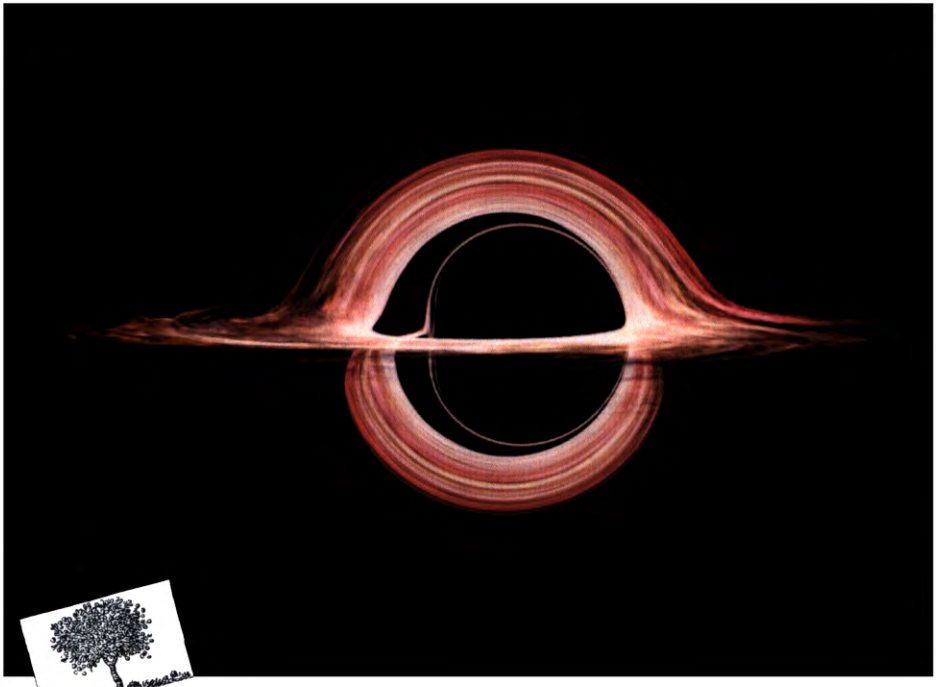
l'insoutenable gravité de l'univers

EINSTEIN L'A APPRIVOISÉE DANS SA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE MAIS ELLE NARGUE LA PHYSIQUE QUANTIQUE : LA GRAVITÉ, FORCE POURTANT LA PLUS IMMÉDIATE À NOS SENS, RÉSISTE À L'INFINIMENT PETIT...

gabriel chardin

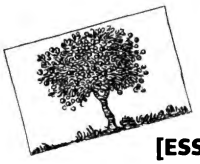
COMMENT AVOIR UNE VISION UNIFIÉE DE L'UNIVERS, DE SA NAISSANCE À SES DERNIERS INSTANTS ?



[ESSAI LE POMMIER !]

l'insoutenable gravité de l'univers

gabriel chardin



[ESSAIS LE POMMIER !]

Directeur de recherche au CNRS, **Gabriel Chardin** y préside le Comité des très grandes infrastructures de recherche (TGIR). Sa carrière scientifique a été consacrée à l'étude de la stabilité de la matière, l'asymétrie matière-antimatière, l'astronomie gamma et la recherche de la matière cachée de l'Univers, travaux pour lesquels il a reçu en 2007 la médaille d'argent du CNRS.

En parallèle de ses publications de recherche, il est au Pommier l'auteur de plusieurs ouvrages destinés à un large public, notamment *L'antimatière, La matière qui remonte le temps*, ou *Peut-on voyager dans le temps ?*

Relecture : Valérie Poge
Illustrations : Laurent Blondel
Mise en pages : Marina Smid

© Le Pommier, 2018
Tous droits réservés
ISBN : 978-2-7465-1083-8

170 bis, boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
www.editions-lepommier.fr

INTRODUCTION

Pourquoi ce titre « *L'Insoutenable Gravité de l'Univers ?* », qui évoque un célèbre ouvrage de Milan Kundera ? Parce que la gravitation, la force qui nous cloue à la surface de la Terre mais qui régit dans le même temps l'évolution de l'Univers tout entier (et notamment son expansion), reste un mystère, un siècle après la formulation par Einstein de sa théorie de la relativité générale. Et parce que, même remarquablement confirmée par tous les tests auxquels on l'a soumise, la gravitation ne dispose toujours pas d'expression quantique, alors que nous savons que le monde est quantique… Les théories des cordes fournissent certes depuis plus de trente ans une voie vers une expression quantique de la gravitation, elles n'en demeurent pas moins pour l'instant incapables de fournir une quelconque prédiction expérimentale.

Mais le mystère le plus intrigant, et une très forte indication que nous ne comprenons pas la gravitation, est cette découverte, il y a juste vingt ans, qu'une mystérieuse énergie noire serait à l'œuvre dans l'Univers : source de gravité répulsive accélérant l'expansion de l'Univers, elle

en représente environ 70 % de la densité d'énergie, ce qui en fait son principal composant. Irritation supplémentaire, le modèle cosmologique standard, modèle de référence de la grande majorité des physiciens aujourd'hui, indique qu'aux côtés de ces 70 % se trouvent également environ 26 % d'une mystérieuse matière noire, aussi peu détectée et identifiée que l'énergie noire. La matière ordinaire ne compterait que pour 4 % du total...

Les physiciens espèrent bien résoudre cette énigme aussi irritante que passionnante dans les prochaines années, et cet ouvrage vous propose de les accompagner dans leurs recherches, d'enquêter en leur compagnie, et même d'aller au-delà de la simple enquête...

Il sera au préalable important d'identifier les suspects, à travers les indices inattendus que nous apporte la gravitation. Pour cela, il nous faudra étudier les trous noirs, monstres cosmiques de masses souvent gigantesques, parfois égales à celle d'une galaxie, mais aussi étonnamment ressemblants avec des particules élémentaires. Nous rencontrerons également des objets plus étranges encore, les trous de ver, sortes de portes dans l'espace-temps. Et à nouveau, nous noterons la ressemblance entre ces trous de ver, abondamment utilisés par les ouvrages et films de science-fiction, avec des particules élémentaires, qui pourraient bien être des portes microscopiques dans l'espace-temps. Or, pour être mis en œuvre, un trou de ver doit contenir des sources de gravité *répulsive*. Considérée comme impossible pendant plusieurs dizaines d'années, cette gravité répulsive

est, comme nous l'avons vu, aujourd'hui admise comme le composant majeur de l'Univers…

Ceci nous conduira à étudier une voie passionnante et assez largement inexplorée : celle de l'antimatière. Introduite par Paul Dirac au début des années 1930, l'antimatière est justement la matière qui remonte le temps et elle possède une masse et une énergie négatives. Si la grande majorité des physiciens est prête à parier que, dans un champ de gravitation, le comportement de l'antimatière est identique à celui de la matière, aucune mesure n'a encore permis de le prouver. En dépit de sa difficulté extrême, trois expériences au CERN luttent pour y parvenir. Ce qu'elles vont pouvoir montrer du comportement de l'antimatière pourrait avoir des répercussions fondamentales. Car l'étude de l'énergie noire et du rôle possible que pourrait y jouer l'antimatière, non seulement autoriserait une vision nouvelle de multiples domaines – de l'état initial de l'Univers à l'asymétrie entre matière et antimatière, en passant par la formation des structures –, mais offrirait, n'ayons pas peur des mots, un changement complet de paradigme.

Un nouveau modèle d'univers, bien dans l'esprit de Paul Dirac.

L'Insoutenable Gravité de l'Univers, mode d'emploi

Ce livre n'est pas un livre de vulgarisation au sens usuel du terme dans la mesure où la solution de l'énigme qu'il étudie, et qui est posée par la gravitation, n'est pas encore connue aujourd'hui. Pour cette raison, j'y propose des chapitres d'une nature assez différente, partant de l'étude historique des débuts de la notion de gravitation jusqu'à des questions encore non résolues sur la nature de l'énergie noire, ou même le rôle inattendu que pourrait jouer l'antimatière dans l'explication de cette énigme. J'espère que leur contenu pourra intéresser autant le lecteur curieux de sciences qu'une fraction significative de mes collègues physiciens et mathématiciens qui travaillent, parfois depuis plusieurs dizaines d'années, à la résolution de l'énigme.

L'historique des premières approches de la gravitation, d'Aristote et sa cosmologie géocentrique jusqu'à Le Verrier et ses calculs sur l'anomalie de la trajectoire de Mercure, qui vont mener à la relativité générale d'Einstein, décrit le travail de construction patiente qui a été nécessaire pour parvenir à la théorie prédictive de Newton.

L'énigme de la trajectoire de Mercure mise en évidence par les calculs de Le Verrier introduit le deuxième chapitre consacré aux deux théories d'Einstein, les relativités restreinte et générale, cette deuxième théorie considérant la gravitation comme une courbure de l'espace-temps. Dans ce chapitre et les suivants, le lecteur trouvera parfois quelques équations plus compliquées que la célèbre formule « $E = mc^2$ », mais qu'il ne soit pas rebuté par ces formules, au demeurant relativement peu nombreuses : il peut les sauter allègrement pour en saisir simplement le sens expliqué dans le texte, sans nécessairement chercher à les maîtriser totalement, ce qui n'est pas le but de cet ouvrage.

Plusieurs des chapitres suivants décrivent les idées qui ont tenté de compléter la théorie d'Einstein de la gravitation, la relativité générale. La plupart de ces idées ont été introduites depuis le début des années 1970 et elles jouent un rôle fondamental dans la préparation à la dernière partie de l'ouvrage, avec l'univers de Dirac-Milne, qui décrit une proposition originale de résolution – partielle mais sur un point qui me semble fondamental (l'antimatière) – de l'énigme de la gravitation. J'y décris un univers non conventionnel, où l'antimatière existe comme un gaz diffus et très froid dans ce que nous appelons les « vides intergalactiques », aux côtés de la matière qui s'est effondrée dans des structures beaucoup plus denses, occupant une très faible fraction du volume de l'espace. Je pense utile d'avertir le lecteur que cet univers de Dirac-Milne est fortement non conventionnel, mais il présente l'avantage de mener à une

cosmologie qui possède un grand nombre de points de concordance avec l'Univers très surprenant dans lequel nous vivons. À la différence du modèle cosmologique standard, que la grande majorité des physiciens utilisent aujourd'hui pour décrire notre Univers, qui met en jeu six paramètres ajustables, ce n'est pas le cas de l'univers de Dirac-Milne, lequel n'a en particulier besoin ni de matière noire ni d'énergie noire.

Mais avant d'arriver à ce dernier chapitre, plusieurs chapitres sont nécessaires. C'est le cas en particulier du chapitre sur les trous noirs, décrivant les observations qui s'accumulent en faveur de leur existence, et qui démontre l'importance de ces objets qui peuvent atteindre des milliards de masses solaires au cœur d'un grand nombre de galaxies. Or, la théorie de formation des structures sous l'action de la gravitation a les plus grandes peines à expliquer leur existence… Ces trous noirs, ce qui est moins connu, ressemblent très fortement à des particules, et je m'attache à détailler cet aspect qui a, ces dernières années, pris une importance renouvelée.

Le chapitre sur les trous de ver, sortes de portes dans l'espace-temps, est fortement relié au précédent, ainsi qu'au sujet de la gravité répulsive, lui-même relié aux énergies et pressions négatives que l'on retrouvera dans la constante cosmologique introduite par Einstein, abandonnée par lui mais revenue dans l'actualité avec la découverte, en 1998, de l'énergie noire. Nous verrons pour quelles raisons les portes dans l'espace-temps comme les trous de ver semblent

extrêmement instables et fortement improbables à une échelle macroscopique, même si de nombreux ouvrages ou films de science-fiction y font appel. Pour autant, en dépit de leur instabilité, leur étude est très intéressante car l'on retrouve là le fait que les particules pourraient bien être des trous de ver…

L'observation directe des ondes gravitationnelles, analogue des ondes hertziennes de l'électromagnétisme, réalisée en septembre 2015 et annoncée en février 2016, après plusieurs mois de vérification par les équipes de LIGO et de Virgo, a constitué une fantastique découverte, un siècle presque exactement après la publication par Einstein de sa théorie de la relativité générale, et il m'a semblé essentiel de décrire cette odyssée. Mais l'une des plus grandes surprises de cette première observation, bientôt suivie de plusieurs autres, vient du fait que la plupart des catastrophes cosmiques qui permettent l'observation de ces ondes mettent en jeu deux trous noirs de masses d'une vingtaine à une trentaine de masses solaires, ce qui était totalement inattendu et qui constitue un élément important du puzzle qui va mener à l'univers de Dirac-Milne que je décris à la fin de cet ouvrage.

Le chapitre suivant, consacré aux liens eux aussi inattendus entre gravitation et information, permet de résumer les travaux sur ce sujet, initiés au début des années 1970 par Jacob Bekenstein, puis par Stephen Hawking, il y aura donc bientôt cinquante ans, et qui ont une importance fondamentale en pointant la probable structure discrète,

véritable tissu, de l'espace-temps. Les liens entre gravitation, thermodynamique et information, mis en évidence dès la fin des années 1960 par les quatre principes de la thermodynamique des trous noirs, contestés initialement, sont aujourd'hui bien établis, à défaut d'être parfaitement compris. Ils constituent des éléments importants dans le tableau de l'enquête que nous menons afin de résoudre l'énigme de la gravitation. Ils permettent par ailleurs de mettre en évidence une première violation, faible mais réelle, du principe d'équivalence tel qu'il est énoncé habituellement – tous les corps tombent de la même façon dans un champ de gravitation –, violation reliée à la question de savoir si un observateur est ou non grillé par un *firewall* (un mur de feu, au sens propre du terme) lorsqu'il traverse l'horizon d'un trou noir, ce qui nous amènera dans le dernier chapitre à une reformulation assez naturelle du principe d'équivalence.

Le chapitre consacré aux théories des cordes résume les principales recherches menées depuis plus de trente ans dans ce domaine mathématiquement très difficile, où les particules ne sont plus représentées par des points mais par des cordes, anneaux ou autres membranes, proposant une voie permettant de quantifier la gravitation, graal des physiciens des particules. Les deux révolutions de la théorie des cordes permettent de mettre en évidence le lien de plus en plus fort entre les théories des cordes et le chapitre précédent, qui en semblait initialement complètement déconnecté. L'idée que notre Univers pourrait être complètement décrit par une sorte d'hologramme, à la surface de notre espace

à trois dimensions d'espace et une dimension de temps, sans plus avoir affaire à la gravitation, sera une indication supplémentaire que la gravitation pourrait ne pas être une interaction comme les autres, mais plutôt une sorte de condition aux limites, caractère que je chercherai à préciser.

Après les théories des cordes et des (mem)branes, je décris dans un chapitre dédié quelques-unes des tentatives de décrire la gravitation et l'espace-temps comme une théorie discrète, non pas bien sûr au sens de la discrétion, mais au sens d'ensembles discrets, par opposition à continu – un exemple d'ensemble discret étant donné par les nombres entiers, bien séparés les uns des autres, face aux nombres réels, avec la puissance du continu, sans « trous » entre eux. L'espace-temps apparaît alors comme une sorte de tissu dont la structure peut s'ordonner ou au contraire s'effilocher sous l'action de la gravitation. Aucune théorie discrète totalement cohérente, et encore moins prédictive, n'existe aujourd'hui, mais le programme m'est apparu suffisamment important et riche pour que je décrive brièvement quelques approches, parmi lesquelles les automates cellulaires chers à Stephen Wolfram, le jeu de la vie de John Conway, ou encore la théorie quantique à boucles défendue par Lee Smolin, Abhay Ashtekar et Carlo Rovelli.

Dans le chapitre consacré au principe de Mach, je décris une vision peu connue et assez stupéfiante de l'Univers, à laquelle Einstein avait longtemps adhéré, avant d'y renoncer à regret dans la dernière partie de sa vie. Les travaux de Dennis Sciama et de ses successeurs ont permis de redonner

un sens quantitatif au principe de Mach, initialement assez vague dans sa formulation. Dans cette vision, la masse inertielle – mesure de la force de réaction que l'on ressent quand on essaie d'accélérer un corps – apparaît comme la réaction de *tout l'ensemble des masses de l'Univers*, et cela de façon *instantanée malgré la distance*. La façon dont ce programme *relationnel*, qui déconstruit l'espace et le temps absolu de Newton, peut être rempli en respectant la relativité et la vitesse limite de la lumière est une remarquable surprise. Stephen Hawking avait d'ailleurs, en 1965, critiqué l'expression machienne de la relativité générale proposée par Sciama, Hoyle et Narlikar, montrant qu'elle était équivalente à la relativité générale à la seule condition qu'il existe dans l'Univers des masses négatives, ce qui, dans son esprit, ne pouvait que signifier que la théorie était fausse. Mais la gravité répulsive a fait une entrée tonitruante dans l'arène de la cosmologie en 1998, menant au prix Nobel de physique de 2011, et rendant beaucoup plus vraisemblable aujourd'hui cette version moderne du principe de Mach.

Avec ces éléments rassemblés, il est temps de présenter les raisons qui ont conduit à la construction de l'univers de Dirac-Milne, un univers symétrique matière-antimatière, surprenant et contredisant nombre de présupposés des cosmologistes, mais finalement analogue au système bien connu des électrons et des trous – un trou étant un « électron manquant » – dans un semi-conducteur. On revient ainsi à la proposition de Paul Dirac de représenter une antiparticule comme un déficit de particule, ou comme un « trou » dans

la « mer de Dirac », que nous décrirons. Cet univers répond à un grand nombre de tests de la cosmologie, mais semble contredit par deux d'entre eux, ce qui amène à reconsidérer ces deux tests.

Cet univers sera-t-il confirmé ou non par des expériences plus précises ? Seul l'avenir nous le dira et je décris brièvement trois expériences en cours au CERN, nommées AEgIS, ALPHA-g et Gbar, qui luttent afin de mesurer enfin l'action de la gravitation sur des particules d'antimatière. Même si mes collègues théoriciens votent actuellement presque tous pour l'hypothèse d'un résultat négatif, l'observation d'une gravité répulsive à l'œuvre dans l'Univers – l'énergie noire – me semble donner de très bonnes chances à ces expériences de nous fournir dans les années qui viennent, et peut-être dès la fin de l'année 2018, une grande et belle surprise.

J'espère que le lecteur sera indulgent pour cette première édition de *L'Insoutenable Gravité de l'Univers*, forcément incomplète et encore pleine de mystères, et ressentira comme moi le souffle de l'excitation et de la passion devant cette énigme qui nous interpelle depuis près d'un siècle, et pour laquelle j'espère fermement que les prochaines années nous apporteront des éléments essentiels de réponse. Je remercie par avance les lecteurs qui me signaleront les erreurs, manquements ou coquilles qu'ils auront notés.

La cosmologie, d'Aristote à Newton

Au début n'est que le froid de l'hiver, la chaleur étouffante de l'été et le poids des jours dans un monde où la survie jusqu'au jour prochain est déjà un miracle dans la plupart des zones où l'homme a réussi à s'accrocher. La régularité des saisons, surveillée par les hommes avec la peur que la nuit ne l'emporte et que la bonne saison ne revienne pas, la fête que constitue, après la diminution de la durée des jours dans le creux de l'hiver, le retour à la lente croissance des jours aux alentours du 21 décembre, constituent les premiers repères astronomiques dans l'esprit des hommes.

Les hommes observent le ciel, porteur du froid et de la chaleur, pour deviner leur futur, et les mages se font astronomes : la voûte céleste défile devant les hommes de façon totalement régulière, du moins au premier regard. En effet, quelques astres semblent avoir leur mouvement propre, comme cette étoile du Berger qui est la première à apparaître dans le ciel du soir et la dernière à disparaître dans le ciel du matin, ou comme cette étoile un peu rouge,

identifiée au dieu de la Guerre Mars, qui fait de curieux mouvements dans le ciel, avec même des rebroussements, des retours en arrière très surprenants. Et au fil des siècles, des astronomes vont transporter à travers les générations un savoir durement acquis dans des pays aussi divers que Sumer (actuel Irak), la Grèce et la Chine, notamment.

Ératosthène

Dès le Ve siècle avant Jésus-Christ, les Grecs savent que la Terre est ronde, et Platon comme Aristote le mentionnent dans leurs ouvrages. Aristote a même donné une première estimation de la circonférence de la Terre, qu'il estime à 60 000 kilomètres (la valeur réelle est très proche de 40 000 kilomètres, même si l'on doit prendre en compte le fait que la Terre n'est pas exactement sphérique mais légèrement aplatie). Pour ce peuple où les voyages marins ont joué une grande importance, les observateurs restés sur la terre ferme ont en effet noté que les navires semblaient sombrer sous l'horizon jusqu'à disparaître complètement lorsqu'ils s'éloignaient des côtes, alors même qu'ils revenaient ensuite sains et saufs à l'issue de leur voyage.

Dans le génie des premiers hommes dont les découvertes ont conduit à notre société technologique, il faut garder en tête le nom d'Ératosthène (276-194 avant Jésus-Christ) qui a imaginé une méthode scientifique qui pouvait être généralisée facilement à deux points quelconques sur un même méridien, et permettant non seulement de confirmer

l'hypothèse que la Terre n'est pas plate, mais de mesurer assez précisément sa circonférence. (Rendez-vous en fin de chapitre pour les détails du calcul.)

Bien sûr, il y eut encore ensuite périodiquement des contestations du fait que la Terre était ronde, sous l'argument que les objets terrestres situés aux antipodes de nous devraient alors s'élever dans les cieux, mais de façon assez constante, y compris au Moyen Âge, la majorité des gens éduqués savaient que la Terre était ronde, car comme le disait l'astronome indien Brahmagupta : « C'est la nature de la Terre d'attirer les choses. »

Aristote

Né en 384 avant Jésus-Christ, Aristote s'est intéressé à tous les domaines de connaissances humaines[1]. Le philosophe grec a notamment proposé un système d'ordonnancement du monde physique, considéré comme intelligible et accessible à la raison. Le système aristotélicien suppose que les corps peuvent se réduire à leurs composantes en quatre éléments fondamentaux : la terre, le feu, l'air et l'eau. La terre est l'élément le plus lourd et le feu le plus léger. Évidemment, avec quatre éléments, il ne peut y avoir qu'un plus lourd et un plus léger, et les deux autres éléments se trouvent dans un statut moins clair vis-à-vis de la gravité.

1. Sa conjointe, Pythias d'Assos, était d'ailleurs une biologiste et certaines descriptions animales d'Aristote et de Pythias d'Assos ont traversé le temps, comme la « lanterne d'Aristote » chez les oursins.

Mais selon Aristote, par ordre de lourdeur, on trouve la terre, puis l'eau, l'air et enfin le feu, qui s'élève toujours vers les sphères célestes.

Un des aspects fondamentaux de la représentation d'Aristote est que le monde terrestre, et plus généralement le monde sublunaire, qui s'étend jusqu'à la Lune sans l'inclure, obéit à des lois qui sont différentes du monde supralunaire, qui contient la Lune et les corps célestes. Aristote propose donc une première théorie physique, que nous savons fausse, avec une classification s'appuyant largement sur la nature des choses d'être lourdes ou légères, et l'ordre supposé naturel des choses.

Ainsi Aristote affirme que les corps lourds cherchent à rejoindre le centre de la Terre, leur lieu naturel. La Terre est de ce fait sphérique car « les corps se précipitant également de toutes parts vers un seul centre (et) l'addition qui était ainsi faite étant partout égale, il a bien fallu que l'extrémité de sa surface fût partout aussi à égale distance du centre »[2].

S'il peut nous sembler bizarre aujourd'hui qu'Aristote ait cherché à imposer des lois différentes a priori pour la Terre et les objets célestes, la question de lois communes aurait probablement paru saugrenue tant les deux mondes terrestre et céleste semblaient étrangers l'un à l'autre. Dans sa division entre monde sublunaire et supralunaire, Aristote suppose ainsi que la gravité exerce son action dans le monde

2. Aristote, *Traité du ciel*, Ladrange et A. Durand, livre II, chapitre XIV, p. 214.

sublunaire, mais pas dans le monde supralunaire. Une des caractéristiques du monde supralunaire d'Aristote est sa perfection. Ce monde supralunaire accueille les dieux : il est donc naturel qu'il soit le lieu de la perfection et du divin. Ainsi la Lune était-elle supposée être un disque poli et parfait, et le Soleil un astre flamboyant également parfait.

Les autres caractéristiques de ce monde supralunaire, royaume de la perfection, sont l'éternité, les astres ne connaissant ni début ni fin dans leur mouvement ni dans leur existence, et le fait que tous les corps se meuvent sur des orbites parfaitement circulaires et uniformes. Le monde supralunaire tel que le conçoit Aristote est étranger aux quatre éléments du monde sublunaire, et il est empli d'un mystérieux cinquième élément spécifique, la quintessence ou éther, avatar que nous retrouverons sous d'autres formes par la suite. La Terre se trouve donc au centre de l'Univers car c'est le lieu qui cherche à rassembler tous les lourds. La Terre elle-même et les cieux sont organisés en couches concentriques, dans une rotation uniforme autour du centre de la Terre. Et si Aristote est bien conscient du fait que le monde terrestre n'est pas le lieu de la perfection, cette perfection va croître vers les couches extérieures du monde supralunaire.

Ce modèle développé par Aristote nous semble aujourd'hui d'une grande naïveté et d'un grand arbitraire, mais il représente une tentative de mettre de l'ordre dans un Univers jusqu'ici peu compréhensible. De fait, l'influence de l'enseignement d'Aristote sera tellement forte que son

modèle, développé et précisé dans le modèle de Ptolémée, restera dominant pendant une quinzaine de siècles, en dépit de ses contradictions et de la complication grandissante nécessitée par la volonté de le garder compatible avec les observations astronomiques.

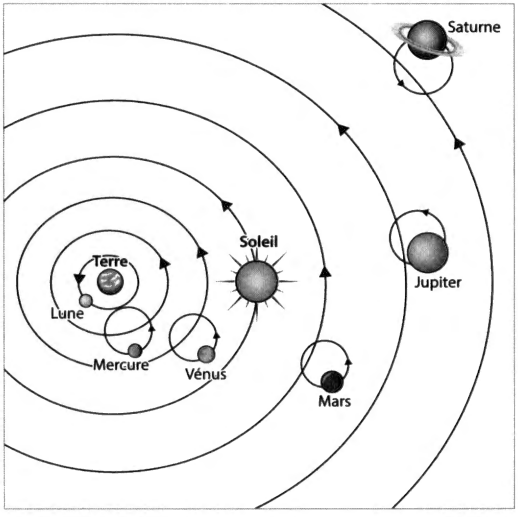
Ptolémée

Né aux alentours de 90 après Jésus-Christ et mort vers 168 après Jésus-Christ, Ptolémée, probable citoyen romain d'origine grecque habitant en Haute-Égypte, est comme Aristote un savant s'intéressant à l'ensemble des domaines de la connaissance. Il est en particulier astronome – ainsi qu'astrologue, qu'il distingue bien de l'astronomie. Le modèle que Ptolémée va décrire dans *L'Almageste*, son ouvrage majeur écrit aux alentours de 140 après Jésus-Christ, cherche à présenter la synthèse astronomique, ou grande synthèse, de plusieurs siècles d'observations astronomiques qui ont précédé Ptolémée lui-même, avec l'apport essentiel d'auteurs comme Hipparque, que Ptolémée cite d'ailleurs abondamment.

Dans le modèle de Ptolémée, comme chez Aristote, c'est la Terre qui est au centre de l'Univers, constitué de sphères concentriques orbitant autour de la Terre. Ayant compilé un très grand nombre d'observations et écrit des tables de prédiction des mouvements astronomiques, Ptolémée sait que le mouvement circulaire uniforme, à vitesse angulaire constante, ne marche pas pour pratiquement toutes les

planètes, et même pour le Soleil. Si la trajectoire de la plupart des astres peut être approximativement représentée par des cercles dans le ciel, comme on l'a dit, certains astres (en fait les planètes) rebroussent parfois chemin dans le ciel. Pour parvenir à des prédictions raisonnables, il est donc nécessaire à Ptolémée d'introduire non pas une trajectoire circulaire unique, mais des combinaisons de cercles organisées en épicycles, c'est-à-dire un cercle d'un rayon $r1$ tournant à l'intérieur d'un autre cercle de rayon r^2 (ci-dessous).

Cette combinaison de mouvements circulaires peut sembler totalement artificielle et assez évidemment fausse



Dans le modèle de Ptolémée, c'est autour de la Terre qu'orbitent le Soleil et les planètes du Système solaire. Pour décrire les orbites de ces dernières, il est alors nécessaire de combiner des épicycles, en introduisant un grand nombre de mouvements circulaires – une quarantaine dans le modèle de Ptolémée – pour reproduire avec une précision acceptable le mouvement des planètes tel qu'il est vu de la Terre.

aujourd'hui, mais le poids du modèle d'Aristote est tel que le modèle développé par Ptolémée, avec sa composition de mouvements circulaires qui, individuellement, peuvent être considérés comme parfaits au sens d'Aristote, constitue néanmoins une approche de procédure algorithmique pour calculer le mouvement des planètes et de la Lune.

Rétrospectivement, nous pouvons réaliser que le mouvement composé résultant d'un cercle tournant dans un autre cercle est simplement dû au fait que la planète Terre, sur laquelle se trouve l'observateur, et la planète observée depuis la Terre tournent approximativement selon des orbites raisonnablement circulaires autour du Soleil, ce qui est en opposition avec le modèle géocentrique d'Aristote et de Ptolémée. Et si, avec deux ou trois cercles, on arrive effectivement à décrire de façon assez raisonnable le mouvement de l'essentiel des planètes, on doit augmenter assez vite le nombre des épicycles si on veut aboutir à une bonne précision dans la prédiction d'événements comme des éclipses. Certains astronomes/astrologues – la différence n'est pas toujours très nette à l'époque – proposent parfois même d'utiliser plus d'une dizaine d'épicycles par planète ! Où s'arrêter dans la mesure où tout mouvement périodique va pouvoir se décomposer en un nombre infini d'épicycles ? Plus ennuyeux, dans le cas de la Lune et du Soleil, dont il est possible d'observer la taille apparente et donc indirectement la variation de la distance, les astronomes se rendent compte que le mouvement n'est pas uniforme et que le mouvement circulaire n'est pas « parfait »...

Conscient de ces problèmes, Ptolémée introduit la notion de point équant, un point décalé du centre du cercle et par rapport auquel la rotation retrouverait son uniformité, artifice qui sera plus tard durement critiqué par Copernic. Pour autant, Ptolémée, astronome pragmatique intéressé par l'exactitude des prédictions, est prêt à s'affranchir des règles édictées par Aristote, pour qui les astres étaient fixés sur des sphères de cristal, considérant au contraire qu'ils se déplacent dans un fluide parfait n'exerçant aucune résistance à leur mouvement. Ainsi, en dépit de leur complication mais grâce à leur assez bonne précision, les tables et le modèle développés par Ptolémée restèrent la référence jusqu'au début du XVIe siècle, où la remise en cause de son modèle fut effectuée par Nicolas Copernic, avant de l'être par Johannes Kepler et Galilée.

L'influence de la religion sur les modèles cosmologiques

Si le modèle d'Aristote distingue le monde sublunaire, incluant la Terre, au centre du monde, du monde supralunaire, divin et parfait, Aristote érige cependant en principe que la réalité du monde est accessible aux sens et au raisonnement, laissant en principe ouvert une remise en question de son modèle. La religion catholique, quant à elle, reconnaissant en Jésus-Christ le fils de Dieu, considérera jusqu'à une époque très tardive comme sacré le rôle central et unique de la Terre au centre du monde, avant d'admettre

finalement, au début du XVIIIe siècle, la validité du modèle copernicien et de la gravitation de Newton, après une mise à l'index des ouvrages de Copernic, une condamnation de Galilée et avoir brûlé vif Giordano Bruno pour ses visions hétérodoxes – mais étonnamment justes d'un point de vue moderne – sur l'Univers. La remise en question du modèle copernicien semble avoir été beaucoup plus aisée dans le monde protestant, par ailleurs beaucoup moins centralisé que l'Église romaine – même si l'on connaît là aussi la persistance des idées créationnistes jusqu'à nos jours dans certaines sectes protestantes.

Dans le monde musulman, les attitudes ont suivi un chemin inverse après une période d'or de la science arabe, qui s'étend du VIIIe siècle au milieu du XIIe siècle. En ces temps primitifs de la religion islamique, la logique n'a pas encore perdu ses droits : dès le début du IXe siècle, l'astronome perse Al-Khawarizmi est sans doute le premier à faire l'hypothèse d'une force d'attraction entre les corps célestes, et Ibn Rushd – Avicène dans le monde occidental – discute les hypothèses aristotéliciennes et défend l'idée d'un monde intelligible et connaissable par les sens. Un siècle plus tard cependant, Al-Ghazâlî va critiquer violemment cette approche, jugée impie, au nom de la prééminence de la religion : selon Al-Ghazâlî, on ne peut pas dire qu'une pierre lâchée à vitesse nulle va tomber avec une certaine loi de vitesse, car si Dieu veut qu'elle flotte ou qu'elle remonte, il le décidera et aucune loi physique ne pourra venir lutter contre cette volonté divine. Dans cette lutte entre pensée

logique et attitude dogmatique, la pensée d'Ibn Rushd subit une défaite tragique qui perdure, avec pour conséquence aujourd'hui encore une faiblesse extrême de l'apport scientifique du monde arabe (le monde perse ayant mieux tiré son épingle du jeu). Comme le dit Abdus Salam, l'un des deux seuls Prix Nobel musulmans, « de toutes les grandes civilisations de la planète, la communauté islamique est celle qui a fait à la science la place la plus restreinte ».

Copernic

Copernic naît en Pologne en 1473 à Thorun (Poméranie). Après des études à l'université de Cracovie, il étudie en Italie à l'université de Bologne, où il rencontre l'astronome Domenico Novara qui lui expose ses critiques vis-à-vis du modèle de Ptolémée. Après des observations astronomiques, Copernic revient en Pologne, où il poursuit l'observation des astres. Ses études comme ses observations le convainquent de remettre en cause le modèle de Ptolémée au profit d'un modèle héliocentrique. Copernic ne se sent cependant pas assez sûr de son modèle pour le publier, mais fait circuler un manuscrit (écrit au cours des années 1511 à 1513) parmi ses amis scientifiques. Ses compétences en astronomie étant déjà internationalement reconnues, Copernic est consulté par Rome pour la réforme du calendrier dans le cadre du concile du Latran. Curieusement, Copernic n'est pas prêt à renoncer au mouvement circulaire uniforme, jugé comme un ingrédient essentiel dans la perfection du mouvement des

astres. Or, comme nous le savons aujourd'hui, les orbites des planètes sont elliptiques, pas circulaires. De ce fait, malgré son modèle héliocentrique, il est impossible à Copernic d'améliorer notablement les prédictions astronomiques sans rajouter lui aussi des épicycles disgracieux. Au tout début des années 1530, Copernic a achevé le manuscrit de son ouvrage *De revolutionibus orbium celestum* (« Des révolutions des orbites célestes »), et sa thèse parvient à Rome et au pape Clément VII dès 1533, sans que cela suscite initialement de réaction négative. Il faudra attendre l'année 1543 de la mort de Copernic pour que soit imprimé à Nuremberg, et diffusé, cet ouvrage majeur, dédié au pape Paul III, Copernic étant sans doute un peu effrayé par sa diffusion de son vivant. C'est aussi l'approche de l'éditeur, prudent devant les risques que l'ouvrage soit sinon mis à l'index ou brûlé au bûcher, ce dont Giordano Bruno fera, quelques dizaines d'années plus tard, l'amère expérience. Complexe pour l'époque et bourré de calculs, l'ouvrage passera initialement relativement inaperçu en dépit de la révolution qu'il propose…

Copernic est très pragmatique dans son approche et a notamment l'intention d'améliorer le calendrier romain qui dérive doucement année après année, et où les saisons menacent de ne plus être du tout en phase avec les dates du calendrier. La véritable révolution que propose Copernic est par ailleurs abordée de façon astucieuse, par l'indication que l'expression en termes d'héliocentrisme est intéressante, car simplifiant les calculs. Les trajectoires en termes de cercles centrés sur le Soleil, si elles ne constituent pas une description

parfaite, simplifient en effet fortement la description du mouvement des planètes. On peut ainsi désormais ordonner facilement les planètes selon leur distance de trajectoire circulaire autour du Soleil. Mercure et Vénus étant à distance plus proches que nous du Soleil, on comprend également pour quelle raison on ne les observe que toujours relativement proches du Soleil, en début et en fin de nuit, alors que les autres planètes, du fait qu'elles sont plus éloignées du Soleil que la Terre, peuvent apparaître à n'importe quel moment de la nuit et en une position complètement opposée au Soleil dans le ciel selon leur position sur leur orbite autour du Soleil. Le cycle jour-nuit s'explique non plus par la rotation du Soleil autour de la Terre, mais par la rotation de la Terre sur elle-même. La rotation de la Terre autour du Soleil entraîne un rythme très différent de la journée : c'est l'année et son rythme des saisons.

Le modèle de Copernic explique par ailleurs pour quelle raison les périodes des épicycles principaux des planètes Mars, Jupiter et Saturne étaient aussi proches de la période de l'épicycle du Soleil : toute correction sur la trajectoire de la Terre, tournant autour du Soleil, se retrouvait automatiquement ensuite dans les corrections de trajectoire des autres astres. Mais à l'évidence une conséquence du modèle de Copernic est que sa révolution annuelle autour du Soleil en fait une planète comme les autres. Copernic, sans atteindre encore la précision des lois de Kepler dont nous allons reparler, commence à étudier la relation entre distance au Soleil et période de révolution autour de

celui-ci. Ainsi, comme le justifie Copernic et son éditeur à Nuremberg, ordre, harmonie et simplification des calculs sont introduits dans le cosmos…

Comme on l'a indiqué plus haut, Copernic critique sévèrement comme une complication inutile l'introduction du point équant introduit par Ptolémée, qui permettait pourtant une meilleure approximation du mouvement elliptique des trajectoires, car Copernic veut conserver mordicus le mouvement circulaire postulé par Aristote – situation intenable qui a été pour une large part la cause du délai d'une trentaine d'années entre l'écriture de *De revolutionibus orbium coelestium* et sa publication[3]. En revanche, le modèle héliocentrique de Copernic permet de supprimer les épicycles de grande taille, qui étaient en fait dus à la rotation annuelle de la Terre autour du Soleil. Au-delà des confins des planètes et du Système solaire, Copernic n'a pas renoncé non plus à l'ingrédient aristotélicien de la « sphère des fixes », sphère à distance finie censée abriter l'ensemble des étoiles, dont la distance estimée à l'époque était très inférieure à la distance réelle aux étoiles les plus proches, comme Proxima Centauri.

L'ordre et l'harmonie apportés par le modèle de Copernic sont donc encore partiels et il faudra les travaux de Kepler et de Galilée pour corriger ce modèle héliocentrique

3. Et donc, contrairement à une légende tenace, le modèle de Copernic n'a pas permis une réduction importante du nombre d'épicycles par rapport au modèle de Ptolémée – il y en a même 48 dans le modèle publié finalement, contre une quarantaine dans celui de Ptolémée.

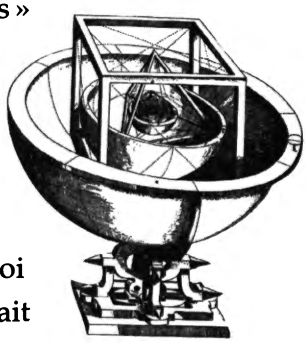
révolutionnaire, afin de permettre enfin à Newton, avec l'aide de Hooke, de parvenir à exprimer la loi de gravitation universelle qui permettra enfin des prédictions précises des mouvements dans le Système solaire.

Kepler

Johannes Kepler naît prématuré en 1571 en Allemagne, vingt-huit ans après la mort de Copernic, et souffrira toute sa vie d'une santé fragile et, ce qui est ironique pour un astronome, d'une mauvaise vue. Ses parents lui font découvrir l'astronomie et des phénomènes comme les éclipses, le passage d'une comète et l'observation des planètes. Lors de ses études à l'université de Tübingen, il suit les cours d'astronomie de Michael Maestlin qui, même si l'orthodoxie lui impose d'enseigner le système de Ptolémée, est un fervent partisan du système héliocentrique de Copernic – enthousiasme qu'il communique à Kepler. Après ses études, Kepler devient professeur de mathématiques à Graz, où il publie des almanachs astrologiques – qui rencontrent un certain succès, Kepler étant apparemment assez chanceux dans ses prédictions.

Deux ans après son arrivée à Graz, Kepler publie plus sérieusement son premier ouvrage scientifique, *Mysterium cosmographicum* (« mystères cosmiques »). Il y développe une théorie où les distances relatives des planètes de Mercure à Saturne sont déterminées par les dimensions des polyèdres réguliers : cube, tétraèdre, octaèdre, icosaèdre et dodécaèdre.

Si cette « musique des sphères » peut nous paraître un peu étrange, il y a deux aspects fondamentaux dans l'approche de Kepler : son approche est héliocentrique, et les distances qu'il trouve avec son hypothèse sont issues d'une loi relativement simple, que l'on pourrait qualifier d'« harmonique ». Environ deux siècles plus tard, Titius proposera d'ailleurs une loi harmonique similaire, reprise et étendue ensuite par Bode. Cette loi harmonique prédit la position des planètes successives, et notamment la position d'Uranus, qui n'était pas encore connue à l'époque, ainsi que la position d'une cinquième planète entre Mars et Jupiter correspondant en fait à la ceinture des astéroïdes. Comme plus tard la loi de Titius-Bode, cette première publication de Kepler est donc basée sous le signe de la simplification et de l'harmonie, et semble explicable par les résonances entre planètes, qui aboutissent à privilégier certaines orbites.

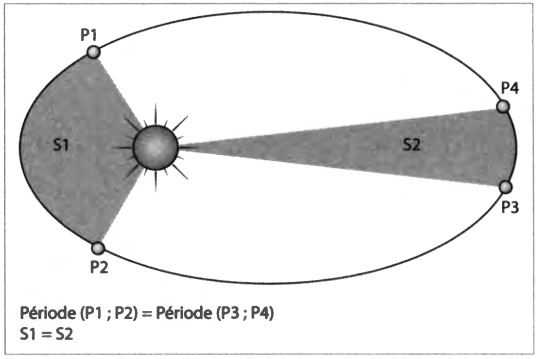


Bien avant les travaux de Titius puis de Bode, Kepler avait noté les rapports harmoniques entre les rayons des orbites des planètes, loi harmonique approchée qu'il avait matérialisée par des polyèdres encastrés les uns autour des autres.

Mais la défense par Kepler de l'héliocentrisme, même dissimulée derrière des arguments de simplicité et d'esthétique, a pour conséquence qu'il est poursuivi et qu'il doit quitter Graz. Il rejoint alors Prague, où l'astronome Tycho Brahe, qui connaît ses travaux, lui propose de devenir son

assistant. Les données de Tycho Brahe, excellent observateur, et doté d'une bien meilleure vue que Kepler, vont être d'une très grande utilité à ce dernier. Mais les relations entre Kepler et Tycho Brahe sont houleuses, car Tycho Brahe ne croit pas à l'héliocentrisme de Copernic, défendant l'idée que la Terre est bien au centre de l'Univers, dans un modèle où toutes les autres planètes tournent autour du Soleil, sans se rendre compte que sa théorie est, au moins au sens galiléen, strictement identique au modèle copernicien…

Tycho Brahe confie à Kepler la tâche de déterminer précisément la trajectoire de Mars, prédite de façon imprécise par les tables astronomiques existantes. Kepler va mettre six ans à mener à bien cette tâche, mais le résultat est extraordinaire dans son pouvoir prédictif nouveau. En effet, Kepler énonce, ce qui constitue sa première loi, que les planètes suivent précisément des trajectoires elliptiques – et non circulaires –, dont l'un des foyers est le Soleil. Concernant la vitesse à laquelle les trajectoires elliptiques sont décrites, là aussi Kepler va à l'encontre des postulats de Ptolémée (et même de Copernic) en démontrant sa deuxième loi, la « loi des aires », qui affirme que toute planète, dans son mouvement autour du Soleil, balaie une aire constante par unité de temps (page suivante). Si les deux premières lois sont publiées dès 1609 dans un ouvrage bien nommé intitulé *Astronomia nova*, il faudra encore près de dix ans à Kepler pour parvenir à sa troisième loi, qui énonce que pour toutes les planètes du Système solaire – car on peut désormais l'appeler ainsi –, le carré de la période de révolution autour du Soleil divisé par le cube du demi-grand axe de



La deuxième loi de Kepler, ou loi des aires, énonce que la surface balayée par unité de temps par une planète dans son mouvement autour du Soleil est une constante, le Soleil étant par ailleurs situé au foyer d'une orbite elliptique (première loi de Kepler). Ces deux lois de Kepler, simples et prédictives, donnent évidemment un rôle privilégié au Soleil, en contradiction avec les modèles d'Aristote et de Ptolémée.

l'ellipse est une constante, identique pour toutes les planètes. Au passage, Kepler fait l'hypothèse que le Soleil possède un mouvement de rotation propre et qu'il exerce une force sur les planètes, qu'il appelle « quasi magnétique ».

Avec ce travail colossal de Kepler, qui unifie des siècles d'observation en un corpus unique désormais extrêmement simple, tout est désormais en place pour que puisse être précisée la théorie de la gravitation universelle, dans la construction de laquelle Isaac Newton jouera un rôle essentiel.

Galilée

Né en 1564 à Pise, fils d'un musicien, Galilée étudie dans cette ville les mathématiques ainsi que la médecine, avant

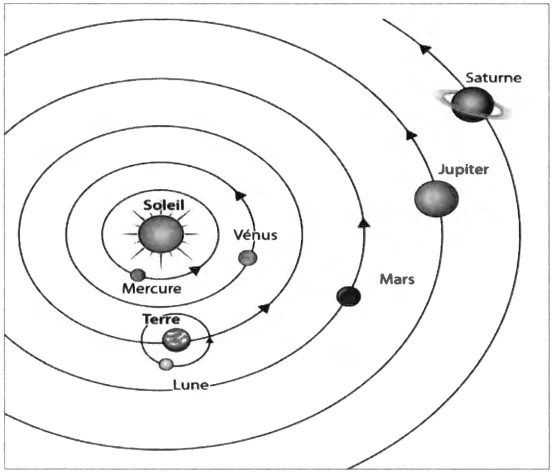
de devenir un professeur de mathématiques, d'abord à l'université de Pise, puis à celle de Padoue. L'un des apports fondamentaux de Galilée fut de s'en remettre à l'observation, à l'expérience et à la logique pour construire une représentation du monde. Par beaucoup d'aspects, il peut être considéré comme le père de la physique moderne.

Galilée ayant appris que les Hollandais avaient assemblé dans un tube deux lentilles, ce que nous appelons encore aujourd'hui une longue-vue, il entreprend de fabriquer une lunette, dont les performances semblent aujourd'hui dérisoires par rapport aux performances des grands télescopes modernes, mais dont le grossissement d'un facteur 20 environ lui permet, une fois qu'il l'a pointée vers le ciel, un très grand nombre de découvertes qui vont révolutionner la conception du monde et renforcer le modèle copernicien. De fait, avec l'aide de sa lunette astronomique, Galilée observe que la Lune n'est pas plate, uniforme et parfaite comme on l'imaginait, mais qu'elle présente de nombreux cratères ainsi que des paysages qui font qu'on peut la comparer à la Terre, suggérant ainsi un lien entre le monde sublunaire et le monde supralunaire, totalement indépendants chez Aristote. De même, les corps célestes dont la trajectoire n'est pas régulière dans le ciel, les planètes, apparaissent comme des petits disques de taille finie, les étoiles étant visiblement beaucoup plus lointaines car restant désespérément ponctuelles en dépit du grossissement de la lunette astronomique de Galilée, et cela même pour les étoiles dont nous savons aujourd'hui qu'elles

sont relativement proches et pour lesquelles il sera possible d'observer, à partir du XIXe siècle seulement, un effet de parallaxe annuelle, c'est-à-dire une petite variation annuelle de la position apparente de ces étoiles sur la sphère céleste en raison du mouvement (approximativement) circulaire de la Terre autour du Soleil.

L'une des performances les plus remarquables des observations astronomiques de Galilée fut sa découverte que Jupiter possédait plusieurs satellites, qui apparaissaient dans sa lunette comme de petites étoiles, mais suivant un mouvement orbital autour de Jupiter. Ce dernier devenait lui aussi une planète dotée, non pas d'une seule Lune comme la Terre, mais de plusieurs, ce qui conduit Galilée à la représentation héliocentrique suivante du Système solaire (ci-contre), où Galilée attribue quatre satellites à Jupiter (69 ont été identifiés à ce jour). La Terre devenait donc une planète comme les autres (ci-contre).

Mais le clou dans le cercueil de la cosmologie d'Aristote est sans doute apporté lorsque Galilée observe également le Soleil et remarque que celui-ci présente des taches à sa surface. Diverses observations avaient déjà relaté ces taches, certaines remontant à l'Antiquité, notamment par les astronomes chinois (dont Galilée ne connaissait cependant pas les travaux). Mais d'une part, il était difficile à l'œil nu de confirmer l'étendue de ces taches et d'autre part l'hypothèse alors avancée était que ces taches étaient dues à des corps célestes venant s'interposer entre nous et le Soleil. Voilà qui permettait de sauver le caractère parfait et immuable du Soleil.



Mais avec sa lunette astronomique, en projetant sur une feuille de papier blanc l'image du Soleil (dont l'observation oculaire directe au travers de sa lunette aurait été dévastatrice), Galilée démontre que ces tâches ne peuvent pas être dues à des planètes qui viendraient s'interposer sur le chemin de la lumière du Soleil. Après une série d'observations que Galilée date plus tard à 1610 et aux années suivantes, le savant observe le caractère changeant des taches solaires, de leur nombre et de leur surface. Galilée pense par ailleurs pouvoir émettre l'hypothèse qu'une partie de ce caractère changeant est dû à la rotation du Soleil sur lui-même, hypothèse également avancée par Kepler. Le Soleil n'est donc pas, pas plus que la Lune, un objet parfait, et il n'est pas non plus immuable. Et si le Soleil tourne sur lui-même, pourquoi la Terre ne le ferait-elle pas également ? Cette représentation est évidemment en totale opposition avec la représentation

aristotélicienne du monde car dans l'hypothèse de Galilée et de Kepler, en accord avec le modèle copernicien, c'est la rotation de la Terre sur son axe, avec une période d'environ vingt-quatre heures, qui engendre l'alternance du jour et de la nuit, alors que les saisons et leur répétition doivent être attribuées à un mouvement d'orbite de la Terre autour du Soleil, en trois cent soixante-cinq jours environ.

Enfin, Galilée réalise également des observations de la Voie lactée, et découvre que celle-ci est constituée d'une multitude d'étoiles. Bien sûr, Galilée, avec sa lunette encore très rudimentaire, ne peut pas observer l'ensemble des étoiles, mais il en découvre des milliers et leur vision suffit à supposer que la Voie lactée est en fait constituée d'un nombre gigantesque d'étoiles, qui se fondent dans un aspect laiteux en raison de leur multitude.

Les découvertes de Galilée vont donc bien au-delà de l'assez timide contestation du modèle de Ptolémée par Copernic. Et alors qu'initialement Copernic avait tenu informé le pape Paul III, lui dédiant même son ouvrage *De revolutionibus orbium celestum* et que plusieurs prélats avaient encouragé un Copernic assez réticent à publier son modèle, l'Inquisition romaine, dans une lutte de pouvoirs entre factions conservatrices et modernistes, déclare maintenant hérétique l'héliocentrisme de Copernic, sans mettre en cause directement Galilée, ami du pape, mais en lui enjoignant de ne plus aborder cette question.

Quelques années avant les observations de Galilée, un drame s'est en effet noué entre les institutions romaines et

Giordano Bruno, un ancien dominicain, qui défendait avec vigueur l'héliocentrisme copernicien. Giordano Bruno était allé nettement plus loin que Copernic dans sa contestation d'un Univers où la Terre jouerait un rôle privilégié, en avançant en effet l'hypothèse d'un espace sans limites où le Soleil n'est qu'une étoile quelconque parmi une infinité : « D'innombrables soleils existent et d'innombrables terres orbitent autour de ces soleils de la même façon que les sept planètes tournent autour de notre Soleil, et des êtres vivants peuplent ces mondes. » Les propos hérétiques de Giordano Bruno, dont le procès commence en 1592 et durera huit ans, ne se limitent pas à l'astronomie et à la cosmologie et il est difficile de démêler dans quelle mesure c'est sa conception du monde qui va le faire condamner[4]. Son procès est ponctué de propositions de rétractation, dont Giordano Bruno donnera plusieurs fois l'impression qu'il allait les accepter, avant un nouveau refus de toute rétractation. Comme on le sait, le procès et la vie de Giordano Bruno s'achèvent de façon tragique, avec une condamnation à être brûlé vif sur le bûcher en l'an 1600 à Rome[5].

---

4. Entre autres affirmations, Giordano Bruno affirme en effet que le Christ n'est pas Dieu mais un « mage habile », que même Satan sera sauvé et que l'Esprit saint est l'esprit du monde, dans une vision panthéiste.

5. Même sous Jean-Paul II, pape jugé par certains comme « éclairé », la « Commission pour l'étude de la controverse ptoléméo-copernicienne » instituée le 3 juillet 1981 par le pape, si elle revint bien sur la condamnation de Galilée, réaffirmera la condamnation pour hérésie de Giordano Bruno car « le copernicisme de Bruno ne présente aucun intérêt au plan des raisons scientifiques », contre-vérité flagrante quand on voit aujourd'hui la clairvoyance extraordinaire dont avait fait preuve Giordano Bruno.

Galilée, disposant d'une grande réputation et d'appuis haut placés au Vatican, est plus difficile à attaquer frontalement, mais en 1615, après plusieurs lettres de calomnie contre lui et des attaques violentes par les dominicains Niccolò Lorrini et Tommaso Caccini, Galilée se rend à Rome, d'une part pour se défendre contre les calomnies en tentant de faire entendre sa démarche scientifique, mais surtout pour éviter une mise à l'index des écrits de Copernic, qui, selon lui, serait catastrophique. C'est pourtant ce qui se produit en 1616 : devant la violence des attaques, le cardinal Bellarmin, jésuite pourtant favorable à Galilée, pense apaiser la polémique en écrivant que, faute d'une démonstration convaincante que la théorie géocentrique est fausse, il condamne la théorie héliocentrique de Copernic, jugée incompatible avec plusieurs passages des Écritures, même s'il en reconnaît l'utilité en termes de calcul. Proposant le principe que l'on a appelé « l'équivalence des hypothèses », il cherche ainsi à éviter un procès de Galilée devant l'Inquisition. Mais Galilée, intransigeant, considère l'héliocentrisme comme clairement supérieur au géocentrisme de Ptolémée et refuse de le considérer comme une simple hypothèse ou une représentation alternative.

L'affaire aurait pu en rester là, mais en 1623 le cardinal Maffeo Barberini, ami de Galilée, devient le pape Urbain VIII. Au milieu des années 1620, Urbain VIII charge Galilée d'établir une comparaison aussi neutre que possible entre les deux systèmes. C'est l'occasion pour Galilée, brillant polémiste, de ridiculiser dans son pamphlet célèbre *Dialogue*

sur les deux grands systèmes du monde le modèle de Ptolémée et d'Aristote, défendu par le personnage Simplicio, et de défendre avec passion le modèle héliocentrique de Copernic. Urbain VIII, affaibli par les attaques de conservateurs lui reprochant sa faiblesse vis-à-vis des doctrines hérétiques, doit se résoudre à l'ouverture d'un procès mené par l'Inquisition contre Galilée. Convoqué en octobre 1632 pour son procès, Galilée, malade, ne peut répondre à la convocation qu'en février de l'année suivante. Et comme Galilée est incapable de démontrer la rotation de la Terre qui ne sera démontrée que bien plus tard au moyen du pendule de Foucault, il doit, sous la menace de la torture, se résoudre, la mort dans l'âme, à s'abjurer. Le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* est interdit de publication et Galilée incarcéré, même si Urbain VIII parvint assez rapidement à transformer cette incarcération en simple assignation à résidence.

Au-delà de la défense de l'héliocentrisme de Copernic, Galilée a eu une autre contribution fondamentale à la naissance de la physique à travers l'étude de la chute des corps. Le récit des expériences de chutes de corps qui auraient été menées par Galilée à partir de la tour penchée de Pise sont apocryphes, mais illustrent néanmoins la démarche scientifique de Galilée sur le principe d'équivalence, exprimé comme la proposition que la vitesse en chute libre est identique pour tous les corps, quelle que soit leur composition. Cette affirmation va à l'encontre de l'intuition, car il semble évident qu'un boulet métallique ne tombe pas à la même vitesse, mais plus vite, qu'une plume. Mais dès

lors que l'on imagine une expérience réalisée dans le vide, et que l'on fait abstraction de la résistance de l'air, Galilée justifie le principe d'équivalence par un raisonnement par l'absurde. Si l'on suppose qu'un corps massif tombe dans le vide plus vite qu'un corps léger, relions les deux corps en question par une petite cordelette : selon notre hypothèse, le corps le plus lourd devrait alors être ralenti dans son mouvement de chute par le corps le plus léger, dont on a supposé qu'il tombait moins vite. Mais le couple des deux objets reliés entre eux est plus lourd que chacun d'entre eux, il doit donc tomber moins vite que le plus lourd des deux corps initiaux, alors qu'il est plus lourd que chacun d'entre eux : contradiction[6].

On voit de quelle façon Galilée se trouve là aussi en contradiction directe avec la doctrine d'Aristote, pour qui l'état naturel pour un corps grave est l'immobilité, et où tout mouvement requiert une « violence ». Newton attribue ainsi à Galilée sa première loi, qu'il énonce ainsi : « Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer cet état. » En l'absence de forces, par exemple la force de frottement ou la force de gravitation, le corps

6. Sans vouloir jeter la consternation et le doute dans l'esprit du lecteur, notons dès à présent, nous y reviendrons, que ce raisonnement, qui semble pourtant assez imparable, ne marche pas si on cherche à réaliser un système lié d'une masse positive et d'une masse négative en relativité générale, car un tel système lié se comporte en effet violemment différemment de chacun des corps qui le composent.

conserverait sa vitesse constante indéfiniment. Force de l'abstraction dans un monde où les outils sont encore très grossiers et où, pour qu'une charrette de foin conserve sa vitesse, il faut un attelage de bœufs puissants... Mais malgré ce pas de géant dans la formulation d'un principe d'inertie et des lois de transformation associées, encore aujourd'hui appelé « invariance galiléenne », Galilée n'a à ce stade pas pleinement pris conscience que la Lune subit la force de gravitation de la Terre et il faudra encore quelques dizaines d'années pour que soit formulée la théorie de la gravitation universelle de Newton, qui constituera le véritable départ de la physique moderne.

Newton, sur la Terre comme au ciel...

Né en Angleterre en 1642, Isaac Newton grandit et fait ses études à Cambridge. À l'issue de ses études, il devient assistant d'enseignement à Trinity College, où il découvre et enseigne le cartésianisme, théorie un peu sulfureuse et en forte tension avec les enseignements de l'Église, qui présente le monde comme une structure purement mécanique et géométrique. La conception du monde physique de Descartes, basée sur des tourbillons, est peu prédictive, même si le philosophe s'aventure à proposer une théorie de formation du Système solaire qui ne manque pas d'intuition. Comme Galilée, Newton et Descartes défendent l'idée que le monde est intelligible et répond à des lois mathématiques et physiques accessibles via l'expérience.

Newton reprend de façon plus quantitative l'hypothèse de Descartes d'orbites circulaires, par analogie avec le mouvement d'un manège circulaire ou d'une pierre accrochée à une corde et à laquelle on imprime un mouvement de fronde. Dans l'hypothèse un peu gratuite de Descartes, le mouvement circulaire des planètes peut s'interpréter comme un équilibre entre une force attractive exercée par le Soleil et une force répulsive, centrifuge, justement comme celle que cherche à exercer la pierre en tendant la corde lorsqu'on lui impose un mouvement circulaire, et dans l'esprit du principe d'inertie de Galilée. Au milieu du XVIIe siècle, Christian Huygens (1629-1695), mathématicien et astronome flamand, avait montré, en utilisant ce que nous appellerions aujourd'hui des « lois d'échelle », que la force centrifuge exercée sur une corde par une pierre devait avoir la forme v^2/r, où v est la vitesse tangentielle de la pierre, et r est la longueur de la corde.

Intervient alors un personnage fondamental qui est Robert Hooke, physicien en charge d'animer les séances hebdomadaires de la Royal Society (dont il est l'un des créateurs), et responsable des expériences et démonstrations présentées lors de ces réunions. Hooke a une vivacité et une étendue de connaissances remarquable pour l'époque, et devient un touche-à-tout de génie car il doit présenter chaque semaine une nouveauté à ses collègues de la jeune société royale. L'idée géniale de Hooke est d'utiliser l'analogie avec une loi bien terrestre – la force centrifuge d'une fronde compensée par la tension de la corde – pour l'appliquer dans les cieux. Comme la troisième loi de Kepler énonce

que T^2/a^3 est une constante pour la relation entre la période de révolution et le demi-grand axe de la trajectoire, pour une trajectoire d'un corps céleste approximativement circulaire (ce qui est une bonne approximation de la trajectoire de la Lune autour de la Terre ou de celle de la Terre autour du Soleil), Hooke calcule que la force centrifuge qui s'applique doit dépendre de la distance au centre attracteur en $1/r^2$ [7].

Hooke écrit donc à Newton afin de lui proposer l'idée d'une force de gravitation attractive variant en $1/r^2$, la force répulsive n'étant que la conséquence du principe d'inertie introduit par Galilée. C'est donc selon Hooke la force attractive qui perturbe le mouvement rectiligne des corps, entraînant un mouvement circulaire. Ironiquement, Newton répond à Hooke avec un argument faux, où il prétend démontrer que les planètes vont suivre des spirales. Hooke n'est que trop heureux de démontrer à Newton son erreur, mais le fait qu'il doive présenter chaque semaine quelque chose de nouveau fait qu'il ne peut s'attarder sur cette polémique[8] et il abandonne assez vite le sujet, probablement irrité par la réaction de Newton. Mais ce dernier va continuer en secret à travailler sur le sujet des

---

7. En effet, en exprimant la période T comme $2\pi r/v$ et en remplaçant T par cette expression dans la troisième loi de Kepler, on voit que le produit v^2r – proportionnel au moment cinétique – est constant et donc que la force centrifuge v^2/r doit être proportionnelle à $1/r^2$ si on l'exprime en fonction de la seule distance r.

8. Hooke a par ailleurs d'autres sujets polémiques avec Newton sur la nature corpusculaire ou ondulatoire de la lumière.

lois de la dynamique et de la force de gravitation et, en 1687, il publie les *Principia mathematica*, qui expriment enfin clairement la loi universelle de la gravitation.

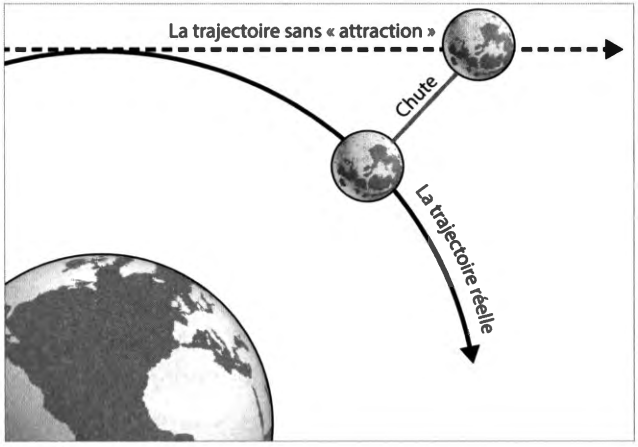
Dans les *Principia*, les mouvements célestes de la Lune autour de la Terre, ou de la Terre autour du Soleil, trouvent la même explication que des phénomènes terrestres, comme la chute d'une pomme. Prenons en effet le cas du mouvement de la Lune autour de la Terre. On sait dès l'époque de Newton que la distance Terre-Lune est d'environ soixante fois le rayon de la Terre. Si la force de gravitation de la Terre à sa surface crée un mouvement accéléré qui, comme l'a mesuré Galilée, a fait chuter au bout d'une seconde le corps de: $1/2\ gt^2 \approx 4{,}9$ m, la même force variant en $1/r^2$ s'exerçant à une distance soixante fois plus grande va engendrer une chute environ 3600 fois plus faible (en fait 3650 fois plus faible), soit une chute de 1,35 mm environ en une seconde.

Calculons maintenant la distance dont s'éloignerait la Lune en une seconde si elle ne suivait pas sa trajectoire circulaire autour de la Terre mais qu'elle continuait tout droit sur sa trajectoire (ci-contre). La période de révolution de la Lune autour de la Terre est d'environ 27,3 jours – il s'agit là de la période de révolution en prenant comme référence les étoiles fixes, excellente approximation d'un référentiel galiléen – soit environ $2{,}36 \times 10^6$ secondes. Pendant une seconde, la Lune parcourt donc un angle *theta* de $2\pi/(2{,}36 \times 10^6)$ radian, et l'écart entre la trajectoire circulaire et la trajectoire rectiligne sur un tel angle est donc: distance (Terre-Lune) x (Theta^2)/2 $\approx 3{,}85 \times 10^8 \times 4\pi^2 / (2{,}36 \times 10\text{^}6)^2 \approx 1{,}36$ mm, la même valeur

– à nos approximations près – que la chute de la Lune dans le champ de gravitation terrestre, ce qui veut dire, pour reprendre l'expression de Valéry, même si nous verrons par la suite qu'elle se révélera fausse : « Il fallait le génie de Newton pour voir que la Lune tombe quand tout le monde voit qu'elle ne tombe pas. »

Les mêmes lois de la gravitation s'expriment donc bien de la même manière pour la Terre et la Lune, et par extension pour les autres planètes du Système solaire : nous aurions pu appliquer le même raisonnement pour les orbites des planètes autour du Soleil, à condition toutefois de connaître la masse de ce dernier.

Newton était arrivé, quant à lui, à ce résultat, après son dialogue irrité avec Hooke, en imaginant des boulets de



Si l'on traite la chute de la Lune comme celle de n'importe quel objet terrestre, telle une pomme, on s'aperçoit que sa trajectoire circulaire autour de la Terre peut se concevoir comme une chute permanente qui la maintient, en raison de son mouvement tangentiel, à distance constante par rapport au centre de la Terre.

canon tirés à des vitesses de plus en plus grandes qui, hors le frottement sur l'air, auraient fini par conduire à des boulets de canon satellisés autour de la Terre, voire s'échappant dans l'espace si leur vitesse était suffisamment grande.

Newton, dans ses *Principia*, exprime donc la force de gravitation entre deux corps de masse m_1 et m_2 placés à la distance r l'un de l'autre sous la forme: $F = G\, m_1\, m_2/r^2$, où G est la constante de gravitation universelle, dont la valeur est d'environ: $G \approx 6{,}67 \times 10^{(-11)}\ m^3\ kg\text{-}1\ s^{(-2)}$

Comme le reconnaît Newton dans une lettre à Hooke, reprenant une citation de Bernard de Chartres, cette révolution est l'aboutissement du travail patient et acharné de grands scientifiques comme Copernic, Galilée ou encore Kepler, et Newton déclare: «Si j'ai vu plus loin, c'est en montant sur les épaules de géants.»

Confirmations et prédictions

La théorie de Newton, combinée avec sa méthode de calcul des trajectoires qui s'appuie sur le calcul différentiel, constitue la première loi d'interaction qui permet des prédictions d'une grande précision. Parmi les premières prédictions, Newton fit l'hypothèse que les comètes étaient des petits corps prisonniers du Système solaire, mais suivant des orbites extrêmement excentriques. Halley entreprit de reprendre les archives d'observation des comètes et remarqua que l'une d'entre elles avait été visible de la Terre en 1531, puis en 1607 et enfin en 1682. Prenant en compte les perturbations des planètes du

Système solaire – qui ont pour conséquence que les passages ne sont pas réguliers –, Halley prédit que le prochain passage de la comète, qui porte encore aujourd'hui son nom, aurait lieu aux alentours d'avril 1759, avec une incertitude estimée à un mois. L'observation de la comète contournant le Soleil à la mi-mars 1759 acheva de convaincre la communauté scientifique de la validité de la théorie de Newton.

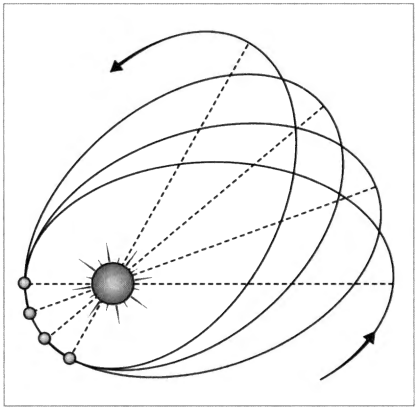
Un autre succès majeur de la théorie newtonienne de la gravitation fut apporté par le mathématicien français Urbain Le Verrier (1811-1877) : les anomalies dans le comportement gravitationnel des planètes alors connues du Système solaire amenèrent Le Verrier à l'hypothèse qu'une planète encore inobservée perturbait ces orbites. Purement par le calcul, en utilisant les lois de la gravitation de Newton, Le Verrier prédit la position et la masse approximative de Neptune, qu'il communiqua à Johann Gottfried Galle, un astronome allemand qui, dans la nuit suivant la réception du message de Le Verrier, la découvrit à moins d'un degré de la position prédite, ce qui constitua une nouvelle consécration du pouvoir prédictif de la théorie de la gravitation. Aujourd'hui, les équipes d'astronomes cherchent également à détecter, sur le même principe, une neuvième planète, super-Terre à très grande distance du Soleil, selon la suggestion d'une équipe de Caltech et, à nouveau, un mathématicien français, Jacques Laskar, a commencé à contraindre la position de cette planète encore hypothétique.

La théorie de Newton comportait cependant elle aussi plusieurs éléments non justifiés, voire illogiques, comme l'existence d'un temps absolu, l'existence de référentiels

galiléens privilégiés dans lesquels les lois de la dynamique pouvaient s'écrire sans l'introduction de forces « fictives » sur lesquelles nous reviendrons dans la suite. Newton était par ailleurs parfaitement conscient du caractère très peu satisfaisant de l'action à distance instantanée de la gravité. Il qualifie d'ailleurs lui-même l'idée d'absurde : « That gravity should be innate, inherent and essential to Matter, so that one body may act upon another at a distance through a Vacuum, without the mediation of anything else (...) is to me so great an Absurdity that I believe that no Man who has in philosophical Matters a competent Faculty of thinking can ever fall into it. » Nous verrons cependant par la suite qu'il est probablement possible de concevoir une action à distance de la gravitation, respectant le principe de Mach et le principe de relativité – cette fois-ci d'Einstein et non de Galilée.

Avec le succès de l'électromagnétisme, à travers la découverte des lois de Maxwell, qui propose une théorie unifiée entre les phénomènes apparemment disjoints du magnétisme et de l'électricité, les physiciens ont pu croire à la fin du XIXe siècle que la science avait atteint son objectif et que tout se résumait désormais à augmenter la précision des calculs et à calculer la décimale suivante, dans un monde dont les lois, se réduisant à des forces électromagnétiques ou gravitationnelles, seraient totalement connues.

Cependant, il devint alors de plus en plus clair qu'il existait une énigme irritante à laquelle la gravitation de Newton ne savait pas répondre, et qui consistait en une erreur, petite mais irréductible, dans le calcul de l'avance du périhélie de Mercure



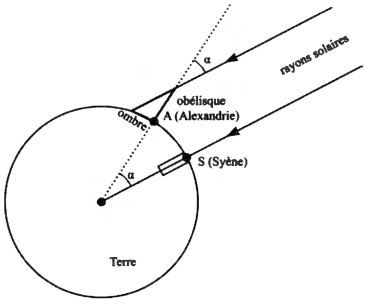
– la petite rotation qu'effectue Mercure à chaque passage au plus près du Soleil.

