est le trou qui est quatre fois moins large, dans ce cas il semble que la planche de surf ne puisse pas tomber dedans.

* Même la Terre se contracte dans la direction de son mouvement autour du Soleil. Cette valeur est-elle mesurable ?

Défi 51 s

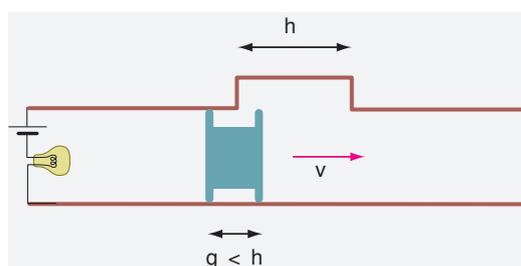


FIGURE 23 Est-ce que la pièce conductrice glissante laisse l'ampoule allumée, à très grande vitesse ?



FIGURE 24 Qu'advient-il à la corde ?

- Réf. 44 Une analyse plus attentive montre que, contrairement à l'observation du creuseur de trous, le surfeur des neiges ne voit pas que la forme de la planche est figée : au moment de passer au-dessus du trou, il observe que la planche affecte une forme parabolique et chute dans le trou, comme indiqué sur la Figure 22. Pouvez-vous le confirmer ? En d'autres termes, la forme n'est pas une notion invariante. (Toutefois, la rigidité est invariante par rapport à l'observateur, si elle est correctement définie. Pouvez-vous appuyer ce dernier point ?)
- Défi 52 e Cette explication, bien que répandue, n'est pas exacte, comme Harald van Lintel et Christian Gruber l'ont souligné. Nous ne devrions pas oublier d'estimer la durée de l'effet. Aux vitesses relativistes le temps requis pour que le trou agisse sur toute l'épaisseur de la planche ne peut pas être négligé. Le surfeur des neiges voit que sa planche prend une forme parabolique seulement si elle est extrêmement fine et flexible. Pour des planches ordinaires se déplaçant à des vitesses relativistes, le surfeur n'a pas le temps de tomber d'une hauteur h appréciable ou de voir sa planche se courber dans le trou avant de passer dessus. La Figure 22 est si exagérée qu'elle est inexacte. Le surfeur des neiges devrait tout simplement filer à toute vitesse au-dessus du trou.
- Défi 53 s Les paradoxes autour de la contraction des longueurs deviennent même plus intéressants dans le cas d'un conducteur glissant qui établit un contact électrique entre deux rails, comme dessiné sur la Figure 23. Les deux rails sont parallèles, mais l'un d'entre eux possède un décrochement qui est plus long que la pièce glissante. Pouvez-vous rechercher si une ampoule reliée en série reste allumée lorsque la pièce glissante se déplace le long des rails à une vitesse relativiste ? (Faites l'hypothèse simplificatrice, mais non parfaitement réaliste, que le courant électrique s'écoule instantanément dès que la pièce touche les rails.) Obtenez-vous le même résultat pour tous les observateurs ? Et qu'arrive-t-il lorsque la pièce glissante est plus longue que le décrochement ? (Attention : ce problème a donné naissance à des débats *houleux* !) Qu'est-ce qui est irréaliste dans cette expérience ?
- Réf. 45
- Défi 54 pe Les paradoxes autour de la contraction des longueurs deviennent même plus intéressants dans le cas d'un conducteur glissant qui établit un contact électrique entre deux rails, comme dessiné sur la Figure 23. Les deux rails sont parallèles, mais l'un d'entre eux possède un décrochement qui est plus long que la pièce glissante. Pouvez-vous rechercher si une ampoule reliée en série reste allumée lorsque la pièce glissante se déplace le long des rails à une vitesse relativiste ? (Faites l'hypothèse simplificatrice, mais non parfaitement réaliste, que le courant électrique s'écoule instantanément dès que la pièce touche les rails.) Obtenez-vous le même résultat pour tous les observateurs ? Et qu'arrive-t-il lorsque la pièce glissante est plus longue que le décrochement ? (Attention : ce problème a donné naissance à des débats *houleux* !) Qu'est-ce qui est irréaliste dans cette expérience ?
- Réf. 46
- Défi 55 s Un autre exemple de contraction des longueurs apparaît lorsque deux objets, disons deux voitures, sont reliés sur une distance d par une corde tendue, comme indiqué sur la Figure 24. Imaginez que les deux véhicules soient au repos à l'instant $t = 0$ puis soient accélérés ensemble exactement de la même façon. L'observateur au repos soutiendra que les deux voitures demeurent à la même distance l'une de l'autre. De l'autre point de vue, la corde doit recouvrir une distance $d' = d/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, et doit donc s'allonger lorsque
- Réf. 47

les deux véhicules accélèrent. En d'autres termes, la corde rompra. Cette prédiction est-elle confirmée par les observateurs situés dans chacun des deux véhicules ?

Défi 56 s

Un exemple amusant – mais complètement irréaliste – de contraction des longueurs est celui d'un sous-marin se déplaçant horizontalement. Imaginez que le sous-marin stationnaire ait ajusté son poids afin de flotter dans l'eau sans avoir tendance à couler ni à s'élever. Maintenant, le sous-marin se déplace (avec une vitesse relativiste possible). Le capitaine observe que l'eau à l'extérieur est contractée selon la formule de Lorentz, donc l'eau est plus dense et il conclut que le sous-marin s'élèvera. Un poisson situé à proximité voit le sous-marin se contracter, donc ce dernier devient plus dense que l'eau, et conclut

Réf. 48

Défi 57 s

Défi 58 s

que celui-ci coulera. Qui prêche le faux ? Quelle est la contrainte de flottabilité ? À ce sujet, répondez à la question suivante : pourquoi est-il impossible pour un sous-marin de se déplacer à une vitesse relativiste ?

En résumé, la contraction des longueurs ne peut pratiquement jamais être observée pour des corps macroscopiques. Toutefois, elle joue un rôle important pour les *images*.

IMAGES RELATIVISTES – ABERRATION ET EFFET DOPPLER

Nous avons rencontré plusieurs situations dans lesquelles les observations varient lorsqu'un observateur se déplace à très grande vitesse. En tout premier lieu, la contraction de Lorentz et l'aberration provoquent la *distorsion* des images. Deuxièmement, l'aberration augmente l'angle de vision au-delà des 180 degrés approximatifs que les êtres humains perçoivent dans la vie quotidienne. Un observateur relativiste qui regarde dans la direction du mouvement reçoit de la lumière qui est invisible pour un observateur stationnaire, parce que, pour ce dernier, elle arrive par derrière. Troisièmement, l'effet Doppler engendre un *décalage de couleurs* sur les images. Quatrièmement, le mouvement rapide modifie la *luminosité* et le *contraste* de l'image : c'est l'*effet projecteur*. Chacune de ces modifications dépend de la direction du regard, elles sont montrées sur la [Figure 26](#).

Les ordinateurs modernes nous permettent de reproduire les observations faites par des voyageurs ultra-rapides avec une qualité photographique, et même de produire des simulations animées*. Les images de la [Figure 25](#) sont particulièrement opportunes pour nous permettre de comprendre la déformation relativiste des images. Elles indiquent l'angle de vision, le cercle qui distingue les objets qui sont devant l'observateur de ceux qui se trouvent derrière lui, les coordonnées des pieds de l'observateur et le point sur l'horizon en direction duquel se déplace cet observateur. En intégrant ces repères dans votre esprit lorsque vous regardez d'autres images ou films, vous devez comprendre plus clairement ce que représentent ces images.

Nous notons que la forme de l'image vue par un observateur en mouvement est une version *distordue* de celle vue par un observateur au repos au même endroit. Toutefois, un observateur en déplacement ne voit pas des objets différents d'un autre observateur stationnaire au même emplacement. En fait, les cônes de lumière sont indépendants du mouvement d'un observateur.

* Consultez par exemple des images et des films sur <http://www.anu.edu.au/Physics/Searle> par Anthony Searle, sur <http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~weiskopf/gallery/index.html> par Daniel Weiskopf, sur <http://www.itp.uni-hannover.de/~dragon/stonehenge/stone1.htm> par Norbert Dragon et Nicolai Mokros, ou sur <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de> par le groupe de Hanns Ruder.

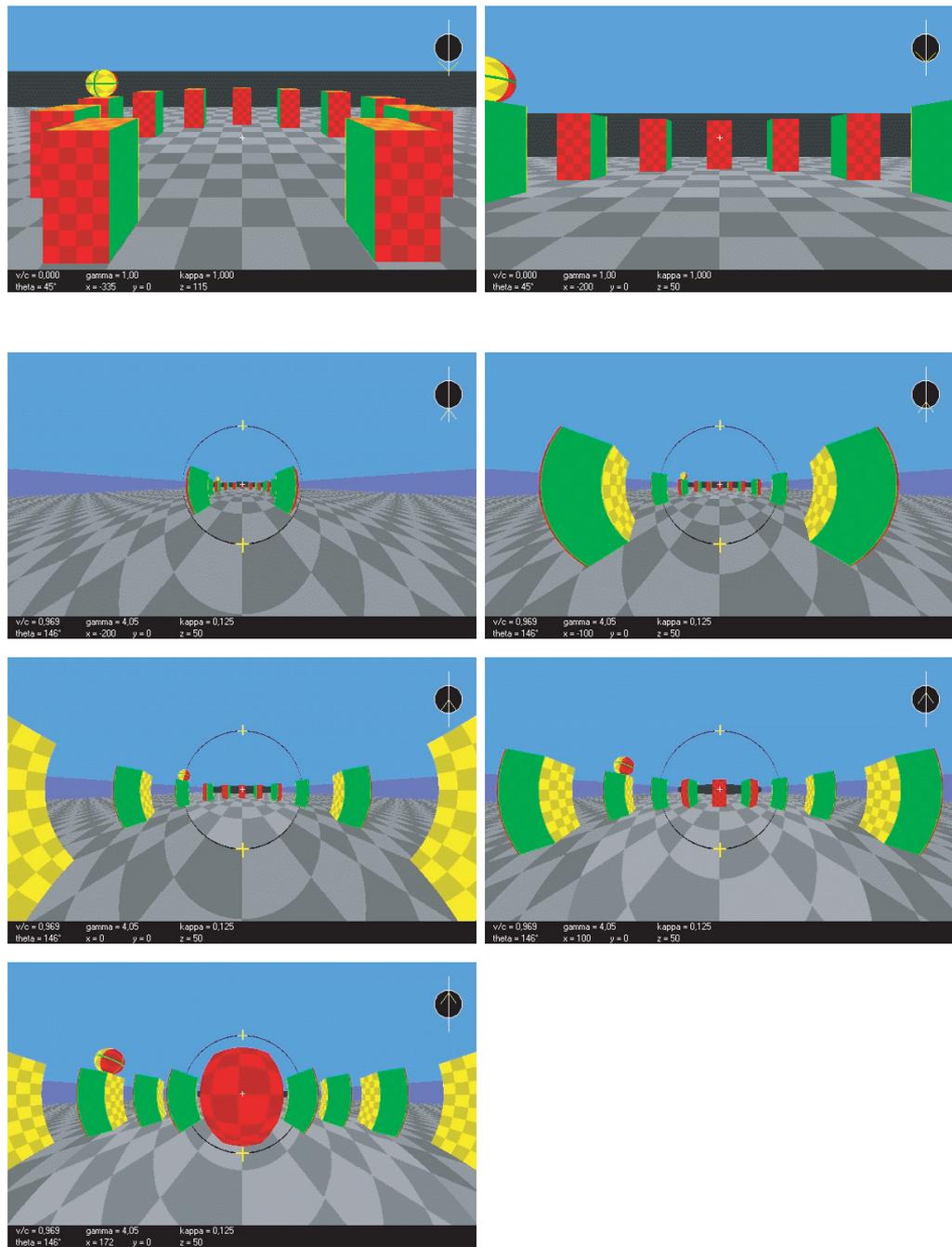


FIGURE 25 Traversée de douze colonnes verticales (indiquées sur les deux images du haut) à 0,9 fois la vitesse de la lumière tel que simulé par Nicolai Mokros et Norbert Dragon, exhibant ainsi l'effet de la vitesse et de la position sur les distorsions. (© Nicolai Mokros)

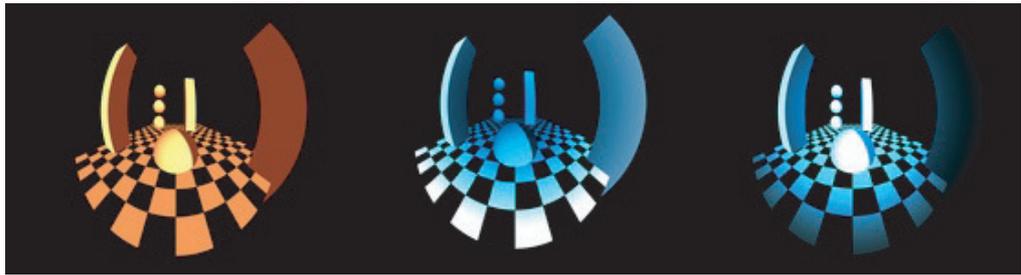


FIGURE 26 Traversée de trois colonnes droites verticales à 0,9 fois la vitesse de la lumière tel que simulé par Daniel Weiskopf : à gauche avec les couleurs d'origine, au milieu en intégrant l'effet Doppler, et à droite en incluant les effets sur la luminosité, montrant ainsi ce qu'un observateur verrait réellement. (© Daniel Weiskopf)



FIGURE 27 Ce qu'un chercheur qui se tient debout et un autre courant rapidement à travers un couloir observe (en omettant les effets sur les couleurs). (© Daniel Weiskopf)

La contraction de Lorentz est mesurable, pourtant elle ne peut pas être photographiée. Cette distinction surprenante ne fut découverte qu'en 1959. La mesure implique la simultanéité à la position de l'objet, la photographie entraîne la simultanéité à la position de l'observateur. Sur une photographie, la contraction de Lorentz est modifiée par les effets dus aux différents temps de trajet de la lumière depuis les différentes parties d'un objet. Le résultat provoque un changement dans la forme qui rappelle une rotation, bien que n'en étant pas exactement une. La déformation résultante est une aberration dépendant de l'angle. Nous avons discuté de l'aberration au début de cette section. L'aberration

Réf. 49

Page 18

transforme des cercles en d'autres cercles : de telles transformations sont dites *conformes*.

Les images de la Figure 27, produites par Daniel Weiskopf, intègrent également l'effet Doppler et les changements de luminosité. Elles montrent que ces effets sont au moins aussi saisissants que la distorsion due à l'aberration.

Cela nous conduit au « paradoxe du collier de perles ». Si le mouvement relativiste transforme des sphères en sphères, et des tiges en tiges plus courtes, que se passe-t-il pour un collier de perles se déplaçant le long de son grand axe ? Devient-il plus court ?

Défi 59 s

Il y a encore beaucoup de choses à explorer grâce aux films relativistes. Par exemple, l'auteur prédit que des films de sphères en mouvement de rotation rapide révéleront des effets intéressants. Dans ce cas aussi, l'observation visuelle et les résultats des mesures seront divergents. Pour certaines combinaisons de rotations relativistes et de poussées relativistes, il a été postulé* que le sens de rotation (horaire ou antihoraire) sera *différent* pour des observateurs distincts. Cet effet jouera un rôle intéressant dans la discussion sur l'unification.

Défi 60 r

QUELLE EST LA MEILLEURE PLACE DANS UN BUS ?

Explorons une autre surprise de la relativité restreinte. Imaginez des jumeaux à l'intérieur de deux véhicules accélérés de manière identique, l'un devant l'autre, partant du point mort à l'instant $t = 0$, comme le décrit un observateur au repos par rapport aux jumeaux. (Il n'y a pas de corde qui relie les voitures maintenant.) Les deux véhicules contiennent la même quantité de carburant. Nous en déduisons aisément que l'accélération des deux jumeaux cessera lorsque le carburant s'épuisera, au même instant dans le référentiel de l'observateur extérieur. De plus, la distance entre les voitures est restée identique tout au long de la course pour cet observateur, et les deux voitures continuent de rouler avec une vitesse constante v identique, tant que le frottement reste négligeable. Si nous appelons les événements correspondant à l'arrêt des moteurs de la voiture de devant et de celle de derrière respectivement a et b, leurs coordonnées temporelles dans le référentiel extérieur sont tout simplement reliées par $t_a = t_b$. En utilisant les transformations de Lorentz vous pouvez en déduire, dans le référentiel des jumeaux roulant librement, la relation

Défi 61 e

Défi 62 e

$$t_b = \gamma \Delta x v / c^2 + t_a, \quad (20)$$

qui signifie que le jumeau de devant a vieilli *plus vite* que le jumeau de derrière ! Par conséquent, dans des systèmes accélérés, le vieillissement dépend de la position.

Pour choisir une place dans un bus, cependant, ce résultat ne nous est d'aucune aide. Il est vrai que la meilleure place dans un bus en accélération est celle du fond, mais dans un bus qui ralentit c'est celle de devant. À la fin du parcours, le choix du siège n'importe plus.

Est-il exact d'en déduire que les gens qui habitent dans les hautes montagnes vieillissent plus vite que ceux des vallées, au point que vivre dans une vallée permettrait de retarder l'apparition des cheveux blancs ?

Défi 63 s

* En juillet 2005.

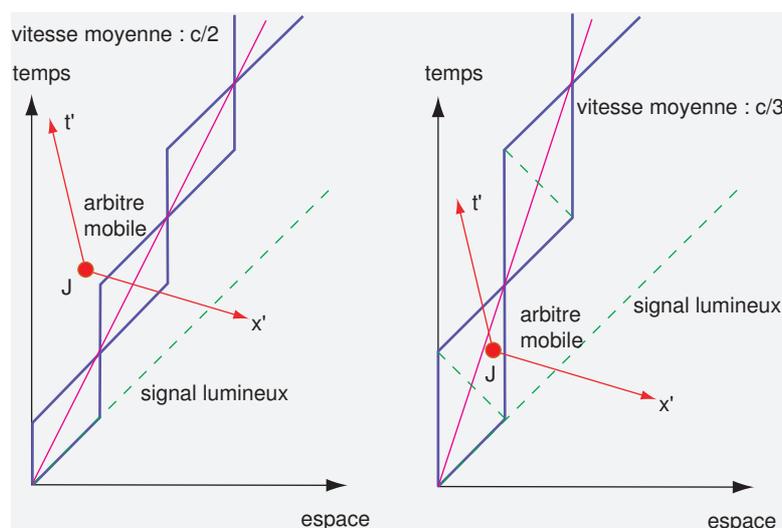


FIGURE 28 Pour l'athlète de gauche, l'arbitre se déplaçant dans la direction opposée voit ses deux pieds hors du sol à certains moments, mais pas pour celui de droite.

À QUELLE VITESSE POUVONS-NOUS MARCHER ?

Marcher signifie déplacer les pieds de telle façon qu'au moins l'un des deux soit toujours sur le sol à chaque instant. C'est une des règles que les athlètes doivent respecter dans les compétitions olympiques de marche à pied, au risque d'être disqualifiés. Un étudiant athlète était en train de réfléchir sur la vitesse maximale théorique qu'il pourrait atteindre aux Jeux olympiques. L'idéal serait que chaque pied puisse accélérer instantanément jusqu'à (pratiquement) la vitesse de la lumière. Pour atteindre la vitesse la plus élevée à la marche, il faudrait lever le second pied du sol exactement au même instant que le premier est posé. Par « même instant », l'étudiant entendait au départ « tel que perçu par l'arbitre de la compétition au repos par rapport à la Terre ». Le mouvement des pieds est indiqué par le diagramme de gauche de la Figure 28. Cela donne une vitesse limite pour la marche égale à la moitié de la vitesse de la lumière. Mais alors l'étudiant remarqua qu'un arbitre *en mouvement* verrait ses deux pieds hors du sol et ainsi éliminerait l'athlète de la course. Pour éviter une disqualification par *n'importe quel* arbitre, le second pied doit attendre un signal lumineux du premier. La vitesse limite pour la marche à pied olympique n'est donc que d'un tiers de la vitesse de la lumière.

Réf. 50

LA VITESSE DE L'OMBRE EST-ELLE PLUS GRANDE QUE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ?

En réalité, le mouvement plus rapide que la lumière existe et est même plutôt commun. La relativité restreinte contraint seulement le mouvement de la masse et de l'énergie. Ainsi, des points immatériels ou des images et des dispositifs qui ne transportent pas d'énergie *peuvent* se déplacer plus vite que la lumière. Il en existe plusieurs exemples simples. Pour être clair, nous ne parlons pas de vitesse *propre*, laquelle ne peut pas, de toute façon, être définie dans ces situations. (Pourquoi ?)

Les exemples suivants montrent des vitesses qui sont véritablement plus élevées que

Page 41
Défi 64 s

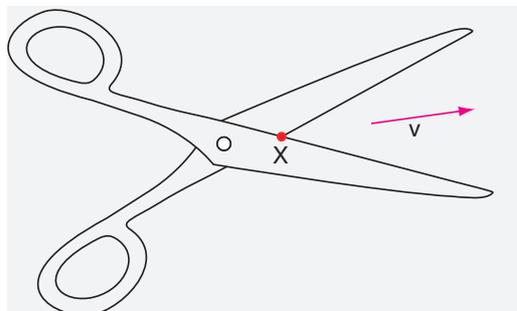


FIGURE 29 Un exemple élémentaire de mouvement qui est plus rapide que la lumière.

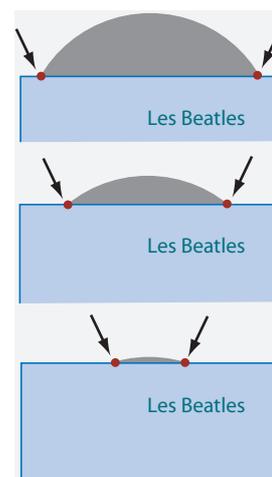


FIGURE 30 Un autre exemple de mouvement plus rapide que la lumière.

celle de la lumière dans le vide.

Considérez le point repéré par X sur la Figure 29, l'emplacement où les ciseaux coupent le papier. Si ces ciseaux sont refermés suffisamment rapidement, ce point se déplace plus vite que la lumière. Des exemples similaires peuvent également être soulignés pour chaque fenêtre, et en fait pour n'importe quel dispositif qui possède des parties rotatives.

Une autre occurrence de mouvement supraluminique survient dans le cas d'un disque vinyle – un vieux disque 33 tours démodé – disparaissant dans sa pochette, comme indiqué sur la Figure 30. Le point où le bord du disque rencontre le bord de la pochette peut voyager plus vite que la lumière.

Défi 65 s

Un autre exemple vient à l'esprit lorsque nous nous rappelons que nous vivons sur une planète sphérique. Imaginez que vous soyez allongé sur le sol et que vous vous mettiez debout. Pouvez-vous montrer que la vitesse avec laquelle l'horizon s'éloigne de vous peut être plus grande que celle de la lumière ?

Pour finir, le mouvement d'un point lumineux produit en éclairant la Lune avec un rayon laser est un exemple classique. Si le laser est agité, le point peut facilement se déplacer plus vite que la lumière. La même chose s'applique au point lumineux situé sur l'écran d'un oscilloscope lorsqu'un signal de fréquence suffisamment élevée est alimenté en entrée.

Défi 66 s

Tout cela correspond à des exemples typiques de la *vitesse des ombres*, parfois également appelée *vitesse de l'obscurité*. Les ombres et l'obscurité peuvent en réalité se déplacer tous les deux plus vite que la lumière. En fait, il n'y a aucune limite pour leur vitesse. Pouvez-vous citer un autre exemple ?

De plus, il y a un nombre toujours croissant d'installations expérimentales dans lesquelles la vitesse de phase ou même la vitesse de groupe de la lumière est plus grande que c . Elles font régulièrement la une des journaux, généralement sous le titre « la lumière se déplace plus vite que la lumière ». Nous discuterons de ce phénomène surprenant plus

Page 102 en détail un peu plus tard. En fait, ces situations peuvent aussi être vues – avec un peu d’imagination – comme des cas particuliers du phénomène de la « vitesse de l’ombre ».

Pour citer un exemple différent, imaginez que nous soyons situés à la sortie d’un tunnel de longueur l . Nous voyons une voiture, dont nous savons que sa vitesse est v , entrant à l’autre extrémité du tunnel et roulant dans notre direction. Nous savons qu’elle y entre parce qu’elle n’est plus au soleil ou parce que ses feux sont allumés à ce moment-là. À quel instant t , après que nous l’aurons vue entrer dans le tunnel, nous dépassera-t-elle ? Un raisonnement élémentaire indique que t est donné par

$$t = l/v - l/c . \quad (21)$$

En d’autres termes, la voiture qui s’approche semble avoir une vitesse v_{appr} de

$$v_{\text{appr}} = \frac{l}{t} = \frac{vc}{c - v} , \quad (22)$$

qui est plus grande que c pour n’importe quelle vitesse v supérieure à $c/2$. Pour des voitures cela ne se produit pas très souvent, mais les astronomes connaissent un type d’objet lumineux dans le ciel appelé *quasar* (une contraction de « quasi-stellar object »), qui émet parfois des jets de gaz ultra-rapides. Si l’émission est dans la direction de la Terre, ou proche de cette direction, sa vitesse apparente – et même sa composante purement transversale – est plus grande que c . De telles circonstances sont aujourd’hui fréquemment observées avec les télescopes.

Réf. 51

Remarquez que, pour un deuxième observateur situé à l’entrée du tunnel, la vitesse apparente du véhicule qui s’éloigne est donnée par

$$v_{\text{éloi}} = \frac{vc}{c + v} , \quad (23)$$

ce qui n’est *jamais* supérieur à $c/2$. En d’autres termes, nous n’observons jamais d’objets s’éloignant à plus de la moitié de la vitesse de la lumière.

Cette histoire possède un ultime rebondissement. Nous venons de voir qu’un mouvement plus rapide que la lumière peut être observé dans plusieurs situations. Mais un objet se déplaçant plus vite que la lumière pourrait-il malgré tout être observé ? De façon surprenante, il le pourrait, mais de manière plutôt insolite. Premièrement, puisqu’un tel objet imaginaire, que l’on appelle généralement un *tachyon*, se déplace plus vite que la lumière, nous ne pouvons jamais le voir filer dans notre direction. S’il peut malgré tout être aperçu, un tachyon ne peut être vu que de telle manière qu’il s’éloigne de nous. Apercevoir un tachyon pourrait être similaire à entendre un jet supersonique. Ce n’est qu’après que le tachyon sera passé à proximité, en supposant qu’il soit visible le jour, que nous pourrions le remarquer. Nous verrions d’abord un flash lumineux, correspondant au bang d’un avion filant à une vitesse supersonique. Nous verrions ensuite deux images du tachyon, apparaissant quelque part dans l’espace et s’éloignant dans des directions opposées, comme nous pouvons le déduire de la Figure 31. Même si l’une des deux images s’approchait de nous, elle paraîtrait de plus en plus petite et indistincte. C’est, pour le moins, un comportement plutôt inhabituel. Qui plus est, si vous vouliez observer

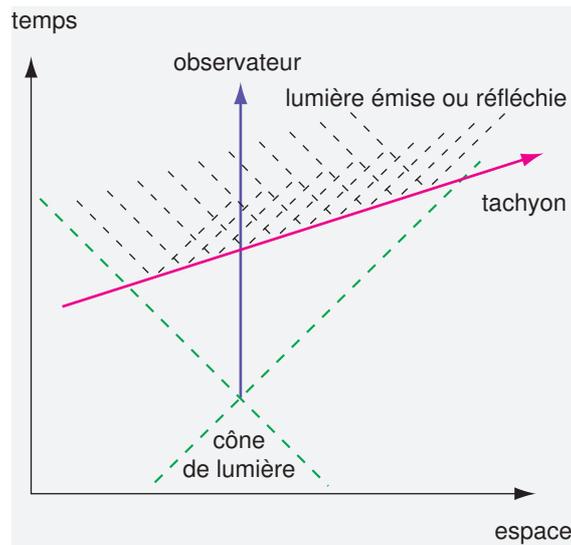


FIGURE 31 Diagramme d'espace-temps hypothétique pour l'observation du tachyon.

Défi 67 e

Réf. 52

Page 63

un tachyon en pleine nuit, en l'éclairant à l'aide d'une torche électrique, vous devriez alors tourner votre tête dans la direction opposée au bras qui tient la torche ! Cette condition découle également du diagramme de l'espace-temps : pouvez-vous voir pourquoi ? Personne n'a jamais observé un tel phénomène. Les tachyons, s'ils existaient, seraient de bien curieux objets : ils accéléreraient lorsqu'ils perdent de l'énergie ; un tachyon d'énergie nulle serait plus rapide que tout, avec une vitesse infinie, et la direction de son mouvement dépendrait du mouvement de l'observateur. Aucun objet possédant ces propriétés n'a été observé. Pire, comme nous l'avons vu, les tachyons sembleraient surgir du néant, contredisant les lois de conservation. Comme les tachyons ne peuvent pas être vus au sens habituel du terme, remarquez qu'ils ne peuvent pas non plus être touchés, puisque ces deux processus font appel aux interactions électromagnétiques, comme nous le verrons plus tard dans notre ascension de la Montagne Mouvement. Les tachyons ne peuvent donc pas représenter des objets au sens usuel du terme. Dans la deuxième partie de notre aventure, nous montrerons que la théorie quantique *exclut* véritablement l'existence des tachyons (réels). Cependant, comme nous le découvrirons, elle *réclame* en même temps l'existence de tachyons « virtuels ».

LA PARALLÈLE À UNE PARALLÈLE N'EST PAS PARALLÈLE – LA ROTATION DE THOMAS

En vérité, la relativité conduit à des conséquences étranges. Deux observateurs quelconques peuvent maintenir un bâton parallèle à un autre, même s'ils se déplacent l'un relativement à l'autre. Mais étrangement, étant donné une série de bâtons pour lesquels deux bâtons adjacents quelconques sont parallèles, le premier et le dernier ne seront généralement *pas* parallèles. En particulier, ils ne le seront *jamais* si les mouvements des divers observateurs pointent dans des directions différentes, comme dans le cas où l'ensemble des vecteurs vitesse forme une boucle.

Le dispositif le plus simple est indiqué sur la Figure 32. En relativité restreinte, un

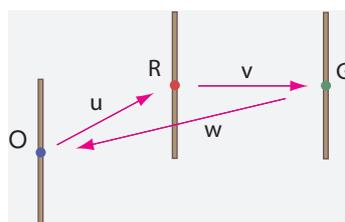


FIGURE 32 Si le bâton O est parallèle à R et R parallèle à G, alors le bâton O et le bâton G ne le sont pas.

Réf. 53

enchaînement général de mouvements purement translationnels ne donne pas à l'arrivée un mouvement purement translationnel, mais une translation plus une rotation. Par conséquent, les éléments extrémaux d'un ensemble de bâtons parallèles ne sont généralement pas parallèles.

Un exemple de cet effet survient dans le mouvement de rotation. Si nous marchons rapidement le long d'un cercle en tenant un bâton, et en maintenant constamment celui-ci parallèlement à la direction qu'il avait juste avant, à la fin de cette course circulaire le bâton fera un certain angle non nul par rapport à la direction d'origine. De manière identique, l'axe d'un corps en rotation tournant autour d'un deuxième corps ne pointera pas dans la même direction au bout d'une révolution. Cet effet est nommé la *précession de Thomas*, d'après Llewellyn Thomas, qui le découvrit en 1925, vingt années après la naissance de la relativité restreinte. Il avait échappé à l'attention d'une douzaine d'autres célèbres physiciens. La précession de Thomas est cruciale dans le fonctionnement interne des atomes, nous reviendrons là-dessus dans une section ultérieure de notre aventure. Ces phénomènes surprenants sont purement relativistes, et ne sont donc mesurables *que* dans le cas de vitesses comparables à celle de la lumière.

UNE HISTOIRE SANS FIN – TEMPÉRATURE ET RELATIVITÉ

Les écrits relatifs à la température sont confus. Albert Einstein et Wolfgang Pauli étaient d'accord sur le résultat suivant : la température T , relevée par un observateur se déplaçant à la vitesse v , est reliée à la température T_0 , mesurée par l'observateur au repos par rapport à la température ambiante, par

$$T = T_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (24)$$

Un observateur en mouvement mesure donc toujours des valeurs inférieures à celles mesurées par un observateur au repos.

En 1908, Max Planck utilisa cette expression, en combinaison avec la transformation correspondante de la chaleur, pour déduire que l'entropie est invariante sous les transformations de Lorentz. Étant le révélateur de la constante de Boltzmann k , Planck démontra de cette façon que cette constante est un invariant relativiste.

Réf. 54

Tous les chercheurs ne s'accordent pas sur cette expression. D'autres soutiennent que T et T_0 devraient être échangés dans la transformation de la température. De même, des puissances différentes de la simple racine carrée ont été proposées. L'origine de ces discordances est évidente : la température est définie uniquement pour des situations d'équilibre, c'est-à-dire pour des bains thermiques. Mais un bain thermique pour un observa-

teur n'en est pas un pour l'autre. Pour des vitesses lentes, un observateur en mouvement observe une situation qui est *presque* identique à un bain thermique, mais à des vitesses plus élevées ce problème devient plus subtil. La température est déduite de la vitesse des particules de matière, tels les atomes et les molécules. Pour des observateurs mobiles, il n'existe aucune méthode convenable pour mesurer la température. La valeur mesurée naïvement pour la température dépend même de l'étendue de l'énergie des particules de matière concernées ! En bref, l'équilibre thermique n'est pas un concept invariant selon l'observateur. Par conséquent, *aucune* formule de transformation de la température n'est correcte. (Avec quelques hypothèses supplémentaires, l'expression de Planck ne semble toutefois pas cohérente.) En fait, il n'existe même pas une quelconque observation expérimentale qui permettrait de vérifier une telle formule. La réalisation d'une telle mesure constitue un défi pour les futurs expérimentateurs – mais pas pour la relativité elle-même.

MÉCANIQUE RELATIVISTE

Puisque la vitesse de la lumière est constante et puisque les vitesses ne s'additionnent pas simplement, nous avons besoin de redéfinir les notions de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Nous avons par conséquent besoin de rebâtir la théorie de la mécanique à partir de zéro.

LA MASSE EN RELATIVITÉ

Page 72 En physique galiléenne, le rapport des masses entre deux corps a été défini en utilisant la notion de collision ; il était donné par l'opposé du rapport inverse des variations de vitesses

$$\frac{m_2}{m_1} = -\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} . \quad (25)$$

Défi 68 pe Toutefois, des expériences démontrent que cette expression doit être modifiée pour des vitesses approchant celle de la lumière. En fait, des expériences ne sont pas nécessaires : nous pouvons montrer cela uniquement par la pensée. Pouvez-vous y parvenir ?

Réf. 55 Il y a une seule solution à ce problème. Les deux théorèmes de conservations galiléennes, $\sum_i m_i \mathbf{v}_i = \text{constante}$ pour la quantité de mouvement et $\sum_i m_i = \text{constante}$ pour la masse, doivent être modifiés en

$$\sum_i \gamma_i m_i \mathbf{v}_i = \text{constante} \quad (26)$$

et

$$\sum_i \gamma_i m_i = \text{constante} . \quad (27)$$

Défi 69 s Ces expressions, qui demeureront inchangées jusqu'à la fin de notre escalade de la Montagne Mouvement, impliquent, entre autres, que la téléportation est *impossible* dans la nature. (Pouvez-vous le confirmer ?) Évidemment, afin de pouvoir retrouver la physique

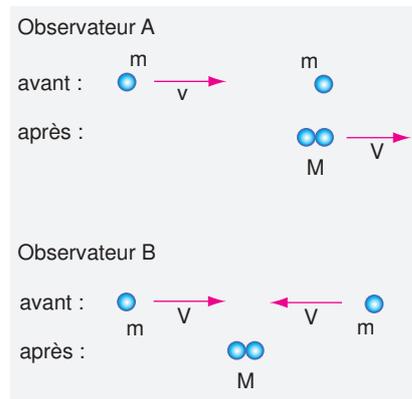


FIGURE 33 Une collision inélastique entre deux particules identiques, observée à partir de deux référentiels inertiels distincts.

galiléenne, la correction relativiste représentée par les facteurs γ_i doit être proche de la valeur 1 pour les vitesses quotidiennes, c'est-à-dire pour les vitesses qui sont très petites devant la vitesse de la lumière.

Même si nous ne connaissons pas la valeur de ce facteur de correction relativiste, nous pouvons la déduire à partir de la collision indiquée sur la Figure 33.

Dans le premier référentiel (A) nous avons $\gamma_v m v = \gamma_V M V$ et $\gamma_v m + m = \gamma_V M$. À partir des observations du second référentiel (B) nous déduisons que la composition de V avec V donne v , en d'autres termes que

Défi 70 e

$$v = \frac{2V}{1 + V^2/c^2} \tag{28}$$

Lorsque ces équations sont combinées, la correction relativiste γ se révèle être dépendante de la grandeur de la vitesse v à travers

$$\gamma_v = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{29}$$

À l'aide de cette expression, et d'une généralisation de la physique galiléenne, le rapport des masses entre deux particules incidentes est défini comme étant le rapport

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{\Delta(\gamma_2 v_2)}{\Delta(\gamma_1 v_1)} \tag{30}$$

Page 76

(Nous ne donnons pas ici la définition généralisée de la masse, mentionnée au chapitre sur la mécanique galiléenne, c'est-à-dire celle qui est fondée sur le rapport des accélérations, parce qu'elle contient quelques subtilités que nous découvrirons bientôt.) Les facteurs de correction γ_i assurent que la masse définie par cette équation est la même que celle définie en mécanique galiléenne, et qu'elle reste la même pour tous les types de collisions qu'un corps peut subir*. De cette façon, la masse demeure une quantité

* Les résultats qui suivent montrent également que $\gamma = 1 + T/mc^2$, où T représente l'énergie cinétique d'une

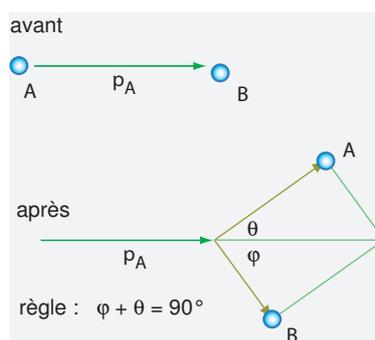


FIGURE 34 Une règle très utile pour jouer au billard non relativiste.

caractérisant la difficulté à accélérer un corps, et elle peut toujours être utilisée pour des ensembles de corps.

En suivant l'exemple de la physique galiléenne, nous appelons la quantité

$$\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v} \quad (31)$$

le *vecteur quantité de mouvement relativiste (linéaire)* d'une particule. À nouveau, la quantité de mouvement totale est une quantité *conservée* pour tout système n'étant pas sujet à des influences externes, et cette conservation est une conséquence directe de la manière dont la masse est définie.

Pour des vitesses faibles, où $\gamma \approx 1$, la quantité de mouvement relativiste est identique à celle de la physique galiléenne, et est proportionnelle à la vitesse. Mais pour des vitesses élevées, la quantité de mouvement augmente plus vite que la vitesse, convergeant vers l'infini lorsqu'elle s'approche de la vitesse de la lumière.

POURQUOI LE JEU DU BILLARD RELATIVISTE EST PLUS DIFFICILE

Il existe une propriété bien connue qui concerne les collisions entre une sphère ou une particule en mouvement et une autre au repos de *même masse*, et qui est primordiale lorsque nous jouons au billard, ou snooker. À l'issue d'une telle collision, les deux sphères s'en iront en formant un *angle droit* l'une par rapport à l'autre, comme indiqué dans la Figure 34.

Toutefois, les expériences montrent que la règle de l'angle droit ne s'applique *pas* aux collisions relativistes. En fait, en utilisant la conservation de la quantité de mouvement, et en faisant preuve d'un peu de dextérité, vous pouvez calculer que

$$\tan \theta \tan \varphi = \frac{2}{\gamma + 1}, \quad (32)$$

où les angles sont définis dans la Figure 35. Il apparaît que la somme $\varphi + \theta$ est *plus petite* que l'angle droit dans le cas relativiste. Des vitesses relativistes modifient ainsi complètement la donne au jeu du billard. En réalité, chaque physicien des accélérateurs le sait :

Défi 72 e

Défi 71 e particule.

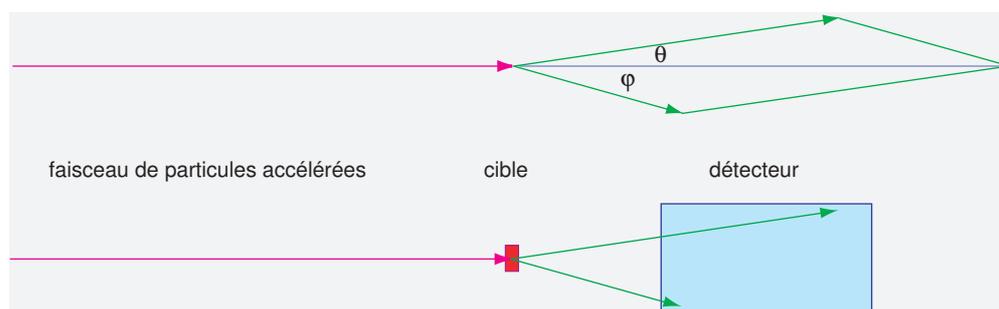


FIGURE 35 Les dimensions des détecteurs dans les accélérateurs de particules sont fondées sur la règle de l'angle du billard relativiste.

Réf. 22

Défi 73 pe

pour des électrons ou des protons, ces angles peuvent facilement être déduits à partir des photographies prises dans les chambres à brouillard, lesquelles indiquent les traces laissées par les particules lorsqu'elles les traversent. Toutes ces photographies confirment l'expression ci-dessus. En fait, les formes des détecteurs sont choisies en fonction de l'expression (32), comme esquissé sur la Figure 35. Si cette formule – et la relativité – était fausse, la plupart de ces détecteurs ne pourraient pas fonctionner, puisqu'ils manqueraient la plupart des particules après la collision. En fait, ces expériences prouvent également la validité de la formule de la composition des vitesses. Pouvez-vous le montrer ?

LA MASSE EST DE L'ÉNERGIE CONCENTRÉE

Défi 74 s

Revenons à la collision inélastique et colinéaire de la Figure 33. Quelle est la masse M du système à l'arrivée ? Le calcul montre que

$$M/m = \sqrt{2(1 + \gamma_v)} > 2. \quad (33)$$

En d'autres termes, la masse du système final est *plus grande* que la somme des deux masses m originales. Par opposition à la mécanique galiléenne, la somme de toutes les masses dans un système *n'est pas* une quantité conservée. Seule la somme $\sum_i \gamma_i m_i$ des masses corrigées est conservée.

La relativité fournit la réponse à cet embarras. Tout rentre dans l'ordre si, pour l'énergie E d'un objet de masse m et de vitesse v , nous utilisons l'expression

$$E = \gamma m c^2 = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (34)$$

en l'appliquant à la fois au système tout entier et à chacun de ses constituants. La conservation de la masse corrigée peut alors être vue comme étant la conservation de l'énergie, simplement sans le facteur c^2 . Dans l'exemple des deux masses identiques collées l'une à l'autre, les deux particules sont décrites chacune par la masse et l'énergie, et le système résultant possède une énergie E donnée par la somme des énergies des deux particules. En particulier, il en résulte que l'énergie E_0 d'un corps *au repos* et sa masse m sont reliées

par

$$E_0 = mc^2, \quad (35)$$

ce qui est probablement la découverte la plus admirable et la plus célèbre de la physique moderne. Puisque c^2 est si grand, nous pouvons dire que *la masse est de l'énergie concentrée*. En d'autres termes, la relativité restreinte exprime que chaque masse possède de l'énergie, et que chaque forme d'énergie contenue dans un système possède une masse. L'accroissement de l'énergie d'un système entraîne l'augmentation de sa masse, et la diminution du contenu en énergie conduit à une diminution de la masse. En bref, si une bombe explose à l'intérieur d'une boîte fermée, la masse, le poids et la quantité de mouvement de la boîte sont les mêmes avant et après l'explosion, mais la masse cumulée des débris à l'intérieur de la boîte sera *plus petite* qu'auparavant. Toutes les bombes – pas seulement les nucléaires – tirent donc leur énergie d'une réduction de la masse. De même, chaque action réalisée par un système – tels une caresse, un sourire ou un regard – tire son énergie d'une diminution de la masse.

L'énergie cinétique T est donc donnée par

$$T = \gamma mc^2 - mc^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}m\frac{v^4}{c^2} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}m\frac{v^6}{c^4} + \dots \quad (36)$$

Défi 75 e (en utilisant la formule du binôme de Newton) laquelle se réduit à l'expression galiléenne uniquement pour des petites vitesses.

L'équivalence masse-énergie $E = \gamma mc^2$ implique que le prélèvement de *n'importe quelle* énergie sur la matière conduit à une diminution de sa masse. Lorsqu'une personne joue du piano, réfléchit ou court, sa masse décroît. Lorsqu'une tasse de thé refroidit ou qu'une étoile brille, leur masse décroît. L'équivalence masse-énergie s'imisce partout dans la nature.

Défi 76 s Par ailleurs, nous devons faire attention de bien distinguer la transformation de la *masse* en énergie de la transformation de la *matière* en énergie. Cette dernière est beaucoup plus rare. Pouvez-vous en fournir quelques exemples ?

La relation masse-énergie (34) implique la mort de nombreux récits fantaisistes de science-fiction. Elle signifie qu'il n'existe *pas* de sources d'énergie non découvertes sur ou près de la Terre. Si de telles sources existaient, elles seraient mesurables à travers leur masse. De nombreuses expériences ont recherché de tels effets, et sont toujours en train de le faire, en vain. Il n'y a pas d'énergie gratuite disponible dans la nature*.

La relation masse-énergie $m = E_0/c^2$ implique également que nous avons besoin d'environ 90 mille millions kJ (ou 21 mille millions kcal) pour accroître notre poids d'un seul gramme. Bien entendu, les diététiciens ont des opinions légèrement divergentes sur cette question ! En fait, les êtres humains obtiennent leur énergie quotidienne à partir des substances qu'ils mangent, boivent et respirent en réduisant cette masse cumulée avant de l'expulser. Cependant, *ce défaut de masse chimique* survenant lorsque du combustible est consommé ne peut pas toujours être mesuré en pesant la matière avant et après la réaction : la différence est extrêmement petite, à cause du facteur de conversion impliqué qui

* Il est possible qu'il existe deux formes d'énergie extrêmement diluées et non encore découvertes, que l'on appelle la *matière noire* et (de façon confuse) l'*énergie sombre*, éparpillées partout dans l'univers. Elles sont déduites de mesures de masses (quoique laborieuses). Cette énigme n'a pas encore été résolue.

est énorme. En réalité, pour toutes les réactions chimiques, les énergies de liaison sont d'environ 1 aJ (6 eV) par liaison : cela donne une variation de poids de l'ordre d'une partie pour 10^{10} , trop imperceptible pour être mesurée par des individus qui se pèsent ou pour déterminer les différences de masse entre les aliments et les excréments. Par conséquent, pour des processus chimiques courants, la masse peut être considérée comme étant constante, en accord avec la physique galiléenne.

L'équivalence masse-énergie a été confirmée par toutes les expériences réalisées jusqu'à ce jour. Le procédé de mesure utilisé pour le *défaut de masse nucléaire* est celui qui est le plus simple. L'expérience la plus précise, depuis 2005, a confirmé la relation masse-énergie jusqu'à plus de 6 décimales, en comparant d'une part la différence de masse de noyaux avant et après la capture de neutrons, et d'autre part l'énergie émise par le rayon gamma.

Réf. 56

Des méthodes modernes de mesure de la masse de molécules uniques ont même permis de mesurer le défaut de masse *chimique*, en comparant la masse d'une seule molécule par rapport à celle de ses atomes constitutifs. Le groupe de David Pritchard a développé les *pièges de Penning*, qui permettent de déterminer les masses à partir des mesures de fréquence. La précision accessible par ces expériences de résonance cyclotron est suffisante pour confirmer la relation $\Delta E_0 = \Delta mc^2$ pour les liaisons chimiques. À l'avenir, une précision accrue permettra même de déterminer des énergies de liaison de cette manière avec exactitude. Puisque l'énergie de liaison est souvent rayonnée sous forme de lumière, nous pouvons dire que ces techniques modernes permettent de *peser* la lumière.

Réf. 57

La première dérivation d'Einstein de la relation masse-énergie était fondée sur la réflexion qu'il mena à propos de la lumière et de sa masse. Lorsqu'un objet émet deux rayons lumineux identiques dans des directions opposées, son énergie décroît de la quantité émise. Puisque les deux rayons lumineux sont identiques en énergie et en quantité de mouvement, le corps ne se déplace pas. Si nous décrivons la même situation du point de vue d'un observateur en mouvement, nous déduisons à nouveau que l'énergie au repos de cet objet est

Défi 77 e

$$E_0 = mc^2 . \quad (37)$$

En résumé, tous les processus physiques, y compris les collisions, nécessitent un traitement relativiste à chaque fois que l'énergie concernée représente une portion assez importante de l'énergie au repos.

Toute augmentation de l'énergie entraîne une augmentation de la masse. Par conséquent, le fait de chauffer un corps le rend également plus lourd. Cependant, cet effet est si ténu que personne ne l'a mesuré jusqu'à ce jour. C'est un défi pour les expériences futures de pouvoir le réaliser un jour.

Comment l'énergie et la quantité de mouvement sont-elles reliées ? Les définitions de la quantité de mouvement (31) et de l'énergie (34) conduisent à deux relations fondamentales. En premier lieu, leurs grandeurs sont reliées par

Défi 78 e

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2 \quad (38)$$

pour tous les systèmes relativistes, qu'ils soient des objets ou, comme nous le verrons ci-après, du rayonnement. Pour le *vecteur* de la quantité de mouvement, nous obtenons

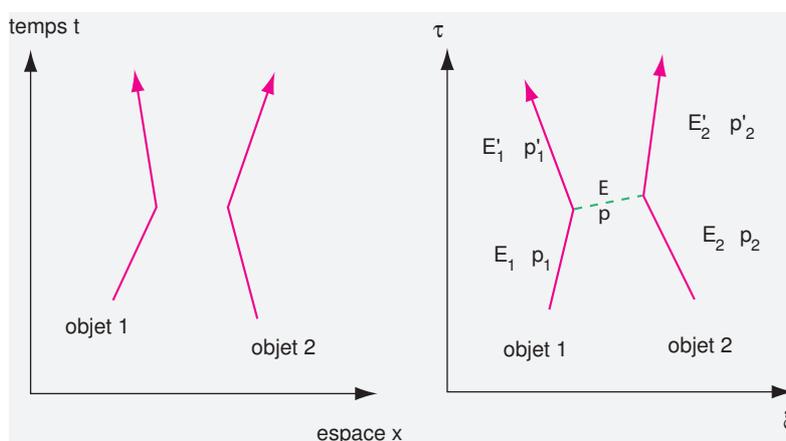


FIGURE 36 Diagramme d'espace-temps d'une collision pour deux observateurs.

l'autre relation importante

$$\mathbf{p} = \frac{E}{c^2} \mathbf{v}, \quad (39)$$

Défi 79 e

qui est également valide pour *n'importe quel* type d'énergie en mouvement, qu'il soit un objet, un rayon ou une pulsation de rayonnement*. Nous utiliserons souvent ces deux relations dans le reste de notre ascension de la Montagne Mouvement, et en particulier dans la discussion qui suit.

COLLISIONS, OBJETS VIRTUELS ET TACHYONS

Nous venons juste de voir que, dans le cas des collisions relativistes, la conservation de l'énergie et celle de la quantité de mouvement totale sont des conséquences implicites de la définition de la masse. Analysons maintenant les collisions plus en détail, en utilisant ces nouveaux concepts. Une *collision* est un processus, c'est-à-dire une succession d'événements, pour lequel

- la quantité de mouvement totale avant l'interaction et après l'interaction reste la même,
- la quantité de mouvement est échangée dans une petite région de l'espace-temps,
- pour des vitesses faibles, la description galiléenne demeure valide.

Réf. 58

Dans la vie quotidienne un *choc*, c'est-à-dire une interaction de courte distance, est l'événement par lequel deux objets modifient leur quantité de mouvement. Mais ces deux objets qui se heurtent sont situés en des points *différents* lorsque cela se produit. Une collision est par conséquent décrite par un diagramme d'espace-temps tel que celui de gauche dans la Figure 36, évocateur de la constellation d'Orion. Il est facile de vérifier que le processus décrit par un tel diagramme est une collision en accord avec la définition donnée ci-dessus.

Défi 80 e

La partie droite de la Figure 36 représente le même processus vu dans un autre référentiel, grec. L'observateur grec affirme que le premier objet a modifié sa quantité de

* En notation quadrivectorielle, nous pouvons écrire $v/c = \mathbf{P}/P_0$, où $P_0 = E/c$.

mouvement *avant* le second. Cela signifie que durant un court intervalle de temps l'énergie et la quantité de mouvement ne seraient *pas* conservées !

La seule manière de donner un sens à cette situation est de supposer qu'il y a échange d'un troisième objet, représenté par une ligne en pointillés. Découvrons quelles sont les propriétés de ce troisième objet. Si nous notons les masses, les énergies et les quantités de mouvement des deux corps à l'aide d'un indice numérique inférieur, et si nous les notons prime après la collision, la masse inconnue m vérifie

Défi 81 e

$$m^2 c^4 = (E_1 - E'_1)^2 - (p_1 - p'_1)^2 c^2 = 2m_1^2 c^4 - 2E_1 E'_1 \left(\frac{1 - v_1 v'_1}{c^2} \right) < 0. \quad (40)$$

C'est un résultat étrange, parce qu'il signifie que la masse inconnue est un nombre *imaginaire** ! Par-dessus tout, nous voyons aussi tout de suite, d'après le deuxième graphique, que l'objet échangé avance plus vite que la lumière. C'est un *tachyon*, d'après le mot grec ταχύς « rapide ». En d'autres termes, les collisions impliquent l'existence d'un mouvement plus rapide que la lumière ! Nous verrons plus tard que les collisions sont en réalité les *seuls* processus où les tachyons jouent un rôle dans la nature. Puisque les objets échangés n'apparaissent que pendant les collisions, et jamais en tant que tels, ils sont appelés des objets *virtuels*, pour les distinguer des objets *réels* usuels, et peuvent se déplacer librement sans aucune restriction**. Nous étudierons leurs propriétés un peu plus tard, lorsque nous viendrons à discuter de la théorie quantique.

Dans la nature, un tachyon est toujours un objet virtuel. Les objets réels sont des *bradyons* – d'après la racine grecque βραδύς « lent » – ou objets se déplaçant moins vite que la lumière. Remarquez d'une part que les tachyons, en dépit de leur extrême célérité, n'autorisent pas un transport de l'énergie qui soit plus rapide que la lumière, et d'autre part qu'ils ne violent pas le principe de causalité si, et seulement si, ils sont émis ou absorbés avec une probabilité identique. Pouvez-vous confirmer tout cela ?

Défi 82 pe

Lorsque nous étudierons la théorie quantique, nous découvrirons également qu'une interaction de contact entre des objets est décrite en général non par l'échange d'un *unique* objet virtuel, mais par un *flux* continu de particules virtuelles. Pour des collisions courantes entre des objets familiers, l'interaction se révèle être d'origine électromagnétique. Dans ce cas, les particules échangées sont des photons virtuels. En d'autres termes, quand notre main touche une autre main, quand elle pousse une pierre, ou quand une montagne soutient les arbres qui poussent sur ses flancs, des flux de photons virtuels sont continuellement échangés.

Page ??

* Il est courant de modifier les relations masse-énergie et masse-quantité de mouvement des tachyons en $E = \pm mc^2 / \sqrt{v^2/c^2 - 1}$ et $p = \pm mv / \sqrt{v^2/c^2 - 1}$: cela revient à redéfinir m . Après cette redéfinition, les tachyons possèdent une masse *réelle*. Les relations de l'énergie et de la quantité de mouvement montrent que les tachyons perdent de l'énergie et de la quantité de mouvement lorsqu'ils vont plus vite. (De façon déconcertante, un unique tachyon situé dans une boîte pourrait nous fournir toute l'énergie que nous souhaiterions.) Les deux signes pour ces relations de l'énergie et de la quantité de mouvement doivent être maintenus, parce que sinon l'équivalence entre tous les observateurs inertiels ne serait pas vérifiée. Les tachyons ne possèdent donc pas une énergie minimale ou une quantité de mouvement minimale.

** Plus précisément, une particule virtuelle n'obéit pas à la relation $m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$, valide pour les particules réelles.

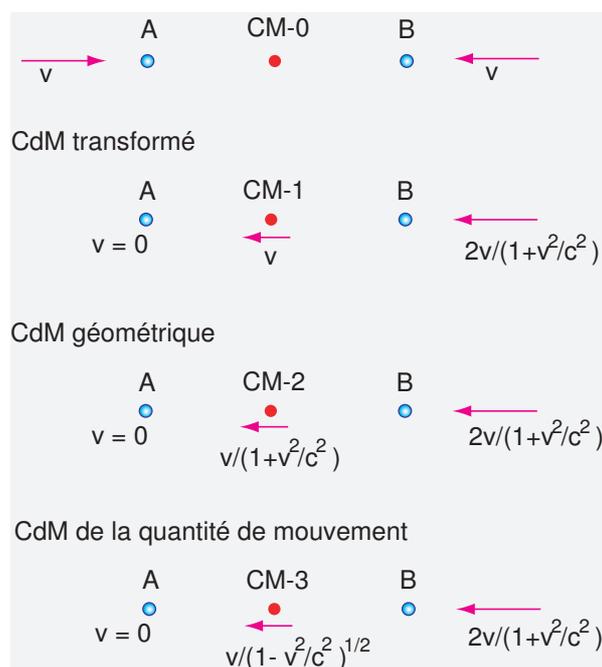


FIGURE 37 Il n'existe aucune manière de définir un centre de masse relativiste.

Défi 83 s

Il existe un autre secret dissimulé dans les collisions. Dans la partie droite de la Figure 36, le tachyon est émis par le premier objet et absorbé par le second. Toutefois, il est facile d'imaginer un observateur pour lequel la situation opposée se produit. En bref, la direction de la trajectoire d'un tachyon dépend de l'observateur ! En réalité, c'est une allusion à l'*antimatière*. Dans les diagrammes d'espace-temps, la matière et l'*antimatière* voyagent dans des directions opposées. Le lien entre la relativité et l'*antimatière* deviendra également plus flagrant dans la théorie quantique.

Page ??

SYSTÈMES DE PARTICULES – ABSENCE DE CENTRE DE MASSE

La relativité nous oblige également à abandonner le concept de *centre de masse* qui nous est cher. Nous pouvons déjà le remarquer en prenant l'exemple le plus simple possible : celui de deux objets identiques qui se heurtent.

Réf. 59

La Figure 37 montre que, à partir du point de vue où une des deux particules incidentes est au repos, il existe au moins trois manières différentes pour définir le centre de masse. En d'autres termes, le centre de masse n'est pas un concept invariant par rapport à l'observateur. Nous pouvons déduire à partir de la figure que cette notion a un sens uniquement pour des systèmes dont les constituants se déplacent avec des vitesses *faibles* les uns par rapport aux autres. Pour des systèmes plus généraux, le centre de masse n'est pas définissable de manière unique. Cela représentera-t-il une entrave dans notre ascension ? Non. Nous sommes plus attachés au mouvement de particules prises séparément qu'à celui d'objets ou de systèmes composés.

POURQUOI LA PLUPART DES MOUVEMENTS SONT-ILS SI LENTS ?

Pour la plupart des systèmes courants, les intervalles de temps mesurés par deux observateurs distincts sont pratiquement égaux ; ce n'est que pour des vitesses relatives élevées, typiquement de plus de quelques pour cent de la vitesse de la lumière, qu'une différence perceptible se fait ressentir. La plupart de ces situations sont microscopiques. Nous avons déjà mentionné le cas des électrons à l'intérieur du tube d'un téléviseur ou dans un accélérateur de particules. Les particules issues des rayons cosmiques en sont un autre exemple : leur énergie phénoménale a entraîné un grand nombre de mutations qui sont à la base de l'évolution des animaux et des plantes sur notre planète. Nous découvrirons plus loin que les particules impliquées dans la radioactivité sont également relativistes.

Mais pourquoi n'observons-nous jamais de corps *macroscopique* rapide ? Des corps mobiles, y compris des observateurs, ayant des vitesses relativistes possèdent une propriété qu'on ne rencontre pas dans la vie quotidienne : lorsqu'ils sont impliqués dans une collision, une partie de leur énergie est convertie en matière nouvelle via $E = \gamma mc^2$. Dans l'histoire du cosmos cela est survenu si fréquemment que pratiquement tous les corps qui sont demeurés en mouvement relativiste sont des particules microscopiques.

Défi 84 s Une deuxième raison qui explique la disparition du mouvement relativement rapide est l'amortissement par rayonnement. Pouvez-vous imaginer ce qui survient aux charges électriques pendant les collisions, ou dans un bain de lumière ?

Page 210 En résumé, presque toute la matière contenue dans l'univers se déplace à des vitesses relativement petites par rapport à la matière restante. Les quelques contre-exemples connus sont soit très anciens, comme les jets issus des quasars déjà mentionnés, soit cessent après un court laps de temps. Les énergies colossales nécessaires pour le mouvement relativiste macroscopique sont toujours rencontrées dans les explosions de supernovae, mais elles cessent d'exister après quelques semaines seulement. Finalement, l'univers est principalement empli de mouvement lent parce qu'il est *vieux*. Nous déterminerons son âge bientôt.

L'HISTOIRE DE LA FORMULE DE L'ÉQUIVALENCE MASSE-ÉNERGIE DE DE PRETTO ET EINSTEIN

Il a fallu plusieurs mois à Albert Einstein, après la parution de son premier article sur la relativité restreinte, avant de déduire l'expression

$$E = \gamma mc^2 \quad (41)$$

Réf. 11 laquelle est souvent considérée comme étant la plus célèbre formule de la physique. Il la publia dans un deuxième article indépendant vers la fin de l'an 1905. Indubitablement, cette formule aurait pu être révélée une trentaine d'années plus tôt, à partir de la théorie de l'électromagnétisme.

En fait, au moins une personne déduisit ce résultat avant Einstein. En 1903 et 1904, *avant* le premier article d'Einstein sur la relativité, un ingénieur italien peu connu, Olinto De Pretto, fut le premier à calculer, discuter et publier la formule $E = mc^{2*}$. Il se pourrait qu'Einstein ait eu cette idée à partir de la formule de De Pretto, probablement

* Umberto Bartocci, professeur de mathématiques à l'université de Pérouse en Italie, publia les détails de cette surprenante histoire dans plusieurs articles. Le récit complet se trouve dans son ouvrage UM-

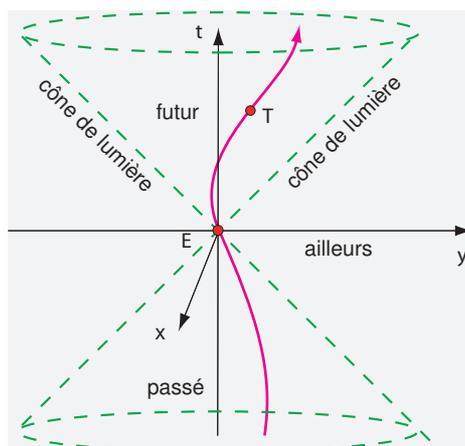


FIGURE 38 Le diagramme d'espace-temps d'un objet mobile T.

par le biais de Michele Besso, un de ses amis, ou d'autres amis de langue italienne qu'il avait rencontrés lorsqu'il rendait visite à ses parents, qui habitaient en Italie à l'époque. Bien sûr, l'importance des efforts d'Einstein n'en est pas diminuée pour autant.

Réf. 60

En fait, une formule similaire avait également été déduite en 1904 par Friedrich Hasenöhl et publiée encore une fois dans *Annalen der Physik* en 1905, avant Einstein, quoique avec un facteur numérique erroné, à cause d'une erreur de calcul. La formule $E = mc^2$ constitue également une partie des diverses expressions situées dans deux publications d'Henri Poincaré en 1900. Le véritable héros de l'histoire pourrait aussi bien être Tolver Preston, qui dissertait déjà sur l'équivalence entre la masse et l'énergie en 1875, dans son livre *Physics of the Ether*. L'équivalence masse-énergie flottait donc en réalité dans l'air du temps, attendant tout simplement d'être révélée.

Défi 85 s

Dans les années 1970, il y eut une histoire similaire : une relation élémentaire entre l'accélération gravitationnelle et la température du vide fut mise en lumière. Ce résultat avait attendu pendant plus de 50 ans avant d'être découvert. En réalité, un grand nombre de résultats similaires et antérieurs étaient consignés dans la littérature. D'autres relations élémentaires pourraient-elles être cachées dans la physique moderne, attendant d'être révélées ?

QUADRIVECTEURS

Pour décrire le mouvement de manière cohérente pour *tous* les observateurs, nous devons introduire quelques nouveaux objets mathématiques. Avant tout, le mouvement des particules est perçu comme étant une succession d'événements. Pour décrire les événements avec précision, nous utilisons des coordonnées événementielles, également appelées éléments à *quatre coordonnées*. Ils sont notés comme suit

$$\mathbf{X} = (ct, \mathbf{x}) = (ct, x, y, z) = X^i . \quad (42)$$

BERTO BARTOCCI, *Albert Einstein e Olinto De Pretto : la vera storia della formula più famosa del mondo*, Ulteja, 1998.

De cette manière, un événement est un point dans l'espace-temps quadridimensionnel et est décrit par quatre coordonnées. Les coordonnées sont énumérées ainsi : celui d'indice zéro, à savoir le temps $X^0 = ct$, d'indice 1, généralement $X^1 = x$, d'indice 2, $X^2 = y$, et d'indice 3, $X^3 = z$. Nous pouvons alors définir une *distance* d entre des événements comme étant la longueur du vecteur différence. En fait, nous utilisons généralement le carré de la longueur, pour éviter ces racines carrées peu maniables. En relativité restreinte, la grandeur (« longueur au carré ») d'un vecteur est toujours définie par

$$\mathbf{X}\mathbf{X} = X_0^2 - X_1^2 - X_2^2 - X_3^2 = ct^2 - x^2 - y^2 - z^2 = X_a X^a = \eta_{ab} X^a X^b = \eta^{ab} X_a X_b. \quad (43)$$

Dans cette équation nous avons introduit pour la première fois deux notations qui sont utiles en relativité. En premier lieu, nous sommes automatiquement et implicitement sur les indices répétés. Ainsi, $X_a X^a$ représente la somme de tous les produits $X_a X^a$ si a est un indice qui prend toutes les valeurs de l'intervalle. Deuxièmement, pour chaque quadrivecteur \mathbf{X} nous discernons deux manières d'écrire les coordonnées, à savoir les coordonnées avec les indices en position haute et les coordonnées avec les indices en position basse. (En trois dimensions, nous utilisons uniquement des indices inférieurs.) Elles sont reliées par la relation générale

$$X_a = \eta_{ab} X^b = (ct, -x, -y, -z), \quad (44)$$

où nous avons introduit la *métrique* η^{ab} , une abréviation de la matrice*

$$\eta^{ab} = \eta_{ab} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (45)$$

Ne paniquez pas : ce sera tout, et ce ne sera pas plus compliqué ! Revenons maintenant à la physique.

La grandeur d'un vecteur position, ou distance, également nommé *intervalle* d'espace-temps, est essentiellement égale au temps propre multiplié par c . Le *temps propre* est le temps indiqué par une horloge se déplaçant en ligne droite et avec une vitesse constante depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée dans l'espace-temps. La différence par rapport aux vecteurs classiques (trivecteurs) est que la grandeur de l'intervalle peut être positive, négative ou même nulle. Par exemple, si les points de départ et d'arrivée dans l'espace-temps réclament un mouvement à la vitesse de la lumière, le temps propre est nul (cela est requis pour des vecteurs nuls). Si le mouvement est plus lent que la vitesse de la lumière, le temps propre au carré est positif et la distance est du genre temps. Pour des intervalles négatifs et donc des temps propres imaginaires, la distance est du genre espace**. Un tour d'horizon simplifié en est donné par la [Figure 38](#).

Page 40

* Remarquez que 30 % de tous les manuels de physique emploient la valeur négative de η pour la métrique, ce que l'on appelle la *convention de genre espace*, et emploient donc des signes opposés à cette définition. Dans ce texte, comme dans les 70 % des textes de physique, nous utilisons la *convention de genre temps*.

** Dans le dernier cas, la valeur négative de la grandeur, laquelle est un nombre positif, est appelée la *distance*

Nous sommes maintenant capables de calculer et de mesurer le mouvement en quatre dimensions. Les mesures sont fondées sur une seule idée centrale. Nous ne pouvons pas définir la vitesse d'une particule comme la dérivée de ses coordonnées par rapport au temps, puisque le temps et les intervalles de temps dépendent de l'observateur. La solution consiste à définir toutes les observables en fonction du *temps propre* τ mentionné juste ci-dessus, qui est défini comme étant le temps indiqué par une horloge attachée à l'objet. En relativité, le mouvement et le changement sont toujours mesurés par rapport à des horloges fixées au système en mouvement. En particulier, la *vitesse relativiste* ou *quadrivitesse* \mathbf{U} d'un corps est définie comme étant la variation infinitésimale des *quatre coordonnées*, ou coordonnées événementielles, $\mathbf{X} = (ct, \mathbf{x})$ par rapport au temps propre, c'est-à-dire comme

$$\mathbf{U} = d\mathbf{X}/d\tau . \quad (46)$$

Les coordonnées \mathbf{X} sont mesurées dans le système de coordonnées défini par l'observateur inertiel choisi. La valeur de la vitesse \mathbf{U} dépend de l'observateur ou du système de coordonnées utilisé ; ainsi la vitesse dépend de l'observateur, comme c'est le cas dans la vie quotidienne. En utilisant $dt = \gamma d\tau$ et donc

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{dx}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \gamma \frac{dx}{dt} , \quad \text{où comme d'habitude} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} , \quad (47)$$

nous obtenons la relation avec la vitesse classique $\mathbf{v} = d\mathbf{x}/dt$:

$$u^0 = \gamma c , \quad u^i = \gamma v_i \quad \text{ou} \quad \mathbf{U} = (\gamma c, \gamma \mathbf{v}) . \quad (48)$$

Pour des vitesses faibles nous avons $\gamma \approx 1$, et donc les trois dernières composantes de la quadrivitesse sont celles de la vitesse galiléenne usuelle. Pour la norme de la quadrivitesse \mathbf{U} nous trouvons $\mathbf{U}\mathbf{U} = U_a U^a = \eta_{ab} U^a U^b = c^2$, qui est par conséquent indépendant de la norme de la vitesse \mathbf{v} et fait de celui-ci un vecteur de genre temps, c'est-à-dire un vecteur situé à l'intérieur du cône de lumière*.

Remarquez que la grandeur d'un quadrivecteur peut être nulle bien que toutes ses composantes soient différentes de zéro. Un tel vecteur est qualifié de *nul*. Quels mouvements possèdent un vecteur vitesse nul ?

Défi 87 s

propre au carré. La distance propre est la longueur mesurée par un odomètre si l'objet se déplace avec celui-ci.

* En général, un *quadrivecteur* est défini comme étant une quantité (h_0, h_1, h_2, h_3) qui se transforme de la manière suivante

$$\begin{aligned} h'_0 &= \gamma_V (h_0 - h_1 V/c) \\ h'_1 &= \gamma_V (h_1 - h_0 V/c) \\ h'_2 &= h_2 \\ h'_3 &= h_3 \end{aligned} \quad (49)$$

quand on passe d'un observateur inertiel à un autre se déplaçant avec une vitesse relative V dans la direction x . Les généralisations correspondantes pour les autres coordonnées peuvent en être déduites. Cette relation nous permet d'inférer les lois de transformation pour n'importe quel trivecteur. Pouvez-vous déduire la formule de composition des vitesses (9) à partir de cette définition, en l'appliquant à la quadrivitesse ?

Défi 86 s

De manière identique, l'accélération relativiste ou quadri-accélération \mathbf{B} d'un corps est définie comme suit

$$\mathbf{B} = d\mathbf{U}/d\tau = d^2\mathbf{X}/d\tau^2 . \tag{50}$$

Réf. 61 En utilisant $dy/d\tau = \gamma dy/dt = \gamma^4 \mathbf{v}\mathbf{a}/c^2$, nous obtenons les relations suivantes entre les quatre composantes de \mathbf{B} et l'accélération $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$:

$$B^0 = \gamma^4 \frac{\mathbf{v}\mathbf{a}}{c} , \quad B^i = \gamma^2 a_i + \gamma^4 \frac{(\mathbf{v}\mathbf{a})v_i}{c^2} . \tag{51}$$

Défi 88 s La grandeur b de la quadri-accélération est facilement retrouvée via $\mathbf{B}\mathbf{B} = \eta_{cd}B^c B^d = -\gamma^4(a^2 + \gamma^2(\mathbf{v}\mathbf{a})^2/c^2) = -\gamma^6(a^2 - (\mathbf{v} \times \mathbf{a})^2/c^2)$. Remarquez qu'elle dépend de la valeur de l'accélération \mathbf{a} . La grandeur de la quadri-accélération est aussi appelée l'accélération propre car $\mathbf{B}^2 = -a^2$ si $v = 0$. (Quel est le rapport qui existe entre la quadri-accélération et la tri-accélération pour un observateur se déplaçant à la même vitesse que l'objet ?) Nous notons que la quadri-accélération se trouve à l'extérieur du cône de lumière, c'est-à-dire qu'il est un vecteur de genre espace, et que $\mathbf{B}\mathbf{U} = \eta_{cd}B^c U^d = 0$, ce qui signifie que la quadri-accélération est toujours perpendiculaire à la quadrivitesse*. Nous remarquons également que les accélérations, contrairement aux vitesses, ne peuvent pas être qualifiées de relativistes : la différence entre b_i et a_i , ou entre leurs deux normes, ne dépend pas de la valeur de a_i , mais uniquement de la valeur de la vitesse v . En d'autres termes, les accélérations nécessitent un traitement relativiste seulement lorsque les vitesses impliquées sont relativistes. Si les vitesses concernées sont faibles, les plus fortes accélérations peuvent quand même être traitées à l'aide des méthodes galiléennes.

Page 79 Quand l'accélération \mathbf{a} est parallèle à la vitesse \mathbf{v} , nous obtenons $B = \gamma^3 a$, quand \mathbf{a} est perpendiculaire à \mathbf{v} , comme dans le cas du mouvement circulaire, nous obtenons $B = \gamma^2 a$. Nous réutiliserons ce résultat plus loin.

QUANTITÉ DE MOUVEMENT RELATIVISTE

Pour décrire le mouvement, nous avons également besoin du concept de quantité de mouvement. La quantité de mouvement relativiste ou quadri-impulsion** est définie par

$$\mathbf{P} = m\mathbf{U} \tag{54}$$

* De façon similaire, le jerk relativiste (dérivée de l'accélération par rapport au temps) ou quadri-jerk \mathbf{J} d'un corps est défini par

$$\mathbf{J} = d\mathbf{B}/d\tau = d^2\mathbf{U}/d\tau^2 . \tag{52}$$

Défi 89 e Pour la relation avec le tri-jerk $\mathbf{j} = d\mathbf{a}/dt$ nous obtenons alors

$$\mathbf{J} = (J^0, J^i) = \left(\frac{\gamma^5}{c} (\mathbf{j}\mathbf{v} + a^2 + 4\gamma^2 \frac{(\mathbf{v}\mathbf{a})^2}{c^2}) , \gamma^3 j_i + \frac{\gamma^5}{c^2} ((\mathbf{j}\mathbf{v})v_i + a^2 v_i + 4\gamma^2 \frac{(\mathbf{v}\mathbf{a})^2 v_i}{c^2} + 3(\mathbf{v}\mathbf{a})a_i) \right) \tag{53}$$

Défi 90 pe que nous utiliserons un peu plus tard. De façon étonnante, \mathbf{J} ne s'annule pas lorsque \mathbf{j} s'annule. Pourquoi ? ** Comme nous l'avons déjà souligné dans le premier chapitre, le terme impulsion est utilisé abusivement en relativité pour désigner la quantité de mouvement (quadri-impulsion, impulsion-énergie, etc.) : en toute rigueur, il faudrait dire quadri-quantité de mouvement et quantité de mouvement-énergie. [N.D.T.]

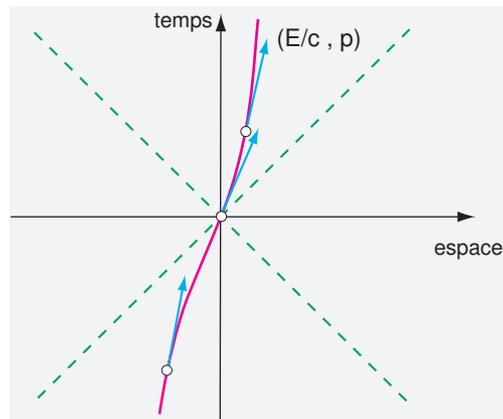


FIGURE 39 L'impulsion-énergie est tangente à la ligne d'univers.

et est par conséquent associée à la quantité de mouvement \mathbf{p} par

$$\mathbf{P} = (\gamma mc, \gamma m\mathbf{v}) = (E/c, \mathbf{p}) . \quad (55)$$

Pour cette raison la quantité de mouvement relativiste est également appelée *quadrivecteur impulsion-énergie*. En bref, la quantité de mouvement relativiste d'un corps est donnée par sa masse multipliée par le quadri-déplacement par unité de temps propre. C'est la définition la plus simple possible de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ce concept fut introduit par Max Planck en 1906. Le quadrivecteur impulsion-énergie, appelé également *4-moment*, est *tangent* à la ligne d'univers d'une particule, de même que la quadrivitesse. Cette correspondance, indiquée dans la Figure 39, découle directement de la définition, puisque

$$(E/c, \mathbf{p}) = (\gamma mc, \gamma m\mathbf{v}) = m(\gamma c, \gamma \mathbf{v}) = m(dt/d\tau, d\mathbf{x}/d\tau) . \quad (56)$$

La longueur (au carré) du 4-moment, à savoir $\mathbf{P}\mathbf{P} = \eta_{ab}P^aP^b$, est par définition la même pour tous les observateurs inertiels, on montre qu'elle vaut

$$E^2/c^2 - p^2 = m^2c^2 , \quad (57)$$

confirmant ainsi un résultat donné plus haut. Nous avons déjà mentionné que des énergies ou des situations sont qualifiées de *relativistes* si l'énergie cinétique $T = E - E_0$ n'est pas négligeable lorsque nous la comparons à l'énergie au repos $E_0 = mc^2$. Une particule dont l'énergie cinétique est beaucoup plus élevée que sa masse inertielle est dite *ultra-relativiste*. Les particules rencontrées dans les accélérateurs ou dans les rayons cosmiques tombent dans cette catégorie. (Quelle est leur relation impulsion-énergie ?)

Défi 91 s

Par opposition à la mécanique galiléenne, la relativité suggère l'existence d'un zéro absolu pour l'énergie. Nous ne pouvons pas extraire plus d'énergie que mc^2 d'un système ou d'une masse m . En particulier, une valeur nulle pour l'énergie potentielle est fixée de cette manière. En bref, la relativité indique que l'énergie est limitée par le bas.

Remarquez que par le mot « masse » m nous voulons toujours parler de ce que nous

dénommons parfois la *masse inertielle*. Ce nom dérive de la mauvaise habitude de nombreuses sciences-fictions et des manuels de l'enseignement secondaire à appeler le produit γm une *masse relativiste*. Les chercheurs dans ce domaine rejettent généralement (mais pas à l'unanimité) ce point de vue, comme le fit Einstein lui-même, et ils réfutent également l'expression « la masse (relativiste) augmente avec la vitesse », que l'on entend souvent. La masse relativiste et l'énergie seraient alors deux manières d'exprimer la même chose : cette façon de s'exprimer est du ressort de la presse à sensation.

Réf. 62

Toute l'énergie galiléenne ne contribue pas forcément à la masse. Par exemple, l'énergie potentielle d'un champ externe n'y participe pas. La relativité nous oblige à tenir une comptabilité précise de l'énergie. L'« énergie potentielle » en relativité est une forme raccourcie pour dire « la réduction d'énergie du champ externe ».

Pouvez-vous montrer que, pour deux particules de quantités de mouvement P_1 et P_2 , nous avons $P_1 P_2 = m_1 E_2 = M_2 E_1 = c^2 \gamma v_{12} m_1 m_2$, où v_{12} est leur vitesse relative ?

Défi 92 s

QUADRIFORCE

La quadriforce \mathbf{K} est définie par

$$\mathbf{K} = d\mathbf{P}/d\tau = m\mathbf{B} . \quad (58)$$

Par conséquent, en relativité, la force reste égale à la masse fois l'accélération. À partir de la définition de \mathbf{K} nous déduisons la relation avec la force classique $\mathbf{f} = d\mathbf{p}/dt = md(\gamma\mathbf{v})/dt$, à savoir*

Réf. 61, Réf. 63

$$\mathbf{K} = (K^0, K^i) = (\gamma^4 m\mathbf{v}\mathbf{a}/c, \gamma^2 m\mathbf{a}_i + \gamma^4 v_i \frac{m\mathbf{v}\mathbf{a}}{c^2}) = \left(\frac{\gamma}{c} \frac{dE}{dt}, \gamma \frac{d\mathbf{p}}{dt} \right) = \left(\gamma \frac{\mathbf{f}\mathbf{v}}{c}, \gamma \mathbf{f} \right) . \quad (59)$$

Défi 94 e La quadriforce, comme la quadri-accélération, est perpendiculaire à la quadrivitesse. La signification de la composante d'indice zéro de la quadriforce peut facilement être distinguée : c 'est la *puissance* requise pour accélérer l'objet. Nous avons $\mathbf{K}\mathbf{U} = c^2 dm/d\tau = \gamma^2 (dE/dt - \mathbf{f}\mathbf{v})$: c 'est le rapport adéquat par lequel l'énergie interne d'un système augmente. Le produit $\mathbf{K}\mathbf{U}$ s'annule uniquement pour des forces qui conservent la masse inertielle. Les collisions de particules qui conduisent à des réactions n'appartiennent pas à cette classe. Dans la vie quotidienne, la masse inertielle est conservée, et nous obtenons alors l'expression galiléenne $\mathbf{f}\mathbf{v} = dE/dt$.

LA ROTATION EN RELATIVITÉ

Si, la nuit, nous tournons sur nous-mêmes tout en regardant le ciel, les astres bougent avec une vitesse beaucoup plus élevée que celle de la lumière. La majorité des étoiles sont des masses, pas des images. Leur vitesse devrait être limitée par celle de la lumière. Comment tout cela s'accorde-t-il avec la relativité restreinte ?

* Certains auteurs définissent la tri-force comme $d\mathbf{p}/d\tau$, \mathbf{K} s'écrit alors de manière légèrement différente. Dans tous les cas, il est important de remarquer qu'en relativité la tri-force $\mathbf{f} = d\mathbf{p}/dt$ est en réalité proportionnelle à la tri-accélération \mathbf{a} . Toutefois, la force et l'accélération ne sont pas parallèles l'une à l'autre. En fait, pour des forces préservant la masse inertielle, nous trouvons $\mathbf{f} = \gamma m\mathbf{a} + (\mathbf{f}\mathbf{v})\mathbf{v}/c^2$. Au contraire, en relativité la tri-impulsion n'est *pas* proportionnelle à la tri-vitesse, bien qu'elle soit parallèle à celle-ci.

Défi 93 s

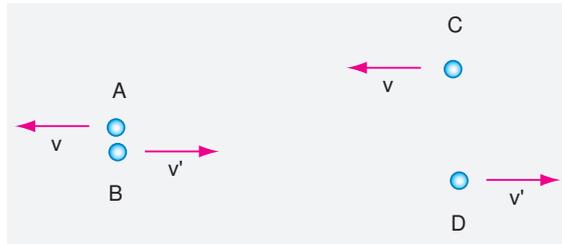


FIGURE 40 Sur la définition de la vitesse relative.

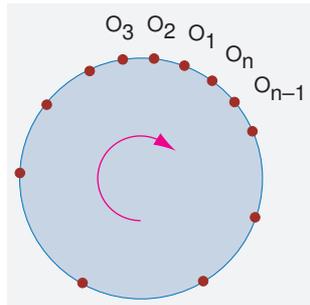


FIGURE 41 Observateurs sur un objet en rotation.

Cet exemple aide à éclaircir, d'une autre manière, ce qu'est réellement la vitesse limite. Physiquement parlant, une voûte céleste en rotation ne permet *pas* le transport d'énergie supraluminique, et donc ne contredit pas l'idée de vitesse limite. Mathématiquement parlant, la vitesse de la lumière restreint les vitesses relatives *uniquement* entre des objets qui sont *proches* les uns des autres, comme indiqué sur la partie gauche de la Figure 40. Comparer des vitesses entre des objets éloignés n'est possible que si toutes les vitesses concernées sont constantes au cours du temps, ce qui n'est pas le cas dans notre exemple. La version différentielle des transformations de Lorentz rend ce point particulièrement évident. Dans un grand nombre de situations générales, les vitesses relatives entre des objets *éloignés* peuvent être supérieures à la vitesse de la lumière. Nous en avons déjà rencontré un exemple lors de la discussion sur la voiture dans le tunnel, et nous rencontrerons bientôt quelques exemples supplémentaires.

Page 53

Page 86

Avec cet éclaircissement, nous pouvons dorénavant considérer succinctement la *rotation* en relativité. La première question est de savoir comment les longueurs et les durées varient dans un référentiel en rotation. Vous devriez pouvoir vérifier qu'un observateur situé dans un référentiel en rotation s'accorde avec un collègue, qui n'est pas en rotation, situé sur l'axe d'un corps en rotation. Cependant tous les deux remarquent que le corps en rotation, même s'il est rigide, possède une circonférence *différente* de celle qu'il avait avant de commencer à tourner. Grossièrement dit, la valeur de π *change* pour des observateurs en rotation. Le rapport entre la circonférence c et le rayon r se révèle être $c/r = 2\pi\gamma$: il augmente avec la vitesse de rotation. Cette conséquence non intuitive est souvent appelée le *paradoxe d'Ehrenfest*. Par-dessus tout, elle indique que l'espace-temps pour un observateur situé sur un disque en rotation n'est *pas* l'espace-temps de Minkowski de la relativité restreinte.

Défi 95 e

Défi 96 e

Réf. 64

Les corps en rotation se comportent de façon étrange pour plusieurs raisons. Par

exemple, nous éprouvons des difficultés lorsque nous tentons de synchroniser des horloges disposées sur un disque qui tourne, comme indiqué sur la [Figure 41](#). Si nous commençons par synchroniser l'horloge située en O_2 avec celle en O_1 , et ainsi de suite, en continuant jusqu'à l'horloge O_n , nous remarquons que la dernière horloge n'est *pas* synchronisée avec la première. Ce résultat est le reflet du changement dans la circonférence citée ci-dessus. En fait, une étude attentive montre que les mesures de longueur et de durée amènent tous les observateurs O_k à conclure qu'ils vivent dans un espace-temps en rotation. Les disques tournants peuvent ainsi être utilisés comme une introduction à la relativité générale, dans laquelle cette courbure et ses conséquences forment le thème central. Nous en dirons plus à ce propos dans le prochain chapitre.

La vitesse angulaire est-elle limitée ? Oui : la vitesse tangentielle dans un référentiel inertiel ne peut excéder celle de la lumière. Cette limite dépend donc de la *taille* du corps en question, ce qui nous conduit à une énigme simple : pouvons-nous *voir* des objets tournant très rapidement ?

Défi 97 pe

On dit que le moment cinétique relativiste est naturellement défini comme suit :

$$l^{ab} = x^a p^b - x^b p^a . \quad (60)$$

En d'autres termes, le moment cinétique relativiste est un *tenseur*, et non un vecteur, comme indiqué par ses deux indices. Le moment cinétique est conservé en relativité restreinte. Le moment d'inertie est ainsi logiquement défini comme étant le facteur de proportionnalité entre la vitesse angulaire et le moment cinétique.

Défi 98 pe

Certes, pour une particule en rotation, l'énergie rotationnelle représente une fraction de la masse inertielle. Vous devriez pouvoir calculer la fraction qu'elle représente pour la Terre et le Soleil. Elle n'est pas si élevée. Par ailleurs, comment feriez-vous pour déterminer si une particule microscopique, trop petite pour être observée, est en rotation ?

Défi 99 pe

Défi 100 pe

Dans la théorie de la relativité, la rotation et la translation se combinent de manière surprenante. Imaginez un cylindre en rotation uniforme le long de son axe, telle qu'elle apparaît pour un observateur au repos. Comme l'avait affirmé Max von Laue, le cylindre sera *déformé* pour un observateur avançant le long de l'axe de rotation. Pouvez-vous confirmer ce point ?

Défi 101 e

Maintenant, un dernier problème concernant la rotation. La vitesse est relative : cela signifie que la valeur mesurée dépend de l'observateur. Est-ce le cas également pour la vitesse angulaire ?

Défi 102 pe

MOUVEMENT ONDULATOIRE

En physique galiléenne, une onde est décrite par un vecteur d'onde et par une fréquence. En relativité restreinte, les deux sont combinés en un quadrivecteur d'onde, donné par

$$\mathbf{L} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\omega}{c}, \mathbf{n} \right) , \quad (61)$$

où λ représente la longueur d'onde, ω la fréquence angulaire de l'onde et \mathbf{n} le vecteur normal dans la direction de propagation. Supposons qu'un observateur ayant une qua-

drivitesse U observe qu'une onde L possède une fréquence ν . Montrez que

$$\nu = \mathbf{LU} \quad (62)$$

- Défi 103 pe doit être vérifié. De façon intéressante, la vitesse angulaire ω de l'onde se transforme
 Réf. 16 d'une manière différente de la vitesse d'une particule, sauf dans le cas où $\omega = c$. La
 Défi 104 pe formule de l'aberration pour le mouvement ondulatoire diffère également de celle des
 particules, excepté dans le cas $\omega = c$.

ACTION D'UNE PARTICULE LIBRE – COMMENT LES CHOSSES BOUGENT-ELLES ?

Page 173 Si nous désirons exposer le mouvement relativiste d'une particule libre en termes de principe extrémal, nous avons besoin d'une définition de l'action. Nous savons déjà que l'action physique est une mesure du changement qui intervient dans un système. Pour une particule libre ou en mouvement inertiel, le seul changement est celui de la cadence du tic-tac de sa propre horloge. Par conséquent, l'action d'une particule libre sera proportionnelle au temps propre écoulé. Afin d'appliquer l'unité standard de l'énergie fois le temps, ou $J\cdot s$, à l'action, la première estimation de l'action pour une particule libre est

$$S = -mc^2 \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau, \quad (63)$$

- Défi 105 pe où τ est le temps propre le long de sa trajectoire. C'est en vérité l'expression exacte. Elle implique la conservation de l'énergie et de l'impulsion (relativiste), puisque la variation du temps propre est maximale pour un mouvement en ligne droite avec une vitesse constante. Pouvez-vous le confirmer ? En fait, dans la nature, toutes les particules se déplacent de telle manière que leur temps propre soit maximal. En d'autres termes, nous trouvons une nouvelle fois que dans la nature les choses changent le moins possible. La nature s'apparente à une vieille dame circonspecte : ses mouvements sont aussi lents que permis. Si vous préférez, tout changement recherche l'efficacité maximale. Comme nous l'avons déjà mentionné, Bertrand Russel appelait cela la *loi de la paresse universelle*.

- Défi 106 pe L'expression (63) pour la définition de l'action est due à Max Planck. En 1906, en l'explorant plus en détail, il nota que le quantum d'action \hbar , qu'il avait découvert avec la constante de Boltzmann, est un invariant relativiste (comme la constante de Boltzmann k). Pouvez-vous imaginer comment il s'y est pris ?

L'action peut également être décrite de manière plus compliquée, et apparemment plus effrayante. Ces modalités équivalentes pour l'écrire sont particulièrement appropriées pour préparer le terrain de la relativité générale :

$$S = \int L dt = -mc^2 \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\gamma} dt = -mc \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sqrt{u_a u^a} d\tau = -mc \int_{s_1}^{s_2} \sqrt{\eta^{ab} \frac{dx_a}{ds} \frac{dx_b}{ds}} ds, \quad (64)$$

où s représente une certaine fonction de τ , arbitraire, mais invariablement croissante, tel

que τ lui-même. Comme d'habitude, la *métrique* $\eta^{\alpha\beta}$ de la relativité restreinte est

$$\eta^{ab} = \eta_{ab} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (65)$$

Défi 107 pe Vous pouvez aisément confirmer cette forme (64) de l'action en déduisant l'équation du mouvement de la manière habituelle.

Défi 109 pe En résumé, la nature n'est pas pressée : chaque objet se déplace de telle manière que sa propre horloge indique la durée la *plus longue* possible par rapport à n'importe quel autre mouvement proche et peu différent*. Ce principe général est également valable pour des particules sous l'influence de la gravitation, comme nous le verrons dans la section sur la relativité générale, et pour des particules sous l'influence d'interactions électriques ou magnétiques. En fait, elle est valable dans toutes les situations de mouvement (macroscopique) rencontrées dans la nature. Pour l'instant, nous remarquons simplement que le temps propre le plus long est atteint lorsque la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle est minimale. (Pouvez-vous le confirmer ?) Pour l'approximation galiléenne, le temps propre maximal implique donc une différence moyenne minimale entre ces deux types d'énergie. Nous retrouvons ainsi le principe de moindre action dans sa formulation galiléenne.

Page 173 Auparavant, nous avons vu que l'action quantifie le changement qui se produit dans un système. La relativité restreinte montre que la nature minimise le changement en maximisant le temps propre. Dans la nature, *le temps propre est toujours maximal*. En d'autres termes, les choses se déplacent le long de trajectoires de *vieillessement maximum*. Pouvez-vous expliquer pourquoi le « vieillissement maximum » et la « paresse universelle » sont équivalents ?

Défi 110 pe Nous découvrons ainsi une nouvelle fois que la nature est à l'opposé d'une superproduction d'Hollywood : la nature se modifie de la manière la plus parcimonieuse possible. La signification plus profonde de ce résultat est livrée à votre réflexion personnelle : amusez-vous avec !

TRANSFORMATIONS CONFORMES – POURQUOI LA VITESSE DE LA LUMIÈRE EST-ELLE CONSTANTE ?

La distinction entre l'espace et le temps en relativité restreinte dépend de l'observateur. D'un autre côté, tous les observateurs inertiels s'accordent sur la position, la forme et l'orientation du cône de lumière en un point donné. Donc, dans la théorie de la relativité, les cônes de lumière représentent les « objets » physiques fondamentaux. Étant donné leur importance, nous devrions nous demander si les observateurs inertiels sont uniquement ceux qui observent des cônes de lumière identiques. De manière intéressante, il apparaît que *d'autres* observateurs sont également concernés.

La première catégorie de ce type d'observateurs représente ceux qui utilisent des unités de mesure pour lesquelles toutes les longueurs et les durées sont multipliées par un

Défi 108 pe * Si les neutrinos étaient sans masse, l'action (64) ne serait pas applicable pour eux. Pourquoi ? Pouvez-vous trouver une alternative pour ce cas (indubitablement purement académique) ?

facteur d'échelle λ . Les transformations qui représentent ces points de vue sont données par

$$x_a \mapsto \lambda x_a \quad (66)$$

et sont appelées des *dilatations*.

Une seconde catégorie d'observateurs additionnels est relevée en appliquant les *transformations conformes spéciales*. Celles-ci sont composées d'une *inversion*

$$x_a \mapsto \frac{x_a}{x^2} \quad (67)$$

et d'une *translation* par un vecteur b_a , à savoir

$$x_a \mapsto x_a + b_a, \quad (68)$$

puis d'une deuxième inversion. Ainsi les transformations conformes spéciales sont

$$x_a \mapsto \frac{x_a + b_a x^2}{1 + 2b_a x^a + b^2 x^2} \quad \text{ou} \quad \frac{x_a}{x^2} \mapsto \frac{x_a}{x^2} + b_a. \quad (69)$$

Défi 111 pe Ces transformations sont qualifiées de *conformes* parce qu'elles ne changent pas les angles pour des formes (infinitésimalement) petites, comme vous pouvez le vérifier. Elles laissent par conséquent la *morphologie* (d'objets infinitésimalement petits) intacte. Par exemple, elles transforment des cercles infinitésimaux en cercles infinitésimaux. Elles sont qualifiées de *spéciales* parce que le groupe conforme *tout entier* contient les dilatations et aussi les transformations de Lorentz non homogènes*.

Défi 113 pe Remarquez que la manière dont les transformations conformes spéciales laissent les cônes de lumière invariants est plutôt subtile.

Puisque les dilatations ne permutent pas avec les translations dans le temps, il n'existe aucune quantité conservée associée à cette symétrie. (La même chose est vraie pour les poussées de Lorentz.) Au contraire, les rotations et les translations dans l'espace permutent avec les translations dans le temps et donc conduisent à des quantités conservées.

En résumé, le vide est conformément invariant – au sens précis indiqué juste ci-dessus – et est donc également invariant par dilatation. C'est une autre manière d'exprimer le fait que le vide tout seul n'est pas suffisant pour définir des longueurs, puisqu'il ne fixe pas un facteur d'échelle. Comme nous devons nous y attendre, la matière est nécessaire pour cela. En fait, les transformations conformes (spéciales) ne sont pas des symétries représentatives de situations contenant de la matière. Seul l'espace vide est conformément invariant, la nature dans son intégralité ne l'est pas.

Défi 112 pe * L'ensemble de toutes les transformations conformes *spéciales* forme un groupe ayant quatre paramètres, en ajoutant les dilatations et les transformations de Lorentz non homogènes nous obtenons quinze paramètres pour le groupe conforme *complet*. Le groupe conforme est localement isomorphe à $SU(2,2)$ et au groupe simple $SO(4,2)$: ces concepts sont expliqués dans l'[Annexe ??](#). Remarquez que tout cela est vrai seulement pour *quatre* dimensions d'espace-temps ; en *deux* dimensions – l'autre cas important, particulièrement en théorie des cordes – le groupe conforme est isomorphe au groupe des transformations de coordonnées analytiques arbitraires, et est donc de dimension infinie.

Page ??

Défi 114 pe

Toutefois, l'invariance conforme, ou l'invariance des cônes de lumière, est suffisante pour permettre des mesures de vitesse. Elle est également *nécessaire* pour les mesures de vitesse, comme vous devriez pouvoir le vérifier.

Nous avons vu que l'invariance conforme implique la symétrie par renversement : c'est-à-dire que les grandes échelles et les petites échelles d'un espace vide sont reliées. Cela suggère que la constance de la vitesse de la lumière est associée à l'existence d'une symétrie par renversement. Cette correspondance mystérieuse nous permet d'entrevoir les aventures qui nous attendent dans la troisième partie de notre ascension de la Montagne Mouvement. L'invariance conforme s'avère être une propriété cruciale qui nous conduira vers des perspectives merveilleuses*.

OBSERVATEURS EN ACCÉLÉRATION

Jusqu'à là, nous n'avons étudié que ce que des observateurs inertiels, ou en mouvement libre, se disent l'un à l'autre lorsqu'ils parlent de la même observation. Par exemple, nous avons vu que des horloges en mouvement avancent toujours lentement. Cette histoire devient encore plus intéressante lorsque l'observateur ou les deux sont accélérés.

Nous entendons parfois dire que la relativité restreinte ne peut pas être utilisée pour décrire des observateurs accélérés. C'est faux, comme il est faux d'affirmer que la physique galiléenne ne peut pas être utilisée pour des observateurs accélérés. L'unique restriction de la relativité restreinte concerne le fait qu'elle ne peut être utilisée dans un espace-temps non plat, c'est-à-dire courbé. Des corps accélérés existent dans des espaces-temps plats, et par conséquent ils peuvent être discutés dans le cadre de la relativité restreinte.

Réf. 65

En guise d'introduction, regardons ce qu'un observateur grec accéléré dit concernant l'horloge d'un autre inertiel, romain, et vice versa. Supposez que l'observateur grec, indiqué sur la [Figure 42](#), se déplace le long de la trajectoire $\mathbf{x}(t)$, tel que le note l'observateur romain inertiel. En général, le rapport entre les variations des horloges grecque/romaine est donné par $\Delta\tau/\Delta t = (\tau_2 - \tau_1)/(t_2 - t_1)$. Ici les coordonnées grecques sont construites à l'aide d'une procédure simple : prenez les deux ensembles d'événements définis par $t = t_1$ et $t = t_2$, et posez τ_1 et τ_2 comme étant les points où ces ensembles coupent l'axe

Défi 115 pe

* Le groupe conforme n'apparaît pas seulement dans la cinématique de la relativité restreinte : il est le groupe de symétrie de toutes les interactions physiques, comme l'électromagnétisme, à condition que toutes les particules impliquées possèdent une masse nulle, comme c'est le cas pour le photon. Un champ qui possède une masse ne peut pas être conformément invariant, par conséquent l'invariance conforme n'est pas une symétrie exacte de la nature tout entière. Pouvez-vous confirmer qu'un terme de masse $m\varphi^2$ dans un lagrangien n'est pas conformément invariant ?

Cependant, puisque toutes les particules observées jusqu'à présent possèdent des masses qui sont de plusieurs ordres de grandeur plus petites que la masse de Planck, nous pouvons dire qu'elles ont pour la plupart une masse évanescence, la symétrie conforme pouvant alors être vue comme une symétrie *approximative* de la nature. Selon cette idée, toutes les particules massives devraient être perçues comme des petites corrections, ou perturbations, de champs sans masse, c'est-à-dire conformément invariants. Donc, pour la construction d'une théorie fondamentale, des lagrangiens conformément invariants sont souvent présumés fournir une bonne approximation de départ.

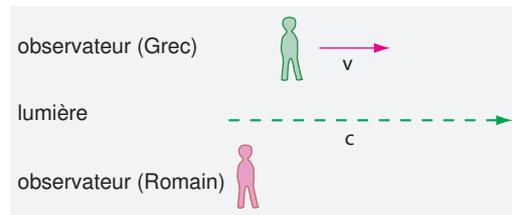


FIGURE 42 L'exemple le plus simple d'un observateur inertiel et d'un autre accéléré.

du temps de l'observateur grec*. Nous supposons que l'observateur grec est inertiel et se déplace avec une vitesse v tel qu'observé par le romain. Le rapport des horloges, pour un observateur grec est alors donné par

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta t} = \frac{d\tau}{dt} = \sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{1}{\gamma_v}, \quad (70)$$

Défi 116 pe une formule que nous avons l'habitude d'utiliser. Nous trouvons encore une fois que des horloges en mouvement avancent plus lentement.

Réf. 65 Pour des mouvements accélérés, la version différentielle du raisonnement précédent est indispensable. Le rapport de la variation des horloges grecque/romaine est encore $d\tau/dt$, τ et $\tau + d\tau$ sont calculés de la même manière que t et $t + dt$. Supposons à nouveau que l'observateur grec se déplace le long de la trajectoire $\mathbf{x}(t)$, telle que mesurée par le romain. Il s'ensuit immédiatement que

$$\tau = t - \mathbf{x}(t)\mathbf{v}(t)/c^2 \quad (71)$$

et donc

$$\tau + d\tau = (t + dt) - [\mathbf{x}(t) + dt\mathbf{v}(t)][\mathbf{v}(t) + dt\mathbf{a}(t)]/c^2. \quad (72)$$

Ensemble, ces équations produisent

$$\ll d\tau/dt \gg = \gamma_v(1 - \mathbf{v}\mathbf{v}/c^2 - \mathbf{x}\mathbf{a}/c^2). \quad (73)$$

Cela indique que des horloges accélérées peuvent avancer *rapidement* ou lentement, en fonction de leur position \mathbf{x} et du signe de leur accélération \mathbf{a} . Les guillemets dans l'équation ci-dessus sont là parce que nous pouvons voir directement que l'observateur grec remarque que

$$\ll dt/d\tau \gg = \gamma_v, \quad (74)$$

ce qui n'est *pas* égal à l'inverse de l'équation (73). Cette divergence devient plus flagrante dans la situation simple de deux horloges ayant des vitesses égales, l'une d'entre elles possédant une accélération constante g en direction de l'origine, alors que l'autre se déplace de façon inertielle. Nous avons alors

$$\ll d\tau/dt \gg = 1 + gx/c^2 \quad (75)$$

* Ces ensembles forment ce que les mathématiciens nomment des *hypersurfaces*.

et

$$\ll dt/d\tau \gg = 1. \quad (76)$$

Nous allons bientôt discuter de ce contexte. Mais nous devons auparavant éclaircir la notion liée à l'accélération.

ACCÉLÉRATION POUR DES OBSERVATEURS INERTIELS

Les accélérations se comportent différemment des vitesses sous un changement de point de vue. Prenons tout d'abord le cas simple dans lequel l'objet et deux observateurs inertiels se déplacent tous le long de l'axe des x . Si l'observateur inertiel romain mesure une accélération $a = dv/dt = d^2x/dt^2$, et si l'observateur grec, également inertiel, mesure une accélération $\alpha = d\omega/d\tau = d^2\xi/d\tau^2$, nous obtenons

$$\gamma_v^3 a = \gamma_\omega^3 \alpha. \quad (77)$$

Cette relation indique que les accélérations ne sont *pas* des invariants de Lorentz, à moins que les vitesses soient très petites comparées à la vitesse de la lumière. C'est en contradiction avec notre expérience quotidienne, où les accélérations sont indépendantes de la vitesse de l'observateur.

L'expression (77) se simplifie si les accélérations sont mesurées à un instant t pour lequel ω disparaît – c'est-à-dire si elles sont mesurées par l'observateur inertiel *comobile*. Dans ce cas la relation pour l'accélération est donnée par

$$a_c = a\gamma_v^3 \quad (78)$$

et l'accélération $a_c = \alpha$ est également appelée accélération propre, puisque sa valeur décrit ce que l'observateur comobile grec *ressent* : l'accélération propre décrit la sensation d'être poussé vers l'arrière du siège en accélération.

En général, la vitesse de l'observateur et l'accélération ne sont pas parallèles. Nous pouvons évaluer comment la valeur de la tri-accélération \mathbf{a} mesurée par un observateur inertiel général est reliée à la valeur \mathbf{a}_c mesurée par l'observateur comobile en utilisant les expressions (51) et (49). Nous obtenons la généralisation de (78) :

$$\mathbf{va}_c = \mathbf{va}\gamma_v^3 \quad (79)$$

et

$$\mathbf{a} = \frac{1}{\gamma_v^2} \left(\mathbf{a}_c - \frac{(1-\gamma_v)(\mathbf{va}_c)\mathbf{v}}{v^2} - \frac{\gamma_v(\mathbf{va}_c)\mathbf{v}}{c^2} \right). \quad (80)$$

En mettant le tout au carré nous obtenons la relation

$$a^2 = \frac{1}{\gamma_v^4} \left(a_c^2 - \frac{(\mathbf{a}_c\mathbf{v})^2}{c^2} \right) \quad (81)$$

que nous connaissons déjà sous une forme légèrement différente. Elle montre (à

Défi 117 e

nouveau) que la tri-accélération propre ou comobile est toujours supérieure à la tri-accélération mesurée par un observateur inertiel extérieur. Plus l'observateur inertiel extérieur se déplace vite, plus l'accélération qu'il observe est petite. L'accélération n'est pas un invariant relativiste. Cette expression montre également qu'à chaque fois que la vitesse est perpendiculaire à l'accélération une poussée produit un facteur γ_v^2 , tandis qu'une vitesse parallèle à l'accélération donne la dépendance en γ_v^3 déjà mentionnée.

Page 241

Nous voyons que l'accélération complique de nombreux problèmes et requiert une analyse plus poussée. Pour rester dans des sujets simples, nous allons désormais étudier uniquement des accélérations *constantes*. Il est intéressant de noter que cette situation constitue aussi une bonne introduction aux trous noirs et, comme nous le verrons bientôt, à l'univers dans son ensemble.

RÉFÉRENTIELS ACCÉLÉRÉS

Comment pouvons-nous vérifier que nous sommes dans un référentiel inertiel ? Définissons tout d'abord ce terme. Un *référentiel inertiel* possède deux propriétés déterminantes. Premièrement, des longueurs et des distances mesurées avec une règle sont décrites par la géométrie euclidienne. En d'autres termes, les règles agissent de la même manière que dans la vie courante. En particulier, des distances relevées en comptant combien de règles (barres) doivent être positionnées bout à bout pour arpenter la distance d'un point à un autre – la *distance des barres* – se comportent comme dans la vie quotidienne. Par exemple, elles obéissent au théorème de Pythagore dans le cas de triangles rectangles. Deuxièmement, la vitesse de la lumière est constante. En d'autres termes, deux observateurs quelconques situés dans ce référentiel, où leurs temps et leurs positions sont indépendants, font l'observation suivante : le rapport c entre le double de la distance des barres entre deux points et le temps mis par la lumière pour voyager d'un de ces points à l'autre puis revenir au point de départ est toujours le même.

De façon équivalente, un référentiel inertiel est celui pour lequel toutes les horloges restent toujours synchronisées et où la géométrie est euclidienne. En particulier, dans un référentiel inertiel, tous les observateurs situés à des coordonnées fixes demeurent toujours au repos l'un par rapport à l'autre. Cette dernière condition est cependant plus générale : il existe d'autres situations, non inertielles, où cela reste le cas.

Les référentiels non inertiels, ou *référentiels accélérés*, constituent un concept utile en relativité restreinte. En fait, nous vivons tous dans un tel référentiel. Nous pouvons utiliser la relativité restreinte pour les décrire, de la même manière que nous avons utilisé la physique galiléenne pour les décrire au début de notre expédition.

Un *référentiel* en général est un ensemble continu d'observateurs demeurant au repos les uns par rapport aux autres. Ici, « au repos les uns par rapport aux autres » signifie que le temps nécessaire à un signal lumineux pour aller d'un observateur à un autre et revenir est constant au cours du temps, ou, de manière équivalente, que la distance des barres entre deux observateurs est constante. N'importe quel référentiel peut par conséquent également être appelé collection *rigide* d'observateurs. Nous remarquons donc qu'un référentiel en général n'est *pas* la même chose qu'un ensemble de coordonnées, ce dernier n'est généralement *pas* rigide. Si tous les observateurs reliés de manière rigide possèdent des valeurs constantes de coordonnées, nous parlons d'un *système de coordonnées rigide*. Bien sûr, ceux-ci sont utiles surtout lorsqu'il est nécessaire de décrire des référentiels

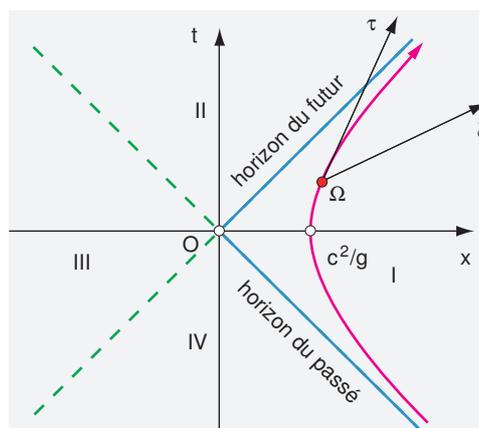


FIGURE 43 Mouvement hyperbolique d'un observateur Ω en accélération uniforme et rectiligne.

accélérés*.

Réf. 68
Défi 118 pe

Remarquez que si deux observateurs se déplacent ensemble avec une vitesse \mathbf{v} , telle que mesurée dans un certain référentiel *inertiel*, ils observent qu'ils sont au repos l'un par rapport à l'autre *seulement* si cette vitesse est *constante*. Encore une fois nous notons, comme ci-dessus, que deux individus attachés l'un à l'autre par une corde, et à une distance telle que la corde soit tendue, verront la corde se rompre (ou ne seront plus attachés) s'ils accélèrent ensemble vers (ou décélèrent depuis) des vitesses relativistes exactement de la même manière. L'accélération relativiste exige une attention rigoureuse.

Un observateur qui *ressent* constamment la *même* force appliquée sur son corps est qualifié d'*uniformément* accéléré. Plus précisément, un observateur en accélération uniforme est un observateur dont l'accélération à chaque instant, mesurée dans le référentiel inertiel par rapport auquel l'observateur est au repos à *cet instant*, possède toujours la valeur identique \mathbf{B} . Il est important de remarquer que l'accélération uniforme n'est *pas* uniformément accélérée quand elle est toujours observée depuis le *même* référentiel inertiel. C'est une différence importante par rapport au cas galiléen.

Pour un mouvement uniformément accéléré au sens où nous venons de le définir, nous exigeons que

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{B} = -g^2 \quad (82)$$

Réf. 69 où g représente une constante indépendante de t . Le cas le plus simple est un mouvement uniformément accéléré qui est également *rectiligne*, c'est-à-dire pour lequel l'accélération \mathbf{a} est parallèle à \mathbf{v} à un instant donné du temps et (par conséquent) pour tous les autres instants également. Dans ce cas nous pouvons écrire, en utilisant des vecteurs à

Réf. 67 * Il n'existe fondamentalement que deux autres types de référentiels de coordonnées rigides, excepté les référentiels inertiels :

- Le référentiel $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 (1 + g_k x_k / c^2)^2$ avec une accélération arbitraire, mais constante, de l'origine. L'accélération est $\mathbf{a} = -\mathbf{g}(1 + \mathbf{g}\mathbf{x}/c^2)$.
- Le référentiel en rotation uniforme $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + 2\omega(-y dx + x dy)dt - (1 - r^2 \omega^2 / c^2)dt$. Ici l'axe z représente l'axe de rotation, et $r^2 = x^2 + y^2$.

Défi 119 pe trois composantes,

$$\gamma^3 \mathbf{a} = \mathbf{g} \quad \text{ou} \quad \frac{d\gamma \mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g}. \quad (83)$$

En supposant que la direction considérée coïncide avec l'axe des x , puis en résolvant pour $v(t)$, nous obtenons

$$v = \frac{gt}{\sqrt{1 + \frac{g^2 t^2}{c^2}}}, \quad (84)$$

Défi 120 pe

où il a été supposé que $v(0) = 0$. Nous remarquons que pour des durées très petites nous avons $v = gt$, et que pour des longues durées $v = c$, comme attendu. La quantité de mouvement de l'observateur accéléré augmente linéairement avec le temps, encore une fois comme prévu. En intégrant, nous découvrons que l'observateur accéléré suit la trajectoire

$$x(t) = \frac{c^2}{g} \sqrt{1 + \frac{g^2 t^2}{c^2}}, \quad (85)$$

où nous avons fait l'hypothèse que $x(0) = c^2/g$, afin d'obtenir une expression plus simple. À cause de ce résultat, visualisé dans la [Figure 43](#), on dit qu'un observateur en accélération uniforme et rectiligne décrit un mouvement *hyperbolique*. Pour des durées très petites, la ligne d'univers se réduit à l'expression habituelle $x = gt^2/2 + x_0$, tandis que pour des grandes durées elle vaut $x = ct$, comme prévu. Ce mouvement est donc uniformément accéléré uniquement pour le corps mobile lui-même, et *non pas* pour un observateur extérieur.

Réf. 69, Réf. 70

Le temps propre τ de l'observateur accéléré est relié au temps t du référentiel inertiel de la manière classique par $dt = \gamma d\tau$. En utilisant l'expression pour la vitesse $v(t)$ de l'équation (84) nous obtenons*

$$t = \frac{c}{g} \sinh \frac{g\tau}{c} \quad \text{et} \quad x = \frac{c^2}{g} \cosh \frac{g\tau}{c} \quad (86)$$

pour la relation entre le temps propre τ , mesuré par l'observateur romain inertiel et externe, et le temps t et la position x . Nous rencontrerons cette relation à nouveau pendant notre étude des trous noirs.

Défi 121 s

Tout cela vous semble inintéressant ? Imaginez simplement que vous accélériez à vive allure sur une moto à $g = 10 \text{ m/s}^2$ pendant un temps propre τ de 25 ans. Cette moto vous emporterait au-delà des confins de l'univers connu ! Cela ne vaut-il pas la peine d'essayer ? Malheureusement, il n'existe ni moto ni missile qui pourraient accélérer à ce point, parce que leur réservoir à carburant devrait être énorme. Pouvez-vous le confirmer ?

Réf. 71

* Utilisez votre formulaire préféré de mathématiques – chaque étudiant devrait en avoir un – pour déduire cela. Le *sinus hyperbolique* et le *cosinus hyperbolique* sont définis par $\sinh y = (e^y - e^{-y})/2$ et $\cosh y = (e^y + e^{-y})/2$. Ils impliquent que $\int dy/\sqrt{y^2 + a^2} = \operatorname{arsinh} y/a = \operatorname{Arsh} y/a = \ln(y + \sqrt{y^2 + a^2})$.

Pour l'accélération uniforme, les coordonnées se transforment comme suit

$$\begin{aligned} t &= \left(\frac{c}{g} + \frac{\xi}{c} \right) \sinh \frac{g\tau}{c} \\ x &= \left(\frac{c^2}{g} + \xi \right) \cosh \frac{g\tau}{c} \\ y &= v \\ z &= \zeta, \end{aligned} \quad (87)$$

où τ représente maintenant la coordonnée de temps dans le référentiel grec. Nous remarquons également que l'intervalle d'espace-temps $d\sigma$ vérifie

$$d\sigma^2 = (1 + g\xi/c^2)^2 c^2 d\tau^2 - d\xi^2 - dv^2 - d\zeta^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2, \quad (88)$$

et puisque pour $d\tau = 0$ les distances sont données par le théorème de Pythagore, le référentiel grec est en réalité rigide.