Une toute petite anomalie qui cette fois-ci ne s'expliquait pas par l'existence d'une planète non détectée, car Mercure est beaucoup trop proche du Soleil pour qu'une planète même petite puisse passer inaperçue, mais qui allait entraîner une véritable révolution et un complet changement de conception dans les notions de temps, d'espace et de gravitation…

Pour en savoir plus

L'idée d'Ératosthène est de mesurer précisément la différence d'angle de l'ombre d'un bâton vertical, ou d'un fil à plomb, dans deux lieux situés idéalement exactement sur le même méridien. De cette façon, si l'on prend par exemple le cas de la ville de Syène, dont nous savons aujourd'hui qu'elle se situe environ à 24 degrés de latitude Nord, soit très proche – un demi-degré – du tropique du Cancer, le Soleil apparaît presque exactement à la verticale en quatre occasions dans l'année. Si l'on mesure à ce même moment, également au midi solaire, c'est-à-dire au moment où le Soleil culmine dans le ciel, l'angle *thêta* de l'ombre d'un bâton vertical dans un lieu situé plusieurs centaines de kilomètres au nord du premier, on peut déterminer ainsi, si l'on sait mesurer la distance *d*

entre les deux lieux, la valeur de la circonférence terrestre estimée selon la formule : circonférence terrestre = 2π rayon de la Terre = distance sur le méridien entre les deux lieux x 360 degrés/(angle *thêta* en degrés de l'ombre).



Ératosthène utilise cette méthode entre les villes de Syène (ancêtre d'Assouan) et d'Alexandrie, et mesure un angle de 7,2 degrés (figure), soit environ un cinquantième d'un tour complet (sur la figure, l'angle a été exagéré pour plus de clarté), pour la différence d'angle de l'ombre entre les deux puits, ce qui lui permet de mesurer avec une bonne précision la circonférence terrestre, distance plus grande sans doute qu'aucun homme de cette époque n'en avait parcouru dans sa vie. La principale source d'incertitude vient de l'estimation précise de la distance entre les deux villes. Ératosthène estime cette distance à 5000 stades, un nombre rond qui en traduit l'incertitude, la légende disant que cette distance a été mesurée précisément en comptant le pas régulier des chameaux… Combiné avec la différence d'angle de 7,2 degrés, cela signifie que la circonférence terrestre fait donc environ 50 x 5000 = 250000 stades. La longueur précise du stade utilisée par Ératosthène n'est pas connue, mais si l'on utilise le stade égyptien, qui vaut 157 mètres environ, on trouve pour la circonférence de la Terre une valeur très proche, quoique légèrement inférieure – à 2 % près – de la valeur moderne de la circonférence terrestre, 40000 kilomètres.

LES DEUX THÉORIES DE LA RELATIVITÉ D'EINSTEIN

La mystérieuse constante « *c* »

1905 est une année remarquable dans la production scientifique d'Einstein avec la publication par celui-ci de trois articles majeurs sur l'effet photoélectrique, le mouvement brownien et la relativité restreinte. Assez curieusement, Einstein reçut le prix Nobel en 1921 non pour sa théorie de la relativité – restreinte ou générale –, mais pour l'effet photoélectrique, le jury Nobel ayant visiblement encore craint à cette époque que la théorie ne fût fausse… Quant à la relativité générale, publiée dès l'année 1915, son formalisme initial assez absconds engendra une plaisanterie sur le fait que seules trois personnes, dont Arthur Eddington, la comprenaient. Interrogé sur cette assertion, Eddington resta silencieux et aurait, devant l'air interrogateur de son interlocuteur, déclaré : « Je cherche qui peut être la troisième personne… »

Rétrospectivement, on peut reconstruire la façon dont l'invariance de la vitesse de la lumière, fondamentale dans la construction de la relativité restreinte, s'est imposée progressivement dans l'étude des lois de l'électromagnétisme.

En effet, au cours du XIXe siècle, une série de travaux, dont ceux d'Ampère, de Faraday et de Maxwell, ont permis d'établir quatre équations, aujourd'hui appelées « équations de Maxwell » qui démontrent qu'une variation du champ magnétique dans le temps ou dans l'espace induit une variation du champ électrique. De même, les variations temporelles et spatiales du champ électrique induisent des variations de même ordre sur le champ magnétique.

Electricité et magnétisme, initialement considérés comme des phénomènes disjoints, sont donc reliés en un champ unique, le champ électromagnétique.

Les équations de Maxwell s'écrivent sous la forme :

$$div\ \vec{B} = 0$$

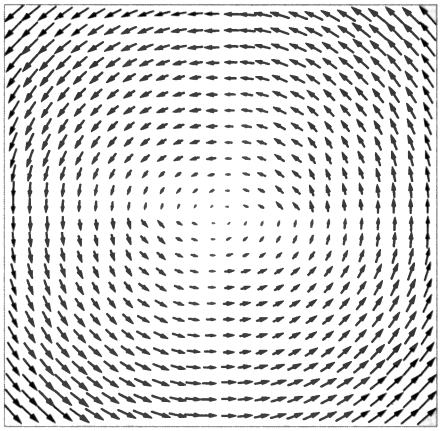
$$div\ E = \rho / \varepsilon_0$$

$$rot\ \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$rot\ \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Ces équations introduisent deux opérateurs sur les champs électrique E et magnétique B, le rotationnel et la divergence. L'action du rotationnel, noté rot, est, comme son nom l'indique, de mesurer la façon dont tourne un champ de vecteurs, un peu comme un champ de blé dont les épis sont orientés par le vent en vagues assez régulières, avec une inclinaison définie en chaque point, et, comme cela nécessite une mesure dans trois plans orthogonaux, le rotationnel a la forme d'un vecteur[1].

1. Pour plus de précision, il s'agit d'un pseudo-vecteur, avec un signe qui dépend de l'orientation du repère de référence.

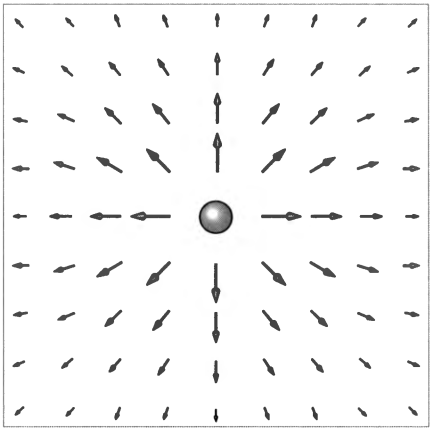


Comme son nom l'indique, le rotationnel est une mesure de la façon dont tourne un champ de vecteurs, ensemble de vecteurs définis en chaque point, dont un exemple peut être donné par l'angle d'inclinaison d'épis de blé quand ils sont caressés par le vent dans un champ. On voit sur la figure que le rotationnel s'annule au centre de la figure, et qu'il est non nul sur le reste de la figure.

La divergence, notée div, mesure quant à elle l'intensité avec laquelle un champ de vecteur rayonne à partir d'un point, ce qui permet dans les équations de Maxwell de mesurer la densité de charge en chaque point, et c'est une grandeur scalaire. On voit que la première équation affirme qu'il n'y a pas de charge magnétique[2] (ce qui se traduit par une divergence nulle du champ magnétique), alors que

2. De la même façon qu'il existe des charges électriques ponctuelles comme l'électron, rien n'interdit a priori qu'il existe aussi des charges magnétiques ponctuelles, les hypothétiques monopôles magnétiques, que l'on n'a néanmoins jamais observés dans la Nature, malgré de très grands détecteurs comme MACRO au laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie).

la deuxième équation donne la méthode pour mesurer la quantité de charges électriques en chaque point.



Comme son nom l'indique, la divergence est une mesure de la façon dont un champ de vecteurs diverge en chaque point, ce qui signale en électromagnétisme la présence d'un charge électrique, et d'une masse en gravitation. Sur la figure, la divergence du champ de vecteurs indique la présence d'une charge (pour le champ électrique) ou d'une masse (pour le champ gravitationnel) positive.

On voit également que dans la quatrième équation, une grandeur ayant les dimensions d'une vitesse notée *c* apparaît, qui s'exprime en fonction des autres constantes comme :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

et les mesures de Faraday montrent qu'elle est numériquement très proche de, et donc probablement égale à, la vitesse de la lumière. L'intuition géniale de Maxwell est de conjecturer, ce qui se révèlera exact, que dans tous les phénomènes électromagnétiques, on a affaire à un *même phénomène*, quelle que soit la longueur d'onde radio, optique ou infrarouge.

Mais si *c* est la vitesse de la lumière, par rapport à quoi est-elle mesurée ? Y a-t-il dans la nature un référentiel

privilégié ? Et dans ce cas quel est-il ? Car dans la conception newtonienne, où l'action de la gravitation se propage à vitesse infinie, si la vitesse de la lumière est finie, il doit être possible d'égaler sa vitesse, ou au moins de s'en rapprocher, et donc de voir sa vitesse grandement diminuée. C'est en tout cas le raisonnement que font à la fin du XIXe siècle les scientifiques qui, bercés depuis leur enfance par la physique newtonienne, n'imaginent pas remettre en cause l'idée d'un temps absolu, partagé par tous les observateurs.

L'expérience de Michelson et Morley, et la mort de l'éther

L'hypothèse à l'époque est que la vitesse c apparaissant dans les équations de Maxwell est la vitesse par rapport à l'éther, un référentiel privilégié que l'on suppose au repos par rapport au mouvement moyen des objets massifs dans l'Univers, et qui constitue le support des ondes lumineuses, de la même façon que les sons de notre vie quotidienne sont portés par l'air, et que l'eau porte les oscillations de la houle ou le sillage d'un bateau. Ptolémée lui-même avait déjà introduit la notion d'éther comme milieu portant les mouvements des corps célestes, et une longue polémique avait eu lieu à l'époque de Newton sur le caractère ondulatoire ou corpusculaire de la lumière, l'onde lumineuse semblant exiger un – élusif – milieu pour se propager.

Pour tester cette hypothèse d'un milieu porteur de la lumière et mesurer le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, l'expérience de Michelson-Morley, du nom des deux physiciens de l'université de Case Western (à l'époque

université d'Ohio) – dont il n'est pas très clair de savoir quel rôle elle a joué dans la réflexion d'Einstein, ni même si celui-ci en connaissait précisément les résultats – a été menée dans sa première version entre 1881 et 1887, puis répétée dans une série d'expériences qui se sont déroulées jusqu'au début des années 1920. Son principe est représenté sur la figure ci-contre.

Pour se replacer dans le questionnement de l'époque sur l'éther support de propagation de la lumière, il faut se rappeler, même si les chiffres que je vais citer étaient loin d'être connus précisément à la fin du XIXe siècle, que la vitesse de la Terre, dans son mouvement de révolution annuel autour du Soleil, est d'environ ≈ 30 km/s, ce qui aurait dû entraîner une variation *saisonnière* de la vitesse de la lumière par rapport à l'éther, avec une période annuelle, sauf à supposer que l'éther soit très strictement lié et entraîné par la Terre. À cette variation saisonnière, très lente, on s'attendait également à ce que se superpose une variation *journalière* induite par la rotation de la Terre sur son axe, avec un déplacement d'environ 40 000 kilomètres en vingt-quatre heures à l'équateur, soit une vitesse d'un peu plus de 300 m/s à nos latitudes. Par ailleurs, on pourrait également considérer, même si elle n'était pas connue à l'époque, la vitesse de ≈ 300 km/s du Soleil dans la Galaxie[3].

3. La vitesse de la Terre par rapport au référentiel constitué par l'ensemble des masses de l'Univers est mesurée avec précision aujourd'hui grâce à la distorsion dipolaire qu'elle induit sur le spectre du bruit de fond cosmologique à 2,7 kelvins, et cette vitesse est en fait proche de 370 km/s,

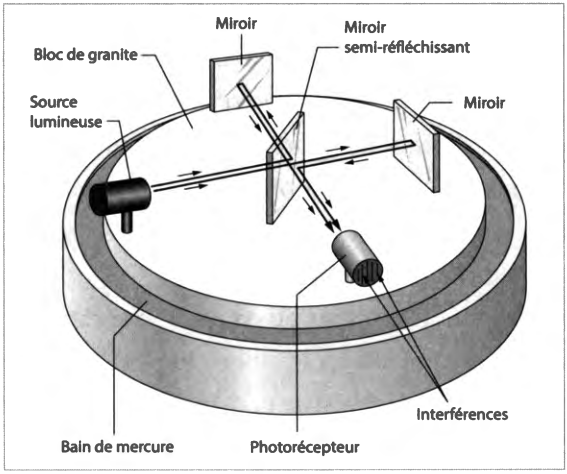


Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson-Morley. Le pinceau de lumière issu d'une source lumineuse est divisé en deux parties égales, l'une transmise et l'autre réfléchie lorsqu'il tombe sur un miroir semi-réfléchissant. Après réflexion sur deux miroirs, les deux faisceaux lumineux interfèrent et sont enregistrés par le photodétecteur (qui était à l'époque un dispositif de projection observé à l'œil).
Afin de mesurer très précisément les variations de la vitesse de la lumière selon deux directions orthogonales, Michelson et Morley placèrent leur interféromètre, situé dans la cave de l'université de Case Western, sur un socle de granit, reposant lui-même sur un bain de mercure, ceci afin de disposer à la fois d'un support très stable et de la possibilité de faire tourner l'appareillage de façon très régulière et sans vibration. Ainsi, en quelques secondes, il était possible de modifier l'angle de l'appareil dans un plan horizontal.

Par rapport au référentiel galiléen, où les étoiles sont en moyenne immobiles – le référentiel où l'on s'attendait que la

---

le groupe local de galaxies contenant la Voie lactée ayant quant à lui une vitesse moyenne d'environ 625 km/s. Les variations de la vitesse du Soleil dans la Galaxie, extrêmement lentes, sont, quant à elles, a priori beaucoup plus difficiles à mesurer.

vitesse de l'éther soit nulle –, la vitesse de la Terre est donc de l'ordre du millième de la vitesse de la lumière. L'expérience de Michelson et Morley devait donc permettre de déterminer la vitesse du vent d'éther supportant les vibrations lumineuses, tout comme on mesurerait notre vitesse par rapport à l'air, qui porte les vibrations sonores, en mesurant l'intensité ou la vitesse du vent dans notre déplacement.

À leur très grande surprise, au cours de la série d'expériences réalisées entre 1881 et 1887, et publiée en 1887 dans l'*American Journal of Science*, Michelson et Morley ne purent jamais mettre en évidence une quelconque variation journalière ou saisonnière de la vitesse de la lumière par rapport au dispositif, alors même qu'ils faisaient varier l'angle d'orientation du dispositif, et malgré les nombreuses répétitions de l'expérience à différentes heures du jour ou encore à différentes périodes de l'année, au cas où, par malchance, la vitesse par rapport à l'éther aurait été momentanément nulle (pour en savoir plus, rendez-vous à la fin de ce chapitre – I).

Ce résultat négatif constitua une énorme surprise et fut plus tard couronné par l'un des premiers prix Nobel de physique décerné à Michelson en 1907[4]. Diverses interprétations furent données au résultat négatif de l'expérience, notamment une contraction réelle des longueurs en raison de leur mouvement dans l'éther qui aurait juste compensé l'effet de modification

4. Il faut noter que seul Michelson reçut le prix Nobel en 1907 (et pas Morley), qui lui fut décerné pour l'ensemble de ses mesures interférométriques de précision. En 1907, la théorie de la relativité restreinte d'Einstein n'est pas du tout considérée comme établie.

du temps de parcours dû à la vitesse dans l'éther, un mécanisme proposé par George FitzGerald et Anton Lorentz en 1889, visiblement pas encore prêts à remettre en cause la notion de temps absolu de Newton.

Mais c'est Einstein qui apporte la modification décisive, en faisant l'hypothèse que la vitesse de la lumière est réellement indépendante du référentiel galiléen dans lequel on la mesure, ce qui va aboutir à la destruction du temps et de l'espace absolus de Newton.

La théorie de la relativité, ou la théorie de l'invariance ?

Un élément essentiel de la révolution qui s'annonce au tout début du XXe siècle est l'idée, exprimée par Poincaré dès 1900, puis de façon plus précise en 1904, d'un principe de relativité qui stipule que : « Les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement uniforme, de sorte que nous n'avons et ne pouvons avoir aucun moyen de discerner si nous sommes oui ou non entraînés dans un pareil mouvement. »

Ceci nous ramène à la notion d'invariance des équations de Maxwell, étudiée mathématiquement par Lorentz dès la fin des années 1890 et publiée finalement par lui en 1904 dans un article qui décrit à la fois les transformations reliant les coordonnées de temps et d'espace de deux référentiels en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre

à la vitesse v, ainsi que la façon dont un expérimentateur va décrire le champ électrique et le champ magnétique mesurés dans le premier référentiel en fonction du champ électrique et du champ magnétique, a priori différents mais reliés aux premiers, mesurés dans le second référentiel. Lorentz apporte ainsi la démonstration que les lois de l'électromagnétisme s'expriment sous la même forme des équations de Maxwell dans les deux référentiels, à condition que les champs électrique et magnétique soient reliés par des transformations que l'on appelle aujourd'hui les « transformations de Lorentz des champs ». Ces transformations étant plus complexes et moins intuitives que les transformations de coordonnées d'espace et de temps d'un référentiel à l'autre, étudions d'abord de quelle façon les transformations de Lorentz des coordonnées diffèrent des transformations galiléennes.

Dans les équations de Galilée, le changement de référentiel s'écrivait, pour un mouvement relatif à la vitesse v le long de la direction x :

$$x' = x - vt$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = t$$

où l'on voit que les dimensions transverses au mouvement sont inchangées (les deux équations $y' = y$ et $z' = z$), ce qui est imposé par la symétrie du mouvement entre les deux référentiels galiléens, et que le temps est supposé être le même pour les deux référentiels – c'est le temps absolu

de Newton. Dans ce changement de référentiel, seule la coordonnée le long de l'axe x change de façon linéaire en fonction du temps, comme c'est par exemple le cas si l'un des référentiels est fixe par rapport aux rails d'un chemin de fer alors que l'autre référentiel est lié au train qui avance à la vitesse v par rapport aux rails.

Mais comme l'avait démontré Lorentz, si l'on utilise ce changement de coordonnées galiléen, les équations de Maxwell ne sont plus valables car après changement de référentiel elles n'auraient plus la même forme... Le génie d'Einstein est de partir du postulat que la vitesse de la lumière est *invariante* dans un changement de référentiel, et à partir de cette seule hypothèse, il retrouve les transformations de Lorentz, qui sont très proches pour les faibles vitesses des transformations galiléennes, et qui s'écrivent :

$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \gamma(t - vx/c^2)$$

où g représente la quantité :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

On voit donc que par rapport aux transformations de Galilée, il y a deux aspects nouveaux : d'une part, le terme g qui apparaît dans les expressions de x' et de t' et, d'autre part, le fait que le temps t' lui-même dépend maintenant de la position à travers le terme vx/c^2, et n'est donc plus le temps absolu, partagé par tous les observateurs, de Newton.

Notons que le terme g est très proche de 1 lorsque la vitesse v est faible devant celle de la lumière, c. Dans ce cas en effet, on peut démontrer que la quantité g est pratiquement égale à :

$$\gamma = 1 + v^2/2c^2$$

et ne diffère de 1 que par un terme au carré du rapport v/c. Nous retrouverons ce terme, car il ressemble beaucoup à l'énergie cinétique, $1/2\ m\ v^2$, et nous verrons plus loin que c'est bien ce qu'il représente par rapport à l'énergie de masse qu'introduiront Poincaré et Einstein, $m\ c^2$.

Même si pour les vitesses faibles devant la vitesse de la lumière, il n'y a pas de modification notable par rapport aux transformations de Galilée, le temps absolu de Newton a disparu, et temps et espace sont désormais liés entre eux. Pour reprendre l'expression de Minkowski, qui décrira mathématiquement cet espace-temps : « Désormais l'espace en lui-même et le temps en lui-même sont destinés à s'évanouir comme de simples ombres, et seule pourra prétendre à une existence indépendante une sorte d'union de l'un et de l'autre [5,6]. »

---

5. La publication originale de Minkowski paraît en allemand dans *Physikalische Zeitschrift* 10 (1909) 104, et en raison de son importance, le texte a été plus tard traduit en anglais dans l'ouvrage *Space and time*, Einstein *et al.*, p. 73 (1923).

6. Dans l'abandon de la croyance en un temps (et un espace) universel, le passage d'Einstein par les chemins de fer suisses et le problème de leur synchronisation n'est sans doute pas étranger à la définition opérationnelle de la synchronisation des horloges et de la référence de temps. Voir à ce sujet la discussion qu'en donne Étienne Klein dans son

Pour Einstein, c'est bien la notion d'espace-temps qui prime, un espace-temps dans lequel une seconde qui s'écoule peut s'exprimer dans les mêmes unités que l'espace ordinaire, une seconde correspondant à une seconde-lumière – soit environ 300 000 kilomètres.

Au cœur de l'invariance des transformations de Lorentz, la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels, et la grandeur invariante sur laquelle les différents observateurs sont d'accord entre eux est non plus la longueur ni la durée, mais l'intervalle entre deux événements dans l'espace-temps – et non plus dans l'espace.

(x_1, y_1, z_1, t_1) et (x_2, y_2, z_2, t_2), dont le carré s'écrit :

$$c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2$$

Il est important de noter que ce carré peut être nul ou même négatif. Il est assez facile en particulier de voir que l'intervalle est nul entre deux événements reliés à la vitesse de la lumière. Si le carré de l'intervalle est positif, les deux événements peuvent être reliés par une particule qui se propage à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière. Si par contre le carré de l'intervalle est négatif, les deux événements ne peuvent pas être directement causalement reliés, car il faudrait une particule plus rapide que la vitesse de la lumière pour les relier (rendez-vous à la fin de cet ouvrage pour en savoir plus - II)...

---

ouvrage *Il était sept fois la révolution. Albert Einstein et les autres.*

Qui est l'inventeur de la relativité restreinte ?

Rétrospectivement, presque toute la relativité restreinte se trouve déjà dans les transformations de Lorentz, mais l'abandon des concepts de temps et d'espace absolus ne suivit pas immédiatement la publication de Lorentz. Ainsi, comme déjà évoqué, le physicien irlandais George Francis FitzGerald et Lorentz lui-même ont initialement préféré supposer que ce sont les objets qui se contractent en raison de leur mouvement dans l'éther, plutôt que de remettre en cause les notions d'espace et de temps ! Il faut l'intuition d'un Einstein pour oser sauter le pas alors que Poincaré, qui décédera quelques années plus tard, en 1912, semblait rester hésitant devant la révolution que constitue l'introduction explicite d'un temps qui n'est plus absolu.

Poincaré est sans doute, aux côtés d'Einstein, celui qui s'est le plus approché de la vision relativiste : il mentionne en effet plusieurs fois qu'il considère que l'éther est une sorte d'intermédiaire commode dont on se passera certainement par la suite. C'est à nouveau Poincaré qui, dès 1900, associe une masse m au gain d'énergie E à travers la formule $m = E/c^2$, relation qu'il estime nécessaire pour conserver l'impulsion et l'énergie dans les phénomènes électromagnétiques – même s'il parle alors de « fluide fictif » dans son bilan d'énergie sur un corps accéléré par un champ électromagnétique. De même, Poincaré est aussi le premier qui indique qu'un photon d'énergie E une fois absorbé va conduire à une augmentation de la masse de l'absorbeur de la même quantité E/c^2. Einstein

confirmera et précisera cette hypothèse de Poincaré avec sa très célèbre formule reliant masse et énergie d'un objet de masse m, qui lui est aujourd'hui associée.

Dans le début de polémique de l'époque – qui s'est renouvelée il y a quelques années – sur les contributions relatives de Poincaré et d'Einstein, il me semble que Poincaré a, avant Einstein, tous les éléments en main et les bons termes sous sa plume, mais qu'Einstein ose remettre de façon plus claire en question le temps absolu de Newton qui, s'il a pu sembler une évidence pendant deux siècles, n'était en fait pas du tout évident et, surtout, n'était pas réalisé par la Nature... Einstein écrit par ailleurs le plus clairement que, même s'ils restent différents, temps et espace peuvent s'exprimer en une unité commune et se rassemblent dans la notion d'espace-temps, avec un nouveau type d'invariance, l'invariance de Lorentz, ou de Lorentz-Poincaré, dont la relativité galiléenne peut être considérée comme le cas particulier où la vitesse de la lumière serait infinie.

Quelques conséquences expérimentales de la relativité restreinte

Une application numérique simple de la célèbre formule[7] $E = mc^2$ montre que lorsque l'on convertit en énergie un gramme de matière, on peut raser une bonne partie de

7. On trouve parfois dans certains ouvrages l'appellation de « masse au repos », laissant entendre que la masse dépend de la vitesse à laquelle se déplace le corps. Si l'énergie cinétique d'un corps dépend clairement de

Paris, ou obtenir le dégagement d'énergie d'une centrale nucléaire d'une puissance de 1 gigawatt pendant environ une journée. Ce caractère potentiellement dévastateur d'un seul gramme de matière est dû au facteur c^2, qui vaut de l'ordre de 10^{17} quand on convertit des kilogrammes en Joules dans le système international. Si Einstein ne voyait initialement aucune application pratique à cette formule, il fut néanmoins au début des années 1940 le défenseur, et en un certain sens l'un des initiateurs, du programme Manhattan de fabrication de l'arme atomique aux États-Unis lorsqu'il devint clair que les nazis s'intéressaient eux aussi à ce type d'applications militaires, du fait que les armes nucléaires auraient pu changer le cours de la guerre entre le régime nazi et le reste du monde.

Une deuxième conséquence expérimentale de la relativité restreinte est la désynchronisation des horloges lorsqu'elles sont en mouvement uniforme l'une par rapport à l'autre. Dans le cas limite où une particule se déplace à la vitesse de la lumière – il faut alors qu'elle ait une masse nulle, faute de quoi elle devrait avoir une énergie infinie –, le déplacement vu par elle est toujours vu comme instantané, quelle que soit la distance parcourue, du fait qu'elle effectue le déplacement à temps propre écoulé nul. Ainsi, le voyage d'un photon émis par une étoile il y a un milliard d'années-lumière dans notre passé est littéralement instantané pour le photon,

---

sa vitesse v, sa masse est par contre indépendante de la vitesse, et est un invariant relativiste relié à l'énergie E et à l'impulsion p par la relation : $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$. L'expression « masse au repos » est donc impropre et devrait être bannie.

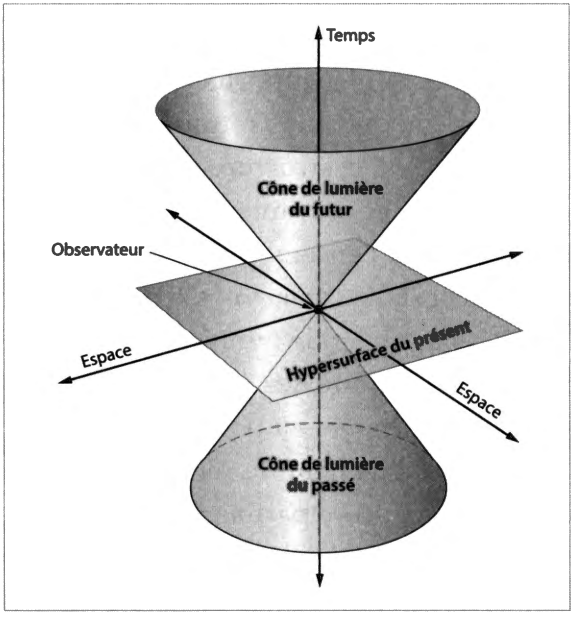
montrant à quel point les différences de temps mesurées par un observateur ou un autre peuvent être dramatiques lorsque les vitesses se rapprochent de la vitesse de la lumière.

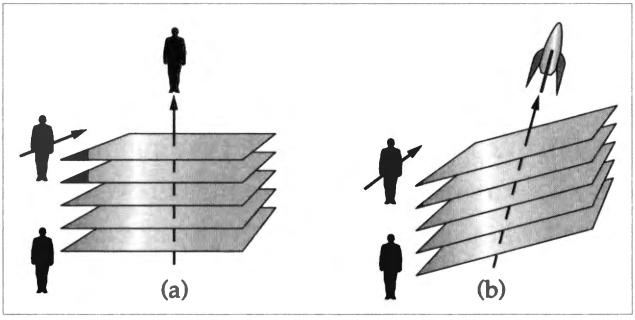
Une illustration expérimentale de ce que l'on appelle de façon un peu impropre la « dilatation des temps » est fournie par les muons, sortes d'électrons lourds qui sont issus des produits de désintégration des particules qui se développent dans les gerbes cosmiques et qui n'arriveraient jamais au sol si cet effet relativiste n'existait pas : en effet, la durée de vie d'un peu plus de deux microsecondes du muon est trop faible pour qu'il parcoure plus que quelques centaines de mètres, alors que la distance à parcourir entre le lieu de leur production et le niveau de la mer dépasse plusieurs dizaines de kilomètres, du fait qu'ils sont pour l'essentiel produits dans les hautes couches de l'atmosphère.

Une autre nouveauté apportée par la théorie de la relativité d'Einstein, que nous retrouverons aussi dans la relativité générale, est la structure causale définie par les cônes de lumière (page suivante, qui peuvent être définis de façon commune à l'ensemble des référentiels inertiels en raison de la constance de la vitesse de la lumière. Alors que pour Newton, du fait de l'universalité du temps et de l'absence de vitesse limite, les événements se rangent en deux catégories, antérieurs ou postérieurs (ou à la rigueur simultanés) à un événement de référence, dans le cas de la relativité, s'il est encore parfois possible de définir des événements qui sont clairement antérieurs ou postérieurs à un événement de référence, il apparaît également une

troisième catégorie : les événements qui sont « ailleurs », ni avant ni après… En particulier, pour l'observateur placé à l'origine de la figure ci-dessous, tous les points de son plan de simultanéité – ce qui est pour lui « maintenant » – sont situés dans l'ailleurs, et un autre observateur pourra voir ces événements soit comme postérieurs, soit comme antérieurs, selon sa vitesse par rapport au premier observateur.

Dans un espace-temps plat, en absence de gravitation, les plans de simultanéité à des instants successifs d'un observateur sont parallèles les uns aux autres, ce que l'on peut représenter schématiquement par la figure ci-contre (a). Pour un deuxième observateur, se déplaçant à la vitesse v par rapport au premier, les plans de simultanéité sont toujours





bien parallèles les uns aux autres, comme représenté en (b), mais les angles des deux ensembles de plan de simultanéité diffèrent. En revanche, les deux observateurs ont toujours en commun, et s'accordent sur la définition des cônes de lumière, conséquence directe de l'invariance de la vitesse de la lumière.

Ce parallélisme dans les plans de simultanéité en relativité restreinte est directement relié au fait que la relativité restreinte est une théorie sur un espace-temps

◀ La relativité d'Einstein définit une structure de l'espace-temps très différente de celle de Newton, avec son espace et son temps absolus, et son absence de vitesse limite. Dans la figure ci-contre, pour des raisons de représentation, l'espace à un moment donné est représenté par un plan à deux dimensions et le temps est figuré par l'axe vertical (avec le futur vers le haut de la figure). L'observateur est situé à l'intersection des cônes de lumière futur et passé. Il ne peut recevoir du passé que des informations provenant de l'intérieur du cône de lumière passé. De même, il ne peut envoyer dans le futur des informations ou des interactions qu'avec les objets se trouvant dans le cône de lumière futur. Tout ce qui est à l'extérieur des deux cônes se situe dans un «ailleurs», et n'est pas directement accessible à l'observateur.

plat, représenté mathématiquement par l'espace-temps de Minkowski. La relativité restreinte peut être considérée comme un cas limite de la relativité générale, loin des objets massifs, lorsque l'espace-temps est pratiquement plat[8].

Nous allons maintenant voir comment Einstein est parvenu à adapter sa théorie restreinte à une théorie plus générale, incorporant la gravitation, décrite comme une déformation de l'espace-temps, qui va induire cette fois-ci une modification de l'orientation des cônes de lumière, jusqu'à complètement cacher certaines régions de l'espace-temps au regard d'observateurs extérieurs ainsi qu'une courbure des surfaces de simultanéité, faisant de l'espace-temps un objet *dynamique*.

La relativité générale d'Einstein

Comment généraliser la théorie de la relativité restreinte à la gravitation ? Peu après la finalisation de la relativité restreinte, Einstein sait bien que la gravitation n'est pas prise en compte dans l'espace de Minkowski, et cherche le principe qui permettra de généraliser sa théorie pour y inclure la gravitation. Dans son principe même, la gravitation de Newton est en effet totalement incompatible avec la théorie de la relativité : Newton affirme que la propagation de l'interaction gravitationnelle se fait à vitesse infinie.

8. Mais le principe de la constance de la vitesse de la lumière, qui avait guidé Einstein, ne sera plus valable dans le cas de la relativité générale, même si l'on peut trouver une classe de référentiels pour lesquels cette propriété reste vraie.

Mais, d'une part, la vitesse de la lumière apparaît comme une vitesse limite indépassable et, d'autre part, comme nous l'avons vu, en relativité, une vitesse qui serait infinie dans un référentiel – une propagation instantanée d'un point à un autre – ne serait plus infinie dès lors qu'on la mesurerait dans un autre référentiel : une vitesse infinie n'a donc plus aucun sens absolu en relativité.

Afin de pouvoir étendre les résultats de la relativité restreinte au cas de la gravitation, Einstein va s'intéresser aux référentiels où l'on ne sent pas la gravitation[9], c'est-à-dire les référentiels en « chute libre ». Galilée avait découvert que la gravitation est cette curieuse interaction où tous les corps « tombent » exactement de la même façon lorsqu'ils sont soumis à la « force » de gravitation, si bien que si l'on se place dans le référentiel où tout le monde tombe en même temps on ne sent en première approximation plus la force de la gravitation, qui semble avoir disparu.

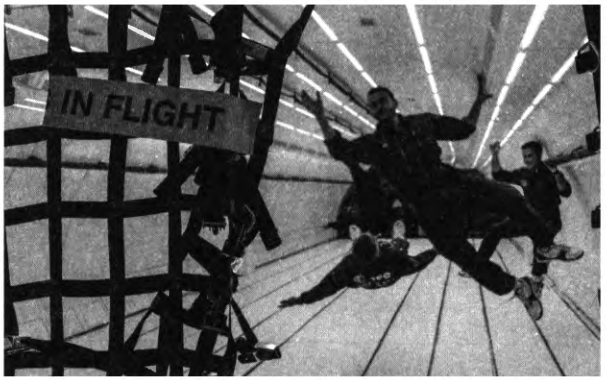
Notons d'abord que dans nos raisonnements sur les mouvements inertiels, où nous avions pris l'exemple d'un train en mouvement libre, sans accélération ni freinage si nous négligeons le frottement de l'air, nous avons un peu triché car, en dépit des apparences, le mouvement n'est *pas* inertiel selon l'axe de la verticale : le train est en effet plaqué sur les rails par son poids, et le mouvement n'est inertiel

9. Pour être tout à fait exact, même en « flottement libre », qui définit un référentiel inertiel, on peut quand même s'apercevoir quasi localement, à travers les effets de marée, que l'on est soumis à un champ gravitationnel. Nous reviendrons sur ce point.

(pour un train se déplaçant à vitesse constante v) que dans un plan horizontal. Ce qui veut dire que le mouvement vertical est en permanence accéléré avec une accélération $g \sim 9{,}8\ m/s^2$, et cela même si, assis dans un fauteuil du train, nous avons l'impression de ne subir aucune accélération verticale car nous restons à altitude constante.

Pour disposer d'un référentiel inertiel selon les trois directions spatiales, il faut en effet se placer dans un ascenseur ou un Airbus en « flottement libre » (photo ci-contre). C'est à partir de ces « ascenseurs en chute libre » qu'Einstein va construire, après de multiples essais, d'erreurs, d'espoirs déçus, et obtiendra finalement, après des discussions en 1914 et 1915 avec plusieurs mathématiciens dont Hilbert, les équations de la relativité générale.

Pour comprendre comment Einstein est parvenu à cette notion d'espace-temps courbé par la matière afin de représenter la gravitation, revenons un instant sur la structure des plans de simultanéité dans le cas de la relativité restreinte. En effet, comme nous l'avons signalé plus haut, les événements qui sont jugés comme simultanés par un observateur dépendent du référentiel dans lequel est placé celui-ci. Nous avons déjà signalé que deux observateurs en mouvement relatif à la vitesse v l'un par rapport à l'autre ne seront pas d'accord entre eux sur ce qui est leur « maintenant », et la figure page 69 représente leurs plans de simultanéité, où nous nous sommes limités à deux dimensions d'espace afin de pouvoir représenter sur une page de livre ce que chaque observateur appelle « maintenant » en chaque point



Personnels en « flottement libre » dans l'Airbus dédié aux expériences de micropesanteur © Air Zero G.

de sa trajectoire dans l'espace-temps, représentée par une ligne avec une flèche indiquant le sens du futur.

Dans le cas d'un mouvement accéléré, Einstein tâtonne, se rend compte que les surfaces de simultanéité pour un observateur accéléré deviennent a priori courbes même si l'espace-temps reste plat. Renversant le problème, et utilisant le principe d'équivalence, il parvient à l'idée qu'un mouvement inertiel en présence de gravitation, le mouvement de « flottement libre », pourrait bien être un mouvement au plus droit dans un espace-temps courbe. Pour ces référentiels en flottement libre, l'espace (à trois dimensions) peut être considéré comme localement euclidien, même si l'espace-temps est courbé en présence d'un champ de gravitation.

C'est cette idée centrale qui va guider Einstein dans sa construction de la relativité générale. Mais, au-delà de

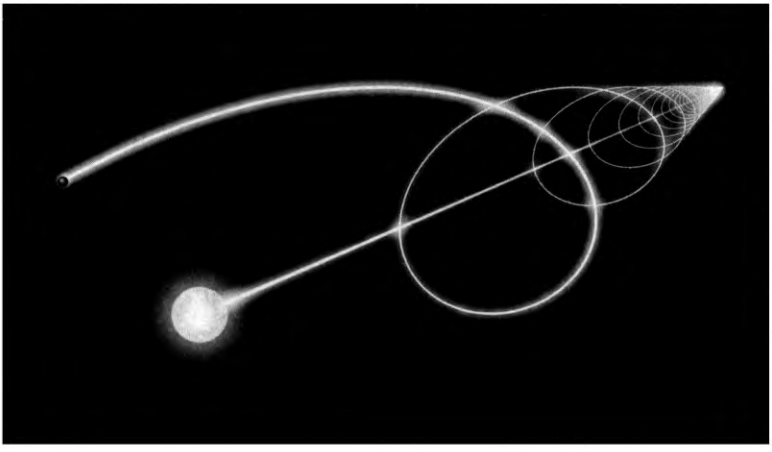
cette idée simple d'une théorie relativiste de la gravitation comme manifestation de la courbure de l'espace-temps, sa construction demandera dix ans à Einstein, la théorie n'étant publiée qu'en 1915. Cette œuvre monumentale remplace la théorie de Newton par une théorie géométrique de l'espace-temps, qui devient un objet dynamique, les référentiels inertiels étant associés aux mouvements en flottement libre, qui sont en fait des géodésiques, trajets allant au plus droit sur un espace-temps courbe.

Afin de donner un exemple simple de la modification profonde de conception de la gravitation que propose Einstein, considérons par exemple le mouvement apparemment circulaire de la Terre autour du Soleil. Einstein nous dit qu'en fait la Terre suit le chemin géodésique – sorte de chemin optimal au sens de la métrique – sur l'espace-temps courbé par le Soleil. Une révolution annuelle de ce mouvement circulaire apparent est en fait un mouvement droit sur une longueur d'une année-lumière – car la révolution dure une année et la vitesse très faible devant la vitesse de la lumière ne modifie pratiquement pas la longueur, très proche d'une année-lumière, du trajet de la Terre dans l'espace-temps. Avec une déviation de l'ordre du rayon de la trajectoire, soit 150 millions de kilomètres, la trajectoire de la Terre autour du Soleil est donc en fait une hélice dans l'espace-temps courbé par le Soleil (figure ci-contre).

Je reprends ici, afin de montrer en quoi elle est ironiquement fausse, l'expression de Valéry, que je citais dans

le chapitre sur la construction galiléenne et newtonienne de la gravitation : « Il fallait le génie de Newton pour voir que la Lune tombe quand tout le monde voit qu'elle ne tombe pas. » La conception d'Einstein est radicalement différente, et magnifiquement résumée dans la contraposition de la phrase de Valéry qu'en fait Wheeler : « Il fallait le génie d'Einstein pour voir que la Lune ne tombe pas quand tout le monde voit qu'elle tombe. »

On voit donc que, pour parcourir les 2π fois 150 millions de kilomètres de révolution, soit environ 950 millions de kilomètres sur une durée d'une année, la Terre doit parcourir dans l'espace-temps une distance – appelée « intervalle » – qui est un tout petit peu inférieure à une année-lumière, soit environ $\approx 9{,}5\,10^{12}$ km, la distance dans l'espace (950 millions de kilomètres, soit un peu moins de 1 600 secondes-lumière)



D'après une réalisation de WorldlessTech.

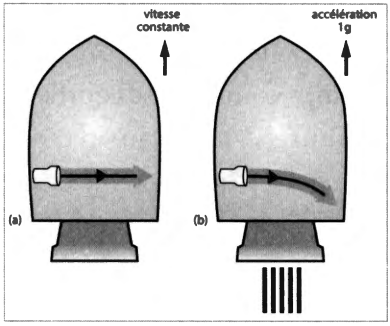
étant très faible devant la distance dans le temps (environ une année-lumière, ou environ 31 millions de secondes-lumière) dans le référentiel du Système solaire.

Cela signifie qu'au niveau de la Terre le Soleil ne perturbe que relativement peu l'espace-temps – au niveau de 10^{-4} environ, soit un dix-millième – et la figure n'est donc pas du tout à l'échelle entre l'échelle des temps – le long de l'axe de révolution – et dans la dimension d'espace – ici le plan orthogonal à l'axe de l'hélice. Nous reviendrons dans un chapitre dédié aux trous noirs au cas où, même à la vitesse de la lumière, il n'est plus possible d'échapper à la gravitation du corps massif.

En comparant le cas d'un observateur faisant ses expériences dans un ascenseur en chute libre au cas d'un observateur les réalisant dans un ascenseur subissant une accélération, Einstein réalise également dans cette expérience de pensée que si, dans le premier cas, un faisceau lumineux émis depuis l'extérieur doit être vu comme se propageant en ligne droite, dans le deuxième cas, la lumière doit être déviée et que, si le principe d'équivalence est respecté, un faisceau lumineux doit donc être courbé par un champ gravitationnel (ci-contre). Nous reviendrons par la suite sur ce test important, où Einstein dut tâtonner longtemps avant de parvenir à la prédiction correcte de la déviation angulaire du faisceau lumineux dans un champ de gravitation, double de la prédiction newtonienne. C'est ce test, réalisé initialement par Arthur Eddington dans une campagne d'observation en 1919, qui assura à la relativité générale d'Einstein une

notoriété importante même si, comme nous le verrons, le résultat ne fut que peu significatif.

Cette courbure de l'espace, et ces accélérations relatives entre les observateurs ont pour conséquence que la structure causale est modifiée par rapport à la relativité restreinte : au lieu de plans de simultanéité parallèles les uns aux autres, la courbure de l'espace entraîne la modification de l'orientation des cônes de lumière, voire même, on le verra dans le cas des trous noirs, une impossibilité pour un observateur de communiquer avec l'extérieur du trou noir une fois passé la zone de non-retour, l'horizon du trou noir[10]. Ainsi certaines zones de l'espace, bien définies et à distance constante de nous, peuvent-elles être inaccessibles à l'observation, aspect sur lequel nous reviendrons dans un chapitre dédié aux trous noirs.



Dans un espace-temps plat et dans un référentiel non accéléré, un faisceau lumineux se propage en ligne droite (partie gauche (a) de la figure). Ceci a pour conséquence que, observé dans une fusée en accélération (partie droite (b) de la figure), un faisceau lumineux voit sa trajectoire courbée, la fusée en phase d'accélération prenant de plus en plus d'avance sur la fusée de gauche, non accélérée.

10. Pour les trous noirs en rotation, nous aurons même la possibilité d'avoir des dialogues avec renversement du signe de l'énergie dans la zone que l'on appelle l'« ergosphère du trou noir » qui permet, comme le décrit le scénario du film *Interstellar*, d'extraire de l'énergie d'un trou noir au prix du sacrifice nécessaire d'une partie de l'objet ainsi piégé.

Les équations d'Einstein et leur signification

S'il est possible d'exprimer de façon élégante les équations de la relativité générale, il est aussi très aisé de se perdre dans des pages de calcul, et de ne plus voir les aspects essentiels. Pour cette raison, j'ai pris le parti de résumer l'esprit des équations d'Einstein, puis de les étudier non pas dans notre espace-temps à 3 + 1 dimensions, mais dans un espace-temps de dimensionalité réduite, à 2 + 1 dimensions, qui simplifie grandement la résolution de l'équation.

Notons que dans tous les cas, quel que soit le nombre de dimensions, les équations d'Einstein peuvent se résumer sous la forme[11] :

courbure = énergie-impulsion
(de la matière à l'endroit considéré)

ce que le physicien John Wheeler a résumé dans la formule élégante : « L'espace-temps indique à la matière comment bouger ; la matière dit à l'espace-temps comment se courber. »

Mathématiquement, la courbure est décrite par un tenseur et va décrire les effets de marée qui s'exercent sur un objet en raison de la gravitation. Ce tenseur de courbure

11. Dans l'équation ci-dessus, les deux membres de l'égalité entre courbure et énergie-impulsion sont en fait des objets complexes, appelés des « tenseurs », qui ont seize composantes (16 étant le carré du nombre (4) de dimensions de l'espace-temps). En fait, dans le tenseur énergie-impulsion, on trouve non seulement la grandeur énergie pour l'une des composantes et l'impulsion pour six autres des composantes, le tenseur énergie-impulsion étant symétrique, mais aussi des grandeurs de flux comme les flux d'énergie et les flux d'impulsion. L'expression « énergie-impulsion » est ainsi une manière commode de résumer cet objet complexe.

vient compléter l'arsenal des deux autres quantités déjà rencontrées dans l'étude de la gravitation : le potentiel gravitationnel U_g, qui intervient dans la conservation de l'énergie, et le champ de gravitation, qui est un vecteur vec{g} qui apparaissait déjà dans la théorie newtonienne.

La gravité dans un espace-temps à (2 + 1) dimensions

Du fait qu'il est rarement décrit dans les ouvrages de relativité générale et en raison à la fois de sa simplicité et de la compréhension qu'il permet d'apporter, il est utile d'étudier le cas d'un espace-temps à deux dimensions d'espace – une de moins que dans notre Univers – et une dimension de temps, noté 2 + 1. Si cela peut paraître bizarre, cela correspond approximativement au cas où l'Univers serait peuplé de cordes cosmiques qui, comme l'indique leur nom, sont des sortes d'objets longilignes massifs, dont il est important de noter qu'ils sont tous parallèles les uns aux autres. Dans ce cas, quand on se déplace le long de l'axe des cordes cosmiques, on voit toujours exactement le même système physique, et donc une fois que l'on a décrit la situation pour un point de l'axe, on l'a décrite pour tous les points de l'axe, si bien que l'on se ramène à un espace qui se comporte effectivement comme s'il était de dimension 2 + 1 (seulement deux dimensions d'espace).

Dans ce cas d'un espace-temps de dimension 2 + 1, les équations d'Einstein se simplifient grandement et il est possible d'expliciter les solutions des équations, et cela quelle que soit la distribution de masse présente dans

l'Univers[12]. En effet, lorsqu'il n'y a que deux dimensions d'espace, le terme géométrique des équations d'Einstein $G_{\mu\nu}$[13] est simplement égal au tenseur métrique $g_{\mu\nu}$, qui définit les relations de distance sur cet espace, sans avoir à faire intervenir les dérivées qui empoisonnent les calculs à 3 + 1 dimensions, si bien que les équations d'Einstein se réduisent à :

$$g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

dont la signification est :

métrique = impulsion-énergie.

L'égalité de ce tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ avec le tenseur énergie-impulsion $T_{\mu\nu}$ a pour conséquence que la courbure de l'espace-temps n'est non nulle qu'aux seuls endroits où une masse est présente, l'espace-temps étant plat dans le cas contraire et en particulier dans le vide [14].

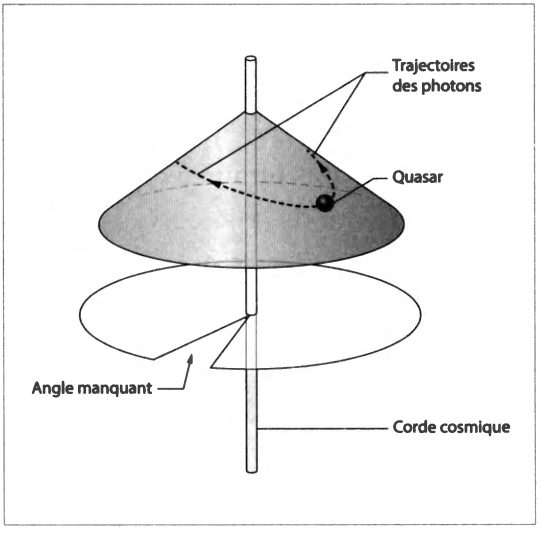
---

12. Notons que dans le cas quantique également, la gravité en 2+1 dimensions a été très utile car elle a permis la découverte par Banados, Teitelboim et Zanelli en 1992 d'une solution exacte d'un trou noir en (2 + 1) dimensions où la densité et la courbure de l'espace-temps sont constantes, si bien qu'il n'existe aucune singularité de courbure à l'origine, alors même que les caractéristiques essentielles d'un trou noir (horizon, thermodynamique, rayonnement, ergosphère, dont nous reparlerons) sont présentes dans la solution en dépit de cette absence de singularité.

13. Pour les tenseurs cités, les indices sont ceux des dimensions d'espace-temps, soit 4 pour l'espace-temps usuel et 3 pour l'espace-temps à 2+1 dimensions.

14. Ce qui n'est pas le cas dans un espace-temps à 3 + 1 dimensions, par exemple dans le vide au voisinage du Soleil, où le tenseur de Riemann n'est pas nul bien qu'il n'y ait pas de matière à cet endroit.

Dans notre espace à 2 + 1 dimensions, considérons le cas d'un univers qui ne comporterait qu'une seule masse positive ponctuelle : l'espace prend alors la forme d'une pizza dont on a enlevé une tranche (ci-dessous), et la taille de la tranche de pizza enlevée à l'espace est proportionnelle à la masse

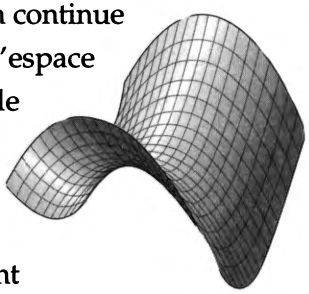


En gravité à deux dimensions d'espace et une dimension de temps – ce que l'on appelle de manière condensée la « gravité (2+1) » – l'espace-temps est plat partout sauf à l'endroit exact où l'on place une masse. Sur la figure ci-dessus, la position de la masse ponctuelle est représentée par l'axe vertical. La présence d'une masse positive a pour conséquence d'enlever un peu d'espace dans le plan, ce qui a pour conséquence que l'espace a une structure conique, comme si on avait retiré une « part de pizza » dans l'espace, ce qui est représenté dans la portion de figure par un déficit d'angle et la partie d'espace manquant, qui conduit à l'espace-temps conique quand on recolle les deux bords découpés de la pizza. À noter que dans le cas d'une masse négative, cette masse fournit un supplément d'espace par rapport aux 2π d'angle d'un plan, ce qui correspond à une « pizza plus que complète » (non représentée sur la figure).

présente en ce point. Notez cependant bien que, l'espace étant continu, le trait de coupure n'existe pas, et l'espace est simplement conique, ce qui signifie qu'il faut que l'on ait recollé les deux bords de la pizza pour que l'espace-temps retrouve sa continuité. L'espace-temps est donc partout plat, sauf à l'endroit exact où on a placé la seule masse de l'espace.

Du fait que l'espace-temps est plat partout sauf à l'endroit où existent des cordes cosmiques, qui sont les masses ponctuelles dans l'espace-temps à 2 + 1 dimensions, il est nécessaire, pour se rendre compte de la courbure induite localement par une masse, d'utiliser des rayons lumineux qui passent *de part et d'autre* dans le plan autour de la corde. C'est seulement ainsi, l'espace-temps étant plat ailleurs, que l'on peut s'apercevoir qu'il existe une masse, sauf à se placer exactement sur la singularité de la corde, situation que l'on ne sait pas traiter en raison… de la singularité. Le même objet lumineux placé au loin, par exemple un quasar, sera alors vu dans deux directions différentes selon que le rayon lumineux passe d'un côté ou de l'autre de la corde cosmique (page précédente) et, en général, avec une différence de temps d'arrivée des signaux au niveau de l'observateur entre les deux images. Si cela peut sembler étrange, il faut noter que ces images multiples existent également dans le cas d'un espace-temps possédant, comme le nôtre, trois dimensions d'espace et une dimension de temps, et que ce décalage temporel entre les temps d'arrivée des différentes images est d'ailleurs un moyen de s'assurer, pour un objet variable comme un quasar, que l'on a bien affaire à deux images d'un *même objet*.

Même si la question peut sembler bizarre, essayons maintenant de voir à quoi peut correspondre une masse *négative* en gravité à 2 + 1 dimensions. Il est assez simple de démontrer que si une masse positive enlève une portion de l'espace conique, une masse négative va redonner de l'espace – au lieu d'avoir une pizza dont une tranche manque, on a affaire à une pizza plus que complète, avec plus que 180 degrés ! –, et qu'il n'y a pas de différence notable entre masses positives et masses négatives en dehors de cette condition aux limites sur l'espace : en effet, en dehors des masses, l'espace-temps est tout aussi plat dans un cas comme dans l'autre. Si on distribue de façon continue des masses négatives, on donne à l'espace une structure hyperbolique, difficile à représenter en trois dimensions mais dont une portion en « selle à cheval » est représentée sur la figure ci-contre. Bien entendu, devant la possibilité iconoclaste des masses négatives, il faut disposer d'un mécanisme protecteur, imposant par exemple qu'on ne puisse pas créer à partir du vide deux masses négatives, mais toujours une masse négative accompagnée d'une masse positive, faute de quoi le vide a toutes les chances de devenir violemment instable…



Un autre aspect intéressant de la gravitation dans un univers à 2 + 1 dimensions est mis en évidence lorsque le moment cinétique de la corde est non nul, c'est-à-dire que la corde cosmique possède un mouvement de rotation sur

elle-même. Dans ce cas, l'espace-temps devient hélicoïdal, ce qui veut dire que si l'on est très proche de la corde cosmique, à chaque tour de la corde que l'on effectue, on avance ou on recule dans le temps selon que l'on tourne dans le même sens que la rotation de la corde sur elle-même, ou que l'on tourne dans le sens inverse. Il semble ainsi que l'on puisse se rendre aussi loin en avant qu'en arrière dans l'espace-temps si l'on effectue un nombre de tours suffisant au voisinage immédiat de la corde cosmique...

La machine à voyager dans le temps de Richard Gott III

A-t-on trouvé le moyen de fabriquer une machine à voyager dans le temps ? Cette question a été étudiée très sérieusement par Richard Gott III, de l'université de Princeton, qui a secoué la communauté des relativistes en décrivant en 1991 de façon explicite ce qui ressemblait fort à une machine à voyager dans le temps, avec une solution impliquant deux cordes cosmiques de masse positive se croisant, sans chercher à utiliser des masses négatives et tout en respectant la positivité de l'énergie. Cependant, quelques mois plus tard, Stanley Deser, Roman Jackiw et Gerard 't Hooft démontrèrent qu'il est impossible d'implémenter cette solution dans un monde réel car l'Univers s'effondre sur lui-même dans un Big Crunch – le film passé à l'envers du Big Bang – avant que l'on ne soit parvenu à utiliser ce système des deux cordes cosmiques pour remonter dans le temps et/ou dépasser la vitesse de la lumière[15].

---

15. De façon générale, ces cordes cosmiques infinies conduisent d'ailleurs

L'Univers comme un objet dynamique, la cosmologie de Lemaître

La gravitation est le moteur de l'Univers, et comme Einstein l'avait découvert assez rapidement après avoir cherché à justifier un Univers statique, un moteur qui ne peut jamais être coupé, si bien qu'instabilité et évolution sont des conséquences inéluctables de la gravitation. Comment de ce fait pouvait-on identifier les caractères les plus généraux possibles de l'évolution des univers soumis à la gravitation ?

Au-delà de l'exemple de la gravité en 2 + 1 dimensions, exactement soluble et très éducatif, mais qui présente des caractères pathologiques[16] quand on cherche à l'appliquer à un univers ayant trois dimensions d'espace, on peut trouver également quelques solutions exactes, c'est-à-dire dont les espaces-temps peuvent être explicités, en diminuant encore d'une unité le nombre de dimensions de l'espace, soit un espace-temps à 1 + 1 dimensions. Cela peut être fait en considérant un univers homogène et isotrope et on

---

à ce même problème d'effondrement, ce qui fait que la gravité en 2 + 1 dimensions présente des problèmes de cohérence interne.
Nous retrouverons ce type de symétrie masse positive-masse négative dans les solutions de trous noirs chargés et en rotation de Kerr-Newman, dont nous reparlerons dans le chapitre suivant, solutions dans lesquelles il est très difficile d'éviter les courbes qui peuvent revenir sur leurs pas dans l'espace-temps.

16. En particulier, comme on l'a vu dans la discussion sur la machine à voyager dans le temps proposée par Richard Gott III, une seule corde cosmique ne peut réellement exister dans la mesure où un univers qui la contient s'effondre de façon catastrophique en un temps fini, alors que cet effondrement ne se voit pas en gravité 2 + 1.

peut assez facilement montrer que dans ce cas, un univers présentant une symétrie sphérique peut effectivement se réduire à un problème à une dimension, qui est la distance par rapport à un point de référence[17]. Dans le cas d'un univers homogène et isotrope, où la densité à un temps cosmologique donné est constante, l'étude de ces solutions revient à Georges Lemaître en 1925, et Alexander Friedmann dès 1922, avant que Howard Robertson et Arthur Geoffrey Walker ne poursuivent l'étude dans les années 1930 en démontrant que cette famille de solutions est unique.

Dès 1922, Alexander Friedmann, physicien et mathématicien russe, publie un article décrivant ces univers homogènes et isotropes en relativité générale. Mais Friedmann meurt très jeune, en 1925, si bien que ses articles restent largement ignorés initialement. L'analyse ultérieure des articles de Friedmann démontre qu'il maîtrisait les trois types d'univers ouverts, fermés et critiques qui seront étudiés plus tard par Robertson et Walker.

Georges Lemaître (1894-1966) était, quant à lui, un prêtre catholique belge mais aussi un astronome formé par des physiciens prestigieux comme Arthur Eddington et Harlow Shapley. Lemaître découvre de façon indépendante de Friedmann la vision d'un univers dynamique, en expansion, et publie en 1927, deux ans avant Hubble, un article où il estime la vitesse de récession en fonction de la distance. L'article

17. Dans le cas d'un trou noir, la géométrie correspondante sera donnée par la géométrie de Schwarzschild : l'Univers est alors vide sauf au cœur du trou noir, cas sur lequel nous reviendrons.

de Lemaître est publié en Belgique et, n'étant pas écrit en anglais, suscite lui aussi peu de réactions de la communauté astronomique. Arthur Eddington, qui en saisit l'importance, aide Lemaître à le traduire en anglais mais, pour des raisons peu claires, la traduction est incomplète et ne mentionne pas le passage sur la loi d'expansion de l'Univers, ce qui explique partiellement que cette loi d'expansion deviendra ensuite connue comme la « loi de Hubble. »[18]

Si l'article de 1927 de Lemaître, qu'Eddington a finalement fait connaître, décrit déjà l'expansion de l'Univers, il faudra attendre quatre ans, en 1931, pour que, renversant le sens du temps afin de décrire l'histoire passée de l'Univers, Lemaître démontre que le film à l'envers de l'expansion conduit dans le passé à une compression de l'Univers, si bien que l'Univers a dû être dans un état extrêmement, voire infiniment, condensé quand on remonte suffisamment en arrière. Lemaître assigne à cet état l'origine de l'Univers, ce qu'il appelle l'« atome primordial », introduisant avant l'heure la notion de Big Bang – expression qui date du début des années 1950. On peut noter néanmoins que les notions d'atome ou d'œuf primordial employées par Lemaître – et notamment l'expression « œuf cosmique explosant au moment de sa création » – peuvent évoquer un lieu confiné pour l'état initial de l'Univers, ce qui est inexact car, dans

18. La loi de Hubble s'exprime usuellement sous la forme : $v = H_0 d$, où v est la vitesse de récession par rapport à l'observateur, H_0 est la « constante » de Hubble, qui vaut environ 70 km/s/Mpc, et qui dépend en fait de l'époque à laquelle on la considère, et d est la distance à l'observateur.

le modèle standard, le Big Bang a lieu partout et pas en un endroit central et unique.

Lemaître s'éteint en 1966, peu après la découverte par Penzias et Wilson du bruit de fond cosmologique, qui constituait un témoignage des phases beaucoup plus chaudes de l'Univers, confirmation éclatante de la cosmologie de Friedmann et Lemaître, et vestige d'une époque où l'Univers était environ un milliard de fois plus dense qu'aujourd'hui[19].

Première rencontre avec la constante cosmologique

Einstein croyait initialement, pour des raisons largement philosophiques, en un Univers stable et éternel et, après avoir réussi à formuler sa théorie de la relativité générale à la fin 1915, chercha à appliquer sa théorie au comportement de l'Univers, comme l'avait d'ailleurs partiellement étudié Newton. Einstein chercha donc à étudier un modèle d'Univers constitué d'une distribution de masse uniforme et statique sur un espace euclidien[20] à trois dimensions, et prit rapidement conscience du fait

---

19. Notons également que la notion d'instant primordial pour l'Univers introduite par Lemaître amena plus tard le pape Pie XII à déclarer en 1951 que cette notion constituait une validation du catholicisme – et de la notion de création divine –, affirmation avec laquelle Lemaître, bien que prêtre, était en total désaccord, considérant les deux domaines de la relativité générale et de la religion catholique comme complètement distincts.

20. Le lecteur perspicace aura noté qu'un espace euclidien est plat, mais il est important de préciser que c'est la section *d'espace* qui est plat, et pas *l'espace-temps* lui-même, doté par Einstein d'une distribution uniforme de matière, et donc courbé.

qu'un tel univers ne peut rester statique en raison de son instabilité extrême, instabilité dont Newton s'était déjà lui aussi convaincu.

À l'époque (1931) où Lemaître fait connaître son modèle, Einstein est encore extrêmement réticent à l'idée d'un Univers en expansion, ayant connu dans le passé une phase extrêmement dense. Il écrit ainsi à Lemaître : « Vos calculs sont corrects, mais votre physique est abominable. » De ce fait, Einstein inclut un terme additionnel dans ses équations, terme qui peut être attractif ou répulsif selon le signe qui lui est donné et, dans un espace-temps à quatre dimensions, les équations d'Einstein deviennent [21] :

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

Ce terme supplémentaire proportionnel à Λ peut s'interpréter, aux côtés du terme $T_{\mu\nu}$ décrivant le contenu matériel de l'Univers, comme une énergie, positive ou négative, du vide. On pourrait penser qu'une densité positive de l'énergie du vide ou de la constante cosmologique va ralentir l'expansion de l'Univers – car créer de l'espace supplémentaire à travers l'expansion coûte de l'énergie. Mais une nouvelle fois l'intuition est mise à rude épreuve dans la relativité générale, du fait que dans les équations d'Einstein c'est la densité d'énergie ρ additionnée de trois fois la pression P, soit : $\rho + 3P$ qui intervient. Or la pression

21. Devant l'énergie-impulsion $T\mu\nu$, on trouve généralement une constante multiplicative égale à $8\pi G/c^4$, mais cette constante est inessentielle et peut être absorbée dans un changement d'unités.

étant négative – justement parce que créer un nouveau volume d'espace coûte de l'énergie et que ça résiste – et égale à $-\rho$, si bien que la somme $\rho + 3P$ est égale à -2ρ, et une constante cosmologique positive contribue à *accélérer* l'expansion de l'Univers ! S'étant convaincu de l'instabilité sous les perturbations les plus minimes d'un Univers qu'il avait cherché à rendre statique, et considérant comme extrêmement peu probable l'existence d'une constante cosmologique qui viendrait accélérer l'expansion de l'Univers, Einstein renonça bientôt à ce terme (néanmoins parfaitement permis par ses équations) et considéra ensuite ce terme de constante cosmologique comme sa plus grande erreur[22].

Mais nous verrons cependant qu'ironiquement, au début des années 1990, le problème réapparaîtra grâce à l'analyse de la théorie des champs et l'article fondateur de Steven Weinberg sur la question de la valeur de la constante cosmologique et de l'énergie du vide, dont les ordres de grandeur montrent qu'elle doit être a priori énorme, sauf si une raison de symétrie, comme ce pourrait être le cas dans la supersymétrie, parvenait

22. Une certaine polémique existe sur le fait de savoir si Einstein a dit ou pas que la constante cosmologique constituait effectivement « sa plus grande erreur ». Cette affirmation supposée d'Einstein est en effet rapportée par Gamow, qui n'était pas nécessairement un modèle de fiabilité. Ce qui est certain, c'est qu'Einstein a déploré plus tard comme inélégant le terme de « constante cosmologique », comme par exemple dans la deuxième édition de *The meaning of relativity* (1945) : "L'introduction de la « constante cosmologique" dans les équations de la gravité, bien que possible du point de vue de la relativité, doit être rejetée du point de vue de l'économie logique. »

à compenser termes positifs et négatifs qui peuvent contribuer à cette constante. Quelques années plus tard, à la fin des années 1990, les physiciens furent confrontés à l'immense surprise de la découverte de l'accélération de l'expansion, démontrant qu'est à l'œuvre une gravité répulsive dans l'Univers à très grande distance, avec apparemment toutes les propriétés d'une constante cosmologique, une découverte couronnée par le prix Nobel de physique de 2011.

Sommes-nous sûrs de l'existence du Big Bang ?

Nous avons vu que Lemaître avait, quelques années après la publication par Einstein de sa théorie de la relativité générale, mis en évidence que l'Univers devait avoir connu des phases extrêmement, voire infiniment, denses. Auteur de l'expression « Big Bang », utilisée par dérision dans une série de conférences qu'il avait données sur la BBC, Fred Hoyle s'est battu jusqu'au bout, et pratiquement jusqu'à sa mort, contre cette idée de « Big Bang », proposant à la place un Univers éternel, avec une création continue de matière. Aujourd'hui, plus d'un siècle après la publication de la relativité générale, où en sommes-nous ? Pouvons-nous croire de façon quasi certaine à la notion de Big Bang, ou faut-il encore considérer cet état singulier et extrêmement dense et chaud comme une hypothèse ?

Parmi les témoins les plus forts du Big Bang, citons d'abord la nucléosynthèse qui, comme son nom l'indique, correspond à la formation des éléments nucléaires légers.

Notre Univers est en effet constitué à 75 % environ en masse d'hydrogène et à 25 % en masse d'hélium, les autres éléments étant beaucoup moins abondamment produits. Bien entendu, les étoiles, qui possèdent en leur centre un réacteur thermonucléaire, fabriquent elles aussi de l'hélium, mais en quantité trop faible sur la durée de vie actuelle de l'Univers – environ quatorze milliards d'années – pour expliquer ces 25 %. En revanche, le modèle cosmologique standard permet d'expliquer ce pourcentage d'hélium au cours de ses premiers instants, car au cours de ses trois premières minutes extrêmement chaudes, ses températures supérieures à un milliard de degrés environ rendent possible la « cuisson » des premiers éléments chimiques que sont, outre l'hélium-4, le très fragile deutérium (environ 2,5 cent-millièmes), le lithium-7, l'hélium-3, et de plus petites quantités encore des éléments plus lourds comme le carbone et l'oxygène[23]. La nucléosynthèse primordiale prédit les proportions d'éléments nucléaires légers produits au cours de cette phase extrêmement chaude de l'Univers, et le modèle cosmologique standard fixe assez précisément sa composition nucléaire, dans un déroulement historique que Weinberg a décrit dans son célèbre ouvrage *Les Trois Premières Minutes de l'Univers*.

L'autre grand témoin des phases initiales de notre Univers, quoique à une époque nettement plus tardive que « les

23. Ces éléments plus lourds seront d'ailleurs plutôt produits ensuite par les étoiles et par les explosions de supernovæ, dont nous reparlerons.

trois premières minutes », est le fond diffus cosmologique. Dès 1946, George Gamow avait calculé que l'expansion de notre Univers à partir de ces phases extrêmement chaudes devait conduire aujourd'hui à une température résiduelle de l'Univers qu'il estimait à environ 50 degrés absolus, valeur nettement trop élevée par rapport à la véritable température résiduelle, proche de 2,7 kelvins. L'erreur de Gamow provenait notamment du fait qu'il estimait l'âge de l'Univers à seulement 3 milliards d'années (contre 14 milliards d'années pour l'âge effectif). Robert Dicke, de l'université de Princeton, lança de son côté au début des années 1960 un programme expérimental afin de mesurer le bruit de fond centimétrique qui doit accompagner cette température. Mais ce sont Arno Penzias et Robert Wilson, ingénieurs au Bell Laboratory de Holmdel dans le New Jersey qui les premiers mettront en évidence l'existence d'un fond diffus et remarquablement isotrope. Penzias et Wilson chercheront pendant plusieurs mois à vérifier que ce « bruit » ne pouvait pas être expliqué par des sources plus conventionnelles, avant de l'attribuer à un fond diffus cosmologique. Il faut ensuite attendre 1992 et le satellite *COBE* qui accueille plusieurs instruments, dont l'un, FIRAS (Far-Infrared Absolute Spectrophotometer) a vérifié avec une précision remarquable que le spectre est thermique et mesuré la température du rayonnement. Ce même satellite *COBE* comportait un deuxième instrument, DMR (Differential Microwave Radiometers), qui permit d'établir la première carte, de précision encore très limitée, démontrant l'existence de fluctuations très ténues de température, au niveau de

quelques parties sur cent mille que prévoit le modèle cosmologique standard, sur lequel nous reviendrons.

Au cours des années suivantes, d'abord avec des détecteurs emportés en ballon dans l'expérience Boomerang, puis avec un deuxième satellite dédié de la NASA, *WMAP* (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, du nom de l'un des pionniers des études du domaine), les observations deviennent de plus en plus précises, aboutissant avec le satellite *Planck* de l'ESA (ci-contre) à une image d'une précision remarquable du spectre du son dans l'Univers primordial, et d'environ un millionième de degré en température[24].

La loi de Hubble, prédiction des solutions étudiées par Friedmann et Lemaître, était initialement très imprécise lors de la publication par Hubble de ses premières mesures, à la fois à cause d'une erreur monumentale sur l'échelle des distances et d'autre part en fonction de l'étendue limitée des mesures. Elle est aujourd'hui remarquablement vérifiée sur un large domaine de distance et il serait désormais absurde de nier l'expansion de l'Univers, où la vitesse de récession d'objets lumineux lointains – conséquence directe de l'expansion de l'Univers – est mesurée jusqu'à une fraction importante de la vitesse de la lumière. Comme nous l'avons signalé à propos de l'énergie noire et de la constante

24. Les mesures sont si précises qu'elles fournissent presque un film des mouvements de matière à cette époque reculée du fait que les champs de vitesse d'effondrement peuvent être mesurés par ce que l'on appelle la « polarisation du champ électrique ».

cosmologique, l'attention se porte depuis une vingtaine d'années sur la mesure de *l'accélération* au cours du temps de ce taux d'expansion, très important sujet d'étude actuel (rendez-vous à la fin du chapitre pour en savoir plus – III).

Pour répondre à la question de savoir si les physiciens croient dur comme fer au Big Bang, on peut résumer l'opinion actuelle des scientifiques en disant que plus de 99 % des physiciens sont convaincus que l'Univers a connu des phases extrêmement chaudes et compressées par rapport à aujourd'hui, avec des températures qui ont dépassé un milliard de degrés. Il est fort possible en revanche que la prédiction de la relativité générale que le Big Bang corresponde à une singularité et une densité infinie soit « évitée » par l'Univers, et que le Big Bang soit en ce sens une approximation, à charge pour une théorie quantique de la gravitation de nous indiquer comment ces infinis pourraient être évités.

Plus qu'une remise en cause du modèle du Big Bang, dans l'étude de ce que l'on appelle le « modèle standard cosmologique », les efforts des physiciens et cosmologistes se portent plutôt aujourd'hui sur la curieuse composition de l'Univers, supposé contenir à hauteur de 96 % les deux composantes de matière noire et d'énergie noire dont on est incapable aujourd'hui de mettre en évidence la véritable nature, et dont on postule simplement l'existence en ajustant, très bien il faut le reconnaître, mais avec six paramètres que l'on ne mesure pas par ailleurs, les données du nombre croissant d'expériences à notre disposition.

Tests expérimentaux de la relativité générale

Il est essentiel de mettre à l'épreuve de l'expérience la théorie de la relativité générale, et c'est bien ce qu'avait en tête Einstein en se lançant dans la prédiction de la précession du périhélie de Mercure, qui résistait aux prédictions de la théorie newtonienne de la gravitation. Vinrent ensuite le calcul par Einstein de l'angle de déviation des rayons lumineux au voisinage du Soleil – où le calcul réalisé initialement par Einstein comportait une erreur d'un facteur 2 – et l'effet de ralentissement (relatif) d'une horloge dans un puits de potentiel gravitationnel qui ne fut testé qu'à partir de la fin des années 1950, après la mort d'Einstein.

Peu après la publication de sa théorie, Einstein avait par ailleurs pris conscience que les mouvements de corps massifs devaient mener à l'émission d'ondes gravitationnelles, même si Einstein pensait qu'un tel effet serait probablement impossible à mesurer : nous verrons que nous y sommes parvenus aujourd'hui, à la fois de façon indirecte par la modification de période d'un système binaire et par l'observation directe des ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de trous noirs (et d'étoiles à neutrons), découverte récente à laquelle je dédie un chapitre. Les deux derniers tests de la relativité générale que je discuterai concernent l'énergie de liaison d'un corps et son respect du principe d'équivalence, un test proposé par Kenneth Nordtvedt en 1968, ainsi que le test du principe d'équivalence pour l'antimatière, dont on attend les premières expériences en 2018 auprès du décélérateur d'antiprotons ELENA du CERN à Genève.

Décalage du périhélie de Mercure

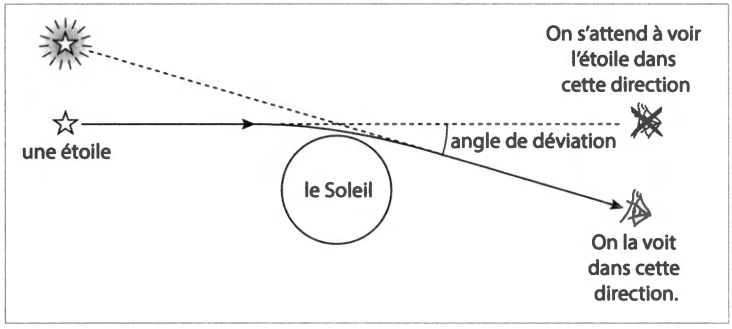
On peut se rappeler que la découverte en 1846 grâce aux calculs du mathématicien Urbain Le Verrier d'une nouvelle planète, Neptune, passée jusqu'ici inaperçue, avait constitué le triomphe de la gravitation newtonienne. Dès 1859, Le Verrier montrait cependant que quelque chose semblait clocher dans les calculs de la trajectoire de Mercure, planète la plus proche du Soleil. En gravitation newtonienne, en effet, si l'on néglige l'influence des autres planètes, la trajectoire devrait se refermer sur elle-même, du fait que les orbites newtoniennes sont des ellipses. Conscient que cette ellipse pouvait être perturbée par les autres planètes, Le Verrier avait entrepris le calcul de leurs perturbations. Ses calculs montraient un lent déplacement du périhélie de Mercure – le lieu qui s'approche le plus du Soleil –, d'environ 532 secondes d'arc par siècle. Mais ce que montrait l'expérience était différent, quoique proche, avec un décalage de 575 secondes d'arc environ, soit un écart d'environ 43 secondes d'arc par siècle, et environ trois millions d'années pour avoir un décalage d'un tour complet…

Déviations des rayons lumineux au voisinage du Soleil

Après le calcul de la précession du périhélie de Mercure, dès 1915, le test suivant de la relativité générale fut fourni par la prédiction de la déviation des rayons lumineux rasant le Soleil. Pour cette déviation, la gravitation newtonienne prédit également une déviation, que l'on peut calculer assez simplement en considérant, comme l'avait fait Newton, que la lumière est constituée de corpuscules se déplaçant à la

vitesse dont on savait à l'époque d'Einstein qu'elle était très proche de 300000 km/s. En utilisant cette valeur, la déviation prédite par Newton pour des rayons lumineux passant au ras de la surface du Soleil aurait dû être de 0,87 seconde d'arc. Einstein tâtonna pendant plusieurs mois sur le calcul de cette déviation, avant de démontrer qu'elle devait être le double de la prédiction newtonienne, soit environ 1,74 seconde d'arc.

Connaissant cette prédiction, et voulant avec force contribuer à mettre en œuvre un deuxième test de la relativité d'Einstein, Arthur Eddington chercha à profiter de l'éclipse totale du 29 mai 1919, où il choisit de réaliser des observations à l'île du Prince (Principe), au large de la Guinée, alors qu'une deuxième équipe d'observation, pour plus de sûreté, se rendait dans le nord du Brésil, à Sobral, sur le passage de l'éclipse.



La déviation des rayons lumineux par un corps massif (ici le Soleil) peut se mesurer en suivant la position apparente sur le ciel d'une étoile lors de son passage au voisinage du corps massif. Dans le Système solaire, le corps de loin le plus massif est le Soleil, mais comme il est aussi extrêmement lumineux, la mesure nécessite l'emploi d'un coronographe, cachant la majeure partie de la lumière du Soleil, ainsi que le contrôle de la température des instruments, soumise à des variations intenses lors de l'éclipse.

Malheureusement pour Eddington, les conditions météorologiques furent très médiocres, avec un temps pluvieux jusqu'à l'éclipse, avant qu'assez miraculeusement une éclaircie ne permette de prendre plusieurs plaques photographiques, avec quelques étoiles brillantes de l'amas des Hyades dans le champ de la photographie.

Revenu en Europe, Eddington annonce, après analyse, une déviation d'environ 1,6 seconde d'arc, à comparer à la prédiction d'Einstein de 1,74 seconde d'arc, et une erreur annoncée de 0,3 seconde d'arc. Au sens moderne, avec un minimum de cinq fois l'erreur pour pouvoir revendiquer un effet raisonnablement certain, les mesures d'Eddington se situent assez bas dans l'échelle des certitudes. De fait, une polémique se développe ensuite afin de déterminer si les mesures étaient vraiment concluantes, d'autant que les mesures de la deuxième équipe qui a effectué ses mesures à Sobral sont jugées non concluantes, avec des plaques photographiques qui ne fournissent pas le résultat attendu et sont écartées sans justification claire...

Ironiquement, le résultat d'Eddington, bénéficiant d'une large publicité, contribue en tout cas à la diffusion des idées d'Einstein dans le grand public, et parmi les scientifiques. Une analyse en aveugle aurait aidé à affermir le résultat et il n'est pas sûr que dans ce cas les deux campagnes de mesures auraient été jugées concluantes[25]. Mais en défense

25. Une ré-analyse récente des clichés qui ont survécu à l'épreuve du temps semble confirmer que le résultat d'Eddington était relativement significatif, mais si on prend en compte que la théorie newtonienne

des expérimentateurs de l'époque, il s'agissait des premières mesures de précision de position d'étoiles au voisinage de l'objet immensément plus lumineux qu'est le Soleil, avec des effets de variation importante de la température, qui baisse notablement au moment de l'éclipse et qui modifie la focalisation de l'image sur les plaques photographiques.

En fait, par manque de chance lors des éclipses totales suivantes, et en raison de la difficulté des mesures optiques au voisinage du Soleil, il faudra attendre plusieurs dizaines d'années avant qu'une mesure réellement déterminante de l'effet de déviation des rayons lumineux ne soit effectuée dans le domaine optique.

Horloges dans un puits gravitationnel

Une vérification plus probante de la théorie d'Einstein fut fournie à partir de la fin des années 1950 par une série d'expériences initiée par Robert Pound et Glen Rebka à l'université Harvard. Le but était de mettre en évidence, dans un premier temps, puis de mesurer précisément, le décalage vers le rouge d'un photon dans un champ gravitationnel. Un photon, ayant une fréquence qui diminue au fur et à mesure qu'il lutte contre le potentiel gravitationnel, peut

---

prédisait elle aussi un effet, deux fois plus faible que l'effet prédit par Einstein, la démonstration expérimentale d'Eddington reste faible. La mesure de déviation ne passe les critères requis à notre époque pour valider une découverte que dans la ré-analyse des clichés pris au Brésil qui avec la mesure de la déviation sur 12 étoiles fournit finalement une analyse plus convaincante que celle des clichés d'Eddington, avec seulement cinq étoiles et une déviation à la limite du marginal!

servir de base de temps pour une horloge, et l'on voit que le temps relatif entre deux horloges de fabrication strictement identique mais situées en deux régions présentant une différence de potentiel gravitationnel va entraîner une désynchronisation progressive des horloges, et cela même si les horloges sont immobiles – c'est-à-dire à distance relative constante – l'une par rapport à l'autre. En particulier, l'horloge qui est au plus profond dans le puits de potentiel gravitationnel prend de l'avance sur la deuxième horloge ou, pour simplifier, « vieillit plus vite ». On peut en voir une illustration, scientifiquement correcte, dans le film *Interstellar* où les astronautes amerrissent sur la surface océanique de la planète de Miller, située avec son étoile si profondément dans le champ gravitationnel du trou noir Gargantua qu'après une heure passée sur cette planète, sept années se sont écoulées sur Terre…

À un niveau infiniment plus faible dans ses effets, mais avec des conséquences bien réelles, on peut noter qu'il est essentiel de prendre en compte cet effet de décalage gravitationnel des horloges des satellites du système GPS, faute de quoi, en quelques secondes, le GPS commet des erreurs de plusieurs mètres, si bien qu'un conducteur utilisant un GPS qui ne prendrait pas en compte les effets de la relativité générale se retrouverait très rapidement dans un mur ou dans un champ au lieu de rester bien sagement sur la route.

Dans l'expérience historique de Pound et Rebka en 1959, la comparaison entre les deux horloges s'effectua sur une hauteur h de 22,5 m dans le bâtiment du laboratoire Jefferson,

la comparaison entre les fréquences d'horloges mettant en jeu des photons gamma de basse énergie (14,4 keV) se propageant entre la cave et le grenier du bâtiment. (Pour les lecteurs curieux du détail du calcul, rendez-vous en fin de chapitre - V.) Pound et Rebka déterminèrent que le décalage de fréquence du photon était en très bon accord avec la prédiction de la relativité générale, avec une précision d'environ 10 % dans cette première version de leur expérience, un test jugé très significatif, et en tout cas nettement plus que les premières expériences de déflexion de rayons lumineux au voisinage du Soleil.

Quelques années plus tard, en 1965, Pound, associé cette fois à Joseph Snider, accrut la précision de l'expérience de Pound et Rebka d'un facteur 10 environ, en améliorant le contrôle de paramètres extérieurs comme la température ou la pression, et en multipliant par près d'un facteur 100 le nombre de photons gamma détectés (mais en restant dans le même bâtiment, de hauteur assez limitée). Avec la précision obtenue, de l'ordre du pourcent, le résultat de Pound et Snider ne laissait clairement plus aucun doute sur le très bon accord entre le ralentissement des horloges prédit par la relativité générale et l'expérience.

Bien que la précision de cette dernière mesure soit déjà impressionnante, dans un autre domaine de longueur d'onde où ils n'utilisaient plus des photons gamma de basse énergie mais un maser à hydrogène à une fréquence de l'ordre de 2 GHz, et donc des photons d'une énergie environ un milliard plus faible, Robert Vessot et Martin Levine, de l'Institut

Smithsonian de Harvard, utilisèrent un vol en « flottement libre » culminant à une altitude d'environ 10 000 kilomètres, qui leur permit de vérifier l'effet de potentiel gravitationnel prédit par la relativité générale avec une précision de 1 pour 10 000 environ, et un nouveau gain d'un facteur 100 de précision. Par rapport à l'expérience de Pound et Rebka décrite plus haut, l'expérience de Vessot et Levine constitue une remarquable performance du fait que les effets de variation du potentiel gravitationnel ne représentent qu'un décalage relatif de fréquence de quatre dix-milliardièmes à l'apogée de la trajectoire de la fusée. Cette première utilisation dans l'espace d'horloges atomiques a ouvert la voie à un grand nombre de mesures de précision, dont nous reparlerons plus tard dans le chapitre consacré à la détection des ondes gravitationnelles.

Universalité de la chute des corps : le principe d'équivalence

Le principe d'équivalence, dont nous avons vu à quel point il est central dans la théorie de la relativité d'Einstein, est généralement exprimé sous la forme que tous les corps suivent la même trajectoire dans un champ gravitationnel, propriété qui reste sans explication dans la gravitation newtonienne. En revanche, dans la relativité d'Einstein, qui se débarrasse en quelque sorte de la notion de force de gravitation pour la remplacer par un mouvement au plus droit[26] dans un

26. Si je n'emploie pas l'expression de « chemin le plus court », c'est parce que la géodésique en question est en fait le chemin *le plus long dans l'espace-temps*, du fait que l'intervalle est déterminé par une *différence*

espace-temps courbe, le principe d'équivalence apparaît extrêmement naturel. Certes, pour permettre à des corps de suivre des trajectoires différentes dans le contexte d'un espace-temps courbe, on peut faire l'hypothèse qu'il existerait des métriques multiples – proposition initialement formulée, dans le cas d'une double métrique, par l'ancien étudiant d'Einstein, Nathan Rosen, que nous retrouverons dans le trou de ver d'Einstein-Rosen, ainsi que dans le « paradoxe » d'Einstein-Podolsky-Rosen. Mais dans le cas de la relativité générale, avec une métrique unique, les corps ne peuvent que suivre tous le même chemin, déterminé par les géodésiques de la métrique de l'espace-temps.

Après les tests de précision limitée réalisés par Galilée, puis par Newton, les premiers tests de grande précision afin de vérifier le principe d'équivalence et l'universalité de la chute des corps sont dus au baron Lorand von Eötvös, physicien hongrois (ou austro-hongrois à l'époque) dans une série d'expériences conduites à la fin des années 1880, et qui se poursuivirent jusqu'en 1909, avec des mesures impliquant un grand nombre de matériaux différents et en différents points de la Terre. L'idée d'Eötvös est d'utiliser le fait que la force que ressent un corps à la surface de la Terre, par exemple quand on le maintient fixe au bout d'un film à plomb, n'est pas due seulement à la force de gravitation terrestre, mais aussi à la force centrifuge due au fait que

---

entre les carrés de la longueur dans l'espace et dans le temps.

la Terre, dans son mouvement de rotation autour de son axe, constitue un référentiel non inertiel. Or, si la force de gravitation qui s'exerce sur un corps est par définition le produit de la masse gravitationnelle de l'objet en question par l'intensité du champ de pesanteur à cet endroit, $m_g \vec{g}$, la force centrifuge dépend, quant à elle, de la masse inertielle, qui mesure, dans une vision newtonienne, l'intensité de la force de résistance d'un corps quand on accélère un corps, $m_i \vec{\gamma}$ où $\vec{\gamma}$ est l'accélération. Et donc, si le rapport de la masse inertielle m_i et la masse gravitationnelle m_g dépend, par exemple, de la composition atomique du corps, on s'attend à des variations dans les forces entre deux objets de composition différente.

Afin de gagner en précision par rapport aux expériences antérieures de Galilée, Newton et Bessel, Eötvös utilisa un pendule de torsion. L'avantage du pendule de torsion est son extrême sensibilité dès lors que le fil de suspension du pendule possède une constante de rappel suffisamment faible[27]. Un effet même minime de différence entre masse inertielle et masse gravitationnelle se verrait donc par exemple lorsque l'on varie l'orientation de l'appareil par rapport à la force centrifuge. Les expériences d'Eötvös publiées en 1890 démontrèrent une proportionnalité entre masse inertielle et masse gravitationnelle, et donc du principe d'équivalence, à la précision de 5×10^{-8} environ,

27. C'est ainsi par exemple que Cavendish mesura la – très faible – force de gravitation entre deux sphères de plomb attachées aux bras d'un pendule de torsion et deux grosses sphères de plomb fixes.

avant qu'une nouvelle série d'expériences n'améliore cette précision d'un facteur 5, soit une précision de 10^{-8} environ.

Il fallut ensuite attendre les années 1960, avec Robert Dicke et ses collaborateurs, à l'université de Princeton, qui utilisèrent un appareil basé sur le même principe qu'Eötvös mais utilisant le Soleil au lieu de la Terre comme système de référence, pour augmenter encore la précision de ce test du principe d'équivalence de près de trois ordres de grandeur, soit une précision d'environ 10^{-11}. Plus récemment, motivés initialement par l'annonce de la découverte d'un possible effet dépendant de la composition qui aurait été caché dans les données d'Eötvös, plusieurs groupes, dont celui d'Eric Adelberger de l'université de Washington – dont l'expérience s'appelle Eöt-Wash en hommage à Eötvös et en référence à l'université de Washington, reproduisirent avec des méthodes d'ingénierie moderne les expériences d'Eötvös et de Dicke, améliorant encore d'environ un facteur 1 000 la précision des expériences de Dicke.

Aucune déviation du principe d'équivalence n'a été détectée dans ces expériences, la plus précise des expériences étant l'expérience Microscope en satellite, qui a annoncé à la fin de l'année 2017 ses premiers résultats et qui profite de l'extrêmement faible niveau de bruit dans l'espace et du fait que l'ensemble du satellite est en « flottement libre[28] ».

28. Le lecteur aura pu remarquer que j'emploie l'expression « flottement libre » plutôt que « chute libre ». Cette expression « flottement libre » (*free float*) est due initialement à John Wheeler, qui souhaitait ainsi lutter contre l'appellation de « chute », qui évoque un événement accidentel,

À l'heure où j'écris ces lignes, après quelques sueurs froides initiales, les expériences de Microscope fournissent déjà une amélioration d'un facteur 10 environ par rapport aux expériences du groupe Eöt-Wash, et la précision ultime de Microscope devrait être de l'ordre de 10^{-16} environ, soit près d'un milliard de fois plus précise que celle des expériences initiales, pourtant déjà remarquables, du baron von Eötvös !

Perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles

De la même façon que des charges accélérées permettent l'émission à grande distance d'énergie électromagnétique, ce qui a conduit à l'utilisation des ondes hertziennes pour la communication, le mouvement de masses accélérées conduit également à l'émission de son correspondant dans le domaine de la gravitation, soit l'émission des ondes gravitationnelles, prévues par Einstein, et à la détection directe desquelles nous consacrerons un chapitre spécifique. Mais si Einstein avait bien prédit l'existence des ondes gravitationnelles, il jugeait pratiquement impossible d'en détecter l'émission en raison de l'extrême faiblesse de la force de gravitation quand elle est comparée aux forces électromagnétiques, par exemple.

Malgré le défi posé par la faiblesse de la force de la gravitation, et bien avant la détection directe de coalescences de trous noirs qui donnèrent lieu en septembre 2015 à la

---

qui dévie de la normale, et insister plutôt sur la notion de mouvement libre, sans force mise en jeu, mise en évidence par le mot « flottement ».

première détection en temps réel d'ondes gravitationnelles, Joseph Taylor, assisté par son étudiant Russel Hulse, tous deux à l'université de Princeton, étudièrent pendant plusieurs années la variation de fréquence du pulsar binaire PSR 1913+16. En effet, après avoir détecté le signal de ce pulsar au moyen de l'antenne d'Arecibo (Puerto Rico), Hulse et Taylor remarquèrent des variations quasi périodiques dans sa période d'émission, variations qui se reproduisaient toutes les 7 heures 3/4 environ. Comme une étoile sur deux environ fait partie d'un système binaire, il devenait naturel de supposer que cette variation régulière était due au fait que le pulsar faisait partie d'un tel système binaire, et orbitait autour d'une étoile compagnon, avec un phénomène analogue à la variation de la fréquence apparente d'une sirène placée sur un manège en rotation pour un observateur sur le sol ferme.

Avec une période orbitale aussi faible, de quelques heures, le pulsar et son étoile compagnon devaient être très proches [29]. Même si cette proximité rend plus aisée la mise en évidence de la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles, la diminution de la période du système étudié par Hulse et Taylor n'est que de 75 microsecondes par an environ. La puissance de freinage par émission d'ondes gravitationnelles pour ce système est très respectable,

---

29. Rappelez-vous la troisième loi de Kepler, T^2/a^3 = constante, reliant le carré de la période au cube du demi-grand axe, et estimez la distance entre le pulsar et son compagnon par comparaison avec la distance Terre-Soleil de 150 millions de kilomètres et sa période d'un an.

environ 7×10^{24} W, soit de l'ordre de 2 % de la puissance émise en rayonnement visible par notre Soleil. L'accord avec la relativité générale est excellent, au niveau du pour mille, et constitue un test très fort de la théorie, couronné par un prix Nobel en 1993.

Le « poids » de l'énergie de liaison, le test de Nordtvedt

Lorentz et Poincaré avaient étudié sous des hypothèses très générales les conséquences des équations de Lorentz, et avaient montré en particulier que toute composante contribuant à l'énergie, par exemple l'énergie E_{em} d'interaction électromagnétique, devait contribuer à la masse inertielle selon la formule $\Delta m = E_{em}/c^2$, s'approchant très près de la formule fameuse attribuée à Einstein $E = mc^2$. Mais qu'en est-il de l'énergie d'interaction *gravitationnelle* ? Comme les équations d'Einstein n'établissent pas de différence selon la forme d'énergie, elles requièrent par construction le respect du principe d'équivalence. Mais les systèmes présentant une importante énergie de liaison gravitationnelle respectent-ils le principe d'équivalence ? Peut-être que la théorie d'Einstein, dont la théorie de Newton était une approximation, n'est elle-même qu'une approximation d'une théorie qui violerait de cette façon le principe d'équivalence, violation qui serait passée inaperçue du fait que pour les corps de notre voisinage l'énergie de liaison gravitationnelle reste faible ? C'est le physicien américain Kenneth Nordtvedt, alors au MIT, qui démontra au milieu des années 1960 que le test du principe d'équivalence en fonction de l'énergie de

liaison constituait un nouveau test de la relativité générale, complémentaire des tests que nous avons décrits plus haut.

Dans les mesures réalisées par Eötvös, puis par Dicke et leurs successeurs, afin de mettre à l'épreuve le principe d'équivalence, la masse des corps utilisés pour les tests est généralement de l'ordre du kilogramme, au plus de quelques tonnes. Dans ces conditions, il est facile de calculer que la fraction d'énergie de liaison gravitationnelle du corps se situe aux alentours de 10^{-25}, voire moins, ce qui veut dire que même si l'énergie de liaison gravitationnelle n'avait aucune contribution à la masse gravitationnelle, il serait pratiquement impossible de s'en rendre compte. En effet, la contribution pour un corps de 1 kilogramme est de l'ordre de quelques dizaines d'atomes au plus, précision totalement inaccessible avec les méthodes actuelles.

Nordtvedt entreprit d'estimer la précision avec laquelle il serait possible de tester le principe d'équivalence pour quelques corps célestes, pour lesquels, en raison de leur masse, l'énergie de liaison gravitationnelle présente une contribution relative à l'énergie totale du corps accessible à la mesure. Pour le Soleil, l'énergie de liaison gravitationnelle représente environ 4 parties par million de l'énergie de masse du Soleil[30]. Mais la difficulté est alors de trouver comment mesurer une variation d'orbite étant donné que la masse du Soleil est très prédominante dans le Système solaire et

30. Estimée selon la formule $E = mc^2$, avec la masse du Soleil $m \sim 2 \times 10^{30}$ kg.

que la mesure d'une distance très précise entre la Terre et la surface du Soleil est extrêmement difficile, pour ne pas dire impossible, la notion de surface du Soleil étant mal définie, comme l'indique assez joliment le film *Sunshine*.

En fait, curieusement, le système le plus à même de tester l'effet Nordtvedt est la Lune, car bien que sa masse soit relativement faible – un peu plus de 1% de la masse de la Terre – et que son énergie de liaison gravitationnelle soit relativement faible – environ 2×10^{-11} de son énergie de masse –, la distance Terre-Lune peut être mesurée avec une précision telle que le test sur la trajectoire de la Lune représente aujourd'hui le test le plus contraignant de l'effet Nordtvedt. Ce sont les missions Apollo qui, en permettant de déposer sur la surface de la Lune les premiers réflecteurs laser, complétés ensuite par des réflecteurs plus efficaces, permirent de mesurer la distance Terre-Lune avec une précision de quelques millimètres. Si les toutes premières mesures furent, en dépit de la publicité qui leur fut apportée, un échec, aujourd'hui c'est plus de 20 000 mesures qui ont été effectuées depuis la première tentative réalisée en 1969 : en vérifiant l'absence de distorsion mesurable dans l'orbite de la Lune autour de la Terre, d'une part, et en prenant compte également les effets de marée du Soleil sur Lune et Terre, d'autre part, les expériences de mesure de distance Terre-Lune impliquent que l'énergie de liaison gravitationnelle U ne dévie pas plus de un pour mille de la prédiction de la relativité générale.

La relativité générale est-elle parfois mise en défaut ?

Comme nous l'avons vu, la relativité générale a jusqu'ici passé haut la main pratiquement tous les tests qui lui ont été soumis. On peut penser à deux endroits où le succès ne semblait pas au rendez-vous : le premier concerne l'anomalie des trajectoires des satellites *Pioneer 10* et *11* dont les trajectoires ont été suivies et analysées pendant trente ans environ et sur un parcours de plus de trois milliards de kilomètres, du lancement de ces satellites en 1972 et 1973 jusqu'à l'arrêt de la communication avec eux en 2003. L'analyse de la trajectoire des deux satellites nécessite un grand nombre de corrections car, même si elles sont faibles, plusieurs forces viennent s'ajouter à la gravitation, notamment l'influence du vent solaire, de l'adsorption et du dégazage de la surface du satellite, avec des inhomogénéités de température assez fortes entre la face éclairée par le Soleil et celle qui ne l'est pas.

À l'issue de ces corrections, l'analyse fit apparaître une très faible accélération résiduelle, comme si la force de gravitation était plus faible d'environ 8×10^{-10} m/s^2, soit environ un dix-milliardième de l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre, avec un effet à peu près constant, au moins dès que les satellites eurent dépassé Saturne. Cette valeur semblait pouvoir indiquer une origine cosmologique du fait qu'elle est proche de la grandeur proportionnelle à une accélération que l'on peut construire à partir de la

constante de Hubble[31] et de la vitesse de la lumière, soit :

$$cH_0 \approx 69 \text{ km/s/Mpc} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Cette grandeur accélération cH_0 vaut donc environ $6{,}9 \times 10^{-10}$ m/s^2 et est curieusement proche de la valeur de l'accélération qui intervient dans la théorie de MOND (Modified Newtonian Dynamics), dont nous reparlons ci-dessous, et qui propose de se débarrasser de la matière noire galactique au moyen d'une modification des lois de la gravitation.

Aujourd'hui, il est communément admis que l'on a trouvé l'explication de l'effet Pioneer à travers l'effet résultant de la chaleur émise, de façon anisotrope, par le petit réacteur au plutonium d'une puissance de 2 kW environ qui entraîne un effet de propulsion en raison du gaz résiduel au voisinage du satellite, qui repart « boosté » par le surcroît de température apporté par le réacteur – sorte d'effet de réaction induit par le chauffage du gaz sur le satellite. Il faut cependant

---

31. Il est facile de vérifier numériquement, un mégaparsec étant égal à environ 3×10^{22} m, que H_0, dont il est utile de se rappeler qu'il est de l'ordre de grandeur de l'inverse de l'âge de l'Univers, vaut environ $2{,}3 \times 10^{-18}$ s^{-1}. Il existe au moment où j'écris ce livre une certaine tension sur la valeur de la « constante » de Hubble H_0 selon la méthode avec laquelle on la mesure. Selon que l'on détermine la constante de Hubble via les mesures de Planck et le fond diffus cosmologique, ou à travers les mesures des temps de retard des images multiples de quasars grâce au télescope spatial Hubble, il existe une tension persistante entre les deux méthodes (ainsi que d'autres méthodes impliquant les structures). Même si ce choix peut s'avérer discutable, j'ai choisi pour la constante de Hubble une sorte de valeur moyenne, les deux valeurs extrêmes n'étant en tout état de cause pas très différentes, différant seulement de quelques pourcents.

noter que les deux physiciens qui ont étudié pendant plus de dix ans cet effet, John Anderson de Jet Propulsion Lab et Michael Martin Nieto de Los Alamos, s'ils reconnaissent que l'hypothèse thermique constitue une explication probable, ne considèrent pas qu'une réelle démonstration a été apportée d'une *absence d'une accélération anormale.*

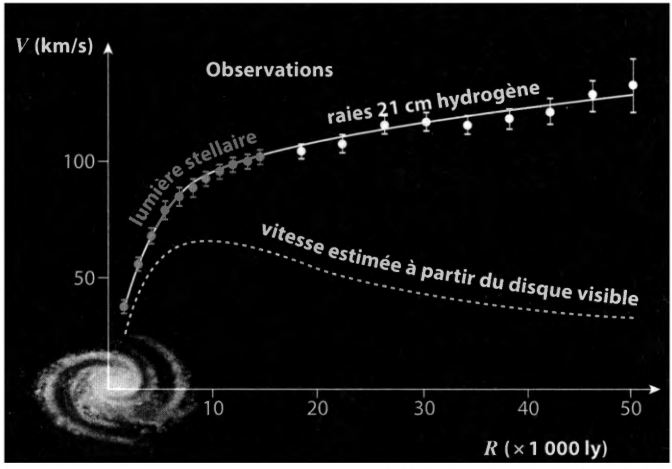
Le deuxième domaine où la relativité générale pourrait avoir été mise en défaut concerne l'application des lois de la gravitation dans le domaine des champs faibles, voire extrêmement faibles, dans les zones périphériques des galaxies, où les accélérations mises en jeu sont de l'ordre ou inférieures à 10^{-10} m/s^2, soit un cent-milliardième de la gravité terrestre, et dans les amas de galaxies.

Pour comprendre cette problématique, aujourd'hui encore non résolue, il faut se rappeler que, dès 1933, Fritz Zwicky avait remarqué que les galaxies dans l'amas de Coma présentaient des vitesses nettement trop grandes par rapport aux vitesses de satellisation que l'on s'attend à trouver en estimant la masse totale de l'amas via sa luminosité, avec des vitesses qui auraient dû conduire depuis longtemps à la dispersion de l'amas. La différence mesurée par Zwicky est énorme car le déficit de masse par rapport à la vitesse de satellisation, calculée en appliquant les lois de Newton, excède un facteur 100. Donc soit les lois de Newton ne s'appliquent pas à l'échelle des clusters de galaxies, soit une fraction énorme de matière échappe à nos mesures.

Tombée dans l'oubli pendant près de quarante ans, la problématique de la matière noire galactique mise en

évidence de manière géniale par Zwicky va resurgir dans les années 1970 lorsque les mesures de vitesse de rotation galactique vont s'affiner et le problème se révéler très général, pour pratiquement toutes les galaxies (figure).

À la fin des années 1980, trois grands programmes observationnels, EROS, MACHO et OGLE, vont tenter de déterminer si des MACHOs (l'acronyme de Massive Compact Halo Objects), des étoiles avortées ou très peu



L'énigme de la matière cachée de l'Univers, la matière ordinaire n'apparaissant représenter que 4 % environ de l'énergie présente dans l'Univers, pourrait en fait signaler une modification des lois de la gravitation dans le domaine des faibles accélérations, comme celles qui sont rencontrées dans les zones externes des galaxies, ce que propose la théorie MOND (Modified Newtonian Dynamics). Sur la figure ci-dessus, on a représenté la vitesse des bras de la Galaxie en fonction de la distance au centre de la Galaxie, comparée à la vitesse attendue si l'on prend en compte la masse visible dans les galaxies. La différence est très importante et se retrouve dans pratiquement toutes les galaxies où il a été possible de réaliser ce type de mesures.

lumineuses, sortes de gros Jupiters, pourraient constituer la masse manquante dans la Galaxie, ce qui permettrait d'expliquer leurs courbes de rotation sans avoir à modifier les lois de la gravitation. Après une quinzaine d'années d'efforts et l'observation de millions d'étoiles des deux nuages de Magellan, le couperet est tombé en 2006 : la matière noire sous forme de Jupiters ne peut pas représenter plus de quelques pourcents de la masse invisible.

Mais dès 1983, Mordehai Milgrom, alors à l'université de Princeton, avait proposé une tout autre explication en lançant l'hypothèse de MOND (Modified Newtonian Dynamics) que je citais plus haut : selon Milgrom, les vitesses de rotation galactique n'ont rien à voir avec une hypothétique matière noire invisible, mais au fait que nous n'avons jamais testé la gravitation dans le domaine des très faibles accélérations, et que c'est pour cette raison, totalement différente de la problématique d'une masse cachée, que les lois classiques de la gravitation conduisent à la prédiction de vitesses erronées. Plus précisément, Milgrom propose qu'au lieu de la forme de Newton :

$$\vec{F} = m\vec{\gamma},$$

on a une équation de la forme :

$$F = m\gamma\, \mu(\gamma/\gamma_0)$$

où F représente la force de gravitation, γ est l'accélération, γ_0 est une constante et la fonction $\mu(x)$ a les propriétés suivantes :

– elle tend vers 1 lorsque x est grand devant 1 (c'est-à-dire lorsque l'accélération est grande devant γ_0), ce qui permet

de retrouver la force newtonienne au-delà d'un certain seuil d'accélération γ_0;
– et elle est approximativement proportionnelle à l'accélération lorsque celle-ci devient plus faible que le seuil γ_0.

L'approche par Milgrom de MOND est très phénoménologique, et la constante γ_0 est simplement ajustée aux données de rotation des galaxies, sans justification fondamentale. Par ajustement aux courbes de rotation galactique, Milgrom propose la valeur de $1{,}2\ 10^{-10}\ m/s^2$, cent milliards de fois plus faible que l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre. Le statut de la loi proposée pour MOND reste à établir, même si elle semble avoir un pouvoir de description des courbes de rotation extrêmement efficace. Il faut noter également que si elle semble marcher très bien à l'échelle galactique l'accord apparaît nettement moins bon à l'échelle des groupes de galaxies.

Quand on a une accélération, on a aussi un horizon. Cette notion d'horizon, surprenante initialement, est due au fait que, si on accélère de façon constante avec une accélération g, même un photon, comme le lièvre de la fable, ne pourra jamais vous rattraper s'il a plus de c^2/g – qui est une distance – de retard sur vous. Milgrom note la coïncidence fascinante, dont on ne sait comment l'interpréter, que pour $g = 1{,}2 \times 10^{-10}\ m/s^2$, la distance à l'horizon est de l'ordre de la longueur parcourue par la lumière depuis le Big Bang, ce qui laisse imaginer, idée que nous retrouverons, que la gravitation pourrait n'être qu'un effet de conditions aux limites plutôt qu'une véritable interaction. À la fin de ce chapitre, dans

l'appendice « La relativité générale est-elle parfois mise en défaut ? », nous mettons d'ailleurs en évidence une violation, certes faible dans la plupart des situations mais néanmoins très réelle, du principe d'équivalence qui donne un exemple d'influence de ce que peuvent être ces conditions aux limites (rendez-vous à la fin du chapitre - VI pour en savoir plus).

En poursuivant cette réflexion sur les régimes où les lois de la relativité générale pourraient être modifiées, on peut s'inspirer de l'exemple de l'électromagnétisme, dont les lois ont conduit à la découverte de l'invariance de Lorentz, à la base de la relativité d'Einstein. Ces lois, bien que très fondamentales, sont modifiées par le milieu environnant, qui peut être un milieu diélectrique, ou même le vide dans le cas de champs très intenses, pour donner ce que l'on appelle les « équations de Maxwell dans la matière » (ou dans le vide polarisé dans le cas des champs intenses) : si les lois de Maxwell restent fondamentalement les mêmes, leur expression est modifiée par les charges du milieu environnant neutre ou dans le vide (également neutre).

Ceci m'amène à parler du travail réalisé par les théoriciens français Luc Blanchet et Alexandre Le Tiec, de l'Institut astrophysique de Paris, qui ont noté, par analogie avec les équations de Maxwell dans un milieu diélectrique, que si un milieu est digravitationnel, c'est-à-dire contient des dipôles de masse positive et négative qui se polarisent sous l'action d'un champ gravitationnel, la modification qui en résulte des lois de Newton ou de la relativité générale va, dans le régime des faibles champs, avoir le comportement de la théorie de MOND,

ce qui permettrait de fournir une explication microscopique à cette théorie initialement purement phénoménologique.

En fait, la gravité étant une interaction très faible devant les autres interactions, comme l'interaction électromagnétique, la densité du milieu gravitationnel dipolaire – d'où l'appellation de « milieu digravitationnel » – imaginé par Blanchet et Le Tiec doit être énorme (environ 10^{42} dipôles par mètre cube) pour reproduire la loi de MOND. Mais comment justifier, si le principe d'équivalence au cœur de la relativité générale est vérifié, qu'il puisse exister un milieu digravitationnel, qui se polarise et se distend sous l'effet d'un champ gravitationnel ? Comme nous le verrons par la suite, et notamment dans le chapitre consacré à l'univers de Dirac-Milne, qui comporte autant de matière que d'antimatière et où les particules d'antimatière possèdent une masse gravitationnelle négative, l'expression du principe d'équivalence est violemment modifiée dès lors que l'on considère un système lié mettant en jeu deux particules, l'une de masse positive, l'autre de masse négative.

En particulier, exactement comme l'imaginaient Blanchet et Le Tiec, la théorie de la relativité générale, contrairement à l'intuition, prédit que deux particules de masses égales en valeur absolue mais de signe opposé *lévitent* dans un champ gravitationnel dès qu'elles sont liées entre elles, comme ce pourrait être le cas par exemple dans un positronium, atome exotique constitué d'un électron et d'un positron, si on fait l'hypothèse – non conventionnelle mais peut-être vérifiée par la Nature – que le positron possède une masse gravitationnelle

négative opposée à celle de l'électron. Notez que si on éloigne suffisamment ces deux particules chargées et qu'on parvient à annuler leur interaction – il faut plus d'une dizaine de mètres pour cela, tant la gravité est faible –, elles tombent alors toutes deux en respectant le principe d'équivalence comme on l'attend de n'importe quel corps ! Nous reviendrons sur ce comportement apparemment paradoxal par la suite.

Ce qu'il faut retenir

Einstein a développé deux théories successives de la relativité : dans la relativité restreinte, la notion fondamentale introduite par Einstein est l'invariance de la vitesse de la lumière, qui conduit à abolir la séparation stricte entre l'espace et le temps absolus conjecturés par Newton, au profit de l'introduction d'un espace-temps à quatre dimensions dont les changements de coordonnées entre référentiels galiléens sont régis par les transformations de Lorentz (qui laissent inchangée la forme des équations de Maxwell de l'électromagnétisme).

L'espace-temps plat de la relativité restreinte ne permettant pas de traiter la gravitation, il fallut ensuite dix ans à Einstein pour incorporer celle-ci dans un formalisme relativiste : la gravitation apparaît alors comme la courbure de l'espace-temps, et les trajectoires des objets sont définies comme des géodésiques sur cet espace-temps courbe, trajets curieusement les plus *longs* possible dans l'espace-temps

(la longueur d'un trajet dans l'espace-temps étant définie à partir de la différence du carré de la longueur dans l'espace et du carré de la longueur dans le temps).

Les vérifications expérimentales de la relativité générale sont nombreuses, et incluent l'effet du potentiel gravitationnel sur la fréquence d'une horloge, la déviation des rayons lumineux au voisinage de corps massifs comme le Soleil, l'universalité de la chute des corps et le respect du principe d'équivalence par l'énergie de liaison, ainsi que la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles. L'accord avec les prédictions de la relativité générale est excellent et plusieurs tests ont une précision supérieure à un pour mille.

Nous étudierons dans les chapitres suivants, en raison de leur importance dans la théorie de la relativité générale, les propriétés des trous noirs, qui possèdent une zone de non-retour à laquelle même la lumière ne peut échapper, ainsi que celles des trous de ver, structures hypothétiques qui seraient au contraire traversables, comme le propose le scénario d'*Interstellar*, la détection directe des ondes gravitationnelles, réalisée à la fin de l'année 2015, ainsi que le lien très surprenant entre gravitation et information qui est apparu en analysant l'analogie entre gravitation et thermodynamique dans ce qu'il est convenu d'appeler les « lois de la thermodynamique des trous noirs ». Nous aborderons ensuite la question encore non résolue de la quantification de la relativité générale, que nous étudierons principalement à travers la théorie des cordes.

Pour en savoir encore plus

L'expérience de Michelson et Morley, et la mort de l'éther

I - Du fait que l'on compare la vitesse de la lumière dans un aller-retour, il faut noter que l'effet d'une dépendance de la vitesse de la lumière c en fonction de la vitesse locale v par rapport à l'éther n'est pas un effet linéaire proportionnel à la vitesse, soit un effet en v/c, mais est nécessairement du *second ordre* en la vitesse v, beaucoup plus difficile à mesurer pour des vitesses faibles devant la vitesse de la lumière, soit en v^2/c^2: en effet, on s'attendait à ce que le temps d'un aller-retour de la lumière soit:

$$\frac{D}{c-v}+\frac{D}{c+v}$$

pour un trajet parallèlement à la marche de l'éther, alors que l'on s'attendait qu'il soit de:

$$\frac{2D}{\sqrt{c^2-v^2}}$$

pour un mouvement perpendiculaire à la vitesse de l'éther. Ces deux temps ne diffèrent l'un et l'autre que de termes d'ordre v^2/c^2 (et donc pas v/c, qui aurait été beaucoup plus aisé à mesurer) du temps $2D/c$ pour un trajet réalisé uniformément à la vitesse c.

C'est pour cette raison que Michelson et Morley avaient choisi un dispositif interférométrique qui leur donnait la possibilité de mesurer une différence de parcours extrêmement faible, correspondant à une fraction de longueur d'onde – inférieure au micron – de la lumière utilisée dans le dispositif.

La théorie de la relativité, ou la théorie de l'invariance?

II - Si le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley va contribuer à l'abandon pendant plusieurs dizaines d'années de la notion d'éther, ironiquement on revient aujourd'hui, au moins d'une façon limitée, à un vide qui est un milieu doté de propriétés, assez

analogue à un superfluide qui n'oppose aucun frottement à un corps qui le traverse, et ce milieu «vide» n'est pas sans ressembler à l'éther. Dans la description du modèle cosmologique standard, nous verrons en effet qu'il est possible de mesurer la vitesse d'un observateur par rapport au référentiel privilégié défini par le fond diffus cosmologique, le bruit de fond de micro-ondes, aujourd'hui à une température d'environ 2,7 kelvins, vestige de l'époque où l'Univers était aussi chaud qu'une étoile. Notons dès à présent que même si l'Univers avait une température nulle, on pourrait également percevoir que le vide est un milieu à travers l'effet Unruh, dont nous reparlerons par la suite, et qui prédit qu'un objet accéléré mesure une température non nulle, proportionnelle à son accélération. Même s'il n'est pas question de revenir à la notion d'éther défendue au XIXe siècle, il est intéressant de noter l'aller-retour depuis la notion de milieu portant les ondes lumineuses de Huyghens, suivie de la contradiction d'une certaine vision de l'éther par l'expérience de Michelson-Morley, et, de façon plus récente, un retour vers le milieu du vide avec l'effet Hawking d'évaporation du «vide» autour des trous noirs, et son analogue l'effet Unruh dans un espace-temps plat.

Sommes-nous sûrs de l'existence du Big Bang ?

III - Nous avons indiqué plus haut que la loi de Hubble exprimant la vitesse de récession en fonction de la distance s'exprimait usuellement sous la forme $v = H_0\, d$, où H_0 est la «constante» de Hubble, qui vaut environ 70 km/s/Mpc. Le lecteur attentif aura noté qu'à distance suffisante – calculez cette distance aujourd'hui, comment s'exprime-t-elle en fonction de H_0 et de c, la vitesse de la lumière ? – il est possible dans la loi de Hubble de dépasser pour v la vitesse de la lumière.

Quelle peut être la signification de telles vitesses supraluminiques ? La relativité d'Einstein ne nous enseigne-t-elle pas en effet qu'il est impossible de dépasser la vitesse de la

lumière ? La réponse à ces questions est simple : la loi de Hubble peut être considérée comme valide même pour ces vitesses, et si la vitesse de récession d'une région dépasse la vitesse de la lumière par rapport à nous, cela signale que ces régions ne sont pas encore visibles ou, dans le cas considéré actuellement d'une expansion accélérée, sont devenues invisibles et ne pourront désormais plus communiquer avec nous.

Décalage du périhélie de Mercure

IV - Un calcul assez simple peut permettre de comprendre pour quelle raison le décalage du périhélie de Mercure présente cette valeur. Pour cela, il nous faut quelques données numériques : nous avons déjà cité la distance moyenne de Mercure au Soleil, a ≈ 58 millions de kilomètres, même si la trajectoire est évidemment elliptique, avec une distance minimale de 46 millions de kilomètres environ (et maximale d'environ 70 millions de kilomètres). La période de révolution autour du Soleil peut se déduire de la troisième loi de Kepler T^2/a^3 reliant le carré de la période de révolution au cube du demi-grand axe a, soit 88 jours – faites le calcul en partant de la période d'environ 365 jours de la Terre, située à environ 150 millions de kilomètres du Soleil. Ce qui veut dire que Mercure fait environ 415 révolutions par siècle.

Reprenons maintenant la figure de la page 75, décrivant la trajectoire de Mercure autour du Soleil comme une hélice dans un espace-temps courbe. Nous verrons dans le chapitre consacré aux trous noirs que le rayon de Schwarschild du Soleil, qui correspondrait à l'endroit où, si elle était un trou noir, notre étoile piégerait toute la lumière, est d'environ 3 kilomètres. Le rapport entre ces 3 kilomètres et la distance moyenne de Mercure au Soleil est d'environ :

3 kilomètres/58 millions de kilomètres

soit environ 1 sur 20 millions. On peut donc s'attendre à ce que l'angle de décalage sur cette géométrie courbe autour du Soleil

soit de 1 tour tous les 20 millions de révolutions, ce que Mercure effectue en un peu moins de cinq millions d'années. C'est tout à fait l'ordre de grandeur de la valeur que Le Verrier avait trouvée comme temps de rotation anormale du périhélie de Mercure (trois millions d'années), et la formule exacte d'Einstein constituait une explication très naturelle du décalage découvert par Le Verrier sur le périhélie de Mercure.

Horloges dans un puits gravitationnel

V - Sur cette distance, le parcours du photon prend un temps h/c, soit 75 nanosecondes environ. Si un calcul relativiste avec la métrique de Schwarzschild est en principe nécessaire, un raisonnement basé sur le principe d'équivalence donne une précision largement suffisante et nous reprendrons donc ici le raisonnement qu'Einstein avait développé avec son ascenseur en chute libre, où un observateur utilisant un tel ascenseur doit mesurer une fréquence constante pour les photons, que ce soit à la cave ou au grenier. La vitesse nécessaire pour compenser le décalage et la diminution de fréquence après un trajet de hauteur h est :

$$v = gh/c$$

ce qui n'est rien d'autre que la vitesse acquise par un observateur en chute libre pendant le temps de chute du photon entre la cave et le grenier, 75 nanosecondes, et où g est la valeur du champ de gravitation – environ 9,8 m/s² à la surface de la Terre –, h = 22,5 m est la hauteur dans l'expérience de Pound et Rebka, et $c \approx 3 \times 10^8$ m/s est la vitesse de la lumière.

Un calcul numérique simple montre que la vitesse v en question est approximativement égale à $7{,}35 \times 10^{-7}$ m/s, vitesse extrêmement faible qu'il semblait initialement très difficile de mesurer. L'idée de Pound et Rebka fut d'utiliser l'effet Mössbauer, où un photon gamma peut être émis ou absorbé pratiquement sans recul par le noyau qui l'a émis s'il fait partie d'un cristal, qui dans ce cas peut

reculer globalement, sans perte d'énergie de recul ou presque pour le photon. L'absorption et l'émission de ces photons gamma est résonnante, ce qui signifie que dès que l'on change un tout petit peu la vitesse de l'émetteur ou du récepteur de rayons gamma on change fortement la probabilité de réabsorption du photon gamma.

La relativité générale est-elle parfois mise en défaut ?

VI- En relativité générale, seul en principe le tenseur de Riemann, qui mesure les effets de marées gravitationnelles, est accessible à des mesures (quasi) locales, par exemple en mesurant la déformation d'une petite goutte de liquide initialement sphérique, qui va prendre une forme d'ellipsoïde dans un champ de gravitation, cet ellipsoïde étant d'autant plus allongé ou oblong que le champ est fort. Dans la théorie classique de la relativité générale – on verra dans quelques instants pour quelles raisons je précise ce point –, le vecteur g d'accélération de la pesanteur, qui vaut environ 9,8 m/s^2 à la surface de la Terre, n'est mesurable que parce qu'en restant immobiles à la surface de la Terre nous avons vu que nous ne sommes pas en flottement libre, comme dans l'ascenseur en chute libre cher à Einstein, mais accélérés car retenus immobiles par la surface de la Terre ! Il n'est donc pas immédiatement apparent de voir sous quelle forme il est possible de faire apparaître et de mesurer l'intensité du champ de gravitation g comme le propose Milgrom, pour des étoiles qui ont un mouvement libre dans la Galaxie – rappelons-nous que dans la relativité générale, il n'y a pas à proprement parler de force de la gravitation, mais simplement le mouvement le plus « droit » dans un espace-temps courbe. De la même façon, le potentiel gravitationnel $U(\vec{r})$ n'est pas mesurable localement, et on ne peut généralement parler que de différence de potentiel entre deux points, mais pas du potentiel absolu en un point.

Mais alors qu'en relativité générale, le champ g n'est pas accessible directement pour des objets en orbite libre – par opposition par exemple aux atomes de la Terre, qui peuvent rester immobiles les

uns par rapport aux autres en raison des forces électromagnétiques qui s'opposent à la force de la gravitation –, le champ g redevient mesurable localement à travers les effets quantiques. C'est le cas par exemple dans le mécanisme très surprenant, que nous avons déjà cité et que nous reverrons par la suite, découvert en 1974 par Stephen Hawking, de l'évaporation des trous noirs où la température du rayonnement émis est proportionnelle à la gravité g selon la formule :

$$T = \hbar g / 2\pi k_B c$$

où $\hbar$ est la constante de Planck, g est l'intensité du champ de pesanteur, k_B est la constante de Boltzmann et c est la vitesse de la lumière. Si cet effet est généralement très faible, il est néanmoins mesurable en principe et permet d'accéder localement à la valeur du champ g.

Même dans le cas d'un espace-temps plat, l'effet Unruh, en référence au physicien William Unruh de l'université de British Columbia qui l'a mis en évidence en 1976, décrit le fait qu'un observateur qui subit une accélération g mesure lui aussi, avec la même formule que dans le cas des trous noirs, une température non nulle proportionnelle à son accélération, qui est donc une mesure de celle-ci.

On peut noter que la théorie standard accepte par ce petit effet quantique une violation du principe d'équivalence : en effet, il devient possible de déterminer par l'effet Unruh si l'on est ou pas dans un ascenseur d'Einstein accélérant dans un espace-temps plat – auquel cas on mesure une température non nulle proportionnelle à g –, ou si au contraire on est accéléré avec la même accélération g en restant immobile à la surface de la Terre dans un champ de gravitation d'intensité g – et donc dans un espace-temps courbe –, auquel cas la température est supposée être nulle. Mais si la source de gravitation n'est plus une étoile ou une planète mais un trou noir, les théoriciens prédisent que la température redevient non nulle,

avec la même formule que l'effet Unruh… Ce comportement très bizarre laisse entendre que le traitement actuel des effets quantiques n'est pas cohérent, d'une façon qui reste à découvrir.

LES TROUS NOIRS EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Une étoile qui piège sa propre lumière...

Dès la fin du XVIIe siècle, l'astronome danois Ole Römer avait, en étudiant le mouvement du satellite Io de Jupiter, réalisé la première estimation de la vitesse de la lumière : 225 000 km/s environ. Nous savons aujourd'hui que sa vitesse réelle est très proche de 300 000 km/s, mais il faut noter la performance que Römer aurait trouvé à moins d'1 % près la bonne valeur si l'échelle des distances et la valeur de l'unité astronomique de l'époque avaient été correctes. Les distances et les masses des objets dans le Système solaire se précisant au cours du siècle qui suivit, le physicien anglais John Mitchell et le mathématicien français Pierre-Simon de Laplace estimèrent de façon indépendante la masse d'un objet massif de la taille du Soleil à l'attraction duquel même la lumière ne parviendrait pas à s'échapper, l'objet devenant donc un véritable trou noir. Il s'agit bien sûr là d'un calcul newtonien, mais l'estimation de ces deux scientifiques fournit, dès la seconde moitié du XVIIIe siècle, les premiers

éléments quantitatifs sur ce que pourrait être un trou noir – ne laissant même pas échapper sa propre lumière.

Le point fondamental du raisonnement de Mitchell et de Laplace est qu'en partant d'un objet de densité très standard, comme le Soleil qui a une densité moyenne égale à environ deux fois la densité de l'eau, on va parvenir à un objet qui piège même sa propre lumière dès lors que son diamètre est environ cinq cents fois plus grand que la taille du Soleil lui-même. En effet, la vitesse de libération depuis la surface de notre Soleil, d'un rayon d'environ 700 000 kilomètres, est d'environ 600 km/s, et la vitesse de libération d'un petit corps de masse m est donnée par la formule exprimant l'égalité entre son énergie cinétique $1/2\ mv^2$ et l'énergie potentielle gravitationnelle à la distance r du corps massif de masse M envisagé par Mitchell, $G\ mM/r$. Comme la masse, pour une densité donnée, est proportionnelle au cube du rayon, un calcul simple montre qu'il faut augmenter d'un facteur 500 le rayon du corps céleste, les autres paramètres étant constants par ailleurs, pour parvenir à une vitesse de libération égale à 300 000 km/s, la vitesse de la lumière.

Même si nous verrons que le raisonnement de Mitchell doit être quelque peu modifié pour être en accord avec la relativité d'Einstein, ce qui modifiera quelque peu la vitesse de libération appliquée à la lumière, il n'en reste pas moins que la connaissance de la valeur de la vitesse de la lumière, de la masse et du rayon du Soleil, permet d'estimer les caractéristiques des astres très massifs ou très

denses qui pourraient piéger la lumière et être de ce fait des astres sombres. Dans la mesure où l'astre n'émettrait plus de lumière, Mitchell s'était posé la question de la détection de tels astres sombres, concluant que ce serait probablement grâce aux modifications induites sur les trajectoires de leurs éventuels compagnons qu'il serait possible de les détecter.

Dans le cadre de la relativité générale, c'est Karl Schwarzschild qui, dès 1916, en pleine Première Guerre mondiale, découvre la solution exacte des équations d'Einstein qui représente un trou noir sans rotation. Mais il faudra attendre plusieurs dizaines d'années, et le travail de David Finkelstein, pour que les propriétés de cette solution, qui décrit un piège sans retour une fois passé l'horizon, soient pleinement comprises[1].

Pendant longtemps, on parlera donc de la traversée de la frontière $r = r_s$ comme la « singularité de Schwarzschild » alors que cette frontière est simplement la limite d'une

1. En effet, l'expression de la métrique, qui sert à paver la géométrie trouvée par Schwarzschild :
$ds^2 = (1 - r_s/r)c^2\,dt^2 - dr^2/(1 - r_s/r) - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\,d\varphi^2$
qui diffère de la géométrie de Minkowski par les deux termes en $(1 - r_s/r)$ et son inverse, et semble donc contenir des éléments singuliers et divergents à la fois lorsque la coordonnée r tend vers 0 – à chaque fois que l'on a un facteur en $1/r$ – ce qui va se révéler une vraie singularité où tout observateur va être écartelé, mais aussi lorsque l'observateur traverse ce que l'on appellera bientôt le « rayon de Schwarzschild » r_s car dans ce cas le facteur $(1 - r_s/r)$ s'annule, si bien que la contribution du terme de temps en dt s'annule, alors que celle en distance radiale dr devient infinie.

région dont nous pensons aujourd'hui qu'elle n'est pas singulière a priori[2].

En revanche, la singularité « centrale » (bien que parler de « centre » soit un abus de langage) en $r = 0$ correspond à une divergence des effets de marée, aux tensions qui s'exercent sur l'imprudent qui s'en est approché et qui sont mesurées par le tenseur de Riemann, avec une force infinie du champ gravitationnel[3] (et voir également à la fin de ce chapitre - I).

Einstein lui-même ne croyait semble-t-il pas à la notion de trou noir, cette appellation moderne étant d'ailleurs bien plus tardive et due au physicien John Wheeler qui l'employa pour la première fois dans une conférence de l'American Physical Society au cours des années 1960. Einstein semble en particulier avoir été extrêmement réticent à l'hypothèse d'une densité infinie et d'une singularité du champ de gravitation, car il estimait que « la matière ne peut être concentrée arbitrairement ».

---

2. Cette affirmation doit être tempérée par la discussion récente, initiée par Polchinski et son groupe en 2012, sur le « paradoxe du mur de feu » (*firewall paradox* dans la littérature anglo-saxonne) qui signerait la traversée catastrophique de l'horizon du trou noir. Comme nous le verrons dans le chapitre consacré aux liens entre gravité et information, la solution à ce « paradoxe » n'est pas encore connue.

3. En fait, comme le montrera David Finkelstein à la fin des années 1950, la première divergence qui apparaît dans les coordonnées en $r = r_s$ ne semble pas une véritable singularité, constituant plutôt la description de la façon dont un observateur à l'infini perd le contact avec un observateur capturé par le trou noir, sans nécessairement que l'observateur capturé en question détecte lui-même une modification majeure dans sa communication avec l'extérieur.

Or, au cours des années 1960, Roger Penrose démontra, sous des conditions apparemment très générales, qu'une singularité devient inévitable dans le futur dès lors qu'une quantité suffisante de matière était rassemblée dans une zone suffisamment restreinte. Comme nous le verrons plus loin dans le cas des trous noirs supermassifs, tels ceux qui semblent exister au cœur de pratiquement toutes les galaxies, la densité moyenne en question peut être tout à fait ordinaire, de l'ordre de celle de l'eau, pour un trou noir de quelques millions de masses solaires : pas besoin d'apporter de la matière exotique ou déjà très compressée pour fabriquer un trou noir ! Et donc, si une civilisation avancée décidait de fabriquer un tel trou noir en rassemblant dans la même zone étendue un nombre suffisant d'étoiles, ou même des corps froids comme des comètes ou des planètes, la relativité d'Einstein prédit que la formation d'un trou noir est *absolument inéluctable* dès lors que la masse concentrée dans une certaine zone dépasse la masse qui apparaît dans la formule de Schwarzschild : pas moyen de changer d'avis, l'effondrement et la formation d'une singularité doivent se produire selon la relativité générale dès lors que cette masse limite a été rassemblée (rendez-vous à la fin de ce chapitre pour en savoir plus – II).

Trous noirs de Schwarzschild et de Kerr, deux « familles » pleines de surprises

Comme on l'a dit, Einstein répugnait à l'idée de singularité et à la notion de champ gravitationnel infini. Derrière

Einstein, pendant plusieurs dizaines d'années, la notion de singularité, associée à une densité et à des effets de distorsion infinis, fut âprement discutée et critiquée, l'appellation aujourd'hui évidente de Big Bang étant due initialement à Fred Hoyle, qui pensait ridiculiser ainsi l'idée d'une déflagration initiale. Comme les théorèmes de Penrose semblaient indiquer qu'une singularité qui se situe dans le futur d'un observateur, au moins dans le cadre de la relativité générale, était inéluctable dès lors que l'on respectait la positivité de l'énergie, les physiciens se replièrent sur une stratégie de défense consistant à dire que peut-être effectivement les singularités existaient-elles, mais qu'elles devaient pudiquement être cachées à l'observation de tout observateur extérieur, derrière un « horizon des événements ». C'est ce que Penrose appela la « conjecture de protection cosmologique » – *cosmic censorship hypothesis* dans les ouvrages anglo-saxons –, en excluant de ce fait l'exception notable de la singularité que tout observateur a dans son passé – le Big Bang –, et qui est en quelque sorte visible de tous. Hawking eut l'astuce, en adaptant les théorèmes de Penrose à travers un renversement temporel, de considérer non pas les singularités *futures* comme l'avait fait Penrose, mais les singularités *passées*, démontrant ce faisant que, sous des hypothèses très générales de positivité d'énergie, notre Univers devait comporter dans son passé une singularité, le Big Bang, contredisant ainsi l'ironie de Hoyle et les réticences initiales d'Einstein (rendez-vous à la fin de ce chapitre pour en savoir plus – III).

Pendant longtemps, la discussion resta à ce stade de conjecture, notamment du fait que pendant près de cinquante ans la seule solution exacte connue (en dehors des solutions cosmologiques homogènes et isotropes) était la solution de Schwarzschild. De temps à autre, un physicien annonçait bien la découverte d'une nouvelle solution exacte des équations d'Einstein reliant géométrie et contenu de matière, mais après quelques semaines ou quelques mois de calcul on finissait par démontrer qu'il s'agissait en fait toujours de la solution du trou noir à symétrie sphérique de Schwarzschild affublée d'un simple changement de coordonnées.

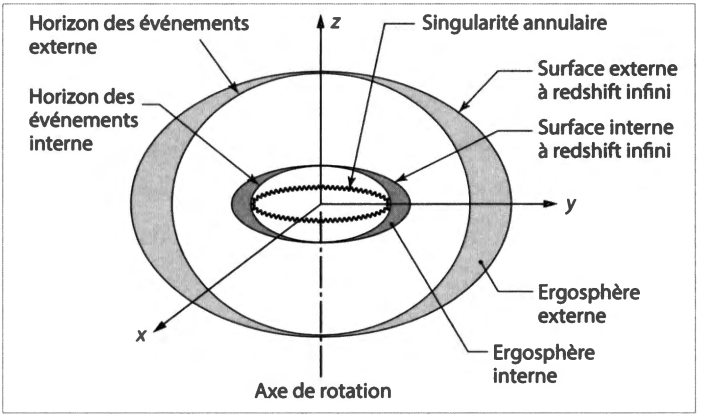
Mais en 1963, le mathématicien néo-zélandais Roy Kerr trouve une famille de solutions à deux paramètres (et non plus un seul, comme la masse de la géométrie de Schwarzschild). Il se révèle bientôt que ce deuxième paramètre présente toutes les caractéristiques du moment cinétique et, quelques mois plus tard, en étendant la géométrie de Kerr avec une coordonnée complexe, qui permet d'ajouter au paramètre de la masse deux paramètres au lieu d'un à travers sa partie réelle et sa partie imaginaire, le physicien américain Ezra Newman permet de trouver la famille qui apparaît aujourd'hui comme la plus générale de trous noirs, avec la géométrie dite de Kerr-Newman, le paramètre complexe introduit par Newman combinant la charge électrique et le moment cinétique. Leur travail révèle la famille générique des trous noirs – la géométrie de Schwarzschild apparaissant effectivement exceptionnelle avec sa symétrie parfaite, alors

qu'un corps possède dans la réalité pratiquement toujours un moment cinétique (une rotation) non nul(le)[4].

Dans cette famille plus générale des trous noirs en rotation, ou trous noirs de Kerr, et des trous noirs en rotation et chargés électriquement, ou trous noirs de Kerr-Newmann, la structure de la géométrie comporte plusieurs caractères nouveaux. Si la singularité de ces géométries reste toujours cachée derrière un horizon, il y a maintenant une première zone, l'ergosphère (figure ci-contre), région à partir de laquelle résister à la rotation du trou noir devient impossible, mais où il est encore possible de ressortir du trou noir. En d'autres termes, l'observateur, lorsqu'il pénètre dans l'ergosphère, ne peut plus rester immobile et doit être emporté au moins partiellement par la rotation du trou noir. De ce fait, il est possible d'extraire de l'énergie de rotation d'un trou noir, jusqu'à un certain point du moins, que précisera Demetrios Christodoulou.

Si l'on continue à explorer les zones internes du trou noir en rotation, un observateur va pouvoir rencontrer un horizon dont il ne sera pas possible de revenir s'il le traverse, mais plusieurs caractères nouveaux apparaissent néanmoins dans cette nouvelle région. D'abord, la singularité devient annulaire et elle est en principe visible de tout observateur imprudent qui s'est aventuré dans cette région. Cependant,

4. En effet, ce moment cinétique devant être un multiple de la constante de Planck (divisée par deux) $\hbar/2$, ce quantum de moment cinétique est si faible qu'il est infiniment peu probable que le moment cinétique d'un corps de masse stellaire soit nul.



Un trou noir en rotation, ou trou noir de Kerr, est décrit par une géométrie qui comporte plusieurs éléments nouveaux par rapport à un trou noir de Schwarzschild : la première surface frontière traversée par un observateur marque l'entrée dans l'ergosphère, zone où, même si l'on va à la vitesse de la lumière, il n'est plus possible de résister à la rotation du trou noir. Mais il est encore possible de s'échapper de l'ergosphère en sacrifiant un objet, précipité vers l'intérieur du trou noir. On trouve ensuite deux surfaces d'horizon correspondant à des surfaces de passage à sens unique : plus possible alors de revenir en arrière. La singularité du trou noir de Kerr, quant à elle, est dissimulée derrière ces horizons, et est donc invisible de l'extérieur du trou noir. Mais, à la différence du trou noir de Schwarzschild, la singularité est annulaire et essentiellement impossible à atteindre, sauf si l'on vise avec une précision infinie et en ayant la vitesse de la lumière.

cette visibilité est finalement assez anodine : en effet, atteindre la singularité n'est possible que d'un ensemble de trajectoires de mesure nulle, c'est-à-dire qu'il faut être *exactement* dans le plan équatorial du trou noir en rotation pour avoir une chance de l'atteindre. Dès que l'on vise un tout petit peu en dehors de ce plan, la rotation de l'anneau vous éjecte et vous empêche de l'atteindre. Pour un trou noir en rotation et chargé de Kerr-Newman, atteindre la

singularité est encore plus difficile, et seul un photon sur une trajectoire très particulière permet d'atteindre la singularité là aussi annulaire, et cette singularité est donc encore plus difficile à observer pour la géométrie de Kerr-Newman que pour celle de Kerr. Si donc ces singularités sont bien visibles en théorie, il est pratiquement impossible pour un observateur matériel de les atteindre[5].

Mais la caractéristique la plus intéressante des trous noirs de Kerr-Newman est, comme dans le cas d'*Alice au pays des merveilles*, ce qui se passe à la traversée de la surface enserrée par l'anneau, qui constitue une porte sur un deuxième univers. En effet, la singularité est annulaire, un anneau infiniment fin qui enserre un disque, et la surprise est que ce disque n'a, quant à lui, rien de singulier. C'est un peu la situation décrite dans le film *Interstellar*, où les héros lancent leur vaisseau à travers une sorte d'anneau allongé, un tunnel – supposant par là qu'il est possible de revenir en arrière – ce que l'on appelle un « trou de ver », dont nous parlerons plus tard.

C'est Brandon Carter qui étudie, dans deux articles célèbres publiés en 1966 et 1968, la géométrie dite « maximale de Kerr » (dans l'article de 1966), puis de Kerr-Newman

5. Signalons néanmoins un cas particulier avec la géométrie de Reissner-Nordström, qui est le cas particulier de la géométrie de Kerr-Newman où la charge est non nulle, mais où le moment cinétique est nul, également une solution exceptionnelle : dans ce cas peu réaliste – la rotation étant rigoureusement nulle –, la singularité est visible pour tout observateur dans le sens où toute personne qui rentre à l'intérieur de l'horizon d'un tel trou noir sera précipitée sur cette singularité chargée.

(dans son deuxième article de 1968), géométrie qualifiée de « maximale » car elle s'intéresse à la géométrie la plus complète possible, et comprenant donc la géométrie au-delà de la porte que représente l'anneau. Carter découvre ainsi qu'un observateur qui traverse le disque intérieur de l'anneau pénètre dans un deuxième espace, où un anneau de singularité est toujours visible, mais dont la masse et la charge mesurées par l'observateur ont été changées de signe – en gardant la même valeur absolue.

Par exemple, si la masse apparaissait positive pour un observateur dans le premier espace, le corps deviendra gravitationnellement répulsif dans le deuxième espace que l'on découvre après le passage par l'anneau de Kerr, la masse du trou noir devenant négative, alors que dans le même temps la charge du trou noir est elle aussi renversée ! Par exemple, si l'on suppose que l'astronaute a le même signe de charge que le trou noir dans le premier espace, les charges électriques portées par l'astronaute et le trou noir ont initialement un effet répulsif. Mais lorsqu'il traverse l'intérieur de l'anneau, si l'astronaute a bien sûr sa propre charge qui reste inchangée, il voit maintenant une force électrique attractive, signalant que la charge du trou noir est devenue, dans ce deuxième espace, opposée à la sienne.

Carter remarque dès le milieu des années 1960 que les trous noirs en rotation et chargés ressemblent énormément à des particules élémentaires. Du fait que toute la masse se concentre dans la singularité, toutes les caractéristiques initiales de la matière qui a mené à la constitution du trou

noir se sont dissipées par émission de photons et d'ondes gravitationnelles à la vitesse de la lumière. C'est ce que John Wheeler veut signifier lorsqu'il emploie l'expression qu'un trou noir n'a pas de « cheveux », ses caractéristiques, quelques instants après sa création, se réduisant en pratique aux trois nombres quantiques que nous avons cités pour les décrire : la masse, la charge et le moment cinétique, trois nombres quantiques par lesquels on identifie également les particules élémentaires. Carter note également le fait que le moment gyromagnétique – le rapport entre le moment magnétique et le moment cinétique de rotation – d'une particule trou noir est égal à celui d'un électron. Or le moment cinétique propre de l'électron est très particulier, car il est le double de celui qu'on obtient quand on réalise le calcul pour un courant électrique que l'on fait circuler dans un anneau. La ressemblance avec une particule élémentaire est donc forte et poussera Carter à étudier pendant de nombreuses années l'idée que les particules élémentaires puissent en définitive être ce qu'il appelle des « vortons », des vortex de géométrie ou micro-trous noirs en rotation, dont il reste à justifier pour quelle raison seules certaines configurations de charge et de masse sont réalisées dans la nature, la particule chargée la plus légère étant par exemple l'électron.

Brandon Carter n'avait en revanche pas noté la ressemblance que les renversements de charge et de masse évoquent avec la transformation matière-antimatière. D'abord, les physiciens n'aiment pas beaucoup les énergies et les masses négatives, qu'ils assimilent à l'instabilité. Car

si l'on récupère de l'énergie en fabriquant une particule de masse négative, il faut expliquer pour quelle raison le vide ne se met pas à en produire de façon copieuse ou même catastrophique… Dès 1996, je notai cette ressemblance entre la structure des solutions de Kerr-Newman et un couple particule-antiparticule, ressemblance notée également en 2002 par les physiciens brésilien Héctor Arcos et colombien Jose Geraldo Pereira, qui démontrèrent de façon techniquement précise le lien entre la géométrie de Kerr-Newman et une particule au sens de Dirac, c'est-à-dire incorporant la symétrie matière-antimatière.