Réf. 72

Après cette foison de formules, occupons-nous d'une question simple, indiquée sur la Figure 43. L'observateur inertiel romain O voit l'observateur grec Ω se déplacer avec une accélération g , s'éloignant de plus en plus et obéissant à l'équation (85). Qu'est-ce que l'observateur grec dit à propos de son collègue romain ? Avec tout ce que nous savons maintenant, il est facile de répondre. À chaque point de sa trajectoire, Ω voit que O possède la coordonnée $\tau = 0$ (pouvez-vous confirmer ce point ?), ce qui signifie que la distance à l'observateur romain, telle qu'elle est perçue par le Grec, est la même que l'intervalle d'espace-temps $O\Omega$. En utilisant l'expression (85), nous voyons qu'elle est

Défi 122 e

Réf. 73

$$d_{O\Omega} = \sqrt{\xi^2} = \sqrt{x^2 - c^2 t^2} = c^2/g, \quad (89)$$

ce qui est, de manière assez surprenante, constant au cours du temps ! En d'autres termes, l'observateur grec notera qu'il demeure à une distance constante du romain, en parfaite contradiction avec ce que l'observateur romain affirme. Prenez votre temps pour vérifier cette conséquence bouleversante d'une tout autre manière. Nous aurons encore besoin de cela plus tard, pour expliquer pourquoi la Terre n'explose pas. (Pouvez-vous deviner comment cette question est reliée à ce résultat ?)

Défi 123 s

Réf. 74

Le théorème de la composition des accélérations est plus complexe que le théorème de la composition des vitesses. Sa meilleure explication fut publiée par Mishra. Si nous appelons a_{nm} l'accélération du système n par l'observateur m , nous cherchons à exprimer l'accélération de l'objet a_{01} comme une fonction de la valeur a_{02} mesurée par l'autre observateur, de l'accélération relative a_{12} et de l'accélération propre a_{22} de l'autre observateur : regardez la Figure 44. Ici nous étudierons uniquement des situations unidimensionnelles, où tous les observateurs et tous les objets se déplacent le long d'un seul axe. (Pour plus de clarté, nous notons également $v_{11} = v$ et $v_{02} = u$.) En physique galiléenne nous avons la relation générale

Défi 124 e

$$a_{01} = a_{02} - a_{12} + a_{22} \quad (90)$$

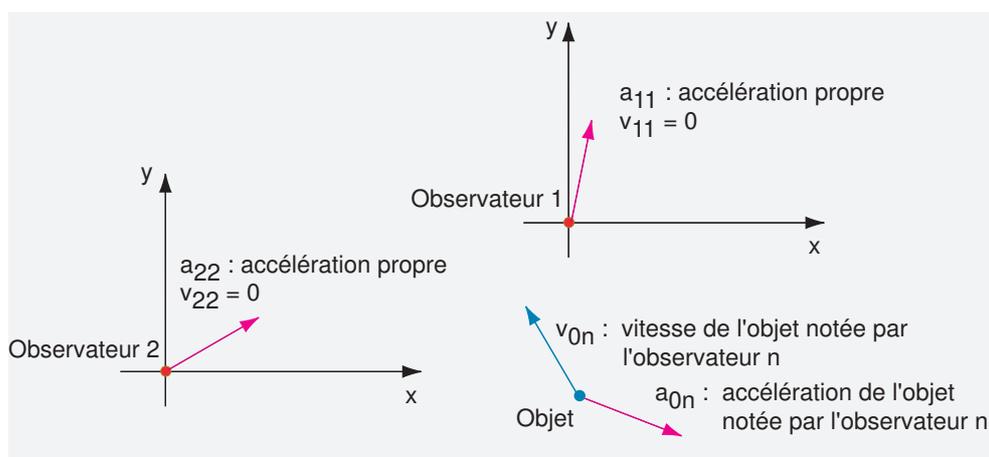


FIGURE 44 Les définitions nécessaires pour déduire le comportement de la composition des accélérations.

parce que les accélérations se comportent de manière simple. En relativité restreinte, nous obtenons

$$a_{01} = a_{02} \frac{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}{(1 - uv/c^2)^3} - a_{12} \frac{(1 - u^2/c^2)(1 - v^2/c^2)^{-1/2}}{(1 - uv/c^2)^2} + a_{22} \frac{(1 - u^2/c^2)(1 - v^2/c^2)^{3/2}}{(1 - uv/c^2)^3} \quad (91)$$

Défi 125 pe

et vous devriez vous amuser à vérifier cette expression.

Page 57

Pouvez-vous maintenant stipuler comment le rapport des accélérations s'inscrit dans la définition de la masse en relativité restreinte ?

Défi 126 pe

HORIZONS DES ÉVÉNEMENTS

Le mouvement accéléré exhibe de nombreuses propriétés surprenantes. Il en est une d'un intérêt particulier qui concerne la trajectoire, en termes de coordonnées ξ et τ dans le référentiel rigide accéléré, d'un objet situé au point de départ $x = x_0 = c^2/g$, à chaque instant t . Nous avons les deux relations*

Défi 127 pe

$$\xi = -\frac{c^2}{g} \left(1 - \operatorname{sech} \frac{g\tau}{c}\right)$$

$$d\xi/d\tau = -c \operatorname{sech} \frac{g\tau}{c} \tanh \frac{g\tau}{c}. \quad (93)$$

Ces équations sont étranges. Pour des temps τ très grands, la coordonnée ξ s'approche de la valeur limite $-c^2/g$ et $d\xi/d\tau$ devient nulle. Cette situation est identique à celle d'un vé-

* Les fonctions apparaissant ci-dessus, la *sécante hyperbolique* et la *tangente hyperbolique*, sont définies en utilisant les expressions provenant de la note de la page 82 :

$$\operatorname{sech} y = \frac{1}{\cosh y} \quad \text{et} \quad \tanh y = \frac{\sinh y}{\cosh y}. \quad (92)$$

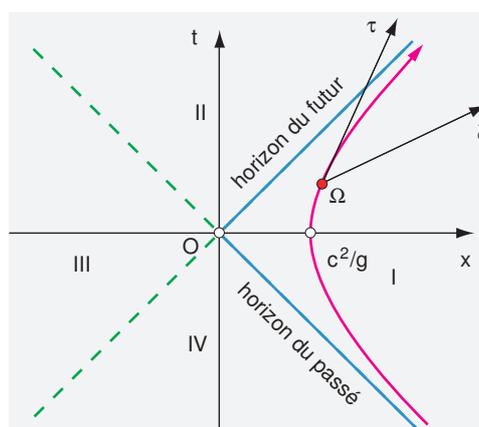


FIGURE 45 Mouvement hyperbolique et horizons des événements.

hicule qui accélère en s'éloignant d'une femme debout au bord d'une longue route. Vue depuis la voiture, la femme s'éloigne ; pourtant, après un certain temps, la seule chose que le conducteur remarque est qu'elle s'approche lentement de l'horizon. En physique galiléenne, à la fois le conducteur du véhicule et la femme sur la route observent que l'autre personne s'approche de leur horizon. En relativité restreinte, seul l'observateur accéléré fait cette observation.

Un graphique de la situation permet d'éclaircir ce résultat. Dans la Figure 45 nous pouvons voir que la lumière émise depuis n'importe quel événement des régions II et III ne peut atteindre l'observateur grec. Ces événements-là sont masqués pour lui et ne peuvent pas être observés. Assez étrangement, pourtant, la lumière émise par l'observateur grec *peut* atteindre la région II. La frontière entre la partie de l'espace-temps qui peut être observée et la partie que ne peut l'être est appelée l'*horizon des événements*. En relativité, les horizons des événements agissent comme des passerelles à sens unique pour la lumière et d'autres signaux. Afin d'être exhaustif, le graphique indique également l'horizon des événements passés. Pouvez-vous confirmer que les horizons des événements sont *noirs* ?

Défi 128 pe

Donc, tous les événements observés dans un référentiel inertiel ne peuvent pas être observés dans un référentiel en accélération uniforme. Les référentiels uniformément accélérés produisent des horizons des événements situés à une distance de $-c^2/g$. Par exemple, une personne qui est debout ne peut jamais voir plus loin que cette distance, mesurée depuis ses pieds.

Par ailleurs, est-il vrai qu'un rayon lumineux ne peut pas être intercepté par un observateur en mouvement hyperbolique, si l'observateur possède une longueur d'avance suffisante ?

Défi 129 s

Maintenant nous formulons un défi encore plus fort, qui nous préparera à la relativité générale. Quelle est la *forme* de l'horizon, vue par un observateur uniformément accéléré ?

Défi 130 s

L'ACCÉLÉRATION MODIFIE LA COULEUR

Réf. 69, Réf. 75

Nous avons vu auparavant qu'un récepteur mobile perçoit des couleurs différentes par rapport à l'émetteur. Jusqu'à présent, nous avons discuté du décalage de couleur, ou effet Doppler, uniquement pour des observateurs inertiels. Pour des référentiels accélérés la situation est encore plus bizarre : l'émetteur et le récepteur ne s'accordent pas sur les couleurs, même s'ils sont *au repos* l'un par rapport à l'autre. En réalité, si la lumière est émise dans la direction de l'accélération, la formule des intervalles d'espace-temps donne

$$d\sigma^2 = \left(1 + \frac{g_0 x}{c^2}\right)^2 c^2 dt^2 \quad (94)$$

Défi 131 pe

dans laquelle g_0 est l'accélération propre d'un observateur situé au point $x = 0$. Nous pouvons déduire d'une manière directe que

$$\frac{f_r}{f_s} = 1 - \frac{g_r h}{c^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{g_s h}{c^2}\right)} \quad (95)$$

Défi 132 s

où h représente la distance des barres entre la source et le récepteur, et où $g_s = g_0/(1 + g_0 x_s/c^2)$ et $g_r = g_0/(1 + g_0 x_r/c^2)$ sont les accélérations propres mesurées à la source et au détecteur. En bref, la fréquence de la lumière décroît lorsque la lumière se déplace dans la direction de l'accélération. D'ailleurs, cela a-t-il un effet sur la couleur des arbres dans leur direction verticale ?

La formule généralement citée, à savoir

$$\frac{f_r}{f_s} = 1 - \frac{gh}{c^2}, \quad (96)$$

Défi 133 pe

n'est exacte qu'en première approximation. Dans des référentiels accélérés, nous devons être prudents à propos de la signification de chaque quantité. Pour les accélérations courantes, toutefois, les différences entre les deux formules sont négligeables. Pouvez-vous confirmer ce point ?

LA LUMIÈRE PEUT-ELLE ALLER PLUS VITE QUE c ?

Quelle est la vitesse de la lumière mesurée par un observateur accéléré ? En utilisant l'expression (96) précédente, un observateur en accélération en tire que

$$v_{\text{lumière}} = c \left(1 + \frac{gh}{c^2}\right) \quad (97)$$

ce qui est supérieur à c pour de la lumière se déplaçant en face ou « au-dessus » de lui, et inférieur à c pour de la lumière se déplaçant derrière ou « en dessous » de lui. Cette conséquence déconcertante découle d'une propriété élémentaire d'un référentiel accéléré quelconque. Dans un tel référentiel, bien que tous les observateurs soient au repos les uns par rapport aux autres, les horloges ne restent *pas* synchronisées. Cette variation

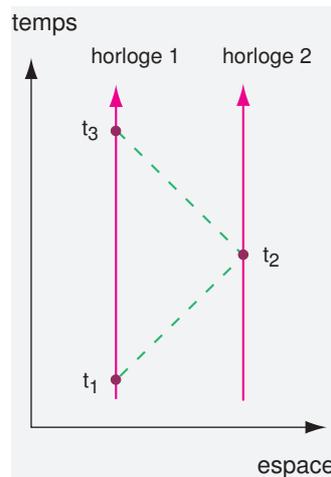


FIGURE 46 Horloges et mesure de la vitesse de la lumière par une approche à double sens.

de la vitesse de la lumière a également été confirmée par l'expérience*. Ainsi, la vitesse de la lumière n'est constante que lorsqu'elle est définie par $c = dx/dt$, et si dx et dt sont mesurés avec une règle située à l'intérieur de l'intervalle dx et une horloge lue pendant l'intervalle dt . Si la vitesse de la lumière est définie par $\Delta x/\Delta t$, ou si la règle définissant les distances, ou l'horloge mesurant le temps, est située à une grande distance de la lumière qui se propage, la vitesse de la lumière est différente de c pour des observateurs en accélération ! C'est le même effet que vous pouvez expérimenter lorsque vous tournez sur vous-même, autour de votre axe vertical, la nuit : les vitesses des étoiles que vous observez sont beaucoup plus élevées que la vitesse de la lumière.

Remarquez que ce résultat n'implique pas que des signaux ou de l'énergie puissent se déplacer plus vite que c . Vous devez pouvoir le vérifier par vous-même.

Défi 134 s

En fait, tous ces effets sont négligeables pour des distances l qui sont insignifiantes par rapport à c^2/a . Pour une accélération de $9,5 \text{ m/s}^2$ (environ celle de la chute libre), les distances devraient être de l'ordre d'une année-lumière, ou $9,5 \cdot 10^{12} \text{ km}$, afin de rendre observable n'importe quel effet significatif. En bref, c est la vitesse de la lumière seulement relativement à la matière située à proximité.

D'ailleurs, la gravité quotidienne est équivalente à une accélération constante. Donc pourquoi, d'après l'expression (97), des objets éloignés tels que des étoiles ne se déplacent-ils pas plus vite que la lumière ?

Défi 135 s

QU'EST-CE QUE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ?

Nous avons vu que la vitesse de la lumière, telle qu'elle est généralement définie, est donnée par c seulement si l'observateur est inertiel ou s'il mesure la vitesse de la lumière passant à proximité (au lieu de la lumière qui passe au loin). En résumé, la vitesse de la lumière doit être mesurée localement. Mais cette condition n'élimine pas toutes les subtilités.

Page 164

* Les propagations retardées qui seront discutées au chapitre sur la relativité générale peuvent être vues comme des confirmations de cet effet.

Un point supplémentaire est souvent omis. Généralement, la longueur est mesurée par le temps que la lumière met pour voyager. Dans un tel cas la vitesse de la lumière sera bien évidemment constante. Mais comment vérifions-nous cette constance ? Nous avons besoin de faire abstraction des mesures de longueur. La manière la plus simple pour y parvenir est de faire réfléchir la lumière avec un miroir, comme indiqué sur la Figure 46. La constance de la vitesse de la lumière implique que, si la lumière va et vient le long d'une courte ligne droite, alors les horloges situées aux deux extrémités mesurent le temps donné par

$$t_3 - t_1 = 2(t_2 - t_1) . \quad (98)$$

Nous supposons ici que les horloges ont été synchronisées en accord avec les instructions de la page 44. Si le facteur n'était pas exactement égal à deux, la vitesse de la lumière ne serait pas constante. En réalité, toutes les expériences réalisées jusqu'à présent ont produit un facteur égal à deux, dans les limites des erreurs de mesure*.

Défi 136 s Ce résultat est parfois exprimé en disant qu'il est impossible de mesurer la *vitesse de la lumière à sens unique*, seule la vitesse de la lumière à *double sens* (aller et retour) est mesurable. Êtes-vous d'accord ?

LIMITES SUR LA LONGUEUR DES CORPS SOLIDES

Un objet solide familier se brise lorsqu'une certaine partie de celui-ci se déplace par rapport à une autre partie donnée à une vitesse supérieure à la vitesse du son c pour ce matériau**. Par exemple, quand un objet frappe le sol et que sa partie frontale est stoppée dans l'intervalle d'une distance d , l'objet finit par se briser lorsque

$$\frac{v^2}{c^2} \geq \frac{2d}{l} . \quad (99)$$

De cette manière, nous voyons que nous pouvons éviter de briser des objets fragiles en les enveloppant dans de la mousse – ce qui augmente la distance d'arrêt – ayant une épaisseur approximativement égale à la taille de l'objet. Cela pourrait expliquer pourquoi des boîtes contenant des cadeaux sont généralement beaucoup plus grandes que les cadeaux eux-mêmes !

La limite de rupture peut aussi être écrite d'une manière différente. Pour éviter la brisure, l'accélération a d'un corps solide de longueur l doit vérifier

$$la < c^2 , \quad (100)$$

où c représente la vitesse du son, qui est la vitesse limite pour les parties matérielles

* Les subtilités concernant l'approche à sens unique et à double sens de la vitesse de la lumière demeureront un sujet de discussion pendant longtemps. Un grand nombre d'expériences sont expliquées et discutées dans la Réf. 22. Zhang affirme, dans son récapitulatif en page 171, que la vitesse de la lumière à sens unique est en réalité indépendante de la source lumineuse. Toutefois, aucune expérience ne montre réellement qu'elle est équivalente à l'approche à double sens. Qui plus est, la plupart des expériences dites à « sens unique » sont toujours en fait des expériences à « double sens » (consultez sa page 150).

Réf. 76

** La vitesse (longitudinale) du son est d'environ 5,9 km/s pour le verre, le fer ou l'acier, environ 4,5 km/s pour l'or et environ 2 km/s pour le plomb. La page 209 liste d'autres vitesses pour le son.

des solides. Reprenons maintenant la discussion en relativité, en utilisant la vitesse de la lumière au lieu de celle du son. Imaginez que vous accélériez la face frontale d'un corps solide avec une certaine accélération propre a . La face arrière ne peut pas se déplacer avec une accélération α supérieure ou égale à l'infini, ou, si nous préférons, elle ne peut pas se déplacer plus vite que la vitesse de la lumière. Une rapide vérification montre par conséquent que la longueur l d'un corps solide doit vérifier

$$l\alpha < c^2/2, \quad (101)$$

où c est maintenant la vitesse de la lumière. Celle-ci limite donc la taille des corps solides. Par exemple, à $9,8 \text{ m/s}^2$, l'accélération d'une moto puissante, cette expression donne une longueur limite de $9,2 \text{ Pm}$, soit environ une année-lumière. Ce n'est pas une restriction importante : toutes les motos sont plus courtes.

En revanche, il existe d'autres situations plus intéressantes. Les accélérations les plus élevées atteintes aujourd'hui sont produites dans les accélérateurs de particules. Les noyaux atomiques possèdent une taille de quelques femtomètres. Pouvez-vous déduire à quelles énergies ils se brisent lorsqu'ils se heurtent violemment dans un accélérateur ? En fait, à l'intérieur d'un noyau, les nucléons se déplacent à des accélérations de l'ordre de $v^2/r \approx \hbar^2/m^2r^3 \approx 10^{31} \text{ m/s}^2$: c'est une des valeurs les plus élevées rencontrées dans la nature.

Remarquez que la physique galiléenne et la relativité induisent une conclusion identique : une vitesse limite, fût-elle celle du son ou celle de la lumière, fait qu'il est impossible que les corps solides soient rigides. Lorsque nous poussons une extrémité d'un corps, l'autre extrémité se déplace toujours un petit peu plus tard.

Une énigme : la vitesse limite entraîne-t-elle l'existence d'une « relation d'incertitude » relativiste

$$\Delta l \Delta a \leq c^2 \quad (102)$$

pour l'indétermination entre la longueur et l'accélération ?

Qu'est-ce que tout cela implique pour la taille des particules élémentaires ? Prenez deux électrons séparés par une distance d , et notez l leur taille. L'accélération due à la répulsion électrostatique conduit alors à une limite supérieure pour leur taille donnée par

$$l < \frac{4\pi\epsilon_0 c^2 d^2 m}{e^2}. \quad (103)$$

Plus les électrons peuvent être proches, plus ils doivent être petits. La limite expérimentale actuelle donne une taille inférieure à 10^{-19} m . Les électrons peuvent-ils être réellement ponctuels ? Nous reviendrons sur cette question durant notre étude de la relativité générale et de la théorie quantique.

LA RELATIVITÉ RESTREINTE EN QUATRE PROPOSITIONS

Cette étape de notre ascension de la Montagne Mouvement peut être rapidement synthétisée.

- Tout observateur (flottant librement) remarque qu'il existe une vitesse unique et parfaite dans la nature, à savoir une vitesse maximale pour l'énergie ordinaire, qui se rapporte au rayonnement sans masse comme la lumière ou les signaux radio, mais qui ne peut être atteinte par les systèmes matériels.
- Par conséquent, bien que l'espace-temps soit le même pour tous les observateurs, les durées et les longueurs varient d'un observateur à l'autre, comme les transformations de Lorentz (13) et (14) l'expliquent, et comme les expériences le confirment.
- Les collisions indiquent qu'une vitesse maximale implique que la masse est de l'énergie concentrée, et que l'énergie totale d'un corps est donnée par $E = \gamma mc^2$, comme les expériences le confirment encore une fois.
- Appliqués à des objets accélérés, ces résultats conduisent à un grand nombre de conséquences qui défient l'intuition, tels le paradoxe des jumeaux, l'émergence des horizons des événements et l'apparition de tachyons à courte durée de vie dans les collisions.

La relativité restreinte montre que le mouvement, bien qu'il soit limité en vitesse, est relatif, défini à l'aide de la propagation de la lumière, conservé, réversible et déterministe.

LA VITESSE DE LA LUMIÈRE A-T-ELLE PU FLUCTUER ?

La vitesse de la lumière dépourvue de masse est la vitesse limite. En supposant que toute la lumière soit en réalité sans masse, la vitesse de la lumière a-t-elle pu malgré tout varier d'un endroit à l'autre, ou au fil du temps ? Ce problème retors nous donne toujours la sensation d'être idiot à côté de nombreux physiciens. La première réponse est généralement formulée sous la forme d'un net : « Oui, bien sûr ! Regardez simplement ce qui se passe lorsque la valeur de c est modifiée dans la formule ». (En réalité, il y a même eu des tentatives pour bâtir des « théories de la vitesse de la lumière variable ».) Cependant, cette affirmation souvent formulée est fautive.

Puisque la vitesse de la lumière s'inscrit dans notre définition de l'espace et du temps, elle s'immisce alors, même si nous ne le remarquons pas, dans la construction de toutes les règles, tous les étalons de mesure et tous les instruments de mesure. Donc il n'y a aucune manière de détecter si cette valeur fluctue réellement. Aucune expérience concevable ne pourrait détecter une variation de la vitesse limite, puisque celle-ci représente le fondement de toutes les mesures. « C'est une cruauté intellectuelle ! », pourriez-vous penser. « Toutes les expériences montrent que la vitesse de la lumière est invariante, nous devons admettre les conséquences non intuitives les unes après les autres pour accepter la constance de la vitesse de la lumière, et nous serions dorénavant censés admettre qu'il n'y a aucun autre choix ? » Oui, nous le sommes. C'est le comble des progrès de la physique. L'invariance de la vitesse de la lumière par rapport à l'observateur est contre-intuitive et choquante lorsqu'elle est comparée à l'absence d'invariance par rapport à l'observateur aux vitesses quotidiennes, galiléennes. Mais si nous avons pris en considération le fait que chaque mesure de vitesse est fondée – que nous le voulions ou non –

Défi 140 s

sur une comparaison avec la vitesse de la lumière, nous n'aurions pas été étonnés par la constance de celle-ci ; au contraire, nous aurions été étonnés par les propriétés étranges des *petites* vitesses.

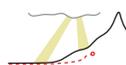
En résumé, il n'existe en principe aucune façon de vérifier l'invariance d'un étalon de mesure. Autrement dit, l'aspect vraiment surprenant de la relativité n'est pas l'invariance de c , c'est sa disparition des formules propres au mouvement quotidien.

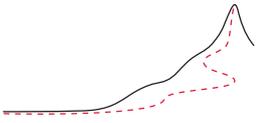
QUE SE PASSE-T-IL PRÈS DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ?

Au fur et à mesure que nous approchons de la vitesse de la lumière, les quantités présentes dans la transformation de Lorentz divergent. Une division par zéro est impossible : en réalité, ni les masses ni les observateurs ne peuvent se déplacer à la vitesse de la lumière. Toutefois, cette conclusion est incomplète.

Aucune observable ne diverge réellement dans la nature. En s'approchant aussi près que possible de la vitesse de la lumière, la relativité restreinte elle-même s'effondre. Aux contractions de Lorentz extrêmement grandes, il n'existe aucune manière de faire fi de la courbure de l'espace-temps. En fait, la gravitation doit être prise en compte dans ces situations. À proximité des horizons, nous ne pouvons pas ignorer les fluctuations de vitesse et de position : ici la théorie quantique doit être prise en considération. L'exploration de ces deux limitations définit les deux prochaines étapes de notre ascension de la Montagne Mouvement.

Au début de notre aventure, pendant notre exploration de la physique galiléenne, après avoir défini les concepts fondamentaux de la vitesse, de l'espace et du temps, nous avons tourné notre regard vers la gravitation. L'invariance de la vitesse de la lumière nous a obligé à revoir ces concepts de base. Nous allons maintenant revenir à l'étude de la gravitation à la lumière de cette invariance.





CHAPITRE 2

RELATIVITÉ GÉNÉRALE : GRAVITATION, VITESSE MAXIMALE ET FORCE MAXIMALE

GÉNÉRALE, cette nouvelle théorie (relativiste) est à la portée de tous. De même que la gravitation universelle et sa loi en l'inverse du carré, elle peut être rendue très intuitive, de nos jours, en utilisant la bonne approche. Les idées principales de la relativité générale, tout comme celles de la relativité restreinte, sont accessibles aux étudiants du second cycle. Les trous noirs, les ondes gravitationnelles, la courbure de l'espace-temps et les frontières de l'Univers dans son ensemble peuvent alors être appréhendés aussi facilement que l'effet Doppler ou le paradoxe des jumeaux.

Nous découvrirons que, comme la relativité restreinte qui est fondée sur l'existence d'une vitesse maximale c , la relativité générale est fondée sur une force maximale $c^4/4G$ ou sur une puissance physique maximale $c^5/4G$. Nous allons montrer, tout d'abord, que toutes les données expérimentales connues sont cohérentes avec ces limitations. En fait, nous remarquerons que la force maximale et la puissance maximale ne sont atteintes que sur des surfaces limites infranchissables : ces surfaces extrêmes sont dénommées *horizons*. Nous serons alors capables de déduire les équations du champ de la relativité générale. En particulier, l'existence d'une valeur maximum pour la force ou la puissance implique que l'espace-temps est courbé. Ceci explique pourquoi le ciel est noir la nuit et indique que l'Univers est de taille finie.

Nous discuterons également des principaux paradoxes qui surgissent de ces limites, ainsi que des arguments de ses détracteurs. Les réponses aux paradoxes nous permettront de comprendre pourquoi ces limites sont restées invisibles pendant si longtemps, à la fois dans les expériences et dans l'enseignement.

Passé cette introduction, nous étudierons les effets de la gravitation relativiste plus en détail. En particulier, nous analyserons les conséquences de la courbure de l'espace-temps sur les mouvements des corps et de la lumière dans notre environnement quotidien. Par exemple, la loi en l'inverse du carré sera remaniée. (Pouvez-vous expliquer pourquoi cela est nécessaire au vu de tout ce que nous avons appris jusqu'à présent?) De manière totalement fascinante, nous découvrirons comment nous pouvons déplacer et courber le vide. Nous étudierons alors l'Univers dans sa globalité, et pour finir nous explorerons les formes les plus extrêmes de gravitation : les trous noirs.

Défi 141 s



FIGURE 47 Effets de la gravitation : une stalactite qui coule (© Richard Cindric) et les anneaux de Saturne, photographiés lorsque le Soleil est masqué par la planète. (CICLOPS, JPL, ESA, NASA)

FORCE MAXIMALE – TOUTE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE DANS UNE FORMULE

Réf. 78

« Un des principaux objets de la recherche théorique dans de nombreux départements scientifiques consiste à découvrir le point de vue à partir duquel le sujet étudié se manifeste dans sa plus grande simplicité. »

Willard Gibbs

Nous venons de voir que la théorie de la relativité *restreinte* se manifeste à partir du moment où nous reconnaissons l'existence d'une vitesse limite c dans la nature et où nous prenons cette limite comme principe fondamental. Au tournant du vingt et unième siècle, on a montré que la relativité *générale* peut être appréhendée en utilisant un principe élémentaire similaire :

Réf. 79, Réf. 81

▷ *Il existe une force maximale dans la nature :*

$$F \leq \frac{c^4}{4G} = 3,0 \cdot 10^{43} \text{ N} . \quad (104)$$

Dans la nature, aucune force ne peut excéder cette valeur, quel que soit le muscle, la machine ou le système qui l'exerce. Pour les curieux, la valeur de cette force limite représente l'énergie d'un trou noir (de Schwarzschild) divisée par le double de son rayon. Cette force maximale peut être comprise intuitivement en remarquant que les trous noirs (de Schwarzschild) sont les corps les plus denses possibles pour une masse donnée. Puisqu'il existe une limite à la façon dont un corps peut être comprimé, les forces – qu'elles soient gravitationnelles, électriques, centripètes ou de n'importe quel autre type – ne peuvent pas être arbitrairement grandes.

Alternativement, il est possible de faire usage d'un autre énoncé, équivalent, comme principe fondamental :

▷ *Il existe une puissance maximale dans la nature :*

$$P \leq \frac{c^5}{4G} = 9,1 \cdot 10^{51} \text{ W} . \quad (105)$$

La puissance dégagée par n'importe quel moteur, ampoule ou explosion ne peut excéder cette valeur. Cette puissance maximale est atteinte lorsqu'un trou noir (de Schwarzschild) rayonne dans l'espace durant le temps que la lumière met pour parcourir une longueur correspondant à son diamètre. Nous verrons précisément plus bas ce que sont les trous noirs et pourquoi ils sont reliés à ces valeurs limites.

Toute la théorie de la relativité générale découle de l'existence d'une force ou d'une puissance maximale. Afin de démontrer l'exactitude et l'efficacité de cette approche, une énumération d'arguments est nécessaire. Cette liste est la même que pour la démonstration de la légitimité de la vitesse limite en relativité restreinte. En premier lieu, nous devons recueillir tout témoignage observationnel sur cette prétendue limite. Deuxièmement, pour ériger cette limite en principe naturel, nous devons montrer que la relativité générale découle de celle-ci. Finalement, nous devons vérifier que cette limite s'applique dans toutes les situations possibles et imaginables. N'importe quel paradoxe apparent demandera à être résolu.

Ces trois étapes structurent cette introduction à la relativité générale. Nous commencerons cette histoire en racontant la genèse de cette idée d'une valeur limite.

LES LIMITES D'UNE FORCE ET D'UNE PUISSANCE MAXIMALES

Au cours des dix-neuvième et vingtième siècles, de nombreux physiciens s'efforçaient d'éviter de faire appel au concept de force. Heinrich Hertz en fit une ligne directrice de ses travaux, et écrivit un ouvrage influent sur la mécanique classique sans jamais utiliser ce concept. Les pères de la théorie quantique, qui connaissaient tous ce texte, supprimèrent alors complètement le terme « force » du vocabulaire de la physique microscopique. Entre-temps, le concept de « force gravitationnelle » fut éliminé de la relativité générale, en le réduisant à une « pseudo-force ». La notion de force tomba en désuétude.

Pourtant, le principe de force maximale a un sens, pourvu que nous l'imaginions au moyen de cette définition pratique : *la force est le flux de quantité de mouvement par unité de temps*. La quantité de mouvement ne peut pas être créée ou détruite. Nous employons le mot « flux » pour nous rappeler que la quantité de mouvement, étant une quantité conservée, ne peut varier que par un écoulement vers l'intérieur ou vers l'extérieur. En d'autres termes, la variation de la quantité de mouvement se produit toujours à travers une certaine surface frontière. Cette remarque est d'une importance cruciale. À chaque fois que nous pensons à une force en un point, nous cherchons à matérialiser la quantité de mouvement qui « s'écoule » à travers une surface en ce point. La relativité générale formule habituellement cette idée comme suit : la force oblige les corps à suivre des géodésiques. Le mécanisme sous-jacent à la mesure d'une force n'est pas important. Afin de fournir un exemple concret pour éclairer cette discussion, il peut être utile d'imaginer la force comme étant d'origine électromagnétique. En réalité, n'importe quel type de force est possible.

Le principe de la force maximale se ramène ainsi à l'assertion suivante : si nous imaginons une surface physique quelconque (et que nous la recouvrons d'observateurs), l'intégrale du flux de la quantité de mouvement à travers cette surface (mesurée par tous ces observateurs) ne dépasse jamais une certaine valeur. Il importe peu de savoir comment cette surface est choisie tant qu'elle reste physique, c'est-à-dire tant que nous pouvons

TABLEAU 2 Comment persuader les gens, ainsi que vous-même, qu'il existe une force maximale $c^4/4G$ (ou une puissance maximale $c^5/4G$) dans la nature.

PROBLÈME	MÉTHODE
Des valeurs de force $> c^4/4G$ ne sont pas observées	vérifiez toutes les observations
Des valeurs de force $> c^4/4G$ ne peuvent pas être produites	vérifiez toutes les tentatives possibles
Des valeurs de force $> c^4/4G$ ne sont pas locales ou ne sont pas dues à un transport d'énergie	vérifiez toutes les observations
Des valeurs de force $> c^4/4G$ ne peuvent être imaginées	résolvez tous les paradoxes
Une valeur maximale de force de $c^4/4G$ est cohérente	montrez que toutes les conséquences, même bizarres, sont confirmées par l'observation déduisez-en la théorie de la relativité générale

attacher des observateurs* sur celle-ci.

Ce principe impose une limite aux muscles, aux effets des marteaux, à l'écoulement de matière, à l'accélération des corps massifs, et à bien d'autres encore. Aucun système ne peut créer, mesurer ou ressentir une force supérieure à cette limite. Aucune particule, aucune galaxie et aucun bulldozer ne peuvent la dépasser.

L'existence d'une force limite possède une conséquence séduisante. Dans la nature, les forces peuvent être mesurées. Chaque mesure est une comparaison avec un standard. La force limite fournit une unité *naturelle* de force qui s'ajuste dans le système d'unités naturelles** que Max Planck dérivait de c , G et h (ou \hbar). La force maximale fournit donc un étalon de force valable à chaque endroit de l'espace et à chaque instant du temps.

La valeur limite de $c^4/4G$ se distingue de l'unité que Planck proposa sur deux points. Premièrement, le facteur numérique est différent (Planck avait dans l'esprit la valeur c^4/G). Deuxièmement, l'unité de force est une valeur *limitante*. À cet égard, la force maximale joue le même rôle que la vitesse maximale. Comme nous le verrons plus tard, cette propriété limite est également valide pour toutes les autres unités de Planck, une fois que les facteurs numériques ont été correctement corrigés. Le facteur $1/4$ n'a pas de signification plus profonde : c'est juste la valeur qui conduit à la forme correcte des équations du champ de la relativité générale. Ce facteur $1/4$ dans la limite est également requis pour retrouver, dans des situations plus courantes, la loi en l'inverse du carré de la gravitation universelle. Lorsque ce facteur est correctement pris en considération, la

Réf. 80

Page ??

Page 115

* Les observateurs en relativité générale, comme en relativité restreinte, sont des systèmes physiques possédant une masse qui est si petite que leur influence sur le système observé est imperceptible.

** Lorsque Planck découvrit le quantum d'action, il remarqua également qu'il était possible de définir des unités naturelles. Lors d'une promenade dans la forêt au voisinage de Berlin avec son fils alors âgé de sept

force (ou puissance) maximale est simplement donnée par l'énergie de Planck (corrigée) divisée par la longueur de Planck (corrigée) ou le temps de Planck.

L'expression de la force maximale inclut la vitesse de la lumière c et la constante gravitationnelle G ; elle peut donc être qualifiée d'expression de la gravitation relativiste. Le principe fondamental de la relativité restreinte établit que la vitesse v vérifie $v \leq c$ pour tous les observateurs. De manière analogue, le principe de base de la relativité générale établit que, dans tous les cas, la force F et la puissance P vérifient $F \leq c^4/4G$ et $P \leq c^5/4G$. Il importe peu que l'observateur mesure la force ou la puissance tout en se déplaçant avec une vitesse élevée par rapport au système observé, tout en étant en chute libre ou tout en étant fortement accéléré. Cependant, nous verrons qu'il est essentiel que l'observateur relève des valeurs mesurées à son emplacement propre et que l'observateur soit réaliste, c'est-à-dire constitué de matière et non séparé du système par un horizon. Ce sont les mêmes contraintes qui doivent être vérifiées par des observateurs mesurant la vitesse en relativité restreinte.

Page 71

Puisque la puissance physique est la force multipliée par la vitesse, et puisque la nature fournit une vitesse limite, la borne de la force et la borne de la puissance sont équivalentes. Nous avons déjà vu que la force et la puissance apparaissent ensemble dans la définition de la quadri-force, nous pouvons donc affirmer que cette borne supérieure s'applique à chaque composante d'une force, ainsi qu'à sa grandeur. La borne de la puissance limite le débit d'énergie des moteurs des voitures et des motos, des ampoules, des lasers, des astres, des sources de rayonnement gravitationnel et des galaxies. Elle est équivalente à $1,2 \cdot 10^{49}$ chevaux-vapeur. Le principe de puissance maximale établit qu'il n'existe aucune manière de fournir ou de se débarrasser de l'énergie plus rapidement que cette borne.

La puissance limite peut être comprise intuitivement en remarquant que chaque moteur produit des *échappements*, c'est-à-dire une certaine quantité de matière ou d'énergie qui est délaissée. Pour une ampoule, une étoile ou un trou noir en évaporation, les échappements sont les rayonnements émis. Pour une voiture ou un moteur à réaction ce sont des gaz chauds, pour une turbine à eau l'échappement est l'eau qui se déplace lentement en quittant la turbine, pour une fusée c'est la matière éjectée à son extrémité arrière, pour un photon qui fuse ou un moteur électrique, c'est l'énergie électromagnétique. À chaque fois que la puissance d'un moteur se rapproche de la valeur limite, les échappements s'accroissent de façon drastique en termes de masse-énergie. Pour des masses dégagées extrêmement élevées, l'attraction gravitationnelle issue de ces échappements – même s'ils ne sont que rayonnements – empêche une accélération supplémentaire du moteur par rapport à ceux-ci. Le principe de puissance maximale exprime donc le fait qu'il existe un mécanisme automatique de freinage dans la nature, ce mécanisme de ralentissement est la gravité.

De plus, une autre limite analogue surgit lorsque la puissance maximale est divisée par c^2 .

▷ *Il existe un taux maximum de variation de la masse dans la nature :*

$$\frac{dm}{dt} \leq \frac{c^3}{4G} = 1,0 \cdot 10^{35} \text{ kg/s} . \quad (106)$$

ans, il lui déclara qu'il avait fait une découverte aussi importante que celle de la gravitation universelle.

Cette borne impose une limite aux pompes, aux moteurs à réaction et à ceux qui mangent très rapidement. En réalité, le débit d'écoulement de l'eau ou d'une matière quelconque à l'intérieur des conduits est restreint. La limite de l'écoulement de masse est manifestement équivalente à l'une des deux limites, de la force ou de la puissance.

Cette revendication d'une force, puissance ou variation de masse maximale dans la nature semble presque trop saugrenue pour être vraie. Notre première tâche consiste par conséquent à la vérifier empiriquement de la manière la plus complète possible.

L'ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE

De même que le principe de vitesse maximale, le principe de force maximale doit en premier lieu être contrôlé de manière expérimentale. Michelson a consacré une grande partie de sa vie de chercheur à rechercher des variations possibles dans la valeur de la vitesse de la lumière. Personne n'a jusqu'à présent consacré autant d'efforts à tester la force ou la puissance maximale. Toutefois, il faut reconnaître honnêtement qu'aucune expérience, qu'elle soit microscopique, macroscopique ou astronomique, n'a jamais mesuré des valeurs de force supérieures à la limite établie. De nombreuses personnes ont prétendu avoir réalisé des vitesses plus grandes que celle de la lumière. Jusque-là, personne n'a jamais proclamé avoir produit une force plus importante que la valeur limite.

Les accélérations colossales que les particules éprouvent lors des collisions à l'intérieur du Soleil, dans les accélérateurs les plus puissants ou dans les réactions induites par les rayons cosmiques correspondent à des grandeurs de forces beaucoup plus petites que la force limite. Il en est de même pour les neutrons dans les étoiles à neutrons, pour les quarks à l'intérieur des protons, et pour toute la matière qui a été observée en train de chuter en direction des trous noirs. En outre, la recherche de singularités de l'espace-temps, qui pourraient permettre à des forces d'atteindre ou de dépasser la force limite, est restée infructueuse.

Dans le domaine astronomique, toutes les forces qui agissent entre les étoiles ou les galaxies se situent en deçà de la valeur limite, comme le sont les forces qui agissent en leur sein. Même les interactions qui agissent entre deux moitiés quelconques de l'Univers n'excèdent pas la limite, à condition qu'une division physiquement raisonnable entre les deux moitiés soit prise en compte. (La signification de « division physiquement raisonnable » sera donnée ci-après, pour des divisions qui *ne sont pas* raisonnables, des exceptions à cette exigence de force maximale *peuvent* être construites. Vous devriez vous amuser à rechercher une telle exception.)

Les astronomes ne sont également pas parvenus à découvrir une quelconque région de l'espace-temps dont la courbure (une notion qui est introduite plus bas) est assez grande pour permettre aux forces de surpasser la force limite. En fait, aucune des très nombreuses observations récentes des trous noirs n'a permis de révéler des forces supérieures à la valeur limite ou des objets plus petits que le rayon du trou noir correspondant. Les observations n'ont pareillement pas réussi à trouver une situation qui pourrait permettre à un observateur rapide d'observer une grandeur de force qui dépasse la limite, grâce au facteur d'impulsion relativiste.

La limite à la puissance peut aussi être vérifiée expérimentalement. Il apparaît que la puissance – ou la luminosité – des étoiles, des quasars, des pulsars binaires, des sursauts gamma, des galaxies ou des amas de galaxies peut en réalité représenter une fraction

significative de la puissance limite. Toutefois, aucune violation de cette frontière n'a été constatée jusqu'à présent. En fait, la somme de toute la lumière émise par tous les astres de l'Univers ne dépasse pas la limite. De la même manière, les sources les plus intenses d'ondes gravitationnelles, des trous noirs qui fusionnent, n'excèdent pas la puissance limite. Seule la luminosité des trous noirs qui s'évaporent, dans leur phase terminale, peuvent égaler cette limite. Mais, jusqu'à ce jour, on n'en a jamais observé. (Le fait que des sources dans l'Univers puissent à elles seules approcher la puissance limite, alors que l'Univers tout entier doit également obéir à celle-ci, constitue le paradoxe de la puissance. Nous en dirons plus ci-dessous.)

De façon similaire, tous les débits d'écoulement de masse observés ont des ordres de grandeur inférieurs à la limite associée. Même des systèmes physiques qui sont les analogues mathématiques des trous noirs – par exemple, des trous noirs acoustiques silencieux ou des trous noirs optiques – n'infirmes pas les limites à la force et à la puissance, lesquelles sont vérifiées dans les systèmes correspondants.

La réalité expérimentale est quelque peu décevante. Les expériences ne contredisent pas les valeurs limites. Mais ces données ne les confirment pas non plus. La raison en est que dans la vie quotidienne et dans les systèmes expérimentalement accessibles, les horizons sont absents. Nous rencontrons la vitesse maximale à la base de la relativité restreinte presque partout, la force maximale et la puissance maximale ne se manifestent presque nulle part. Nous proposerons ci-dessous quelques tests consacrés aux limites qui pourraient être atteintes à l'avenir.

EN DÉDUIRE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE*

Afin d'ériger les limites de la force et de la puissance maximales en principes physiques fondamentaux, il n'est pas suffisant de montrer qu'elles sont cohérentes avec ce que nous observons dans la nature. Il est nécessaire de vérifier qu'elles impliquent la théorie complète de la relativité générale. (Cette section est destinée uniquement aux lecteurs qui connaissent déjà les équations du champ de la relativité générale. Les autres devraient passer à la section suivante.)

Afin de déduire la théorie de la relativité, nous avons besoin d'étudier minutieusement les systèmes qui réalisent cette limite. Dans le cas de la théorie restreinte de la relativité, le système principal qui réalise la vitesse limite est la lumière. Pour cette raison, la lumière est primordiale dans l'exploration de la relativité restreinte. Dans le cas de la relativité générale, les systèmes qui réalisent cette limite sont moins évidents. Nous remarquons tout d'abord qu'une force (ou puissance) maximale ne peut pas être réalisée dans tout un volume d'espace. Si cela était possible, une simple poussée de Lorentz** pourrait transformer cette force (ou puissance) en une valeur plus élevée. Par conséquent, la nature ne peut réaliser de force et de puissance maximales que sur des surfaces, non sur des volumes. De plus, ces surfaces doivent être inaccessibles. Ces surfaces inaccessibles sont élémentaires pour la relativité générale, elles sont appelées *horizons*. La force et la puissance maximales n'apparaissent que sur des horizons. Nous avons rencontré ceux-ci en relativité restreinte, où ils étaient définis comme des surfaces qui imposent des limites

* Cette section peut être sautée en première lecture. (La preuve mentionnée date de décembre 2003.)

** Une *poussée de Lorentz* a été définie en relativité restreinte comme un changement de point de vue pour un deuxième observateur se déplaçant par rapport au premier.

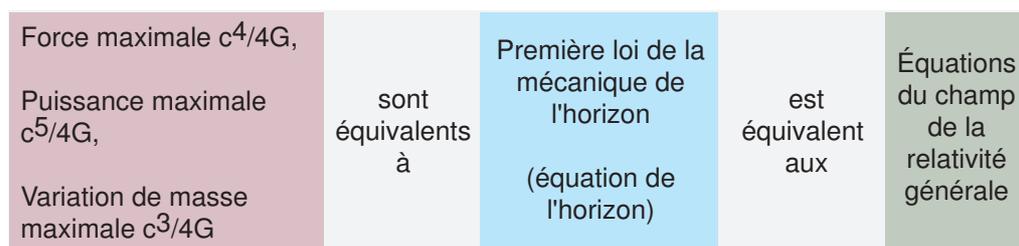


FIGURE 48 Présentation de l'équivalence de la force ou puissance maximale avec les équations du champ de la relativité générale.

à l'observation. (Remarquez le contraste avec la vie courante, où un horizon est simplement une ligne, et non une surface.) Cette définition d'un horizon comme étant une surface de force (ou puissance) maximale est équivalente à la définition d'une surface au-delà de laquelle aucun signal ne peut être reçu. Dans les deux cas, un horizon est une surface au-delà de laquelle l'interaction demeure impossible.

La correspondance entre les horizons et la force maximale est un point capital de la gravitation relativiste. Elle est aussi importante que le rapport qui existe entre la lumière et la vitesse maximale en relativité restreinte. Dans celle-ci, nous avons montré que le fait que la vitesse de la lumière soit la vitesse maximale dans la nature implique la transformation de Lorentz. En relativité générale, nous allons maintenant démontrer que la force maximale dans la nature, que nous pouvons baptiser *force de l'horizon*, implique les équations du champ de la relativité générale. Pour atteindre cet objectif, nous commençons avec la remarque pertinente qu'un flux d'énergie traverse tous les horizons. Ce flux dépend de la courbure de l'horizon, comme nous le verrons. Cette correspondance implique que des horizons ne peuvent être plats, puisqu'un plan s'étendant à l'infini impliquerait un flux infini d'énergie.

La déduction des équations de la relativité générale ne se fait qu'en deux étapes, comme l'indique la Figure 48. Dans la première, on montre que le principe de force ou puissance maximale implique la première « loi » de la mécanique de l'horizon. Dans la seconde, on montrera que cette première « loi » implique les équations du champ de la relativité générale.

L'horizon fini le plus simple est une sphère statique, correspondant à un trou noir de Schwarzschild. Un horizon sphérique est caractérisé par son rayon de courbure R ou, de manière équivalente, par sa gravité de surface a . Ces deux quantités sont reliées par $2aR = c^2$. Maintenant, l'écoulement d'énergie à travers n'importe quel horizon est toujours fini par extension lorsqu'il est mesuré le long de la direction de propagation. Nous pouvons alors parler plus précisément d'une impulsion d'énergie. Toute impulsion d'énergie qui traverse un horizon est donc caractérisée par une énergie E et une longueur propre L . Lorsque cette impulsion d'énergie s'écoule perpendiculairement à travers un horizon, le taux de variation de la quantité de mouvement, ou la force, pour un observateur situé sur l'horizon est

$$F = \frac{E}{L}. \quad (107)$$

Notre but est de montrer que l'existence d'une force maximale implique la relativité générale. Maintenant, la force maximale est réalisée sur des horizons. Nous avons ainsi besoin d'insérer les valeurs maximales possibles de chaque côté de l'équation (107) et de montrer que la relativité générale en découle.

En utilisant la valeur de la force maximale et l'aire $4\pi R^2$ pour un horizon sphérique, nous obtenons :

$$\frac{c^4}{4G} = \frac{E}{LA} 4\pi R^2. \quad (108)$$

La fraction E/A représente l'énergie par unité de surface s'écoulant à travers n'importe quelle aire A qui est une partie d'un horizon. L'insertion des valeurs maximales est achevée lorsque nous remarquons que la longueur L de l'impulsion d'énergie est restreinte par le rayon R . La limite $L \leq R$ découle de considérations géométriques : vue depuis le côté concave de l'horizon, l'impulsion doit être plus courte que le rayon de courbure. Un argument indépendant est le suivant. La longueur L d'un objet accéléré d'un facteur a est limitée, par la relativité restreinte, par $L \leq c^2/2a$. La relativité restreinte montre déjà que cette limite est associée à l'émergence d'un horizon. Avec la relation (108), l'allégation que les horizons sont des surfaces de force maximale conduit à la relation importante suivante pour des horizons sphériques et statiques :

Réf. 83

$$E = \frac{c^2}{8\pi G} a A. \quad (109)$$

Cette équation de l'horizon relie le flux d'énergie E qui traverse une surface A d'un horizon sphérique à la gravité de surface a . Elle établit que l'énergie qui s'écoule à travers un horizon est limitée, que cette énergie est proportionnelle à l'aire de cet horizon, et que le flux d'énergie est proportionnel à la gravité de surface. (L'équation de l'horizon est également appelée *première loi de la mécanique du trou noir* ou *première loi de la mécanique de l'horizon*.)

Réf. 84

La dérivation ci-dessus conduit également au résultat intermédiaire suivant :

$$E \leq \frac{c^4}{16\pi G} \frac{A}{L}. \quad (110)$$

Cette variante de l'équation de l'horizon formule plus clairement le fait qu'aucune surface autre qu'un horizon ne peut parvenir au flux d'énergie maximal, lorsque l'aire et la longueur de l'impulsion (ou la gravité de surface) sont données. Aucun autre domaine de la physique ne fait de déclarations comparables : elles sont intrinsèques à la théorie de la gravitation.

Une dérivation alternative de l'équation de l'horizon peut débiter en mettant l'accent sur la puissance au lieu de la force, en utilisant $P = E/T$ comme équation de départ.

Il est important de souligner que les équations de l'horizon (109) et (110) découlent uniquement de deux hypothèses : premièrement, il existe une vitesse maximale dans la nature et, deuxièmement, il existe une force (ou puissance) maximale dans la nature. Aucune théorie spécifique de la gravitation n'est présumée. L'équation de l'horizon pourrait même être testée de manière expérimentale, comme il est argumenté ci-dessous.

(Nous remarquons également que l'équation de l'horizon – ou, de façon équivalente, la force ou puissance limite – implique un taux de variation de masse maximal dans la nature donné par $dm/dt \leq c^3/4G$.)

Ensuite, nous devons généraliser l'équation de l'horizon, des horizons sphériques et statiques aux horizons généraux. Puisque la force maximale est supposée valide pour *tous* les observateurs, qu'ils soient au repos ou accélérés, la généralisation est immédiate. Pour un horizon dont la courbure est irrégulière ou variable au cours du temps, l'équation de l'horizon devient :

$$\delta E = \frac{c^2}{8\pi G} a \delta A . \quad (111)$$

Cette relation différentielle – qui devrait être baptisée *équation généralisée de l'horizon* – est valable pour un horizon quelconque. Elle peut être appliquée séparément pour chaque morceau δA d'un horizon spatialement ou dynamiquement variable. L'équation généralisée de l'horizon (111) a été comprise comme étant équivalente à la relativité générale au moins depuis 1995, lorsque cette équivalence fut (implicitement) démontrée par Jacobson. Nous montrerons que cette équation différentielle de l'horizon joue le même rôle pour la relativité générale que l'équation $dx = c dt$ pour la relativité restreinte. Désormais, lorsque nous évoquerons l'équation de l'horizon, nous sous-entendrons la forme différentielle générale (111) de cette relation.

Réf. 85

Il est instructif de reformuler le comportement des impulsions d'énergie de longueur L d'une manière qui reste valable pour n'importe quelle surface, même s'il ne s'agit pas d'un horizon. En réitérant la dérivation précédente, nous obtenons

$$\frac{\delta E}{\delta A} \leq \frac{c^4}{16\pi G} \frac{1}{L} . \quad (112)$$

L'égalité est réalisée uniquement quand la surface A est un horizon. En d'autres termes, à chaque fois que la valeur $\delta E/\delta A$ dans un système physique approche celle du membre de droite, un horizon commence à se former. Cette correspondance sera essentielle dans notre discussion sur les contradictions apparentes des principes limites.

Si nous nous souvenons que, sur un horizon, la longueur L de l'impulsion vérifie $L \leq c^2/2a$, il devient clair que l'équation généralisée de l'horizon est une conséquence de la force maximale $c^4/4G$ ou de la puissance maximale $c^5/4G$. De plus, l'équation de l'horizon prend aussi en compte la vitesse maximale, laquelle est à l'origine de la relation $L \leq c^2/2a$. L'équation de l'horizon découle donc complètement de ces deux limites de la nature.

Réf. 85

La partie restante de l'argumentation est tout simplement la dérivation de la relativité générale à partir de l'équation généralisée de l'horizon. Cette déduction fut tacitement conduite par Jacobson, et les étapes indispensables en sont données dans les paragraphes qui suivent. (Jacobson n'avait pas insisté sur le fait que sa dérivation était aussi valable pour un espace-temps continu, ou que son argument pouvait aussi être utilisé en relativité générale classique.) Pour visualiser le rapport qui existe entre l'équation généralisée de l'horizon (111) et les équations du champ, nous avons juste besoin de généraliser cette équation aux systèmes de coordonnées généralisées et aux directions quelconques du flux de l'énergie-impulsion. Nous y parvenons en introduisant la notation tensorielle qui est

adaptée à l'espace-temps courbé.

Pour étendre l'équation généralisée de l'horizon, nous introduisons l'élément général de surface $d\Sigma$ et le champ vectoriel de Killing k de la poussée de Lorentz locale qui engendre l'horizon (avec la norme appropriée). Jacobson utilisa ces deux quantités pour récrire le membre de gauche de l'équation généralisée de l'horizon (III) comme suit :

$$\delta E = \int T_{ab} k^a d\Sigma^b, \quad (113)$$

où T_{ab} représente le tenseur énergie-impulsion. Cette expression donne manifestement l'énergie à l'horizon pour des systèmes de coordonnées arbitraires et des directions quelconques du flux d'énergie.

Le principal résultat de Jacobson est que le facteur $a \delta A$ dans la partie droite de l'équation généralisée de l'horizon (III) peut être reformulé, en tirant profit de l'équation de Raychaudhuri (purement géométrique), comme suit :

$$a \delta A = c^2 \int R_{ab} k^a d\Sigma^b, \quad (114)$$

où R_{ab} est le tenseur de Ricci décrivant la courbure de l'espace-temps. Cette relation décrit comment les propriétés locales de l'horizon dépendent de la courbure locale.

En combinant ces deux étapes, l'équation généralisée de l'horizon (III) devient

$$\int T_{ab} k^a d\Sigma^b = \frac{c^4}{8\pi G} \int R_{ab} k^a d\Sigma^b. \quad (115)$$

Jacobson montra alors que cette équation, combinée avec la conservation locale de l'énergie (c'est-à-dire l'annulation de la divergence du tenseur énergie-impulsion), ne peut être satisfaite que si

$$T_{ab} = \frac{c^4}{8\pi G} \left(R_{ab} - \left(\frac{R}{2} + \Lambda \right) g_{ab} \right), \quad (116)$$

où R représente le scalaire de Ricci et Λ est une constante d'intégration pour laquelle la valeur n'est pas déterminée par ce problème. Les équations ci-dessus constituent les équations complètes du champ de la relativité générale, incluant la constante cosmologique Λ . Les équations du champ résultent donc de l'équation de l'horizon. Elles sont par conséquent représentées comme étant valides aux horizons.

Puisqu'il est possible, en choisissant une transformation de coordonnées appropriée, de placer un horizon à n'importe quel point souhaité de l'espace-temps, les équations du champ doivent être valables partout, dans tout l'espace-temps. Cette observation achève l'argumentation de Jacobson. Puisque les équations du champ découlent, via l'équation de l'horizon, du principe de force maximale, nous avons également démontré qu'à chaque point de l'espace-temps dans la nature la même force maximale s'applique : la valeur de la force maximale est un invariant et une constante de la nature.

En d'autres termes, les équations du champ de la relativité générale sont une conséquence directe de la limite sur le flux d'énergie aux horizons, lequel en fin de compte est dû à l'existence d'une force (ou puissance) maximale. En réalité, comme Jacobson

le montra, l'argument fonctionne dans les deux sens. La force (ou puissance) maximale, l'équation de l'horizon et la relativité générale sont équivalentes.

En bref, *le principe de force maximale représente une manière simple d'exprimer le fait que, sur des horizons, le flux d'énergie est proportionnel à l'aire et à la gravité de surface.* Cette correspondance permet de déduire complètement la théorie de la relativité générale. En particulier, une valeur de force maximale est suffisante pour indiquer à l'espace-temps comment il doit être courbé. Nous explorerons les particularités de cette relation sous peu. Remarquez que si aucune force limite n'existait dans la nature il serait possible de « prélever » n'importe quelle quantité souhaitée d'énergie à travers une surface donnée, comprenant n'importe quel horizon. Dans ce cas, le flux d'énergie ne serait pas proportionnel à l'aire, les horizons n'auraient pas les propriétés qu'ils ont, et la relativité générale ne pourrait pas s'appliquer. Nous avons ainsi une idée de la manière dont le flux maximal d'énergie, le flux maximal d'impulsion et le flux maximal de masse sont associés aux horizons. Ce lien est plus évident pour des trous noirs, où l'énergie, l'impulsion ou la masse sont ce qui tombe dans le trou noir.

Page 243

Par ailleurs, puisque la dérivation de la relativité générale à partir du principe de force maximale ou à partir du principe de puissance maximale est dorénavant bien établie, nous pouvons baptiser à juste titre ces limites *force de l'horizon* et *puissance de l'horizon*. Toute confirmation expérimentale ou théorique des équations du champ confirme indirectement leur existence.

L'ESPACE-TEMPS EST COURBÉ

Imaginez deux observateurs qui commencent à se déplacer parallèlement l'un à l'autre et qui continuent à avancer en ligne droite. Si, après un moment, ils découvrent qu'ils ne se déplacent plus parallèlement l'un à l'autre, alors ils peuvent en déduire qu'ils se sont déplacés sur une surface incurvée (essayez!) ou dans un espace courbé. En particulier, cela se produit près d'un horizon. La dérivation précédente a montré qu'une force maximale finie implique que tous les horizons sont courbes; la courbure des horizons entraîne ensuite la courbure de l'espace-temps. Si la nature n'avait que des horizons plats, il n'y aurait pas d'espace-temps courbe. L'existence d'une force maximale implique que l'espace-temps est courbé.

Défi 143 s

Un horizon si fortement courbé qu'il forme une frontière fermée, comme la surface d'une sphère, est appelé un trou noir. Nous étudierons les trous noirs en détail plus loin. La propriété principale d'un trou noir, comme celle de n'importe quel horizon, est qu'il est impossible de définir ce qui se trouve « derrière » la frontière*.

Page 241

L'analogie qui existe entre relativité restreinte et relativité générale peut être poussée plus loin. En relativité restreinte, la vitesse maximale implique $dx = c dt$, et la variation du temps dépend de l'observateur. En relativité générale, la force (ou puissance) maximale implique l'équation de l'horizon $\delta E = \frac{c^2}{8\pi G} a \delta A$ et l'observation que l'espace-temps est courbé.

La force (ou puissance) maximale possède donc le même double rôle en relativité générale que la vitesse maximale en relativité restreinte. Dans celle-ci, la vitesse de la lumière est la vitesse maximale, elle représente également la constante de proportionnalité

* De façon analogue, il est impossible en relativité restreinte de détecter ce qui se déplace plus vite que la limite de la lumière.

qui relie l'espace et le temps, comme le souligne l'équation $dx = c dt$. En relativité générale, la force de l'horizon est la force maximale ; elle apparaît également (avec un facteur 2π) dans les équations du champ comme étant la constante de proportionnalité qui relie l'énergie et la courbure. La force maximale décrit donc à la fois l'élasticité de l'espace-temps et – si nous employons la représentation simple de l'espace-temps comme étant un milieu dans lequel nous sommes baignés – la tension maximale à laquelle l'espace-temps peut être soumis. Ce double rôle d'une constante matérielle comme facteur de proportionnalité et comme valeur limite est bien connu dans les sciences de la matière.

Page 108

Cette similitude vous fait penser à l'éther ? Ne vous inquiétez pas : la physique n'a pas besoin du concept d'éther, parce qu'il est indiscernable du vide. La relativité générale décrit l'espace vide comme une sorte de milieu qui peut être déformé et déplacé.

Pourquoi la force maximale est-elle également le facteur de proportionnalité entre la courbure et l'énergie ? Imaginez l'espace-temps comme un matériau élastique. L'élasticité d'un matériau est décrite par une constante matérielle numérique. La définition la plus simple de cette constante matérielle est le rapport entre la contrainte (la force par unité de surface) et la déformation (la variation relative de la longueur). Une définition exacte doit prendre en compte la géométrie de la situation. Par exemple, le module de cisaillement G (ou μ) décrit la difficulté à déplacer deux surfaces parallèles d'un matériau l'une contre l'autre. Si une force F est nécessaire pour déplacer deux surfaces parallèles d'aire A et de longueur l l'une contre l'autre d'une distance Δl , alors nous définissons le module de cisaillement G par

$$\frac{F}{A} = G \frac{\Delta l}{l} . \quad (117)$$

Le module de cisaillement pour les métaux et les alliages varie entre 25 et 80 GPa. La théorie des milieux continus appliquée aux solides montre que, pour n'importe quel solide cristallin dépourvu d'impuretés (un solide « parfait »), il existe une contrainte de cisaillement théorique : lorsqu'on applique des contraintes supérieures à cette valeur, le matériau cède. La contrainte de cisaillement théorique, en d'autres mots la contrainte maximale dans un matériau, est donnée par

$$G_{\text{cct}} = \frac{G}{2\pi} . \quad (118)$$

Réf. 86

La contrainte maximale est donc principalement donnée par le module de cisaillement. Cette correspondance est similaire à celle que nous avons rencontrée pour le vide. En réalité, imaginer le vide comme un milieu matériel qui peut être tordu est un procédé utile pour mieux comprendre la relativité générale. Nous l'utiliserons régulièrement par la suite.

Que se passe-t-il quand on exerce une contrainte sur le vide avec la force maximale ? Est-il également déchiré comme un solide ? Oui : en réalité, lorsque le vide est déchiré, des particules surgissent. Nous en saurons plus à propos de ce phénomène plus tard : puisque les particules sont des entités quantiques, nous avons d'abord besoin d'étudier la théorie quantique avant que nous puissions en décrire les effets dans la dernière partie de notre ascension montagnaise.

CONDITIONS DE VALIDITÉ DES LIMITES DE LA FORCE ET DE LA PUISSANCE

Page 51 La valeur de la force maximale est valable uniquement sous certaines conditions. Pour éclaircir ce point, nous pouvons la comparer à la vitesse maximale. La vitesse de la lumière (dans le vide) est une borne supérieure pour le mouvement des systèmes simplement dotés d'une *quantité de mouvement* ou d'une *énergie*. Elle peut, cependant, être dépassée pour des mouvements de points immatériels. En réalité, le point de découpage d'une paire de ciseaux, un point de lumière laser sur la Lune, la vitesse de groupe ou la vitesse de phase de paquets d'ondes peuvent dépasser la vitesse de la lumière. De plus, la vitesse de la lumière est une limite uniquement si elle est mesurée *près* de la masse ou de l'énergie qui se déplace : la Lune avance plus vite que la lumière si nous faisons un tour sur nous-mêmes en une seconde, des points éloignés dans un univers de Friedmann s'éloignent les uns des autres avec des vitesses supérieures à la vitesse de la lumière. Finalement, l'observateur doit être *réaliste* : il doit être constitué de matière et d'énergie, il doit donc avancer plus lentement que la lumière, et doit être capable d'observer le système. Aucun système se déplaçant à une vitesse égale ou supérieure à celle de la lumière ne peut représenter un observateur.

Réf. 87 Ces trois mêmes conditions s'appliquent en relativité générale. En particulier, la gravitation relativiste interdit l'existence d'observateurs et de masses ponctuels : ils ne sont pas réalistes. Des surfaces se déplaçant plus vite que la lumière ne sont également pas réalistes. Dans ces cas, nous pouvons trouver des contradictions à l'idée de la force maximale. Essayez d'en découvrir une – de nombreuses sont possibles, et elles sont toutes fascinantes. Nous en explorerons quelques-unes parmi les plus importantes ci-après.

Défi 144 s Un autre point mériterait d'être mentionné. La relativité générale implique une puissance et une force maximales. La déduction inverse, celle des équations du champ de la relativité générale à partir de la force ou puissance maximale, est correcte uniquement sous l'hypothèse que la gravitation est purement géométrique. C'est l'énoncé primordial de la relativité générale. Si le mécanisme de la gravitation était fondé sur d'autres champs, tels que des particules inconnues jusqu'ici, l'équivalence entre la gravitation et une force maximale ne pourrait être établie.

EXPÉRIENCES DE PENSÉE ET PARADOXES SUR LA FORCE LIMITE

« Wenn eine Idee am Horizonte eben aufgeht, ist gewöhnlich die Temperatur der Seele dabei sehr kalt. Erst allmählich entwickelt die Idee ihre Wärme, und am heissesten ist diese (das heisst sie tut ihre grössten Wirkungen), wenn der Glaube an die Idee schon wieder im Sinken ist. »
Friedrich Nietzsche*

* « Quand une idée émerge tout juste à l'horizon, la température de l'esprit par rapport à celle-ci est habituellement très froide. Ce n'est que petit à petit que l'idée développe sa chaleur, et elle est la plus chaude (ce qui signifie qu'elle exerce sa plus forte influence) lorsque la conviction dans cette idée est déjà une nouvelle fois en train de décliner. » Friedrich Nietzsche (1844–1900) fut un philosophe et savant allemand. Cette phrase est l'aphorisme 207 – *Sonnenbahn der Idee* – tiré de son ouvrage *Menschliches Allzumenschliches – Der Wanderer und sein Schatten*.

La dernière étape, bien que cruciale, dans notre discussion de la force limite est la même que dans la discussion de la vitesse limite. Nous avons besoin de montrer que n'importe quelle expérience *concevable* – pas seulement une qui soit réelle – vérifie l'hypothèse. Selon une convention qui remonte au début du vingtième siècle, une telle expérience imaginaire est dénommée une *expérience de pensée*, en anglais on dit « Gedanken experiment » d'après l'expression allemande « Gedankenexperiment ».

Pour invalider toutes les tentatives concevables permettant de dépasser la vitesse maximale, il suffit d'étudier les propriétés de l'addition des vitesses et la divergence de l'énergie cinétique près de la vitesse de la lumière. Dans le cas de la force maximale, la tâche est beaucoup plus compliquée. En effet, énoncer une force maximale, une puissance maximale et une variation maximale de masse engendre facilement de nombreuses tentatives pour les contredire. Nous allons maintenant discuter de quelques-unes d'entre elles.

* *

L'approche brutale de la force. La tentative la plus simple pour dépasser la force limite est de tenter d'accélérer un objet avec une force plus élevée que la valeur maximale. Maintenant, l'accélération implique le transfert de l'énergie. Ce transfert est limité par l'équation de l'horizon (111) ou par la limite (112). Pour chaque tentative de surpasser cette force limite, l'écoulement de l'énergie engendre l'apparition d'un horizon. Mais un horizon empêche cette force de dépasser la limite, parce qu'elle impose une borne à l'interaction.

Page 88

Nous pouvons explorer directement cette limite. En relativité restreinte, nous avons remarqué que l'accélération d'un objet est restreinte par sa longueur. En fait, à une distance donnée par $c^2/2a$ dans la direction opposée à l'accélération a , un *horizon* se forme. En d'autres termes, un corps accéléré se brise, au plus tard, en ce point. La force F qui agit sur un corps de masse M et de rayon R est donc limitée par

$$F \leq \frac{M}{2R} c^2 . \quad (119)$$

L'ajout des effets (généralement minuscules) de la gravitation est immédiat. Pour être observable, un corps accéléré doit demeurer *plus gros* qu'un trou noir ; en y insérant le rayon correspondant $R = 2GM/c^2$, nous obtenons la force limite (104). Des tentatives *dynamiques* pour dépasser la force limite échouent donc forcément.

* *

La tentative par la corde. Nous pouvons aussi essayer de produire une force plus élevée dans une situation *statique*, par exemple en tirant sur les deux extrémités d'une corde dans des directions opposées. Nous supposons pour simplifier qu'une corde incassable puisse exister. Pour produire une force dépassant la valeur limite, nous avons besoin d'emmagasiner une très grande énergie (élastique) dans cette corde. Cette énergie doit être introduite à partir des extrémités. Lorsque nous augmentons la tension de la corde vers des grandeurs de plus en plus élevées, de plus en plus d'énergie (élastique) doit être stockée dans des distances de plus en plus petites. Pour surpasser la force limite, nous aurions besoin d'ajouter plus d'énergie par unité de distance et de surface que celle qui est permise par l'équation de l'horizon. Un horizon surgit donc inévitablement. Mais il n'existe aucune manière de tendre une corde à travers un horizon, même si elle est

incassable. Un horizon conduit soit à la brisure de la corde, soit à son détachement du système de traction. Des horizons interdisent donc de générer des forces supérieures à la force limite. En réalité, l'hypothèse d'une puissance filaire infinie n'est pas nécessaire : la force limite ne peut pas être dépassée même si la puissance contenue dans un fil est finie.

Nous remarquons qu'il n'est pas important que la force appliquée soit une force qui tire – comme pour les cordes ou les fils – ou qui pousse. Si nous *poussons* deux objets l'un contre l'autre, une tentative pour accroître sans fin la valeur de la force conduira également à la formation d'un horizon, à cause de la limite imposée par l'équation de l'horizon. Par définition, cela se produit précisément au moment où la force limite est atteinte. Comme il n'y a aucune manière de pousser (ou tirer) quelque chose en présence d'un horizon, la tentative pour atteindre une force plus élevée s'achève une fois que l'horizon s'est formé. Des forces statiques ne peuvent pas dépasser la valeur limite.

* *

Page 88

L'essai par le freinage. Une force limite impose une variation maximale de la quantité de mouvement par unité de temps. Nous pouvons donc rechercher une manière de *stopper* un système physique en mouvement si brutalement que la force maximale devrait être surpassée. L'inexistence de corps rigides dans la nature, déjà mise en évidence avec la relativité restreinte, rend impossible le fait de s'arrêter subitement, mais la relativité restreinte ne donne en elle-même aucune limite inférieure pour le temps de freinage. Toutefois, l'introduction de la gravitation le fait. Arrêter un système mobile implique un transfert d'énergie. Le flux d'énergie par unité de surface ne peut pas dépasser la valeur fournie par l'équation de l'horizon. Par conséquent, nous ne pouvons pas dépasser la force limite en freinant un objet.

De la même manière, si un système rapide est *réfléchi* au lieu d'être stoppé, une certaine quantité d'énergie exige d'être transférée et emmagasinée pendant un court instant. Par exemple, lorsqu'une balle de tennis rebondit sur un grand mur, sa quantité de mouvement est modifiée et une force est appliquée. Si un grand nombre de balles identiques rebondissent en même temps, une force assurément plus grande que la limite peut-elle être réalisée ? Il apparaît que c'est impossible. Si nous le tentions, l'énergie qui est transférée au mur parviendrait à la limite donnée par l'équation de l'horizon et engendrerait alors un horizon. Dans ce cas, la réflexion ne serait plus possible. Donc la limite ne peut pas être dépassée.

* *

La tentative par le rayonnement classique. À la place de systèmes qui tirent, poussent, freinent ou réfléchissent la *matière*, nous pouvons explorer des systèmes dans lesquels c'est le *rayonnement* qui est concerné. Cependant, l'argumentation se tient exactement de la même manière, que soient mis en jeu des photons, des gravitons ou d'autres particules. En particulier, les miroirs, comme les murs, sont limités dans leurs facultés.

Il est également impossible de produire une force supérieure à la force maximale en concentrant une grande quantité de lumière sur une surface. La même situation que pour les balles de tennis se manifeste : quand la valeur limite E/A donnée par l'équation de l'horizon (112) est obtenue, un horizon apparaît, empêchant la limite d'être enfreinte.

* *

La tentative avec des briques. Les limites de la force et de la puissance peuvent également être testées avec des expériences de pensée plus tangibles. Nous pouvons tenter de dépasser la force limite en entassant des poids. Mais même bâtir une tour en brique infiniment haute n'engendre pas une force suffisamment forte au niveau de ses fondations : en intégrant le poids, en prenant en considération sa décroissance avec la hauteur, on produit une valeur finie qui ne peut pas parvenir à la force limite. Si nous augmentons continuellement la densité des briques, nous avons besoin de prendre en compte le fait que la tour et la Terre se transformeront en un trou noir. Et les trous noirs, comme mentionné ci-dessus, n'autorisent pas le dépassement de la force limite.

* *

Réf. 88 L'essai avec la poussée de Lorentz. Une poussée peut apparemment être choisie de telle manière qu'une valeur de force F dans un référentiel soit transformée en n'importe quelle valeur souhaitée F' dans un autre référentiel. Toutefois, ce résultat n'est pas physique. Pour être plus concret, imaginez un observateur massif, mesurant la valeur F , au repos par rapport à une grande masse, et un second observateur se déplaçant en direction de cette masse conséquente avec une vitesse relativiste, mesurant la valeur F' . Les deux observateurs peuvent être imaginés comme étant aussi petits qu'on le désire. Si nous convertissons le champ de force au repos F en appliquant la transformation de Lorentz, la force F' pour l'observateur mobile peut atteindre des valeurs extrêmement élevées, à condition que la vitesse soit suffisamment grande. Cependant, une force doit être mesurée par un observateur situé en un point précis. Nous devons par conséquent vérifier ce qui se passe quand l'observateur rapide avance en direction de la région où la force est supposée dépasser la force limite. Imaginez que l'observateur possède une masse m et un rayon r . Pour être un observateur digne de ce nom, il doit être plus grand qu'un trou noir ; en d'autres termes, son rayon doit vérifier $r > 2Gm/c^2$, ce qui implique que cet observateur possède une taille non négligeable. Lorsque celui-ci plonge dans le champ de force entourant la sphère, il y aura un écoulement d'énergie E vers l'observateur déterminé par la valeur du champ transformé et l'aire de son intersection avec l'observateur. Cette énergie d'interaction peut être rendue aussi petite qu'on le souhaite, en choisissant un observateur suffisamment petit, mais l'énergie n'est jamais nulle. Quand l'observateur mobile s'approche de l'énorme charge massive, l'énergie de l'interaction augmente. Avant que l'observateur n'arrive au point où la force était supposée être supérieure à la force limite, l'énergie de l'interaction aura atteint les limites de l'horizon (111) ou (112) pour l'observateur. Par conséquent, un horizon surgit et l'observateur mobile est empêché d'observer quoi que ce soit, en particulier n'importe quelle valeur que ce soit au-delà de la force de l'horizon.

La même restriction apparaît quand des interactions électriques ou autres sont analysées en utilisant un observateur-test qui est chargé. En résumé, les poussées de Lorentz ne peuvent vaincre la force limite.

* *

Réf. 82 L'offensive par la divergence. La force agissant sur une masse m située à une distance radiale d d'un trou noir de Schwarzschild (pour $\Lambda = 0$) est donnée par

$$F = \frac{GMm}{d^2 \sqrt{1 - \frac{2GM}{dc^2}}} . \quad (120)$$

De plus, la loi en l'inverse du carré de la gravitation universelle déclare que la force agissant entre deux masses m et M est

$$F = \frac{GMm}{d^2} . \quad (121)$$

Ces deux expressions peuvent prendre n'importe quelle valeur, ce qui suggère qu'il n'existe aucune force limite maximale.

Une étude méticuleuse montre que la force maximale reste toujours valide. En réalité, la force dans ces deux situations diverge uniquement pour des masses ponctuelles, non physiques. Ainsi, la force maximale implique une distance d'approche minimale, pour une masse m , donnée par

$$d_{\min} = \frac{2Gm}{c^2} . \quad (122)$$

La distance minimale d'approche – en termes élémentaires, ceci devrait correspondre au rayon du trou noir associé – interdit d'atteindre une distance nulle entre deux masses ou entre un horizon et une masse. Cela implique qu'une masse ne peut jamais être ponctuelle, et qu'il existe une distance d'approche (réelle) minimale, proportionnelle à la masse. Si ce minimum est inséré dans les équations (120) et (121), nous obtenons

$$F = \frac{c^4}{4G} \frac{Mm}{(M+m)^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{M}{M+m}}} \leq \frac{c^4}{4G} \quad (123)$$

et

$$F = \frac{c^4}{4G} \frac{Mm}{(M+m)^2} \leq \frac{c^4}{4G} . \quad (124)$$

La valeur de la force maximale n'est donc jamais dépassée tant que nous prenons en compte la taille des observateurs et des objets.

* *

Le problème de cohérence. Si les observateurs ne peuvent être ponctuels, nous devrions nous demander s'il est toujours correct d'appliquer la définition initiale de la variation de la quantité de mouvement ou de la variation de l'énergie comme l'intégrale des valeurs mesurées par des observateurs attachés à une surface donnée. En relativité générale, les observateurs ne peuvent être ponctuels, mais ils peuvent être aussi petits que souhaités. La définition originale reste donc applicable lorsqu'elle est considérée comme étant une procédure limite pour une taille d'observateur qui décroît toujours. Bien évidemment, si la théorie quantique est prise en compte, cette procédure limite touche à sa fin à la longueur de Planck. Ce n'est pas un problème pour la relativité générale, tant que les dimensions caractéristiques de la situation sont beaucoup plus grandes que cette valeur.

* *

Défi 145 pe

Réf. 80

La question quantique. Si les effets quantiques sont négligés, il est possible de construire des surfaces ayant des angles pointus ou même des formes fractales qui surpassent la force limite. Toutefois, de telles surfaces ne sont pas physiques, puisqu'elles supposent que des longueurs plus petites que la longueur de Planck peuvent être réalisées ou mesurées. La condition qu'une surface soit physique entraîne qu'il devrait y avoir une incertitude intrinsèque donnée par la longueur de Planck. Une étude détaillée indique que les effets quantiques ne permettent pas à la force de l'horizon d'être dépassée.

* *

La tentative de l'observateur relativiste extrême. Tout observateur extrême, qu'il soit en mouvement inertiel rapide ou accéléré, n'a aucune chance de devancer la limite. En physique classique, nous sommes habitués à imaginer que l'interaction nécessaire pour réaliser une mesure peut être aussi petite qu'on le veut. Cette affirmation, toutefois, n'est pas valable pour tous les observateurs, en particulier des observateurs extrêmes ne peuvent pas la satisfaire. Pour eux, l'interaction de la mesure est énorme. Ainsi, un horizon se forme et empêche la limite d'être dépassée.

* *

L'essai microscopique. Nous pouvons tenter de dépasser la force limite en accélérant une petite particule aussi fortement que possible ou en la faisant entrer en collision avec d'autres particules. Des forces gigantesques apparaissent en réalité lorsque deux particules de haute énergie sont écrasées l'une contre l'autre. Toutefois, si l'énergie cumulée de ces deux particules devenait assez élevée pour défier la force limite, un horizon apparaîtrait avant qu'elles puissent être suffisamment proches.

Réf. 89

En fait, la théorie quantique aboutit exactement à la même conclusion. Elle prévoit déjà en elle-même une limite à l'accélération. Pour une particule de masse m , elle est donnée par

$$a \leq \frac{2mc^3}{\hbar}. \quad (125)$$

Page ??

Ici, $\hbar = 1,1 \cdot 10^{-34}$ Js représente le quantum d'action, une constante fondamentale de la nature. En particulier, cette accélération limite est vérifiée dans les accélérateurs de particules, dans les collisions de particules et dans les créations de paires virtuelles. Par exemple, l'apparition spontanée des paires électron-positron dans les champs électromagnétiques intenses ou près des horizons des trous noirs respecte la limite (125). En introduisant la masse maximale possible pour une particule élémentaire, à savoir la masse de Planck (corrigée), nous trouvons alors que l'équation (125) établit que la force de l'horizon est la borne supérieure pour les particules élémentaires.

* *

Réf. 82

L'offensive par le compactage. Les trous noirs représentent-ils réellement la forme la plus dense de matière ou d'énergie ? L'étude de la thermodynamique des trous noirs montre que des concentrations de masse ayant des densités plus fortes que les trous noirs contrediraient les principes de la thermodynamique. Dans la thermodynamique des trous noirs, la surface et l'entropie sont reliées : des processus réversibles qui réduisent l'entropie

pourraient être réalisés si les systèmes physiques pouvaient être comprimés à des valeurs plus petites que le rayon du trou noir. Par conséquent, la taille d'un trou noir est la taille limite pour une masse dans la nature. De manière équivalente, la force limite ne peut pas être dépassée dans la nature.

* *

La tentative d'addition des forces. En relativité restreinte, la composition des vitesses par une simple addition vectorielle n'est pas possible. De manière identique, dans le cas des forces, une telle somme naïve est incorrecte ; ainsi toute tentative pour additionner des forces engendrerait un horizon. Si les manuels de relativité avaient exploré le comportement des vecteurs de force sous l'addition avec le même soin qu'ils l'ont fait avec les vecteurs vitesse, la borne de la force serait apparue beaucoup plus tôt dans la littérature. (Évidemment, la relativité générale est requise pour un traitement rigoureux.)

* *

Défi 146 r Pouvez-vous proposer et résoudre une autre tentative pour dépasser la force ou la puissance limite ?

EXPÉRIENCES DE PENSÉE SUR LA PUISSANCE LIMITE ET LE FLUX LIMITE DE MASSE

Comme la borne de la force, la borne de la puissance doit être valide pour tous les systèmes *imaginables*. Nous présentons ici quelques idées pour tenter de la réfuter.

* *

La tentative par le funiculaire. Imaginez un moteur qui accélère un objet à l'aide d'un câble incassable dénué de masse (en supposant qu'un tel câble puisse exister). Au moment où le moteur atteint la barrière de la puissance, celui-ci ou son échappement atteindrait l'équation de l'horizon. Lorsqu'un horizon se forme, le moteur ne peut pas continuer à tirer le câble, puisqu'un câble, même infiniment résistant, ne peut pas traverser un horizon. La limite de la puissance est donc respectée, que le moteur soit installé à l'intérieur du corps en accélération ou à l'extérieur, à l'extrémité du câble qui le tire.

* *

La tentative de la montagne. Il est possible de définir une surface qui serait si étrangement courbée qu'elle passerait *juste au-dessous* des noyaux de chaque atome d'une montagne, comme la surface A indiquée sur la [Figure 49](#). Tous les atomes de la montagne situés au-dessus du niveau de la mer sont alors *juste au-dessus* de la surface, la touchant à peine. En outre, imaginez que cette surface se déplace *vers le haut* presque à la vitesse de la lumière. Il n'est pas difficile de montrer que l'écoulement de masse à travers cette surface est plus élevé que le flux limite de masse. En fait, on attribue au flux limite de masse $c^3/4G$ une valeur d'environ 10^{35} kg/s. En un temps de 10^{-22} s, soit le diamètre d'un noyau divisé par la vitesse de la lumière, 10^{13} kg seulement ont besoin de traverser la surface : c'est la masse d'une montagne.

Cette surface semble fournir un contre-exemple à la limite. Toutefois, une attention minutieuse montre que ce n'est pas le cas. Le problème vient de l'expression « juste au-

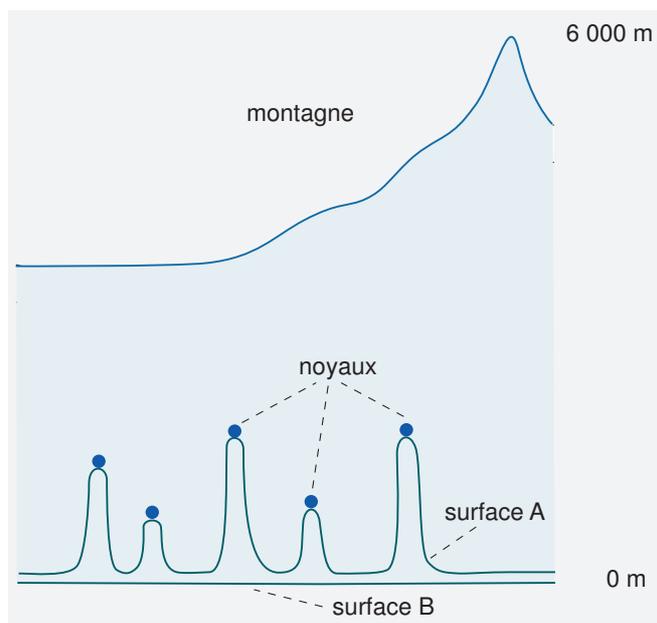


FIGURE 49 La tentative de la montagne pour dépasser la valeur maximale du flux de masse.

dessous ». Les noyaux sont des particules quantiques et possèdent une incertitude quant à leur position ; cette indétermination est essentiellement la distance de noyau à noyau. Par conséquent, afin d'être certain que la surface qui nous intéresse ait bien tous les atomes *au-dessus* d'elle, la forme ne peut pas être celle de la surface A de la Figure 49. Elle doit être plutôt une surface plane qui reste au-dessous de la montagne entière, comme la surface B de la figure. Cependant, une surface plane située sous une montagne ne permet pas de dépasser la variation limite de masse.

* *

L'essai avec de nombreux atomes. Nous pouvons imaginer un nombre d'atomes égal à celui d'une montagne, qui se tiennent tous (approximativement) dans un plan unique et largement espacés les uns des autres. Une nouvelle fois, le plan se déplace vers le haut à la vitesse de la lumière. Mais, même dans ce cas, l'incertitude sur les positions atomiques fait qu'il est impossible d'affirmer que la limite à l'écoulement de la masse a été dépassée.

* *

L'offensive des trous noirs multiples. Les trous noirs sont typiquement énormes, et l'incertitude sur leur position est donc négligeable. La masse limite $c^3/4G$, ou la puissance limite $c^5/4G$, correspond au flux d'un unique trou noir traversant une surface plane à la vitesse de la lumière. Plusieurs trous noirs passant ensemble à travers un plan à une vitesse juste inférieure à celle de la lumière semblent donc vaincre la limite. Toutefois, la surface doit être physique : on doit pouvoir positionner un observateur à chacun de ses points. Mais aucun observateur ne peut traverser un trou noir. Un trou noir perce donc réellement la surface plane. Personne ne peut affirmer qu'un quelconque trou noir a traversé une surface plane, même sans faire appel à une telle quantité de trous noirs. La

limite demeure valide.

* *

La tentative des étoiles à neutrons multiples. Le flux limite de masse semble être atteint lorsque plusieurs étoiles à neutrons (qui sont légèrement moins denses qu'un trou noir de même masse) traversent une surface plane en même temps, à une vitesse élevée. Cependant, quand la vitesse approche celle de la lumière, les temps de traversée pour des points éloignés des étoiles à neutrons et pour ceux qui traversent réellement les étoiles sont très différents. Les étoiles à neutrons qui sont presque à l'état de trou noir ne peuvent pas être traversées de part en part en un temps court selon une horloge de référence qui est située loin des étoiles. À nouveau, la limite n'est pas dépassée.

* *

Réf. 82 L'essai par la luminosité. L'existence d'une luminosité maximale a été discutée par les astrophysiciens. En toute généralité, la borne maximale sur la puissance, c'est-à-dire sur l'énergie par unité de temps, est valable pour chaque flux d'énergie *traversant n'importe quelle surface physique, quelle qu'elle soit*. Cette surface physique peut même recouvrir l'Univers tout entier. Pourtant, même en rassemblant toutes les chandelles, toutes les étoiles et toutes les galaxies de l'Univers, on ne recouvrira jamais une surface qui aurait une puissance d'émission supérieure à la limite proposée.

Page ?? La surface doit être *physique**. Une surface est *physique* si un observateur peut être placé sur chacun de ses points. En particulier, une surface physique ne peut pas traverser un horizon, ou avoir une caractéristique locale plus fine qu'une certaine longueur minimale. Cette longueur minimale, qui sera introduite plus tard, est fixée par la longueur de Planck corrigée. Si une surface n'est pas physique, elle peut représenter un contre-exemple aux limites de la force et de la puissance. Cependant, ces contradictions ne permettent pas d'affirmer quoi que ce soit concernant la nature. (*Ex falso quodlibet***.)

Défi 147 s

* *

La tentative des nombreuses sources lumineuses, ou *paradoxe de la puissance*. Une limite absolue pour la puissance impose une limite sur le flux d'énergie qui s'écoule à travers n'importe quelle surface imaginable. À première vue, il peut apparaître que la puissance cumulée émise par deux sources de rayonnement qui émettent chacune $3/4$ de la valeur maximale devrait donner une fois et demie cette valeur. Cependant, de telles chandelles cosmiques devraient être si massives qu'elles formeraient un trou noir. Aucune quantité de rayonnement, qui dépasse cette limite, ne peut en sortir. À nouveau, puisque la limite de l'horizon (112) est franchie, un horizon se présente, il absorbe la lumière et empêche la force ou la puissance limite d'être dépassée.

* *

La tentative de la concentration de lumière. Une autre approche consiste à illuminer une masse ronde avec un flash lumineux sphérique, bref et intense. À première vue, il semble

* Elle peut également être qualifiée de *physiquement raisonnable*.

** Nous pouvons déduire n'importe quoi à partir d'une affirmation fautive. (Cette propriété de la logique classique énonce que, si une proposition est à la fois fautive et vraie, alors tout autre énoncé est vrai. [N.D.T.]

que les limites de la force et de la puissance puissent être surpassées, parce que l'énergie lumineuse peut être concentrée dans des volumes minuscules. Toutefois, une concentration colossale d'énergie lumineuse forme un trou noir ou incite la masse à en former un. Il n'existe aucune manière de prélever de l'énergie dans une masse à un débit plus rapide que celui dicté par la puissance limite. En réalité, il est impossible de regrouper des sources lumineuses de telle manière que leur émission totale soit supérieure à la puissance limite. Chaque fois que l'on s'approche de la force limite, un horizon se forme et empêche cette limite d'être franchie.

* *

L'offensive par le trou noir. Un système possible dans la nature qui *atteint* réellement la puissance limite est la phase finale de l'évaporation d'un trou noir. Cependant, même dans ce cas, la puissance limite n'est pas dépassée mais seulement égalée.

* *

L'essai par l'écoulement d'eau. Nous pouvons essayer de pomper de l'eau aussi rapidement que possible à travers un grand tube dont l'aire de la section transversale est A . Malgré tout, quand un tube de longueur L rempli avec de l'eau s'écoulant à une vitesse v s'approche de la limite de l'écoulement de masse, la force de gravité exercée par l'eau *attendant* d'être pompée à travers l'aire A fera ralentir l'eau qui est en train d'être pompée à travers cette surface. La limite est une nouvelle fois atteinte lorsque la section A se transforme en un horizon.

Le fait de vérifier qu'aucun système – du microscopique à l'astrophysique – n'excède jamais la puissance maximale ou le flux maximal de masse constitue une épreuve supplémentaire pour la relativité générale. Il peut sembler facile de trouver une contradiction, puisque cette surface peut traverser l'Univers tout entier ou envelopper n'importe quel nombre de réactions entre particules élémentaires. Cependant, tous ces efforts sont vains.

En résumé, dans toutes les situations qui défient la force, la puissance ou le flux de masse limite, à chaque fois que le flux d'énergie atteint la densité de masse-énergie du trou noir dans l'espace ou le flux de l'impulsion correspondante dans le temps, un horizon des événements surgit. Cet horizon fait qu'il est impossible de dépasser les limites. Ces trois limites sont confirmées à la fois par les observations et par la théorie. Des valeurs dépassant ces limites ne peuvent ni être produites ni être mesurées. Les expériences de pensée montrent également que ces trois bornes sont celles qui sont les plus strictes possibles. Évidemment, elles sont ouvertes à des tests ultérieurs et à des expériences de pensée supplémentaires. (Si vous réussissez à en dénicher une excellente, signalez-le à l'auteur.)

Défi 148 r

LA VÉRITÉ SE CACHE

L'absence d'horizons dans la vie quotidienne constitue la *première* raison pour laquelle le principe de la force maximale est resté dissimulé pendant si longtemps. Les expériences dans la vie courante ne peuvent mettre en évidence les limites de la force ou de la puissance. La *deuxième* raison pour laquelle ce principe est demeuré caché, c'est la croyance erronée dans l'existence des particules ponctuelles. C'est une justification théo-

rique. (Les préjugés contre le concept de force en relativité générale y furent également pour quelque chose.) Le principe de force maximale – et de puissance maximale – est donc resté enfoui durant tant de temps à cause d’une « conspiration » de la nature qui l’a dissimulé à la fois aux yeux des théoriciens et des expérimentateurs.

Afin de comprendre soigneusement la relativité générale, il est essentiel de rappeler que les particules ponctuelles, les masses ponctuelles et les observateurs assimilés à des points n’existent pas. Ils ne sont que des approximations applicables uniquement en physique galiléenne ou en relativité restreinte. En relativité générale, les horizons interdisent leur existence. L’habitude de croire qu’on peut rendre la taille d’un système aussi petite que souhaité, tout en conservant sa masse, empêche de révéler l’existence de la force ou puissance limite.

UNE COMPRÉHENSION INTUITIVE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

« Wir leben zwar alle unter dem gleichen Himmel,
aber wir haben nicht alle den gleichen
Horizont*.

Konrad Adenauer

Les idées de force de l’horizon et de puissance de l’horizon peuvent être utilisées comme fondements pour une approche directe et intuitive de la relativité générale.

* *

Qu’est-ce que la gravitation ? Parmi les nombreuses réponses possibles que nous rencontrerons, nous en tenons maintenant une : la gravitation est l’« ombre » de la force maximale. Toutes les fois que nous ressentons faiblement la gravitation, nous pouvons nous rappeler qu’un autre observateur situé au même endroit et au même instant ressentirait la force maximale. Un bon exercice consiste à rechercher les propriétés précises de cet observateur. Une autre manière de le dire : s’il n’y avait pas de force maximale, la gravitation ne pourrait exister.

* *

La force maximale implique l’attraction universelle. Pour le vérifier, nous allons étudier un système planétaire élémentaire, c’est-à-dire doté de vitesses et de forces faibles. Un système planétaire simple de taille L est composé d’un (petit) satellite tournant autour d’une masse centrale M à une distance radiale $R = L/2$. Notons a l’accélération de l’objet. Une vitesse faible implique la condition $aL \ll c^2$, déduite de la relativité restreinte. Une force faible implique $\sqrt{4GMa} \ll c^2$, déduite à partir de la force limite. Ces conditions sont valables pour le système tout entier et pour toutes ses composantes. Ces deux expressions possèdent les dimensions d’une vitesse au carré. Puisque ce système n’a qu’une seule vitesse caractéristique, les deux expressions $aL = 2aR$ et $\sqrt{4GMa}$ doivent être proportionnelles, entraînant

$$a = f \frac{GM}{R^2}, \quad (126)$$

* « Nous vivons tous sous le même ciel, mais nous n’avons pas tous le même horizon. » Konrad Adenauer (1876–1967), chancelier d’Allemagne de l’Ouest.

où le facteur numérique f reste à déterminer. Pour ce faire, nous étudions la vitesse de libération nécessaire pour s'échapper du corps central. Cette vitesse d'échappement doit être plus petite que la vitesse de la lumière pour un corps quelconque plus grand qu'un trou noir. Celle-ci, dérivée à partir de l'expression (126), pour un corps de masse M et de rayon R est donnée par $v_{\text{lib}}^2 = 2fGM/R$. Le rayon minimal R des objets, donné par $R = 2GM/c^2$, implique alors que $f = 1$. Par conséquent, pour des vitesses lentes et des forces faibles, la loi en l'inverse du carré décrit l'orbite d'un satellite autour d'une masse centrale.

* *

Si l'espace-temps vide est flexible, comme une feuille métallique, alors il doit également être capable d'osciller. N'importe quel système physique peut présenter des oscillations lorsqu'une déformation engendre une force de rétablissement. Nous avons vu plus haut qu'il existe une telle force dans le vide : elle est appelée gravitation. En d'autres termes, le vide doit pouvoir osciller et, puisqu'il est étendu, il doit également être capable d'entretenir la propagation d'ondes. En réalité, les ondes gravitationnelles sont prédites par la relativité générale, comme nous le verrons plus loin.

Page 154

* *

Si la courbure et l'énergie sont reliées, la vitesse maximale doit également être valable pour l'énergie gravitationnelle. En fait, nous découvrirons que la gravité possède une vitesse de propagation finie. La loi en l'inverse du carré de la vie quotidienne ne peut pas être exacte, puisqu'elle est incompatible avec une vitesse limite quelconque. Des informations supplémentaires concernant les corrections induites par la vitesse maximale permettront bientôt d'y voir plus clair. De plus, puisque les ondes gravitationnelles sont des ondes d'énergie sans masse, nous nous attendons à ce que la vitesse maximale soit celle de leur propagation. Comme nous le verrons, c'est effectivement le cas.

Page 154

* *

Un corps ne peut pas être plus dense qu'un trou noir (statique) de même masse. Les limites de la force et de la puissance maximales, qui s'appliquent aux horizons, font qu'il est impossible de comprimer une masse en horizons encore plus petits. La limite de la force maximale peut par conséquent être reformulée comme une contrainte sur la taille L des systèmes physiques de masse m :

$$L \geq \frac{4Gm}{c^2} . \quad (127)$$

Si nous appelons le double du rayon d'un trou noir sa « taille », nous pouvons stipuler qu'aucun système physique de masse m n'est plus petit que cette valeur*. La taille limite joue un rôle crucial en relativité générale. L'inégalité inverse, $m \geq \sqrt{A/16\pi} c^2/G$, qui définit la « taille » maximale des trous noirs, est appelée l'*inégalité de Penrose* et a été démontrée dans un grand nombre de situations physiquement réalistes. On peut pressentir

Réf. 90, Réf. 91,
Réf. 92

* La valeur maximale de la masse pour la taille limite est manifestement similaire à la variation maximale de masse donnée plus haut.

que cette inégalité de Penrose implique la limite de la force maximale, et vice versa. Le principe de la force maximale, ou la taille minimale équivalente des systèmes constitués de matière-énergie, empêche donc la formation de singularités nues, et implique la validité de ce que nous appelons la *censure cosmique*.

* *

Réf. 82 Il y a une puissance limite pour toutes les sources d'énergie. En particulier, la valeur $c^5/4G$ restreint la luminosité de toutes les sources gravitationnelles. En réalité, toutes les formules concernant l'émission d'ondes gravitationnelles impliquent que cette valeur est une limite supérieure. En outre, les simulations numériques de la relativité ne l'ont jamais excédée : par exemple, la puissance émise durant la simulation de la fusion de deux trous noirs reste en deçà de cette limite.

* *

Les ondes parfaitement planes n'existent pas dans la nature. Les ondes planes sont infiniment étendues. Mais ni les ondes électromagnétiques ni les ondes gravitationnelles ne peuvent être infinies, puisque de telles ondes transporteraient une quantité de mouvement par unité de temps à travers une surface plane supérieure à celle qui est permise par la limite de la force. La non-existence d'ondes gravitationnelles planes exclut aussi la possibilité d'apparition de singularités lorsque deux ondes de ce type interfèrent.

* *

Dans la nature, il n'existe pas de forces infinies. Il n'y a donc aucune singularité nue naturelle. Les horizons interdisent leur émergence. En particulier, le Big Bang n'était *pas* une singularité. Les théorèmes mathématiques de Penrose et Hawking qui semblent entraîner l'existence de singularités supposent implicitement que les masses ponctuelles existent – souvent sous la forme de « poussières » – contrairement à ce que la relativité générale présuppose. Un réexamen attentif de chacune de ces démonstrations s'impose.

* *

La force limite signifie que l'espace-temps possède une stabilité réduite. Cette limite suggère que l'espace-temps peut être déchiré en morceaux. C'est effectivement le cas. Toutefois, la manière dont cela se produit n'est pas décrite par la relativité générale. Nous l'étudierons dans la dernière partie de ce livre.

* *

Réf. 93 La force maximale est l'étalon de la force. Cela implique que la constante gravitationnelle G est constante dans l'espace et le temps – ou, du moins, que ses variations à travers l'espace et le temps ne peuvent pas être détectées. Les données actuelles corroborent cette affirmation jusqu'à un haut degré de précision.

* *

Réf. 82 Le principe de la force maximale entraîne que l'énergie gravitationnelle – à condition qu'elle puisse être définie – *chute* dans les champs gravitationnels de la même manière que les autres types d'énergie. Ainsi, le principe de la force maximale prévoit que l'effet Nordtvedt disparaît. L'effet Nordtvedt est une variation périodique hypothétique dans

l'orbite de la Lune qui apparaîtrait si l'énergie gravitationnelle du système Terre–Lune ne diminuait pas, comme d'autres masses–énergies, dans le champ gravitationnel du Soleil. Une large gamme de mesures lunaires a confirmé l'absence de cet effet.

* *

Page 241

Si les horizons sont des surfaces, nous pouvons nous demander de quelle couleur ils sont. Cette question sera explorée plus tard.

* *

Page ??
Défi 149 e

Nous découvrirons plus loin que les effets quantiques ne peuvent pas être mis à contribution pour dépasser la force ou puissance limite. (Pouvez-vous deviner pourquoi ?) La théorie quantique fournit également une limite au mouvement, à savoir une borne inférieure pour l'action. Cependant, cette limite est indépendante de la force ou puissance maximale. (Une analyse dimensionnelle montre déjà cela : il n'existe aucune manière de définir une action par une combinaison de c et G .) Par conséquent, même l'association de la théorie quantique avec la relativité générale n'est d'aucune aide pour surpasser les limites de la force et de la puissance.

UNE PERCEPTION INTUITIVE DE LA COSMOLOGIE

Une puissance maximale constitue l'explication la plus simple possible du paradoxe d'Olbers. La puissance et la luminosité sont deux désignations différentes de la même observable. Le total de toutes les luminosités qui rayonnent dans l'Univers est fini ; la lumière, et toute autre énergie, émise par tous les astres pris collectivement est finie. Si nous supposons que l'Univers est homogène et isotrope, la puissance limite $P \leq c^5/4G$ doit rester valide à travers n'importe quel plan qui divise l'Univers en deux parties identiques. La partie de la luminosité de l'Univers qui parvient à la Terre est alors si ténue que le ciel est noir la nuit. En fait, la luminosité réellement mesurée est toujours plus petite que son estimation par le calcul, puisqu'une grande partie de la puissance n'est pas visible pour l'œil humain (étant donné que la majorité de celle-ci est de toute façon constituée de matière). En d'autres termes, la nuit est noire à cause de la puissance limite de la nature. Cette explication *ne* contredit *pas* celle, plus banale, qui fait appel à la durée de vie finie des astres, à leur densité finie, à leur taille finie, ainsi qu'à l'âge limité et à l'expansion de l'Univers. En réalité, la combinaison de tous ces arguments conventionnels implique simplement, et ne fait que répéter en termes plus compliqués, que la puissance limite ne peut pas être dépassée. Pourtant, cette explication plus simple semble être absente de la littérature.

L'existence d'une force maximale dans la nature, de concert avec l'homogénéité et l'isotropie, implique que l'Univers visible est de *taille finie*. Le cas contraire serait un Univers homogène, isotrope et infiniment grand. Mais, dans ce cas, deux moitiés quelconques de l'Univers s'attireraient l'une vers l'autre avec une force supérieure à la limite (pourvu que l'Univers soit assez âgé). Ce résultat peut être quantifié en imaginant une sphère centrée sur la Terre, qui contient tout l'Univers, et dont le rayon décroît avec le temps presque aussi rapidement que la vitesse de la lumière. On conjecture alors que la

variation de masse $dm/dt = \rho Av$ atteint le flux limite de masse $c^3/4G$. Nous avons donc

$$\frac{dm}{dt} = \rho_0 4\pi R_0^2 c = \frac{c^3}{4G} \quad , \quad (128)$$

Réf. 94 une relation également prédite par les modèles de Friedmann. Les mesures de précision du rayonnement cosmologique de fond effectuées par le satellite WMAP confirment que la densité totale d'énergie ρ_0 actuelle (incluant la matière noire et l'énergie sombre) et que le rayon de l'horizon R_0 parviennent quasiment à la valeur limite. La limite de la force maximale prédit donc la taille observée du cosmos.

Défi 150 s Une puissance limite finie suggère également que nous pouvons conclure que l'Univers possède un âge fini. Pouvez-vous en trouver un raisonnement ?

DÉFIS EXPÉRIMENTAUX POUR LE TROISIÈME MILLÉNAIRE

Le manque de tests directs sur la force, la puissance ou le flux de masse de l'horizon est évidemment dû à l'absence d'horizons dans l'environnement de toutes les expériences réalisées jusqu'à présent. Malgré les difficultés pour parvenir aux limites, leurs valeurs sont observables et réfutables.

En réalité, la force limite pourrait être examinée avec des mesures de haute précision dans les pulsars binaires ou les trous noirs binaires. De tels systèmes permettent une détermination précise de la position de chaque astre. Le principe de force maximale implique une relation entre l'incertitude sur la position Δx et l'incertitude sur l'énergie ΔE . Pour tous les systèmes, nous avons

Réf. 80

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} \leq \frac{c^4}{4G} \quad . \quad (129)$$

Par exemple, une erreur sur la position de 1 mm donne une erreur sur la masse inférieure à $3 \cdot 10^{23}$ kg. Dans la vie quotidienne, toutes les mesures s'accordent avec cette relation. En réalité, le membre de gauche de l'inégalité est tellement petit comparé au membre de droite que nous faisons rarement allusion à cette relation. Pour une vérification directe, seuls les systèmes qui pourraient accomplir l'égalité pure et simple sont intéressants. Les trous noirs doubles ou les pulsars doubles représentent de tels systèmes.

Il se pourrait qu'un jour la quantité de matière chutant dans un trou noir, tel celui situé au centre de la Voie lactée, puisse être mesurée. La borne $dm/dt \leq c^3/4G$ pourrait alors être testée directement.

La puissance limite entraîne que les luminosités les plus intenses ne sont atteintes que lorsque des systèmes émettent de l'énergie à la vitesse de la lumière. En réalité, la puissance émise maximale n'est approchée que lorsque toute la matière est diffusée, par rayonnement dans l'espace, le plus rapidement possible : la puissance émise $P = Mc^2/(R/v)$ ne peut pas parvenir à la valeur maximale si le rayon R du corps est supérieur à celui d'un trou noir (le corps le plus dense pour une masse donnée) ou si la vitesse d'émission v est inférieure à celle de la lumière. Les sources ayant les plus fortes luminosités doivent par conséquent être de densité maximale et émettre des entités dépourvues de masse au repos, comme des ondes gravitationnelles, des ondes électroma-

gnétiques ou (probablement) des gluons. Les prétendants à la détection de ces limites sont les trous noirs en formation, en évaporation ou ceux qui fusionnent.

Le ciel nocturne est une surface candidate qui parvient à la limite. La voûte céleste est un horizon. Étant donné que les flux de lumière, de neutrinos, de particules et d'ondes gravitationnelles se cumulent, on prédit que la limite $c^5/4G$ est atteinte. Si la puissance mesurée est inférieure à la limite (comme il semble que ce soit le cas en ce moment), cela pourrait même fournir un indice sur l'existence de nouvelles particules qui resteraient à découvrir. Si la limite était dépassée ou loin d'être atteinte, la relativité générale apparaîtrait comme étant fautive. Ceci constituerait un test expérimental très intéressant pour l'avenir.

La puissance limite implique qu'une onde dont l'intégrale de l'intensité s'approche de la force limite ne peut pas être plane. La puissance limite entraîne donc une restriction sur le produit de l'intensité I (donnée comme une énergie par unité de temps et unité de surface) par la taille (rayon de courbure) R du front d'une onde se déplaçant à la vitesse de la lumière c :

$$4\pi R^2 I \leq \frac{c^5}{4G} . \quad (130)$$

De toute évidence, cette affirmation est difficile à vérifier expérimentalement, bien que la fréquence et le type de l'onde puissent l'être, parce que la valeur apparaissant dans le membre de droite est extrêmement grande. Des expériences futures probables avec des détecteurs d'ondes gravitationnelles, des détecteurs de rayons X, de rayons gamma, des récepteurs radio ou des détecteurs de particules pourraient nous permettre de contrôler la relation (130) avec rigueur. (Vous pourriez chercher à prédire laquelle de ces expériences confirmera la première cette limite.)

Défi 151 e

Le manque de tests expérimentaux directs sur les limites de la force et de la puissance explique pourquoi les *tests indirects* sont particulièrement importants. Tous ces tests étudient le mouvement de la matière ou de l'énergie et le comparent avec une célèbre conséquence de la force et de la puissance limites : les équations du champ de la relativité générale. Ce sera notre prochain domaine d'exploration.

UN RÉSUMÉ DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Il existe une formulation axiomatique élémentaire de la relativité générale : la force de l'horizon $c^4/4G$ et la puissance de l'horizon $c^5/4G$ sont les plus fortes valeurs possibles pour la force et la puissance. Nous ne connaissons aucune observation qui contredise cela. Il n'a été imaginé aucun contre-exemple. La relativité générale découle de ces limites. Par ailleurs, ces limites expliquent l'obscurité de la nuit et la finitude de la taille de l'Univers.

Le principe de la force maximale possède des applications évidentes dans l'enseignement de la relativité générale. Ce principe met celle-ci à la portée des étudiants du premier niveau universitaire, et probablement aux élèves bien préparés du second cycle : seuls les concepts de force maximale et d'horizon sont nécessaires. La courbure de l'espace-temps est une conséquence de la courbure de l'horizon.

Le concept d'une force maximale met le doigt sur un autre aspect de la gravitation. La constante cosmologique Λ n'est pas fixée par le principe de la force maximale. (Toutefois, ce principe lui attribue un signe positif.) Des mesures récentes donnent le résultat

Défi 152 pe

Page 221 $\Lambda \approx 10^{-52} / \text{m}^2$. Une constante cosmologique positive entraîne l'existence d'une densité d'énergie négative $-\Lambda c^4 / G$. Cette valeur correspond à une pression négative, puisque la pression et la densité d'énergie possèdent les mêmes dimensions. La multiplication par l'aire de Planck (numériquement corrigée) $2G\hbar/c^3$, la plus petite aire dans la nature, redonne une valeur pour la force de :

$$F = 2\Lambda\hbar c = 0,60 \cdot 10^{-77} \text{ N} . \quad (131)$$

Défi 153 d Elle représente également la force gravitationnelle qui agit entre deux masses de Planck (numériquement corrigées) $\sqrt{\hbar c / 8G}$ situées à la distance cosmologique $1/4\sqrt{\Lambda}$. Si nous formulons l'hypothèse, quelque peu séduisante, que l'expression (131) est la plus petite force possible dans la nature (les facteurs numériques ne sont pas encore vérifiés), nous obtenons la conjecture fascinante que la théorie complète de la relativité générale, incluant la constante cosmologique, peut être définie par la combinaison d'une force *maximale* et d'une *minimale* dans la nature. (Pouvez-vous découvrir une force plus petite ?)

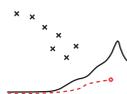
Il est plus compliqué de démontrer la conjecture de la force minimale que celle de la force maximale. Jusqu'à présent, seules certaines présomptions peuvent être formulées. Comme la force maximale, la force minimale doit être compatible avec la gravitation, ne doit pas être mise en défaut par une quelconque expérience, et doit résister à toute expérience de pensée. Un examen rapide montre que cette force minimale, comme nous venons de le souligner, nous permet de déduire la gravitation, est un invariant, et n'est réfutée par aucune expérience. Il y a également un faisceau d'indices qui laisse présager qu'il n'existe probablement aucune manière d'engendrer ou de mesurer une valeur plus petite. Par exemple, la force minimale correspond à l'énergie par unité de longueur contenue dans un photon ayant une longueur d'onde de la taille de l'Univers. Il est ardu – mais peut-être pas impossible – d'imaginer la formation d'une force encore plus petite.

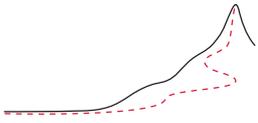
Nous avons vu que le principe de la force maximale et la relativité générale ne parviennent pas à fixer la valeur de la constante cosmologique. Seule une théorie unifiée peut le faire. Nous avons donc deux prérequis pour une telle théorie. Premièrement, toute théorie unifiée doit prédire la même borne supérieure pour la force. Deuxièmement, une théorie unifiée doit déterminer la constante cosmologique. L'apparition de \hbar dans l'expression conjecturée pour la force minimale suggère que celle-ci est établie par une combinaison de la relativité générale et de la théorie quantique. La démonstration de cette hypothèse et la mesure directe de la force minimale constituent deux défis majeurs pour notre ascension au-delà de la relativité générale.

Nous sommes dorénavant prêts à explorer les conséquences de la relativité générale et ses équations du champ plus en détail. Nous allons commencer en nous concentrant sur le concept de courbure de l'espace-temps dans la vie quotidienne, et en particulier sur ses conséquences pour l'observation du mouvement.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie Steve Carlip, Corrado Massa, Tom Helmond, Gary Gibbons, Heinrich Neumaier et Peter Brown pour leurs discussions passionnantes sur ces sujets.





CHAPITRE 3

LES IDÉES NOUVELLES SUR L'ESPACE, LE TEMPS ET LA GRAVITÉ

« Sapere aude.

»
Horace*

Les attractions gravitationnelles transportent de l'énergie**. Notre description du mouvement doit par conséquent être assez précise pour supposer que ce transport puisse se produire tout au plus à la vitesse de la lumière. Henri Poincaré avait déjà exprimé cette condition dès 1905. Les implications qui découlent de ce principe sont palpitantes : nous découvrirons que l'espace vide peut se déplacer, que l'Univers possède un âge fini et que des objets peuvent être perpétuellement en chute libre. Il en ressortira que l'espace vide peut être courbé, bien qu'il soit beaucoup moins flexible que l'acier. Malgré ces étranges conséquences, la théorie et toutes ses prédictions ont été confirmées par toutes les expériences.

La théorie de la gravitation universelle, qui décrit le mouvement engendré par la gravité en utilisant la relation $a = GM/r^2$, autorise des vitesses supérieures à celle de la lumière. En réalité, la vitesse d'une masse en orbite n'est pas limitée. La manière dont les valeurs de a et de r dépendent de l'observateur est également vague. Donc cette théorie ne peut pas être exacte. Afin de parvenir à la description correcte, dénommée *relativité générale* par Albert Einstein, nous devons jeter par-dessus bord un certain nombre d'idées préconçues.

Réf. 95, Réf. 96

REPOS ET CHUTE LIBRE

L'antithèse du mouvement dans la vie quotidienne est matérialisée par un corps au repos, comme un enfant qui dort ou un rocher qui résiste aux vagues. Un corps est dit au repos à chaque fois qu'il n'est pas perturbé par d'autres corps. Dans la description galiléenne du monde, le repos est l'*absence de vitesse*. En relativité restreinte, le repos devient le *mouvement inertiel*, puisque aucun observateur en mouvement inertiel ne peut faire la distinction entre son propre mouvement et le repos : rien ne le perturbe. Le rocher dans les vagues et les protons qui traversent promptement la galaxie, comme les rayons cosmiques, sont tous au repos. L'intrusion de la gravité nous emmène tout droit vers une définition encore plus générale.

Défi 154 e

Si tout corps en mouvement inertiel doit être considéré comme étant au repos, alors

* « Ose être sage. » Quintus Horatius Flaccus, *Épîtres*, 1, 2, 40.

** Les particularités de cette affirmation sont loin d'être évidentes. Elles sont discutées à la [page 154](#) et à la [page 190](#).

Réf. 97 tout corps en chute libre doit également l'être. Joseph Kittinger le sait mieux que quiconque, lui qui, en août 1960, sauta de la capsule d'un ballon à une hauteur record de 31,3 km. À cette altitude, l'air est si raréfié que, pendant la première minute de sa chute libre, il se sentit complètement au repos, comme s'il était en train de flotter. Bien qu'étant parachutiste expérimenté, il fut si étonné qu'il dut se tourner vers le haut afin de se convaincre qu'il était vraiment en train de s'éloigner de son ballon ! Malgré son manque flagrant de sensation de mouvement, il était en train de chuter à 274 m/s ou 988 km/h en direction de la surface de la Terre. Il ne commença à ressentir quelque chose que lorsqu'il rencontra les premières couches d'air substantielles, ce qui se produisit lorsque sa chute libre commença à être perturbée. Ensuite, après quatre minutes et demie de descente, son parachute spécial s'ouvrit, et neuf minutes plus tard il atterrissait au Nouveau-Mexique.