S'il ne remarque pas le lien avec l'antimatière, Carter note néanmoins une caractéristique essentielle, et apparemment dérangeante, de la géométrie de Kerr : en pénétrant dans le deuxième espace au-delà de l'anneau, il est possible d'effectuer des retours en arrière dans le temps, ce qui, à nouveau, évoque l'antimatière pour un physicien des particules, pour qui un positron est un électron qui remonte le temps par rapport à nous – Carter utilise, quant à lui, le qualificatif « *totally vicious* » (« totalement vicieux ») pour un tel espace-temps… Ce lien entre trous noirs et particules est relativement peu étudié et peu connu, et le lien possible avec l'antimatière encore moins connu et étudié de façon très rare, probablement parce que pendant longtemps les physiciens ont cru que les solutions de masse négative étaient absolument interdites, et probablement également parce que le retour en arrière dans le temps semble également mener à des paradoxes et devrait donc être évité à tout prix.

Or ces deux bastions d'impossibilité sont largement tombés : très récemment pour la possibilité d'avoir sans catastrophe une solution de masse négative dans un univers comme le nôtre, comme l'ont montré en 2014 Manu Paranjape de l'université de Montréal et ses étudiants. Et dès le début des années 1990 pour la démonstration que les trous de ver et le retour possible en arrière dans le temps ne conduisent pas à des paradoxes, mais au contraire à une multiplicité de solutions, qui ressemble fortement à l'indéterminisme de la mécanique quantique, comme l'ont démontré les physiciens Kip Thorne, Igor Novikov et leurs collaborateurs. Nous reviendrons sur ces propriétés dans l'étude consacrée aux trous de ver et à la discussion sur leur existence.

La perte du contenu de matière

Une autre caractéristique très importante des trous noirs est qu'ils transcendent et permettent de façon effective de violer la conservation du nombre baryonique, qui caractérise en physique des particules le nombre de protons et de neutrons (les autres baryons étant instables et de durée de vie extrêmement faible, nous nous limiterons à ces deux particules). En effet, dès lors que l'on reconnaît qu'une fois effondré un trou noir n'est plus caractérisé que par les trois nombres quantiques masse, charge et moment cinétique, seuls accessibles de l'extérieur, il n'est plus possible ensuite expérimentalement de conserver la trace de la quantité de

matière que l'on y a accumulée dans la mesure où un même trou noir de masse donnée a pu être constitué avec des quantités de matière très différentes selon la façon dont il a été assemblé.

Concernant la non-conservation du nombre baryonique – ou contenu de matière –, Gerard 't Hooft et Alexander Polyakov avaient déjà noté que le modèle standard comportait ce que l'on appelle un « instanton » (appelé en leur honneur le monopôle de 't Hooft-Polyakov), qui permet le passage entre matière et antimatière, et donc a priori la désintégration ultime d'un bloc de matière. Mais ici la perte de sens opérationnel à la notion de contenu de matière laisse également entendre que la gravité doit elle aussi permettre la désintégration de la matière ! C'est ce que les physiciens Jacob Bekenstein et Stephen Hawking vont d'ailleurs démontrer dans le mécanisme d'évaporation des trous noirs sur lequel nous reviendrons dans le chapitre consacré au lien entre gravité et information. Pour citer le physicien Igor Novikov, « rien ne peut être plus compliqué ni plus simple qu'un trou noir », en un sens à la fois profond et ironique.

De la description de Carter de la géométrie de Kerr, il faut retenir que les particules élémentaires, comme les quarks et les leptons, pourraient, en un sens très profond, être des trous de ver – et non des trous noirs, dont on ne pourrait ressortir –, et comportant une singularité nue – c'est-à-dire visible par un observateur extérieur – en principe mais invisible en pratique, car nous avons vu qu'il faut viser infiniment bien pour y parvenir. Cette géométrie suggère également qu'il existe en

fait deux univers faiblement couplés, et où chaque particule dans un espace est une antiparticule dans le deuxième espace, le seul moyen de passer de l'un à l'autre étant de passer à travers l'intérieur de l'anneau d'une particule[6].

La question se pose de savoir s'il est possible qu'existent des familles plus générales de trous noirs, comportant d'autres paramètres en dehors des trois nombres quantiques masse, charge électrique et moment cinétique, l'opinion actuelle des physiciens étant qu'il n'y a probablement pas d'extension en relativité générale à cette famille à trois paramètres[7].

Chute dans un trou noir

Afin de devenir plus familier avec les ordres de grandeur des géométries caractérisant les trous noirs, prenons quelques exemples de situations que pourrait rencontrer un voyageur ayant la malchance ou l'imprudence de s'approcher trop près d'un trou noir.

---

6. On peut par ailleurs montrer que la taille de l'anneau de Kerr pour une particule est toujours de l'ordre de ce que l'on appelle en physique des particules sa «section efficace», c'est-à-dire la surface effective qu'elle offre dans les collisions avec d'autres particules, la marche de potentiel nécessaire pour passer d'un côté à l'autre de l'anneau (et d'un espace à l'autre) étant, quant à elle, de l'ordre ou supérieure à la masse de la particule.

7. Signalons néanmoins le monopôle magnétique, hypothétique quantum de charge électrique, auquel nous faisions allusion plus haut, et dont l'existence, par exemple à travers le monopôle – qui est lui sans singularité – de 't Hooft-Poliakov, présenterait un intérêt considérable, avec la possible catalyse de la désintégration de la matière.

Commençons par étudier le cas – assez improbable comme nous le verrons par la suite – d'un trou noir de la masse d'une montagne. Il est simple de montrer que sa taille est microscopique, la circonférence de son horizon étant de l'ordre du dixième de picomètre, environ le millième de la taille d'un atome. Dans la vision classique d'un trou noir, sans effets quantiques, l'attraction gravitationnelle d'un tel trou noir est anodine et extrêmement difficile à remarquer sauf si l'on se trouve dans le voisinage immédiat, disons à quelques mètres, d'un tel trou noir, où les forces de marée commencent à devenir très désagréables. Quels sont les dégâts si le trou noir vous traverse ? Car avec une masse très supérieure à un supertanker, il poursuivra sa trajectoire sans presque être modifié par la traversée de votre corps. On s'attend à ce que le trou noir absorbe tout sur son passage, ceci dans une région qui est un peu plus grande en étendue que le rayon de Schwarzschild, soit ici une région de taille subatomique : des dégâts donc, mais d'extension limitée. En fait, les principaux dégâts que crée un tel trou noir ne sont pas liés à l'absorption de matière, ni même aux effets de forces de marée, mais au fait que, comme nous le verrons dans le chapitre « Gravité et information », il *émet* un rayonnement de la puissance de plusieurs centrales nucléaires, une dizaine de gigawatts pour une masse de 10^{15} kilogrammes, et va donc vous tuer instantanément – la mort sera rapide par vaporisation – s'il vous traverse. Par ailleurs, on réalise qu'il sera extrêmement difficile de fabriquer progressivement un trou noir d'une telle masse si la « porte

d'entrée» microscopique émet en retour une telle quantité d'énergie vers l'extérieur, avec un flux remarquablement intense d'électrons et de positrons.

Le comportement de ces trous noirs microscopiques est donc très différent de celui que l'on peut imaginer naïvement. Un calcul simple montre que, même à ce taux d'émission très important, un trou noir d'une masse de 10^{15} kilogrammes mettra plusieurs milliards d'années avant de dissiper une part appréciable de sa masse. L'autre aspect important de ce type de trou noir microscopique est qu'il émet autant de matière que d'antimatière, non seulement parce qu'il émet copieusement des photons qui sont leur propre antiparticule, mais aussi parce qu'il émet un rayonnement thermique à température d'environ 1 méga-électronvolt et aussi copieusement composé d'électrons que de positrons, l'anti-électron[8].

Considérons maintenant un trou noir de masse trois fois la masse du Soleil: c'est un trou noir plus classique, car avec cette masse, qui se situe au-dessus de la masse prévue par Chandrasekhar au-delà de laquelle une étoile froide ne devrait plus pouvoir supporter son propre poids, le rayon de Schwarzschild est maintenant d'une dizaine de kilomètres. Les effets de gravitation dans le Système solaire induits par un tel trou noir sont dans ce cas visibles sur des

8. Cela illustre la notion de transcendance, effectivement équivalente à une non-conservation, de la notion de contenu de matière (ou d'antimatière) que nous évoquions plus haut, le trou noir se dissipant de façon ultime en un mélange autant matière qu'antimatière.

distances beaucoup plus grandes que dans le cas précédent, avec des modifications majeures des orbites des planètes, et du Soleil lui-même, s'étendant nettement au-delà d'une unité astronomique, soit la distance Terre-Soleil. Si vous êtes assez imprudent pour foncer droit vers l'horizon d'un tel trou noir, deux choses se passent : d'une part, les effets de marée s'amplifient considérablement lorsque vous vous rapprochez de l'horizon de ce trou noir, et la force de marée entre votre tête et vos pieds devient égale à 100 millions de fois votre poids au moment de la traversée de l'horizon, ce qui veut dire que vous êtes étiré bien au-delà du spaghetti lorsque vous pénétrez dans le trou noir. Rassurez-vous, une fois passé l'horizon, il ne vous reste plus qu'une trentaine de microsecondes à vivre avant de tomber sur la singularité cachée derrière son horizon : vous la découvrez alors, mais en piteux état... On peut noter que pour un tel trou noir, le rayonnement du trou noir dont nous parlions plus haut est extrêmement faible, totalement immesurable, et ce n'est cette fois-ci pas lui qui va vous tuer...

Considérons maintenant le cas d'un trou noir comme Sagittarius A*, le trou noir d'environ 4,5 millions de masses solaires qui se trouve au centre de notre Galaxie. Son rayon de Schwarzschild est d'une dizaine de millions de kilomètres, ce qui fait qu'une fois passé l'horizon, il vous reste quelques dizaines de secondes à vivre avant de rencontrer inévitablement la singularité centrale. Cette fois-ci, la force de marée entre votre tête et vos pieds est nettement plus faible, de l'ordre du millionième de votre poids à la surface

de la Terre, si bien que sans appareil de mesure, vous ne vous rendrez compte de rien à la traversée de l'horizon. Mais les choses vont grandement se compliquer au fur et à mesure que vous continuerez votre descente, et les dernières secondes de votre existence vont être très difficiles : en effet, les forces de marée vont alors progressivement dépasser votre poids, avant de tendre vers l'infini dans l'instant final, qui va à nouveau vous transformer en spaghetti.

Que se passe-t-il maintenant si vous vous approchez trop près d'un trou noir Gargantua (pour reprendre le nom du trou noir géant du film *Interstellar*) d'une dizaine de milliards de masses solaires, comme il en existe au cœur de bon nombre de galaxies ? Dans ce cas, votre durée de vie après l'entrée fatale dans le trou noir est de l'ordre du jour. Au moment où vous traversez l'horizon du trou noir, en dehors de quelques distorsions bizarres du ciel étoilé, vous ne remarquez rien du point de vue des forces de marée, même si elles vont là encore finir par vous tuer, mais seulement lorsque vous serez parvenu beaucoup plus profondément à l'intérieur du trou noir. En revanche, les dernières dizaines de secondes de votre existence vont être extrêmement pénibles, et je vous conseille de prendre avec vous une capsule de cyanure pour en finir avant l'étirement progressif et de plus en plus violent, qui va ressembler au supplice de l'étirement que l'on faisait subir aux hérétiques du Moyen Âge.

Imaginons enfin un trou noir dont la masse serait égale à la masse de l'Univers observable aujourd'hui – cette notion d'Univers observable est dynamique et son extension

géométrique varie avec le temps. La taille de notre Univers qui est actuellement observable dépend quelque peu des détails de la cosmologie, mais est égale environ à une trentaine de milliards d'années-lumière de rayon – ce qui peut sembler surprenant dans la mesure où l'âge de l'Univers est inférieur et vaut environ 14 milliards d'années –, la quantité et la masse de la matière présente dans cet univers sont sujettes aux incertitudes liées à sa composition – vraie ou fausse ? – en matière ordinaire, matière noire et énergie noire, mais on s'attend à ce que l'Univers observable contienne de la matière ordinaire, baryonique, à hauteur d'environ 10^{80} nucléons (ou leur équivalent en masse). Converti en kilogrammes, ce nombre correspond à un peu moins de 2×10^{53} kilogrammes, soit environ 10^{23} fois la masse de notre Soleil. Le rayon de Schwarzschild d'un tel trou noir hypothétique est de l'ordre de 3×10^{23} kilomètres – souvenez-vous du fait que le rayon de Schwarzschild d'un trou noir est proportionnel à sa masse et que le rayon de Schwarzschild du Soleil est proche de 3 kilomètres –, soit environ 30 milliards d'années-lumière. On pourrait donc être tenté d'en déduire que nous sommes dans un trou noir de la taille de l'Univers observable. Mais il est important de noter que ce n'est pas le cas car, à la différence d'un trou noir qui correspond à une accumulation (extrême) de masse locale, il n'existe pas a priori de centre dans notre Univers, qui est homogène et isotrope à une excellente approximation. L'image n'est cependant pas totalement inutile néanmoins car si l'Univers observable est d'extension finie et de l'ordre d'une trentaine de milliards d'années-

lumière, c'est que nous allons commencer seulement à voir – avec un *redshift* énorme qui complique d'ailleurs beaucoup les observations – les zones qui s'étendent au-delà, et ce *redshift*, ce décalage vers le rouge, est directement relié à la quantité de matière présente entre nous et ces confins de notre Univers observable. De ce fait, et comme c'est le cas pour l'intérieur d'un trou noir, il existe des zones de notre Univers qui sont aujourd'hui complètement inaccessibles à notre observation.

Les distorsions extrêmes de l'espace-temps au voisinage des trous noirs conduisent à quelques résultats très contre-intuitifs : ainsi, la meilleure stratégie, si on veut survivre le plus longtemps possible dans un trou noir, est de surtout ne rien faire, et de se laisser tomber en « chute libre » – Wheeler souhaitait lutter contre l'expression « chute libre », qu'il jugeait impropre, et conseillait plutôt de parler de « flottement libre » ou *free float* – sans accélérer ni décélérer. Toute tentative de quitter la trajectoire géodésique de « flottement libre » conduit à une diminution du temps propre mesuré par l'observateur avant sa rencontre avec la singularité du trou noir (la limite étant le temps propre nul du photon), entre le moment où il pénètre au-delà de l'horizon du trou noir et celui où il rencontre la singularité. Par ailleurs, si nous sommes habitués à ressentir la force centrifuge dans un mouvement de rotation, par exemple sur un manège, cette force est en fait ici *centripète*, nous plaquant en direction du trou noir lorsque nous suivons une orbite circulaire proche de l'horizon du trou noir, ce qui a sans doute des implications importantes dans les mécanismes

d'accrétion de la matière au voisinage des trous noirs. Ces deux résultats, qui semblent paradoxaux mais qui n'en sont pas moins bien réels, constituent des illustrations du caractère très peu intuitif de la relativité d'Einstein dans ces géométries très torturées des trous noirs.

On voit par ailleurs que l'on retrouve dans l'étude des trous noirs la notion de Dirac de l'antimatière comme matière d'énergie négative[9] : alors qu'un trou noir à symétrie sphérique, représenté par la géométrie de Schwarzschild, nous cache tout ce qui est au-delà de l'horizon de visibilité, un trou noir en rotation fait apparaître la notion d'ergosphère et de la possibilité d'extraire de l'énergie d'un trou noir (ce que nous retrouverons dans le chapitre consacré aux liens entre gravité et information). Si un *redshift* infini – un décalage de la fréquence vers le rouge par un facteur infini – a pour conséquence de rendre invisible le contenu d'un trou noir, on peut aller plus loin encore, au-delà de l'énergie nulle, et retrouver la notion d'antimatière – la matière d'énergie négative et qui remonte le temps dans la vision de Dirac – lorsqu'un corps acquiert une énergie suffisamment négative pour être inférieure à son énergie de masse changée de signe. Avec un cône de lumière complètement renversé, on se retrouve alors dans une situation qui ressemble à celle du héros d'*Interstellar* qui a la nécessité de « sacrifier » un objet – dans le film, lui-même et sa capsule – qui devient

9. La première étape étant fournie par l'énergie nulle avec laquelle apparaît – ou plutôt disparaît… – un objet quand son *redshift* devient infini.

d'énergie négative pour qu'une autre partie de l'attelage – Amelia Brand et sa capsule – puisse échapper au trou noir, phénomène d'extraction d'énergie qui avait été étudié par le physicien russe Yacov Zel'dovich et le physicien britannique Roger Penrose.

Autres questions...

Les trous noirs sont-ils chauves ?

Nous avons vu que les trous noirs prédits par la relativité générale pouvaient être caractérisés par trois paramètres, et qu'il ne semblait pas y en avoir d'autres. Comme nous le verrons dans les premiers signaux d'observation des ondes gravitationnelles à la fin de l'année 2015, la coalescence de deux trous noirs dissipe extrêmement vite les « cheveux », c'est-à-dire tout caractère qui serait un trait distinctif issu des caractéristiques de la coalescence de deux objets distincts, avec un temps caractéristique qui est donné par la taille de l'horizon du trou noir résultant divisée par la vitesse de la lumière. De la même façon, et même si nous n'en avons pas aujourd'hui d'observation directe, pour une étoile massive qui s'effondre en produisant un trou noir, généralement en rotation, on estime que le temps caractéristique de dissipation des « cheveux » du trou noir qui est produit dans l'effondrement est de quelques millisecondes. Après ce temps typique, seuls trois paramètres subsistent pour le trou noir et sont visibles de l'extérieur : la masse, la charge électrique, le moment cinétique. Cette caractéristique d'anonymisation

des trous noirs est résumée dans l'expression due à John Wheeler : « *Black holes have no hair* », les trous noirs ont des traits indistinctifs et le crâne lisse comme celui d'un chauve…

Les trous blancs existent-ils ?

Après avoir étudié quelques propriétés des trous noirs, posons-nous la question de l'existence du film, cette fois à l'envers, de la formation d'un trou noir, appelé de façon impropre un « trou blanc ». Cette expression est impropre car la matière en ressort au lieu d'y tomber, et il faudrait donc plutôt parler de « fontaine blanche ». Peuvent-ils exister dans la Nature ? La réponse à cette question n'est pas claire et est liée à la question de symétrie temporelle – la symétrie sous le renversement du temps – en gravitation. Roger Penrose a conjecturé par exemple que les singularités qui sont dans notre passé et celles qui sont dans notre futur sont de type différent, le critère pouvant s'exprimer, selon Penrose, selon la valeur du tenseur de Weyl, qui mesure les effets de marée en l'absence de matière. Penrose a noté en effet que la seule singularité que nous voyons dans notre passé – à travers le dépoli du fond diffus cosmologique – présente une valeur pratiquement nulle du tenseur de Weyl, alors que l'autre partie du tenseur de courbure – appelée « tenseur de Ricci » – qui caractérise la courbure due à la présence de matière est très importante dans les premiers instants de l'Univers, à une époque où la matière est extrêmement dense. La situation est opposée dans le cas des singularités futures, les solutions trous noirs apparaissant vides – tenseur

de Ricci nul – et avec des effets de marée non nuls, écartelant l'imprudent qui s'en approche – tenseur de Weyl différent de zéro.

La relativité générale étant une théorie classique qui respecte en principe la symétrie temporelle, comment diable pouvons-nous justifier le fait qu'il ne semble exister aucune « fontaine blanche » dans notre Univers ? Nous reviendrons sur cette question et sur l'asymétrie temporelle en gravitation, qui permettrait peut-être d'expliquer cette asymétrie de solutions, dans le chapitre consacré au lien entre gravitation et information[10].

Les trous noirs existent-ils vraiment ?

Comment peut-on être sûr du fait que les trous noirs existent ? Comme ces objets, au moins pour des trous noirs de masse stellaire, n'émettent pas eux-mêmes directement de la lumière, comment pouvons-nous « voir » d'une façon ou une autre un trou noir et montrer par ailleurs qu'ils correspondent bien aux prédictions de la relativité générale ?

10. Notons que si une explication est donnée à cette asymétrie, elle viendra probablement de la prise en compte des effets quantiques, ou d'une théorie quantique de la gravitation elle-même. On peut noter ainsi que la théorie de gravité quantique à boucles, popularisée par le physicien mathématicien Carlo Rovelli, prédit que la formation d'un trou noir ne conduit pas à la production d'une véritable singularité, où le champ gravitationnel tendrait vers l'infini, mais s'interrompt avec une polarisation du vide qui conduit, justement, à une fontaine blanche et une explosion d'énergie.

Pendant longtemps, le candidat de trou noir le plus sérieux fut Cygnus X-1, considéré en raison de sa masse qui apparaissait supérieure à une dizaine de masses solaires comme un candidat très probable de trou noir. Mais le seul fait de dire qu'on le considère comme très probable signifie également que l'on n'est pas absolument sûr de sa nature. Découvert au milieu des années 1960 comme un émetteur très puissant de rayonnement X grâce à un vol de fusée – les rayons X ne parvenant pas à traverser l'atmosphère –, l'objet qui nous intéresse est l'un des membres d'un système binaire – comme c'est le cas pour environ une étoile sur deux –, situé à une distance d'environ six mille années-lumière de la Terre. De façon très significative, les variations de flux de rayonnement X en provenance de Cygnus X-1 peuvent s'effectuer avec des temps caractéristiques nettement inférieurs à la seconde, ce qui signe un objet de petite dimension, inférieur en dimension à une seconde-lumière, soit à peu près la distance Terre-Lune ou environ la moitié du rayon du Soleil. Cygnus X-1 est ainsi le compagnon compact d'un système comprenant une étoile supergéante bleue affublée du doux nom de HDE 226868, dont le vent solaire s'enroule autour de Cygnus X-1 avant de tomber sur l'astre compact, produisant le rayonnement X dans sa chute. Les mesures les plus contemporaines de la masse de l'objet compact dans ce système binaire de Cygnus X-1 fournissent une masse très proche de 15 masses solaires. Si des étoiles d'une telle masse existent, elles ont une durée de vie extrêmement brève. Et on ne connaît pas de moyen

de former des objets compacts d'une telle masse sans qu'ils s'effondrent rapidement sous leur propre poids en se transformant en trou noir, ce qui a dû se passer il y a cinq millions d'années environ, à partir d'une étoile qui avait initialement une masse d'une quarantaine de masses solaires et qui a ensuite perdu les deux tiers environ de sa masse dans l'événement cataclysmique qui a conduit à la formation du trou noir. Pourquoi ne pourrait-il pas s'agir d'une étoile à neutrons plutôt que d'un trou noir : on estime en effet que la masse d'une étoile à neutrons, dernière étape avant le trou noir, ne peut pas excéder 3 masses solaires environ, alors que la masse de Cygnus X-1 se situe très au-delà de cette limite. C'est l'ensemble de ces éléments qui fait que Cygnus X-1 est considéré comme un candidat extrêmement sérieux de trou noir.

Le candidat qui est situé dans notre Galaxie et qui apparaît à l'heure actuelle comme le candidat pratiquement indiscutable de trou noir est l'objet supermassif Sagittarius A*, dont nous avons déjà parlé plus haut, et qui se situe tout proche – mais pas exactement – du centre de notre Voie lactée. À ce stade, nous pouvons observer les bouffées d'énergie résultant de nuages de gaz capturés par ce trou noir de masse gigantesque. Nous avons déjà noté qu'un très grand nombre de galaxies – peut-être toutes – contiennent de tels trous noirs supermassifs, bien au-delà des masses des objets stellaires, probablement formés par captures successives d'étoiles par un trou noir initialement beaucoup moins massif. Au-delà de l'observation des

bouffées d'énergie à la fois violentes et rapidement variables qui signalent un objet compact de grande masse, nous disposons également de l'observation des trajectoires elliptiques de la douzaine d'étoiles en orbite autour de Sagittarius A*. Travaillant à l'époque sur la recherche de la matière noire, je participais à la conférence dite « Texas Symposium » en 2002 à Florence lorsque furent présentées les observations rassemblées sur plusieurs années de l'étoile S2 (les étoiles autour de Sagittarius A* sont nommées de S1 à S14) alors que l'orbite elliptique de l'étoile venait de contourner Sagittarius A* à son péricentre, très proche de l'objet massif[11]. Le point essentiel à retenir est que l'étoile S2, dont le mouvement a été observé attentivement au cours des vingt-cinq dernières années, approche un objet dont sa trajectoire démontre qu'il possède une masse d'environ 4,5 millions de masses solaires, et que cet objet extrêmement massif est contenu dans un rayon inférieur à 100 unités astronomiques (rappelons que l'unité astronomique est la distance Terre-Soleil). Plus récemment, l'étude de l'émission radio par mesure interférométrique a permis de démontrer que la zone d'émission est confinée sur une distance encore bien inférieure, de l'ordre d'une unité astronomique, soit 150 millions de kilomètres.

Au moment où sont écrites ces lignes, il n'est pas encore possible de « voir » de façon directe la déformation induite

11. On peut observer le film très accéléré des mouvements des étoiles proches de Sagittarius A* sur le lien: https://www.youtube.com/watch?v=u_gggKHvfGw

sur la sphère céleste par une telle masse de trou noir, ce que l'on peut appeler l'image, non pas du trou noir lui-même, mais, ce qui revient finalement au même, à sa déformation de l'espace-temps et de l'image du ciel autour de lui qui en résulte. Le programme d'observation de Sagittarius A* montre que nous ne sommes plus très loin de pouvoir réaliser cette image. En effet, le rayon de Schwarzschild de Sagittarius A* est de l'ordre de 13 millions de kilomètres, alors que l'interférométrie millimétrique parvient à démontrer que la zone d'émission possède une extension de l'ordre ou inférieure à une centaine de millions de kilomètres. Un programme international a donc été mis en place afin d'observer la déformation de l'image du ciel au voisinage de Sagittarius A*. Si l'observation d'un trou noir de quelques masses solaires à une distance de l'ordre de notre distance au centre de la Galaxie apparaît actuellement pratiquement sans espoir (avec une résolution qui devrait être inférieure au dix-milliardième de milliradian), une telle observation pour Sagittarius A*, vu sa masse, est assez proche des meilleures performances de résolution actuelles. Un programme d'observation impliquant un ensemble de télescopes dans le domaine millimétrique, coordonnant leurs observations comme un gigantesque télescope sur plusieurs continents (avec notamment l'IRAM en France), est donc actuellement mis en place pour réaliser l'augmentation de résolution qui devrait permettre la première observation de trou noir supermassif, ce qui serait une importante observation scientifique. Pour atteindre la résolution

phénoménale inférieure aux 13 millions de kilomètres de rayon de Schwarzschild de Sagittarius A* alors que nous sommes à une distance d'environ 8 kiloparsecs, soit environ 3×10^{16} kilomètres, du centre de la Galaxie, l'angle sous lequel on peut voir la déformation des images induites par le trou noir sur le ciel est de l'ordre du dix-milliardième de radian, ce qui est la performance de distinguer un cheveu à une distance de 1 000 kilomètres…

Rappelons, ce qui est une question observationnelle différente, que l'environnement d'un trou noir est très souvent la source de très grandes quantités d'énergie, comme c'est le cas dans les quasars. Leur environnement n'est donc pas du tout noir, le gaz ou parfois une étoile passant dans leur voisinage pouvant être happé par les forces de marée. Ceci conduit à des épisodes d'émission brutale d'énergie, avec des jets très violents réémis vers l'extérieur, et des émissions radio qui sont visibles à des milliards d'années-lumière pour les quasars (de l'anglais *quasi-stellar objets*) dont l'origine est restée pendant longtemps énigmatique, avant que leurs distances cosmologiques – le plus souvent des centaines de millions à des milliards d'années-lumière – ne soient fermement établies. On peut de ce fait considérer Sagittarius A* comme un mini-quasar dans notre Galaxie, qui permet d'étudier ce type d'événement violent en miniature.

Quand on parle de stratégies pour « voir » un trou noir, il faut donc bien préciser si c'est de façon indirecte (donc de façon pas nécessairement convaincante), en mesurant par exemple l'accrétion de matière sur un trou noir, le critère

pour distinguer un trou noir d'une étoile compacte comme une étoile à neutrons étant que la matière une fois tombée dans le trou noir ne rayonne plus vers l'extérieur, ce qui permet des accrétions très importantes. Ce comportement diffère notablement de celui d'une étoile compacte, dont l'accrétion doit rester inférieure à la limite d'Eddington, atteinte lorsque le chauffage de l'astre devient si important qu'il finit par repousser par son rayonnement la matière qui tenterait de tomber au-delà de cette limite.

L'observation de l'image du trou noir qui va être tentée dans le programme « Event Horizon Telescope » rassemblant une dizaine d'observatoires millimétriques répartis sur la Terre, et qui est en cours d'analyse au moment où j'écris ces lignes, est en revanche un essai d'observation du voisinage immédiat de l'horizon et de la déformation de la géométrie induite par notre trou noir galactique.

Ce qu'il faut retenir

Après plus de cinquante ans d'efforts, les physiciens ont découvert ce qui apparaît comme la famille la plus large de trous noirs, dite de Kerr-Newman, caractérisée par trois paramètres : masse, charge et moment cinétique. Les singularités des trous noirs en rotation ont un caractère très différent, annulaire, de la singularité des trous noirs à symétrie sphérique, dont on peut se douter qu'ils sont exceptionnels. Brandon Carter a été le premier à noter que

ces trous noirs présentent des ressemblances fortes avec les particules élémentaires, aspect important sur lequel nous reviendrons.

Parmi les scientifiques, pratiquement plus personne ne met aujourd'hui en doute l'existence des trous noirs, notamment par l'observation pendant plusieurs dizaines d'années du voisinage de ce qui est très probablement un trou noir de 4,5 millions de masses solaires, Sagittarius A*, au centre de notre Galaxie. L'observation de l'image de Sagittarius A*, ou plutôt de la déformation qu'il induit, devrait être obtenue dans les prochaines années, ce qui conforterait la nature de trou noir de cet objet supermassif. Par ailleurs, la découverte récente des ondes gravitationnelles confirme de façon impressionnante, dès les premières observations, le mécanisme de coalescence en un dixième de seconde de ce qui apparaît comme deux trous noirs de masse d'environ 30 et 35 masses solaires chacun. Les années prochaines devraient fournir de nombreux autres exemples de formation de tels trous noirs.

Pour aller plus loin

Une étoile qui piège sa propre lumière...

I - Certains pourront être gênés, pour des raisons largement philosophiques, par le fait que des régions d'espace-temps soient à jamais inaccessibles à notre observation. À noter d'ailleurs que ce n'est pas le cas pour les gros trous noirs du type de Gargantua, le trou noir supermassif d'*Interstellar*: on peut aller voir à l'intérieur,

même si, a priori, on ne reviendra jamais pour en parler. Mais on peut noter que même dans un univers sans trous noirs, voire sans expansion, il y a également des régions qui, comme dans un trou noir, nous sont invisibles car de *redshift* infini. Certaines de ces régions pourront devenir observables dans le futur mais pas nécessairement. Ainsi, l'énergie noire, quand (si ?) elle deviendra dominante, devrait conduire également à un univers où les objets deviennent totalement isolés et à des distances énormes les uns des autres, avec de petits îlots de matière condensés en galaxies destinés à rester isolés car ne pouvant même pas communiquer par rayons lumineux entre eux. Plus près de nous, si l'on peut dire, on peut imaginer une fusée accélérant, avec une accélération égale seulement à une fois la gravité terrestre, soit environ 10 mètres par seconde au carré, et au bout d'une année d'accélération, il devient impossible de communiquer avec la fusée (car si elle continue à accélérer, même nos messages radio ne parviendront pas à la rattraper).

II - Rappelons qu'en parallèle de la solution trouvée par Schwarzschild et décrivant un trou noir, déformation extrême et localisée de l'espace-temps, un prêtre catholique belge, Georges Lemaître, trouve la solution correspondante appliquée au domaine cosmologique, avec l'univers tout entier, supposé homogène et isotrope. Dans cette solution cosmologique, Lemaître fournit une description d'un univers dynamique, en expansion, et partant d'un état initial extrêmement condensé, qu'il appelle « théorie de l'atome primitif », dénomination quelque peu impropre du fait que l'explosion se produit dans tout l'univers de façon identique. Lemaître, pour lequel le récit de la Genèse était nécessairement symbolique, manifesta son désaccord avec le pape Pie XII quand, dans les années 1950, celui-ci fit référence à sa théorie de l'atome primitif, en se référant au récit biblique de la création de la lumière.

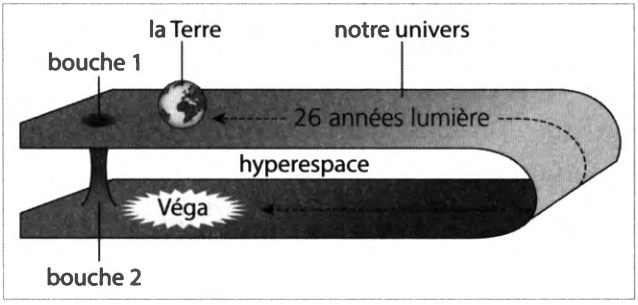
En parallèle des travaux d'Alexandre Friedmann qui, dès le début des années 1920, avait également mis en évidence le caractère dynamique de l'Univers, les travaux de Lemaître vont conduire à l'ensemble des solutions d'univers homogènes et isotropes que l'on appelle souvent aujourd'hui les « solutions FRW », en référence à Friedmann, Robertson et Walker (et en oubliant donc Lemaître).

Solutions exactes des équations d'Einstein

III. Si les physiciens n'aiment pas les singularités, c'est que les grandeurs deviennent infinies ou indéfinies, et qu'il est impossible de prédire ce qui va ressortir de ces infinis : en d'autres termes, la physique devient pour une part au moins imprédictible. Est-ce vraiment un problème ? Cinquante ans environ après la conjecture de Penrose (qu'il exprima en 1969), le statut de cette conjecture de protection cosmologique reste incertain… En effet, dans l'intervalle, des simulations sur ordinateur ont montré que la formation de singularités nues, c'est-à-dire qui ne seraient pas dissimulées par un horizon, semblait possible. La réponse des défenseurs de la conjecture est que de tels cas sont exceptionnels et de mesure nulle, et en d'autres termes qu'il serait infiniment peu probable de tomber sur ce type de situation. Pour donner un exemple, la symétrie sphérique parfaite est exceptionnelle et pratiquement impossible à obtenir et, comme nous le verrons par la suite, dès que l'on inclut un peu de rotation dans la solution, le caractère des singularités change complètement.

TROUS DE VER ET MACHINES À VOYAGER DANS LE TEMPS

Après avoir étudié les trous noirs, dont nous avons aujourd'hui une confiance très forte dans le fait qu'ils existent réellement dans la nature, à travers les observations du trou noir galactique Sagittarius A* et des ondes gravitationnelles émises par des systèmes de trous noirs binaires, la question se pose maintenant de l'existence de « trous de ver », des



Un trou de ver est une porte dans l'espace-temps permettant d'accéder presque instantanément, pour l'observateur qui le traverse, à une autre zone de l'espace-temps - permettant par exemple d'accéder de la Terre à Véga, située à 26 années-lumière de nous. Le trou de ver permet ainsi à un voyageur de « court-circuiter » le trajet « en ligne directe » représenté sur la figure par la ligne pointillée entre les deux lieux.

géométries permettant non seulement de rentrer par une porte gravitationnelle, mais aussi d'en ressortir selon le schéma représenté sur la figure ci-dessus. De telles portes, popularisées par exemple dans le film *Interstellar*, sont-elles autorisées par les lois de la physique, en étant éventuellement instables, et donc absentes de la Nature, mais accessibles à une civilisation techniquement (nettement) plus avancée que la nôtre ? C'est à ces questions que nous allons tenter de répondre par la suite.

Du pont d'Einstein-Rosen aux solutions « pathologiques » du trou de ver de Kerr-Newman

Dès 1935, Albert Einstein et son étudiant Nathan Rosen avaient étudié ce que l'on appelle aujourd'hui le « pont d'Einstein-Rosen », un trou de ver qui semblait connecter deux régions éloignées de l'Univers, ou éventuellement deux univers différents, joints uniquement par la porte du « trou de ver ». Ce que découvrirent assez rapidement Einstein et Rosen, c'est que la géométrie qu'ils étudiaient ne permettait pas le passage vers une deuxième région asymptotiquement plate – un deuxième univers où la masse est concentrée au voisinage de la porte et où le champ de gravité tend vers zéro loin de la porte –: au contraire, le voyageur était inévitablement écrasé au milieu de son parcours. En fait, la géométrie étudiée par Einstein et Rosen correspondait à la géométrie où la masse « centrale » d'un trou noir est dissimulée par une singularité, et le pont

d'Einstein-Rosen était en fait la géométrie non d'un trou de ver, mais bien d'un trou noir vu à travers le prisme de la symétrie temporelle, avec donc à la fois la partie trou noir, familière dans les effondrements de systèmes massifs, mais aussi la partie, tout aussi autorisée par la relativité générale, que l'on appelle de façon impropre un « trou blanc » – *white hole* dans la littérature anglo-saxonne –, et que l'on devrait plutôt appeler « fontaine blanche », film à l'envers de la formation d'un trou noir. (Comme déjà évoqué dans le chapitre consacré aux trous noirs, de telles fontaines blanches ne se rencontrent pas dans notre Univers et cette asymétrie temporelle n'est pas encore totalement comprise.)

Au-delà de ce premier essai, qui s'achevait par un échec, d'Einstein et Rosen, il faut ensuite attendre les années 1960 pour que des éléments importants supplémentaires sur les trous de ver soient fournis par l'étude des solutions exactes de la relativité générale. Comme on l'a vu plus haut, la solution exacte de la géométrie d'un trou noir à symétrie sphérique a été trouvée très rapidement par Karl Schwarzschild, en décembre 1915 puis, deux ans et demi plus tard, une autre solution à symétrie sphérique, correspondant au trou noir chargé et sans rotation, par Reissner et Nordström. Dotée d'un champ électrique divergent autour de sa singularité, on pouvait se douter que cette solution allait probablement polariser le vide et présenter des éléments d'instabilité, mais cette discussion resta dans l'enfance à cette époque-là, notamment parce que leurs travaux furent publiés à l'époque tragique de la fin de la Première Guerre mondiale, suivie peu

après par l'épidémie de grippe espagnole, largement oubliée aujourd'hui, qui allait tuer plusieurs millions de personnes. Il fallut effectivement attendre cinquante ans avant qu'en 1963, Roy Kerr découvre la solution décrivant la géométrie d'un trou noir en rotation puis que, deux ans plus tard, soit découverte la solution de Kerr-Newman, décrivant la géométrie d'un trou noir chargé et en rotation. Autant qu'on le sache, il n'existe pas de famille plus générale de trous noirs que cette famille à trois paramètres, masse, charge et moment cinétique, de Kerr-Newman.

Si, comme nous l'avons vu, Brandon Carter remarque la ressemblance étonnante entre un électron et un trou noir chargé et en rotation, ressemblance renforcée par le fait que le rapport gyromagnétique de l'électron et d'un trou noir de Kerr-Newman est le même[1], ce qui est très difficile à justifier par une théorie classique de l'électromagnétisme, il est assez clair dans son étude qu'il ne croit que de façon très limitée à la réalité physique des régions des géométries de Kerr qui présentent une masse négative et une gravité répulsive. De même, à aucun moment il ne parle du lien possible et des ressemblances que présentent ces solutions avec l'antimatière.

Carter note ainsi dans son article de 1968 consacrée à la géométrie de Kerr-Newman : « Quand la charge ou le

1. Ce rapport gyromagnétique est égal à 2. Toutefois, le rapport gyromagnétique de l'électron n'est en fait pas tout à fait égal à 2 mais à 2,002 319 304 361 82 une fois que l'on a pris en compte les corrections de polarisation du vide quantique.

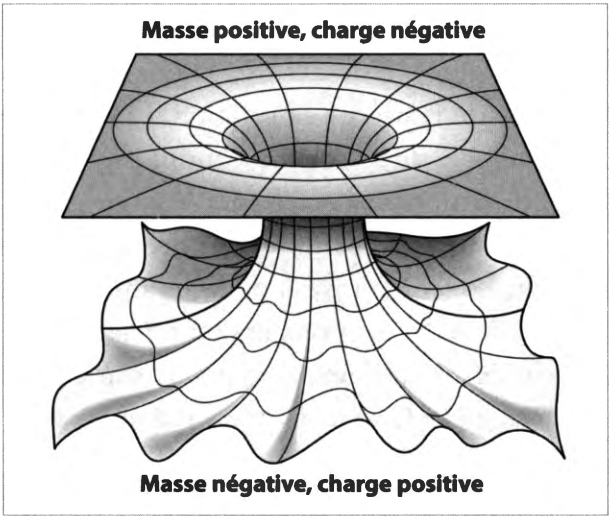
moment cinétique est suffisamment grand, la violation de la causalité est du type le plus flagrant possible, en ce qu'il devient possible de connecter n'importe quel événement à n'importe quel autre à travers une trajectoire de genre temps » (rappelons qu'une « trajectoire de genre temps » est une trajectoire qu'il est possible de suivre à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière). Carter qualifie ce résultat de « pathologique » et une telle géométrie de « totalement vicieuse » (« *totally vicious* »). Comme Gödel avant lui lorsqu'en 1949 il avait construit son modèle d'univers en rotation permettant de remonter en arrière dans le temps, ce type de trajectoire constitue pour Carter un tel défi qu'il envisage même que « la théorie tout entière [de la relativité générale] pourrait devoir être abandonnée » ! Par contraste, l'existence, dans les solutions trous de ver de Kerr-Newman, de singularités, c'est-à-dire de lieux où le champ de gravitation devient infini, lui paraît beaucoup moins grave, probablement en raison de la difficulté pratiquement infinie pour les atteindre et les observer… Notons dès à présent que l'ensemble des particules élémentaires que nous connaissons, lorsqu'on les représente par des structures géométriques de Kerr-Newman, ne peuvent être rangées dans la catégorie des trous noirs mais dans celle des trous de ver (nous reviendrons sur cette propriété dans le chapitre sur l'univers matière-antimatière de Dirac-Milne). La gravité répulsive et les violations des conditions d'énergie étant aujourd'hui acceptées par la majorité des physiciens dans le cas de l'inflation et de l'énergie noire, l'hypothèse que

les particules élémentaires constituent *réellement* des trous de ver est de nos jours beaucoup plus acceptable qu'elle ne l'était à l'époque où Gödel et Carter étudiaient les géométries présentant des possibilités de voyages temporels. Nous verrons d'ailleurs plus loin qu'une hypothèse similaire a récemment été lancée par Leonard Susskind et Juan Maldacena.

Soyons clair sur le fait qu'il est très probable que la géométrie de Kerr « rapide » – la notion de « rapide » signifie en gros que le moment cinétique et le mouvement de rotation sont trop importants pour qu'un trou noir puisse se former en raison de la trop grande force centrifuge – avec sa singularité non dissimulée derrière un horizon, ne va pas exister en tant que telle dans la nature : elle va très probablement polariser – faire exploser – le vide et être habillée par ces effets de polarisation. Cependant, l'étude de cette géométrie que Carter a réalisée en 1968 est très intéressante en raison de ce qu'elle nous évoque de la relation matière-antimatière. L'antimatière apparaît en effet dans la théorie quantique, selon les travaux de Dirac, de Wheeler et de Feynman, comme la matière qui remonte le temps : elle paraît donc le meilleur candidat pour réaliser la matière exotique nécessaire à la réalisation de trous de ver, même si nous allons voir qu'il semble peu probable que nous puissions réaliser des trous de ver tels que les envisage le film *Interstellar*.

En effet, comme je l'étudie plus en détail dans le dernier chapitre consacré à l'univers de Dirac-Milne, un observateur qui mesure la charge et la masse de ce qu'il faut appeler le

« trou de ver de Kerr-Newman » – par opposition à un trou noir, où la singularité serait dissimulée derrière un horizon – voit cette masse et cette charge changer de signe à chaque fois qu'il traverse la surface de l'anneau délimité par la singularité annulaire (figure ci-dessous). Cela suggère, nous y reviendrons, une description de notre Univers comportant en fait *deux* univers, que les physiciens des particules appelleraient « CP-conjugués », c'est-à-dire deux espaces faiblement couplés et reliés seulement à travers les portes microscopiques des anneaux-tunnels de Kerr-Newman des



Cette représentation très simplifiée d'un trou noir chargé en rotation, ou trou noir de Kerr-Newman, montre que la géométrie est en fait celle d'un trou de ver qui relie deux espaces : dans le premier espace, si la gravitation est attractive et la charge celle d'un électron, négative, après traversée du trou de ver de Kerr-Newman, la gravitation est devenue répulsive (la masse a changé de signe et est devenue négative) et la charge a également changé de signe, devenant égale à la charge d'un positron.

particules élémentaires, aujourd'hui en densité très faible, ce qui a pour conséquence que les deux univers conjugués sont donc très faiblement couplés, alors qu'ils l'étaient très fortement lorsque particules et antiparticules peuplaient l'espace dans un plasma de quarks et de gluons (rendez-vous en fin de chapitre pour en savoir plus – I).

Dans la représentation qu'en avait proposée Paul Dirac, l'antimatière apparaît comme de la matière d'énergie négative, ce qui, pour la relativité générale, la situe au-delà de l'énergie nulle et du *redshift* infini de l'horizon des trous noirs ; son cône de lumière et son sens du temps sont complètement renversés, notions que rendent possibles des zones comme l'ergosphère des trous noirs, cette zone où il est impossible de résister à la rotation du trou noir, mais dont il est possible de ressortir à condition de sacrifier un objet qui va devenir pour l'extérieur d'énergie négative[2]. Ce mécanisme permettant d'extraire de l'énergie d'un trou noir, découvert par Roger Penrose et de façon indépendante par Yakov Zel'dovich, a été un précurseur de la découverte du rayonnement des trous noirs, dont nous reparlerons dans le chapitre consacré à « Gravité et information ».

2. C'est un tel type de scénario que développe le film *Interstellar* où Matthew McConaughey se sacrifie avec sa capsule pour permettre à sa coéquipière d'échapper à l'attraction du trou noir Gargantua.

Dans quelle mesure l'énergie peut-elle devenir négative ?

Afin de comprendre l'opposition initiale forte à la notion de trou de ver et à toute forme d'énergie négative, il est important de revenir un instant sur les développements historiques de la relativité générale au cours des années 1960. Nous avons vu plus haut que dès 1965 Roger Penrose cherchait à déterminer à partir de quelles conditions, et en particulier de quelle concentration de matière dans un volume donné, la formation d'un trou noir doit devenir inéluctable. Sous des conditions qui paraissaient extrêmement générales, supposant en particulier que la pression ne soit pas trop négative, Penrose avait démontré qu'un trou noir et une singularité future, avec un champ gravitationnel infini, doivent être produits dès lors que l'on a dépassé une masse critique dans un volume donné. Comme, pour des trous noirs tels ceux présents au cœur des galaxies, possédant des masses pouvant atteindre des centaines de millions, voire des milliards de masses solaires, cela correspond à des densités très anodines, inférieures à celle de l'eau, le théorème de Penrose fut considéré comme une démonstration très solide de l'existence de singularités futures. Comme nous l'avons vu, Stephen Hawking eut l'idée de « passer le film à l'envers » et d'appliquer le même raisonnement aux singularités passées et à l'inéluctabilité de la singularité que nous appelons le Big Bang. Sous réserve que l'on respecte leurs hypothèses de positivité de l'énergie, cela arrête largement la discussion et la possibilité de

considérer des trous de ver, qui permettraient à un voyageur d'être expulsé de cette porte spatio-temporelle après une phase d'attraction.

Jusqu'à la fin des années 1980 (et même au-delà pour ceux qui n'étaient pas proches de la discussion sur les contre-exemples au théorème de positivité de l'énergie), les relativistes ont cru de façon quasi absolue à ces théorèmes de positivité de l'énergie[3]. Cependant, plusieurs événements vinrent graduellement saper la confiance en ces théorèmes.

La première brèche majeure vint de l'impossibilité dans laquelle se trouvaient les physiciens d'expliquer la très grande homogénéité de l'Univers dans ses instants initiaux. En effet, si on suppose qu'énergie et pression sont nécessairement positives, des régions éloignées de l'Univers n'ont aucun moyen d'avoir pu échanger des signaux physiques et égaliser leurs densités du fait qu'elle n'ont pas eu le temps de communiquer depuis le Big Bang: à supposer qu'un observateur puisse survivre dans cet environnement extrêmement chaud, son horizon serait extrêmement proche, et cela d'autant plus que l'on remonte vers le Big Bang. Ainsi, à la température et le temps de Planck, l'horizon est situé à la distance ridiculement petite de la longueur de Planck, soit environ 10^{-35} mètres, et la distance jusqu'à l'horizon ne contient alors qu'une particule environ, sans aucune corrélation possible avec toutes les autres de l'Univers. Or le bruit de fond cosmologique, par

3. Croyance basée notamment sur un théorème démontré en 1979 par Richard Schoen and Shing-Tung Yau (référence), renforcé par une démonstration différente donnée par Ed Witten deux ans plus tard.

exemple, démontre de façon remarquable que ces régions ont, au moment où l'Univers devient transparent, des différences de densité de quelques parties par cent mille, extrêmement faibles. C'est pour cette raison que les modèles d'inflation, qui avec leur pression négative permettent d'étendre de façon gigantesque les dimensions de toute région de l'Univers, ont tant séduit les physiciens. Mais, comme nous l'avons signalé, ces modèles d'inflation, avec une pression à peu près égale à la densité changée de signe, violent de façon flagrante la condition d'énergie dite « forte ». Les physiciens ont donc dû choisir entre deux maux : soit se trouver confrontés à l'énigme de l'homogénéité de l'Univers sur des régions causalement totalement disjointes, soit accepter une violation du théorème de positivité de l'énergie (*strong energy condition*, la condition d'énergie dite forte que nous avons déjà rencontrée pour la constante cosmologique d'Einstein, $\rho+3P$, dont nous avons vu qu'elle la violait de façon claire).

Il faut noter que, dès le départ, ce que l'on entendait par « positivité de l'énergie » n'était pas clair, et diverses expressions, plus ou moins contraignantes, de la positivité de l'énergie, ont été avancées : citons notamment la condition d'énergie forte, aujourd'hui abandonnée, la condition d'énergie dite « nulle[4] » par référence aux photons,

4. L'appellation fait référence au fait qu'un photon a dans tout trajet un intervalle de longueur nulle dans l'espace-temps, ce qui correspond à un temps propre – tel que mesuré par le photon – exactement nul le long de son déplacement, effectué à la vitesse de la lumière : le photon est ainsi une espèce de court-circuit dans l'espace-temps.

la condition d'énergie faible et la condition d'énergie dominante.

Nous avons vu que la condition d'énergie forte est violée si l'on suppose que la théorie de l'inflation est correcte, mais il est important de noter qu'une même violation se produit à notre époque contemporaine, et non plus dans des périodes reculées à d'énormes températures. Il est difficile en effet de ne pas croire aujourd'hui à l'existence d'une gravitation répulsive à l'œuvre à l'échelle cosmologique – ce que l'on appelle, faute d'une meilleure compréhension, « l'énergie noire[5] ». Au milieu des années 1990, dès avant la découverte en 1998 de la gravité répulsive à travers les observations de supernovæ, les tensions croissantes entre l'âge de l'Univers prédit par une cosmologie standard d'Einstein-de Sitter, environ 9 milliards d'années, et l'âge des plus vieilles étoiles observées dans l'Univers – environ 13 milliards d'années – avaient conduit les relativistes généraux à admettre l'idée que la condition d'énergie forte devait être violée. Pour l'ensemble de ces raisons – phase initiale probable d'inflation, gravité répulsive à l'œuvre actuellement dans l'Univers, incompatibilités fortes de notre Univers avec l'univers de densité critique d'Einstein-de Sitter–, la condition d'énergie forte a été graduellement abandonnée.

---

5. Qui semble proche de la constante cosmologique qu'Einstein lui-même avait postulée, laquelle semble une excellente approximation de cette composante énergie noire si l'on en croit le modèle cosmologique standard.

Le problème avec les autres expressions des théorèmes de positivité de l'énergie est que l'on connaît là aussi des violations d'essentiellement toutes d'entre elles dans le domaine quantique, et notamment par l'effet de modification de l'énergie du « vide » en présence de contraintes géométriques, dont l'effet Casimir, mis en évidence expérimentalement de façon précise aujourd'hui, constitue un exemple concret[6].

Ce type de violation de toutes les formes connues des théorèmes de positivité de l'énergie a suscité de grandes interrogations parmi les défenseurs de ces théorèmes, dont l'expression semblait pourtant initialement très rassurante. Les conditions étaient-elles violées également classiquement, ou s'agissait-il d'une violation confinée purement au domaine quantique, limitée à des effets microscopiques et des conditions aux limites qui seraient compensées dès lors que l'on prendrait en compte les sources de champ (comme les plaques métalliques dans l'effet Casimir), celles-ci possédant des contributions nettement positives ? C'est ce que Lawrence Ford et Thomas Roman ont par exemple proposé avec leur « conjecture d'intérêt quantique » – « intérêt » au sens monétaire du terme, dans le sens que la Nature nous autorise

6. Ainsi, en raison des fluctuations du « vide », deux plaques métalliques placées l'une face à l'autre avec seulement du vide entre elles, subissent une force attractive due à la modification par les plaques métalliques de l'état de plus basse énergie que l'on appelle le « vide », et dont certains modes sont supprimés en raison des plaques métalliques. Il en résulte une force attractive, très faible mais réelle et mesurée précisément aujourd'hui, entre les plaques.

à « emprunter » brièvement l'énergie négative, mais plus on s'aventure en terrain d'énergie négative, plus la compensation en énergie positive doit ensuite être forte et rapide – où, quand on étend l'intégrale sur une région suffisamment étendue, on parvient sous des conditions qui semblent assez générales à sauver les théorèmes de positivité de l'énergie.

Le problème avec cette approche est que l'on sait aujourd'hui qu'il existe des systèmes parfaitement raisonnables pour lesquels il existe également des violations classiques, et non plus quantiques, c'est-à-dire des violations de la positivité de l'énergie qui peuvent être rendues aussi grandes que l'on veut (rendez-vous en fin de chapitre pour en savoir plus – II). De ce fait, les théorèmes de positivité de l'énergie sont aujourd'hui attaqués à la fois au niveau microscopique par les effets quantiques, qui violent toutes les versions connues des théorèmes de positivité de l'énergie, et du point de vue macroscopique, au moins dans deux versions qui paraissaient initialement rassurantes du théorème.

M. Jourdain et les masses négatives

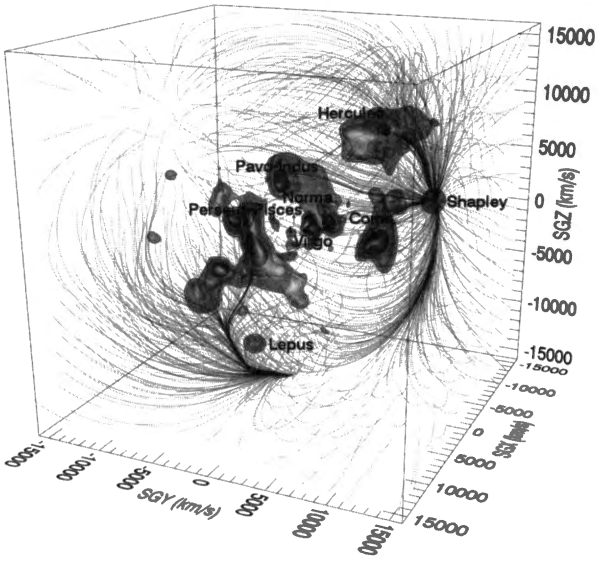
Quant aux masses négatives elles-mêmes, qui constituent l'exemple de violation la plus flagrante des théorèmes de positivité de l'énergie, Manu Paranjape, de l'université de Montréal et ses étudiants ont démontré récemment, en 2014, la possibilité de l'existence de bulles de masse négative, ces bulles étant constituées d'un fluide parfait, à la condition qu'elles soient plongées dans un univers d'Einstein-de Sitter, donc très proche du nôtre. La différence est en effet extrêmement ténue

entre un espace-temps plat – l'espace-temps de Minkowski – et un univers en expansion dont l'espace est plat, comme l'univers d'Einstein-de Sitter : il faut en effet réaliser des mesures sur plusieurs milliards d'années-lumière de distance afin de déterminer si l'on est dans l'un ou dans l'autre type d'univers. Ces bulles de masse négative, tout en respectant à la fois la condition dominante de l'énergie (*dominant energy condition*), les équations d'Einstein et les équations d'équilibre hydrostatique, sont aussi proches que l'on veut d'une solution – dite de Schwarzschild-de Sitter – possédant une masse négative. Le résultat de Paranjape et ses étudiants signifie qu'il semble possible de créer, à travers ces bulles de masse négative, des sortes de particules de masse gravitationnelle négative sans créer de catastrophe ou une instabilité plus forte que celle qui se trouve déjà présente dans la cosmologie, avec son instabilité gravitationnelle des structures. Comme nous l'avons vu, et comme Einstein l'avait assez vite découvert, l'Univers ne peut en effet pas rester statique. En paraphrasant Brassens, mourons pour l'instabilité, oui, mais de mort lente… Ce que montrent en effet Paranjape et ses étudiants, c'est qu'il est possible d'avoir des particules de masse négative dès lors qu'elles sont placées dans un univers possédant une évolution cosmologique et des temps caractéristiques d'évolution se comptant en milliards d'années.

Une idée assez similaire, même si elle ne s'appliquait pas à la notion de particule, avait été développée plusieurs années auparavant, en 2008, par Tsvi Piran, de l'université hébraïque de Jérusalem, pour les aspects théoriques, puis par

John Dubinski pour les aspects de simulation par ordinateur, où ces auteurs démontrèrent qu'il est possible de considérer les zones de sous-densité comme des structures de masse négative et que ces régions en sous-densité par rapport aux zones voisines s'étendent en repoussant leurs voisines.

D'ailleurs, comme M. Jourdain, les simulateurs de structures dans l'Univers utilisent journellement, même si c'est sans nécessairement s'en rendre compte, autant de masses positives que de masses négatives : la grande majorité de leurs programmes simulant la formation des structures dans l'univers primordial, dont on a vu qu'il était initialement très homogène, commencent par calculer la densité moyenne, bonne approximation de la densité, à partir de laquelle ils calculent l'expansion moyenne, le facteur d'échelle $a(t)$, de l'Univers. Une fois soustraite cette densité moyenne, il y a par construction autant de masses négatives (les sous-densités) que de masses positives (les sur-densités). Dans ces conditions, les simulations réalisées par Dubinski et son groupe montrent que les zones de sous-densité se comportent comme des bulles de masse négative, en expansion et qui vont venir repousser les zones de densité plus forte qui les entourent. La figure ci-contre, tirée d'un article de l'astrophysicienne Hélène M. Courtois, et de ses collaborateurs Yehuda Hoffman, Daniel Pomarède et Brent Tully, montre ainsi comment l'étude des grandes structures dans notre voisinage est décrite assez naturellement aujourd'hui en termes d'attracteur (l'attracteur de Shapley, avec son excès de masse) et de « repousseur » (le « Dipôle répulsif », avec son déficit de masse, équivalent à une masse négative).



Sur cette figure qui représente notre environnement local à l'échelle d'environ 200 mégaparsec, Hélène Courtois et ses collaborateurs ont représenté les lignes de flot sous l'action de la gravitation, qui mettent en évidence la très forte concentration des lignes de flot, et corrélativement de la matière, dans des zones de taille très réduite, là où la densité des lignes est importante. La très grande majorité de l'espace est constituée de quasi-vides, où la densité des lignes de flot est très faible, zones qui apparaissent comme des repousseurs des objets massifs et nuages situés dans leur proximité, et qui se comportent de façon effective comme des objets de densité et de masse négative.

Il faut enfin saluer ici le travail de sape du mathématicien néo-zélandais Matt Visser, de l'université de Wellington, qui a réalisé un déboulonnage systématique, l'une après l'autre, des différentes versions des théorèmes de positivité de l'énergie. Il est d'ailleurs l'auteur de deux ouvrages, *Lorentzian Wormholes* (« les trous de vers Lorentziens »),

et *Artificial Black Holes* qui cherchent à étudier les limites d'implémentation de ces concepts étranges de trous de ver et de voyage dans le temps dans notre Univers. Matt Visser a montré en particulier que des trous de ver traversables ne requièrent a priori qu'une quantité aussi faible que l'on veut de matière exotique, nom donné à une matière violant les théorèmes de positivité de l'énergie.

Carl Sagan entre en scène : le temps de la mise en œuvre

En 1988, Kip Thorne, Richard Morris et Ulvi Yurtsever publièrent deux articles importants, suscités par des discussions avec le physicien et vulgarisateur Carl Sagan, qui allaient relancer considérablement la discussion sur les trous de ver et la possibilité de les mettre en œuvre dans notre Univers, non seulement à travers des phénomènes naturels, sans intervention intelligente, ce qui est jugé improbable par la majorité des physiciens, mais également par une civilisation avancée capable de combattre leur instabilité, pour les raisons que nous allons étudier maintenant.

Avant de résumer la discussion sur la famille de trous de ver proposée par Kip Thorne et ses collaborateurs, il est utile de rappeler la signification des équations d'Einstein, que l'on peut résumer schématiquement sous la forme suivante :

$$G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu},$$

géométrie = contenu de matière.

Ces équations ont pour conséquence que, dès lors que l'on est capable de décrire une géométrie (décrite par le tenseur $G_{\mu\nu}$, dérivé de la métrique), et c'est ce que l'on fait quand on décrit une structure géométrique permanente comme celle représentée sur la figure d'un trou de ver, le tenseur impulsion-énergie ($T_{\mu\nu}$) des matériaux constitutifs du trou de ver afin de réaliser cette géométrie s'en déduit immédiatement. Notons qu'évidemment les équations d'Einstein peuvent être considérées de façon équivalente comme la contrainte inverse : dès lors que je dis quel type de matière (masse, énergie, pression) j'accumule à un endroit, la géométrie (généralement dynamique) qu'elle va engendrer est automatiquement fixée.

Concrètement, ce que proposent Michael Morris, Kip Thorne et Ulvi Yurtsever dans leurs articles de 1988, c'est une famille de géométries avec des portes du type de celles représentées sur la géométrie de Kerr au début de ce chapitre, avec diamètre et épaisseur ajustables. Pour autant, si on cherche à les réaliser en utilisant l'effet Casimir, dont on a vu qu'il constitue un exemple connu de violation des conditions de positivité de l'énergie, il va être très difficile, voire impossible, par ce seul moyen de construire un trou de ver macroscopique[7] même si

7. En effet, l'effet Casimir est une modification de l'énergie du vide induite par la présence de plaques métalliques, mais même avec des plaques métalliques de dimensions transverses égales à la distance Terre-Soleil, l'espacement entre les plaques nécessaire afin de parvenir à construire le trou de ver doit être microscopique, inférieur à la longueur d'onde de Compton de l'électron, soit de l'ordre de 10^{-13} mètre, qui est justement la distance en dessous de laquelle il devient difficile de parler

l'on peut imaginer qu'au niveau microscopique, une particule puisse s'y glisser. Dans ces mêmes articles, Morris, Thorne et Yurtsever démontrent par ailleurs que, sous des hypothèses très générales, ce type de trou de ver peut être converti en machine à voyager dans le temps.

En 1992, Hawking démontre de son côté que toute construction d'une machine temporelle dans une région finie de l'espace-temps nécessite un matériau exotique, c'est-à-dire qui présente, au moins dans certains référentiels, une énergie négative et donc viole d'une façon ou d'une autre les théorèmes de positivité de l'énergie, conclusion à laquelle parviennent également à la même époque le groupe réuni autour de Kip Thorne, bientôt élargi au physicien russe Igor Novikov et à quelques-uns de leurs étudiants, comme Gunnar Klinkhammer et Fernando Echeverria.

Les trous de ver conduisent-ils à des paradoxes ?

La question qui se pose alors à ce stade est de déterminer dans quelle mesure les deux éléments : violation de la positivité de l'énergie, construction d'une machine temporelle sont des aspects acceptables ou rédhibitoires des trous de ver. L'opinion courante des physiciens en 1988, lorsque Thorne et ses collaborateurs relancent la discussion, est qu'une machine à voyager dans le temps au sens d'un trou de ver conduit nécessairement à des paradoxes. Le paradoxe du

---

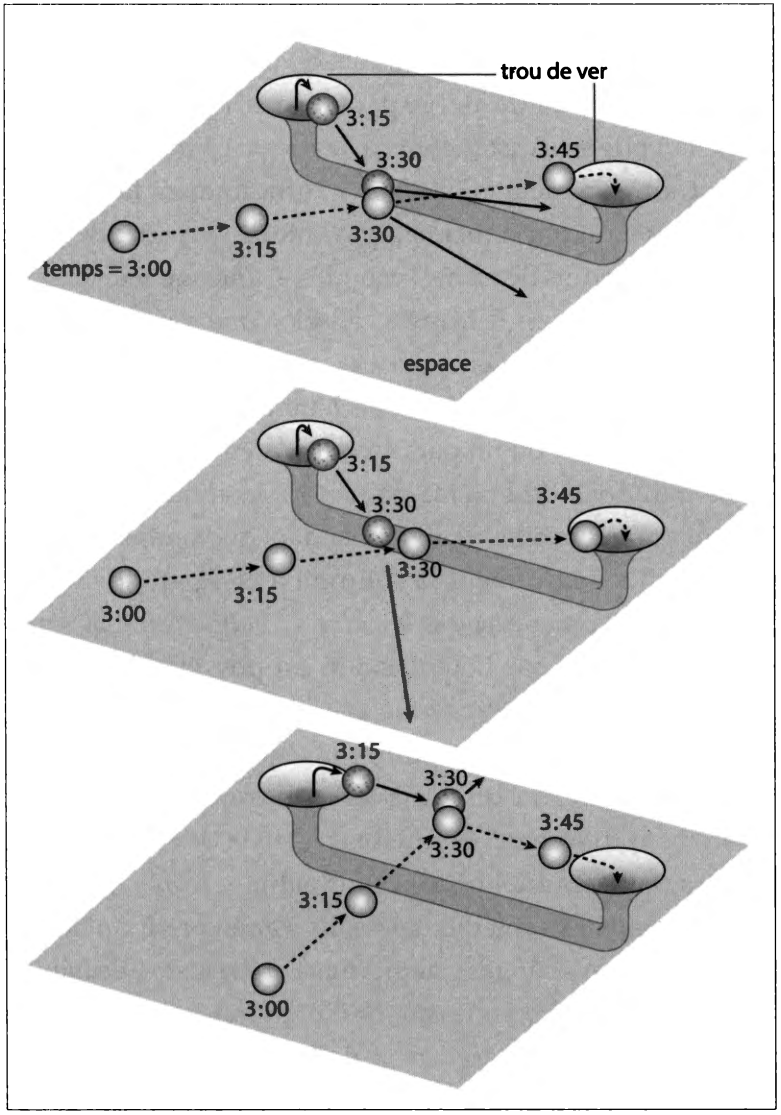
d'un électron individuel.

grand-père en est une illustration largement utilisée par la science-fiction, comme c'est le cas dans le cycle de *Retour vers le futur* de Robert Zemeckis où Marty McFly risque plusieurs fois de mettre en danger son existence même par interaction avec ses parents ou ses ancêtres plus lointains : si on sait fabriquer une machine à voyager dans le temps, qu'est-ce qui peut empêcher en effet un voyageur de remonter à l'époque où son grand-père n'a pas encore d'enfants, de le tuer et donc d'empêcher que son père et lui-même naissent, ce qui à l'évidence l'empêche de tuer son grand-père, d'où le paradoxe apparemment flagrant.

Le comportement des grands-pères, et plus généralement des individus, étant difficile à modéliser de façon précise en physique, en raison de leur très grand nombre de degrés de liberté, la question de l'existence ou non d'un paradoxe en était restée jusqu'alors à un préjugé fortement négatif des physiciens quant à la possible existence des trous de ver. Le physicien théoricien Joseph Polchinski, de l'institut Kavli de physique théorique de Santa Barbara, spécialiste renommé de la théorie des cordes que nous retrouverons dans le chapitre consacré à « Gravité et information » pour un autre paradoxe lié à l'horizon des trous noirs, apporta au groupe de Kip Thorne ce qu'il considérait comme un paradoxe imparable. Constitué à partir de systèmes dynamiques entièrement prédictibles comme des boules de billard élastiques, le paradoxe de Polchinski était bâti autour du modèle suivant de trou de ver, aisément transformable en machine à voyager dans le temps.

Imaginons un trou de ver dont la porte d'entrée et la porte de sortie sont proches l'une de l'autre, à une distance inférieure à la distance Terre-Lune qui est d'un peu plus d'une seconde-lumière. La géométrie du trou de ver dans l'espace-temps est définie de la façon suivante, représentée sur la figure ci-contre (adaptée du célèbre ouvrage de Thorne) : si un observateur pénètre par la porte d'entrée droite du trou de ver, la traversée du trou de ver s'effectue pour l'observateur qui la traverse en un temps négligeable (c'est le temps \tau qui est noté sur la figure). En revanche, vu de l'espace-temps extérieur (repéré par le temps *t*),

Dans la sous-figure du haut, une boule de billard part à 3:00 du coin en bas à gauche de la figure et entre à 3:45 dans la bouche du trou de ver située en haut à droite de la figure. Pour la boule de billard (ou tout autre voyageur qui traverserait le trou de ver), le temps de traversée du trou de ver est négligeable (moins d'une seconde, par exemple). Mais pour un observateur situé dans l'espace-temps plat extérieur au trou de ver la boule émerge à 3:15 de la bouche gauche du trou de ver, *avant* d'être rentrée dans la bouche droite du trou de ver. On suppose que la distance entre les bouches du trou de ver est suffisamment faible pour que la boule de billard puisse aller rentrer *en collision avec elle-même plus jeune* à 3:30 dans un choc qui l'empêche de rentrer dans la bouche droite du trou de ver à 3:45, ce qui semble constituer un paradoxe imparable.
La solution au paradoxe de Polchinski, trouvée par Thorne et ses collaborateurs, est représentée dans les deux sous-figures suivantes. Si on peut trouver des situations telles que celles de la première figure, effectivement paradoxales, on peut aussi trouver des situations légèrement différentes, avec *exactement les mêmes conditions initiales*, où la boule se défléchit elle-même légèrement sans s'empêcher ensuite de rentrer dans la bouche du trou de ver. On peut d'ailleurs montrer qu'il existe non pas une seule, mais une *infinité* de telles possibilités, ce qui introduit une multiplicité de solutions et une indétermination dans un système qui apparaissait initialement l'archétype même du système déterministe. ▶


trou de ver
3:15
3:30
3:45
3:15
3:30
temps = 3:00
espace
3:15
3:30
3:45
3:30
3:00
3:15
3:15
3:30
3:45
3:30
3:15
3:00

l'observateur ressort du trou de ver par la porte située à gauche sur la figure *trente secondes avant d'y être entré*. La sortie du trou de ver est donc annonciatrice de l'entrée, trente secondes plus tard, de l'observateur par la porte du trou de ver située à droite. Le paradoxe de Polchinski est bâti sur le fait que si la distance entre les portes A et B du trou de ver est suffisamment faible – par « suffisamment faible », on entend qu'il est physiquement possible de se rendre de l'une à l'autre en moins de trente secondes –, une boule de billard peut être lancée vers le trou de ver selon une trajectoire qui a pour conséquence qu'elle rentre en collision avec elle-même et est déviée de sa route, l'empêchant ainsi de rentrer dans le trou de ver – d'où un paradoxe apparemment flagrant.

Le paradoxe de Polchinski suscita la consternation de Thorne et de ses collaborateurs pendant quelques semaines, avant qu'ils ne trouvent la solution à ce « paradoxe » : en effet, en gardant *exactement les mêmes conditions initiales* que celles proposées par Polchinski, il est possible de trouver *une autre collision entre la boule et elle-même* qui la dévie de façon moins forte, avec pour conséquence que la boule rentre dans le trou de ver avec une trajectoire d'entrée légèrement différente, permettant juste la déviation douce requise pour rendre l'histoire compatible. Après quelques jours de travail supplémentaires, ils s'aperçurent qu'en fait cette solution n'était pas unique, mais qu'il existe une *infinité* de telles solutions pour les mêmes conditions initiales. Donc, non seulement le « paradoxe » de Polchinski n'est pas un paradoxe, mais il permet une multiplicité de solutions et

un caractère aléatoire de l'histoire de la boule de billard, système qui semble pourtant au premier abord l'archétype du système déterministe. Il est possible de répéter l'analyse pour un fluide continu, comme une onde électromagnétique ou de l'eau, au lieu de boules de billard, et Thorne et son groupe ont indiqué que la situation est dans ce cas extrêmement similaire à l'indétermination qui est rencontrée dans la mécanique quantique[8].

Ainsi, à partir d'un paradoxe apparent, il se pourrait que Thorne et ses collaborateurs aient trouvé un *mécanisme déterministe localement* – mais non déterministe globalement, dès lors que l'on autorise le passage par le trou de ver –, permettant d'expliquer (si l'on suppose l'existence de trous de ver) le comportement *aléatoire* des systèmes quantiques. Ce point est évidemment fondamental et une conjecture similaire sera proposée par Leonard Susskind et Juan Maldacena en 2013. Nous y reviendrons.

Les trous de ver existent-ils réellement dans la Nature ?

À ce stade de la discussion, peut-on croire à l'existence de trous de vers macroscopiques ? La réponse est que de telles structures, qui nécessitent en pratique des masses énormes et des violations conséquentes de la positivité de l'énergie

8. Thorne et son groupe annoncent ce résultat dans une de leurs publications en faisant référence à un article non publié, mais il ne semble pas que ce résultat important ait ensuite été publié par ces auteurs.

pour être construites dans notre Univers, ont, dans l'esprit des physiciens, extrêmement peu de chance d'exister à l'état naturel. Conscients de leur improbabilité, Thorne et ses collaborateurs avaient d'ailleurs reformulé la question dans le sens de celle qui est posée dans l'ouvrage *Contact* de Carl Sagan : une civilisation technologiquement très avancée peut-elle avoir les moyens de créer – et surtout de maintenir – de telles portes dans l'espace-temps ?

Sans avoir la réponse définitive à cette question, je pense que l'on peut justifier la réponse majoritairement négative des physiciens à cette question par les deux éléments suivants de réponse : si une telle porte pouvait être créée, elle pourrait selon toute probabilité être utilisée pour voyager dans le passé, même si elle ne permettrait a priori pas de revenir au-delà de la date de création de la porte, ce qui semble indiquer que soit les voyageurs dans le temps sont rares, soit ils sont très discrets, soit qu'aucune civilisation n'a encore réussi à créer une telle porte. De nombreux films de science-fiction font l'hypothèse que de tels voyages sont possibles, comme c'est le cas dans *Premier Contact*, mais les physiciens ne croient généralement pas à la possibilité de tels voyages dans le passé d'objets macroscopiques.

Par ailleurs, cette perte de déterminisme associée à la création d'un trou de ver signale pour les physiciens l'intrusion d'une instabilité. Et c'est bien ce que montre l'analyse de Thorne et de ses collaborateurs : juste au moment où un trou de ver se forme et va permettre d'aller plus vite que la vitesse de la lumière, on trouve toujours à ce moment-

là des photons qui vont voir leur énergie amplifiée à chaque passage par le trou de ver et qui viennent superposer leur énergie à eux-mêmes, avec un effet de laser qui diverge très rapidement – à la limite instantanément –, contrebalançant les effets de la matière exotique, d'énergie ou de pression négative, que l'on a assemblée à grand-peine pour constituer le trou de ver. En d'autres termes, il semble extrêmement difficile, et probablement impossible, que le trou de ver ne se détruise pas lui-même dès qu'il est créé…

En revanche, j'ai indiqué plus haut qu'il semble assez raisonnable, voire probable, que des trous de vers existent à une échelle microscopique et on peut même supposer que les particules élémentaires qui sont des fermions sont des trous de ver. C'est en tout cas le sens du programme qu'a suivi pendant plusieurs année Brandon Carter dans son étude des « vortons », structures géométriques stables – dont John Wheeler avait conjecturé l'existence, les appelant quant à lui des « géons » –, qui permettraient de fournir une interprétation géométrique, comme une sorte de nœud dans l'espace-temps, aux particules élémentaires. Nous avons signalé également dans le chapitre sur les trous noirs que les physiciens mathématiciens Arcos et Pereira avaient mis en évidence la très forte analogie entre les trous de ver de Kerr-Newman et des particules élémentaires, avec les mêmes nombres quantiques masse charge et spin, et avec la même structure de fermions, avec *deux univers* couplés à travers les anneaux de Kerr-Newman qu'abrite chaque particule – et non pas un seul univers comme nous

sommes habitués à le concevoir. Enfin, j'indiquais plus haut que le lien entre trou de ver et mécanique quantique, que nous avons esquissé à travers la solution au « paradoxe » de Polchinski, a été revivifié en 2013 par la conjecture provocante mais très intéressante des deux théoriciens des cordes Leonard Susskind et Juan Maldacena, qu'ils ont résumée dans la formule « ER = EPR », ER faisant référence au trou de ver d'Einstein-Rosen dont nous avons parlé plus haut, et EPR faisant référence à un autre paradoxe apparent, le paradoxe posé la même année 1935 – décidément très productive – par le même Einstein et ses étudiants Boris Podolski et Nathan Rosen. En effet, Susskind et Maldacena ont avancé des arguments permettant d'établir un lien entre les propriétés des trous noirs dits « extrémaux » – des trous noirs au bord de se former – et un système quantique de deux particules dans un état pur, dont les particules sont dans un état de corrélation maximale entre elles, justifiant l'identification entre les concepts de trou de ver et de corrélation quantique, pourtant initialement considérés comme entièrement différents.

Ce qu'il faut retenir

Lancée dès 1935 par Albert Einstein et son collaborateur Nathan Rosen, la discussion sur la possible existence des trous de ver, ces ponts traversables qui constitueraient des sortes de raccourcis dans l'espace-temps, s'est poursuivie jusqu'à notre

époque, avec de longues interruptions, parfois de plusieurs dizaines d'années. Après la découverte en 1963 et en 1965 des solutions de Kerr et de Kerr-Newman, qui peuvent représenter trous noirs comme trous de ver en rotation et chargés, l'analogie que présentent ces solutions avec des particules élémentaires a été notée par Brandon Carter, sans que le lien de ces solutions avec la symétrie matière-antimatière ait été noté avant la fin des années 1990.

Mais c'est sans doute à Kip Thorne, Igor Novikov et à leur collaborateurs, puis à Matt Visser, que l'on doit la renaissance des discussions autour des trous de ver. Si leur étude semble montrer que la construction de trous de ver macroscopiques présente d'énormes difficultés, peut-être même des impossibilités physiques, leurs travaux ont en revanche permis de faire apparaître que les trous de ver ne conduisent pas à des paradoxes, comme on l'a longtemps cru, mais au contraire à un comportement qui s'apparente à celui, indéterministe et non local, de la mécanique quantique. La découverte en 1998 de ce que l'on appelle faute de mieux l'« énergie noire », composante majoritaire de l'Univers qui constitue la source d'une gravité répulsive à l'œuvre sur des distances cosmologiques, a en tout cas montré que des composantes exotiques, c'est-à-dire violant les conditions de positivité de l'énergie, étaient à l'œuvre dans l'Univers.

Si les trous de ver macroscopiques semblent une espèce extrêmement instable et probablement de construction impossible, il se pourrait en revanche que ces objets

existent au niveau microscopique, idée que l'on trouve dans l'identification, avancée par Brandon Carter, entre les particules élémentaires et des vortons, c'est-à-dire des trous de ver microscopiques que l'on parviendrait à rendre stables. Le fait que les trous de ver traversables autorisent, au moins à ce niveau microscopique, des trajets permettant un retour en arrière dans le temps ne devrait en tout cas pas inquiéter outre mesure le physicien des particules qui sait que l'antimatière est la matière qui remonte le temps, et qu'au niveau microscopique et quantique la Nature réalise la somme de tous les trajets possibles, même ceux qui remontent le temps ou dépassent la vitesse de la lumière...

Récemment enfin, le lien possible entre trous de ver et corrélations quantiques a été renforcé par la conjecture de Juan Maldacena et de Leonard Susskind « ER = EPR » qui établit un lien fort entre le trou de ver d'Einstein-Rosen (ER) et les corrélations quantiques et leur non-localité (Einstein-Podolsky-Rosen = EPR).

Le rôle possible de l'antimatière dans le domaine de la cosmologie sera étudié plus en détail dans le dernier chapitre consacré à l'univers de Dirac-Milne.

Pour aller plus loin

I - Si Carter lui-même n'a jamais mentionné le lien possible de ces renversements de la charge et de la masse avec la transformation matière-antimatière, ce qu'ils évoquent assez furieusement pour un physicien des particules, Héctor Ivan Arcos et Jose Geraldo

Pereira, de l'université de Sao Paulo, que nous avons cités plus haut, ont montré qu'il existe en fait quatre solutions de Kerr-Newman physiquement différentes, tout comme les quatre états du système électron-positron dans l'équation de Dirac, que ces solutions présentent des symétries sous les rotations qui ressemblent fortement à un spin – moment cinétique intrinsèque de la particule – demi-entier, avec en particulier la propriété que ce système nécessite une rotation de 4π radians, soit deux tours complets, pour retomber sur lui-même. Ils ont montré par ailleurs que son évolution est gouvernée par l'équation de Dirac, qui traite justement des systèmes de fermions comme les quarks et les leptons, à spin demi-entier et relativistes. La correspondance et le lien entre la géométrie de Kerr-Newman et une paire particule-antiparticule doivent donc être considérés comme extrêmement profonds, et pas seulement comme une analogie superficielle.

II - C'est le cas par exemple pour les systèmes impliquant des champs dits « scalaires ». Pendant longtemps, les seuls systèmes scalaires que l'on connaissait étaient des systèmes exotiques de particules comme les kaons, instables et composés de quarks et d'antiquarks, donc pas de nature fondamentalement scalaire si ces particules étaient étudiées avec une résolution spatiale très fine. Mais le modèle standard prédit l'existence du champ de Higgs, particule scalaire, fondamentale à la construction du modèle standard de physique des particules. La découverte de la particule de Higgs au CERN en 2012 a donc constitué un clou supplémentaire dans le cercueil des théorèmes de positivité de l'énergie, déjà bien mis en danger par toute tentative d'explication en terme de champ, comme la quintessence ou l'inflaton, de l'accélération de l'expansion de l'Univers. La situation est peut-être pire encore du fait qu'il apparaît aujourd'hui que ce Higgs est dangereusement proche de rendre le vide métastable ou instable. En effet, avec ses paramètres physiques mesurés (masse du quark top, constante de couplage

et masse du boson de Higgs), le vide électro-faible du modèle standard de physique des particules pourrait bien ne pas être l'état fondamental de vide, c'est-à-dire l'état d'énergie le plus faible.

La découverte des ondes gravitationnelles

La découverte, un siècle après Einstein

Le 14 septembre 2015 à 11 h 50 du matin, heure de la Louisiane, l'un des deux détecteurs de LIGO, dont les bras mesurent chacun 4 kilomètres de longueur (photo), enregistre une infime vague de l'espace-temps, résidu d'une gigantesque explosion à une distance d'environ un milliard trois cents millions années-lumière, soit environ 10^{25} mètres ou encore dix mille milliards de milliards de kilomètres. Sept millisecondes plus tard, un signal similaire est enregistré dans le deuxième détecteur de LIGO, dans l'État de Washington, au nord-ouest des États-Unis. Presque exactement un siècle après la prédiction par Einstein de leur existence, qui doutait que les ondes gravitationnelles soient jamais détectables, l'ère de l'astronomie gravitationnelle s'est ouverte.

Les deux détecteurs de LIGO avaient en effet détecté la trace infime d'une catastrophe cosmique qui s'est déroulée

plus d'un milliard d'années plus tôt : deux astres effondrés sur eux-mêmes, deux trous noirs d'une masse d'environ trente fois la masse du Soleil pour l'un et de 36 masses solaires pour l'autre, qui tournaient très probablement l'un autour de l'autre depuis des milliards d'années en perdant tout doucement leur énergie, se sont rapprochés de plus en plus rapidement, jusqu'à atteindre une bonne fraction de la vitesse de la lumière, avant de mourir dans un chant du cygne cataclysmique, pour devenir en un petit dixième de seconde un seul trou noir d'environ 63 masses solaires. Voilà qui constitue une sorte de déchirure extrême de l'espace-temps sur une dimension, un véritable trou, d'environ 200 kilomètres (2×10^5 mètres) d'extension, la taille de la déchirure étant proportionnelle à la masse du trou noir résultant[1].

Le déchirement fantastique de l'espace-temps au cours de cet instant final a consommé plus de 3 masses solaires en un dixième de seconde[2]. Pendant cette fraction de seconde finale que dure la coalescence, qui va voir les deux trous noirs fondre en un seul, l'énergie émise est phénoménale, ce système mourant surpassant alors la puissance émise par l'ensemble de toutes les étoiles de l'Univers observable, dans un rayon de plus de dix milliards d'années-lumière !

---

1. Mais, comme nous le verrons plus précisément dans le chapitre sur le principe de Mach, cette distorsion extrême de l'espace-temps s'atténue comme l'inverse de la distance.

2. Résultant en un trou noir d'une masse inférieure à celle de la somme des masses des trous noirs du système.

Bien que la distorsion de l'espace-temps de cette catastrophe lointaine ne change la distance entre la Terre et le Soleil – environ 150 millions de kilomètres – que du rayon d'un atome, soit un dix-milliardième de mètre environ, la sensibilité de l'instrument LIGO est largement suffisante pour que le signal soit très nettement au-dessus du niveau de bruit – par plus d'un facteur 20. Ce qui fait que quelques minutes plus tard cette coïncidence déclenche un message d'alerte à l'ensemble des équipes de LIGO et de Virgo. Commence alors un long processus de vérification de plusieurs mois qui mènera finalement à la publication de la découverte, le 16 février 2016: la première détection, historique, d'une onde gravitationnelle (rendez-vous à la fin de ce chapitre pour plus de détails – I).

C'est le 11 février 2015, simultanément au siège de la NSF à Washington, sur le site de Virgo à Pise et au siège du CNRS à Paris, qu'est faite l'annonce de la découverte, dans une immense émotion, après plus de cinquante ans de développements expérimentaux, dont plus de vingt ans d'efforts pour les deux projets LIGO et Virgo, et plus de cinquante ans après les expériences pionnières du physicien Joseph Weber.

Les ondes gravitationnelles, rides sur l'espace-temps

Mais revenons un instant sur la nature des ondes gravitationnelles. De la même manière qu'en électromagnétisme le mouvement accéléré de charges électriques conduit à

l'émission d'un champ électromagnétique qui se propage à la vitesse de la lumière, Einstein réalisa très vite, dès 1916, que sa théorie de la gravitation, la relativité générale, prédisait l'existence d'un phénomène similaire d'émission d'ondes gravitationnelles dans le cas d'un mouvement de masses accélérées.

On apprend au lycée qu'en électromagnétisme des charges immobiles produisent un champ statique, appelé « champ de Coulomb », qui décroît comme $1/r^2$, c'est-à-dire proportionnellement à l'inverse du carré de la distance r. Il est important de noter que ce champ statique ne correspond *pas* à un transport ou à une émission d'énergie, et qu'il décroît trop rapidement avec la distance pour être détectable à grande distance. Pour remplir cet objectif, le champ d'émission électromagnétique dont nous parlons, dans le cas d'un mouvement accéléré de charges, doit présenter une décroissance beaucoup moins rapide, le signal variant comme l'inverse de la distance, soit en $1/r$, auquel cas de l'énergie est émise et peut être transportée à grande distance. C'est par exemple le cas des ondes hertziennes, qui ont eu une importance phénoménale dans les communications et qui résultent du mouvement accéléré de charges électriques, généralement avec le support d'une antenne. Quant à la vitesse de propagation du signal, la particule quantique associée au champ électromagnétique, le photon, étant de masse nulle, l'interaction se propage à la vitesse de la lumière.

En gravitation, a-t-on également la possibilité d'émettre des ondes ? S'il a semblé assez vite presque évident que dans ce cas

également des ondes allaient être émises, il y a deux grandes différences avec le cas électromagnétique, qui rendent très difficile la détection des ondes gravitationnelles. D'une part, la faiblesse extrême de la gravitation qui ne représente entre deux protons qu'environ 10^{-38} de la force électromagnétique qui s'exerce entre ces deux particules. La grande difficulté consistera alors à mettre en œuvre des masses suffisantes (l'analogue des charges en relativité générale) à des vitesses notables par rapport à la vitesse de la lumière. Le fait que le potentiel ne s'atténue pas exponentiellement avec la distance[3], ce qui est le cas à la fois dans l'électromagnétisme et dans la gravitation, où le potentiel varie comme $1/r$, implique que le vecteur de propagation, l'élusif graviton, s'il existe, est de masse nulle et se propage donc lui aussi à la vitesse de la lumière.

D'autre part, il est beaucoup moins simple de calculer les formes d'ondes gravitationnelles résultant de la collision ou de l'accélération de deux masses que dans le cas des signaux de l'électromagnétisme, cela en raison de la non-linéarité de la théorie de la gravitation d'Einstein. Calculer les formes de signaux émis lors des phases finales de coalescence de deux trous noirs, dans les différentes configurations de masses des deux trous noirs, a ainsi nécessité des années

3. Lorsque la particule vecteur d'interaction possède une masse m, l'atténuation du potentiel en fonction de la distance est exponentielle, avec une atténuation qui est d'autant plus forte que la masse du vecteur est élevée, avec la forme dite « de Yukawa » $\exp(-mr)/r$ où, pour simplifier, les constantes fondamentales $\hbar$ et c ont été prises égales à 1. Dans le cas où $m = 0$, on voit que l'atténuation exponentielle disparaît et que l'on retrouve le potentiel newtonien ou électrostatique.

de calcul sur de puissants calculateurs, et encore n'a-t-on abouti qu'à des solutions approchées. Pas question donc de recalculer en temps réel les formes de signaux attendus, tant la difficulté du calcul reste énorme même pour les plus puissants calculateurs actuels. Au fil des années, les équipes de LIGO et Virgo ont donc constitué une collection de signaux modèles (*templates*) pour un très grand nombre de configurations de masses des deux trous noirs – plusieurs centaines de milliers de formes sont disponibles dans leur catalogue des ondes de fin de vie des systèmes binaires ! Les chercheurs ont également réalisé des bibliothèques de formes d'ondes pour les systèmes binaires comprenant une étoile à neutrons et un trou noir, ainsi que pour les systèmes binaires comprenant deux étoiles à neutrons, même si l'incertitude est alors plus grande en raison de la physique nucléaire mal connue à ces densités extrêmes.

Restait à comprendre quels événements, nécessairement très violents, étaient nécessaires pour que l'on ait une chance raisonnable de les observer avec des détecteurs terrestres d'ondes gravitationnelles, et surtout à quel rythme on allait pouvoir les observer (rendez-vous en fin de chapitre pour davantage de détails – II)…

Détecter les ondes gravitationnelles

Détecter une différence de chemin de la taille d'un atome (un dix-milliardième de mètre) sur la distance Terre-Soleil (150 millions de kilomètres) peut sembler un défi insensé,

comme Einstein lui-même n'était pas loin de l'estimer. Retraçons donc les essais, qui s'étendent sur plus de cinquante ans, de lutte souvent ingrate et toujours acharnée afin de parvenir à atteindre cette sensibilité, efforts qui ont finalement permis ces premières détections à la fin de l'année 2015.

Premiers essais : les barres de Weber

La première méthode crédible de détection est due à Joseph Weber, de l'université de Maryland, qui va concevoir au cours des années 1950 ce que l'on appellera ensuite les « barres de Weber ». Son idée est de constituer un système résonnant, assez similaire à un verre de cristal qui résonne si l'on excite sa fréquence, mais ici beaucoup plus sensible encore, afin de détecter les infimes vibrations de l'espace-temps. Weber réalise pour cela une étude d'optimisation des matériaux résonnants. Il découvre assez vite que c'est ce que l'on appelle le « module d'élasticité » du matériau constituant l'antenne qui constitue le bon critère, et l'aluminium est un matériau qui constitue un bon compromis performance-coût. Weber choisit comme forme d'antenne une barre cylindrique de quelques tonnes, d'un diamètre d'un mètre et d'une longueur de deux mètres, ce qui fournit des fréquences de résonance un peu aiguës – de quelques kilohertz – mais raisonnablement adaptées aux phénomènes que l'on veut « écouter », c'est-à-dire la phase finale de formation de deux trous noirs de quelques masses solaires en coalescence (rendez-vous en fin de chapitre pour en savoir plus – III).

Weber revendique une première série de détections en 1969, qu'il confirme en 1970. Ces observations correspondent à des vibrations en coïncidence entre deux de ses barres, séparées d'environ deux kilomètres dans un premier temps. Afin de s'assurer que les vibrations ne sont pas dues au bruit ambiant sismique, les deux barres sont bientôt séparées d'un peu plus de 1 000 kilomètres, une des antennes ayant été installée par Weber sur le site du laboratoire national d'Argonne. Mais si Weber revendique quelques dizaines de détections dans sa première publication, ce sont plus de 300 qui sont annoncées dans la deuxième, Weber précisant même qu'un nombre significatif de ces 300 détections semblent pointer préférentiellement vers le centre galactique. L'importance potentielle énorme de la découverte requérait que l'estimation de la probabilité que de tels événements se produisent en raison de coïncidences dues au bruit des détecteurs soit estimée de façon précise, or cette estimation est réalisée par Weber selon des critères très subjectifs. Le juge de paix de la physique étant en définitive l'expérience, alors que l'intérêt de la communauté scientifique était initialement fort, le doute sur les résultats de Weber s'accrut plus fortement encore lorsque personne ne fut capable de reproduire ses observations, alors que plusieurs groupes s'étaient lancés dans la construction de barres du même type. Si bien qu'au bout de quelque temps, Weber fut assez largement discrédité[4].

4. Weber refera une annonce du même type, cette fois sur la détection de neutrinos de réacteurs, particules remarquablement élusives mais dont Weber prétendait qu'elles interagissaient de façon cohérente, donc

Après cet échec, plusieurs groupes, notamment en Italie, cherchèrent néanmoins pendant plus d'une vingtaine d'années, jusqu'au début des années 2000, à reprendre le flambeau porté par Weber en améliorant la sensibilité des capteurs piézo-électriques, en faisant croître la taille du dispositif, ainsi qu'en abaissant sa température. Les deux essais les plus ambitieux dans cette technique furent sans doute la barre Nautilus de l'INFN à Frascati (Italie), de dimensions légèrement supérieures à celle de Weber (avec une longueur de trois mètres pour un diamètre d'un mètre, et donc une fréquence de résonance légèrement plus faible, environ 900 hertz), mais surtout à une température qui n'est que d'un dixième de degré au-dessus du zéro absolu – alors que la température ordinaire est d'environ 300 degrés absolus – ainsi que MiniGRAIL, détecteur sphérique – donc sensible de façon uniforme quelle que soit la direction – refroidi à une température encore plus faible, de vingt millièmes de degré seulement au-dessus du zéro absolu. Même si MiniGRAIL possède en principe des performances proches de celles des interféromètres laser LIGO et Virgo, l'opinion générale est que ces détecteurs ont atteint leur limite pratique de sensibilité, avec l'important défaut, déjà

---

très renforcée, avec ses détecteurs cristallins. Après la nouvelle vague d'intérêt que suscita cette nouvelle annonce, plusieurs physiciens montrèrent que Weber avait fait une analyse incorrecte en mécanique quantique, ce qui acheva de détruire sa réputation scientifique. Si Joseph Weber était un très bon ingénieur et un physicien pionnier, il s'était révélé un piètre statisticien.

signalé, que leur bande passante, c'est-à-dire les fréquences auxquelles ces barres sont sensibles, est assez étroite.

Détection indirecte des ondes gravitationnelles : PSR B1913+16

En parallèle des développements des détecteurs d'ondes gravitationnelles, Joseph Taylor et Russel Hulse étudiaient dans le même temps à l'université de Princeton, sur une durée de plusieurs années, un système qui a permis de se convaincre raisonnablement, même si c'est de façon indirecte, de l'existence des ondes gravitationnelles. Dans ce système, on mesure non pas directement les ondes gravitationnelles elles-mêmes, mais l'augmentation de la fréquence du système binaire. Ce rapprochement des deux membres du système est prédit de façon très précise par la relativité générale, qui décrit la perte d'énergie continue par émission d'ondes gravitationnelles lorsque deux objets massifs sont en rotation l'un autour de l'autre. Ces pertes d'énergie sont mesurées à travers les périodes de pulsars binaires et s'effectuent sur des échelles de temps très longues, le changement extrêmement lent de fréquence d'émission du pulsar pouvant être suivi avec une extrême précision. Pour certains de ces systèmes, la stabilité est d'ailleurs telle que l'on peut imaginer de les utiliser comme des références de temps plus précises même que celles des horloges atomiques utilisées sur Terre comme bases de temps. Cette extrême stabilité de l'horloge des pulsars permet en retour d'envisager d'utiliser la variation sur de

courtes périodes de temps de leur fréquence pour effectuer une mesure des ondes gravitationnelles elles-mêmes : ces dernières, en distordant très légèrement l'espace-temps, induisent ces petits déplacements de fréquence.

L'idée de Taylor et de Hulse était que si la perte d'énergie correspondait très précisément à ce que prévoit la théorie de la relativité générale pour le système binaire en question, on aurait une très bonne indication à la fois que la théorie est correcte et qu'il y a bien émission d'ondes gravitationnelles au taux prévu. De fait, dès la fin des années 1980, dans un programme poursuivi ensuite par Taylor au début des années 1990, Taylor et Hulse démontrèrent que la modification de fréquence du système binaire PSR 1913 +16 était parfaitement compatible – à mieux que un pour mille – avec ce que l'on attend de la relativité générale. Pour ce travail expérimental très novateur et de longue haleine, proposé très tôt par le physicien théoricien français Thibault Damour, Taylor et Hulse reçurent le prix Nobel en 1993[5].

5. En fait, au-delà des premières années de mesures, Hulse n'avait pas du tout poursuivi dans le domaine de sa thèse et de la relativité générale, mais était devenu un ingénieur informaticien au PPPL (laboratoire de physique des plasmas de Princeton), voisin de l'université. Mais le jury Nobel eut sans doute peur de reproduire l'histoire de Jocelyn Bell et de la découverte des pulsars – objets qui serviront à Taylor et Hulse pour effectuer ce test remarquable de la relativité générale. Dans cette découverte, Antony Hewish, qui n'était que le superviseur assez lointain des mesures réalisées par Jocelyn Bell, reçut pour cette découverte un prix Nobel partagé avec Martin Ryle, alors que Jocelyn Bell ne fut pas associée au prix.

Dès le début des années 1990, la plupart de physiciens étaient convaincus de l'existence des ondes gravitationnelles en raison de la perte d'énergie pratiquement continue dans le système PSR 1913 +16. Mais, bien sûr, le rêve du physicien était d'observer le signal en temps réel de la phase finale de coalescence entre deux trous noirs, dans les dernières millisecondes de la vie du système binaire…

Les interféromètres laser, LIGO et Virgo

Avec le piétinement et la limitation des performances des barres résonnantes de Weber, un changement de technique dramatique fut suggéré par la remarquable expérience du Français Alain Brillet et du Britannique John Hall, utilisant un interféromètre laser afin de tester l'isotropie de l'espace-temps à la fin des années 1970. Cette expérience très précise donna l'idée à plusieurs chercheurs, dont Alain Brillet lui-même, de développer cette technique d'interférométrie à une échelle supérieure à un kilomètre afin d'apporter enfin le gain de sensibilité décisif qui permettrait à la fin de l'année 2015 la découverte des ondes gravitationnelles. L'idée de l'interféromètre est simple : il s'agit de créer une sorte de « piège à lumière », où la lumière rebondit sur les miroirs en étant littéralement piégée comme dans une boîte. Mais si la taille de la boîte change ne serait-ce qu'un tout petit peu, un peu de lumière va pouvoir s'échapper, signant la déformation de l'espace.

Comme souvent, la possibilité d'un tel interféromètre avait été notée plus de vingt ans auparavant, dès le milieu

des années 1950, par Felix Pirani, qui n'y avait pas donné suite. Joseph Weber lui-même avait également assez brièvement considéré cette idée, sans jamais la publier, ce qui ne l'empêcha pas d'en parler à Robert Forward, l'un de ses anciens étudiants qui, reprenant cette idée, construisit le premier interféromètre laser. S'il était de sensibilité très inférieure aux interféromètres actuels, cet interféromètre démontrait que ce type d'interféromètre était de bande passante large, c'est-à-dire capable de détecter sans déformation des signaux complexes à l'échelle du kilohertz. Malheureusement, Forward, à l'issue du test de ce premier prototype, n'obtint pas de financement lui permettant d'améliorer son dispositif, qu'il dut donc abandonner.

Mais bientôt le Britannique Ronald Drever et l'Américain Kip Thorne parviennent à décider la National Science Foundation de se lancer dans l'aventure du financement du projet LIGO, plusieurs années avant que les Français et les Italiens ne parviennent eux aussi à recueillir un soutien financier de leurs organismes, le CNRS en France et l'INFN en Italie, pour le projet Virgo. Démarrant la mort dans l'âme plusieurs années après leurs compétiteurs américains, Alain Brillet, accueilli au Laboratoire linéaire d'Orsay, et Adalberto Giazotto, de l'université de Pise, concentrèrent leurs efforts sur un système multi-étages d'isolation des vibrations pour Giazotto, qu'il développa à Pise, quatre cents ans après Galilée, alors qu'Alain Brillet s'investit dans le développement de lasers très stables et de haute puissance, afin d'augmenter la sensibilité de l'interféromètre.

Le projet LIGO, démarré avant Virgo, comprend bientôt deux interféromètres, l'un à Livingston en Louisiane, le second sur le site de Hanford, dans l'État de Washington (à ne pas confondre avec la capitale des États-Unis), situés à un peu plus de 3000 kilomètres de distance l'un de l'autre. Les deux interféromètres comportent deux bras orthogonaux de 4 kilomètres de longueur[6] alors que le projet franco-italien Virgo devra se contenter de bras de 3 kilomètres et d'un seul interféromètre. Les Européens partent par ailleurs désunis, car la Max-Planck allemande, alliée aux Anglais du Science and Technology Facilities Council (STFC), se lance dans un prototype de 600 mètres, GEO600, après l'échec de leur demande de financement d'un projet de 3 kilomètres comme Virgo.

En dépit de cette dispersion des efforts européens, en quelques années, la progression impressionnante en sensibilité sur une large partie du spectre en fréquence, dans la bande de fréquence de 100 hertz à 1 kilohertz, montre, après des débuts difficiles, que la technique progresse rapidement et va sans doute permettre d'atteindre la sensibilité requise pour une première détection. Et en 2010, même si les premières campagnes simultanées de LIGO et de Virgo n'ont encore permis de détecter aucun événement d'ondes gravitationnelles, la progression est néanmoins déjà impressionnante, de plus d'un facteur 100000 par rapport

6. Ils sont une version gigantesque d'un interféromètre de Fabry-Pérot – sorte de boîte résonnante pour la lumière, créée par les Français Charles Fabry et Alfred Pérot.

aux barres de Weber ! Même si la première génération des interféromètres de LIGO et Virgo n'a pas permis de détecter de candidat convaincant, la décision est prise, en dépit ou grâce à quelque vingt ans d'efforts, de lancer la construction d'une seconde génération d'interféromètres, utilisant les mêmes immenses tubes à vide qui représentent une large part du coût de l'installation, afin de gagner un facteur d'environ 10 en sensibilité. Ce qui peut sembler peu, mais qui, du fait que le signal varie comme l'inverse de la distance à la source, doit permettre une augmentation d'un facteur 1 000 environ du volume utile de détection, ce volume utile variant comme le cube de la sensibilité (rendez-vous en fin de chapitre pour en savoir plus – IV).

Premières observations directes : GW150914 et GW151226

Partis avec deux ans de retard sur les équipes américaines, les équipes d'Advanced Virgo n'étaient pas encore en prise de données au moment où la première observation d'ondes gravitationnelles est détectée par les interféromètres de LIGO, en septembre 2015. Comme nous l'avons dit plus haut, la découverte n'est annoncée que le 11 février 2016, après plusieurs mois de vérification, même si l'analyse est grandement simplifiée par l'excellent rapport signal/bruit, exceptionnel pour une première découverte[7]. Surprise : il s'agit d'un événement aux caractéristiques très inattendues.

7. Ce rapport est un facteur environ 23 au-dessus du niveau du bruit – alors que le seuil de découverte acceptée par la communauté des physiciens se situe aux alentours d'un facteur 5 environ.

Revenons maintenant sur les caractéristiques de cette première détection.

Le 14 septembre 2015, à 9 heures 50 minutes et 45 secondes en temps universel, les deux interféromètres de LIGO observent donc enfin un signal d'onde gravitationnelle qui correspond parfaitement au signal attendu dans la coalescence de deux trous noirs. La déformation de l'espace au voisinage des trous noirs est colossale : les deux monstres qui tournent autour l'un de l'autre depuis sans doute des milliards d'années se sont maintenant rapprochés au point de bientôt permettre de fusionner les trous de quelques dizaines de kilomètres qu'ils créent dans le tissu de l'espace-temps. Dans cette phase finale, ils tournent près d'une centaine de fois par seconde l'un autour de l'autre, comme le montre la simulation de leur coalescence réalisée par ordinateur[8] et comme le montre l'enregistrement du signal par LIGO (voir la figure en fin de chapitre). À la toute dernière seconde, les trous noirs fusionnent enfin et le trou noir résultant va, selon l'expression de John Wheeler, « perdre ses cheveux » et tout caractère distinctif en une fraction de seconde, après quoi il aura retrouvé une structure sphéroïdale, extrêmement lisse. Pour ceux qui disposent d'une chaîne haute fidélité capable de produire des sons très graves, le fichier son de la dernière étape finale de fusion des deux trous noirs est impressionnant de violence[9].

---

8. https://www.ligo.caltech.edu/mit/video/ligo20170601v3

9. https://www.livescience.com/53694-sound-of-merging-black-holes.html

La surprise est grande lorsque l'analyse démontre que la masse des deux trous noirs, que l'on peut estimer très précisément en raison de la force du signal, très supérieure au bruit, est d'environ 35 masses solaires pour l'un, et de 30 masses solaires pour le deuxième trou noir. La masse du trou noir résultant de la fusion est estimée, quant à elle, à 62 masses solaires. La distance d'environ un milliard trois cents millions d'années-lumière est très grande par rapport à ce qu'espéraient détecter dans un premier temps les physiciens de LIGO et de Virgo. On a vu que les 3 masses solaires converties en énergie d'ondes gravitationnelles en un dixième de seconde surpassent l'énergie émise par toutes les étoiles de l'ensemble de l'Univers observable pendant ce court instant. Ces quelques masses solaires dissipées en ondes gravitationnelles en un petit dixième de seconde ont une interaction tellement faible avec la matière qu'elles vont poursuivre leur trajectoire à l'infini, perdant peu à peu leur énergie en s'essoufflant avec l'expansion de l'Univers, si bien que tout se passe comme si cette énergie avait disparu à l'infini…

La nomenclature proposée – qui sera peut-être rapidement à modifier si le nombre d'événements détecté est à terme aussi important qu'on peut l'espérer à partir des deux premières observations – désigne par le nom de GW150914 le premier événement détecté, où les six chiffres désignent la date du 14 septembre 2015 et où GW indique qu'il s'agit d'une onde gravitationnelle – *gravitational wave*[10].

10. Sans doute de plus en plus souvent au fur et à mesure que croîtra la

Dans la même campagne de prise de données par LIGO, alors qu'il s'agissait en principe d'une prise de données de test, un deuxième candidat est observé le 26 décembre 2015, ce qui fait qu'il est de son côté affublé du nom de GW151226. Pour cette deuxième détection, il s'agit à nouveau de la coalescence de deux trous noirs de masses 14 et 8 masses solaires environ, la masse du trou noir résultant étant d'environ 20 masses solaires. À nouveau, l'énergie de 2 masses solaires a été envoyée dans l'espace en environ un dixième de seconde, surpassant là aussi la luminosité de tout l'Univers observable dans ce court instant. La surprise est grande de constater qu'il s'agit à nouveau d'un événement qui met lui aussi en jeu deux trous noirs d'assez grande masse, et en tout cas très au-delà de la masse minimale qui permet de fabriquer un trou noir (la masse de Chandrasekhar, que l'on estime se situer entre 2 et 3 masses solaires), et à nouveau à une distance énorme, environ un milliard et demi d'années-lumière[11]. La surprise est d'autant plus grande que ce n'était clairement

---

sensibilité de LIGO et de Virgo, on peut s'attendre à avoir deux détections le même jour, ce qui impliquera d'ajouter parfois un appendice pour les distinguer, même si nous n'en sommes pas encore là.

11. Il faut noter qu'un troisième événement, impliquant lui aussi très probablement deux trous noirs, a été observé au cours de la même campagne de trois mois de LIGO, mais ce troisième événement, bien que nettement au-dessus du bruit, et bien qu'il soit très probablement un véritable signal, n'a pas été retenu à ce stade en raison de son faible rapport signal/bruit, et il servira seulement par la suite à contrôler la cohérence des données.

pas le type d'événements que l'on s'attendait à détecter en premier lieu. La formation de tels monstres massifs en configuration rapprochée (suffisamment pour former des systèmes doubles qui vont finir par s'effondrer l'un sur l'autre en quelques milliards d'années) n'a en effet pas à ce stade d'explication.

Parti avec deux ans de retard, les physiciens de Virgo ont travaillé d'arrache-pied pour rattraper leur retard sur LIGO. Au début de l'année 2017, l'installation Advanced Virgo est inaugurée et une chasse aux bruits de l'installation commence afin de pouvoir se joindre à la deuxième campagne d'observation des deux interféromètres de LIGO. Le 1er août 2017, les physiciens décident que la sensibilité est suffisante pour lancer officiellement la campagne d'observations en parallèle de la campagne de LIGO. Deux semaines plus tard, les 14 et 17 août 2017, deux détections d'ondes gravitationnelles viennent couronner leurs efforts. Le premier événement, détecté le 14 août, montre à nouveau une coalescence de trous noirs de masse importante, ce qui constitue une nouvelle surprise. La nouveauté est cette fois-ci que les signaux des trois interféromètres permettent maintenant de pointer sur une zone précise du ciel. Mais, comme on pouvait s'y attendre de trous noirs, aucun télescope optique ne vient confirmer la détection…

L'événement détecté le 17 août 2017, GW170817, est d'une autre nature. Observé avec un signal/bruit de près de 40 et pendant plusieurs secondes, il porte la signature prévue pour la coalescence de deux étoiles à neutrons. Aussitôt une alerte

est lancée à l'ensemble des observatoires qui font partie du réseau d'alerte de LIGO et de Virgo. Et ce sont plusieurs dizaines d'observatoires qui confirment, sur la zone pointée à quelques degrés près par LIGO et Virgo, l'observation d'un événement cataclysmique. Observé d'abord en rayons gamma un peu moins de deux secondes plus tard par le satellite *Integral* et le satellite *Fermi*, l'explosion et sa décroissance vont être suivis au cours des heures, des jours et des semaines qui suivent par plus de 70 observatoires à travers le monde, ce qui constitue la première confirmation directe, indiscutable, d'un signal d'ondes gravitationnelles. La moisson scientifique qui en résulte est extraordinaire car les observations démontrent qu'au moins une partie des bouffées de rayons gamma est due à des coalescences d'étoiles à neutrons, comme on le soupçonnait mais comme il n'avait jamais été possible encore de le démontrer. Le suivi au cours des semaines qui suivent de la décroissance radioactive de ce que les astrophysiciens appellent une « kilonova », explosion stellaire immensément brillante, permet de démontrer la production d'énormes masses d'éléments lourds comme l'or et le platine, et d'en quantifier l'importance du fait que les observations de LIGO et de Virgo fournissent une distance assez précise pour le lieu de l'événement[12].

12. Ainsi, d'ores et déjà, au-delà de la simple confirmation de la relativité générale, LIGO et Virgo promettent de fournir dans les toutes prochaines années des informations très importantes non seulement sur la relativité générale elle-même mais aussi sur la distribution de masse et la formation des structures dans l'Univers, ainsi que sur l'astrophysique stellaire et la

Vers 2019, lorsque Advanced LIGO et Advanced Virgo auront atteint leurs performances nominales, on peut s'attendre, après l'observation de ces premiers événements, à plusieurs dizaines, voire à plusieurs centaines d'événements par an grâce à cette deuxième génération de détecteurs interféromètres laser, qui seront bientôt rejoints par l'interféromètre souterrain au Japon, KAGRA, dans le site souterrain de Kamioka (qui accueille déjà le détecteur de neutrinos Super-Kamiokande), ainsi qu'un peu plus tard par le troisième interféromètre de LIGO en Inde.

En attendant, ce type d'observation confirme déjà de façon très claire la notion encore un peu controversée de trou noir, et l'on peut s'attendre à mieux comprendre la distribution de masse de ces objets exotiques dès que l'on disposera de quelques dizaines de candidats d'ondes gravitationnelles : comment expliquer autrement la présence de masses aussi énormes variant sur des temps de l'ordre de la milliseconde, donc décrivant des objets de dimensions au plus de quelques centaines de kilomètres ? (rendez-vous en fin de chapitre pour en savoir plus – V).

Et au-delà ?

En parallèle, depuis le début des années 2000, les physiciens pensent déjà aux expériences qui vont succéder à Advanced LIGO et Advanced Virgo. Sur la Terre, les laboratoires européens ont réalisé au début des années 2000 l'étude

---

physique de la matière de densité extrême comme les étoiles à neutrons.

conceptuelle d'une expérience très ambitieuse qui propose de s'affranchir de deux sources de bruit importantes qui limitent la précision des expériences actuelles. Car, même si les systèmes anti-vibration développés en Italie réduisent de façon remarquable les vibrations sismiques, ce bruit sismique se propage de façon majoritaire dans une fine coquille au voisinage de la surface terrestre. S'installer en site souterrain permettrait donc de le réduire. Un des autres facteurs de bruit concerne le fait que la température actuelle des miroirs de LIGO et de Virgo est la température ambiante, soit un peu moins de 300 degrés absolus (ce qui équivaut à une vingtaine de degrés Celsius). En réalisant un ensemble de miroirs cryogéniques, refroidis à environ deux kelvins, on pourra réduire le bruit aléatoire des miroirs, d'autant plus faible que la température est faible. Le défi est dans ce cas de réaliser une enceinte à très basse température sans aucune vibration due au système cryogénique qui permettra de refroidir les miroirs. Inspiré par ce design – et en avance sur le projet Einstein Telescope, d'ambition plus forte –, le projet japonais KAGRA s'est dès à présent installé dans un site souterrain, dans la mine de Kamioka, près de Toyama et se propose d'être le premier détecteur interférométrique à mettre en œuvre de tels miroirs refroidis à la température de l'hélium liquide[13].

13. Ce qui constitue une étape majeure de développement après son premier interféromètre japonais de petite taille, TAMA, dont les bras de 300 mètres ne lui permettaient pas d'atteindre la sensibilité nécessaire à la détection d'ondes gravitationnelles, sauf pour des objets très proches.

Comme on l'a signalé, les groupes européens ont réalisé dès le début des années 2000 l'étude d'un interféromètre qui serait lui aussi souterrain et cryogénique, et auquel ils ont donné le nom prédestiné d'Einstein Telescope, ET. À la différence des interféromètres actuels LIGO et Virgo, Einstein Telescope utiliserait une configuration en triangle (ci-dessous).

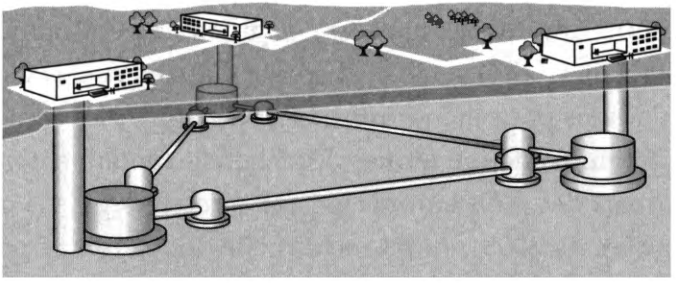


Schéma de principe d'Einstein Telescope, un interféromètre souterrain conçu pour dépasser d'un ordre de grandeur la sensibilité de Advanced LIGO et Advanced Virgo. Deux interféromètres laser souterrains, dont les trois bras ont dix kilomètres de longueur, sont refroidis à la température de l'hélium superfluide, permettant d'envisager un facteur compris entre 100 et 1 000 dans le taux d'événements observés, soit de quelques unités à plusieurs dizaines par jour.

Pour gagner le facteur 10 en sensibilité qu'il vise, qui révolutionnerait l'astronomie gravitationnelle en permettant l'observation de plusieurs milliers d'événements par an – le nombre d'événements variant, on l'a vu, comme le cube de la sensibilité –, Einstein Telescope propose d'utiliser des interféromètres dont les bras possèdent une longueur d'environ 10 kilomètres (au lieu des bras de 3 kilomètres de longueur de Virgo et de 4 kilomètres de LIGO), et surtout

de combiner dans un détecteur un interféromètre spécialisé dans les basses fréquences de quelques hertz à quelques dizaines de hertz (les sons graves de l'univers gravitationnel) tandis que l'autre se spécialise dans les ondes de fréquences plus élevées (de la centaine de hertz à plusieurs kilohertz).

Un tel projet est ambitieux et son coût s'annonce comme dépassant un milliard d'euros, ce qui nécessitera au minimum un projet européen, et probablement mondial, d'autant que l'idéal serait de disposer d'au moins deux telles installations pour bien confirmer et trianguler les signaux. L'ambition limitée en termes de recherche fondamentale de la plupart des pays européens, notamment depuis la crise financière de 2008, rend donc difficile de réaliser ce projet avant le début des années 2030. Pour autant, les premières détections ont relancé l'enthousiasme pour ce domaine de la physique et il est désormais assez probable qu'Einstein Telescope, ou un dispositif qui lui ressemble, sera construit vers la fin des années 2020.

LISA (Laser Interferometer Space Antenna Project)

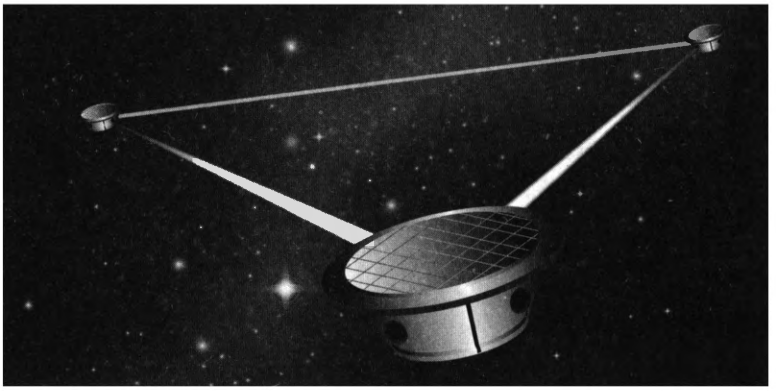
Dans le même temps, un projet spatial est déjà en cours de test, avec une « oreille » gravitationnelle qui, à terme, écoutera à des fréquences beaucoup plus graves et basses. Initialement un projet commun à la NASA et à l'ESA, mais disparu momentanément des écrans radar de la NASA pour des questions budgétaires, le projet LISA a survécu dans une version européenne e-LISA (le « e » pouvant à la fois signifier le côté européen renforcé et l'évolution de ce

projet). Depuis 2015, la mission ondes gravitationnelles fait désormais partie des programmes prioritaires de l'Agence spatiale européenne, et même si la technologie reste en principe ouverte, c'est bien le concept d'un gigantesque interféromètre laser LISA dans l'espace qui devrait être retenu, avec un lancement prévu initialement aux alentours de 2034[14].

Les moyens énergétiques étant très limités pour un satellite spatial, il n'est bien sûr pas question de développer et de mettre en œuvre des lasers de puissance de l'ordre du kilowatt dans l'espace. En revanche, on va chercher à profiter des caractéristiques du spatial : l'absence totale de vibrations – si l'on ne crée pas soi-même de vibrations à l'intérieur du satellite –, une température basse – la température de fond de l'Univers étant 2,7 kelvins (si on se protège et que l'on s'éloigne du Soleil) – et les énormes distances qu'il est possible de développer, inaccessibles sur Terre. À la condition d'utiliser non pas un satellite, mais une mini-constellation de trois satellites, dialoguant entre eux dans une configuration triangulaire (page suivante).

La longueur envisagée des bras est de l'ordre de 5 millions de kilomètres ! Dans une telle configuration, pas question de faire circuler sans perte un seul faisceau laser comme c'est le cas sur Terre. En effet, à de telles distances, même un laser s'étale naturellement trop et il faudrait des

14. Le lancement pourrait être avancé de quelques années en raison de l'immense enthousiasme scientifique engendré par les premières détections d'ondes gravitationnelles.



http://sci.esa.int/lisa/

miroirs gigantesques pour capter, à 5 millions de kilomètres, la puissance du faisceau initial. Mais on sait aujourd'hui, et les groupes français sont à la pointe mondiale de cette technique, comparer les phases de deux faisceaux laser, l'un interne à chaque satellite et l'autre fourni par le satellite maître, qui fournit aux deux autres un faisceau de référence avec lequel ils mesurent leur écart. Dans la configuration initiale, envisagée par ESA et NASA, les trois satellites de la mini-constellation étaient maîtres et envoyaient chacun leur faisceau laser aux deux autres pour comparaison, ce qui renforce la précision (il n'est d'ailleurs pas exclu que l'on revienne à cette configuration).

Évidemment, même à la vitesse de la lumière – la vitesse maximale de propagation de signaux –, il faut plus de trente secondes pour échanger de l'information entre deux satellites distants de 5 millions de kilomètres, dans un aller-retour d'information. Ceci signifie que le projet spatial LISA donnera

accès à des fréquences de signaux d'ondes gravitationnelles beaucoup plus basses – inférieures à quelques dizaines de millihertz – que celles accessibles au sol (et cela même en utilisant le futur projet Einstein Telescope). Ainsi, en raison de la longueur des bras mille fois plus grande dans l'espace, il est possible d'accéder à un nombre énorme d'événements d'ondes gravitationnelles, généralement induits par la coalescence de systèmes de très grande masse – ceux-là se voient comme le nez au milieu de la figure pour LISA –, ou encore les phases de rapprochement lent, encore assez loin de la coalescence, entre deux trous noirs de masse intermédiaire, comme les premiers événements observés par LIGO.

Satellite test décidé il y a plus d'une dizaine d'années, LISA Pathfinder a été une mission de petite taille destinée à tester certaines des techniques essentielles au projet final LISA. Il s'agissait en particulier de voir si l'on parvenait à « lâcher » des masses test sans aucune vitesse, ce qui ne peut être réalisé facilement au sol, de mesurer très précisément la position ensuite de ces masses, et enfin de tester la compensation de dérive du satellite, due aux faibles forces résiduelles induites par exemple par le vent solaire ou encore le dégazage des matériaux. Ces dérives étant en principe identifiables, il était important de démontrer que des « compensateurs » utilisant comme propulseur l'émission de très faibles quantités de gaz permettaient de maintenir fixe la position du satellite à une excellente précision. Lancée le 2 décembre 2015, cette mission LISA Pathfinder s'est déroulée sans anicroches et l'analyse de ses résultats se révèle un très grand succès, avec des performances

excédant largement ce qui était visé, se rapprochant même des performances nécessaires pour la version finale de LISA[15].

À la recherche des ondes gravitationnelles primordiales

L'extrême faiblesse de la gravitation peut parfois se révéler un avantage. En effet, les ondes gravitationnelles sont la seule fenêtre de visibilité existante sur l'Univers extrêmement proche du Big Bang et du temps de Planck (10^{-44} seconde environ dans le modèle cosmologique standard), lors de la naissance cataclysmique de l'Univers, aux confins de l'espace et du temps, où ces notions classiques s'effondrent probablement. Or, c'est cette extrême faiblesse de la force de gravitation qui permet d'accéder au vacarme gravitationnel de l'Univers à ses tout premiers instants[16]. Pour ces périodes très primordiales proches du Big Bang, on ne s'attend cependant pas à voir directement

15. Le succès de cette première mission laisse entrevoir un nombre d'événements potentiellement énorme pour l'expérience LISA, dont une assez large proportion se situera d'ailleurs a priori à un niveau très proche du bruit, ces signaux constituant par superposition un bruit stochastique d'ondes gravitationnelles, un peu comme le bruit thermique des électrons dans un conducteur métallique, si bien que le traitement des données de LISA s'annonce comme un défi majeur.

16. Alors que les photons, du fait qu'ils sont diffusés tant que l'Univers est ionisé, soit aux températures dépassant 3 000 degrés environ, ne nous permettent pas de remonter aux instants plus proches du Big Bang. De leur côté, les neutrinos permettent en principe de remonter un peu plus loin, du fait qu'ils ne sont plus diffusés et se propagent en ligne droite pour les températures inférieures à 10 milliards de degrés.

de vibration avec une fréquence particulière, mais plutôt à détecter un « brouhaha sonore » d'ondes gravitationnelles, qui reflète la multitude d'événements violents et d'inhomogénéités au cours des tout premiers instants de l'Univers.

Pour mesurer la production d'ondes gravitationnelles à des fréquences qui sont à notre époque beaucoup plus faibles encore que celles que peut mesurer Einstein Telescope, mais qui sont celles qui sont produites au plus près du Big Bang, avec des empreintes aujourd'hui de centaines de millions d'années-lumière, il faut utiliser une façon complètement différente et indirecte de détection. Cette méthode consiste à essayer de détecter ce que l'on appelle les « modes B » (par analogie avec la notation habituelle représentant le champ magnétique) du rayonnement diffus cosmologique. En principe, ces modes B ne sont produits que par la gravitation, mais en pratique la situation est nettement plus compliquée car les nuages de poussières, qui réémettent une partie du rayonnement qu'elles reçoivent dans la Galaxie, ainsi que les effets, eux aussi gravitationnels, de l'effet de lentille des galaxies, vont justement simuler ces fameux modes B primordiaux, en créant des empreintes sur le fond diffus cosmologique qui simulent les effets « tournants » (rotationnels) que créeraient les ondes gravitationnelles primordiales.

L'annonce tonitruante, en mars 2015, par le projet américain BICEP2, basé au pôle Sud afin de s'affranchir au maximum des effets de l'atmosphère, de la mise en évidence des ondes gravitationnelles à travers les modes B fut considérée pendant quelques mois avec une grande excitation, le

résultat annonçant l'ouverture d'une nouvelle astronomie. Cependant, la découverte revendiquée s'est, après analyse, révélée remarquablement fragile. Très vite en effet, le satellite *Planck*, capable de détecter de façon beaucoup plus précise la poussière de notre Galaxie et ses effets délétères sur le fond diffus cosmologique, fournit des cartes démontrant que la région analysée par BICEP2 souffrait de corrections dues à la poussière qui expliquaient au moins pour une très large partie l'effet revendiqué. Le signal observé était en tout état de cause très supérieur à ce que l'on s'attendait à observer comme effet : il est malheureusement probable que le signal recherché se situe à des niveaux des centaines de fois plus faibles que l'effet annoncé par BICEP2.

Cette annonce prématurée, engendrée par une course assez malsaine à la découverte, illustre le fait qu'une analyse extrêmement précise des effets de poussière et du lentillage gravitationnel sera nécessaire pour démontrer une découverte, ou son contraire.

Ce qu'il faut retenir

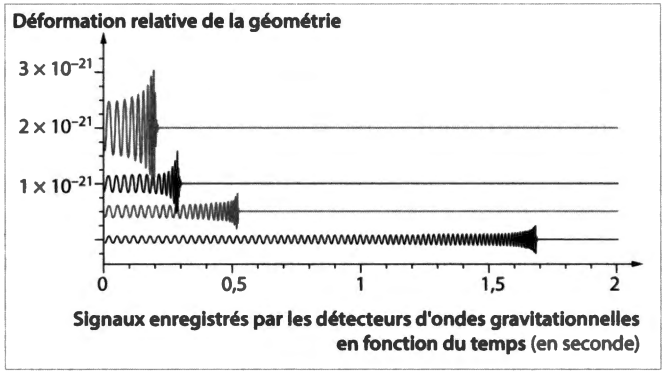
Les ondes gravitationnelles, prédites par Einstein dès 1916, sont l'analogue des ondes hertziennes pour l'électromagnétisme. La faiblesse de la gravitation a fait de leur détection un défi expérimental développé sur une période de plus de cinquante ans, qui a débouché sur l'annonce, en février 2016, exactement un siècle après

la prédiction d'Einstein, de la première détection par les équipes de LIGO et de Virgo. La vague créée par la rencontre de deux trous noirs massifs à plus d'un milliard d'années-lumière de la Terre ne représente qu'une modification de distance de la taille d'un atome sur la distance Terre-Soleil. La surprise est grande devant les caractéristiques des trous noirs impliqués dans les premiers événements détectés. Au-delà d'Advanced Virgo et Advanced LIGO, les physiciens travaillent déjà aux prochaines générations de détecteurs, au sol avec Einstein Telescope et dans l'espace avec LISA. Ces projets, au début des années 2030, devraient permettre de détecter plusieurs dizaines de milliers de cataclysmes gravitationnels par an.

Pour aller plus loin

I - Il faut dire que les équipes croient initialement à un exercice et n'osent pas croire à la découverte. En 2010 en effet, les détecteurs de LIGO et de Virgo, fonctionnant alors en parallèle, avaient déjà reçu une telle alerte et ce n'est qu'au bout du processus de plusieurs mois d'écriture, puis de validation d'une publication scientifique que les chercheurs découvrirent qu'il s'agissait en fait d'un événement simulé, injecté par une petite équipe qui seule savait que le signal n'était pas réel, mais ce que l'on appelle une « injection aveugle ». Cette procédure assez frustrante est néanmoins essentielle pour s'assurer que les analyses des physiciens ne laissent pas passer un tel événement, ou a minima pour étudier la probabilité qu'il soit bien détecté et correctement reconstruit.

Mais cette fois-ci, en septembre 2016, les membres de la collaboration découvrent assez vite que l'équipe en charge de l'injection de signaux simulés n'a pas encore eu le temps de mettre en place sa procédure d'injection. Les équipes sont donc rapidement persuadées que le signal enregistré constitue très probablement la première détection, historique, d'une onde gravitationnelle. Assez rapidement, et notamment sur le site du physicien américain Lawrence Krauss, à l'université d'Arizona, des rumeurs révèlent que les équipes seraient très près d'annoncer la première découverte d'ondes gravitationnelles. Les équipes ne confirment évidemment pas, mais peu avant l'annonce de la découverte Lawrence Krauss, encore lui, affirme sur son site qu'il a eu confirmation indépendante que l'annonce est imminente. Entre-temps, les équipes ont affiné l'analyse, précisé l'amplitude et la forme du signal, remarquablement similaires sur les deux interféromètres de LIGO distants de 3000 kilomètres (ci-dessous), et par ailleurs parfaitement compatibles avec la prédiction de la relativité générale pour la coalescence de deux trous noirs de grande masse.



II - Les premières estimations réalisées dans les premières années de LIGO et de Virgo étaient assez imprécises et très optimistes quant au taux d'événements observables. Ce fut donc avec une forte déception

que l'on constata que cette première génération d'expériences d'interféromètres laser ne conduisait à aucune observation, alors qu'un peu plus d'une étoile sur deux fait partie d'un système binaire et que le nombre de candidats émetteurs paraissait très élevé. Mais en raison des incertitudes sur la distribution de masse des étoiles doubles dans les galaxies, et plus encore les populations des trous noirs pratiquement inconnues, de très fortes incertitudes limitaient la précision du nombre d'événements les plus susceptibles d'émettre des ondes gravitationnelles. Initialement, l'incertitude était de l'ordre d'un facteur 100, avec des estimations initiales comme on l'a dit extrêmement optimistes. Les premiers projets de détection d'ondes gravitationnelles furent de ce fait assez durement critiqués à l'issue de leur première phase, dont ils étaient revenus bredouilles, alors que plusieurs centaines de millions d'euros avaient déjà été investis aux États-Unis et en Europe. Il faut faire néanmoins remarquer aux esprits chagrins qu'il n'est pas évident que des physiciens se seraient lancés dans une entreprise aussi difficile s'ils avaient connu dès le départ la difficulté de la tâche qui les attendait.

Dans les années 1950, alors que les chercheurs commençaient à concevoir les premiers détecteurs d'ondes gravitationnelles, s'est posée la question de l'observabilité et de l'existence de ces ondes. Certains théoriciens craignaient en effet que ces ondes ne soient pas observables en raison d'une élimination par une transformation de jauge. Pour comprendre l'idée qui tracassait les physiciens et qui se cache derrière l'expression barbare de « transformation de jauge », si les ondes gravitationnelles sont un plissement de l'espace-temps, imaginons un tissu plissé à deux dimensions (une surface) et un être à deux dimensions forcé de vivre sur cette surface sans avoir aucune possibilité d'explorer l'extérieur de celle-ci. Si l'on n'a pas le droit de distendre le tissu, c'est-à-dire de modifier les relations de distance à l'œuvre dans les fils du tissu, et encore moins de le déchirer, l'être en deux dimensions, condamné à vivre sur sa surface,

ne pourra pas se rendre compte que le tissu est plissé. La question de l'invariance de jauge, et corrélativement de l'observabilité des ondes gravitationnelles, est donc la question de la possibilité de détecter les distorsions de distance à l'intérieur du tissu de l'espace-temps. Joseph Weber, de l'université de Maryland, fut l'un des premiers à démontrer qu'il existe bien un effet observable par les objets matériels, même si certains prétendent aujourd'hui, assez rétrospectivement, que la réponse à la question était évidente bien avant cela.

III - Voici une façon simple d'estimer l'ordre de grandeur de la fréquence et de l'amplitude du signal d'ondes gravitationnelles créé par la coalescence de deux trous noirs de 3 masses solaires: la « taille » du trou noir, ce que l'on appelle de façon impropre le « rayon » de Schwarzschild, est, pour un trou noir de 3 masses solaires, d'environ 10 kilomètres. Ce qui veut dire que deux trous noirs de quelques masses solaires vont, dans la phase finale de leur coalescence, déformer violemment l'espace sur une distance d'environ 30 kilomètres, cette distance étant parcourue à la vitesse de la lumière en environ un dixième de milliseconde. Si l'on suppose que la chute finale, catastrophique, va céder la majeure partie de son énergie sur une dizaine d'oscillations (je vous renvoie au signal de la première détection), soit dans le cas choisi environ une milliseconde, on comprend le choix de Weber de construire des cylindres d'aluminium qui oscillent à une fréquence d'environ 2 kilohertz, la vitesse du son dans l'aluminium étant d'un peu plus de six kilomètres par seconde. Évidemment, la méthode souffre d'un défaut: le fait que la barre de Weber soit un bon résonateur a également pour conséquence assez inéluctable qu'elle n'entend bien les sons que dans une bande étroite de fréquence, ce qui veut dire qu'il sera difficile de reconstruire la forme exacte, multifréquentielle, de la coalescence de deux trous noirs. En outre, le système de Weber ne permet de détecter, avec les senseurs piézo-électriques

qu'il utilise, que des déformations relatives de l'espace de l'ordre de 10^{-16}, une sensibilité qui, si elle est déjà remarquable, limite fortement la zone où l'on peut espérer « entendre » le signal d'ondes gravitationnelles.

Supposons pour simplifier que la distorsion de l'espace-temps soit de l'ordre de l'unité sur la distance de 30 kilomètres de l'horizon lors de la coalescence des deux trous noirs en un seul trou noir. Avec une décroissance du signal variant comme l'inverse de la distance, la déformation vaut donc 10^{-16} – la sensibilité limite des barres de Weber – après la distance de 3×10^{17} kilomètres. Ces 300 millions de milliards de kilomètres, s'ils peuvent sembler énormes, sont de l'ordre de la distance entre nous et le centre de la Voie lactée. Mais dans une galaxie, les explosions de supernovæ sont loin d'être légion, les explosions visibles ayant apparemment lieu à un taux inférieur à 1 par siècle, même si le taux réel est sans doute d'environ dix fois supérieur en raison de l'opacité qui règne au centre de notre Galaxie, obscurci par du gaz ionisé.

IV - Peut-on interagir instantanément avec un objet qui est à plusieurs années-lumière de nous ? La réponse immédiate du physicien est négative : la vitesse de la lumière étant la vitesse limite de propagation des interactions, une telle interaction ne semble pas possible. En fait, curieusement, si on ne cherche pas à passer un message, mais juste à interagir de manière diffuse avec des objets distants, il est très probable que nous interagissons en permanence avec tous les objets de l'Univers à travers le mécanisme décrit par John Wheeler et Richard Feynman et qu'il appelèrent « *action-at-a-distance* » – « action à distance ». Ainsi, en électromagnétisme, la réaction de rayonnement, c'est-à-dire la force de résistance que l'on ressent si l'on cherche à modifier l'accélération d'une charge électrique peut s'exprimer comme cette réaction de l'ensemble des charges de l'Univers sur cette charge. Et, comme on pouvait s'y attendre, cet effet curieux et contre-

intuitif a son analogue en gravitation, où la force de résistance, lorsque l'on cherche à accélérer un objet est la force inertielle bien connue, proportionnelle à l'accélération que l'on cherche à lui communiquer. Nous reviendrons sur cette affirmation étonnante dans le chapitre consacré au principe de Mach.

V - Lors du passage de l'onde gravitationnelle de GW150914, les miroirs des cavités des interféromètres de LIGO ont subi un déplacement maximal de $2\ 10^{-18}$ mètres, un millier de fois inférieur à la taille du proton, alors que la sensibilité limite de l'interféromètre est plus d'un facteur vingt fois meilleure, soit de l'ordre de 10^{-19} m. Il peut sembler paradoxal d'obtenir une précision meilleure que la taille d'un noyau atomique. Cette performance extrême est due au fait que le faisceau laser est cohérent sur toute la surface du miroir, qui possède un diamètre d'une trentaine de centimètres pour LIGO comme pour Virgo, permettant d'effectuer une moyenne de la position de l'ensemble des atomes du miroir constituant cette surface importante et donc de dépasser nettement la précision non seulement du diamètre d'un atome, mais même d'un noyau atomique (cent mille fois plus petit environ que l'atome lui-même).

Cette performance technologique est rendue possible par un état de quasi-perfection au niveau de la surface des miroirs, dont l'état de surface extrêmement uniforme, au niveau de quelques distances atomiques seulement (4 dix-milliardièmes de mètre, soit le diamètre de trois ou quatre atomes) est réalisé, pour Advanced LIGO comme pour Advanced Virgo, au Laboratoire des matériaux avancés (LMA) de Lyon-Villeurbanne. C'est cette qualité extrême de la surface des miroirs qui rend possible la performance de la mesure d'une onde gravitationnelle.

Gravité et information

Quel peut bien être le rapport entre la gravité et l'information ? Les deux concepts semblent en effet tellement étrangers l'un à l'autre qu'il semble incongru de tenter de relier la force de gravité que ressent un individu à la surface de la Terre et la notion d'information telle qu'elle peut se définir par le nombre de caractères dans un journal ou le flot d'information sur une chaîne de télévision. En fait, comme nous allons le voir, les liens entre gravité et information vont se révéler multiples et très profonds. Il y a même une probabilité assez forte désormais que la notion d'entropie et celle d'information soient les principes primordiaux permettant de comprendre la notion même de force de gravitation, qui pourrait ne pas être une véritable interaction mais d'origine statistique, comme nous le verrons dans la suite.

Les quatre principes de la thermodynamique

Commençons par rappeler la signification des principes de la thermodynamique classique qui, s'ils sont souvent associés à de mauvais souvenirs pour les étudiants, ont été à la base

du développement des machines à vapeur et de la naissance de notre monde industriel. Pourquoi les rappeler ici ? Parce que nous allons retrouver ensuite leur exact correspondant dans les lois qui gouvernent les trous noirs.

Le premier principe décrit la conservation de l'énergie, introduisant la notion d'énergie interne dont les variations se définissent comme la somme des échanges de travail et de chaleur qui s'exercent sur le système. Rien de nouveau, me direz-vous, dans ce premier principe de la thermodynamique par rapport à la conservation de l'énergie. Mais historiquement, ce principe de conservation de l'énergie qui nous semble évident a été découvert dans la douleur, et curieusement après le second principe, qui traite de l'évolution et de la dégradation de l'énergie. Formellement, la mathématicienne Emmy Noether a démontré qu'il est toujours possible de construire une grandeur énergie, qui nous semble avoir un sens immédiat et concret, dès lors que les lois respectent l'invariance par translation dans le temps, ce qui est vérifié à une très bonne approximation dans les lois de la gravitation : en effet, nous avons toutes les raisons de penser que les lois célestes sont les mêmes aujourd'hui qu'il y a un milliard d'années, même si l'Univers était légèrement plus chaud et plus dense à cette époque qu'aujourd'hui. Nous verrons par ailleurs plus loin que la notion d'énergie globale de l'Univers est difficile à définir, et identiquement nulle pour un univers de densité critique. Mais la nouveauté introduite par le premier principe de la thermodynamique concerne, en complément

des formes habituelles d'énergie échangées sous forme de travail, à introduire et à reconnaître la chaleur comme une forme d'énergie. Dissimulée à l'intérieur de la matière, à travers l'excitation de la structure atomique de la matière, la chaleur est en effet restée longtemps inaperçue comme forme d'échange d'énergie – et c'est ce qui a retardé l'expression du premier principe.

Une fois établie la notion de conservation de l'énergie, survient la question de la dégradation de l'énergie, qu'elle soit mécanique ou thermique. On le sait bien, une voiture lancée sur une route horizontale finira par s'arrêter, ne serait-ce qu'en raison de la dissipation de son énergie cinétique dans l'air et de la dissipation dans les pneus. En un certain sens, qui reste à préciser, nous allons très généralement être confrontés à une dégradation de l'énergie mécanique « noble » en une énergie thermique « dégradée », répartie dans les atomes de l'environnement, comme c'est le cas d'une turbine qui s'arrête après avoir dissipé son énergie de rotation dans le fluide dans lequel elle tourne, ou de notre voiture en roue libre. Impossible une fois que la voiture est arrêtée d'espérer que les atomes chauds du bitume et des pneus fassent redémarrer la voiture, ce qui amène à l'expression de Kelvin-Planck du second principe : « Il est impossible de réaliser un processus cyclique, échangeant de la chaleur avec une seule source, et dont le résultat serait la production de travail. »

C'est cette dégradation que le second principe tente de quantifier et de préciser en introduisant une notion,

l'entropie, qui ne peut, de façon générale, qu'augmenter de façon irréversible pour les systèmes isolés thermiquement – l'entropie ne parvenant à rester constante qu'à condition que l'on procède de façon lente et en évitant la dissipation de l'énergie qui se produit lorsque l'on met en contact direct des systèmes à températures différentes.

L'entropie est donc une mesure de la dégradation de la puissance motrice des systèmes, ce qui intéressait vivement les concepteurs de machines thermiques comme Sadi Carnot, jeune polytechnicien qui l'énonça dès 1824, alors qu'il n'avait que 28 ans. L'approche de Sadi Carnot était une approche purement macroscopique – que l'on pourrait qualifier de « technologique » – et ne cherchait pas à justifier le second principe de manière microscopique. Jusqu'au début du XXe siècle, les atomes, dont les Grecs avaient conjecturé l'existence, n'étaient pas encore acceptés, ce qui a sans doute contribué au suicide de Boltzmann qui avait proposé une formule exprimant l'entropie comme une grandeur associée à une mesure de la complexité microscopique : $S = k_B \text{ Log } \Omega$, où Ω représente le nombre d'états microscopiques compatible avec l'état macroscopique (pression, volume et température) du système, et k_B est une constante, appelée « constante de Boltzmann ». C'est finalement Claude Shannon qui relia entropie et information, avec la même formule que celle de Boltzmann, confirmant et généralisant le lien entre information et thermodynamique, ce qui était très loin d'être évident initialement.

Les deux derniers principes à être formalisés sont le principe zéro, qui reconnaît la température comme la mesure

de la grandeur de tension et d'échange de la chaleur entre deux corps, les échanges s'effectuant toujours du plus chaud au plus froid, et l'équilibre nécessitant que la température soit uniforme, ainsi que le troisième principe.