Kittinger et tous les autres observateurs en chute libre, comme les cosmonautes qui gravitent autour de la Terre ou les passagers des vols aériens paraboliques*, font la même observation : il est impossible de distinguer quoi que ce soit survenant en chute libre de ce qui surviendrait au repos. Cette impossibilité est appelée le *principe d'équivalence*, c'est l'un des points de départ de la relativité générale. Elle conduit à la définition la plus précise, et la dernière : *le repos est la chute libre*. Le repos est l'absence de perturbation, donc il est la chute libre.

L'ensemble de tous les observateurs chutant librement en un point de l'espace-temps généralise la notion relativiste (restreinte) d'ensemble des observateurs inertiels ponctuels. Cela signifie que nous devons décrire le mouvement de telle manière que non seulement les observateurs inertiels mais également ceux chutant librement puissent se comprendre. De plus, une description complète du mouvement doit être apte à décrire la gravitation et le mouvement qu'elle engendre, et doit être capable de décrire le mouvement pour n'importe quel observateur concevable. La relativité générale y parvient.

Défi 155 s En premier lieu, nous exprimons ce résultat en termes simples : le *véritable mouvement est le contraire de la chute libre*. Ce postulat soulève immédiatement de nombreuses questions : la plupart des arbres ou des montagnes ne sont pas en chute libre, donc ils ne sont pas au repos. Quel mouvement effectuent-ils ? Et si la chute libre est du repos, qu'est-ce que le poids ? Et, en fin de compte, que représente la gravité ? Commençons par la dernière question.

QU'EST-CE QUE LA GRAVITÉ ? – UNE DEUXIÈME RÉPONSE

Réf. 98 Au début, nous avons décrit la gravité comme étant l'ombre de la force maximale. Mais il existe une deuxième façon de la décrire, plus proche de la vie courante. Comme William Unruh aime l'expliquer, la constance de la vitesse de la lumière pour tous les observateurs implique une conclusion élémentaire : *la gravité est l'avancement inégal d'horloges situées en des endroits différents***. Bien sûr, cette définition apparemment absurde a besoin d'être vérifiée. Celle-ci ne dit rien concernant une unique situation perçue par des observateurs distincts, comme nous le faisons fréquemment en relativité

* Actuellement, il est possible de réserver de tels vols dans les agences de voyages spécialisées.

** La gravité est aussi la longueur inégale de mètres étalons situés en des endroits différents, comme nous le verrons plus bas. Ces deux effets sont nécessaires pour la décrire de manière complète, mais dans la vie courante sur Terre l'effet des horloges est suffisant, puisqu'il est beaucoup plus significatif que l'effet des longueurs, lequel peut généralement être ignoré. Pouvez-vous voir pourquoi ?

Défi 156 s



FIGURE 50 À l'intérieur d'un train ou d'un bus en accélération.

restreinte. Cette définition dépend du fait que des horloges adjacentes identiques, fixées l'une contre l'autre, avancent différemment en présence d'un champ gravitationnel lorsqu'elles sont regardées par le même observateur. Par ailleurs, cette différence est directement reliée à ce que nous appelons généralement la gravité. Il existe deux manières de vérifier ce rapport : par l'expérience et par le raisonnement. Commençons avec la dernière méthode, puisqu'elle est plus économique, plus rapide et plus amusante.

Un observateur ne ressent aucune différence entre la gravité et une accélération constante. Nous pouvons donc étudier l'accélération constante et employer une manière de réfléchir que nous avons déjà rencontrée dans le chapitre sur la relativité restreinte. Supposons que de la lumière soit émise à l'extrémité arrière d'un train de longueur Δh qui est accéléré vers l'avant avec une accélération g , comme indiqué sur la Figure 50. La lumière arrive à l'avant après une durée $t = \Delta h/c$. Toutefois, pendant ce temps, le train en accélération a gagné une certaine vitesse supplémentaire, à savoir $\Delta v = gt = g\Delta h/c$. Par conséquent, à cause de l'effet Doppler que nous avons rencontré dans notre discussion sur la relativité restreinte, la fréquence f de la lumière parvenant à l'avant est modifiée. En utilisant l'expression de l'effet Doppler, nous avons alors*

Page 50
Défi 158 e

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{g\Delta h}{c^2} . \tag{132}$$

Le signe de la variation de fréquence dépend du fait que le mouvement de la lumière et l'accélération du train se font dans la même direction ou dans des directions opposées. Pour des trains ou des bus réels, la variation de fréquence est très petite, mais reste mesurable. L'accélération induit des variations de fréquence pour la lumière. Comparons cet effet de l'accélération avec les effets de la gravité.

Défi 160 s

Pour mesurer l'espace et le temps, nous nous servons de la lumière. Qu'est-ce qui se passe pour la lumière quand la gravité entre en jeu ? L'expérience la plus simple consiste à laisser la lumière tomber ou s'élever. Afin de déduire ce qui devrait se produire, nous ajoutons quelques précisions. Imaginez un tapis roulant transportant des masses autour de deux roues, une en bas et une en haut, comme le montre la Figure 51. Les masses vertes qui descendent sont légèrement plus grosses. À chaque fois qu'une telle masse plus importante s'approche du bas, un certain dispositif – non montré sur la figure – transforme l'excédent de masse en lumière, en accord avec l'équation $E = mc^2$, et envoie cette lumière vers le niveau supérieur**. Au sommet, une des masses blanches plus

Réf. 99

* L'expression $v = gt$ est uniquement valable pour des vitesses non relativistes, cependant, la conclusion de cette section n'est pas affectée par cette approximation.

Défi 159 e

** Comme en relativité restreinte, ici et dans le reste de notre ascension montagnaise, le terme « masse » se

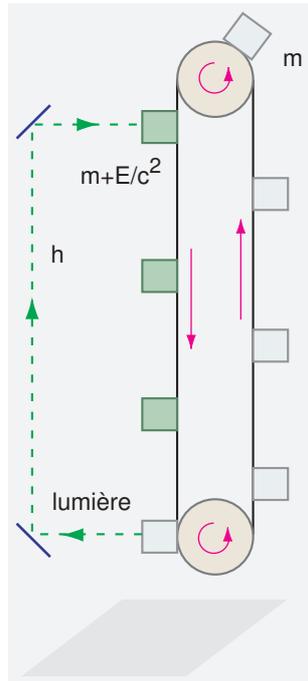


FIGURE 51 La contrainte du décalage vers le rouge et le bleu de la lumière : pourquoi les arbres sont plus verts au pied.

légères passe à proximité, absorbe la lumière et, à cause de sa masse additionnelle, fait tourner le tapis roulant jusqu'à ce qu'elle parvienne en bas. Le même processus se répète alors*.

Puisque les masses vertes sur le flanc descendant sont toujours plus lourdes, le tapis tournerait perpétuellement et ce système pourrait *produire* continuellement de l'énergie. Néanmoins, puisque la conservation de l'énergie est le fondement même de notre définition du temps, comme nous l'avons vu au début de notre promenade, le processus dans sa globalité doit être inconcevable. Nous devons conclure que la lumière voit son énergie modifiée lorsqu'elle monte. La seule possibilité est que celle-ci parvienne au sommet avec une fréquence *différente* de celle à laquelle elle a été émise en bas**.

En bref, il apparaît que la lumière montante est gravitationnellement décalée vers le rouge. De manière similaire, la lumière qui descend de la cime d'un arbre vers un observateur situé plus bas est *décalée vers le bleu*, ce qui donne une couleur plus sombre au sommet par rapport au pied de l'arbre. La relativité générale affirme donc que les arbres possèdent différentes nuances de vert le long de leur hauteur***. Quelle est l'importance de cet effet ? Le résultat déduit à partir du schéma est une nouvelle fois celui de la formule (132). C'est ce que nous cherchions, puisque la lumière se déplaçant dans un train en accélération et la lumière avançant sous l'effet de la gravité sont des situations

réfère toujours à la masse inertielle.

* Ce processus peut-il être réalisé avec 100 % d'efficacité ?

** La relation précise entre l'énergie et la fréquence de la lumière est décrite et expliquée dans notre discussion de la théorie quantique, à la page ?? . Mais nous savons déjà grâce à l'électrodynamique classique que l'énergie de la lumière dépend de son intensité et de sa fréquence.

*** Quel est l'impact sur cet argument si vous prenez en compte l'illumination due au Soleil ?

Page 200

Défi 163 e

Défi 161 s

Défi 162 pe

Défi 164 s équivalentes, comme vous devriez pouvoir le vérifier vous-même. Cette formule donne une variation relative de fréquence de $1,1 \cdot 10^{-16}$ /m seulement, à proximité de la surface de la Terre. Pour les arbres, ce que nous appelons le *décalage vers le rouge gravitationnel* ou *effet Doppler gravitationnel* est beaucoup trop insignifiant pour être observable, tout au moins en faisant appel à la lumière ordinaire.

Réf. 100 En 1911, Einstein proposa une expérience pour vérifier la variation de fréquence avec la hauteur par la mesure du décalage vers le rouge de la lumière émise par le Soleil, en utilisant les fameuses raies de Fraunhofer* comme marqueurs de couleur. Les résultats des premières expériences, réalisées par Schwarzschild et d'autres, étaient imprécis, voire négatifs, à cause d'un grand nombre d'effets additionnels qui induisent des variations de couleur à haute température. Mais, en 1920 et 1921, Grebe et Bachem, et de manière indépendante Perot, confirmèrent le décalage vers le rouge gravitationnel à l'aide d'expériences méticuleuses. Dans les années qui suivirent, les avancées technologiques facilitèrent la réalisation des mesures, jusqu'à ce qu'il fût même possible de mesurer cet effet sur Terre. En 1960, dans une expérience exemplaire utilisant l'effet Mössbauer, Pound et Rebka validèrent le décalage vers le rouge gravitationnel dans la tour de leur université en utilisant des rayons γ .

Réf. 101 Mais nos deux expériences de pensée nous en disent beaucoup plus. Utilisons les mêmes arguments que dans le cas de la relativité restreinte : une variation de couleur implique que des horloges avancent différemment à des hauteurs différentes, de la même manière qu'elles avancent différemment à l'avant et à l'arrière du train. On prédit que la différence temporelle $\Delta\tau$ dépend de la différence de hauteur Δh et de l'accélération de la gravité g comme suit

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{g\Delta h}{c^2}. \quad (133)$$

Par conséquent, sous l'effet de la gravité, *le temps dépend de la hauteur*. C'est exactement ce que nous avons affirmé plus haut. En réalité, *la hauteur fait vieillir*. Pouvez-vous confirmer cette conclusion ?

Défi 165 pe En 1972, en embarquant quatre horloges très précises dans un avion tout en en gardant une identique au sol, Hafele et Keating relevèrent que les horloges avançaient réellement différemment à des altitudes distinctes en accord avec l'expression (133). Par la suite, en Réf. 102 1976, l'équipe de Vessot *et al.* propulsa dans l'atmosphère une horloge ultra-précise basée sur un maser – un générateur et oscillateur micro-onde précis – et située sur un missile. Réf. 103 L'équipe compara le maser à l'intérieur du projectile avec un maser identique cloué au sol, confirmant de nouveau cette expression. En 1977, Briatore et Leschiutta montrèrent Réf. 104 qu'une horloge située à Turin égrène ses tic-tac plus lentement qu'une autre située au sommet du mont Rose. Ils confirmèrent la prédiction que sur Terre, pour chaque hauteur parcourue de 100 m, les gens vieillissent plus rapidement d'environ 1 ns par jour. Cet effet a été confirmé pour tous les systèmes pour lesquels des expériences ont été réalisées, tels que diverses planètes, le Soleil et de nombreuses autres étoiles.

Défi 166 pe Ces expériences montrent-elles que le temps varie ou sont-elles tout simplement dues à des horloges qui fonctionnent mal ? Prenez un peu de temps et essayez de répondre à cette question. Nous ne donnerons qu'un seul argument : la gravité change la couleur de

Défi 167 e

* Plus communément appelées raies d'absorption solaire [N.D.T.]

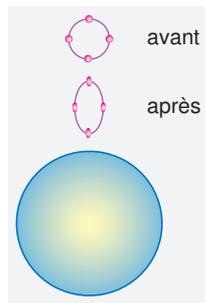


FIGURE 52 Forces de marée : le seul effet que des corps ressentent en chutant.

la lumière, et donc agit effectivement sur le temps. La précision des horloges n'est pas un problème, ici.

En résumé, la gravité est vraiment l'avancement inégal d'horloges situées à des altitudes différentes. Remarquez qu'un observateur en position basse et un autre en position haute *s'accordent* sur ce résultat : tous les deux remarqueront que l'horloge supérieure avance plus vite. En d'autres termes, lorsque la gravité est présente, l'espace-temps n'est *pas* décrit par la géométrie de Minkowski de la relativité restreinte, mais par une géométrie encore plus générale. Pour l'exprimer de manière mathématique, à chaque fois que la gravité entre en jeu, la quadri-distance ds^2 entre des événements est différente de l'expression qui ne tient pas compte de la gravité :

$$ds^2 \neq c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 . \quad (134)$$

Nous allons donner sous peu l'expression exacte.

Cette vision de la gravité comme un temps dépendant de la hauteur est-elle sérieusement raisonnable ? Non. Il apparaît qu'elle est encore plus étrange que cela ! Puisque la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, nous pouvons en dire plus. Si le temps varie avec la hauteur, la longueur doit également en faire autant ! Plus précisément, si des horloges avancent différemment à des hauteurs différentes, la longueur de mètres étalons doit aussi varier avec la hauteur. Pouvez-vous le confirmer pour le cas de barres horizontales situées à des altitudes distinctes ?

Défi 168 pe

Si la longueur varie avec la hauteur, la circonférence d'un cercle entourant la Terre *ne peut pas* être donnée par $2\pi r$. Un désaccord analogue est également relevé par une fourmi qui mesure le rayon et la circonférence d'un cercle tracé sur la surface d'un ballon de basket. En réalité, la gravité implique que les êtres humains sont dans une situation semblable à celle des fourmis sur un ballon de basket, l'unique différence étant que les circonstances se manifestent en deux et en trois dimensions. Nous en concluons que partout où la gravité joue un rôle, l'espace est *courbé*.

CE QUE LES MARÉES NOUS ENSEIGNENT À PROPOS DE LA GRAVITÉ

Durant sa chute libre, Kittinger était capable de définir un référentiel inertiel pour lui-même. En fait, il se sentait complètement au repos. Cela signifie-t-il qu'il est impossible de distinguer l'accélération de la gravitation ? Non : la distinction *est* possible. Nous avons juste besoin de comparer *deux* observateurs (ou plus) qui chutent.

Défi 169 e Kittinger n'aurait pas pu trouver un référentiel qui soit également inertiel pour un confrère chutant du côté opposé de la Terre. Un tel référentiel commun n'existe pas. En général, il est impossible de découvrir un *unique* référentiel inertiel décrivant des observateurs distincts chutant librement près d'une masse. En fait, il est même impossible de trouver un référentiel inertiel commun pour des observateurs *proches* plongés dans un champ gravitationnel. Deux observateurs proches remarquent que, pendant leur chute, leur distance relative varie. (Pourquoi ?) La même chose se produit pour des observateurs en orbite.

Défi 170 s Dans une pièce close en orbite autour de la Terre, une personne ou une masse située au centre de la pièce ne ressentirait aucune force, et en particulier aucune force de pesanteur. Mais, si plusieurs particules sont placées dans cette pièce, elles se comporteront différemment en fonction de leur position exacte dans la pièce. Deux particules ne conserveraient la même position relative que si elles étaient exactement sur la même orbite. Si une particule est située sur une orbite plus haute ou plus basse que l'autre, elles s'écarteront l'une de l'autre au cours du temps. De façon encore plus intéressante, si une particule en orbite est poussée latéralement, elle oscillera autour d'une position centrale. (Pouvez-vous entériner ce point ?)

Défi 171 pe La gravitation conduit à des variations relatives de distance. Ces changements témoignent d'un autre effet, indiqué dans la [Figure 52](#) : un corps étendu en chute libre est légèrement *comprimé*. Cet effet nous enseigne aussi qu'une caractéristique essentielle de la gravité est que la chute libre est *différente* d'un point à un autre. Cela nous rappelle quelque chose. La compression d'un corps est le même effet que celui qui engendre les marées. En réalité, le renflement des océans peut être vu comme étant la compression de la Terre dans sa chute vers la Lune. En utilisant ce résultat de la gravitation universelle, nous pouvons maintenant confirmer : l'essence de la gravité est acquise par l'observation des forces de marée.

Page 136

Réf. 105

Formulé autrement, la gravité n'est simple que *localement*. Ce n'est que localement qu'elle ressemble à l'accélération. Ce n'est que localement qu'un observateur qui tombe comme Kittinger se sentira au repos. En fait, seul un observateur assimilé à un point peut le faire ! Dès que nous prenons en considération l'extension spatiale, nous rencontrons les forces de marée. *La gravité est la présence d'effets de marée*. L'absence de forces de marée implique l'absence de gravité. Elles représentent la conséquence quotidienne du temps dépendant de la hauteur. N'est-ce pas un merveilleux dénouement ?

En principe, Kittinger aurait pu *ressentir* la gravitation durant sa chute libre, même en fermant les yeux, s'il avait prêté plus attention à lui-même. S'il avait mesuré la variation de distance entre ses deux mains, il aurait remarqué une minuscule diminution qui aurait pu lui faire dire qu'il était en train de tomber. Cette fine diminution aurait imposé à Kittinger une étrange conclusion. Deux mains en mouvement inertiel devraient se déplacer le long de deux lignes parallèles, conservant constamment la même distance. Puisque la distance varie, il doit conclure que dans l'espace qui l'entourne des lignes qui commencent en étant parallèles ne le restent pas. Kittinger aurait pu conclure que l'espace autour de lui était analogue à la surface de la Terre, où deux lignes qui démarrent au nord, parallèles l'une à l'autre, ont également un écartement qui varie, jusqu'à ce qu'elles se rencontrent au pôle Nord. En d'autres termes, Kittinger aurait pu conclure qu'il était dans un *espace courbe*.

En étudiant la variation de distance entre ses mains, Kittinger aurait même pu en

déduire que la courbure de l'espace varie avec la hauteur. L'espace physique est différent d'une sphère, où la courbure est constante. L'espace physique est plus complexe. Cet effet est extrêmement faible, et ne peut pas être perçu par les facultés sensorielles humaines. Kittinger n'avait aucune chance de déceler quoi que ce soit. La détection requiert des appareils ultrasensibles spécifiques. Néanmoins, cette conclusion reste valable. L'espace-temps n'est *pas* décrit par la géométrie de Minkowski quand la gravité est présente. Les forces de marée impliquent la courbure de l'espace-temps. La gravité est la courbure de l'espace-temps.

ESPACE COURBE ET MATELAS

« Wenn ein Käfer über die Oberfläche einer Kugel krabbelt, merkt er wahrscheinlich nicht, daß der Weg, den er zurücklegt, gekrümmt ist. Ich dagegen hatte das Glück, es zu merken*.
Réponse d'Albert Einstein à la question de son fils Édouard sur la raison de sa renommée. »

Le 7 novembre 1919, Albert Einstein devint mondialement célèbre. Ce jour-là, un article paru dans le quotidien *Times* de Londres annonçait les résultats d'une double expédition partie vers l'Amérique du Sud, sous le titre « Révolution en sciences – Une nouvelle théorie de l'Univers – Les conceptions newtoniennes sont détrônées ». Cette expédition avait démontré sans équivoque – bien que ce ne fût pas la première fois – que la théorie de la gravitation universelle, essentiellement donnée par $a = GM/r^2$, était fautive, et qu'à la place l'espace était *courbé*. Un élan enthousiaste s'empara du monde entier. Einstein fut présenté comme étant le plus grand de tous les génies. La plupart des journaux titraient « L'espace est déformé ». Les articles d'Einstein sur la relativité générale furent réimprimés en entier dans des revues populaires. Les gens pouvaient lire les équations du champ de la relativité générale, sous forme tensorielle et avec les indices en lettres grecques, dans la revue *Time*. Rien de comparable à cela ne s'était produit auparavant ni ne s'est produit depuis pour n'importe quel autre physicien. Quelle était la raison de cette effervescence ?

L'expédition partie dans l'hémisphère Sud avait effectué une expérience proposée par Einstein lui-même. Mis à part la vérification de la variation du temps avec l'altitude, Einstein avait également songé à un grand nombre d'expériences supplémentaires pour détecter la courbure de l'espace. Dans celle qui l'a rendu célèbre par la suite, Einstein suggérait de prendre une photographie des étoiles proches du Soleil, si possible pendant une éclipse solaire, et de la comparer à une photographie des mêmes étoiles, la nuit, lorsque le Soleil est très éloigné. Einstein avait prédit une variation dans la position de $1,75'$ (1,75 seconde d'arc) pour des photos d'étoiles situées en bordure du Soleil, une valeur *deux fois* plus grande que celle prédite par la gravitation universelle. Ce pronostic, correspondant à une distance de $1/40$ mm sur les photographies, fut confirmé en 1919, et ainsi la gravitation universelle fut anéantie.

Ce résultat *implique-t-il* que l'espace est courbé ? En lui-même, non. En fait, d'autres explications pourraient être données pour le résultat de l'expérience de l'éclipse, comme

* « Lorsqu'un insecte marche sur la surface d'une sphère, il ne remarque probablement pas que le chemin qu'il emprunte est courbé. Moi, par contre, j'ai eu la chance de le remarquer. »

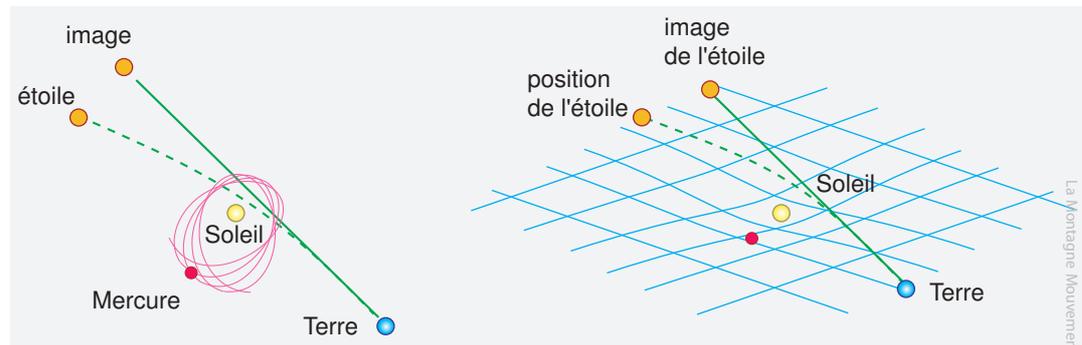


FIGURE 53 Le modèle de l'espace sous forme de matelas : la trajectoire d'un rayon lumineux et d'une planète près d'une masse sphérique.

par exemple un potentiel différent de la forme en l'inverse du carré. Toutefois, les résultats de l'éclipse ne constituent pas les seules données. Nous savons déjà que le temps varie en fonction de la hauteur. Des expériences montrent que deux observateurs placés à des altitudes distinctes mesurent la même valeur pour la vitesse de la lumière c à leur proximité. Mais ces expériences montrent aussi que, si un observateur mesure la vitesse de la lumière à la position de l'autre observateur, il obtient une valeur différente de c , puisque son horloge avance différemment. Il n'y a qu'une solution possible à ce dilemme : les mètres étalons, comme les horloges, varient également avec la hauteur, et d'une façon telle qu'ils doivent produire partout la même vitesse pour la lumière.

Si la vitesse de la lumière est constante mais que les horloges et les mètres étalons varient avec l'altitude, la conclusion doit être que *l'espace est courbé à proximité des masses*. De nombreux physiciens au cours du vingtième siècle s'assurèrent que les mètres étalons sont vraiment différents là où la gravité est présente. Et en réalité la courbure a été décelée autour de plusieurs planètes, dans le voisinage de toutes les centaines d'étoiles où elle pouvait être mesurée, et autour de douzaines de galaxies. Beaucoup d'effets indirects de la courbure autour des masses, qui seront analysés en détail ci-dessous, ont également été observés. Tous les résultats confirment la courbure de l'espace et de l'espace-temps autour des masses, et valident de surcroît les valeurs de courbure prédites par la relativité générale. En d'autres termes, les mètres étalons situés à proximité des masses voient réellement leur taille varier d'un endroit à l'autre, et même d'une orientation à l'autre. La Figure 53 donne une idée de cette situation.

Mais attention : la figure de droite, même si on la rencontre dans de nombreux manuels, peut induire en erreur. Elle peut facilement être confondue avec une reproduction d'un *potentiel* autour d'un corps. En réalité, il est impossible de dessiner un graphique représentant la courbure et le potentiel séparément. (Pourquoi ?) Nous verrons que pour des courbures faibles il est même possible d'expliquer la variation de la longueur du mètre étalon en utilisant seulement un potentiel. Cette figure ne triche donc pas réellement, au moins dans le cas d'une faible gravité. Mais pour des valeurs énormes et variables de la gravité, on ne peut pas définir de potentiel, et il n'existe donc en fait aucune manière de ne pas utiliser l'espace courbe pour décrire la gravitation. En résumé, si nous imaginons l'espace comme une sorte de matelas généralisé dans lequel des masses produisent des déformations, nous avons un modèle plausible de l'espace-temps. Puisque

Défi 172 pe

Réf. 107

Défi 173 s

les masses bougent, les déformations les suivent.

L'accélération d'une particule ne dépend que de la courbure du matelas. Elle ne dépend pas de sa masse. Donc le modèle du matelas explique pourquoi tous les corps tombent de la même manière. (Autrefois, on appelait également cela l'égalité entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle.)

Page 108

L'espace se comporte donc comme un matelas lisse qui s'infilte partout. Nous vivons à l'intérieur du matelas, mais nous ne le ressentons pas dans la vie courante. Les objets massifs tirent la mousse du matelas vers eux, modifiant ainsi la forme de ce dernier. Une force, une énergie ou une masse plus importante entraîne une déformation plus importante. (Le matelas vous fait-il penser à l'éther ? Ne vous inquiétez pas : la physique a évincé le concept d'éther parce qu'il est indiscernable du vide.)

Défi 174 pe

Si la gravité signifie que l'espace est courbé, alors n'importe quel observateur accéléré, comme un homme dans une voiture qui démarre, doit aussi le constater. Toutefois, dans la vie quotidienne, nous n'observons pas de tels effets, parce que pour les accélérations et les dimensions de la vie courante les valeurs de courbure sont trop insignifiantes pour être perçues. Pouvez-vous concevoir une expérience, faisant appel à nos sens, qui vérifie cette prédiction ?

ESPACE-TEMPS COURBE

La Figure 53 montre la courbure de l'espace uniquement, mais en fait c'est l'espace-temps qui est courbé. Nous découvrirons bientôt comment décrire à la fois la forme de l'espace et la forme de l'espace-temps, et comment mesurer leur courbure.

Page 38

Page 128

Faisons une première tentative pour décrire la nature avec l'idée d'espace-temps courbe. Dans le cas de la Figure 53, la meilleure description des événements est faite par l'emploi du temps t indiqué par une horloge située à l'infini dans l'espace. Cela contourne les problèmes dus à l'avancement inégal d'horloges situées à des distances différentes de la masse centrale. Pour la coordonnée radiale r , le choix le plus commode pour éviter des problèmes avec la courbure de l'espace consiste à utiliser la circonférence d'un cercle situé autour du corps central, divisé par 2π . La forme courbe de l'espace-temps est mieux décrite par le comportement de la distance de l'espace-temps ds , ou par le temps de l'horloge $d\tau = ds/c$, entre deux points voisins ayant des coordonnées (t, r) et $(t+dt, r+dr)$. Comme nous l'avons vu ci-dessus, la gravité implique qu'en coordonnées sphériques nous ayons

$$d\tau^2 = \frac{ds^2}{c^2} \neq dt^2 - dr^2/c^2 - r^2 d\phi^2/c^2. \quad (135)$$

Cette inégalité exprime le fait que l'espace-temps est *courbé*. En réalité, les expériences sur la variation du temps avec la hauteur confirment que l'intervalle d'espace-temps autour d'une masse sphérique est donné par

$$d\tau^2 = \frac{ds^2}{c^2} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{c^2 - \frac{2GM}{r}} - \frac{r^2}{c^2} d\phi^2. \quad (136)$$

Cette expression est appelée la *métrique de Schwarzschild* d'après l'un de ses décou-

vreurs*. La métrique (136) décrit la forme courbée de l'espace-temps situé autour d'une masse sphérique qui n'est pas en rotation. Elle est bien approchée par celle de la Terre ou du Soleil. (Pourquoi leur rotation peut-elle être négligée ?) L'expression (136) indique également que l'intensité de la gravité autour d'un corps de masse M et de rayon R est quantifiée par un nombre h sans dimension défini comme suit

$$h = \frac{2G M}{c^2 R} . \quad (137)$$

Ce rapport explicite la tension gravitationnelle avec laquelle les longueurs et le vide sont déformés par rapport à la situation plate de la relativité restreinte, et donc détermine également la durée de ralentissement des horloges lorsque la gravité entre en jeu. (Ce rapport indique aussi à quelle distance nous nous trouvons de n'importe quel horizon possible.) À la surface de la Terre, le rapport h possède la minuscule valeur de $1,4 \cdot 10^{-9}$; à la surface du Soleil, elle possède la valeur, dans une certaine mesure plus importante, de $4,2 \cdot 10^{-6}$. La précision des horloges modernes nous permet de déceler des effets aussi ténus plutôt facilement. Nous discuterons bientôt des diverses conséquences et usages de la déformation de l'espace-temps.

Nous remarquons que si une masse est fortement concentrée, en particulier quand son rayon devient égal à son rayon de Schwarzschild

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} , \quad (138)$$

la métrique de Schwarzschild se comporte bizarrement : à cet emplacement, *le temps disparaît* (remarquez que t représente le temps à l'infini). Au rayon de Schwarzschild, le temps local (indiqué par une horloge située à l'infini) s'arrête – et un horizon apparaît. Nous explorerons plus bas ce qui se passe précisément. Cette situation n'est pas commune : le rayon de Schwarzschild pour une masse comme la Terre est de 8,8 mm, et pour le Soleil de 3,0 km. Vous devriez pouvoir vérifier que la taille de chaque objet de la vie quotidienne est supérieure à son rayon de Schwarzschild. Des corps qui atteignent cette limite sont appelés des *trous noirs*, nous les étudierons en détail prochainement. En fait, la relativité générale stipule qu'*aucun* système dans la nature n'est plus petit que sa taille de Schwarzschild, en d'autres termes que le rapport h défini par l'expression (137) n'est jamais supérieur à 1.

En résumé, les résultats mentionnés jusqu'ici établissent clairement que *la masse engendre la courbure*. L'équivalence masse-énergie que nous connaissons en relativité restreinte nous enseigne que, par conséquent, l'espace devrait également être courbé par la présence de n'importe quel type d'énergie-impulsion. Chaque type d'énergie courbe l'espace-temps. Par exemple, la lumière devrait également le courber. Cependant, même les rayons de plus forte énergie que nous puissions créer correspondent à des masses

* Karl Schwarzschild (1873–1916) fut un important astronome allemand, il fut un des premiers à comprendre la relativité générale. Il publia sa formule en décembre 1915, seulement quelques mois après qu'Einstein eut publié ses équations du champ. Il décéda prématurément à 42 ans, ce qui attrista énormément Einstein. Nous déduirons la forme de la métrique plus loin, directement à partir des équations du champ de la relativité générale. L'autre inventeur de cette métrique, inconnu d'Einstein, fut le physicien hollandais J. Droste.

extrêmement petites, et donc à des courbures infinitésimales. Même la chaleur courbe l'espace-temps, mais, dans la plupart des systèmes, la chaleur ne représente approximativement qu'une fraction de 10^{-12} de la masse totale, son effet sur la courbure n'est donc pas mesurable et est négligeable. Néanmoins, il est toujours possible de montrer expérimentalement que l'énergie courbe l'espace. Dans presque tous les atomes, une portion considérable de la masse est due à l'énergie électrostatique qui existe entre les protons chargés positivement. En 1968 Kreuzer confirma que l'énergie courbe l'espace à l'aide d'une expérience astucieuse utilisant une masse flottante.

Réf. 110

Défi 177 pe

Nous pouvons immédiatement imaginer que l'avancement inégal des horloges est l'équivalent temporel de la courbure spatiale. En rassemblant ces deux notions, nous concluons que lorsque la gravité est présente l'*espace-temps* est courbé.

Résumons notre chapelet de réflexions. L'énergie est équivalente à la masse, la masse engendre la gravité, celle-ci est équivalente à l'accélération, l'accélération est le temps dépendant de la position. Puisque la vitesse de la lumière est constante, nous en déduisons que *l'énergie-impulsion dicte à l'espace-temps de se courber*. Cet énoncé représente la première moitié de la relativité générale.

Nous découvrirons bientôt comment mesurer la courbure, comment la calculer à partir de l'énergie-impulsion et ce que nous constatons lorsque les mesures et les calculs sont comparés. Nous découvrirons également que des observateurs distincts mesurent des valeurs de courbure différentes. L'ensemble des transformations qui associent un point de vue à un autre en relativité générale, la *symétrie difféomorphisme*, nous apprendra comment relier les mesures faites par des observateurs différents.

Puisque la matière se déplace, nous pouvons même en dire plus. Non seulement l'espace-temps est courbé près des masses, mais il se met aussi à onduler comme des vagues après qu'une masse est passée à proximité. En d'autres termes, la relativité générale stipule que l'espace, de même que l'espace-temps, est *élastique*. Cependant, il est plutôt rigide : beaucoup plus rigide que l'acier. Pour courber une région de l'espace de 1% il faut une densité d'énergie considérablement plus importante que pour courber un simple rail de chemin de fer de 1%. Tout cela, ainsi que d'autres conséquences intéressantes de l'élasticité de l'espace-temps, nous absorbera durant le reste de ce chapitre.

Réf. 111

Défi 178 pe

LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ET LA CONSTANTE GRAVITATIONNELLE

“ Si morior, moror*.”

Nous poursuivons notre chemin vers une compréhension précise de la gravitation. Toute notre connaissance théorique et empirique concernant la gravité peut être résumée en seulement deux formulations générales. Le premier principe établit que :

▷ *La vitesse v d'un système physique est bornée par :*

$$v \leq c \quad (139)$$

pour tous les observateurs, où c représente la vitesse de la lumière.

* « Si je m'arrête, je meurs. » C'est la devise de l'oiseau de paradis.

La théorie qui découle de ce premier principe, la relativité *restreinte*, est étendue à la relativité *générale* en y ajoutant un deuxième principe, caractérisant la gravitation. Il existe plusieurs manières équivalentes de formuler ce principe. En voici une.

▷ Pour tous les observateurs, la force F agissant sur un système est limitée par

$$F \leq \frac{c^4}{4G}, \quad (140)$$

où G représente la constante universelle de la gravitation.

Défi 179 e En bref, il existe une force maximale dans la nature. La gravitation conduit à l'attraction entre les masses. Cependant, cette force d'attraction est restreinte. Une formulation équivalente est :

▷ Pour tous les observateurs, la taille L d'un système de masse M est limitée par

$$\frac{L}{M} \geq \frac{4G}{c^2}. \quad (141)$$

En d'autres termes, un système massif ne peut pas être plus concentré qu'un trou noir de même masse qui n'est pas en rotation. Une autre façon d'exprimer le principe de la gravitation est la suivante :

▷ Pour tous les systèmes, la puissance émise P est restreinte par

$$P \leq \frac{c^5}{4G}. \quad (142)$$

En bref, il existe une puissance maximale dans la nature.

Page 98 Les trois limitations citées ci-dessus sont toutes équivalentes, et aucune exception n'est connue ou réellement possible. Ces limites incluent la gravitation universelle dans le cas non relativiste. Elles nous disent *ce qu'est* la gravité, à savoir la courbure, et *comment* elle se comporte exactement. Ces limites nous permettent de déterminer la courbure dans toutes les situations, pour tous les événements de l'espace-temps. Comme nous l'avons vu ci-dessus, la vitesse limite associée à n'importe lequel des trois derniers principes implique toute la relativité générale*.

Défi 180 pe Par exemple, pouvez-vous montrer que la formule décrivant le décalage vers le rouge gravitationnel est conforme à la limite générale (141) pour les rapports longueur sur masse ?

Nous remarquons que toute formule qui contient la vitesse de la lumière c est fondée sur la relativité restreinte et, si elle contient la constante de la gravitation G , elle est reliée à la gravitation universelle. Si une formule contient à la fois c et G , elle est propre à la relativité générale. Le présent chapitre soulignera souvent cette correspondance.

Jusqu'à présent, notre ascension de la montagne nous a appris qu'une description précise du mouvement exige la caractérisation de tous les points de vue autorisés, leurs

Réf. 112 * Cette approche didactique n'est pas conventionnelle. Il est possible qu'elle ait été initiée par le présent auteur. Le physicien britannique Gary Gibbons l'a également développée de manière indépendante. Des références plus anciennes ne sont pas connues.

particularités, leurs différences, et les transformations possibles entre eux. Désormais, tous les points de vue sont permis, sans exception : quiconque doit être capable de communiquer avec n'importe qui d'autre. Il n'y a aucune différence entre un observateur qui ressent la gravité, celui qui est en chute libre, celui qui est accéléré ou celui qui est en mouvement inertiel. En outre, les individus qui intervertissent la gauche et la droite, ceux qui échangent le haut et le bas ou les gens qui affirment que le Soleil tourne autour de la Terre doivent pouvoir se parler entre eux, et avec nous. Cela introduit un ensemble beaucoup plus vaste de transformations des points de vue que dans le cas de la relativité restreinte, et rend la relativité générale à la fois difficile et captivante. Et puisque tous les points de vue sont autorisés, la description du mouvement qui en résulte est *complète**.

POURQUOI UNE PIERRE JETÉE EN L'AIR RETOMBE-T-ELLE SUR LA TERRE ? – LES GÉODÉSQUES

« Un génie est une personne qui fait toutes les erreurs possibles dans le temps le plus court possible. »

Anonyme

Page 74 Dans notre discussion de la relativité restreinte, nous avons vu que le mouvement inertiel ou de flottaison libre est le mouvement qui associe deux événements qui nécessitent *le plus long* temps propre. En l'absence de la gravité, le mouvement qui satisfait cette condition est un mouvement en *ligne droite* (rectiligne). D'autre part, nous sommes également habitués à imaginer les rayons lumineux comme étant droits. En réalité, nous avons tous l'habitude de vérifier la rectitude d'une bordure en l'observant de profil sur toute sa longueur. À chaque fois que nous dessinons les axes d'un système de coordonnées physique, nous imaginons que nous traçons soit des trajectoires de rayons lumineux soit celles du mouvement de corps se déplaçant librement.

Page 47

En l'absence de la gravité, les trajectoires d'objets et celles de la lumière coïncident. Cependant, si la gravité est présente, les objets ne se déplacent plus le long de trajets lumineux, comme l'indique chaque pierre lancée en l'air. La lumière ne définit plus la notion de rectitude spatiale. En présence de la gravité, les trajets de la lumière et de la matière sont tous les deux courbés, bien que ce soit avec des amplitudes *différentes*. Mais la formulation originale reste valide : même quand la gravité est présente, les corps suivent des trajectoires de plus long temps propre possible. Pour la matière, de tels trajets sont appelés des *géodésiques de genre temps*. Pour la lumière, ils sont dénommés des *géodésiques nulles* ou de *genre lumière*.

Nous remarquons que dans l'espace-temps les géodésiques sont les courbes qui ont la longueur *maximale*. C'est en contradiction avec le cas purement spatial, telle la surface d'une sphère, où les géodésiques sont les courbes de longueur *minimale*. En termes simples, *les pierres retombent parce qu'elles suivent des géodésiques*. Faisons quelques vérifications concernant cette affirmation.

Puisque les pierres se déplacent en maximisant le temps propre pour des observateurs inertiels, elles doivent en faire autant pour des observateurs chutant librement, comme Kittinger. En fait, elles doivent en faire autant pour tous les observateurs. Au moins, l'équivalence entre les trajectoires de chute et les géodésiques reste cohérente.

* Ou du moins devrait-elle l'être, s'il n'y avait pas une minuscule déviation appelée théorie quantique.

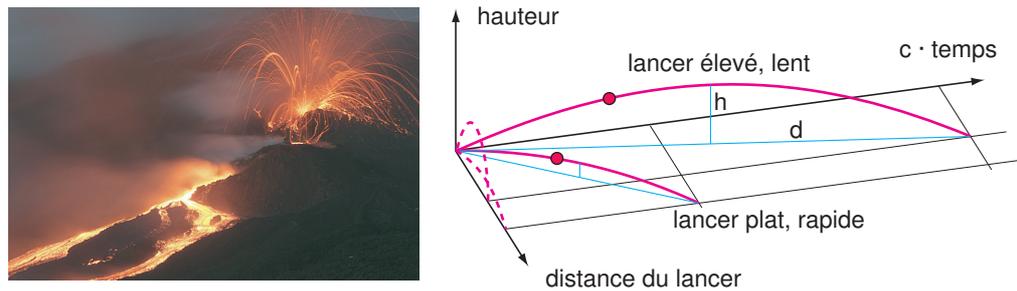


FIGURE 54 Toutes les trajectoires des pierres voltigeant en l'air, indépendamment de leurs vitesses et de leurs angles, ont la même courbure dans l'espace-temps. (Photographie © Marco Fulle)

Défi 181 pe

Si la chute est perçue comme étant une conséquence du rapprochement de la surface de la Terre – comme nous le discuterons plus tard –, nous pouvons déduire directement que la chute implique un temps propre qui est aussi long que possible. La chute libre est en réalité un mouvement qui suit des géodésiques.

Défi 182 pe

Nous avons vu plus haut que la gravitation découle de l'existence d'une force maximale. Ce résultat peut être visualisé d'une autre manière. Si l'attraction gravitationnelle entre un corps central et un satellite était *plus forte* qu'elle ne l'est, les trous noirs seraient plus petits qu'ils ne le sont. Dans ce cas, les limites de la force maximale et de la vitesse maximale pourraient être dépassées en s'approchant suffisamment d'un tel trou noir. Si, d'autre part, la gravitation était *plus faible* qu'elle ne l'est, il y aurait des observateurs pour lesquels les deux astres n'interagiraient pas, donc pour lesquels ils ne formeraient pas un système physique. En résumé, une force maximale de $c^4/4G$ implique la gravitation universelle. Il n'y a aucune différence entre l'affirmation que tous les corps s'attirent à travers la gravitation et celle qu'il existe une force maximale dont la valeur est déterminée par $c^4/4G$. Mais en même temps, le principe de la force maximale implique que les objets se déplacent le long de géodésiques. Pouvez-vous le montrer ?

Défi 183 pe

Tournons-nous vers une vérification expérimentale. Si la chute est une conséquence de la courbure, alors les trajectoires de *toutes* les pierres jetées ou chutant près de la Terre doivent avoir la *même* courbure dans l'espace-temps. Prenez une pierre lancée horizontalement, une pierre jetée verticalement, une pierre jetée avec vigueur, ou une pierre lancée mollement : un bref raisonnement permet de montrer que *dans l'espace-temps* toutes leurs trajectoires sont approchées avec une grande précision par des arcs de cercle, comme indiqué sur la Figure 54. Toutes les trajectoires possèdent le *même* rayon de courbure r , donné par :

$$r = \frac{c^2}{g} \approx 9,2 \cdot 10^{15} \text{ m} . \tag{143}$$

La valeur énorme du rayon, correspondant à une faible courbure, explique pourquoi nous ne la remarquons pas dans notre vie de tous les jours. La forme parabolique, caractéristique de la trajectoire d'une pierre dans la vie courante, représente juste la projection de la trajectoire plus fondamentale dans l'espace-temps quadridimensionnel sur l'espace tridimensionnel. La remarque importante est que la valeur de la courbure *ne* dépend *pas* des conditions du lancer. En fait, ce résultat élémentaire aurait pu suggérer les idées de la

relativité générale aux chercheurs un siècle avant Einstein ; ce qui manquait était l'identification de l'importance de la vitesse de la lumière comme vitesse limite. Dans tous les cas, ce calcul simple confirme que la chute et la courbure sont reliées. Comme attendu, et comme il a déjà été mentionné ci-dessus, la courbure décroît avec l'augmentation de la hauteur, jusqu'à ce qu'elle disparaisse à une distance infinie de la Terre. Maintenant, étant donné que toutes les trajectoires pour la chute libre ont la même courbure, et étant donné que toutes ces trajectoires sont des chemins de moindre action, on en déduit immédiatement qu'elles sont également des géodésiques.

Si nous décrivons la chute comme une conséquence de la courbure de l'espace-temps, nous devons montrer que la description avec les géodésiques reproduit toutes ses caractéristiques. En particulier, nous devons être capables d'expliquer le fait que les pierres lancées avec une vitesse faible retombent, et que celles propulsées avec une vitesse importante s'échappent. Pouvez-vous déduire cela à partir de la courbure spatiale ?

Défi 184 pe

En résumé, le mouvement de n'importe quelle particule chutant librement « dans un champ gravitationnel » est décrit par le même principe variationnel que le mouvement d'une particule libre en relativité restreinte : la trajectoire maximise le temps propre $\int d\tau$. Nous le reformulons en disant qu'une particule quelconque en chute libre du point A au point B minimise l'action S donnée par

$$S = -mc^2 \int_A^B d\tau . \quad (144)$$

C'est tout ce que nous avons besoin de connaître concernant la chute libre des objets. En conséquence, *toute déviation par rapport à la chute libre vous rajeunit*. Plus l'écart est important, plus vous restez jeune.

Page 267

Réf. 113

Comme nous le verrons ci-après, la description de l'action minimale de la chute libre a été contrôlée avec beaucoup de précision, et l'expérience n'a pas décelé le moindre écart. Nous découvrirons aussi que, pour la chute libre, les prédictions de la relativité générale et de la gravitation universelle diffèrent de manière significative, à la fois pour les particules proches de la vitesse de la lumière et pour les corps centraux de densité élevée. Jusqu'ici, toutes les expériences ont montré qu'à chaque fois que les deux prédictions étaient différentes la relativité générale était exacte, et que la gravitation universelle ou toute description alternative était fautive.

Tous les corps chutent le long de géodésiques. Cela nous indique quelque chose d'important. La façon dont les corps chutent ne dépend pas de leur masse. Les géodésiques sont comme des « rails » dans l'espace-temps qui indiquent aux corps comment tomber. En d'autres termes, l'espace-temps peut vraiment être imaginé comme une entité unique, énorme, déformée. L'espace-temps n'est pas un « néant », c'est une réalité issue de notre réflexion. La forme de cette entité indique aux objets comment se déplacer. L'espace-temps est donc en réalité assimilable à un matelas impalpable, ce matelas déformé guidant les objets qui chutent le long de ses réseaux de géodésiques.

Défi 185 s

Qui plus est, l'énergie *de liaison* chute de la même manière que la masse, comme on le prouve en comparant la chute d'objets constitués de matériaux différents. Ils possèdent des pourcentages différents d'énergie de liaison. (Pourquoi ?) Par exemple, sur la Lune, où il n'y a pas d'air, les astronautes lâchent des boules en acier et des plumes, et remarquent qu'elles tombent ensemble, les unes à côté des autres. L'indépendance de la

Réf. 114 composition matérielle pour la chute a été vérifiée et confirmée maintes et maintes fois.

LA LUMIÈRE PEUT-ELLE TOMBER ?

Comment le rayonnement tombe-t-il ? La lumière, comme tout rayonnement, est de l'énergie possédant une masse inertielle nulle. Elle se déplace comme un courant d'entités lumineuses extrêmement rapides. Par conséquent, les écarts par rapport à la gravitation universelle deviennent plus flagrants dans le cas de la lumière. Comment la lumière tombe-t-elle ? La lumière ne peut pas modifier sa vitesse. Quand elle chute verticalement, elle change uniquement de couleur, comme nous l'avons vu ci-dessus. Mais la lumière peut également changer de direction. Bien avant que les idées de la relativité ne deviennent populaires, en 1801, l'astronome prussien Johann Soldner comprit que la gravitation universelle implique que la lumière est *déviée* lorsqu'elle passe à proximité d'une masse. Il calcula également dans quelle mesure l'angle de déviation dépend de la masse du corps et de la distance de la trajectoire du rayon lumineux. Pourtant, personne au cours du dix-neuvième siècle ne fut capable de vérifier ce résultat expérimentalement.

Évidemment, la lumière possède de l'énergie, et l'énergie a un poids. La déviation de la lumière en elle-même *ne* constitue *pas* une pièce à conviction pour la courbure de l'espace. La relativité générale prédit également un angle de déviation pour la lumière frôlant des masses, mais du *double* de la valeur classique de Soldner, parce que la courbure de l'espace autour de grosses masses s'ajoute à l'effet de la gravitation universelle. La déviation de la lumière ne confirme donc la courbure de l'espace que si sa grandeur s'*accorde* avec celle prédite par la relativité générale. C'est effectivement le cas : les observations coïncident avec les prédictions. Nous allons donner bientôt un peu plus de détails.

La masse n'est donc pas nécessaire pour ressentir la gravité, l'énergie est suffisante. On doit se familiariser avec cette notion de l'équivalence masse-énergie lorsque l'on étudie la relativité générale. En particulier, la lumière n'entre pas dans la catégorie poids plume, mais est plutôt lourde. Pouvez-vous étayer le fait que la courbure de la lumière près de la Terre doit être la même que celle des pierres, donnée par l'expression (143) ?

En résumé, toutes les expériences montrent que l'énergie, tout comme la masse, chute le long des géodésiques, quel que soit son type (liée ou libre) et quelle que soit l'interaction en jeu (fût-elle électromagnétique ou nucléaire). De plus, le mouvement du rayonnement confirme que l'espace-temps est courbé.

Puisque les expériences démontrent que toutes les particules tombent de la même manière, indépendamment de leur masse, de leur charge ou de toute autre propriété, nous pouvons en conclure que le système constitué de toutes les trajectoires possibles forme une structure indépendante. Cette structure est ce que nous appelons l'*espace-temps*.

Nous remarquons donc que *l'espace-temps indique à la matière, à l'énergie et au rayonnement comment ils doivent tomber*. Cette proposition représente la seconde moitié de la relativité générale. Elle complète la première partie, qui stipule que l'énergie spécifique à l'espace-temps comment il doit se courber. Pour achever la description du mouvement macroscopique, nous avons juste besoin de rendre ces formulations plus quantitatives, de telle manière qu'elles puissent devenir réfutables. Comme d'habitude, nous pouvons procéder de deux manières différentes : nous pouvons déduire ces équations directement du mouvement, ou nous pouvons d'abord déterminer le lagrangien correspondant puis

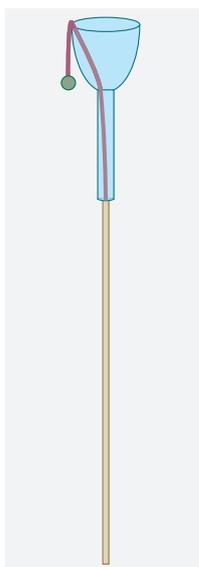


FIGURE 55 Un casse-tête : quelle est la façon la plus simple de mettre la balle attachée au fil élastique dans la coupe ?

en déduire les équations du mouvement. Mais, avant de faire cela, divertissons-nous un peu.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LA GRAVITATION

« Wenn Sie die Antwort nicht gar zu ernst nehmen und sie nur als eine Art Spaß ansehen, so kann ich Ihnen das so erklären : Früher hat man geglaubt, wenn alle Dinge aus der Welt verschwinden, so bleiben noch Raum und Zeit übrig. Nach der Relativitätstheorie verschwinden aber auch Zeit und Raum mit den Dingen*.

Albert Einstein en 1921 à New York.

Prenez une bouteille en plastique et faites quelques trous près de sa base. Remplissez la bouteille avec de l'eau et bouchez les trous avec vos doigts. Si vous laissez tomber la bouteille, l'eau ne quittera pas celle-ci durant la chute. Pouvez-vous expliquer comment cette expérience confirme l'équivalence entre le repos et la chute libre ?

Défi 187 s

* *

Lors de son soixante-seizième anniversaire, Einstein reçut un cadeau spécialement conçu pour lui, indiqué sur la **Figure 55**. Une coupe plutôt profonde est montée sur le haut d'un manche à balai. La coupe contient un petit morceau de fil élastique, attaché à son fond, à l'autre extrémité duquel une balle est fixée. En position initiale, la balle est suspendue

* « Si vous ne prenez pas cette réponse trop au sérieux et la considérez uniquement comme une distraction, je peux vous l'expliquer de la manière suivante : par le passé nous pensions que, si toutes les choses disparaissaient du monde, l'espace et le temps seraient ce qui resterait. Mais, en suivant la théorie de la relativité, l'espace et le temps disparaîtraient en même temps que les choses. »

à l'extérieur de la coupe. Le fil élastique est trop mince pour vaincre la gravité et tirer la balle dans la coupe. Quelle est la manière la plus élégante de placer la balle dans la coupe ?

Défi 188 s

* *

La gravité possède les mêmes propriétés partout dans l'Univers – sauf dans le bureau des brevets américain. En 2005, il accorda un brevet, n° 6 960 975, pour un dispositif d'antigravité qui fonctionne en déformant l'espace-temps d'une manière telle que la gravité se trouve « compensée » (allez sur patft.uspto.gov). Connaissez-vous un dispositif plus simple ?

Défi 189 s

* *

Le rayon de courbure de l'espace-temps à la surface de la Terre est de $9,2 \cdot 10^{15}$ m. Pouvez-vous confirmer cette valeur ?

Défi 190 e

* *

Un morceau de bois flotte sur l'eau. Émergera-t-il un peu plus ou un peu moins dans un ascenseur qui accélère vers le haut ?

Défi 191 pe

* *

Nous avons vu en relativité restreinte que si des jumeaux sont accélérés de manière identique dans la même direction, sachant qu'un jumeau se tient à une certaine distance devant l'autre, alors le jumeau situé devant vieillit plus vite que le jumeau resté derrière. Cela se produit-il également dans un champ gravitationnel ? Et que se passe-t-il lorsque le champ varie avec la hauteur, comme sur Terre ?

Défi 192 pe

* *

Une force maximale et une puissance maximale impliquent également un flux maximal de masse. Pouvez-vous montrer qu'aucun flux de masse ne peut excéder $1,1 \cdot 10^{35}$ kg/s ?

Défi 193 pe

* *

Les expériences des figures 50 et 51 diffèrent sur un point : l'une se passe dans un espace plat, l'autre dans un espace courbe. L'une semble être reliée à la conservation de l'énergie, l'autre pas. Ces différences contredisent-elles l'équivalence des observations ?

Défi 194 pe

* *

Comment les cosmonautes peuvent-ils eux-mêmes se peser pour vérifier qu'ils ont assez mangé ?

Défi 195 s

* *

Un cosmonaute en orbite flotte-t-il réellement librement ? Non. Il apparaît que les stations orbitales et les satellites sont accélérés par plusieurs effets minuscules. Les plus importants sont la pression de la lumière issue du Soleil, le frottement de l'air ténu, et les effets du vent solaire. (Les micrométéorites peuvent généralement être négligées.) Ces trois effets entraînent tous des accélérations de l'ordre de 10^{-6} m/s² à 10^{-8} m/s², en fonction de l'altitude de l'orbite. Pouvez-vous estimer combien de temps il faudrait à une pomme

Défi 196 s flottant dans l'espace pour frapper la paroi d'une station orbitale, sachant qu'elle se situe au départ au milieu ? Par ailleurs, quelle est la grandeur des accélérations de marée dans cette situation ?

* *

Page 78 Il n'existe pas de masse négative dans la nature, comme nous en avons déjà débattu au début de notre promenade (même l'antimatière possède une masse *positive*). Cela signifie que, à la différence des interactions électromagnétiques, rien ne peut se soustraire à la gravitation. Puisque la gravitation ne peut pas être évitée, il n'y a aucune manière de concevoir un système parfaitement isolé. Mais de tels systèmes forment la base de la thermodynamique ! Nous étudierons les implications fascinantes de cela plus tard : par exemple, nous découvrirons une *limite supérieure* pour l'entropie des systèmes physiques.

Page ??

* *

Réf. 116 L'espace courbe peut-il être utilisé pour voyager plus vite que la lumière ? Imaginez un espace-temps dans lequel deux points peuvent être connectés, soit par un itinéraire qui traverse une zone plate, soit par un deuxième trajet qui traverse une zone partiellement courbée. Cette zone courbée pourrait-elle être utilisée pour voyager entre les points plus rapidement qu'à travers celle qui est plate ? Mathématiquement, c'est possible ; toutefois, un tel espace courbé aurait besoin d'avoir une densité d'énergie *négative*. Une telle situation est incompatible avec la définition de l'énergie et avec l'inexistence avérée de masses négatives. Le postulat que cela ne se produit pas dans la nature est également appelé la *condition faible sur l'énergie*. Est-elle implicitement suggérée par la limite des rapports longueur sur masse ?

Défi 197 pe

* *

Défi 198 pe La proposition d'une limite de la longueur par rapport à la masse $L/M \geq 4G/c^2$ invite les expérimentateurs à tenter de la surpasser. Pouvez-vous expliquer ce qui se produit lorsqu'un observateur se déplace si rapidement vers une masse que la contraction de la longueur du corps parvient à la limite ?

* *

Il existe une propriété mathématique primordiale de \mathbb{R}^3 qui distingue l'espace tridimensionnel de toutes les autres possibilités. Une courbe (unidimensionnelle) fermée peut former des nœuds *uniquement* dans \mathbb{R}^3 : dans n'importe quel autre nombre supérieur de dimensions, elle peut toujours être dénouée. (L'existence des nœuds explique également pourquoi le nombre trois représente le plus petit nombre de dimensions qui permet aux particules d'avoir un mouvement chaotique.) Néanmoins, la relativité générale ne dit pas *pourquoi* l'espace-temps possède quatre dimensions. Elle est simplement fondée sur la réalité. Cette question ardue et profonde ne sera résolue que dans la dernière partie de notre ascension de la montagne.

* *

Henri Poincaré, qui est décédé en 1912, peu avant que la théorie de la relativité générale ne fût achevée, pensait depuis un certain temps que l'espace courbe n'était pas une néces-

Défi 199 p e sité, mais seulement une possibilité. Il imaginait que nous pouvions continuer à utiliser l'espace euclidien à condition que nous autorisions la lumière à suivre des trajectoires courbées. Pouvez-vous élucider pourquoi une telle théorie est impossible ?

* *

Défi 200 s Deux atomes d'hydrogène peuvent-ils tourner l'un autour de l'autre, dans leur champ gravitationnel mutuel ? Quelle serait la taille de cette « molécule » ?

* *

Défi 201 s Deux impulsions lumineuses peuvent-elles tourner l'une autour de l'autre, dans leur champ gravitationnel mutuel ?

* *

Page 84 Les divers mouvements de la Terre mentionnés dans la section sur la physique galiléenne, tels que sa rotation autour de son axe ou autour du Soleil, conduisent à plusieurs variantes de temps en physique et en astronomie. Le temps défini par les meilleures horloges atomiques est baptisé *temps dynamique terrestre* ou TDT. En introduisant des sauts de quelques secondes de temps en temps pour compenser la mauvaise définition de la seconde (une rotation terrestre ne dure pas 86 400 mais 86 400,002 secondes) et, accessoirement, pour compenser le ralentissement de la rotation de la Terre, nous obtenons le *temps universel coordonné* ou TUC. Il existe alors un temps dérivé de celui-ci qui prend en compte toutes les corrections de l'ordre de quelques secondes. Nous aurions ainsi le temps – distinct – qui serait indiqué par une horloge non rotative située au centre de la Terre. Finalement, il y a le *temps dynamique barycentrique* ou TDB, qui est le temps qui serait indiqué par une horloge située au centre de masse du Système solaire. C'est en utilisant ce dernier uniquement que les satellites peuvent être guidés de manière fiable à travers le Système solaire. En résumé, la relativité dit adieu au Temps Moyen de Greenwich, comme le fit en son temps la loi britannique, dans une des rares situations où la loi a écouté la science. (Seule la BBC continue de l'utiliser.)

Page 283

Réf. 117

* *

Les agences spatiales *doivent* donc tenir compte de la relativité générale si elles veulent envoyer des satellites artificiels vers Mars, Vénus ou des comètes. Sans celle-ci, les orbites ne seraient pas calculées avec exactitude, et les satellites manqueraient leur cible et même carrément la planète elle-même. En réalité, les agences spatiales jouent la carte de la sécurité : elles utilisent une généralisation de la relativité générale, à savoir le *formalisme post-newtonien paramétrisé*, qui effectue une vérification continue pour savoir si la relativité générale est correcte. Aucune déviation n'a été décelée jusqu'à présent, aux erreurs de mesures près*.

* Pour donner une idée de ce que cela signifie, le formalisme post-newtonien *non paramétrisé*, fondé sur la relativité générale, compose l'équation du mouvement d'un corps de masse m près d'une grande masse M comme un développement de l'expression en l'inverse du carré, pour l'accélération a :

$$a = \frac{GM}{r^2} + f_2 \frac{GM}{r^2} \frac{v^2}{c^2} + f_4 \frac{GM}{r^2} \frac{v^4}{c^4} + f_5 \frac{Gm}{r^2} \frac{v^5}{c^5} + \dots \quad (145)$$

Ici les facteurs numériques f_n sont évalués à partir de la relativité générale et sont du premier ordre. Les

* *

Réf. 118 La relativité générale est également utilisée par les agences spatiales tout autour du monde pour calculer les positions exactes des satellites et pour ajuster les radios à la fréquence des émetteurs radio situés sur ceux-ci. De plus, la relativité générale est cruciale pour le *système de positionnement mondial* (en anglais *global positioning system* ou GPS). Cet outil moderne de navigation* est composé de 24 satellites équipés d'horloges, qui couvrent la surface du globe. Pourquoi ce système nécessite-t-il la relativité générale pour pouvoir fonctionner ? Puisque tous les satellites, de même que n'importe qui à la surface de la Terre, voyagent le long de cercles, nous avons $dr = 0$, et nous pouvons réécrire la métrique de Schwarzschild (136) ainsi

$$\left(\frac{d\tau}{dt}\right)^2 = 1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{r^2}{c^2} \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 = 1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{v^2}{c^2}. \quad (146)$$

Défi 202 e Pour la relation entre le temps du satellite et le temps terrestre, nous obtenons alors

$$\left(\frac{dt_{\text{sat}}}{dt_{\text{Terre}}}\right)^2 = \frac{1 - \frac{2GM}{r_{\text{sat}}c^2} - \frac{v_{\text{sat}}^2}{c^2}}{1 - \frac{2GM}{r_{\text{Terre}}c^2} - \frac{v_{\text{Terre}}^2}{c^2}}. \quad (147)$$

Défi 203 s Pouvez-vous déduire de combien de microsecondes une horloge de satellite avance chaque jour, étant donné que les satellites GPS font le tour de la Terre une fois toutes les douze heures ? Puisqu'un décalage de trois microsecondes seulement entraînerait une erreur sur la position d'un kilomètre au bout d'une seule journée, les horloges dans les satellites doivent être réajustées de la quantité calculée pour avancer plus lentement. Les ajustements nécessaires sont contrôlés, et jusqu'ici chaque jour qui s'est écoulé depuis que le système est entré en fonctionnement a confirmé la relativité générale, aux erreurs expérimentales près.

Réf. 119

* *

La relativité générale est à la base du sport dénommé *géocaching*, sorte de chasse au trésor internationale utilisant des récepteurs GPS. Consultez les sites Web www.terracaching.com et www.geocaching.com pour avoir plus d'informations.

* *

Réf. 120 La constante de la gravitation G ne semble pas varier au cours du temps. Les dernières

deux premiers termes impairs sont omis à cause de la réversibilité (approximative) du mouvement en relativité générale : l'émission d'ondes gravitationnelles, qui est irréversible, compte pour le minuscule terme f_5 . Remarquez qu'il contient la petite masse m au lieu de la grosse masse M . Tous les facteurs f_n jusqu'à f_7 ont maintenant été calculés. Cependant, dans le Système solaire, seul le terme f_2 a déjà été détecté. Cette situation pourrait changer avec les futures expériences utilisant des satellites de haute précision. Des effets d'ordres supérieurs, jusqu'à f_5 , ont été mesurés dans les pulsars binaires, comme discuté ci-après.

Page 160

Dans un formalisme post-newtonien *paramétrisé*, tous les facteurs f_n , y compris ceux qui sont impairs, sont ajustés par rapport aux données recueillies, jusqu'ici tous ces ajustements concordent avec les valeurs prédites par la relativité générale.

* Pour plus d'informations, consultez le site Web www.gpsworld.com.

Défi 204 d expériences restreignent son taux de variation à moins d'une partie pour 10^{12} par an. Pouvez-vous imaginer comment cela peut être vérifié ?

* *

Défi 205 s La sensation que nous éprouvons de vivre dans trois dimensions d'espace seulement pourrait-elle être due à une limitation de nos facultés sensorielles ? Comment ?

* *

Défi 206 pe Pouvez-vous estimer l'effet de la force de marée sur la couleur de la lumière émise par un atome ?

* *

Réf. 121 Le plus fort champ gravitationnel possible est celui d'un petit trou noir. Le champ gravitationnel le plus intense jamais observé est malgré tout plus faible. En 1998, Zhang et Lamb utilisèrent les données issues du rayonnement X d'une étoile double pour déterminer que l'espace-temps à proximité de l'étoile à neutrons d'une taille de 10 km est courbé de 30 % au plus de la valeur maximale possible. Quelle est l'accélération gravitationnelle correspondante, en supposant que l'étoile à neutrons possède la même masse que le Soleil ?

Défi 207 pe

* *

Réf. 122 La déviation de la lumière modifie la taille angulaire δ d'une masse M de rayon r lorsqu'elle est observée à une distance d . Cet effet conduit à la belle expression

Défi 208 e

$$\delta = \arcsin\left(\frac{r\sqrt{1 - R_S/d}}{d\sqrt{1 - R_S/r}}\right) \quad \text{où} \quad R_S = \frac{2GM}{c^2}. \quad (148)$$

Défi 209 pe Quel pourcentage de la surface du Soleil un observateur situé à l'infini peut-il voir ? Nous examinerons ce problème plus en détail bientôt.

Page 252

QU'EST-CE QUE LE POIDS ?

Il n'existe aucune manière pour un *unique* observateur (ponctuel) de distinguer les effets de la gravité de ceux de l'accélération. Cette propriété de la nature nous permet de formuler une étrange assertion : les choses *tombent* parce que la surface de la Terre accélère dans leur direction. Par conséquent, le *poids* d'un objet résulte de l'accélération vers le haut de la surface de la Terre, qui pousse ainsi l'objet. C'est le principe d'équivalence appliqué à la vie quotidienne. Pour la même raison, les objets en chute libre n'ont pas de poids.

Réf. 123 Vérifions les ordres de grandeur. Bien évidemment, une surface terrestre en accélération engendre un poids pour chaque corps reposant sur celle-ci. Ce poids est proportionnel à la masse inertielle. En d'autres termes, la masse inertielle d'un corps est identique à la masse gravitationnelle. C'est en réalité ce que les expériences soulignent, et ce jusqu'à la plus haute précision accessible. Roland von Eötvös* réalisa beaucoup d'expériences

* Roland von Eötvös (n. Budapest 1848 , d. *id.* 1919), un physicien hongrois, réalisa de nombreuses expé-

Défi 210 pe

Réf. 123

Page 73

Page 141

très précises de ce type tout au long de sa vie, sans jamais découvrir un quelconque désaccord. Dans ces expériences, il utilisait le fait que la masse inertielle détermine les effets centrifuges alors que la masse gravitationnelle détermine la chute libre. (Pouvez-vous imaginer comment il testa la concordance ?) Des expériences récentes ont montré que les deux masses sont égales à 10^{-12} près.

Toutefois, l'égalité des masses n'est pas une surprise. Si nous revenons sur la définition du rapport des masses comme étant le rapport négatif inverse des accélérations, indépendamment de l'origine des accélérations, nous nous rappelons alors que les mesures des masses ne peuvent pas être utilisées pour distinguer la masse inertielle de la masse gravitationnelle. Comme nous l'avons vu, les deux masses sont égales par définition en physique galiléenne, et ainsi toute cette discussion est véritablement stérile. Le poids est un effet intrinsèque de la masse.

L'équivalence entre l'accélération et la gravité nous permet d'imaginer la chose suivante. Supposez que vous entriez dans un ascenseur afin de descendre de quelques étages. Vous appuyez sur le bouton. L'ascenseur est poussé vers le haut par la surface terrestre en accélération bien que ce soit d'une valeur plus faible que l'immeuble. L'immeuble est en train de dépasser l'ascenseur, qui prend par conséquent de la distance. Qui plus est, à cause de cette poussée plus faible, au départ tout le monde à l'intérieur de l'ascenseur se sent un peu plus léger. Quand le contact avec l'immeuble est restitué, l'ascenseur est accéléré pour rattraper la surface terrestre en accélération. Par conséquent, nous avons tous l'impression d'être dans une voiture qui accélère fortement, poussés dans la direction opposée à l'accélération : pendant un court instant, nous nous sentons plus lourds, jusqu'à ce que l'ascenseur parvienne à sa destination.

POURQUOI LES POMMES TOMBENT-ELLES ?

« Vires acquirit eundo.

Virgile* »

Un véhicule en accélération rattrapera en peu de temps un objet projeté devant celui-ci. Pour la même raison, la surface de la Terre rattrape assez vite une pierre jetée en l'air, parce qu'elle est continuellement accélérée vers le haut. Si vous aimez cette façon de voir les choses, imaginez une pomme qui tombe d'un arbre. À l'instant où elle se détache, elle cesse d'être accélérée vers le haut par la branche. La pomme peut dorénavant jouir de la sérénité du véritable repos. À cause de notre perception humaine limitée, nous appelons cet état de repos la chute libre. Malheureusement, la surface de la Terre qui accélère s'approche impitoyablement et, en fonction du temps durant lequel la pomme est restée au repos, la Terre la frappe avec une vitesse plus ou moins importante, provoquant une déformation plus ou moins prononcée de sa forme.

Les pommes qui tombent nous instruisent également sur la manière de ne plus être préoccupé par la déclaration que la gravité est l'avancement inégal d'horloges avec la hauteur. En fait, cette phrase est *équivalente* à l'affirmation que la surface de la Terre est

riences de haute précision sur la gravité. Il découvrit, entre autres, l'effet qui porte son nom. L'université de Budapest a été rebaptisée en son honneur.

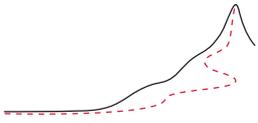
* « Elle acquiert des forces dans sa course. » (En référence à la Renommée. [N. D. T.]) Publius Vergilius Maro (n. Andes 70 av. J.-C., d. Brundisium 19 av. J.-C.), tiré de l'*Énéide* 4, 175.

accélérée vers le haut, comme l'a montré la discussion ci-dessus.

Défi 211 pe

Ce raisonnement peut-il être prolongé indéfiniment ? Nous pouvons continuer pendant un certain temps. Il est amusant de montrer comment la Terre peut garder un rayon constant alors que sa surface est partout accélérée vers le haut. Nous pouvons alors jouer avec l'équivalence entre l'accélération et la gravité. Cependant, cette équivalence est utile uniquement dans des situations qui font appel à un seul corps accéléré. Elle s'écroule dès que *deux* objets qui chutent sont étudiés. Toute étude de plusieurs corps conduit inévitablement à la conclusion que la gravité n'est pas l'accélération, *la gravité est l'espace-temps courbe*.

De nombreux aspects de la gravité et de la courbure peuvent être appréhendés avec très peu de mathématiques seulement, voire pas du tout. La section suivante mettra en relief certaines des différences qui existent entre la gravitation universelle et la relativité générale, montrant que seule la dernière description s'accorde avec l'expérience. Après cela, quelques concepts concernant la mesure de la courbure seront introduits et appliqués au mouvement des objets et à l'espace-temps. Si le raisonnement devient trop compliqué pour une première lecture, sautez plus loin. De toute façon, la section sur les étoiles, la cosmologie et les trous noirs fera à nouveau usage d'un minimum de mathématiques.



CHAPITRE 4

MOUVEMENT EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE – LUMIÈRE COURBÉE ET FLUCTUATION DU VIDE

« J'ai le sentiment qu'Einstein comprend très bien la théorie de la relativité. »
Chaim Weizmann, premier président d'Israël

Avant que nous passions en revue les détails de la relativité générale, nous allons explorer comment le mouvement des objets et de la lumière *diverge* de celui prédit par la gravitation universelle, et comment ces différences peuvent être quantifiées.

CHAMPS FAIBLES

La gravitation est puissante près des horizons. Cela survient lorsque la masse M et l'échelle de distance R vérifient

$$\frac{2GM}{Rc^2} \approx 1. \quad (149)$$

Par conséquent, la gravitation est forte principalement dans trois circonstances : près des trous noirs, près de l'horizon de l'Univers, et lorsque des particules possèdent des énergies extrêmement élevées. Les deux premiers cas sont étudiés plus loin, tandis que le troisième sera examiné dans la dernière partie de notre escalade de la montagne. En revanche, dans la plupart des régions de l'Univers, il n'y a *pas* d'horizons proches et, dans ces cas-là, la gravité agit *faiblement*. Malgré la violence des avalanches ou des impacts d'astéroïdes, dans la vie courante la gravité est considérablement plus faible que la force maximale. Sur la Terre, le rapport mentionné ci-dessus ne vaut que 10^{-9} environ. Dans ce cas, et tous les autres de la vie quotidienne, la gravitation peut toujours être approchée par un champ, en dépit de ce que nous avons dit plus haut. Ces situations en champ faible sont intéressantes parce qu'elles sont simples à comprendre, elles nécessitent surtout pour leur explication de prendre en compte l'avancement inégal d'horloges situées à des altitudes différentes. Les situations en champ faible nous permettent de faire allusion, en passant, à la courbure de l'espace-temps, et de continuer à imaginer la gravité comme une source d'accélération. Cependant, la variation du temps avec la hauteur induit déjà de nombreux effets intéressants et inédits. La seule chose dont nous avons besoin est une démarche relativiste cohérente.

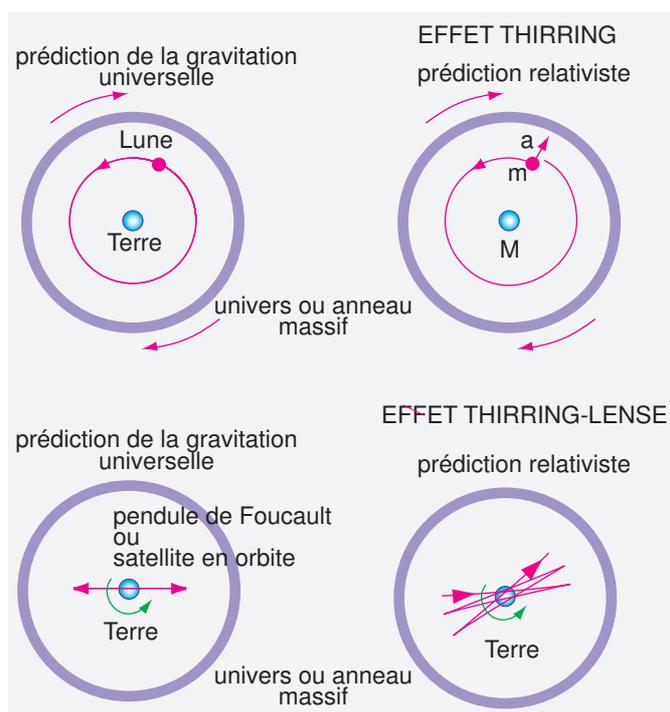


FIGURE 56 Les effets Thirring et Thirring-Lense.

LES EFFETS THIRRING

En 1918, le physicien autrichien Hans Thirring publia deux prédictions simples et élégantes de mouvements, dont l'une avec son collaborateur Josef Lense. Aucun de ces deux mouvements ne se produit dans le cadre de la gravitation universelle, mais ils apparaissent tous les deux dans la relativité générale. La **Figure 56** montre ces prédictions.

Réf. 124

Dans le premier exemple, aujourd'hui appelé l'*effet Thirring*, on prédit que des accélérations centrifuges ainsi que des accélérations de Coriolis se produisent pour des masses situées à l'intérieur d'une coquille sphérique massive en rotation. Thirring montra que, si une masse sphérique enveloppante tourne, des masses situées dedans sont attirées vers la coquille. L'effet est très petit ; toutefois, cette prédiction est en parfaite contradiction avec celle de la gravitation universelle, dans laquelle une coquille sphérique massive – en rotation ou non – n'agit nullement sur les masses situées en son sein. Pouvez-vous expliquer cet effet en utilisant la figure et l'analogie du matelas ?

Défi 212 pe

Le deuxième effet, l'*effet Thirring-Lense*^{*}, est plus connu. La relativité générale prévoit qu'un pendule de Foucault en oscillation, ou un satellite faisant le tour de la Terre sur une orbite polaire, ne demeure pas exactement dans un plan figé par rapport au reste de l'Univers, mais que la rotation de la Terre entraîne un tout petit peu ce plan dans une direction donnée. Cet effet, également appelé *entraînement de référentiel*, survient parce que la Terre dans l'espace vide se comporte comme une balle en rotation dans un matelas de mousse. Quand une balle ou une coquille tourne dans la mousse, elle entraîne

* Bien que l'ordre des auteurs soit Lense puis Thirring, on a coutume (mais cela ne fait pas l'unanimité) d'insister sur l'idée de Hans Thirring en le plaçant en premier.



FIGURE 57 Les satellites LAGEOS : des sphères métalliques d'un diamètre de 60 cm, d'une masse de 407 kg, recouvertes de 426 rétro-rélecteurs. (NASA)

partiellement la mousse située près d'elle. De même, la Terre entraîne le vide avec elle, et fait donc tourner le plan d'oscillation du pendule. Pour la même raison, la rotation de la Terre fait tourner le plan de l'orbite d'un satellite.

L'effet Thirring–Lense, ou effet d'entraînement de référentiel, est extrêmement ténu. Il fut mesuré pour la première fois en 1998 par un groupe italien dirigé par Ignazio Ciufolini, et une nouvelle fois par la même équipe dans les années qui précédèrent 2004. Ils surveillèrent le mouvement de deux satellites artificiels spécifiquement conçus – dont l'un est indiqué dans la [Figure 57](#) – constitués uniquement d'un corps en acier muni de quelques réflecteurs. Le groupe mesura le mouvement de chaque satellite autour de la Terre avec une très haute résolution, en faisant usage de pulsations laser réfléchies. Cette méthode permit à cette expérience à faible coût de devancer de plusieurs années les efforts d'autres groupes beaucoup plus importants mais aussi beaucoup moins réactifs*.

Réf. 125

Les résultats confirmèrent les prédictions de la relativité générale avec une approximation d'environ 25 %.

Les effets d'entraînement de référentiel ont également été mesurés dans des systèmes d'étoiles binaires. Cela est possible lorsque l'une des étoiles est un pulsar, parce que de tels astres envoient des signaux radio réguliers, par exemple chaque milliseconde, avec une précision de métronome. En mesurant l'instant précis où le signal arrive sur Terre, nous pouvons déduire de quelle manière ces étoiles se déplacent et confirmer que des effets aussi subtils que l'entraînement de référentiel se produisent réellement.

Réf. 126

GRAVITOMAGNÉTISME**

L'effet d'entraînement de référentiel et l'effet Thirring–Lense peuvent être vus comme des cas particuliers de gravitomagnétisme. (Nous ferons ressortir cette correspondance plus loin.) Cette approche de la gravitation, déjà étudiée au cours du dix-neuvième siècle par Holzmüller et par Tisserand, est à nouveau devenue populaire ces dernières années, particulièrement pour ses qualités pédagogiques. Comme nous l'avons mentionné, le fait de parler de *champ* gravitationnel représente toujours une approximation. Dans le cas d'une faible gravité, comme cela se passe dans la vie quotidienne, cette approximation est excellente. De nombreux effets relativistes peuvent être décrits en termes de champ gravitationnel, sans faire usage du concept de courbure de l'espace ou du tenseur métrique. Au

Réf. 127

* L'une d'entre elles est la mission du satellite Gravity Probe B, qui devrait accroître de manière significative la précision des mesures. Le satellite fut mis en orbite polaire en 2004, après 30 années d'études.

** Cette section peut être sautée en première lecture.

lieu de décrire complètement le matelas de l'espace-temps, le modèle du champ gravitationnel ne traite que des écarts du matelas par rapport à l'espace-temps plat, en stipulant que cet écart représente une entité distincte, appelée champ gravitationnel. Mais quelle est la manière relativistiquement correcte de décrire le champ gravitationnel ?

Page 40 Nous pouvons comparer cette situation à l'électromagnétisme. Dans une description relativiste de l'électrodynamique, le champ électromagnétique possède une composante électrique et une composante magnétique. Le champ électrique est responsable de la force de Coulomb en l'inverse du carré. De la même manière, dans une description relativiste de la gravitation (faible)*, le champ gravitationnel possède une composante gravitoélectrique et une composante gravitomagnétique. Le champ gravitoélectrique est responsable de l'accélération en l'inverse du carré de la gravitation ; ce que nous appelons le champ gravitationnel dans la vie quotidienne est la partie gravitoélectrique du champ gravitationnel relativiste complet.

Dans la nature, toutes les composantes du tenseur énergie-impulsion produisent des effets gravitationnels. Autrement dit, ce ne sont pas seulement la masse et l'énergie qui engendrent un champ, mais également les *déplacements* (ou *courants*) de masse ou d'énergie. Ce dernier cas est baptisé gravitomagnétisme (ou entraînement de référentiel). Cette dénomination est due à l'analogie qui existe avec l'électrodynamique, dans laquelle ce n'est pas uniquement la densité de charge qui produit un champ (le champ électrique), mais également le déplacement des charges** (le champ magnétique).

Réf. 128 Dans le cas de l'électromagnétisme, la distinction entre le champ magnétique et le champ électrique dépend de l'observateur, chacun des deux pouvant (en partie) être transformé en l'autre. La gravitation est exactement similaire. L'électromagnétisme fournit une excellente indication sur la manière dont les deux types de champs gravitationnels se comportent, cette intuition peut être directement transposée à la gravitation. En électrodynamique, le mouvement $\mathbf{x}(t)$ d'une particule chargée est décrit par l'équation de Lorentz

$$m\ddot{\mathbf{x}} = q\mathbf{E} - q\dot{\mathbf{x}} \wedge \mathbf{B} . \quad (150)$$

En d'autres termes, les champs électriques \mathbf{E} agissent sur la variation de la *vitesse*, tandis que les champs magnétiques \mathbf{B} contribuent à une variation, en fonction de la grandeur de la vitesse, de la *direction* de cette vitesse, sans faire varier sa grandeur elle-même. Ces deux modifications dépendent de la valeur de la charge q . Dans le cas de la gravitation, cette expression devient

$$m\ddot{\mathbf{x}} = m\mathbf{G} - m\dot{\mathbf{x}} \wedge \mathbf{H} . \quad (151)$$

Le rôle de la charge est campé par la masse. Dans cette expression, nous connaissons déjà le champ \mathbf{G} , donné par

$$\mathbf{G} = \nabla\varphi = \nabla \frac{GM}{r} = -\frac{GM\mathbf{x}}{r^3} . \quad (152)$$

Comme d'habitude, la quantité φ représente le potentiel (scalaire). Le champ \mathbf{G} est le champ gravitationnel usuel de la gravitation universelle, produit par chaque masse, et

* Cette approximation requiert que les vitesses soient faibles, les champs faibles, et les distributions de masse-énergie stationnaires et localisées.

** Ce qu'on appelle plus couramment le *courant électrique*. [N.D.T.]

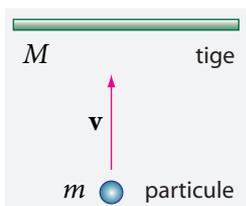


FIGURE 58 La réalité du gravitomagnétisme.

dans ce contexte il est appelé le *champ gravitoélectrique*. Sa dimension est celle d'une accélération. Les masses sont les sources du champ gravitoélectrique. Celui-ci vérifie $\Delta \mathbf{G} = -4\pi G\rho$, où ρ représente la masse volumique. Un champ \mathbf{G} statique n'a aucun mouvement de rotation, il vérifie $\Delta \wedge \mathbf{G} = 0$.

Réf. 129

Page 40

Il n'est pas difficile de montrer que si des champs gravitoélectriques existent, alors des champs gravitomagnétiques doivent également être rencontrés. Ces derniers apparaissent à chaque fois que nous changeons de point de vue, d'un observateur au repos à un autre en mouvement. (Nous utiliserons le même argument en électrodynamique.) Une particule qui chute perpendiculairement en direction d'une tige de longueur infinie illustre cette idée, comme indiqué sur la Figure 58. Un observateur au repos par rapport à la tige peut décrire toute la situation à l'aide uniquement des forces gravitoélectriques. Un deuxième observateur, se déplaçant le long de la tige à vitesse constante, observe que la quantité de mouvement de la particule le long de la tige augmente aussi. Il ne mesurera donc pas seulement un champ gravitoélectrique, il mesurera aussi un champ gravitomagnétique. En réalité, une masse se déplaçant à une vitesse \mathbf{v} engendre une (tri-)accélération gravitomagnétique, sur une masse de référence m , donnée par

Défi 213 pe

$$m\mathbf{a} = -m\mathbf{v} \wedge \mathbf{H} \quad (153)$$

où, presque comme en électrodynamique, le *champ gravitomagnétique* statique \mathbf{H} vérifie

$$\mathbf{H} = \nabla \wedge \mathbf{A} = 16\pi N\rho\mathbf{v}, \quad (154)$$

ici, ρ est la masse volumique de la source du champ et N est une constante de proportionnalité. La quantité \mathbf{A} est appelée le *potentiel vecteur gravitomagnétique*. Dans la nature, il n'existe aucune source pour le champ gravitomagnétique, celui-ci obéit donc à la relation $\nabla \mathbf{H} = 0$. Le champ gravitomagnétique possède la dimension de l'inverse du temps, comme une vitesse angulaire.

Défi 214 pe

Lorsque la situation de la Figure 58 est quantifiée, nous trouvons que la constante de proportionnalité N est donnée par

$$N = \frac{G}{c^2} = 7,4 \cdot 10^{-28} \text{ m/kg}, \quad (155)$$

soit une valeur extrêmement faible. Nous découvrons alors que, comme dans le cas de l'électrodynamique, le champ gravitomagnétique est plus faible que le champ gravitoélectrique d'un facteur c^2 . Il est donc très délicat de l'observer. De plus, un deuxième aspect

Défi 215 s

rend l'observation du gravitomagnétisme encore plus ardue. Contrairement à l'électromagnétisme, dans le cas de la gravitation il n'existe aucune façon d'observer des champs gravitomagnétiques *purs* (pourquoi?). Ils sont toujours combinés avec les champs gravitoélectriques, plus communs. Pour ces raisons, les effets gravitomagnétiques ne furent mesurés pour la première fois que dans les années 1990. Nous remarquons que la gravitation universelle constitue l'approximation de la relativité générale lorsque tous les effets gravitomagnétiques sont ignorés.

En résumé, *si une masse se déplace, elle engendre également un champ gravitomagnétique*. Comment pouvons-nous imaginer le gravitomagnétisme? Jetons un œil sur ses effets. L'expérience de la Figure 58 a montré qu'une tige en mouvement a pour effet d'accélérer délicatement une masse de référence dans la même direction. Dans notre métaphore du vide comme étant un matelas, il apparaît que si une tige en mouvement entraîne le vide dans sa course, il en sera de même pour toute masse observée dans cette zone. Le gravitomagnétisme peut donc être perçu comme étant un effet de l'entraînement de l'espace vide. À cause d'une réticence répandue à imaginer le vide comme étant un matelas, l'expression *entraînement de référentiel* est utilisée à la place.

Dans cette description, *tous les effets d'entraînement de référentiel sont des effets gravitomagnétiques*. En particulier, un champ gravitomagnétique apparaît aussi lorsqu'une grosse masse *tourne*, comme dans l'effet Thirring-Lense de la Figure 56. Pour un moment cinétique \mathbf{J} , le champ gravitomagnétique \mathbf{H} est un champ dipolaire, qui est exprimé par

$$\mathbf{H} = \nabla \wedge \mathbf{h} = \nabla \wedge \left(-2 \frac{\mathbf{J} \wedge \mathbf{x}}{r^3} \right) \quad (156)$$

exactement comme dans le cas de l'électrodynamique. Le champ gravitomagnétique qui règne autour d'une masse en rotation possède trois implications majeures.

En premier lieu, comme en électromagnétisme, une particule observée en rotation avec un moment cinétique \mathbf{S} ressent un *couple* si elle se trouve près d'une grosse masse en rotation ayant un moment cinétique \mathbf{J} . Ce couple \mathbf{T} est donné par

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{S}}{dt} = \frac{1}{2} \mathbf{S} \wedge \mathbf{H} . \quad (157)$$

Ce couple provoque la précession des gyroscopes. Pour la Terre, cet effet est extrêmement petit : au pôle Nord, cette précession a un angle conique de 0,6 milliseconde d'arc et une période de rotation de l'ordre de 10^{-10} fois celle de la Terre.

Défi 216 pe

Puisque pour le couple nous avons $\mathbf{T} = \dot{\mathbf{S}} \wedge \mathbf{S}$, le champ dipolaire d'une grosse masse en rotation ayant un moment cinétique \mathbf{J} conduit à un deuxième effet. Une masse en orbite subira une précession de son plan orbital. Observée à partir d'une position située à l'infini, nous obtenons pour une orbite de demi-grand axe a et d'excentricité e ,

$$\dot{\mathbf{\Omega}} = -\frac{\mathbf{H}}{2} = -\frac{G}{c^2} \frac{\mathbf{J}}{|\mathbf{x}|^3} + \frac{G}{c^2} \frac{3(\mathbf{J}\mathbf{x})\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|^5} = \frac{G}{c^2} \frac{2\mathbf{J}}{a^3(1-e^2)^{3/2}} , \quad (158)$$

ce qui constitue la prédiction de Lense et Thirring*. Cet effet est une nouvelle fois extrê-

Défi 217 pe

* Une sphère homogène en rotation possède un moment cinétique exprimé comme suit : $J = \frac{2}{5} M\omega R^2$.

mement ténu, engendrant une variation de seulement $8''$ par révolution pour un satellite situé à proximité de la surface de la Terre. Malgré cette valeur modique et un grand nombre d'effets plus importants qui la perturbent, l'équipe de Ciufolini est parvenue à confirmer ce résultat.

Réf. 125

En conséquence du troisième effet du gravitomagnétisme, une masse en rotation entraîne une précession du périastre. C'est un effet analogue à celui produit par la courbure spatiale sur des masses en orbite, même si le corps central ne tourne pas. La rotation atténue simplement la précession due à la courbure de l'espace-temps. Cet effet a été entièrement confirmé dans le cas du célèbre pulsar binaire PSR B1913+16, découvert en 1974, ainsi que pour le « véritable » pulsar double* PSR J0737-3039, découvert en 2003. Ce dernier exhibe une précession de son périastre de $16,9^\circ/a$, la plus grande valeur observée jusqu'à présent.

Réf. 130

Le fossé qui sépare les effets gravitoélectriques des effets gravitomagnétiques est donc utile pour réaliser une approximation pertinente de la description de la gravité. Cela nous permet également de répondre à des questions telles que : comment la gravité peut-elle maintenir la Terre en orbite autour du Soleil, si elle met 8 minutes pour voyager du Soleil jusqu'à nous ? Pour découvrir la réponse, il s'avère très utile de réfléchir en s'aidant de l'analogie de l'électromagnétisme. De plus, la séparation du champ gravitationnel en composantes gravitoélectrique et gravitomagnétique nous permet de broser une description simple des ondes gravitationnelles.

Défi 218 pe

ONDES GRAVITATIONNELLES

L'une des prédictions les plus fantastiques de la physique concerne l'existence des ondes gravitationnelles. Les ondes de gravité** démontrent que l'espace vide lui-même possède l'aptitude à se déplacer et à vibrer. L'idée de base est élémentaire. Puisque l'espace est flexible, tel ce vaste matelas dans lequel nous vivons, il devrait être capable d'osciller sous la forme d'ondes de propagation, exactement comme un matelas ou n'importe quel autre milieu élastique.

TABLEAU 3 L'éventail attendu des ondes gravitationnelles.

FRÉQUENCE	LONGUEUR D'ONDE	NOM	PHÉNOMÈNE PRÉVU
$< 10^{-4}$ Hz	$> 3 \text{ Tm}$	fréquences extrêmement basses	systèmes d'étoiles binaires lentes, trous noirs supermassifs
$10^{-4} \text{ Hz} - 10^{-1} \text{ Hz}$	$3 \text{ Tm} - 3 \text{ Gm}$	fréquences très basses	systèmes d'étoiles binaires rapides, trous noirs massifs, oscillations de naines blanches

* Le terme de « pulsar double » ne doit pas être confondu avec celui de « pulsar binaire », dont seulement l'une des deux composantes est identifiée comme étant un pulsar. [N.D.T.]

** En toute rigueur, l'expression « onde de gravité » possède une signification particulière : les ondes de gravité sont les ondes de surface de l'océan, où la gravité est la force de rétablissement. Cependant, en relativité générale, cette expression est employée de façon interchangeable avec « onde gravitationnelle ».

FRÉQUENCE	LONGUEUR D'ONDE	NOM	PHÉNOMÈNE PRÉVU
10^{-1} Hz– 10^2 Hz	3 Gm–3 Mm	basses fréquences	pulsars binaires, trous noirs moyens et légers
10^2 Hz– 10^5 Hz	3 Mm–3 km	fréquences moyennes	supernovae, oscillations de pulsars
10^5 Hz– 10^8 Hz	3 km–3 m	hautes fréquences	inconnu, peut-être des sources futures anthropiques
$> 10^8$ Hz	< 3 m		peut-être des sources cosmologiques inconnues

Réf. 131

Jørgen Kalckar et Ole Ulfbeck ont développé un argument simple pour justifier la nécessité des ondes gravitationnelles, fondé sur la réalité d'une vitesse maximale. Ils étudièrent deux masses identiques chutant l'une vers l'autre sous l'effet de l'attraction gravitationnelle, et imaginèrent la présence d'un ressort situé entre elles. Un tel ressort fera rebondir les masses l'une contre l'autre, puis elles chuteront à nouveau, et ainsi de suite. Le ressort central emmagasine l'énergie cinétique des masses en question. La valeur de l'énergie peut être mesurée en déterminant de quelle longueur le ressort est comprimé. Lorsque ce ressort se détend à nouveau et projette les masses en arrière dans l'espace, l'attraction gravitationnelle fera graduellement ralentir celles-ci, jusqu'à ce qu'elles tombent à nouveau l'une vers l'autre, entamant donc un nouveau cycle identique.

Néanmoins, l'énergie stockée dans le ressort doit diminuer à chaque cycle. Dès qu'une sphère se détache du ressort, elle est décélérée par la traction gravitationnelle que l'autre sphère exerce. Maintenant, la valeur de ce ralentissement dépend de la distance à l'autre masse, mais, puisqu'il existe une vitesse maximale de propagation, la décélération effective est fonction de la distance où l'autre masse *était* lorsque sa gravité s'est mise effectivement en route en direction de la seconde masse. Pour deux masses s'éloignant l'une de l'autre, la distance effective est donc légèrement inférieure à la véritable distance. En bref, tout au long de l'éloignement, la véritable décélération est *plus importante* que celle calculée en ne tenant pas compte du délai de propagation.

De façon similaire, lorsqu'une masse retombe vers l'autre, elle est accélérée par cette autre masse en fonction de la distance où elle était quand la gravité effective a commencé à se déplacer dans sa direction. Par conséquent, tout en s'approchant, l'accélération est *plus faible* que celle calculée sans ce décalage temporel.

Par conséquent, les masses reviennent avec une énergie *inférieure* à celle qu'elles avaient avant de s'en aller. À chaque rebond, le ressort est un peu moins comprimé. La différence entre ces deux énergies est perdue par chaque masse : elle est prélevée par l'espace-temps ; en d'autres termes, elle est diffusée en tant que rayonnement gravitationnel. La même chose se produit avec les matelas. Rappelez-vous qu'une masse déforme l'espace autour d'elle de même qu'une boule métallique posée sur un matelas déforme la surface autour d'elle. (Toutefois, contrairement aux véritables matelas, il n'y a aucun frottement entre la boule et le matelas.) Si deux boules métalliques se cognent à plusieurs reprises l'une contre l'autre puis s'éloignent alors, jusqu'à ce qu'elles reviennent à nouveau ensemble, elles émettront des ondes de surface sur le matelas. Au cours du temps,

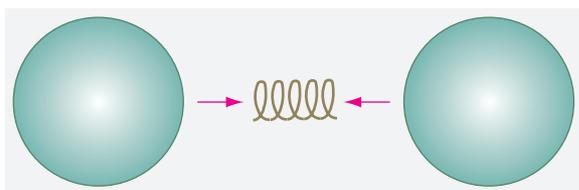


FIGURE 59 Une expérience de pensée démontrant l'existence nécessaire des ondes gravitationnelles.

cet effet réduira la distance à laquelle les deux boules s'écartent l'une de l'autre après chaque heurt. Comme nous le verrons bientôt, un effet similaire a déjà été mesuré, où les deux masses, au lieu d'être repoussées par un ressort, étaient en train de graviter l'une autour de l'autre.

Réf. 132

Une description mathématique simple des ondes de gravité découle de la séparation entre les effets gravitomagnétiques et gravitoélectriques. Il n'est pas besoin de faire beaucoup d'efforts pour étendre la gravitomagnétostatique et la gravitoélectrostatique à la *gravitodynamique*. De même que l'électrodynamique peut être déduite de l'attraction de Coulomb lorsque nous commutons vers d'autres observateurs inertiels, la gravitodynamique peut être déduite de la gravitation universelle. Nous obtenons les quatre équations

Défi 219 pe

$$\begin{aligned} \nabla \mathbf{G} &= -4\pi G\rho \quad , \quad \nabla \wedge \mathbf{G} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \mathbf{H} &= 0 \quad , \quad \nabla \wedge \mathbf{H} = -16\pi G\rho\mathbf{v} + \frac{N}{G} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial t} . \end{aligned} \quad (159)$$

Nous avons déjà rencontré deux de ces équations. Les deux autres sont des versions étendues de ce que nous avons vu, prenant en compte la dépendance temporelle. Mis à part un facteur de 16 au lieu de 4 dans la dernière équation, ces équations pour la gravitodynamique sont les mêmes que les équations de Maxwell pour l'électrodynamique*. Ces équations possèdent une propriété élémentaire : dans le vide, nous pouvons déduire de celles-ci une *équation d'onde* pour les champs gravitoélectrique et gravitomagnétique \mathbf{G} et \mathbf{H} . (Ce n'est pas difficile : essayez !) En d'autres termes, *la gravité peut se comporter comme une onde : la gravité peut rayonner*. Tout cela découle de l'expression de la gravitation universelle lorsqu'elle est appliquée à des observateurs en mouvement, en exigeant que ni les observateurs ni l'énergie ne puissent se déplacer plus vite que c . L'argument présenté ci-dessus concernant le ressort et le présent argument mathématique utilisent tous les deux les mêmes hypothèses et parviennent à la même conclusion.

Défi 220 pe

* Le facteur supplémentaire souligne le fait que le rapport entre le moment cinétique et l'énergie (le « spin ») des ondes gravitationnelles est différent de celui des ondes électromagnétiques. Les ondes de gravité ont un spin égal à 2, alors que les ondes électromagnétiques ont un spin de 1. Remarquez que, puisque la gravitation est universelle, il ne peut exister qu'une seule sorte de particule de rayonnement de spin 2 dans la nature. C'est en contradiction flagrante avec le cas du spin 1, dont il existe plusieurs exemplaires dans la nature.

Par ailleurs, le spin de rayonnement est une propriété *classique*. Le *spin d'une onde* est le rapport $E/L\omega$, où E est l'énergie, L le moment cinétique, et ω la fréquence angulaire. Pour des ondes électromagnétiques, ce rapport est égal à 1, pour des ondes gravitationnelles, il est de 2.

Réf. 133

Remarquez que, à cause de l'approximation à la base des équations de la gravitodynamique, ces équations ne sont *ni* des invariants de jauge *ni* covariantes en général.

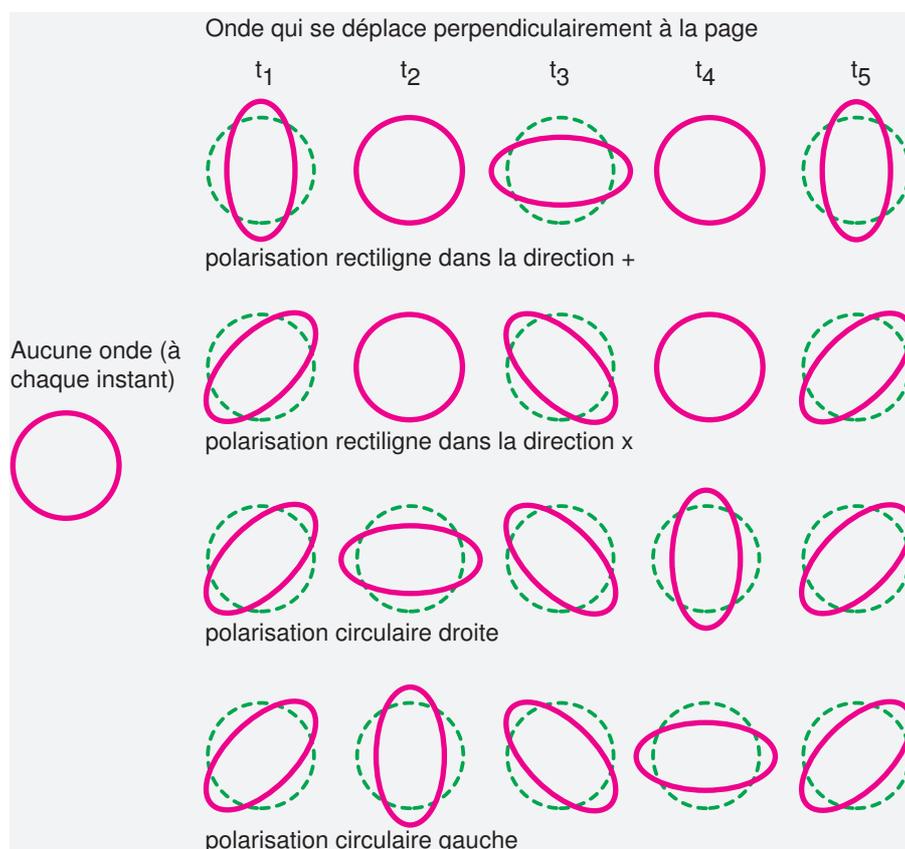


FIGURE 60 Effets exercés sur un corps circulaire ou sphérique, dus à une onde plane gravitationnelle se déplaçant dans une direction perpendiculaire à la page.

Défi 221 e Quelques manipulations nous indiquent que la vitesse de ces ondes est déterminée par

$$c = \sqrt{\frac{G}{N}} . \quad (160)$$

Page 78 Ce résultat correspond à l'équivalent électromagnétique

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} . \quad (161)$$

La même lettre a été utilisée pour désigner les deux vitesses, puisqu'elles sont identiques. Ces deux influences se propagent avec la vitesse commune à toute énergie dépourvue de masse au repos. (Nous remarquons que c 'est, à proprement parler, une prédiction : la vitesse des ondes gravitationnelles n'a pas encore été mesurée. Il s'est avéré qu'en 2003 certains ont prétendu, à tort, l'avoir fait.)

Réf. 134

Réf. 136

Comment pourrions-nous imaginer ces ondes? Nous avons affirmé plus haut avec insouciance qu'une onde gravitationnelle correspondait à une onde de surface sur un

matelas. Maintenant, nous devons faire mieux et imaginer que nous vivons à l'intérieur du matelas. Les ondes gravitationnelles représentent donc des déformations mouvantes et oscillantes du matelas, c'est-à-dire de l'espace. Comme les ondes du matelas, il apparaît que les ondes de gravité sont *transversales*. Elles peuvent donc être polarisées. (Les ondes de surface sur le matelas ne le peuvent pas, parce qu'en deux dimensions il n'y a pas de polarisation possible.) Les ondes gravitationnelles peuvent être polarisées de deux manières indépendantes. Les effets d'une onde gravitationnelle sont indiqués sur la [Figure 60](#), à la fois pour des polarisations rectiligne et circulaire*. Nous remarquons que les ondes sont invariantes par une rotation d'angle π et que les deux polarisations rectilignes diffèrent d'un angle $\pi/4$. Cela montre que les particules associées à ces ondes, les gravitons, ont un spin égal à 2. (En général, le champ de rayonnement classique pour une particule de spin S est invariant par une rotation d'angle $2\pi/S$. De plus, les deux composantes orthogonales de la polarisation rectiligne d'une particule de spin S forment un angle de $\pi/2S$. Pour le photon, par exemple, le spin est de 1. En réalité, son angle de rotation invariant est 2π et l'angle formé par les deux polarisations est $\pi/2$.)

Si nous schématisons le vide comme un matelas qui *emplit* l'espace, les ondes gravitationnelles sont des déformations fluctuantes de ce matelas. Plus précisément, la [Figure 60](#) montre qu'une onde de polarisation circulaire possède les mêmes propriétés qu'un tire-bouchon progressant à travers ce matelas. Nous découvrirons plus tard pourquoi l'analogie entre un tire-bouchon et une onde de gravité de polarisation circulaire fonctionne si bien. En réalité, dans la dernière partie, nous mettrons la main sur un modèle particulier de la substance du matelas de l'espace-temps qui incorpore automatiquement des ondes en tire-bouchon (à la place des ondes de spin 1 générées par des matelas ordinaires en latex).

Comment engendrons-nous des ondes gravitationnelles ? Évidemment, des masses

* Une onde de gravité plane (de faible amplitude) se propageant dans la direction des z est décrite par une métrique g donnée par

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 + h_{xx} & h_{xy} & 0 \\ 0 & h_{xy} & -1 + h_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (162)$$

où ses deux composantes, dont le rapport des amplitudes détermine la polarisation, sont exprimées par

$$h_{ab} = B_{ab} \sin(kz - \omega t + \varphi_{ab}) \quad (163)$$

comme dans toute onde harmonique plane. Les amplitudes B_{ab} , la fréquence ω et la phase φ sont déterminées par le système physique en particulier. La relation de dispersion générale, pour le nombre d'onde k , issue de l'équation d'onde est

$$\frac{\omega}{k} = c \quad (164)$$

et montre ainsi que l'onde se déplace à la vitesse de la lumière.

Dans une autre jauge, une onde plane peut être écrite comme

$$g = \begin{pmatrix} c^2(1 + 2\varphi) & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & -1 + 2\varphi & h_{xy} & 0 \\ A_2 & h_{xy} & -1 + h_{xx} & 0 \\ A_3 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (165)$$

où φ et \mathbf{A} représentent les potentiels tels que $\mathbf{G} = \nabla\varphi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}$ et $\mathbf{H} = \nabla \wedge \mathbf{A}$.

doivent être accélérées. Mais comment, précisément ? La conservation de l'énergie interdit à des distributions de masses monopolaires (des monopôles) de voir leurs potentiels énergétiques varier. Nous savons également par la gravitation universelle qu'une masse sphérique dont le rayon oscille ne devrait pas émettre des ondes gravitationnelles. De plus, la conservation de la quantité de mouvement empêche les distributions de masses dipolaires (les dipôles) d'être variables.

Défi 222 pe

Par conséquent, seuls les *quadrupôles variables* peuvent émettre des ondes*. Par exemple, deux masses en orbite l'une autour de l'autre émettront des ondes gravitationnelles. De même, n'importe quel objet en rotation qui ne possède pas une symétrie cylindrique autour de son axe de rotation en fera de même. Ainsi, le simple fait de faire tourner son bras conduit à l'émission d'ondes gravitationnelles. La plupart de ces affirmations s'appliquent également à des masses situées dans un matelas. Pouvez-vous indiquer quelles en sont les différences ?

Défi 223 pe

Einstein remarqua que l'amplitude h d'ondes situées à une distance r d'une source est donnée, en bonne approximation, par la dérivée seconde du moment quadrupolaire retardé Q :

Réf. 135

$$h_{ab} = \frac{2G}{c^4} \frac{1}{r} d_{tt} Q_{ab}^{\text{ret}} = \frac{2G}{c^4} \frac{1}{r} d_{tt} Q_{ab}(t - r/c). \quad (166)$$

Cette expression montre que l'amplitude des ondes de gravité décroît *uniquement* en $1/r$, contrairement aux attentes naïves. Cependant, cette caractéristique est la même que pour les ondes électromagnétiques. De plus, la valeur minuscule du premier facteur, $1,6 \cdot 10^{-44}$ Wm/s, indique que des systèmes vraiment gigantesques sont nécessaires pour produire des variations du moment quadrupolaire qui puissent entraîner une fluctuation décelable de la longueur des corps. Pour vous en convaincre, remplacez simplement les lettres par quelques nombres, en gardant à l'esprit que les meilleurs détecteurs actuels sont capables de mesurer des variations de longueur allant jusqu'à $h = \delta l/l = 10^{-19}$. La création d'ondes gravitationnelles détectables par les êtres humains est probablement impossible.

Défi 224 pe

Les ondes gravitationnelles, comme toutes les autres ondes, transportent de l'énergie**. Si nous appliquons la formule générale de la puissance émise P au cas de deux masses m_1 et m_2 en orbite circulaire l'une autour de l'autre à une distance l , nous obtenons

Réf. 96

$$P = -\frac{dE}{dt} = \frac{G}{45c^5} \ddot{Q}_{ab}^{\text{ret}} \ddot{Q}_{ab}^{\text{ret}} = \frac{32}{5} \frac{G}{c^5} \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)^2 l^4 \omega^6 \quad (167)$$

ce qui, en utilisant la relation de Kepler $4\pi^2 r^3 / T^2 = G(m_1 + m_2)$, devient

$$P = \frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{(m_1 m_2)^2 (m_1 + m_2)}{l^5}. \quad (168)$$

* Un *quadrupôle* est une disposition symétrique, sur les *quatre* côtés d'un carré, de quatre pôles alternatifs. Dans la gravitation, un monopôle est représenté par une masse ponctuelle ou deux masses sphériques, et, puisque les masses ne peuvent pas être négatives, un quadrupôle est formé par *deux* monopôles. Une sphère aplatie, telle la Terre, peut être approchée par l'addition d'un monopôle et d'un quadrupôle. La même chose reste valable pour une sphère allongée.

Page 61

Réf. 129

** Le gravitomagnétisme et la gravitoélectricité nous permettent de définir un vecteur de Poynting gravitationnel. Il est aussi aisé à définir et à utiliser que dans le cas de l'électrodynamique.

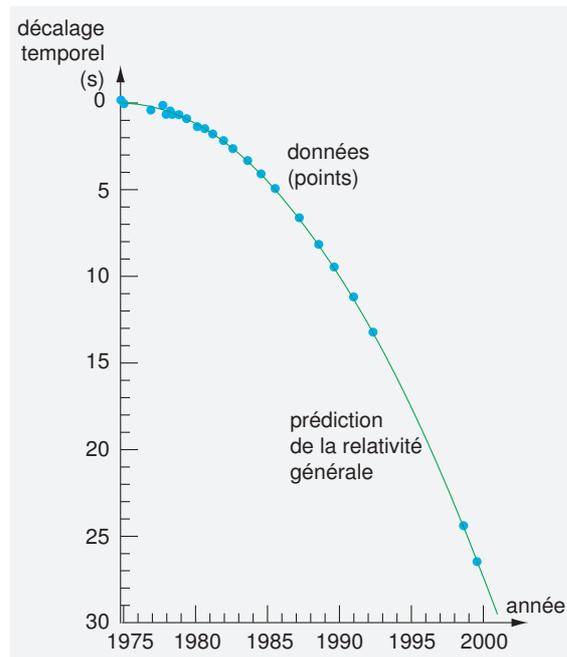


FIGURE 61 Comparaison entre le retard temporel mesuré du périastre du pulsar binaire PSR 1913+16 et la prédiction due à la perte d'énergie par rayonnement gravitationnel.

Réf. 96

Pour des orbites elliptiques, la proportion augmente avec l'ellipticité, comme l'explique Goenner. En insérant les valeurs propres au cas de la Terre et du Soleil, nous obtenons une puissance d'environ 200 W, et une valeur de 400 W pour le système Jupiter-Soleil. Ces grandeurs sont si petites que leurs effets ne peuvent pas du tout être décelés.

Défi 225 pe

Pour tous les systèmes qui gravitent, la fréquence des ondes est le double de la fréquence orbitale, comme vous devriez pouvoir le vérifier. Ces basses fréquences font qu'il est encore plus difficile de les détecter.

Par conséquent, la seule observation possible des effets des ondes gravitationnelles se trouve pour le moment dans les pulsars binaires. Les pulsars sont des astres petits mais prodigieusement denses : même avec une masse équivalente à celle du Soleil, leur diamètre est approximativement de 10 km seulement. En conséquence, ils peuvent graviter l'un près de l'autre à faible distance et à des vitesses considérables. En réalité, dans le système le plus connu constitué d'un pulsar binaire, PSR 1913+16, les deux astres gravitent l'un autour de l'autre en une période ahurissante de 7,8 h, bien que leur demi-grand axe soit d'environ 700 Mm, un peu moins du double de la distance Terre-Lune. Puisque leur vitesse orbitale grimpe à 400 km/s, ce système est significativement relativiste.

Réf. 137

Les pulsars sont dotés d'une propriété très utile : à cause de leur rotation, ils émettent des pulsations radio extraordinairement régulières (d'où leur nom), souvent de l'ordre de quelques millisecondes. Par conséquent, il est facile de retrouver leur orbite en mesurant la variation du temps d'arrivée du signal. Dans une célèbre expérience, une équipe d'astrophysiciens dirigée par Joseph Taylor* mesura la décroissance de la vitesse du pulsar binaire déjà cité. Après avoir écarté tous les autres effets et collecté les données du-

* Il partagea le prix Nobel de physique en 1993 pour tout le travail effectué durant sa carrière.

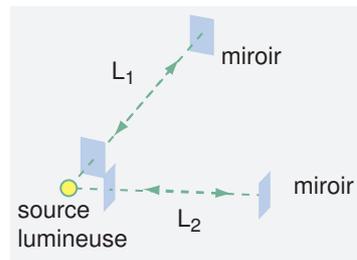


FIGURE 62 Détection d'ondes gravitationnelles.

- Réf. 138 **Figure 61.** Ce ralentissement est dû à l'émission d'ondes gravitationnelles. Le résultat s'ajuste parfaitement avec la prédiction de la relativité générale, *sans faire appel à un quelconque paramètre d'ajustement*. (Vous devriez pouvoir vérifier que cet effet doit dépendre de façon quadratique du temps.) C'est la seule fois jusqu'à présent où la relativité générale a été testée jusqu'à la précision de $(v/c)^5$. Pour se faire une idée de cette précision, considérez bien que cette expérience avait détecté une réduction du diamètre orbital de 3,1 mm par révolution, ou de 3,5 m par an ! Les mesures furent possibles uniquement parce que les deux astres qui constituent ce système sont des étoiles à neutrons de petite taille, de très grande vitesse et sous l'influence d'interactions purement gravitationnelles. La période de rotation du pulsar autour de son axe, environ 59 ms, est connue jusqu'à une précision de onze chiffres, la période orbitale de 7,8 h est connue jusqu'à dix chiffres et l'excentricité de l'orbite jusqu'à six chiffres.

Réf. 96

La détection *directe* des ondes gravitationnelles constitue l'un des objectifs de la relativité générale expérimentale. La compétition est en cours depuis les années 1990. L'idée fondamentale est simple, comme l'indique la **Figure 62** : prenez quatre corps, généralement quatre miroirs, pour lesquels la ligne reliant une paire est perpendiculaire à la ligne reliant l'autre paire. Mesurez alors les variations de distance de chaque paire. Si une onde gravitationnelle traverse le dispositif, une paire verra sa distance augmenter alors que l'autre diminuera, au *même* moment.

Puisque les ondes gravitationnelles détectables ne peuvent pas être produites par les hommes, la détection d'onde sollicite avant tout beaucoup de patience, pour attendre qu'une onde suffisamment puissante arrive. Deuxièmement, un système capable de détecter des variations de longueur de l'ordre de 10^{-22} ou mieux est requis – autrement dit, il faut beaucoup d'argent. Toute détection est assurée de faire la une des journaux télévisés*.

Il apparaît que, même pour un corps gravitant autour d'un trou noir, seul 6 % environ de sa masse inertielle peut être rayonnée dans l'espace sous forme d'ondes gravitationnelles. En outre, la majorité de l'énergie est diffusée pendant la chute finale dans le trou noir, de telle façon que seuls des processus plutôt violents, comme des collisions de trous noirs, sont de bons candidats de sources d'ondes de gravité décelables.

Les ondes gravitationnelles constituent un domaine d'étude captivant. Elles fournissent toujours de nombreux sujets à investiguer. Par exemple : pouvez-vous trouver

- Réf. 139 * Le thème des ondes gravitationnelles est rempli d'applications potentielles pratiques. Par exemple, peut-on tirer profit des ondes de gravité pour propulser une fusée ? Oui, répondent Bonnor et Piper. Vous devriez méditer cette éventualité vous-même.