Ce dernier principe de la thermodynamique stipule quant à lui qu'à température nulle, l'entropie est nulle. La formule de Boltzmann reliant entropie et désordre, ainsi que la relation de Shannon entre entropie et information laissent alors fortement entendre que le corps doit devenir totalement ordonné, de description extrêmement simple, comme peut l'être un cristal dès lors que l'on a décrit sa maille cristalline, et être à température nulle. Mais le troisième principe indique aussi que cette température nulle est une limite inatteignable dès lors que le système est initialement à température non nulle : il faut en effet un nombre infini d'étapes, impossible à implémenter dans le monde réel pour atteindre cet ordre parfait et cette température nulle ! Dans le dernier chapitre, nous indiquerons une curiosité : pour certains systèmes à énergie finie, il est possible d'envisager des températures négatives. Or, curieusement, toute température négative est plus chaude que la température infinie positive. Je laisse le lecteur méditer sur cet apparent paradoxe qui sera discuté plus avant dans l'ouvrage[1].

1. En particulier, T = 0- (zéro par valeur négative) correspond à un système parfaitement ordonné, mais infiniment chaud, plus chaud que la température +infini.

Les principes de la mécanique des trous noirs

Au début des années 1970, les physiciens se rendent compte de la très forte analogie entre les principes de la thermodynamique et ce que l'on commence à appeler les « lois de la mécanique des trous noirs », sans oser encore parler de thermodynamique – la dynamique de la chaleur – pour des objets censés être d'un noir absolu.

L'équivalent de la grandeur température commune à toutes les parties d'un système thermodynamique quand il est à l'équilibre apparaît assez rapidement pour un trou noir comme la gravité de surface – l'équivalent de l'intensité de la gravité au voisinage de l'horizon du trou noir. Cette grandeur est constante en tout point de la surface d'un trou noir, même quand il est chargé ou en rotation.

Une autre caractéristique importante des trous noirs, qui évoque un comportement irréversible et que nous avons déjà rencontrée lors de leur étude, est que les trous noirs perdent très rapidement presque tous leurs caractères distinctifs. Plus précisément, les trous noirs rayonnent avec des temps caractéristiques donnés par le « rayon » de Schwarzschild divisé par la vitesse de la lumière, donc en des temps très brefs (de l'ordre de la milliseconde, pour des trous noirs de quelques masses solaires, dissipant tout ce qui pouvait leur donner des caractères distinctifs, leurs « cheveux ». Caractère résumé par Wheeler dans l'expression célèbre « Les trous noirs n'ont pas de cheveux » : un crâne chauve et lisse, bonne approximation de l'état final d'un trou noir, n'est-il pas décrit beaucoup plus facilement

– en gros par une sphère ou un ellipsoïde – qu'une chevelure désordonnée ?[2]

Et comme la lumière elle-même ne peut pas s'échapper d'un trou noir une fois qu'il s'est formé, il se sépare en quelque sorte du reste de l'Univers, de même que tous les objets qu'il absorbe après sa création – impossible en effet à ces derniers d'en réchapper une fois capturés.

Cette perte d'information lorsque des objets sont incorporés dans un trou noir signale l'intrusion d'un caractère irréversible, qui n'est pas présent en mécanique et relève donc de la thermodynamique et plus précisément du second principe. L'un des premiers liens quantitatifs apparut lorsqu'un étudiant de John Wheeler, Demetrios Christodoulou, démontra que dans la fusion de deux trous noirs la superficie totale du trou noir résultant est toujours supérieure à la somme des surfaces initiales des trous noirs qui participent à la fusion. Christodoulou montra également que, dans des transformations lentes, réversibles, il est possible de ne pas faire augmenter la surface de trou noir, mais de la garder constante. Et de la même façon que dans le premier principe de la thermodynamique, on peut exprimer une variation infinitésimale de l'énergie interne comme la somme d'un apport élémentaire

2. Une série de théorèmes à laquelle Brandon Carter contribua fortement mène d'ailleurs au résultat que les trous noirs ne livrent à l'extérieur que la connaissance de trois paramètres: masse, moment cinétique et charge, ce qui les fait ressembler à des particules élémentaires, comme un électron, ce qu'avait également noté Brandon Carter.

de travail et d'un flux de chaleur, Larry Smarr, de l'université d'Austin au Texas, parvint à relier la variation de la masse du trou noir – qui va mesurer la variation de son énergie – à deux termes de variation d'énergie cinétique de rotation et d'énergie électromagnétique et, ce qui est inattendu, à un troisième terme proportionnel à la gravité de surface (notre analogue de la température pour un trou noir) multiplié par la variation de la surface du trou noir – qui trouve son analogue en thermodynamique avec le terme $T\ \mathrm{d}S$ multipliant température et variation de l'entropie. Donc, à une constante multiplicative près, la surface d'un trou noir apparaît comme la grandeur qui se comporte comme l'entropie dans un système thermodynamique isolé.

Dans son ouvrage de référence écrit avec George Ellis, Stephen Hawking démontre lui aussi que la fusion de deux trous noirs conduit de manière très générale à un trou noir dont la surface est supérieure à la somme des surfaces des trous noirs initiaux. Cette caractéristique de croissance inéluctable de la surface de l'horizon des trous noirs ressemble fortement au second principe et à l'entropie d'un système isolé qui ne peut que croître, pour une transformation réaliste, ou au mieux rester approximativement constante pour une transformation suffisamment lente pour ne pas créer de dissipation et d'entropie.

À l'école des Houches de 1972, John Bardeen, Brandon Carter et Stephen Hawking avaient déjà bien sûr noté cette analogie entre mécanique des trous noirs et lois de la

thermodynamique[3]. En parallèle des cours magistraux, il est d'usage aux Houches que les étudiants qui suivent les cours réalisent de courts exposés ou des posters sur leurs travaux. Le jeune Jacob Bekenstein, lui aussi un étudiant de John Wheeler, y défend l'idée que l'analogie est plus qu'une analogie formelle, sinon il serait possible de « contourner » le second principe de la thermodynamique en « cachant » à l'intérieur d'un trou noir tout le désordre que l'on veut, ce qui transcenderait le second principe ou le rendrait vide de sens.

John Wheeler, directeur de thèse de Jacob Bekenstein[4], avait en effet lancé son étudiant sur l'étude du paradoxe apparent suivant : comme on l'a signalé, un objet que l'on fait tomber dans un trou noir échappe ensuite à l'observation. Mais si l'on jette dans un trou noir la même quantité d'énergie-impulsion – la seule grandeur à apparaître dans les équations d'Einstein –, sous deux formes très différentes, l'une extrêmement froide et ordonnée, l'autre extrêmement désordonnée et chaude, le résultat final, une fois les objets absorbés par le trou noir, est a priori strictement le même pour un observateur extérieur, et donc le second principe perd largement son sens : un observateur extérieur au trou noir n'aura en effet plus aucun moyen opérationnel

3. À cette école, ils développent d'ailleurs un cours à plusieurs voix intitulé « Les quatre lois de la mécanique des trous noirs » – on ne parle toujours pas de thermodynamique – qui sera publié l'année suivante.

4. Il s'illustrera ensuite par l'étude de la théorie MOND de gravité newtonienne modifiée dont nous avons parlé dans un chapitre précédent.

de vérifier si le second principe est ou non respecté – en recensant par exemple toutes les contributions à l'entropie qui sont accessibles à ses mesures.

Mais c'est le physicien Robert Geroch qui met le doigt, par la construction d'un démon analogue au démon de Maxwell, sur la contradiction – qui ne sera finalement qu'apparente – avec le second principe de la thermodynamique. Sa construction est basée sur le fait que, pour un observateur extérieur au trou noir, un objet placé juste à l'horizon a une énergie nulle. À partir de cette constatation élémentaire, Geroch met en place le fonctionnement de son démon : celui-ci prend une boîte contenant du rayonnement, l'abaisse pratiquement à l'horizon. Pendant ce processus, il récupère du travail car la boîte acquiert une énergie potentielle négative de plus en plus forte en valeur absolue. Arrivé pratiquement à l'horizon du trou noir, le démon largue le contenu de rayonnement dans le trou noir en ouvrant la partie inférieure de la boîte (presque tout le rayonnement est ainsi absorbé par le trou noir). Puis il remonte la boîte allégée de son contenu, ce qui lui coûte moins cher que le travail qu'il avait récupéré dans la phase de descente, la boîte étant désormais vide. Le résultat global est qu'à partir d'une seule source de chaleur on a récupéré du travail, ce qui est en contradiction directe avec la formulation de Kelvin et de Planck du second principe de la thermodynamique que nous citions plus haut…

En 1972, à l'époque de son exposé aux Houches, Bekenstein ne sait pas répondre au défi posé par le démon

de Geroch. Ses arguments, dans son article publié un an plus tard, sont loin d'être convaincants. Mais son analyse de l'expression de l'entropie d'un trou noir va néanmoins bien au-delà de la simple analogie : Bekenstein analyse en effet la forme que doit prendre une expression de l'entropie du trou noir basée sur une fonction de sa surface pour que le second principe sous la forme :

> Entropie totale de l'Univers = entropie (surface) du trou noir + entropie classique de l'extérieur au trou noir

soit respecté. En analysant la croissance de la masse et de la surface du trou noir quand il absorbe matière et rayonnement, Bekenstein propose une expression, qui se révélera par la suite très proche (à un facteur 1/4 près) de l'entropie d'un trou noir basée sur la surface de son horizon[5].

Cependant, l'exposé de Bekenstein à l'école des Houches suscite de fortes critiques des trois conférenciers : la proposition de Bekenstein ne peut être valide, raisonnent Bardeen, Carter et Hawking, car si un système possède entropie et énergie il doit aussi posséder une température

---

5. Cette formule est d'une très grande simplicité car il suffit d'exprimer la surface du trou noir en unités de « surface de Planck », c'est-à-dire la longueur de Planck au carré, où l'on rappelle que la longueur de Planck est la seule longueur que l'on peut construire à partir des constantes fondamentales G, $\hbar$ et c :

$$l_p = \sqrt{\hbar G / c^3}$$

Numériquement, il est facile de vérifier que cette longueur est de l'ordre de 10^{-35} mètre, ce qui va conduire à des entropies énormes pour des trous noirs de taille macroscopique.

non nulle. En effet, la température d'un système n'est rien d'autre que la mesure de l'accroissement de son entropie quand on fait varier un peu son énergie, ce qui s'exprime via la relation $1/T = \mathrm{d}S/\mathrm{d}U$.

Or chacun sait bien – même si cela se révélera faux – que les trous noirs ne rayonnent pas et ont de ce fait une température nulle. Énorme déception de Bekenstein, qui repart à Princeton assez décontenancé devant la réaction des maîtres du domaine face à son exposé.

Avant de donner la solution de l'énigme, il faut noter que l'expression de Bekenstein de l'entropie d'un trou noir de masse solaire ou, ce qui est équivalent, la quantité d'information associée lorsqu'elle est exprimée en bits d'information par exemple, est énorme. La formule de Bekenstein implique en effet que l'entropie d'un trou noir dont l'horizon a une surface d'un mètre carré est d'environ 10^{69} bits. Le rayon de Schwarzschild d'un trou noir de masse solaire étant de l'ordre de 3 kilomètres, la surface de son horizon est d'environ 10^{8} mètres carrés : son entropie de trou noir, selon la formule de Bekenstein, est par conséquent d'environ 10^{77} bits ! Or notre Soleil, en tant que système thermodynamique constitué très principalement d'hydrogène et d'hélium, possède une entropie qui est en gros égale à son nombre d'atomes, soit de l'ordre de 10^{56}. La perte d'information associée au fait qu'un objet de masse solaire s'effondre en un trou noir et disparaît à notre observation résulte donc en une augmentation gigantesque de l'entropie, qui est multipliée par un facteur 10^{21} environ

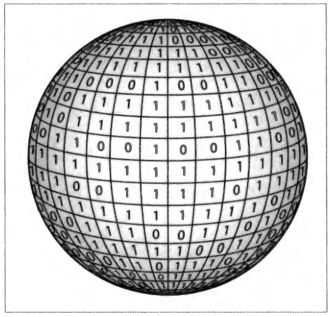
dès que le trou noir se forme, soit un facteur de mille milliards de milliards[6]... Et même pour un trou noir de masse égale à celle de notre Terre, dont l'horizon aurait une taille centimétrique (en supposant que nous sachions fabriquer un trou noir de cette taille), l'entropie est encore de l'ordre de 10^{65} bits.

Il est important de noter que la relation entre masse et entropie de Bekenstein est non linéaire car proportionnelle au carré de la masse. Ainsi, l'entropie devient-elle égale à l'unité – un seul bit d'information – lorsque la masse devient égale à la masse de Planck. C'est ce qui a amené Bekenstein et Wheeler à la représentation de l'entropie d'un trou noir calculée par un pavage avec des pavés minuscules, de surface la longueur de Planck (soit 10^{-35} mètre) au carré, ou « surfaces de Planck », de 10^{-70} mètre carré environ...

La formule proposée par Bekenstein pour l'entropie d'un trou noir suggère la façon suivante de calculer simplement cette entropie : il suffit de mesurer la surface de l'horizon du trou noir, qui délimite la portion d'espace qui n'est plus accessible à l'observation par un observateur extérieur, en la pavant avec des « surfaces de Planck », égales à la longueur de Planck au carré (page suivante).

---

6. Si l'on compare ce nombre à l'entropie d'un bloc d'un mètre cube de silicium, matériau qui sert à réaliser nos barrettes de mémoires d'ordinateurs, cette entropie thermodynamique du silicium est de l'ordre de 10^{29} bits, elle-même très supérieure à la quantité d'information que l'on sait stocker, au moins actuellement, dans un mètre cube de silicium, et très supérieure également à la quantité d'information à laquelle peut accéder le plus puissant des ordinateurs actuels.



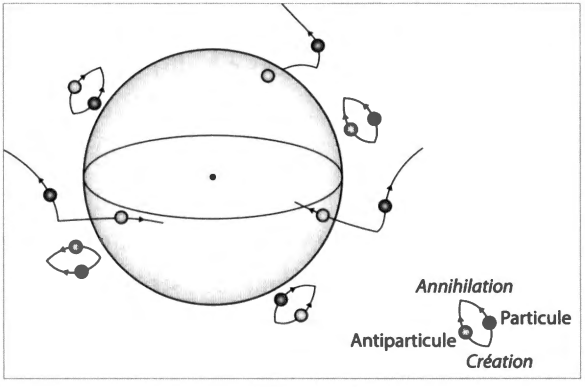
D'après J. A. Wheeler, « Information, Physics, Quantum: The Search for Links ».

L'histoire de la physique est parfois très ironique puisque deux ans plus tard, c'est Hawking lui-même qui confirme l'intuition géniale de Bekenstein et qui, par un raisonnement de théorie des champs semi-classique, démontre qu'un trou noir doit effectivement émettre un rayonnement thermique.

Le raisonnement de Hawking est le suivant : il remarque que l'on ne peut pas s'approcher impunément aussi près que l'on veut de l'horizon d'un trou noir, il y a une certaine distance de protection à prévoir. De ce fait, Hawking s'intéresse à ce qui se passe dans le vide quantique au voisinage immédiat de l'horizon. En effet, le vide quantique cache un bouillonnement de processus virtuels, d'autant plus furtifs que l'énergie et l'impulsion empruntées momentanément au vide sont fortes – les fameuses inégalités de Heisenberg, appelées de façon impropre « relations d'incertitude ».

Par exemple, le vide quantique fabrique en permanence des paires électron-positron virtuelles, dont l'exploration

spatiale ne doit pas dépasser environ 10^{-13} mètre et la durée de vie 3×10^{-22} seconde environ. Mais même extrêmement furtifs et en dépit de leur extension spatiale et temporelle très limitée, ces phénomènes sont bien réels. Hawking imagine alors une telle création de paire au voisinage de l'horizon d'un trou noir, à cheval sur l'horizon : un membre de la paire s'aventure au-delà de l'horizon alors que l'autre reste à l'extérieur. Dans ce cas, l'un des membres restera piégé, tandis que l'autre peut survivre ou au contraire être lui aussi capturé. Si le deuxième cas de capture correspond à laisser le vide inchangé, le premier cas correspond à l'émission nette



Le fait que les trous noirs peuvent, en dépit de leur appellation, émettre des particules et donc n'être pas totalement noirs est dû au fait que le vide quantique réalise en permanence des créations très brèves de particules, suivies de leur annihilation aussi immédiate. Mais lorsqu'une de ces créations de paires a lieu à proximité immédiate de l'horizon, une particule peut tomber dans le trou noir alors que son antiparticule échappe à la capture. Ceci est équivalent à l'émission d'une particule, et l'on peut montrer que le spectre d'émission est thermique, avec une température proportionnelle à la gravité de surface du trou noir. D'après physicsforidiots.com

d'une particule avec brisure de la paire virtuelle extraite du « vide » – dont on voit bien ici qu'il n'est pas si vide que cela.

En estimant le spectre d'émission, Hawking se rend compte du fait que le spectre est un spectre universel, caractérisé par une exponentielle décroissante de l'énergie, qui n'est rien d'autre qu'un spectre thermique. Après s'être convaincu que le phénomène apparaît universel et robuste, Hawking se résout à publier son calcul, qui suscite une énorme surprise. De toutes parts, avec initialement sans doute la volonté de mettre en défaut le résultat, différentes méthodes confirment le résultat de Hawking, ce qui résulte en quelques années en l'acceptation assez générale que l'émission thermique des trous noirs existe bel et bien.

Si nous revenons un instant au démon de Geroch, la réponse à l'apparente violation du second principe vient de ce que Geroch n'avait pas pris en compte que le démon doit opérer, s'il est immobile au voisinage de l'horizon du trou noir, dans un véritable enfer thermique, et que ce flux de rayonnement – qui n'est pas sensible dans la théorie standard par un observateur qui se laisse tomber en chute libre, ce qui peut sembler paradoxal – constitue un élément essentiel du bilan de la machine thermique que le démon essaye de mettre en œuvre. Là aussi, il est bientôt admis que le démon de Geroch ne parvient pas à opérer en violant le second principe.

Par la suite, la cohérence de la notion d'entropie de Bekenstein-Hawking se renforce. Ainsi, en 1982, Woyzeck Zurek, de Los Alamos, autre ancien étudiant de Wheeler,

montre que l'entropie d'un trou noir n'est rien d'autre que le nombre de photons émis au cours du processus d'évaporation du trou noir – de la même façon que l'entropie du Soleil est en gros égale à son nombre de noyaux d'hydrogène et d'hélium. On retrouve ici le fait que, si l'entropie thermodynamique est définie à une constante près, l'entropie du système trou noir et du rayonnement qui le baigne prend ici, même dans ce traitement semi-classique, une valeur bien définie, la valeur nulle de l'entropie définissant un état parfaitement ordonné. On retrouve par ailleurs l'autre aspect que nous avions déjà cité de l'entropie de Shannon en tant que mesure d'une quantité d'information. Considérée comme un système pouvant stocker de l'information, l'entropie d'un gaz de photons correspond également à une information stockable en principe. Car un photon peut, par ses degrés de liberté de polarisation, permettre de stocker un bit[7].

Dans l'intervalle, en 1976, un nouvel élément important éclaira le problème de l'émission thermique d'un trou noir. Nous avons mentionné dans le chapitre sur « Les deux théories de la relativité d'Einstein » que William Unruh, de l'université de British Columbia au Canada, avait étudié en effet le cas d'un objet accéléré, relié par le principe d'équivalence au cas d'un objet maintenu immobile juste au-dessus de l'horizon d'un trou noir. D'après le principe d'équivalence en effet, du fait qu'il faut soumettre l'objet

7. Et pas une quantité infinie d'information comme pourrait le laisser croire la description de la polarisation par un angle réel compris entre 0 et 2π.

suspendu à une force énorme pour éviter qu'il ne soit emporté par le trou noir, on s'attend à ce que ce problème soit équivalent à ce que ressent un corps accéléré très fortement dans un espace-temps plat, loin de toute masse. À sa surprise, Unruh démontrait que le corps accéléré doit ressentir un rayonnement thermique proportionnel à son accélération (et donc de température élevée lorsque l'accélération devient énorme)[8].

Cherchant à déterminer si cet effet est testable, Unruh se rend rapidement compte que pour les accélérations supportables pour un être humain, l'effet est ridiculement petit et inobservable. Ainsi, pour une accélération de 10 m/s^2, proche de l'accélération nécessaire à nous maintenir à la surface de la Terre, l'effet thermique correspond à un rayonnement d'une année-lumière de longueur d'onde, typique d'une température d'environ $3\ 10^{-19}$ K, soit un tiers de milliardième de milliardième de degré, ce qui veut dire également qu'il faudrait maîtriser toute fluctuation dans une région d'au moins une année-lumière pour arriver à le mesurer, ce qui est parfaitement impossible en pratique.

Cet effet thermique est donc en général très petit. Au CERN, John Bell, connu comme un spécialiste de la

8. La formule qui donne la température de cette excitation thermique est :

$$T = \hbar g / 2\pi c$$

où $\hbar$ est la constante de Planck, g est la valeur de l'accélération et c est la vitesse de la lumière. Cette formule montre que la température ressentie est proportionnelle à l'accélération – formule où nous exprimons la température en unité d'énergie, et où la constante de Boltzmann qui intervient dans la formule initiale d'Unruh vaut 1 par définition.

mécanique quantique par les inégalités qui portent son nom mais qui travaillait au CERN sur la physique des faisceaux, cherchait à déterminer s'il était possible de mettre en évidence expérimentalement l'effet Unruh dans les systèmes subissant les plus fortes accélérations que l'on sait produire : les électrons ultra-relativistes dans un synchrotron, l'accélération étant tellement forte que leur horizon court derrière eux à une distance d'un centimètre environ ! Si on transcrit cela en température, cela correspond à un rayonnement de longueur d'onde centimétrique (la distance à l'horizon) et à une température de l'ordre du kelvin. Pas chaud, mais peut-être détectable, se dit John Bell, qui montre qu'effectivement on peut considérer, en prenant par exemple en compte à quel taux se renverse le spin des électrons dans leur mouvement accéléré, que les électrons baignent dans un bain thermique à la température prévue par la formule d'Unruh. John Bell décédant prématurément à l'automne 1990 d'une attaque cérébrale, c'est le physicien Jon Magne Leinaas, collaborateur de Bell, qui finalise cette étude (rendez-vous en fin de chapitre pour en savoir plus – I).

Le « paradoxe » de l'information des trous noirs

Le lecteur attentif aura pu s'étonner d'une bizarrerie de l'entropie de Bekenstein des trous noirs : en effet, dès qu'un objet massif s'est effondré en un trou noir, on lui attribue une entropie énorme, dont nous avons vu que, pour un trou noir de quelques masses solaires, elle est gigantesque devant

l'entropie de la matière ayant servi à constituer le trou noir, juste avant son effondrement. Pourtant cette matière est encore visible, avec une entropie des milliards de milliards de fois plus faible, une fraction de seconde seulement avant la formation du trou noir ! On peut même considérer la situation extrême d'une civilisation très avancée qui construirait des coquilles sphériques de matière constituées de particules dans un état quantique pur, parfaitement déterminé et donc d'entropie nulle, et de masse suffisante pour que, si on la laisse s'effondrer sous son propre poids, elle constitue un trou noir, lequel, dès sa formation, acquerra une entropie énorme. D'où le « paradoxe » de l'information des trous noirs, exprimé par Hawking : alors que la mécanique quantique est unitaire, ce qui signifie à peu près que les processus conservent la somme des probabilités, où passe l'information et comment se construit l'entropie si elle se modifie aussi brutalement dans le temps ? Que se passe-t-il notamment dans le processus d'évaporation du trou noir qui voit finalement sa disparition dans un grand flash final, comme l'avait montré Stephen Hawking ?

Trois solutions sont usuellement envisagées pour répondre au « paradoxe » de l'information des trous noirs :
– l'un des points de vue, que défendit initialement Hawking, était que l'information est réellement détruite dans le processus d'évaporation du trou noir quand on prend en compte la mécanique quantique, processus qui devient donc non unitaire, en contradiction forte avec les règles de la mécanique quantique ;

– une autre solution possible était que le trou noir ne s'évapore pas complètement, laissant derrière lui un objet d'une masse de Planck (2×10^{-5} gramme environ) qui contiendrait toute l'information. Le problème associé à cette « solution » est d'imaginer comment un objet de taille et de masse aussi faibles pourrait concentrer une telle masse d'information, par ailleurs d'autant plus complexe que le trou noir initial, avant le début de son évaporation, était plus massif et constitué d'une multitude d'objets. Cette hypothèse n'est donc plus considérée sérieusement, d'autant que des bornes ont été démontrées sur la quantité d'information qu'il est possible d'encoder en fonction du volume où on veut la confiner ;
– la troisième solution, qui rassemble aujourd'hui le plus grand nombre de supporteurs, est que l'information n'est pas perdue, point de vue défendu initialement par John Preskill, qui s'est lancé en 1997 dans un pari avec Hawking sur cette bataille entre perte et conservation de l'information. Hawking avait basé son raisonnement et son pari sur le fait que l'état quantique de n'importe quelle particule qui s'échappe du trou noir est aléatoire et ne peut donc contenir aucune information utile. Cependant, au milieu des années 1990, Susskind prend conscience du fait que l'information pourrait être codée non pas dans chaque photon individuel – qui apparaît effectivement individuellement comme du bruit thermique –, mais dans l'état quantique de l'ensemble du rayonnement émis par le trou noir. On sait en effet que, si un observateur n'a pas accès à l'ensemble des membres d'un système intriqué, le comportement de l'un seul de ses

membres peut donner l'impression de l'aléatoire[9]. Susskind développe alors l'idée de « complémentarité du trou noir » où l'ensemble (trou noir + ensemble de son rayonnement) garde la même entropie que la matière initiale qui a servi à sa constitution. Le point de vue de Preskill et de Susskind respecte la mécanique quantique car l'information ne peut y être détruite (ce qui est lié à la propriété d'unitarité de la mécanique quantique), développant l'idée que, même avec une émission thermique, il est possible de respecter l'unitarité et de reconstruire l'image et l'information des objets tombés dans le trou noir à travers les corrélations quantiques des photons émis dans le processus d'évaporation du trou noir. Dans la pratique, tout se passe néanmoins comme si l'information était perdue, car la condition de mesurer l'ensemble de tous les photons du rayonnement émis au cours de l'évaporation du trou noir est totalement irréalisable.

Ce point de vue que fondamentalement, en dépit des apparences, l'information est conservée dans le processus d'évaporation des trous noirs, a reçu une confirmation indirecte, venant de l'étude de certaines théories des cordes que je discute dans le chapitre que je leur consacre. En 1997 également, Juan Maldacena étudie mathématiquement la conjecture lancée par 't Hooft et développée par Susskind que l'ensemble de l'Univers peut être décrit comme une sorte

9. Ce qui est traduit par le formalisme de la matrice densité, trop technique pour être détaillé ici, mais dont le lecteur pourra trouver la construction dans les références.

d'hologramme informationnel. Le lecteur trouvera à la fin de ce chapitre un développement à ce sujet. L'information importante à en retenir est que la gravité pourrait n'être qu'une question de conditions aux limites, et non une interaction standard, comme le sont la théorie des champs électrofaible et de l'interaction nucléaire forte (rendez-vous en fin de chapitre pour en savoir plus – II).

Donc, après l'exposé de Maldacena et le travail de consolidation qui suit, l'opinion générale se déplace du côté de Preskill que l'information est d'une façon ou d'une autre conservée, au point que Hawking reconnaîtra finalement face à Preskill en 2004 avoir perdu son pari, le prix offert par Hawking à Preskill étant une encyclopédie ultime du baseball, dédicacée par Hawking avec le qualificatif ironique « dont toute l'information peut être extraite »...

Le « *firewall paradox* »

Tout semble donc pour le mieux dans le meilleur des mondes, jusqu'à ce qu'une nouvelle énigme vienne remettre en tension la mécanique quantique, la relativité et la gravitation : le « *firewall paradox* », le « paradoxe du mur de feu ». Publié en 2012 par Joseph Polchinski et son équipe – le même Polchinski qui avait soumis à Thorne la version « billard » du paradoxe temporel du grand-père que nous discutons dans le chapitre sur les trous de ver –, le paradoxe du mur de feu revient sur la vision classique de l'horizon d'un trou noir sans problème et essentiellement

invisible pour un observateur qui passe au travers. Polchinski, en cherchant initialement à justifier le principe de complémentarité énoncé par Susskind, prend conscience du fait que si, réellement, l'intérieur d'un trou noir est caché à nos observations, la modification des intrications quantiques au voisinage de l'horizon doit conduire à un véritable mur de feu – *firewall* – lorsqu'un observateur parvient à la surface de l'horizon. Ce qui serait en contradiction brutale avec le principe d'équivalence, qui stipule qu'un observateur en chute libre, sur une géodésique, ne doit rien ressentir[10] dans son mouvement non accéléré, en particulier à la traversée de l'horizon d'un trou noir.

L'argument de Polchinski est technique mais peut être résumé dans son principe de la façon suivante : reprenant le mécanisme de rayonnement de Hawking, où une paire particule-antiparticule est créée au voisinage de l'horizon d'un trou noir, l'un des membres de la paire tombe vers le trou noir avec une énergie négative, ce qui permet à l'autre membre de la paire de s'échapper du trou noir avec une énergie positive. L'intrication quantique est initialement

10. Pour être tout à fait exact, on s'attend à ce que l'observateur ne ressente rien en dehors des effets de marée, qui sont certes importants pour des trous noirs de quelques masses solaires au voisinage de l'horizon, mais qui peuvent être rendus aussi faibles que l'on veut pour des trous noirs supermassifs comme Saggitarius A*, au centre de notre Voie lactée, avec ses 4,5 millions de masses solaires environ, ou plus encore pour les trous noirs de masse supérieure à un milliard de masses solaires qui semblent présents au cœur de nombre de galaxies actives.

complète entre les deux membres de la paire. Mais d'après le principe de complémentarité de Susskind, cette paire doit aussi être intriquée avec *l'ensemble* du rayonnement du trou noir, dont la cohérence est essentielle à assurer l'unitarité de l'évolution. Si ce double appariement peut paraître anodin, il est cependant en contradiction frontale avec un théorème fondamental de la mécanique quantique, qui indique qu'un système quantique ne peut pas être cloné exactement deux fois et ne peut donc pas être totalement intriqué avec deux systèmes distincts (ici la particule de la paire qui retombe dans le trou noir, d'une part, et le rayonnement de Hawking du trou noir, d'autre part).

Comme c'est le cas dans le raisonnement heuristique de Hawking où, à la frontière du trou noir, un membre d'une paire peut tomber dans le trou noir tandis que l'autre s'en échappe en étant séparé à jamais de l'autre particule de la paire, Polchinski et son groupe étudièrent quelles conséquences en résulteraient si l'on brisait la cohérence, le lien quantique entre les deux membres de la paire nouvellement créée. Car cette brisure possède un coût, d'autant plus fort que le lien est rompu dans une zone de petite dimension, proche de l'horizon du trou noir (ce qui est imposé dès lors que la durée de vie de la paire de particules extraite du vide est extrêmement brève). La conclusion de Polchinski et de son groupe était donc que le moindre mal était d'en passer par une violation du principe d'équivalence lors de la traversée de l'horizon des événements qui définit la frontière du trou noir, avec pour conséquence l'apparition

d'un mur de feu à la traversée de l'horizon du trou noir. La publication de cette discussion sur le « *firewall paradox* » sur le site de prépublication arXiv[11] déclencha plusieurs dizaines de publications – assez contradictoires – en réponse à l'article de Polchinski, ce qui montrait au moins que le problème était loin d'être évident et méritait réflexion. Susskind lui-même oscilla plusieurs fois entre l'opinion que la solution proposée par Polchinski et son groupe était fausse ou au contraire la seule qui pouvait être retenue...

Au moment où j'écris ces lignes, la solution au paradoxe du mur de feu de Polchinski n'est pas encore connue, mais une opinion assez générale est que « quelque chose » doit céder, car la contradiction entre les trois ingrédients gravitation, mécanique quantique et relativité semble très profonde et apparaît dans les différentes solutions envisagées par Polchinski, qui violent les règles d'au moins une des trois théories.

Dans le dernier chapitre consacré à l'univers de Dirac-Milne, nous verrons que si le « vide » est l'état fondamental d'un ensemble de particules de masses positives autant que négatives, la relativité générale elle-même prévoit, ce qui est généralement ignoré, une tension de polarisation gravitationnelle à l'intérieur d'un tel vide qui conduit, lorsque le champ devient énorme comme c'est le cas au voisinage de l'horizon d'un trou noir, à la polarisation du

11. Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski, James Sully, « Black holes : complementarity or firewalls ? », arXiv :1207.3123.

vide. Laquelle débouche sur la création de paires électron-positron et à un véritable mur de feu, fournissant peut-être une solution naturelle au « paradoxe » du *firewall*...

La gravitation comme force émergente ou statistique ?

Au-delà de l'acceptation maintenant générale des liens très forts entre gravitation et information, nous sommes confrontés à la question, non résolue, de savoir si l'on peut trouver une explication simple et plus fondamentale à ces liens. Plusieurs auteurs ont énoncé ces dernières années des conjectures qui pourraient expliquer pour quelles raisons la gravitation n'est pas une force comme les autres, mais est de nature statistique, comme je le mentionnais au début de ce chapitre.

Parmi les approches les plus récentes de ce type, on peut citer celle d'Erik Verlinde qui, en 2009, propose l'idée que la gravitation est une force entropique, c'est-à-dire une force qui résulte d'aspects purement statistiques.

Avant de tenter de résumer de façon heuristique l'argumentation de Verlinde, donnons un exemple classique de force entropique qui se rencontre dans la physique des polymères et qui explique certaines de leurs propriétés surprenantes, comme celle de leur contraction quand on les chauffe, ce qui est l'opposé du comportement de pratiquement tous les autres corps, qui se dilatent sous une élévation de leur température.



Afin de faire apparaître la force entropique dans un polymère, représentons-le de manière très simplifiée : nous supposons que les maillons n'ont pas de force de tension individuelle, mais sont articulés à chaque liaison entre deux maillons.

Dans ces conditions, si l'on néglige les effets dus à l'agitation thermique, une force même infiniment faible va permettre d'allonger complètement le polymère à sa longueur maximale, tous les maillons étant alignés. C'est donc ici l'agitation thermique qui crée la force de rappel et l'élasticité dans le polymère. On peut facilement montrer que la force de rappel augmente avec l'énergie d'agitation thermique de chaque maillon, énergie d'agitation thermique qui n'est rien d'autre qu'une mesure de la température, ce qui permet d'expliquer la raison pour laquelle les élastiques se contractent quand on les chauffe.

Dans le modèle de Verlinde, comme dans d'autres approches que nous décrivons brièvement par la suite, la force de gravitation apparaîtrait comme résultant de « l'information associée aux positions des corps matériels ». Les degrés de liberté – les analogues des maillons de notre polymère – utilisés par Verlinde dans sa « démonstration » sont reliés aux bits d'information que décrit 't Hooft dans son principe holographique.

De façon assez classique, compatible avec ce que nous ont appris les trous noirs, Verlinde conjecture que l'entropie/information d'un volume d'espace-temps peut être encodée

sur sa surface exprimée en unités de : « surface de Planck » = (longueur de Planck^2)

Jusqu'ici, rien que de très naturel, même si la généralisation n'est pas si évidente. De même, la température est reliée via la formule d'Unruh à l'accélération. Plus difficile à « avaler » : Verlinde va construire une énergie thermique à partir de la masse M totale du système, qui permet de définir une énergie interne globale donnée par Mc^2. Si l'on suppose que T peut par ailleurs être dérivée par la relation thermodynamique usuelle :

$$1/T = \mathrm{d}S/\mathrm{d}U$$

il devient possible d'identifier une force comme la dérivée de l'énergie par rapport à un déplacement, ce qui est aussi une formule usuelle, et de faire apparaître une relation entre la force et l'accélération $F = mg$, où g est l'accélération, reliée à la température par la relation d'Unruh, ce qui conduit à la forme habituelle de la gravité newtonienne. Comme on le voit, la démonstration, ici résumée de façon extrêmement cursive, reste très formelle et laisse par ailleurs entendre que de multiples températures doivent coexister dans un système où potentiels et intensités de gravitation vont dépendre de la position, ce qui est le cas de manière générale, la gravitation ayant tendance à aggraver les inhomogénéités plutôt qu'à les aplanir, empêchant donc le système d'être véritablement à l'équilibre thermodynamique.

Autre critique qui peut être adressée à la théorie de Verlinde et qui constitue un problème potentiel : si la température est non nulle, elle va induire de la décohérence. Notons que ce n'est

pas nécessairement un problème si les températures restent faibles dans les cas que nous savons tester. Nous avons en effet mentionné au sujet de l'effet Unruh que la décohérence qu'il doit lui aussi entraîner est pratiquement impossible à tester pour la gravité terrestre, où la longueur d'onde caractéristique de décohérence, donnée par l'expression :

$$c^2/g$$

où c est la vitesse de la lumière et g la gravité de surface habituelle, est d'une année-lumière environ. Néanmoins, ceci impose de vérifier si l'on peut tester l'hypothèse de perte de cohérence en champ plus fort, comme par exemple dans une étoile à neutrons.

Les réactions face à la proposition de Verlinde ont été remarquablement variées et incompatibles entre elles : comme l'a fait remarquer avec ironie le physicien théoricien Andrew Strominger, les jugements sur la proposition d'Erik Verlinde vont de l'affirmation que son modèle est faux, vrai mais trivial, vrai et profond, qu'on le savait déjà, etc. Devant la critique que sa conjecture est, indépendamment de sa véracité, de toute façon largement intestable, Verlinde précisera en 2011 sa proposition afin de parvenir à des prédictions concernant l'énigme de la matière noire, dont il prédit qu'elle n'existe pas, et que sa théorie prédit en revanche MOND, la théorie de gravité newtonienne modifiée conjecturée par Mordehai Milgrom (sans justification théorique, du moins initialement).

Verlinde propose en effet dans cette deuxième publication que son expression entropique de la gravitation pourrait

permettre d'expliquer pourquoi, aux accélérations faibles, la forme newtonienne de la gravité n'est plus respectée, mais prend la forme de MOND, qui prédit que pour les accélérations inférieures à 10^{-10} m/s^{-2}, la force décroît linéairement par rapport à la force attendue du point de vue newtonien. On peut noter la coïncidence que la longueur d'onde du rayonnement Unruh pour de telles accélérations est de 10^{10} années-lumière environ, soit de l'ordre de grandeur de la taille de l'Univers observable, longueur qui, convertie en temps, est de l'ordre de l'âge de notre Univers.

Le problème est qu'à ce stade il n'y a pratiquement pas moyen de tester expérimentalement cette idée dans le Système solaire : en effet, le satellite *Voyager*, après un voyage d'environ quarante ans et soumis à un champ gravitationnel cent millions de fois plus faible que celui auquel il était soumis à la surface de la Terre, est encore dans un champ de gravité mille fois trop fort pour tester ce régime de gravité. Il existe bien dans le Système solaire quelques endroits où la compensation des forces gravitationnelles et l'accélération associée sont suffisamment faibles, mais ceci nécessite de contrôler la position du satellite à une fraction de mètre près, ce qui n'est pas encore accessible actuellement.

En revanche, aux échelles galactiques, Verlinde a également proposé un autre test de sa théorie, et qui concerne les effets de lentilles gravitationnelles galactiques, ces effets étant assez fortement différents selon que l'on fait appel ou non à de la matière noire pour expliquer la cohésion des galaxies. Utilisant un échantillon de plus de 30 000 galaxies,

une équipe de Leiden a revendiqué un bon accord avec les prédictions de Verlinde, mais il faudra clairement plusieurs études similaires pour conforter cette théorie.

Comme pour l'univers de Dirac-Milne, un univers matière-antimatière que nous étudierons au dernier chapitre, et peut-être pour les mêmes raisons fondamentales, la gravité émergente se propose donc de se débarrasser de la matière noire par une modification de la gravitation à faibles accélérations, et Verlinde revendique par ailleurs d'expliquer l'énergie noire, qu'il prétend prédire avec le bon ordre de grandeur. Nous verrons par opposition que Dirac-Milne dit simplement qu'il y a compensation entre masses positives et masses négatives, et que l'Univers est gravitationnellement vide à grande distance, sans besoin d'énergie noire car ce sont les masses négatives qui jouent le rôle de la composante répulsive.

On peut noter par ailleurs, qu'antérieurement à la proposition de Verlinde, plusieurs travaux avaient déjà essayé d'établir un lien entre gravitation et entropie, notamment les travaux de Thanu Padmanabhan, astrophysicien au Tata Institute. Avant cela, dès 1995, Ted Jacobson, de l'université du Maryland, avait montré qu'il était possible de dériver les équations d'Einstein de la relativité générale à partir du principe holographique et des lois de la thermodynamique statistique.

Gravitation et intrication quantique

Un lien plus inattendu a été proposé par le physicien Mark Van Raamsdonk dans sa proposition que l'espace-temps

pourrait n'être rien d'autre qu'une expression géométrique des liens d'intrication au niveau quantique – « *Spacetime is just a geometrical picture of how stuff in the quantum system is entangled*[12] ». Comme dans le cas de la proposition de Verlinde, la conjecture de Van Raamsdonk que la géométrie n'est rien d'autre que l'ensemble des relations d'informations entre « objets » est assez formelle dans son expression et il est effectivement difficile d'en tirer des prédictions immédiates.

Pour comprendre l'idée de Van Raamsdonk, il faut se rappeler qu'en 1935, Albert Einstein, avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, dans un article célèbre appelé depuis le « paradoxe EPR » en référence aux initiales de leurs noms, pensaient démontrer que la mécanique quantique conduisait à des conclusions inacceptables, en établissant qu'un lien perdure entre des systèmes quantiques séparés par des distances aussi grandes que l'on veut. Bien que l'on puisse démontrer qu'il n'est pas possible par ce moyen de transférer de l'information d'un point à un autre à une vitesse plus grande que la vitesse de la lumière, on a néanmoins fini par vérifier expérimentalement cette prédiction très surprenante de la mécanique quantique au début des années 1980, dans

12. L'histoire de la publication de Van Raamsdonk illustre la difficulté qu'il y a à faire passer des idées novatrices, et à ce qu'elles ne soient pas enterrées prématurément. En effet, après deux tentatives infructueuses de publication dans le journal *General Relativity and Gravitation*, Van Raamsdonk proposa son article comme essai au concours annuel de la Gravity Research Foundation. Le premier prix qu'il reçut à cette occasion lui offrait très ironiquement le droit de le publier dans... le même *General Relativity and Gravitation* qui venait de le refuser par deux fois.

une expérience célèbre réalisée par Alain Aspect et son équipe. De fait, il n'est donc pas possible de considérer qu'une partie d'un système ayant interagi dans le passé possède des propriétés locales, qui lui soient propres et qui existent indépendamment de ce qui arrive à l'autre partie, même très éloignée, du système avec qui elle a été en interaction. C'est la propriété d'intrication quantique, très surprenante dans une vision classique, locale de la physique.

Publié la même année, à nouveau sous la direction d'Einstein, un article d'Einstein et de Rosen (noté ensuite ER, selon leurs initiales) étudiait ce qui paraissait un problème complètement différent, les propriétés d'un trou de ver à symétrie sphérique, sorte de passage direct dans l'espace-temps entre deux points aussi éloignés que l'on veut. Si l'on sait aujourd'hui que les trous de ver d'Einstein et de Rosen ne permettent pas un tel passage, car l'espace se referme sur l'imprudent juste au milieu, l'idée fondamentale du trou de ver était lancée dès 1935. Il est étonnant qu'Einstein soit pour une très large part à l'origine de l'introduction de ces deux articles fondateurs, publiés la même année, et discutés encore aujourd'hui, plus de quatre-vingts ans après leur écriture.

Dans un article au titre provocant mais très évocateur « ER = EPR » publié sur arXiv[13] en 2013, Juan Maldacena et Leonard Susskind justifiaient assez largement la proposition

13. Juan Maldacena et Leonard Susskind, « Cool horizons for entangled black holes », arXiv :1306.0533.

de Van Raamsdonk en proposant d'établir une véritable équivalence entre les trous de ver d'Einstein-Rosen et l'intrication quantique discutée par Einstein, Podolski et Rosen. La conjecture de Maldacena et Susskind, initialement très vivement discutée et contestée par une partie de la communauté scientifique, est que la propriété d'intrication entre deux particules équivaut à ce que les particules soient reliées par un trou de ver, ou encore qu'un trou de ver d'Einstein-Rosen est réellement une intrication quantique maximale entre deux trous noirs, ce qui signifie que les deux concepts ne sont pas indépendants mais deux expressions équivalentes d'une même réalité. Le statut de cette conjecture reste encore à confirmer, et personne pour le moment ne semble avoir une idée exacte de l'expression plus fondamentale de la théorie qui permettrait de comprendre cette identité entre trou de ver et intrication quantique. Mais après des débuts tumultueux et soumis à un flot de critiques parfois peu amènes, le lien entre gravitation et information quantique semble prendre de la consistance et devenir une analogie fertile.

Autres liens

Il doit être clair que les conjectures que nous venons de citer sur le lien entre gravité et intrication quantique, et plus encore celles que nous allons citer par la suite, n'ont pas le même statut de solidité que possède la thermodynamique des trous noirs qui semble désormais fermement établie. Si certaines de ces conjectures tomberont probablement comme des branches mortes, elles reflètent néanmoins la démarche scientifique

d'exploration à partir d'analogies et de liens avec des situations mathématiques ou physiques déjà traitées et fertiles par ailleurs, et sont en cela très intéressantes dans leur capacité à proposer des approches nouvelles vers une théorie plus complète, et notamment une théorie prédictive de la gravité quantique qui, à ce stade, nous manque assez désespérément.

Dans cet ordre d'idées, on peut noter les analogies entre l'univers holographique et la physique des électrons fortement corrélés, un domaine très actif de la physique des solides de ces dernières années. Et notamment l'analogie étudiée en 2007 par Brian Swingle, alors au MIT, par l'étude des structures hiérarchiques de liens entre électrons, en partant des électrons adjacents jusqu'à considérer des groupes d'électrons de plus en plus distants. Cette délocalisation de l'information quand on étend l'échelle à laquelle on la caractérise[14] permet de montrer qu'il y a une correspondance forte entre certaines transitions de ces systèmes et la géométrie hyperbolique de l'espace anti de Sitter, dont nous avons déjà parlé au sujet de la conjecture de Maldacena. Là aussi, l'analogie semble se révéler assez profonde et pourrait permettre d'établir un nouveau lien entre géométrie et information/intrication.

Dans un domaine connexe de la physique quantique, même s'il semblait initialement très éloigné de la gravitation, on peut noter également l'étude réalisée par John Preskill,

14. Approche dite «du groupe de renormalisation», introduite dès le début des années 1970 par Leo Kadanoff et par Kenneth Wilson.

que nous avions déjà rencontré dans l'étude du paradoxe de l'information des trous noirs, avec Daniel Harlow de l'université Harvard, sur les codes de correction quantique (nécessaires en pratique pour pouvoir envisager de faire fonctionner un ordinateur quantique). En effet, les codes de correction d'erreurs quantiques mettent toujours en jeu des états où l'information est répartie sur des régions étendues plutôt que locales. Cette délocalisation évoque déjà un peu un hologramme, mais l'analogie a été considérablement renforcée lorsque Preskill et Harlow ont montré sur un cas simple que le principe de correspondance de Maldacena – entre monde à trois dimensions avec gravité et sa surface sans gravité – est en lui-même un code de correction d'erreur quantique. Il reste cependant, comme dans le cas de la théorie des cordes qui, pour être une théorie élégante, reste remarquablement peu prédictive, à trouver des applications dans l'Univers que nous connaissons, qui ne correspond pas à l'univers idéalisé de Maldacena.

Comme touche finale à ce chapitre, je voudrais noter ce qui représente l'un des liens les plus inattendus entre trous de ver et mécanique quantique : l'idée, alors que l'on était parti d'une description classique, et donc apparemment déterministe, de trous de ver dans l'espace-temps, d'un comportement très similaire (et peut-être même identique) à la mécanique quantique : cette irruption de l'aléatoire me paraît très importante. Car ces portes dans l'espace-temps introduisent en effet de l'aléatoire par la multiplicité de leurs solutions pour les mêmes conditions initiales. Nous avons

mentionné cette propriété dans l'étude de ce qui apparaissait initialement comme un paradoxe, le paradoxe du grand-père, étudié très sérieusement par Igor Novikov, Kip Thorne et leurs collaborateurs, qui annoncent même dans une note d'un de leurs articles la démonstration (jamais donnée sauf erreur), que le comportement pour des ondes traversant ces trous de ver est strictement celui de la mécanique quantique.

Ce qu'il faut retenir

Les quatre lois de la thermodynamique des trous noirs énoncées par Bardeen, Carter et Hawking, étonnamment similaires dans leur forme aux lois de la thermodynamique, traduisent en fait une véritable identité physique. Les trous noirs sont en effet associés à une entropie ainsi qu'à un mécanisme d'émission thermique, d'autant plus intense qu'ils sont de faible masse. Cette émission thermique est néanmoins inobservable en pratique pour des trous noirs de masse solaire ou supérieure, ce qui rend difficile un test direct.

La règle simple à conserver à l'esprit est que l'entropie d'un trou noir est égale à la surface de son horizon exprimée en surface de Planck (environ 10^{-70} mètre carré). Ce nombre est aussi le nombre de photons émis par le trou noir tout au long de son processus d'évaporation, jusqu'à sa disparition finale.

L'augmentation d'entropie étant associée à des transformations irréversibles, un important débat sur le

« paradoxe de l'information des trous noirs » a eu lieu afin de déterminer si l'information est effectivement détruite dans le mécanisme d'évaporation des trous noirs ou si, au contraire, on peut considérer qu'elle est conservée, comme semble l'exiger la mécanique quantique. Alors qu'un consensus s'exprimait – en utilisant les résultats sur l'univers holographique de 't Hooft et Susskind, associés aux travaux dont nous reparlerons de Juan Maldacena et Ed Witten – en faveur de l'hypothèse de la conservation de l'information, le débat a été relancé en 2012 par Joseph Polchinski avec un nouveau « paradoxe » : le *firewall paradox*, ou « paradoxe du mur de feu », non résolu au moment où est écrit cet ouvrage, et où l'horizon d'un trou noir constituerait un véritable mur de feu, le prix minimal à payer afin de ne pas violer l'unitarité – en gros la conservation des probabilités – de la mécanique quantique.

Nous retrouverons ce paradoxe du mur de feu dans le dernier chapitre consacré à l'univers matière-antimatière de Dirac-Milne, où il pourrait trouver une expression et une solution naturelles.

Pour aller plus loin

I - Un autre aspect surprenant ressort de l'étude de Bell : en effet, un physicien réaliste pourrait se poser la question suivante : les photons de l'effet Unruh « vus » par une particule accélérée sont-ils réels, existent-ils indépendamment de cette particule ou ne sont-ils qu'une conséquence du mouvement accéléré, et donc visibles uniquement

dans ce cas par l'observateur accéléré ? En effet, si une particule suit une trajectoire sans accélération dans un espace-temps plat (de Minkowski), même si elle est juste à côté de l'électron accélérée, elle mesurera une température nulle et ne verra pas de photons, alors que l'électron accéléré ressent une température non nulle. Qui a raison et n'y a-t-il pas une contradiction entre les deux mesures – température nulle ou différente de zéro – au même endroit ? La différence de température ressentie par les deux observateurs, accéléré ou en mouvement libre, géodésique, indique que forcer une particule à suivre une trajectoire non géodésique dans l'espace-temps va nécessiter de relier l'objet accéléré à des photons, sortes de filaments d'espace-temps. Cette image de filaments d'espace-temps se retrouve dans l'image proposée par Wheeler de l'horizon de trous noirs pavé par des surfaces de Planck (figure page 246), le nombre de ces pavés de Planck étant lui-même égal, selon le résultat de Zurek, au nombre de photons qui vont émerger du trou noir au cours de son évaporation.

II - En 1997 également, Juan Maldacena étudie mathématiquement la conjecture lancée par 't Hooft et développée par Susskind que l'ensemble de l'Univers peut être décrit comme une sorte d'hologramme informationnel « stocké » à la frontière du volume, idée que l'on retrouve implémentée dans l'hologramme dans le sens où l'éclairage d'une surface à deux dimensions peut donner l'impression d'observer un objet en trois dimensions.

En étudiant les espaces anti de Sitter (AdS), qui sont des espaces quantiques à courbure négative constante à trois dimensions d'espace et une dimension de temps, avec une géométrie reproduisant en tout point celle d'une selle de cheval, Maldacena note qu'il est possible d'établir un dictionnaire complet de correspondance entre, d'une part, cet espace à trois dimensions d'espace et une dimension de temps – qui ressemble fortement au nôtre – et qui est soumis

à la gravité et, d'autre part, sa surface à l'infini (figure) à deux dimensions d'espace et une dimension de temps, sans gravité, et où règne une théorie de champ dite « conforme du type des interactions fortes » (notée CFT, pour Conformal Field Theory), pour lesquelles les questions de violation d'unitarité et de perte d'information ne se posent pas. Le dictionnaire de Maldacena permet donc d'établir une correspondance complète, notée AdS/CFT, entre les probabilités de processus dans l'univers à 3+1 dimensions avec gravité et sa frontière à 2+1 dimensions sans gravité. Avec ce dictionnaire de correspondance sur les processus et leurs probabilités, il devient clair que l'information ne se perd pas dans le monde avec gravité – car on a une très grande confiance dans le fait que l'unitarité est respectée dans les théories des champs comme l'interaction forte ou l'interaction électrofaible. Cette conjecture de Maldacena, qui est devenue depuis l'article le plus cité de toute l'histoire de la physique des particules, permet à la fois de donner un sens précis à la conjecture de t'Hooft-Susskind d'univers holographique, et de fournir une indication que la gravité pourrait n'être qu'une question de conditions aux limites, et non une interaction standard, comme le sont la théorie des champs électrofaible et de l'interaction nucléaire forte. Depuis 1997, la conjecture de Maldacena a été étendue à d'autres cas – avec différentes dimensions, et dans des théories de supersymétrie – qui semblent confirmer sa validité même s'il reste difficile de la rendre opérationnelle et prédictive dans le monde physique réel.

THÉORIE DES CORDES ET DIMENSIONS CACHÉES

À ce stade, nous avons vu que la théorie de la relativité générale d'Einstein, théorie classique et géométrique de la gravitation, est vérifiée de façon très précise sur un grand nombre de tests expérimentaux, mais qu'elle n'incorpore nulle part le formalisme quantique[1].

On peut se poser la question de savoir pour quelle raison on souhaiterait absolument quantifier la gravitation. La réponse semble assez évidente au niveau des interactions faible, forte et électromagnétique du fait que ces interactions semblent très bien décrites par des théories des champs (quantiques), et que toutes les particules que nous produisons répondent *in fine* aux règles de la mécanique quantique. Ainsi par exemple, l'électrodynamique quantique constitue-t-elle la théorie quantique considérée comme exacte, associée à la théorie approchée et classique de l'électromagnétisme.

1. Par ailleurs, question sur laquelle nous reviendrons dans un chapitre ultérieur, elle n'a jamais été testée directement sur l'antimatière, un programme développé actuellement au CERN dans trois expériences.

Unification des interactions faible, forte et électromagnétique

Parmi les quatre interactions qui apparaissent dans la Nature, trois d'entre elles, les interactions faible, forte et électromagnétique, semblent donc bien décrites par des théories de champ en espace-temps plat, mais la quatrième, la force de gravitation, résiste à ce schéma et à une unification du type de celle qui lie les interactions faible et électromagnétique dans l'interaction électrofaible – schéma probablement étendu à l'interaction forte avec les théories de Grande Unification (GUT).

Que les interactions faible, forte et électromagnétique s'unifient dans un tel schéma de grande unification est rendu probable par la convergence des forces d'interaction (figure page 279). Mais leurs forces d'interaction présentent une énorme différence, d'un facteur $5\ 10^{42}$ entre la force électromagnétique et la force gravitationnelle s'exerçant entre deux électrons, ou $2{,}7\ 10^{39}$ quand il s'agit d'un proton (environ 1 835 fois plus lourd qu'un électron) et d'un électron. Comment rassembler la gravitation dans un même schéma avec les autres forces avec une telle différence d'intensité? Cette énorme différence révèle-t-elle que la gravitation est d'une nature complètement différente des autres forces?

Si l'on essaye d'utiliser l'arrangement des masses des particules pour deviner une loi générale sous-jacente, comme il avait été possible de le faire en physique atomique avec la loi de Ritz, il nous faut reconnaître qu'encore aujourd'hui, nous n'avons pas d'explication sur le nombre, qui semble limité à

trois, des familles de quarks et de leptons. La progression des masses dans les trois familles de quarks et de leptons reste tout aussi mystérieuse, en particulier pour les neutrinos, particules neutres dans les trois familles de leptons. La seule trace de la masse dans le modèle standard provient du boson de Higgs[2], particule qui présente la propriété que le couplage avec elle des particules est proportionnel à la masse des composants élémentaires impliqués dans l'interaction – même s'il est épistémologiquement étrange de parler de la masse du Higgs pour une particule censée donner sa masse aux autres particules…

L'apparition d'une masse pour les particules dans le modèle standard est en effet associée au mécanisme de Higgs, que nous pouvons interpréter comme la « rumeur du vide ». Je vais tenter d'expliquer par une analogie ce que l'on peut entendre par cette expression : à l'époque où Margaret Thatcher était un Premier ministre qui, comme on le sait, était très critique vis-à-vis de l'Europe et, dans le domaine scientifique, du CERN et du projet LHC qu'elle jugeait trop coûteux, elle avait soumis un ultimatum aux physiciens, sommés d'expliquer en un langage compréhensible le but poursuivi par la recherche et la production du Higgs, faute de quoi elle leur coupait les

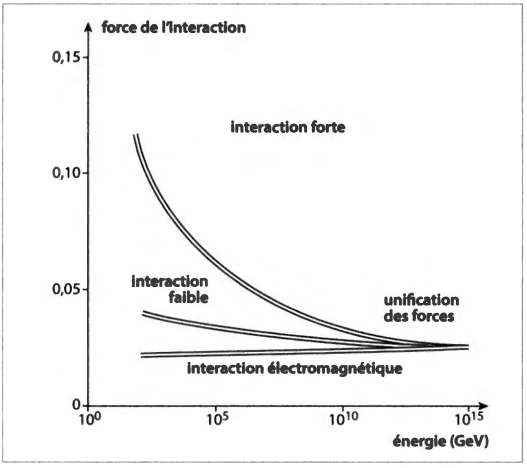
2. Même s'il est difficile de lutter aujourd'hui contre cette appellation de « boson de Higgs » passée dans le grand public, il faut noter qu'il serait plus juste de parler du boson de Brout, Englert et Higgs, voire même de lui associer le nom de Philip Anderson, qui avait déjà introduit une idée similaire dans des travaux antérieurs à ceux de Brout et Englert. Pour disposer d'un nom prononçable, on pourrait parler du « boson de ABEH », ce qui remettrait Higgs à une place plus raisonnable.

crédits. Après réflexion, les physiciens proposèrent à Margaret Thatcher l'analogie suivante :

« Imaginons que vous rentriez dans une pièce remplie d'un grand nombre de personnes ; comme les gens se pressent autour de vous et veulent vous parler, ils ralentissent votre mouvement et augmentent de façon effective la masse en déplacement autour de vous et, *in fine*, votre masse effective.
— Est-ce cela, le Higgs ?, demande Margaret Thatcher.
— Non, madame, ceci n'est pas encore le Higgs.
— Alors, demande Margaret Thatcher, qu'est-ce que le Higgs ?
— Le Higgs, madame le Premier ministre, c'est la masse associée à la rumeur que vous pénétrez dans la pièce : comme la salle est bondée et que les personnes présentes ne peuvent pas voir que vous n'êtes en fait pas présente, une onde de mouvement et un grand nombre de personnes se pressent autour de la rumeur, acquérant une masse, bien qu'aucune personne ne soit au centre. »

Le CERN étant toujours aujourd'hui financé par le Royaume-Uni, on peut supposer que Margaret Thatcher fut sensible à l'analogie proposée.

Pour en revenir à l'unification des interactions faible, forte et électromagnétique, l'unification des trois forces requiert non seulement la convergence des forces d'interaction (figure ci-contre) à une énergie qui n'est plus très éloignée de l'énergie de Planck, mais également que la charge du proton soit exactement égale en valeur absolue à la charge de l'électron – ce qui n'était pas évident a priori –, conséquence

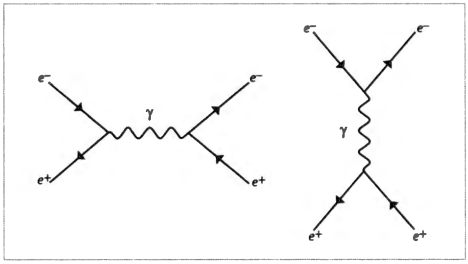


Une très forte indication que les trois forces électromagnétique, faible et forte (les deux premières se rassemblant d'abord dans la force électrofaible) sont bien fondamentalement la même force est donnée par la variation de leur intensité en fonction de l'énergie et par la prédiction de leur convergence vers une énergie de 10^{15} à 10^{16} GeV. Il faut noter que les moyens expérimentaux actuels comme le LHC ne donnent accès qu'à une énergie de l'ordre de 10^3 GeV, à comparer avec l'échelle d'unification de 10^{15} à 10^{16} GeV, et avec l'échelle de Planck, dont nous parlons plus bas pour la gravité quantique, d'environ 10^{19} GeV.

du fait que la désintégration du proton est, ce qui était initialement totalement inattendu, autorisée dans le modèle standard[3].

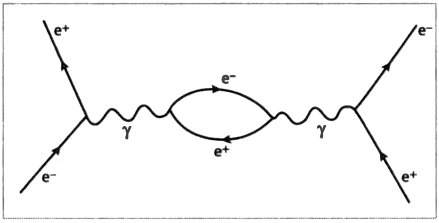
3. Cette désintégration est rendue possible selon un mécanisme surprenant mis en évidence par Gerard 't Hooft et Alexander Polyakov, avec ce que l'on appelle le monopole de 't Hooft-Polyakov, qui permet des voies de passage entre particules et antiparticules, un proton pouvant par exemple, se désintégrer en un positron et un méson pion neutre π^0, c'est-à-dire en un ensemble de particules de nombre baryonique (en gros le nombre de protons ou de neutrons) nul.

Ces trois interactions faible, forte et électromagnétique se prêtent à une représentation diagrammatique, impliquant toujours trois particules se retrouvant dans un vertex, due à Richard Feynman (ci-dessous).



Le diagramme ci-dessus, dont le principe a été introduit par Richard Feynman, représente ici la diffusion d'un électron et d'un positron (à gauche de la figure), qui fusionnent en un photon, qui se transforme en une nouvelle paire électron-positron (à droite de la figure). Les flèches indiquant le sens de propagation dans l'espace ou dans le temps, on voit que dans ce diagramme d'interaction électromagnétique, le positron n'est rien d'autre qu'un électron qui remonte le temps.

Or un problème déjà présent dans les interactions électrofaible et forte est lié aux infinis qui interviennent dans les diagrammes présentant des boucles, comme dans la partie centrale de la figure ci-contre, laquelle fait intervenir la même diffusion entre électron et positron que dans la figure précédente, mais avec, en plus, une création-annihilation d'une paire électron-positron sur le parcours du photon. Il est alors possible et nécessaire de renormaliser les infinis présents dans la théorie, qui apparaissent dans ces boucles intermédiaires, selon une technique proposée par Gerard 't Hooft et Martinus Veltman, technique qui leur valut le prix Nobel de physique en 1999.



Le diagramme ci-dessus ne diffère du diagramme précédent que par la boucle électron-positron qui est insérée sur le trajet du photon (ligne ondulante) médiateur de l'interaction. Ce type de boucle conduit à des infinis du fait que seule la somme des impulsions de l'électron et du positron de la boucle est fixée, mais pas les impulsions individuelles de l'électron et du positron, ce qui conduit à une intégrale divergente. La procédure permettant de se débarrasser de ces infinis est appelée « renormalisation » et a conduit au prix Nobel de physique décerné en 1999 à Gerard 't Hooft et Martinus Veltman.

Mais si l'on essaye d'appliquer la même démarche diagrammatique à la gravitation, la méthode de renormalisation appliquée à des particules ponctuelles ne marche pas et les infinis abondent, avec des problèmes également du côté de l'unitarité, qui, rappelons-le, traduit la conservation des probabilités dans une interaction. L'impossibilité, dans le cas de la gravitation, de se débarrasser des infinis dans une théorie quantique du type de celle qui avait été proposée par Chen Ning Yang et Robert Mills pour unifier interactions électromagnétique et interactions faibles (champs de Yang-Mills) fut contournée à travers la découverte fortuite qu'une théorie représentant les interactions par les modes de vibration de cordes (ou plus tard par des surfaces ou des hypersurfaces), par opposition à une théorie de particules ponctuelles, contient une particule de spin 2 ayant les mêmes propriétés que le graviton…

Est-il nécessaire de quantifier la gravitation ?

Avant d'aborder la construction de la théorie des cordes, on pourrait à bon droit se poser la question de la nécessité d'une version quantique de la relativité générale dans la mesure où la force de gravitation semble totalement négligeable au niveau des particules et d'ailleurs totalement impossible à mesurer pour un électron ou un positron isolés[4]. Cependant, si l'on en croit les équations de la relativité générale, sous des hypothèses très générales, les trous noirs contiennent en leur cœur des singularités, c'est-à-dire des zones où la valeur du champ de gravitation diverge, devenant infini.

Mais que veut dire un champ de gravitation infini ? Que se passe-t-il lorsqu'un observateur ou même ce que nous appelons le vide y sont soumis ? Quelles sont les transformations physiques que subit un objet lorsqu'il devient de densité infinie et est soumis à des gradients de force extrêmes ? En essayant de progresser sur ces questions sans disposer encore d'une théorie quantique de la gravitation, Stephen Hawking avait réalisé au début des années 1970 un traitement que l'on appelle « semi-classique », alliant un traitement quantique de l'électromagnétisme, tout en traitant la géométrie comme le tissu classique d'un espace-temps courbe. Et dans ce traitement, Hawking avait, à sa grande surprise, vu

4. Il est en revanche a priori possible de mesurer l'action de la gravitation sur une particule neutre comme un atome d'antihydrogène, ce qu'ambitionnent de réaliser les expériences AEgIS, ALPHA-g et Gbar au CERN.

apparaître à la frontière de l'horizon des trous noirs des effets thermiques, des processus de création de particules qui relèvent directement de la mécanique quantique, ce qui constitue une nouvelle motivation pour essayer de formuler une théorie quantique de la gravitation.

Quand ils commencent à aborder un problème, et afin d'obtenir les ordres de grandeur d'un phénomène, les physiciens utilisent volontiers l'analyse dimensionnelle, en combinant entre elles les constantes fondamentales associées au problème. De cette façon, en utilisant les constantes, qui est le quantum d'action de la mécanique quantique, *G*, la constante de la gravitation, et *c*, la vitesse de la lumière, il est facile de démontrer qu'en utilisant ces seules trois constantes, il est possible de construire d'une façon unique une grandeur proportionnelle à une longueur, que l'on appelle aujourd'hui « longueur de Planck », et qui, contenant des constantes relevant de la mécanique quantique, pourrait signaler l'entrée dans le régime de la gravité quantique. Son expression est :

$$l_p = \sqrt{\hbar G / c^3}$$

et sa valeur est d'environ $1{,}62 \times 10^{-35}$ m, et donc extrêmement faible.

De la même façon, on peut construire une masse, qui vaut environ $2{,}2 \times 10^{-8}$ kg – la masse d'une poussière –, et une énergie déjà respectable, environ deux milliards de joules, qui représente à peu près l'énergie cinétique d'un TGV lancé à pleine vitesse…

Il est intéressant de comparer la longueur de Planck avec la meilleure résolution actuelle obtenue avec le LHC[5] : la longueur de Planck apparaît comme inatteignable, avec environ quinze ordres de grandeurs à gagner sur le LHC, accélérateur présentant aujourd'hui les meilleures performances mondiales[6]. Il faut donc se tourner vers d'autres techniques de validation de la théorie, par exemple par la prédiction des masses, des schémas d'agencement des particules élémentaires en (probablement trois) familles, ou encore par la prédiction de phénomènes nouveaux, qui restent à expliciter (rendez-vous à la fin de ce chapitre pour davantage de détails – I).

Construction et première révolution de la théorie des cordes

Historiquement, la découverte des théories des cordes s'est effectuée à partir d'une étude qui n'avait apparemment aucun lien avec la gravitation, celle du confinement des quarks dans les nucléons – proton et neutron. À la fin des années 1960,

5. Dont les faisceaux de protons ont chacun une énergie de 6,5 téra-électron-volts (TeV), dans les rares collisions proton-proton qui impliquent des transferts d'impulsion de l'ordre de 1 TeV/c de transfert, ce qui correspond à une précision de sonde d'environ 3×10^{-20} m.

6. Même avec les techniques d'accélération de pointe en cours de développement, et sans considérer les problèmes de rayonnement de freinage à ces énergies, un accélérateur capable d'atteindre l'énergie de Planck et de produire des particules ayant la masse de Planck devrait donc largement dépasser en dimensions le Système solaire.

Gabriele Veneziano avait ainsi noté, sans savoir le justifier, qu'une fonction mathématique, la fonction bêta d'Euler, décrivait bien la façon dont se diffusaient les particules lors de chocs nucléaires. Partant de cette remarque, ce furent Yoichiro Nambu, Holger Nielsen et Leonard Susskind qui, au tout début des années 1970, trouvèrent l'explication de la remarquable intuition de Veneziano en démontrant que si l'interaction peut être décrite comme étant due à une corde élastique infiniment fine l'amplitude de diffusion sera décrite par cette même fonction bêta d'Euler. Malgré son immense importance ultérieure, cette découverte suscita peu de réactions et, par exemple, l'article de Susskind sur ce sujet des cordes fut initialement refusé comme étant sans grand intérêt... Il faut dire qu'il fut bientôt clair que les prédictions associées au modèle de corde de Nambu, Nielsen et Susskind n'étaient pas en réel accord avec les données expérimentales des interactions fortes, alors qu'à peu près au même moment une théorie concurrente, la chromodynamique quantique – souvent abrégée en QCD en raison de son nom anglo-saxon *Quantum Chromodynamics* –, sorte d'extension de la théorie quantique du champ électromagnétique, prenait son essor et semblait plus à même de décrire de façon précise les interactions fortes. Au milieu des années 1970, les travaux de physiciens russes comme Yuri Dokshitzer et Vladimir Gribov, puis les équations d'Altarelli-Parisi proposent en effet des tests expérimentaux relativement précis qui déplacent l'intérêt des théoriciens – comme des expérimentateurs – vers la nouvelle théorie QCD.

Malgré cet abandon de la première version de la théorie des cordes dans le domaine des interactions fortes, John Schwarz et Joël Scherk, un physicien français disparu prématurément, remarquent en 1974 qu'une théorie quantique des cordes prédit l'émission copieuse, dans les processus à haute énergie, de particules qui ressemblent aux photons, car de masse nulle, mais qui en diffèrent du fait qu'elles ont un spin 2 (au lieu d'un spin 1 pour le photon). Schwarz et Scherk émettent alors l'hypothèse géniale que la théorie des cordes, si elle ne s'applique pas à la théorie des interactions fortes, constitue une théorie quantique de la gravitation. Mais cette proposition, publiée quelques mois plus tard en 1974, va recevoir un accueil extrêmement réservé, peut-être parce qu'elle apparaît comme l'adaptation désespérée d'une théorie qui, malgré ses aspects esthétiques, n'était pas capable de reproduire fidèlement les résultats expérimentaux des interactions fortes. La taille de la corde utilisée par Schwarz et Scherk – de l'ordre de la longueur de Planck $\approx 10^{-35}$ m – était par ailleurs dramatiquement différente de celle introduite initialement dans la tentative d'explication des interactions fortes – environ un femtomètre, 10^{-15} m –, ce qui constituait un autre élément expliquant la méfiance des théoriciens.