Défi 227 pe

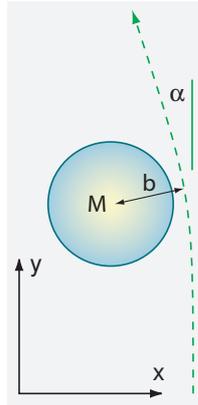


FIGURE 63 Calcul du fléchissement de la lumière par une masse.

Défi 228 r une méthode pour mesurer leur vitesse ? Une fausse annonce largement diffusée est survenue en 2003. En réalité, toute mesure correcte qui n'utilise pas clairement deux détecteurs distants, du type de ceux de la Figure 62, serait une fabulation scientifique.

Réf. 134

Défi 229 pe Pour le moment, une autre question sur les ondes gravitationnelles nous taraude : si tout changement est dû au mouvement de particules, comme l'affirmèrent les Grecs en leur temps, comment les ondes de gravité s'insèrent-elles dans cette vision ? Si les ondes gravitationnelles étaient constituées de particules, l'espace-temps devrait l'être aussi. Nous devons patienter jusqu'au début de la dernière partie de notre ascension pour en savoir plus.

FLÉCHISSEMENT DE LA LUMIÈRE ET DES ONDES RADIO

Comme nous le savons d'après ce qui a été dit, la gravité influence également le mouvement de la lumière. Un observateur éloigné mesure une valeur fluctuante pour la vitesse v de la lumière près d'une masse. (Mesurée à son propre emplacement, la vitesse de la lumière est bien entendu toujours égale à c .) Il s'avère qu'un observateur éloigné mesure une vitesse *plus faible*, de telle façon que pour lui la gravité a le même effet qu'un milieu optique épais. Il suffit d'un peu de réflexion pour s'apercevoir que cet effet *augmentera* donc le fléchissement de la lumière qui passe à proximité des masses, par rapport à celui déjà déduit en 1801 par Soldner dans le cadre de la gravitation universelle.

Réf. 140

Nous donnons dans ce qui suit une méthode simple pour calculer cet effet. Comme d'habitude, nous utilisons le système de coordonnées de l'espace-temps plat à l'infini. L'idée est de faire tous les calculs au premier ordre, puisque la valeur de la courbure est très petite. L'angle de déviation α , au premier ordre, est simplement

$$\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial v}{\partial x} dy, \quad (169)$$

Défi 230 pe où v représente la vitesse de la lumière mesurée par un observateur éloigné. (Pouvez-vous le confirmer ?) L'étape suivante consiste à se servir de la métrique de Schwarzschild

$$d\tau^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{\left(c^2 - \frac{2GM}{r}\right)} - \frac{r^2}{c^2} d\varphi^2 \quad (170)$$

Défi 231 pe et de la transformer en coordonnées (x, y) au premier ordre. Cela donne

$$d\tau^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \left(1 + \frac{2GM}{rc^2}\right) \frac{1}{c^2} (dx^2 + dy^2) \quad (171)$$

ce qui entraîne, une nouvelle fois, au premier ordre

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c. \quad (172)$$

Cela confirme ce que nous savions déjà, à savoir que des observateurs éloignés observent que la lumière *ralentit* lorsqu'elle frôle une masse. Donc nous pouvons également dire que l'indice de réfraction dépend de l'altitude. En d'autres termes, une vitesse de la lumière *locale* constante conduit à un ralentissement *global*.

Défi 232 pe En glissant ce dernier résultat dans (169) et en effectuant une substitution astucieuse, nous obtenons un angle de déviation α donné par

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{b} \quad (173)$$

où la distance b représente ce que nous appelons le *paramètre d'impact* du rayon lumineux qui s'approche. L'angle de déviation α résultant est le *double* du résultat que nous avons trouvé pour la gravitation universelle. Pour un rayon situé juste au-dessus de la surface du Soleil, le résultat donne la valeur célèbre de $1,75''$ qui fut confirmée par l'expédition expérimentale de 1919. (Comment mesurèrent-ils l'angle de déviation ?) Ce fut l'expérience qui rendit Einstein illustre, puisqu'elle confirma définitivement que la gravitation universelle est incorrecte. En réalité, Einstein avait eu de la chance. Deux expéditions antérieures organisées pour mesurer cette valeur avaient échoué. En 1912, il fut impossible de relever les données à cause de la pluie et, en 1914, en Crimée, les scientifiques furent arrêtés (par erreur) parce que la Première Guerre mondiale venait d'être déclenchée et qu'ils étaient soupçonnés d'être des espions. Mais, en 1911, Einstein avait déjà publié un calcul *incorrect*, indiquant seulement la valeur de Soldner, la moitié de la véritable grandeur. Ce n'est qu'en 1915, lorsqu'il acheva la relativité générale, qu'il trouva la valeur juste. Par conséquent, Einstein devint célèbre uniquement en raison de l'échec des deux expéditions qui eurent lieu avant qu'il publie le bon calcul.

Pour réaliser des expériences de haute précision au voisinage du Soleil, il est plus efficace de mesurer le fléchissement des ondes radio, puisqu'elles subissent moins de perturbations lorsqu'elles se propagent à travers la couronne solaire. Jusqu'ici, plus d'une douzaine d'expériences indépendantes l'ont fait, en utilisant des sources radio présentes dans le ciel, qui sont alignées avec la direction du Soleil. Elles ont confirmé la prédiction de la relativité générale à quelques pour cent près.

Jusqu'à présent, la courbure du rayonnement a aussi été observée près de Jupiter, de certaines étoiles, de plusieurs galaxies et près des amas de galaxies. Pour la Terre, l'angle

Page 139

Défi 233 pe

Réf. 141

Page 139

Réf. 118, Réf. 95

Réf. 96

Page 230

est au maximum de 3 nrad, trop insignifiant pour pouvoir être mesuré, bien que cela puisse être faisable dans un proche avenir. Il existe une chance de détecter cette valeur si, comme le suggère Andrew Gould, les données du satellite Hipparcos, qui a pris des images très précises du ciel nocturne, sont dorénavant analysées de manière adéquate.

Page 173

Défi 234 pe

Bien sûr, la courbure de la lumière confirme également que, dans un triangle, la somme des angles ne donne pas π (deux angles droits), comme on le prévoit *a posteriori* pour l'espace courbe. (Quel est le signe de la courbure ?)

DÉCALAGE TEMPOREL

Le calcul précédent de la courbure de la lumière à proximité des masses montre que, pour un observateur éloigné, la lumière est ralentie en s'approchant d'une masse. La vitesse de la lumière *locale* constante provoque un ralentissement de la vitesse de la lumière *globale*. Si la lumière n'était pas ralentie près d'une masse, elle irait plus vite que c pour un observateur situé près de cette masse*. En 1964, Irwin Shapiro eut l'idée de mesurer cet effet. Il proposa deux méthodes. La première consistait à envoyer des signaux radar vers Vénus, et à mesurer le temps mis pour que le signal réfléchi revienne sur Terre. Si les signaux passent près du Soleil, ils doivent être retardés. La seconde manière reposait sur l'utilisation d'un satellite artificiel communiquant avec la Terre.

Réf. 142

Réf. 143

La première mesure, publiée en 1968, confirma directement la prédiction de la relativité générale, aux erreurs expérimentales près. Tous les tests ultérieurs de même espèce, tel celui indiqué sur la [Figure 64](#), ont également corroboré ce pronostic, aux erreurs expérimentales près, qui sont de nos jours de l'ordre d'une partie pour mille. Le retard a également été mesuré dans les pulsars binaires, puisqu'il existe certains systèmes de ce type dans le ciel pour lesquels la ligne de visée se trouve presque exactement dans le plan orbital.

Réf. 144

Les calculs élémentaires présentés ici proposent un défi : est-il également possible de décrire *complètement* la relativité générale – donc la gravitation en champs *forts* – comme étant une variation de la vitesse de la lumière, par rapport à la position et au temps, induite par la masse et l'énergie ?

Défi 236 pe

CONSÉQUENCES SUR LES ORBITES

L'astronomie permet de réaliser des mesures précises des mouvements. Ainsi, Einstein tenta avant toutes choses d'appliquer ses résultats au mouvement des planètes. Il cherchait des décalages dans leur mouvement par rapport aux prédictions de la gravitation universelle. Einstein trouva une telle déviation : la précession du périhélie de Mercure. Cet effet est indiqué sur la [Figure 65](#). Einstein annonça plus tard que l'instant où il s'était aperçu que ses calculs sur la précession de Mercure coïncidaient avec les observations fut l'un des moments les plus euphoriques de sa vie.

Les calculs ne sont pas compliqués. Dans la gravitation universelle, les orbites sont calculées en posant $a_{\text{grav}} = a_{\text{centri}}$; en d'autres termes, en posant $GM/r^2 = \omega^2 r$ et en

Défi 235 e

* Un admirable exercice consiste à montrer que la courbure d'une particule lente donne la valeur de Soldner, vu qu'avec une vitesse croissante la valeur du fléchissement se rapproche du double de cette valeur. Dans toutes ces considérations, la rotation de la masse a été négligée. Comme l'effet de l'entraînement de référentiel le montre, la rotation modifie également la déviation de l'angle ; toutefois, dans tous les cas étudiés jusqu'à présent, cette influence reste inférieure au seuil de détection.

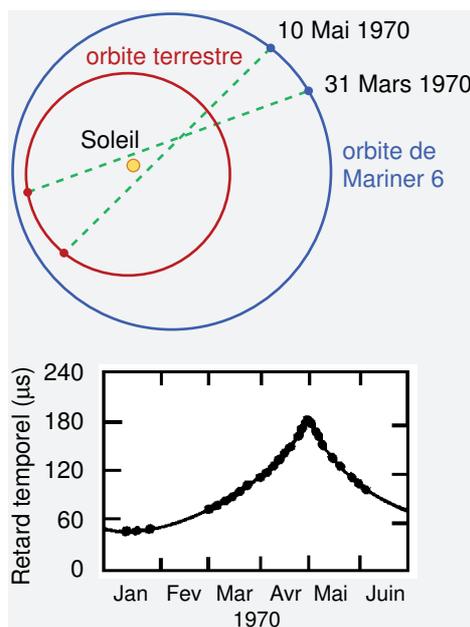


FIGURE 64 Décalage temporel dans des signaux radio – une des expériences d'Irwin Shapiro.

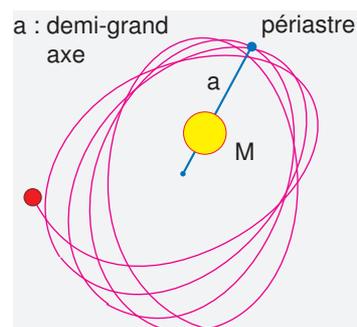


FIGURE 65 Tracé de l'orbite autour d'un corps central en relativité générale.

fixant l'énergie et le moment cinétique. La masse d'un satellite qui gravite n'apparaît donc pas explicitement.

Dans la relativité générale, nous pouvons faire disparaître la masse du satellite en orbite en effectuant un changement de variable pour l'énergie et le moment cinétique : $e = E/mc^2$ et $j = J/m$. Ensuite, la courbure de l'espace a besoin d'être intégrée. Nous utilisons la métrique de Schwarzschild (170) mentionnée plus haut pour déduire que l'état initial pour l'énergie e , associé à sa conservation, conduit à une relation entre le temps propre τ et le temps t à l'infini :

Réf. 95, Réf. 96
Page 132

Défi 237 e

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{e}{1 - 2GM/rc^2}, \tag{174}$$

tandis que l'état initial pour le moment cinétique j et sa conservation impliquent que

$$\frac{d\phi}{d\tau} = \frac{j}{r^2}. \tag{175}$$

Ces relations sont valables pour n'importe quelle particule, quelle que soit sa masse m . En insérant tout cela dans la métrique de Schwarzschild, nous trouvons que le mouvement d'une particule vérifie

$$\left(\frac{dr}{cd\tau}\right)^2 + V^2(j, r) = e^2 \tag{176}$$

où le potentiel effectif V est donné par

$$V^2(J, r) = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) \left(1 + \frac{j^2}{r^2 c^2}\right). \quad (177)$$

Défi 238 pe Cette expression diffère légèrement de celle de la gravitation universelle, comme vous devriez pouvoir le vérifier. Nous avons maintenant besoin de résoudre l'équation pour $r(\varphi)$. Pour des orbites *circulaires* nous obtenons *deux* possibilités

Défi 239 e

$$r_{\pm} = \frac{6GM/c^2}{1 \pm \sqrt{1 - 12\left(\frac{GM}{cj}\right)^2}} \quad (178)$$

où le signe moins donne une orbite stable et le signe plus une orbite instable. Si $cj/GM < 2\sqrt{3}$, aucune orbite stable n'existe, l'objet entrera en collision avec la surface ou, pour un trou noir, sera avalé. Il existe une orbite circulaire stable *uniquement* si le moment cinétique j est supérieur à $2\sqrt{3}GM/c$. Nous découvrons donc que, dans la relativité générale, par opposition à la gravitation universelle, il y a une *plus petite* orbite circulaire stable. Le rayon de cette orbite circulaire stable minimale est $6GM/c^2 = 3R_s$.

Quelle est la situation pour des orbites *elliptiques*? En posant $u = 1/r$ dans (176) et en dérivant, l'équation pour $u(\varphi)$ devient

$$u' + u = \frac{GM}{j^2} + \frac{3GM}{c^2} u^2. \quad (179)$$

Défi 240 e

Sans la correction non linéaire située à l'extrême droite et due à la relativité générale, les solutions sont représentées par les fameuses *sections coniques*

$$u_0(\varphi) = \frac{GM}{j^2} (1 + \varepsilon \cos \varphi), \quad (180)$$

Page 134

c'est-à-dire des ellipses, des paraboles ou des hyperboles. Le type de section conique dépend de la valeur du paramètre ε , que nous appelons l'*excentricité*. Nous connaissons les formes de ces courbes grâce à la gravitation universelle. Maintenant, la relativité générale introduit le terme non linéaire dans le membre de droite de l'équation (179). Ainsi, les solutions ne sont plus des sections coniques. Toutefois, puisque la correction est minuscule, une bonne approximation en est donnée par

Défi 241 e

$$u_1(\varphi) = \frac{GM}{j^2} \left[1 + \varepsilon \cos\left(\varphi - \frac{3GM^2}{j^2 c^2} \varphi\right)\right]. \quad (181)$$

Les hyperboles et paraboles de la gravitation universelle sont donc légèrement déformées. Au lieu d'avoir des orbites elliptiques, nous obtenons la célèbre trajectoire en forme de rosace indiquée sur la [Figure 65](#). Une telle trajectoire est par-dessus tout caractérisée par une avancée du périastre. Le *périastre*, ou *périhélie* dans le cas du Soleil, est le point le plus proche du corps central que le corps gravitant puisse atteindre. Le périastre tourne

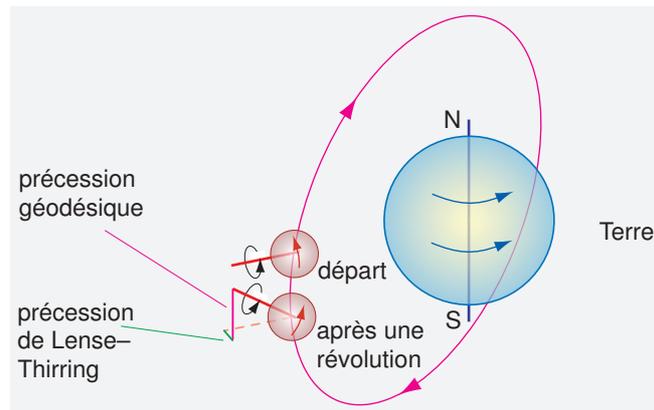


FIGURE 66 L'effet géodésique.

Défi 242 e autour du corps central d'un angle

$$\alpha \approx 6\pi \frac{GM}{a(1 - \varepsilon^2)c^2} \quad (182)$$

à chaque révolution, où a est le *demi-grand axe*. Pour Mercure, cette valeur est de $43''$ par siècle. Autour des années 1900, c'était le seul effet connu qui demeurait inexplicable par la gravitation universelle. Lorsque les calculs d'Einstein le conduisirent exactement à cette valeur, il fut submergé de joie durant plusieurs jours.

Pour être certain de l'égalité entre les calculs et l'expérience, tous les autres effets conduisant aux trajectoires en forme de rosace doivent être évincés. Pendant un certain temps, on pensa que le moment quadropolaire du Soleil pourrait être une autre origine de cet effet, mais des mesures ultérieures éliminèrent cette possibilité.

Entre-temps, l'avancée du périhélie a également été mesurée pour les orbites d'Icare, de Vénus et de Mars autour du Soleil, ainsi que pour plusieurs systèmes d'étoiles binaires.

Réf. 144 Dans les pulsars binaires, l'avancée du périastre peut représenter plusieurs degrés par an. Dans tous les cas, l'expression (182) décrit correctement le mouvement aux erreurs de mesure près.

Page 159 Nous remarquons que l'orbite en forme de rosace elle-même n'est pas réellement stable, à cause de l'émission d'ondes gravitationnelles. Mais, dans le Système solaire, la puissance perdue de cette manière est complètement négligeable, même au bout de quelques milliards d'années, comme nous l'avons déjà vu ; ainsi cette trajectoire reste une excellente description des observations.

L'EFFET GÉODÉSIQUE

Lorsqu'un corps orienté gravite autour d'une masse centrale m à une distance r , la direction de la pointe ne sera plus la même après une révolution complète. Cet effet n'existe que dans la relativité générale. L'angle α décrivant la variation de la direction est donné

par

$$\alpha = 2\pi \left(1 - \sqrt{1 - \frac{3Gm}{rc^2}} \right) \approx \frac{3\pi Gm}{rc^2} . \quad (183)$$

Défi 243 e La modification de l'angle est appelée *effet géodésique* – que l'on désigne également par effet « géodétique ». C'est une conséquence supplémentaire de la séparation entre les champs gravitoélectrique et gravitomagnétique, comme vous pouvez le montrer. Manifestement, elle n'existe pas dans la gravitation universelle.

Dans les cas où la direction dans laquelle le corps gravitant est indiquée par une rotation intrinsèque, comme un satellite qui tourne comme une toupie en même temps qu'il effectue sa révolution, l'effet géodésique engendre une *précession* de cet axe. Donc cet effet est comparable au couplage spin-orbite de la théorie atomique. (L'effet Thirring-Lense cité ci-dessus est l'analogue du couplage spin-spin.)

Réf. 145 L'effet géodésique, ou précession géodésique, fut prédit par Willem de Sitter en 1916. En particulier, il proposa de détecter le changement de direction dans laquelle pointe le système Terre-Lune au cours de sa chute autour du Soleil. Cet effet est ténu : pour l'axe de la Lune, l'angle de précession est d'environ 0,019 arcsec par an. Cette incidence fut

Réf. 146 détectée pour la première fois en 1987 par une équipe italienne, pour le système Terre-Lune, par le truchement d'une astucieuse combinaison d'interférométrie radio et de disposition lunaire, en tirant profit des réflecteurs, indiqués sur la [Figure 67](#), déposés par Lunokhod et Apollo sur la Lune. Des expériences sont également en cours pour le détecter dans des satellites artificiels.

Page ?? À première vue, la précession géodésique est similaire à la précession de Thomas que nous avons rencontrée dans la relativité restreinte. Dans les deux cas, un cheminement le long d'une ligne fermée provoque la perte de la direction originale. Cependant, une analyse méticuleuse montre que la précession de Thomas peut *s'ajouter* à la précession géodésique en appliquant une certaine interaction supplémentaire non gravitationnelle. Ainsi, cette analogie est bancale.

Ceci achève notre discussion des effets de la faible gravité. Nous allons maintenant nous tourner vers la forte gravité, où la courbure ne peut pas être ignorée et où le plaisir est encore plus vif.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES CHAMPS FAIBLES

Défi 244 pe Existe-t-il un champ gravitationnel statique oscillant ?

* *

Défi 245 pe Des faisceaux concentrés d'ondes gravitationnelles, semblables aux rayons de lumière, sont-ils possibles ?

* *

Défi 246 pe Deux faisceaux parallèles d'ondes gravitationnelles pourraient-ils s'attirer l'un vers l'autre ?

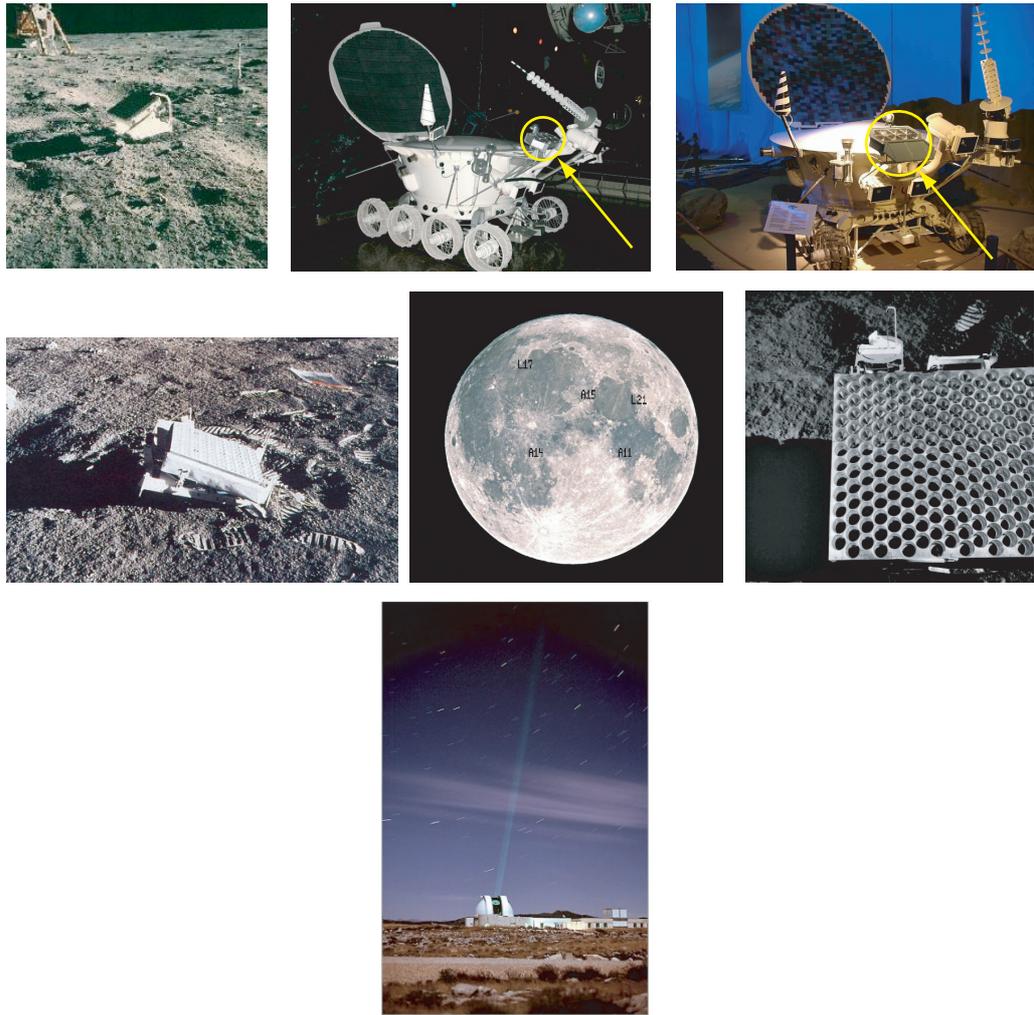


FIGURE 67 Les dispositifs rétro-réfléchissants lunaires déposés par Apollo 11 (en haut à gauche), Lunokhod (en haut au centre et à droite), Apollo 14 (au milieu à gauche) et Apollo 15 (au milieu à droite) avec leurs positions sur la Lune et un télescope réalisant une mesure de la distance. (© NASA, Observatoire de la Côte d'Azur)

COMMENT LA COURBURE EST-ELLE MESURÉE ?

Nous avons vu que dans la description précise de la gravité le mouvement dépend de la courbure de l'espace-temps. Afin de pouvoir quantifier cette idée, nous avons besoin en premier lieu de décrire la courbure elle-même aussi fidèlement que possible. Pour simplifier ce problème, nous allons commencer la discussion en deux dimensions, puis nous reviendrons aux trois et quatre dimensions.

Incontestablement, une feuille de papier plane ne possède aucune courbure. Si nous l'enroulons en cône ou en cylindre, nous obtenons ce que nous appelons une *courbure extrinsèque*. Ainsi, la feuille de papier semble toujours plane pour n'importe quel animal bidimensionnel vivant dessus – comme nous pouvons l'idéaliser par une fourmi mar-

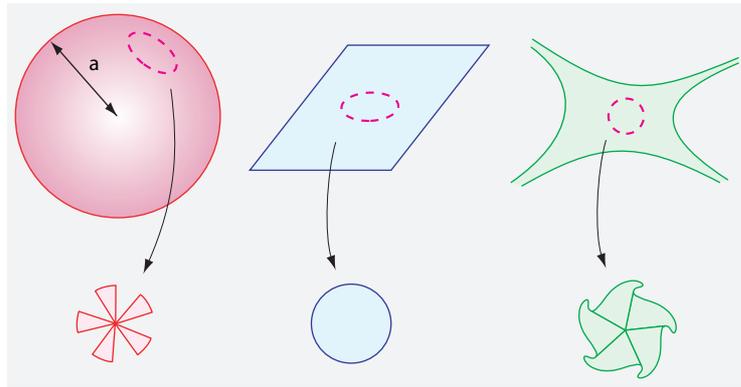


FIGURE 68 Courbure positive, nulle et négative en deux dimensions.

Défi 247 s

chant dessus. En d'autres termes, la *courbure intrinsèque* de la feuille de papier est nulle même si cette feuille tout entière est courbée extrinsèquement. (Un espace unidimensionnel peut-il avoir une courbure intrinsèque ? Un tore est-il intrinsèquement courbé ?)

La courbure intrinsèque représente donc le concept clé, quantifiant la courbure qui peut être observée même par une fourmi. (Toutes les surfaces intrinsèquement courbées sont également extrinsèquement courbées.) La surface de la Terre, la surface d'une île ou les pentes d'une montagne* sont intrinsèquement courbées. À chaque fois que nous discutons de la courbure en relativité générale, nous parlons toujours de courbure *intrinsèque*, puisque un observateur quelconque dans la nature est par définition dans la même situation qu'une fourmi sur une surface : leurs expériences, leurs actions et leurs projets ne concernent toujours que leur voisinage immédiat dans l'espace et le temps.

Mais comment une fourmi peut-elle déterminer si elle vit sur une surface intrinsèquement courbée** ? Une méthode est indiquée sur la Figure 68. La fourmi peut contrôler si la circonférence d'un cercle ou son aire donne naissance à une relation euclidienne pour mesurer le rayon. Elle peut même utiliser la différence qui existe entre la valeur mesurée et la valeur euclidienne comme une mesure de la courbure locale intrinsèque, si elle prend comme limite des cercles infiniment petits et si elle normalise les valeurs correctes. En d'autres termes, la fourmi peut s'imaginer découper un minuscule disque autour de l'emplacement où elle se trouve, le repasser pour l'aplatir et vérifier si le disque se déchire ou se froisse. On dit qu'une surface bidimensionnelle quelconque est intrinsèquement courbée à chaque fois qu'en la repassant on ne parvient pas à produire une carte plate. La « densité » des plis ou des déchirures est liée à la courbure.

Cela signifie que nous pouvons aussi mettre en évidence la courbure intrinsèque en examinant si deux lignes parallèles le restent lorsque leurs prolongements se rapprochent l'un de l'autre, ou lorsqu'ils s'éloignent l'un de l'autre. Dans le premier cas, telles les lignes sur un cylindre de papier, on dit que la surface possède une courbure intrinsèque *nulle* ; une surface où les parallèles se rapprochent, comme sur Terre, est dite de courbure *positive* ; et une surface où les parallèles s'éloignent, comme sur une selle, est dite de cour-

Défi 248 e

* À moins que la montagne ait la forme d'un cône parfait. Pouvez-vous le confirmer ?

** Remarquez que la solution à cette question nous indique également comment distinguer une véritable courbure des systèmes de coordonnées courbes attachés à un espace plat. Cette question est souvent posée par ceux qui côtoient la relativité générale pour la première fois.

bure *négative*. En bref, la courbure positive signifie que nous sommes plus limités dans nos possibilités de mouvements, et négative que nous le sommes moins. Une courbure *constante* implique même que nous sommes enfermés dans un espace fini. Vous devriez pouvoir vérifier cela à l'aide de la [Figure 68](#).

La troisième manière de mesurer la courbure consiste à utiliser des triangles. Sur des surfaces courbes, la somme des angles d'un triangle est soit plus grande, soit plus petite que π (deux angles droits).

Réf. 147

Regardons comment nous pouvons quantifier la courbure. Tout d'abord, faisons une mise au point terminologique : on dit qu'une sphère de rayon a est, par définition, dotée d'une courbure intrinsèque $K = 1/a^2$. Par conséquent, un plan possède une courbure nulle. Vous devriez vérifier que, pour un cercle tracé sur une sphère, le rayon r , la circonférence C et l'aire A mesurés sont reliés par

Défi 249 e

$$C = 2\pi r(1 - \frac{K}{6}r^2 + \dots) \quad \text{et} \quad A = \pi r^2(1 - \frac{K}{12}r^2 + \dots) \quad (184)$$

où les points de suspension désignent les termes d'ordres supérieurs. Cela nous permet de définir la courbure intrinsèque K , également appelée courbure *gaussienne*, pour un point généralisé situé sur une surface bidimensionnelle, de l'une des deux manières équivalentes qui suivent :

$$K = 6 \lim_{r \rightarrow 0} (1 - \frac{C}{2\pi r}) \frac{1}{r^2} \quad \text{ou} \quad K = 12 \lim_{r \rightarrow 0} (1 - \frac{A}{\pi r^2}) \frac{1}{r^2} . \quad (185)$$

Ces expressions permettent à une fourmi de mesurer la courbure intrinsèque en chaque point d'une surface régulière quelconque*. Désormais dans ce texte, la *courbure* sera toujours considérée sous sa signification de courbure *intrinsèque*. Remarquez que la courbure peut être différente d'un endroit à l'autre, et qu'elle peut être positive, comme pour un œuf, ou négative, comme pour la zone d'un tore la plus proche du trou. La selle représente un autre exemple de ce dernier cas, mais, contrairement au tore, sa courbure change dans toutes les directions. En fait, il est tout à fait impossible de plonger une surface bidimensionnelle de courbure négative *constante* à l'intérieur d'un espace tridimensionnel ; il faut pour cela au moins quatre dimensions, comme vous pourrez le découvrir si vous tentez d'imaginer cette situation.

Défi 251 e

Pour n'importe quelle surface, en *chaque* point, la direction de la courbure maximale et la direction de la courbure minimale sont *perpendiculaires* l'une par rapport à l'autre. Cette relation, indiquée dans la [Figure 69](#), fut découverte par Leonhard Euler au dix-huitième siècle. Vous devriez pouvoir la vérifier avec une tasse à café, avec une sculpture de Henry Moore ou avec n'importe quel autre objet courbé situé dans votre voisinage, par exemple une Volkswagen Coccinelle. La courbure gaussienne K définie dans (185)

Défi 252 e

Réf. 148

* Si le volume n -dimensionnel d'une sphère est noté $V_n = C_n r^n$ et sa « surface » $(n-1)$ -dimensionnelle $O_n = nC_n r^{n-1}$, nous pouvons généraliser l'expression de la courbure ainsi

$$K = 3(n+2) \lim_{r \rightarrow 0} (1 - \frac{V_n}{C_n r^n}) \frac{1}{r^2} \quad \text{ou} \quad K = 3n \lim_{r \rightarrow 0} (1 - \frac{O_n}{nC_n r^{n-1}}) \frac{1}{r^2} , \quad (186)$$

Défi 250 pe

comme l'a indiqué Vermeil. Une célèbre devinette consiste à déterminer le nombre C_n .

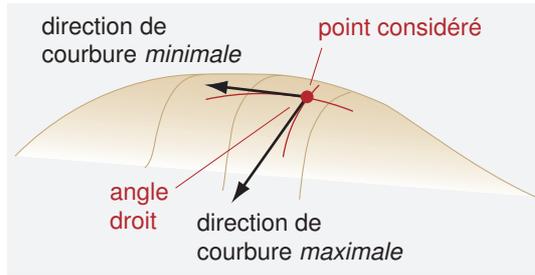


FIGURE 69 La courbure maximale et minimale d'une surface courbe.

est en réalité le produit des inverses des deux rayons de courbure correspondants. Donc, bien que la ligne de niveau de la courbure ne soit pas une propriété intrinsèque, ce produit particulier l'est. La courbure gaussienne est une mesure de la courbure intrinsèque. Les mesures de la courbure intrinsèque sont nécessaires si nous sommes obligés de rester à l'intérieur de la surface ou de l'espace que nous explorons. Les physiciens sont ainsi particulièrement attachés à la courbure gaussienne et ses analogues de dimensions plus élevées.

Pour des « surfaces » tridimensionnelles, le problème est un peu plus corsé. En premier lieu, nous avons beaucoup de mal à imaginer cette situation. Mais nous pouvons toujours admettre que la courbure d'un petit disque situé autour d'un point dépendra d'une direction donnée. Examinons les exemples les plus simples. Si la courbure en un point est la même dans toutes les directions, ce point est qualifié d'*isotrope*. Nous pouvons imaginer une petite sphère qui entoure celui-ci. Dans ce cas précis, en trois dimensions, la relation entre, d'une part, le rayon r mesuré et, d'autre part, l'aire A de la surface et le volume V mesurés de la sphère entraîne que

Défi 253 pe

$$A = 4\pi r^2 \left(1 - \frac{K}{3} r^2 + \dots\right) \quad \text{et} \quad V = \frac{4\pi}{3} r^3 \left(1 - \frac{K}{5} r^2 + \dots\right), \quad (187)$$

où K représente la courbure pour un point isotrope. Cela nous conduit à

$$K = 3 \lim_{r \rightarrow 0} \left(1 - \frac{A}{4\pi r^2}\right) \frac{1}{r^2} = 6 \lim_{r \rightarrow 0} \frac{r - \sqrt{A/4\pi}}{r^3} = 6 \lim_{r \rightarrow 0} \frac{r_{\text{excès}}}{r^3}, \quad (188)$$

en définissant l'*excès de rayon* par $r_{\text{excès}} = r - \sqrt{A/4\pi}$. Nous trouvons donc que pour un espace tridimensionnel la courbure moyenne est six fois l'excès de rayon d'une petite sphère divisé par le cube du rayon. Une courbure positive est équivalente à un excès de rayon positif, et le raisonnement est similaire pour les cas nul et négatif.

Bien évidemment, une valeur de courbure définie de cette manière n'est qu'une moyenne de toutes les directions possibles. La définition rigoureuse de la courbure concerne le disque. Pour des points qui ne sont pas isotropes, la valeur produite pour un disque sera *différente* de la valeur calculée en utilisant une sphère, puisqu'elle dépendra de l'*orientation* du disque. En réalité, il existe une relation entre toutes les courbures possibles de disques en un point donné : considérées toutes ensemble, elles doivent former un tenseur. (Pourquoi ?) Pour une description exhaustive de la courbure, nous de-

Défi 254 pe

vons donc spécifier, comme pour n'importe quel tenseur en trois dimensions, les valeurs principales de la courbure dans trois directions orthogonales*.

Quelles sont les valeurs de la courbure dans l'espace qui nous entoure ? Déjà en 1827, le mathématicien et physicien Carl-Friedrich Gauss** était reconnu pour avoir vérifié que les trois angles formés par trois pics montagneux près de son lieu de villégiature étaient supérieurs à π . De nos jours, nous savons que l'écart δ par rapport à l'angle π , sur la surface d'un corps de masse M et de rayon r , est donné par

$$\delta = \pi - (\alpha + \beta + \gamma) \approx A_{\text{triangle}} K = A_{\text{triangle}} \frac{GM}{r^3 c^2}. \quad (189)$$

Cette expression est caractéristique des géométries hyperboliques. Pour le cas de la courbure mathématique négative K , la première égalité fut déduite par Johann Lambert (1728–1777). Toutefois, ce fut Einstein qui découvrit que la courbure négative K est liée à la masse et à l'accélération gravitationnelle d'un corps. Pour le cas de la Terre et des distances typiques concernant les montagnes, l'angle δ est de l'ordre de 10^{-14} rad. Gauss n'avait aucune chance de déceler le moindre écart, et en réalité il n'en détecta aucun. Même aujourd'hui, des études faisant appel à des lasers et des appareils de haute précision n'ont détecté aucune déviation jusqu'à présent – sur Terre. Le facteur du membre de droite, qui mesure la courbure de l'espace-temps à la surface de la Terre, est naturellement trop petit. Mais Gauss ne savait pas, contrairement à nous maintenant, que la gravitation et la courbure étaient pieds et poings liés.

COURBURE ET ESPACE-TEMPS

« Notre tête est ronde pour permettre à la pensée de changer de direction. »
Francis Picabia***

* Ces trois valeurs pour les disques ne sont toutefois pas indépendantes puisque, ensemble, elles doivent produire la courbure volumique moyenne K citée ci-dessus. Au total, il y a ainsi *trois* scalaires indépendants décrivant la courbure en trois dimensions (en chaque point). Avec le tenseur métrique g_{ab} et le tenseur de Ricci R_{ab} qui sont introduits ci-dessous, une possibilité consiste à prendre les valeurs $R = -2K$, $R_{ab} R^{ab}$ et $\det R / \det g$ pour les trois nombres indépendants.

** Carl-Friedrich Gauß (n. Brunswick 1777, d. Göttingen 1855) fut un mathématicien allemand. Avec Leonhard Euler, il fut le mathématicien le plus prolifique de tous les temps. Tel un remarquable enfant prodige, lorsqu'il avait 19 ans, il construisit l'heptadécagone régulier à l'aide d'un compas et d'une règle (consultez www.mathworld.wolfram.com/Heptadecagon.html). Il était si fier de son résultat qu'il demanda à ce que l'on grave un dessin de cette figure sur sa tombe. Gauss présenta une kyrielle de résultats en théorie des nombres, en topologie, en statistiques, en algèbre, sur les nombres complexes et en géométrie différentielle, qui représentent tous des pans entiers des mathématiques modernes et qui portent son nom. Parmi ses nombreuses réalisations, il produisit une théorie de la courbure et développa la géométrie non euclidienne. Il travailla également sur l'électromagnétisme et l'astronomie.

Gauss avait un tempérament dur, travaillait toujours tout seul et n'enseigna jamais les mathématiques. Il publiait très peu, et sa devise était : « *pauca sed matura* » (« peu mais mûr »). En conséquence, lorsqu'un autre mathématicien publiait un nouveau résultat, il exhibait régulièrement une note dans laquelle il avait déjà inscrit exactement le même résultat quelques années auparavant. Ses notes sont dorénavant disponibles en ligne sur www.sub.uni-goettingen.de.

*** Francis Picabia (n. Paris 1879, d. *id.* 1953) fut un peintre dadaïste et surréaliste français.

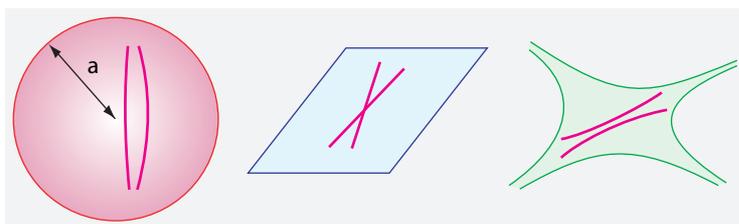


FIGURE 70 Courbure positive, nulle et négative (en deux dimensions) et comportement géodésique.

Dans la nature, avec *quatre* dimensions d'espace-temps, déterminer la courbure requiert une approche plus compliquée. En premier lieu, l'utilisation des coordonnées de l'espace-temps introduit automatiquement la vitesse de la lumière c comme vitesse limite, laquelle est une contrainte cruciale pour la relativité générale. En outre, le nombre de dimensions étant de quatre, nous nous attendons à avoir une valeur pour une courbure moyenne en un point, définie en comparant le 4-volume d'une 4-sphère dans l'espace-temps avec celui déduit du rayon mesuré. Nous nous attendons alors à avoir un ensemble de courbures « presque moyennes » définies par les 3-volumes des 3-sphères dans diverses orientations, en sus d'un ensemble de courbures de « niveau inférieur » définies par les 2-aires classiques des 2-disques usuels dans des directions encore plus nombreuses. Évidemment, nous avons besoin de mettre un peu d'ordre pour dévoiler cet ensemble, et nous avons besoin d'éliminer le comptage redondant que nous avons rencontré dans le cas de trois dimensions.

Par chance, la physique peut nous aider à rendre les mathématiques plus accessibles. Commençons en définissant ce que nous entendons par courbure de l'espace-temps. Nous définirons alors les courbures pour des disques d'orientations diverses. Pour réaliser cela, nous interprétons la définition de la courbure d'une autre manière, laquelle nous permet de la généraliser aussi pour le temps. La Figure 70 illustre l'idée que la courbure K décrit également comment les géodésiques *divergent*. Les géodésiques sont les chemins les plus directs sur une surface, c'est-à-dire les itinéraires qu'un minuscule véhicule ou un vélo suivrait s'il roulait sur la surface en maintenant son cap droit devant lui.

Si un espace est courbé, la distance s qui sépare deux géodésiques augmentera le long des géodésiques comme

$$\frac{d^2s}{dl^2} = -Ks + \text{ordres supérieurs} \quad (190)$$

où l mesure la longueur parcourue le long de la géodésique, et K est la courbure, autrement dit l'inverse du rayon de courbure au carré. Dans l'espace-temps, cette relation est étendue en substituant le temps propre (multiplié par la vitesse de la lumière) à la longueur propre. Donc la séparation et la courbure sont reliées par

$$\frac{d^2s}{d\tau^2} = -Kc^2s + \text{ordres supérieurs} . \quad (191)$$

Mais c'est la définition d'une accélération. Autrement dit, ce qui dans la situation pure-

ment spatiale est décrit par la *courbure* devient l'*accélération relative* de deux particules chutant librement depuis des points proches, dans le cas de l'espace-temps. En réalité, nous avons déjà rencontré ces accélérations : elles décrivent les forces de marée. En bref, la courbure de l'espace-temps et les forces de marée sont précisément les mêmes choses.

Page 136

Incontestablement, la grandeur des forces de marée, et donc la courbure, dépendra de l'orientation – plus précisément de l'orientation du plan de l'espace-temps généré par les vitesses des deux particules. Cette définition montre également que K représente un tenseur, donc par la suite nous devons lui adjoindre des indices. (Combien ?) Le plus amusant est que nous pouvons tout de même éviter d'ajouter des indices pendant un certain

Défi 256 pe

Réf. 149

temps en considérant une combinaison particulière de courbures spatiales. Si nous prenons trois plans plongés dans l'espace, tous perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et se coupant en un point donné, la *somme* des trois valeurs des courbures *sectionnelles* ne dépend *pas* de l'observateur. (Cela correspond à la trace du tenseur.) Pouvez-vous entériner ce point, en utilisant la définition de la courbure que nous venons de donner ?

Défi 257 pe

Défi 258 pe

La somme des trois courbures sectionnelles définies pour des plans réciproquement perpendiculaires, $K_{(12)}$, $K_{(23)}$ et $K_{(31)}$, est reliée à l'excès de rayon défini plus haut. Pouvez-vous trouver comment ?

Défi 259 e

Réf. 150

Si une surface possède une courbure (intrinsèque) *constante*, c'est-à-dire la même courbure en tous ses points, des objets géométriques peuvent y être déplacés sans être déformés. Pouvez-vous illustrer cela ?

En résumé, la courbure n'est pas un concept si difficile à appréhender. Elle décrit la *déformation* de l'espace-temps. Si nous imaginons l'espace(-temps) comme une énorme goutte de caoutchouc dans laquelle nous vivons, la courbure en un point décrit comment cette goutte est comprimée en ce point. Puisque nous vivons à l'*intérieur* du caoutchouc, nous avons besoin d'utiliser des méthodes « *in situ* » telles que les excès de rayons et les courbures sectionnelles pour décrire cette déformation. La relativité paraît souvent difficile à assimiler parce que les gens n'aiment pas imaginer le vide de cette manière, et encore moins l'expliquer de cette façon. (Pendant une centaine d'années, ce fut une profession de foi pour chaque physicien que d'affirmer que l'espace vide était vide.) En schématisant le vide comme une substance, nous pouvons améliorer de multiples façons notre manière de comprendre la relativité générale.

COURBURE ET MOUVEMENT EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, une moitié de la relativité générale concerne l'idée que n'importe quel objet se déplace le long des trajectoires de temps propres *maximaux*, c'est-à-dire le long des géodésiques. L'*autre* moitié est contenue dans une expression élémentaire : pour *chaque* observateur, la somme des trois courbures sectionnelles *spatiales propres* en un point est donnée par

$$K_{(12)} + K_{(23)} + K_{(31)} = \frac{8\pi G}{c^4} W^{(0)} \quad (192)$$

où $W^{(0)}$ est la densité *propre* d'énergie en ce point. Les indices inférieurs indiquent la courbure combinée définie par les trois directions orthogonales 1, 2 et 3. Ce paragraphe à lui seul résume toute la relativité générale.

Défi 260 e On trouve facilement une expression équivalente en utilisant l'excès de rayon défini ci-dessus, en introduisant la masse $M = VW^{(0)}/c^2$. Pour l'aire A enveloppant le volume V contenant cette masse, nous obtenons

$$r_{\text{excès}} = r - \sqrt{A/4\pi} = \frac{G}{3c^2}M. \quad (193)$$

En bref, la relativité générale proclame que, pour chaque observateur, *l'excès de rayon d'une minuscule sphère est donné par la masse contenue à l'intérieur de cette sphère**.

Remarquez que l'expression précédente implique que la courbure spatiale moyenne en un point situé dans l'espace vide s'annule. Comme nous le verrons bientôt, cela signifie que près d'une masse sphérique la valeur négative de la courbure vers cette masse est égale au double de la courbure autour de cette masse, et la somme totale est donc bien nulle.

La courbure est également différente d'un point à l'autre. En particulier, l'expression précédente entraîne que, si l'énergie se déplace, la courbure se déplacera avec elle. En bref, la courbure de l'espace et en même temps, comme nous allons le voir, la courbure de l'espace-temps varient en fonction de l'espace et du temps.

Défi 261 pe Nous remarquons au passage que la courbure possède un effet ennuyeux : la vitesse relative d'observateurs éloignés n'est pas définie. Pouvez-vous appuyer cet argument ? Dans l'espace courbe, la vitesse relative est définie uniquement pour des objets proches – en réalité uniquement pour des objets à une distance nulle. Ce n'est que dans l'espace plat que les vitesses relatives pour des objets éloignés sont bien définies.

Les grandeurs apparaissant dans l'expression (192) sont indépendantes de l'observateur. Mais souvent les gens veulent utiliser des quantités qui dépendent de l'observateur. La relation devient alors plus complexe, la seule équation (192) doit être étendue à dix équations, appelées *équations du champ d'Einstein*. Elles seront introduites plus loin. Mais, avant d'aborder cela, nous allons vérifier que la relativité générale est bien cohérente. Nous allons nous assurer qu'elle contient bien la relativité restreinte comme un cas limite, puis nous passerons directement au test principal.

GRAVITATION UNIVERSELLE

« La seule raison qui fait que je reste ici, c'est la gravité. »

Anonyme

Défi 262 e Pour des valeurs de vitesses et de courbures faibles, les courbures temporelles $K_{(0j)}$ possèdent alors une propriété particulière. Dans ce cas, elles peuvent être définies comme les dérivées spatiales secondes d'une fonction φ d'un seul scalaire. En d'autres termes, nous pouvons écrire

Réf. 151 * Une autre formulation équivalente établit que pour des rayons minuscules l'aire A est donnée par

$$A = 4\pi r^2 \left(1 + \frac{1}{3}r^2 R\right) \quad (194)$$

où R est le scalaire de Ricci, qui sera introduit plus tard.

$$K_{(0j)} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial (x^j)^2} . \quad (195)$$

Dans les situations courantes, il s'avère que la fonction φ est le potentiel gravitationnel. En réalité, la gravitation universelle est le cas limite de la relativité générale pour les petites vitesses et les courbures spatiales faibles. Ces deux restrictions impliquent, en utilisant $W^{(0)} = \rho c^2$ et $c \rightarrow \infty$, que

$$K_{(ij)} = 0 \quad \text{et} \quad K_{(01)} + K_{(02)} + K_{(03)} = 4\pi G\rho . \quad (196)$$

En d'autres termes, pour des vitesses faibles, l'espace est plat et le potentiel vérifie l'équation de Poisson. La gravitation universelle est donc en fait la limite de la relativité générale pour une vitesse faible et une courbure restreinte.

Pouvez-vous montrer que la relation (192) entre la courbure et la densité d'énergie signifie en réalité que le temps près d'une masse dépend de la hauteur, comme nous l'avons stipulé au début de ce chapitre ?

Défi 263 pe

LA MÉTRIQUE DE SCHWARZSCHILD

Réf. 149

Quelle est la courbure de l'espace-temps à proximité d'une masse sphérique ?

Défi 264 pe

La courbure de la métrique de Schwarzschild est donnée par

$$\begin{aligned} K_{r\varphi} = K_{r\theta} &= -\frac{G M}{c^2 r^3} \quad \text{et} \quad K_{\theta\varphi} = 2\frac{G M}{c^2 r^3} \\ K_{t\varphi} = K_{t\theta} &= \frac{G M}{c^2 r^3} \quad \text{et} \quad K_{tr} = -2\frac{G M}{c^2 r^3} \end{aligned} \quad (197)$$

Réf. 149

en chaque point. La dépendance en $1/r^3$ découle de la dépendance générale à toutes les forces de marée, nous les avons déjà calculées dans le chapitre sur la gravitation universelle. Les facteurs G/c^2 sont dus à la force maximale de la gravité; seuls les premiers facteurs numériques nécessitent d'être évalués à partir de la relativité générale. La courbure moyenne s'annule manifestement, de même que pour tout espace vide. Comme attendu, les valeurs des courbures près de la surface de la Terre sont excessivement dérisoires.

Page 136

Défi 265 pe

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LA COURBURE

Une abeille s'est posée sur le côté extérieur d'un verre cylindrique, 1 cm en dessous de son bord. Une goutte de miel est située à mi-chemin d'un tour complet du verre, toujours sur le côté extérieur, 2 cm en dessous de son bord. Quelle est pour l'abeille la distance la plus courte pour aller jusqu'à la goutte ? Quelle est la distance la plus courte si la goutte est située à l'intérieur du verre ?

Défi 266 e

* *

Où sont situés les points de la courbure gaussienne la plus élevée et la moins élevée sur un œuf ?

Défi 267 e

UNIVERSALITÉ DES OBSERVATEURS – MATHÉMATIQUES PLUS PROFONDES*

« Jeder Straßenjunge in unserem mathematischen Göttingen versteht mehr von vierdimensionaler Geometrie als Einstein. Aber trotzdem hat Einstein die Sache gemacht, und nicht die großen Mathematiker. »

David Hilbert**

Maintenant que nous avons une intuition de la courbure, nous voulons la décrire d'une manière telle que *n'importe quel* observateur puisse communiquer avec *n'importe quel autre* observateur. Malheureusement, cela signifie qu'il faut utiliser des formules avec des tenseurs. Ces formules semblent intimidantes. Le défi consiste à percevoir dans chacune de ces expressions l'idée essentielle (par exemple en faisant abstraction de tous les indices pendant un certain temps) et de ne pas se laisser distraire par toutes ces petites lettres qui s'éparpillent tout autour d'elles.

LA COURBURE DE L'ESPACE-TEMPS

« Il faut suivre sa pente, surtout si elle monte. »

André Gide

Nous avons mentionné ci-dessus qu'un espace-temps quadridimensionnel est décrit par la 2-courbure, la 3-courbure et la 4-courbure. De nombreux textes sur la relativité générale commencent avec la 3-courbure. Ces courbures révèlent la distinction qui existe entre le 3-volume calculé à partir d'un rayon et le 3-volume réel. Elles sont décrites par le *tenseur de Ricci****. À l'aide d'un argument que nous avons déjà rencontré pour le cas de l'écart géodésique, il apparaît que le tenseur de Ricci décrit comment la forme d'un nuage sphérique de particules chutant librement est modifiée durant sa course.

En bref, le tenseur de Ricci est la version en relativité générale de $\Delta\varphi$ ou, encore mieux, de $\square\varphi$.

La définition la plus générale, mais la moins détaillée, de la courbure est celle qui décrit la distinction entre le 4-volume calculé à partir d'un rayon mesuré et le véritable 4-volume. C'est la *courbure moyenne* en un point de l'espace-temps, qui est représentée par ce que nous appelons le *scalaire de Ricci* R , défini comme suit :

$$R = -2K = -\frac{2}{r_{\text{courbure}}^2} . \quad (198)$$

* Cette section pourra être sautée en première lecture. La section sur la cosmologie, à la [page 196](#), constitue alors le bon jalon permettant de poursuivre.

** « Chaque gamin dans les rues de notre Göttingen mathématique en sait plus qu'Einstein concernant la géométrie quadridimensionnelle. Néanmoins, ce fut Einstein qui fit le travail, et non pas les grands mathématiciens. »

*** Gregorio Ricci-Cubastro (n. Lugo 1853, d. Bologne 1925) était un mathématicien italien. Il est le père du calcul différentiel absolu (plus tard renommé calcul tensoriel [N.D.T.]), également dénommé « calcul de Ricci » en ce temps-là. Tullio Levi-Civita était son assistant.

Il apparaît que le scalaire de Ricci peut être dérivé du tenseur de Ricci en utilisant ce que l'on appelle la *contraction tensorielle*, qui représente une procédure précise de moyennage. Pour des tenseurs de rang deux, la contraction est équivalente à la prise en compte de la trace :

$$R = R^\lambda{}_\lambda = g^{\lambda\mu} R_{\lambda\mu} . \quad (199)$$

Le scalaire de Ricci décrit la courbure moyennée sur l'espace *et* le temps. Dans l'image d'un nuage sphérique qui chute, le scalaire de Ricci décrit la variation de volume de ce nuage. Il s'annule toujours dans le vide. Ce résultat nous permet, à la surface de la Terre, d'associer la courbure spatiale à la variation du temps avec l'altitude.

Défi 268 pe

Une idée découverte par Einstein, après deux années de travail acharné, surgit maintenant. La quantité cruciale pour la description de la courbure dans la nature n'est pas le tenseur de Ricci R_{ab} , mais un tenseur construit à partir de celui-ci. Ce *tenseur d'Einstein* G_{ab} est défini mathématiquement (pour une constante cosmologique nulle) comme

$$G_{ab} = R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R . \quad (200)$$

Il n'est pas difficile de comprendre sa signification. La valeur G_{00} représente la somme des courbures sectionnelles dans les plans *orthogonaux* à la direction 0 et donc la somme de toutes les courbures sectionnelles spatiales :

$$G_{00} = K_{(12)} + K_{(23)} + K_{(31)} . \quad (201)$$

De façon similaire, pour chaque dimension i , l'élément diagonal G_{ii} est la somme (en prenant en considération le signe moins de la métrique) des courbures sectionnelles dans les plans *orthogonaux* à la direction i . Par exemple, nous avons

$$G_{11} = K_{(02)} + K_{(03)} - K_{(23)} . \quad (202)$$

La distinction entre le tenseur de Ricci et le tenseur d'Einstein s'établit donc selon le mode de combinaison des courbures sectionnelles : des disques *contenant* la coordonnée en question dans un cas, des disques *perpendiculaires* à cette coordonnée dans l'autre cas. Les deux décrivent la courbure de l'espace-temps aussi efficacement, et fixer l'une signifie que nous fixons l'autre. (Que représentent la trace et le déterminant du tenseur d'Einstein ?)

Défi 269 d

Le tenseur d'Einstein est symétrique, ce qui signifie qu'il possède *dix* composantes indépendantes. Plus important, sa divergence s'annule : il décrit par conséquent une quantité conservée. Ce fut la propriété essentielle qui permit à Einstein de l'associer à la masse et à l'énergie en langage mathématique.

LA DESCRIPTION DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT, DE LA MASSE ET DE L'ÉNERGIE

De toute évidence, pour obtenir une description complète de la gravitation, les déplacements de quantité de mouvement et d'énergie doivent également être quantifiés d'une manière telle qu'un observateur quelconque puisse communiquer avec n'importe quel

autre. Nous avons vu que la quantité de mouvement et l'énergie apparaissent toujours ensemble dans les descriptions relativistes ; l'étape suivante consiste donc à découvrir comment leurs déplacements peuvent être mesurés pour des observateurs généraux.

Avant toute chose, la quantité qui décrit l'énergie, appelons-la T , doit être définie en utilisant le vecteur énergie-impulsion $\mathbf{p} = m\mathbf{u} = (\gamma mc, \gamma m\mathbf{v})$ de la relativité restreinte. Par ailleurs, T ne décrit pas une particule unique, mais la manière dont l'énergie-impulsion est distribuée dans l'espace et le temps. Ainsi, il est plus commode d'utiliser T pour décrire une *densité* d'énergie et de quantité de mouvement. T sera donc un *champ*, et sera fonction du temps et de l'espace, ce que l'on indique généralement par la notation $T = T(t, \mathbf{x})$.

Puisque la densité d'énergie-impulsion T décrit une densité qui est fonction de l'espace et du temps, elle définit, en chaque point de l'espace-temps et pour chaque surface infinitésimale $d\mathbf{A}$ au voisinage de ce point, le flux d'énergie-impulsion $d\mathbf{p}$ qui traverse cette surface. En d'autres termes, T est défini par la relation

$$d\mathbf{p} = T d\mathbf{A} . \quad (203)$$

La surface est supposée être caractérisée par son vecteur normal $d\mathbf{A}$. Puisque la densité d'énergie-impulsion est un facteur de proportionnalité entre deux vecteurs, T est un *tenseur*. Bien sûr, nous sommes en train de parler ici de 4-flux et de 4-surfaces. Par conséquent, le tenseur densité d'énergie-impulsion peut être divisé de la manière suivante :

$$T = \left(\begin{array}{c|ccc} w & S_1 & S_2 & S_3 \\ \hline S_1 & t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ S_2 & t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ S_3 & t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|ccc} \text{densité} & & & \text{flux d'énergie ou} \\ \text{d'énergie} & & & \text{densité d'impulsion} \\ \hline \text{flux d'énergie ou} & & & \text{densité du} \\ \text{densité d'impulsion} & & & \text{flux d'impulsion} \end{array} \right) \quad (204)$$

où $w = T_{00}$ est un 3-scalaire, \mathbf{S} un 3-vecteur et t un 3-tenseur. La quantité totale T est appelée le *tenseur (densité d')énergie-impulsion*. Il possède deux propriétés essentielles : il est symétrique et sa divergence s'annule.

La divergence nulle du tenseur T , souvent notée comme suit :

$$\partial_a T^{ab} = 0 \quad \text{ou abrégée} \quad T^{ab}_{,a} = 0 , \quad (205)$$

exprime le fait que le tenseur décrit une quantité *conservée*. Dans chaque volume, l'énergie peut varier uniquement via le flux qui traverse sa surface frontalière. Pouvez-vous confirmer que la description de l'énergie-impulsion avec ce tenseur satisfait la condition que deux observateurs quelconques, ayant des positions, des orientations, des vitesses *et* des accélérations différentes, peuvent échanger l'un l'autre leurs résultats et se comprendre ?

Le tenseur densité d'énergie-impulsion fournit une description complète de la distribution de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la masse dans l'espace et le temps. Pour prendre un exemple, déterminons la densité d'énergie-impulsion pour un liquide en mouvement. Pour un liquide de densité ρ , de pression p et de quadrivitesse \mathbf{u} , nous

avons

$$T^{ab} = (\rho_0 + p)u^a u^b - pg^{ab} \quad (206)$$

où ρ_0 identifie la densité mesurée dans le référentiel comobile, c'est-à-dire la densité *propre**. Évidemment, ρ , ρ_0 et p dépendent de l'espace et du temps.

Bien entendu, pour un fluide matériel en particulier, nous avons besoin de savoir comment la pression p et la densité ρ sont reliées. Une caractérisation complète du matériau nécessite donc la connaissance de la relation

$$p = p(\rho) . \quad (208)$$

Cette relation étant une propriété matérielle, elle *ne* peut donc *pas* être déterminée à partir de la relativité. Elle doit être dérivée à partir des constituants de la matière ou du rayonnement et de leurs interactions. Le cas le plus simple possible est représenté par la *poussière*, c'est-à-dire la matière constituée de particules ponctuelles** n'interagissant pas. Son tenseur énergie-impulsion est donné par

$$T^{ab} = \rho_0 u^a u^b . \quad (209)$$

Défi 271 pe Pouvez-vous expliquer la différence avec le cas du liquide ?

Défi 272 pe La divergence du tenseur énergie-impulsion est nulle pour tous les instants et toutes les positions, comme vous devez pouvoir le vérifier. Cette propriété est la même que pour le tenseur d'Einstein présenté ci-dessus. Mais avant d'approfondir ce problème, faisons une brève remarque. Nous n'avons pas pris en compte l'*énergie gravitationnelle*. Il apparaît que celle-ci ne peut pas être définie de manière générale. La gravitation n'est *pas* une interaction et ne doit *pas* avoir une énergie associée***.

ACTION DE HILBERT – COMMENT LES CHOSSES TOMBENT-ELLES ?

Lorsque Einstein avait discuté de son travail avec David Hilbert, ce dernier avait trouvé une manière de faire en quelques semaines ce qui avait pris des années à Einstein. Hilbert avait compris que la relativité générale *dans un espace vide* pouvait être décrite par l'intégrale d'une action, comme pour tous les autres systèmes physiques.

* Nous avons donc dans le référentiel *comobile*

$$T^{ab} = \begin{pmatrix} \rho_0 c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix} . \quad (207)$$

** Bien que la relativité générale interdise expressément l'existence de particules ponctuelles, l'approximation est utile dans les cas où les distances entre les particules sont énormes comparées à leur propre taille.

*** Dans certaines circonstances particulières, tels les champs faibles, le mouvement lent ou un espace-temps asymptotiquement plat, nous *pouvons* définir l'intégrale de la composante G^{00} du tenseur d'Einstein comme une énergie gravitationnelle négative. L'énergie gravitationnelle n'est donc décrite qu'*approximativement*, et uniquement pour notre environnement quotidien. Néanmoins, cette approximation conduit à la célèbre conjecture que l'énergie totale de l'Univers est nulle. Êtes-vous d'accord ?

Ainsi Hilbert s'en est sorti en trouvant la mesure du changement, puisque c'est ce que décrit une action, pour le mouvement causé par la gravitation. Manifestement, cette mesure doit être indépendante de l'observateur, et en particulier elle doit être invariante sous tous les changements possibles de points de vue.

Le mouvement engendré par la gravité est déterminé par la courbure. Une mesure quelconque de la courbure, indépendante de l'observateur, doit être une combinaison du scalaire de Ricci R et de la constante cosmologique Λ . Il est donc logique de s'attendre à ce que le changement de l'espace-temps soit décrit par une action S donnée par

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int (R + 2\Lambda) dV . \quad (210)$$

L'élément de volume dV doit être spécifié pour pouvoir utiliser cette expression dans des calculs. La constante cosmologique Λ (rajoutée quelques années après les travaux de Hilbert) apparaît comme une possibilité mathématique de décrire l'action la plus générale, qui soit invariante par difféomorphisme. Nous verrons plus loin que sa valeur dans la nature, bien que petite, semble être différente de zéro.

L'action de Hilbert d'une région significative de l'espace-temps est donc l'intégrale du scalaire de Ricci et du double de la constante cosmologique, sur cette région. Le principe de moindre action établit que l'espace-temps se déplace de telle manière que cette intégrale varie le moins possible.

En résumé, à la question « comment les choses bougent-elles ? » la relativité générale répond de la même manière que la relativité restreinte : *les choses suivent les trajectoires de vieillissement maximal*.

Défi 274 pe

Pouvez-vous montrer que l'action de Hilbert découle de la force maximale ?

LES SYMÉTRIES DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

La principale symétrie du lagrangien de la relativité générale est appelée *invariance par difféomorphisme*.

Les équations du champ pour l'espace-temps vide dénotent également une *symétrie d'échelle*. Elle représente l'invariance de ces équations après multiplication de toutes les coordonnées par un facteur numérique commun. En 1993, Torre et Anderson ont montré que la symétrie difféomorphisme et la symétrie d'échelle triviale sont les *seules* symétries des équations du champ du vide.

Réf. 152

Mis à part la symétrie difféomorphisme, la relativité générale complète, incluant la masse-énergie, possède une symétrie supplémentaire qui n'est pas encore totalement élucidée. Cette symétrie relie les diverses conditions initiales possibles des équations du champ ; cette symétrie est extrêmement complexe et constitue toujours un domaine actif de recherches. Ces enquêtes fascinantes devraient fournir de nouvelles perspectives dans la description classique du Big Bang.

Réf. 153

ÉQUATIONS DU CHAMP D' EINSTEIN

« [La théorie de la relativité générale d' Einstein] dissimulait l'effroyable émergence de l' inexistence de Dieu.

Un chasseur de sorcières de Boston, vers 1935

Croyez-vous en Dieu ? Réponse prépayée de 50 mots.

Télégramme ultérieur d' un inconnu à son héros Albert Einstein

Je crois au Dieu de Spinoza, qui se révèle dans l'ordre harmonieux de ce qui existe, et non en un dieu qui se préoccupe du sort et des actions des êtres humains.

» Réponse d' Albert Einstein

Page 98 Les célèbres équations du champ d' Einstein furent à l'origine de nombreuses critiques religieuses. Elles contiennent la description complète de la relativité générale. Comme expliqué ci-dessus, elles découlent de la force maximale – ou, de manière équivalente, de l' action de Hilbert – et sont données par

$$G_{ab} = -\kappa T_{ab}$$

ou

$$R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R - \Lambda g_{ab} = -\kappa T^{ab} . \quad (211)$$

On a mesuré que la constante κ , appelée *constante de couplage gravitationnel*, vaut

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^4} = 2,1 \cdot 10^{-43} \text{ /N} \quad (212)$$

Page 221 et sa minuscule valeur – 2π divisé par la force maximale $c^4/4G$ – reflète la faiblesse de la gravité dans la vie quotidienne, ou mieux, la difficulté à courber l' espace-temps. La constante Λ , ou *constante cosmologique*, correspond à une masse volumique d' énergie du vide, ou Λ/κ à une pression. Sa très basse valeur fait qu' elle est plutôt difficile à mesurer. La valeur courante qui recueille le plus de faveurs est

$$\Lambda \approx 10^{-52} \text{ /m}^2 \quad \text{ou} \quad \Lambda/\kappa \approx 0,5 \text{ nJ/m}^3 = 0,5 \text{ nPa} . \quad (213)$$

Réf. 154 Des mesures et des simulations récentes suggèrent que ce paramètre, bien qu' il soit numériquement proche de l' inverse du carré du rayon actuel de l' Univers, est une constante de la nature qui ne varie pas avec le temps.

En résumé, les équations du champ établissent que la courbure en un point est égale au flux d' énergie–impulsion qui traverse ce point, en prenant en compte la densité d' énergie du vide. Autrement dit, *l' énergie–impulsion dicte à l' espace-temps comment il doit se courber**.

* Einstein parvint à établir ses équations du champ en utilisant un grand nombre de directives abstraites qui

Les équations du champ de la relativité générale peuvent être simplifiées dans le cas où les vitesses sont faibles. Dans cette situation, $T_{00} = \rho c^2$ et toutes les autres composantes de T s'annulent. En utilisant la définition de la constante κ et en posant $\varphi = (c^2/2)h_{00}$ dans $g_{ab} = \eta_{ab} + h_{ab}$, nous trouvons

$$\nabla^2 \varphi = 4\pi\rho \quad \text{et} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} = -\nabla\varphi \quad (214)$$

que nous connaissons bien, puisque cela peut être réexprimé comme suit : un corps de masse m situé à proximité d'un autre corps de masse M est accéléré par

$$a = G \frac{M}{r^2}, \quad (215)$$

une valeur qui est indépendante de la masse m du corps qui chute. Et en fait, comme l'avait déjà remarqué Galilée, tous les corps chutent avec la même accélération, indépendamment de leur taille, de leur masse, de leur couleur, etc. En relativité générale aussi la gravitation est entièrement impartiale*. L'indépendance entre la chute libre et la masse du corps qui tombe découle de la description de l'espace-temps comme un ma-

son qualifiées de *principes* dans la littérature. Aujourd'hui, plusieurs d'entre elles ne sont pas considérées comme étant primordiales. Néanmoins, nous en donnons un court aperçu.

- *Principe de relativité générale* : tous les observateurs sont équivalents, ce principe, bien qu'il soit fréquemment exprimé, est probablement vide de tout contenu physique.

Réf. 155

Page 218

- *Principe de covariance générale* : les équations de la physique doivent être formulées sous forme tensorielle, même si nous savons aujourd'hui que toutes les équations peuvent être écrites avec des tenseurs, y compris la gravitation universelle ; dans de nombreux cas elles requièrent des éléments « absolus » non physiques, c'est-à-dire des quantités qui influent sur les autres mais pas sur elles-mêmes. Cette idée non physique est en contradiction avec l'idée d'*interaction*, comme nous l'avons déjà expliqué.

- *Principe de couplage minimal* : les équations du champ de la gravitation sont déduites de celles de la relativité restreinte en considérant la généralisation la plus simple possible. Bien sûr, maintenant que ces équations sont connues et testées expérimentalement, ce principe n'est que d'un intérêt historique.

- *Principe d'équivalence* : l'accélération est localement indiscernable de la gravitation, nous l'avons utilisé pour démontrer que l'espace-temps est semi-riemannien et que la gravitation est sa courbure.

Page 237

- *Principe de Mach* : l'inertie est due à l'interaction avec le reste de l'Univers, ce principe est correct, même si l'on affirme souvent qu'il n'est pas vérifié dans la relativité générale. Dans tous les cas, il ne représente pas l'essence de la relativité générale.

- *Identité entre masse gravitationnelle et inertielle* : elle est incluse depuis le début dans la définition de la masse, mais elle est ressassée à n'en plus finir dans les textes sur la relativité générale, et est implicitement utilisée dans la définition du tenseur de Riemann.

- *Principe de correspondance* : une nouvelle théorie plus générale, telle que la relativité générale, doit pouvoir se réduire aux théories précédentes, dans notre cas la gravitation universelle ou la relativité restreinte, lorsqu'elle est restreinte aux domaines dans lesquels celles-ci restent valides.

* Vous trouverez ici une autre manière de montrer que la relativité générale s'accorde avec la gravitation universelle. À partir de la définition du tenseur de Riemann, nous savons que l'accélération relative b_a et la vitesse de particules proches sont reliées par

$$\nabla_e b_a = R_{ceda} v^c v^d. \quad (216)$$

Par les symétries de R , nous savons qu'il existe un φ tel que $b_a = -\nabla_a \varphi$. Cela signifie que

$$\nabla_e b^a = \nabla_e \nabla^a \varphi = R_{ced}^a v^c v^d \quad (217)$$

telas courbé. Les objets qui se déplacent sur un matelas le font tous de la même manière, indépendamment de la valeur de la masse.

Défi 276 e Pour pouvoir nous représenter les équations complètes du champ, nous allons nous frayer un court chemin à travers leurs principales propriétés. Premièrement, tout mouvement dû à la courbure de l'espace-temps est *réversible*, *différentiable* et donc *déterministe*. Remarquez que seul le mouvement complet, c'est-à-dire de l'espace-temps *et* de la matière *et* de l'énergie, possède ces propriétés. Pour le mouvement d'une particule seule, celui-ci est en fait *irréversible*, puisqu'une certaine quantité de rayonnement gravitationnel est généralement diffusée.

En abrégant les équations du champ nous trouvons, pour une constante cosmologique nulle, l'expression suivante pour le scalaire de Ricci :

$$R = -\kappa T . \quad (220)$$

Défi 277 pe Ce résultat implique aussi la relation qui existe entre l'excès de rayon et la masse contenue à l'intérieur d'une sphère.

Les équations du champ sont *non linéaires* dans la métrique g , ce qui signifie que les sommes de solutions *ne* constituent généralement *pas* des solutions. Cela rend la recherche de ces solutions particulièrement ardue. Pour une solution complète des équations du champ, les conditions initiales et limites doivent être précisées. Les méthodes permettant de le faire forment une partie spécialisée de la physique mathématique, qui ne sont pas explorées ici.

Réf. 156

Défi 278 pe Albert Einstein avait l'habitude de dire que la relativité générale fournit les clés de la compréhension d'un côté seulement des équations du champ (211), mais pas de l'autre côté. Pouvez-vous entrevoir de quel côté il voulait parler ?

Que pouvons-nous faire d'intéressant à l'aide de ces équations ? En fait, pour être honnête, rien de plus que ce que nous avons déjà fait jusqu'à présent. Très peu de processus nécessitent l'utilisation des équations complètes. Un grand nombre de manuels sur la relativité s'arrêtent même après les avoir dévoilées ! Cependant, cela vaut la peine de les étudier. Par exemple, nous pouvons montrer que la solution de Schwarzschild est la *seule* solution à symétrie sphérique. De manière similaire, en 1923, Birkhoff montra que, pour le vide, chaque solution symétrique par rotation est statique. C'est le cas même si les masses elles-mêmes se déplacent, comme pendant l'effondrement d'une étoile.

Les applications les plus admirables des équations du champ sont peut-être les divers *films* réalisés sur les processus relativistes. La Toile mondiale héberge plusieurs d'entre eux : ils nous permettent de voir ce qui se passe lorsque deux trous noirs fusionnent, ce qui se produit quand un observateur tombe dans un trou noir, etc. Pour produire ces films, les équations du champ nécessitent généralement d'être résolues directement, sans

ce qui implique que

$$\Delta\varphi = \nabla_a \nabla^a \varphi = R_{cad}^a v^c v^d = R_{cd} v^c v^d = \kappa(T_{cd} v^c v^d - T/2) \quad (218)$$

En introduisant $T_{ab} = \rho v_a v_b$, nous obtenons

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho \quad (219)$$

comme nous voulions le montrer.

l'aide d'approximations*.

Un autre domaine d'application concerne les *ondes gravitationnelles*. Les équations complètes du champ montrent que ces ondes ne sont pas harmoniques, et sont non linéaires. Les ondes sinusoïdales n'existent qu'approximativement, pour des petites amplitudes. De manière encore plus intéressante, si deux ondes se heurtent, dans de nombreux cas on prédit que des *singularités* surgissent. Ce sujet à lui seul représente toujours un domaine de recherches et pourrait apporter un nouvel éclairage sur le phénomène de quantification de la relativité générale dans les années à venir.

Nous achevons cette section avec une petite remarque. En général, les équations du champ sont lues seulement dans un sens, en stipulant que l'énergie-impulsion engendre la courbure. Nous pouvons également les lire dans l'autre sens, en calculant l'énergie-impulsion nécessaire pour produire une courbure donnée. Lorsque nous faisons cela, nous découvrons que les espaces-temps courbes ne sont pas tous possibles, puisque certains conduiraient à des densités d'énergie (ou de masse) *négatives*. De telles solutions contrediraient la limite déjà citée sur les ratios longueur sur masse pour les systèmes physiques.

SUPPLÉMENT SUR LA FORCE LIMITE

Lorsque la constante cosmologique entre en ligne de compte, le principe de la force maximale nécessite d'être à nouveau examiné. Dans le cas d'une constante cosmologique qui n'est pas nulle, la force limite reste cohérente uniquement si la constante Λ est positive; c'est le cas pour la valeur mesurée actuellement, qui se situe à $\Lambda \approx 10^{-52}/\text{m}^2$. En effet, la relation rayon-masse des trous noirs

$$2GM = Rc^2\left(1 - \frac{\Lambda}{3}R^2\right) \quad (221)$$

implique qu'une force maximale *indépendante* du rayon est valide uniquement pour une constante cosmologique positive ou nulle. Pour une constante cosmologique négative, la force limite ne serait valide que pour des trous noirs infiniment petits. Du reste, nous empruntons une approche pragmatique et remarquons qu'une force limite maximale peut être vue comme impliquant une constante cosmologique nulle ou positive. Bien évidemment, la force limite ne précise pas la *valeur* de cette constante. Pour ce faire, un deuxième principe doit être ajouté. Une formulation immédiate, en utilisant le principe supplémentaire d'une force minimale dans la nature, a été proposée ci-dessus.

Nous devrions aussi nous demander si des trous noirs en rotation ou chargés modifient l'argument qui conduit de la force maximale à la dérivation de la relativité générale. Cependant, la dérivation qui utilise l'équation de Raychaudhuri ne change pas. En fait, le seul changement dans l'argument apparaît avec l'introduction de la torsion, qui modifie l'équation de Raychaudhuri elle-même. Tant que la torsion ne joue aucun rôle, la dérivation donnée ci-dessus demeure valide. L'introduction de la torsion est toujours une question ouverte de la recherche.

Une autre question consiste à savoir comment la force maximale est reliée aux théories scalaires-tensorielles de la gravitation, telle la proposition de Brans et Dicke ou ses gé-

* Voir par exemple le site Web www.photon.at/~werner/black-earth.

néralisations. Si une théorie scalaire–tensorielle particulière obéit à l'équation générale de l'horizon (III), alors elle doit également entraîner l'existence d'une force maximale. L'équation générale de l'horizon doit être vérifiée à la fois pour des horizons *statiques* et *dynamiques*. Si c'était le cas, la théorie scalaire–tensorielle spécifique serait équivalente à la relativité générale, puisqu'elle nous permettrait, en utilisant le raisonnement de Jacobson, de déduire les équations du champ classiques. Ce cas peut survenir si le champ scalaire se comporte comme la matière, c'est-à-dire s'il possède une masse–énergie comme la matière et s'il courbe l'espace-temps comme celle-ci. D'un autre côté, si dans la théorie scalaire–tensorielle particulière l'équation générale de l'horizon (III) n'est pas vérifiée pour *tous* les horizons *en mouvement* – ce qui est le cas en général, puisque les théories scalaires–tensorielles possèdent plus de constantes définies que la relativité générale –, alors la force maximale disparaît et la théorie n'est pas équivalente à la relativité générale. Cette correspondance montre également qu'un test expérimental de l'équation de l'horizon pour des horizons *statiques* uniquement n'est pas suffisant pour confirmer la relativité générale. Un tel test éliminerait certaines théories scalaires–tensorielles seulement, mais pas toutes.

RETROUVER LA GRAVITATION UNIVERSELLE

Pour que la limite de la force maximale soit considérée comme un principe physique fondamental, toutes les propriétés de la gravitation, y compris la théorie complète de la relativité générale, doivent être déduites à partir de celle-ci. Pour rendre ce raisonnement plus facile à suivre, nous allons le découper en plusieurs étapes. Premièrement, nous montrons que la limite de la force implique que, dans la vie de tous les jours, la loi en l'inverse du carré de la gravitation universelle est vérifiée. Ensuite, nous montrons qu'elle implique les principaux concepts de la relativité générale. Enfin, nous montrons que la théorie complète de la relativité générale s'ensuit.

En d'autres termes, à partir de maintenant nous supposons que la limite de la force est valide. Nous explorons ses conséquences et les comparons aux propriétés connues de la nature. La limite de la force maximale peut également être abordée d'une autre manière. Si l'attraction gravitationnelle entre un corps central et un satellite était *plus forte* qu'elle ne l'est, les trous noirs seraient plus petits qu'ils ne le sont : dans ce cas, la limite de la force maximale et la vitesse maximale pourraient être dépassées. Si, par contre, la gravitation était *plus faible* qu'elle ne l'est, un observateur rapide en accélération ne serait pas capable de déterminer que les deux corps interagissent. En résumé, une force maximale de $c^4/4G$ implique la gravitation universelle. Il n'existe aucune différence entre le fait d'affirmer que tous les corps s'attirent par le biais de la gravitation et le fait d'affirmer qu'il existe une force maximale ayant pour valeur $c^4/4G$.

RETROUVER LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE LINÉARISÉE

L'étape logique suivante consiste à montrer qu'une force maximale implique également la relativité générale. La démarche triviale consiste à répéter, étape par étape, l'approche standard de la relativité générale.

La courbure de l'espace-temps est une conséquence du fait que la vitesse de la lumière est la vitesse maximale pour *tous* les observateurs, même s'ils sont situés dans un champ gravitationnel. Le décalage vers le rouge gravitationnel indique que dans des champs gra-

Réf. 95, Réf. 96

vitationnels les horloges voient leur cadence se modifier avec l'altitude. Ce changement, associé à la constance de la vitesse de la lumière, implique la courbure de l'espace-temps. La gravitation implique donc la courbure de l'espace-temps. La valeur de la courbure dans le cas de champs gravitationnels faibles est entièrement déterminée par la loi en l'inverse du carré de la gravité. Puisque l'attraction universelle découle de la force maximale, nous déduisons que cette dernière entraîne que l'espace-temps est courbé.

Indépendamment de la courbure, nous devons aussi valider l'autre idée fondamentale de la relativité générale. Le *principe de relativité générale* stipule que tous les observateurs sont équivalents. Puisque le principe de la force maximale s'applique à tous les observateurs, le principe de relativité générale est intégré dans celui-ci. Le *principe d'équivalence* établit que, localement, la gravitation peut être éliminée en considérant un observateur convenablement choisi. C'est également le cas pour le principe de la force maximale, qui s'applique à tous les observateurs, donc aussi aux observateurs qui ne ressentent pas localement la gravitation. Le *principe de Mach*, dont la formulation précise est variable, affirme que seules les quantités relatives devraient intervenir dans la description de la nature. Puisque la force maximale est une quantité relative – en particulier, la relation entre la masse et la courbure l'est – le principe de Mach est également satisfait.

Des corps libres situés dans un espace plat se déplacent à vitesse constante. Par le principe d'équivalence, cette affirmation se généralise en la déclaration que des corps en chute libre avancent le long des géodésiques. Le principe de la force maximale laisse intacte l'allégation que *l'espace-temps dicte à la matière comment elle doit se déplacer*.

Réf. 158 La courbure de l'espace-temps pour des champs gravitationnels faibles est fixée par la loi en l'inverse du carré de la gravité. La courbure spatiale est donc omniprésente, avec la valeur juste, autour de chaque masse. Comme Richard Feynman l'a expliqué, en extrapolant ce résultat à tous les observateurs possibles, nous pouvons en déduire tous les effets de la gravitation de faible courbure. En particulier, cela entraîne l'existence d'ondes gravitationnelles linéaires (de faible amplitude) et l'effet de Thirring–Lense. La relativité générale linéarisée découle donc du principe de la force maximale.

COMMENT CALCULER LA FORME DES GÉODÉSQUES

L'autre moitié de la relativité générale établit que les corps chutent le long des géodésiques. Toutes les orbites sont des géodésiques, donc des courbes qui maximisent le temps propre. Il est ainsi utile d'être capable de calculer ces trajectoires*. Pour commencer, nous avons besoin de connaître *la forme de l'espace-temps*, la notion de « forme » étant généralisée à partir de sa signification bidimensionnelle familière. Pour un être vivant sur cette surface, elle est habituellement décrite par la métrique g_{ab} , qui définit les distances entre des points voisins, par

$$ds^2 = dx_a dx^a = g_{ab}(x) dx^a dx^b . \quad (222)$$

Un exercice classique de calcul consiste à montrer à partir de cette expression qu'une courbe $x^a(s)$ dépendant d'un paramètre s (affine) bien caractérisé est une *géodésique* (métrique) de genre espace, c'est-à-dire la trajectoire la plus longue possible entre les

* C'est une brève section qui peut intéresser les plus curieux, elle peut être sautée en première lecture.

Défi 279 pe deux événements*, si et seulement si

$$\frac{d}{ds} \left(g_{ad} \frac{dx^d}{ds} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial g_{bc}}{\partial x^a} \frac{dx^b}{ds} \frac{dx^c}{ds}, \quad (223)$$

Page 136 tant que ds est différent de zéro tout au long de la trajectoire**. Tous les corps en chute libre suivent de telles géodésiques. Nous avons montré ci-dessus que la propriété de la géodésique implique qu'une pierre jetée en l'air retombe, à moins qu'elle soit lancée avec une vitesse supérieure à la vitesse de libération. L'expression (223) remplace donc à la fois l'expression $d^2x/dt^2 = -\nabla\phi$ valable pour des corps en chute et l'expression $d^2x/dt^2 = 0$ valable pour des corps flottant librement en relativité restreinte.

Réf. 159 La trajectoire ne dépend pas de la masse ou du matériau dont est constitué le corps. Par conséquent, l'*antimatière* tombe également le long des géodésiques. Autrement dit, l'antimatière et la matière ne se repoussent pas, mais s'attirent également l'une vers l'autre. De manière intéressante, même les expériences réalisées avec la matière ordinaire peuvent le montrer, si elles sont soigneusement analysées. Pouvez-vous montrer comment ?

Défi 280 pe

Pour être exhaustif, nous mentionnons que la lumière suit des géodésiques *nulles* ou *de genre lumière*. En d'autres termes, il existe un paramètre affine u tel que les géodésiques vérifient

$$\frac{d^2x^a}{du^2} + \Gamma^a_{bc} \frac{dx^b}{du} \frac{dx^c}{du} = 0 \quad (227)$$

avec la condition distincte que

$$g_{ab} \frac{dx^a}{du} \frac{dx^b}{du} = 0. \quad (228)$$

Défi 281 pe Étant donné toutes ces définitions sur les divers types de géodésiques, que représentent les lignes dessinées dans la Figure 53 de la page 131 ?

* Nous nous rappelons que dans l'espace de la vie courante les géodésiques sont les chemins les plus courts possibles, alors que dans l'espace-temps de la relativité générale les géodésiques sont les chemins les plus longs possibles. Dans les deux cas, ils représentent des trajets « extrémaux ».

** Cela est souvent noté comme suit

$$\frac{d^2x^a}{ds^2} + \Gamma^a_{bc} \frac{dx^b}{ds} \frac{dx^c}{ds} = 0 \quad (224)$$

où la condition

$$g_{ab} \frac{dx^a}{ds} \frac{dx^b}{ds} = 1 \quad (225)$$

doit être vérifiée, donc simplement en exigeant que tous les vecteurs tangents soient des vecteurs *unitaires*, et que $ds \neq 0$ tout au long de la trajectoire. Les symboles Γ apparaissant ci-dessus sont donnés par

$$\Gamma^a_{bc} = \left\{ \begin{matrix} a \\ bc \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{ad} (\partial_b g_{dc} + \partial_c g_{db} - \partial_d g_{bc}), \quad (226)$$

et sont appelés *symboles de Christoffel de seconde espèce* ou plus simplement *connexion métrique*.

LA MASSE EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE

L'invariance par difféomorphisme de la relativité générale rend la vie plutôt fascinante. Nous verrons qu'elle nous permet de dire que nous vivons à l'intérieur d'une sphère creuse, et qu'elle ne nous permet pas de dire où l'énergie est réellement située. Si l'énergie ne peut pas être localisée, qu'en est-il de la masse ? Il devient immédiatement clair que la masse, comme l'énergie, peut être localisée *uniquement* si l'espace-temps lointain est identifié comme étant plat. Il est alors possible de définir une valeur pour la masse localisée en précisant une idée intuitive : la masse est mesurée par le temps que met une sonde pour graviter autour du corps inconnu*.

Défi 282 pe

La définition intuitive de la masse exige un espace-temps plat à l'infini, elle ne peut pas être étendue à d'autres situations. En bref, la masse ne peut être localisée que si la masse totale peut être définie. Et la *masse totale* n'est définie que pour un espace-temps asymptotiquement plat. La seule autre notion de masse qui soit précise en relativité générale est la *masse volumique locale* en un point. À l'opposé, nous ne comprenons pas très bien comment définir la masse contenue dans une région plus grande qu'un point mais plus petite que l'intégralité de l'espace-temps.

Maintenant que nous pouvons continuer à discuter de masse sans avoir (trop) mauvaise conscience, revenons aux équations du mouvement.

LA GRAVITÉ EST-ELLE UNE INTERACTION ?

Nous avons eu tendance, jusqu'à présent, à répondre à cette question par l'affirmative, puisque dans la physique galiléenne la gravité était perçue comme une influence sur le mouvement des corps. En fait, nous l'avons décrite par un potentiel, suggérant ainsi que la gravité *engendre* le mouvement. Mais soyons prudents. Une force ou une interaction est ce qui modifie l'état de mouvement des objets. Toutefois, nous venons de voir que, lorsque deux corps s'attirent l'un vers l'autre par le truchement de la gravitation, tous deux restent toujours en chute libre. Par exemple, la Lune tourne autour de la Terre parce qu'elle chute perpétuellement vers elle. Puisque n'importe quel observateur en chute libre demeure constamment au repos, l'affirmation que la gravité modifie le mouvement des corps n'est pas correcte pour tous les observateurs. En réalité, nous découvrirons bientôt que, dans un sens qui sera précisé sous peu, la Lune et la Terre suivent toutes les deux des trajectoires « droites ».

Ce réajustement de notre idée de la gravité est-il simplement une question de mots ?

* Cette définition fut formalisée par Arnowitt, Deser et Misner, et depuis ce temps a souvent été dénommée la *masse ADM*. L'idée consiste à utiliser la métrique g_{ij} et à prendre l'intégrale

$$m = \frac{1}{16\pi} \int_{S_R} (g_{ij,i}v_j - g_{ii,j}v_j) dA \quad (229)$$

Réf. 160

où S_R représente la sphère des coordonnées de rayon R , v est le vecteur unitaire normal de cette sphère et dA est l'aire élémentaire sur la sphère. La limite existe si l'espace-temps est asymptotiquement plat et si la distribution de masse est suffisamment concentrée. Les physiciens mathématiciens ont également montré que pour une variété quelconque dont la métrique change à l'infini comme

$$g_{ij} = (1 + f/r + O(1/r^2))\delta_{ij} \quad (230)$$

la masse totale est donnée par $M = 2f$.

Pas vraiment. Puisque la gravité n'est pas une interaction, elle n'est *pas* due à un champ et elle ne dérive d'*aucun* potentiel.

Page 218

Vérifions cet étrange résultat d'une autre manière encore. La définition la plus fondamentale de l'« interaction » est celle de la différence entre le tout et la somme des parties. Dans le cas de la gravité, un observateur en chute libre pourrait affirmer que rien de particulier ne se produit, indépendamment du fait que l'autre corps soit présent ou non, et pourrait prétendre que la gravité n'est pas une interaction.

Toutefois, c'est aller trop loin. Une interaction transporte de l'énergie entre des systèmes. Nous avons vu en réalité que la gravité peut être considérée comme transportant de l'énergie, uniquement de façon approximative. La gravitation est donc *grosso modo* une interaction. Mais ce n'est pas une raison suffisante pour abandonner cette particularité. Le concept d'énergie n'est pas utile pour la gravité au-delà du domaine de la vie quotidienne. Pour le cas général, à savoir pour un observateur en général, la gravité est ainsi fondamentalement différente de l'électricité ou du magnétisme.

Défi 283 pe

Une autre manière d'appréhender ce problème est la suivante. Prenez un satellite orbitant autour de Jupiter avec une énergie-impulsion $\mathbf{p} = m\mathbf{u}$. Si nous calculons la variation d'énergie-impulsion le long de sa trajectoire s , nous obtenons

$$\frac{d\mathbf{p}}{ds} = m \frac{d\mathbf{u}}{ds} = m \left(\mathbf{e}_a \frac{du^a}{ds} + \frac{d\mathbf{e}_a}{ds} u^a \right) = m \mathbf{e}_a \left(\frac{du^a}{ds} + \Gamma^a_{bd} u^b u^c \right) = 0 \quad (231)$$

Défi 284 pe

Réf. 161

Défi 285 pe

où \mathbf{e} représente le vecteur unitaire le long d'un axe des coordonnées. La variation de l'énergie-impulsion s'annule le long d'une quelconque géodésique, comme vous pouvez le vérifier. Par conséquent, l'énergie-impulsion de ce mouvement est conservée. En d'autres termes, *aucune* force n'agit sur le satellite. Nous pourrions répondre que dans l'équation (231) le deuxième terme représente à lui seul la force gravitationnelle. Mais ce terme peut être rendu nul sur l'intégralité de n'importe quelle ligne d'univers donnée. En bref, rien ne change entre deux corps en chute libre l'un autour de l'autre : nous pouvons dire que la gravitation n'est pas une interaction. Les propriétés de l'énergie confirment ce raisonnement.

Défi 286 s

Bien sûr, la conclusion que la gravitation n'est pas une interaction est quelque peu abstraite, puisqu'elle contredit notre expérience de la vie de tous les jours. Mais nous aurons besoin d'elle plus tard pour la compréhension complète du mouvement. Le comportement du rayonnement confirme cette déduction. Dans le vide, le rayonnement est toujours en mouvement libre. Dans un sens, nous pouvons dire que celui-ci chute toujours librement. Étrangement, puisque nous avons dit que la chute libre est la même chose que le repos, nous devrions conclure que le rayonnement est toujours au repos. Ce n'est pas faux ! Nous avons déjà vu que la lumière ne peut pas être accélérée*. Nous avons même vu que la déviation due à la gravitation n'est pas une accélération, car la lu-

* La réfraction, le ralentissement de la lumière à l'intérieur de la matière, ne constitue pas un contre-exemple. À proprement parler, la lumière à l'intérieur de la matière est continuellement en train d'être absorbée puis réémise. Entre ces processus, la lumière se propage toujours avec la vitesse de la lumière dans le vide. Le processus dans sa globalité *paraît* seulement ressembler à un ralentissement dans la limite macroscopique. La même chose s'applique pour la diffraction et pour la réflexion. Une liste de manières apparentes permettant de courber la lumière peut être consultée à la [page 86](#). Les détails des processus quantomécaniques qui les fondent peuvent être trouvés à la [page ??](#).

mière suit des trajectoires droites dans l'espace-temps, même dans cette situation. Bien que la lumière semble ralentir en se rapprochant des masses pour des observateurs éloignés, localement elle se déplace constamment à la vitesse de la lumière. En bref, même la gravitation ne parvient pas à déplacer la lumière.

Il existe un autre procédé pour montrer que la lumière est en permanence au repos. Pour un observateur essayant d'atteindre la vitesse de la lumière, une horloge avance de plus en plus lentement. Pour la lumière, en un certain sens, le temps s'arrête : ou, si vous préférez, *la lumière ne se déplace plus*.

L'ESSENCE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Si une puissance ou une force maximale surgissant aux horizons constitue le fondement de la relativité générale, nous pouvons nous demander si des systèmes physiques autres que l'espace-temps peuvent aussi être décrits de cette manière.

Réf. 162 Pour la relativité restreinte, nous avons découvert que l'on rencontre également tous ses principaux effets – comme une vitesse limite, une contraction de Lorentz ou une équivalence masse-énergie – dans les dislocations des solides. Des systèmes comparables à la relativité générale existent-ils ? Des tentatives pour découvrir de tels systèmes y sont déjà partiellement parvenus. Plusieurs équations et idées de la relativité générale sont applicables à la déformation des solides, étant donné que celle-ci décrit la déformation du ma-

Réf. 163 telas de l'espace-temps. Kröner a étudié cette analogie avec beaucoup de soin. D'autres systèmes ayant des horizons, et ainsi dotés d'observables analogues à la courbure, sont débusqués dans certains liquides – où les tourbillons jouent le même rôle que les trous noirs – et dans certains fluides quantiques pour la propagation de la lumière. Explorer ces systèmes est devenu un thème de recherches à part entière. Une correspondance complète de la relativité générale dans un système macroscopique fut découverte il y a quelques années seulement. Cette analogie sera présentée dans la troisième partie de notre aventure, mais nous aurons besoin d'un ingrédient supplémentaire qui n'est pas perceptible à ce point de notre ascension.

GYMNASTIQUE DE RIEMANN

La plupart des ouvrages introduisent la courbure d'une manière austère, à savoir de manière historique*, en utilisant le tenseur de courbure de Riemann. Nous en faisons un court résumé, de telle sorte que vous puissiez comprendre cet ancien procédé si jamais vous le rencontrez.

Défi 287 e Nous avons vu plus haut que la courbure est mieux décrite par un tenseur. En 4 dimensions, ce tenseur de courbure, généralement noté R , doit être une quantité qui nous permette de calculer, entre autres, l'aire d'un 2-disque d'orientation quelconque dans l'espace-temps. Maintenant, en 4 dimensions, les orientations d'un disque sont définies par le biais de deux quadrivecteurs, appelons-les \mathbf{p} et \mathbf{q} . Et, au lieu d'un disque, nous prendrons le *parallélogramme* engendré par \mathbf{p} et \mathbf{q} . Il existe plusieurs définitions possibles.

Le *tenseur de courbure de Riemann-Christoffel* R est alors défini comme une quantité qui nous permet d'évaluer la courbure $K(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ pour la surface engendrée par \mathbf{p} et \mathbf{q} ,

* C'est une brève section qui peut intéresser les plus curieux, elle peut être sautée en première lecture.

d'aire A , à travers

$$K(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{R \mathbf{p} \mathbf{q} \mathbf{p} \mathbf{q}}{A^2(\mathbf{p}, \mathbf{q})} = \frac{R_{abcd} p^a q^b p^c q^d}{(g_{\alpha\delta} g_{\beta\gamma} - g_{\alpha\gamma} g_{\beta\delta}) p^\alpha q^\beta p^\gamma q^\delta} \quad (232)$$

où, comme d'habitude, les lettres latines a, b, c, d , etc. prennent des valeurs allant de 0 à 3, de même que les indices grecs, et où une *somme* sur plusieurs indices est sous-entendue lorsqu'une notation indicielle apparaît deux fois. Évidemment, R est un tenseur de rang 4. Ce tenseur décrit donc uniquement la courbure *intrinsèque* d'un espace-temps. Au contraire, la métrique g décrit la *forme* complète de la surface, et pas seulement la courbure. La courbure est donc la quantité physique localement pertinente, et des descriptions physiques utilisent par conséquent uniquement le *tenseur de Riemann** R ou des quantités dérivées de celui-ci**.

Défi 288 e

Mais nous pouvons oublier la définition de la courbure que nous venons de donner. Il existe une seconde manière, plus physique, de voir le tenseur de Riemann. Nous savons que la courbure sous-tend l'existence de la gravité. Comme nous l'avons dit avant, la gravité signifie que, lorsque deux particules proches chutent librement avec la même vitesse et la même direction, la distance entre elles change. Autrement dit, l'effet local de la gravité est l'*accélération relative* des particules proches.

Défi 289 pe

Il apparaît que le tenseur R décrit précisément cette accélération relative, c'est-à-dire ce que nous appelions plus tôt les *forces de marée*. Manifestement, l'accélération relative \mathbf{b} s'accroît avec la distance de séparation \mathbf{d} et le carré (pourquoi ?) de la vitesse \mathbf{u} des deux particules. Par conséquent, nous pouvons également définir R comme un facteur de proportionnalité (généralisé) entre ces quantités :

$$\mathbf{b} = R \mathbf{u} \mathbf{u} \mathbf{d} \quad \text{ou, plus clairement,} \quad b^a = R^a{}_{bcd} u^b u^c d^d. \quad (235)$$

Les composantes du tenseur de courbure de Riemann possèdent les dimensions de l'inverse d'une longueur au carré. Puisqu'elles contiennent toute l'information concernant

* Bernhard Riemann (n. Breselenz 1826 , d. Selasca 1866) fut un important mathématicien allemand.

** Nous avons montré ci-dessus que l'espace-temps est courbé en remarquant les variations dans les rythmes des horloges, dans les longueurs des mètres étalons et dans la propagation de la lumière. Ces expériences sont les manières les plus aisées qui permettent de déterminer la métrique g . Nous savons que l'espace-temps est décrit par une variété quadridimensionnelle M dotée d'une métrique g_{ab} qui, localement, en chaque point de l'espace-temps, est une métrique de Minkowski. Une telle variété est appelée une *variété riemannienne*. Seule une telle métrique nous permet de définir un système inertiel local, c'est-à-dire un espace-temps de Minkowski local en chaque point de l'espace-temps. En particulier, nous avons

$$g_{ab} = 1/g^{ab} \quad \text{et} \quad g_a{}^b = g^a{}_b = \delta_b^a. \quad (233)$$

Comment la courbure et la métrique sont-elles reliées ? La solution à cette interrogation remplit généralement un grand nombre de pages dans les livres sur la relativité. Juste pour information, la relation est

$$R^a{}_{bcd} = \frac{\partial \Gamma^a{}_{bd}}{\partial x^c} - \frac{\partial \Gamma^a{}_{bc}}{\partial x^d} + \Gamma^a{}_{ec} \Gamma^e{}_{bd} - \Gamma^a{}_{fd} \Gamma^f{}_{bc}. \quad (234)$$

Le tenseur de courbure est construit à partir des dérivées secondes de la métrique. D'autre part, nous pouvons également déterminer la métrique si la courbure est connue. Une relation approchée est donnée ci-dessous.

Défi 290 pe la courbure intrinsèque, nous concluons que si R s'annule dans une région l'espace-temps dans cette région est plat. Nous déduisons facilement cette correspondance de cette deuxième définition*.

Une dernière manière de définir le tenseur R est la suivante. Pour un observateur *en chute libre*, la métrique g_{ab} est donnée par la métrique η_{ab} issue de la relativité restreinte. Dans son voisinage, nous avons

$$\begin{aligned} g_{ab} &= \eta_{ab} + \frac{1}{3}R_{abcd}x^c x^d + O(x^3) \\ &= \frac{1}{2}(\partial_c \partial_d g_{ab})x^c x^d + O(x^3). \end{aligned} \quad (237)$$

Le terme de courbure décrit donc l'écart entre la métrique de l'espace-temps et celle de l'espace-temps plat. Le tenseur de courbure R est un énorme monstre : il possède $4^4 = 256$ composantes en chaque point de l'espace-temps. Cependant, ses propriétés de symétrie les réduisent à 20 nombres indépendants**. Les véritables nombres qui comptent dans les problèmes physiques sont encore moins nombreux, à savoir 10 uniquement. Ceux-ci sont les composantes du tenseur de Ricci, qui peut être défini à l'aide du tenseur de Riemann par contraction, c'est-à-dire en posant

$$R_{bc} = R^a{}_{bac}. \quad (240)$$

Défi 293 e Ses composantes, comme celles du tenseur de Riemann, sont des inverses de longueurs au carré. Les valeurs du tenseur R_{bc} , ou celles de $R^a{}_{bcd}$, sont indépendantes de la convention de signe utilisée dans la métrique de Minkowski, par opposition à R_{abcd} .

Réf. 164

* Cette deuxième définition est également appelée définition fondée sur la *déviations géodésique*. Il n'est bien entendu pas évident qu'elle coïncide avec la première. Pour une démonstration explicite, consultez la littérature. Il y a aussi une troisième manière, plus mathématique, de schématiser le tenseur R , à savoir la manière originale qu'utilisa Riemann pour l'introduire. Si nous appliquons un transport parallèle à un vecteur w autour d'un parallélogramme formé par deux vecteurs u et v , chacun de longueur ε , le vecteur w est transformé en $w + \delta w$. Nous avons alors

$$\delta w = -\varepsilon^2 R u v w + \text{termes d'ordres supérieurs} \quad (236)$$

Page 170

Vous pouvez en apprendre plus concernant la déviation géodésique en étudiant le comportement du fameux chariot qui indique le sud. Cet appareil, courant en Chine avant que le compas soit découvert, fonctionne uniquement si le monde est plat. En réalité, sur une surface courbe, après avoir parcouru une grande trajectoire fermée, il indiquera une direction différente de celle du début du voyage. Pouvez-vous expliquer pourquoi ?

Défi 291 pe

Défi 292 pe

** La définition de la chute libre indique que le tenseur de Riemann est symétrique dans certains indices et antisymétrique dans d'autres :

$$R_{abcd} = R_{cdab}, \quad R_{abcd} = -R_{bacd} = -R_{abdc}. \quad (238)$$

Ces relations impliquent également que de nombreuses composantes s'annulent. La relation suivante est également importante

$$R_{abcd} + R_{adbc} + R_{acdb} = 0. \quad (239)$$

Remarquez que l'ordre des indices n'est pas standardisé dans la documentation. La liste des invariants qui peuvent être confectionnés à partir de R est longue. Nous citerons que $\frac{1}{2}\varepsilon^{abcd}R_{cd}{}^{ef}R_{abef}$, à savoir le produit $*R R$ du tenseur de Riemann avec son dual, est l'invariant caractérisant l'effet Thirring-Lense.



FIGURE 71 Une photographie récente du ciel nocturne (© Axel Mellinger, de ?)

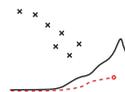
Défi 294 pe Pouvez-vous confirmer la relation $R_{abcd}R^{abcd} = 48m^2/r^6$ pour la solution de Schwarzschild ?

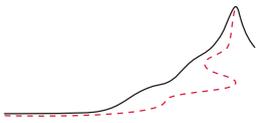
CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Réf. 165 Pendant longtemps, les gens ont spéculé pour savoir pourquoi les satellites artificiels Pioneer 10 et 11, qui sont maintenant situés à plus de 70 unités astronomiques du Soleil, subissent une décélération constante de $8 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$ (en direction du Soleil) depuis qu'ils ont dépassé l'orbite de Saturne. Cet effet est appelé l'*anomalie Pioneer*. Son origine n'est pas claire et constitue toujours un sujet de recherches. Mais plusieurs études ont montré que la raison n'est *pas* une irrégularité par rapport à la dépendance en l'inverse du carré de la gravitation, comme il est parfois proposé. En d'autres termes, cet effet doit être d'origine électromagnétique.

Réf. 166 Il existe plusieurs indices qui pointent vers une asymétrie dans l'émission du rayonnement thermique. En réalité, une asymétrie d'avant en arrière de seulement 80 W est suffisante pour expliquer cet effet. (Les moteurs embarqués en produisent 2,5 kW.) Mais l'origine de cette asymétrie n'est pas encore bien comprise. La révélation de cette asymétrie – ou de toute autre explication de cette décélération – constitue l'un des défis de la physique spatiale moderne.

Défi 295 r Page 94 Défi 296 pe Mettez-vous à l'épreuve : l'effet du moulin à lumière, à savoir que la lumière qui arrive tire l'objet vers la source, pourrait-il être la raison qui expliquerait cet effet ?





CHAPITRE 5

POURQUOI POUVONS-NOUS CONTEMPLER LES ÉTOILES ? – LE MOUVEMENT DANS L'UNIVERS

« Zwei Dinge erfüllen das Gemüt mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht, je öfter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschäftigt : der bestirnte Himmel über mir und das moralische Gesetz in mir*.

Emmanuel Kant (1724–1804) »

Lors des nuits claires, entre deux mille et cinq mille étoiles sont visibles à l'œil nu. Plusieurs centaines d'entre elles ont un nom. En réalité, dans toutes les régions du monde, les étoiles et les constellations qu'elles forment sont considérées comme étant la mémoire des événements passés, et on raconte de nombreux récits à leur sujet**. Mais le simple fait que nous puissions *voir* les étoiles est le point de départ d'une histoire fabuleuse, plus extraordinaire encore que toutes ces légendes. Elle concerne presque tous les aspects de la physique moderne.

QUELLES ÉTOILES POUVONS-NOUS ADMIRER ?

« Démocrite affirme [à propos de la Voie lactée] qu'elle est une région où la lumière émane d'une multitude de petites étoiles situées à proximité les unes des autres, pour lesquelles le rassemblement engendre la clarté de l'ensemble. »

Aetius, *Opinions*.

Réf. 168

Les étoiles que nous observons par une nuit claire sont principalement les plus brillantes parmi les plus proches voisines de notre région de la Voie lactée. Elles se trouvent à des distances allant de quatre à quelques milliers d'années-lumière de nous. Globalement, il y a dans notre environnement en moyenne une étoile pour 400 années-lumière cubes.

Pratiquement toutes les étoiles visibles sont situées dans notre propre galaxie. Le seul objet extragalactique *constamment* visible à l'œil nu depuis l'hémisphère Nord est la

* « Deux choses remplissent le cœur d'une admiration et d'une vénération toujours nouvelles et toujours croissantes, à mesure que la réflexion s'y attache et s'y applique : le ciel étoilé au-dessus de moi et la loi morale en moi. »

Réf. 167

** Sur les mythes concernant les étoiles et les constellations, lisez par exemple l'ouvrage de G. FASCHING, *Sternbilder und ihre Mythen*, Springer Verlag, 1993. Sur Internet nous trouvons également les magnifiques sites Web www.astro.wisc.edu/~dolan/constellations/ et www.astro.uiuc.edu/~kaler/sow/sow.html.



FIGURE 72 La nébuleuse d'Andromède M31, notre galaxie voisine (et 31^e membre du catalogue Messier des objets célestes). (NASA)

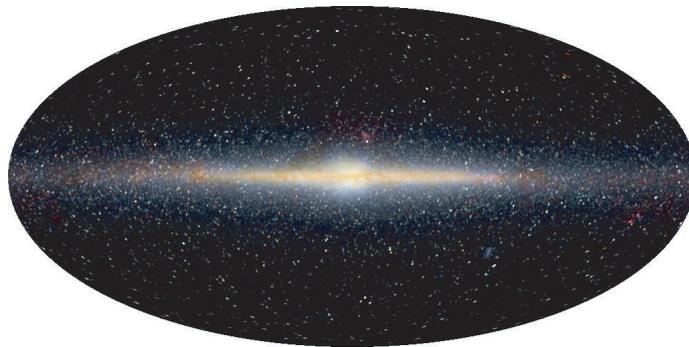


FIGURE 73 Comment notre galaxie apparaît dans l'infrarouge. (NASA)

nébuleuse d'Andromède, montrée agrandie sur la Figure 72. C'est une galaxie à part entière comme la nôtre, comme Emmanuel Kant l'avait déjà conjecturé en 1755. Plusieurs objets extragalactiques sont observables à l'œil nu depuis l'hémisphère Sud : la nébuleuse de la Tarentule, ainsi que le Grand et le Petit Nuage de Magellan. Les nuages de Magellan sont des galaxies voisines de la nôtre. D'autres exceptions temporaires sont les rares *novae*, des étoiles en explosion qui peuvent être vues si elles apparaissent dans des galaxies proches, ou les encore plus rares *supernovae*, qui peuvent souvent être aperçues même dans des galaxies lointaines.

En fait, les étoiles visibles sont également particulières par un autre aspect. Par exemple, les télescopes indiquent qu'environ la moitié d'entre elles sont doubles : elles sont constituées de deux étoiles tournant l'une autour de l'autre, comme dans le cas de Sirius. Le fait de mesurer les orbites qu'elles suivent dans leur folle course nous permet de déterminer leur masse. Pouvez-vous expliquer comment ?

Défi 297 pe

L'Univers est-il différent de notre Voie lactée ? Oui, il l'est, et plusieurs raisonnements permettent de le démontrer. Tout d'abord, notre galaxie – le mot *galaxie* est justement le terme grec original qui désigne la « Voie lactée » – est *aplatie*, à cause de sa rotation. Si la Galaxie tourne, il doit y avoir d'autres masses qui constituent l'arrière-plan par rapport auquel cette rotation s'effectue. En fait, il existe un nombre colossal d'autres galaxies – environ 10^{11} – dans l'Univers, une découverte qui date seulement du vingtième siècle.

Pourquoi notre compréhension de la place qu'occupe notre galaxie dans l'Univers



FIGURE 74 La galaxie elliptique NGC 205 (le 205^e membre du New General Catalogue NGC). (NASA)

eut-elle lieu si tard ? Eh bien, les gens ont rencontré la même difficulté que lorsqu'ils ont tenté de déterminer la forme de la Terre. Ils ont dû comprendre que la Galaxie n'est pas seulement une traînée opaline que l'on voit lors de nuits dégagées, mais un véritable système physique, constitué d'environ 10^{11} étoiles gravitant les unes autour des autres*. Comme pour la Terre, on s'est aperçu que la galaxie possède une *forme* tridimensionnelle, elle est indiquée sur la Figure 73. Notre galaxie est une structure plate et circulaire, d'un diamètre de 100 000 années-lumière. Au centre, elle possède un bulbe sphérique. Elle effectue une rotation environ tous les 200 à 250 millions d'années. (Pouvez-vous deviner comment on la mesure ?) La rotation est plutôt lente : depuis que le Soleil s'est formé, il a accompli à peu près 20 à 25 tours complets seulement autour du centre.

Il est même possible de mesurer la *masse* de notre galaxie. L'astuce consiste à utiliser un pulsar binaire situé dans sa périphérie. S'il est observé pendant de nombreuses années, nous pouvons déduire son accélération autour du centre galactique, puisque le pulsar réagit avec un décalage de fréquence qui peut être mesuré sur Terre. Plusieurs décennies d'observations sont nécessaires et un grand nombre d'artefacts doivent être éliminés. Malgré tout, de telles mesures sont en cours. Des estimations actuelles positionnent la masse de notre galaxie à 10^{42} kg ou $5 \cdot 10^{11}$ masses solaires.

Défi 298 pe

Réf. 171

* On imaginait naguère que la Voie lactée, ou *galaxie* en grec, avait été créée lorsque Zeus, le principal dieu de la mythologie grecque, avait tenté de nourrir son fils Héraclès au sein d'Héra afin de le rendre immortel. Le jeune Héraclès, dans un signe annonciateur de sa force future, teta si fort que le lait divin se répandit dans le ciel en une traînée blanchâtre.



FIGURE 75 Les galaxies M51 et M51B en collision (NASA), larges de 65 000 al, distantes de 31 Mal.

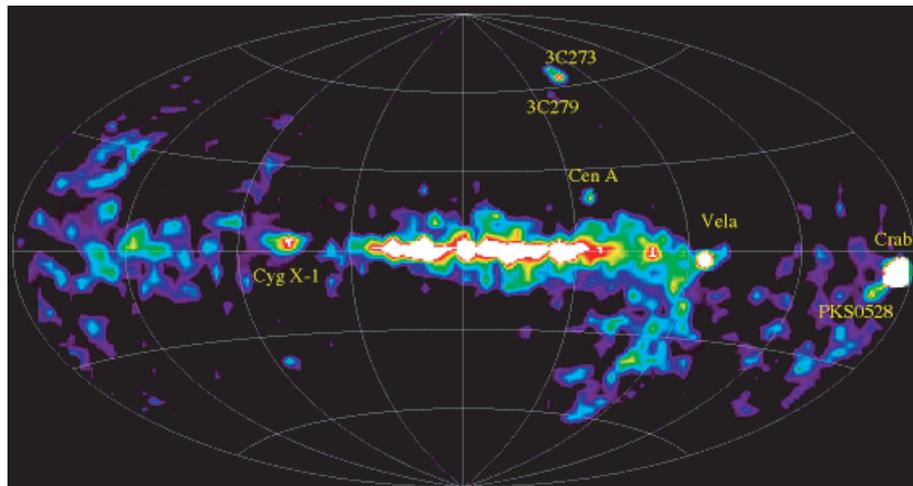


FIGURE 76 Les rayons X dans le ciel nocturne, entre 1 et 30 MeV. (NASA)

QUE VOYONS-NOUS LA NUIT ?

L'astrophysique nous conduit à une étrange conclusion concernant la matière, quelque peu différente de la manière de réfléchir que nous avons eue en physique classique : *la matière observée dans le ciel se trouve dans des nuages*. Les *nuages* sont des systèmes dans lesquels la densité de matière diminue avec la distance au centre, n'ayant ni frontière précise ni taille déterminée. La plupart des objets astrophysiques sont mieux décrits comme étant des nuages.

La Terre aussi est un nuage si nous prenons en compte, comme partie intégrante, son atmosphère, sa magnétosphère et l'anneau de poussières qui l'entourent. Le Soleil est un nuage. Pour commencer, c'est déjà une boule de gaz, mais il ressemble encore plus

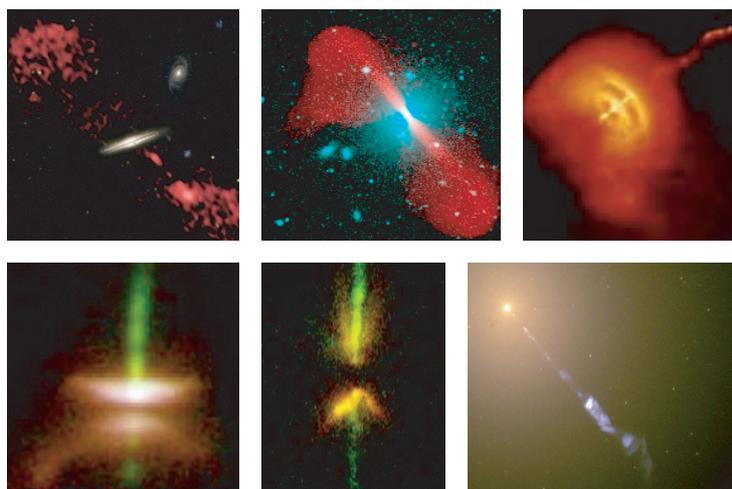


FIGURE 77 Des nuages en rotation émettant des jets le long de leurs axes. En haut : une image composite (visible et infrarouge) de la galaxie 0313-192, la galaxie 3C296 et le pulsar de Vela. En bas : l'étoile HH30 en formation, l'étoile DG Tauri B en formation, et un jet de trou noir issu de la galaxie M87. (Tous NASA)

à un nuage si nous prenons en considération ses protubérances, son héliosphère, le vent solaire qu'il provoque et sa magnétosphère. Le Système solaire est un nuage si nous considérons sa cohorte de comètes, sa ceinture d'astéroïdes et son nuage de gaz interstellaire. La Galaxie est un nuage si nous considérons sa distribution de matière et son halo de rayonnements cosmiques qui l'entourent. En fait, même les gens peuvent être considérés comme des nuages, puisque chaque personne est entourée de gaz, de petites particules de poussière près de la peau, de vapeur exhalée, etc.

Réf. 169

Dans l'Univers, presque tous les nuages sont des nuages de plasma. Un *plasma* est un gaz ionisé, tel que le feu, l'éclair, l'intérieur des tubes de néon, ou le Soleil. Au moins 99,9 % de toute la matière de l'Univers se trouve sous la forme de nuages de plasma. Seul un très faible pourcentage existe à l'état solide ou liquide, tels les grille-pains, les métros ou leurs usagers.

Les nuages dans l'Univers possèdent certaines propriétés en commun. Premièrement, les nuages observés dans l'Univers, lorsqu'ils ne sont pas perturbés par des collisions ou d'autres interactions provenant d'objets voisins, sont en *rotation*. La majorité des nuages sont par conséquent aplatis et prennent la forme de disques. Deuxièmement, dans nombre de nuages en rotation, la matière est en train de chuter vers le centre : la plupart des nuages sont des *disques d'accrétion*. Finalement, les disques d'accrétion non perturbés émettent généralement quelque chose le long de leur axe de rotation : ils accusent la présence de *jets*. Cette structure fondamentale de nuage a été observée pour des étoiles jeunes, pour des pulsars, pour des galaxies, pour des quasars et pour une foule d'autres systèmes. La Figure 77 en donne quelques exemples. (Le Soleil possède-t-il un jet ? La Voie lactée en a-t-elle un ? Jusqu'à présent, nous n'en avons détecté aucun – le champ est libre pour des découvertes futures.)

Défi 299 r

En résumé, la nuit nous observons principalement des nuages de plasma aplatis en rotation émettant des jets suivant leurs axes. Une grande partie de l'astronomie et de

Réf. 170 l'astrophysique collecte des renseignements à leur sujet. Un tour d'horizon concernant ces observations en est donné dans le [Tableau 4](#).

TABLEAU 4 Quelques observations sur l'Univers.

ASPECT	PRINCIPALES PROPRIÉTÉS	VALEUR
Phénomènes		
formation de galaxie	observée par Hubble	à maintes reprises
	événement déclencheur	inconnu
collisions galactiques	quantité de mouvement	10^{45} à 10^{47} kg m/s
formation stellaire	effondrement de nuage	donne naissance à des étoiles de 0,04 à 200 masses solaires
	fréquence	entre 0 et 1 000 masses solaires par an par galaxie, environ 1 masse solaire dans la Voie lactée
novae	nouvelles étoiles brillantes,	$L < 10^{31}$ W
	bulle d'éjection	$R \approx t \cdot c/100$
supernovae	nouvelles étoiles éclatantes,	$L < 10^{36}$ W
	taux	1 à 5 par galaxie pour 1 000 a
hypernovae	sursauts optiques	$L > 10^{37}$ W
sursauts gamma	luminosité	L allant jusqu'à 10^{45} W, environ 1 % de la luminosité de tout l'Univers visible
	énergie	env. 10^{46} J
	durée	env. 0,015 à 1 000 s
	quantité observée	env. 2 par jour
sources radio	émission d'ondes radio	10^{33} à 10^{38} W
sources de rayons X	émission de rayons X	10^{23} à 10^{34} W
rayons cosmiques	énergie	de 1 eV à 10^{22} eV
effet de lentille gravitationnelle	courbure de la lumière	angles allant jusqu'à 10^{-4} "
comètes	réapparition, volatilisation	période typique 50 a, longévité typique de la visibilité 2 ka, durée de vie typique 100 ka
météorites	âge	jusqu'à $4,57 \cdot 10^9$ a
Composantes observées		
espace intergalactique	masse volumique	env. 10^{-26} kg/m ³
quasars	décalage vers le rouge	jusqu'à $z = 6$
	luminosité	$L = 10^{40}$ W, à peu près la même qu'une galaxie
superamas de galaxies	nombre de galaxies	env. 10^8 à l'intérieur de notre horizon
notre superamas local	nombre de galaxies	environ 4 000

ASPECT	PRINCIPALES PROPRIÉTÉS	VALEUR
groupes et amas de galaxies	taille	100 Zm
	nombre de galaxies	entre une douzaine et 100 (groupe) entre 100 et 1 000 (amas)
notre groupe local galaxies	nombre de galaxies	30
	taille	0,5 à 2 Zm
	nombre	env. 10^{11} dans l'horizon
	contenant	10 à 400 amas globulaires
notre galaxie	contenant	typiquement 10^{11} étoiles chacune
	contenant	typiquement un trou noir supermassif et plusieurs de masses intermédiaires
	diamètre	1,0(0,1) Zm
	masse	10^{42} kg ou $5 \cdot 10^{11}$ masses solaires Réf. 171
	vitesse	600 km/s en direction de l'Hydre-Centaure
	contenant	environ 30 000 pulsars Réf. 172
amas globulaires (ex. M15)	contenant	100 amas globulaires ayant chacun 1 million d'étoiles
	âge	des milliers d'étoiles, un trou noir de masse intermédiaire jusqu'à 12 Ga (plus anciens objets connus)
nébuleuses, nuages	composition	poussière, oxygène, hydrogène
notre nuage interstellaire local	taille	20 années-lumière
systèmes stellaires	composition	hydrogène atomique à 7 500 K
	types	étoiles binaires gravitantes, plus de 70 étoiles entourées par des naines brunes, plusieurs systèmes planétaires
notre Système solaire	taille	2 années-lumière (nuage d'Oort)
	vitesse	368 km/s du Verseau vers le Lion
étoiles	masse	jusqu'à 130 masses solaires (sauf lorsque des étoiles fusionnent) Réf. 173
	géantes et supergéantes	jusqu'à 1 Tm
	étoiles de la séquence principale	
	naines brunes	petite masse moins de 0,072 masse solaire
	naines L	température faible moins de 2 800 K Réf. 174
	naines T	température faible 1 200 à 2 800 K
	naines blanches	température faible 900 à 1 100 K
		petit rayon $r \approx 5\,000$ km
		température élevée refroidit de 100 000 jusqu'à 5 000 K
	étoiles à neutrons	densité nucléaire $\rho \approx 10^{17}$ kg/m ³

A S P E C T	P R I N C I P A L E S P R O P R I É T É S	V A L E U R
	taille « minuscule »	$r \approx 10 \text{ km}$
sources de jet		
objets compacts centraux		
sursauteurs X	émission de rayons X	
pulsars	émission radio périodique	
magnétars	masse champs magnétiques hyper-puissants	jusqu'à environ 25 masses solaires jusqu'à 10^{11} T et plus Réf. 175
(sursauteurs gamma mou, pulsars X irréguliers)		
trous noirs	masse rayon de l'horizon	plus de 25 masses solaires Réf. 176 $r = 2GM/c^2$, masse observée variant de 1 à 100 millions de masses solaires
Propriétés générales		
horizon cosmique	distance	env. $10^{26} \text{ m} = 100 \text{ Ym}$
expansion cosmique	constante de Hubble	$71(4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ou $2,3(2) \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$
« âge » de l'Univers		$13,7(2) \text{ Ga}$
vide	densité d'énergie	$0,5 \text{ nJ/m}^3$ ou $\Omega_\Lambda = 0,73$ pour $k = 0$ aucune preuve de dépendance temporelle
forme à grande échelle	courbure de l'espace topologie	$k \approx \Omega_K = 0$ Page 215 simple dans notre environnement galactique, inconnue aux grandes échelles
dimensions	nombre	3 pour l'espace, 1 pour le temps, aux énergies faibles et modérées
matière	densité	$2 \text{ à } 11 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ ou 1 à 6 atomes d'hydrogène par mètre cube $\Omega_M = 0,25$
baryons	densité	$\Omega_b = 0,04$, un sixième de la précédente (incluse dans Ω_M)
matière noire	densité	$\Omega_{MN} = 0,21$ (incluse dans Ω_M), inconnue
énergie sombre	densité	$\Omega_{ES} = 0,75$, inconnue
photons	quantité volumique densité d'énergie	$4 \text{ à } 5 \cdot 10^8 / \text{m}^3 = 1,7 \text{ à } 2,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$ $\Omega_R = 4,6 \cdot 10^{-5}$
neutrinos	densité d'énergie	Ω_ν , inconnue
température moyenne	photons neutrinos	$2,725(2) \text{ K}$ non mesurée, valeur prédite de 2 K
fluctuations	anisotropie des photons amplitude de densité	$\Delta T/T = 1 \cdot 10^{-5}$ $A = 0,8(1)$



FIGURE 78 L'Univers est rempli de galaxies – cette photographie montre l'amas de Persée. (NASA)

ASPECT	PRINCIPALES PROPRIÉTÉS	VALEUR
	indice spectral	$n = 0,97(3)$
	rapport tensoriel/scalaire	$r < 0,53$ avec 95 % de certitude
profondeur optique de l'ionisation		$\tau = 0,15(7)$
découplage		$z = 1\,100$

Mais puisque nous sommes en train de parler de ce que nous voyons dans le ciel, nous devons élucider un problème plus général.

QU'EST-CE QUE L'UNIVERS ?

« Je suis abasourdi par le nombre de personnes qui veulent « connaître » l'Univers alors qu'il est déjà suffisamment difficile de se repérer dans Chinatown. »

Woody Allen

Le terme univers implique la rotation. L'Univers est ce qui tourne autour de nous la nuit. Pour un physicien, il existe au moins trois définitions distinctes du mot « Univers » :

- L'Univers (*visible*) représente la totalité de la masse et de l'énergie observables. Cela intègre tout ce qui est localisé à l'intérieur de l'horizon cosmologique. Puisque l'horizon est en train de s'éloigner de nous, la quantité de la masse et de l'énergie observables est en constante augmentation. Le contenu de l'expression « Univers visible »

n'est donc pas figé dans le temps. (Quelle est la source de cette augmentation ? Nous reviendrons sur cette question plus tard.)

- L'Univers (*présumé*) représente la totalité de la masse et de l'énergie, *incluant* toutes celles qui ne sont pas visibles. De nombreux ouvrages sur la relativité générale stipulent qu'il existe certainement là de la matière ou de l'énergie située au-delà des frontières de l'observation. Nous expliquerons l'origine de cette conviction plus bas.
- L'Univers (*complet*) constitue la somme de la matière et de l'énergie *ainsi que* l'espace-temps lui-même.

On fait souvent l'amalgame entre ces définitions dans les débats physiques et philosophiques. Il n'existe *aucun* consensus unanimement accepté sur ces termes, ainsi nous devons être prudents. Dans ce livre, lorsque nous emploierons le mot « Univers », nous sous-entendrons uniquement la *dernière* définition. Nous découvrirons à plusieurs reprises que, sans une distinction claire et nette entre ces définitions, l'achèvement de l'ascension de la Montagne Mouvement deviendra impossible. (Par exemple, la quantité de matière et d'énergie contenue dans l'Univers complet est-elle la même que dans l'Univers visible ?)

Défi 300 pe

Remarquez que la « taille » de l'Univers visible ou, mieux, la distance à son horizon est une quantité qui *peut* être imaginée. La valeur de 10^{26} m ne surpasse pas toute imagination. Si nous prenons tout le fer qui se trouve dans le noyau terrestre et que nous le forgeons en un fil métallique qui s'étend jusqu'au bout de l'Univers visible, quelle épaisseur devrait-il avoir ? La réponse vous surprendra sans aucun doute. Aussi, le contenu de l'Univers est-il manifestement fini. Il y a à peu près autant de *galaxies* visibles dans l'Univers que de grains dans un mètre cube de sable. Pour prolonger cette comparaison, pouvez-vous déduire de quelle quantité d'espace vous auriez besoin pour déposer toute la farine que vous auriez si chaque petite particule de cette poudre représentait une étoile ?

Défi 301 pe

Défi 302 pe

LA COULEUR ET LE MOUVEMENT DES ÉTOILES

« Ἡ τοι μὲν πρότιστα Ἐἰός γένετ' ...* »
Hésiode, *Théogonie*.

Manifestement, l'Univers est rempli de mouvement. Pour s'en faire une petite expérience, il est utile de mesurer la vitesse et la position du plus grand nombre possible d'objets. Au cours du vingtième siècle, une foule considérable d'observations fut obtenue sur les étoiles et les galaxies. (Pouvez-vous imaginer comment la distance et la vitesse sont déterminées ?) Cette profusion de données expérimentales peut être synthétisée en deux points.

Défi 303 s

Tout d'abord, aux grandes échelles, c'est-à-dire en moyenne sur environ cinq cents millions d'années-lumière, la densité de la matière dans l'Univers est *homogène* et *isotrope*. Évidemment, à des échelles plus petites, des inhomogénéités existent, telles que des galaxies, ou grumeaux. Notre galaxie par exemple n'est ni isotrope ni homogène. Mais

* « Au commencement était le Chaos... ». La *Théogonie*, œuvre probable du poète mythique Hésiode, fut finalisée autour de 700 av. J.-C. Elle peut être lue en anglais et en grec sur le site www.perseus.tufts.edu, et en français sur <http://remacle.org/bloodwolf/poetes/falc/hesiod/theogonie.htm>. Cette célèbre sentence est tirée du vers 117.

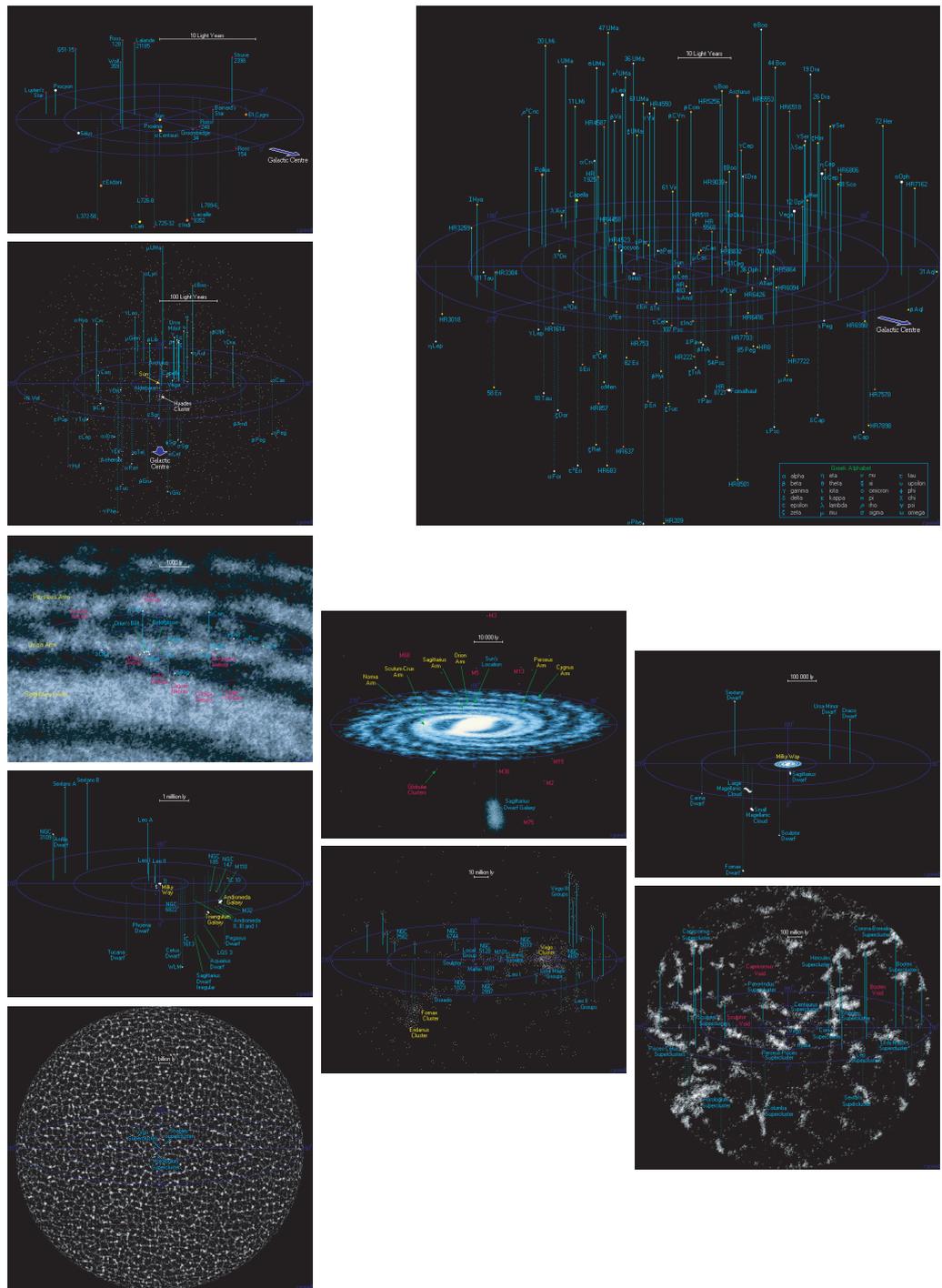


FIGURE 79 Un atlas de notre environnement cosmique : les illustrations ont une échelle de 12,5, 50, 250, 5 000, 50 000, 500 000, 5 millions, 100 millions, 1 milliard et 14 milliards d'années-lumière. (© Richard Powell, www.atlasoftheuniverse.com)

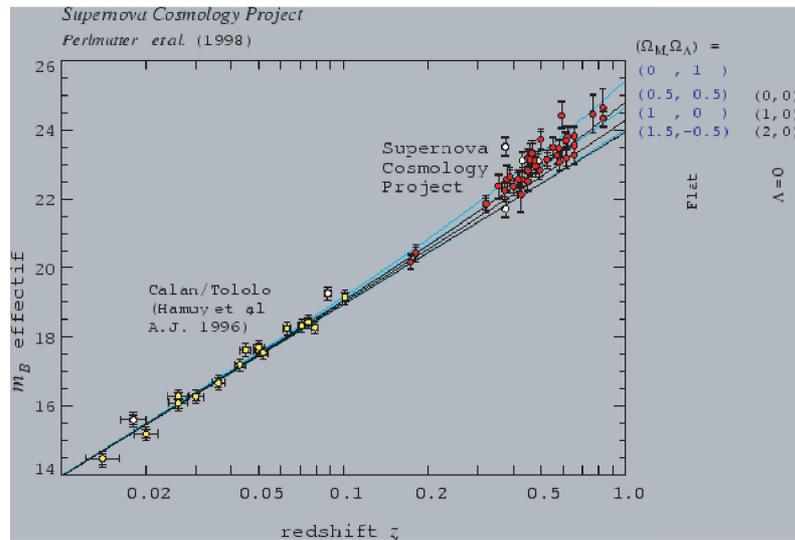


FIGURE 80 La relation entre la distance et la vitesse stellaire.

Réf. 177 aux grandes échelles les différences s'estompent. Cette homogénéité à grande échelle de la distribution de la matière est souvent dénommée le *principe cosmologique*.

Réf. 178 Le deuxième point concernant l'Univers est encore plus important. Dans les années 1920, de manière indépendante, Carl Wirtz, Knut Lundmark et Gustaf Stromberg ont montré que, de façon générale, les galaxies s'éloignent de la Terre, et plus elles sont éloignées, plus elles s'éloignent vite. Il y a quelques exceptions pour des galaxies proches, telle la nébuleuse d'Andromède elle-même, mais globalement la vitesse de fuite v d'un objet augmente avec la distance d . En 1929, l'astronome américain Edwin Hubble* publia la première mesure de la relation entre la vitesse et la distance. Bien qu'il fit usage d'échelles de longueur incorrectes, il trouva une relation

$$v = H d , \quad (241)$$

où la constante de proportionnalité H est aujourd'hui appelée la *constante de Hubble*. Un graphique de cette relation en est donné sur la Figure 80. Il s'avère que la constante de Hubble possède en ce moment une valeur d'environ $71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. (La propre valeur de Hubble était si éloignée de cette valeur qu'elle n'est jamais citée.) Par exemple, une étoile située à une distance de 2 Mpc^{**} s'éloigne de la Terre avec une vitesse comprise autour de 142 km/s , et cette valeur est proportionnellement plus élevée pour des étoiles encore plus éloignées.

Défi 304 pe En fait, la découverte de Wirtz, Lundmark et Stromberg implique que chaque galaxie s'éloigne de toutes les autres. (Pourquoi ?) En d'autres termes, la matière dans l'Univers est en *expansion*. L'échelle de cette expansion et les dimensions colossales concernées

* Edwin Powell Hubble (1889–1953) fut un important astronome américain. Après avoir été athlète puis avoir obtenu ses diplômes universitaires en droit, il retourna à sa passion de jeunesse pour les astres. Il démontra finalement la conjecture d'Emmanuel Kant de 1755 qui stipulait que la nébuleuse d'Andromède est une galaxie à part entière. Il montra ainsi que la Voie lactée n'est qu'une minuscule portion de l'Univers.

Page 289 ** Un mégaparsec ou Mpc représente une distance de $30,8 \text{ Zm}$.

sont prodigieuses. Le mouvement des milliers de millions de groupes de galaxies dans le ciel est décrit par l'unique équation (241) ! Certains écarts sont observés pour des galaxies proches, comme mentionné ci-dessus, et pour des galaxies lointaines, comme nous allons le voir bientôt.

Le principe cosmologique et l'expansion, pris ensemble, entraînent que l'Univers ne peut pas avoir existé avant l'instant où il avait une taille évanescence : l'Univers possède donc un *âge fini*. Combinée avec les équations d'évolution, comme il sera expliqué plus en détail ci-après, la constante de Hubble indique que son âge serait situé autour de 13 700 millions d'années. L'expansion signifie également que l'Univers possède un *horizon*, c'est-à-dire une distance maximale finie pour les sources dont les signaux peuvent parvenir à la Terre. Les signaux provenant des sources situées au-delà de l'horizon ne peuvent pas nous atteindre.

Puisque l'Univers est en expansion, il était beaucoup plus petit par le passé et donc beaucoup plus dense qu'il ne l'est actuellement. Il se révèle qu'il était également plus chaud. George Gamow* annonça en 1948 que, puisque des objets chauds rayonnent de la lumière, le ciel ne peut pas être parfaitement noir la nuit, mais doit être rempli d'un rayonnement de corps noir émis lorsqu'il était « en chaleur ». Ce rayonnement, appelé *rayonnement de fond diffus cosmologique*, doit s'être refroidi du fait de l'expansion de l'Univers. (Pouvez-vous entériner ce point ?) Malgré diverses prédictions similaires dues à d'autres initiateurs, dans un de ces exemples les plus célèbres de communication scientifique inefficace, le rayonnement fut découvert bien plus tard, par deux chercheurs complètement ignorants dans ce domaine de recherche. Un célèbre article de 1964 de Doroshkevich et Novikov avait même établi que l'antenne utilisée par les découvreurs ultérieurs (novices) était le meilleur dispositif pour débusquer ce rayonnement ! En tout cas, ce n'est qu'en 1965 qu'Arno Penzias et Robert Wilson découvrirent le signal. Ce fut lors d'une des plus admirables découvertes de la science, pour laquelle ils reçurent plus tard tous les deux le prix Nobel de physique. Il apparaît que ce rayonnement est décrit par le rayonnement de corps noir d'un corps ayant une température de 2,7 K. Cela découle de la loi du corps noir, avec une précision d'environ une partie pour 10⁴.

Mais, excepté l'expansion et le refroidissement, les quatorze milliards d'années qui se sont écoulées ont également engendré quelques autres événements marquants.

LES ÉTOILES BRILLEN-ELLES TOUTES LES NUITS ?

« Les étoiles ne brillent-elles pas merveilleusement ? Je suis l'unique personne dans le monde qui sait pourquoi il en est ainsi. »
Friedrich (Fritz) Houtermans (1903–1966)

Les astres semblent avoir toujours existé. En réalité, de temps en temps, une nouvelle étoile apparaît dans le ciel : c'est une *nova*. La désignation est latine et signifie « nouveau ». Des novae particulièrement brillantes sont appelées *supernovae*. Les novae et les

* George Gamow (n. Odessa 1904, d. Boulder 1968), physicien russo-américain, expliqua la radioactivité alpha comme un effet tunnel et prédit l'existence du fond diffus cosmologique micro-onde. Il rédigea les premiers ouvrages scientifiques de vulgarisation à succès, tels que *Un, deux... l'infini* et la série des *Mr. Thompkins*, qui furent imités plus tard par de nombreux autres auteurs.

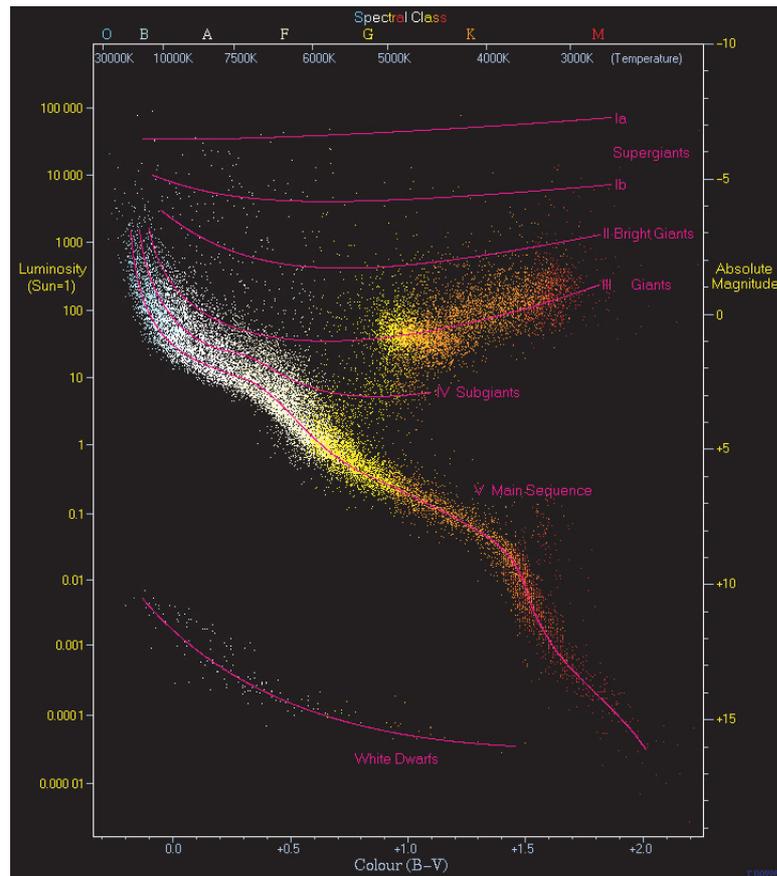


FIGURE 81 Le diagramme de Hertzsprung–Russell. (© Richard Powell)

phénomènes analogues nous rappellent que les astres vivent généralement beaucoup plus longtemps que les êtres humains, mais comme nous ils naissent et meurent.

Il apparaît que nous pouvons placer toutes les étoiles sur ce que nous appelons le *diagramme de Hertzsprung–Russell*. Ce diagramme, crucial dans chaque ouvrage d'astronomie, est représenté sur la [Figure 81](#). C'est un magnifique exemple d'une méthode courante utilisée par les astrophysiciens : amasser des statistiques sur de nombreux exemplaires d'un type d'objet en particulier, puis pouvoir en déduire le cycle de vie de cet objet, bien que leur durée de vie soit considérablement plus importante que celle d'un homme. Par exemple, il est possible, par une utilisation intelligente de ce diagramme, d'estimer l'âge des amas stellaires, et ainsi d'aboutir à un âge minimum pour l'Univers. Le résultat est estimé à treize milliards d'années environ.

Une évidence saute aux yeux : puisque les étoiles brillent, elles *meurent* également. Les étoiles ne peuvent être observées que si elles sont nées mais n'ont pas encore disparu au moment de l'émission de lumière*. Cela conduit à des restrictions sur leur visibilité, particulièrement pour des décalages vers le rouge importants. En réalité, les télescopes

* En fait, l'auteur a voulu dire que les étoiles que l'on observe sont celles qui étaient encore vivantes quand elles ont émis la lumière, qui parvient sur la Terre au moment où on les observe. Mais, bien sûr, une étoile peut être déjà morte quand on la voit. [N.D.T.]

modernes peuvent scruter des lieux (et des instants) si éloignés de l'instant présent qu'ils ne contiennent aucune étoile. À ces distances, nous ne pouvons observer que des quasars. Ce ne sont pas des étoiles, mais des systèmes beaucoup plus massifs et lumineux. Leur structure précise est encore étudiée par les astrophysiciens.

D'autre part, puisque les étoiles brillent, elles ont dû être *façonnées* d'une certaine manière. Les détails captivants de leur formation à partir de nuages de poussière représentent une partie majeure de l'astrophysique, mais ne sera pas explorée ici.

Nous n'avons pas encore la réponse complète à notre question. Après tout, pourquoi les étoiles brillent-elles ? Manifestement, elles brillent parce qu'elles sont chaudes. Elles sont chaudes à cause des réactions nucléaires qui se produisent dans leur cœur. Nous discuterons de ces processus plus en détail dans le chapitre sur les noyaux.

Page ??

UNE BRÈVE HISTOIRE DE L'UNIVERS

Réf. 182

« Anima scintilla stellaris essentiae*.
Héraclite d'Éphèse (v. 540 à v. 480 av. J.-C.) »

Réf. 183

Les aventures que l'Univers a vécues ou, mieux, les péripéties que la matière et le rayonnement qui le composent ont expérimentées sont résumées dans le [Tableau 5](#). Les étapes qui ne sont pas encore précisées seront étudiées dans la théorie quantique. Ce tableau chronologique possède des applications qu'aucun physicien théoricien n'aurait imaginées. La séquence est si élégante et si impressionnante que, de nos jours, elle est utilisée dans certaines psychothérapies pour rappeler aux gens toute l'histoire qui a eu lieu avant leur existence et pour leur faire apprécier l'importance de leur propre valeur. Profitez-en vous aussi.

TABLEAU 5 Une brève histoire de l'Univers.

TEMPS DEPUIS AUJOURD'HUI ^a	TEMPS DEPUIS LE BIG BANG ^b	ÉVÉNEMENT	TEMPÉRATURE
$\approx 14 \cdot 10^9$ a	$\approx t_{PI}$ ^b	Temps, espace, matière et conditions initiales indéterminés	10^{32} K $\approx T_{PI}$
$13 \cdot 10^9$ a	v. $800 t_{PI}$ $\approx 10^{-42}$ s	L'espace-temps se distingue de la matière et du rayonnement, conditions initiales déterminées	10^{30} K
	10^{-35} s à 10^{-32} s	Début de l' inflation & de l' époque GUT , les interactions forte et électrofaible divergent	$5 \cdot 10^{26}$ K
	10^{-12} s	Les antiquarks s'annihilent, les interactions faible et électromagnétique se séparent	10^{15} K
	$2 \cdot 10^{-6}$ s	Les quarks sont confinés dans les hadrons, l'Univers est un plasma	10^{13} K
		Annihilation des positrons	
	0,3 s	L'Univers devient transparent pour les neutrinos	10^{10} K
	quelques secondes	Nucléosynthèse : les <i>noyaux</i> D, ^4He , ^3He et ^7Li se forment, le rayonnement domine toujours	10^9 K

* « L'âme est un éclat de l'essence des étoiles. »

TEMPS DEPUIS AUJOUR- D'HUI ^a	TEMPS DEPUIS LE BIG BANG ^b	ÉVÉNEMENT	TEMPÉ- RATURE
	2 500 a	La domination de la matière commence, les fluctuations de densité s'intensifient	75 000 K
$z = 1$	380 000 a	Recombinaison : durant ces dernières étapes du Big Bang, les <i>atomes</i> de H, He et Li se forment, et l'Univers devient « transparent » pour la lumière, car la matière et le rayonnement se découplent, c'est-à-dire qu'ils acquièrent des températures différentes, le ciel « nocturne » commence à devenir de plus en plus sombre Le ciel est presque noir, sauf pour le rayonnement de corps noir	3 000 K $T_y = T_o(1+z)$
$z = 10$ à 30		Formation des galaxies	
$z = 6$		Les plus vieux objets observés jusqu'à présent	
$z = 5$		Formation des amas de galaxies	
$z = 3$	10^6 a	La première génération d'étoiles (population II) est formée, démarrage de la fusion de l'hydrogène, la fusion de l'hélium produit le carbone, le silicium et l'oxygène	
	$2 \cdot 10^9$ a	Les premières étoiles explosent en supernovae ^c , le fer est produit	
$z = 1$	$3 \cdot 10^9$ a	La deuxième génération d'étoiles (population I) apparaît et les explosions ultérieures de supernovae issues des étoiles en fin de vie forment le reste des éléments (Fe, Se, etc.) dont nous sommes constitués et les dispersent dans la galaxie	
	$4,7 \cdot 10^9$ a	Nuages primitifs, nés des vestiges de ces explosions, effondrements, formation du Soleil	
	$4,6 \cdot 10^9$ a	Formation de la Terre et des autres planètes : début de l'Azoïque	
	$4,3 \cdot 10^9$ a	Les cratères se forment sur les planètes	
	$4,0 \cdot 10^9$ a	La Lune se forme à partir de la matière éjectée au cours de la collision d'un gros astéroïde avec la Terre, encore liquide	
	$4,0 \cdot 10^9$ a	Début de l'éon archéen (Archaezoicum) : le bombardement spatial cesse, la croûte terrestre se solidifie, les plus anciens minerais se forment, l'eau se condense	
	$3,5 \cdot 10^9$ a	La vie (microscopique) unicellulaire apparaît, les stromatolithes se forment	
	$2,5 \cdot 10^9$ a	Début de l'éon protérozoïque (« âge de la première vie ») : l'atmosphère devient riche en oxygène grâce à l'activité des micro-organismes Réf. 184	

TEMPS DEPUIS AUJOUR- D'HUI ^a	TEMPS DEPUIS LE BIG BANG ^b	ÉVÉNEMENT	TEMPÉ- RATURE
1 · 10 ⁹ a		La vie multicellulaire, macroscopique apparaît	
800 · 10 ⁶ a		La Terre est entièrement recouverte de glace pour la première fois (pour une raison toujours inconnue) Réf. 185	
600 à		La Terre est entièrement recouverte de glace pour la dernière fois	
540 · 10 ⁶ a		L'ère paléozoïque (Palaeozoicum, « âge de la vie ancienne ») commence, après une gigantesque période glaciaire : les animaux apparaissent, les plus anciens fossiles (avec 540(5) début des périodes Cambrien, 495(5) Ordovicien, 440(5) Silurien, 417(5) Dévonien, 354(5) Carbonifère et 292(5) Permien)	
450 · 10 ⁶ a		Les plantes terrestres apparaissent	
370 · 10 ⁶ a		Les arbres à bois apparaissent	
250(5) · 10 ⁶ a		L'ère mésozoïque (Mesozoicum, « âge de la vie moyenne », anciennement appelé ère secondaire) commence : la majorité des insectes et des autres formes de vie sont exterminés, les mammifères apparaissent (avec 250(5) début des périodes Trias, 205(4) Jurassique et 142(3) Crétacé)	
150 · 10 ⁶ a		Le continent de la Pangée se disloque en Laurasia et Gondwana	
150 · 10 ⁶ a		L'amas d'étoiles des Pléiades se forme	
150 · 10 ⁶ a		Les oiseaux apparaissent	
142(3) · 10 ⁶ a		La période glorieuse des dinosaures (Crétacé) débute	
100 · 10 ⁶ a		Début de la formation des Alpes, des Andes et des montagnes Rocheuses	
65,5 · 10 ⁶ a		L'ère cénozoïque (Caenozoicum, « âge de la nouvelle vie ») commence : les dinosaures disparaissent après qu'un astéroïde a frappé la Terre au Yucatán, les primates apparaissent (avec 65,5 début du Tertiaire, constitué de la période du Paléogène avec les époques Paléocène, 55,0 Éocène et 33,7 Oligocène, et de la période du Néogène avec les époques 23,8 Miocène et 5,32 Pliocène, puis 1,81 la période du Quaternaire avec les époques du Pléistocène (ou Diluvium) et 0,01 Holocène (ou Alluvium))	
50 · 10 ⁶ a		Les grands mammifères apparaissent	
7(1) · 10 ⁶ a		Les hominidés apparaissent	

TEMPS DEPUIS AUJOUR- D'HUI ^a	TEMPS DEPUIS LE BIG BANG ^b	ÉVÉNEMENT	TEMPÉ- RATURE
3 · 10 ⁶ a		Explosions des supernovae, avec les conséquences que l'on sait : rayonnement cosmique plus intense, taux de formation des nuages plus élevé, la Terre se refroidit vigoureusement, forte pression évolutionnaire sur les hominidés et, comme conséquence, le genre Homo apparaît Réf. 186	
500 000 a		Formation des étoiles les plus jeunes dans la Galaxie	
500 000 a		Homo sapiens apparaît	
100 000 a		Début de la dernière période glaciaire	
90 000 a		Homo sapiens sapiens apparaît	
11 800 a		Fin de la dernière période glaciaire, début de l'Holocène	
6 000 a		Premiers textes écrits	
2 500 a		La physique naît	
500 a		Consommation du café, usage du crayon et naissance de la physique moderne	
200 a		Début de l'usage de l'électricité	
100 a		Einstein publie	
10 à 120 a		Vous êtes un être unicellulaire	
présent	v. 14 · 10 ⁹ a	Vous êtes en train de lire ce livre	$T_\gamma = 2,73 \text{ K},$ $T_\nu \approx 1,6 \text{ K},$ $T_b \approx 0 \text{ K}$
futur		Vous aimez la vie ; pour savoir précisément pourquoi, lisez la page 154	

a. La coordonnée temporelle utilisée ici est celle donnée par le système de coordonnées défini par le rayonnement de fond diffus micro-onde, comme expliqué à la [page 217](#). Une année est abrégée « a » (du latin « annus »). Les marges d'erreur dans la précision des derniers chiffres sont données entre parenthèses.

b. Cette quantité n'est pas exactement définie puisque le Big Bang ne constitue pas un événement de l'espace-temps. Nous en dirons plus à ce sujet à la [page ??](#).

c. L'histoire des atomes sur la Terre montre que nous sommes constitués des résidus d'une supernova. Nous sommes vraiment faits de *poussières d'étoiles*.

L'échelle des temps géologiques est celle donnée par la Commission internationale de stratigraphie, les temps sont mesurés par le truchement de méthodes de datation radiométriques (dites « par radiochronologie », c'est-à-dire en utilisant la radioactivité [N.D.T.]).

Malgré sa longueur et son intérêt, ce tableau possède ses limites. Par exemple, que s'est-il passé partout ailleurs dans le dernier milliard d'années ? Il reste encore plein de choses à écrire pour lesquelles nous ne savons presque rien. Pour des raisons évidentes, les investigations ont été plutôt centrées sur la Terre.

La recherche en astrophysique s'est focalisée sur la découverte et la compréhension de tous les phénomènes observés dans les cieux. Nous abandonnons ici un large pan de ce domaine palpitant puisque, du reste, nous voulons nous concentrer sur le mouvement.

De manière intéressante, la relativité générale nous permet de trouver une explication pour un grand nombre d'observations globales sur le mouvement dans l'Univers.

L'HISTOIRE DE L'ESPACE-TEMPS

« Un grand nombre de lapins s'enfuient d'une position centrale, dans diverses directions, tous avec la même vitesse. Durant la course, un seul lapin tourne la tête, et fait une observation renversante. Que voit-il ? »

Défi 306 s

Les données indiquant que l'Univers est de toutes parts saupoudré d'étoiles conduisent à une conclusion élémentaire : l'Univers ne peut pas être statique. La gravitation modifie constamment les distances entre les corps, la seule exception étant les orbites circulaires. La gravitation modifie également les distances moyennes entre les corps : elle tente toujours de faire effondrer les nuages. Le plus grand nuage parmi tous, celui formé par toute la matière dans l'Univers, doit par conséquent ou être en train de s'effondrer, ou être encore en expansion.

Réf. 187

Le premier qui osa esquisser cette conclusion fut Aleksander Friedmann*. En 1922 il déduisit l'évolution détaillée de l'Univers dans le cas d'une distribution de masse homogène et isotrope. Son calcul est un exemple classique de raisonnement simple mais puissant. Pour un Univers qui est homogène et isotrope en chaque point, l'élément linéaire est donné par

Défi 307 pe

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (242)$$

et la matière est décrite par une masse volumique ρ_M et une pression p_M . En insérant tout cela dans les équations du champ, nous obtenons deux équations

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho_M + \frac{\Lambda}{3} \quad \text{et} \quad (243)$$

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_M + 3p_M)a + \frac{\Lambda}{3}a \quad (244)$$

qui impliquent

$$\dot{\rho}_M = -3\frac{\dot{a}}{a}(\rho_M + p_M). \quad (245)$$

À l'instant présent t_0 , la pression de la matière est négligeable. (Dans la suite, l'indice 0 se réfère à l'instant présent.) Dans ce cas, l'expression $\rho_M a^3$ est constante au cours du

* Aleksander Aleksandrowitsch Friedmann (1888–1925) était un physicien russe qui avait prédit l'expansion de l'Univers. Suite à son décès prématuré du typhus, son travail demeura principalement inconnu jusqu'à ce que Georges A. Lemaître (n. Charleroi 1894, d. Louvain 1966), prêtre belge et cosmologiste, l'ait compris et ait développé son travail en 1927, se concentrant, comme l'exigeait sa tâche, sur des solutions dotées d'une singularité initiale. Lemaître est l'un de ceux qui ont promulgué l'idée (fausse !) que le Big Bang est un « événement » de la « création » et il a réussi à en convaincre toute la profession. Les solutions de Friedmann-Lemaître sont souvent incorrectement baptisées d'après deux autres physiciens, qui les étudièrent une nouvelle fois bien plus tard, en 1935 et 1936, à savoir H.P. Robertson et A.G. Walker.

temps.

Les équations (243) et (244) ne dépendent que de deux constantes de la nature : la constante gravitationnelle G , associée à la force ou puissance maximale dans la nature, et la constante cosmologique Λ , qui décrit la densité d'énergie du vide ou, si nous préférons, la force minimale dans la nature.

Avant que nous discussions de ces équations, précisons d'abord certains points concernant le vocabulaire utilisé. On a coutume d'exprimer toutes les masses volumiques en fonction de ce que nous appelons la *densité critique* ρ_c , donnée par

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx (8 \pm 2) \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \quad (246)$$

correspondant à environ 8, plus ou moins 2, atomes d'hydrogène par mètre cube. Sur Terre, nous appellerions cette valeur un *vide* extrêmement poussé. Voilà à quoi ressemblent globalement les différences qui existent entre la vie quotidienne et l'Univers tout entier. Dans tous les cas, la densité critique caractérise une distribution de matière conduisant à une évolution de l'Univers située juste à la frontière entre l'expansion perpétuelle et l'effondrement. En fait, cette densité est critique uniquement dans le cas d'une constante cosmologique *nulle*, et conduit à une évolution que nous qualifions de *limite*. Malgré cette restriction, le terme est maintenant employé dans cette expression également pour toutes les autres situations. Nous parlons donc de masses volumiques sans dimensions Ω_M définies comme

$$\Omega_M = \rho_0 / \rho_c . \quad (247)$$

La constante cosmologique peut également être reliée à cette densité critique en posant

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G \rho_c} = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} . \quad (248)$$

Un troisième paramètre sans dimension Ω_K décrit la courbure de l'espace. Il est défini en fonction du rayon actuel de l'Univers R_0 et de la constante de courbure $k = \{1, -1, 0\}$ comme

$$\Omega_K = \frac{-k}{R_0^2 H_0^2} \quad (249)$$

et son signe est opposé à celui de la courbure k , Ω_K s'annulant pour une courbure nulle. Remarque qu'un Univers positivement courbé, s'il est homogène et isotrope, est nécessairement fermé et de volume fini. Un Univers plat ou négativement courbé ayant la même distribution de matière peut être ouvert, c'est-à-dire de volume infini, mais pas nécessairement. Il peut être simplement ou multiplesment connexe. Dans ces situations, la topologie n'est pas entièrement fixée par la courbure.

Le paramètre de Hubble de l'instant présent est défini par $H_0 = \dot{a}_0 / a_0$. À partir de l'équation (243), nous obtenons alors la relation majeure

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1 . \quad (250)$$

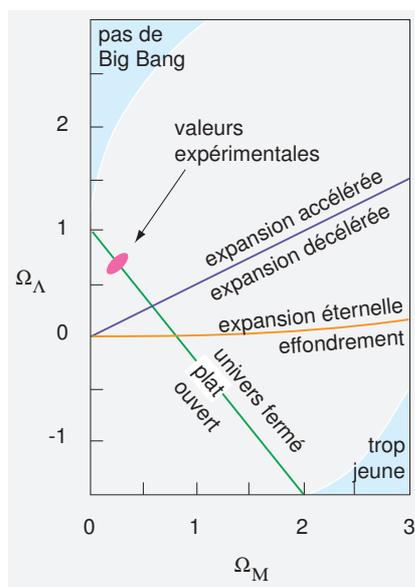


FIGURE 82 L'étendue des valeurs possibles pour les paramètres Ω et leurs conséquences.

Par le passé, alors que les données manquaient, les physiciens étaient partagés en deux camps : les *claustrophobes*, qui pensaient que $\Omega_K > 0$, et les *agoraphobes*, qui étaient persuadés que $\Omega_K < 0$. Nous allons bientôt donner plus de détails concernant les valeurs mesurées de ces paramètres. Le diagramme de la Figure 82 indique les intervalles les plus intéressants pour ces paramètres et les comportements correspondants de l'Univers.

Pour le paramètre de Hubble, les mesures les plus récentes donnent une valeur de

$$H_0 = 71 \pm 4 \text{ km/sMpc} = 2,3 \pm 2 \cdot 10^{-18} / \text{s} \quad (251)$$

ce qui correspond à un Univers âgé de $13,7 \pm 2$ milliards d'années. En d'autres termes, cet âge déduit de l'histoire de l'espace-temps s'accorde avec l'âge, donné plus haut, retrouvé à partir de l'histoire des astres.

Pour avoir une idée de la manière dont l'Univers évolue, on a coutume de faire appel à ce que nous appelons le *paramètre de décélération* q_0 . Il est défini par

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}_0}{a_0 H_0^2} = \frac{1}{2} \Omega_M - \Omega_\Lambda . \quad (252)$$

Le paramètre q_0 est positif si l'expansion est en cours de ralentissement, négatif si l'expansion s'accélère. Ces possibilités sont aussi indiquées sur le diagramme.

Une manière encore plus claire de schématiser l'expansion de l'Univers pour une pression nulle consiste à réécrire l'équation (243) en utilisant $\tau = t H_0$ et $x(\tau) = a(t)/a(t_0)$,

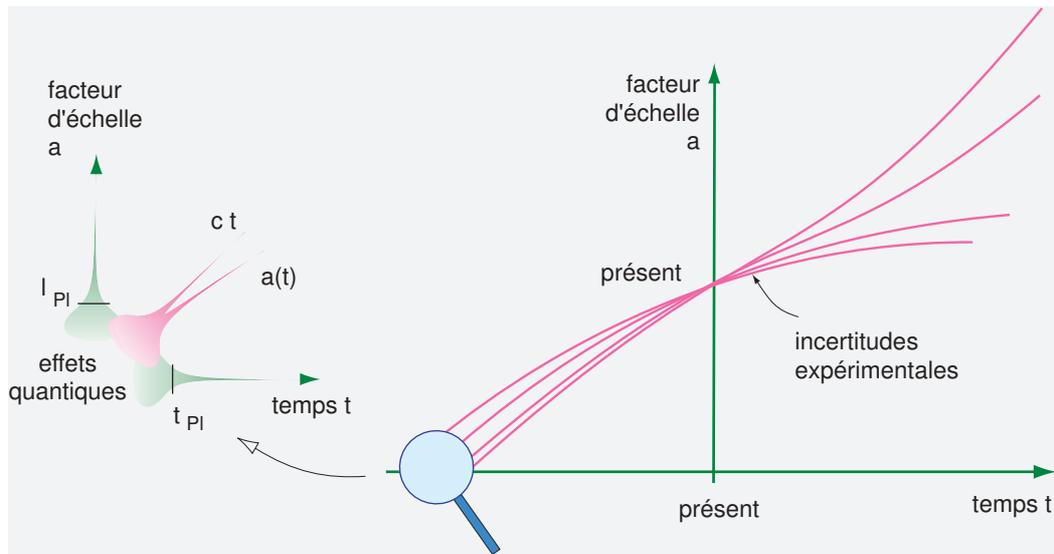


FIGURE 83 Évolution de l'échelle a de l'Univers pour différentes valeurs de densités.

conduisant à

$$\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 + U(x) = \Omega_K$$

avec $U(x) = -\Omega_\Lambda x - \Omega_\Lambda x^2$

(253)

Cela ressemble à l'équation de l'évolution du mouvement d'une particule de masse 1, ayant une énergie totale Ω_K , dans un potentiel $U(x)$. Les évolutions résultantes sont facilement déduites.

Pour Ω_Λ nul, soit l'Univers se dilate pour toujours, soit il s'effondre, en fonction de la valeur de la densité de masse-énergie.

Pour Ω_Λ non nul (positif), le potentiel possède exactement un maximum ; si la particule a suffisamment d'énergie pour grimper jusqu'à ce maximum, elle accélérera continuellement. C'est la situation que l'Univers semble avoir aujourd'hui.

Pour un intervalle de temps prédéfini, le résultat est indiqué sur la Figure 83. Il faut souligner deux points : d'abord, l'ensemble des courbes possibles est décrit par deux paramètres, et non pas un. De plus, les lignes ne peuvent pas être tracées à partir d'une taille nulle. Il existe deux raisons principales à cela : nous ne comprenons pas encore très bien le comportement de la matière aux très hautes énergies, et nous ne maîtrisons pas le comportement de l'espace-temps aux énergies très élevées. Nous reviendrons sur ce problème important plus loin.

La principale conclusion que nous pouvons tirer du travail de Friedmann est qu'un Univers homogène et isotrope *n'est pas statique* : soit il se dilate, soit il se contracte. Dans les deux cas, il possède un *âge fini*. Il fallut de nombreuses années avant que cette idée profonde soit largement acceptée dans la communauté des cosmologistes. Même Einstein mit beaucoup de temps avant de s'y accoutumer.

Remarque qu'en raison de son expansion isotrope l'Univers possède un référentiel

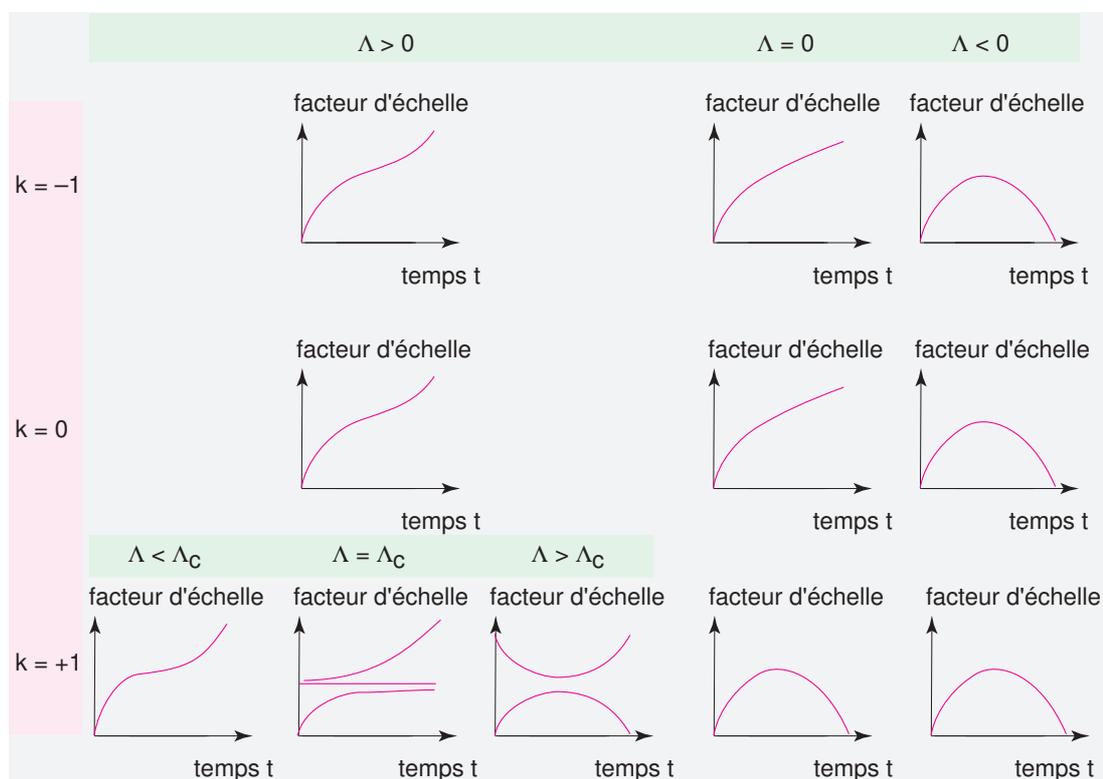


FIGURE 84 L'évolution à long terme du facteur d'échelle a de l'Univers pour divers paramètres.

de prédilection : le référentiel défini par la répartition moyenne de matière. Le temps mesuré dans ce référentiel est le temps listé dans le [Tableau 5](#), qui est celui que nous utilisons implicitement lorsque nous parlons de l'âge de l'Univers.

Un tour d'horizon des éventualités concernant l'évolution à long terme est donné par la [Figure 84](#). L'évolution peut avoir diverses issues. Au début du vingtième siècle, les gens choisissaient parmi elles selon leurs préférences personnelles. Albert Einstein donnait la primauté à la solution $k = 1$ et $\Lambda = a^{-2} = 4\pi G\rho_M$. C'est la solution instable rencontrée lorsque $x(\tau)$ culmine au maximum du potentiel $U(x)$.

Défi 310 pe

En 1917, le physicien hollandais Willem de Sitter avait trouvé, à la grande stupeur d'Einstein, qu'un Univers vide avec $\rho_M = p_M = 0$ et $k = 1$ est également possible. Ce type d'Univers se dilate pendant des durées très longues. L'Univers de de Sitter indique que, dans des cas particuliers, la matière n'est pas nécessaire pour que l'espace-temps puisse exister.

Lemaître avait trouvé des Univers en expansion pour une masse positive, et ses résultats furent également contestés, à commencer par Einstein. Lorsque plus tard les premières mesures confirmèrent ces calculs, l'idée d'un Univers massif et en expansion se généralisa peu à peu. Il devint le modèle standard de la cosmologie dans les manuels. Cependant, dans une sorte d'aveuglement collectif qui a perduré de 1950 à 1990 environ, presque tout le monde croyait que $\Lambda = 0^*$. Ce n'est que vers la fin du vingtième siècle que

Défi 311 pe

* Dans ce cas, pour $\Omega_M \geq 1$, l'âge de l'Univers vérifie $t_0 \leq 2/(3H_0)$, où les limites sont compatibles. Pour

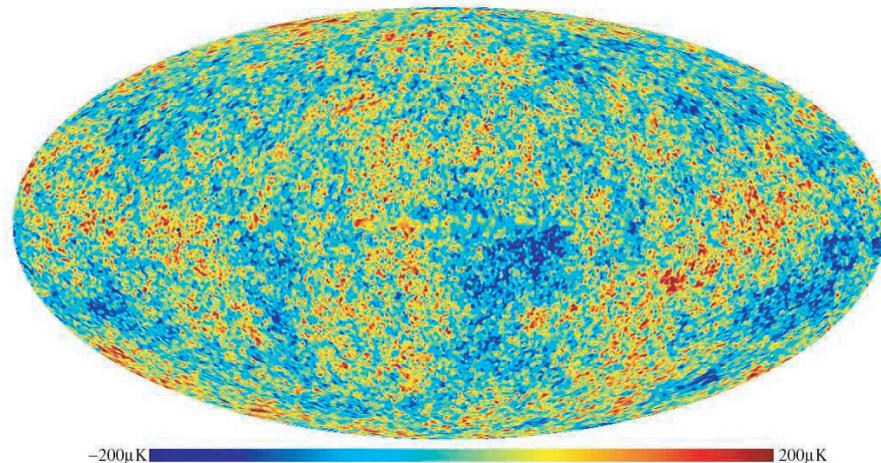


FIGURE 85 Les fluctuations du rayonnement de fond cosmologique. (WMAP/NASA)

les progrès expérimentaux nous permirent de faire des déductions fondées sur l'évidence rationnelle plutôt que sur des croyances ou des préférences personnelles, comme nous allons bientôt le découvrir. Mais avant toutes choses nous devons faire toute la lumière sur une vieille controverse.

POURQUOI LE CIEL EST-IL NOIR LA NUIT ?

« In der Nacht hat ein Mensch nur ein Nachthemd an, und darunter kommt gleich der Charakter. »
Robert Musil

En premier lieu, le ciel nocturne n'est pas noir. Il possède la même couleur intrinsèque que durant le jour, comme n'importe quelle photographie à longue pose le démontre. (Regardez, par exemple, la Figure 67.) Mais cette couleur, comme la couleur du ciel au cours de la journée, n'est pas due à la température de la voûte céleste, mais à la lumière diffuse provenant des étoiles. Si nous voulons rechercher la véritable couleur du ciel, nous avons besoin d'inspecter son rayonnement thermique. En réalité, les mesures indiquent que même le ciel vidé de sa substance n'est pas complètement froid ou noir la nuit. Il est rempli d'un rayonnement d'environ 200 GHz. Des relevés plus précis montrent que ce rayonnement correspond à l'émission thermique d'un corps noir à 2,73 K. Ce *rayonnement de fond cosmologique* représente le rayonnement thermique résiduel provenant du Big Bang.

Réf. 188 L'Univers est en réalité plus froid que les étoiles. Mais pourquoi en est-il ainsi ? Si l'Univers était homogène à grande échelle et infiniment grand, il aurait un nombre infini d'étoiles. En regardant dans n'importe quelle direction, nous verrions la surface d'une étoile. Le ciel nocturne serait alors aussi lumineux que la surface du Soleil ! Pouvez-vous convaincre votre grand-mère avec ce raisonnement ?

Défi 312 s

une densité nulle, nous avons $t_0 = 1/H_0$.

* « La nuit, un homme ne porte qu'une chemise de nuit, et directement sous celle-ci se cache sa véritable nature. » Robert Musil (n. Klagenfurt 1880, d. Genève 1942) fut un écrivain allemand.

Dans une forêt profonde, nous remarquons qu'il y a un arbre dans toutes les directions. De manière analogue, dans un Univers « profond », nous devrions voir une étoile dans chaque direction. À présent, l'étoile moyenne possède une température de surface d'environ 6 000 K. Si nous vivions dans un Univers vieux et profond, nous vivrions effectivement à l'intérieur d'un four ayant une température avoisinant les 6 000 K, ce qui nous empêcherait de profiter d'une bonne glace à la crème.

Ce paradoxe fut formulé de manière plus précise en 1823 par l'astronome Wilhelm Olbers*. Comme ce dernier avait considérablement débattu de cette question, il est également dénommé *paradoxe d'Olbers*. Aujourd'hui nous savons que, même si toute la matière contenue dans l'Univers était convertie en rayonnement, l'Univers ne serait toujours pas aussi brûlant que nous venons de l'estimer. Autrement dit, la puissance et la longévité des étoiles sont beaucoup trop faibles pour engendrer la fournaise lumineuse que nous venons de citer. Donc quelque chose ne colle pas.

Réf. 189

En fait, deux effets principaux peuvent être invoqués pour contourner cette contradiction. Premièrement, puisque l'Univers possède un âge limité, les étoiles éloignées brillent depuis peu. Nous les voyons à une époque où elles étaient plus jeunes ou même pendant leur formation, lorsqu'elles étaient plus sombres. Par conséquent, la part de la luminosité des étoiles distantes est plus petite que celle des étoiles proches, de telle façon que la température moyenne du ciel s'en trouve diminuée d'autant**. Deuxièmement, nous pourrions imaginer que le rayonnement des étoiles distantes est décalé vers le rouge et que le volume que le rayonnement devrait remplir est en constante augmentation, de telle sorte que la température moyenne du ciel est également réduite.

Réf. 190

Des calculs sont nécessaires pour déterminer quel effet est plus important que l'autre. Ce problème a été étudié avec beaucoup de soin par Paul Wesson, qui expliqua que le premier effet est plus important que le second d'un facteur trois environ. Nous pouvons donc affirmer convenablement que le ciel nocturne est noir *principalement* parce que l'Univers possède un âge fini. Nous pouvons ajouter que le ciel serait légèrement plus lumineux si l'Univers n'était pas en expansion.

Réf. 188

Défi 314 pe

De plus, l'obscurité du ciel est possible uniquement parce que la vitesse de la lumière est finie. Pouvez-vous confirmer cette idée ?

Réf. 191

Finalement, l'obscurité du ciel nous rappelle également que l'Univers possède un âge *important* (mais fini). En réalité, le rayonnement de fond de 2,7 K est si froid, bien qu'il ait été émis à 3 000 K, parce qu'il est décalé vers le rouge suite à l'effet Doppler. En faisant des hypothèses raisonnables, on trouve que la température T de ce rayonnement varie avec le facteur d'échelle $R(t)$ de l'Univers comme

$$T \sim \frac{1}{R(t)}. \quad (254)$$

* Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers (n. Arbergen 1758, d. Brême 1840) était astronome. Il découvrit deux planètes, Pallas et Vesta, et cinq comètes. Il développa la méthode de calcul des orbites paraboliques pour les comètes qui est toujours utilisée aujourd'hui. Olbers encouragea également activement le mathématicien et astronome Friedrich Wilhelm Bessel dans le choix de sa profession. Le paradoxe est baptisé d'après Olbers, bien que d'autres aient fait des remarques similaires auparavant, tels l'astronome suisse Jean Philippe Loys de Cheseaux en 1744 et Johannes Kepler en 1610.

Page 102

** Pouvez-vous expliquer que le ciel n'est pas noir simplement parce qu'il est peint en noir ou composé de chocolat noir ? Ou, plus généralement, que le ciel n'est pas constitué de et ne contient aucune substance noire et froide, comme Olbers le suggérait lui-même, et comme John Herschel le réfuta en 1848 ?

Défi 313 pe

Dans un Univers jeune, nous ne serions donc pas capables d'admirer les étoiles, même si elles existaient.

Réf. 189 À partir de la luminosité du ciel nocturne, mesurée comme valant à peu près $3 \cdot 10^{-13}$ fois celle d'une étoile moyenne comme le Soleil, nous pouvons déduire quelque chose d'intéressant : la densité d'étoiles dans l'Univers doit être beaucoup plus petite que dans notre galaxie. La densité des étoiles dans la Galaxie peut être déduite en comptant les étoiles que nous voyons la nuit. Mais la densité moyenne d'étoiles dans la Galaxie conduirait à des valeurs de luminosités nocturnes beaucoup plus élevées si celle-ci était constante partout dans l'Univers. Nous pouvons donc en conclure que la Galaxie est beaucoup *plus petite* que l'Univers simplement en mesurant la luminosité du ciel nocturne et en comptant les étoiles présentes dans le ciel ! Pouvez-vous développer explicitement les calculs ?

Défi 315 pe

Défi 316 pe En résumé, le ciel est noir la nuit parce que l'espace-temps et la matière ont un âge important, mais fini. Comme problème annexe, nous pouvons formuler une énigme : y a-t-il également un paradoxe d'Olbers pour la gravitation ?

L'UNIVERS EST-IL OUVERT, FERMÉ OU SITUÉ ENTRE LES DEUX ?

« - L'immensité de l'Univers ne te donne-t-elle pas l'impression d'être tout petit ?
- Je peux me sentir petit sans l'aide de l'Univers. »
Anonyme

Parfois, l'histoire de l'Univers est résumée en deux mots : *boum ! ...crac*. Mais l'Univers s'effondrera-t-il réellement, ou se dilatera-t-il à jamais ? Ou encore, se trouve-t-il dans une situation limite intermédiaire ? Les paramètres qui décident de son destin sont la densité et la constante cosmologique.

Réf. 192 Les principales nouvelles de la dernière décennie de l'astrophysique du vingtième siècle sont les résultats expérimentaux nous permettant de déterminer ces paramètres. Plusieurs méthodes sont utilisées. La première est évidente : déterminer la vitesse et la distance des astres lointains. Pour de grandes distances, c'est difficile, puisque ces étoiles sont très indistinctes. Mais il est devenu possible aujourd'hui de scruter le ciel à la recherche de supernovae, des étoiles brillantes en explosion, et de déterminer leur distance à partir de leur luminosité. Nous y parvenons actuellement grâce à des moyens informatiques d'examen du ciel, en utilisant les plus grands télescopes disponibles.

Une deuxième méthode consiste à mesurer l'anisotropie du fond cosmologique micro-onde. À partir du spectre de puissance observé comme une fonction de l'angle, la courbure de l'espace-temps peut être retrouvée.

Page 230 Une troisième méthode est la détermination de la masse volumique de l'Univers, en utilisant l'effet de lentille gravitationnelle pour la lumière issue des quasars lointains, qui est déviée par les galaxies ou les amas de galaxies.

Une quatrième méthode est la détermination de la densité en utilisant les amas de galaxies. Nous nous attendons à ce que toutes ces mesures soient grandement améliorées dans les années à venir.

Réf. 193 Actuellement, ces quatre ensembles complètement indépendants de mesures fournissent les valeurs

$$(\Omega_M ; \Omega_\Lambda ; \Omega_K) \approx (0,3 ; 0,7 ; 0,0) \quad (255)$$

où les erreurs sont de l'ordre de 0,1 ou moins. Les valeurs impliquent que *l'Univers est spatialement plat, que son expansion s'accélère et, par conséquent, qu'il n'y aura pas de Big Crunch**. Toutefois, aucune déclaration définitive concernant la topologie n'est encore possible. Nous reviendrons sur cette dernière question bientôt.

En particulier, les données indiquent que la densité de matière, incluant toute la matière noire, ne représente environ qu'un tiers de la valeur critique**. Les deux autres tiers sont fournis par le terme cosmologique. Pour la constante cosmologique Λ nous obtenons la valeur

$$\Lambda = \Omega_{\Lambda} \frac{3H_0^2}{c^2} \approx 10^{-52} / \text{m}^2 . \quad (256)$$

Cette valeur possède des implications majeures pour la théorie quantique, puisqu'elle correspond à une densité d'énergie du vide

$$\rho_{\Lambda} c^2 = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G} \approx 0,5 \text{ nJ/m}^3 \approx \frac{10^{-46} (\text{GeV})^4}{(\hbar c)^3} . \quad (257)$$

Mais ce terme cosmologique implique également une pression négative du vide $p_{\Lambda} = -\rho_{\Lambda} c^2$. En introduisant ce résultat dans la relation du potentiel de la gravitation universelle déduite de la relativité

$$\Delta\varphi = 4\pi G(\rho + 3p/c^2) \quad (258)$$

Réf. 194 nous obtenons

$$\Delta\varphi = 4\pi G(\rho_M - 2\rho_{\Lambda}) . \quad (259)$$

Défi 317 pe Donc l'accélération gravitationnelle est

$$a = \frac{GM}{r^2} - \frac{\Lambda}{3} c^2 r = \frac{GM}{r^2} - \Omega_{\Lambda} H_0^2 r , \quad (260)$$

ce qui indique qu'une énergie du vide *positive* entraîne en réalité l'existence d'un effet gravitationnel *répulsif*. En insérant la valeur mentionnée (256) pour la constante cosmologique Λ , nous trouvons que l'effet répulsif est minuscule même sur des distances telles que celle qui sépare la Terre du Soleil. En fait, l'ordre de grandeur de l'effet répulsif est tellement petit par rapport à celui de l'attraction que nous ne pouvons pas du tout espérer obtenir une confirmation expérimentale directe de cet écart par rapport à la gravitation universelle. Les déterminations astrophysiques demeureront probablement les seules possibles. Une constante gravitationnelle positive se manifeste par le biais d'une composante positive dans le taux d'expansion, comme nous le verrons bientôt.

* Le Big Crunch, c'est-à-dire l'effondrement de l'Univers, serait équivalent à un « Big Bang à l'envers ». [N.D.T.]

** La différence entre la densité totale de matière et la densité de matière baryonique mesurable séparément, environ un sixième seulement de la valeur précédente, n'est également toujours pas expliquée. Il se pourrait même que l'Univers contienne de la matière d'un type inconnu jusqu'à présent. Cette énigme est appelée le *problème de la matière noire*, elle constitue une des questions les plus importantes non résolues en cosmologie.

Mais cette situation est déconcertante. L'origine de cette constante cosmologique n'est *pas* expliquée par la relativité générale. Ce mystère sera résolu uniquement à l'aide de la théorie quantique. Dans tous les cas, la constante cosmologique est le premier aspect local et quantique de la nature détecté par des moyens astrophysiques.

POURQUOI L'UNIVERS EST-IL TRANSPARENT ?

Réf. 195 L'Univers pourrait-il être rempli d'eau, qui est transparente, comme certains ou-
Défi 319 pe vrages populaires le soutiennent afin d'expliquer la pluie ? Non. Même s'il était empli
d'air, la masse totale n'aurait jamais permis à l'Univers d'atteindre la taille qu'il a au-
jourd'hui, il se serait effondré beaucoup plus tôt et nous n'existerions pas.

Page ?? L'Univers est donc transparent parce qu'il est principalement vide. Mais *pourquoi*
est-il si vide ? Tout d'abord, à l'époque où la taille de l'Univers était minuscule, toute
l'antimatière s'est annihilée avec la quantité équivalente de matière. Seule une infime
fraction de matière, qui était initialement légèrement plus abondante que l'antimatière,
est restée. Cette fraction de 10^{-9} est la matière que nous voyons aujourd'hui. Par consé-
quent, il y a 10^9 fois plus de photons dans l'Univers que d'électrons ou de quarks.

De plus, 380 000 ans après l'annihilation de l'antimatière, tous les noyaux et les élec-
trons présents se sont associés, pour former des atomes et leurs agrégats, tels que les
étoiles et les hommes. Il ne restait alors plus aucune charge libre interagissant avec des
photons dans l'espace, de telle façon que depuis cette période la lumière peut voyager
dans l'espace comme elle le fait aujourd'hui, n'étant affectée que lorsqu'elle rencontre
une étoile ou des particules de poussière.

Si nous nous rappelons que la densité moyenne de l'Univers est de 10^{-26} kg/m³ et que
la majeure partie de la matière est agrégée par la gravité en galaxies, nous pouvons imagi-
ner qu'un excellent vide se maintient dans les espaces intergalactiques. Par conséquent,
la lumière peut voyager sur de longues distances sans obstacles significatifs.

Page ?? Mais pourquoi le vide est-il transparent ? C'est une question plus profonde. Le vide
est transparent parce qu'il ne contient aucune charge électrique et aucun horizon : les
charges ou les horizons sont indispensables pour absorber la lumière. En réalité, la théo-
rie quantique montre que le vide contient ce que nous appelons des charges *virtuelles*.
Cependant, les charges virtuelles n'ont aucun effet sur la propagation de la lumière.

LE BIG BANG ET SES RÉPERCUSSIONS

« Μελέτη θανάτου. S'entraîner à la mort. »
Platon, *Phédon*, 81a.

Page 234 Par-dessus tout, le modèle du Big Bang, qui est énoncé en observant la couleur des
Réf. 196 astres et des galaxies, établit qu'il y a environ quatorze milliards d'années l'Univers tout
entier était extrêmement petit. C'est cette situation qui a donné au Big Bang son nom.
Ce terme fut forgé (avec une certaine connotation sarcastique) en 1950 par Fred Hoyle,
qui, par ailleurs, n'avait jamais pensé qu'il puisse s'appliquer à la nature. Néanmoins, ce
terme fut adopté. Puisque nous ne pouvons pas vérifier directement que l'Univers était
si petit par le passé, nous avons besoin de rechercher d'autres conséquences vérifiables.
Les plus importantes sont les suivantes :

- toute matière s'éloigne du reste de la matière ;
- la masse de l'Univers est constituée d'environ 75 % d'hydrogène et 23 % d'hélium ;
- il existe un rayonnement thermique de fond cosmologique d'environ 2,7 K ;
- l'âge maximal pour n'importe quel système dans l'Univers est d'environ quatorze milliards d'années ;
- il y a un fond cosmologique de neutrinos d'une température d'environ 2 K* ;
- pour une constante cosmologique non nulle, la gravité newtonienne est légèrement plus faible.

Toutes ces prédictions, excepté les deux dernières, ont été confirmées par les observations. La technologie ne nous permettra probablement pas de vérifier celles-ci dans un proche avenir. Toutefois, il n'existe aucune pièce à conviction à leur encontre.

Réf. 196 Des descriptions concurrentes de l'Univers ne sont pas parvenues avec autant de succès à cette concordance avec les observations. De plus, des arguments théoriques stipulent qu'avec les distributions de matière que nous observons, et quelques hypothèses un peu plus générales, il n'existe aucune manière de contourner l'existence d'une période dans le passé *fini* au cours de laquelle l'Univers était extrêmement petit. Il est donc important de porter un regard attentif sur cette situation.

Réf. 197

LE BIG BANG FUT-IL UN BIG BANG ?

Fut-il une sorte d'explosion ? Cette description implique que de la matière transforme en quelque sorte de l'énergie interne en un mouvement de ses parties. Il n'y a jamais eu un tel processus dans l'histoire du début de l'Univers. En fait, une meilleure description consiste à dire que l'espace-temps est en expansion, plutôt que de dire que la matière se déplace. Le mécanisme et l'origine de l'expansion sont *inconnus* à ce niveau de notre ascension montagnaise. À cause de l'importance de l'expansion spatiale, le phénomène global ne peut aucunement être qualifié d'explosion. Et manifestement il n'y a jamais eu, et il n'y a pas, de milieu pouvant transporter le son dans l'espace interstellaire ; ainsi nous ne pouvons pas parler d'un « bang », quel que soit le sens de ce terme.

Était-il gros (« big ») ? L'Univers visible était plutôt ridiculement petit il y a environ quatorze milliards d'années, beaucoup plus petit qu'un atome. En résumé, le Big Bang n'était ni gros ni un bang, mais le reste est correct.

LE BIG BANG FUT-IL UN ÉVÉNEMENT ?

La théorie du Big Bang est une description de ce qui est survenu dans l'espace-temps *tout entier*. Contrairement à ce qu'on lit fréquemment dans les articles de journaux imprudents, à chaque instant de son expansion l'espace avait une taille non nulle : l'espace n'a *jamais* été un simple point. Les individus qui prétendent qu'il le fut font des déclarations plausibles en apparence, mais fausses en réalité. La théorie du Big Bang est une description de l'*expansion* de l'espace-temps, et non de son origine. En suivant le mouvement de la matière en remontant le temps, la relativité générale ne peut pas déduire l'existence d'une singularité initiale. Le problème des erreurs de mesure n'est probablement pas un obstacle. Cependant, l'effet induit par les non-linéarités de la relativité générale dans les situations de densités d'énergie énormes n'est pas encore très clair.

* La théorie établit que $T_\nu/T_\gamma \approx (4/11)^{1/3}$. Ces neutrinos sont apparus à peu près 0,3 s après le Big Bang.

De façon plus importante, la théorie quantique montre que le Big Bang n'était *pas* une véritable singularité, puisque aucune observable physique, que ce soit la densité ou la température, n'a jamais atteint une valeur infiniment grande (ou infiniment petite).
 Page ?? De telles grandeurs ne peuvent pas exister dans la nature*. Dans tous les cas, il existe un consensus général pour dire que les raisonnements fondés uniquement sur la relativité générale *pure* ne peuvent pas faire des déductions correctes concernant le Big Bang. Pourtant, la plupart des déclarations que l'on trouve dans les articles de journaux sont de cet acabit.

LE BIG BANG FUT-IL UN COMMENCEMENT ?

Se demander ce qu'il y avait avant le Big Bang revient à se demander où se trouve le nord au pôle Nord. De même que rien n'indique le nord au pôle Nord, il n'y « avait » rien avant le Big Bang. Cette analogie pourrait être mal interprétée, au point d'impliquer que le Big Bang a débuté en un point unique précis du temps, ce qui est bien sûr inexact, comme nous venons de l'expliquer. Mais cette analogie est meilleure qu'elle ne paraît : en fait, il n'y a *pas* de pôle Nord précis, puisque la théorie quantique montre qu'il existe une incertitude fondamentale quant à sa position. Il existe de même une incertitude correspondante pour le Big Bang.

En réalité, un raisonnement très simple permet de montrer qu'avec la théorie quantique le temps et l'espace *ne* sont *pas* définis au moment ou à proximité du Big Bang. Nous fournirons ce raisonnement élémentaire dans le premier chapitre de la dernière partie de notre promenade. Par conséquent, le Big Bang ne peut pas être qualifié de « commencement » de l'Univers. Il n'y a jamais eu de temps lorsque le facteur d'échelle $a(t)$ de l'Univers était égal à zéro.
 Page ??

Cette erreur conceptuelle est fréquemment rencontrée. En fait, la théorie quantique indique que près du Big Bang les événements ne peuvent *ni* être ordonnés *ni* même être définis. Plus franchement, il n'y a *pas* de commencement, il n'y a jamais eu d'événement ou de singularité initiale.

Certes, le concept de temps n'est pas défini « en dehors » ou « avant » l'existence de l'Univers, ce fait étant déjà évident pour les penseurs il y a plus de mille ans. Il est alors tentant de conclure que le temps doit avoir *commencé*. Mais comme nous l'avons vu, c'est également une erreur logique : en premier lieu, il n'y a pas d'événement de départ, et, deuxièmement, le temps ne s'écoule pas, comme nous l'avons déjà révélé au début de notre promenade.
 Réf. 198
 Page 38

Une confusion similaire se cache derrière l'idée que l'Univers possède certaines « conditions initiales ». Des conditions initiales *par définition* ont un sens uniquement pour des objets ou des champs, c'est-à-dire pour des entités qui peuvent être observées de l'extérieur, ou encore pour des entités qui possèdent un environnement. L'Univers ne se conformant pas à cette nécessité, il ne peut donc avoir d'états initiaux. Malgré tout, de nombreuses personnes s'évertuent toujours à réfléchir sur ce problème. De manière intéressante, Stephen Hawking a vendu des millions d'exemplaires d'un livre expliquant
 Page 163
 Réf. 199

* De nombreux physiciens sont toujours prudents avant de faire des déclarations aussi profondes sur ce point. Les premières sections de la troisième partie de notre ascension montagnaise fournissent les arguments précis qui conduisent à celles-ci.
 Page ??

qu'une description dépourvue d'états initiaux est la plus séduisante, l'emportant largement sur le fait qu'il n'existe de toute façon aucune autre possibilité*.

En résumé, le Big Bang n'est pas un commencement, pas plus qu'il n'en implique un. Nous leverons le voile sur la manière correcte de méditer sur ce sujet dans la dernière partie de notre progression sur la montagne.

LE BIG BANG IMPLIQUE-T-IL UNE CRÉATION ?

« [La théorie générale de la relativité procure] un doute universel concernant l'existence de Dieu et de sa création. »

Un chasseur de sorcières.

Page 226

La création, c'est-à-dire l'apparition de quelque chose à partir de rien, nécessite un concept prédéfini de l'espace et du temps pour avoir une signification. Sinon, ce concept d'« apparition » est vide de sens. Mais, quelle que soit la description du Big Bang, qu'elle soit classique, comme dans ce chapitre, ou quantomécanique, comme dans les prochains, cette condition n'est jamais remplie. Même dans la description classique actuelle du Big Bang, qui fut à l'origine de sa dénomination, il n'y a *pas* d'apparition de matière, ni d'énergie, ni de quoi que ce soit d'autre. Et cette situation ne changera pas, quelle que soit la description ultérieure améliorée, puisque le temps ou l'espace ne sont jamais définis *avant* l'apparition de la matière.

En fait, toutes les propriétés d'une création sont absentes : il n'existe aucun « instant » de création, aucune apparition à partir de rien, aucun choix possible de quelconques conditions « initiales » piochées dans un certain ensemble de possibilités et, comme nous le verrons plus en détail plus loin, pas même un quelconque choix de « lois » physiques particulières à partir d'un quelconque ensemble d'éventualités.

Défi 320 pe

En résumé, le Big Bang n'implique ni ne nourrit aucun processus de création. Il n'était pas un événement, pas un commencement et *pas non plus* une situation de création. Il est impossible de poursuivre l'ascension de la Montagne Mouvement si nous ne pouvons pas accepter chacune de ces trois conclusions. Les renier revient à persévérer dans le domaine des croyances et des préjugés, donc à renoncer définitivement à progresser dans notre aventure.

Page 41

Remarquez que cette exigence n'est pas nouvelle. En fait, elle était déjà contenue implicitement dans l'équation (1) au tout début de notre excursion, de même que dans toutes les suivantes. Elle apparaît de manière encore plus flagrante à ce niveau. Mais finalement *qu'est-ce* que le Big Bang ? Nous le découvrirons dans l'ultime partie de notre ascension. Nous revenons maintenant sur la discussion concernant ce que les étoiles peuvent nous enseigner sur la nature.

POURQUOI POUVONS-NOUS VOIR LE SOLEIL ?

En premier lieu, le Soleil peut être observé parce que l'air est transparent. Il n'est pas évident en soi que l'air soit transparent ; en fait, il ne l'est que pour la lumière *visible* et pour quelques autres fréquences données. Les rayonnements infrarouge et ultraviolet

* Cette phrase suscitera toujours des réactions fortes de la part des physiciens, elle sera analysée plus en détail dans la section sur la théorie quantique.

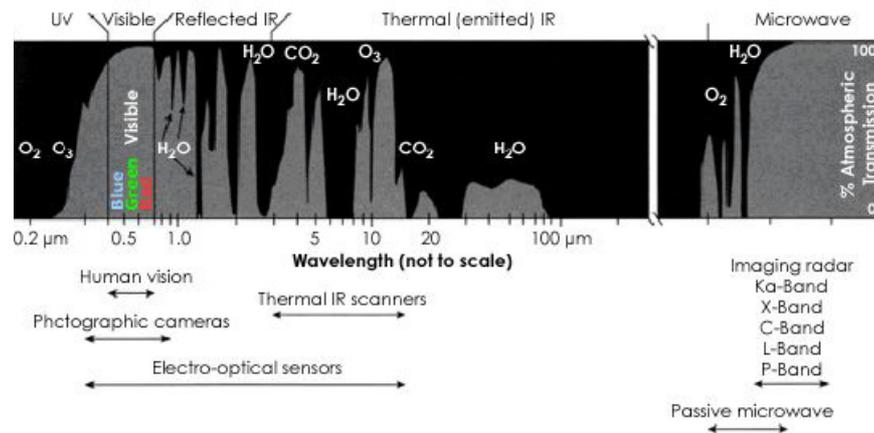


FIGURE 86 Transmittance de l'atmosphère. (NASA)

let sont majoritairement absorbés. Les explications résident dans le comportement des molécules qui composent l'air, à savoir principalement l'azote, l'oxygène et quelques autres gaz transparents. Plusieurs satellites et planètes du Système solaire possèdent des atmosphères opaques : nous avons en fait beaucoup de chance de pouvoir contempler les étoiles.

En réalité, l'air lui-même n'est pas parfaitement transparent, ses molécules *diffusent* très légèrement la lumière. Cela explique pourquoi le ciel et les montagnes lointaines paraissent bleus et le coucher du soleil paraît rouge*, et pourquoi les étoiles sont invisibles en cours de journée. L'atmosphère est même opaque à de nombreuses longueurs d'onde éloignées du spectre visible, comme l'indique la Figure 86. (Elle est également opaque pour toutes les longueurs d'onde inférieures à 200 nm, jusqu'aux rayons gamma. Sur la grande étendue du spectre électromagnétique, elle reste transparente jusqu'à une longueur d'onde d'environ 10 à 20 m, en fonction de l'activité solaire, où l'opacification due à l'ionosphère se met en place.)

En second lieu, nous pouvons voir le Soleil parce que celui-ci, comme tous les corps chauds, *émet* de la lumière. Nous allons par la suite décrire en détail l'*incandescence*, puisque c'est comme cela que cet effet est dénommé.

Page 145

Troisièmement, nous pouvons voir la lumière du jour parce que nous sommes, comme notre environnement et le voisinage du Soleil, *plus froids* que le Soleil lui-même. En réalité, les corps incandescents peuvent être discernés de leur arrière-plan uniquement si celui-ci est plus froid. C'est une conséquence des propriétés de l'émission incandescente de lumière, généralement appelée *rayonnement de corps noir*. Ce rayonnement est indépendant de la matière, de telle sorte que, pour un milieu ayant la même température que le corps, nous ne pouvons absolument rien discerner de particulier. Pour preuve, jetez simplement un œil sur la photographie de la page 121.

Enfin, nous pouvons voir le Soleil parce qu'il n'est pas un trou noir. S'il l'était, il n'émettrait (pratiquement) pas de lumière.

* La diffusion de l'air fait que le ciel est également bleu la nuit, comme nous pouvons le démontrer par des photos à longue pose. (Consultez, par exemple, la Figure 67.) Néanmoins, nos yeux ne sont pas capables de le percevoir, et les faibles intensités de lumière font qu'il nous apparaît comme noir.

Manifestement, chacune de ces conditions s'applique également aux étoiles en général. Par exemple, nous pouvons les contempler uniquement parce que le ciel nocturne est noir. Mais alors, comment expliquer la présence dans le ciel de multiples couleurs ?

POURQUOI LES COULEURS DES ÉTOILES SONT-ELLES DIFFÉRENTES ?

Les étoiles sont visibles parce qu'elles émettent de la lumière visible. Nous avons rencontré plusieurs effets importants qui déterminent les couleurs : les températures variées des étoiles, le décalage Doppler dû à une vitesse relative par rapport à l'observateur et le décalage vers le rouge gravitationnel.

Page 119 Toutes les étoiles ne constituent pas de bonnes approximations de corps noirs, de telle manière que la loi du rayonnement du corps noir ne décrit pas toujours fidèlement leur couleur. Toutefois, la plupart des étoiles sont des approximations raisonnables de corps noirs. La température d'une étoile dépend principalement de sa taille, de sa masse, de sa composition et de son âge, comme les astrophysiciens aiment l'expliquer. Orion représente un excellent exemple de constellation colorée : toutes ses étoiles possèdent une couleur différente. Les photos à longue pose le montrent de façon merveilleuse.

Réf. 200

Page 65

La couleur fondamentale déterminée par la température est modifiée par deux effets. Le premier, le *décalage Doppler vers le rouge* z , dépend de la vitesse v relative entre la source et l'observateur, comme suit

Défi 321 pe

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_s}{f_o} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1. \quad (261)$$

De tels décalages jouent un rôle significatif uniquement pour des étoiles visibles éloignées, et donc pâles, observées au moyen de télescopes. À l'œil nu, les décalages Doppler ne peuvent être perçus. Mais ceux-ci peuvent faire en sorte que des astres lointains brillent dans l'infrarouge au lieu du domaine spectral visible. En fait, les plus forts décalages Doppler observés pour des objets lumineux sont supérieurs à 5,0, correspondant à une vitesse de récession de plus de 94 % de la vitesse de la lumière. Remarquez que dans l'Univers le décalage vers le rouge est également relié au facteur d'échelle $R(t)$ par

Défi 322 pe

$$z = \frac{R(t_0)}{R(t_{\text{émission}})} - 1. \quad (262)$$

La lumière émise avec un décalage spectral de 5,0 l'a donc été lorsque l'Univers avait un sixième de son âge actuel.

L'autre effet qui modifie la couleur, le *décalage vers le rouge gravitationnel* z_g , dépend de la densité de matière de la source et est donné par

$$z_g = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_s}{f_o} - 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}} - 1. \quad (263)$$

Défi 323 pe

Il est généralement beaucoup plus petit que le décalage Doppler. Pouvez-vous le confirmer ?

Nous ne connaissons aucun autre processus de décalage vers le rouge. De surcroît, de

TABLEAU 6 La couleur des étoiles.

CLASSE	TEMPÉRA-TURE	EXEMPLE	LOCALISA-TION	COULEUR
O	30 kK	Mintaka	δ Orionis	bleu-violet
O	31(10) kK	Alnitak	ζ Orionis	bleu-violet
B	22(6) kK	Bellatrix	γ Orionis	bleu
B	26 kK	Saiph	κ Orionis	bleu-blanc
B	12 kK	Rigel	β Orionis	bleu-blanc
B	25 kK	Alnilam	ϵ Orionis	bleu-blanc
B	17(5) kK	Régulus	α Leonis	bleu-blanc
A	9,9 kK	Sirius	α Canis Majoris	bleu-blanc
A	8,6 kK	Megrez	δ Ursae Majoris	blanc
A	7,6(2) kK	Altair	α Aquilae	jaune-blanc
F	7,4(7) kK	Canopus	α Carinae	jaune-blanc
F	6,6 kK	Procyon	α Canis Minoris	jaune-blanc
G	5,8 kK	Soleil	écliptique	jaune
K	3,5(4) kK	Aldébaran	α Tauri	orange
M	2,8(5) kK	Bételgeuse	α Orionis	rouge
D	< 80 kK	–	–	quelconque

Remarques : les naines blanches, ou étoiles de classe D, sont des résidus d'étoiles ayant explosé, avec une taille de seulement quelques dizaines de kilomètres. Elles ne sont pas toutes blanches, elles peuvent être jaunes ou rouges. Elles représentent 5 % de toutes les étoiles. Aucune n'est visible à l'œil nu. Les incertitudes dans les derniers chiffres de la température sont indiquées entre parenthèses.

La taille de toutes les autres étoiles est une variable indépendante et est parfois accolée en chiffres romains à la fin du type spectral. (Sirius est une étoile A1V, Arcturus une étoile K2III.) Des géantes et supergéantes existent dans toutes les classes allant de O à M.

Pour accueillir les naines brunes, deux nouvelles classes stellaires, L et T, ont été proposées.

Page 240 tels processus contrediraient toutes les propriétés connues de la nature. Mais le problème de la couleur nous conduit à la question qui suit.

EXISTE-T-IL DES ÉTOILES SOMBRES ?

Il se pourrait que certaines étoiles ne soient pas aperçues parce qu'elles sont sombres. On pourrait ainsi expliquer la présence de l'énorme quantité de matière noire relevée dans les mesures récentes du rayonnement de fond diffus. Cette énigme est d'un intérêt majeur et est actuellement âprement débattue. Nous savons que des objets plus massifs que Jupiter mais moins massifs que le Soleil peuvent exister à des stades pour lesquels ils émettent une quantité à peine perceptible de lumière. Nous les appelons des *naines brunes*. Nous ne savons pas encore très bien actuellement combien d'objets de cette catégorie peuvent exister. Un grand nombre de « planètes » extrasolaires sont probablement des naines brunes. Ce problème n'a pas encore trouvé de solution.

Une autre éventualité pour l'existence d'astres ténébreux est représentée par les trous

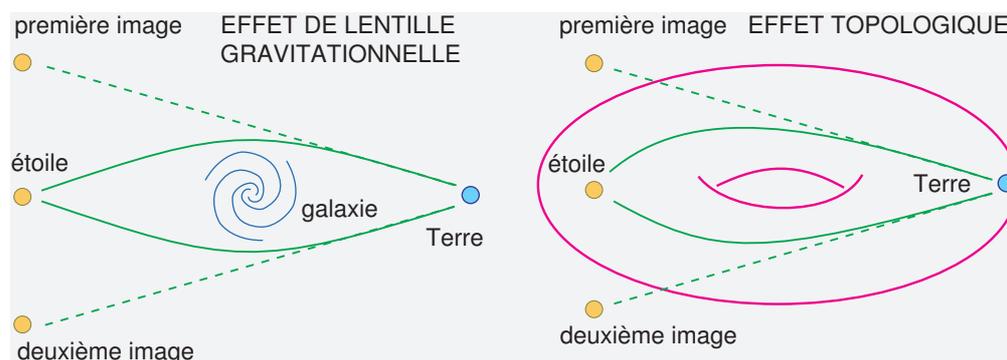


FIGURE 87 Comment une étoile peut conduire à la formation de plusieurs images.

Page 241 noirs. Ceux-ci sont analysés plus en détail ci-dessous.

TOUTES LES ÉTOILES SONT-ELLES DIFFÉRENTES ? – LENTILLES GRAVITATIONNELLES

“ Per aspera ad astra*.”

Sommes-nous certains que la nuit deux étoiles sont réellement distinctes ? La réponse est non. On a montré récemment que deux « étoiles » étaient en réalité deux images du même objet. Cela fut relevé en comparant le vacillement lumineux des deux images. On a découvert que l'oscillation d'une des images était exactement identique à l'autre, décalée simplement de 423 jours. Ce résultat fut découvert par l'astrophysicien estonien Jaan Pelt et son groupe de recherche, pendant l'observation de deux images de quasars dans le système Q0957+561.

Réf. 201

Ces deux images sont la conséquence de l'*effet de lentille gravitationnelle*, comme indiqué sur la Figure 87. En réalité, une énorme galaxie, beaucoup plus proche de la Terre, peut être aperçue entre les deux images. Cet effet avait déjà attiré l'attention d'Einstein, mais il ne pensait pas qu'il était observable. Le père légitime de l'effet de lentille gravitationnelle est Fritz Zwicky, qui prédit en 1937 que cet effet serait plutôt répandu et facile à observer si l'on s'intéressait à des galaxies situées sur la ligne de visée plutôt qu'à des étoiles. Et effectivement, cela s'est révélé être le cas.

Réf. 202

De façon intéressante, lorsque le temps de propagation est connu, les astronomes sont capables de déterminer la taille de l'Univers à partir de cette observation. Pouvez-vous imaginer comment ?

Défi 324 pe

En fait, si les deux objets observés sont alignés exactement l'un derrière l'autre, celui qui est le plus éloigné est vu sous la forme d'un *anneau* entourant le plus proche. De tels anneaux ont effectivement été observés, et l'image de la galaxie autour d'une galaxie centrale située en avant-plan à l'emplacement de B1938+666, indiquée sur la Figure 88, en représente l'un des exemples les plus magnifiques. En 2005, plusieurs cas de lentilles gravitationnelles engendrées par des étoiles ont également été signalés. Trois exemples

* « Des sentiers ardu jusqu'aux étoiles. » Une célèbre locution latine. Fréquemment citée de manière incorrecte par « per ardua at astra ».

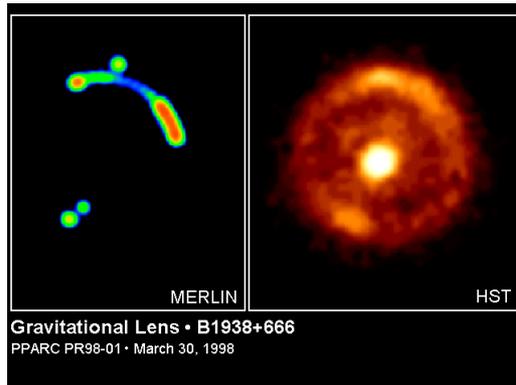


FIGURE 88 L'anneau de Zwicky-Einstein B1938+666, vu dans le spectre radio (à gauche) et dans le domaine optique (à droite). (NASA)

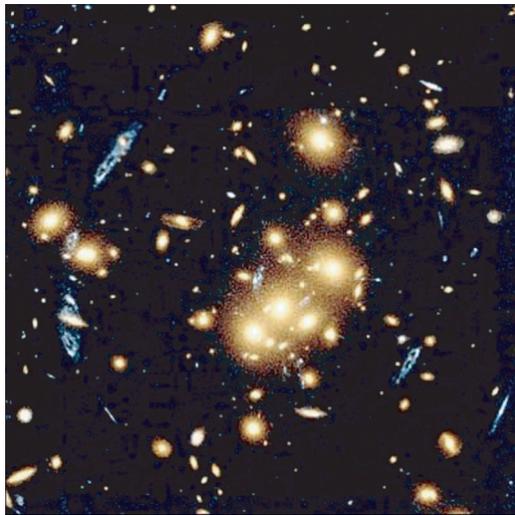


FIGURE 89 Images bleues multiples d'une galaxie formées par l'amas en jaune CL0024+1654. (NASA)

encore plus intéressants, où l'une des deux étoiles possède une planète de masse comparable à la Terre, ont également été observés. Les années à venir conduiront certainement à de nombreuses observations complémentaires, à l'aide notamment du programme d'observation céleste de l'hémisphère Sud qui analyse la luminosité d'environ 100 millions d'étoiles chaque nuit.

En règle générale, les images d'étoiles proches de nous sont véritablement uniques, mais pour les étoiles distantes, ce problème est plus épineux. Globalement, pour des étoiles seules, cette répercussion n'est pas très conséquente. De manière rassurante, seules quelque 80 images multiples d'étoiles ont été identifiées jusqu'à présent. Mais lorsque des galaxies entières sont observées en même temps sous forme de plusieurs images distinctes (et pour le moment on en a décelé plusieurs douzaines), nous pourrions commencer à nous sentir déconcertés. Dans la situation de l'amas de galaxies CL0024+1654, indiqué sur la [Figure 89](#), on aperçoit sept images bleues, minces et allongées de la même galaxie lointaine, autour des galaxies elliptiques jaunes plus proches de nous.

Si des images multiples peuvent être engendrées par des lentilles gravitationnelles, la forme de l'Univers pourrait également y ajouter son petit grain de sel.

QUELLE EST LA FORME DE L'UNIVERS ?

Il existe une analogie répandue qui permet d'échapper à certains des problèmes que nous venons de soulever. L'Univers dans son évolution est similaire à la surface d'une sphère en expansion permanente : la surface est finie, mais elle ne possède pas de frontières. L'Univers est tout simplement doté d'une dimension supplémentaire ; par conséquent, son volume est également en accroissement perpétuel et fini, mais sans frontières. Cette affirmation présume que l'Univers possède la même topologie, la même « forme » que celle d'une sphère ayant une dimension supplémentaire.

Réf. 203

Mais quelle preuve expérimentale permet-elle d'appuyer cette affirmation ? Il n'y en a aucune. Nous ne savons encore rien sur la morphologie de l'univers. Elle est extrêmement ardue à déterminer, simplement à cause de sa taille vertigineuse.

Qu'est-ce que les expériences nous enseignent ? Dans l'Univers local, disons à l'intérieur d'une région de quelques millions d'années-lumière qui nous entoure, la topologie est simplement connexe. Mais pour des distances plus grandes, nous ne pouvons pratiquement rien affirmer. Les recherches sur les sursauts gamma nous informeront peut-être sur la topologie, puisque ces sursauts se sont produits pour la plupart à l'aube des temps*. Peut-être même l'étude des fluctuations du rayonnement de fond diffus cosmologique nous en dira-t-elle plus. Toutes ces recherches en sont encore à leurs balbutiements.

Puisque nous en savons peu, nous pouvons nous interroger sur l'ensemble des réponses possibles. Comme mentionné ci-dessus, dans le modèle standard de la cosmologie avec $k = 1$, l'espace-temps est généralement considéré comme étant un produit entre un temps linéaire, ayant la topologie \mathbb{R} de la droite réelle, et une sphère S^3 pour l'espace. Cela constitue la forme la plus élémentaire possible, correspondant à un Univers *simplement connexe*. Pour $k = 0$, la topologie la plus simple pour l'espace est l'espace réel tridimensionnel \mathbb{R}^3 , et pour $k = -1$ c'est une variété hyperbolique \mathbf{H}^3 .

Page 216

De surcroît, la Figure 82 avait montré que, en fonction de la valeur de la constante cosmologique, l'espace pouvait être fini et délimité, ou infini et sans bords. Selon les calculs de Friedmann-Lemaître, la simple connexité est ordinairement implicitement présumée, bien qu'elle ne soit pas du tout requise.

Il se pourrait bien que l'espace-temps soit *multiplement* connexe, comme une version d'un tore de dimension supérieure. Il pourrait également y avoir des topologies encore plus complexes**. Dans ces circonstances, il se pourrait même que le véritable nombre de galaxies soit beaucoup plus petit que celui que l'on observe. Cette situation correspondrait à un kaléidoscope, où quelques perles produisent un grand nombre d'images par réflexion. De plus, des surprises topologiques pourraient aussi être camouflées derrière l'horizon.

En réalité, l'étendue des possibilités n'est pas limitée aux cas de connexité simple et

* Cette histoire est contée du point de vue mathématique par BOB OSSERMAN, *Poetry of the Universe*, 1996.

** La métrique de Friedmann-Lemaître est également valable pour n'importe quel quotient des topologies simples mentionnées ci-dessus par un groupe d'isométries, engendrant des espaces diédraux et des espaces lenticulaires dans le cas où $k = 1$, des tores dans le cas où $k = 0$, et *n'importe quelle* variété hyperbolique dans le cas où $k = -1$.

Réf. 204

multiple suggérés par la physique classique. Un écueil supplémentaire et complètement inattendu surgira dans la dernière partie de notre promenade, quand la théorie quantique sera intégrée à nos investigations.

Page ??

QU'Y A-T-IL DERRIÈRE L'HORIZON ?

« L'Univers est un lieu gigantesque, peut-être le plus grand. »
 Kilgore Trout, *Venus on the Half Shell*.

L'horizon est une entité compliquée. En fait, tous les modèles cosmologiques montrent qu'il s'éloigne hâtivement de nous. Un examen minutieux révèle que pour un Univers dominé par la matière l'horizon s'éloigne de nous à une vitesse

Réf. 205

Défi 325 pe

$$v_{\text{horizon}} = 3c . \quad (264)$$

C'est un merveilleux résultat, n'est-ce pas ? Évidemment, puisque l'horizon ne transporte aucun signal, ce n'est pas en contradiction avec la relativité. Mais qu'y a-t-il derrière l'horizon ?

Défi 326 pe

Si l'Univers est *ouvert* ou *marginal* (juste à la limite), la matière que nous voyons la nuit est identifiée par la relativité générale, appliquée de manière directe, comme représentant une portion – littéralement – infiniment petite de toute la matière qui existe. En fait, un Univers ouvert ou marginal implique qu'il y a une quantité infinie de matière derrière l'horizon. Une telle affirmation est-elle réfutable ?

Dans un Univers *fermé*, on conjecture toujours que de la matière se trouve derrière l'horizon, mais dans ce cas cela n'en concerne qu'une quantité finie.

En bref, le modèle standard de la cosmologie établit qu'il y a une grande quantité de matière située derrière l'horizon. Comme la majorité des cosmologistes, nous mettons ce problème de côté pour l'instant et nous le ressortirons plus tard au cours de notre promenade. Une description précise de ce sujet est apportée par l'hypothèse de l'inflation.

POURQUOI Y A-T-IL DES ÉTOILES DANS TOUS LES RECOINS DU CIEL ? – L'INFLATION

Que furent les conditions initiales de la matière ? La matière était distribuée selon une densité constante dans l'espace se dilatant à grande vitesse. Comment cela a-t-il pu se produire ? La personne qui a exploré cette question de la manière la plus approfondie est Alan Guth. Jusque-là, nous avons fondé nos études du ciel nocturne, de la cosmologie, sur deux principes observationnels : l'isotropie et l'homogénéité de l'Univers. De plus, l'Univers est (presque) plat. L'inflation représente une percée pour tenter de comprendre l'origine de ces observations. L'uniformité observée en ce moment est étrange : l'aspect plat est une solution instable des équations de Friedmann. Puisque l'Univers est toujours plat après quatorze milliards d'années, il devait être encore plus plat près du Big Bang.

Réf. 206

Guth argumenta que cette homogénéité, cette isotropie et cette platitude pouvaient précisément apparaître si, au cours de la première seconde de son histoire, l'Univers avait traversé une brève phase d'accroissement exponentiel de sa taille, qu'il appela *inflation*. Cette augmentation exponentielle de taille, d'un facteur d'environ 10^{26} , aurait homogénéisé l'Univers. Cette évolution extrêmement courte aurait été pilotée par un champ

encore inconnu, le *champ de l'inflation*. L'inflation semble également décrire correctement la croissance des inhomogénéités présentes dans le rayonnement de fond diffus cosmologique.

Mais voilà, jusqu'à présent, l'inflation pose autant de questions qu'elle n'en résout. Vingt ans après sa soumission initiale, Guth reste lui-même sceptique sur le fait de savoir si elle constitue une véritable avancée conceptuelle. Le dernier mot de l'histoire n'a pas encore été prononcé.

POURQUOI Y A-T-IL SI PEU D'ÉTOILES ? – LE CONTENU EN ÉNERGIE ET EN ENTROPIE DE L'UNIVERS

« Die Energie der Welt ist constant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu*.
Rudolph Clausius »

La densité de matière-énergie de l'Univers est proche de la valeur critique. L'inflation, décrite dans la section précédente, constitue l'explication privilégiée pour comprendre cette correspondance. Cela entraîne que le nombre réel d'étoiles est déterminé par le comportement de la matière aux températures extrêmement élevées, et par la densité d'énergie émise à plus basse température. Le rapport précis est toujours un sujet de recherches intenses. Mais ce problème soulève également une question en rapport avec la citation ci-dessus. L'initiateur du mot « entropie », Rudolph Clausius, avait-il raison lorsqu'il formula cette célèbre déclaration ? Portons notre regard sur ce que la relativité générale dit concernant tout cela.

En relativité générale, une énergie *totale* peut effectivement être définie, contrairement à l'énergie *localisée*, qui ne le peut pas. L'énergie totale de toute la matière et du rayonnement est en réalité une constante du mouvement. Elle est donnée par la somme des contributions baryonique, lumineuse et celle relative aux neutrinos :

$$E = E_b + E_\gamma + E_\nu \approx \frac{c^2 M_0}{T_0} + \dots + \dots \approx \frac{c^2}{G} + \dots \quad (265)$$

Cette valeur est constante uniquement lorsqu'elle est intégrée sur l'Univers tout entier, et non quand on prend seulement en considération l'intérieur de l'horizon**.

De nombreuses personnes y ajoutent aussi un terme d'énergie gravitationnelle. Si nous essayons d'en faire autant, nous sommes obligés de le définir de telle manière qu'il soit exactement égal à la valeur négative du terme précédent. Cette valeur pour l'énergie gravitationnelle conduit à la conjecture populaire qui stipule que l'énergie *totale* de l'Univers doit être nulle. Autrement dit, le nombre d'étoiles pourrait également être limité par cette relation.

Cependant, la discussion sur l'*entropie* laisse entrevoir une question subtile derrière toutes ces formulations apparemment évidentes. Beaucoup de gens ont tenté d'attribuer des valeurs à l'entropie de l'Univers. Certains ont vérifié si la relation

Réf. 207

* « L'énergie de l'Univers est constante. Son entropie tend vers un maximum. »

** Excepté pour le cas où la pression peut être négligée.

$$S = \frac{kc^3}{G\hbar} \frac{A}{4} = \frac{kG}{\hbar c} 4\pi M^2, \quad (266)$$

Défi 327 pe qui est correcte pour les trous noirs, s'applique également à l'Univers. Cela présuppose que toute la matière et tout le rayonnement de l'Univers peuvent être décrits par une certaine température moyenne. Ils avancent l'idée que l'entropie de l'Univers est étonnamment faible, de telle façon qu'il doit y avoir un certain principe d'arrangement, dissimulé derrière elle. D'autres spéculent même sur le fait de savoir d'où provient l'entropie de l'Univers, et si l'horizon est la source de celle-ci.

Mais soyons prudents. Clausius postule, sans l'ombre d'un doute, que l'Univers est un système fermé, et en déduit donc l'affirmation citée ci-dessus. Vérifions cette supposition. L'entropie décrit l'énergie maximale qui peut être extraite d'un objet chaud. Suite à la découverte de la structure particulaire de la matière, il devint clair que l'entropie est également déterminée par le nombre d'états microscopiques qui peuvent composer un état macroscopique particulier. Mais ni l'une ni l'autre de ces définitions n'est logique si elle est appliquée à l'Univers dans son ensemble. Il n'existe aucune manière d'extraire de l'énergie de celui-ci, et aucune manière de dire combien d'états microscopiques de l'Univers ressembleraient à son état macroscopique.

Page 25 L'explication fondamentale est l'impossibilité d'appliquer le concept d'état à l'Univers. Nous avons tout d'abord défini l'état comme étant toutes ces propriétés d'un système qui nous permettent de le distinguer des autres systèmes ayant les mêmes propriétés intrinsèques, ou qui diffèrent d'un observateur à un autre. Vous devriez pouvoir vérifier, pour votre culture personnelle, que pour l'Univers de telles propriétés qui déterminent un état n'existent nullement.

Défi 328 s

Nous pouvons parler de l'état de l'espace-temps, et nous pouvons définir l'état de la matière et de l'énergie. Mais nous ne pouvons pas évoquer l'état de l'Univers, parce que ce concept ne possède aucun sens. S'il n'y a pas d'état pour l'Univers, il n'y a pas d'entropie qui lui soit associée. Et il n'y a pas non plus de valeur pour l'énergie. C'est en fait l'unique conclusion correcte que nous puissions tirer concernant cette question.

POURQUOI LA MATIÈRE EST-ELLE AMASSÉE EN GRUMEAUX ?

Nous pouvons contempler les étoiles parce que l'Univers est constitué principalement d'espace vide, autrement dit, parce que les étoiles sont petites et distantes. Mais pourquoi est-ce ainsi ? L'expansion cosmique fut déduite et évaluée en utilisant une distribution homogène de la masse. Alors pourquoi la matière s'est-elle agglomérée ?

Il se révèle que des distributions homogènes de masse sont *instables*. Si la densité fluctue pour une raison quelconque, des régions de densité plus élevée attireront plus de matière que les régions de densité moindre. La gravitation entraîne donc que les régions de plus forte densité voient leur densité augmenter, et que les régions de plus faible densité se vident petit à petit de leur contenu. Pouvez-vous confirmer cette instabilité, simplement en considérant un espace rempli de poussière et la formule $a = GM/r^2$? En résumé, même une minuscule fluctuation quantique de la densité engendrera, après un certain laps de temps, des grumeaux de matière.

Défi 329 pe

Mais comment les premières inhomogénéités se sont-elles formées ? C'est l'un des grands problèmes de la physique moderne et de l'astrophysique, pour lequel il n'y a

pas encore de réponse unanimement acceptée. Plusieurs expériences avancées sont en train de mesurer les variations du spectre de rayonnement du fond diffus cosmologique par rapport à la position angulaire et à la polarisation. Ces résultats, qui seront disponibles dans les années à venir, pourraient fournir des renseignements sur la manière de résoudre ce problème.

Réf. 208

POURQUOI LES ÉTOILES SONT-ELLES SI PETITES PAR RAPPORT À L'UNIVERS ?

Page 260

Étant donné que la densité de matière est proche de la valeur critique, la taille des étoiles, qui contiennent la plus grande partie de la matière, est une conséquence de l'interaction entre les particules élémentaires qui les constituent. Nous montrerons plus loin que la relativité générale (seule) ne peut pas expliquer une taille quelconque observée dans la nature. La discussion de ce problème constitue un thème de la théorie quantique.

LES ÉTOILES ET LES GALAXIES SONT-ELLES EN TRAIN DE S'ÉLOIGNER LES UNES DES AUTRES OU EST-CE L'UNIVERS QUI SE DILATE ?

Défi 330 pe

Pouvons-nous faire une distinction entre l'expansion de l'espace et l'éloignement des galaxies ? Oui, nous le pouvons. Pouvez-vous découvrir un argument ou imaginer une expérience permettant de faire cette distinction ?

Réf. 209

L'expansion de l'Univers ne s'applique pas à l'espace situé sur Terre. Cette expansion est calculée pour une distribution homogène et isotrope de la masse. La matière n'est ni homogène ni isotrope au sein des galaxies, l'approximation du principe cosmologique n'est donc pas valable ici-bas. On a même vérifié expérimentalement, par l'étude des spectres atomiques provenant de divers endroits du Système solaire, qu'il *n'y a pas* de récession de Hubble dans notre voisinage immédiat.

Y A-T-IL PLUS D'UN UNIVERS ?

Défi 331 pe

L'existence de « plusieurs » Univers pourrait constituer une alternative lorsque nous étudions la question de savoir si nous observons toutes les étoiles. Mais vous pouvez vérifier qu'aucune définition de l'« Univers » donnée ci-dessus, qu'elle soit « toute la matière-énergie » ou « toute la matière-énergie et tout l'espace-temps », ne nous permet de répondre positivement à cette question.

Page ??

Il n'existe aucun procédé pour définir une pluralité concernant l'Univers : soit l'Univers est le tout, et il est alors unique, soit il n'est pas le tout, et alors il n'est pas l'Univers. Nous découvrirons que la théorie quantique ne fera pas varier cette conclusion, malgré les rumeurs incessantes qui affirment le contraire.

Quiconque épilogue sur des Univers multiples tient un discours inintelligible.

POURQUOI LES ÉTOILES SONT-ELLES FIGÉES ? – BRAS, ÉTOILES ET PRINCIPE DE MACH

« Si les astres étaient immobiles, le temps et l'espace n'existeraient plus. »
Maurice Maeterlinck*

* Maurice Maeterlinck (1862–1949) est un célèbre dramaturge belge.

Les deux bras que possèdent les hommes ont joué un rôle crucial dans les discussions sur le mouvement, et particulièrement dans le développement de la relativité. En observant le firmament la nuit, nous pouvons formuler une observation élémentaire, si nous relâchons nos bras. Lorsque nous sommes immobiles, nos bras restent le long du corps. Ensuite, nous tournons rapidement sur nous-mêmes. Nos bras se soulèvent. En fait, ils le font à chaque fois que nous voyons les étoiles tourner. Certaines personnes ont passé une grande partie de leur vie à étudier ce phénomène. Pourquoi ?

Réf. 210 Les étoiles et les bras démontrent que le mouvement est relatif, et non pas absolu*. Cette remarque inspire deux formulations possibles de ce qu' Einstein dénommait le *principe de Mach*.

— *Les référentiels inertiels sont déterminés par le reste de la matière contenue dans l'Univers.*

Cette idée est en vérité comprise dans la relativité générale. Il n'y a aucune interrogation à ce sujet.

— *L'inertie est due à l'interaction avec le reste de l'Univers.*

Cette variante est plus controversée. Nombreux sont ceux qui l'interprètent comme voulant indiquer que la *masse* d'un objet dépend de la distribution de masse présente dans le reste de l'Univers. Cela signifierait que nous avons besoin d'examiner si la masse est anisotrope lorsqu'un énorme corps est situé à proximité. Bien évidemment, cette question a été étudiée expérimentalement : nous avons simplement besoin d'évaluer si une particule possède la même valeur de masse lorsqu'elle est accélérée dans différentes directions. Il n'est pas surprenant qu'aucune anisotropie de ce type n'ait été décelée jusqu'à un très haut niveau de précision. Par conséquent, beaucoup en ont conclu que le principe de Mach est faux, alors que d'autres en ont conclu, non sans difficulté, que ce sujet n'est pas encore définitivement tranché.

Réf. 211

Réf. 212

Mais en réalité, il est aisé de voir que Mach *ne pouvait pas* sous-entendre une variation de masse : nous devrions alors également conclure que la masse est dépendante de la distance, même en physique galiléenne. Mais nous savons que ce n'est pas vrai, personne en son for intérieur n'a eu un quelconque doute là-dessus.

Défi 332 pe

Toute cette discussion est due à un malentendu sur ce que nous entendons par « inertie » : nous pouvons l'interpréter comme étant une *masse* inertielle ou comme étant un *mouvement* inertielle (comme les bras en mouvement sous les étoiles). Il n'existe aucune preuve flagrante indiquant que Mach croyait soit à la masse anisotrope, soit à la masse dépendante de la distance. Toute cette discussion constitue un exemple d'individus annonçant fièrement ne pas faire une erreur, qui est abusivement attribuée à une autre personne présumée plus sotte**.

* Le raisonnement original de Newton, et de nombreuses autres personnalités, faisait appel à un seau et à la surface de l'eau à l'intérieur, mais les arguments sont les mêmes.

** Pour citer un autre exemple, nous avons généralement appris à l'école que Christophe Colomb fut tourné en dérision parce qu'il pensait que la Terre était ronde. Mais il ne fut pas du tout moqué pour cette raison. Il y avait simplement des désaccords sur la *taille* de la Terre, et en fait il s'avéra que ses critiques avaient raison, et qu'il s'était trompé dans son estimation, beaucoup trop petite, du rayon terrestre.

Réf. 212 Manifestement, les effets de l'inertie doivent dépendre de la distribution de masse présente dans le reste de l'Univers. Le principe de Mach est correct. Si Mach a commis certaines bévues dans sa vie (notamment son opposition à l'idée des atomes qu'il soutint, malgré l'évidence expérimentale, jusqu'à sa mort), son principe n'en est *pas* une. Malheureusement, il faut s'attendre à ce que ce mythe concernant l'inexactitude du principe de Mach persiste, tout comme celui de la dérision concernant Christophe Colomb.

Défi 333 s En fait, le principe de Mach possède une importance inestimable. Par exemple, considérez notre galaxie. Les expériences montrent qu'elle est aplatie et en rotation. Le Soleil tourne autour de son centre en 250 millions d'années environ. En réalité, si le Soleil ne tournait pas autour du centre galactique, ce dernier nous engloutirait en à peine 20 millions d'années. Comme le fit remarquer le physicien Dennis Sciama, à partir de la forme de notre galaxie nous pouvons esquisser une conclusion profonde : il doit y avoir une quantité considérable de matière autre que celle que nous voyons, c'est-à-dire un nombre gigantesque d'autres étoiles et galaxies dans l'Univers. Pouvez-vous appuyer son raisonnement ?