Un autre problème dont semblait souffrir la théorie de Schwarz et Scherk était lié aux anomalies que la nouvelle théorie avait toutes les chances de présenter. La question des anomalies des théories quantiques est assez technique: ces anomalies résultent des cas où la symétrie que possède la

théorie classique ne trouve pas son correspondant dans le cas quantique, notamment après la procédure de renormalisation qui traite des infinis dans les théories des champs. Persuadé de l'intérêt de la théorie des cordes, Schwarz entreprit avec l'aide de Michael Green, dans les années qui suivirent le suicide de Joël Scherk, le calcul des anomalies, afin de voir si, par chance, elles se compenseraient. Le calcul, difficile et laborieux, ne fut finalisé qu'en 1984 où, de façon quasi miraculeuse, Schwarz et Green démontrèrent l'annulation de l'ensemble des anomalies, enlevant cette épée de Damoclès de la théorie des cordes.

Un autre aspect de la théorie initiale des cordes qui faisait douter les physiciens de son statut de théorie générale capable d'intégrer l'ensemble des interactions et des particules est que, telle qu'elle était formulée en 1970 par Nambu, Nielsen et Susskind, elle ne pouvait décrire que des particules de spin entier, et cela dans un espace-temps comprenant vingt-six dimensions, ce qui fait quand même beaucoup de dimensions, notre Univers ne présentant apparemment que trois dimensions d'espace et une dimension de temps... Or, dans le modèle standard, on trouve d'une part les bosons intermédiaires de spin entier, particules qui transportent les interactions d'une particule à une autre, comme le photon et le gluon, de masse nulle, ou les W et le Z, massifs, aux côtés des particules de matière, comme les quarks et les leptons, qui sont toutes de spin demi-entier[7].

7. Les fermions sont des particules pour lesquelles il faut une rotation de 4π radians, soit deux tours complets, pour qu'elles retombent sur elles-mêmes – alors que pour une particule de spin entier, comme pour

C'est le physicien français Pierre Ramond, de l'université de Gainesville qui, en 1971, trouva un élément essentiel de la théorie en montrant comment il était possible de construire des cordes fermioniques aux côtés des cordes bosoniques. La démonstration est assez formelle mais la découverte de Ramond était fondamentale dans la mesure où elle introduisait une première version, à deux dimensions, de ce que l'on appela ensuite la «supersymétrie», qui réalise ce que l'on considérait jusqu'alors comme le mariage de la carpe et du lapin, en établissant un lien entre fermions (spin demi-entier) et bosons (spin entiers), et plus précisément entre un fermion et un boson de spin entier immédiatement voisin de celui du fermion. De cette manière, la voie était ouverte pour décrire l'ensemble des particules et non pas seulement les bosons intermédiaires.

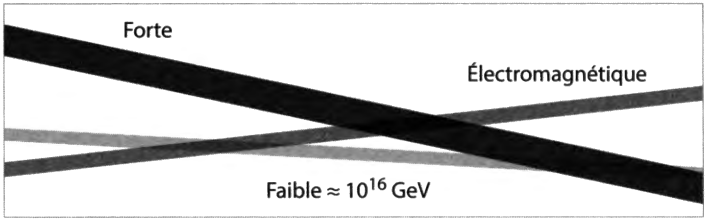
Un autre aspect remarquable de la supersymétrie (que l'on exigera donc de toute théorie des cordes réaliste) est qu'elle incorpore un mécanisme qui résout le problème de la constante cosmologique, l'énergie du vide qu'Einstein avait introduite avant de la rejeter comme une erreur majeure, si du moins la (super)symétrie est parfaitement respectée. En effet, les éléments des couples boson-fermion qui apparaissent grâce à la supersymétrie contribuent de façon égale et opposée à l'énergie du vide. Le problème est bien sûr que dans notre monde physique, la supersymétrie n'est pas une «bonne» symétrie, c'est-à-dire pas une symétrie exacte, sinon nous verrions dans

---

tout objet classique que nous connaissons, il suffit d'une rotation de 2π radians, ou 360 degrés.

la Nature pour chaque électron, par exemple, un sélectron – partenaire supersymétrique de l'électron – de même masse, et un appariement similaire pour chaque particule. Or ce n'est clairement pas le cas, car nos accélérateurs ne produisent pas de telles particules supersymétriques de masse faible – donc a priori aisées à produire. Si la supersymétrie n'est qu'une symétrie approchée, la compensation des termes de l'énergie du vide a toutes les chances de n'être qu'approchée elle aussi, et la valeur naturelle de la densité d'énergie du vide étant énorme – typiquement la masse de Planck à la puissance 4 –, on peut craindre que le problème reste sinon entier, du moins largement présent – même si l'introduction de la supersymétrie constitue indéniablement un pas dans la direction de la résolution de ce problème.

Détail qui a son importance dans le contexte de la théorie quantique de la gravitation : un zoom de la zone de convergence des trois interactions faible, forte et électromagnétique que nous avions notée dans la figure page 290 met en évidence que la convergence n'est pas parfaite (page suivante) : or l'introduction de la supersymétrie dès l'échelle d'énergie de l'unification électrofaible, soit une énergie de l'ordre du TeV, permet d'améliorer d'environ un ordre de grandeur la précision de la convergence, qui n'est pas parfaite sans elle. Cet argument avancé par Ed Witten constituait une motivation forte en faveur de la supersymétrie, mais on ne voit malheureusement aucun signe de particules supersymétriques au LHC, qui aurait dû les détecter si elles existaient bien à l'échelle électrofaible…



Dans le modèle standard de la physique des particules, la convergence des trois interactions faible, forte et électromagnétique est très bonne et indicatrice que les trois interactions sont des manifestations d'une interaction unique, mais pas parfaite. L'introduction de la supersymétrie à une énergie intermédiaire de l'ordre du TeV, accessible au LHC, permet d'améliorer cette convergence d'environ un ordre de grandeur. Malheureusement, aucun signe de vie supersymétrique n'a encore été détectée au LHC…

La libération du problème des anomalies par Green et Schwarz de la théorie des cordes supersymétriques en dix dimensions va en tout cas relancer de façon extraordinaire l'intérêt des théoriciens pour la théorie des cordes et susciter l'espoir, au moins initialement, que la théorie des cordes soit LA théorie, unique et nécessaire, qui décrit l'ensemble des interactions présentes dans notre Univers, sorte de Graal des physiciens, que l'on appelle la « Théorie de Tout » – *Theory of Everything* dans la littérature anglo-saxonne.

Il serait présomptueux d'affirmer que la théorie des cordes permet aujourd'hui d'identifier une telle structure unificatrice de l'ensemble des particules et de leurs interactions, mais nous verrons qu'elle permet effectivement d'envisager qu'il s'agit peut-être de la bonne théorie à travers les schémas des dimensions cachées. Elle permet aussi d'envisager la possibilité de représenter l'ensemble

des particules élémentaires (de spin demi-entier) et leurs bosons d'échange (de spin entier) comme des modes de vibration de cordes. La masse des particules est alors donnée par l'énergie des modes de vibration. On peut par ailleurs noter que, comme c'est également le cas dans les géométries qui représentent les trous noirs, il est également possible d'inclure dans la définition des modes de vibration les caractéristiques de charge et de spin qui, complètent, aux côtés de la masse, la caractérisation d'une particule élémentaire. En tout état de cause, et ce qui est fondamental, l'un de ces modes de vibration des cordes possède les caractéristiques de spin 2 et de masse nulle du graviton.

Nous avons signalé plus haut qu'un élément fondamental de la représentation par les cordes vient du fait que l'on ne représente plus les particules par des éléments ponctuels mais par une corde, dont la longueur constitue par ailleurs une sorte de minimum de distance. En effet, la théorie des cordes comprend une propriété d'invariance[8], qui signifie que s'il est toujours possible de considérer une corde qui serait plus petite que la longueur de Planck, mettons le dixième de la longueur de Planck, unité de longueur quant à elle fixée en fonction de la valeur (très faible) de la force de la gravitation, la situation est alors parfaitement équivalente à celle où la longueur de la corde est dix fois – au lieu d'un dixième, son inverse – la longueur de Planck. De ce point

8. Sur ce sujet, on pourra par exemple consulter le chapitre 8 du cours de David Tong disponible sur: https://arxiv.org/pdf/0908.0333.pdf, et notamment le sous-chapitre « Why big circles are the same as small circles ».

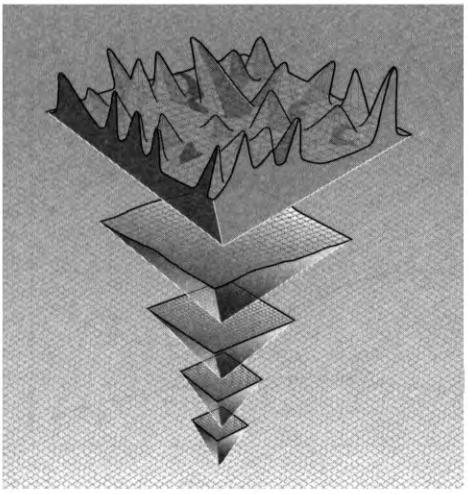
de vue, les infinis et les topologies extrêmement chaotiques (figure ci-contre) introduites par des longueurs aussi petites que l'on veut sont rendus maîtrisables par cette invariance et l'existence d'une longueur qui est équivalente à une longueur minimale de corde vibrante (rendez-vous en fin de chapitre pour davantage de détails – II).

En proposant une solution à la quantification de la gravitation, et en montrant que le problème des anomalies n'affligeait pas la théorie des cordes, Green et Schwarz convainquirent la communauté de physique mathématique de l'importance de cette théorie et du fait qu'elle pouvait bien représenter la solution au problème de la théorie quantique de la gravitation, même s'il restait un travail considérable de consolidation à effectuer.

Masse de Planck et masses des particules élémentaires

Cette longueur extraordinairement faible de la corde introduite par Schwarz et Scherk, nécessaire dans un espace-temps à quatre dimensions pour reproduire la faiblesse de la force de la gravitation, a une conséquence désagréable sur les masses des particules qui sont prédites par la théorie.

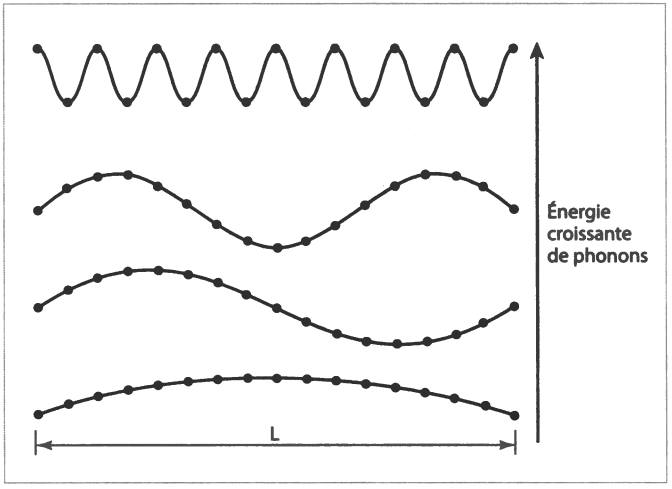
Comme ce sont les modes de vibration des cordes qui représentent les différentes particules, le spectre de vibration de la corde va, en première approximation, être constitué par les harmoniques de la note fondamentale, un peu comme dans une flûte ou dans un piano où, en plus du fondamental,



Si on laisse ouverte, comme c'est le cas en théorie des champs, la possibilité de fluctuations aussi grandes que l'on veut pour impulsion et énergie des particules cachées dans le vide, on parvient en augmentant le grossissement (qui croît du bas de la figure au haut de la figure) à un moment où l'échelle de confinement des fluctuations, de plus en plus fortes au fur et à mesure de l'augmentation du grossissement, conduit à créer des trous noirs ou des topologies très compliquées pour le vide, comme on l'a représenté sur la « mer agitée » en haut de la figure, au grossissement maximal.

ce sont tous les harmoniques excités également aux côtés du fondamental qui constituent le son de l'instrument (figure ci-après).

Or, tout semble indiquer que, du simple fait de la longueur de la corde et du principe de Heisenberg, le fondamental doit posséder l'énergie de Planck, soit de l'ordre de 10^{19} GeV, la masse se dérivant de l'énergie suivant la formule. Mais un simple coup d'œil suffit à constater que les masses des particules élémentaires qui figurent dans le tableau des



L'énergie de vibration d'une corde est d'autant plus élevée que, pour une amplitude donnée de vibration, la longueur d'onde est faible ou, ce qui est équivalent, le vecteur d'onde est grand.

trois familles de quarks et de leptons sont, même pour les plus élevées comme la masse du quark top ou des bosons intermédiaires W et Z, des millions de milliards de fois plus légères que la masse de Planck. Pour contrer le fait que les oscillations des cordes sont a priori de l'ordre de la masse de Planck, on essaye généralement de partir de l'ensemble des particules de masse nulle (comme le photon ou le graviton) prévues par la théorie, et de voir dans quelle mesure il est possible de générer des particules de masse faible, c'est-à-dire très inférieure à la masse de Planck, par perturbation à partir de ces modes (le tableau et des explications plus développées sont consultables à la fin du chapitre – III).

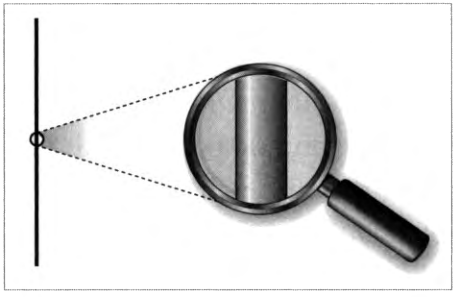
On peut par ailleurs noter que les masses des particules observées dans notre monde ne se distribuent pas du tout de façon régulière, comme c'est le cas pour un oscillateur harmonique, ni dans des relations simples, ce qui peut se comprendre si chaque particule est décrite par un mode de vibration complètement différent des autres (même s'il semble malgré tout assez étrange que l'on ne voie pas apparaître de relations plus claires entre les énergies – proportionnelles aux masses – des différents modes).

Revenons un instant sur l'énorme différence de force d'interaction entre les forces d'interaction faible, forte et électromagnétique d'une part, et la force de gravitation d'autre part (environ 40 ordres de grandeur). Une première idée d'explication consiste à proposer que la force de la gravitation est en fait beaucoup plus importante que ce que l'on peut mesurer dans notre univers macroscopique à 3 + 1 dimensions car l'espace-temps comporte en fait des dimensions cachées, enroulées sur elles-mêmes. Quand on se rapproche à distance inférieure à l'échelle de l'enroulement de cette dimension supplémentaire, très difficile à voir si l'enroulement se fait sur une toute petite distance, bien inférieure au diamètre d'un cheveu, la force de la gravitation change brutalement du fait que les lignes de champ peuvent maintenant s'engouffrer dans les dimensions supplémentaires qui s'offrent à elles, ce qui modifie l'intensité de la force associée (figure page suivante). Des contraintes existent néanmoins quant aux longueurs maximales admissibles à laquelle la différence

doit apparaître en fonction du nombre de dimensions supplémentaires.

L'hypothèse des (mem)branes, généralisant les cordes, dont nous verrons plus loin qu'elle a été proposée en 1995 par Joseph Polchinski, a également conduit à considérer la possibilité que la taille des dimensions supplémentaires soit nettement supérieure à la longueur de Planck de 10^{-35} mètres lorsqu'elle est estimée à partir d'un espace-temps à quatre dimensions. Pour citer l'exemple qui est sans doute le plus attractif, cette taille pourrait se situer à l'échelle de 10^{-20} mètres accessible à l'énergie du LHC, se situant alors à l'échelle de l'unification électrofaible. Dans le scénario des branes par ailleurs, les dimensions d'espace de Calabi-Yau peuvent être beaucoup plus grandes que 10^{-35} mètres, car c'est leur intersection avec la brane qui est de très petite taille, à une résolution que nous n'avons pas encore réussi à observer.

En dépit de ces questions, à l'époque de ce que l'on appelle aujourd'hui la « première révolution des cordes »,



Une dimension cachée microscopique, de taille d'enroulement l, passe inaperçue pour un observateur qui est à distance grande devant l. Mais si on se rapproche d'une particule à distance de l'ordre de l ou inférieure à celle-ci, les lignes de champ découvrent cette dimension cachée, dans lesquelles elles peuvent s'engouffrer, ce qui modifie fortement l'intensité et la variation de la force en fonction de la distance.

liée à la démonstration de Green et Schwarz en 1984, un engouement extraordinaire va s'emparer de la communauté des physiciens théoriciens et, pendant plus de vingt ans, l'essentiel des recrutements va s'effectuer sur ce sujet, éteignant une large part de la recherche qui aurait pu s'effectuer sur d'autres voies. Des critiques virulentes de cet état de fait et de cette prédominance stérilisante ont été effectuées par des physiciens comme Lee Smolin, notamment dans son ouvrage *Rien ne va plus en physique !*. Je ne m'étendrai donc pas plus sur cette question. Notons malgré tout que, même si la critique de Smolin est valide, la théorie des cordes est indubitablement une grande théorie, en particulier pour les raisons que nous développons par la suite. Et ce, même si l'espoir d'unicité va se révéler assez largement déçu, plusieurs théories des cordes différentes semblant pouvoir être formulées, avec cinq théories constituant des cas limites, représentant chacun certaines des propriétés des particules effectivement rencontrées dans la Nature (rendez-vous en fin de chapitre pour plus de détails – IV).

Dimensions supplémentaires et espaces de Calabi-Yau

Nous avons vu plus haut que la démonstration de l'annulation des anomalies, qui a constitué la première révolution des cordes, était valable pour une théorie supersymétrique en dix dimensions d'espace-temps. Mais notre espace-temps

n'a-t-il pas quatre dimensions seulement ? En quoi pouvons-nous être intéressés par une théorie qui n'est cohérente que pour un espace-temps à dix dimensions ?

En fait, dès 1919, Theodor Kaluza avait déjà remarqué que l'ajout d'une dimension supplémentaire, soit un espace-temps à cinq dimensions, permettait de traiter non seulement la gravitation en tant que déformation de l'espace-temps à 3 + 1 dimensions, mais aussi l'électromagnétisme. Kaluza avait discuté son projet d'article avec Einstein et, bien que l'idée d'une dimension supplémentaire apparaisse à première vue bizarre, Einstein, qui poursuivra toute sa vie la recherche d'une théorie unifiée des champs, avait encouragé Kaluza à publier son idée, ce que celui-ci avait fait en 1921. Mais la question de savoir quel pouvait bien être le sens et le « lieu » de cette cinquième dimension d'espace-temps restait sans réponse. C'est Oskar Klein qui, en 1926, complétant la théorie de Kaluza (d'ailleurs appelée aujourd'hui « théorie de Kaluza-Klein »), imagina que cette dimension supplémentaire pouvait être enroulée sur elle-même et de toute petite dimension, inférieure à la résolution de nos meilleurs instruments, ce qui expliquerait qu'elle reste invisible. Ironiquement, la recherche d'une théorie unifiée par Einstein fut, jusque dans les années 1970, considérée comme une voie sans issue, car poursuivie sans succès pendant plus de trente ans par Einstein – avis généralement assorti d'un peu de commisération. Mais l'idée renaît avec force dans la théorie des cordes, d'abord dans le cadre de la théorie des cordes initiale, dite « bosonique » en vingt-six

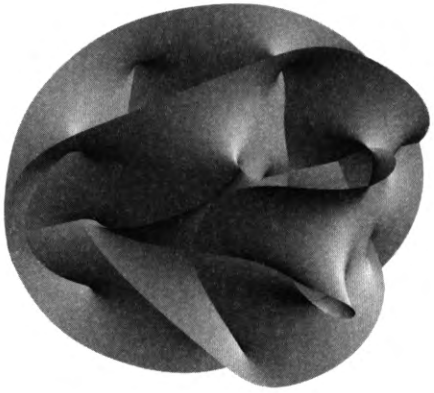
dimensions, puis dans le cadre de la théorie supersymétrique des (super)cordes, en dix dimensions.

Concernant les six dimensions cachées de la théorie supersymétrique et des multiples façons dont ces dimensions cachées peuvent s'enrouler entre elles, notons l'importance fondamentale des espaces de Calabi-Yau, nommés ainsi en référence à Eugenio Calabi, de l'université de Pennsylvanie qui, le premier, au milieu des années 1950 – soit nettement avant l'introduction des théories des cordes – émit l'hypothèse de tels espaces, et à Shing-Tung Yau qui, à la fin des années 1970, démontra la conjecture de Calabi sur l'existence de ces espaces dont l'une des caractéristiques essentielles est la possibilité d'incorporer l'asymétrie miroir entre matière et antimatière. Il est en effet essentiel de décrire le fait d'expérience que la matière est dans notre Univers d'hélicité gauche, alors que l'antimatière est d'hélicité droite.

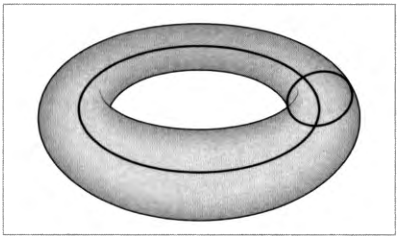
Ces dimensions supplémentaires enroulées sur elles-mêmes dans ce que l'on appelle des variétés compactes – pour simplifier, disons qu'elles ne s'étendent pas à l'infini du fait qu'elles se replient sur elles-mêmes – ont été essentiellement étudiées dans le cadre de la théorie des cordes à trois dimensions complexes[9]. La situation est rendue intéressante mais aussi compliquée par le fait que des structures de Calabi-Yau différentes – voire même de topologie différente – peuvent conduire à la même

9. Ce qui est équivalent aux six dimensions réelles cachées nécessaires à la cohérence de la théorie des supercordes, même si elles peuvent être définies à un nombre quelconque de dimensions.

théorie effective d'un espace-temps à quatre dimensions, c'est-à-dire avoir les mêmes conséquences physiques. La figure ci-dessous donne la représentation simplifiée – par projection – d'un exemple d'espace de Calabi-Yau avec son enchevêtrement des dimensions compactes.



Pour avoir une idée approchée des espaces de Calabi-Yau, on peut commencer à considérer les tores, dont la version à deux dimensions peut être représentée dans un espace à trois dimensions par une chambre à air (ci-contre). L'inconvénient de cette représentation d'un tore plongé dans un espace à trois dimensions est qu'elle laisse penser – ce qui est faux – que le tore a une courbure, alors qu'il est plat. En revanche, chaque dimension a effectivement une extension finie, et donc un objet se « retrouve lui-même » s'il avance dans une dimension, ce qui conduit à une quantification (des modes de vibration) et généralement à une énergie non nulle des modes qui s'enroulent sur le tore du fait qu'ils rebouclent sur



Représentation 3D d'un tore à deux dimensions d'espace, où les deux coordonnées cycliques, car rebouclant sur elles-mêmes, sont indiquées par des cercles. Notons que cet exemple très simple ne peut représenter un espace de Calabi-Yau dans la mesure où il n'incorpore pas d'asymétrie droite/gauche.

eux-mêmes après une longueur finie (figure ci-dessus). Cet exemple très simple de tore ne peut néanmoins constituer encore un espace de Calabi-Yau du fait que ce « pneu » ne possède pas d'asymétrie droite/gauche.

Il est assez simple, du fait que la longueur de corde est liée à l'énergie du mode de vibration de la corde[10], de voir qu'a priori le type de repliement des six dimensions cachées des espaces de Calabi-Yau va influer sur les niveaux d'énergie de vibration des cordes qui s'enroulent sur ces espaces, et donc fournir un ensemble d'énergie de vibrations de cordes que, dans notre monde, nous interpréterons comme des particules avec des masses bien définies. L'espoir des théoriciens des cordes est évidemment de trouver l'espace de Calabi-Yau qui va prédire le spectre de masse des particules observées

10. Par exemple à partir de la figure de tore ci-dessus où deux cordes de longueur différente sont enroulées sur le tore, enroulements qui ne sont pas transformables continûment l'un en l'autre.

dans notre Univers, en supposant qu'un tel espace existe, qui réponde à la question, ce qui n'est pas évident, même s'il y a quelques indices encourageants en ce sens[11].

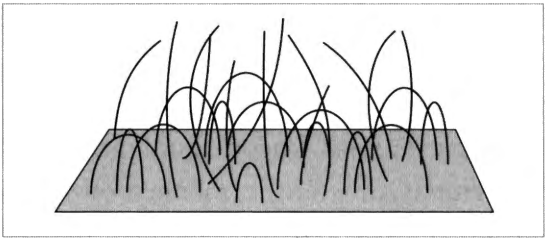
La deuxième révolution des cordes : la théorie M et les branes

Dans ce que l'on appelle aujourd'hui la deuxième révolution des théories des cordes, Ed Witten est probablement le premier à noter, au milieu des années 1990, que les cinq classes de théories des supercordes en 9 + 1 dimensions peuvent probablement être considérées comme des cas limites d'une théorie unique, qu'il appelle la théorie M (*M-Theory* dans la littérature anglo-saxonne). La théorie M comporterait onze dimensions – dix dimensions d'espace et une dimension de temps – et contiendrait en quelque sorte

11. La recherche des mathématiciens s'est en particulier focalisée sur les modes de vibration de plus basse énergie qui apparaissent en raison des « trous » dans les espaces de Calabi-Yau, et notamment les espaces de Calabi-Yau présentant trois « trous », car c'est aussi le nombre de familles de quarks et de leptons. Mais si cette voie semble prometteuse en offrant un schéma d'explication, nous sommes encore loin aujourd'hui de pouvoir justifier qu'il reproduit les masses, charges et spins des six quarks et des six leptons connus, associés à leurs bosons d'interaction.
Il faut noter par ailleurs, indépendamment du nombre de cas limites de théories des cordes, que le nombre de vides différents – les états de plus basse énergie et sans particules – des théories des cordes semble énorme : on cite souvent un nombre de l'ordre de 10^{500} vides différents – 1 suivi de 500 zéros –, sans que l'on voie apparaître de règle claire permettant de comprendre quel vide plutôt que tel autre devrait être choisi par la Nature…

toutes les théories des cordes. J'emploie le conditionnel car cette théorie M – pour « maîtresse », « mystérieuse », « membrane » ou « magique », Witten laisse au lecteur le soin de choisir le qualificatif de la théorie qu'il introduit – est loin d'être complètement caractérisée, même si elle propose une voie d'unification entre les différentes versions des théories des cordes. La théorie M laisse ainsi entrevoir un retour vers l'unicité du fait que les conséquences physiques de théories des cordes en dimension 9 + 1 apparemment très différentes, voire même associées à des espaces de Calabi-Yau de topologie différente, peuvent, en dépit de leurs formulations distinctes, être identiques d'un point de vue physique.

Peu auparavant, en 1995, Joseph Polchinski, décidément un acteur majeur dans le domaine de la gravitation et des divers « paradoxes » qu'elle fait apparaître, avait découvert que la théorie devait inclure non seulement des cordes linéaires mais aussi des objets de dimensionalité supérieure, surfaces ou hypersurfaces, objets qu'il appelle des « branes », le cas le plus simple de généralisation des cordes étant la 2-brane qui est une surface à deux dimensions, même si ces objets peuvent occuper jusqu'aux neuf dimensions d'espace. Cette découverte a plusieurs conséquences : d'une part, la théorie, en ne se limitant plus seulement à des cordes unidimensionnelles mais à des objets de dimensions variées, devient nettement plus riche ; et d'autre part, les branes introduites par Polchinski permettent d'envisager une solution très différente de la vision initiale, proposée par Kaluza et Klein, où trois dimensions d'espace

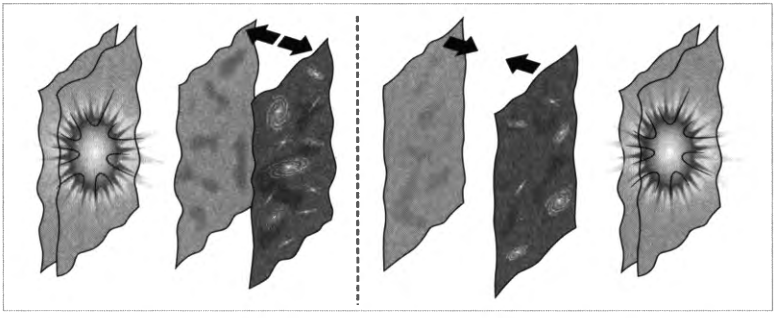


Joseph Polchinski et ses collaborateurs ont montré que les branes (ou membranes), outre le fait qu'elles enrichissent par leur diversité les théories initiales des seules cordes, constituent des points d'attache privilégiés des extrémités des cordes, qui coexistent avec les branes. Figure adaptée de *String theory for Dummies*.

d'extension infinie étaient complétées par une ou plusieurs dimensions compactes, enroulées sur elles-mêmes sur des dimensions très faibles. En lieu et place des six dimensions microscopiques enroulées selon un espace de Calabi-Yau, à partir du moment où les théories des cordes peuvent contenir des branes de dimensions supérieures à 1 (les cordes initiales), il se pourrait en effet que notre Univers soit une 3-brane flottant dans un espace de dimension supérieure (sans plus faire appel aux dimensions cachées).

Pour tenter d'habiller de chair cette idée, Paul Steinhardt, de l'université de Princeton, et ses collaborateurs apportent des arguments pour justifier un modèle cosmologique cyclique, l'univers ekpyrotique, du mot grec signifiant « embrasement », assez différent de l'Univers décrit par le modèle cosmologique standard, où le Big Bang se développe en un Univers en expansion aujourd'hui accélérée et, dans le futur, de plus en plus vide. Dans le modèle développé par Steinhardt et ses collaborateurs, le Big Bang est dû, non pas

à une géométrie dynamique d'un Univers unique, comme celle des géométries de Friedmann, Lemaître, Robertson et Walker, mais au fait que deux 3-branes relativement proches l'une de l'autre ont une distance oscillante et se « croisent » ou se « pincent » régulièrement (comme représenté ci-dessous).



On peut également inclure dans la seconde révolution des cordes la proposition (également décrite dans le chapitre sur gravitation et information), par Juan Maldacena, que l'Univers tel que nous le percevons pourrait en fait n'être qu'une sorte d'hologramme contenant toute l'information de notre Univers à 3 + 1 dimensions. Dans l'équivalence suggérée par Maldacena, on a affaire à deux théories totalement équivalentes, différant l'une de l'autre d'une unité quant au nombre de leurs dimensions d'espace : l'une contient la gravité, tandis que l'autre est une théorie de jauge en espace-temps plat qui ressemble, étrange ironie de l'histoire si on s'en réfère aux débuts de la construction des théories des cordes, à la chromodynamique quantique. Cette conjecture de Maldacena, l'un des articles les plus cités de la

littérature scientifique, confirmée ou plutôt renforcée par des arguments de Witten et d'autres auteurs car elle est encore loin d'être totalement démontrée, fait apparaître la force de gravitation comme une sorte d'effet de polarisation, de la même façon que les déformations d'un milieu diélectrique, milieu fondamentalement neutre, peuvent faire apparaître des charges à sa surface – et dans la plupart des cas également des charges volumiques.

À ce stade, si la beauté mathématique et l'espoir d'unification apportée par la théorie M font espérer que la théorie des cordes – qu'il faudrait sans doute désormais renommer la « théorie des branes » – reste la voie d'unification, elle donne encore l'impression d'une théorie très inachevée, dont on n'aperçoit que quelques éléments à travers le brouillard, éléments mis en évidence par quelques théorème remarquablement élégants.

Le paysage de la théorie des cordes

Comme nous l'avons vu, la théorie des cordes, qui va devenir assez rapidement *les* théories des cordes, apporte initialement un espoir énorme d'une théorie universelle et inévitable de l'ensemble des interactions, qui aurait expliqué l'ensemble de la structure des particules, composants élémentaires de notre Univers. Si l'objectif d'expliquer la structure des particules – trois familles de quarks et de leptons, et leurs bosons médiateurs de leurs interactions – dont l'arrangement des masses reste pour le moment un total mystère par l'une de ces

théories reste d'actualité, l'unicité semblait bien compromise, même si la seconde révolution des cordes de Witten et la théorie M ont restauré un certain espoir de ce côté.

Après que le rêve de l'unicité de la théorie est devenu plus incertain, les théoriciens des cordes ont eu un moment l'espoir que la multiplicité des solutions se limite aux cinq théories distinctes que nous avons citées plus haut. Il semble en fait qu'il existe un quasi-continuum de solutions « interpolant » les cinq théories des cordes bien identifiées, et il apparaît aujourd'hui qu'il existe en tout cas de l'ordre de 10^{500} versions différentes de vides – états localement de plus basse énergie et sans particules – dans les théories des cordes. Que faire de cet immense ensemble d'univers a priori possibles, et comment justifier ou déterminer la version qui correspond à notre Univers ?

Comme l'ont remarqué un grand nombre de physiciens, un certain nombre de coïncidences dans les constantes qui régissent notre Univers, et notamment l'ordonnancement des états d'énergie nucléaire sur les éléments légers comme le carbone et l'oxygène, semblent montrer qu'une modification même relativement minime des constantes des forces d'interaction conduit à des univers que rien ne semble interdire a priori mais où nous sommes à peu près certains que l'homme, ou même une vie carbonée quelconque, ne pourront pas exister ou survivre. Dans le rêve initial où la théorie des cordes qui décrit notre Univers était unique, il ne restait en principe qu'à vérifier que les propriétés de notre monde étaient bien décrites par cette théorie. Mais face au nombre énorme de vides possibles, nettement plus grand

que le nombre de nucléons, protons et neutrons présents dans l'univers observable, comment la théorie des cordes particulière qui décrit notre Univers est-elle choisie ?

L'hypothèse de Leonard Susskind, théoricien majeur de la théorie des cordes, aux alentours de 2003 s'apparente à celle que Brandon Carter avait, le premier, avancée en 1974 dans un article célèbre sur le principe anthropique cosmologique. Susskind développe l'idée que, comme nous sommes là pour discuter de la cosmologie, notre simple présence impose une sélection très forte sur les modèles d'univers et de théories des cordes, en sélectionnant le tout petit nombre d'entre elles – ce nombre restant malheureusement à déterminer – qui autorise notre présence. Une solution qui n'autorise pas l'existence de vie telle que la nôtre ne sera en effet jamais observée par des êtres du type de l'homme et, en quelque sorte, « n'existe pas » pour nous.

Assez curieusement, un assez grand nombre de physiciens semble s'accommoder ou même sympathiser avec cette idée introduite par Susskind de « paysage » – *landscape* dans la littérature anglo-saxonne – composé d'un nombre énorme de théories possibles et où le point de vue est sélectionné par l'observateur. Il se peut que cette hypothèse anthropique soit vérifiée, mais je considère qu'elle ne doit être utilisée qu'en dernier recours, car ce type de raisonnement anti-copernicien – c'est l'homme qui, même en un sens faible, détermine les lois de la Nature et redevient donc en quelque sorte au cœur de la création – signifie en fait la fin de la science. Comme l'a argumenté avec force par ailleurs Smolin, cette hypothèse est

largement intestable car elle revient à dire que l'Univers est comme il est parce qu'il est comme il est, car s'il n'était pas comme il est, on ne serait pas là pour en discuter...

L'avenir dira si la théorie des cordes constitue la solution à la quantification de la gravitation, ou s'il est nécessaire de se tourner vers l'une des théories alternatives en compétition, la théorie de la gravitation quantique à boucles – *Loop Quantum Gravity* dans la littérature anglo-saxonne – apparaissant aujourd'hui comme son plus sérieux compétiteur. Notons néanmoins que cette dernière théorie reste malheureusement à ce stade aussi peu prédictive que la théorie des cordes elle-même[12]...

Ce qu'il faut retenir

La théorie des cordes, née dans les années 1960 de la tentative (infructueuse) de décrire les interactions fortes et le confinement des quarks par des cordes vibrantes, constitue sans doute le candidat le plus sérieux de théorie quantique de la gravitation. Partant de la première version de la théorie des cordes, qui n'incorporait que les bosons, de spin entier, l'introduction par Pierre Ramond en 1971

12. Je recommande à ce sujet au lecteur la séquence hilarante sur Youtube entre Carlo Rovelli, l'un des inventeurs de la théorie de gravitation quantique à boucles, et Raphael Bousso, connu pour ses contributions à la théorie des cordes, où chacun des deux physiciens joue le rôle de défenseur de la théorie de l'autre :
https://www.youtube.com/watch?v=jEr038WOKFI

de la supersymétrie, mettant en place une association entre couples fermion-boson, a constitué une addition essentielle à la théorie des cordes. La démonstration en 1984 par Green et Schwarz que la théorie supersymétrique à dix dimensions (9 dimensions d'espace et 1 dimension de temps) ne souffrait pas du grave problème des anomalies a constitué ce que l'on appelle la première révolution de la théorie des cordes et a fait de la théorie des (super)cordes le sujet majeur de recherche des physiciens mathématiciens au cours des vingt années suivantes. La découverte de cinq versions limites différentes de théories des cordes semblait avoir sonné le glas de l'espoir d'une théorie unique, d'autant qu'il apparaissait un véritable continuum d'autres solutions entre ces cinq formes limites. Un aspect essentiel des théories des cordes supersymétriques est lié au fait que six dimensions d'espace sont invisibles à notre échelle car compactes et enroulées sur elles-mêmes à travers des espaces de Calabi-Yau, qui représentent en quelque sorte les différentes façons – plusieurs centaines de milliers – d'enchevêtrer les dimensions enroulées.

Au cours de la période s'étendant de 1984 à la fin des années 1990, plusieurs additions importantes sont venues renforcer la conviction d'une large part des théoriciens que la théorie des cordes constituait bien le cadre quantique de la gravitation, l'une de ces additions menant notamment aux alentours du milieu des années 1990 à ce que l'on a appelé la « deuxième révolution » de la théorie des cordes. Au premier plan de ces additions, on trouve la contribution initiée par

Witten au milieu des années 1990 sur la théorie M, théorie en onze dimensions (10 dimensions d'espace et 1 dimension de temps) qui, en dépit de son caractère encore très élusif, semble englober l'ensemble des théories des cordes et notamment les cinq théories apparemment différentes, qui en seraient en fait des formes limites, dans un même cadre. Une autre addition majeure a été apportée par Polchinski avec sa découverte en 1995 que la théorie des cordes devait contenir des objets de dimension plus élevée que les seules cordes linéaires, objets appelés génériquement des « branes » ou « D-branes. » Cette découverte ouvre la possibilité que notre espace-temps à quatre dimensions soit en fait une brane à trois dimensions d'espace flottant dans un espace à 9 + 1 dimensions.

Par ailleurs, la conjecture que notre Univers est en fait une sorte d'hologramme à la frontière de notre espace-temps, de dimension immédiatement supérieure à sa surface à l'infini, formulée initialement par Gerard 't Hooft en 1993, a reçu un très fort regain d'intérêt en 1998 avec la conjecture plus précise émise par Juan Maldacena, renforcée par Witten, proposant une équivalence totale entre une théorie avec gravité dans son volume associée à une théorie sans gravité sur la surface de ce même espace, mettant en jeu des interactions ressemblant aux interactions fortes, et donc traitable quantiquement. De ce point de vue, la gravité apparaît comme un effet de conditions aux limites, plus que comme une « véritable » interaction.

Le principal problème de la théorie des cordes, outre sa complexité ou en raison de celle-ci, est cependant l'absence

totale de prédiction expérimentale précise, absence qui a mené au cours des années récentes à une vigoureuse remise en question de la suprématie de la théorie des cordes et à une baisse notable des publications dans ce domaine.

Pour aller plus loin

I - Certains lecteurs perspicaces auront peut-être noté que la Galaxie nous envoie des particules beaucoup plus énergiques que celles que sait produire le LHC, certaines particules détectées ayant, comme le disait mon ami Murat Boratav aujourd'hui disparu, une énergie supérieure à l'énergie déployée dans un service de Steffi Graf ou de l'une des sœurs Williams, mais qui sont d'énergie encore un facteur 100 millions environ trop faible pour atteindre l'énergie correspondant à la masse de Planck. Il faut noter cependant deux inconvénients majeurs si on cherche à utiliser les particules cosmiques afin de sonder la matière: ce n'est pas nous qui les accélérons mais des sources multiples dans la Galaxie, après des parcours dans des champs magnétiques de structure géométrique complexe, qui ont complètement oblitéré leur direction initiale, si bien que leur direction et leur point d'arrivée sur l'atmosphère sont presque complètement aléatoires. Par ailleurs, ces particules viennent frapper non pas des congénères de même énergie comme c'est le cas dans les collisions proton-proton du LHC mais des noyaux d'azote et d'oxygène, immobiles ou presque dans l'atmosphère si bien que l'énergie utilisable – ce que l'on appelle « l'énergie dans le centre de masse », où les particules se frappent tête-bêche – n'est qu'un facteur 30 environ plus élevée qu'au LHC. Enfin, autre inconvénient majeur: le nombre de ces particules ultra-énergiques est très faible (environ 1 par siècle et par km^2) aux énergies dont nous parlons, égales à environ 10^{20} eV. Par

ailleurs, il y a une énergie au-delà de laquelle le nombre de particules tombe pratiquement à zéro, pour une raison inattendue : avec leur énergie énorme, la collision des particules ultra-énergiques avec les photons du fond diffus cosmologique à 2,7 K (un peu plus de 400 photons par centimètre cube) est vue par ces particules comme une collision avec des photons gamma dont les plus énergiques, de plus de 100 MeV, permettent d'exciter leur structure nucléaire et de fabriquer des pions, y compris pour des protons, et donc de dissiper leur énergie. Si donc l'échelle de Planck est réellement de l'ordre de 10^{-35} mètres, l'approche consistant à en réaliser une étude directe via des accélérateurs ou le rayonnement cosmique semble complètement hors de notre portée technologique.

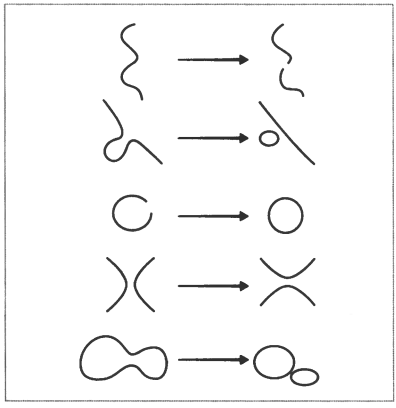
II - Cette notion de longueur minimale laisse entendre que la structure de l'espace et du temps n'est pas indéfiniment divisible, comme pourrait le laisser supposer la description en termes d'un espace-temps continu. Nous reviendrons sur cette question par la suite, ainsi que dans un chapitre dédié aux essais de théories discrètes de l'espace-temps. Au niveau au moins de la gravitation, tout se passe comme si la structure de l'espace-temps était divisée, et cela de façon irréductible, en petites cellules quadridimensionnelles de volume = (longueur de Planck)^4. Cette vision d'un réseau discret à l'échelle de Planck reste une image assez grossière, mais dans le chapitre sur les liens entre gravitation et information cette notion était mise en avant car cette représentation en termes de petites cellules permet de calculer très simplement l'entropie associée à un trou noir. Notons que nous avons directement supposé dans cette estimation du nombre de cellules de l'espace-temps que le nombre de dimensions de l'espace-temps était égal à 4, même si idéalement, de la même façon que nous pensons que l'espace et le temps sont des concepts macroscopiques qui émergent d'une structure cellulaire et discrète, nous souhaiterions dériver la notion

de dimension elle-même, qui perd largement son sens à l'échelle de Planck, à partir de principes mathématiques plus fondamentaux.

III - Face au problème posé par la théorie quantique de la gravitation, il peut être tentant de proposer de modifier « un peu » les théories existantes des champs. Malheureusement, quand on veut construire une théorie des champs en espace-temps plat, le physicien n'a à sa disposition qu'un choix très limité de théories des champs, avec les champs scalaire (spin 0, le Higgs étant actuellement le seul champ scalaire mis en évidence expérimentalement), vectoriel (spin 1, avec le photon pour les interactions électromagnétiques et le gluon pour les interactions fortes) et tensoriel d'ordre 2 (spin 2, l'élusif graviton). Nous avons déjà noté les divergences qui font tendre vers l'infini les quantités prédites par la théorie, en leur enlevant tout sens physique dès le spin 2, et avec des problèmes encore plus graves au-delà, pour les théories mettant en jeu des vecteurs de spin 3 ou supérieur, dont on considère qu'il est totalement impossible de les rendre cohérentes. Ce résultat semble général dans les théories des champs où les particules sont ponctuelles et les interactions se décomposent en diagrammes de Feynman similaires à ceux utilisés pour la théorie des interactions faibles, fortes et électromagnétiques.

IV - Même si le sujet est très technique, résumons dans leurs grandes lignes ces cinq théories, en notant d'abord qu'il y a un certain arbitraire dans les règles et les propriétés qui régissent les cordes : elles peuvent être ouvertes, c'est-à-dire que leurs extrémités sont libres et « nues », ou au contraire fermées en boucles. Notons que les règles de coupure et de recomposition des cordes (figure) imposent que toutes les théories des cordes incluent des cordes fermées, mais pas nécessairement des cordes ouvertes. Elles peuvent par ailleurs avoir, comme c'est le cas dans notre Univers, une asymétrie droite-gauche – il s'agit d'une asymétrie dans l'espace-temps et non

pas dans l'espace. Les cordes peuvent enfin être bosoniques ou fermioniques ou hybrides. Une fois dit cela, parmi les cinq théories des cordes, la théorie des cordes de type I autorise des cordes à la fois ouvertes et fermées, qui doivent respecter un type particulier de symétrie (le groupe O(32)). Les théories de type II sont de deux sortes, notées II-A et II-B, où toutes deux traitent de cordes fermées mais où II-A n'incorpore pas d'asymétrie droite-gauche alors que II-B incorpore cette asymétrie, comme c'est le cas dans la Nature. Les deux derniers types de cordes, appelés « cordes hétérotiques, » ont des comportements des cordes différents selon que leur vibration est droite ou gauche, alors que seuls deux groupes de symétrie (notés O(32) et E8 x E8) sont possibles pour ce type de cordes, ce qui différencie les deux groupes.



Les 6 règles de coupure et de recomposition des cordes.

GRAVITÉ ET ESPACE-TEMPS DISCRET

Qu'est-ce qu'un espace-temps discret ?

Face aux énigmes posées par la gravitation, nous disposons certes comme théorie classique de la relativité générale d'Einstein, dont les prédictions n'ont pas encore été prises en défaut. Mais nous avons vu que le chemin vers une théorie quantique, où les théories des cordes – qu'il faudrait sans doute renommer « théorie des membranes » – joueront sans doute un rôle, semble encore long. Pour autant, avant même que ne soit identifiée une théorie quantique de la gravitation, plusieurs physiciens majeurs, dont Tsung-Dao Lee, Gerard 't Hooft, John Wheeler ou encore Rolf Landauer et son groupe de physiciens de IBM Yorktown Heights, se sont intéressés à la question de la discrétisation de l'espace-temps et de la gravitation.

Quand on dit d'une théorie de l'espace-temps qu'elle est discrète, de quoi parle-t-on ? En quoi est-ce différent des

autres approches de la gravité ? D'abord, il est fondamental de bien comprendre la distinction entre discret et continu. Pour cela, nous pouvons utiliser une analogie cinématographique : un metteur en scène dispose d'une scène originale, avec de vrais acteurs – pas des avatars numériques – et des objets physiques de décor. Cette scène, il peut l'enregistrer avec un film analogique, sur pellicule 35 ou 70 mm ou, ce qui est devenu le plus courant, en réalisant un enregistrement digital. L'enregistrement digital comme l'enregistrement sur pellicule peuvent donner l'impression d'une image continue – essentiellement parce que l'œil humain est lui aussi un système largement digital, avec un nombre fini de cellules de vision, les bâtonnets –, mais l'enregistrement digital contient une information finie, qui par exemple pour un film en Blu-ray numérisé en haute définition est actuellement de l'ordre d'une vingtaine de gigabytes par heure de film. Cette succession de bits constituant l'image digitale est appelée une « discrétisation » de l'information.

Les approches discrètes de la gravitation supposent que les notions d'espace et de temps continus, que nous avons l'habitude de représenter par des nombres réels, sont des approximations d'une réalité qui est elle-même discrète, discontinue et représentable par des nombres entiers plutôt que par des nombres réels.

Avant les physiciens que nous avons cités, c'est Andreï Sakharov, remarquable novateur, qui a sans doute le premier jeté les bases de la notion d'un espace-temps discret. En effet, dès 1967, Sakharov, physicien et dissident

soviétique, avait émis l'hypothèse que la gravité pouvait être non pas une véritable interaction mais une propriété émergente, c'est-à-dire une propriété qui apparaît pour des raisons statistiques dans de grands ensembles sans que la propriété existe pour les constituants élémentaires du système. Sakharov proposa ainsi l'idée que la courbure de l'espace-temps et ses équations d'évolution – les équations d'Einstein – seraient en fait une propriété statistique de la structure microscopique du « vide » considéré comme un milieu, de la même façon que les équations de Maxwell de l'électromagnétisme dans la matière, ou dans le vide en présence de champs très intenses, ont une expression effective (apparemment) différente des équations de Maxwell dans le vide en raison des propriétés de polarisation et de magnétisme du milieu matériel sous-jacent.

Sakharov nota en particulier que de nombreux systèmes de matière condensée donnent lieu à des phénomènes émergents qui trouvent une résonance et un analogue en relativité générale. Par exemple, les défauts dans un réseau cristallin, mettant en jeu des atomes distincts, peuvent fournir une illustration discrète (non continue) de la courbure ainsi que de la torsion. La torsion n'étant pas présente en relativité générale, l'analogie avec la physique de l'état condensé permet donc d'envisager une théorie étendue de la gravitation d'Einstein, en s'inspirant d'un modèle cristallin de l'espace-temps, et où la matière est associée aux différents types de défauts à l'intérieur d'un cristal, cristal qui, s'il était sans aucun défaut, constituerait un exemple de vide parfait,

sans aucune particule. L'analogie proposée par Sakharov suggère par ailleurs l'une des rares explications possibles au fait qu'il existe dans la nature des familles de particules, discrètes car bien séparées les unes des autres – que l'on pourrait relier ou même identifier à la classification en un nombre fini de familles des défauts cristallins.

La maille de la structure cristalline sous-jacente à l'espace-temps étant très probablement de longueur ridiculement petite, de l'ordre de la longueur de Planck[1], il est alors normal que nous n'ayons pas encore pu mettre en évidence cette structure cristalline. L'idée de Sakharov était donc de fournir une justification des équations d'Einstein à partir d'un formalisme très général, sans avoir à les introduire a priori et à la main. Le gros inconvénient de son idée est que ce type de modèle fait apparaître très généralement une constante cosmologique – dont on a vu qu'elle constituait une sorte d'énergie du vide – dans les équations qui en dérivent, et que la dimension naturelle de cette constante cosmologique est la densité de Planck, gigantesque devant tout ce que nous observons dans la Nature...

Pourquoi peut-on penser que le monde est discret ou, si l'on veut, digital ? La première réponse est donnée par le fait que l'Univers que nous pouvons observer aujourd'hui, 14 milliards d'années après le Big Bang, n'a pas ce que l'on appelle en mathématiques la « puissance du continu », et donc

1. Longueur dont on rappelle qu'elle est construite à partir des constantes de quantum d'action $\hbar$, de la constante de la gravitation G et de la vitesse de la lumière c, et qu'elle a pour valeur $\sim 1{,}6 \times 10^{-35}$ mètre.



Sur cette représentation d'un visage souriant, la moitié droite du visage a un codage clairement pixellisé et discrétisé. On peut noter que la partie gauche du visage, qui apparaît continue à la plupart des yeux humains, est en fait elle-même discrétisée, au minimum au niveau des pixels de l'écran à travers lequel vous l'observez. Ce qui est plus surprenant, c'est que l'objet original lui-même, le visage humain, comporte nécessairement une quantité finie d'information, comme d'ailleurs l'ensemble de l'Univers.

qu'il n'est pas possible d'implémenter les nombres réels dans le monde physique que nous connaissons, mais seulement une approximation de ceux-ci. En effet, il existe des bornes sur la quantité d'information que l'on peut stocker dans un volume et avec une énergie donnée, ces bornes ayant été exprimées par Jacob Bekenstein, qui a été à l'origine de la notion d'entropie des trous noirs que nous avons déjà rencontrée dans le chapitre « Gravité et information ». Et donc, aussi surprenant que cela puisse paraître, l'information qu'il est possible de stocker ou d'exprimer dans l'Univers est non seulement discrète mais finie. D'où l'idée que ce

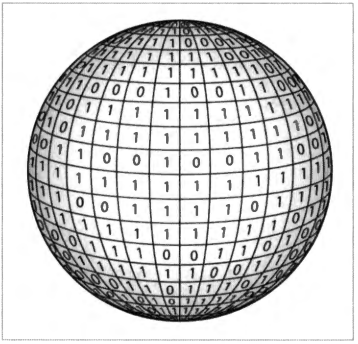
sont plutôt les nombres entiers, des objets à valeurs discrètes, comme des bits de données ou leur version quantique, les qbits d'un ordinateur quantique, qui sont le bon objet pour représenter l'Univers, plutôt que les nombres réels d'un espace-temps continu à quatre dimensions (ou peut-être plus que quatre si, comme le propose la théorie des cordes, il existe des dimensions cachées et repliées sur elles-mêmes).

Quelle quantité d'information dans l'Univers observable ?

Cherchons à quantifier la quantité maximale d'information qu'il est possible d'exprimer dans l'Univers. Nous avons vu dans le chapitre sur le lien entre gravitation et information que l'entropie d'un trou noir pouvait s'exprimer par une règle simple : il suffit de paver la surface de son horizon avec de petites surfaces de Planck (soit environ $2,6 \times 10^{-70}$ m^2) pour obtenir l'entropie physique du trou noir (figure).

Si l'on applique la formule de Bekenstein à l'Univers observable, en l'estimant à partir de son contenu de matière ordinaire, qui est de l'ordre de 10^{80} nucléons, protons et neutrons, et en prenant pour surface aux confins de l'Univers observable la surface de l'horizon d'un trou noir de cette masse, on obtient une entropie énorme mais néanmoins finie, de l'ordre de 10^{123} bits, ou environ 10^{113} gigabytes (un byte représentant un ensemble de 8 bits).

Cette règle de calcul de l'entropie d'un trou noir ou de l'information maximale contenue dans l'Univers observable



Comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré au lien entre gravité et information, Jacob Bekenstein a proposé une règle très simple permettant de calculer l'entropie d'un trou noir : on pave la surface de l'horizon du trou noir avec des surfaces de Planck. Cette règle constitue une forte indication que l'espace-temps a une structure discrète à cette échelle de Planck. D'après J. A. Wheeler, « Information, Physics, Quantum: The Search for Links ».

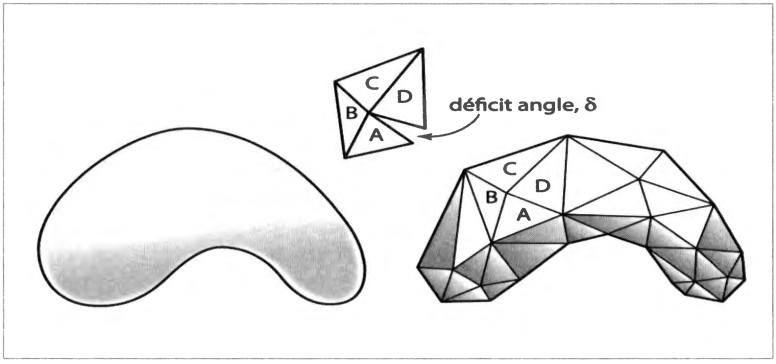
laisse entendre que l'espace-temps est discret à l'échelle de la longueur de Planck. Mais si la structure fondamentale de l'Univers est discrète et non pas continue, cela veut dire qu'il n'est pas possible de considérer comme données les notions de temps, d'espace continu, et de même de dimension. Ces concepts sont sans doute à exprimer en termes de notions plus fondamentales, et de façon relationnelle ou statistique à partir des sites de la structure discrète, et non pas comme l'espace et le temps absolus proposés par Newton. En d'autres termes, seule existe la structure discrète, et l'espace et le temps sont des grandeurs construites, dérivées à partir de celle-ci, et non pas indépendantes.

L'espoir de Wheeler, qui a popularisé les règles de calcul sur des structures discrètes destinées à représenter la courbure

de l'espace-temps proposées par le physicien Tullio Regge, était que la notion d'espace-temps et de ses dimensions macroscopiques émerge naturellement d'une structure discrète sans espace sous-jacent. Une première figure permet de représenter l'idée de Wheeler et de Regge : une surface courbe continue peut être approximée par un ensemble de triangles reliés entre eux par une de leurs arêtes, et sans arête laissée libre (ci-contre). Les arêtes et les sommets d'une telle structure sont liés à la courbure, ainsi qu'aux masses présentes dans la structure ; or nous avons vu dans le chapitre consacré aux deux relativités d'Einstein que la gravité en deux dimensions d'espace et une dimension de temps était exactement comme cela : un espace-temps plat partout où il n'y a pas de masse et de la courbure précisément à l'endroit où l'on place des particules.

Une autre image suggérée par Wheeler, naïve mais proche des spineurs et des twistors de Penrose, dont nous parlerons plus loin, est celle d'un ensemble de N anneaux, dont une liste de N(N-1)/2 instructions[2] indique si l'anneau numéro i est ou non entrelacé à l'anneau j (i et j étant deux entiers différents compris entre 1 et N), ce qui peut être condensé par une série de 0 (si les deux anneaux sont disjoints) et de 1 (si les deux anneaux sont entrelacés). Il est bien sûr possible que des anneaux ne soient entrelacés avec aucun autre anneau : dans ce cas, ils constituent un

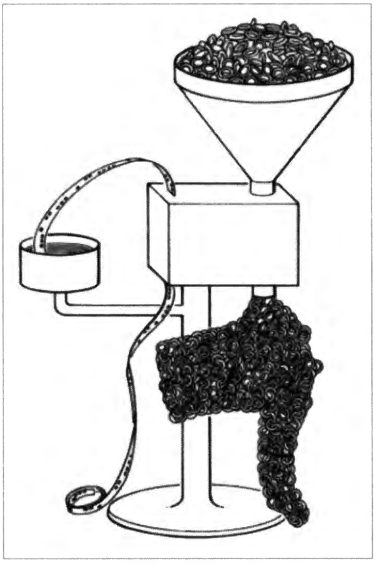
2. La relation « être entrelacé » étant une relation symétrique, on peut vérifier simplement qu'il faut bien N(N-1)/2 instructions binaires pour décrire complètement le système d'anneaux.



Comme l'avait montré le physicien italien Tullio Regge, une surface courbe continue peut être approximée aussi précisément que l'on veut par un ensemble de triangles adjacents, comme représenté sur la figure ci-dessus. Cette construction, appelée « calcul de Regge » lorsqu'elle est exprimée à quatre dimensions, permet, chaque triangle étant plat, de confiner la courbure aux vertex, où elle est estimée par le déficit ou le surcroît d'angle par rapport aux 180 degrés de la géométrie euclidienne plane.
Figure inspirée de Misner, Thorne et Wheeler, *Gravitation*, p. 1168.

univers, infiniment simple et ennuyeux, à eux seuls. Mais il se peut également, en ajustant la proportion de liens entre anneaux, que la structure ainsi assemblée donne lieu à des univers intéressants qui contiennent des structures non triviales, aussi complexes que des êtres humains ou des civilisations. Sur le dessin page suivante, dû à John Wheeler lui-même, on voit ainsi que l'assemblage des anneaux est en train de produire une armure en cotte de mailles... Dans cet exemple sans prétention, comme le note Wheeler, il est important de réaliser que seuls existent les anneaux et leurs relations d'entrelacement, alors

qu'espace et temps sont des concepts dérivés de la structure discrète, émergence de la structure des anneaux entrelacés.



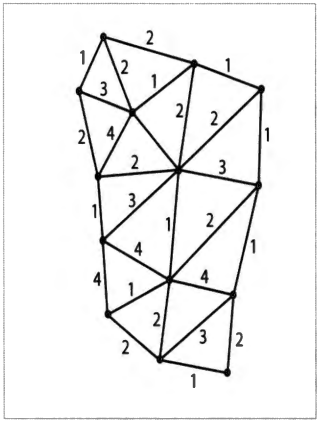
Cette figure, due à John Wheeler, représente de façon très imagée l'idée d'une géométrie émergente. Un gros réservoir en forme d'entonnoir contient un nombre énorme d'anneaux disjoints, sans aucun lien entre eux, représentant les éléments pré-géométriques. Ces anneaux sont ensuite reliés (ou non) entre eux en fonction du programme d'une machine de Turing représentée par le ruban codeur sur la gauche de la figure. Une fois reliés entre eux, il se peut que la structure assemblée à partir des anneaux, maintenant reliés, constituent une structure géométrique (ici une cotte de mailles...).
Dessin tiré de Misner, Thorne et Wheeler, *Gravitation*, page 1210.

Spineurs, twistors et autres gravités quantiques à boucles

Convaincu qu'au niveau élémentaire et quantique il est nécessaire de changer radicalement les éléments de construction de l'espace-temps mais aussi d'incorporer la notion de non-localité, Roger Penrose, de l'université d'Oxford, s'intéressa d'abord aux réseaux de spins, qui ont une structure voisine des anneaux entrelacés que nous

venons de décrire. L'idée sous-jacente est liée au fait qu'un spin est un système quantique élémentaire à deux états, et caractérisé par le fait que, quand on le mesure par rapport à une direction d'analyse quelconque, on ne peut trouver que deux résultats de mesure, selon que le spin est aligné ou anti-aligné avec la direction d'analyse choisie, que l'on peut noter indifféremment 0 et 1, ou encore 1/2 et -1/2. Sur un tel système quantique à deux états, on peut coder un qbit, version quantique d'un bit. Dans les assemblages de spins en réseau, schématisés par exemple par le schéma ci-dessous, la notion de distance continue disparaît au profit d'assemblages de spins reliés entre eux par des relations d'addition et de soustraction des moments cinétiques de spin, la « distance » entre deux spins adjacents sur le réseau étant l'unité, et donc pas une variable continue.

Après quelques essais liés à ces réseaux de spins, sur lesquels il fut difficile de développer une dynamique



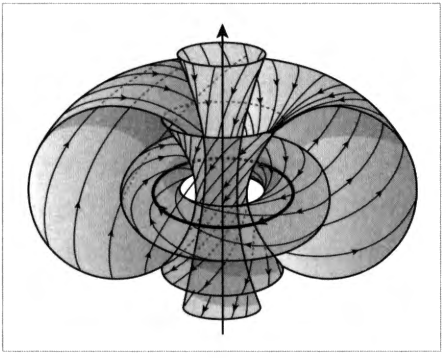
Exemple de réseau de spins construit par Penrose ou utilisé dans la théorie de gravité quantique à boucles. Dans ces diagrammes, les liens sont associés à des valeurs entières qui doivent se lier à la façon des diagrammes de Feynman. Des règles dites « d'inégalité triangulaire », permettant au triangle d'exister, doivent être respectées, ainsi qu'une règle de parité.

d'évolution, Penrose développa la notion de « twistor », qui allie spin et quantité de mouvement. L'une des motivations derrière ces objets est de faire apparaître la non-localité présente dans les interactions, notamment les interactions électromagnétiques, et plus généralement dans tout échange de vecteur de masse nulle, comme le photon ou le graviton, ainsi que dans la mécanique quantique où deux particules ayant interagi dans le passé conservent de façon générale des corrélations entre elles, quelle que soit la distance à laquelle les particules peuvent s'échapper à la suite de leur interaction.

Pour donner un exemple très simple, un photon, ou toute particule de masse nulle, relie, *instantanément dans son référentiel*, le point d'émission et le point de réception du photon, établissant de ce fait un élément de non-localité. De ce fait, des *points* dans l'espace des twistors vont pouvoir être traduits par des *lignes* dans l'espace-temps ordinaire, alors qu'un *point* de l'espace-temps pourra être traduit par une *ligne* dans l'espace des twistors. Les twistors sont des objets mathématiquement trop complexes pour être décrits ici, mais on peut considérer qu'un twistor est constitué d'un ensemble de lignes de genre lumière (c'est-à-dire de longueur nulle [3] au sens de l'espace-temps), et pouvant représenter des trajectoires de particules se déplaçant à la vitesse de la lumière. Cet ensemble de lignes est ordonné dans un mouvement de

3. Rappelons que l'intervalle d'espace-temps, qui est relié au temps propre, peut être nul du fait qu'il s'écrit comme la *différence* de carrés, ce qui, pour un espace-temps plat, s'écrit : $ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$.

rotation global, les deux rotations d'hélicité droite et gauche étant possibles, d'où le nom de twistor – *twist* se traduit à peu près par « torsion » (ci-dessous).



Représentation schématique d'un twistor de Penrose, constitué à partir de trajectoires de type lumière dans un mouvement tournant (hélicité droite ou gauche). Adapté de la conférence donnée en l'honneur de Roger Penrose par la London Mathematical Society en 2011.

Des liens ont été établis entre la gravité quantique à boucles et la théorie des twistors de Penrose, qui peuvent servir d'éléments constitutifs de la première. L'idée essentielle de cette théorie de gravité quantique à boucles est à nouveau de définir des éléments discrets et quantifiés constituant l'espace-temps, formé de boucles à l'échelle de Planck[4]. On espère qu'une notion d'espace-temps émergera de ces ensembles statistiques de boucles à suffisamment grande « distance » : comme une sorte de tissu discret à très petite

4. C'est-à-dire le temps de Planck pour l'échelle de temps et la longueur de Planck pour l'échelle d'espace.

échelle de l'espace-temps. Nous avons déjà indiqué que la théorie quantique, compétitrice de la théorie des cordes, avait à peu près autant (c'est-à-dire aucune…) de prédictions expérimentales vérifiées ou vérifiables actuellement. Si la théorie des cordes a longtemps rassemblé les plus importantes cohortes de chercheurs, jusqu'à presque monopoliser les recrutements de physiciens théoriciens pendant une bonne vingtaine d'années, la théorie de gravité quantique à boucles rassemble aujourd'hui plus d'une centaine de chercheurs impliqués assez fortement, ce qui en fait un sujet de recherche assez développé, avec deux variantes de la théorie appelées « canonique » et « covariante » (également appelée « théorie *spin foam* » dans la littérature anglo-saxonne, ce qui se traduit approximativement par « mousse de spin »).

J'ai indiqué un peu méchamment que la gravité quantique à boucles manquait désespérément de prédictions expérimentales, mais la théorie revendique plusieurs prédictions, même si elles sont parfois très difficiles, voire impossibles à tester : elle prétend ainsi pouvoir justifier la continuation de l'espace-temps au-delà du Big Bang, la singularité étant contournée, et s'est aventurée à la prédiction d'un Big Bounce – le « grand rebond », ou « rebondissement ». Ce Big Bounce risque d'être un faux problème du fait qu'il faut considérer le gradient de complexité et la flèche du temps avant d'affirmer qu'un observateur va bien décrire un Big Bounce plutôt que son renversé temporel – un effondrement gravitationnel –, sauf si l'entropie, comme dans le modèle cyclique des branes que nous avons décrit dans un chapitre précédent, croît continûment et permet effectivement

de parler d'effondrements suivis de rebonds cataclysmiques, mais avec une distinction entre les différents cycles si l'entropie augmente de cycle en cycle.

Les acteurs fondamentaux de la gravité quantique à boucles ont été Abhay Ashtekar, Ted Jacobson et Lee Smolin, qui se sont initialement appuyés sur l'équation de Wheeler-De Witt, fondatrice quant à la question de quantification du temps en cosmologie. Dès les années 1990, Carlo Rovelli, aujourd'hui au Centre de physique théorique de Marseille, a été l'un des acteurs les plus en vue et l'un des défenseurs les plus actifs de la gravité quantique à boucles.

Ainsi, dès 1994, Rovelli et Smolin construisirent-ils les opérateurs surface et volume à spectre discret, avec une base explicite d'états de la géométrie quantique, en établissant un lien avec les réseaux de spin de Penrose. En 2008, la version dite « covariante » de la gravité quantique à boucles fut construite, avant qu'en 2011 il ne soit démontré que les amplitudes de processus prédites par la théorie sont bien régulières, sans être affligées des infinis qui avaient bloqué le chemin de la quantification de la relativité générale. La gravité quantique à boucles prétend également prédire l'existence d'une constante cosmologique non nulle et positive, et justifier la formule de Bekenstein de l'entropie d'un trou noir.

L'Univers est-il un ordinateur ?

À la grande époque des laboratoires d'IBM, qui avaient vu plusieurs Prix Nobel émerger de leurs rangs, plusieurs physiciens

du laboratoire d'IBM Yorktown Heights, au nord de New York, comme son directeur de la recherche Rolf Landauer ou encore Charles Bennett, se sont intéressés à la question de la dissipation lors d'un calcul, et de savoir si un calcul peut ou non s'effectuer de façon réversible, sans dissipation d'énergie. La question est en effet fondamentale pour un concepteur d'ordinateurs comme IBM, car la dissipation thermique des ordinateurs, dont les processeurs vont avoir dans les prochaines générations des gravures à l'échelle de quelques dizaines d'atomes, donc très proches de la limite atomique et avec des contraintes quantiques de plus en plus fortes, représente aujourd'hui une part significative de la consommation électrique mondiale, avec un fort enjeu économique. Et vers la même époque, la question de savoir si l'Univers pouvait être équivalent à un ordinateur, ou même être un programme d'ordinateur, commença à se faire jour, notamment grâce à des arguments de Gerard 't Hooft ou d'Ed Fredkin.

Initialement, Landauer défendit l'idée que les opérations de calcul devaient être nécessairement irréversibles et dissipatives, avançant même l'idée d'un coût minimum de $1/2\,k_B T$, l'énergie thermique moyenne par degré de liberté[5], pour chaque opération élémentaire – un «step» – dans un programme d'ordinateur. Pourquoi cette discussion sur la réversibilité du

5. Par exemple, une particule libre dispose de trois degrés de liberté, qui sont les trois composantes de sa vitesse, et une molécule diatomique comme le dihydrogène comporte en outre deux degrés de liberté de rotation (et non pas trois). Chacun de ces degrés de liberté a en moyenne une énergie de $1/2\,k\,B\,T$ à température T.

calcul ? Parce que la Nature semble étonnamment réversible au niveau microscopique, qui ne semble pas incorporer de notion d'entropie ni de flèche du temps. Car même si l'on connaît de très faibles violations de la symétrie temporelle au niveau microscopique dans les systèmes de particules appelées les « mésons neutres », ces violations ne permettent pas en elles-mêmes de définir une flèche du temps. On s'attend donc à ce qu'une dissipation à très petite échelle, l'échelle de Planck, fasse littéralement bouillonner l'espace, ce qui tendrait à prouver que notre Univers ne peut pas être représenté par, ou être équivalent à, un ordinateur.

Mais Charles Bennett remit en question l'idée de Landauer d'un calcul irréversible, montrant que ce n'était pas le calcul en lui-même qui était irréversible, mais la création de registres de mémoire, ou une opération comme l'écrasement d'une mémoire indépendamment de son contenu initial. En particulier, si l'on procède suffisamment lentement, il est possible de réaliser des calculs avec aussi peu de dissipation que l'on veut, Charles Bennett utilisant d'ailleurs un système discret comme l'ADN et ses mécanismes de réplication pour illustrer sa démonstration.

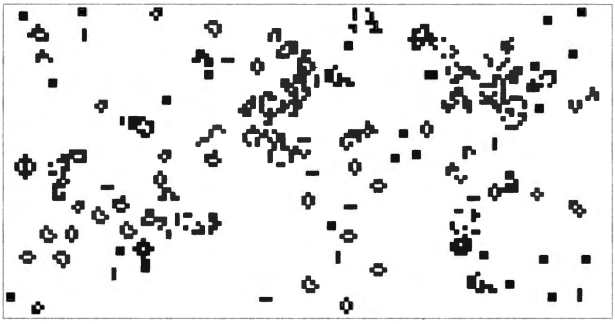
Le « Jeu de la vie » de John Conway

Au MIT, Ed Fredkin s'est également intéressé à ces questions et a été l'un des plus ardents instigateurs de l'idée que l'univers est un ordinateur[6].