AU REPOS DANS L'UNIVERS

Il n'existe aucun référentiel de prédilection en relativité restreinte, aucun espace absolu. En est-il de même dans l'Univers réel ? Non, il *existe* un référentiel privilégié. En fait, dans la cosmologie standard du Big Bang, la galaxie moyenne est au repos. Bien que nous parlions du Big Bang, n'importe quelle galaxie moyenne peut proclamer à juste titre qu'elle est au repos. Chacune d'entre elles est en chute libre. La meilleure concrétisation de ce référentiel privilégié est fournie par le rayonnement du fond diffus.

Autrement dit, le ciel nocturne est noir parce que nous nous déplaçons avec une vitesse pratiquement nulle à travers le rayonnement de fond diffus. Si la Terre avait une vitesse relative conséquente par rapport à ce milieu, le ciel paraîtrait brillant même la nuit grâce à l'effet Doppler agissant sur ce fond diffus. En d'autres termes, le fait que le ciel nocturne soit sombre dans toutes les directions est une conséquence de notre lente progression par rapport au rayonnement de fond diffus.

Défi 334 pe Ce mouvement « lent » possède une vitesse de 368 km/s. (C'est la valeur attribuée au mouvement du Soleil, mais il y a des variantes dues à l'ajout du mouvement de la Terre.) Cette valeur est énorme par rapport à celles de notre vie quotidienne, mais ridicule comparée à la vitesse de la lumière. Des études plus approfondies ne contredisent pas cette conclusion. Même le mouvement de la Voie lactée et celui du Groupe local par rapport au rayonnement de fond diffus cosmologique sont de l'ordre de 600 km/s, ce qui est toujours bien en deçà de la vitesse de la lumière. Les raisons pour lesquelles la Galaxie et le Système solaire se déplacent à ces vitesses « faibles » à travers l'Univers ont déjà été étudiées dans notre excursion. Pouvez-vous en faire une synthèse ?

Réf. 213 Par ailleurs, le terme « Univers » est-il approprié ? Est-ce que l'Univers tourne, comme l'indique son étymologie ? Si par Univers nous entendons l'intégralité du milieu qui baigne le cosmos, la question n'a pas de sens, parce que la rotation n'est définie que pour des corps, c'est-à-dire pour des parties de l'Univers. En revanche, si par Univers nous entendons seulement « toute la matière », la réponse *peut* être déterminée par des expériences. Il apparaît que cette rotation, si elle existe, est extrêmement petite : des relevés du rayonnement de fond diffus cosmologique montrent qu'au cours de sa durée de

vie l'Univers ne peut pas avoir tourné de plus d'un centième de millionième de tour ! En bref, « Univers » est un terme inapproprié.

LA LUMIÈRE ATTIRE-T-ELLE LA LUMIÈRE ?

Une autre raison pour laquelle nous pouvons admirer les étoiles est que leur lumière nous parvient. Mais pourquoi des rayons lumineux qui voyagent ne sont-ils pas perturbés par l'action gravitationnelle de tous les autres rayons ? Nous savons que la lumière est de l'énergie et que toute énergie en attire d'autres par le truchement de la gravitation. En particulier, la lumière est de l'énergie électromagnétique, et des expériences ont montré que toute énergie électromagnétique est soumise à la gravitation. Deux faisceaux lumineux qui avancent en formant un angle minuscule entre eux peuvent-ils converger à cause de leur attraction gravitationnelle mutuelle ? Cela pourrait avoir des effets mesurables et peut-être intéressants sur la lumière observée, provenant des astres lointains.

La manière la plus simple d'aborder ce problème consiste à étudier la question suivante : des faisceaux lumineux parallèles restent-ils parallèles ? De manière captivante, un calcul précis indique que cette gravitation réciproque n'altère *pas* la trajectoire de deux rayons lumineux parallèles, même si elle altère *vraiment* la trajectoire de rayons lumineux antiparallèles*. La raison est que, pour des rayons parallèles se déplaçant à la vitesse de la lumière, la composante gravitomagnétique *annule* exactement la composante gravitoélectrique.

Défi 335 pe

Puisque la lumière n'attire pas la lumière qui se déplace avec elle, elle n'est pas dérangée par sa gravité durant les millions d'années qu'elle met pour parvenir jusqu'à nous depuis les astres lointains. La lumière n'attire ni ne perturbe la lumière se propageant à côté d'elle. Jusqu'à présent, tous les effets connus de la mécanique quantique ont également confirmé cette conclusion.

LA LUMIÈRE SE DÉSINTÈGRE-T-ELLE ?

Dans la section sur la théorie quantique, nous rencontrerons des expériences démontrant que la lumière est constituée de particules. Il est plausible que ces photons puissent *se désintégrer* en d'autres particules, encore non découvertes, ou en photons de plus basse fréquence. Si cela se produisait réellement, nous ne pourrions pas observer les étoiles lointaines.

Défi 336 pe

Réf. 215

Mais toute désintégration signifierait aussi que la lumière change de direction (pourquoi ?) et donc qu'elle engendre des images voilées des objets distants. Toutefois, nous n'observons aucun flou. En outre, le physicien soviétique Matvey Bronstein mit en évidence dans les années 1930 le fait que tout processus de désintégration de la lumière engendrerait une décroissance plus importante pour les basses fréquences. Lorsque le décalage des ondes radio a été vérifié, en particulier celui de la fameuse raie de 21 cm, et qu'il a été comparé au décalage de la lumière issue de la même source, aucune différence n'a été décelée pour chacune des galaxies examinées.

Réf. 216

Certains ont même vérifié que la constante de structure fine de Sommerfeld, qui détermine la couleur des objets, ne varie pas au cours du temps. Hormis une prétention erronée datant de ces dernières années, aucun changement n'a pu être détecté sur des

* Des rayons antiparallèles sont des rayons parallèles voyageant dans des directions opposées.

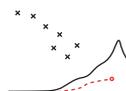
milliards d'années.

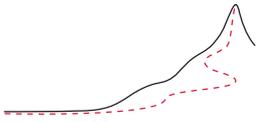
Défi 337 pe

Page 228

Bien entendu, au lieu de se désintégrer, la lumière pourrait également être *frappée* par une certaine entité encore inconnue. Mais cette éventualité est exclue pour les mêmes raisons. Ces investigations montrent également qu'il n'existe aucun mécanisme de décalage vers le rouge supplémentaire dans la nature, mis à part les décalages Doppler et gravitationnel.

L'observation des étoiles la nuit a permis en réalité de lever le voile sur de nombreuses propriétés de la nature. Nous continuons dorénavant notre ascension montagnaise avec un sujet plus général, plus proche de notre quête des principes fondamentaux qui régissent le mouvement.





CHAPITRE 6

TROUS NOIRS – L'ÉTERNELLE CHUTE

« Qui iacet in terra non habet unde cadat*.
Alanus de Insulis »

POURQUOI ÉTUDIER LES TROUS NOIRS ?

Les trous noirs sont les phénomènes gravitationnels les plus extrêmes. Ils atteignent la limite de la nature concernant la longueur divisée par la masse. Ils produisent la valeur de la force la plus élevée possible dans la nature ; par conséquent, ils engendrent de fortes courbures de l'espace-temps. Ainsi, les trous noirs ne peuvent pas être étudiés *sans* l'aide de la relativité générale. De surcroît, leur étude constitue un cheminement essentiel vers l'unification et la description définitive du mouvement.

- Réf. 109 « Trou noir » est un raccourci pour dire « objet dont l'effondrement gravitationnel est achevé ». Pendant de nombreuses années, nous n'avons pas vraiment su s'ils existaient ou non. Mais les données expérimentales disponibles ont maintenant conduit la plupart des spécialistes à conclure qu'un trou noir est logé au centre de la majorité des galaxies, y compris la nôtre. L'existence des trous noirs est également suspectée au cœur des quasars et des sursauts gamma. Il semble que l'évolution des galaxies et celle des trous noirs soient fortement corrélées. De plus, une demi-douzaine de trous noirs plus petits ont été identifiés un peu partout dans notre galaxie. Pour ces raisons et beaucoup d'autres, les trous noirs, les systèmes les plus impressionnants, les plus puissants et les plus relativistes de la nature, représentent un sujet d'étude fascinant.
- Réf. 217
- Réf. 218

HORIZONS

- Réf. 219 La vitesse de libération est la vitesse nécessaire pour propulser un projectile de telle manière qu'il ne retombe jamais. Elle dépend de la masse et de la taille de la planète depuis laquelle ce lancer se produit. Que se passe-t-il lorsqu'une planète ou une étoile possède une vitesse de libération supérieure à la vitesse c de la lumière ? Ce type d'objet fut tout d'abord imaginé par le géologue britannique John Michell en 1784, et de manière indépendante par le mathématicien français Pierre Laplace en 1795, bien longtemps avant que la relativité générale ne fût développée. Michell et Laplace se rendirent compte de quelque chose de fondamental : même si cet objet ayant une vitesse de libération si élevée était une étoile chaude, il nous apparaîtrait comme étant parfaitement *noir*. Cet objet empêcherait toute lumière de le quitter. De plus, il engloutirait toute la lumière provenant

* « Celui qui est debout sur le sol ne peut tomber plus bas. » Le nom original de l'auteur est Alain de Lille (v. 1128–1203).

Réf. 109 de derrière. En 1967, John Wheeler* inventa l'expression, dorénavant consacrée, de *trou noir*.

Défi 338 pe Un court calcul suffit pour démontrer que la lumière ne peut pas s'échapper d'un corps de masse M , à chaque fois que le rayon est plus petit qu'une valeur critique donnée par

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \quad (267)$$

appelée le *rayon de Schwarzschild*. Cette formule est valide à la fois pour la gravitation universelle et pour la relativité générale, à condition qu'en relativité générale nous considérons que le rayon est équivalent à la circonférence divisée par 2π . Un tel corps atteint la valeur limite concernant le rapport de la longueur par la masse dans la nature. Pour cette raison et pour d'autres qui seront données sous peu, nous appellerons également R_S la *taille* du trou noir de masse M . (Mais remarquez qu'il ne représente que la moitié du diamètre. De plus, le mot « taille » doit être pris avec des pincettes.) En principe, il est possible d'imaginer un objet ayant un rapport longueur sur masse plus petit, mais personne n'en a encore observé un. En fait, nous découvrirons qu'il n'existe aucune façon d'observer un objet plus petit que le rayon de Schwarzschild, de la même manière qu'un objet se déplaçant plus vite que la lumière ne peut être observé. Cependant, nous pouvons observer des trous noirs (indirectement, bien sûr [N.D.T.]) – le cas limite – de la même manière que nous pouvons apercevoir les entités se déplaçant à la vitesse de la lumière.

Lorsqu'une masse s'approche du rayon critique R_S , deux choses se produisent. Premièrement, l'accélération propre locale pour des masses ponctuelles (imaginaires) augmente à l'infini. Pour des objets réalistes de taille finie, le trou noir exerce la force la plus forte possible qui soit dans la nature. Quelque chose qui tombe dans un trou noir ne peut plus en être retiré. Un trou noir engloutit donc toute la matière qui chute dedans. Il agit comme un aspirateur cosmique.

Défi 339 pe À la surface d'un trou noir, le facteur de décalage vers le rouge pour un observateur éloigné augmente également à l'infini. Le rapport entre ces deux quantités est appelé la *gravité de surface* d'un trou noir. Il est donné par

$$g_{\text{surf}} = \frac{GM}{R_S^2} = \frac{c^4}{4GM} = \frac{c^2}{2R_S} . \quad (268)$$

Un trou noir ne permet donc pas à la lumière de s'échapper.

Une surface qui atteint la force limite et un décalage vers le rouge infini rend impossible l'envoi de lumière, de matière, d'énergie ou de signaux de n'importe quel type vers le monde extérieur. Un trou noir est donc entouré par un horizon. Nous savons qu'un horizon est une surface limite. En réalité, un horizon est une frontière, pour deux raisons. Premièrement, un horizon est une limite pour les communications : personne ne peut échanger des informations à travers celui-ci. Deuxièmement, un horizon est une surface

* John Archibald Wheeler (1911–) est un physicien américain, un spécialiste renommé de la relativité générale et l'auteur de plusieurs ouvrages extraordinaires, dont le ravissant JOHN A. WHEELER, *A Journey into Gravity and Spacetime*, Scientific American Library & Freeman, 1990, dans lequel il expose avec passion la relativité générale en détail, sans faire appel aux mathématiques.

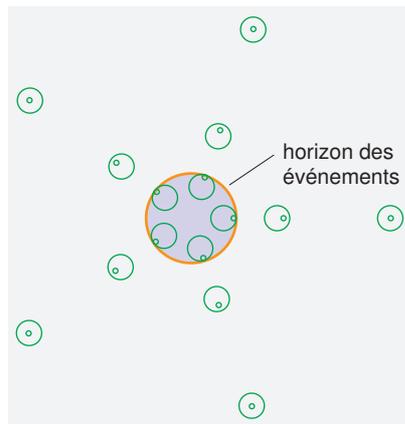


FIGURE 90 Les cônes de lumière situés dans le plan équatorial autour d'un trou noir statique, vu du dessus.

Défi 340 pe

de force et de puissance maximales. Ces propriétés sont suffisantes pour satisfaire toutes les questions concernant les effets dus aux horizons. Par exemple : que se passe-t-il lorsqu'un faisceau lumineux est envoyé vers le haut depuis l'horizon ? Et d'une position située légèrement au-dessus de l'horizon ?

Les trous noirs, considérés comme étant des objets astronomiques, sont donc différents des planètes. Pendant la formation des planètes, la matière s'amoncelle en grumeaux, et tant qu'elle ne peut pas être comprimée davantage un équilibre est trouvé, lequel détermine le rayon de la planète. C'est le même mécanisme qui se produit lorsqu'une pierre est jetée vers la Terre : elle cesse de chuter lorsqu'elle *frappe* le sol. Un « sol » est formé à chaque fois que de la matière heurte une autre matière. Dans le cas d'un trou noir, il n'y a pas de sol, toutes les choses *continuent* de chuter. C'est pourquoi, en langue russe, les trous noirs sont communément appelés des *collapsars**.

Réf. 220

Cette chute perpétuelle se produit lorsque la concentration de matière est si importante qu'elle surpasse toutes les interactions qui font que la matière est *impénétrable* dans la vie courante. En 1939, Robert Oppenheimer** et Hartland Snyder ont montré qu'en théorie un trou noir se forme à chaque fois qu'une étoile de masse suffisante cesse de brûler. Lorsqu'une étoile suffisamment massive s'éteint, les interactions qui façonnent son « sol » disparaissent, et toutes les choses continuent de chuter *ad vitam aeternam*.

Un *trou noir est de la matière en chute libre permanente*. Néanmoins, son rayon pour un observateur extérieur demeure constant ! Mais ce n'est pas tout. À cause de cette chute libre perpétuelle, les trous noirs représentent le seul état de la matière qui soit en équilibre thermodynamique ! En un certain sens, les sols et tous les autres états quotidiens de la matière sont métastables*** : ces structures ne sont pas aussi stables que les trous noirs.

La propriété caractéristique d'un trou noir est donc son *horizon*. La première fois

* C'est une abréviation de l'expression anglaise « collapsed star » ou « étoile effondrée ». [N.D.T.]

** Robert Oppenheimer (1904–1967) est un important physicien américain. Il peut être désigné comme le père de la physique théorique aux États-Unis. Il travailla sur la théorie quantique et la physique atomique. Il prit alors la tête du groupe qui développa la bombe nucléaire durant la Seconde Guerre mondiale. Il fut également la plus éminente victime (innocente) de l'une des plus grandes « chasses aux sorcières » jamais organisées dans son propre pays. Consultez aussi le site books.nap.edu/openbook.php?record_id=5737&page=175.

*** C'est-à-dire qu'ils sont cinétiquement stables mais pas thermodynamiquement. [N.D.T.]

Page 84 que nous avons rencontré les horizons, ce fut en relativité restreinte, dans la section sur les observateurs accélérés. Les horizons dus à la gravitation sont analogues au regard de toutes leurs propriétés ; la section sur la force et la puissance maximales en a fourni une première impression. L'unique différence que nous avons relevée est due à l'omission de la gravitation en relativité restreinte. Par conséquent, les horizons dans la nature ne peuvent pas être plats, contrairement à ce qui est suggéré par les remarques des observateurs ponctuels imaginaires supposés exister en relativité restreinte.

Page 132 Le principe de la force maximale et les équations du champ impliquent tous les deux que l'espace-temps situé autour d'une masse symétrique par rotation (donc qui n'est pas en rotation) et électriquement neutre est décrit par

$$di^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} - r^2 d\varphi^2 / c^2 . \quad (269)$$

C'est la *métrique de Schwarzschild*. Comme mentionné ci-dessus, r est la circonférence divisée par 2π , t est le temps mesuré à l'infini. Jamais un observateur *extérieur* ne recevra un signal quelconque émis depuis un rayon de valeur $r = 2GM/c^2$ ou inférieure. En fait, puisque le temps propre i d'un observateur situé au rayon r est relié au temps t d'un observateur situé à l'infini via

$$di = \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} dt , \quad (270)$$

nous en déduisons qu'un observateur situé sur l'horizon devrait avoir un temps propre évanescant. Autrement dit, à l'horizon le décalage vers le rouge est infini. (En fait, la surface de décalage vers le rouge infini et l'horizon coïncident uniquement pour des trous noirs statiques. Pour des trous noirs en rotation, les deux surfaces sont distinctes.) Tout ce qui se passe sur l'horizon progresse avec une lenteur infinie, comme le remarque un observateur éloigné. En d'autres termes, pour un observateur distant qui examine ce qui se passe sur l'horizon lui-même, absolument rien ne se produit jamais.

De la même façon que des observateurs ne peuvent pas atteindre la vitesse de la lumière, ceux-ci ne peuvent pas parvenir à un horizon. Pour un deuxième observateur, la seule chose qui puisse se produire est que le premier se déplace presque aussi vite que la lumière. De la même manière, pour un deuxième observateur, la seule chose qui puisse se produire est que le premier ait presque atteint l'horizon. De surcroît, un voyageur ne peut pas savoir de combien il se rapproche de la vitesse de la lumière pour un autre, et ressent la vitesse de la lumière comme étant inaccessible. De la même manière, un voyageur (dans un vaste trou noir) ne peut pas avoir une idée de combien il est proche d'un horizon et imagine que ce dernier est inaccessible.

En relativité générale, on prédit que les horizons, quels que soient leurs types, sont *noirs*. Puisque la lumière ne peut s'en échapper, les horizons classiques sont des surfaces parfaitement sombres. En fait, les horizons sont les entités les plus ténébreuses qui puissent être imaginées : rien dans la nature n'est plus sombre. Néanmoins, nous découvrons plus tard que les horizons physiques ne sont pas complètement noirs.

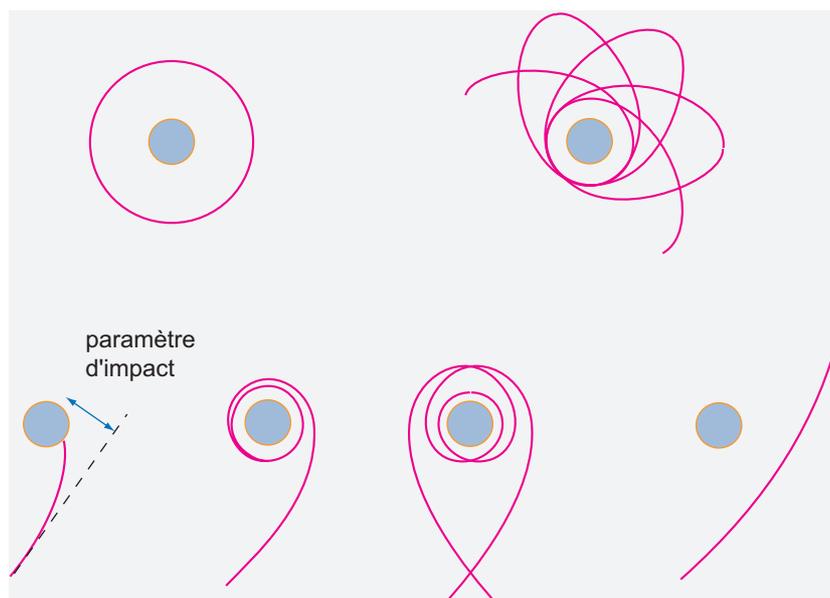


FIGURE 91 Mouvements d'objets non chargés tournant autour d'un trou noir statique – pour différents paramètres d'impact et vitesses initiales.

ORBITES

Réf. 215 Puisque les trous noirs courbent vigoureusement l'espace-temps, un corps se déplaçant au voisinage d'un trou noir se comporte de manière beaucoup plus complexe que prévu par la gravitation universelle. Dans celle-ci, les trajectoires sont des ellipses, des paraboles ou des hyperboles, qui sont toutes des courbes planes. Il apparaît que les trajectoires se situent dans un plan, uniquement près des trous noirs *qui ne sont pas en rotation**.

Défi 342 pe Autour des trous noirs statiques, également appelés *trous noirs de Schwarzschild*, les trajectoires circulaires sont impossibles pour des rayons inférieurs à $3R_S/2$ (pouvez-vous montrer pourquoi ?) et sont instables si elles sont soumises à des perturbations allant de cette valeur jusqu'à un rayon de $3R_S$. Les orbites circulaires ne sont stables qu'à des rayons plus importants. Autour des trous noirs, il n'existe pas de trajectoire elliptique, le trajet correspondant en forme de rosace est indiqué sur la Figure 91. Une telle trajectoire révèle la célèbre avancée du périastre dans toute sa splendeur.

Défi 343 pe Remarquez que le potentiel situé autour d'un trou noir n'est pas significativement différent de $1/r$ pour des distances supérieures à environ quinze rayons de Schwarzschild. Pour un trou noir de la masse du Soleil, cela se situerait à 42 km de son centre : par conséquent, nous ne serions pas en situation de déceler une différence quelconque dans

* Pour de telles trajectoires, la loi de Kepler reliant la distance moyenne à la période de l'orbite

$$\frac{GMt^3}{(2\pi)^2} = r^3 \quad (271)$$

Défi 341 pe reste valable, à condition que l'on considère que le temps propre et le rayon soient mesurés par un observateur lointain.

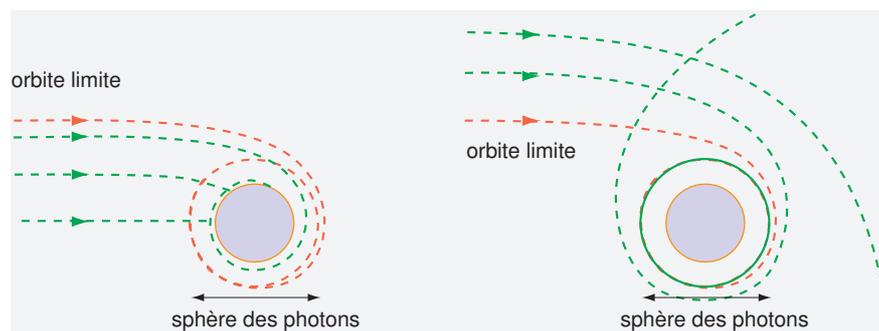


FIGURE 92 Mouvements de la lumière s'approchant d'un trou noir statique.

la course de la Terre autour du Soleil.

Nous avons mentionné à plusieurs reprises au cours de notre aventure que la gravitation est caractérisée par ses effets de marée. À cet égard, les trous noirs exhibent des propriétés extrêmes. Si un nuage de poussière tombe dans un trou noir, la taille de ce nuage augmente au cours de sa chute, jusqu'à ce que celui-ci enveloppe l'horizon tout entier. En fait, ce résultat est valable pour n'importe quel corps étendu. Cette propriété des trous noirs sera d'une importance cruciale plus tard, lorsque nous discuterons de la taille des particules élémentaires.

Pour des corps qui chutent depuis un lieu infiniment éloigné, la situation à proximité des trous noirs est encore plus remarquable. Naturellement, il n'y a pas de trajectoire hyperbolique, seuls des trajets analogues aux hyperboles se présentent dans le cas de corps s'approchant de manière suffisamment distante. Pour des paramètres d'impacts réduits, mais pas trop petits, un corps effectuera un certain nombre de révolutions autour du trou noir, avant de le quitter à nouveau. Ce nombre de révolutions augmente indéfiniment avec la réduction du paramètre d'impact, jusqu'à ce qu'une valeur soit atteinte pour laquelle le corps est capturé à l'intérieur d'une orbite d'un rayon $2R$, comme indiqué sur la Figure 91. Autrement dit, cette orbite *capture* des corps qui s'approchent s'ils la frôlent en deçà d'un certain angle critique. À ce propos, souvenez-vous que dans la gravitation universelle la capture n'est jamais possible. Pour des paramètres d'impacts encore plus petits, le trou noir engloutit l'objet qui se frotte à lui. Dans les deux cas – la capture et la déviation –, un corps peut faire plusieurs tours autour du trou noir, tandis que dans la gravitation universelle il est impossible de faire plus d'un *demi-tour* autour d'un corps.

Cependant, les orbites qui paraissent les plus insensées sont celles qui correspondent au cas parabolique de la gravitation universelle. (Celles-ci sont d'intérêt purement académique, puisqu'elles se produisent avec une probabilité nulle.) En résumé, la relativité altère radicalement les mouvements dus à la gravité.

Autour d'un trou noir *en rotation*, les orbites de masses ponctuelles sont encore plus complexes que celles indiquées dans la Figure 91. Pour des mouvements adéquats, par exemple, les ellipses ne se tiennent plus dans un seul plan – à cause de l'effet Thirring–Lense –, engendrant ainsi des orbites particulièrement enchevêtrées dans les trois dimensions qui emplissent l'espace autour du trou noir.

Pour la lumière passant à proximité d'un trou noir, les trajectoires formées sont éga-

lement intéressantes, comme indiqué sur la [Figure 92](#). Il n'existe pas de distinction qualitative avec le cas des particules rapides. Pour un trou noir statique, le trajet se déroule évidemment dans un seul plan. Naturellement, si la lumière passe assez près, elle peut être fortement courbée, ou même capturée. À nouveau, la lumière peut aussi faire un ou plusieurs tours autour du trou noir avant de repartir ou d'être capturée. La limite entre les deux situations est représentée par la trajectoire dans laquelle la lumière décrit un cercle autour d'un trou noir, à $3R/2$. Si nous étions situés sur cette orbite, nous verrions l'arrière de notre tête en regardant vers l'avant ! Toutefois, cette orbite est instable. La surface contenant toutes les orbites situées à l'intérieur de celle qui est circulaire est appelée la *sphère des photons*. Celle-ci départage donc les trajectoires conduisant à la capture de celles conduisant à une position toujours éloignée. Remarquez qu'il n'existe aucune orbite *stable* pour la lumière autour d'un trou noir. Existe-t-il des trajectoires en forme de rosace pour la lumière tournant autour d'un trou noir ?

Défi 345 pe

Défi 346 pe

Pour la lumière orbitant autour d'un trou noir *en rotation*, les courbes sont beaucoup plus complexes. Rien que dans le plan équatorial, il existe deux trajectoires circulaires possibles pour la lumière : la plus petite est dans le sens de rotation et la plus grande tourne dans le sens opposé.

Défi 347 pe

Pour des trous noirs *chargés*, les orbites décrites par des particules chargées en chute sont encore plus alambiquées. Les lignes du champ électrique doivent être prises en considération. Plusieurs effets fascinants surgissent, lesquels n'ont aucun équivalent avec l'électromagnétisme classique, comme des effets similaires à des versions électriques de l'effet Meissner. Le comportement de ces orbites constitue toujours un domaine de recherches en pleine effervescence de la relativité générale.

ENTROPIE ET CHEVEUX

Comment un trou noir est-il caractérisé ? Il apparaît que toutes les propriétés des trous noirs découlent d'un petit nombre de quantités élémentaires qui les déterminent, à savoir la masse M , le moment cinétique J et la charge électrique Q^* . Toutes les autres propriétés – telles que la taille, la forme, la couleur, le champ magnétique – sont déterminées de manière unique par celles-ci^{**}. C'est comme si, pour employer l'analogie imagée de Wheeler, nous pouvions déduire chaque trait particulier d'une femme à partir de ses dimensions, de sa taille et de sa hauteur. Les physiciens disent aussi que les trous noirs « n'ont pas de cheveux », sous-entendant par là que les trous noirs (classiques) ne possèdent aucun autre degré de liberté. Cette expression fut également introduite par Whee-

* L'existence de trois caractéristiques fondamentales n'est pas sans rappeler le monde des particules. Nous en découvrirons plus concernant le rapport qui existe entre les trous noirs et les particules dans la dernière partie de notre ascension montagnaise.

** Principalement pour des raisons de reconnaissance vis-à-vis de leurs découvreurs, les trous noirs statiques et électriquement neutres sont souvent appelés trous noirs de *Schwarzschild*, ceux en rotation et non chargés sont fréquemment appelés trous noirs de *Kerr*, d'après Roy Kerr, qui découvrit les solutions correspondantes des équations du champ d'Einstein en 1963. Des trous noirs électriquement chargés mais statiques sont couramment appelés trous noirs de *Reissner-Nordström*, d'après le physicien allemand Hans Reissner et le physicien finlandais Gunnar Nordström. Le cas général, chargé et en rotation, est parfois baptisé des noms de Kerr et Newman.

Réf. 221

Réf. 222

Réf. 223 ler*. Cette idée a été démontrée par Israel, Carter, Robinson et Mazur : ils ont montré que, pour une masse, un moment cinétique et une charge donnés, il existe *un seul* trou noir possible. (Cependant, ce théorème d'unicité n'est plus valable si le trou noir comporte des nombres quantiques nucléaires, telles des charges faibles ou fortes.)

Réf. 224

En d'autres termes, un trou noir est indépendant de la manière dont il s'est formé et du type de matière utilisé lors de sa formation. Les trous noirs ont tous la même composition ou, mieux, ils n'ont pas de composition du tout (du moins classiquement).

Défi 348 pe

La masse M d'un trou noir n'est pas limitée par la relativité générale. Elle peut être aussi petite que celle d'une particule microscopique et aussi vaste que plusieurs millions de masses solaires. Mais pour le moment cinétique J et la charge électrique Q , la situation est différente. Un trou noir en rotation possède un moment cinétique maximal possible et une charge électrique (et magnétique) maximale possible**. La limitation du moment cinétique apparaît parce que son périmètre ne peut pas bouger plus vite que la lumière. La charge électrique est également restreinte. Ces deux limites ne sont pas indépendantes : elles sont reliées par

$$\left(\frac{J}{cM}\right)^2 + \frac{GQ^2}{4\pi\epsilon_0 c^4} \leq \left(\frac{GM}{c^2}\right)^2. \quad (272)$$

Défi 349 pe

Cela découle de la limite des rapports entre longueur et masse à la base de la relativité générale. Les trous noirs en rotation parvenant à la limite (272) sont baptisés trous noirs *extrémaux*. Cette limite (272) implique que le rayon de l'horizon d'un trou noir en général est donné par

$$r_h = \frac{GM}{c^2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{J^2 c^2}{M^4 G^2} - \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 G M^2}}\right) \quad (273)$$

Par exemple, pour un trou noir doté de la masse du Soleil et de la moitié de son moment cinétique, à savoir $2 \cdot 10^{30}$ kg et $0,45 \cdot 10^{42}$ kg m²/s, la charge limite est d'environ $1,4 \cdot 10^{20}$ C.

Réf. 225

Comment distinguons-nous les trous noirs en rotation de ceux qui sont statiques ? En tout premier lieu par leur *forme*. Des trous noirs statiques doivent être sphériques (toute non-sphéricité est diffusée dans l'espace sous forme d'ondes gravitationnelles) et des trous noirs en rotation possèdent une forme légèrement aplatie, uniquement déterminée par le moment cinétique. À cause de leur rotation, leur surface de gravité infinie ou de décalage vers le rouge infini, appelée la *limite statique*, est différente de leur horizon (externe). La région située entre les deux est baptisée l'*ergosphère*, un terme mal approprié puisque ce n'est *pas* une sphère. (Elle est appelée ainsi parce que, comme nous le verrons bientôt, elle peut être utilisée pour extraire de l'énergie du trou noir.) Le mouvement des corps situés dans l'ergosphère peut être assez compliqué. Il suffit de mentionner que

Réf. 109

* Wheeler prétendit qu'il fut inspiré par la difficulté à faire des distinctions entre des hommes chauves ; cependant, Feynman, Ruffini et d'autres avaient une image anatomique claire dans leur esprit lorsqu'ils affirmaient que « les trous noirs, contrairement à leur voisinage, n'ont pas de cheveux ».

Page 41

** Nous en dirons plus à propos de la charge magnétique toujours hypothétique. Dans les trous noirs, elle est introduite comme un type supplémentaire de charge dans toutes les expressions où la charge électrique apparaît.

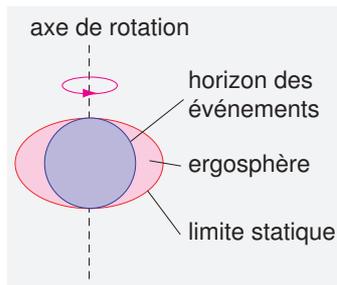


FIGURE 93 L'ergosphère d'un trou noir en rotation.

des trous noirs en rotation entraînent tout corps qui chute dedans vers une orbite qui les encercle, ce qui est en contradiction avec les trous noirs statiques, qui avalent les corps chutant vers eux. Autrement dit, des trous noirs en rotation ne sont pas vraiment des « trous », mais plutôt des tourbillons.

La distinction entre des trous noirs rotatifs et statiques se manifeste également par l'aire de l'horizon. L'aire A (de l'horizon) d'un trou noir statique et non chargé est trivialement reliée à sa masse M par

Défi 350 e

$$A = \frac{16\pi G^2}{c^4} M^2 . \quad (274)$$

La relation entre l'aire et la masse pour un trou noir rotatif et chargé est plus complexe : elle est donnée par

$$A = \frac{8\pi G^2}{c^4} M^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{J^2 c^2}{M^4 G^2} - \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 G M^2}} \right) \quad (275)$$

où J représente le moment cinétique et Q la charge. En fait, la relation

$$A = \frac{8\pi G}{c^2} M r_h \quad (276)$$

est valide pour *tous* les trous noirs. Manifestement, dans le cas d'un trou noir électriquement chargé, la rotation engendre également un champ magnétique autour de celui-ci. Cela contraste avec les trous noirs statiques, qui ne peuvent pas avoir de champ magnétique.

LES TROUS NOIRS COMME SOURCES D'ÉNERGIE

Réf. 226

Pouvons-nous extraire de l'énergie d'un trou noir ? Roger Penrose a découvert que c'est possible pour des trous noirs *en rotation*. Une fusée gravitant autour d'un tel trou noir, dans son ergosphère, pourrait allumer ses moteurs et serait alors propulsée dans l'espace extérieur au trou noir à une vitesse gigantesque, beaucoup plus importante que celle que les moteurs pourraient eux-mêmes produire. En réalité, les fusées sur la Terre tirent profit du même effet, et c'est la raison pour laquelle tous les satellites en orbite au-

tour de la Terre gravitent dans la même direction. Il faudrait beaucoup plus de carburant pour les faire tourner dans l'autre sens*.

L'énergie gagnée par la fusée serait perdue par le trou noir, qui serait alors ralenti et perdrait un peu de sa masse. D'un autre côté, il y aurait une augmentation de masse due aux gaz d'échappement tombant dans le trou noir. Cette augmentation est toujours supérieure, ou au mieux égale, à la perte due au ralentissement de la rotation. Le mieux que nous puissions faire consiste à mettre les moteurs en marche exactement à l'horizon, car alors l'aire de l'horizon du trou noir demeure constante, et seule sa rotation est ralentie**.

Défi 352 pe Ainsi, pour un trou noir neutre *en rotation* ayant un moment cinétique égal au maximum possible, $1-1/\sqrt{2} = 29,3\%$ de son énergie totale peut être extraite par le truchement de la procédure de Penrose. Pour des trous noirs tournant plus lentement, ce pourcentage est évidemment plus petit.

Défi 353 pe En ce qui concerne les trous noirs *chargés*, de tels procédés d'extraction irréversibles de l'énergie sont également possibles. Pouvez-vous en imaginer un exemple? En utilisant l'expression (272), nous trouvons que jusqu'à 50 % de la masse d'un trou noir statique peut être due à sa charge. En fait, dans la partie quantique de notre aventure, nous rencontrerons un procédé d'extraction de l'énergie que la nature semble employer très fréquemment.

Défi 354 pe Page ?? Réf. 227 La procédure de Penrose nous permet de déterminer comment le moment cinétique et la charge accroissent la masse d'un trou noir. Le résultat est la célèbre relation masse-énergie

$$M^2 = \frac{E^2}{c^4} = \left(m_{\text{irr}} + \frac{Q^2}{16\pi\epsilon_0 G m_{\text{irr}}}\right)^2 + \frac{J^2}{4m_{\text{irr}}^2} \frac{c^2}{G^2} = \left(m_{\text{irr}} + \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 \rho_{\text{irr}}}\right)^2 + \frac{J^2}{\rho_{\text{irr}}^2} \frac{1}{c^2} \quad (277)$$

qui montre comment l'énergie électrostatique et l'énergie rotationnelle se joignent à la masse d'un trou noir. Dans cette expression, m_{irr} est la *masse irréductible* définie comme

$$m_{\text{irr}}^2 = \frac{A(M, Q=0, J=0)}{16\pi} \frac{c^4}{G^2} = \left(\rho_{\text{irr}} \frac{c^2}{2G}\right)^2 \quad (278)$$

et ρ_{irr} est le *rayon irréductible*.

Des examens minutieux révèlent qu'il n'existe pas de procédé qui permette de *diminuer* l'aire de l'horizon, et donc la masse ou le rayon irréductible, du trou noir. Nous l'avons vérifié de toutes les manières possibles et imaginables. Par exemple, lors de la coalescence de deux trous noirs, la surface totale augmente. Nous qualifions les processus qui conservent l'aire et l'énergie du trou noir à une valeur constante de *réversibles*, et tous les autres d'*irréversibles*. En fait, l'aire des trous noirs se comporte comme l'*entropie* d'un

Défi 351 pe * Et cela serait beaucoup plus dangereux, puisque n'importe quel objet minuscule heurterait un tel satellite avançant à contre-courant à environ 15,8 km/s, transformant ainsi cet objet en un redoutable projectile. En réalité, toute puissance désirant anéantir les satellites de l'ennemi aurait simplement besoin de charger un satellite d'écrous ou de boulons, de l'expédier dans l'espace à contresens et de disperser les boulons sous forme de nuage. Cela empêcherait les satellites de parvenir sur cette orbite pendant de nombreuses décennies.

** Il est également possible d'extraire de l'énergie des trous noirs en rotation grâce au rayonnement gravitationnel.

Réf. 228 système isolé : elle ne décroît jamais. Jakob Bekenstein a, le premier, formulé en 1970 que cette aire *représente* en fait une entropie. Il en a déduit que ce n'est que lorsqu'une entropie est attribuée à un trou noir qu'il est possible de comprendre où se retrouve l'entropie de toute la matière chutant dedans.

Défi 355 pe L'entropie du trou noir est une fonction uniquement de la masse, du moment cinétique et de la charge de celui-ci. Vous devriez pouvoir confirmer la déduction de Bekenstein que l'entropie S est proportionnelle à l'aire de l'horizon. Plus tard on a découvert, en utilisant la théorie quantique, que

$$S = \frac{A k c^3}{4 \hbar G} = \frac{A k}{4 l_{\text{pl}}^2}. \quad (279)$$

Page ?? Cette célèbre relation ne peut pas être retrouvée sans l'aide de la théorie quantique, puisque la valeur absolue de l'entropie, comme toute autre observable, n'est jamais déterminée uniquement par la physique classique. Nous discuterons de cette expression plus tard dans notre ascension montagnaise.

Page ?? Si les trous noirs possèdent une entropie, alors ils doivent aussi avoir une température. S'ils ont une température, ils doivent briller. Les trous noirs ne peuvent donc pas être noirs ! Cela fut démontré par Stephen Hawking en 1974 à l'aide de calculs extrêmement compliqués. Néanmoins, cela pourrait avoir été imaginé dans les années 1930, à l'aide d'une simple expérience de pensée que nous présenterons plus loin. Vous devriez pouvoir réfléchir à ce problème, en vous demandant et en recherchant quelles conséquences étranges surgiraient si les trous noirs n'avaient pas d'entropie. Le rayonnement des trous noirs est un mécanisme (quantique) supplémentaire, bien que minuscule, d'extraction de l'énergie, qui est même applicable à ceux qui sont statiques et non chargés.

Page ?? Les connexions intéressantes qui existent entre les trous noirs, la thermodynamique et la théorie quantique seront exposées dans les prochaines parties de notre excursion montagnaise. Pouvez-vous imaginer d'autres mécanismes qui font que les trous noirs brillent ?

Défi 356 pe

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS CONCERNANT LES TROUS NOIRS

« Tiens, les trous noirs. C'est troublant. »
Anonyme

Page ?? Les trous noirs possèdent un grand nombre de propriétés contre-intuitives. Nous jettons tout d'abord un coup d'œil aux effets classiques, gardant les effets quantiques pour plus tard.

* *

Défi 357 pe D'après la gravitation universelle, la lumière pourrait, depuis la surface d'un trou noir, grimper vers le haut puis retomber en arrière. En relativité générale, un trou noir ne permet nullement à la lumière de grimper vers le haut, elle ne peut que tomber. Pouvez-vous démontrer cette assertion ?

* *

Qu'est-ce qui arrive à un individu chutant dans un trou noir ? Un observateur extérieur

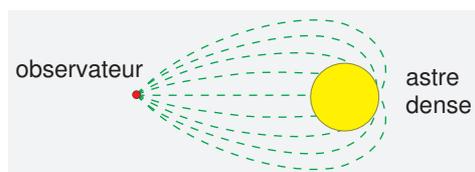


FIGURE 94 Trajectoire de quelques rayons lumineux provenant d'un corps massif et se dirigeant vers un observateur.

Défi 358 pe

Défi 359 pe

en donne une réponse claire : la personne qui tombe n'y parvient *jamais* puisqu'elle a besoin d'une durée infiniment longue pour atteindre l'horizon. Pouvez-vous confirmer ce résultat ? Celui qui chute, cependant, parvient à l'horizon au bout d'une quantité *finie* de son temps. Pouvez-vous la calculer ?

Ce résultat est surprenant, car il signifie que, pour un observateur extérieur situé dans un Univers ayant un âge *fini*, les trous noirs ne peuvent pas encore s'être formés ! Au mieux, nous ne pouvons observer que des systèmes qui sont en train de donner naissance aux trous noirs. Dans un sens, il pourrait être correct d'affirmer que les trous noirs n'existent pas. Ceux-ci pourraient bien avoir existé dès le début de la création de l'espace-temps. D'un autre côté, nous découvrirons plus tard pourquoi cela est impossible. En bref, il est primordial de bien garder à l'esprit que l'idée de trou noir représente un concept théorique idéal mais que, généralement, ces concepts limites (comme les bains thermiques ou la température) constituent des descriptions pertinentes de la nature. Indépendamment de ce dernier problème, nous pouvons confirmer que, dans la nature, le rapport de la longueur par la masse vérifie toujours

$$\frac{L}{M} \geq \frac{4G}{c^2} . \quad (280)$$

* *

Défi 360 pe

Il est intéressant de noter que la *taille* d'un individu dégringolant dans un trou noir est évaluée de manière radicalement différente par celui qui chute et par une personne qui demeure à l'extérieur. Si le trou noir est vaste, l'observateur chutant dedans ne ressent presque rien, tellement les forces de marée sont faibles. L'observateur extérieur fait une remarque effrayante : il observe que la personne qui chute *s'étale* sur toute la surface de l'horizon du trou noir. *Des corps étendus qui tombent recouvrent l'horizon tout entier.* Pouvez-vous expliciter cette situation, par exemple en utilisant la limite des rapports de la longueur sur la masse ?

Ce résultat bizarre, qui sera essentiel plus loin dans notre exploration, conduira à des résultats importants concernant la taille des particules ponctuelles.

* *

Défi 361 pe

Un observateur situé près d'un trou noir (statique), ou en fait à proximité de n'importe quel objet de taille inférieure à $7/4$ de son rayon gravitationnel, peut même apercevoir la face *cachée* entière de l'objet, comme indiqué sur la Figure 94. Pouvez-vous imaginer à quoi ressemblerait cette image ? Remarquez qu'en plus des trajectoires représentées sur la Figure 94 la lumière peut également tourner plusieurs fois autour du trou noir avant de parvenir à l'observateur ! Par conséquent, un tel observateur voit un nombre infini d'images du trou noir. La formule résultante concernant la taille angulaire de l'image la

Page 145 plus proche de l'horizon a été donnée plus haut.

En réalité, l'effet de la gravité signifie qu'il est possible de voir davantage que la moitié de la surface d'un objet sphérique *quelconque*. Dans la vie de tous les jours, cependant, cet effet est imperceptible : par exemple, la courbure de la lumière nous permet d'observer à peu près 50,0002 % de la surface du Soleil.

* *

Une masse ponctuelle située à l'intérieur de la plus petite trajectoire circulaire de la lumière autour d'un trou noir, à $3R/2$, ne peut pas demeurer sur une orbite circulaire parce que, dans cette région, il se produit quelque chose de déconcertant. Un corps qui encercle un autre corps dans la vie courante ressent constamment une tendance à être poussé vers l'extérieur, cette force centrifuge étant due à l'inertie du corps en question. Mais pour des valeurs inférieures à $3R/2$, un corps qui décrit un cercle est poussé *vers l'intérieur* par son inertie. Il existe plusieurs méthodes pour expliquer cet effet contradictoire. La plus simple consiste à remarquer que, près d'un trou noir, le poids augmente plus vite que la force centrifuge, comme vous devriez pouvoir le vérifier. Seule une fusée ayant ses moteurs allumés et fonçant dans la direction du ciel peut graviter autour d'un trou noir à $3R/2$.

Réf. 229

Défi 362 pe

* *

Défi 363 s D'autre part, comment la gravité ou un champ électrique peuvent-ils s'échapper d'un trou noir si aucun signal et aucune énergie ne peuvent en sortir ?

* *

Les *trous blancs*, c'est-à-dire des trous noirs inversés par rapport au temps, dans lesquels tout s'écoule vers l'extérieur, au lieu de l'intérieur, d'une certaine région délimitée, existent-ils ?

Défi 364 pe

* *

Montrez qu'une constante cosmologique Λ conduit à la métrique suivante pour un trou noir :

Défi 365 pe

$$d\tau^2 = \frac{ds^2}{c^2} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{\Lambda}{3}r^2\right) dt^2 - \frac{dr^2}{c^2 - \frac{2GM}{r} - \frac{\Lambda c^2}{3}r^2} - \frac{r^2}{c^2} d\varphi^2. \quad (281)$$

Remarquez que cette métrique ne se transforme pas en métrique de Minkowski pour des valeurs importantes de r . Toutefois, dans le cas où Λ est petit, la métrique est presque plate pour des valeurs de r qui vérifient $1/\sqrt{\Lambda} \gg r \gg 2Gm/c^2$.

Ainsi, la loi en l'inverse du carré est également modifiée :

$$F = -\frac{Gm}{r^2} + \frac{c^2\Lambda}{6}r. \quad (282)$$

Avec les valeurs connues de la constante cosmologique, le deuxième terme est négligeable à l'intérieur du Système solaire.

* *

Dans la théorie quantique, le *rapport gyromagnétique* représente une quantité cruciale pour tout système chargé en rotation. Quel est le rapport gyromagnétique pour des trous noirs rotatifs ?

Défi 366 pe

* *

Un vaste trou noir est, comme son nom l'indique, noir. Pourtant, il peut être vu. Si nous sommes en train de voyager dans sa direction à bord d'un vaisseau spatial, nous remarquons que le trou noir est entouré d'un cercle lumineux, telle une mince auréole. L'anneau, situé à la distance radiale de la sphère des photons, est dû aux photons qui proviennent des autres objets lumineux qui encerclent le trou, et qui achèvent finalement, après un ou plusieurs tours, leur course dans notre œil. Pouvez-vous confirmer ce résultat ?

Défi 367 s

* *

Les trous noirs en mouvement subissent-ils une contraction de Lorentz ? Ils doivent briller un tout petit peu. Il est vrai que les images qu'ils engendrent sont complexes, puisque la lumière peut effectuer plusieurs révolutions autour d'eux avant d'atteindre l'observateur. De surcroît, l'observateur doit être très éloigné, de telle sorte que les effets de la courbure soient petits. Tous ces effets peuvent être pris en compte, mais cette question reste épineuse. La raison en est que le concept de contraction de Lorentz n'a aucun sens en relativité générale, puisque la comparaison avec la situation non contractée est difficile à définir précisément.

Défi 368 pe

* *

Pouvez-vous confirmer que les trous noirs impliquent une limite à la puissance ? La puissance représente la variation d'énergie par unité de temps. La relativité générale restreint la puissance à $P \leq c^5/4G$. Autrement dit, aucune machine dans la nature ne peut fournir plus de $0,92 \cdot 10^{52}$ W ou $1,2 \cdot 10^{49}$ chevaux-vapeur.

Défi 369 pe

LA GENÈSE ET LA QUÊTE DES TROUS NOIRS

Comment les trous noirs pourraient-ils se former ? Aujourd'hui, au moins trois mécanismes sont plausibles, et cette question constitue toujours un ardent sujet de recherches. En premier lieu, les trous noirs pourraient s'être formés au cours des premières étapes de l'Univers. Ces *trous noirs primordiaux* auraient grossi par le biais de l'*accrétion*, c'est-à-dire par le biais de l'engloutissement de la matière et du rayonnement environnants, ou auraient disparu à travers l'un des mécanismes qui seront étudiés plus tard.

Réf. 230

Page ??

Parmi les trous noirs *observés*, ceux que nous appelons trous noirs *supermassifs* sont localisés au centre de toutes les galaxies étudiées jusqu'ici. Ils ont une masse allant de 10^6 à 10^9 masses solaires et renferment environ 0,5 % de la masse de la galaxie. On conjecture qu'il y en a un au centre de toutes les galaxies, et ils semblent être associés à la formation des galaxies elles-mêmes. Les trous noirs supermassifs sont supposés s'être formés après l'effondrement de vastes nuages de poussière, et avoir grossi grâce à l'accrétion ultérieure de matière. Les idées les plus récentes impliquent que ces trous noirs accumulent une énorme quantité de matière dès leur plus jeune âge. La matière qui chute dedans émet de grandes quantités de rayonnement, ce qui pourrait expliquer l'intense lumino-

sité des quasars. Ensuite, le régime d'accrétion diminue et les galaxies de Seyfert moins spectaculaires se forment. Il se pourrait même que le trou noir supermassif logé au cœur de la galaxie déclenche la formation d'étoiles. Par la suite, ces trous noirs supermassifs deviennent pratiquement inactifs, comme celui situé au centre de la Voie lactée.

Réf. 231 D'autre part, les trous noirs peuvent se former lorsque de vieilles étoiles massives *s'effondrent*. On estime que, lorsque des étoiles d'au moins trois masses solaires brûlent tout leur carburant, une partie de la matière restante s'effondre pour donner naissance à un trou noir. Un tel trou noir *stellaire* possède une masse comprise entre une et une centaine de masses solaires. Il peut également continuer à grossir par la suite par accrétion. Ce scénario a accouché de la découverte du tout premier candidat plausible de trou noir, Cygnus X-1, en 1971.

Des relevés récents suggèrent également l'existence de trous noirs *intermédiaires*, ayant des masses d'environ un millier de masses solaires ou plus, les mécanismes et les conditions de leur formation étant encore inconnus.

Réf. 232 L'identification des trous noirs constitue un sport populaire chez les astrophysiciens. Conceptuellement, la manière la plus simple pour les détecter consiste à rechercher des champs gravitationnels puissants. Mais seules les étoiles binaires nous permettent de mesurer directement des champs gravitationnels, et le plus fort jamais mesuré est à 30 % de la valeur théorique maximale. Une autre manière consiste à rechercher des lentilles gravitationnelles puissantes, et de tenter d'obtenir un rapport masse/taille indiquant l'existence d'un trou noir. Une autre manière encore consiste à observer la dynamique des étoiles proches du centre des galaxies. En mesurant leur mouvement, nous pouvons en déduire la masse du corps autour duquel elles gravitent. La méthode favorite pour détecter des trous noirs repose sur l'émission de rayons X extrêmement intenses provenant de sources ponctuelles, en utilisant des satellites spatiaux ou des détecteurs situés dans des ballons atmosphériques. Si la distance à l'objet est connue, sa magnitude absolue* peut être retrouvée. Si celle-ci est supérieure à une certaine limite, l'objet doit être un trou noir puisque la matière ordinaire ne peut pas produire une quantité illimitée de lumière. Cette méthode est en cours de perfectionnement afin de pouvoir observer directement la disparition d'énergie dans un horizon. En fait, il se pourrait que cela ait déjà été observé.

Réf. 233 Pour résumer la situation expérimentale, les mesures indiquent qu'un trou noir supermassif semble être localisé au centre de toutes les galaxies étudiées jusqu'à présent, soit plus d'une douzaine. Les masses varient : le trou noir au centre de notre galaxie fait environ 2,6 millions de masses solaires, alors que le trou noir central de la galaxie M87 fait 3 milliards de masses solaires.

Réf. 217 Nous connaissons à peu près une douzaine de trous noirs stellaires compris entre 4 et 20 masses solaires dans l'étendue de notre chère galaxie. Ils ont tous été découverts depuis 1971, date à laquelle Cygnus X-1 a été détecté. En l'an 2000, des trous noirs de masse intermédiaire furent détectés. Les astronomes étudient également quel est le nombre de trous noirs qui se trouvent dans les amas stellaires, à quelle fréquence ils se heurtent, et quelle sorte d'ondes gravitationnelles détectables ces collisions engendrent. On s'attend à ce que la liste des découvertes s'allonge considérablement dans les années à venir.

* La magnitude absolue est une mesure de la luminosité intrinsèque d'un objet céleste. [N.D.T.]

SINGULARITÉS

En résolvant les équations de la relativité générale pour diverses conditions initiales, nous remarquons qu'un nuage de poussière s'effondre généralement en une *singularité*, c'est-à-dire en un point de densité infinie. La même conclusion se manifeste lorsque nous suivons l'évolution de l'Univers, en remontant en arrière dans le temps. En fait, Roger Penrose et Stephen Hawking ont démontré plusieurs théorèmes mathématiques concernant la nécessaire existence de singularités pour de nombreuses distributions classiques de matière. Ces théorèmes se fondent uniquement sur la continuité de l'espace-temps et sur quelques conditions plutôt faibles concernant la matière située à l'intérieur. Ces théorèmes établissent que dans des systèmes en expansion tels que l'Univers lui-même, ou dans des systèmes en effondrement tels que les trous noirs en formation, des phénomènes de densité matérielle infinie auraient existé quelque part dans le passé, ou, respectivement, existeront dans le futur. Ce résultat est ordinairement résumé en disant qu'il existe une preuve mathématique qui établit que l'Univers naquit sous la forme d'une singularité.

Réf. 234

En réalité, la dérivation des singularités initiales crée une hypothèse forte, mais cachée, concernant la matière : ces particules de poussière n'ont pas de taille. En d'autres termes, on suppose que les particules de poussière sont des singularités. Ce n'est qu'à l'aide de cette hypothèse que nous déduisons l'existence de singularités initiales. Toutefois, nous avons vu que le principe de la force maximale peut être reformulé comme un principe de taille minimale pour la matière. L'argument qu'il a dû y avoir une singularité initiale dans l'Univers est donc corrompu. La situation expérimentale est claire : il y a une évidence accablante pour qu'au cours de son plus jeune âge l'Univers ait été prodigieusement chaud et dense, mais il n'y a *aucune* évidence pour une température ou une densité infinies.

Les chercheurs ayant une inclination pour les mathématiques distinguent deux types de singularités : celles avec et celles sans horizon. Les dernières, les singularités *nues*, sont particulièrement étranges : par exemple, une brosse à dents peut tomber dans une singularité nue et disparaître sans laisser de traces. Puisque les équations du champ sont invariantes par renversement du temps, nous pourrions nous attendre à ce que, de temps en temps, des singularités nues recrachent des brosses à dents. (Pouvez-vous expliquer pourquoi des singularités « habillées » sont moins dangereuses ?)

Défi 370 pe

Pour esquiver l'irruption spontanée des brosses à dents, au fil des ans de nombreuses personnes ont tenté de découvrir certains principes théoriques interdisant l'existence de singularités nues. Il apparaît qu'il existe deux principes de cette forme. Le premier est le principe de la force maximale ou de la puissance maximale que nous avons rencontré auparavant. La force maximale implique qu'aucune valeur infinie de force n'apparaît dans la nature ou, autrement dit, qu'il n'existe pas de singularités nues dans la nature. Cette déclaration est souvent dénommée la *censure cosmique*. Évidemment, si la relativité générale n'était pas la description correcte de la nature, des singularités nues *pourraient* toujours surgir. La censure cosmique est ainsi toujours discutée dans les articles scientifiques. La quête expérimentale des singularités nues n'a produit aucun résultat ; en fait, il n'y a même pas de candidat observationnel pour les singularités habillées, moins absconses. Mais le cas théorique de l'existence des singularités « habillées » est également faible. Puisqu'il n'existe aucun procédé pour interagir avec quoi que ce soit situé der-

Réf. 235

rière un horizon, il est inutile de discuter de ce qui se passe à cet endroit. Il n'y a pas de voie pour démontrer que derrière un horizon se tient une singularité. Les singularités habillées sont des représentations idéologiques, mais ne concernent pas la physique.

En fait, il existe un autre principe qui empêche l'apparition des singularités, à savoir la *théorie quantique*. À chaque fois que nous rencontrons une prédiction concernant une valeur infinie, nous étendons notre description de la nature à un domaine pour lequel elle n'était pas conçue. Pour parler de singularités, nous devons supposer que la relativité générale pure s'applique aux distances très petites et aux énergies très élevées. Comme cela deviendra clair dans les deux prochaines parties de ce livre, la nature ne le permet pas : l'association de la relativité générale et de la théorie quantique indique qu'il n'y a aucun sens à parler de « singularités », pas plus que de ce qui se passe « à l'intérieur » d'un horizon de trou noir. La raison en est que le temps et l'espace ne sont pas continus aux très petites échelles*.

UN PETIT QUIZ : L'UNIVERS EST-IL UN TROU NOIR ?

Se pourrait-il que nous vivions à l'intérieur d'un trou noir ? L'Univers et les trous noirs ont tous les deux des horizons. De manière intéressante, la distance de l'horizon r_0 de l'Univers est d'environ

$$r_0 \approx 3ct_0 \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ m} \quad (283)$$

et son contenu en matière est à peu près de

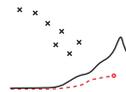
$$m_0 \approx \frac{4\pi}{3}\rho_0 r_0^3 \quad \text{d'où} \quad \frac{2Gm_0}{c^2} = 72\pi G\rho_0 ct_0^3 = 6 \cdot 10^{26} \text{ m} \quad (284)$$

pour une densité de $3 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$. Nous avons donc

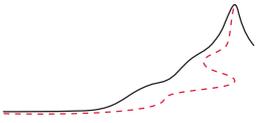
$$r_0 \approx \frac{2Gm_0}{c^2}, \quad (285)$$

Défi 371 pe ce qui est équivalent à la relation du trou noir $r_S = 2Gm/c^2$. Est-ce une coïncidence ? Non, ce n'en est pas une : tous les systèmes ayant une forte courbure obéissent plus ou moins à cette relation. Mais sommes-nous néanmoins en train de chuter dans un énorme

Défi 372 pe trou noir ? Vous pouvez répondre à cette question par vous-même.



* De nombreux physiciens sont toujours prudents avant de faire de tels postulats fondamentaux à ce niveau, et il y en a toujours un certain nombre qui proclament que l'espace et le temps sont continus même jusqu'aux distances les plus petites. Notre discussion sur la théorie quantique, et les premières sections de la dernière partie de notre ascension de la montagne, nous donneront les arguments décisifs conduisant à la conclusion opposée.



CHAPITRE 7

L'ESPACE DIFFÈRE-T-IL DU TEMPS ?

« Tempori parce*.

»
Sénèque

Les gens disent, sur un ton résigné, que le temps est notre souverain. Personne ne dit une telle chose pour l'espace. Le temps et l'espace sont manifestement distincts dans la vie quotidienne. Mais quelle est précisément cette différence en relativité générale ? Et après tout, avons-nous besoin d'eux ? En relativité générale, il est supposé que nous vivons dans un espace-temps (pseudo-riemannien) de courbure variable. La courbure est une observable, qui est reliée à la distribution et au mouvement de la matière et de l'énergie de la manière décrite par les équations du champ.

Toutefois, il y a un problème fondamental. Les équations de la relativité générale sont invariantes sous un grand nombre de transformations qui *mélangent* les coordonnées x_0 , x_1 , x_2 et x_3 . Par exemple, la transformation du point d'observation

$$\begin{aligned}x'_0 &= x_0 + x_1 \\x'_1 &= -x_0 + x_1 \\x'_2 &= x_2 \\x'_3 &= x_3\end{aligned}\tag{286}$$

Défi 373 pe

est permise en relativité générale, et laisse les équations du champ invariantes. Vous devriez pouvoir rechercher d'autres exemples.

Cela entraîne une conséquence qui est, clairement, en contradiction flagrante avec la vie courante : l'invariance par difféomorphisme fait qu'il est *impossible* de distinguer l'espace du temps *dans le cadre* de la relativité générale. Plus explicitement, la coordonnée x_0 ne peut pas être uniquement identifiée au temps physique t , comme nous l'avons fait implicitement jusqu'à présent. Cette identification n'est possible qu'en relativité *restreinte*. Dans celle-ci, l'invariance sous la transformation de Lorentz (ou de Poincaré) de l'espace et du temps différencie l'énergie, la quantité de mouvement et le moment cinétique comme étant les observables fondamentales. En relativité générale, il n'y a *pas* de groupe d'isométrie pour une métrique (non triviale). Par conséquent, il n'y a *pas* d'observables physiques élémentaires, distinguées par leur particularité d'être conservées. Mais des quantités invariantes sont nécessaires pour les échanges d'informations !

* « Épargnez le temps. » Lucius Annaeus Seneca (v. 4 av. J.-C. - 65), *Lettres à Lucilius (Epistulae morales ad Lucilium)* 88, 39.

En fait, nous pouvons nous *comprendre* les uns les autres uniquement parce que nous vivons dans un espace-temps approximativement *plat* : si la somme des angles d'un triangle n'était pas égale à π (deux angles droits), il n'y aurait *aucune* quantité invariante et nous n'aurions pas la propension naturelle à communiquer entre nous.

Comment avons-nous réussi à éluder habilement ce problème jusqu'à présent ? Nous l'avons fait de plusieurs manières. Le plus simple était d'exiger constamment que, dans une certaine région de la situation considérée, l'espace-temps fût notre espace-temps plat de Minkowski, où x_0 peut être assimilé à t . Nous pouvons remplir cette exigence soit à l'infini, comme nous l'avons fait autour des masses sphériques, soit par une approximation d'ordre zéro, comme nous l'avons fait pour les calculs du rayonnement gravitationnel et de toutes les autres perturbations. De cette manière, nous éliminons l'enchevêtrement délibéré des coordonnées, et les quantités invariantes autrement manquantes apparaissent comme prévu. Cette approche pragmatique constitue l'issue ordinaire de ce problème. En fait, elle est employée dans quelques textes, par ailleurs excellents, sur la relativité générale, qui évitent toute interrogation plus profonde concernant ce problème.

Réf. 191

Une variante commune de ce tour de passe-passe consiste à laisser cette distinction « poindre subrepticement » dans les calculs par l'introduction de la matière et de ses propriétés, ou par l'introduction du rayonnement. Les propriétés matérielles de la matière, par exemple ses équations d'état thermodynamiques, font toujours la distinction entre l'espace et le temps. Le rayonnement en fait de même, par sa propagation. Évidemment cela reste vrai uniquement pour les combinaisons particulières de la matière et du rayonnement que l'on nomme horloges et mètres étalons. En fait, cette méthode d'introduction de la matière est identique à la méthode d'introduction de l'espace-temps de Minkowski, si nous l'analysons minutieusement : les propriétés de la matière sont toujours définies en utilisant des descriptions de l'espace-temps de la relativité restreinte*.

Page 210, page 154

Une autre variante de cette approche pragmatique consiste à utiliser la coordonnée de temps cosmologique. Un Univers isotrope et homogène doit avoir une coordonnée temporelle privilégiée, à savoir celle employée dans toutes les chronologies sur le passé et le futur de l'Univers. Cette méthode est en fait une combinaison des deux précédentes.

Mais ici nous sommes dans une situation particulière. Nous voulons *comprendre* le mouvement dans ses principes, et pas seulement le calculer en pratique. Nous voulons une réponse *fondamentale*, non une pragmatique. Et pour cela nous avons besoin de savoir comment les positions x_i et le temps t sont reliés, et comment nous pouvons définir des quantités invariantes. Cette question nous prépare également à la lourde tâche d'allier la gravité et la théorie quantique, ce qui sera l'objectif de la dernière partie de notre ascension de la Montagne Mouvement.

Une solution fondamentale nécessite une description des horloges associées au système considéré, et une déduction sur la manière dont la lecture du temps t d'une horloge est reliée au comportement de ce système dans l'espace-temps. Mais nous savons que toute description d'un système requiert des mesures, par exemple afin de déterminer les états initiaux. Et des états initiaux réclament l'espace et le temps. Nous entrons donc dans un cercle vicieux : c'est précisément ce que nous voulions éviter au premier

Défi 374 pe
Page ??

* Nous remarquons quelque chose de stupéfiant ici : l'introduction d'une certaine condition aux petites distances (la matière) possède le même effet que l'introduction d'une certaine condition à l'infini. Est-ce juste une coïncidence ? Nous reviendrons sur ce problème dans la dernière partie de notre aventure.

abord.

Nos soupçons s'éveillent. Y a-t-il en réalité une distinction essentielle entre l'espace et le temps ? Faisons une petite excursion sur les diverses manières d'aborder cette question.

L'ESPACE ET LE TEMPS PEUVENT-ILS ÊTRE MESURÉS ?

Page 287 Afin d'établir une distinction entre l'espace et le temps en relativité générale, nous devons être capables de les quantifier. Mais déjà dans la section sur la gravitation universelle, nous avons mentionné l'impossibilité de mesurer des longueurs, des durées et des masses seulement à l'aide des effets gravitationnels. Cette situation change-t-elle avec la relativité générale ? Les longueurs et durées sont liées par la vitesse de la lumière, et de surcroît les longueurs et les masses sont liées par la constante gravitationnelle. Malgré cette corrélation supplémentaire, il faut peu de temps pour se convaincre que le problème demeure.

Réf. 236 En fait, nous avons besoin de l'électrodynamique pour le résoudre. C'est seulement en utilisant la charge élémentaire e que nous pouvons former des échelles de longueur, dont la plus simple est

$$l_{\text{échelle-em}} = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} \frac{\sqrt{G}}{c^2} \approx 1,4 \cdot 10^{-36} \text{ m} . \quad (287)$$

Page 23 Ici, ϵ_0 représente la permittivité du vide. Alternativement, nous pouvons argumenter que la mécanique quantique fournit une échelle de longueur, puisque nous pouvons utiliser le quantum d'action \hbar pour définir l'échelle de longueur

$$l_{\text{échelle-qt}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m} , \quad (288)$$

qui est appelée *longueur de Planck* ou *unité de longueur naturelle de Planck*. Toutefois, cela ne change pas l'argumentation, car nous avons besoin de l'électrodynamique pour mesurer la valeur de \hbar . L'équivalence entre ces deux arguments est mise en évidence en réécrivant la charge élémentaire e comme une combinaison de constantes fondamentales de la nature :

$$e = \sqrt{4\pi\epsilon_0 c \hbar \alpha} . \quad (289)$$

Ici, $\alpha \approx 1/137,06$ est la constante de structure fine qui caractérise la force d'interaction de l'électromagnétisme. En fonction de α , l'expression (287) devient

$$l_{\text{échelle}} = \sqrt{\frac{\alpha \hbar G}{c^3}} = \sqrt{\alpha} l_{\text{Pl}} . \quad (290)$$

Défi 375 e En résumé, chaque mesure de longueur est fondée sur la constante de couplage électromagnétique α et sur la longueur de Planck. Bien entendu, la même chose est vraie pour les mesures de durées et de masses. Il n'existe donc aucune manière de définir ou de me-

surer des longueurs, des durées et des masses en utilisant uniquement la gravitation ou la relativité générale*.

Étant donné ce résultat qui nous ramène à la raison, nous pouvons nous demander si l'espace et le temps sont véritablement nécessaires dans la relativité générale.

L'ESPACE ET LE TEMPS SONT-ILS INDISPENSABLES ?

Réf. 238 Robert Geroch répondit à cette question dans un magnifique article de cinq pages. Il explique comment formuler la théorie de la relativité générale sans faire usage de l'espace et du temps, en prenant comme point de départ uniquement les observables physiques.

Il commence avec l'ensemble de toutes les observables. Parmi elles, il y en a une, notée ν , qui se distingue. C'est la seule observable qui nous permette de dire que pour deux observables a_1, a_2 quelconques il en existe une troisième a_3 , telle que

$$(a_3 - \nu) = (a_1 - \nu) + (a_2 - \nu) . \quad (291)$$

Une telle observable est appelée le *vide*. Geroch montre comment tirer profit de celle-ci pour construire les dérivées des observables. Ce que nous appelons l'algèbre d'Einstein peut alors être construite, laquelle inclut la relativité générale tout entière.

Généralement, nous décrivons le mouvement en déduisant l'espace-temps des observables matérielles, en calculant l'évolution de l'espace-temps, et ensuite en inférant le mouvement de la matière qui découle de celui-ci. La description de Geroch montre que l'étape intermédiaire, c'est-à-dire l'utilisation de l'espace et du temps, n'est pas nécessaire.

De manière indirecte, le principe de la force maximale sous-tend la même idée. La relativité générale peut être dérivée de l'existence de valeurs limites pour la force ou la puissance. L'espace et le temps sont les seuls outils nécessaires pour traduire ce principe en conséquences tangibles pour des observateurs de la vie réelle.

Ainsi, il est possible de formuler la relativité générale sans faire usage de l'espace et du temps. Puisqu'ils ne sont pas indispensables, il semble improbable qu'il doive y avoir une différence fondamentale entre eux. Pourtant, une telle différence est notoire.

LES COURBES FERMÉES DE GENRE TEMPS EXISTENT-ELLES ?

Est-il possible que la coordonnée temporelle se comporte, du moins dans certaines régions, comme un tore ? Lorsque nous marchons, nous pouvons retourner au point de départ. Est-il possible de revenir dans le temps à l'endroit d'où nous sommes partis ? Cette question a été étudiée avec beaucoup de soin. Le texte de référence sur le sujet est celui de Hawking et Ellis, qui ont énuméré les propriétés requises de l'espace-temps, expliquant lesquelles sont mutuellement compatibles ou non. Ils ont trouvé, par exemple, que les espaces-temps qui sont uniformes, globalement hyperboliques, orientés, et dont le temps est orienté ne contiennent aucune courbe de cette espèce. Nous supposons généralement que l'Univers observé possède ces propriétés ; ainsi l'observation de courbes

Réf. 197

Réf. 237

Défi 376 s

* Par le passé, John Wheeler avait l'habitude d'affirmer que son *horloge géométrodynamique*, un dispositif qui mesure le temps en faisant rebondir sans cesse une impulsion lumineuse entre deux miroirs parallèles, était un contre-exemple. Cependant ce n'est pas exact. Pouvez-vous le confirmer ?

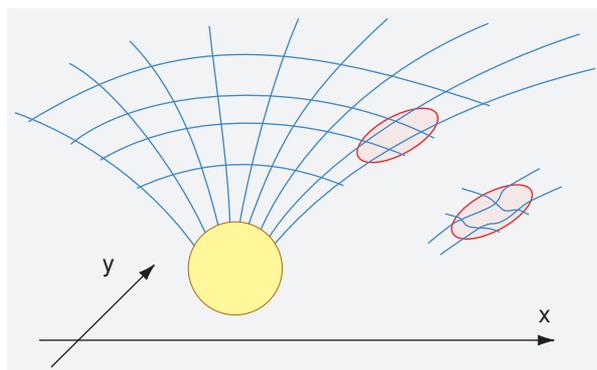


FIGURE 95 Un « trou » dans l'espace.

Page ??

fermées de genre temps est improbable. En réalité, aucun indice n'a été relevé jusqu'à présent. Plus tard, nous montrerons que la recherche de telles courbes à l'échelle microscopique n'est pas parvenue, elle non plus, à en découvrir une.

L'impossible existence des courbes fermées de genre temps semble souligner une démarcation possible entre l'espace et le temps. Mais en fait, cette différence n'est qu'apparente. Tous ces examens sont fondés sur le comportement de la matière. Et ces arguments tablent sans ambages sur une distinction explicite entre l'espace et le temps dès le départ. En bref, cette discussion ne peut pas nous permettre de savoir si l'espace et le temps diffèrent. Analysons ce problème d'une autre manière.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE EST-ELLE LOCALE ? – L'ARGUMENT DU TROU

Réf. 239

Lorsqu'Albert Einstein développa la relativité générale, il eut du fil à retordre avec l'invariance par difféomorphisme. Sa préoccupation la plus retentissante fut son fameux *argument du trou*, que nous pourrions dénommer de façon plus adéquate le *paradoxe du trou*. Prenez la situation indiquée sur la Figure 95, dans laquelle une masse déforme l'espace-temps autour d'elle. Einstein imagina une petite région du vide, le *trou*, qui est schématisée par une petite ellipse. Qu'est-ce qui se passe si nous modifions d'une manière ou d'une autre la courbure à l'intérieur du trou tout en laissant la situation extérieure à celui-ci intacte, comme indiqué dans le croquis annexé à la figure ?

D'une part, la nouvelle situation est, manifestement, physiquement distincte de la première, puisque la courbure à l'intérieur du trou est différente. Cette différence implique donc que la courbure à l'extérieur d'une région ne détermine pas la courbure à l'intérieur de celle-ci. Cela est profondément frustrant. Pis, si nous généralisons cette opération au domaine du temps, nous obtenons apparemment le pire cauchemar qui soit en physique : la disparition du déterminisme.

D'autre part, la relativité générale est invariante par difféomorphisme. La déformation indiquée sur la figure est un difféomorphisme, donc la nouvelle situation doit être physiquement équivalente à la situation d'origine.

Lequel de ces arguments est-il correct ? Einstein privilégia d'abord la première thèse, et par conséquent abandonna entièrement l'idée de l'invariance par difféomorphisme durant environ un an. Ce n'est qu'après qu'il réalisa que la deuxième hypothèse est correcte et que la première affirmation commet une erreur fondamentale : elle présume que

les axes de coordonnées x et y existent indépendamment l'un de l'autre, comme indiqué sur la figure. Mais, au cours de cette déformation, les coordonnées x et y changent mécaniquement aussi, de telle sorte qu'il n'existe *aucune* différence physique entre ces deux situations.

La morale de cette histoire est qu'il n'y a *aucune différence entre l'espace-temps et le champ gravitationnel*. L'espace-temps est un apanage du champ, comme le faisait remarquer Einstein, et non une entité dotée d'une réalité séparée, comme le suggère le graphique. Les coordonnées n'ont aucune signification physique, seules les distances (intervalles) dans l'espace et le temps en ont une. En particulier, l'invariance par difféomorphisme démontre que *le temps ne s'écoule pas*. Le temps, comme l'espace, est seulement une entité relationnelle : le temps et l'espace sont relatifs, ils ne sont pas absolus.

La relativité de l'espace et du temps possède des conséquences pratiques. Par exemple, il apparaît que de nombreux problèmes en relativité générale sont équivalents à la situation de Schwarzschild, bien qu'ils en paraissent totalement différents à première vue. Par conséquent, des chercheurs ont « redécouvert » la solution de Schwarzschild (bien entendu avec des systèmes de coordonnées différents) plus de vingt fois, pensant toujours qu'ils avaient découvert une nouvelle solution encore inconnue. Nous allons maintenant discuter d'une conséquence bouleversante de cette nouvelle perspective.

LA TERRE EST-ELLE CREUSE ?

Page 48 *L'hypothèse de la Terre creuse*, c'est-à-dire la conjecture qui stipule que nous vivons à l'intérieur d'une sphère, était populaire dans les cercles paranormaux autour de l'an 1900, et le demeure aujourd'hui chez certaines personnalités excentriques, surtout en Grande-Bretagne, en Allemagne et aux États-Unis. Ils soutiennent, comme illustré sur la Figure 96, que la Terre solide *enveloppe* le ciel, y compris la Lune, le Soleil et les étoiles. La plupart d'entre nous sommes bernés par l'enseignement, qui donne une autre description, parce que nous sommes élevés pour croire que la lumière voyage en ligne droite. Débarrassez-vous de cette croyance erronée, disent-ils, et la Terre creuse apparaît dans toute sa splendeur.

Réf. 240 Il est intéressant de noter que ce raisonnement est correct. Il n'existe *aucune manière* de réfuter cette classe de descriptions de l'Univers. En fait, comme le grand physicien autrichien Roman Sexl avait l'habitude de le dire, l'invariance par difféomorphisme de la relativité générale déclare même que ces deux points de vue sont équivalents entre eux. Le côté comique de cette histoire commence lorsque l'un des deux camps veut faire comprendre à l'autre que *seule* sa propre description peut être correcte. Vous pourriez vérifier que n'importe quelle argumentation de ce type est fautive, et il est amusant de se glisser dans la peau d'une telle personnalité fantasque et de défendre l'hypothèse de la Terre creuse contre vos amis. On explique facilement ainsi l'apparition du jour et de la nuit, l'horizon, et les images satellite de la Terre. Il est facile d'expliquer ce qui s'est passé au cours du voyage des premiers hommes vers la Lune. Ce faisant, vous pouvez rendre un grand nombre de physiciens novices complètement fous. La description usuelle et la description de la Terre creuse sont totalement équivalentes. Pouvez-vous confirmer que même la théorie quantique, avec son introduction d'échelles de longueur dans la nature, laisse cette situation invariablement identique ?

Défi 377 e

Défi 378 s

De telles investigations montrent que l'invariance par difféomorphisme n'est pas une



FIGURE 96 Une modélisation de la théorie de la Terre creuse. (© Helmut Diehl)

symétrie facile à digérer. Mais il est dorénavant préférable de s'y habituer, car le reste de notre aventure nous dévoilera encore plus de surprises. En réalité, dans la dernière partie de notre excursion, nous découvrirons qu'il existe une symétrie de la nature encore plus générale, qui est analogue au changement de point de vue entre l'idée de la Terre creuse et la vision standard. Cette symétrie, la dualité de l'espace-temps, est valable non seulement pour des distances mesurées depuis le centre de la Terre, mais aussi pour des distances mesurées depuis un point quelconque dans la nature.

Page ??

L'ESPACE, LE TEMPS ET LA MASSE SONT-ILS INDÉPENDANTS ?

Nous pouvons conclure de cette brève discussion qu'il n'existe aucune distinction essentielle entre l'espace et le temps en relativité générale. Des distinctions pragmatiques, faisant usage de la matière, du rayonnement ou de l'espace-temps situé à l'infini, sont les seules possibles.

Dans la dernière partie de notre aventure, nous découvrirons que même l'introduction de la théorie quantique est cohérente avec cette vision. Nous montrerons explicitement qu'aucune distinction n'est possible en principe. Nous comprendrons que la masse et l'espace-temps sont sur un pied d'égalité, et que, dans un certain sens, les particules et le vide sont constitués de la même substance. Des distinctions entre l'espace et le temps se révèlent possibles uniquement aux basses énergies de la vie courante.

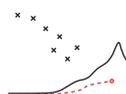
Page ??

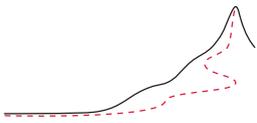
Page 168

Au commencement de notre ascension montagnaise, nous avons découvert que nous avons besoin de la matière pour définir l'espace et le temps. Maintenant, nous avons trouvé que nous avons même besoin de la matière pour *discerner* l'espace du temps. De manière analogue, au départ nous avons établi que l'espace et le temps sont nécessaires pour définir la matière ; maintenant nous avons deviné que même l'espace-temps *plat* est nécessaire pour la définir.

Page 190

En résumé, la relativité générale ne fournit pas une issue au raisonnement récursif que nous avons dévoilé en physique galiléenne. En réalité, elle rend ce problème encore moins limpide qu'avant. Il est vraiment digne d'intérêt de poursuivre notre escalade montagnaise.





CHAPITRE 8

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE EN DIX POINTS – UN RÉSUMÉ POUR LE PROFANE

« Sapientia felicitas* »

La relativité générale est l'ultime description des *trajectoires du mouvement* ou, si nous préférons, du *mouvement macroscopique*. Elle décrit comment les observations du mouvement faites par deux observateurs *quelconques* sont reliées l'une à l'autre. Elle décrit également le mouvement causé par la gravitation. En fait, la relativité générale est fondée sur les observations suivantes :

- Tous les observateurs s'accordent sur le fait qu'il existe une vitesse « parfaite » dans la nature, à savoir une vitesse énergétique maximale commune pour la matière. Cette vitesse est atteinte par le rayonnement sans masse, tels la lumière et les signaux radio.
- Tous les observateurs s'accordent sur le fait qu'il existe une force « parfaite » dans la nature, une force maximale commune qui peut être réalisée ou mesurée par des observateurs réalistes. Cette force se manifeste sur des horizons des événements.

Ces deux propositions contiennent toute la théorie de la relativité. À partir d'elles nous en déduisons que :

- L'espace-temps est composé d'événements situés dans $3 + 1$ *dimensions continues*, ayant une courbure variable. La courbure peut être retrouvée à partir des mesures de distance entre les événements ou à partir des forces de marée. Nous vivons donc dans un espace-temps pseudo-riemannien. Les durées, les longueurs et les courbures mesurées varient d'un observateur à l'autre.
- L'espace-temps et l'espace sont *courbés à proximité de la masse et de l'énergie*. La courbure en un point est déterminée par la densité d'énergie-impulsion en ce point, et est décrite par les équations du champ. Lorsque la matière et l'énergie se déplacent, la courbure spatiale se déplace dans la même direction. Un retard inhérent dans ce mouvement rend impossible le transport d'énergie plus rapide que la lumière. La constante de proportionnalité entre l'énergie et la courbure est si petite que cette courbure n'est pas observée dans la vie quotidienne ; seule sa manifestation indirecte, à savoir la gravitation, est observée.
- L'espace est également *flexible* : il tend à être plat. Étant élastique, il peut osciller indépendamment de la matière, nous parlons alors de rayonnement gravitationnel ou d'ondes gravitationnelles.

* « La raison est le comble du bonheur. » Une célèbre inscription de l'université d'Oxford.

- La matière en chute libre se déplace le long de *géodésiques*, c'est-à-dire le long de trajectoires de longueur maximale dans l'espace-temps courbe. Dans l'espace, cela signifie que la lumière est déviée, lorsqu'elle passe près des grosses masses, du double de la grandeur prévue par la gravitation universelle.
- Pour décrire la gravitation, nous *avons besoin* de l'espace-temps courbe, c'est-à-dire de la relativité générale, pour le moins *en dernier recours* à chaque fois que les distances sont de l'ordre du rayon de Schwarzschild $r_S = 2Gm/c^2$. Lorsque les distances sont beaucoup plus importantes que cette grandeur, la description relativiste de la gravité et du gravitomagnétisme (entraînement de référentiel) est suffisante. Lorsque les distances sont encore plus grandes, la description par la gravitation universelle, à savoir $a = Gm/r^2$, associée à l'espace-temps plat de Minkowski, est convenable en première approximation.
- L'espace et le temps ne sont pas discernables de façon globale, mais seulement de façon locale. La *matière* est requise pour faire cette distinction.

De surcroît, toute la matière et l'énergie que nous observons dans le ciel nous conduisent aux conclusions qui suivent :

- À l'échelle cosmologique, tout objet s'éloigne des autres : l'Univers est en *expansion*. Cette expansion de l'espace-temps est décrite par les équations du champ.
- L'Univers possède un *âge fini*, c'est l'explication de l'obscurité du ciel nocturne. Un horizon restreint les intervalles d'espace-temps mesurables à environ quatorze milliards d'années.

LA PRÉCISION DE CETTE DESCRIPTION

Réf. 241 La relativité générale est-elle à la hauteur des efforts consentis ? Il est plus commode de partager la discussion concernant son exactitude en deux ensembles d'expériences. Le premier ensemble est constitué des mesures sur la manière dont la *matière se déplace*. Les objets suivent-ils réellement des géodésiques ? Comme résumé dans le [Tableau 7](#), toutes les expériences s'accordent avec la théorie aux erreurs de mesures près, c'est-à-dire à moins d'une partie pour 10^{12} . En bref, la façon dont la matière chute est effectivement bien décrite par la relativité générale.

Réf. 242

Réf. 241, Réf. 242 Le second ensemble de mesures concerne la dynamique de l'espace-temps lui-même. *L'espace-temps s'agite-t-il* en respectant les équations du champ de la relativité générale ? Autrement dit, l'espace-temps est-il réellement courbé par la matière de la façon prédite par la théorie ? Un grand nombre d'expériences ont été réalisées, près et loin de la Terre, à la fois dans des champs faibles et forts. Toutes s'accordent avec les prédictions aux erreurs de mesure près. Cependant, les meilleurs relevés réalisés jusqu'à présent ne possèdent environ que 3 chiffres significatifs. Remarquez que, bien que de nombreuses expériences aient été exécutées, il n'existe que quelques *types* de tests, comme le [Tableau 7](#) l'indique. La découverte d'un nouveau type d'expériences garantit pratiquement d'avance notoriété et prospérité à son inventeur. Ce qui est le plus recherché, bien entendu, c'est la détection directe des ondes gravitationnelles.

Défi 379 pe

Un autre commentaire sur le [Tableau 7](#) concerne l'ordre de grandeur. Après plusieurs décennies au cours desquelles tous les effets mesurés étaient seulement de l'ordre de v^2/c^2 , plusieurs *effets en champs forts* dans des pulsars nous ont permis d'atteindre

TABLEAU 7 Types de tests de la relativité générale.

E F F E T M E S U R É	C O N F I R - T Y P E M A T I O N	R É F É - R E N C E
Principe d'équivalence	10^{-12}	mouvement de la matière Réf. 123, Réf. 241, Réf. 243
Dépendance en $1/r^2$ (nombre de dimensions de l'espace-temps)	10^{-10}	mouvement de la matière Réf. 244
Indépendance de G par rapport au temps	10^{-19} /s	mouvement de la matière Réf. 241
Décalage vers le rouge (lumière et micro-ondes sur le Soleil, la Terre, Sirius)	10^{-4}	courbure spatio-temporelle Réf. 101, Réf. 100, Réf. 241
Avancée du périhélie (quatre planètes, Icare, pulsars)	10^{-3}	courbure spatio-temporelle Réf. 241
Déviations de la lumière (lumière, ondes radio frôlant le Soleil, les étoiles, les galaxies)	10^{-3}	courbure spatio-temporelle Réf. 241
Décalage temporel (signaux radio près du Soleil, près des pulsars)	10^{-3}	courbure spatio-temporelle Réf. 241, Réf. 130
Gravitomagnétisme (Terre, pulsar)	10^{-1}	courbure spatio-temporelle Réf. 125
Effet géodésique (Lune, pulsars)	10^{-1}	courbure spatio-temporelle Réf. 146, Réf. 241
Émission décalée d'ondes gravitationnelles (pulsars)	10^{-3}	courbure spatio-temporelle Réf. 241

Réf. 241 l'ordre v^4/c^4 . Quelques effets de cet ordre de grandeur devraient bientôt être également découverts à l'intérieur même du Système solaire, en utilisant des expériences satellitaires de haute précision. Actuellement, le trophée de toutes les mesures revient au délai de l'émission des ondes gravitationnelles, c'est le seul effet en v^5/c^5 mesuré jusqu'à présent.

Page 160

La difficulté de parvenir à une haute précision dans les mesures de la courbure de l'espace-temps représente la raison pour laquelle la masse est évaluée à l'aide de balances, en utilisant toujours (de manière indirecte) le prototype du kilogramme situé à Paris, au lieu de définir une certaine courbure étalon et de fixer la valeur de G . En réalité, aucune expérience utile sur la courbure engendrée par la Terre n'a été réalisée jusqu'à maintenant. Une percée dans ce domaine ferait sensation. Les méthodes de courbure terrestre actuellement disponibles ne pourraient même pas nous permettre de définir un kilogramme d'or ou d'oranges avec une précision d'un kilogramme seulement !

Réf. 242, Réf. 245 Un autre procédé pour tester la relativité générale consiste à rechercher des descriptions alternatives de la gravitation. Il existe un nombre assez important d'autres théories de la gravitation qui ont été formulées et étudiées, mais jusqu'à présent seule la relativité générale est en accord avec toutes les expériences.

En résumé, comme Thibault Damour aime l'expliquer, la relativité générale est exacte

Réf. 241 à au moins 99,999 999 999 9 % à propos de la description du mouvement de la matière et de l'énergie, et exacte à au moins 99,9 % concernant la façon dont la matière et l'énergie courbent et déplacent l'espace-temps. Nous ne connaissons aucune exception, aucune anti-gravité et aucune donnée expérimentale inexplicée. Tout mouvement se produisant sur Terre et dans les cieux est décrit par la relativité générale. La réussite d'Albert Einstein ne peut être mise en défaut.

Nous remarquons que la relativité générale n'a pas été testée pour le *mouvement microscopique*. Dans ce contexte, le mouvement microscopique concerne tout mouvement pour lequel l'action se rapproche du quantum d'action, à savoir 10^{-34} Js. Ce problème constitue la partie centrale de la dernière étape de notre aventure.

RECHERCHES EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET EN COSMOLOGIE

Réf. 246 La recherche en relativité générale n'a jamais été aussi intense*.

* *

Les études expérimentales les plus intéressantes en ce moment sont celles qui sont consacrées aux pulsars binaires, à la quête des ondes gravitationnelles et aux divers satellites dédiés à cette observation. Entre autres, un satellite spécifique détectera tous les pulsars possibles de la Galaxie. Toutes ces expériences permettront de réaliser des tests expérimentaux dans des domaines qui sont demeurés inaccessibles jusqu'à présent.

* *

Réf. 247 La description des collisions et des problèmes à plusieurs corps, impliquant des étoiles, des étoiles à neutrons et des trous noirs, aide les astrophysiciens à améliorer leur compréhension de la profusion des phénomènes qu'ils observent dans leurs télescopes.

* *

Réf. 248 L'étude de l'Univers primordial et des propriétés des particules élémentaires, ainsi que des phénomènes tels que l'*inflation*, une courte période d'expansion accélérée qui eut lieu au cours des toutes premières secondes, représente toujours un important sujet de recherches.

* *

Réf. 249 L'approfondissement du chaos présent dans les équations du champ est d'un intérêt fondamental dans l'étude de l'Univers primordial, et peut être rattaché au problème de la formation des premières galaxies, une des plus grandes questions ouvertes en physique.

* *

Réf. 250 Le recueil de données concernant la formation des galaxies représente le principal objectif de plusieurs systèmes de satellites et de télescopes construits dans ce but. Ceux-ci se focalisent principalement sur la quête d'anisotropies localisées du fond diffus cosmologique micro-onde dues aux galaxies primordiales.

* Il existe même une excellente revue gratuite de la recherche disponible sur Internet, appelée *Living Reviews in Relativity*, qui peut être compulsée sur le site www.livingreviews.org.

* *

Réf. 193 La détermination des paramètres cosmologiques tels que la densité de matière, la courbure et la densité du vide constitue un effort primordial de l'astrophysique moderne.

* *

Réf. 251 Des astrophysiciens découvrent régulièrement de nouveaux phénomènes dans les cieux. Par exemple, les divers types de sursauts gamma, de bouffées de rayons X et de sursauts optiques ne sont pas encore parfaitement compris. Des sursauts gamma, par exemple, peuvent être aussi brillants que 10^{17} étoiles du gabarit du Soleil réunies. Cependant, ils ne durent que quelques secondes. Nous fournirons plus loin plus de détails sur cette recherche.

Page ??

* *

Réf. 252 Une base de données informatisée de toutes les solutions des équations du champ est en train d'être alimentée. Les chercheurs vérifient entre autres si elles sont toutes vraiment différentes les unes des autres.

* *

Réf. 254 Des solutions dotées de topologies non triviales, tels les trous de ver et les solutions de type particule, constituent un domaine captivant de recherche, associé à la théorie des cordes.

* *

Réf. 255 D'autres formulations de la relativité générale, qui décrivent l'espace-temps avec des quantités différentes de la métrique, sont continuellement en cours de développement, dans l'espoir d'éclaircir ses relations avec le monde quantique. Un exemple moderne d'une telle description se trouve dans ce que nous appelons les variables d'Ashtekar.

* *

Réf. 256 L'unification de la physique quantique et de la relativité générale, qui est le thème de la dernière partie de cette ascension montagnaise, absorbera les chercheurs pendant un grand nombre d'années encore.

* *

Réf. 257 Finalement, l'enseignement de la relativité générale, qui est restée cloîtrée pendant plusieurs décennies derrière des indices grecs, des formes différentielles et d'autres méthodes antipédagogiques, bénéficiera grandement des améliorations futures qui se focalisent plus sur la physique sous-jacente et moins sur le formalisme utilisé.

En bref, la relativité générale forme toujours un domaine de recherche extrêmement intéressant, et des découvertes importantes sont toujours attendues.

SE POURRAIT-IL QUE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE SOIT DIFFÉRENTE ?

La constante de la gravitation fournit une limite pour la densité et l'accélération des objets, ainsi que pour la puissance dégagée par les machines. Nous avons fondé toutes nos

déductions sur son invariance. Est-il possible que la constante gravitationnelle G varie d'un endroit à l'autre ou au cours du temps ? Cette question est subtile. À première vue, la réponse est un franc : « Oui, bien sûr ! Regardez simplement ce qui se passe lorsque la valeur de G est modifiée dans les formules. » Cependant, cette réponse est fautive, de même qu'elle était fautive pour la vitesse de la lumière c .

Page 90

Puisque la constante de la gravitation entre dans notre définition de la gravité et de l'accélération, et donc, même si nous ne le remarquons pas, dans la construction de tous les étalons de référence, de tous les standards de mesure et de tous les dispositifs de mesure, il n'existe *aucun procédé* permettant de détecter si sa valeur varie réellement. Aucune expérience imaginable ne pourrait détecter une quelconque variation. Chaque évaluation de la force est, que nous le voulions ou non, basée sur une comparaison avec la force limite. Il n'y a aucun procédé permettant, en principe, de contrôler l'invariance d'un étalon. Cela est encore plus surprenant parce que des mesures de cette espèce sont régulièrement rapportées, comme dans le [Tableau 7](#). Mais le résultat de n'importe quelle expérience de ce type se prévoit facilement : aucun changement ne sera jamais détecté.

Défi 380 pe

Page 268

Le nombre de dimensions spatiales pourrait-il être différent de 3 ? Cette question est plutôt compliquée. Par exemple, trois est le plus petit nombre de dimensions pour lequel un tenseur de Ricci nul est compatible avec une courbure non nulle. D'un autre côté, des dimensions supérieures à trois entraînent des déviations par rapport à la « loi » en l'inverse du carré de la gravitation. Jusqu'à présent, il n'existe aucun indice allant dans ce sens.

Les équations de la relativité générale pourraient-elles être différentes ? Les théoriciens ont exploré plusieurs théories alternatives, telles que les théories tenseur-scalaire, les théories avec torsion, ou les théories qui brisent l'invariance de Lorentz. Cependant, aucune des théories alternatives proposées jusqu'à maintenant ne semble s'ajuster avec les données expérimentales. Toutefois, deux candidats pourraient subsister.

Réf. 253

L'incorporation de la torsion dans les équations du champ, qui constitue une éventuelle extension de la théorie, représente une des tentatives les plus prometteuses permettant d'introduire le spin des particules dans la relativité générale. L'inclusion de la torsion dans la relativité générale ne requiert aucune nouvelle constante fondamentale. En réalité, l'absence de la torsion constituait une hypothèse de départ dans l'équation de Raychaudhuri. L'utilisation de l'équation de Raychaudhuri étendue, qui inclut la torsion, devrait nous permettre de déduire la théorie d'Einstein-Cartan tout entière à partir du principe de la force maximale. Ce sujet représente un terrain de recherches pour l'avenir.

Réf. 258

Finalement, il y a un résultat expérimental qui demeure toujours inexplicé. La vitesse de rotation de la matière située très loin du centre des galaxies ne semble pas être cohérente avec la dépendance en l'inverse du carré de la distance. Il pourrait y avoir plusieurs raisons qui expliquent cet effet. Les modèles les plus populaires sont, d'un côté, l'existence de la matière noire et, de l'autre côté, une modification dans les équations du champ pour les très grandes distances astronomiques. Le modèle de la matière noire suppose que nous rencontrons des difficultés pour observer quelque chose ; le modèle de la dynamique corrigée suppose que nous avons omis quelque chose dans les équations. Cette question est toujours ouverte.

Réf. 259

LES LIMITES DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Défi 381 e En dépit de ses nombreux succès, la description du mouvement présentée jusqu'à maintenant n'est pas satisfaisante. Peut-être avez-vous déjà eu quelques intuitions concernant certains problèmes non résolus.

En premier lieu, bien que la vitesse de la lumière soit le point de départ de toute la théorie, nous ne savons pas encore *ce qu'est* réellement la lumière. Ce sera notre prochain sujet de discussion.

Deuxièmement, nous avons vu que toutes les choses chutent en suivant des géodésiques. Mais une montagne ne chute pas. Dans un sens, la matière située en dessous l'empêche de tomber. Comment ? Et après tout, d'où vient la masse ? Qu'est-ce que la masse ? Qu'est-ce que la matière ? La relativité générale ne fournit aucune réponse ; en fait, elle *ne décrit pas du tout* la matière elle-même. Einstein avait l'habitude de dire que le membre de gauche des équations du champ, qui décrit la courbure de l'espace-temps, est le granite, alors que le membre de droite, qui décrit la matière, est le sable. En réalité, à ce niveau, nous ne savons toujours pas ce que sont la matière et la masse. Comme nous l'avons déjà souligné, pour transformer le sable en roche nous avons d'abord besoin de la théorie quantique, et ensuite, dans une étape ultérieure, de son unification avec la relativité. C'est le programme qui nous attend pour le reste de notre aventure.

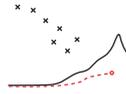
Nous avons aussi vu que la matière est nécessaire pour distinguer clairement l'espace du temps, et surtout pour comprendre le fonctionnement des horloges, des mètres étalons et des balances. En particulier, une question demeure : *après tout* pourquoi y a-t-il des unités de masse, de longueur et de temps dans la nature ? Cette question profonde sera également abordée dans le chapitre suivant.

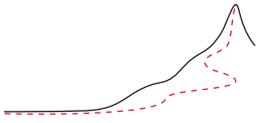
Page ?? Pour finir, nous en savons peu au sujet du vide. Nous avons besoin de comprendre l'origine de la grandeur constatée de la constante cosmologique et du nombre de dimensions d'espace-temps. Ce n'est qu'après cela que nous pourrons répondre à la question élémentaire : pourquoi le ciel est-il si éloigné ? La relativité générale ne nous est d'aucun secours ici. Pire, la petitesse de la constante cosmologique contredit la version la plus simple de la théorie quantique. C'est l'une des raisons pour lesquelles nous avons encore beaucoup de chemin à parcourir avant d'atteindre le sommet de la Montagne Mouvement.

Page ?? En résumé, pour décrire correctement le mouvement, nous avons besoin d'une description plus précise de la lumière, de la matière et du vide. Autrement dit, nous avons besoin d'en savoir plus sur tout ce que nous savons déjà. Sinon, nous ne pouvons espérer trouver de réponse aux questions qui nous taraudent sur les montagnes, les horloges et les astres. Dans un sens, il semblerait que nous n'ayons pas accumulé beaucoup de connaissances. Par chance, ce n'est pas vrai. Nous en avons tant appris que, dans la prochaine étape, nous serons obligés de revenir en arrière, aux situations *sans* la gravité, c'est-à-dire de revenir au cadre de la relativité restreinte. C'est la prochaine section, intermédiaire, de notre ascension montagnaise. Malgré ce retour simplificateur à l'espace-temps plat, attendons-nous à y trouver beaucoup d'émerveillement.

“ C’est une bonne chose que nous ayons la gravité, sinon les oiseaux morts resteraient tout simplement en l’air. Les chasseurs seraient bien embarrassés.

Steven Wright, acteur.”





ANNEXE A

UNITÉS, MESURES ET CONSTANTES

MESURER consiste à comparer avec un étalon. Un étalon est basé sur une *unité*. Une multitude de systèmes d'unités différents ont été utilisés à travers le monde. La plupart des étalons confèrent du pouvoir à l'organisme qui en a la charge. Une telle autorité peut être utilisée abusivement : c'est le cas aujourd'hui, par exemple dans l'industrie informatique, et il en était de même jadis. La solution est identique dans les deux situations : mettre sur pied un étalon indépendant et général. Au sujet des unités, cela eut lieu au dix-huitième siècle : pour éviter des abus de la part d'institutions autoritaires, pour évincer les problèmes dus aux unités de référence différentes, variables et non reproductibles, et – ce n'est pas une blague – pour simplifier le recouvrement des impôts, un groupe de scientifiques, d'hommes politiques et d'économistes se sont mis d'accord sur un ensemble d'unités. On l'appelle le *Système International d'Unités*, *SI* en abrégé, et il est défini par un traité international, la « Convention du Mètre ». Les unités sont régies par un organisme international, la « Conférence Générale des Poids et Mesures », et ses organisations filles, la « Commission Internationale des Poids et Mesures » et le « Bureau International des Poids et Mesures » (BIPM), qui ont toutes vu le jour au même moment, juste avant la Révolution française.

Réf. 260

Toutes les unités du SI sont construites à partir de sept *unités de base*, dont les définitions officielles sont données ci-dessous, avec les dates de leurs formulations :

- « La *seconde* est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à une température de 0 kelvin. » (1967)*
- « Le *mètre* est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde. » (1983)
- « Le *kilogramme* est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. » (1901)*
- « L'*ampère* est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur. » (1948)
- « Le *kelvin*, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. » (1967)*
- « La *mole* est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. » (1971)*
- « La *candela* est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité

énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian. » (1979)*

Notez que les unités de temps et de longueur sont toutes les deux définies à partir de certaines propriétés d'un modèle de référence du mouvement, à savoir la lumière. C'est une illustration supplémentaire qui souligne le fait que l'observation du mouvement, qui est le type fondamental de changement, est une *condition préalable* à la définition et à la construction du temps et de l'espace. Par ailleurs, l'emploi de la lumière dans les définitions avait déjà été proposé en 1827 par Jacques Babinet*.

À partir de ces unités de base, toutes les autres unités sont définies par multiplication et division. Ainsi, toutes les unités du SI possèdent les propriétés suivantes :

- Les unités du SI forment un système ayant *la précision de l'état de l'art* : toutes les unités sont définies avec une précision qui est supérieure à la précision des mesures couramment effectuées. De plus, la précision de ces définitions est régulièrement améliorée. L'incertitude relative actuelle dans la définition de la seconde se situe autour de 10^{-14} , 10^{-10} environ pour le mètre, 10^{-9} environ pour le kilogramme, 10^{-7} pour l'ampère, moins de 10^{-6} pour la mole, 10^{-6} pour le kelvin et 10^{-3} pour la candela.

- Les unités du SI forment un système *absolu* : toutes les unités sont définies de telle manière qu'elles puissent être reproduites dans tout laboratoire convenablement équipé, de manière indépendante, et avec une précision élevée. Cela permet d'éviter autant que possible tout abus de la part de l'organisation qui détermine les étalons. (Le kilogramme, toujours défini à l'aide d'un artefact, est la dernière exception à cette exigence, une recherche intensive est en cours pour éliminer cet objet de la définition – une compétition internationale qui prendra encore quelques années. Il existe deux approches : dénombrer des particules ou fixer \hbar . La première peut être accomplie dans des cristaux, la dernière en utilisant n'importe quelle formule où \hbar apparaît, comme la formule de la longueur d'onde de de Broglie ou celle de l'effet Josephson.)

- Les unités du SI forment un système *pratique* : les unités de base sont des quantités dont la grandeur est familière. Les unités couramment employées possèdent des dénominations et des abréviations standard. La liste complète inclut les sept unités de base, les unités supplémentaires, les unités dérivées et les unités admises.

Les unités *supplémentaires* du SI sont les deux suivantes : l'unité de l'angle (plan), défini comme étant le rapport de la longueur de l'arc au rayon, est le *radian* (rad). Pour l'angle solide, défini comme étant le rapport de la surface sous-tendue au carré du rayon, l'unité est le *stéradian* (sr).

Les unités *dérivées* ayant un nom spécial, dans leur désignation officielle en français, c'est-à-dire sans lettre capitale et sans accent, sont :

* Les symboles respectifs sont s, m, kg, A, K, mol et cd. Le prototype international du kilogramme est un cylindre en platine-iridium conservé au BIPM à Sèvres, en France. Pour obtenir plus de précisions sur les niveaux de l'atome de césium, consultez un livre sur la physique atomique. L'échelle Celsius d'une température θ est définie ainsi : $\theta/^\circ\text{C} = T/\text{K} - 273,15$, remarquez le minuscule écart avec le nombre apparaissant dans la définition du kelvin. Le SI stipule également : « Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules ». Dans la définition de la mole, nous sous-entendons que les atomes du carbone 12 sont non liés, au repos et dans leur état fondamental. Dans la définition de la candela, la fréquence de la lumière correspond à 555,5 nm, c'est-à-dire la couleur verte, qui est à peu près égale à la longueur d'onde où l'œil est le plus sensible.

* Jacques Babinet (1794–1874) fut un physicien français qui publia des travaux importants en optique.

N O M	S Y M B O L E	N O M	S Y M B O L E
hertz	Hz = 1/s	newton	N = kg m/s ²
pascal	Pa = N/m ² = kg/m s ²	joule	J = Nm = kg m ² /s ²
watt	W = kg m ² /As ³	coulomb	C = As
volt	V = kg m ² /As ³	farad	F = As/V = A ² s ⁴ /kg m ²
ohm	Ω = V/A = kg m ² /A ² s ³	siemens	S = 1/Ω
weber	Wb = Vs = kg m ² /As ²	tesla	T = Wb/m ² = kg/As ² = kg/Cs
henry	H = Vs/A = kg m ² /A ² s ²	degré Celsius	°C (cf. définition du kelvin)
lumen	lm = cd sr	lux	lx = lm/m ² = cd sr/m ²
becquerel	Bq = 1/s	gray	Gy = J/kg = m ² /s ²
sievert	Sv = J/kg = m ² /s ²	katal	kat = mol/s

Défi 382 pe

Nous remarquons que dans toutes les définitions de ces unités, le kilogramme n'apparaît qu'aux puissances 1, 0 et -1. L'explication finale de cette réalité n'est apparue que récemment. Pouvez-vous tenter d'en formuler la raison ?

Les unités admises non SI sont la *minute*, l'*heure*, le *jour* (pour le temps), le *degré* 1° = π/180 rad, la *minute* 1' = π/10 800 rad, la *seconde* 1'' = π/648 000 rad (pour les angles), le *litre* et la *tonne*. On doit éviter toutes les autres unités.

On rend plus pratiques toutes les unités du SI grâce à l'introduction de désignations et d'abréviations standard pour les puissances de dix, que nous appelons les *préfixes** :

10 ⁿ	N O M	S Y M B .	10 ⁿ	N O M	S Y M B .	10 ⁿ	N O M	S Y M B .	10 ⁿ	N O M	S Y M B .
10 ¹	déca	da	10 ⁻¹	déci	d	10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹⁸	atto	a
10 ²	hecto	h	10 ⁻²	centi	c	10 ²¹	zetta	Z	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ³	kilo	k	10 ⁻³	milli	m	10 ²⁴	yotta	Y	10 ⁻²⁴	yocto	y
10 ⁶	méga	M	10 ⁻⁶	micro	μ	non officiel :			Réf. 262		
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁹	nano	n	10 ²⁷	xenta	X	10 ⁻²⁷	xenno	x
10 ¹²	téra	T	10 ⁻¹²	pico	p	10 ³⁰	wekta	W	10 ⁻³⁰	weko	w
10 ¹⁵	péta	P	10 ⁻¹⁵	femto	f	10 ³³	vendekta	V	10 ⁻³³	vendeko	v
						10 ³⁶	udekta	U	10 ⁻³⁶	udeko	u

* Certains de ces noms sont inventés (yocto qui se prononce de manière presque identique au latin *octo* « huit », zepto qui se prononce presque comme le mot latin *septem*, yotta et zetta qui leur ressemblent, exa et péta qui se prononcent comme les mots grecs ἕξάκις et πεντάκις pour « six fois » et « cinq fois », ceux qui ne sont pas officiels se prononcent comme les mots grecs désignant neuf, dix, onze et douze). Certains sont issus du danois/norvégien (atto pour *atten* « dix-huit », femto pour *femten* « quinze »), certains proviennent du latin (de *mille*, de *centum* « cent », de *decem* « dix », de *nanus* « nain »), certains sont tirés de l'italien (de *piccolo* « petit »), certains sont grecs (micro provient de μικρός « petit », déca/déka de δέκα « dix », hecto de ἑκατόν « cent », kilo de χίλιοι « mille », méga de μέγας « grand », giga de γίγας « géant », téra de τέρας « monstre »).

Défi 383 e

Interprétez : J'étais bloqué dans un tel embouteillage que j'ai mis un microsiècle pour faire un picoparsec et que ma consommation de carburant fut de deux dixièmes d'un millimètre carré.

- Les unités du SI forment un système *exhaustif* : elles recouvrent de manière systématique l'ensemble complet des observables de la physique. Qui plus est, elles fixent également les unités de mesure de toutes les autres sciences.

- Les unités du SI forment un système *universel* : elles peuvent être utilisées dans le monde des affaires, dans l'industrie, dans le commerce, à la maison, dans l'enseignement et dans la recherche. Elles pourraient même être employées par des civilisations extraterrestres, si celles-ci existaient.

- Les unités du SI forment un système *cohérent* : le produit ou le quotient de deux unités du SI est aussi une unité du SI. Cela signifie qu'en principe, la même abréviation, « SI » par exemple, pourrait être utilisée pour chaque unité.

Les unités du SI ne constituent pas l'unique ensemble possible qui puisse vérifier toutes ces conditions, mais elles sont le seul système existant qui le fait*.

Rappelez-vous que puisque chaque mesure est une comparaison avec un étalon de référence, toute mesure exige de la matière pour réaliser l'étalon (oui, même pour la vitesse standard), et du rayonnement pour accomplir cette comparaison. Le concept de mesure suppose donc que la matière et le rayonnement existent et qu'ils peuvent être clairement dissociés l'un de l'autre.

Page ??

UNITÉS NATURELLES DE PLANCK

Puisque la forme exacte de nombreuses équations dépend du système d'unités utilisé, les physiciens théoriciens emploient souvent des systèmes d'unités optimisés pour produire des équations sous une forme simple. Les unités choisies et les valeurs des constantes de la nature sont reliées. En physique microscopique, le système des *unités naturelles de Planck* est souvent utilisé. Il est défini en posant $c = 1$, $\hbar = 1$, $G = 1$, $k = 1$, $\epsilon_0 = 1/4\pi$ et $\mu_0 = 4\pi$. Les unités de Planck sont donc définies à partir de combinaisons de constantes fondamentales, celles qui correspondent aux unités de base du SI sont données dans le [Tableau 39**](#). Ce tableau est également utile pour convertir des équations notées en unités naturelles aux unités du SI : substituez simplement chaque quantité X par X/X_{Pl} .

Défi 384 e

* La plupart des unités non SI qui sont toujours d'usage dans le monde sont d'origine romaine. Le mile provient de *milia passum*, qui était équivalent à mille (doubles) enjambées d'environ 1 480 mm chacune. Aujourd'hui un mile nautique, autrefois défini comme une minute d'arc à la surface de la Terre, vaut exactement 1 852 m. Le pouce vient de *uncia/onzia* (un douzième – d'un pied actuel). La livre (de l'anglais « pound » qui vient de *pondere* « peser ») est employée comme une traduction de *libra* – balance – qui est à l'origine de son abréviation lb. Même la coutume de compter en douzaines au lieu de dizaines est d'origine romaine. Celles-ci et les autres unités toutes aussi cocasses – comme le système dans lequel toutes les unités commencent avec un « f », et qui utilise le furlong/quinze jours comme unité de vitesse – sont dorénavant officiellement définies comme des multiples des unités du SI.

** Les unités naturelles x_{Pl} données ici sont celles qui sont couramment utilisées aujourd'hui, c'est-à-dire celles définies en utilisant la constante \hbar , et non, comme le fit à l'origine Planck, en utilisant la constante $h = 2\pi\hbar$. Les unités électromagnétiques peuvent aussi être définies à l'aide d'autres facteurs que $4\pi\epsilon_0$ dans les expressions : par exemple, en utilisant $4\pi\epsilon_0\alpha$, avec la *constante de structure fine* α , on obtient $q_{\text{Pl}} = e$. Pour des explications sur les nombres situés entre parenthèses, les écarts types, lisez la [page 286](#).

TABLEAU 9 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck.

NOM	DÉFINITION	VALEUR
Unités de base		
Longueur de Planck	$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1,616\,0(12) \cdot 10^{-35} \text{ m}$
Durée de Planck	$t_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$= 5,390\,6(40) \cdot 10^{-44} \text{ s}$
Masse de Planck	$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G}$	$= 21,767(16) \mu\text{g}$
Courant de Planck	$I_{\text{Pl}} = \sqrt{4\pi\epsilon_0 c^6/G}$	$= 3,479\,3(22) \cdot 10^{25} \text{ A}$
Température de Planck	$T_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	$= 1,417\,1(91) \cdot 10^{32} \text{ K}$
Unités triviales		
Vitesse de Planck	$v_{\text{Pl}} = c$	$= 0,3 \text{ Gm/s}$
Moment cinétique de Planck	$L_{\text{Pl}} = \hbar$	$= 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
Quantum d'action de Planck	$S_{\text{aPl}} = \hbar$	$= 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
Entropie de Planck	$S_{\text{ePl}} = k$	$= 13,8 \text{ yJ/K}$
Unités dérivées		
Densité de Planck	$\rho_{\text{Pl}} = c^5/G^2\hbar$	$= 5,2 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3$
Énergie de Planck	$E_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/G}$	$= 2,0 \text{ GJ} = 1,2 \cdot 10^{28} \text{ eV}$
Quantité de mouvement de Planck	$p_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^3/G}$	$= 6,5 \text{ Ns}$
Puissance de Planck	$P_{\text{Pl}} = c^5/G$	$= 3,6 \cdot 10^{52} \text{ W}$
Force de Planck	$F_{\text{Pl}} = c^4/G$	$= 1,2 \cdot 10^{44} \text{ N}$
Pression de Planck	$p_{\text{Pl}} = c^7/G\hbar$	$= 4,6 \cdot 10^{113} \text{ Pa}$
Accélération de Planck	$a_{\text{Pl}} = \sqrt{c^7/\hbar G}$	$= 5,6 \cdot 10^{51} \text{ m/s}^2$
Fréquence de Planck	$f_{\text{Pl}} = \sqrt{c^5/\hbar G}$	$= 1,9 \cdot 10^{43} \text{ Hz}$
Charge électrique de Planck	$q_{\text{Pl}} = \sqrt{4\pi\epsilon_0 c\hbar}$	$= 1,9 \text{ aC} = 11,7 \text{ e}$
Tension de Planck	$U_{\text{Pl}} = \sqrt{c^4/4\pi\epsilon_0 G}$	$= 1,0 \cdot 10^{27} \text{ V}$
Résistance de Planck	$R_{\text{Pl}} = 1/4\pi\epsilon_0 c$	$= 30,0 \Omega$
Capacité électrique de Planck	$C_{\text{Pl}} = 4\pi\epsilon_0 \sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1,8 \cdot 10^{-45} \text{ F}$
Inductance de Planck	$L_{\text{Pl}} = (1/4\pi\epsilon_0) \sqrt{\hbar G/c^7}$	$= 1,6 \cdot 10^{-42} \text{ H}$
Champ électrique de Planck	$E_{\text{Pl}} = \sqrt{c^7/4\pi\epsilon_0 \hbar G^2}$	$= 6,5 \cdot 10^{61} \text{ V/m}$
Densité du flux magnétique de Planck	$B_{\text{Pl}} = \sqrt{c^5/4\pi\epsilon_0 \hbar G^2}$	$= 2,2 \cdot 10^{53} \text{ T}$

Les unités naturelles sont importantes à un autre égard : à chaque fois qu'une quantité est imprudemment qualifiée d'« infiniment petite (ou grande) », l'expression correcte à considérer est « aussi petite (ou aussi grande) que l'unité de Planck corrigée correspondante ». Comme on l'explique tout au long de ce texte, et particulièrement dans la partie finale, cette substitution est possible parce que presque toutes les unités de Planck fournissent, dans la limite d'un facteur de correction de l'ordre de 1, la valeur extrême pour l'observable correspondante – certaines une borne supérieure et d'autres une

limite inférieure. Malheureusement, ces facteurs de correction ne sont pas encore largement déterminés. La valeur extrême exacte pour chaque observable dans la nature est obtenue lorsque G est remplacé par $4G$, \hbar par $\hbar/2$, k par $k/2$ et $4\pi\epsilon_0$ par $8\pi\epsilon_0\alpha$ dans toutes les quantités de Planck. Ces valeurs extrêmes, ou *unités de Planck corrigées*, sont les *véritables unités naturelles*. Il est possible de dépasser les valeurs extrêmes, mais uniquement pour certaines quantités étendues. (Pouvez-vous deviner lesquelles?)

Défi 385 s

AUTRES SYSTÈMES D'UNITÉS

Un objectif central de la recherche en physique des hautes énergies est l'évaluation des intensités de toutes les interactions. Par conséquent il n'est pas pratique de fixer la constante de la gravitation G à un, comme dans le système des unités de Planck. Pour cette raison, les physiciens des hautes énergies fixent souvent $c = \hbar = k = 1$ et $\mu_0 = 1/\epsilon_0 = 4\pi^*$, laissant seulement la constante gravitationnelle G dans les équations.

Dans ce système, il n'y a qu'une seule unité fondamentale, mais son choix reste libre. Souvent, une longueur standard est choisie comme unité de base, longueur qui est l'archétype d'une quantité mesurée. Les observables physiques les plus importantes sont alors reliées par

$$\begin{aligned} 1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{électrique}}], \\ 1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T], \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropie}}] = \hbar = c = k = [\alpha], \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{et} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{aligned} \tag{292}$$

où nous avons noté $[x]$ l'unité de la quantité x . Cependant, l'utilisation de la même unité pour le temps, la capacité électrique et l'inductance n'est pas du goût de tout le monde, et par conséquent les électriciens n'utilisent pas ce système**.

Souvent, afin d'avoir un aperçu des énergies nécessaires pour observer un effet en cours d'étude, on choisit une énergie de référence comme unité fondamentale. En physique des particules l'unité d'énergie la plus courante est l'*électronvolt* (eV), défini comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une

Réf. 263

* Des définitions différentes pour les constantes de proportionnalité en électrodynamique conduisent, entres autres, au système d'unités gaussiennes souvent utilisé dans les calculs théoriques, au système d'unités de Heaviside-Lorentz, au système d'unités électrostatiques et au système d'unités électromagnétiques.

** Dans cette liste, l est la longueur, E l'énergie, F la force, $E_{\text{électrique}}$ le champ électrique et B le champ magnétique, m la masse, p la quantité de mouvement, a l'accélération, f la fréquence, I l'intensité du courant électrique, U la tension, T la température, v la vitesse, q la charge électrique, R la résistance, P la puissance, G la constante de la gravitation.

La page Web www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html fournit un outil pour convertir diverses unités l'une vers l'autre.

Les chercheurs en relativité générale emploient fréquemment un autre système, dans lequel le *rayon de Schwarzschild* $r_S = 2Gm/c^2$ est utilisé pour mesurer des masses, en posant $c = G = 1$. Dans ce cas, la masse et la longueur possèdent la même dimension, et \hbar possède la dimension d'une surface.

Réf. 264

Déjà au dix-neuvième siècle, George Stoney avait suggéré d'utiliser comme unités de longueur, de temps et de masse les quantités $l_S = \sqrt{Ge^2/(c^4 4\pi\epsilon_0)} = 1,4 \cdot 10^{-36}$ m, $t_S = \sqrt{Ge^2/(c^6 4\pi\epsilon_0)} = 4,6 \cdot 10^{-45}$ s et $m_S = \sqrt{e^2/(G 4\pi\epsilon_0)} = 1,9$ μ g. Comment ces unités sont-elles reliées aux unités de Planck?

Défi 386 s

différence de potentiel électrique de 1 volt (« protonvolt » serait une désignation plus appropriée). Ainsi nous avons $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, ou approximativement

$$1 \text{ eV} \approx \frac{1}{6} \text{ aJ} \quad (293)$$

Défi 387 e

ce qui est facile à mémoriser. La simplification $c = \hbar = 1$ donne $G = 6,9 \cdot 10^{-57} \text{ eV}^{-2}$ et nous permet aussi d'utiliser l'unité eV pour la masse, la quantité de mouvement, la température, la fréquence, le temps et la distance, à l'aide des correspondances respectives $1 \text{ eV} \equiv 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg} \equiv 5,4 \cdot 10^{-28} \text{ Ns} \equiv 242 \text{ THz} \equiv 11,6 \text{ kK}$ et $1 \text{ eV}^{-1} \equiv 4,1 \text{ fs} \equiv 1,2 \mu\text{m}$.

Réf. 265

Pour pouvoir se représenter l'unité eV, les relations qui suivent sont utiles. La température ambiante, généralement considérée comme étant de 20°C ou 293 K , correspond à une énergie cinétique par particule de $0,025 \text{ eV}$ ou $4,0 \text{ zJ}$. L'énergie la plus élevée d'une particule, mesurée jusqu'à présent, appartient à un rayon cosmique d'une énergie de $3 \cdot 10^{20} \text{ eV}$ ou 48 J . Ici bas, sur la Terre, nous avons construit un accélérateur capable de produire une énergie d'environ 105 GeV ou 17 nJ pour des électrons et des anti-électrons, et un autre capable de produire une énergie de 10 TeV ou $1,6 \mu\text{J}$ pour des protons sera bientôt achevé. Ils appartiennent tous les deux au CERN à Genève et possèdent une circonférence de 27 km .

Réf. 266

La température la plus basse mesurée jusqu'à présent est de 280 pK , dans un système de noyaux de rhodium maintenus par un procédé de refroidissement particulier. L'intérieur de ce cryostat serait même le point le plus froid de tout l'univers. L'énergie cinétique par particule correspondant à cette température est également la plus petite jamais mesurée : elle correspond à 24 feV ou $3,8 \text{ vJ} = 3,8 \cdot 10^{-33} \text{ J}$. Pour des particules isolées, le record semble être celui de neutrons : des énergies cinétiques aussi faibles que 10^{-7} eV ont été obtenues, ce qui correspond à des longueurs d'onde de de Broglie de 60 nm .

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES UNITÉS

Le fait de ne pas utiliser les unités du SI peut coûter cher. En 1999, la NASA a perdu un satellite sur Mars parce que certains programmeurs de logiciels avaient utilisé des unités impériales* à la place des unités du SI dans des lignes de code. En conséquence, Mars Climate Orbiter s'écrasa sur la planète, au lieu de graviter autour de celle-ci. La perte fut évaluée à 100 millions d'euros environ**.

* *

Réf. 267

Le *gray* est la quantité de radioactivité qui dépose 1 J sur 1 kg de matière. Le *sievert* est l'unité de radioactivité adaptée aux êtres humains en pondérant chaque type de tissu humain à l'aide d'un facteur représentatif de l'impact que le rayonnement dépose sur celui-ci. Quatre à cinq sieverts constituent une dose létale pour les êtres humains. En comparaison, la radioactivité naturelle présente à l'intérieur du corps humain conduit à une dose de $0,2 \text{ mSv}$ par an. Une radiographie moyenne aux rayons X engendre une radiation de 1 mSv , un scanner, 8 mSv .

* Des unités de mesure anglo-saxonnes. [N.D.T.]

** Ce récit ranima une vieille (et fausse) rumeur qui affirme que seuls trois pays dans le monde n'utilisent pas les unités du SI : le Libéria, les États-Unis et la Birmanie.

TABLEAU 10 Quelques valeurs mesurées de puissances visibles (intensités lumineuses).

OBSERVATION	INTENSITÉ LUMINEUSE
Flamme de bougie	1 cd
Lampe de poche	2 cd
Feux de position d'une voiture	10 cd
Plein phare d'une voiture (avec réflecteur, centre du faisceau)	60 cd
Lampe de cinéma	1,5 kcd
Flash photographique	1 Mcd
Phare	2 Mcd
Les plus gros projecteurs	80 Mcd

* *

Vous êtes décontenancés par la candela ? La définition dit simplement que $683 \text{ cd} = 683 \text{ lm/sr}$ correspond à 1 W/sr . La candela est donc une unité de la puissance lumineuse par angle (solide), ou d'*intensité lumineuse*, mis à part qu'elle est corrigée pour s'ajuster à la sensibilité de l'œil : la candela mesure simplement la puissance *visible* par unité d'angle.

De manière similaire, $683 \text{ lm} = 683 \text{ cd sr}$ correspond à 1 W . Donc le lumen et le watt mesurent tous les deux de la puissance, ou du flux d'énergie, mais le lumen mesure uniquement la partie *visible* de la puissance ou flux énergétique. Cette différence est exprimée en insérant les qualificatifs « radiant » ou « lumineux » : ainsi, le watt mesure le flux *radiant*, tandis que le lumen mesure le flux *lumineux*.

Défi 388 e

Le facteur 683 est d'origine historique. Une chandelle ordinaire émet une intensité lumineuse d'environ une candela. Par conséquent, la nuit, une chandelle peut être vue jusqu'à une distance de 10 ou 20 kilomètres. Une ampoule à incandescence de 100 W produit 1 700 lm, et les diodes émettrices de lumière les plus brillantes environ 5 lm. Les projecteurs de cinéma produisent environ 2 Mlm, et les flashes les plus intenses, comme l'éclair, 100 Mlm.

L'*éclairage énergétique* de la lumière du soleil est d'environ $1\,300 \text{ W/m}^2$ lors d'une journée ensoleillée. Par ailleurs, l'*éclairage lumineux* n'est que de $120 \text{ klm/m}^2 = 120 \text{ klux}$ ou 170 W/m^2 . (Une journée d'été recouverte de nuages ou une journée d'hiver dégagée produit environ 10 klux. L'éclairage lumineux est principalement ce que nous appelons la « luminosité » dans la vie courante.) Ces nombres indiquent que la plupart de l'énergie du Soleil qui parvient à la Terre se situe en dehors du spectre visible.

Réf. 268

Sur un glacier, près de la côte, sur le sommet d'une montagne, ou lors de conditions météorologiques particulières, la luminosité peut atteindre 150 klux. Les lampes les plus brillantes, celles utilisées pendant les opérations chirurgicales, produisent 120 klux. Les hommes ont besoin d'environ 30 lux pour une lecture confortable. Les musées sont souvent maintenus dans l'obscurité parce que les peintures à l'eau sont dégradées par la lumière au-delà de 100 lux, et les peintures à l'huile au dessus de 200 lux. La pleine lune produit 0,1 lux, et le ciel lors d'une nuit sombre sans lune, environ 1 mlux. Les yeux conservent leur aptitude à distinguer les couleurs quelque part entre 0,1 lux et 0,01 lux,

TABLEAU 11 Quelques valeurs mesurées d'éclairéments lumineux.

OBSERVATION	ÉCLAIREMENT LUMINEUX
Pâle étoile	0,1 nlx
Sirius	10 μ lx
Le phot (ancienne unité d'éclairément lumineux)	10 μ lx
Jupiter	20 μ lx
Pleine Lune	0,01 à 0,24 lx
La rue la nuit, faible trafic, faible éclairage	0,1 à 3 lx
La rue la nuit, fort trafic	10 à 30 lx
Pour la lecture	50 à 100 lx
Écran de cinéma	100 lx
Lieu de travail	0,2 à 5 klx
Journée nuageuse	1 klx
Journée ensoleillée	120 klx
Film dans un projecteur de cinéma	5 Mlx
Douloureux pour l'œil	100 Mlx

l'œil cesse de remplir sa fonction en deçà de 1 nlux. Les dispositifs techniques qui produisent des images dans l'obscurité, telles que les lunettes de vision nocturne, commencent à fonctionner à partir de 1 μ lx. Par ailleurs, le corps humain lui-même *brille* à environ 1 plux, une valeur trop faible pour pouvoir être décelée par l'œil, mais facilement mesurable à l'aide d'appareils spécialisés. La source de cette émission reste toujours du domaine de la recherche.

* *

Les plus fortes intensités lumineuses atteignent plus de 10^{18} W/m², soit plus de 15 ordres de grandeur au dessus de l'intensité de la lumière du soleil. Elles sont produites par des focalisations très étroites de lasers pulsés. Le champ électrique de ces impulsions lumineuses est du même ordre que le champ situé à l'intérieur des atomes, un tel faisceau ionise par conséquent toute la matière qu'il rencontre.

Réf. 269

* *

La *densité lumineuse* est une quantité qui est souvent utilisée par les spécialistes de la lumière. Son unité est 1 cd/m², que l'on désigne officieusement 1 Nit et abrégé 1 nt. Les yeux voient, uniquement avec les bâtonnets, de 0,1 μ cd/m² à 1 mcd/m², ils voient avec les cônes simplement au-dessus de 5 cd/m², la perception est meilleure entre 100 et 50 000 cd/m², et ils deviennent complètement éblouis au-delà de 10 Mcd/m² : soit une étendue totale de 15 ordres de grandeur.

* *

La longueur de Planck est approximativement égale à la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_B = h/mv$ d'un homme marchant à son aise ($m = 80$ kg, $v = 0,5$ m/s), ce mouvement

Réf. 270

est par conséquent appelé à juste titre la « promenade de Planck ».

* *

La masse de Planck est égale à la masse d'environ 10^{19} protons. C'est approximativement la masse d'un embryon humain, à l'âge de dix jours environ.

* *

La seconde ne correspond plus à 1/86 400ème du jour, bien que ce fût le cas en l'an 1900. La Terre met maintenant environ 86 400,002 s pour effectuer une rotation, de telle sorte que le *Service international de la rotation terrestre* doit régulièrement introduire une seconde intercalaire pour s'assurer que le Soleil est à son plus haut niveau dans le ciel à midi tapante*. Le temps défini de cette manière est appelé *Temps Universel Coordonné*. La vitesse de rotation de la Terre varie également de manière irrégulière d'un jour à l'autre à cause des conditions météorologiques, la vitesse de rotation moyenne fluctue même entre l'hiver et l'été à cause des changements qui surviennent dans les calottes glaciaires polaires, et de surcroît cette moyenne diminue au cours du temps à cause du frottement engendré par les marées. La fréquence d'insertion de ces secondes intercalaires est par conséquent supérieure à une fois tous les 500 jours, et n'est pas constante dans le temps.

* *

Les quantités mesurées de la manière la plus précise dans la nature sont les fréquences de certains pulsars millisecondes**, la fréquence de certaines transitions atomiques étroites, et la constante de Rydberg de l'*hydrogène atomique*, qui peuvent toutes être mesurées aussi précisément qu'est définie la seconde. La transition du césium qui définit la seconde possède une largeur finie de sa raie spectrale, ce qui restreint la précision accessible : cette limite est d'environ 14 chiffres.

* *

Réf. 271 L'horloge la plus précise jamais réalisée, en utilisant des micro-ondes, possède une stabilité de 10^{-16} pendant une durée de fonctionnement de 500 s. Pour des durées plus longues, le record en 1997 fut d'environ 10^{-15} , mais des valeurs tournant autour de 10^{-17} semblent
Réf. 272 rester du domaine du technologiquement possible. La précision des horloges est limitée par le bruit pour des brèves durées de mesure, et pour des longues durées de mesure par des biais, c'est-à-dire par des effets systématiques. La région de la plus forte stabilité dépend du type d'horloge utilisée, elle se situe généralement entre 1 ms pour des horloges optiques et 5 000 s pour des masers. Les pulsars sont le seul type d'horloge pour lequel cette région n'est pas encore déterminée, elle se situe vraisemblablement à plus de 20 années, c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé entre leur découverte et l'instant où nous écrivons ces lignes.

* *

* Leur site Web sur hpiers.obspm.fr donne plus de précisions sur les particularités de ces insertions, comme sur maia.usno.navy.mil, l'un des quelques sites Web militaires utiles. Consultez aussi www.bipm.fr, le site du BIPM.

** Un tour d'horizon de ce travail fascinant en est donné par J. H. TAYLOR, Pulsar timing and relativistic gravity, *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A* 341, pp. 117–134, 1992.

Les durées les plus brèves qui ont été mesurées sont les durées de vie de certaines particules « élémentaires ». En particulier, la durée de vie de certains mésons D a été évaluée à moins de 10^{-23} s. De telles périodes sont mesurées en utilisant une chambre à bulles, dans laquelle la trace est photographiée. Pouvez-vous estimer quelle est la longueur de cette trajectoire ? (C'est une question trompeuse – si votre longueur ne peut pas être observée à l'aide d'un microscope optique, c'est que vous avez fait une erreur dans vos calculs.)

Réf. 273

Défi 389 s

* *

Les durées les plus longues que l'on rencontre dans la nature sont les durées de vie de certains isotopes radioactifs, plus de 10^{15} années, et la limite inférieure de certaines désintégrations de protons, soit 10^{32} années. Ces périodes sont donc beaucoup plus grandes que l'âge de l'univers, estimé à quatorze milliards d'années.

Réf. 274

* *

Les constantes fondamentales de la physique mesurées avec le moins de précision sont la constante de la gravitation G et la constante de couplage de l'interaction forte α_s . L'âge de l'univers et sa densité sont déterminés avec encore moins de précision (regardez le [Tableau 44](#)).

Page 289

* *

La précision des mesures de masse des solides est limitée par des effets simples tels que l'adsorption de l'eau. Pouvez-vous estimer la masse d'une monocouche d'eau – une couche ayant l'épaisseur d'une seule molécule – sur un métal pesant 1 kg ?

Défi 390 s

* *

Les variations des quantités sont souvent beaucoup plus faciles à mesurer que leurs valeurs. Par exemple, dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, la sensibilité atteinte en 1992 était $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ pour des longueurs de l'ordre de 1 m. Autrement dit, pour un bloc de métal d'environ un mètre cube il est possible de mesurer des variations de longueur à peu près 3 000 fois plus petites que le rayon d'un proton. Ces dispositifs sont dorénavant en train d'être surpassés par les interféromètres en anneau. Des interféromètres en anneau mesurant des différences de fréquence de 10^{-21} ont déjà été construits, et ils sont toujours en cours de perfectionnement.

Réf. 275

Réf. 276

* *

L'astronome suédois Anders Celsius (1701–1744) fixa initialement le point de congélation de l'eau à 100 degrés et le point d'ébullition à 0 degré. Cette échelle fut inversée par la suite. Cependant, l'histoire ne se termine pas là. Avec la définition officielle du kelvin et du degré Celsius, à la pression standard de 1 013,25 Pa, l'eau bout à 99,974°C. Pouvez-vous expliquer pourquoi ce n'est plus 100°C ?

Réf. 277

Défi 391 s

* *

Au cours du millénaire précédent, on avait coutume de mesurer l'énergie thermique en utilisant la *calorie* comme unité, notée cal. 1 cal est l'énergie nécessaire pour réchauffer 1 g d'eau de 1 K. Pour compliquer les choses, 1 kcal était souvent noté 1 Cal. (Nous parlions également de grande et de petite calorie.) 1 kcal vaut 4,1868 kJ.

* *

Les unités du SI sont adaptées aux êtres humains : les valeurs du battement de cœur, de la taille humaine, du poids, de la température et de la quantité de substance d'un homme se rapprochent de la valeur unitaire à guère plus d'un couple d'ordres de grandeurs. Les unités du SI confirment donc (approximativement) ce que disait Protagoras il y a 25 siècles : « L'homme est la mesure de toutes choses ».

* *

Certains systèmes d'unités sont particulièrement mal adaptés aux hommes. Le plus infâme d'entre eux est la taille S des chaussures. C'est un nombre pur calculé ainsi :

$$\begin{aligned} S_{\text{France}} &= 1,5 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) \\ S_{\text{Europe centrale}} &= 1,5748 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) \\ S_{\text{Homme anglo-saxon}} &= 1,181 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) - 22 \end{aligned} \quad (294)$$

où l représente la longueur d'un pied et la correction de longueur dépend de l'entreprise de confection. De surcroît, la formule anglo-saxonne n'est pas valable pour les femmes et les enfants, où le premier facteur dépend, pour des raisons marketing, à la fois du fabricant et de la taille elle-même. Le standard ISO exige, de façon non surprenante, d'exprimer la longueur du pied en millimètres.

* *

Le tableau des préfixes du SI recouvre 72 ordres de grandeurs. Combien de préfixes supplémentaires seraient nécessaires ? Même une liste très longue n'incorporera qu'une partie infime de l'étendue infinie des possibilités. La Conférence Générale des Poids et Mesures devra-t-elle se poursuivre éternellement, pour définir un nombre infini de préfixes du SI ? Pourquoi ?

Défi 392 s

* *

Le philosophe français Voltaire, après avoir rencontré Newton, publia l'histoire maintenant célèbre qui raconte que la correspondance entre la chute des objets et le mouvement de la Lune fut découverte par Newton lorsqu'il vit une pomme tomber d'un arbre. Plus d'un siècle plus tard, juste avant la Révolution Française, un jury de scientifiques décida de prendre comme unité de la force précisément celle exercée par la gravité sur une *pomme étalon*, et de la baptiser du nom de ce scientifique anglais. Après une étude approfondie, on trouva que la masse de la pomme étalon était de 101,9716 g, son poids fut donc appelé 1 newton. Depuis lors, les visiteurs du musée à Sèvres près de Paris ont eu la possibilité d'admirer le mètre étalon, le kilogramme étalon et la pomme étalon*.

* Pour être franc, c'est une blague : il n'existe aucune pomme étalon. Par contre, ce qui suit n'est *pas* une plaisanterie : des propriétaires de plusieurs pommiers en Grande-Bretagne et aux États-Unis prétendirent descendre, suite à un déracinement, de l'arbre original sous lequel Newton eut son trait de génie. Des tests ADN ont même été réalisés pour décider s'ils dériveraient tous du même arbre. De façon non surprenante, le résultat a établi que l'arbre situé au MIT, contrairement à ceux de Grande-Bretagne, est un faux.

Réf. 278

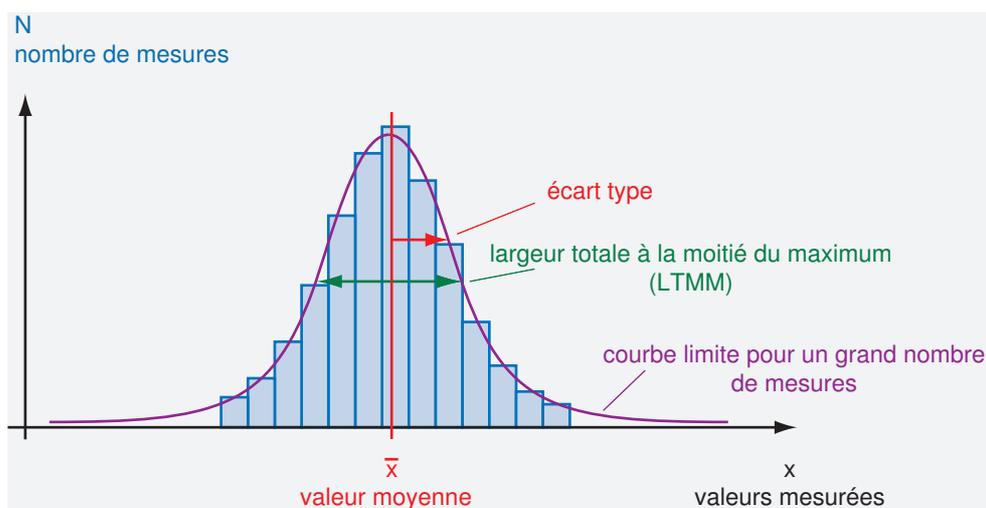


FIGURE 97 Une expérience de précision et sa distribution des mesures.

PRÉCISION ET EXACTITUDE DES MESURES

Comme nous l'avons expliqué à la page 286, la *précision* exprime dans quelle mesure un résultat est bien reproduit lorsque l'évaluation est réitérée, l'*exactitude* est le degré de correspondance d'une mesure à la véritable valeur. Le manque de précision est dû à des *erreurs aléatoires* ou accidentelles, la meilleure façon de les quantifier consiste à évaluer l'*écart-type*, généralement noté σ , qui est défini par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (295)$$

Défi 393 s où \bar{x} représente la moyenne des mesures x_i . (Pouvez-vous imaginer pourquoi on utilise $n-1$ dans la formule au lieu de n ?)

Pour la plupart des expériences, la distribution des valeurs des mesures tend vers une loi normale, également appelée *loi de Laplace-Gauss*, à partir du moment où nous accroissons le nombre de mesures. La distribution, indiquée dans la Figure 97, est décrite par l'expression

$$N(x) \approx e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (296)$$

Défi 394 e Le carré de l'écart type, σ^2 , est également appelé la *variance*. Pour une loi gaussienne des valeurs de mesure, $2,35\sigma$ est la largeur totale de la courbe à la moitié du maximum.

Réf. 279 Le manque d'exactitude est dû à des *erreurs systématiques*, on ne peut généralement que les estimer, seulement. Cette estimation est souvent ajoutée aux erreurs aléatoires pour produire une erreur expérimentale *totale*, également parfois dénommée *incertitude totale*.

Réf. 280 Les tableaux qui suivent fournissent les valeurs des constantes physiques et des propriétés des particules les plus importantes, en unités du SI et dans quelques autres unités courantes, comme on les trouve dans les sources de référence. Ces valeurs sont les

moyennes mondiales des meilleures mesures effectuées jusqu'à présent. Comme d'habitude, les biais expérimentaux, incluant à la fois les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques estimées, sont exprimées en donnant l'écart type dans les derniers chiffres, par exemple 0,31(6) signifie – *grosso modo* – $0,31 \pm 0,06$. En réalité, derrière chacun des nombres qui apparaissent dans les tableaux suivants se cache une longue histoire qu'il serait digne de conter, mais pour lesquelles nous n'avons pas suffisamment de place ici*.

Défi 395 pe
Page ??

Quelles sont les limites à l'exactitude et à la précision ? Il n'existe aucun procédé, même en principe, permettant de mesurer une longueur x jusqu'à une précision supérieure à environ 61 chiffres, parce que $\Delta x/x > l_{\text{pl}}/d_{\text{horizon}} = 10^{-61}$. (Cela est-il également vrai pour la force ou pour le volume ?) Dans la dernière partie de notre texte, l'examen des horloges et des mètres étalons renforcera cette limite théorique.

Mais il n'est pas difficile de déduire des limites pratiques plus strictes. Aucune machine imaginable ne peut mesurer des quantités avec une précision plus élevée que la mesure du diamètre de la Terre à une incertitude près égale à la longueur la plus petite jamais mesurée, soit 10^{-19} m environ, c'est-à-dire environ 26 chiffres de précision. En utilisant une limite plus réaliste d'une machine d'une taille de 1 000 m, on obtient une limite de 22 chiffres. Si, comme nous l'avons prédit plus haut, les mesures du temps atteignent vraiment 17 chiffres de précision, alors elles seront proches de la limite pratique, parce que mis à part la taille, il existe une contrainte pratique supplémentaire : le coût. En réalité, un chiffre supplémentaire dans la précision d'une mesure signifie souvent qu'il faille un chiffre supplémentaire dans le coût de l'équipement.

CONSTANTES PHYSIQUES FONDAMENTALES

Réf. 280

En principe, toutes les propriétés quantitatives de la matière peuvent être calculées avec la théorie quantique. Par exemple, la couleur, la densité et les propriétés élastiques peuvent être prédites en faisant appel aux valeurs des constantes qui suivent, en utilisant les équations du modèle standard de la physique des hautes énergies.

TABLEAU 12 Constantes physiques fondamentales.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT. ^a
nombre de dimensions d'espace-temps		3 + 1	0 ^b
vitesse de la lumière dans le vide ^c c		299 792 458 m/s	0
perméabilité magnétique du vide ^c μ_0		$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m = 1,256 637 061 435 ... $\mu\text{H}/\text{m}0$	0
permittivité diélectrique du vide ^c $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$		8,854 187 817 620 ... pF/m	0
constante de Planck originale	h	$6,626 068 76(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
constante de Planck réduite	\hbar	$1,054 571 596(82) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
charge du positron	e	0,160 217 646 2(63) aC	$3,9 \cdot 10^{-8}$

* Certains de ces récits peuvent être retrouvés dans l'ouvrage de N. W. WISE, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Le domaine des mesures de haute précision, à partir duquel sont tirés les résultats de ces pages, est un monde à lui seul. Une magnifique introduction en est donnée par J. D. FAIRBANKS, B. S. DEEVER, C. W. EVERITT & P. F. MICHAELSON, eds., *Near Zero : Frontiers of Physics*, Freeman, 1988.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT. ^a
constante de Boltzmann	k	$1,380\,650\,3(24) \cdot 10^{-23}$ J/K	$1,7 \cdot 10^{-6}$
constante gravitationnelle	G	$6,673(10) \cdot 10^{-11}$ Nm ² /kg ²	$1,5 \cdot 10^{-3}$
constante de couplage gravit.	$\kappa = 8\pi G/c^4$	$2,076(3) \cdot 10^{-43}$ s ² /kg m	$1,5 \cdot 10^{-3}$
constante de structure fine ^d ,	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	1/137,035 999 76(50)	$3,7 \cdot 10^{-9}$
constante de couplage e.m.	$= g_{em}(m_e^2 c^2)$	$= 0,007\,297\,352\,533(27)$	$3,7 \cdot 10^{-9}$
constante de couplage de Fermi ^d ,	$G_F/(\hbar c)^3$	$1,166\,39(1) \cdot 10^{-5}$ GeV ⁻²	$8,6 \cdot 10^{-6}$
constante de couplage faible	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	1/30,1(3)	$1 \cdot 10^{-2}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2 \theta_w(\overline{MS})$	0,231 24(24)	$1,0 \cdot 10^{-3}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2 \theta_w$ (enveloppe)	0,2224(19)	$8,7 \cdot 10^{-3}$
constante de couplage fort ^d	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	0,118(3)	$25 \cdot 10^{-3}$

a. Incertitude : écart-type des erreurs de mesure.

b. De 10^{-19} m et jusqu'à 10^{26} m, uniquement.

c. Définition numérique de la constante. (La permittivité diélectrique du vide est aussi appelée constante électrique et la perméabilité du vide, constante magnétique [N.D.T.])

d. Toutes les constantes de couplage dépendent du transfert du quadrivecteur impulsion, comme expliqué dans la section sur la renormalisation. La *constante de structure fine* est le nom traditionnel de la constante de couplage électromagnétique g_{em} dans le cas d'un transfert de quadrivecteur impulsion de $Q^2 = m_e^2 c^2$, ce qui est la valeur la plus petite possible. Pour des transferts d'impulsion plus élevés elle possède des valeurs plus grandes, par exemple $g_{em}(Q^2 = M_W^2 c^2) \approx 1/128$. La constante de couplage de l'interaction forte possède des valeurs supérieures pour des transferts d'impulsion moins importants, par exemple $\alpha_s(34 \text{ GeV}) = 0,14(2)$.

Pourquoi toutes ces constantes possèdent-elles les valeurs qu'elles ont ? La réponse est différente dans chacune des situations. Pour toute constante possédant une dimension, tel que le quantum d'action \hbar , la valeur numérique a seulement une signification historique. Elle est de $1,054 \cdot 10^{-34}$ Js à cause de la définition du SI du joule et de la seconde. La question de savoir pourquoi la valeur d'une constante dimensionnelle n'est pas plus grande ni plus petite nous oblige toujours à comprendre l'origine de certains nombres sans dimension qui donnent le rapport entre la constante et l'unité naturelle correspondante. La compréhension des tailles des atomes, des gens, des arbres et des étoiles, de la durée des processus moléculaires et atomiques, ou de la masse des noyaux et des montagnes, implique de comprendre les ratios entre ces valeurs et les unités naturelles correspondantes. La clé de la compréhension de la nature se trouve donc dans la compréhension de tous les ratios, et ainsi de toutes les constantes sans dimension. L'histoire des rapports les plus importants est contée dans la partie qui conclut cette aventure.

Les constantes fondamentales engendrent les observations utiles suivantes, de haute précision.

TABLEAU 13 Constantes physiques dérivées.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
impédance caractéristique du vide	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$	376,730 313 461 77... Ω	0
nombre d'Avogadro	N_A	$6,022\,141\,99(47) \cdot 10^{23}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$
constante de Rydberg ^a	$R_\infty = m_e c \alpha^2 / 2\hbar$	$10\,973\,731,568\,549(83) \text{ m}^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-12}$

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
quantum de conductance	$G_0 = 2e^2/h$	77,480 916 96(28) μS	$3,7 \cdot 10^{-9}$
quantum du flux magnétique	$\varphi_0 = h/2e$	2,067 833 636(81) pWb	$3,9 \cdot 10^{-8}$
rapport de fréquence de Josephson	$2e/h$	483,597 898(19) THz/V	$3,9 \cdot 10^{-8}$
constante de von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812,807 572(95) Ω	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton de Bohr	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9,274 008 99(37) $\gamma\text{J/T}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
fréquence cyclotron de l'électron	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27,992 4925(11) GHz/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rayon classique de l'électron	$r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	2,817 940 285(31) fm	$1,1 \cdot 10^{-8}$
longueur d'onde de Compton de l'électron	$\lambda_c = h/m_e c$	2,426 310 215(18) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
rayon de Bohr ^a	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52,917 720 83(19) pm	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton nucléaire	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$5,050 783 17(20) \cdot 10^{-27}$ J/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rapport de masse proton-électron	m_p/m_e	1836,152 667 5(39)	$2,1 \cdot 10^{-9}$
constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56,704 00(40) nW/m ² K ⁴	$7,0 \cdot 10^{-6}$
constante de la loi du déplacement de Wien	$b = \lambda_{\max} T$	2,897 768 6(51) mmK	$1,7 \cdot 10^{-6}$
constante de conversion de bits en entropie		10^{23} bit = 0,956 994 5(17) J/K	$1,7 \cdot 10^{-6}$
contenu énergétique du TNT		de 3,7 à 4,0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Pour une masse infinie du noyau.

Certaines propriétés générales de la nature sont énumérées dans le tableau qui suit. (Si vous voulez un défi, pouvez-vous déterminer si une quelconque propriété de l'Univers lui-même est listée ?)

Défi 396 s

TABLEAU 14 Constantes astrophysiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
constante gravitationnelle	G	$6,672 59(85) \cdot 10^{-11}$ m ³ /kg s ²
constante cosmologique	Λ	env. $1 \cdot 10^{-52}$ m ⁻²
année tropicale en 1900 ^a	a	31 556 925,974 7 s
année tropicale en 1994	a	31 556 925,2 s
jour sidéral moyen	d	23 ^h 56'4,090 53''
année-lumière	al	9,460 528 173 ... Pm
unité astronomique ^b	ua	149 597 870,691(30) km
parsec	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
âge de l'Univers ^c	t_0	$4,333(53) \cdot 10^{17}$ s = 13,73(0,17) $\cdot 10^9$ a
(déterminé par l'espace-temps, via l'expansion, d'après la relativité générale)		
âge de l'Univers ^c	t_0	$3,5(4) \cdot 10^{17}$ s = 11,5(1,5) $\cdot 10^9$ a, au plus
(déterminé par la matière, via les galaxies et les étoiles, d'après la mécanique quantique)		
constante de Hubble ^c	H_0	$2,3(2) \cdot 10^{-18}$ s ⁻¹ = 0,73(4) $\cdot 10^{-10}$ a ⁻¹
	$H_0 = h_0 \cdot 100$ km/sMpc = $h_0 \cdot 1,0227 \cdot 10^{-10}$ a ⁻¹	

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
constante de Hubble réduite ^c	h_0	0,71(4)
paramètre de décélération	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	-0,66(10)
distance de l'horizon de l'Univers ^c	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26} \text{ m} = 13,0(2) \text{ Gpc}$
topologie de l'Univers		inconnue
nombre de dimensions spatiales		3, jusqu'à 10^{26} m de distance
densité critique de l'Univers	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h_0^2 \cdot 1,878\,82(24) \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ $= 0,95(12) \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
paramètre de densité (totale) ^c	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
paramètre de densité baryonique ^c	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
paramètre de densité de matière noire froide ^c	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0,23(4)
paramètre de densité des neutrinos ^c	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0,001 à 0,05
paramètre de densité de l'énergie sombre ^c	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
paramètre de l'équation d'état de l'énergie sombre	$w = p_X/\rho_X$	-1,0(2)
masse baryonique	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
densité baryonique		$0,25(1) / \text{m}^3$
densité de matière lumineuse		$3,8(2) \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$
étoiles dans l'Univers	n_e	$10^{22 \pm 1}$
baryons dans l'Univers	n_b	$10^{81 \pm 1}$
température du fond diffus micro-onde ^d	T_0	$2,725(1) \text{ K}$
photons dans l'Univers	n_γ	10^{89}
densité d'énergie des photons	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
densité de photons		$410,89 / \text{cm}^3$ ou $400 / \text{cm}^3 (T_0/2,7 \text{ K})^3$
amplitude des perturbations de densité	\sqrt{S}	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
amplitude des ondes gravitationnelles	\sqrt{T}	$< 0,71\sqrt{S}$
fluctuations de masse sur 8 Mpc	σ_8	0,84(4)
indice spectral scalaire	n	0,93(3)
variation de l'indice spectral	$dn/d \ln k$	-0,03(2)
longueur de Planck	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$
temps de Planck	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44} \text{ s}$
masse de Planck	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	$21,8 \mu\text{g}$
nombre d'instants dans l'histoire ^c	t_0/t_{Pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$
points de l'espace-temps dans l'horizon ^c	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3 \cdot (t_0/t_{Pl})$	$10^{244 \pm 1}$
masse dans l'horizon	M	$10^{54 \pm 1} \text{ kg}$

- Défi 397 s**
Réf. 281
- a.* Définition de la constante, d'un équinoxe vernal à l'autre équinoxe vernal. Elle était autrefois utilisée pour définir la seconde. (Rappelez-vous : π secondes représentent à peu près un nanosiècle.) La valeur de 1990 compte environ 0,7 s de moins, correspondant à un ralentissement d'approximativement 0,2 ms/a. (Faites attention : pourquoi ?) Il existe même une formule empirique pour évaluer la variation de la durée de l'année au cours du temps.
- b.* Distance moyenne Terre-Soleil. Cette précision vraiment stupéfiante de 30 m résulte des durées moyennes de propagation des signaux envoyés par les navettes spatiales Viking en orbite et les atterrisseurs martiens, récoltés durant une période de plus de vingt ans.
- c.* L'indice 0 représente les valeurs d'aujourd'hui.
- d.* Ce rayonnement fut produit lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans et avait une température d'environ 3 000 K. Les fluctuations ΔT_0 qui déclenchèrent la formation des galaxies sont aujourd'hui d'environ $16 \pm 4 \mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6} T_0$.

Page 210

Soyez vigilants : dans l'ultime partie de cet ouvrage on montre qu'un grand nombre des constantes du **Tableau 14** ne sont pas des quantités physiquement raisonnables. Elles doivent être considérées avec beaucoup de circonspection. Les constantes plus spécifiques données dans le tableau qui suit sont toutes raisonnables, cependant.

TABLEAU 15 Constantes astronomiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
masse de la Terre	M_{\oplus}	$5,972\,23(8) \cdot 10^{24}$ kg
longueur gravitationnelle de la Terre	$l_{\oplus} = 2GM/c^2$	8,870(1) mm
rayon de la Terre, à l'équateur ^a	$R_{\oplus\text{eq}}$	6 378,1367(1) km
rayon de la Terre, aux pôles ^a	$R_{\oplus\text{p}}$	6 356,7517(1) km
distance Équateur-pôle ^a		10 001,966 km (moyenne)
aplatissement de la Terre ^a	e_{\oplus}	1/298,25231(1)
densité moyenne de la Terre	ρ_{\oplus}	5,5 Mg/m ³
âge de la Terre	T_{\oplus}	4,55 Ga = 143 Ps
rayon de la Lune	$R_{\zeta\text{v}}$	1 738 km dans la direction de la Terre
rayon de la Lune	$R_{\zeta\text{h}}$	1 737,4 km dans les deux autres directions
masse de la Lune	M_{ζ}	$7,35 \cdot 10^{22}$ kg
distance moyenne de la Lune ^b	d_{ζ}	384 401 km
distance de la Lune au périégée ^b		typiquement 363 Mm, minimum historique 359 861 km
distance de la Lune à l'apogée ^b		typiquement 404 Mm, maximum historique 406 720 km
taille angulaire de la Lune ^c		en moyenne $0,5181^{\circ} = 31,08'$, minimum $0,49^{\circ}$, maximum - ligne la plus courte $0,55^{\circ}$
densité moyenne de la Lune	ρ_{ζ}	3,3 Mg/m ³
masse du Soleil	M_{\odot}	$1,988\,43(3) \cdot 10^{30}$ kg
longueur gravitationnelle du Soleil	$l_{\odot} = 2GM_{\odot}/c^2$	2,953 250 08 km
luminosité du Soleil	L_{\odot}	384,6 YW
rayon solaire équatorial	R_{\odot}	695,98(7) Mm

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
taille angulaire du Soleil		0,53° en moyenne; minimum le quatre juillet (aphélie) 1888'', maximum le quatre janvier (périhélie) 1952''
densité moyenne du Soleil	ρ_{\odot}	1,4 Mg/m ³
distance moyenne du Soleil	UA	149 597 870,691(30) km
âge du Soleil	T_{\odot}	4,6 Ga
vitesse solaire autour du centre de la galaxie	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
vitesse solaire par rapport au fond diffus cosmologique	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
distance au centre galactique		8,0(5) kpc = 26,1(1,6) kal
âge de la Voie lactée		13,6 Ga
taille de la Voie lactée		env. 10 ²¹ m ou 100 kal
masse de la Voie lactée		10 ¹² masses solaires, env. 2 · 10 ⁴² kg
masse de Jupiter	M_{J}	1,90 · 10 ²⁷ kg
rayon jovien équatorial	R_{J}	71,398 Mm
rayon jovien polaire	R_{J}	67,1(1) Mm
distance moyenne de Jupiter au Soleil	D_{J}	778 412 020 km
galaxie connue la plus éloignée	1835 IR1916	13,2 · 10 ⁹ al = 1,25 · 10 ²⁶ m, redshift 10

a. La forme de la Terre est décrite de la manière la plus précise par le Système géodésique mondial. La dernière édition date de 1984. Pour une présentation largement développée de ses contextes et de ses détails, consultez le site Web www.wgs84.com. L'Union Géodésique et Géophysique Internationale révisa les données en l'an 2000. Les rayons et l'aplatissement donnés ici sont ceux du système de marée « mean tide system ». Ils diffèrent de 0,7 m environ de ceux du système de marée « zero tide system » et de d'autres systèmes. Les particularités de ce domaine représentent une science à part.

b. Mesurée de centre à centre. Pour trouver la position précise de la Lune à une date donnée, consultez la page www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Pour les planètes, consultez la page www.fourmilab.ch/solar/solar.html et les autres pages du même site.

c. Les angles sont définis comme suit : 1 degré = 1° = $\pi/180$ rad, 1 (première) minute d'arc = 1' = 1°/60, 1 seconde (minute) d'arc = 1'' = 1'/60. Les anciennes unités « tierce minute d'arc » et « quarte minute d'arc », valant chacune 1/60e de la précédente, ne sont plus utilisées. (« Minute » signifiait à l'origine « très petit », comme c'est toujours le cas dans l'anglais moderne.)

NOMBRES UTILES

Réf. 282

π	3, 14159 26535 89793 23846 26433 83279 50288 41971 69399 37510 ₅
e	2, 71828 18284 59045 23536 02874 71352 66249 77572 47093 69995 ₉
γ	0, 57721 56649 01532 86060 65120 90082 40243 10421 59335 93992 ₃
ln 2	0, 69314 71805 59945 30941 72321 21458 17656 80755 00134 36025 ₅
ln 10	2, 30258 50929 94045 68401 79914 54684 36420 76011 01488 62877 ₂
$\sqrt{10}$	3, 16227 76601 68379 33199 88935 44432 71853 37195 55139 32521 ₆

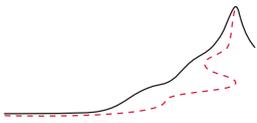
Si le nombre π est *normal*, c'est-à-dire si les chiffres et les combinaisons de chiffres

dans ses développements décimaux apparaissent tous avec la même fréquence limite, alors tous les textes qui ont été écrits ou qui vont l'être, de même que tous les mots qui ont été prononcés ou qui vont l'être, peuvent être retrouvés de manière codée dans ses suites. La propriété de normalité n'a pas encore été démontrée, bien qu'on suspecte qu'elle soit valide. Cela signifie-t-il que toute la science soit encodée dans le simple cercle ? Non. Cette propriété n'a rien de particulier : elle s'applique également au nombre $0,123456789101112131415161718192021\dots$ et de nombreux autres. Pouvez-vous en citer quelques exemples ?

Défi 398 s

Par ailleurs, dans le graphe de la fonction exponentielle e^x , le point $(0,1)$ est le seul point ayant deux coordonnées rationnelles. Si vous vous imaginez colorier en bleu tous les points situés sur le plan et ayant deux coordonnées rationnelles, ce plan paraîtrait quasiment bleu. Néanmoins, le graphe passe par un de ces points seulement et parvient à éviter tous les autres.





BIBLIOGRAPHIE

« Un homme retournera la moitié d'une bibliothèque pour ne produire qu'un seul livre. »
Samuel Johnson*

- 1 ARISTOTE, De la sensation et des sensibles, section 1, partie 1, 350 av. J.-C. Cité dans JEAN-PAUL DUMONT, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 157, 1991. Cité en page 16.
- 2 Le récit historique de la mesure de la vitesse de la lumière peut être compulsé dans le chapitre 19 de l'ouvrage de FRANCIS A. JENKINS & HARVEY E. WHITE, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, New York, 1957. Cité en page 17.
- 3 Sur la manière de réaliser de telles mesures, lisez SYDNEY G. BREWER, *Do-it-yourself Astronomy*, Edinburgh University Press, 1988. Kepler lui-même n'a jamais mesuré les distances des planètes au Soleil, mais uniquement les *rappports* des distances planétaires. La parallaxe du Soleil mesurée à partir de deux points distincts sur Terre est tout au plus de 8,79". Elle fut mesurée pour la première fois au dix-huitième siècle. Cité en page 18.
- 4 ARISTARQUE, On the sizes and the distances of the Sun and the Moon, v. 280 av. J.-C., dans MICHAEL J. CROWE, *Theories of the World From Antiquity to the Copernican Revolution*, Dover, 1990. Cité en page 18.
- 5 J. FRERCKS, Creativity and technology in experimentation : Fizeau's terrestrial determination of the speed of light, *Centaurus* 42, pp. 249–287, 2000. Voyez également le magnifique site Web sur les reconstitutions d'expériences scientifiques historiques : <http://www.uni-oldenburg.de/histodid/forschung/nachbauten>. Cité en page 19.
- 6 La manière de produire des images de signaux lumineux à l'aide d'un appareil photographique ordinaire, sans électronique, est décrite par M. A. DUGUAY & A. T. MATTICK, Ultrahigh speed photography of picosecond light pulses and echoes, *Applied Optics* 10, pp. 2162–2170, 1971. La photographie de la page 19 est tirée de celui-ci. Cité en page 20.
- 7 Vous pouvez apprendre les bases de la relativité restreinte en surfant sur le Web, sans l'assistance d'aucun manuel, en prenant pour point de départ le site <http://physics.syr.edu/research/relativity/RELATIVITY.html>. Cette page fait référence à la majorité des ressources disponibles sur le Web sur la relativité, bien qu'en langue anglaise. Des liens vers d'autres langues peuvent être trouvés à l'aide des moteurs de recherche. Cité en page 20.
- 8 Des observations sur les sursauts de rayons gamma montrent que la vitesse de la lumière ne dépend pas de la vitesse de la source à moins d'une partie pour 10^{20} près, comme indiqué par K. BRECHER, *Bulletin of the American Physical Society* 45, 2000. Il émet l'hypothèse que les deux côtés de l'astre en explosion émettent de la lumière. La grande différence de vitesse et l'acuité de la pulsation conduisent alors à ce résultat. Lisez également son ancien

* Samuel Johnson (1709–1784) fut un célèbre poète et intellectuel anglais.

article K. BRECHER, Is the speed of light independent of the source ?, *Physics Letters* 39, pp. 1051–1054, Errata 1236, 1977. Une autre piste consiste à mesurer la vitesse de la lumière à partir d'étoiles en mouvement rapide. Certaines de ces expériences ne sont toutefois pas complètement irréfutables. Il existe une théorie alternative de l'électrodynamique, due à Ritz, qui soutient que la vitesse de la lumière est c uniquement lorsqu'elle est mesurée par rapport à la source. La lumière issue des étoiles, cependant, traverse l'atmosphère, et sa vitesse peut donc être réduite à c .

L'expérience célèbre utilisant la lumière émise par des mésons pi rapides au CERN n'est pas sujette à cette critique. Elle est décrite dans T. ALVÄGER, J. M. BAILEY, F. J. M. FARLEY, J. KJELLMAN & I. WALLIN, Test of the second postulate of relativity in the GeV region, *Physics Letters* 12, pp. 260–262, 1964. Lisez également T. ALVÄGER & al., Velocity of high-energy gamma rays, *Arkiv för Fysik* 31, pp. 145–157, 1965.

Une autre expérience précise dans le domaine des vitesses extrêmes est décrite par G. R. KALBFLEISCH, N. BAGGETT, E. C. FOWLER & J. ALSPECTOR, Experimental comparison of neutrino, anti-neutrino, and muon velocities, *Physical Review Letters* 43, pp. 1361–1364, 1979. Cité en page 21.

- 9 Lisez par exemple C. WILL, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Revised edition, Cambridge University Press, 1993. Cité aux pages 21 et 23.
- 10 B. E. SCHAEFER, Severe limits on variations of the speed of light with frequency, *Physical Review Letters* 82, pp. 4964–4966, 21 juin 1999. Cité en page 22.
- 11 La théorie moderne de la relativité a vu le jour dans le célèbre article d'ALBERT EINSTEIN, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik* 17, pp. 891–921, 1905. Il est toujours d'une très grande importance, et chaque physicien devrait l'avoir consulté. La même chose peut être dite à propos du célèbre article, probablement rédigé après qu'il eut entendu parler de l'idée d'Olinto De Pretto, que l'on peut trouver dans ALBERT EINSTEIN, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?, *Annalen der Physik* 18, pp. 639–641, 1905. Lisez également ses réflexions : ALBERT EINSTEIN, Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 4, pp. 411–462, 1907. Ces articles sont maintenant disponibles dans plusieurs langues. La copie d'une revue de détail ultérieure, non publiée, est disponible en traduction anglaise dans ALBERT EINSTEIN, Hanoch Gutfreund, ed., *Einstein's 1912 Manuscript on the Theory of Relativity*, George Braziller, 2004. Cité aux pages 22, 24 et 65.
- 12 ALBERT EINSTEIN, *Mein Weltbild*, édité par CARL SELIG, Ullstein Verlag, 1998. Cité en page 22.
- 13 JEAN VAN BLADEL, *Relativity and Engineering*, Springer, 1984. Cité en page 22.
- 14 ALBRECHT FÖLSING, *Albert Einstein – eine Biographie*, Suhrkamp p. 237, 1993. Cité aux pages 23 et 33.
- 15 R. J. KENNEDY & E. M. THORNDIKE, Experimental establishment of the relativity of time, *Physical Review* 42, pp. 400–418, 1932. Lisez aussi H. E. IVES & G. R. STILWELL, An experimental study of the rate of a moving atomic clock, *Journal of the Optical Society of America* 28, pp. 215–226, 1938, et 31, pp. 369–374, 1941. Pour une adaptation moderne très précise, consultez C. BRAXMEIER, H. MÜLLER, O. PRADL, J. MLYNEK, A. PETERS & S. SCHILLER, New tests of relativity using a cryogenic optical resonator, *Physical Review Letters* 88, p. 010401, 2002. Les dernières nouvelles sont dans P. ANTONINI, M. OKHAPKIN, E. GÖKLÜ & S. SCHILLER, Testing the constancy of the speed of light with rotating cryogenic optical resonators, *Physical Review A* 71, p. 050101, 2005, ou <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0504109>. Cité en page 23.

- 16 EDWIN F. TAYLOR & JOHN A. WHEELER, *Spacetime Physics – Introduction to Special Relativity*, second edition, Freeman, 1992. Voyez également NICK M. J. WOODHOUSE, *Special Relativity*, Springer, 2003. Cité aux pages 25 et 74.
- 17 WOLFGANG RINDLER, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001. Un ouvrage admirable rédigé par un des spécialistes de ce domaine. Cité aux pages 25 et 79.
- 18 La lenteur de la vitesse de la lumière à l'intérieur des étoiles est due à la diffusion incessante des photons par la matière de l'astre. L'estimation la plus courante pour la durée d'échappement dans le Soleil est de 40 000 ans à 1 million d'années, mais des estimations situées entre 17 000 ans et 50 millions d'années peuvent être rencontrées dans la littérature. Cité en page 24.
- 19 L. VESTERGAARD HAU, S. E. HARRIS, Z. DUTTON & C. H. BEHROOZI, Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas, *Nature* 397, pp. 594–598, 1999. Lisez aussi ?. Cité en page 24.
- 20 La manière d'exposer la relativité restreinte en dessinant quelques lignes sur une feuille est due à HERMANN BONDI, *Relativity and Common Sense : A New Approach to Einstein*, Dover, New York, 1980. Voyez également DIERCK-EKKEHARD LIEBSCHER, *Relativitätstheorie mit Zirkel und Lineal*, Akademie-Verlag Berlin, 1991. Cité en page 24.
- 21 ROD S. LAKES, Experimental limits on the photon mass and cosmic vector potential, *Physical Review Letters* 80, pp. 1826–1829, 1998. La vitesse de la lumière est indépendante de la fréquence à moins d'un facteur $6 \cdot 10^{-21}$ près, comme les études sur les rayons gamma de B. E. SCHAEFER, Severe limits on variations of the speed of light with frequency, *Physical Review Letters* 82, pp. 4964–4966, 1999, l'ont montré. Cité en page 27.
- 22 Un tour d'horizon des résultats expérimentaux est fourni par YUAN ZHONG ZHANG, *Special Relativity and its Experimental Foundations*, World Scientific, 1998. Cité aux pages 27, 32, 44, 59, 88 et 297.
- 23 R. W. MCGOWAN & D. M. GILTNER, New measurement of the relativistic Doppler shift in neon, *Physical Review Letters* 70, pp. 251–254, 1993. Cité en page 28.
- 24 Le record actuel de synchronisation d'horloges semble être de 1 ps pour deux horloges distantes de 3 km l'une de l'autre. Lisez A. VALENCIA, G. SCARCELLI & Y. SHIH, Distant clock synchronization using entangled photon pairs, *Applied Physics Letters* 85, pp. 2655–2657, 2004, ou <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0407204>. Cité en page 29.
- 25 J. FRENKEL & T. KONTOROWA, Über die Theorie der plastischen Verformung, *Physikalische Zeitschrift der Sowietunion* 13, p. 1, 1938. F. C. FRANK, On the equations of motion of crystal dislocations, *Proceedings of the Physical Society A* 62, pp. 131–134, 1949. J. ESHELBY, Uniformly moving dislocations, *Proceedings of the Physical Society A* 62, pp. 307–314, 1949. Voyez aussi G. LEIBFRIED & H. DIETZE, *Zeitschrift für Physik* 126, p. 790, 1949. Une introduction générale peut être trouvée dans A. SEEGER & P. SCHILLER, Kinks in dislocation lines and their effects in internal friction in crystals, *Physical Acoustics* 3A, W. P. MASON, ed., Academic Press, 1966. Lisez également les manuels de FRANK R. N. NABARRO, *Theory of Crystal Dislocations*, Oxford University Press, 1967, ou J. P. HIRTH & J. LOTHE, *Theory of Dislocations*, McGraw Hill, 1968. Cité en page 30.
- 26 Ce merveilleux graphique est tiré de Z. G. T. GUIRAGOSSIAN, G. B. ROTHBART, M. R. YEARIAN, R. GEARHART & J. J. MURRAY, Relative velocity measurements of electrons and gamma rays at 15 GeV, *Physical Review Letters* 34, pp. 335–338, 1975. Cité en page 30.
- 27 Pour en savoir plus sur ces cinglés très connus et sur leurs idées, envoyez un courriel à

- majordomo@zikzak.net avec cette seule ligne comme message « subscribe psychoceramics ». Cité en page 31.
- 28 La vitesse des neutrinos est identique à celle de la lumière à 9 décimales près. Cela est expliqué par LEO STODOLSKY, The speed of light and the speed of neutrinos, *Physics Letters B* 201, p. 353, 1988. Une observation de la masse minuscule du neutrino a été publiée par la collaboration japonaise du Super-Kamiokande, dans Y. FUKUDA & al., Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, *Physical Review Letters* 81, pp. 1562–1567, 1998. Les nouveaux résultats publiés par l'Observatoire canadien du neutrino à Sudbury, comme Q.R. AHMAD & al., Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, *Physical Review Letters* 89, p. 011301, 2002, confirment également que les neutrinos ont une masse dans la région de 1 eV. Cité aux pages 31 et 321.
- 29 B. ROTHENSTEIN & G. ECKSTEIN, Lorentz transformations directly from the speed of light, *American Journal of Physics* 63, p. 1150, 1995. Lisez aussi le commentaire de E. KAPUŚCIK, Comment on « Lorentz transformations directly from the speed of light », by B. Rothenstein and G. Eckstein, *American Journal of Physics* 65, p. 1210, 1997. Cité en page 33.
- 30 Lisez par exemple les conférences de 1922 données par Lorentz à Caltech, publiées dans H. A. LORENTZ, *Problems of Modern Physics*, édité par H. Bateman, Ginn and Company, page 99, 1927. Cité en page 33.
- 31 A. A. MICHELSON & E. W. MORLEY, On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether, *American Journal of Science (3rd series)* 34, pp. 333–345, 1887. Michelson a publié de nombreux autres articles sur ce sujet après celui-ci. Cité en page 33.
- 32 S. SCHILLER, P. ANTONINI & M. OKHAPKIN, A precision test of the isotropy of the speed of light using rotating cryogenic optical cavities, <http://arxiv.org/abs/physics/0510169>. Cité en page 33.
- 33 H. A. LORENTZ, De relative beweging van de aarde en dem aether, *Amst. Versl.* 1, p. 74, 1892, et aussi H. A. LORENTZ, Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light, *Amst. Proc.* 6, p. 809, 1904, ou *Amst. Versl.* 12, p. 986, 1904. Cité en page 37.
- 34 Une réfutation globale de ces propositions est discutée par S. R. MAINWARING & G. E. STEDMAN, Accelerated clock principles, *Physical Review A* 47, pp. 3611–3619, 1993. Des expériences sur les *muons* au CERN en 1968 montrèrent que des accélérations allant jusqu'à 10^{20} m/s² n'ont aucune incidence, comme l'expliquent D. H. PERKINS, *Introduction to High Energy Physics*, Addison-Wesley, 1972, et J. BAILEY & al., *Il Nuovo Cimento* 9A, p. 369, 1972. Cité en page 37.
- 35 W. RINDLER, General relativity before special relativity : an unconventional overview of relativity theory, *American Journal of Physics* 62, pp. 887–893, 1994. Cité en page 38.
- 36 STEVEN K. BLAU, Would a topology change allow Ms. Bright to travel backward in time ?, *American Journal of Physics* 66, pp. 179–185, 1998. Cité en page 40.
- 37 Sur la formulation de la relativité en termes de quantités « propres », lisez par exemple D. HESTENES, Proper particle mechanics, *Journal of Mathematical Physics* 15, pp. 1768–1777, 1974. Cité en page 41.
- 38 L'expérience élémentaire qui consiste à emporter une horloge précise dans un avion, à voler avec tout autour du globe et à la comparer alors à une autre identique que nous avons pris soin de laisser au sol fut réalisée pour la première fois par J. C. HAFELE & R. E. KEATING, Around-the-world atomic clocks : predicted relativistic time gains, *Science* 177, pp. 166–167, et Around-the-world atomic clocks : observed relativistic time gains, pp. 168–170, 14 juillet 1972. Voyez également Réf. 22. Cité en page 41.

- 39 Une introduction compréhensible à la dilatation du temps pour des observateurs, et à la relativité générale : ROMAN U. SEXL & HERBERT KURT SCHMIDT, *Raum-Zeit-Relativität*, 2. Auflage, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1991. Cité en page 41.
- 40 La plus célèbre d'entre elles est la découverte que des muons qui se déplacent restent plus jeunes, comme l'indiquent par exemple D. H. FRISCH & J. B. SMITH, Measurement of the relativistic time dilation using μ -mesons, *American Journal of Physics* 31, pp. 342–355, 1963. Pour un exposé complet et pédagogique sur le paradoxe des jumeaux, lisez E. SHELDON, Relativistic twins or sextuplets ?, *European Journal of Physics* 24, pp. 91–99, 2003. Cité en page 42.
- 41 PAUL J. NAHIN, *Time Machines – Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, Springer Verlag et AIP Press, second edition, 1999. Cité en page 43.
- 42 La première expérience sur le muon fut : B. ROSSI & D. B. HALL, Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum, *Physical Review* 59, pp. 223–228, 1941. Le « mésotron » est l'ancienne dénomination du muon. Cité en page 43.
- 43 A. HARVEY & E. SCHUCKING, A small puzzle from 1905, *Physics Today*, pp. 34–36, Mars 2005. Cité en page 44.
- 44 W. RINDLER, Length contraction paradox, *American Journal of Physics* 29, pp. 365–366, 1961. Pour une version sans la gravitation, lisez R. SHAW, Length contraction paradox, *American Journal of Physics* 30, p. 72, 1962. Cité en page 46.
- 45 H. VAN LINTEL & C. GRUBER, The rod and hole paradox re-examined, *European Journal of Physics* 26, pp. 19–23, 2005. Cité en page 46.
- 46 Cette situation est analysée par G. P. SASTRY, Is length contraction paradoxical ?, *American Journal of Physics* 55, 1987, pp. 943–946. Cet article contient également une vaste bibliographie recouvrant des variantes des paradoxes sur la contraction des longueurs. Cité en page 46.
- 47 S. P. BOUGHN, The case of the identically accelerated twins, *American Journal of Physics* 57, pp. 791–793, 1989. Cité aux pages 46 et 50.
- 48 J. M. SUPPLEE, Relativistic buoyancy, *American Journal of Physics* 57 1, pp. 75–77, janvier 1989. Lisez aussi G. E. A. MATSAS, Relativistic Arquimedes law for fast moving bodies and the general-relativistic resolution of the “submarine paradox”, *Physical Review D* 68, p. 027701, 2003, ou <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0305106>. Cité en page 47.
- 49 Cette distinction fut établie pour la première fois par J. TERRELL, Invisibility of Lorentz contraction, *Physical Review* 116, pp. 1041–1045, 1959, et R. PENROSE, The apparent shape of a relativistically moving sphere, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 55, pp. 137–139, 1959. Cité en page 49.
- 50 G. R. RYBICKI, Speed limit on walking, *American Journal of Physics* 59, pp. 368–369, 1991. Cité en page 51.
- 51 Les premiers exemples de telles observations astronomiques furent donnés par A.R. WHITNEY & al., Quasars revisited : rapid time variations observed via very-long-baseline interferometry, *Science* 173, pp. 225–230, 1971, et par M.H. COHEN & al., The small-scale structure of radio galaxies and quasi-stellar sources at 3.8 centimetres, *Astrophysical Journal* 170, pp. 207–217, 1971. Lisez aussi T. J. PEARSON, S. C. UNWIN, M. H. COHEN, R. P. LINFIELD, A. C. S. READHEAD, G. A. SEIELSTAD, R. S. SIMON & R. C. WALKER, Superluminal expansion of quasar 3C 273, *Nature* 290, pp. 365–368, 1981. Un aperçu en est donné dans J. A. ZENSUS & T. J. PEARSON, editors, *Superluminal radio sources*, Cambridge University Press, 1987. Une autre mesure, utilisant l'interférométrie à très longue base avec des ondes radio, a été représentée sur la couverture de *Nature* :

- I. F. MIRABEL & L. F. RODRIGUEZ, A superluminal source in the galaxy, *Nature* 371, pp. 46–48, 1994. Un exemple plus récent a été signalé dans *Science News* 152, p. 357, 6 décembre 1997.
- Des explications pédagogiques sont fournies par D. C. GABUZDA, The use of quasars in teaching introductory special relativity, *American Journal of Physics* 55, pp. 214–215, 1987, et par EDWIN F. TAYLOR & JOHN A. WHEELER, *Spacetime Physics – Introduction to Special Relativity*, second edition, Freeman, 1992, pages 89–92. Cet excellent ouvrage a déjà été cité dans ce texte. Cité en page 53.
- 52 O. M. BILANIUK & E. C. SUDARSHAN, Particles beyond the light barrier, *Physics Today* 22, pp. 43–51, 1969, et O. M. P. BILANIUK, V. K. DESHPANDE & E. C. G. SUDARSHAN, “Meta” relativity, *American Journal of Physics* 30, pp. 718–723, 1962. Voyez aussi E. RECAMI, editor, *Tachyons, Monopoles and Related Topics*, North-Holland, Amsterdam, 1978. Cité en page 54.
- 53 J. P. COSTELLA, B. H. J. MCKELLAR, A. A. RAWLINSON & G. J. STEPHENSON, The Thomas rotation, *American Journal of Physics* 69, pp. 837–847, 2001. Cité en page 55.
- 54 Lisez par exemple S. S. COSTA & G. E. A. MATSAS, Temperature and relativity, preprint disponible sur <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9505045>. Cité en page 55.
- 55 R. C. TOLMAN & G. N. LEWIS, The principle of relativity and non-Newtonian mechanics, *Philosophical Magazine* 18, pp. 510–523, 1909, et R. C. TOLMAN, Non-Newtonian mechanics : the mass of a moving body, *Philosophical Magazine* 23, pp. 375–380, 1912. Cité en page 56.
- 56 S. RAINVILLE, J. K. THOMPSON, E. G. MYERS, J. M. BROWN, M. S. DEWEY, E. G. KESSLER, R. D. DESLATTES, H. G. BÖRNER, M. JENTSCHER, P. MUTTI & D. E. PRITCHARD, World year of physics : a direct test of $E = mc^2$, *Nature* 438, pp. 1096–1097, 2005. Cité en page 61.
- 57 Cette information est issue d’une communication confidentielle de Frank DiFilippo. Une partie de cette histoire est contée dans F. DIFILIPPO, V. NATARAJAN, K. R. BOYCE & D. E. PRITCHARD, Accurate atomic masses for fundamental metrology, *Physical Review Letters* 73, pp. 1481–1484, 1994. Ces mesures furent réalisées à l’aide de pièges de Penning, un tour d’horizon des possibilités qu’ils offrent en est donné par R. C. THOMPSON, Precision measurement aspects of ion traps, *Measurement Science and Technology* 1, pp. 93–105, 1990. Les expérimentateurs les plus importants dans le domaine de la lévitation d’une unique particule reçurent le prix Nobel en 1989. Une des conférences du Prix Nobel peut être consultée dans W. PAUL, Electromagnetic traps for neutral and charged particles, *Reviews of Modern Physics* 62, pp. 531–540, 1990. Cité en page 61.
- 58 J. L. SYNGE, *Relativity : The Special Theory*, North-Holland, 1956, pp. 208–213. Vous trouverez plus d’informations sur les antiparticules dans le cadre de la relativité restreinte dans J. P. COSTELLA, B. H. J. MCKELLAR & A. A. RAWLINSON, Classical antiparticles, *American Journal of Physics* 65, pp. 835–841, 1997. Voyez aussi Réf. 73. Cité en page 62.
- 59 A. PAPANETROU, Drehimpuls- und Schwerpunktsatz in der relativistischen Mechanik, *Praktika Acad. Athenes* 14, p. 540, 1939, et A. PAPANETROU, Drehimpuls- und Schwerpunktsatz in der Diracschen Theorie, *Praktika Acad. Athenes* 15, p. 404, 1940. Lisez également M. H. L. PRYCE, The mass-centre in the restricted theory of relativity and its connexion with the quantum theory of elementary particles, *Proceedings of the Royal Society in London, A* 195, pp. 62–81, 1948. Cité en page 64.
- 60 Les références qui ont précédé la formule d’Einstein $E = mc^2$ sont : TOLVER PRESTON, *Physics of the Ether*, E. & F.N. Spon, 1875, J. H. POINCARÉ, La théorie de Lorentz et le principe de réaction, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* 5, pp. 252–278, 1900,

- O. DE PRETTO, Ipotesi dell'etere nella vita dell'universo, *Reale Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti* tome LXIII, parte 2, pp. 439–500, Febbraio 1904, F. HASENÖHRL, *Berichte der Wiener Akademie* 113, p. 1039, 1904, F. HASENÖHRL, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern, *Annalen der Physik* 15, pp. 344–370, 1904, F. HASENÖHRL, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern – Berichtigung, *Annalen der Physik* 16, pp. 589–592, 1905. Hasenöhrl décéda en 1915, De Pretto en 1921. Tous ces articles furent publiés avant le célèbre article d'ALBERT EINSTEIN, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, *Annalen der Physik* 18, pp. 639–641, 1905. Cité en page 66.
- 61 La brochure suivante constitue un véritable bijou parmi tous les manuels de relativité restreinte : ULRICH E. SCHRÖDER, *Spezielle Relativitätstheorie*, Verlag Harri Deutsch, Thun, 1981. Cité aux pages 69 et 71.
- 62 Un article facile à lire montrant une photocopie d'une lettre d'Einstein éclaircissant ce point est le suivant : LEV B. OKUN, The concept of mass, *Physics Today*, pp. 31–36, juin 1989. Ce sujet ne reste pas sans polémique, comme l'attestent les lettres des lecteurs accompagnant cet article. Vous pouvez les lire dans *Physics Today*, pp. 13–14 et pp. 115–117, mai 1990. Ce sujet demeure une source de débats. Cité en page 71.
- 63 CHRISTIAN MØLLER, *The Theory of Relativity*, Clarendon Press, 1952, 1972. Cet ouvrage de référence a été traduit en plusieurs langues. Cité en page 71.
- 64 P. EHRENFEST, Gleichförmige Rotation starrer Körper und Relativitätstheorie, *Physikalische Zeitschrift* 10, pp. 918–928, 1909. Ehrenfest suggéra (de manière incorrecte) que cela signifiait que la relativité ne pouvait pas être correcte. Une synthèse récente de ce problème peut être trouvée dans M. L. RUGGIERO, The relative space : space measurements on a rotating platform, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0309020>. Cité en page 72.
- 65 R. J. LOW, When moving clocks run fast, *European Journal of Physics* 16, pp. 228–229, 1995. Cité aux pages 77 et 78.
- 66 G. STEPHENSON & C. W. KILMISTER, *Special Relativity for Physicists*, Longmans, London, 1965. Voyez également W. N. MATTHEWS, Relativistic velocity and acceleration transformations from thought experiments, *American Journal of Physics* 73, pp. 45–51, 2005. Cité en page 79.
- 67 L'impossibilité de définir des référentiels de coordonnées rigides pour des observateurs non uniformément accélérés est discutée par CHARLES MISNER, KIP THORNE & JOHN A. WHEELER, *Gravitation*, Freeman, p. 168, 1973. Cité en page 81.
- 68 E. A. DESLOGE & R. J. PHILPOTT, Uniformly accelerated reference frames in special relativity, *American Journal of Physics* 55, pp. 252–261, 1987. Cité en page 81.
- 69 R. H. GOOD, Uniformly accelerated reference frame and twin paradox, *American Journal of Physics* 50, pp. 232–238, 1982. Cité aux pages 81, 82 et 86.
- 70 J. DWAYNE HAMILTON, The uniformly accelerated reference frame, *American Journal of Physics* 46, pp. 83–89, 1978. Cité en page 82.
- 71 Le meilleur formulaire de mathématiques (également le moins cher) reste celui de K. ROTTMANN, *Mathematische Formelsammlung*, BI Hochschultaschenbücher, 1960. Cité en page 82.
- 72 C. G. ADLER & R. W. BREHME, Relativistic solutions to a falling body in a uniform gravitation field, *American Journal of Physics* 59, pp. 209–213, 1991. Cité en page 83.
- 73 Consultez par exemple les excellentes notes de cours de D. J. RAYMOND, A radically modern approach to freshman physics, sur le site <http://www.physics.nmt.edu/~raymond/teaching.html>. Cité aux pages 83 et 299.

- 74** L. MISHRA, The relativistic acceleration addition theorem, *Classical and Quantum Gravity* **11**, pp. L97–L102, 1994. Cité en page **83**.
- 75** EDWARD A. DESLOGE, The gravitational red-shift in a uniform field, *American Journal of Physics* **58**, pp. 856–858, 1990. Cité en page **86**.
- 76** Une de ces dernières expériences discutables se trouve dans T. P. KRISHER, L. MALEKI, G. F. LUTES, L. E. PRIMAS, R. T. LOGAN, J. D. ANDERSON & C. M. WILL, Test of the isotropy of the one-way speed of light using hydrogen-maser frequency standards, *Physical Review D* **42**, pp. 731–734, 1990. Cité en page **88**.
- 77** EDWIN F. TAYLOR & A. P. FRENCH, Limitation on proper length in special relativity, *American Journal of Physics* **51**, pp. 889–893, 1983. Cité en page **89**.
- 78** Cette citation est tirée d’une lettre de Gibbs adressée à l’Académie américaine des arts et des sciences, dans laquelle il remercie l’Académie pour sa distinction. Cette lettre fut lue lors d’une session de l’Académie et fut donc intégrée dans ses comptes rendus : J. W. GIBBS, Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, **16**, p. 420, 1881. Cité en page **93**.
- 79** Il semble que la première formulation de ce principe ait été publiée dans l’édition de l’an 2000 de ce texte, dans le chapitre sur la gravitation et la relativité. Le présent auteur découvre le principe de la force maximale en 1998, alors qu’il recherchait une manière de dériver les résultats du chapitre ?? qui aurait été si élémentaire qu’elle aurait même convaincu un étudiant du second cycle. La référence est CHRISTOPH SCHILLER, *Motion Mountain – The Adventure of Physics*, situé sur www.motionmountain.eu. L’idée d’une force maximale a également été proposée par Gary Gibbons en 2002 (voir la référence ci-dessous). De nos jours, Gary Gibbons est plus réticent que l’auteur sur le fait de savoir si la force maximale peut être considérée comme un véritable principe physique (en dépit du titre de son article). L’approche d’une force maximale a été discutée dans différents groupes de discussion Usenet au début du vingt et unième siècle. Ce débat a montré que l’idée d’une force maximale (et d’une puissance maximale) était déjà familière à certains individus, mais que personne avant Gibbons et l’auteur ne l’avait couchée par écrit. Cette découverte aussi a été faite beaucoup trop tard. En résumé, seule l’idée d’ériger la force ou la puissance maximale au rang de *principe* semble être originale. Elle fut publiée pour la première fois dans la référence qui suit celle-ci puis dans C. SCHILLER, General relativity and cosmology derived from principle of maximum power or force, *International Journal of Theoretical Physics* **44**, pp. 1629–1647, 2005, preprint sur arxiv.org/abs/physics/0607090. Cité en page **93**.
- 80** C. SCHILLER, Maximum force and minimum distance : physics in limit statements, qui constitue une partie de ce texte et téléchargeable sur www.motionmountain.eu/MotionMountain-Part6.pdf, preprint sur arxiv.org/abs/physics/0309118. Cité aux pages **95**, **98**, **110** et **119**.
- 81** G. W. GIBBONS, The maximum tension principle in general relativity, *Foundations of Physics* **32**, pp. 1891–1901, 2002, ou arxiv.org/abs/hep-th/0210109. Gary Gibbons explique que la force maximale découle de la relativité générale, il ne fait aucune déclaration concernant l’inverse. Cité en page **93**.
- 82** H. C. OHANIAN & R. RUFFINI, *Gravitation and Spacetime*, W.W. Norton & Co., New York, 1994. Cité aux pages **98**, **108**, **110**, **113** et **117**.
- 83** Lisez par exemple WOLFGANG RINDLER, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001, p. 70 ff, ou RAY D’INVERNO *Introducing Einstein’s Relativity*, Clarendon Press, 1992, p. 36 ff. Cité en page **100**.
- 84** Regardez par exemple A. ASHTEKAR, S. FAIRHUST & B. KRISHNAN, Isolated horizons : Hamiltonian evolution and the first law, arxiv.org/abs/gr-qc/0005083. Cité en page **100**.

- 85** T. JACOBSON, Thermodynamics of spacetime : the Einstein equation of state, *Physical Review Letters* 75, pp. 1260–1263, 1995 ou arxiv.org/abs/gr-qc/9504004. Cité en page 101.
- 86** Lisez par exemple EKKEHART KRÖNER, *Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen*, Springer, 1958, volume 5 de la série des « Ergebnisse der angewandten Mathematik ». Kröner montre la similitude qui existe entre les équations, les méthodes et les résultats de la physique des milieux continus de l'état solide et ceux de la relativité générale. Cité en page 104.
- 87** EDWIN F. TAYLOR & JOHN A. WHEELER, *Spacetime Physics – Introduction to Special Relativity*, second edition, Freeman, 1992. Cité en page 105.
- 88** Ce contre-exemple fut suggéré par Steve Carlip. Cité en page 108.
- 89** E. R. CAIANIELLO, *Lettere al Nuovo Cimento* 41, p. 370, 1984. Cité en page 110.
- 90** R. PENROSE, Naked singularities, *Annals of the New York Academy of Sciences* 224, pp. 125–134, 1973. Cité en page 116.
- 91** G. HUISKEN & T. ILMANEN, The Riemannian Penrose inequality, *International Mathematics Research Notices* 59, pp. 1045–1058, 1997. Cité en page 116.
- 92** S. A. HAYWARD, Inequalities relating area, energy, surface gravity and charge of black holes, *Physical Review Letters* 81, pp. 4557–4559, 1998. Cité en page 116.
- 93** C. WILL, *Was Einstein Right? – Putting General Relativity to the Test*, Oxford University Press, 1993. Consultez également son article arxiv.org/abs/gr-qc/9811036. Cité en page 117.
- 94** Les résultats des mesures réalisées par le satellite WMAP sont synthétisés sur le site map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html, les articles sont disponibles sur lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/map_bibliography.cfm. Cité en page 119.
- 95** La source historique la plus élémentaire est ALBERT EINSTEIN, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* II pp. 844–846, 1915. C'est la première explication de la théorie générale de la relativité, en seulement trois pages. Cette théorie est alors expliquée plus en détail dans le célèbre article ALBERT EINSTEIN, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik* 49, pp. 769–822, 1916. Les références historiques peuvent être trouvées en allemand et en anglais dans JOHN STACHEL, ed., *The Collected Papers of Albert Einstein*, Volumes 1–9, Princeton University Press, 1987–2004.

Nous énumérons ci-dessous une sélection d'ouvrages en langue anglaise pour une étude plus approfondie, dans l'ordre croissant de profondeur et de difficulté :

- Le livre de poche de IGOR NOVIKOV, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990, constitue un livre divertissant sans aucune formule, mais néanmoins exact et détaillé.
- Nous ne trouvons presque pas de formules, mais plein de perspicacité dans le texte enthousiaste de JOHN A. WHEELER, *A Journey into Gravity and Spacetime*, W.H. Freeman, 1990.
- Une excellente présentation didactique se trouve dans EDWIN F. TAYLOR & JOHN A. WHEELER, *Exploring Black Holes : Introduction to General Relativity*, Addison Wesley Longman, 2000.
- Beauté, simplicité et concision sont les mots qui caractérisent l'ouvrage de MALCOLM LUDVIGSEN, *General Relativity, a Geometric Approach*, Cambridge University Press, 1999.
- Une excellente explication fait la force de BERNARD SCHUTZ, *Gravity From the Ground Up*, Cambridge University Press, 2003.
- Un bon aperçu des expériences et de la théorie en est donné dans JAMES FOSTER &

- J. D. NIGHTINGALE, *A Short Course in General Relativity*, Springer Verlag, 2e édition, 1998.
- Un texte agréable : SAM LILLEY, *Discovering Relativity for Yourself*, Cambridge University Press, 1981.
 - Une version moderne en est donnée par RAY D' INVERNO, *Introducing Einstein's Relativity*, Clarendon Press, 1992. Celle-ci intègre une description étendue des trous noirs et du rayonnement gravitationnel, et fait régulièrement référence aux recherches en cours.
 - Pour un ouvrage magnifique, instructif et fortement recommandé, lisez HANS C. OHANIAN & REMO RUFFINI, *Gravitation and Spacetime*, W.W. Norton & Co., 1994.
 - Le livre suivant est bien écrit et particulièrement à jour, il met l'accent sur la théorie, il est écrit par l'un des grands maîtres de ce domaine : WOLFGANG RINDLER, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001.
 - Un classique en est STEVEN WEINBERG, *Gravitation and Cosmology*, Wiley, 1972.
 - La passion pour la relativité générale transpire également dans JOHN KLAUDER, ed., *Magic without Magic : John Archibald Wheeler – A Collection of Essays in Honour of His Sixtieth Birthday*, W.H. Freeman & Co., 1972.
 - Pour un ouvrage complet, lisez KIP S. THORNE, *Black Holes and Time Warps – Einstein's Outrageous Legacy*, W.W. Norton, 1994.
 - L'ouvrage le plus mathématique – et le plus difficile – reste celui de ROBERT M. WALD, *General Relativity*, University of Chicago Press, 1984.
 - Une grande quantité d'informations concernant la relativité générale est disponible sur Internet. Pour un bon point de départ sur des ressources américaines, consultez le site math.ucr.edu/home/baez/physics/.

Il existe toujours un besoin pour un grand ouvrage moderne sur la relativité générale, avec des schémas en couleurs qui combinent les aspects expérimentaux et théoriques.

Pour des textes disponibles dans d'autres langues, lisez la référence suivante. Cité aux pages 123, 163, 165, 186 et 187.

- 96** Le classique G. FALK & W. RUPPEL, *Mechanik, Relativität, Gravitation – ein Lehrbuch*, Springer Verlag, third edition, 1983, est un magnifique texte d'enseignement en allemand.
- Un livret pratique et élégant : ULRICH E. SCHRÖDER, *Gravitation – Einführung in die allgemeine Relativitätstheorie*, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2001.
- Une référence moderne en est TORSTEN FLIESSBACH, *Allgemeine Relativitätstheorie*, Akademischer Spektrum Verlag, 1998.
- Celui-ci est excellent : HUBERT GOENNER, *Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, Akademischer Spektrum Verlag, 1996.
- En italien, il y a le magnifique, instructif, mais coûteux HANS C. OHANIAN & REMO RUFFINI, *Gravitazione e spazio-tempo*, Zanichelli, 1997. Il est hautement recommandé. Une révision moderne de ce livre serait sans égale. Cité aux pages 123, 159, 160, 161, 163, 165, 186, 187 et 307.
- 97** P. MOHAZZABI & J. H. SHEA, High altitude free fall, *American Journal of Physics* **64**, pp. 1242–1246, 1996. En guise d'anecdote, à cause d'une défaillance technique Kittinger avait laissé sa main dans le vide (proche) au cours de son ascension, sans avoir encouru aucun dommage permanent. Sur les conséquences de l'exposition humaine au vide, consultez le site www.sff.net/people/geoffrey.landis/vacuum.html. Cité en page 124.
- 98** Ce récit est conté par exemple par W. G. UNRUH, Time, gravity, and quantum mechanics, preprint disponible sur www.arxiv.org/abs/gr-qc/9312027. Cité en page 124.
- 99** H. BONDI, Gravitation, *European Journal of Physics* **14**, pp. 1–6, 1993. Cité en page 125.

- 100** J. W. BRAULT, Princeton University, thèse de doctorat, 1962. Lisez aussi J. L. SNIDER, *Physical Review Letters* 28, pp. 853–856, 1972, et pour l'étoile Sirius lisez J.L. GREENSTEIN & al., *Astrophysical Journal* 169, p. 563, 1971. Cité aux pages 127 et 268.
- 101** Ce célèbre article est R. V. POUND & G. A. REBKA, Apparent weight of photons, *Physical Review Letters* 4, pp. 337–341, 1960. Une version plus précise en a été publiée par R. V. POUND & J. L. SNIDER, *Physical Review Letters* 13, p. 539, 1964, et R. V. POUND & J. L. SNIDER, *Physical Review B* 140, p. 788, 1965. Cité aux pages 127 et 268.
- 102** J. C. HAFELE & RICHARD E. KEATING, Around-the-world atomic clocks : predicted relativistic time gains, *Science* 177, pp. 166–167, et Around-the-world atomic clocks : observed relativistic time gains, pp. 168–170, 14 juillet 1972. Cité en page 127.
- 103** R.F.C. VESSOT & al., Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser, *Physical Review Letters* 45, pp. 2081–2084, 1980. Cette expérience fut réalisée en 1976. Plus d'une douzaine de co-auteurs étaient impliqués dans ce travail, dans lequel on a tenté de projeter un maser dans l'espace avec un missile Scout jusqu'à une hauteur d'environ 10 000 km. Cité en page 127.
- 104** L. BRIATORE & S. LESCHIUTTA, Evidence for Earth gravitational shift by direct atomic-time-scale comparison, *Il Nuovo Cimento* 37B, pp. 219–231, 1977. Cité en page 127.
- 105** Vous trouverez plus d'informations sur les marées dans E. P. CLANCY, *The Tides*, Doubleday, New York, 1969. Cité en page 129.
- 106** Ces expéditions se rendirent sur deux petites îles, à savoir à Sobral, au nord du Brésil, et à Príncipe, dans le golfe de Guinée. Les résultats de cette expédition parurent dans *The Times* avant qu'ils aient été diffusés dans une revue scientifique. Aujourd'hui, ce serait considéré comme une violation grossière de l'honnêteté scientifique. Les résultats furent publiés dans F. W. DYSON, A. S. EDDINGTON & C. DAVIDSON, *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)* 220A, p. 291, 1920, et *Memoirs of the Royal Astronomical Society* 62, p. 291, 1920. Cité en page 130.
- 107** On trouve une excellente source d'images de l'espace-temps dans le texte de G. F. R. ELLIS & R. WILLIAMS, *Flat and Curved Space-times*, Clarendon Press, Oxford, 1988. Cité en page 131.
- 108** J. DROSTE, Het veld van een enkel centrum in Einstein's theorie der zwaartekracht, en de beweging van een stoffelijk punt, *Verslag gew. Vergad. Wiss. Amsterdam* 25, pp. 163–180, 1916. Cité en page 133.
- 109** L'expression *trou noir* fut introduite en 1967 lors d'une conférence sur les pulsars, comme le décrit JOHN A. WHEELER, dans son autobiographie *Geons, Black Holes, and Quantum Foam : A Life in Physics*, W.W. Norton, 1998, pp. 296–297 : « Dans mon discours, j'ai proposé que nous devions considérer l'éventualité qu'au centre d'un pulsar puisse se trouver un objet gravitationnellement complètement effondré. J'ai fait remarquer que nous ne pouvions plus répéter sans cesse "objet gravitationnellement complètement effondré". Nous avions besoin d'une tournure descriptive plus brève. "Que pensez-vous de trou noir ?" interrogea quelqu'un dans l'auditoire. J'avais cherché le terme approprié pendant des mois, retournant sans cesse cette idée dans mon lit, dans la baignoire, dans ma voiture, à chaque fois que j'avais des périodes propices à la réflexion. Soudainement, ce nom semblait sonner parfaitement juste. Lorsque j'ai donné une conférence ... plus formelle ... quelques semaines plus tard, le 29 décembre 1967, j'ai employé cette expression, puis je l'ai intégrée dans la version écrite de cette conférence publiée au printemps 1968 ... Je décidai d'être plus relâché sur l'utilisation du terme "trou noir", l'abandonnant de mon cours et de la version écrite comme si c'était un vieil ami familier. Deviendrait-il populaire ? En réalité il le devint.

Aujourd'hui, chaque étudiant a entendu ce terme au moins une fois. »

L'usage répandu de cette expression commença avec l'article de R. RUFFINI & J. A. WHEELER, *Introducing the black hole*, *Physics Today* 24, pp. 30–41, janvier 1971.

Dans son autobiographie, Wheeler écrit également que l'expression « le trou noir n'a pas de cheveux » fut critiquée par Feynman qui la trouvait « obscène ». Un commentaire intéressant d'un physicien qui avait l'habitude de rédiger ses articles dans des bars où les serveuses travaillent les seins nus. Cité aux pages 133, 241, 242 et 248.

- 110** L. B. KREUZER, Experimental measurement of the equivalence of active and passive gravitational mass, *Physical Review* 169, pp. 1007–1012, 1968. Par le truchement d'une expérience astucieuse, il montra que les masses gravitationnelles du fluor et du brome sont identiques. Cité en page 134.
- 111** DAVID BLAIR & GEOFF MCNAMARA, *Ripples on a cosmic sea*, Allen & Unwin, 1997, constitue un excellent livre accessible à tous sur ce sujet. Cité en page 134.
- 112** G. W. GIBBONS, The maximum tension principle in general relativity, *Foundations of Physics* 32, pp. 1891–1901, 2002, ou arxiv.org/abs/hep-th/0210109. Cité en page 135.
- 113** Le fait que les corps chutent le long de géodésiques, indépendamment de leur masse, ce que nous appelons le principe d'équivalence faible, a été testé par de nombreuses expériences jusqu'à une précision de 10^{-13} . L'expérience la plus précise utilise des balances de torsion. Regardez, par exemple, le site Web du groupe de Eöt-Wash sur www.npl.washington.edu/eotwash/experiments/experiments.html. Cité en page 138.
- 114** Jusqu'à présent, les expériences confirment que les énergies électrostatique et nucléaire (forte) chutent comme la matière à une partie pour 10^8 près, et l'énergie (nucléaire) faible à quelques pour cent près. Cela est résumé dans la Réf. 118. Cité en page 139.
- 115** J. SOLDNER, *Berliner Astronomisches Jahrbuch auf das Jahr 1804*, 1801, p. 161. Cité en page 139.
- 116** Lisez par exemple K. D. OLUM, Superluminal travel requires negative energies, *Physical Review Letters* 81, pp. 3567–3570, 1998, ou M. ALCUBIERRE, The warp drive : hyper-fast travel within general relativity, *Classical and Quantum Gravity* 11, pp. L73–L77, 1994. Lisez aussi CHRIS VAN DEN BROECK, A warp drive with more reasonable total energy requirements, *Classical and Quantum Gravity* 16, pp. 3973–3979, 1999. Cité en page 142.
- 117** Lisez l'*Astronomical Almanac*, et son *Explanatory Supplement*, H.M. Printing Office, London and U.S. Government Printing Office, Washington, 1992. Concernant l'information à propos des diverses coordonnées de temps utilisées dans le monde, tel que le temps coordonnée barycentrique, le temps situé au barycentre du Système solaire, consultez également la page Web tycho.usno.navy.mil/systime.html. Elle contient de plus une excellente bibliographie. Cité en page 143.
- 118** Un tour d'horizon en est donné dans C. WILL, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, chapitre 14.3, Cambridge University Press, édition corrigée, 1993. (Bien qu'il représente une source de référence, son point de vue sur le rôle des marées et sur le rôle de l'énergie gravitationnelle dans le principe d'équivalence a été critiqué par d'autres chercheurs.) Lisez aussi C. WILL, *Was Einstein Right? – Putting General Relativity to the Test*, Oxford University Press, 1993. Regardez aussi son article sur arxiv.org/abs/gr-qc/9811036. Cité aux pages 144, 163 et 305.
- 119** Ces calculs négligent plusieurs effets plus minuscules, comme la rotation de la Terre et le décalage vers le rouge. Pour l'effet principal, lisez EDWIN F. TAYLOR, « The boundaries of nature : special and general relativity and quantum mechanics, a second course in physics » – Edwin F. Taylor's acceptance speech for the 1998 Oersted Medal presented by the American

- Association of Physics Teachers, 6 janvier 1998, *American Journal of Physics* 66, pp. 369–376, 1998. Cité en page 144.
- 120 A. G. LINDH, Did Popper solve Hume’s problem ?, *Nature* 366, pp. 105–106, 11 novembre 1993, Cité en page 144.
- 121 P. KAARET, S. PIRAINO, P. F. BLOSER, E. C. FORD, J. E. GRINDLAY, A. SANTANGELO, A. P. SMALE & W. ZHANG, Strong Field Gravity and X-Ray Observations of 4U1820-30, *Astrophysical Journal* 520, pp. L37–L40, 1999, ou sur arxiv.org/abs/astro-ph/9905236. Certains graphiques magnifiques situés sur le site Web research.physics.uiuc.edu/CTA/movies/spm exhibent les modèles de ce système stellaire. Cité en page 145.
- 122 R. J. NEMIROFF, Visual distortions near a black hole and a neutron star, *American Journal of Physics* 61, pp. 619–632, 1993. Cité en page 145.
- 123 Cette équivalence fut testée avec précision pour la première fois par R. VON EÖTVÖS, *Annalen der Physik & Chemie* 59, p. 354, 1896, et par R. VON EÖTVÖS, V. PEKÁR, E. FEKETE, Beiträge zum Gesetz der Proportionalität von Trägheit und Gravität, *Annalen der Physik* 4, Leipzig 68, pp. 11–66, 1922. Eötvös releva des accords à 5 parties pour 10^9 . D’autres expériences furent réalisées par P. G. ROLL, R. KROTKOW & R. H. DICKE, The equivalence of inertial and passive gravitational mass, *Annals of Physics (NY)* 26, pp. 442–517, 1964, un des articles de recherche les plus intéressants et divertissants en physique expérimentale, et par V. B. BRAGINSKY & V. I. PANOV, *Soviet Physics – JETP* 34, pp. 463–466, 1971. Des résultats modernes, avec des erreurs inférieures à une partie pour 10^{12} , sont donnés par Y. SU & al., New tests of the universality of free fall, *Physical Review D* 50, pp. 3614–3636, 1994. Plusieurs expériences ont été proposées pour tester l’équivalence dans l’espace jusqu’à moins d’une partie pour 10^{16} . Cité aux pages 145, 146 et 268.
- 124 L’effet Thirring fut prédit dans H. THIRRING, Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie, *Physikalische Zeitschrift* 19, pp. 33–39, 1918, et dans H. THIRRING, Berichtigung zu meiner Arbeit : « Über die Wirkung rotierender Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie », *Physikalische Zeitschrift* 22, p. 29, 1921. L’effet Thirring–Lense fut prédit dans J. LENSE & H. THIRRING, Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie, *Physikalische Zeitschrift* 19, pp. 156–163, 1918. Lisez aussi la Réf. 145. Cité en page 149.
- 125 Cette prouesse, qui a tiré profit des satellites LAGEOS et LAGEOS II, est contée dans IGNAZIO CIUFOLINI, The 1995–99 measurements of the Thirring–Lense effect using laser-ranged satellites, *Classical and Quantum Gravity* 17, pp. 2369–2380, 2000. Lisez également I. CIUFOLINI & E. C. PAVLIS, A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense–Thirring effect, *Nature* 431, pp. 958–960, 2004. Cité aux pages 150, 154 et 268.
- 126 La détection de l’effet Thirring–Lense dans les pulsars binaires est présentée dans R. D. BLANDFORD, Lense–Thirring precession of radio pulsars, *Journal of Astrophysics and Astronomy* 16, pp. 191–206, 1995. Cité en page 150.
- 127 G. HOLZMÜLLER, *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 15, p. 69, 1870, F. TISSERAND, *Comptes Rendus* 75, p. 760, 1872, et *Comptes Rendus* 110, p. 313, 1890. Cité en page 150.
- 128 B. MASHHOON, Gravitoelectromagnetism, www.arxiv.org/abs/gr-qc/0011014. Consultez également sa vaste liste de références sur le gravitomagnétisme. Cité en page 151.
- 129 D. BEDFORD & P. KRUMM, On relativistic gravitation, *American Journal of Physics* 53, pp. 889–890, 1985, et P. KRUMM & D. BEDFORD, The gravitational Poynting vector and energy transfer, *American Journal of Physics* 55, pp. 362–363, 1987. Cité aux pages 152 et 159.

- 130** M. KRAMER & al., Tests of general relativity from timing the double pulsar, preprint sur www.arxiv.org/abs/astro-ph/0609417. Cité aux pages 154 et 268.
- 131** Cette histoire est relatée dans JOHN A. WHEELER, *A Journey into Gravity and Spacetime*, W.H. Freeman, 1990. Cité en page 155.
- 132** Lisez, par exemple, K. T. McDONALD, Answer to question #49. Why c for gravitational waves?, *American Journal of Physics* 65, pp. 591–592, 1997, et la section III de V. B. BRAGINSKY, C. M. CAVES & K. S. THORNE, Laboratory experiments to test relativistic gravity, *Physical Review D* 15, pp. 2047–2068, 1992. Cité en page 156.
- 133** A. TARTAGLIA & M. L. RUGGIERO, Gravito-electromagnetism versus electromagnetism, *European Journal of Physics* 25, pp. 203–210, 2004. Cité en page 156.
- 134** La revendication originale est de S. M. KOPEIKIN, The post-Newtonian treatment of the VLBI experiment on September 8, 2002, *Physics Letters A* 312, pp. 147–157, 2003, ou arxiv.org/abs/gr-qc/0212121. Des arguments allant à l'encontre de cette prétention furent publiés, entre autres, par STUART SAMUEL, On the speed of gravity and the v/c corrections to the Shapiro time delay, arxiv.org/abs/astro-ph/0304006. Cité aux pages 157 et 162.
- 135** La formule du quadrupôle est expliquée dans le texte de Goenner. Lisez la Réf. 96. Cité en page 159.
- 136** Pour une introduction aux ondes gravitationnelles, lisez B. F. SCHUTZ, Gravitational waves on the back of an envelope, *American Journal of Physics* 52, pp. 412–419, 1984. Cité en page 157.
- 137** La magnifique synthèse de DANIEL KLEPPNER, The gem of general relativity, *Physics Today* 46, pp. 9–11, avril 1993, parut six mois avant que les auteurs du travail cité, Joseph Taylor et Russel Hulse, reçoivent le prix Nobel pour la découverte des pulsars milliseconde. Un article de revue plus détaillé se trouve dans J. H. TAYLOR, Pulsar timing and relativistic gravity, *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A* 341, pp. 117–134, 1992. L'article original est J. H. TAYLOR & J. M. WEISBERG, Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16, *Astrophysical Journal* 345, pp. 434–450, 1989. Regardez aussi J. M. WEISBERG, J. H. TAYLOR & L. A. FOWLER, Pulsar PSR 1913+16 sendet Gravitationswellen, *Spektrum der Wissenschaft*, pp. 53–61, décembre 1981. Cité aux pages 160 et 161.
- 138** D. R. LORIMER, Binary and millisecond pulsars, in www.livingreviews.org/lrr-2005-7, et J. M. WEISBERG & J. H. TAYLOR, The relativistic binary pulsar B1913+16 : thirty years of observations and analysis, pp. 25–31, dans F. A. RASIO & I. H. STAIRS, editors, *Binary Radio Pulsars*, Proceedings of a meeting held at the Aspen Center for Physics, USA, 12 janvier - 16 janvier 2004, volume 328 of ASP Conference Series, Astronomical Society of the Pacific, 2005. Cité en page 161.
- 139** W. B. BONNOR & M. S. PIPER, The gravitational wave rocket, *Classical and Quantum Gravity* 14, pp. 2895–2904, 1997, ou arxiv.org/abs/gr-qc/9702005. Cité en page 161.
- 140** L. LERNER, A simple calculation of the deflection of light in a Schwarzschild gravitational field, *American Journal of Physics* 65, pp. 1194–1196, 1997. Cité en page 162.
- 141** A. EINSTEIN, Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, *Annalen der Physik* 35, p. 898, 1911. Cité en page 163.
- 142** I. I. SHAPIRO & al., Fourth test of general relativity, *Physical Review Letters* 13, pp. 789–792, 1964. Cité en page 164.
- 143** I. I. SHAPIRO & al., Fourth test of general relativity : preliminary results, *Physical Review Letters* 20, pp. 1265–1269, 1968. Cité en page 164.

- 144** J. H. TAYLOR, Pulsar timing and relativistic gravity, *Proceedings of the Royal Society, London A* 341, pp. 117–134, 1992. Cité aux pages 164 et 167.
- 145** W. DE SITTER, On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences, *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* 77, pp. 155–184, p. 418E, 1916. Pour une discussion sur la précession de de Sitter et la précession de Thirring–Lense, lisez aussi B. R. HOLSTEIN, Gyroscope precession in general relativity, *American Journal of Physics* 69, pp. 1248–1256, 2001. Cité aux pages 168 et 306.
- 146** B. BERTOTTI, I. CIUFOLINI & P. L. BENDER, New test of general relativity : measurement of de Sitter geodetic precession rate for lunar perigee, *Physical Review Letters* 58, pp. 1062–1065, 1987. Il fut confirmé plus tard par I.I. SHAPIRO & al., Measurement of the de Sitter precession of the moon : a relativistic three body effect, *Physical Review Letters* 61, pp. 2643–2646, 1988. Cité aux pages 168 et 268.
- 147** WOLFGANG RINDLER, *Essential Relativity*, Springer, seconde édition révisée, 1977. Cité en page 171.
- 148** Cela est expliqué (sans donner la solution de l'énigme) à la p. 67, de WOLFGANG PAULI, *Relativitätstheorie*, Springer Verlag, Berlin, 2000, l'édition réimprimée d'un célèbre texte initialement publié en 1921. La référence est H. VERMEIL, Notiz über das mittlere Krümmungsmaß einer n-fach ausgedehnten Riemannschen Mannigfaltigkeit, *Göttinger Nachrichten, mathematische-physikalische Klasse* p. 334, 1917. Cité en page 171.
- 149** M. SANTANDER, L. M. NIETO & N. A. CORDERO, A curvature based derivation of the Schwarzschild metric, *American Journal of Physics* 65, pp. 1200–1209, 1997. Cité aux pages 175 et 177.
- 150** MICHAEL H. SOFFEL, *Relativity in Astronomy, Celestial Mechanics and Geodesy*, Springer Verlag, 1989. Cité en page 175.
- 151** RICHARD P. FEYNMAN, FERNANDO B. MORINIGO, WILLIAM G. WAGNER & BRIAN HATFIELD, *Feynman Lectures on Gravitation*, Westview Press, 1995. Cité en page 176.
- 152** C. G. TORRE & I. M. ANDERSON, Symmetries of the Einstein equations, *Physical Review Letters* 70, pp. 3525–3529, 1993, ou www.arxiv.org/abs/gr-qc/9302033. Cité en page 182.
- 153** H. NICOLAI, Gravitational billiards, dualities and hidden symmetries, www.arxiv.org/abs/gr-qc/0506031. Cité en page 182.
- 154** Y. WANG & M. TEGMARK, New dark energy constraints from supernovae, microwave background and galaxy clustering, *Physical Review Letters* 92, p. 241302, 2004, ou arxiv.org/astro-ph/0403292. Cité en page 183.
- 155** Des arguments prônant la stérilité de la covariance générale en sont donnés par JOHN D. NORTON, General covariance and the foundations of general relativity, *Reports on Progress in Physics* 56, pp. 791–858, 1993. L'opinion opposée, incluant la discussion des « éléments absolus », est tenue dans l'ouvrage de J. L. ANDERSON, *Principles of Relativity Physics*, chapitre 4, Academic Press, 1967. Cité en page 184.
- 156** Pour une bonne introduction à la physique mathématique, lisez le célèbre texte en deux volumes de ces trois femmes YVONNE CHOQUET-BRUHAT, CECILE DEWITT-MORETTE & MARGARET DILLARD-BLEICK, *Analysis, Manifolds, and Physics*, North-Holland, 1996 et 2001. La première édition de ce classique est parue en 1977. Cité en page 185.
- 157** Lisez par exemple R.A. KNOP & al., New constraints on Ω_M , Ω_Λ , and w from an independent set of eleven high-redshift supernovae observed with HST, *Astrophysical Journal* 598, pp. 102–137, 2003. Cité en page 186.

- 158** R. P. FEYNMAN, R. B. LEIGHTON & M. SANDS, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, 1977, volume II, p. 42–14. Cité en page [188](#).
- 159** L'article R. J. HUGHES, The equivalence principle, *Contemporary Physics* 4, pp. 177–191, 1993, est un aperçu récent des tests expérimentaux de l'universalité de la chute libre. Cité en page [189](#).
- 160** Consultez par exemple H. L. BRAY, Black holes, geometric flows, and the Penrose inequality in general relativity, *Notices of the AMS* 49, pp. 1372–1381, 2002. Cité en page [190](#).
- 161** Lisez par exemple l'article de K. DALTON, Gravity, geometry and equivalence, preprint qui peut être trouvé sur arxiv.org/abs/gr-qc/9601004, et L. LANDAU & E. LIFSHITZ, *The Classical Theory of Fields*, Pergamon, 4th edition, 1975, p. 241. Cité en page [191](#).
- 162** EKKEHART KRÖNER, *Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen*, Springer, 1958. Kröner montre comment utiliser le formalisme de Ricci dans la physique de l'état solide. Cité en page [192](#).
- 163** Les analogues du trou noir apparaissent en acoustique, dans les fluides et plusieurs autres domaines. Cité en page [192](#).
- 164** L'équivalence entre les diverses définitions du tenseur de Riemann est expliquée dans ... Cité en page [194](#).
- 165** K. TANGEN, Could the Pioneer anomaly have a gravitational origin ?, arxiv.org/abs/gr-qc/0602089. Cité en page [195](#).
- 166** H. DITTUS & C. LÄMMERZAHN, Die Pioneer-Anomalie, *Physik Journal* 5, pp. 25–31, janvier 2006. Cité en page [195](#).
- 167** Cette célèbre citation est la première phrase du dernier chapitre, le « Beschluß », d'EMMANUEL KANT, *Kritik der praktischen Vernunft*, 1797. Cité en page [196](#).
- 168** AETIUS, Opinions, III, I, 6. Lisez JEAN-PAUL DUMONT, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, 1991, p. 445. Cité en page [196](#).
- 169** Une admirable introduction à l'astronomie moderne a été donnée par PAOLO MAFFEI, *I mostri del cielo*, Mondadori Editore, 1976. Cité en page [200](#).
- 170** Lisez par exemple A. N. COX, ed., *Allen's Astrophysical Quantities*, AIP Press and Springer Verlag, 2000. Un aperçu des observations dans le domaine optique en est donné par le Sloan Digital Sky Survey sur cas.sdss.org/dr7/en/. Nous pouvons trouver plus de précisions concernant l'Univers dans le magnifique ouvrage de W. J. KAUFMANN & R. A. FREDMAN, *Universe*, fifth edition, W.H. Freeman & Co., 1999. Les découvertes les plus récentes sont mieux retracées sur les sites Web sci.esa.int et hubble.nasa.gov. Cité en page [201](#).
- 171** P. JETZER, Gravitational microlensing, *Naturwissenschaften* 86, pp. 201–211, 1999. Des mesures utilisant les vitesses orbitales autour de la Galaxie sont en bon accord avec cette valeur. Cité aux pages [198](#) et [202](#).
- 172** D. R. LORIMER, A. J. FAULKNER, A. G. LYNE, R. N. MANCHESTER, M. KRAMER, M. A. MCLAUGHLIN, G. HOBBS, A. POSSENTI, I. H. STAIRS, F. CAMILO, M. BURGAY, N. D'AMICO, A. CORONGIU & F. CRAWFORD, The Parkes multibeam pulsar survey : VI. Discovery and timing of 142 pulsars and a Galactic population analysis, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* preprint sur arxiv.org/abs/astro-ph/0607640. Cité en page [202](#).
- 173** D. FIGER, An upper limit to the masses of stars, *Nature* 434, pp. 192–194, 2005. Cité en page [202](#).
- 174** G. BASRI, The discovery of brown dwarfs, *Scientific American* 282, pp. 77–83, avril 2001. Cité en page [202](#).

- 175** P. M. WOODS & C. THOMPSON, Soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars : magnetar candidates, arxiv.org/abs/astro-ph/0406133. Cité en page 203.
- 176** B. M. GAENSLER, N. M. MCCLURE-GRIFFITHS, M. S. OEY, M. HAVERKORN, J. M. DICKEY & A. J. GREEN, A stellar wind bubble coincident with the anomalous X-ray pulsar 1E 1048.1-5937 : are magnetars formed from massive progenitors ?, *The Astrophysical Journal (Letters)* 620, pp. L95–L98, 2005, ou arxiv.org/abs/astro-ph/0501563. Cité en page 203.
- 177** Une idée opposée est défendue par ... Cité en page 207.
- 178** C. WIRTZ, *Scientia* 38, p. 303, 1925, et K. LUNDMARK, The motions and the distances of the spiral nebulae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 85, pp. 865–894, 1925. Lisez aussi G. STROMBERG, Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae, *Astrophysical Journal* 61, pp. 353–362, 1925. Cité en page 207.
- 179** G. GAMOW, The origin of the elements and the separation of galaxies, *Physical Review* 74, p. 505, 1948. Cité en page 208.
- 180** A. G. DOROSHKEVICH & I. D. NOVIKOV, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* 154, p. 809, 1964. Il parut dans une traduction anglaise quelques mois plus tard. L'histoire de cette prédiction fut contée par Penzias lors de sa conférence Nobel. Cité en page 208.
- 181** ARNO A. PENZIAS & ROBERT W. WILSON, A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mcs, *Astrophysical Journal* 142, pp. 419–421, 1965. Cité en page 208.
- 182** MACROBIUS, *Somnium Scipionis*, XIV, 19. Lisez JEAN-PAUL DUMONT, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, 1991, p. 61. Cité en page 210.
- 183** Sur l'histoire lointaine de l'Univers, lisez les excellents textes de G. BÖRNER, *The Early Universe – Facts & Fiction*, Springer Verlag, 3rd edition, 1993, ou BARRY PARKER, *Creation – The Story of the Origin and the Evolution of the Universe*, Plenum Press, 1988. Un admirable ouvrage de vulgarisation est celui de M. LONGAIR, *Our Evolving Universe*, Cambridge University Press, 1996. Cité en page 210.
- 184** Les premières traces d'oxygène semblent être apparues dans l'atmosphère il y a 2,32 milliards d'années, vraisemblablement produites par des micro-organismes. Compulsez A. BECKER & al., Dating the rise of atmospheric oxygen, *Nature* 427, pp. 117–120, 2003. Cité en page 211.
- 185** GABRIELE WALKER, *Snowball Earth – The Story of the Great Global Catastrophe That Spawned Life as We Know It*, Crown Publishing, 2003. Cité en page 212.
- 186** K. KNIE, Spuren einer Sternexplosion, *Physik in unserer Zeit* 36, p. 8, 2005. On peut trouver la première étape de cette connexion dans K. KNIE, G. KORSCHINEK, T. FAESTERMANN, E. A. DORFI, G. RUGEL & A. WALLNER, ^{60}Fe anomaly in a deep-sea manganese crust and implications for a nearby supernova source, *Physics Review Letters* 93, p. 171103, 2004, la deuxième étape dans N. D. MARSH & H. SVENSMARK, Low cloud properties influenced by cosmic rays, *Physics Review Letters* 85, pp. 5004–5007, 2000, et la troisième étape dans DE MENOCAI, Plio-Pleistocene African climate, *Science* 270, pp. 53–59, 1995. Cité en page 213.
- 187** A. FRIEDMAN, Über die Krümmung des Raumes, *Zeitschrift für Physik* 10, pp. 377–386, 1922, et A. FRIEDMANN, Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes, *Zeitschrift für Physik* 21, pp. 326–332, 1924. (Dans la transcription latine, le nom de l'auteur acquiert un second « n » dans son deuxième article.) Cité en page 214.
- 188** H. KNUTSEN, Darkness at night, *European Journal of Physics* 18, pp. 295–302, 1997. Cité aux pages 219 et 220.

- 189** Lisez par exemple P.D. PEŠIĆ, Brightness at night, *American Journal of Physics* **66**, pp. 1013–1015, 1998. Cité aux pages [220](#) et [221](#).
- 190** PAUL WESSON, Olbers' paradox and the spectral intensity of extra-galactic background light, *Astrophysical Journal* **367**, p. 399, 1991. Cité en page [220](#).
- 191** STEVEN WEINBERG, *Gravitation and Cosmology*, John Wiley, 1972. Un splendide ouvrage rédigé avec une forte touche personnelle et insistant principalement sur toutes les relations qu'il y a avec les données expérimentales. Il ne développe pas une profonde perception de la courbure de l'espace-temps, et ne mentionne pas les problèmes fondamentaux de l'espace et du temps en relativité générale. Excellent pour apprendre comment calculer effectivement les choses, mais moins pour les objectifs de notre ascension montagnaise. Cité aux pages [220](#) et [259](#).
- 192** Les recherches de supernovae sont dirigées par de nombreux groupes de recherche avec les plus grands télescopes optiques et X. ... Cité en page [221](#).
- 193** Ces expériences sont discutées en détail dans l'excellent exposé de D. GIULINI & N. STRAUMANN, Das Rätsel der kosmischen Vakuumenergiedichte und die beschleunigte Expansion des Universums, *Physikalische Blätter* **556**, pp. 41–48, 2000. Regardez aussi N. STRAUMANN, The mystery of the cosmic vacuum energy density and the accelerated expansion of the universe, *European Journal of Physics* **20**, pp. 419–427, 1999. Cité aux pages [221](#) et [270](#).
- 194** A. HARVEY & E. SCHUCKING, Einstein's mistake and the cosmological constant, *American Journal of Physics* **68**, pp. 723–727, 2000. Cité en page [222](#).
- 195** L'auteur de la Bible explique la pluie de cette manière, comme nous pouvons le déduire de ses toutes premières pages, Genèse 1 : 6-7. Cité en page [223](#).
- 196** Jusqu'à sa mort, Fred Hoyle défendit sa conception de l'Univers statique, par exemple dans G. BURBIDGE, F. HOYLE & J. V. NARLIKAR, A different approach to cosmology, *Physics Today* **52**, pp. 38–44, 1999. Cette équipe a également écrit un livre sous le même titre, publié en 2000 par Cambridge University Press. Cité aux pages [223](#) et [224](#).
- 197** STEPHEN W. HAWKING & G. F. R. ELLIS, *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge University Press, Cambridge, 1973. Entre autres, ce texte de référence discute des singularités de l'espace-temps et de leur nécessité dans l'histoire de l'Univers. Cité aux pages [224](#), [261](#) et [314](#).
- 198** SAINT AUGUSTIN, *Les Confessions*, 398, écrit : « Et je réponds à cette demande : "Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ?" Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : "Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères". Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule. [...] Que si avant le ciel et la terre il n'était point de temps, pourquoi demander ce que vous [Dieu] faisiez ALORS ? Car, où le TEMPS n'était pas, ALORS ne pouvait être. » (Livre onzième, chapitres 12 et 13). Cité en page [225](#).
- 199** STEPHEN HAWKING, *A Brief History of Time – From the Big Bang to Black Holes*, 1988. C'est presque une obligation pour chaque physicien d'avoir lu ce best-seller, puisqu'il constitue un sujet de discussion récurrent lors de dîners festifs. Cité en page [225](#).
- 200** Les détails sur les étoiles sont exposés dans de nombreux ouvrages. Lisez par exemple ... Cité en page [228](#).
- 201** J. PELT, R. KAYSER, S. REFSDAL & T. SCHRAMM, The light curve and the time delay of QSO 0957+561, *Astronomy and Astrophysics* **305**, p. 97, 1996. Cité en page [230](#).

- 202** F. ZWICKY, Nebulae as gravitational lenses, *Physical Review Letters* 51, p. 290, et F. ZWICKY, On the probability to detect nebulae which act as gravitational lenses, p. 679, 1937. Le point de vue pessimiste d'Einstein se trouve dans A. EINSTEIN, Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field, *Science* 84, pp. 506–507, 1936. Une revue de détail sur l'effet de lentille gravitationnelle peut même être trouvée en ligne, dans l'article de J. WAMBSGANSS, Gravitational lensing in astronomy, *Living Reviews in Relativity* 1-12, pp. 1–80, 1998, situé sur le site www.livingreviews.org/Articles/Volume1/1998-12wamb.
- Il y a également le livre de P. SCHNEIDER, J. EHLERS & E. E. FALCO, *Gravitational Lenses*, Springer Verlag, Berlin, 1992. Cité en page 230.
- 203** M. LACHIÈZE-REY & J. -P. LUMINET, Cosmic topology, *Physics Reports* 254, pp. 135–214, 1995. Lisez aussi B. F. ROUKEMA, The topology of the universe, preprint arxiv.org/abs/astro-ph/0010185. Cité en page 232.
- 204** Merci à Steve Carlip d'avoir éclairci ce point. Cité en page 232.
- 205** G. F. R. ELLIS & T. ROTHMANN, Lost horizons, *American Journal of Physics* 61, pp. 883–893, 1993. Cité en page 233.
- 206** A. GUTH, *Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts – Die Theorie des inflationären Universums*, Droemer Knaur, 1999. Cité en page 233.
- 207** Les valeurs possibles pour l'entropie de l'Univers ont été discutées par ILYA PRIGOGINE, *Is Future Given?*, World Scientific, 2003. Ce fut son dernier livre. Pour une approche différente, voyez G. A. MENA MARUGÁN & S. CARNEIRO, Holography and the large number hypothesis, arxiv.org/abs/gr-qc/0111034. Cet article réexprime également la déclaration souvent formulée sur le fait que l'Univers possède une entropie qui est beaucoup plus petite que le maximum théorique. Ce maximum est communément estimé autour de $10^{120} k$, alors qu'on « estime » que la valeur réelle vaut $10^{100} k$. Cependant, d'autres auteurs citent $10^{84} k$. En 1974, Roger Penrose fit également des conjectures concernant l'entropie de l'Univers. Cité en page 234.
- 208** C. L. BENNET, M. S. TURNER & M. WHITE, The cosmic rosetta stone, *Physics Today* 50, pp. 32–38, novembre 1997. Le fond diffus de rayonnement cosmologique se distingue du rayonnement de corps noir par moins de 0,005 %. Cité en page 236.
- 209** L'absence d'expansion dans le Système solaire est indiquée dans ... Cité en page 236.
- 210** Un admirable article expliquant comment nous pouvons réaliser des expériences qui permettent de révéler la manière dont le corps humain perçoit la rotation même lorsque les yeux sont bandés et les oreilles bouchées se trouve dans M. -L. MITTELSTAEDT & H. MITTELSTAEDT, The effect of centrifugal force on the perception of rotation about a vertical axis, *Naturwissenschaften* 84, pp. 366–369, 1997. Cité en page 237.
- 211** L'indépendance de l'inertie a été testée ... Cité en page 237.
- 212** L'état actuel des connaissances en est donné dans les comptes rendus de conférence de JULIAN BARBOUR & HERBERT PFISTER, eds., *Mach's Principle : From Newton's Bucket to Quantum Gravity*, Birkhäuser, 1995. Diverses formulations du principe de Mach – en réalité, 21 toutes différentes – sont comparées en page 530.
- Dans un développement qui n'est pas sans rapport, Dennis Sciama publia, en 1953, un article dans lequel il argumente que l'inertie d'une particule est due à l'attraction gravitationnelle de toute la matière restante, présente dans l'Univers. Cet article est largement cité, mais ne fait aucune déclaration nouvelle sur ce problème. Lisez D. W. SCIAMA, On the origin of inertia, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 113, pp. 34–42, 1953. Cité aux pages 237 et 238.

- 213** Des précisions sur la rotation de l'Univers sont données dans A. KOGUT, G. HINSHAW & A. J. BANDAY, Limits to global rotation and shear from the COBE DMR four-year sky maps, *Physical Review D* 55, pp. 1901–1905, 1997. On trouve une information plus ancienne dans J. D. BARROW, R. JUSZKIEWICZ & D. H. SONODA, Universal rotation : how large can it be?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 213, pp. 917–943, 1985. Lisez aussi J. D. BARROW, R. JUSZKIEWICZ & D. H. SONODA, Structure of the cosmic microwave background, *Nature* 309, pp. 397–402, 1983, ou E. F. BUNN, P. G. FERREIRA & J. SILK, How anisotropic is the universe?, *Physical Review Letters* 77, pp. 2883–2886, 1996. Cité en page 238.
- 214** Ce sujet a été discuté dans le cadre de la gravité linéarisée (approximation des champs faibles) par RICHARD TOLMAN, dans son manuel *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology*, Clarendon Press, 1934, aux pp. 272–290. Le problème a été exactement résolu par A. PERES, Null electromagnetic fields in general relativity theory, *Physical Review* 118, pp. 1105–1110, 1960, et par W. B. BONNOR, The gravitational field of light, *Commun. Math. Phys.* 13, pp. 163–174, 1969. Regardez également N. V. MITSKIEVIC & K. K. KUMARADTYA, The gravitational field of a spinning pencil of light, *Journal of Mathematical Physics* 30, pp. 1095–1099, 1989, et P. C. AICHELBURG & R. U. SEXL, On the gravitational field of a spinning particle, *General Relativity and Gravitation* 2, pp. 303–312, 1971. Cité en page 239.
- 215** Lisez le plaisant récit de vulgarisation d'IGOR NOVIKOV, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990. Les conséquences de la désintégration de la lumière furent étudiées par M. BRONSTEIN, Die Ausdehnung des Weltalls, *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* 3, pp. 73–82, 1933. Cité aux pages 239 et 245.
- 216** C. L. CARILLI, K. M. MENTEN, J. T. STOCKE, E. PERLMAN, R. VERMEULEN, F. BRIGGS, A. G. DE BRUYN, J. CONWAY & C. P. MOORE, Astronomical constraints on the cosmic evolution of the fine structure constant and possible quantum dimensions, *Physical Review Letters* 85, pp. 5511–5514, 25 décembre 2000. Cité en page 239.
- 217** Les observations sur les trous noirs situés au centre des galaxies et ailleurs sont résumées par R. BLANDFORD & N. GEHRELS, Revisiting the black hole, *Physics Today* 52, pp. 40–46, juin 1999. Cité aux pages 241 et 255.
- 218** Le livre de poche suivant constitue un excellent ouvrage divertissant sur les trous noirs, dépourvu de formules, mais néanmoins précis et détaillé : IGOR NOVIKOV, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990. Consultez aussi EDWIN F. TAYLOR & JOHN A. WHEELER, *Exploring Black Holes : Introduction to General Relativity*, Addison Wesley Longman 2000.
Pour une introduction historique, lisez l'article de R. RUFFINI, The physics of gravitationally collapsed objects, pp. 59–118, dans *Neutron Stars, Black Holes and Binary X-Ray Sources*, Proceedings of the Annual Meeting, San Francisco, Calif., 28 février 1974, Reidel Publishing, 1975. Cité en page 241.
- 219** J. MICHELL, On the means of discovering the distance, magnitude, etc of the fixed stars, *Philosophical Transactions of the Royal Society London* 74, p. 35, 1784, réimprimé dans S. DETWEILER, *Black Holes – Selected Reprints*, American Association of Physics Teachers, 1982. Cité en page 241.
- 220** Cet article admirable est de R. OPPENHEIMER & H. SNYDER, On continued gravitational contraction, *Physical Review* 56, pp. 455–459, 1939. Cité en page 243.
- 221** R. P. KERR, Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics, *Physical Review Letters* 11, pp. 237–238, 1963. Cité en page 247.

- 222** E. T. NEWMAN, E. COUCH, R. CHINAPARED, A. EXTON, A. PRAKASH & R. TORRENCE, Metric of a rotating, charged mass, *Journal of Mathematical Physics* 6, pp. 918–919, 1965. Cité en page 247.
- 223** Pour une synthèse, lisez P. O. MAZUR, Black hole uniqueness theorems, pp. 130–157, dans M. A. H. MACCALLUM, editor, *General Relativity and Gravitation*, Cambridge University Press, 1987, ou la mise à jour sur arxiv.org/abs/hep-th/0101012. Regardez aussi D. C. ROBINSON, Four decades of black hole uniqueness theorems, disponible sur www.mth.kcl.ac.uk/staff/dc_robinson/blackholes.pdf. Cité en page 248.
- 224** H. P. KÜNZLE & A. K. M. MASOOD-UL-ALAM, Spherically symmetric static SU(2) Einstein-Yang-Mills fields, *Journal of Mathematical Physics* 31, pp. 928–935, 1990. Cité en page 248.
- 225** Pour des informations sur la tendance du rayonnement gravitationnel à produire des formes sphériques, lisez par exemple ... Cité en page 248.
- 226** R. PENROSE & R. M. FLOYD, Extraction of rotational energy from a black hole, *Nature* 229, pp. 177–179, 1971. Cité en page 249.
- 227** La relation masse-énergie pour un trou noir en rotation est due à D. CHRISTODOULOU, Reversible and irreversible transformations in black hole physics, *Physical Review Letters* 25, pp. 1596–1597, 1970. Pour un trou noir général, chargé et en rotation, elle est due à D. CHRISTODOULOU & R. RUFFINI, Reversible transformations of a charged black hole, *Physical Review D* 4, pp. 3552–3555, 1971. Cité en page 250.
- 228** J. D. BEKENSTEIN, Black holes and entropy, *Physical Review D* 7, pp. 2333–2346, 1973. Cité en page 251.
- 229** Ce paradoxe est traité dans M. A. ABRAMOWICZ, Black holes and the centrifugal force paradox, *Scientific American* 266, pp. 74–81, mars 1993, et dans le commentaire qu'en donne DON N. PAGE, Relative alternatives, *Scientific American* 266, p. 5, août 1993. Lisez aussi M. A. ABRAMOWICZ & E. SZUSZKIEWICZ, The wall of death, *American Journal of Physics* 61, pp. 982–991, 1993, et M. A. ABRAMOWICZ & J. P. LASOTA, On traveling round without feeling it and uncurving curves, *American Journal of Physics* 54, pp. 936–939, 1986. Cité en page 253.
- 230** Pour des précisions concernant les trous noirs dans l'Univers primordial, lisez ... Cité en page 254.
- 231** Pour des précisions concernant la formation des trous noirs par effondrement stellaire, lisez ... Cité en page 255.
- 232** FREDERICK LAMB, APS meeting 1998 press conference : Binary star 4U1820-30, 20 000 light years from Earth, *Physics News Update*, 27 avril 1998. Cité en page 255.
- 233** Le premier témoignage direct de matière chutant dans un trou noir fut annoncé au début de l'an 2001 ... Cité en page 255.
- 234** Pour lire un résumé accessible sur les théorèmes de singularité de Penrose-Hawking, regardez ... Des détails peuvent être trouvés dans la Réf. 197. Cité en page 256.
- 235** Pour un tour d'horizon de la censure cosmique, consultez T. P. SINGH, Gravitational collapse, black holes and naked singularities, arxiv.org/abs/gr-qc/9805066, ou R. M. WALD, Gravitational collapse and cosmic censorship, arxiv.org/abs/gr-qc/9710068. L'idée originale est due à R. PENROSE, Gravitational collapse : the role of general relativity, *Rivista del Nuovo Cimento* 1, pp. 252–276, 1969. Cité en page 256.
- 236** G. J. STONEY, On the physical units of nature, *Philosophical Magazine* 11, pp. 381–391, 1881. Cité en page 260.

- 237** L'horloge géométrodynamique est discutée dans D. E. BRAHM & R. P. GRUBER, Limitations of the geometrodynamical clock, *General Relativity and Gravitation* 24, pp. 297–303, 1992. L'horloge fut elle-même introduite par R. F. MARZKE, dans sa thèse de doctorat *The theory of measurement in general relativity*, 1959, avec John Wheeler comme directeur de thèse. Cité en page 261.
- 238** R. GEROCH, Einstein algebras, *Commun. Math. Phys.* 26, pp. 271–275, 1972. Cité en page 261.
- 239** A. MACDONALD, Einstein's hole argument, *American Journal of Physics* 69, pp. 223–225, 2001. Cité en page 262.
- 240** ROMAN U. SEXL, Die Hohlwelttheorie, *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht* 368, pp. 453–460, 1983. ROMAN U. SEXL, Universal conventionalism and space-time, *General Relativity and Gravitation* 1, pp. 159–180, 1970. Lisez aussi ROMAN U. SEXL, Die Hohlwelttheorie, dans ARTHUR SCHARMANN & HERBERT SCHRAMM, editors, *Physik, Theorie, Experiment, Geschichte, Didaktik – Festschrift für Wilfried Kuhn zum 60. Geburtstag am 6. Mai 1983*, Aulis Verlag Deubner, 1984, pp. 241–258. Cité en page 263.
- 241** T. DAMOUR, Experimental tests of relativistic gravity, arxiv.org/abs/gr-qc/9904057. C'est son dernier article d'une série de publications sur ce thème, le premier étant T. DAMOUR, Was Einstein 100 % right ?, arxiv.org/abs/gr-qc/9412064. Cité aux pages 267, 268 et 269.
- 242** H. DITTUS, F. EVERITT, C. LÄMMERZahl & G. SCHÄFER, Die Gravitation im Test, *Physikalische Blätter* 55, pp. 39–46, 1999. Cité aux pages 267 et 268.
- 243** Consultez S. BÄSSLER & al., Improved test of the equivalence principle for gravitational selfenergy, *Physical Review Letters* 83, pp. 3585–3588, 1999. Lisez également C. M. WILL, Gravitational radiation and the validity of general relativity, *Physics Today* 52, p. 38, octobre 1999. Cité en page 268.
- 244** La dépendance en l'inverse du carré a été testée jusqu'à une précision de 60 μm , comme le rapportent E. ADELBERGER, B. HECKEL & C. D. HOYLE, Testing the gravitational inverse-square law, *Physics World* 18, pp. 41–45, 2005. Cité en page 268.
- 245** Pour des théories concurrentes de la relativité générale, lisez par exemple C. M. WILL, The confrontation between general relativity and experiment, *Living Reviews of Relativity* 2001, www.livingreviews.org/lrr-2001-4. Par exemple, l'absence de l'effet Nordtvedt, une hypothétique oscillation d'une période de 28 jours dans la distance Terre–Lune, qui fut recherchée par des expériences fondées sur des lasers sans donner un quelconque résultat positif, « tua » dans l'œuf plusieurs théories concurrentes. Cet effet, prédit par Kenneth Nordtvedt, n'apparaîtrait que si l'énergie gravitationnelle présente dans le système Terre–Lune chutait d'une manière différente de la Terre et la Lune elles-mêmes. Pour un résumé des mesures relevées, lisez J. MÜLLER, M. SCHNEIDER, M. SOFFEL & H. RUDER, *Astrophysical Journal Letters* 382, p. L101, 1991. Cité en page 268.
- 246** Pratiquement tout ce qu'il est important de savoir en relativité générale est publié dans la revue *Classical and Quantum Gravity*. Cité en page 269.
- 247** Collisions et problèmes à plusieurs corps ... Cité en page 269.
- 248** Inflation et Univers primordial ... Cité en page 269.
- 249** L'étude du chaos dans les équations du champ d'Einstein en est juste à ses balbutiements. Lisez par exemple L. BOMBELLI, F. LOMBARDO & M. CASTAGNINO, Chaos in Robertson-Walker cosmology, [www.arxiv.org/abs/gr-qc/9707051](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9707051). Cité en page 269.
- 250** Le satellite de l'ESA baptisé « Planck » mesurera la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde. Cité en page 269.

- 251** Une bonne introduction au domaine des sursauts gamma en est donnée par S. KLOSE, J. GREINER & D. HARTMANN, Kosmische Gammastrahlenausbrüche – Beobachtungen und Modelle, Teil I und II, *Sterne und Weltraum* mars et avril 2001. Cité en page 270.
- 252** La base de données des solutions du champ est construite autour des travaux de A. Karlhede. Elle nous permet de faire la distinction entre des solutions tout en restreignant la quantité de calculs mathématiques nécessaires. Cité en page 270.
- 253** La torsion est présentée dans R. T. HAMMOND, New fields in general relativity, *Contemporary Physics* 36, pp. 103–114, 1995. Cité en page 271.
- 254** Trous de ver et topologies non triviales ...On peut en trouver une approche élémentaire dans T. DIEMER & M. HADLEY, Charge and the topology of spacetime, *Classical and Quantum Gravity* 16, pp. 3567–3577, 1999, ou www.arxiv.org/abs/gr-qc/9905069 et M. HADLEY, Spin half in classical general relativity, *Classical and Quantum Gravity* 17, pp. 4187–4194, 2000, ou www.arxiv.org/abs/gr-qc/0004029. Cité en page 270.
- 255** Voici une importante formulation de la relativité : A. ASHTEKAR, New variables for classical and quantum gravity, *Physical Review Letters* 57, pp. 2244–2247, 1986. Cité en page 270.
- 256** Un livre magnifiquement rédigé sur les connexions qui existent entre le Big Bang et la physique des particules est celui de I. L. ROZENTAL, *Big Bang – Big Bounce, How Particles and Fields Drive Cosmic Evolution*, Springer, 1988. Pour d'autres corrélations, lisez M. NAGANO & A. A. WATSON, Observations and implications of the ultrahigh energy cosmic rays, *Reviews of Modern Physics* 72, pp. 689–732, 2000. Cité en page 270.
- 257** L'enseignement bénéficiera en particulier de nouvelles formulations, d'une focalisation sur les principes et leurs conséquences, comme cela s'est produit pour la relativité restreinte, de descriptions plus élémentaires dans le domaine des champs faibles, et de recherches ultérieures sur la théorie de la relativité générale. Les récents ouvrages cités ci-dessus vont tous dans ce sens. Cité en page 270.
- 258** G. E. PRINCE & M. JERIE, Generalising Raychaudhuri's equation, in *Differential Geometry and Its Applications*, Proc. Conf., Opava (Czech Republic), 27-31 août 2001, Silesian University, Opava, 2001, pp. 235–242. Cité en page 271.
- 259** L'approche de Bekenstein en est une qui est notoire : il proposa une modification de la relativité générale qui corrige l'attraction universelle en $1/r^2$ aux distances galactiques. Cela a été réalisé dans le but d'expliquer les centaines de mesures des courbes de rotation galactique qui semblent exiger une telle modification. (Cette approche est dénommée théorie MOND pour *dynamique newtonienne modifiée*.) Une introduction en est donnée par JACOB D. BEKENSTEIN, The modified Newtonian dynamics – MOND – and its implications for new physics, *Contemporary Physics* 47, pp. 387–403, 2006, preprint sur www.arXiv.org/abs/astro-ph/0701848v2. Cité en page 271.
- 260** Le Système International d'Unités, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. Tous les nouveaux développements concernant les unités du SI sont publiés dans la revue *Metrologia*, éditée par ce même organisme. Preuve du lent cheminement d'une vieille institution, le BIPM inaugura son site Web en 1998 seulement, il est dorénavant accessible sur www.bipm.fr. Consultez également la page Web www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html, elle présente les biographies des personnes qui ont donné leur nom aux diverses unités employées. Le site de son homologue britannique, www.npl.co.uk/npl/reference, est nettement mieux : il fournit de nombreux détails ainsi que la version en langue anglaise des définitions des unités du SI. Cité en page 274.

- 261** La bible dans le domaine de la mesure du temps est représentée par l'œuvre magistrale en deux volumes de J. VANIER & C. AUOIN, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Un compte-rendu populaire se trouve dans TONY JONES, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.
Le site opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html donne un glossaire des termes employés dans cette discipline. Sur les mesures de longueur, voir ... Sur les mesures de précision du courant électrique, voir ... Sur les mesures de masse, notamment atomique, voir la [page 61](#). Sur les mesures de haute précision de la température, voir la [page 345](#). Cité en page [275](#).
- 262** Les préfixes non officiels furent proposés pour la première fois dans les années 1990 par Jeff K. Aronson de l'Université d'Oxford, et devraient se généraliser à l'avenir. Cité en page [276](#).
- 263** Pour plus d'informations sur les systèmes d'unités électromagnétiques, consultez le livre de référence de JOHN DAVID JACKSON, *Classical Electrodynamics*, 3ème édition, Wiley, 1998. Cité en page [279](#).
- 264** G. J. STONEY, On the physical units of nature, *Philosophical Magazine* 11, pp. 381–391, 1881. Cité en page [279](#).
- 265** D.J. BIRD & al., Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies, *Physical Review Letters* 71, pp. 3401–3404, 1993. Cité en page [280](#).
- 266** P. J. HAKONEN, R. T. VUORINEN & J. E. MARTIKAINEN, Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures, *Physical Review Letters* 70, pp. 2818–2821, 1993. Lisez également son article dans *Scientific American*, janvier 1994. Cité en page [280](#).
- 267** G. CHARPAK & R. L. GARWIN, The DARI, *Europhysics News* 33, pp. 14–17, janvier/février 2002. Cité en page [280](#).
- 268** Les valeurs mesurées des quantités physiques et les plages de valeurs qu'elles prennent sont assemblées dans HORST VÖLZ & PETER ACKERMANN, *Die Welt in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1996. Cité en page [281](#).
- 269** Lisez par exemple K. CODLING & L. J. FRASINSKI, Coulomb explosion of simple molecules in intense laser fields, *Contemporary Physics* 35, pp. 243–255, 1994. Cité en page [282](#).
- 270** A. ZEILINGER, The Planck stroll, *American Journal of Physics* 58, p. 103, 1990. Pouvez-vous découvrir un autre exemple similaire ? Cité en page [282](#).
- 271** L'horloge la plus précise construite en 2004, une horloge à fontaine atomique au césium, avait une précision d'une partie pour 10^{15} . Une précision plus élevée a été prévue comme étant bientôt possible, entre autres par M. TAKAMOTO, F.-L. HONG, R. HIGASHI & H. KATORI, An optical lattice clock, *Nature* 435, pp. 321–324, 2005. Cité en page [283](#).
- 272** J. BERGQUIST, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cité en page [283](#).
- 273** Consultez les informations sur les mésons D_s^\pm , données par le « particle data group » sur pdg.web.cern.ch/pdg. Cité en page [284](#).
- 274** Au sujet de la longue durée de vie du tantale 180, lisez D. BELIC & al., Photoactivation of $^{180}\text{Ta}^m$ and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope, *Physical Review Letters* 83, pp. 5242–5245, 20 décembre 1999. Cité en page [284](#).
- 275** Consultez l'étude donnée par L. JU, D. G. BLAIR & C. ZHAO, The detection of gravitational waves, *Reports on Progress in Physics* 63, pp. 1317–1427, 2000. Cité en page [284](#).
- 276** Lisez l'article clair et approfondi de G. E. STEDMAN, Ring laser tests of fundamental physics and geophysics, *Reports on Progress in Physics* 60, pp. 615–688, 1997. Cité en page [284](#).

- 277** D'après une communication privée de Richard Rusby, c'est la valeur de 1997, alors qu'elle était estimée à 99.975°C en 1989, comme l'indiquent GARETH JONES & RICHARD RUSBY, Official : water boils at 99.975°C, *Physics World* 2, pp. 23–24, septembre 1989, et R. L. RUSBY, Ironing out the standard scale, *Nature* 338, p. 1169, mars 1989. Pour plus d'informations sur les mesures de température, lisez la page 345. Cité en page 284.
- 278** J. SHORT, Newton's apples fall from grace, *New Scientist*, 2098, p. 5, 6 septembre 1997. Vous trouverez plus de détails dans R. G. KEESING, The history of Newton's apple tree, *Contemporary Physics* 39, pp. 377–391, 1998. Cité en page 285.
- 279** Ces divers concepts font même l'objet d'une norme internationale distincte, l'ISO 5725, dont la désignation est *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure*. Une excellente introduction en est donnée par JOHN R. TAYLOR, *An Introduction to Error Analysis : the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cité en page 286.
- 280** P. J. MOHR & B. N. TAYLOR, CODATA recommended values of the fundamental physical constants : 1998, *Reviews of Modern Physics* 59, p. 351, 2000. C'est la compilation des constantes résultant d'un ajustement international et recommandée pour l'usage international par le Comité de données pour la Science et la Technologie (CODATA), un membre du Conseil international pour la science, lequel compte également l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA), l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) et d'autres organisations. Le site Web de l'UICPA est www.iupac.org. Cité aux pages 286 et 287.
- 281** Les détails sont fournis dans la célèbre référence astronomique, KENNETH SEIDELMANN, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cité en page 291.
- 282** Pour plus d'informations concernant le nombre π , ainsi que d'autres constantes, la page Web oldweb.cecm.sfu.ca/pi/pi.html donne une grande quantité de données et de références. Elle possède également un lien vers la synthèse qui en est faite sur mathworld.wolfram.com/Pi.html et vers de nombreux autres sites sur ce sujet. Voici quelques formules simples sur π :

$$\pi + 3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n 2^n}{\binom{2n}{n}} \quad (297)$$

ou l'élégante formule découverte en 1996 par Bailey, Borwein et Plouffe :

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{16^n} \left(\frac{4}{8n+1} - \frac{2}{8n+4} - \frac{1}{8n+5} - \frac{1}{8n+6} \right). \quad (298)$$

Ce site développe aussi les nouvelles méthodes découvertes pour pouvoir calculer des chiffres binaires, choisis au préalable, de π sans avoir à évaluer tous les précédents. En outre, le nombre de chiffres (consécutifs) connus en 1999 était de plus de 1,2 million de millions, tel que le cite *Science News* 162, p. 255, 14 décembre 2002. Ces méthodes passent avec succès tous les tests aléatoires, comme l'explique le site Web mathworld.wolfram.com/PiDigits.html. Cependant, cette propriété, désignée *normalité*, n'a jamais reçu de démonstration, c'est la plus grande question qui demeure ouverte au sujet de π . Il est probable que la théorie de la dynamique du chaos conduise vers une solution à cette énigme dans les années à venir.

Une autre méthode permettant de calculer π ainsi que d'autres constantes a été découverte et publiée par D. V. CHUDNOVSKY & G. V. CHUDNOVSKY, The computation of classical constants, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 86, pp. 8178–8182, 1989. Les frères Chudnowsky avaient mis au point un supercalculateur dans l'appartement de Gregory avec environ 70 000 euros, et détenaient pendant plusieurs années le record du

calcul du plus grand nombre de chiffres de π . Ils engagèrent une rude compétition durant plusieurs décennies avec Kanada Yasumasa, qui a battu le record en 2000, en effectuant le calcul sur un supercalculateur de l'industrie. De nouvelles formules pour calculer π sont toujours occasionnellement découvertes.

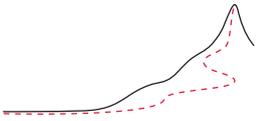
Pour le calcul de la constante d'Euler γ lisez aussi D. W. DETEMPLE, A quicker convergence to Euler's constant, *The Mathematical Intelligencer*, pp. 468–470, mai 1993.

Remarquez que nous en savons peu concernant les propriétés élémentaires de certains nombres, par exemple nous ne savons toujours pas si $\pi + e$ est un nombre rationnel ou pas ! (On pense qu'il ne l'est pas.) Voulez-vous devenir un mathématicien ? Cité en page 292.

Défi 401 r

Défi 402 s





INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS

Challenge 2, page 15: Un cône ou un hyperboloïde paraît également droit dans toutes les directions, à condition que le positionnement soit bon. Nous n'avons donc pas uniquement besoin de tourner l'objet, mais également de le déplacer. La meilleure méthode pour vérifier la planéité consiste à utiliser l'interférence entre un rayon lumineux cohérent entrant et partant. Si les franges d'interférence sont droites, la surface est plane. (Comment vous assurez-vous que le front d'onde du faisceau lumineux est plan ?)

Challenge 3, page 16: Une fraction de l'infini, c'est toujours l'infini.

Challenge 4, page 17: L'instant où le satellite Io pénètre dans l'ombre lors de la deuxième mesure se produit environ 1 000 s plus tard que prévu, par rapport à la première mesure. Puisque la Terre est éloignée d'environ $3 \cdot 10^{11}$ m de Jupiter et Io, nous retrouvons la valeur classique de la vitesse de la lumière.

Challenge 5, page 18: Pour compenser l'aberration, le télescope doit être incliné *dans* la direction du mouvement de la Terre, et pour compenser la parallaxe, dans la direction *opposée* au mouvement.

Challenge 6, page 18: Sinon la somme des vitesses serait supérieure à c .

Challenge 7, page 18: Le dessin le montre. L'observateur, la Lune et le Soleil forment un triangle. Lorsque la Lune est à demi pleine, l'angle formé par celle-ci est un angle droit. Donc le rapport des distances peut être déterminé, quoique non facilement, car l'angle au niveau de l'observateur est très proche également d'un angle droit.

Challenge 8, page 18: Des réflecteurs ont été déposés sur la Lune au cours des missions Apollo et Lunokhod. Ils sont utilisés pour réfléchir des impulsions de lumière laser de 35 ps envoyés dessus par des télescopes. Le chronométrage du voyage aller-retour donne alors la distance à la Lune. Bien sûr, la distance absolue n'est pas connue avec une haute précision, mais les variations le sont. L'épaisseur de l'atmosphère constitue la plus grande source d'erreur. Consultez les sites www.csr.utexas.edu/mlrs et ilrs.gsfc.nasa.gov.

Challenge 9, page 19: Fizeau utilisa un miroir situé à environ 8,6 km. Comme l'indique la figure, il avait juste à compter les dents de sa roue dentée et à mesurer sa vitesse de rotation entre le moment où la lumière partait dans une direction en passant par une dent et celui où elle revenait par la suivante.

Challenge 10, page 20: Ce temps doit être plus court que $T = l/c$, autrement dit plus court que 30 ps. C'était un obturateur *gazeux*, et non pas un solide. Il était déclenché par une impulsion de lumière rouge (indiquée sur la photographie) synchronisée par l'impulsion devant être photographiée. Pour certains matériaux, tel le gaz utilisé, une lumière forte peut conduire à un blanchissement, de telle façon qu'ils deviennent transparents. Pour plus de détails concernant cet obturateur et sa technique de déclenchement perfectionnée, lisez l'article des auteurs.

Challenge 11, page 20: Prenez simplement une photographie d'un éclair tout en déplaçant l'appareil photo horizontalement. Vous verrez qu'un éclair est composé de plusieurs décharges. Tout



FIGURE 98 Les raies originales publiées par Fraunhofer. (© Fraunhofer Gesellschaft)

cela montre qu'il est beaucoup plus lent que la lumière.

Si l'éclair se déplaçait quasiment aussi vite que la lumière elle-même, l'effet Doppler changerait sa couleur en fonction de l'angle auquel nous l'observons, le long de sa direction de mouvement. Un éclair proche changerait de couleur du sommet à sa base.

Challenge 12, page 21: Les ampoules les plus rapides étaient des particules subatomiques, telles que les muons, qui se désintègrent en émettant un photon, donc un minuscule flash lumineux. Toutefois, certaines étoiles émettent aussi des jets rapides de matière, qui se déplacent avec des vitesses comparables à celle de la lumière.

Challenge 13, page 21: La vitesse des neutrinos est la même que celle de la lumière à 9 décimales près, puisqu'on a observé que des neutrinos et de la lumière arrivent ensemble, à 12 secondes d'intervalle l'un de l'autre, après un voyage de 170 000 années-lumière d'une explosion de supernova.

Réf. 28

Challenge 15, page 24: Nous en débattons de la meilleure façon en montrant que les autres possibilités n'ont aucun sens.

Challenge 16, page 25: La coordonnée spatiale de l'événement où la lumière est réfléchi est $c(k^2 - 1)T/2$, la coordonnée de temps est $(k^2 + 1)T/2$. Leur rapport doit être v . Le résultat est donné en résolvant pour k .

Challenge 18, page 26: Le mouvement des ondes radio, du rayonnement infrarouge, ultraviolet et gamma ne peut également être arrêté. Nous avons suspecté dans le passé le neutrino, mais finalement on s'est aperçu qu'il a une masse et peut donc en principe être arrêté. Le mouvement de la gravité ne peut également pas être arrêté.

Challenge 20, page 28: $\lambda_R/\lambda_S = \gamma$.

Challenge 21, page 28: Pour passer de la lumière rouge (650 nm) à la lumière verte (550 nm), il faut une vitesse $v = 0,166c$.

Challenge 22, page 29: Les scientifiques mesurent le décalage des raies spectrales, tel le décalage de ce que nous appelons la raie Lyman- α de l'hydrogène, qui est émise (ou absorbée) lorsqu'un électron libre est capturé (ou éjecté) par un proton. C'est une des célèbres raies de Fraunhofer.

Page ??

Challenge 23, page 29: Les vitesses sont données par

$$v/c = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \quad (299)$$

ce qui implique que $v(z = -0,1) = 31 \text{ Mm/s} = 0,1c$ en direction de l'observateur et que $v(z = 5) = 284 \text{ Mm/s} = 0,95c$ en s'éloignant de l'observateur.

Un décalage vers le rouge de 6 implique une vitesse de $0,96c$; de telles vitesses apparaissent parce que, comme nous le verrons dans la section sur la relativité générale, les objets lointains s'éloignent de nous. Des décalages vers le rouge élevés sont observés uniquement pour des objets qui sont extrêmement éloignés de la Terre, et plus ils sont éloignés plus ils s'éloignent vite. Pour un décalage vers le rouge de 6, cela représente une distance de plusieurs milliards d'années-lumière.

Challenge 24, page 29: Aucun effet Doppler n'est perçu pour un observateur distant au repos par rapport à l'objet massif. Dans d'autres situations, il y a évidemment un effet Doppler, mais il n'est pas engendré par la déviation.

Challenge 25, page 29: La vitesse du son n'est pas invariante par rapport à la vitesse des observateurs. Par conséquent, l'effet Doppler pour le son confirme même – aux différences de mesures près – que le temps est *identique* pour des observateurs se déplaçant l'un par rapport à l'autre.

Challenge 28, page 31: À l'intérieur des tubes de téléviseurs couleurs (ils utilisent des tensions plus élevées que ceux en noir et blanc), les électrons sont décrits par $v/c \approx \sqrt{2 \cdot 30/511}$ ou $v \approx 0,3c$.

Challenge 29, page 31: Si vous pouvez imaginer cela, publiez-le. Les lecteurs seraient enchantés de découvrir cette histoire.

Page ??

Challenge 31, page 32: Les relations entre l'invariance par rapport à l'observateur et la propriété de vitesse limite semblent être valides en général dans la nature, comme indiqué dans la section ?? Cependant, un argument définitif et achevé n'est pas encore à portée de main. Si vous en avez un, publiez-le !

Challenge 34, page 34: Si la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, aucun observateur ne peut prétendre être plus au repos qu'un autre (tant que l'espace-temps reste plat), parce qu'il n'existe aucune observation issue de l'électrodynamique, de la mécanique ou de tout autre domaine de la physique qui permette de faire cette affirmation.

Challenge 37, page 36: Le fait de redessiner la Figure 9 de la page 25 pour l'autre observateur permet de conclure.

Challenge 38, page 36: La valeur anthropique est atteinte dans les accélérateurs de particules, la valeur de la nature se trouve dans les rayons cosmiques de plus forte énergie.

Challenge 39, page 38: L'ensemble des événements se comporte comme une variété, parce qu'il se comporte comme un espace quadridimensionnel : il possède une infinité de points autour de n'importe quel point de départ donné, et les distances se comportent de manière familière, les limites se comportent de la manière usuelle. Il se distingue par une dimension supplémentaire, et par le signe dans la définition de la distance : ainsi, à proprement parler, c'est une variété riemannienne.

Challenge 40, page 38: L'infini est évident, comme l'est l'ouverture. Donc l'équivalence topologique peut être montrée en imaginant que la variété est constituée de caoutchouc et est enveloppée autour d'une sphère.

Challenge 41, page 40: Le cône de lumière demeure inchangé, donc la causalité aussi.

Challenge 42, page 40: Dans une telle situation, la division de l'espace-temps autour d'un observateur inertiel entre le futur, le passé et l'ailleurs ne se tiendrait plus, et le futur pourrait influencer le passé (comme le ferait remarquer un autre observateur).

Challenge 45, page 43: Le rapport prévu par un raisonnement naïf est de $(1/2)^{(6,4/2,2)} = 0,13$.

Challenge 46, page 43: Le facteur de dilatation du temps pour $v = 0,9952c$ est 10,2, ce qui donne un temps propre de $0,62 \mu\text{s}$. Donc le rapport prédit par la relativité restreinte est de $(1/2)^{(0,62/2,2)} = 0,82$.

Challenge 47, page 44: Envoyez un signal lumineux de la première horloge jusqu'à la seconde, et qui revient à la première. Prenez le temps moyen entre le départ et l'arrivée, puis comparez-le avec le temps lors de la réflexion. Répétez cela plusieurs fois. Regardez aussi la Figure 9.

Challenge 50, page 45: Astuce : pensez à différentes directions de visée.

Challenge 51, page 45: Pas avec les méthodes expérimentales actuelles.

Challenge 53, page 46: Indice : soyez prudents avec la définition de la « rigidité ».

Challenge 55, page 46: Quand la pièce glissante qui s'éloigne traverse le décrochement, l'ampoule ne peut pas rester allumée, quelle que soit la vitesse, si cette pièce glissante est plus courte que le décrochement. C'est étrange à première vue, car la pièce n'allume pas l'ampoule même à des vitesses élevées, alors que dans le référentiel de la pièce il y a un contact aux deux extrémités. La raison est que, dans cette situation, il n'y a pas assez de temps pour envoyer le signal à la batterie que le contact est fait, de telle façon que le courant ne peut pas commencer à s'écouler.

Supposez que le courant s'écoule à une vitesse u , qui est de l'ordre de c . Alors, comme l'a montré Dirk Van de Moortel, la lampe s'éteindra si la longueur de la pièce glissante l_{glisseur} et la longueur du décrochement $l_{\text{décro.}}$ vérifient $l_{\text{glisseur}}/l_{\text{décro.}} < \gamma(u + v)/u$. Consultez également la référence citée.

Pour une pièce glissante s'approchant du décrochement et de l'ampoule, la situation est différente : une pièce plus courte que le décrochement *peut* laisser la lampe allumée tout le temps, comme le souligne S.R. Madhu Rao.

Pourquoi les débats sont-ils souvent houleux ? Certaines personnes prétendront (faussement) que ce problème n'est pas physique, d'autres diront que les équations de Maxwell sont nécessaires. D'autres encore affirmeront que ce problème est absurde parce que, pour des longueurs supérieures de la pièce glissante, la réponse allumé/éteint dépend de la valeur précise de la vitesse. Pourtant, c'est vraiment le cas dans cette situation.

Challenge 56, page 47: Oui, la corde cède. Dans des véhicules accélérés, la distance varie, comme indiqué plus loin dans ce texte.

Challenge 57, page 47: Le sous-marin coulera. Le sous-marin rapide sera même plus lourd, car son énergie cinétique s'ajoute à son poids. L'effet de contraction pourrait le rendre plus léger, comme le maintient le capitaine, mais d'une quantité plus petite. Le poids total – en considérant la direction vers le haut comme étant le sens positif – est donné par $F = -mg(\gamma - 1/\gamma)$.

Challenge 58, page 47: Un sous-marin relativiste fondrait instantanément à cause du frottement avec l'eau. Sinon, il s'envolerait loin de la planète car il se déplace plus vite que la vitesse de libération. Et il produirait d'autres catastrophes.

Challenge 59, page 50: Cette question confond l'observation de la contraction de Lorentz avec sa mesure. Un collier de perles relativiste devient plus court, mais ce raccourcissement peut seulement être mesuré, et pas photographié. Les tailles mesurées des perles correspondent à des ellipsoïdes aplatis aux vitesses relativistes. Le collier observé ressemble à des sphères qui se recouvrent partiellement.

Challenge 63, page 50: Oui, le vieillissement dans une vallée est ralenti par rapport aux sommets montagneux. Cependant, la sensation propre du temps ne s'en trouve pas affectée. On ne connaît pas la raison de l'apparition des cheveux gris. Si la synchronisation est génétique, le temps propre où cela se produit est le même dans les deux emplacements.

Challenge 64, page 51: Il n'existe aucune manière de placer un observateur aux points spécifiés. La vitesse propre peut être définie uniquement pour des observateurs, c'est-à-dire pour des entités qui peuvent transporter une horloge. Ce n'est pas le cas pour des images.

Challenge 65, page 52: Utilisez simplement la géométrie élémentaire pour montrer cela.

Challenge 66, page 52: De façon plus intéressante, l'horizon peut aisément se déplacer plus vite que la lumière, si vous bougez la tête de manière appropriée, comme le peut l'extrémité de l'arc-en-ciel.

Challenge 69, page 56: La relativité rend les arguments du défi 130 irréfutables.

Challenge 74, page 59: La collision du bas dans la Figure 33 montre directement ce résultat, grâce à la conservation de l'énergie. Pour la collision du haut, cette conséquence se tient également, si nous partons de la conservation de la quantité de mouvement $\gamma m v = \Gamma M V$ et de la conservation de l'énergie $(\gamma + 1)m = \Gamma M$.

Challenge 76, page 60: L'annihilation de la matière et de l'antimatière.

Challenge 83, page 64: Tournez simplement la partie gauche de la Figure 36 un petit peu dans le sens anti-horaire.

Challenge 84, page 65: Dans les collisions entre des charges relativistes, une partie de l'énergie est rayonnée vers l'extérieur sous forme de lumière, de telle façon que les particules perdent effectivement de l'énergie.

Challenge 85, page 66: Probablement pas, puisque toutes les relations entre les quantités physiques sont désormais connues. Toutefois, vous pourriez le vérifier vous-même : on ne sait jamais. Il est digne de mentionner que la force maximale dans la nature fut découverte (dans ce texte) après être demeurée cachée pendant plus de 80 ans.

Challenge 86, page 68: Exprimez les quadrivecteurs U' et U puis extrayez-en v' comme une fonction de v et la vitesse de coordonnée relative V . Faites alors un changement de variable.

Challenge 87, page 68: Tout mouvement se produisant à la vitesse de la lumière.

Challenge 88, page 69: $b^0 = 0$, $b^i = \gamma^2 a_i$.

Challenge 91, page 70: Pour des particules ultra-relativistes, comme pour des particules sans masse, nous avons $E = pc$.

Challenge 92, page 71: Indice : évaluez P_1 et P_2 dans le référentiel inertiel pour une particule.

Challenge 93, page 71: Utilisez la définition $\mathbf{f} = d\mathbf{p}/dt$ et la relation $\mathbf{K}U = 0 = \mathbf{f}\mathbf{v} - dE/dt$ valables pour des forces qui préservent la masse inertielle.

Challenge ??, page ??: Oui, nous pouvons voir un tel objet : l'effet projecteur et l'effet Doppler n'engendrent pas l'invisibilité. Cependant, une partie de cet objet, à savoir la région qui tourne en s'éloignant de l'observateur, peut devenir très sombre.

Challenge 121, page 82: L'énergie contenue dans le carburant doit être comparable à la masse au repos de la moto, multipliée par c^2 . Puisque le carburant possède une masse beaucoup plus importante que l'énergie, cela soulève un problème insurmontable.

Challenge 123, page 83: L'accélération constante et la gravité sont similaires dans leurs effets, comme nous le discuterons dans la section sur la relativité générale.

Challenge 129, page 85: Oui, c'est vrai.

Challenge 130, page 85: Il est plat, comme un plan.

Challenge 132, page 86: Oui, néanmoins cet effet est très petit et dépend de la position du Soleil. En réalité, ce qui est blanc à une hauteur donnée n'est pas blanc à une autre.

Challenge 134, page 87: Localement, la lumière se déplace toujours à la vitesse c .

Challenge 135, page 87: En s'éloignant de la Terre, g décroît. Il est effectivement nul au terme d'une distance suffisante.

Challenge 136, page 88: La lumière est nécessaire pour déterminer la distance et pour synchroniser des horloges, donc il n'y a aucun moyen de mesurer la vitesse de la lumière d'un point à un autre seulement. Le mouvement inverse nécessite d'être pris en compte. Cependant, certaines

affirmations sur la vitesse à sens unique de la lumière peuvent toujours être faites (regardez math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SR/experiments.html). Toutes les expériences sur la vitesse à sens unique de la lumière réalisées jusqu'à présent sont cohérentes avec une valeur isotrope qui est égale à la vitesse à double sens. Toutefois, aucune expérience n'est capable d'éliminer un ensemble de théories dans lesquelles la vitesse à sens unique de la lumière est anisotrope et donc différente de la vitesse à double sens. Toutes les théories issues de ce groupe possèdent la propriété que la vitesse du *voyage aller-retour* de la lumière est isotrope dans un référentiel inertiel quelconque, mais que la vitesse à *sens unique* est isotrope uniquement dans un référentiel de prédilection lié à l'« éther ». Dans toutes ces théories, dans tous les référentiels inertiels, les effets du transport d'horloge ralentie compensent exactement les effets de la vitesse à sens unique anisotrope de la lumière. Toutes ces théories sont expérimentalement indiscernables de la relativité restreinte. En pratique, cependant, la vitesse à sens unique de la lumière a été mesurée et est constante. Mais un léger soupçon plane encore.

Challenge 137, page 89: Consultez la référence citée. Le facteur 2 a été omis ici, pouvez-vous le déduire ?

Challenge 140, page 90: Bien que de nombreuses publications prétendent examiner ce problème, il y a également suffisamment de physiciens qui font remarquer cette impossibilité. La mesure d'une variation de la vitesse de la lumière n'est pas très éloignée de la mesure de la vitesse à sens unique de la lumière : celle-ci n'est pas possible. Cependant, les discussions sur ce sujet sont houleuses, ce problème prendra beaucoup de temps avant d'être enterré.

Challenge 141, page 92: La loi en l'inverse du carré de la gravitation ne se conforme pas au principe de la vitesse maximale, nous ne voyons pas très bien comment elle change lorsqu'on se place dans la situation d'un observateur mobile.

Challenge 142, page 97: Prenez une surface se déplaçant à la vitesse de la lumière, ou une surface définie avec une précision inférieure à la longueur de Planck.

Challenge 143, page 103: Les ombres non plus ne restent pas parallèles sur des surfaces courbes. Le fait d'oublier cela peut conduire à d'étranges méprises : de nombreux arguments qui ont prétendument « prouvé » que les hommes n'ont jamais été sur la Lune négligent cette réalité lorsqu'ils font allusion aux photographies prises là-bas.

Challenge 144, page 105: Si vous en découvrez une, publiez-la puis envoyez-la à l'auteur de ce livre.

Challenge 146, page 111: Si c'est le cas, publiez-la puis envoyez-la à l'auteur de ce livre.

Challenge 147, page 113: Par exemple, il est possible d'imaginer une surface qui possède une forme tellement complexe qu'elle traversera tous les atomes de l'Univers à une vitesse quasiment identique à celle de la lumière. Une telle surface n'est pas physique, car il est impossible d'imaginer des observateurs placés en tous ses points qui se déplacent de cette manière, tous en même temps.

Challenge 148, page 114: Nombreux sont ceux qui ne croient pas encore en ces limites, ainsi toute proposition de contre-exemple ou de paradoxe supplémentaire vaut le coup d'être publiée.

Challenge 150, page 119: Si c'est le cas, publiez-le puis envoyez-le à l'auteur de ce livre.

Challenge 153, page 121: Si c'est le cas, publiez-la puis envoyez-la à l'auteur de ce livre.

Challenge 155, page 124: Ils sont accélérés vers le haut.

Challenge 156, page 124: Dans la vie quotidienne, (a) la surface de la Terre peut être considérée comme plate, (b) les effets dus à la courbure verticale sont négligeables, et (c) les effets transversaux sur la longueur sont insignifiants.

Challenge 160, page 125: Pour un bus puissant, l'accélération est de 2 m/s^2 , pour une accélération sur 100 m, cela fait une variation relative de fréquence de $2,2 \cdot 10^{-15}$.

Challenge 161, page 126: Oui, l'absorption et l'émission de lumière sont toujours des phénomènes qui convertissent, sans aucune perte, l'énergie en masse et vice versa.

Challenge 164, page 127: Pour un rayon lumineux, dans les deux cas la situation est décrite par un environnement dans lequel les masses « chutent » du côté opposé à la direction du mouvement. Si la Terre et les parois du train n'étaient pas visibles – par exemple si elles étaient masquées par un épais brouillard –, il n'y aurait aucune manière de déterminer par l'expérience dans quelle situation on se trouve. Ou encore, si un observateur était enfermé dans une boîte, il ne pourrait pas faire de distinction entre une accélération constante et une gravité constante. (Important : cette impossibilité s'applique uniquement si l'observateur possède une taille négligeable !)

Challenge 170, page 129: Les deux chutent vers le centre de la Terre. Des particules en orbite sont également en chute libre, leur distance relative varie de la même façon, comme expliqué dans ce texte.

Challenge 173, page 131: Un tel graphique exigerait d'avoir quatre, voire cinq dimensions.

Challenge 175, page 133: L'énergie due à la rotation peut être négligée par rapport à toutes les autres énergies présentes dans ce problème.

Challenge 185, page 138: Des nucléons différents, des noyaux distincts, des atomes différents et des molécules différentes ont des pourcentages distincts d'énergie de liaison par rapport à la masse totale.

Challenge 187, page 140: En chute libre, la bouteille et l'eau restent au repos l'une par rapport à l'autre.

Challenge 188, page 141: Laissez tomber ce dispositif. Le fil élastique est alors suffisamment fort pour tirer la balle dans la coupe. Lisez M. T. WESTRA, Einsteins verjaardagscadeau, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* 69, p. 109, avril 2003. Dans le dispositif original, un ressort était également attaché au fil.

Challenge 189, page 141: Mis à part les chaises et les tables déjà mentionnées, les bretelles, les ceintures et les sacs plastique sont des dispositifs antigravitants importants.

Challenge 195, page 141: Ils utilisent une balance à ressorts et mesurent le temps d'oscillation. À partir de ce dernier, ils déduisent leur masse.

Challenge 196, page 142: La pomme frappe la paroi environ une demi-heure après.

Challenge 200, page 143: Avec \hbar comme moment cinétique minimum, nous obtenons environ $100 T_m$.

Challenge 201, page 143: Non. La diffraction des faisceaux ne le permet pas. La théorie quantique aussi rend cela impossible : des états liés de particules sans masse, tels des photons, ne sont pas stables.

Challenge 203, page 144: Le rayon orbital est de 4,2 rayons terrestres, ce qui fait env. $38 \mu\text{s}$ chaque jour.

Challenge 204, page 145: Pour être honnête, les expériences ne sont pas cohérentes. Elles supposent qu'une certaine autre propriété de la nature est constante – comme la taille atomique – laquelle dépend en fait aussi de G . Nous en dirons plus sur ce sujet à la page 270.

Challenge 205, page 145: Bien évidemment, d'autres dimensions spatiales pourraient exister, qui peuvent être décelées uniquement à l'aide d'appareils de mesure. Par exemple, des dimensions cachées pourraient se manifester à des énergies non accessibles dans la vie courante.

Challenge 215, page 153: Puisqu'il n'y a pas de masse négative, les champs gravitoélectriques ne peuvent pas être neutralisés. À l'inverse, les champs électriques peuvent être neutralisés autour d'un conducteur métallique avec une cage de Faraday.

Challenge 228, page 162: Nous devons mesurer le temps d'arrivée des pulsations qui traversent la Terre à l'emplacement de plusieurs détecteurs d'ondes gravitationnelles sur Terre.

Challenge 247, page 170: Non, une ligne ne peut pas avoir une courbure intrinsèque. Un tore est véritablement intrinsèquement courbé, il ne peut pas être découpé puis réduit à une feuille de papier plate.

Challenge 269, page 179: La trace du tenseur d'Einstein est égale au scalaire de Ricci négatif, il est donc la négation de la trace du tenseur de Ricci.

Challenge 286, page 191: En réalité, dans la relativité générale, l'énergie gravitationnelle ne peut pas être localisée dans l'espace, contrairement à ce que nous pourrions attendre et exiger d'une interaction.

Challenge 299, page 200: Il y a une bonne chance pour qu'une certaine forme ténue d'un jet puisse exister, mais sa détection ne sera pas facile.

Challenge 303, page 205: La vitesse est mesurée avec l'effet Doppler, généralement en observant la raie Lyman- α . La distance est beaucoup plus difficile à expliquer. La mesure des distances est une science à part entière, selon qu'on mesure des distances d'étoiles dans la Galaxie, d'autres galaxies ou de quasars. N'importe quel ouvrage d'astronomie ou d'astrophysique permet d'en apprendre plus.

Challenge 306, page 214: Le lapin observe que tous les autres lapins semblent s'éloigner de lui.

Challenge 312, page 219: Tenez-vous dans une forêt en hiver, et essayez de regarder l'horizon. Si la forêt est très profonde, vous verrez des troncs d'arbre dans toutes les directions. Si la forêt est de profondeur finie, vous avez une chance d'observer l'horizon.

Challenge 328, page 235: L'Univers ne peut pas être observé depuis l'extérieur. Il ne possède donc pas de propriétés d'état.

Challenge 333, page 238: L'aplatissement dû à la rotation exige la présence d'autres masses pour fournir l'arrière-plan par rapport auquel se produit cette rotation.

Challenge 363, page 253: Cela se produit de la même manière que le champ électrique statique qui s'échappe d'une charge. Dans les deux cas, les champs transversaux ne sortent pas, mais les champs longitudinaux le font. La théorie quantique en apporte la raison profonde. Des particules réelles de rayonnement, qui sont responsables des champs transversaux libres, ne peuvent pas quitter un trou noir à cause de la vitesse de libération. Cependant des particules virtuelles le peuvent, car leur vitesse n'est pas limitée par la vitesse de la lumière. Tous les champs longitudinaux statiques sont engendrés par des particules virtuelles. En outre, il y a une deuxième raison. Le champ classique peut s'échapper d'un trou noir parce que, pour un observateur extérieur, tout ce qui constitue le trou noir est perpétuellement en train de chuter, et aucun constituant n'a véritablement traversé l'horizon. Les sources du champ ne sont donc pas encore hors d'atteinte.

Challenge 367, page 254: Cette description retrace tout cela. Une impression visuelle peut en être trouvée dans la salle consacrée aux trous noirs au « Deutsches Museum » de Munich.

Challenge 376, page 261: Tout dispositif qui utilise des miroirs exige la prise en compte de l'électrodynamique. Sans celle-ci, les miroirs sont inconcevables.

Challenge 378, page 263: La théorie de la Terre creuse est correcte si les distances usuelles sont modifiées de manière cohérente selon $r_{tc} = R_{\text{Terre}}^2/r$. Cela implique un quantum d'action qui décroît en direction du centre de la sphère creuse. Alors, il n'existe aucune manière de préférer une description plutôt que l'autre, excepté pour des raisons de simplicité.

Challenge 392, page 285: Il est probable que la quantité ayant la plus grande variation soit la masse, où un préfixe pour $1 \text{ eV}/c^2$ serait utile, de même que pour la masse totale présente dans l'Univers, qui est environ 10^{90} fois plus grande.

Challenge 393, page 286: La formule avec $n - 1$ est un choix plus convenable. Pourquoi ?

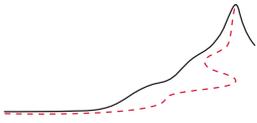
Challenge 396, page 289: Non, seulement les propriétés des parties de l'Univers. L'Univers lui-même ne possède aucune propriété, comme indiqué à la page ??.

Challenge 397, page 291: Ce ralentissement progresse en *proportion quadratique* avec le temps, parce que chaque nouveau ralentissement s'ajoute au précédent !

Challenge 398, page 293: Le double de ce nombre, le nombre constitué de la suite de tous les nombres pairs, etc.

Challenge 401, page 319: Cela pourrait être résolu avec une astuce similaire à celle utilisée pour l'irrationalité de chacun des deux termes de la somme, mais personne n'en a décelée une.

Challenge 402, page 319: Il y a toujours de nombreuses découvertes qui attendent d'être révélées en mathématiques modernes, particulièrement en topologie, en théorie des nombres et en géométrie algébrique. Les mathématiques ont un avenir radieux.



CRÉDITS

REMERCIEMENTS

Nombreux sont ceux qui ont su entretenir leur don de curiosité et qui ont apporté leur soutien afin de mener à bien ce projet. Par-dessus tout, Saverio Pascazio a été – présent ou non – une référence constante pour ce projet. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, mes parents Peter et Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara et Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller et, avant toutes choses, ma femme Britta ont tous apporté de précieux conseils et encouragements.

De nombreuses personnes ont aidé ce projet grâce à leurs précieuses informations. Parmi les plus pertinentes, il y a celles de Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, les innombrables améliorations apportées par Bert Sierra, les suggestions détaillées de Claudio Farnati, les nombreuses améliorations d'Eric Sheldon, les avis développés d'Andrew Young, l'aide persévérante et les conseils de Jonatan Kelu, les corrections d'Elmar Bartel, et en particulier l'aide considérable, passionnée et consciencieuse d'Adrian Kubala.

Des renseignements importants ont été fournis par Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermi, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Steve Carlip, Corrado Massa, Tom Helmond, Gary Gibbons, Heinrich Neumaier, Peter Brown, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksmá, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Nammouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Sergei Kopeikin, et de nombreuses autres personnes qui souhaitent rester dans l'anonymat.

Les outils logiciels ont été affinés grâce à l'aide considérable de Michael Zedler et Achim Bluemensath sur les polices et la mise en page, et avec l'assistance répétée et précieuse de Donald Arseneau. L'aide provient également de Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus

Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccane, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk et Alexander Grahn.

Toutes les illustrations et animations dans ce texte ont été mises à disposition par leurs détenteurs des droits d'auteurs. Je les remercie tous chaleureusement. Ils sont cités dans les sections des crédits photographiques et filmographiques. Plus particulièrement, Lucas Barbosa et José Antonio Díaz Navas ont produit des animations spécialement pour ce livre, et Luca Gastaldi, Antonio Martos et Ulrich Kolberg ont composé des images spécifiquement pour celui-ci. La mise en page et le design de ce livre sont dus à la consultation professionnelle de Ulrich Dirr. Les suggestions et l'assistance de ma femme Britta comptent également pour beaucoup dans le design de l'ouvrage et de son site Web.

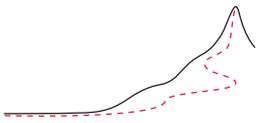


Depuis Mai 2007, la Klaus Tschira Foundation supporte généreusement l'édition et la publication électronique du livre *Motion Mountain*.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

La photographie du ciel nocturne de la [page 14](#) est protégée par les droits d'auteur et est aimablement fournie par Anthony Ayiomamitis ; elle est consultable sur son magnifique site Web www.perseus.gr. La photographie de la reconstitution de l'expérience de Fizeau à la [page 19](#) est protégée par les droits d'auteur par AG Didaktik und Geschichte der Physik, Universität Oldenburg, et est aimablement fournie par Jan Frercks, Peter von Heering et Daniel Osewold. Le cliché d'une impulsion lumineuse sur la [page 19](#) est aimablement fourni et est protégé par les droits d'auteur par Tom Mattick. Les données et les images de l'expérience de Michelson–Morley à la [page 34](#) sont gracieusement offertes et sont la propriété de Stephan Schiller. Les images relativistes du voyage à travers le Stonehenge simplifié de la [page 48](#) sont la propriété de Nicolai Mokros et sont aimablement fournies par Norbert Dragon. Les scènes relativistes de la [page 49](#) et [49](#) sont gracieusement offertes et sont la propriété de Daniel Weiskopf. La photographie de la stalactite de la [page 93](#) est protégée par les droits d'auteur ; elle est aimablement fournie par Richard Cindric et est consultable sur le site Web www.kcgrotto.org. Les figures de galaxies des pages [197](#), [197](#), [198](#), [199](#), [199](#), [200](#), [204](#), [219](#), [231](#) et [231](#) sont gracieusement offertes par la NASA. Les cartes de l'Univers de la [page 206](#) et le diagramme de Hertzsprung–Russell de la [page 209](#) sont la propriété de Richard Powell et sont aimablement fournis par lui, ils sont tirés de son site Web www.atlasoftheuniverse.com. Les portraits historiques des physiciens reproduits dans ce livre ne sont pas protégés par des droits d'auteur, sauf lorsque cela est mentionné. Tous les schémas qui ne sont pas explicitement mentionnés sont protégés par le droit d'auteur © 1997 – 2010 de Christoph Schiller. Si vous soupçonnez qu'un droit d'auteur est attribué ou obtenu de manière incorrecte, cela n'est pas intentionnel et vous êtes aimablement invités à en faire part à l'auteur.





INDEX DES NOMS

A

ABRAHAM

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où la personne est présentée plus en détail.

A

Abraham Michelson, Albert *33*
Abramowicz, M.A. *314*
Ackermann, Peter *317*
Adelberger, E. *315*
Adenauer, Konrad *115*
Adler, C.G. *300*
Aetius *196, 309*
Ahmad, Q.R. *297*
Aichelburg, P.C. *313*
Alanus de Insulis *241*
Alcubierre, M. *305*
Allen, Woody *204*
Alspector, J. *295*
Alvåger, T. *295*
Anderson *182*
Anderson, I.M. *308*
Anderson, J.D. *301*
Anderson, J.L. *308*
Antonini, P. *295, 297*
Antoon Lorentz, Hendrik *33*
Aristarque *294*
Aristarque de Samos *18*
Aristote *294*
Arnowitt *190*
Aronson, Jeff *329*
Aronson, Jeff K. *317*
Arseneau, Donald *329*
Ashtekar, A. *301, 316*
Ata Masafumi *329*
Audoin, C. *317*
Augel, Barbara et Edgar *329*
Ayiomamitis, Anthony *330*

B

Babinet, Jacques *275*
Bachem *127*
Baez, John *329*
Baggett, N. *295*
Bagnoli, Franco *329*
Bailey, J. *297*
Bailey, J.M. *295*
Banday, A.J. *313*
Barberi Gnecco, Bruno *329*
Barbosa, Lucas *330*
Barbour, Julian *312*
Barrow, J.D. *313*
Bartel, Elmar *329*
Bartocci, Umberto *65*
Basri, G. *309*
Bateman, H. *297*
Bautista, Ferdinand *329*
Beaty, William *329*
Becker, A. *310*
Bedford, D. *306*
Beeksma, Herman *329*
Behroozi, C.H. *296*
Bekenstein, J.D. *314*
Bekenstein, Jacob D. *316*
Bekenstein, Jakob *251*
Belfort, François *329*
Belic, D. *317*
Bender, P.L. *308*
Bennet, C.L. *312*
Bergquist, J. *317*
Bertotti, B. *308*
Bessel, Friedrich Wilhelm *220*
Besso, Michele *66*
Beyer, Lothar *329*
Biggar, Mark *329*
Bilaniuk, O.M. *299*
Bilaniuk, O.M.P. *299*
Bird, D.J. *317*
Birkhoff *185*
Blair, D.G. *317*
Blair, David *305*
Blandford, R. *313*
Blandford, R.D. *306*
Blau, Stephen *40*
Bloser, P.F. *306*
Blumensath, Achim *329*
Bohr, Niels *22*
Bombelli, L. *315*
Bombelli, Luca *329*
Bondi, H. *303*
Bondi, Hermann *296*
Bonnor *161*
Bonnor, W.B. *307, 313*
Boone, Roggie *329*
Boughn, S.P. *298*
Boyce, K.R. *299*
Bradley *18*
Bradley, James *17*
Braginsky, V.B. *306, 307*
Brahm, D.E. *315*
Brandes, John *329*
Brault, J.W. *303*
Braxmeier, C. *295*
Bray, H.L. *309*
Brebner, Douglas *329*
Brecher, K. *294, 295*
Brehme, R.W. *300*
Briatore *127*
Briatore, L. *304*

B

BRIGGS

Briggs, F. 313
 Bronstein, M. 313
 Bronstein, Matvey 239
 Brown, J.M. 299
 Brown, Peter 121, 329
 Bruce, Tom 329
 Bruyn, A.G. de 313
 Buchmann, Alfons 329
 Budney, Ryan 329
 Bunn, E.F. 313
 Burbidge, G. 311
 Burgay, M. 309
 Bäßler, S. 315
 Böhncke, Klaus 329
 Börner, G. 310
 Börner, H.G. 299

C

Caianiello, E.R. 302
 Camilo, F. 309
 Carilli, C.L. 313
 Carlip, Steve 121, 302, 312, 329
 Carneiro, S. 312
 Carr, Jim 329
 Carter 248
 Castagnino, M. 315
 Caves, C.M. 307
 Celsius, Anders 284
 Charpak, G. 317
 Cheseaux, Jean Philippe Loÿs
 de 220
 Chinnapared, R. 314
 Choquet-Bruhat, Yvonne 308
 Christodoulou, D. 314
 Christophe Colomb 237, 238
 Chudnovsky, D.V. 318
 Chudnovsky, G.V. 318
 Cindric, Richard 93, 330
 Ciufolini, I. 306, 308
 Ciufolini, Ignazio 150, 154, 306
 Clancy, E.P. 304
 Clausius, Rudolph 234, 235
 Clerk Maxwell, James 37
 Codling, K. 317
 Cohen, M.H. 298
 Colazingari, Elena 329
 Conti, Andrea 329
 Conway, J. 313
 Copernicus, Nicolaus 18

Cordero, N.A. 308
 Corongiu, A. 309
 Corovic, Dejan 329
 Costa, S.S. 299
 Costella, J.P. 299
 Couch, E. 314
 Cox, A.N. 309
 Crawford, F. 309
 Crespi, Roberto 329

D

D'Amico, N. 309
 Dahlman, John 329
 Dalton, K. 309
 Damour, T. 315
 Damour, Thibault 268
 Danecek, Petr 329
 Darley, Vincent 330
 Darre, Daniel 329
 Davidson, C. 304
 De Pretto, Olinto 22, 65
 de Sitter, Willem 168
 Deaver, B.S. 287
 Deser 190
 Deshpande, V.K. 299
 Deslattes, R.D. 299
 Desloge, E.A. 300
 DeTemple, D.W. 319
 Detweiler, S. 313
 Dewey, M.S. 299
 DeWitt-Morette, Cecile 308
 Dicke, R.H. 306
 Dickey, J.M. 310
 Diehl, Helmut 264
 Diemer, T. 316
 Dietze, H. 296
 Diez, Ulrich 330
 DiFilippo, F. 299
 DiFilippo, Frank 329
 Dillard-Bleick, Margaret 308
 Dirr, Ulrich 330
 Dittus, H. 309, 315
 Dobra, Ciprian 329
 Domenico Cassini, Giovanni
 16
 Doppler, Christian 27
 Dorfi, E.A. 310
 Doroshkevich 208
 Doroshkevich, A.G. 310

Dragon, Norbert 47, 48, 329,
 330
 Droste, J. 133, 304
 Duguay 19
 Duguay, M.A. 294
 Dumont, Jean-Paul 294, 309,
 310
 Dutton, Z. 296
 Dyson, F.W. 304
 Dyson, Freeman 329
 Díaz Navas, José Antonio 330

E

Eötvös, Roland von 145
 Eckstein, G. 297
 Eddington, A.S. 304
 Ehlers, J. 312
 Ehrenfest, P. 300
 Einstein, A. 307, 312
 Einstein, Albert 22, 23, 24, 38,
 55, 61, 65, 123, 127, 130, 140,
 148, 183, 185, 213, 262, 269,
 272, 295, 300, 302
 Einstein, Édouard 130
 Ellis, G.F.R. 304, 311, 312
 Els, Danie 330
 Elswijk, Herman B. 329
 Emelin, Sergei 329
 Empédocle 16
 Eötvös, R. von 306
 Eshelby, J. 296
 Euler, Leonhard 171
 Everitt, C.W. 287
 Everitt, F. 315
 Exton, A. 314

F

F. Fitzgerald, George 37
 Faestermann, T. 310
 Fairbanks, J.D. 287
 Fairhurst, S. 301
 Falco, E.E. 312
 Falk, G. 303
 Farinati, Claudio 329
 Farley, F.J.M. 295
 Fasching, G. 196
 Faulkner, A.J. 309
 Fekete, E. 306
 Ferreira, P.G. 313

F

FERMANI

Fermani, Antonio 329
 Feynman, R.P. 309
 Feynman, Richard 188
 Figer, D. 309
 Finkenzeller, Klaus 329
 Fischer, Ulrike 329
 Fizeau, Hippolyte 19
 Fließbach, Torsten 303
 Floyd, R.M. 314
 Ford, E.C. 306
 Foster, James 302
 Fowler, E.C. 295
 Fowler, L.A. 307
 Frank, F.C. 296
 Frasiniski, L.J. 317
 Fredman, R.A. 309
 French, A.P. 301
 Frenkel, J. 296
 Frercks, J. 294
 Frercks, Jan 19, 330
 Friedman, A. 310
 Friedmann, A. 310
 Friedmann, Aleksan-
 der Aleksandrowitsch
 214
 Frisch, D.H. 298
 Fukuda, Y. 297
 Fulle, Marco 137
 Furrie, Pat 329
 Fölsing, Albrecht 295

G
 Gabuzda, D.C. 299
 Gaensler, B.M. 310
 Galilei, Galileo 16
 Gamow, G. 310
 Gamow, George 208
 Garwin, R.L. 317
 Gastaldi, Luca 330
 Gauss, Carl-Friedrich 173
 Gearhart, R. 296
 Gehrels, N. 313
 Georgi, Renate 329
 Geroch, R. 315
 Geroch, Robert 261
 Gesellschaft, Fraunhofer 321
 Gibbons, G.W. 301, 305
 Gibbons, Gary 121, 135, 301,
 329

Gibbs, J. Willard 93
 Gibbs, J.W. 301
 Gide, André 178
 Giltner, D.M. 296
 Giulini, D. 311
 Glassey, Olivier 329
 Goenner 160
 Goenner, Hubert 303
 González, Antonio 329
 Good, R.H. 300
 Gould, Andrew 164
 Grahn, Alexander 330
 Grebe 127
 Green, A.J. 310
 Greenstein, J.L. 304
 Gregorio, Enrico 330
 Greiner, J. 316
 Greiner, Jochen 329
 Grindlay, J.E. 306
 Gruber, C. 298
 Gruber, Christian 46
 Gruber, R.P. 315
 Guiragossian, Z.G.T. 296
 Gutfreund, Hanoch 295
 Guth, A. 312
 Guth, Alan 233
 Gácsi, Zoltán 329
 Göklü, E. 295

H
 Haber, John 329
 Hadley, M. 316
 Hafele 127
 Hafele, J.C. 297, 304
 Hakonen, P.J. 317
 Haley, Stephen 329
 Hall, D.B. 298
 Hamilton, J. Dwayne 300
 Hammond, R.T. 316
 Hanns Ruder 47
 Hardcastle, Martin 329
 Harris, S.E. 296
 Hartmann, D. 316
 Harvey, A. 298, 311
 Hasenöhrl, F. 300
 Hasenöhrl, Friedrich 66
 Hatfield, Brian 308
 Hausherr, Tilman 329
 Haverkorn, M. 310

Hawking 117
 Hawking, Stephen 225, 251,
 256, 261, 311
 Hayes, Allan 329
 Hayward, S.A. 302
 Heckel, B. 315
 Heering, Peter von 330
 Helmond, Tom 121, 329
 Henderson, Paula 329
 Hentig, Hartmut von 7
 Herschel, John 220
 Hertz, Heinrich 94
 Hertzlinger, Joseph 330
 Hestenes, D. 297
 Heumann, John 329
 Higashi, R. 317
 Hilbert, David 178, 181
 Hillman, Chris 329
 Hinshaw, G. 313
 Hipparque 18
 Hirth, J.P. 296
 Hobbs, G. 309
 Holstein, B.R. 308
 Holzmüller, G. 306
 Hong, F.-L. 317
 Hoyle, C.D. 315
 Hoyle, F. 311
 Hoyle, Fred 223, 311
 Hubble, Edwin 207
 Huber, Daniel 329
 Hughes, R.J. 309
 Huiskens, G. 302
 Hulse, Russel 307
 Huygens, Christiaan 16
 Héraclite d'Éphèse 210
 Héraclès 198
 Hésiode 205

I
 Ilmanen, T. 302
 Inverno, Ray d' 301, 303
 Israel 248
 Ivanov, Igor 329
 Ives, H.E. 295

J
 Jacobson, T. 302
 Jalink, Kim 329
 Jamil, M. 329

J

JANEK

Janek, Jürgen 329
 Jentschel, M. 299
 Jerie, M. 316
 Jetzer, P. 309
 Johansson, Mikael 329
 Johnson, Samuel 294
 Jones, Gareth 318
 Jones, Quentin David 329
 Jones, Tony 317
 Jong, Marc de 329
 Ju, L. 317
 Juszkiewicz, R. 313

K

Köppe, Thomas 329
 Kaaret, P. 306
 Kalbfleisch, G.R. 295
 Kalckar, Jørgen 155
 Kanada Yasumasa 319
 Kant, Emmanuel 196, 197, 207, 309
 Kapuścik, E. 297
 Karlhede, A. 316
 Katori, H. 317
 Kaufmann, W.J. 309
 Kayser, R. 311
 Keating 127
 Keating, R.E. 297
 Keesing, R.G. 318
 Kelu, Jonatan 329
 Kennedy, R.J. 295
 Kepler, Johannes 220
 Kerr, R.P. 313
 Kerr, Roy 247
 Kessler, E.G. 299
 Kilmister, C.W. 300
 Kiss, Joseph 329
 Kittinger 128, 303
 Kittinger, Joseph 124
 Kjellman, J. 295
 Klauder, John 303
 Klaus Tschira Foundation 330
 Kleppner, Daniel 307
 Klose, S. 316
 Knie, K. 310
 Knop, R.A. 308
 Knutsen, H. 310
 Kogut, A. 313
 Kolberg, Ulrich 330

Kontorowa, T. 296
 Koolen, Anna 329
 Kopeikin, S.M. 307
 Kopeikin, Sergei 329
 Korschinek, G. 310
 Kramer, M. 307, 309
 Kreuzer 134
 Kreuzer, L.B. 305
 Krijn, Marcel 329
 Krisher, T.P. 301
 Krishnan, B. 301
 Krotkow, R. 306
 Krumm, P. 306
 Królikowski, Jarosław 329
 Kröner 192
 Kröner, Ekkehart 302, 309
 Kubala, Adrian 329
 Kumaraditya, K.K. 313
 Kuzin, Pavel 329
 Künzle, H.P. 314

L

Lachièze-Rey, M. 312
 Lamb 145
 Lamb, Frederick 314
 Lambert, Johann 173
 Landau, L. 309
 Laplace, Pierre 241
 Lasota, J.P. 314
 Leibfried, G. 296
 Leighton, R.B. 309
 Lemaitre, Georges A. 214
 Lense, J. 306
 Lense, Josef 149
 Lerner, L. 307
 Leschiutta 127
 Leschiutta, S. 304
 Levi-Civita, Tullio 178
 Lewis, G.N. 299
 Liebscher, Dierck-Ekkehard 296
 Lifshitz, E. 309
 Lille, Alain de 241
 Lilley, Sam 303
 Linde, Johan 330
 Lindh, A.G. 306
 Linfield, R.P. 298
 Lintel, H. van 298
 Lintel, Harald van 329

Logan, R.T. 301
 Lombardi, Luciano 329
 Lombardo, F. 315
 Longair, M. 310
 Lorentz, H.A. 297
 Lorentz, Hendrik Antoon 37
 Lorimer, D.R. 307, 309
 Lothe, J. 296
 Low, R.J. 300
 Luca Bombelli 329
 Ludvigsen, Malcolm 302
 Luke, Lucky 30
 Luminet, J.-P. 312
 Lundmark 207
 Lundmark, K. 310
 Lundmark, Knut 207
 Lutes, G.F. 301
 Lyne, A.G. 309
 Lämmerzahl, C. 309, 315

M

MacCallum, M.A.H. 314
 Macdonald, A. 315
 Mach, Ernst 237
 Macrobius 310
 Maeterlinck, Maurice 236
 Maffei, Paolo 309
 Mahoney, Alan 329
 Mainwaring, S.R. 297
 Maleki, L. 301
 Manchester, R.N. 309
 Mark, Martin van der 329
 Marsh, N.D. 310
 Martikainen, J.E. 317
 Martos, Antonio 329, 330
 Marzke, R.F. 315
 Mashhoon, B. 306
 Mason, W.P. 296
 Masood-ul-Alam, A.K.M. 314
 Massa, Corrado 121, 329
 Matsas, G.E.A. 298, 299
 Matthews, W.N. 300
 Mattick 19
 Mattick, A.T. 294
 Mattick, Tom 19, 330
 Mayné, Fernand 329
 Mayr, Peter 329
 Mazur 248
 Mazur, P.O. 314

M

McCLURE-GRIFFITHS

McClure-Griffiths, N.M. 310
 McDonald, K.T. 307
 McGowan, R.W. 296
 McKellar, B.H.J. 299
 McLaughlin, M.A. 309
 McNamara, Geoff 305
 McQuarry, George 329
 Mellinger, Axel 195
 Menten, K.M. 313
 Merrit, John 329
 Michaelson, P.F. 287
 Michell, J. 313
 Michell, John 241
 Michelson 97
 Michelson, A.A. 297
 Minkowski, Hermann 37, 38
 Mirabel, I.F. 299
 Mishra 83
 Mishra, L. 301
 Misner 190
 Misner, Charles 300
 Mitskievic, N.V. 313
 Mittelstaedt, H. 312
 Mittelstaedt, M.-L. 312
 Mlynek, J. 295
 Mohazzabi, P. 303
 Mohr, P.J. 318
 Mokros, Nicolai 47, 48, 330
 Moore, C.P. 313
 Moore, Henry 171
 Moortel, Dirk Van de 323, 329
 Morley, E.W. 297
 Moser, Lukas Fabian 329
 Murdock, Ron 329
 Murillo, Nadia 329
 Murray, J.J. 296
 Musil, Robert 219
 Mutti, P. 299
 Muynck, Wim de 329
 Myers, E.G. 299
 Møller, Christian 300
 Müller, H. 295
 Müller, J. 315

N
 Nagano, M. 316
 Namouni, Fathi 329
 Narlikar, J.V. 311
 NASA 169

Natarajan, V. 299
 Nemiroff, R.J. 306
 Neumaier, Heinrich 121, 329
 Newman, E.T. 313
 Newton 285
 Nicolai, H. 308
 Niepraschk, Rolf 330
 Nieto, L.M. 308
 Nietzsche, Friedrich 105
 Nieuwpoort, Frans van 329
 Nightingale, J.D. 303
 Nordström, Gunnar 247
 Nordtvedt, Kenneth 315
 Novikov 208
 Novikov, I.D. 310
 Novikov, Igor 302, 313

O

Oberdiek, Heiko 330
 Oberquell, Brian 329
 Observatoire de la Côte
 d'Azur 169
 Oey, M.S. 310
 Offner, Carl 329
 Ohanian, H.C. 301
 Okhapkin, M. 295, 297
 Olbers, Wilhelm 220
 Olum, K.D. 305
 Oostrum, Piet van 329
 Oppenheimer, R. 313
 Oppenheimer, Robert 243
 Osewold, Daniel 330
 Osserman, Bob 232
 Ovidius, Publius Ovidius
 Naso 20

P

Page, Don 329
 Pahaut, Serge 329
 Panov, V.I. 306
 Papapetrou, A. 299
 Parker, Barry 310
 Parks, David 329
 Pascazio, Saverio 329
 Pasi, Enrico 329
 Paul, W. 299
 Pauli, Wolfgang 55, 308
 Pavlis, E.C. 306
 Pearson, T.J. 298

Peeters, Bert 329
 Pekár, V. 306
 Pelt, J. 311
 Pelt, Jaan 230
 Penrose 117
 Penrose, R. 298, 302, 314
 Penrose, Roger 249, 256, 312
 Penzias, Arno 208
 Peres, A. 313
 Perini, Romano 329
 Perkins, D.H. 297
 Perlman, E. 313
 Perot 127
 Pešić, P.D. 311
 Peters, A. 295
 Pfister, Herbert 312
 Philpott, R.J. 300
 Piper 161
 Piper, M.S. 307
 Piraino, S. 306
 Planck, Max 55, 70, 74, 95
 Platon 223
 Poincaré, Henri 24, 35, 37, 123,
 142
 Poincaré, J.H. 299
 Possenti, A. 309
 Pound 127
 Pound, R.V. 304
 Powell, Richard 206, 209, 330
 Pradl, O. 295
 Prakash, A. 314
 Preston, Tolver 66
 Pretto, Olinto De 295
 Prigogine, Ilya 312
 Primas, L.E. 301
 Prince, G.E. 316
 Pritchard, Carol 329
 Pritchard, D.E. 299
 Pritchard, David 61
 Proença, Nuno 329
 Protagoras 285
 Pryce, M.H.L. 299
 Purves, William 329

R

Rahtz, Sebastian 330
 Rainville, S. 299
 Rankl, Wolfgang 329
 Rao, S.R. Madhu 323

R

RASIO

- Rasio, F.A. 307
 Rawlinson, A.A. 299
 Raymond, D.J. 300
 Readhead, A.C.S. 298
 Rebka 127
 Rebka, G.A. 304
 Recami, E. 299
 Redondi, Pietro 329
 Refsdal, S. 311
 Reissner, Hans 247
 Renselle, Doug 329
 Reppisch, Michael 329
 Ricci-Cubastro, Gregorio 178
 Riemann, Bernhard 193
 Rindler, W. 297, 298
 Rindler, Wolfgang 296, 301, 303, 308
 Ritz 295
 Rivas, Martin 329
 Robertson, H.P. 214
 Robertson, Will 330
 Robinson 248
 Robinson, D.C. 314
 Rodriguez, L.F. 299
 Roll, P.G. 306
 Rossi, B. 298
 Rothbart, G.B. 296
 Rothenstein, B. 297
 Rothmann, T. 312
 Rottmann, K. 300
 Roukema, B.F. 312
 Rozental, I.L. 316
 Ruben, Gary 329
 Ruder, H. 315
 Ruffini, R. 301, 305, 313, 314
 Ruffini, Remo 303
 Rugel, G. 310
 Ruggiero, M.L. 300, 307
 Ruppel, W. 303
 Rusby, R.L. 318
 Rusby, Richard 318
 Russel, Bertrand 74
 Rybicki, G.R. 298
 Rømer, Ole 16
- S**
 S.R. Madhu Rao 329
 Saint Augustin 311
 Samuel, Stuart 307
- Sands, M. 309
 Santander, M. 308
 Santangelo, A. 306
 Sastry, G.P. 298
 Scarcelli, G. 296
 Schaefer, B.E. 295, 296
 Scharmann, Arthur 315
 Schiller, Britta 329, 330
 Schiller, C. 301
 Schiller, Christoph 301, 330
 Schiller, Isabella 329
 Schiller, P. 296
 Schiller, Peter 329
 Schiller, S. 295, 297
 Schiller, Stephan 34, 329, 330
 Schneider, M. 315
 Schneider, P. 312
 Schramm, Herbert 315
 Schramm, T. 311
 Schucking, E. 298, 311
 Schutz, B.F. 307
 Schutz, Bernard 302
 Schwarzschild 127
 Schwarzschild, Karl 133
 Schäfer, G. 315
 Sciamia, D.W. 312
 Sciamia, Dennis 238, 312
 Scott, Jonathan 329
 Searle, Anthony 47
 Seeger, A. 296
 Seielstad, G.A. 298
 Selig, Carl 295
 Seneca, Lucius Annaeus 258
 Sexl, R.U. 313
 Sexl, Roman 263
 Shapiro, I.I. 307, 308
 Shapiro, Irwin I. 164
 Shaw, R. 298
 Shea, J.H. 303
 Sheldon, E. 298
 Sheldon, Eric 329
 Shih, Y. 296
 Short, J. 318
 Siart, Uwe 330
 Sierra, Bert 329
 Silk, J. 313
 Simon, Julia 329
 Simon, R.S. 298
 Singh, T.P. 314
- Singleton, Douglas 329
 Sitter, W. de 308
 Sitter, Willem de 218
 Slabber, André 329
 Smale, A.P. 306
 Smith, J.B. 298
 Snider, J.L. 304
 Snyder, H. 313
 Snyder, Hartland 243
 Soffel, M. 315
 Soldner 162, 163
 Soldner, J. 305
 Soldner, Johann 139
 Solomatin, Vitaliy 329
 Sonoda, D.H. 313
 Stachel, John 302
 Stairs, I.H. 307, 309
 Stark, Johannes 28
 Stedman, G.E. 297, 317
 Stephenson, G. 300
 Stephenson, G.J. 299
 Stilwell, G.R. 295
 Stocke, J.T. 313
 Stodolsky, Leo 297
 Stoney, G.J. 314, 317
 Stoney, George Johnston 279
 Story, Don 330
 Straumann, N. 311
 Stromberg 207
 Stromberg, G. 310
 Stromberg, Gustaf 207
 Su, Y. 306
 Sudarshan, E.C. 299
 Sudarshan, E.C.G. 299
 Supplee, J.M. 298
 Surdin, Vladimir 329
 Svensmark, H. 310
 Synge, J.L. 299
 Szuszkiewicz, E. 314
- T**
 Takamoto, M. 317
 Tangen, K. 309
 Tarko, Vlad 329
 Tartaglia, A. 307
 Taylor, B.N. 318
 Taylor, J.H. 283, 307, 308
 Taylor, Joseph 160, 307
 Tegelaar, Paul 329

T

TEGMARK

Tegmark, M. 308
 Terrell, J. 298
 Thaler, Jon 329
 Thies, Ingo 329
 Thirring, H. 306
 Thirring, Hans 149
 Thomas, Llewellyn 55
 Thompson, C. 310
 Thompson, J.K. 299
 Thompson, R.C. 299
 Thorndike, E.M. 295
 Thorne, K.S. 307
 Thorne, Kip 300
 Tisserand, F. 306
 Tolman, R.C. 299
 Tolman, Richard 313
 Torre 182
 Torre, C.G. 308
 Torrence, R. 314
 Townsend, Paul 329
 Trevorrow, Andrew 330
 Trout, Kilgore 233
 Tuppen, Lawrence 329
 Turner, M.S. 312

U
 Uguzzoni, Arnaldo 329
 Ulfbeck, Ole 155
 Unruh, W.G. 303
 Unruh, William 124
 Unwin, S.C. 298
 Upright, Craig 330

V
 Valencia, A. 296
 van Lintel, Harald 46
 Vanier, J. 317

Vannoni, Paul 329
 Vermeil 171
 Vermeil, H. 308
 Vermeulen, R. 313
 Vessot 127
 Vessot, R.F.C. 304
 Virgile, Publius Vergilius
 Maro 146
 Voigt, Woldemar 37
 Volin, Leo 329
 Voltaire 285
 von Laue, Max 73
 Voss, Herbert 330
 Vuorinen, R.T. 317
 Völz, Horst 317

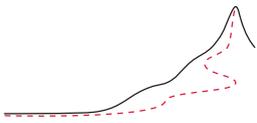
W
 Wald, R.M. 314
 Walker, A.G. 214
 Walker, Gabriele 310
 Walker, R.C. 298
 Wallin, I. 295
 Wallner, A. 310
 Wambsganss, J. 312
 Wang, Y. 308
 Warkentin, John 330
 Watson, A.A. 316
 Weinberg, Steven 303, 311
 Weisberg, J.M. 307
 Weiskopf, Daniel 47, 49, 50,
 330
 Weiss, Martha 329
 Weitzmann, Chaim 148
 Wesson, Paul 220, 311
 Westra, M.T. 326
 Wheeler 247
 Wheeler, J.A. 305

Wheeler, John 261, 315
 Wheeler, John Archibald 242
 White, M. 312
 Whitney, A.R. 298
 Wierda, Gerben 329
 Wierzbicka, Anna 329
 Wijk, Mike van 329
 Will, C. 295, 302, 305
 Will, C.M. 301, 315
 William Morley, Edward 33
 Williams, R. 304
 Wilson, Robert 208
 Wirtz 207
 Wirtz, C. 310
 Wirtz, Carl 207
 Wise, N.W. 287
 Woods, P.M. 310
 Wright, Joseph 330
 Wright, Steven 273

Y
 Yearian, M.R. 296
 Young, Andrew 329

Z
 Zaccone, Rick 330
 Zalm, Peer 329
 Zedler, Michael 329
 Zeeman, Pieter 33
 Zeilinger, A. 317
 Zensus, J.A. 298
 Zeus 198
 Zhang 145
 Zhang, W. 306
 Zhao, C. 317
 Zwicky, F. 312
 Zwicky, Fritz 230





INDEX DES SUJETS



Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où le mot-clé est défini ou présenté en détail. L'index des sujets joue donc le rôle d'un glossaire.

Symboles

4-coordonnées **38**

4-moment **70**

A

a (année) **213**

aberration **18, 47**

acausal **40**

accrétion **254**

accélération **297**

accélération de la lumière **26**

accélération propre **69**

accélération relativiste **69**

accélération uniforme **81**

accélération, comportement relativiste **79**

accélération, théorème de composition **83**

ADN **285**

âge **218**

âge de l'univers **65**

âge de la Terre **291**

âge de la Voie lactée **292**

âge du Soleil **292**

agoraphobes **216**

air **226**

aire de Planck, corrigée **121**

Aldébaran **229**

algèbre d'Einstein **261**

Alluvium **212**

Alnilam **229**

Alnitak **229**

Altair **229**

amas globulaires **202**

ampère **274**

angle de mélange électrofaible **288**

annihilation **223**

année tropicale **289**

année-lumière **289**

anomalie Pioneer **195**

antimatière **64, 189, 223**

aphélie **292**

apogée **291**

Apollo **168, 320**

apprentissage, meilleure méthode **9**

approche brutale de la force **106**

arbre **63, 86, 126, 285**

arbres, apparition **212**

arc-en-ciel **324**

Archaeozoicum **211**

archéen **211**

argument du trou **262**

arrière-plan **38**

artéfact **275**

astronautes **138**

atome, formation **211**

atto **276**

avancée du périastre **166**

avancée du périhélie **268**

azoïque **211**

B

B1938+666 **230**

balances de torsion **305**

barres, distance **80**

bateau **18**

becquerel **276**

Bellatrix **229**

Big Bang **219, 223, 224**

Big Bang n'était pas une singularité **117**

billard **58**

BIPM **274, 275**

blancs, cheveux **50**

bombe **60**

boîtes **88**

bradyons **63**

Brans-Dicke, théorie de **187**

bras, homme **237**

bretelles **326**

brosse à dents **22, 256**

Bureau International des Poids et Mesures **274**

bus **125**

bus, meilleure place **50**

Bételgeuse **229**

C

Caenozoicum **212**

calculs de perturbations **259**

calorie **284**

Cambrien **212**

candela **274**

Canopus **229**

capture de la lumière **247**

capture gravitationnelle **246**

Carbonifère **212**

catadioptré lunaire **169**

causalité et vitesse maximale **40**

cause à effet **39**

censure cosmique **117, 256, 314**

C

CENTI

- centi 276
 centre de masse 64
 Čerenkov, rayonnement 24
 CERN 297
 chaise comme machine à
 voyager dans le temps 43
 champ de l'inflation 234
 champ gravitomagnétique 152
 champ gravitoélectrique 152
 chandelle 281
 charge du positron 287
 chariot qui indique le sud 194
 chevaux-vapeur, valeur
 maximale 96
 cheveux blancs 50
 choc 62
 chocolat 220
 chute libre perpétuelle 243
 chuter 145
 ciel 227
 cinglés 31, 296
 cinématique relativiste 34
 circonspection 291
 ciseaux 52
 CL0024+1654 231
 classes stellaires 228, 229
 claustrophobes 216
 clôture 36
 Coccinelle 171
 CODATA 318
 collapsars 243
 collier de perles 50
 collision 62
 commencement de l'univers
 207
 commencement du temps 207
 Commission Internationale
 des Poids et Mesures 274
 comprendre 259
 concept théorique 252
 condition faible sur l'énergie
 142
 conditions initiales 210, 225
 conformes, transformations
 76
 Conférence Générale des
 Poids et Mesures 274, 285
 connexion métrique 189
 constance de la vitesse de la
 lumière 77
 constante cosmologique 179,
 183, 222, 289
 constante de Boltzmann 55,
 288
 constante de couplage de
 Fermi 288
 constante de couplage fort 288
 constante de couplage gravit.
 288
 constante de Hubble 207, 289
 constante de la loi du
 déplacement de Wien 289
 constante de Planck originale
 287
 constante de Planck réduite
 287
 constante de Rydberg 288
 constante de
 Stefan-Boltzmann 289
 constante de structure fine
 277, 288, 288
 constante gravitationnelle
 constante 117
 constante magnétique 288
 constante électrique 288
 constellation colorée 228
 constellations 196
 conteneur 38
 contraction 194
 contraction des longueurs 46,
 298
 contraction relativiste 36
 contraction tensorielle 179
 convention de genre espace 67
 convention de genre temps 67
 Convention du Mètre 274
 conversion de bits en entropie
 289
 coordonnées rationnelles 293
 coordonnées, quatre 66, 68
 corps humain, émission de
 lumière 282
 corps rigides, n'existent pas
 dans la nature 89
 corps solide 89
 corps solide, accélération et
 longueur limite 89
 corps, rigide 89
 correction relativiste 36
 correspondance, principe 184
 cosinus hyperbolique 82
 cosmique, censure 117
 cosmonautes 35, 124, 141
 coulomb 276
 couplage minimal, principe
 184
 couplage spin-orbite 168
 couplage spin-spin 168
 couple 153
 courage 23
 courbure 130, 131, 133, 171
 courbure du vide 179
 courbure extrinsèque 169
 courbure gaussienne 171, 172
 courbure intrinsèque 170
 courbure moyenne 178
 courbure sectionnelle 175
 covariance générale, principe
 184
 création 226
 Crétacé 212
 Cygnus X-1 255
 cénozoïque 212
 cône de lumière du futur 39
 cône de lumière du passé 39
- D**
 dame, vieille et circonspecte
 74
 dans toutes les directions 238
 de cisaillement théorique,
 contrainte 104
 de l'espace-temps, dualité 264
 de vision nocturne, lunettes
 282
 degré Celsius 276
 degré, unité d'angle 276
 demi-grand axe 167
 densité baryonique 290
 densité critique 215
 densité de photons 290
 densité lumineuse 282
 densité moyenne de la Terre
 291
 densité propre 181
 diagramme de
 Hertzsprung-Russell 209

D

DIEUX

- dieux 183, 235
diffraction 191
dilatations 76
Diluvium 212
dimension, quatrième 40
dinosaures 212
dislocations 29
dispositif d'antigravité,
breveté 141
dispositif rétro-réfléchissant
lunaire 169
disque vinyle 52
disques d'accrétion 200
distance des barres 80
distance moyenne de la Lune
291
distance propre 67
double sens, vitesse de la
lumière 88
Draconis, Gamma 18
dynamique newtonienne
modifiée 316
déca 276
décalage Doppler vers le
rouge 228
décalage temporel 268
décalage vers le bleu 28
décalage vers le rouge 28, 240
décalage vers le rouge
gravitationnel 127, 228
décalage vers le rouge,
mécanismes 240
décalage vers le rouge, tests
268
décalage vers le rouge,
variable 28
déci 276
défaut de masse chimique 60
défaut de masse, mesure 61
défi, classement 9
défi, niveau 9
défis 9, 15–21, 23–26, 28–32,
34–36, 38, 40, 41, 43–47,
50–52, 54, 56–66, 68–78,
80–90, 92, 97, 103, 105, 110,
111, 113, 114, 118–121,
123–129, 131–135, 137–147,
149, 152–154, 156, 157,
159–168, 170–172, 174–177,
179–182, 184, 185, 189–195,
197, 198, 200, 205, 207, 208,
214, 215, 218–223, 226, 228,
230, 233, 235–240, 242, 243,
245–254, 256–261, 263, 267,
271, 272, 276, 277, 279–281,
284–287, 289, 291, 293, 312,
317, 319
dépendance en $1/r^2$ 268
désintégration des photons
239
détecteurs, portes 28
déviation de la lumière 268
déviation géodésique 194
Dévonien 212
- E**
écart-type 286
éclair 20, 281
éclair, couleur 321
éclairage lumineux 281
éclairage énergétique 281
écoulement du temps 263
effet de lentille
gravitationnelle 230
effet Doppler 27, 47
effet Doppler gravitationnel
127
effet géodésique 168, 268
effet Josephson 275
effet jouvence 44
effet Mössbauer 127
effet Nordtvedt 117, 315
effet projecteur 47
effet Thirring 149
effet Thirring–Lense 149, 168,
246
effets de marée 246
effets en champs forts 267
effondrement 255
élasticité 134
électricité, début 213
électron 15
électron, taille 89
électronvolt 279
ellipse 166, 245
Ellis 261
émission décalée d'ondes
gravitationnelles 268
- en bref, relativité générale 266
énergie 59
énergie au repos 61
énergie cinétique relativiste 60
énergie de l'Univers 234
énergie gratuite 60
énergie gravitationnelle 181,
191
énergie limitée 70
énergie potentielle 71
énergie potentielle en
relativité 71
énergie sombre 60, 203
énergie, cinétique relativiste
70
énergie, non découverte 60
énergie, potentielle relativiste
71
entraînement de référentiel
149, 153, 164
entropie 234
entropie du trou noir 250
Éocène 212
époque GUT 210
équilibre thermodynamique
243
équivalence masse–énergie 60
équivalence, principe 184
ergosphère 248, 249
erreurs aléatoires 286
erreurs systématiques 286
espace de la vie 258
espace vide 77
espace, absolu 34, 35
espace-temps 38, 139
espace-temps de Minkowski
38
étalon, pomme 285
état de l'univers 235
éther et relativité générale 104,
132
éther, également appelé éther
lumineux 297
étoiles 211
événements 38
évolution, limite 215
exa 276
exactitude 286
excentricité 166

E

EXCENTRIQUES

excentriques 263
 excès de rayon 172
 explosion 224
 expérience de pensée 106

F

facteur d'échelle 76, 220
 facteur de dilatation 36
 facteur de dilatation du temps 25
 farad 276
 faux 23
 femmes 30, 247, 248
 femto 276
 fenêtre 52
 fluctuations de densité 211
 flux d'énergie 281
 fond diffus de rayonnement cosmologique 312
 force 94, 190
 force centrifuge 253
 force de l'horizon 99
 force de Planck 95
 force limite 94
 force minimale dans la nature 121
 force parfaite 266
 force, maximum, hypothèses 105
 forces de marée 129, 175, 193
 forme 46
 formule de la composition des vitesses 32
 Friedmann–Lemaître, solutions 214
 fusée 249

G

galaxie 197, 238
 galaxies, formation 211
 gazon 36
 Gedanken experiment 106
 genre espace 67
 genre temps 67
 giga 276
 Gondwana 212
 GPS, global positioning system 144
 gravitation 115

gravitation comme mécanisme de freinage 96
 gravitation universelle comme conséquence de la force maximale 187
 gravitation universelle, écart à la 222
 gravitodynamique 156
 gravitomagnétisme 268
 Gravity Probe B 150
 gravité 124
 gravité de surface d'un trou noir 242
 gray 276, 280
 groupe conforme 76, 77
 génie 22, 136
 géocaching 144
 géodésique, de genre lumière 136
 géodésique, de genre temps 136
 géodésiques de genre lumière 189
 géodésiques nulles 189

H

hadrons 210
 haut-parleur 22
 hecto 276
 henry 276
 hertz 276
 heure 276
 Hollywood, films 75
 Holocène 212, 213
 Homo 213
 Homo sapiens 213
 Homo sapiens sapiens 213
 Horace, en latin Quintus Horatius Flaccus 123
 horizon 208, 242, 243, 324
 horizon des événements 85
 horizon et accélération 106
 horizon, s'éloignant plus vite que la lumière 52
 horizons 92
 horizons en tant que systèmes limites 266
 horloge géométrodynamique 261

horloge, synchronisation 24, 29
 horloges 259
 hydrogène 224
 hydrogène atomique 283
 hydrogène, fusion 211
 hyperbole 166, 245
 hypernovae 201
 hypersurfaces 78
 hypothèse de la Terre creuse 263
 hélium 15, 211, 224

I

Icare 167, 268
 id. 145, 173
 imaginaire, masse 63
 impulsions lumineuses, tournant l'une autour de l'autre 143
 impédance caractéristique du vide 288
 incandescence 227
 incertitude totale 286
 indépendance temporelle de G 268
 inertiel 35
 inertielle, masse 132
 inflation 210, 233, 233, 269
 intensité lumineuse 281
 interaction, la gravité est-elle une 190
 interféromètre 33
 interféromètres 284
 interféromètres en anneau 284
 intervalle 67
 intervalle d'espace-temps 38
 intrinsèque 170
 intrinsèque, courbure 172
 invariance conforme 76, 77
 invariance par difféomorphisme 182, 262
 invariants du tenseur de courbure 194
 inversion 76
 inégalité de Penrose 117
 Io 16
 isotrope 172

J

JERK

J

jerk relativiste 69
jets 200
joule 276
jour sidéral 289
jour, unité de temps 276
journée ensoleillée 281
Jurassique 212

K

k-calculus 25
kaléidoscope 232
katal 276
kelvin 274
kilo 276
kilogramme 274
kilogramme, prototype 268
Klitzing, von – constante 289

L

l'air ne peut pas remplir
 l'univers 223
l'eau ne peut pas remplir
 l'univers 223
la lumière ne se déplace plus
 192
LAGEOS 306
lagrangien 139
lait 20, 198
Large Electron Positron 30
largeur totale de la courbe à la
 moitié du maximum 286
Laurasie 212
lentille gravitationnelle 255
LEP 30
ligne d'univers 40
limite statique 248
Linux 19
liquide 180
litre 276
loi de la paresse universelle 74
loi de Laplace–Gauss 286
longueur d'onde de Compton
 289
longueur d'onde de de
 Broglie 275
longueur de Planck 260
longueur gravitationnelle de
 la Terre 291

longueur propre 44
lumen 276
luminosité 281
luminosité du Soleil 291
lumière 26
lumière massive 26
lumière, mouvement qu'on ne
 peut pas arrêter 26
lumière, pesée 61
lumière, plus rapide que la 142
lumière, polarisation
 longitudinale 26
lumière, vitesse finie 220
Lune 268
Lune, formation 211
Lune, mesure de sa distance
 par faisceau laser 294
lunettes de vision nocturne
 282
Lunokhod 168, 320
lux 276, 281
Lyman- α 321

M

M₃₁ 197
M₅₁ 199
Mach, principe 184
machine à voyager dans le
 temps 43
magnétar 203
magnéton nucléaire 289
main 63
main dans le vide 303
mammifères 212
mammifères, apparition 212
manuel, bijou 300
marche à pied, olympique 51
Mars 167, 280
marées 304
maser 127
masse 57
masse ADM 190
masse de Jupiter 292
masse de la Lune 291
masse de la Voie lactée 292
masse du Soleil 291
masse gravitationnelle et
 inertielle, égalité 184
masse imaginaire 63

masse inertielle 71
masse irréductible 250
masse relativiste 71
masse totale, en relativité
 générale 190
masse, centre de 64
masse, gravitationnelle 132
masse, égalité entre inertielle
 et gravitationnelle 145
matelas 131, 154, 155, 158, 159
matière noire 60, 203, 271
matière, domination 211
matière, métastable 243
maximale, force 92
maximale, puissance 92
Megrez 229
Messier, catalogue des objets
 célestes 197
mesure de la distance de la
 Lune par faisceau laser 294
mesure de la vitesse des astres
 28
mesures de vitesse 77
micro 276
mile 277
milli 276
minimum, force dans la
 nature 121
Mintaka 229
minute 276, 292
Miocène 212
mole 274
molécule 143
moment cinétique comme
 tenseur 73
MOND 316
montagne 63
mort 18
moteur 22
moteurs de la puissance
 maximale 96
moteurs de recherche 294
moto 89
mouvement 124
mouvement et unités de
 mesure 275
mouvement hyperbolique 82
mouvement lent 65
mouvement microscopique

M

MOUVEMENT

269
 mouvement non perturbé 15
 mouvement qu'on ne peut
 pas arrêter, lumière 26
 mouvement supraluminique
 52
 mouvement, n'existe pas 39
 muons 297, 298
 mètre 274
 mètres étalons 259
 méga 276
 mégaparsec 207
 mémoire 40
 mésozoïque 212
 métrique 67, 75
 métrique de Schwarzschild
 132, 244

N
 naines blanches 202, 229
 naines brunes 202, 229, 229
 nano 276
 NASA 280
 naviguer 18
 navire 18
 neutrino 31, 210, 297, 321
 neutrinos 75
 New General Catalogue 198
 newton 276
 NGC 205 198
 Nit 282
 noir, peinture 220
 noir, tourbillon 249
 nombre d'Avogadro 288
 nombre imaginaire 63
 nombre infini de préfixes du
 SI 285
 normale, loi 286
 normalité 318
 normalité de π 293
 nova 208
 novae 201
 noyaux 210
 nuage 246
 Nuage de Magellan 197
 nuages 199
 nucléosynthèse 210
 nues, singularités 256
 nul 170

nébuleuse d'Andromède 197,
 207
 nébuleuse de la Tarentule 197
 négatif 171
 Néogène 212

O
 objet réel 63
 objet virtuel 63
 obscurité 52
 obscurité, vitesse 51
 observateur comobile 79
 odomètre 68
 ohm 276
 oiseaux, apparition 212
 Olbers 220
 Oligocène 212
 ombre 15
 ombres 52
 ombres et rayonnement 15
 ombres non parallèles 325
 ombres, vitesse 21, 30, 51
 onde de gravité plane 158
 ondes de gravité 154
 ondes en relativité 73
 ondes gravitationnelles 154
 ondes gravitationnelles, spin
 156
 ondes gravitationnelles,
 vitesse 157, 161
 ondes sonores 28
 orbites 188
 Ordovicien 212
 ordre, partiel 40
 Orion 62, 228
 Oxford 266
 oxygène, apparition dans
 l'atmosphère 310

P
 π 72
 π , normalité de 292
 Paléocène 212
 Paléogène 212
 paléozoïque 212
 Pangée 212
 parabole 166, 245
 paradoxe d'Ehrenfest 72
 paradoxe d'Olbers 220

paradoxe de la puissance 113
 paradoxe des horloges 42
 paradoxe des jumeaux 42
 paradoxe du collier de perles
 50
 paradoxe du trou 262
 paramètre d'impact 163
 paramètre de décélération 216
 paramètres d'impacts 246
 parapluies 18
 parfaite, force 266
 parfaite, vitesse 266
 parsec 207, 289
 particule ultra-relativiste 70
 particules massives 26
 particules ponctuelles, taille
 252
 particules virtuelles 327
 particules élémentaires, taille
 89
 pascal 276
 peinture noire 220
 pendule de Foucault 149
 Permien 212
 permittivité diélectrique du
 vide 287
 perméabilité magnétique du
 vide 287
 perpétuelle, chute libre 243
 pesée de la lumière 61
 phot 282
 photons, désintégration 239
 physique, début 213
 pico 276
 pierres 63, 136, 137, 243
 pièges de Penning 61
 planche de surf 45
 Planck, unités corrigées 279
 plantes, apparition 212
 planètes extrasolaires 229
 planètes, formation 211
 planéité asymptotique 190
 plasma 200
 plastique, sacs 326
 Pliocène 212
 plus rapide que le mouvement
 de la lumière, collisions 63
 plus rapide que le mouvement
 lumineux observé dans un

P

PLUS

- référentiel accéléré 87
 plus vite que la lumière 142
 Pléiades, amas d'étoiles 212
 Pléistocène 212
 PNP, formalisme
 post-newtonien
 paramétrisé 143
 poids 145
 pomme étalon 285
 pommes 146
 pommiers 285
 positif 170
 post-newtonien, formalisme 143
 potentiel vecteur
 gravitomagnétique 152
 poussière 181
 poussières d'étoiles 213
 poussée 37
 poussée de Lorentz 98, 98
 poussées de Lorentz 76
 Príncipe, île de 304
 première loi de la mécanique de l'horizon 100
 première loi de la mécanique du trou noir 100
 pressé 75
 primates, apparition 212
 principe cosmologique 207
 principe d'équivalence 124, 184, 268
 principe d'équivalence faible 305
 principe de correspondance 184
 principe de couplage minimal 184
 principe de covariance générale 184
 principe de Mach 184, 237
 principe de relativité 35
 principe de relativité générale 184
 problème de la matière noire 222
 processus chimiques 61
 Procyon 229
 promenade de Planck 283
 propre, accélération 79
 propre, vitesse 41
 protonvolt 280
 prototype du kilogramme 268
 protérozoïque 211
 précession 168
 précession de Thomas 55, 168
 précision 31, 286, 287
 préfixes 276, 317
 préfixes du SI 285
 préfixes, SI 276
 présent 40
 PSR 1913+16 160
 PSR B1913+16 154
 PSR J0737-3039 154
 puissance 71, 281
 puissance maximale dans la nature 254
 puissance, maximum, hypothèses 105
 pulsar 198
 pulsars 160, 268
 pulsars binaires 144, 167
 périastre 166
 périhélie 291
 périhélie 166, 292
 période glaciaire 213
 période rayonnante 15
 péta 276
 pôle Nord 129, 225
- Q**
 Q0957+561 230
 quadri-accélération 69
 quadri-impulsion 69
 quadri-jerk 69
 quadrivecteur 68
 quadrivecteur
 impulsion-énergie 70
 quadrivitesse 68
 quadrupôle 159
 quantité de mouvement 69
 quantité de mouvement relativiste 58, 69
 quantum d'action 74
 quantum de conductance 289
 quantum du flux magnétique 289
 quarks 210
 quasar 53
- quasars 255
 Quaternaire 212
 quatrième dimension 38, 40
- R**
 radar 28
 radian 275
 radioactivité 280
 radioactivité alpha 208
 raies d'absorption solaire 127
 raies de Fraunhofer 127, 321
 rajeunissement 138
 rapidité 32
 rapport de fréquence de Josephson 289
 rapport de masse
 proton-électron 289
 rapport gyromagnétique 254
 rayon classique de l'électron 289
 rayon de Bohr 289
 rayon de la Lune 291
 rayon de la Terre 291
 rayon de Schwarzschild 133, 242
 rayon de Schwarzschild comme unité de longueur 279
 rayon irréductible 250
 rayonnement 90
 rayonnement Cerenkov 24
 rayonnement de corps noir 227, 312
 rayonnement de fond cosmologique 219, 224
 rayonnement de fond diffus 213
 rayonnement de fond diffus cosmologique 208
 rayonnement gravitationnel 303
 rayonnement quadrupolaire 159
 rayonnements 15
 rayons 15
 rayons α 15
 rayons β 15
 rayons γ 15
 rayons cathodiques 15

R

RAYONS

- rayons cosmiques 43, 65
 - rayons infrarouges 15
 - rayons ionisants 15
 - rayons ultraviolets 15
 - rayons X 15
 - recombinaison 211
 - recouvrement des impôts 274
 - rectiligne 81
 - rectitude 15
 - relation d'incertitude, relativiste 89
 - relation de cause à effet 40
 - relation de dispersion 158
 - relation de Kepler 159
 - relativité générale 24, 123
 - relativité générale en dix points 266
 - relativité générale en un seul paragraphe 175
 - relativité générale, formules 135
 - relativité générale, première moitié 134
 - relativité générale, précision 267
 - relativité générale, seconde moitié 139
 - relativité restreinte 15, 24
 - repos 123, 124
 - restreinte, relativité 15
 - Rigel 229
 - rigidité 46
 - Robertson–Walker, solutions 214
 - rosace 245
 - rosace, trajectoire 247
 - rotation de la Terre 283
 - réflexion 191
 - réfraction 191
 - réfraction, (indice) du vide 163
 - référentiel 80
 - référentiel d'inertie 35
 - référentiel inertiel 80
 - référentiels accélérés 80
 - Régulus 229
 - réversible 250
- S**
- Saiph 229
 - sans dimension 288
 - satellites galiléens 16
 - satellites LAGEOS 150
 - Saturne 93
 - scalaire de Ricci 176, 178, 179
 - science-fiction 60
 - seau, Newton, expérience 237
 - seconde 274, 276, 292
 - sections coniques 166
 - sens unique, vitesse de la lumière 88
 - Service international de la rotation terrestre 283
 - SI, unités 274
 - SI, unités supplémentaires 275
 - siemens 276
 - sievert 276, 280
 - Silurien 212
 - singularités 117, 186, 311
 - singularités habillées 256
 - singularités nues 256
 - sinus hyperbolique 82
 - Sirius 229, 304
 - Sloan Digital Sky Survey 309
 - snooker 58
 - Sobral, île de 304
 - Soleil 211, 229
 - Soleil, mouvement dans la galaxie 198
 - solide, corps 89
 - sondes Voyager 18
 - sous-marin, relativiste 47
 - sphère des photons 247
 - spin d'une onde 156
 - spin des ondes gravitationnelles 156
 - spin et propriétés ondulatoires classiques 158
 - squark 329
 - stalactite 93
 - stalagmites 18
 - stellaire, trou noir 255
 - Stoney, unités 279
 - stéradian 275
 - supernovae 201, 208
 - supraluminique, mouvement 52
 - supérieur 59
 - surface, physique 113
 - surfeur des neiges, relativiste 45
 - sursauts de rayons gamma 21, 294
 - sursauts gamma 201, 232, 316
 - symboles de Christoffel de seconde espèce 189
 - symétrie d'échelle 182
 - symétrie par renversement 77
 - synchronisation des horloges 24, 29
 - système d'unités de Heaviside–Lorentz 279
 - système d'unités gaussiennes 279
 - système d'unités électromagnétiques 279
 - système d'unités électrostatiques 279
 - système de coordonnées rigide 80
 - Système géodésique mondial 292
 - Système International d'Unités (SI) 274
 - systèmes matériels 90
 - sécante hyperbolique 84
- T**
- tachyon 53, 53, 63
 - tachyon, masse 63
 - tachyons 63, 90
 - taille de l'électron 89
 - taille de la Voie lactée 292
 - taille des chaussures 285
 - taille limite 116
 - taille limite du système physique 116
 - Tamise 18
 - tangente hyperbolique 84
 - TDB 143
 - TDT 143
 - temps 40
 - temps coordonnée barycentrique 305
 - temps d'arrêt, minimum 107
 - temps de l'horloge 132

T

TEMPS

- temps de la montre-bracelet 38
 temps dynamique
 barycentrique 143
 temps dynamique terrestre 143
 temps propre 38, 68
 temps universel coordonné 143, 283
 temps, absolu 34, 35
 température du fond diffus micro-onde 290
 température, relativiste 56
 tenseur d'Einstein 179
 tenseur de courbure 172
 tenseur de courbure de Riemann 192
 tenseur de courbure de Riemann-Christoffel 192
 tenseur de Ricci 102, 178
 tenseur de Riemann 193
 tenseur énergie-impulsion 102, 180
 tenseurs 178
 tension 133
 tentative par la corde 106
 Terre creuse 263
 Terre, anneau avoisinant 199
 Terre, contraction des longueurs 45
 Terre, formation 211
 Terre, rotation 283
 Tertiaire 212
 tesla 276
 textes écrits 213
 thermodynamique, deuxième principe de la 40
 théorie d'Einstein-Cartan 271
 théorie de la relativité 24
 théorème de la composition des accélérations 83
 théorèmes de l'existence de singularités de Penrose-Hawking 256
 théorèmes de singularité de Penrose-Hawking 314
 Time, revue 130
 tire-bouchon 158
 TNT, contenu énergétique 289
 tonne 276
 torsion 271
 tour en brique infiniment haute 108
 tourbillon noir 249
 trace du tenseur 175
 trains 125
 trajectoires du mouvement 266
 transformation, conforme 50
 transformations conformes spéciales 76
 transformations de Lorentz de l'espace et du temps 37
 translation 76
 translations, enchaînement 55
 Trias 212
 trou noir 103, 161, 227, 243, 304
 trou noir de Kerr 247
 trou noir de Reissner-Nordström 247
 trou noir de Schwarzschild 247
 trou noir en rotation 248
 trou noir extrémal 248
 trou noir intermédiaire 255
 trou noir stellaire 255
 trou noir supermassif 254
 trou noir, auréole 254
 trou noir, collisions 255
 trou noir, entropie 250
 trous noirs 93, 133, 303
 trous noirs de Schwarzschild 245
 trous noirs primordiaux 254
 trous noirs, n'existent pas 252
 TUC 143
 tunnel 53
 téléportation 56
 télévision 31
 téra 276
- U**
- udeko 276
 udekta 276
 UICPA 318
 UIPPA 318
 ultra-relativiste, particule 70
 Union Géodésique et Géophysique Internationale 292
 unité 274
 unité astronomique 289
 unité de longueur naturelle de Planck 260
 unités de base 274
 unités de Planck corrigées 279
 unités de Stoney 279
 unités naturelles de Planck 277
 unités SI 286
 unités, non SI 277
 unités, véritables naturelles 279
 Univers 238
 univers 238
 univers complet 205
 univers présumé 205
 univers visible 204
 univers, rempli d'eau ou d'air 223
 univers, âge 65
 univers, énergie 234
 univers, état 235
 UNIX 19
- V**
- variables d'Ashtekar 270
 variance 286
 variation de masse, maximum 96
 variété 38
 variété riemannienne 193
 vecteur de Poynting 159
 vecteur, de genre espace 40
 vecteur, de genre lumière 40
 vecteur, de genre temps 40
 vecteur, nul 40
 vecteurs nuls 67, 68
 vendeko 276
 vendekta 276
 vent 18
 vide 261
 vide, main dans 303
 vie, apparition 211
 vieille dame circonspecte 74
 vieillissement maximum 75
 vitesse de l'obscurité 51, 52

V

VITESSE

- vitesse de la lumière à double sens 88
- vitesse de la lumière à sens unique 88
- vitesse de la lumière, finie 220
- vitesse de la lumière, théories avec variable 90
- vitesse de libération 241
- vitesse des ombres 52
- vitesse des ondes gravitationnelles 157, 161
- vitesse du son, valeurs 88
- vitesse parfaite 16, 266
- vitesse propre 41, 323
- vitesse relativiste 68
- vitesse supraluminique 233
- vitesse, plus rapide que la lumière 71
- vitesse, relative 72
- vitesse, relative – non définie 176
- Voie lactée 196
- Volkswagen 171
- volt 276
- voyage dans le passé 40
- voyage temporel dans le futur 42
- Vénus 167
- W**
- watt 276
- weber 276
- weko 276
- wakta 276
- WMAP 119
- X**
- xenno 276
- xenta 276
- Y**
- yocto 276
- yotta 276
- Yucatán, impact 212
- Z**
- zepto 276
- zetta 276



LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'Aventure de la Physique – Vol. II

La Relativité

- Pourquoi le changement et le mouvement existent-ils ?
- Comment l'arc-en-ciel se forme-t-il ?
- De tous les voyages possibles, lequel est le plus fantastique ?
- L'« espace vide » est-il réellement vide ?
- Comment pouvons-nous faire léviter des objets ?
- À partir de quelle distance entre deux points devient-il impossible d'en intercaler un troisième ?
- Que signifie « quantique » ?
- Quels problèmes demeurent sans réponse en physique ?



En répondant à ces questions ainsi qu'à d'autres sur le mouvement, cette collection constitue une introduction à la physique moderne qui se veut divertissante tout en mettant l'esprit à l'épreuve, chaque page proposant une surprise ou un défi à l'imagination.

En partant de la vie quotidienne, cette aventure donne un aperçu des derniers résultats en mécanique, thermodynamique, électrodynamique, relativité, mécanique quantique, gravité quantique et leur unification. Ce texte s'adresse aux étudiants du premier cycle universitaire et à tous ceux qui s'intéressent à la physique.

Christoph Schiller, titulaire d'un doctorat de l'Université Libre de Bruxelles, est physicien et vulgarisateur de la physique.