6. Le lecteur intéressé par ce sujet pourra consulter le site : www.digitalphilosophy.org qui décrit les idées de Fredkin.

Pour illustrer le fait qu'un programme d'ordinateur est à même de simuler n'importe quelle situation, Fredkin employa souvent comme exemple le « Jeu de la vie » – *Game of Life* – de John Conway, dont les règles sont extrêmement simples : sur une grille cartésienne à deux dimensions, chaque site, qui peut être vivant (1) ou mort (0), évolue de la façon suivante :
– tout site vivant comptant zéro ou un voisin vivant meurt (sous-population) ;
– tout site vivant comptant deux ou trois voisins vivants survit ;
– tout site vivant comptant plus de trois voisins vivants meurt (surpopulation) ;
– tout site mort avec exactement trois voisins vivants devient vivant (naissance) ;
– dans tout autre cas, un site mort reste mort.

Malgré l'extrême simplicité de ces règles, on peut démontrer qu'un tel automate cellulaire est un calculateur universel, c'est-à-dire capable de simuler des situations aussi complexes qu'on le souhaite et de réaliser n'importe quel calcul algorithmique, à la condition que la grille qui supporte le jeu soit suffisamment étendue. Par ailleurs, on voit apparaître dans cet automate cellulaire à deux dimensions des objets qui se déplacent en gardant une forme inchangée (les « gliders », qui ressemblent à des particules), une notion de vitesse limite, qui ressemble à la vitesse de la lumière, et de nombreux aspects d'évolution qui évoquent un véritable bouillon de culture particulaire. Les références



Le « Jeu de la vie » inventé par John Conway, dont on a représenté ci-dessus une portion d'une configuration planaire à un instant donné, bénéficie de règles d'évolution très simples, mais démontre malgré cela une très grande richesse d'évolution. On peut démontrer qu'en dépit de la simplicité de ses règles, le « Jeu de la vie » est une machine universelle de Turing, permettant de traiter tout problème algorithmique, et qu'il est impossible de définir de manière générale l'évolution à long terme d'une configuration quelconque.

en fin de volume indiquent quelques utilitaires et sites qui permettent de voir évoluer des configurations du « Jeu de la vie » et de percevoir pour quelles raisons cet automate cellulaire a pu autant fasciner physiciens et mathématiciens.

Stephen Wolfram, alors à l'université de Stanford, a également développé dans un article célèbre de *Reviews of Modern Physics* une thèse similaire, et étudié de façon extensive les automates cellulaires à une dimension. Ces deux exemples des automates cellulaires à une dimension et du « Jeu de la vie » démontrent que des systèmes déterministes dotés de règles d'évolution très simples permettent de simuler des situations extrêmement complexes, et peut-être même l'Univers. Il faut noter néanmoins que ces deux exemples sont basés sur des modèles d'espace-temps discret

de structure planaire dans le cas du « Jeu de la vie », linéaire dans le cas des automates cellulaires étudiés par Wolfram, et disposant d'une horloge d'évolution intégrée (*clock*) synchrone pour l'ensemble des sites. Mais en dépit de leur espace de configuration de dimension limitée – 2 pour le « Jeu de la vie », 1 pour les systèmes linéaires de Wolfram – il est possible de démontrer que ces automates cellulaires aux règles très simples sont d'une complexité et d'une richesse infinies, et en particulier peuvent simuler n'importe quel calcul, aussi complexe soit-il.

Le lien peut sembler ténu entre un ordinateur qui réalise ses calculs et la gravitation. On peut néanmoins donner un exemple de lien, discuté en amont de cet ouvrage dans le cadre du paradoxe du *firewall*, où il semble que l'horizon d'un trou noir doit être un véritable « mur de feu » (d'où le nom du paradoxe). On sait en effet qu'il n'est pas possible de cloner un système quantique à volonté : si on réalise une copie, l'original a dû être modifié, faute de quoi l'unitarité – en gros la conservation des probabilités – et la linéarité de la mécanique quantique doivent être remises en question. Mais dans la description du paradoxe de l'information des trous noirs lors de leur évaporation par le mécanisme de Hawking, il semble qu'une particule qui tombe dans le trou noir pourrait être complètement intriquée à la fois avec la matière qui va constituer avec elle le trou noir, mais aussi avec le rayonnement d'évaporation dans son futur, ce qui permettrait de la cloner deux fois. Une des solutions qui a été proposée pour résoudre le paradoxe – dont on rappelle qu'il

n'a pas encore de solution jugée totalement satisfaisante – est de dire que même si un observateur se sacrifie pour aller effectuer des mesures sur la particule qui tombe dans le trou noir il est impossible qu'il ait le temps de réaliser les calculs qui lui permettraient de déterminer l'état quantique exact de la particule, et que donc en ce sens il y a une impossibilité algorithmique à profiter de la situation pour violer la règle de non-clonage.

On peut également considérer qu'en théorie quantique des champs, les diagrammes de Feynman, que nous avons déjà rencontrés et qui mettent en jeu deux particules entrantes et une particule sortante, peuvent être considérés comme des calculs où il convient de réaliser la somme sur tous les processus intermédiaires possibles pour obtenir la réponse sur l'amplitude d'un processus, manière de fonctionner qui rappelle l'ordinateur quantique que cherchent à développer plusieurs laboratoires, dont celui d'IBM.

Dans ces représentations discrètes, qu'elles s'appuient sur twistors, boucles quantiques ou encore diagrammes de Feynman, l'Univers est vu comme un calcul et une simulation, vision renforcée par la conjecture que notre Univers, qui semble avoir trois dimensions d'espace, pourrait en fait être totalement équivalent à, ou être « joué » par, une sorte de programme. L'information de ce programme pourrait se situer dans un hologramme, l'Univers étant un ordinateur quantique explorant un nombre infini ou en tout cas énorme de solutions alternatives, comme Borgès l'imagine dans sa nouvelle « Le jardin aux sentiers qui bifurquent »,

reproduisant peut-être un nombre infini de fois n'importe quelle situation et toutes ses variantes.

Ce qu'il faut retenir

La notion de longueur de Planck, en dessous de laquelle on s'attend à ce que les notions classiques d'espace et de temps perdent leur sens, laisse entendre qu'une structure discrète de l'espace-temps – par opposition à un espace-temps continu – pourrait apparaître à cette échelle. La formule de Bekenstein donnant l'entropie d'un trou noir, qui est le nombre de surfaces de Planck[7] que mesure la surface de son horizon, indique également que l'espace-temps pourrait être discret à cette même échelle.

Parmi les nombreuses approches proposées vers la discrétisation de l'espace-temps, et donc de la gravitation, on peut citer la théorie des twistors de Roger Penrose, dont les concepts ont été repris et adaptés ensuite par la théorie de gravité quantique à boucles. L'intérêt pour l'approche des twistors a été relancé par un article d'Ed Witten en 2003 proposant un lien entre les twistors et la théorie des cordes.

On peut également citer l'approche consistant à considérer l'Univers comme un ordinateur, au moins en un sens étendu, thèse défendue par exemple par Steven Wolfram, Ed Fredkin ou Gerard 't Hooft. Certaines simulations sur ordinateur

7. On rappelle que la surface de Planck est égale à la longueur de Planck au carré.

permettent par ailleurs de comprendre comment, à partir d'une pré-géométrie, sans espace-temps sous-jacent, il est possible de justifier qu'un espace-temps à quatre dimensions puisse apparaître à une échelle grande devant la trame discrète de l'espace-temps.

L'ensemble de ces approches, y compris la théorie de gravité quantique à boucles, manque encore de base théorique bien assurée, même si des progrès ont été accomplis ces dernières années par la théorie de la gravité quantique à boucles. Néanmoins, cette idée d'espace-temps discret, qui considère l'espace et le temps comme des concepts statistiques et émergents d'une structure discrète, constitue sans doute l'une des voies les plus intéressantes à poursuivre dans le futur, même si le chemin vers la solution est très vraisemblablement long et escarpé.

LE PRINCIPE DE MACH

Peut-on exprimer la physique, et en particulier la gravitation, de façon purement relative, sans référence à l'espace absolu de Newton ? Peut-on en particulier comprendre les forces que notre enseignement scolaire appelle « fictives », telles la force inertielle ou la force centrifuge, comme des forces gravitationnelles ? C'est le programme développé au tout début du XXe siècle par le physicien Ernst Mach, sans beaucoup d'équations il faut le reconnaître, avant même la construction par Einstein de la théorie de la relativité générale.

Aujourd'hui, avec le recul et avec les travaux de physiciens comme Dennis Sciama, Fred Hoyle ou encore Jayant Narlikar, il semble effectivement possible d'expliquer les forces de réaction comme la force centrifuge ou la force inertielle de Newton comme des forces gravitationnelles et de parvenir à une vision assez stupéfiante de l'Univers, où la notion de masse inertielle d'un corps apparaît comme étant due à la réaction de tout l'ensemble des masses de l'Univers. Ces masses étant à des distances généralement

considérables de l'objet considéré, ce programme, comme nous le verrons, avait été progressivement abandonné par Einstein, mais il apparaît aujourd'hui que le principe de Mach peut très probablement être justifié, et c'est à cette vision assez étonnante que ce chapitre convie le lecteur.

Einstein, promoteur puis détracteur du principe de Mach

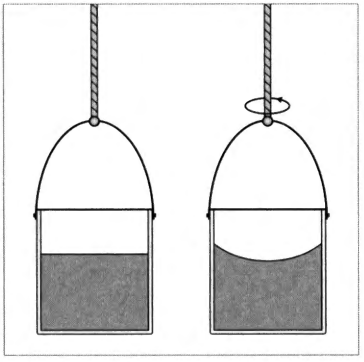
C'est dans son article sur la relativité générale « Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie », qu'Einstein introduit la dénomination de « Principe de Mach » :
« Principe de Mach : le champ gravitationnel [appelé « champ-G » par Einstein] est complètement défini par les masses des corps », qui indique qu'Einstein considère qu'il ne doit pas y avoir de champs indépendants en dehors des masses (rendez-vous en fin de chapitre pour en savoir plus – I).

On peut donc dire qu'effectivement Einstein avait, au moment où il exprime sa théorie, un point de vue profondément machien.

En opposition avec l'espace et le temps absolus qu'avait postulés Newton, le raisonnement de Mach, selon lequel tout mouvement et force doit pouvoir s'exprimer et s'expliquer par un mouvement *relatif* entre les corps présents dans l'Univers, repose sur le raisonnement que si un univers ne contenait que deux corps le mouvement de l'un en orbite autour de l'autre, par exemple la Lune tournant

autour de la Terre en lui montrant toujours la même face, n'aurait absolument aucun sens. En effet, par rapport à quoi tourneraient-ils ? Bien sûr, le point de vue opérationnel et se référant à un espace absolu de Newton pourrait être de proposer de relier les deux corps par un ressort ou un dispositif permettant de mesurer la tension entre les deux et de voir si une force centrifuge s'exerce. Mach pense cependant pouvoir affirmer que l'expérience est ici *inutile* dans le sens où la force centrifuge est *nécessairement* nulle car il faudrait au minimum un troisième corps pour commencer à parler de rotation relative.

Le seau de Newton est une deuxième illustration de cette opposition entre les points de vue de Newton et de Mach. Précédant Newton dans cette réflexion, Descartes (1596-1650) postule qu'espace et matière sont indissociables et que le mouvement d'un objet doit se définir par rapport aux objets dans son voisinage. Newton (1642-1727), quelques dizaines d'années plus tard, critique cette conception en prenant



l'exemple du désormais célèbre seau, dit aujourd'hui « seau de Newton ». Si l'on prend un seau rempli d'eau, initialement immobile par rapport au sol, qu'on le suspend via son anse avec une ficelle et qu'on le fait tourner sur lui-même (page précédente), on observe que l'eau, initialement plane, se courbe progressivement, prenant une forme parabolique au fur et à mesure qu'elle est entraînée par le mouvement de rotation du seau.

Pour Newton, la preuve que les corps voisins de l'eau contenue dans le seau ne jouent pas de rôle et qu'il faut bien faire référence à un espace absolu, est que dans deux situations où le seau est immobile par rapport à l'eau, la surface de l'eau peut être plane (quand le seau est immobile sur le sol), ou incurvée avec une forme parabolique (lorsque seau et eau tournent de façon solidaire autour de l'axe défini par une corde). Ce qui est bien la preuve, selon Newton, que le seau, objet massif le plus voisin de l'eau, ne joue aucun rôle. La réponse de Newton à ce phénomène de courbure est que des « forces fictives » apparaissent dès lors que l'on considère le mouvement d'un corps immobile dans un référentiel non galiléen, comme c'est le cas dans un référentiel en rotation.

Le point de vue de Mach est différent : imaginons quelqu'un qui essaye différents mouvements de toupie sur lui-même en montant sur un plateau tournant manœuvré par quelqu'un d'extérieur, qui ajuste à sa guise la vitesse de rotation du plateau. Si la vitesse de rotation est assez rapide, le personnage sur le plateau sent ses bras devenir plus légers, et même s'élever pratiquement à l'horizontale.

Le manège est situé en plein air, il fait nuit, et le ciel est dégagé. On demande à la personne au centre du manège de décrire le mouvement des étoiles par rapport à lui en fonction de la force centrifuge qu'il sent sur ses bras. Il constate que chaque fois que la force est nulle les étoiles sont immobiles par rapport à lui, alors que dès qu'il ressent une force les étoiles se mettent à tourner. Et plus le mouvement de rotation des étoiles est rapide, plus la force que le personnage ressent sur ses bras est forte. Pour Mach, ceci ne peut pas être une coïncidence. Bien sûr, on peut se contenter de décrire la force centrifuge comme une force « fictive » ressentie dès lors que l'on se trouve dans un référentiel non inertiel, mais pour Mach, cette force doit également pouvoir s'exprimer de la façon suivante : l'observateur est maintenant immobile, mais ce sont toutes les étoiles dans l'Univers qui tournent autour de lui. Selon ce point de vue, on peut conjecturer que c'est l'accélération par rapport à l'observateur, considéré comme immobile, de tous les corps de l'Univers en rotation par rapport à lui qui crée une force qui est égale à la force « fictive » que Newton appelle la « force centrifuge ».

Concernant l'argument de Newton selon laquelle l'influence du seau lui-même est négligeable, Mach répond : « Personne ne possède la compétence permettant de dire quel serait le résultat de l'expérience si les parois du récipient voyaient leur épaisseur et leur masse augmenter jusqu'à ce qu'elles aient plusieurs lieues d'épaisseur. » Nous verrons d'ailleurs dans la suite que même si le seau avait l'épaisseur de la Terre, son influence, sans être nulle, resterait

extrêmement faible, ce qui ne laissait aucune chance aux expérimentateurs du début du XXe siècle qui avaient tenté de mettre en évidence un effet d'entraînement.

Le point de vue de Mach est identique concernant la masse inertielle : selon le point de vue de Newton, si on accélère un corps par rapport à un référentiel inertiel, le corps résiste à cette accélération par une force *F* reliée à son accélération gamma dans un référentiel inertiel par qui n'est rien d'autre que le principe fondamental de la dynamique, et que l'on considère usuellement comme une force locale, liée aux propriétés du seul corps de masse *m*. Le point de vue de Mach est de dire que l'on doit pouvoir parfaitement considérer la situation symétrique où le corps est immobile et où c'est l'accélération de tous les autres corps dans l'Univers qui engendre une force de réaction sur le corps. En fait, comme on l'a dit plus haut, historiquement, Mach n'avait exprimé ce principe que de façon assez vague et sans calculs précis. Ce n'est que plusieurs dizaines d'années plus tard que plusieurs physiciens, et notamment Dennis Sciama, qui fut le directeur de thèse de Roger Penrose et de Stephen Hawking à Oxford, suivi par Michael Berry puis Derek Raine, donnèrent un caractère plus précis à cette équivalence pour la gravitation.

Mais alors qu'Einstein considérait initialement que le principe de Mach devait faire partie intégrante de sa théorie de la relativité générale, vers la fin de sa vie il apparaît fortement désabusé par rapport à lui, comme le montre la citation suivante :

« Mach avait conjecturé que dans une théorie véritablement rationnelle, la notion d'inertie devrait dépendre de l'interaction

entre masses, comme c'était précisément le cas pour les autres forces newtoniennes, conception que j'ai considérée pendant longtemps comme étant la conception correcte. Cela présuppose implicitement, cependant, que la théorie de base soit du type général de la mécanique de Newton, c'est-à-dire les masses et leurs interactions (gravitationnelles) comme concepts originels. Les tentatives vers une telle solution ne mènent pas cependant à une théorie des champs cohérente, comme il sera immédiatement évident. » (Einstein, 1949)

Même si c'est Einstein qui parle, on peut douter de la qualification d'« immédiatement évident » pour l'échec à formuler une théorie des champs dans la mesure où Hoyle et Narlikar ont proposé, au milieu des années 1960, une théorie des champs incorporant le principe de Mach, dont Hawking a démontré qu'elle incorporait la relativité générale, à la condition cependant qu'il existe des masses négatives dans la Nature (nous y reviendrons).

Mais afin de comprendre le renoncement d'Einstein au principe de Mach, qu'il avait en fait lui-même défini en 1918 plus clairement que Mach lui-même, reprenons les approches des années 1940 et 1950, en commençant par l'électromagnétisme et son expression d'action à distance, très surprenante.

L'univers absorbeur de Wheeler et Feynman

Il semble que tout raisonnement justifiant le principe de Mach souffre d'un grave défaut. Comment en effet la réaction de corps se situant à d'énormes distances – typiquement

plusieurs centaines de millions d'années-lumière – pourrait-elle contribuer à une réaction *instantanée* dès lors qu'un corps est accéléré ou, ce qui est en principe équivalent, dès lors que toutes les masses de l'Univers subissent une accélération opposée, le corps subissant la force « fictive » étant par définition immobile. En effet, lorsqu'un observateur placé sur notre manège nocturne voit les étoiles se lancer dans un mouvement de rotation, il ressent *instantanément* l'ensemble de la force centrifuge, et pas une croissance graduelle de cette force. Or les deux calculs ci-dessous nous montreront que la contribution de la Terre (de l'ordre du milliardième) et même du Soleil (de l'ordre de dix-milliardièmes), qui constituent les deux contributions les plus fortes dans notre voisinage, sont mesurables mais extrêmement faibles et incapables d'expliquer à elles seules masse inertielle et force centrifuge.

Il semble donc que le programme de Mach échoue lamentablement pour des raisons de causalité : le Soleil est déjà à cinq cents secondes-lumière de la Terre, et sûrement la force centrifuge se met en action immédiatement, en tout cas en un temps très inférieur à cinq cents secondes, et les interactions ne peuvent pas se propager plus vite que la vitesse de la lumière, non ?

Si on a l'impression à première vue qu'une telle théorie d'action à distance – *action-at-a-distance* dans la littérature anglo-saxonne – est incompatible avec la théorie de la relativité, nous allons néanmoins voir que, de façon très surprenante, ce n'est pas le cas, et que par exemple, Schwarzschild lui-même, dès 1903, dans un programme

repris par Tetrode au début des années 1920, ainsi que par Fokker et Ritz, ont démontré que les notions de relativité et d'action « instantanée » à distance – nous allons préciser en quel sens –ne sont pas incompatibles.

Avant même ses contributions à la relativité générale, Karl Schwarzschild fut en effet le premier à montrer que l'électrodynamique peut s'exprimer comme une théorie qui ne nécessite pas l'utilisation de champs électromagnétiques, et qui peut s'exprimer en fonction des seules interactions entre particules chargées, à la seule condition qu'elles s'effectuent à intervalle nul, $ds^2 = 0$. Et comme l'intervalle ds^2 est une quantité qui est un invariant relativiste – c'est-à-dire que si l'intervalle est nul dans un référentiel, il est nul dans tous les référentiels –, il va être assez facile de démontrer que l'expression de l'électromagnétisme de Schwarzschild respecte la théorie de la relativité. L'autre point fondamental de la formulation de Schwarzschild est qu'il faut a priori considérer l'ensemble complet des interactions s'effectuant à la vitesse de la lumière (intervalle nul), et en particulier qu'il faut considérer des trajets inattendus et que l'on n'a pas l'habitude de considérer, comme celui qui comprend :
1) un aller à la vitesse de la lumière entre la particule A et la particule B qui se situe dans son futur (trajet que nous somme habitués à prendre en compte),
mais aussi, par exemple :
2) l'action en retour de la particule B sur la particule A s'exerçant *du futur vers le passé*, également à la vitesse de la lumière.

L'ensemble de ces deux chemins, qui constitue une sorte d'aller-retour dans l'espace-temps, décrit une interaction qui s'effectue *instantanément* pour le corps accéléré même si la distance entre les deux charges peut être énorme.

Cette expression machienne de l'électromagnétisme en fonction des seuls émetteurs et récepteurs a été résumée de façon excellente par Gilbert Norton Lewis, de l'université Berkeley : « Je vais faire l'hypothèse qu'un atome n'émet jamais de lumière autrement que vers un autre atome, et je vais prétendre qu'il est aussi absurde de concevoir de la lumière émise par un atome indépendamment de l'existence d'un atome récepteur, qu'il serait d'imaginer un atome absorbant de la lumière sans l'existence simultanée de lumière devant être absorbée. Je propose donc d'éliminer l'idée de simple émission de lumière et de lui substituer l'idée de *transmission*, ou de processus d'échange d'énergie entre deux atomes bien définis ou de molécules. »

Derrière le formalisme proposé par Schwarzschild, qui attire l'attention, dès les toutes premières années du XXe siècle, sur le fait que les interactions entre particules n'ont pas besoin de champs pour être décrites, dans la mesure où l'on considère l'ensemble de tous les zig-zag dans l'espace-temps dont chacun des segments est effectué à la vitesse de la lumière, il faudra attendre la fin de la Seconde Guerre mondiale pour que John Wheeler et Richard Feynman, son étudiant à l'époque, appliquent le formalisme de Schwarzschild et de Tetrode au problème de la réaction de rayonnement subie par une charge

accélérée et mettent en évidence le caractère machien de l'électromagnétisme.

Ainsi, même s'il n'y a pas d'autre charge dans son voisinage, une charge électrique subissant une accélération qui varie dans le temps émet un rayonnement et ressent une force égale à :

$$F = 2q^2/3c^3\, d^3x/dt^3$$

où d représente la dérivée de l'accélération par rapport au temps, q est la charge de la particule accélérée et c est comme d'habitude la vitesse de la lumière, F étant la force qui s'oppose au mouvement accéléré de la charge. Notons que cette force est proportionnelle à la *dérivée* de l'accélération, et non pas à l'accélération elle-même, comme c'est le cas dans la force d'induction électromagnétique entre les *deux* charges ou les deux masses que nous étudierons ci-dessous. Notons également que cette force dépend du carré de la charge.

Wheeler et Feynman avaient commencé à s'intéresser à ce problème de l'expression de l'électromagnétisme comme une théorie d'action instantanée à distance au début de la Seconde Guerre mondiale, mais cette dernière interrompit presque totalement leurs travaux, le jeune Richard Feynman rejoignant le programme secret Manhattan à Los Alamos, cependant que John Wheeler, qui n'avait que cinq ans de plus que Feynman, devenait le responsable de la deuxième filière de fabrication du combustible des bombes atomiques (plutonium-239 et uranium-235) sur le site de Hanford dans l'État de Washington.

La guerre se finissant, Wheeler, revenant à l'université de Princeton, et Feynman, quittant Princeton pour s'installer à Caltech où il restera jusqu'à sa mort, cherchèrent à finaliser ces travaux. Ce que montrent Wheeler et Feynman, dans deux articles célèbres publiés en 1945 et 1949 dans la revue *Reviews of Modern Physics*, c'est que la force de réaction de rayonnement peut être considérée comme étant due à la réaction *instantanée*, au sens de l'aller-retour à la vitesse de la lumière que nous avons décrit plus haut, de *l'ensemble des charges de l'Univers*. Et donc, ce qui justifie que, malgré les distances énormes, la force de réaction puisse être instantanée, c'est que Wheeler et Feynman, explicitant le travail de Schwarzschild et de Tetrode, supposent que les charges génèrent un potentiel non seulement retardé[1] comme on a l'habitude de le considérer et qui prend en compte l'influence des charges dans notre passé, mais également, et avec une amplitude égale, un potentiel avancé, symétrique dans le temps, et qui décrit l'influence du *futur vers le passé*, en complément de l'influence du passé vers le futur exprimée par le potentiel retardé.

Si l'on regarde les chemins d'interaction dans l'espace-temps entre la charge émettrice et l'ensemble des charges de l'Univers, ces trajets à temps d'aller-retour nul correspondent

1. Le potentiel retardé, habituellement utilisé, fait intervenir, pour une charge située à la distance r, des temps situés dans le passé à $t' = t - r/c$, alors que le potentiel avancé, symétriquement, fait intervenir les temps situés *dans le futur* au temps $t» = t + r/c$.

à propager dans le futur à la vitesse de la lumière le signal de la charge émettrice et à considérer la partie du rayonnement *réémis dans sa composante avancée, donc du futur vers le passé, par toutes les autres charges de l'Univers*, signal qui, en d'autres termes, revient sur la charge initiale au moment même où l'on essaie d'accélérer la charge.

À ceux qui objecteront que ce n'est pas ainsi que l'on exprime les problèmes d'électrodynamique pour des raisons évidentes de causalité, Wheeler et Feynman entreprennent de démontrer que le champ avancé (revenant en arrière dans le temps) émis par l'ensemble des charges de l'Univers en réaction à l'arrivée du champ retardé va, en revenant sur la charge émettrice, annuler précisément la partie avancée du champ, alors que la partie retardée va se trouver renforcée, ce qui permet de retrouver un champ qui ne s'exprime qu'en fonction d'un potentiel retardé, provenant du passé, pour le champ total.

Après sommation sur l'ensemble des charges de l'Univers, le bilan global pour la charge accélérée correspondra à la force de réaction de rayonnement. Élément essentiel, pour que cela marche, Wheeler et Feynman notent qu'il faut que l'Univers absorbe le rayonnement émis par la charge, et se comporte donc comme un *absorbeur parfait*, d'où le nom de « théorie de l'Univers absorbeur » souvent donné au modèle de Wheeler et Feynman – la théorie étant également parfois appelée « théorie symétrique de Wheeler et Feynman » car le traitement des interactions est symétrique par rapport au renversement du temps.

La masse inertielle comme un effet de réaction gravitationnelle

Il est évidemment tentant d'appliquer le même raisonnement dans le cas de la gravitation et des masses de l'ensemble de l'Univers. C'est ce que Dennis Sciama a proposé dans une version qui s'appuie sur une analogie avec l'induction électromagnétique. De leur côté, Fred Hoyle et Jayant Narlikar ont proposé une expression machienne de la théorie de la gravitation qui, comme l'expression de Schwarzschild, repose sur le formalisme de moindre action[2], basé sur une expression que l'on appelle un « lagrangien » et qui ne fait intervenir que le mouvement des masses, et donc sans avoir besoin d'introduire ni champs ni ondes gravitationnelles.

Essayons donc de montrer que la notion de masse inertielle peut se comprendre comme la force de réaction gravitationnelle induite par l'accélération de tous les corps dans l'Univers. Nous savons que les référentiels inertiels sont ceux qui sont à une très bonne approximation à la fois sans rotation et en translation uniforme par rapport au mouvement moyen des masses dans l'Univers, à condition du moins que nous ne soyons pas trop proches de corps massifs. Considérons maintenant l'effet de l'accélération

2. Ce principe de moindre action, associé au formalisme proposé par Lagrange, se retrouve en de multiples occasions en physique, et est associé au fait que les trajectoires classiques sont en quelque sorte des chemins renforcés par leur cohérence: comme on se trouve à un extremum de chemin, les différentes histoires possibles se renforcent et font apparaître un chemin classique.

d'une masse à une distance r de notre objet et utilisons pour cela le résultat que nous connaissons dans le cas de l'électromagnétisme via l'expression de la force induite par une charge qui est accélérée par rapport à une autre charge. Sans nous préoccuper de la direction de la force, dont nous estimons seulement la valeur absolue, si une charge électrique est accélérée perpendiculairement à la direction qui la relie à la deuxième charge, elle exerce sur la deuxième charge une force égale en module à :

$$q_1 q_2 \frac{a}{4\pi\varepsilon_0 c^2 r}$$

Ici, a est l'accélération, q_1 et q_2 sont les charges des deux objets, $1/4\pi\varepsilon_0$ est une constante de normalisation sans importance – appelée la « permittivité du vide » –, et c est la vitesse de la lumière (ce qui indique que l'effet est un effet relativiste), associée à une force de rayonnement.

Notez bien que cette force ne dépend pas de la distance de la même manière que la force électrostatique entre deux charges immobiles, mais qu'elle décroît beaucoup plus lentement en fonction de la distance, c'est-à-dire comme *l'inverse de la distance* $1/r$, alors que la force électrostatique décroît comme l'inverse *du carré de la distance*[3].

Nous allons supposer pour le moment que la force qui s'exerce entre deux masses en accélération s'exprime à

3. C'est cette décroissance lente qui permet les communications hertziennes au moyen de l'accélération des électrons dans une antenne métallique, alors que l'électrostatique ne permet pas l'émission d'énergie.

travers une formule similaire à celle que nous venons d'écrire pour deux charges électriques en accélération. Évidemment, dans le cas gravitationnel, les charges électriques sont remplacées par les masses, qui jouent le rôle de charges gravitationnelles, et le facteur est remplacé par la constante de gravitation universelle G. En faisant ces hypothèses, la force exercée par une masse m_1 sur une masse m_2 lorsqu'elle possède une accélération a est :

$$\frac{Gam_1m_2}{c^2r}$$

où c est bien entendu toujours la vitesse de la lumière et a l'accélération.

Notez à nouveau que, même si la formule ressemble superficiellement à la force de Newton entre deux masses, elle en diffère néanmoins profondément, car elle varie comme l'inverse de la distance, alors que la force de Newton varie comme l'inverse du carré de la distance $1/r^2$, et qu'elle contient à nouveau la vitesse de la lumière, alors que Newton suppose que la vitesse de propagation de l'interaction est infinie. Par rapport à cette force newtonienne, la force que nous décrivons, à la même distance r, est donc dans le rapport : $a\,r/c^2$.

Prenons pour exemple une accélération égale à l'accélération de la gravité g à la surface de la Terre, soit environ 10 m/s^2. On calcule facilement que le rapport c^2/g possède la dimension d'une distance et que cette distance vaut environ une année-lumière. Comme c'est l'inverse de cette distance qui intervient dans la formule précédente,

cela veut dire que même à la surface de la Terre (d'environ 6400 kilomètres de rayon), la contribution de la Terre elle-même à la force inertielle est de l'ordre du rapport entre ces deux distances, soit le milliardième du poids, ce qui, sans être totalement négligeable, en représente une partie extrêmement faible. Un calcul similaire montre que même la contribution du Soleil, l'objet de loin le plus massif dans notre voisinage, reste également très faible : avec une masse de l'ordre de 330000 fois la masse de la Terre, le Soleil est à une distance d'environ 150 millions de kilomètres de nous, et sa contribution à la force d'inertie demeure de l'ordre de dix parties par milliard, un peu moins négligeable que la contribution de la Terre, pourtant plus proche de nous, mais néanmoins très faible. Comme la variation de cette force de rayonnement gravitationnel varie comme $1/r$, et décroît donc beaucoup plus lentement en fonction de la distance que la force newtonienne, on peut se douter que c'est la contribution de *l'ensemble des masses de l'Univers* qui va effectivement constituer l'essentiel de la force d'inertie.

Essayons donc de sommer les contributions des masses présentes dans l'Univers observable, dont on rappelle que, du point de vue de l'observateur, elles subissent toutes la même accélération, lui restant immobile. Pour cela, nous appelons ρ la densité moyenne de l'Univers. Nous pouvons estimer la densité de la matière ordinaire de la façon suivante : il est aujourd'hui assez facile, et c'est par exemple ce qu'ont fait les satellites *COBE* (Cosmic Background Explorer) et *Planck*, de mesurer la température du bruit de fond de photons

dans l'Univers : ce rayonnement possède une température proche de 2,7 kelvins, ce qui correspond grossièrement à 400 photons par centimètre cube. Nous savons par ailleurs par les contraintes que nous fournit la nucléosynthèse – la fabrication au cours des premiers instants de l'Univers des éléments nucléaires légers comme le deutérium, l'hélium et le lithium – qu'il reste un peu moins d'un milliardième de la matière initiale, environ 6×10^{-10}, qui a résisté à l'annihilation avec l'antimatière. Ce qui nous donne l'équivalent d'environ une masse d'un tiers de proton (ou d'un neutron) par mètre cube.

La coquille d'espace située entre la distance r et la distance $r + dr$ centrée sur nous possède un volume qui est donné par la différence entre le volume de la sphère de rayon $r + dr$ et celui de la sphère de rayon r. Le volume d'une sphère de rayon r étant égal à $4/3\ \pi\ r^3$, on vérifie simplement qu'en se limitant au terme linéaire en dr, le volume de la coquille en question est $4\pi\ r^2\ dr$, et sa masse est donc $\rho\ 4\pi\ r2\ dr$.

Nous faisons l'hypothèse, ce qui est raisonnable au vu des distances sur lesquelles nous réalisons l'intégration, que réaliser ce calcul avec une densité moyenne a bien un sens, ce qui veut dire que nous devons réaliser l'intégration sur une distance supérieure à environ trois cents millions d'années-lumière, distance au-delà de laquelle on observe que l'Univers est de fait presque homogène, avec une bonne approximation. Intégrons maintenant les contributions à la force d'inertie de toutes ces coquilles de matière centrées sur nous jusqu'à atteindre les confins de l'Univers observable

à notre époque, quatorze milliards d'années après le Big Bang. On voit facilement, avec un carré de la distance au numérateur, et l'inverse de la distance au dénominateur, que la somme de toutes les contributions diverge et tend vers l'infini si on poursuit l'intégration au-delà de la limite de l'Univers observable aujourd'hui, et nous supposerons donc que la borne d'intégration est égale à environ quatorze milliards d'années-lumière, soit la valeur c/H_0, où c est la vitesse de la lumière et H_0 est la « constante » de Hubble, égale aujourd'hui à environ 70 km/s/Mpc[4].

Avec ces hypothèses, et si on se limite à la contribution de la matière ordinaire – principalement les protons et neutrons, car les électrons et les photons ont des contributions nettement plus faibles en termes de masse –, on trouve que la force de réaction induite par l'accélération de tous les corps de l'Univers est égale à :

$$F = \frac{2\pi m G\, a\rho}{H^2}$$

En remplaçant la densité moyenne de matière par sa valeur, et en utilisant la valeur expérimentale de H_0, estimée actuellement à 70 km/s/Mpc, on trouve que $F \approx m\, a/30$ environ, ce qui veut dire que la force de réaction

4. Cette « distance de Hubble » c/H_0 est la distance au-delà de laquelle la relation éloignement-vitesse de Hubble indique que la vitesse de récession dépasse la vitesse de la lumière. On peut noter qu'en fait l'Univers observable s'étend plus loin que cette distance de Hubble, mais le *redshift* – « décalage vers le rouge » – diminue également la contribution de ces régions très éloignées, ce qui fait que notre borne d'intégration à quatorze milliards d'années-lumière semble assez bien justifiée.

gravitationnelle due à la matière ordinaire est d'un peu plus de 3 % de la masse inertielle.

Il s'en faut donc d'un facteur 30 que nous retrouvions le résultat attendu de la loi de la dynamique de la force de réaction, $F = m\,a$. Pour autant, ce résultat est très intéressant car il montre que la force de réaction, quand on essaye de modifier la trajectoire d'un corps en l'accélérant, est bien du même ordre de grandeur que la force de réaction de toutes les masses de l'Univers lorsque leur mouvement subit une accélération par rapport à cet objet resté immobile. En outre, bien que notre calcul reste un simple calcul d'ordre de grandeur, il semble indiquer également que soit il existe de la matière et de l'énergie cachées dans l'Univers, d'un facteur de l'ordre de 30 au-delà de la matière nucléaire, soit il y a quelque chose qui ne se comporte pas comme prévu dans la gravitation. Rappelons ici que le modèle cosmologique standard affirme justement que la matière ordinaire ne représente que 4 % environ du contenu énergétique de l'Univers.

Nous pouvons noter d'ailleurs que si la densité de matière est choisie comme étant égale à la densité critique :

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

notre formule approchée ci-dessus prédit : $F = 0{,}75\ ma$, ce qui, à ce niveau d'approximation, est remarquablement proche de la force inertielle de Newton : $F = ma$ (rendez-vous en fin de chapitre pour davantage de détails – II).

Notre raisonnement nous permet donc de comprendre la notion de masse inertielle comme un effet gravitationnel non

pas statique mais de rayonnement, comme c'est le cas dans l'électromagnétisme avec la réaction de rayonnement d'une charge que l'on accélère, et qui conduit là aussi à une force de réaction, proportionnelle à un paramètre que l'on va appeler « masse inertielle ». On voit également que cette compréhension repose sur un effet relativiste, du fait que la vitesse de la lumière apparaît dans la formule. De ce fait, à sa décharge, Newton était à son époque dans la totale incapacité de réaliser le calcul que nous avons fait, basé sur l'électromagnétisme, et on peut considérer qu'il ne faisait qu'assumer une position pragmatique, qui lui permettait d'avancer en contournant son ignorance des lois réelles, relativistes, de la Nature, qui ne seraient découvertes que plus de deux siècles plus tard.

Coalescence de deux trous noirs

Un calcul approché assez similaire à celui que nous avons développé ici pour estimer la réaction d'inertie peut être adapté afin d'estimer la perturbation de la géométrie induite lors de la coalescence de deux trous noirs massifs de 30 et 35 masses solaires, tels ceux qui ont été détectés fin 2015 dans la première détection d'ondes gravitationnelles. Le raisonnement est inspiré de celui de Michael Berry dans son ouvrage *Cosmology and Gravitation* et adapté au cas qui nous intéresse. Intéressons-nous à la dernière fraction de seconde, et à la phase finale de coalescence des deux trous noirs. Dans ces derniers instants, la vitesse de chacun des trous noirs est égale à une bonne fraction de la vitesse de la lumière,

mettons $c/2$, et nous supposons que leur distance relative est de l'ordre de deux fois le rayon de Schwarzschild d'un trou noir qui aurait leur masse totale, soit 65 masses solaires. Pour simplifier encore un peu, nous supposerons que les deux masses sont chacune égales à M = 32 masses solaires, soit environ 6 x 10^{31} kg. Le rayon de Schwarzschild de l'un de ces trous noirs est:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

une distance d'environ cent kilomètres, et dans notre approximation la distance entre les deux trous noirs au moment de la coalescence finale (qui fournit une énergie phénoménale qui va dépasser pendant une fraction de seconde l'émission d'énergie de toutes les étoiles de l'Univers observable, ce qui permet de les détecter en dépit de la faiblesse de la gravitation), est égale au double de cette distance, soit:

$$\frac{4GM}{c^2}$$

Avec notre hypothèse d'une vitesse égale à la moitié de la vitesse de la lumière, $c/2$, l'accélération de l'un des corps est environ:

$$\frac{c^2}{8r_s}$$

soit:

$$\frac{c^4}{16GM}$$

L'accélération qui en résulte est phénoménale et une étude plus précise des trous noirs nous indiquerait d'ailleurs

que la force devient centripète dans cette phase finale, et non centrifuge comme on s'y attendrait.

Les deux trous noirs tournant l'un autour de l'autre, un lecteur attentif pourra objecter que si le plan de leur rotation commune est perpendiculaire à la ligne de visée leurs contributions à la force de réaction gravitationnelle vont s'annuler si les masses sont égales, les accélérations étant opposées. Or, ce ne sera généralement pas le cas, la vitesse de propagation de l'interaction à la vitesse de la lumière ayant pour conséquence que les signaux ne s'annulent pas, voire se renforcent. Nous supposerons donc dans notre estimation que les contributions des deux trous noirs, au moins pour une partie de leur chant du cygne, vont s'additionner.

Dans ce cas, nous pouvons reprendre le calcul précédent en utilisant la formule de la force de réaction gravitationnelle induite par l'accélération des trous noirs :

$$\frac{GamM}{c^2 r}$$

où nous additionnons les deux contributions des trous noirs de masse $m_1 = m_2 = M = 32$ masses solaires, m est la masse de l'objet qui nous sert à mesurer l'accélération, et a, l'accélération subie par chacun des deux trous noirs, que nous avons estimée par l'expression :

$$\frac{c^4}{16GM}$$

ce qui nous donne un résultat très simple pour la force ressentie par notre détecteur d'onde gravitationnelle. Il ressent en effet l'accélération, induite par la déformation

de l'espace-temps, égale à environ 100 % au voisinage du trou noir, et démultipliée par le rapport entre la distance à la source (de l'ordre de 1,3 milliard d'années-lumière pour le premier événement d'ondes gravitationnelles dont nous parlons) et environ quatre fois le rayon de Schwarzschild, soit 350 kilomètres dans le cas qui nous intéresse. Ceci correspond à une déformation relative de la géométrie d'environ 350 km/1,2 x 10^{22} km, soit une variation relative de la géométrie de 3 10^{-21} environ, ou une partie sur 3 x 10^{20}.

De ce fait, le détecteur d'Advanced LIGO, qui avait à ce moment-là une sensibilité aux distorsions de la géométrie proche de 10^{-22}, a détecté très facilement, très au-dessus du niveau de bruit de l'appareillage, cet événement de coalescence de deux gros trous noirs.

On pourrait montrer de la même façon que la force centrifuge n'est pas du tout une force fictive, mais une force bien réelle qui s'exprime comme la force d'induction gravitationnelle que ressent un corps immobile si l'ensemble des masses de l'Univers se met en rotation autour de lui.

Théorie des champs ou action à distance ?

La gravitation et l'électromagnétisme sont généralement exprimés sans actions directes entre particules, et utilisent de ce fait des champs électromagnétiques et des ondes gravitationnelles comme des degrés de liberté supplémentaires, pour exprimer la propagation des interactions à travers l'espace-temps.

Cependant, leur expression dans une théorie d'action-à-distance, avec seulement des interactions entre les charges dans le cas électromagnétique et seulement entre des masses dans le cas gravitationnel, est intellectuellement plus satisfaisante et change profondément la vision de l'Univers : rotation, inertie et réaction électromagnétique s'y expriment de façon relationnelle, comme en rêvait Mach.

Il y a deux points sur lesquels il est important d'insister : redisons d'abord que cette action à distance, s'exprimant dans les deux cas de l'électromagnétisme et de la gravitation comme des allers vers le futur, ce qui est usuel, mais aussi des retours du futur vers le passé sur des cônes de lumière, ce qui est plus surprenant, respecte totalement le principe de relativité d'Einstein. Pas moyen par ailleurs avec ce principe de passer des messages et de l'information plus vite que la vitesse de la lumière, car même si l'Univers réagit instantanément via la force d'inertie et la réaction de rayonnement, la réponse est statistique, intégrant la réponse de l'ensemble énorme des charges et des masses de l'Univers.

Pourquoi alors, en dépit de leur élégance, ces deux expressions, qui avaient été introduites par Schwarzschild pour l'électromagnétisme presque immédiatement après la publication par Einstein de sa théorie, puis un demi-siècle plus tard par Sciama, Hoyle et Narlikar pour la gravitation, ne sont-elles pas plus connues et utilisées par les physiciens, alors qu'elles permettent d'expliquer les forces « fictives » d'inertie et de réaction de rayonnement comme de vraies forces de réaction de l'ensemble des composants de l'Univers,

et qu'elles permettent d'étendre le principe de relativité non seulement à la vitesse, mais également à l'accélération ?

Une première réponse est que l'on aime généralement exprimer la physique de façon locale, et qu'il serait très gênant de ne pas pouvoir se limiter à l'influence d'un environnement local quand on cherche à exprimer l'évolution d'un système. Donc, par simplicité opérationnelle, on va séparer les parties locales et non locales, et l'on va cacher les secondes dans des paramètres comme la masse inertielle ou comme la réaction de rayonnement. D'un point de vue newtonien, la raison pour laquelle des corps célestes lointains sont si utiles pour décrire le mouvement d'un corps en rotation est justement que l'on considère qu'il n'y a pas d'interactions causales entre eux et le corps en question.

Probablement la résistance la plus vive, et c'était notamment le cas d'Einstein, était que le principe de Mach ne pouvait apparemment pas s'appliquer à l'ensemble des solutions autorisées par la relativité générale. Ainsi un espace-temps vide, autorisé non seulement par la relativité restreinte – sans gravitation – mais aussi par la relativité générale comme solution – c'est l'espace-temps de Milne –, semble désespérément anti-machien car il ne contient aucune masse, même si l'on peut objecter que si dans un espace-temps, il n'y a réellement aucun objet massif, il n'y a également rien à voir et donc le principe de Mach devient sans objet, dans tous les sens du terme. De même, l'univers globalement en rotation construit en 1948 par le mathématicien Kurt Gödel semblait également anti-machien, bien que les conséquences du fait qu'il

contient des trajectoires revenant sur leurs pas dans l'espace-temps doivent être étudiées en raison de l'instabilité qu'elles impliquent, et qui va « peupler » cet univers avec des particules.

Un autre argument est dû à Hawking dans sa critique de 1965 de la théorie d'action à distance de Hoyle et Narlikar. Dans cet article qu'il est intéressant de relire aujourd'hui, vingt ans après la mise en évidence d'une gravité répulsive dans l'Univers, Hawking montre que si, formellement, la théorie de Hoyle et Narlikar est bien équivalente à la théorie de la relativité générale – ce qui confirme déjà pour une large part la validité de leur approche –, cette équivalence ne semble pas implémentée dans notre Univers sauf, note Hawking à la fin de son article, si l'on suppose l'existence de particules de masse négative. Or justement, comme n'osait pas l'imaginer Hawking, une gravité répulsive, appelée faute de mieux « énergie noire », est à l'œuvre dans notre Univers. Nous reviendrons au dernier chapitre sur l'hypothèse d'un univers possédant autant de masses positives que négatives, l'univers de Dirac-Milne.

De fait, bien avant Hawking, Einstein était lui-même extrêmement conscient de la menace que faisaient poser les conditions aux limites sur l'implémentation du principe de Mach. Einstein essaiera ainsi pendant quelques mois de justifier qu'au-delà d'une certaine distance, on peut négliger les contributions des masses (ce qui est le cas au-delà de l'horizon des événements, avec un *redshift* infini), espérant ensuite que le problème disparaîtrait dans le cas d'un univers fermé, d'extension spatiale finie. Mais

graduellement, à partir de 1918, Einstein croit de moins en moins au principe de Mach, dont nous avons vu qu'il le répudiera complètement à la fin de sa vie.

Cependant, en dépit des difficultés que rencontre encore aujourd'hui le principe de Mach, l'intérêt pour les théories d'action à distance renaît périodiquement, notamment dans le domaine de la cosmologie, car il pourrait permettre de parvenir à ne plus traiter le temps comme un paramètre donné de façon extérieure, mais comme une variable dynamique définie par le système et son environnement, problème central de la cosmologie quantique.

Ce qu'il faut retenir

Le principe de Mach, qui cherche à exprimer la physique de façon relationnelle, sans référence à l'espace et au temps absolus de Newton, conserve encore aujourd'hui un statut incertain en dépit de son fort attrait esthétique. Cependant, pour l'électromagnétisme comme pour la gravitation, des physiciens comme Schwarzschild, Tetrode, Wheeler et Feynman, ainsi que Sciama, Hoyle, Narlikar et Raine pour la gravitation, ont permis de fournir des expressions de l'électromagnétisme et de la gravitation respectant le programme de Mach et où les notions de masse inertielle et de réaction de rayonnement apparaissent comme des interactions à distance.

Point fondamental : bien qu'exprimées comme des actions à distance entre un corps chargé et massif et l'ensemble des corps

de l'Univers, ces expressions respectent néanmoins le principe de relativité d'Einstein même s'il est a priori impossible d'utiliser ces interactions à distance pour transférer des informations à vitesse plus grande que la vitesse de la lumière.

Il est également important de noter que ces expressions machiennes de l'électromagnétisme et de la gravitation n'utilisent pas de champs *intermédiaires* et ne mettent en jeu que des interactions *directes* entre particules sur des cônes de lumière, donc compatibles avec la relativité, proposant une vision radicalement différente de la représentation habituelle, locale, des interactions.

L'expression développée par Dennis Sciama du principe de Mach dans le cas de la gravitation nous a permis de trouver une explication de la masse inertielle comme une force de réaction d'induction gravitationnelle – par analogie avec l'induction électromagnétique – de *l'ensemble des masses de l'Univers observable*, ainsi qu'une excellente approximation de la déformation de la géométrie induite par la coalescence des deux trous noirs détectés en septembre 2015 par les deux détecteurs d'Advanced LIGO d'ondes gravitationnelles.

Ce qui reste problématique dans ces expressions concerne principalement les conditions aux limites – et en particulier, l'existence ou non de masses négatives dans l'Univers – et, à un moindre titre, la possibilité de quantifier ces expressions[5].

5. Car le formalisme de Lagrange utilisé par Schwarzschild dans le cas de l'électromagnétisme, et par Hoyle et Narlikar dans le cas de la gravitation, laisse espérer une traduction dans une version quantique.

Pour aller plus loin

I - Les citations suivantes montrent à quel point Einstein estimait initialement central de respecter ce principe :

« Dans une théorie cohérente de la relativité, il ne peut pas y avoir d'inertie relative à l'espace, mais seulement une inertie de masses relativement aux autres masses. » (Einstein, 1917.)

« Nous n'avons pas de moyen de différencier un champ centrifuge d'un champ gravitationnel… ceci confirme la vision que nous pouvons considérer le système en rotation K' comme étant au repos et la force centrifuge comme un champ gravitationnel. » (Einstein, 1914), ce qui constitue au passage une expression plus générale du principe d'équivalence que sa formulation initiale d'équivalence entre un référentiel *uniformément* accéléré et un champ de gravitation *uniforme*.

« La théorie de la relativité rend probable que Mach était sur la bonne voie lorsqu'il pensait que l'inertie dépendait de l'action mutuelle entre corps matériels. Nous montrerons en effet par la suite que, selon nos équations, des masses inertes agissent effectivement l'une sur l'autre dans le sens de la relativité de l'inertie, même si c'est de façon très faible. Que pouvons-nous attendre de la ligne de pensée de Mach ?

1. L'inertie d'un corps doit s'accroître lorsque des masses pesantes s'accumulent dans son voisinage ;
2. Un corps doit ressentir une force d'accélération quand des masses sont accélérées dans son voisinage et, en fait, la force doit être dans la même direction que l'accélération.
3. Un corps creux en rotation doit générer à l'intérieur de lui-même un champ de Coriolis, qui défléchit les corps en mouvement dans le sens de sa rotation, et qui crée également un champ centrifuge radial. » (Einstein, 1918, in *La Signification de la relativité*)

« L'entière inertie d'une masse ponctuelle résulte de l'effet de la présence de toutes les autres masses, dérivant d'une certaine interaction avec la première. »

II - Ce calcul montre donc que Newton avait très probablement tort de se gausser des critiques de Leibniz et de Berkeley envers l'espace absolu, en imaginant son dialogue autour d'un seau mis en rotation, avec pour seule référence un espace absolu comme explication des forces « fictives » centrifuges car les parois du seau ne jouaient visiblement aucun rôle gravitationnel ou inertiel.

Concernant l'expérience de pensée de Mach sur un seau de Newton avec des parois très épaisses, la page Wikipédia sur « Le seau de Newton » indique : « Une expérience fut tentée, où on faisait tourner un énorme cylindre de béton, avec juste une petite cavité centrale emplie de mercure. On espérait voir un miroir concave se former. Mais l'effet prédit était si faible que l'expérience fut douteuse. »

Notre calcul nous permet de répondre à l'interrogation de Mach sur l'expérience qui consisterait à avoir un seau dont les parois auraient une épaisseur de 6000 kilomètres (à peu près le rayon de la Terre) : l'effet d'entraînement correspondrait à une correction d'environ un milliardième de la force centrifuge, ce qui est d'ailleurs la base de l'effet d'entraînement des référentiels sous l'effet de la rotation appelé « effet Lense-Thirring ». L'expérience historique utilisant un très gros cylindre de béton et du mercure était donc non seulement douteuse, mais fausse car l'effet attendu était ridiculement faible, et totalement inaccessible à la précision des mesures effectuées…

L'univers de Dirac-Milne

Pourquoi l'étude de l'univers de Dirac-Milne ?

À l'issue de ce livre, il m'a paru important de décrire le modèle d'univers de Dirac-Milne – j'expliquerai par la suite pour quelles raisons nous l'avons appelé ainsi – que j'ai étudié depuis 2006 avec mon étudiant Aurélien Benoit-Lévy. En effet, à mon sens comme dans l'esprit d'un nombre croissant de physiciens, le modèle standard cosmologique possède plusieurs aspects inélégants : il marche assez bien, mais est assez invraisemblable.

Il est important de préciser que le modèle d'univers que je vais présenter, s'il commence à être connu d'une partie de la communauté scientifique, est encore très loin d'être accepté comme une alternative au modèle standard cosmologique, le modèle Lambda-CDM, avec matière noire et énergie noire. Mais en dépit de ce caractère non standard, ou peut-être à cause de celui-ci, je voudrais l'utiliser afin d'illustrer la démarche scientifique qui a conduit à sa

construction, sous plusieurs de ses aspects : recensement des aspects qui ne sont pas satisfaisants dans le modèle standard, éléments de « beauté mathématique » qui amènent à construire une solution alternative, et surtout définition des tests expérimentaux qui vont permettre de conforter, ou au contraire d'invalider, la nouvelle théorie proposée.

Comme nous le verrons par la suite, la validité du modèle d'univers de Dirac-Milne pourra être testée dans ses aspects les plus cruciaux dans un proche avenir. Pour certains tests (âge, distance de luminosité, nucléosynthèse), nous verrons que le modèle bénéficie de prédictions qui semblent extrêmement proches des mesures actuelles. Mais le modèle d'univers de Dirac-Milne devrait être testé de façon plus dramatique dans les prochaines années, et peut-être dès la fin de l'année 2018, grâce aux expériences Gbar, ALPHA-g et AEgIS au CERN, qui luttent depuis plusieurs années afin de mesurer enfin la masse gravitationnelle de l'antimatière. Nous saurons alors si l'explication proposée d'un univers matière-antimatière, guidée par ses arguments d'élégance mathématique et physique, est bien confirmée par l'expérience.

Si c'est le cas, cela amènera très probablement à reconsidérer de façon fondamentale notre façon d'aborder plusieurs problèmes de la physique, comme la formation des structures, l'asymétrie matière-antimatière, ainsi que la composition de notre Univers, dont le modèle cosmologique standard nous dit qu'il comporte 96 % de matière noire et d'énergie noire. Curieusement, notre modèle pourrait permettre d'expliquer la théorie, jusqu'ici totalement

phénoménologique, de MOND de la gravité modifiée de Milgrom (rencontrée au chapitre consacré aux deux relativités d'Einstein), et de comprendre pourquoi on peut s'attendre à une modification de la loi de Newton aux très faibles accélérations.

Forces et faiblesses du modèle cosmologique standard

La Bible nous enseigne que Dieu construisit le monde en six jours, et se reposa le septième. Les physiciens sont moins efficaces et cherchent encore aujourd'hui, un siècle après la formulation de la théorie de la relativité générale, à préciser le modèle d'univers qui correspond au nôtre. Nous avons vu que peu après qu'Einstein eut formulé sa théorie Georges Lemaître et Karl Schwarzschild utilisèrent ses équations en les appliquant à un univers homogène et isotrope. Le travail de Lemaître montrait que l'Univers possédait presque nécessairement un caractère dynamique, ce qui permettait de parler d'un début de l'Univers sous forme d'un état de densité infinie, une création à partir de l'extrême, le Big Bang. Son travail fut systématisé par Alexandre Friedmann, Howard Robertson et Arthur Walker, qui classifièrent les univers dans les trois classes d'univers éternellement ouvert, critique à la frontière d'ouvert et de fermé lorsqu'il est au bord du ré-effondrement, et fermé lorsque l'attraction gravitationnelle vainc l'expansion et finit par engendrer un Big Crunch, renversé temporel du Big Bang.

Jusqu'à la fin des années 1990, l'immense majorité des physiciens estimait que la géométrie de notre Univers était représentée par un univers critique et il paraissait assez évident à tous que la constante cosmologique, ou énergie du vide, était nulle. Cette géométrie est dénommée l'univers d'Einstein-de Sitter, au bord de l'effondrement mais poursuivant néanmoins sans fin son expansion mourante. Si Einstein avait lui-même considéré brièvement l'introduction d'une constante cosmologique dans ses équations, afin de tenter de conserver un univers éternellement statique, il l'avait assez vite rejetée la considérant comme sa plus grande erreur.

Nous avons vu que la découverte que l'expansion de l'Univers n'était pas décélérée comme on le pensait, mais apparaît soumise à une force de gravité répulsive, constitua en 1998 une immense surprise – d'ailleurs accueillie initialement avec une relative incrédulité. Il fallut ainsi quelques années pour que les données s'accumulent et pour que les physiciens se rangent à l'idée qu'une gravité répulsive était bien à l'œuvre dans l'Univers. Mais quelle pouvait bien être alors l'origine et l'explication de cette gravité répulsive ? Dans leur tentative d'explication, les physiciens ont procédé par ajout d'un composant à leur théorie précédente. Partant du modèle antérieur de référence d'Einstein-de Sitter, dont la densité de matière devait être critique, il était devenu apparent, dès le début des années 1990, que la matière ordinaire ne pouvait être que très minoritaire : la nucléosynthèse primordiale indiquait que,

dans l'hypothèse d'un univers critique, la matière ne devait représenter qu'un peu plus de 4 % environ du contenu matériel de l'Univers. Ce simple fait imposait déjà l'existence d'une matière noire très majoritaire, bien que non observée malgré des efforts expérimentaux très importants, efforts auxquels j'ai d'ailleurs participé pendant près de vingt ans à travers la construction de l'expérience EDELWEISS de détection directe de la matière noire.

L'introduction d'une composante additionnelle d'énergie noire, très proche d'une constante cosmologique, afin d'expliquer l'expansion accélérée révélée par les observations de supernovæ lointaines, à des distances énormes de plusieurs milliards d'années-lumière, n'est malgré tout qu'une dénomination pour cacher notre ignorance de sa véritable nature. En rajoutant cette composante, et en tenant compte des incertitudes astrophysiques qui conduisent à l'introduction de plusieurs paramètres libres – actuellement au nombre de six pour les principaux paramètres –, ajustés aux données, notre modèle cosmologique standard ne prédit donc qu'une petite contribution de la matière ordinaire aux environs de 4 % de son contenu total, aux côtés des deux composants majoritaires que sont les 70 % d'énergie noire et environ 26 % de matière noire.

Le modèle cosmologique standard, dit « de concordance », possède pour principal avantage d'être en accord assez remarquable avec un large ensemble de tests expérimentaux. Il permet en particulier de retrouver un âge de l'Univers une fois et demie plus long que l'âge de l'univers d'Einstein-

de Sitter (critique mais sans énergie noire) qui, avec un âge de 9 milliards d'années seulement, était clairement trop jeune pour pouvoir accueillir les étoiles les plus âgées que l'on observe pourtant dans notre Galaxie. L'univers Lambda-CDM du modèle cosmologique standard, doté d'un âge d'environ 14 milliards d'années, est quant à lui assez vieux pour cela. Par ailleurs, l'affaiblissement de la luminosité en fonction de la distance des supernovæ de type 1a, utilisées comme des « chandelles standard » – c'est-à-dire de luminosité raisonnablement constante –, la production d'éléments légers dans l'univers primordial, et surtout les oscillations acoustiques – les sons – qui se propagent dans l'Univers jusqu'au moment où il devient transparent, observées à travers les fluctuations de température du fond diffus cosmologique, sont également très bien reproduits, ou plutôt ajustés, par les six paramètres libres de ce modèle.

À tout seigneur tout honneur, c'est au satellite européen *Planck* et à ses mesures remarquablement détaillées que l'on doit une large part des informations cosmologiques à notre disposition, et des valeurs des six paramètres que nous utiliserons par la suite, dont les trois paramètres définissant la composition de l'Univers[1] sont :

1. Les trois autres paramètres utilisés dans la paramétrisation cosmologique de *Planck* sont plus difficiles à appréhender. Il s'agit:
- du paramètre sigma-8 de l'intensité des fluctuations de structures à l'échelle de 8 Mpc ;
- du paramètre n_s qui décrit l'invariance d'échelle des fluctuations et qui est a priori proche de 1 ;
- du paramètre τ qui caractérise le taux de réionisation de l'Univers,

– la contribution de l'énergie noire Ω_Λ = un peu moins de 70 % du total, avec une précision annoncée de 1 % environ ;
– la densité de matière ordinaire (dite « baryonique ») Ω_b = environ 4 % de la densité totale, 0,42 x 10^{-24} grammes par mètre cube (ou 0,42 yoctogramme par mètre cube) ;
– la densité totale de matière Ω_m = 2,25 × 10^{-24} grammes par mètre cube (2,25 yoctogramme par mètre cube) ;
ce qui veut dire que, dans ce modèle, la matière noire contribue environ 5,4 fois plus à la densité que la matière ordinaire, et l'énergie noire environ dix-huit fois plus à notre époque.

La constante de Hubble (qui n'a en fait rien d'une constante car elle dépend de l'âge de l'Univers à laquelle on la mesure) est d'environ 68 km/s.[2]

Ce qui, dans le modèle standard de la cosmologie, fournit un âge d'environ 13,8 milliards d'années, âge qui n'est pas déterminé directement.

La grandeur qui est la plus étonnante dans le modèle standard, et qui constitue pour un nombre important de physiciens l'indication que la description dudit modèle n'est pas correcte, est la densité d'énergie noire, environ 3,3 GeV (giga-électron-volts) par mètre cube, soit l'énergie de masse de 5,8 x 10^{-24} grammes par mètre cube (5,8 yoctogramme

---

période postérieure à l'époque où il est devenu transparent, et où il redevient partiellement ionisé lorsque des premières étoiles massives commencent à se former en nombre suffisant.

2. Mais avec certaines tensions entre les différentes mesures de la valeur de cette grandeur dont la valeur moyenne au moment où j'écris ces lignes est : H_0 = 67,80 ± 0,9 km/sec/Mpc.

par mètre cube), environ deux fois et demie supérieure à la densité totale de matière aujourd'hui. Là où le bât blesse, c'est qu'une constante cosmologique est, comme son nom l'indique correctement cette fois, une constante, alors que la densité de matière et de rayonnement va croître de façon gigantesque (environ 10^{120}) quand on se rapproche du Big Bang, ce qui donne à l'énergie noire, le principal ingrédient aujourd'hui, un rôle absolument négligeable dans les moments initiaux de l'Univers, rôle insignifiant qui se poursuit pratiquement jusqu'à notre époque, où elle devient tout à coup dominante…

Dès le début des années 1990, Steven Weinberg attira l'attention des physiciens sur le problème de la constante cosmologique, que je reformule ainsi : si tous les termes de masse sont positifs, le temps caractéristique de durée de vie pour un univers au bord de l'effondrement est ridiculement petit, son unité de temps naturelle est le temps de Planck, soit le temps ridiculement faible de 10^{-44} seconde. Si on peut imaginer des constituants qui joueront le rôle de l'énergie noire, comme l'énergie du vide d'Einstein – et les théoriciens ne se sont pas privés d'écrire des centaines d'articles sur le sujet –, on n'a aucune idée aujourd'hui de la raison pour laquelle cette constante cosmologique, ou ses variantes que l'on dénomme « quintessence », auraient le bon goût de conduire à une phase d'accélération de l'expansion qui ne commence qu'une dizaine de milliards d'années après le Big Bang, un temps qui devient énorme, 10^{60}, quand on l'exprime en temps de Planck.

Notons par ailleurs, ce qui aura son importance dans la suite, que l'énergie noire, si jamais elle existe, correspond à une densité de masse effective négative[3]. Or c'est justement cette contribution négative qui entraîne l'accélération actuelle de l'expansion de l'Univers lorsque la densité (positive) de matière devient plus faible que celle de la densité d'énergie noire, ce qui est inévitable dans un univers critique. De ce fait, il peut être plus simple d'introduire directement des masses négatives, et nous verrons que, si cela constitue une modification drastique par rapport à ce que l'on considère comme autorisé dans la relativité générale dans son expression standard, la modification requise pour l'introduction de ces masses négatives peut sans doute préserver l'essentiel de l'esprit de la relativité générale et du principe d'équivalence, même s'il apparaît violé à première vue.

La principale force du modèle standard est donc qu'il permet de reproduire assez remarquablement un grand ensemble de données, même si l'on voit que l'on peut avoir de forts doutes sur la composition prédite pour l'Univers. Ainsi, s'il reste la solution de référence pour une majorité de physiciens, il apparaît peu vraisemblable dans sa composition, et présente par ailleurs quelques tensions avec les données, que je résume brièvement par la suite.

---

3. Du fait que cette densité effective pour une constante cosmologique est égale en relativité générale – il faut me croire sur parole, car c'est un résultat de relativité générale – à la grandeur : $\rho_\Lambda + 3P = -2\rho_\Lambda < 0$, en tenant compte du fait que $P = -\rho_\Lambda$ pour toute constante cosmologique.

Même si la composition du modèle standard cosmologique est assez invraisemblable, le défi est redoutable pour les bâtisseurs de modèles alternatifs : ils doivent en effet décrire l'ensemble des données cosmologiques, désormais mesurées avec une précision de l'ordre du pourcent, comme l'âge de l'Univers, les oscillations acoustiques de l'Univers primordial observées à partir du fond diffus cosmologique, la composition des éléments nucléaires légers ainsi que les structures à grande échelle observées à travers ce que l'on appelle les « oscillations acoustiques baryoniques », conséquence des barrissements de l'Univers primordial.

Rappelons par ailleurs un autre défi que tout modèle doit relever : dans l'univers d'Einstein-de Sitter, il était initialement impossible de comprendre pourquoi des régions à 180 degrés dans le ciel, très éloignées l'une de l'autre au sens causal, pouvaient être aussi semblables et pourquoi l'univers tel qu'il est vu par Planck est aussi homogène (à quelque cent-millièmes près). Pour résoudre ce problème, nous avons vu que le modèle standard incorpore la notion d'inflation, introduite par Guth et perfectionnée par Linde et Steinhard. Mais si elle résout bien le problème de l'horizon, la théorie de l'inflation est elle-même une théorie ad hoc, et nous n'avons aucune indication aujourd'hui que les théories des champs qui sont à l'œuvre au niveau microscopique permettent effectivement le développement réaliste d'un univers inflationnaire. Pour que la théorie d'inflation fonctionne, il faut en effet non seulement rentrer dans une phase d'inflation, ce qui n'est déjà pas évident – même si on

connaît le mécanisme générique d'entrée –, mais une fois cela réalisé, il faut aussi en sortir... Ce qui suppose l'existence d'un « plateau » très contraint qui permette à l'Univers d'exister dans un état métastable et de bénéficier d'une phase d'inflation pendant laquelle les distances entre deux points voisins croissent exponentiellement, mais surtout d'en sortir après une soixantaine[4] de temps caractéristiques d'inflation, qui correspondent au doublement de la distance entre points voisins, comme c'est le cas sur la surface d'un ballon que l'on gonfle. Trop peu de temps et l'Univers se rétractera sans avoir assez dilué l'énorme densité initiale, si bien qu'il se ré-effondrera en une fraction de seconde, sans différence notable avec une cosmologie sans inflation. Trop de temps, et l'Univers ne sort jamais de l'inflation, et l'expansion laissera derrière elle un univers pratiquement vide, où nous ne pouvons certainement pas exister non plus. Ainsi, si l'inflation est un ingrédient du modèle cosmologique standard qui permet dans une certaine mesure d'expliquer l'isotropie et l'homogénéité de notre Univers, nous ne disposons d'aucune indication sérieuse du fait que la physique des particules incorpore bien cette inflation. Là aussi, nous verrons que l'univers de Dirac-Milne propose une autre solution permettant de résoudre la question de l'homogénéité primordiale.

---

4. Une soixantaine est un nombre très approximatif, mais généralement considéré comme un bon ordre de grandeur du nombre de doublements de la distance entre deux points au cours de la phase d'inflation.

Comme je l'ai indiqué plus haut, le modèle cosmologique standard présente un certain nombre de problèmes que l'on peut considérer comme plus mineurs mais néanmoins bien réels, comme celui du nombre de satellites des galaxies. Par exemple, dans notre Voie lactée, les simulations numériques prévoient plusieurs dizaines de galaxies naines, alors que nous n'observons guère que quelques systèmes de ce type, dont les Petit et Grand Nuages de Magellan, à une distance d'environ cent cinquante mille années-lumière, et dont la capture par notre Voie lactée est sans doute assez récente.

Par ailleurs, les simulations prédisent une distribution de matière noire dans la galaxie très différente de celle qui est observée. Alors que les simulations prédisent des accumulations importantes au centre de la galaxie, avec des profils extrêmement marqués, pratiquement divergents, cette accumulation n'est pas observée, notamment dans notre Voie lactée que nous pouvons pourtant observer avec une grande précision, à travers les trajectoires des étoiles qui orbitent autour de notre trou noir galactique, Sagittarius A*.

Enfin, les mouvements des galaxies naines autour de la galaxie voisine Andromède sont beaucoup plus cohérents – orbitant notamment toutes dans un même plan –, que ce que prévoient les simulations, leurs mouvements appartenant à un même plan et étant fortement corrélés, une découverte effectuée en 2013 par Rodrigo Ibata, aidé par son fils de 15 ans, Neil. Ces corrélations inattendues semblent révéler une histoire très différente de celle que prédit a priori le modèle cosmologique standard…

Masse négative, pression négative et température négative étranges ; antimatière en relativité générale

Avant d'aborder l'étude de l'univers de Dirac-Milne proprement dit, revenons sur un aspect étonnant de l'histoire de la relativité générale. Lorsqu'au milieu des années 1980, je commençai à m'intéresser à la question de la violation du principe d'équivalence pour l'antimatière, les *energy conditions*, ou « conditions de positivité de l'énergie », qui stipulaient sous diverses formes qu'il était impossible physiquement qu'existent des situations où la densité d'énergie était négative, régnaient en maître. Presque tous les relativistes généraux hochaient la tête avec commisération si l'on osait invoquer des solutions de masse ou d'énergie négative. Les arguments invoqués étaient que si l'on violait la condition de positivité de l'énergie, des catastrophes d'instabilité s'ensuivraient.

Mais ces conditions de positivité d'énergie, et surtout les raisons qui semblaient les justifier, comme l'instabilité catastrophique associée, tombèrent les unes après les autres. Sans doute la première brèche importante dans ces théorèmes de positivité de l'énergie fut, au milieu des années 1960, l'étude des trous noirs en rotation, qui amena à rendre plus acceptable l'idée que les trous noirs puissent posséder une entropie et émettre un rayonnement émis depuis l'horizon des trous noirs, zone frontière où l'énergie de tout corps apparaît nulle pour un observateur extérieur, ce qui résulta des travaux de Jacob Bekenstein et Stephen Hawking.

Nous avons vu qu'avant cela, de façon indépendante, Roger Penrose, en Angleterre, et Yakov Zel'dovich, en Union soviétique, parvinrent au début des années 1970 à la conclusion qu'au voisinage d'un trou noir en rotation, il existe des régions où un objet – une particule par exemple –, apparaît comme ayant une énergie négative. À la différence des trous noirs à symétrie sphérique où de tels objets d'énergie négative sont cachés à jamais à la vue des observateurs extérieurs, il devenait possible à cet objet de ressortir du trou noir, à la condition expresse cependant qu'il sacrifie un objet qu'il envoie plus profondément encore dans le trou noir : à ce prix, il était possible qu'il quitte le statut d'objet d'énergie négative pour être à nouveau visible à l'extérieur du trou noir. C'est le mécanisme utilisé par exemple dans le film *Interstellar* où l'astronaute incarné par Matthew McConaughey se sacrifie afin de permettre à sa comparse Anne Hathaway d'échapper à la gravitation d'un gigantesque trou noir. Il était donc bien possible d'extraire de l'énergie des trous noirs en rotation en utilisant des états internes d'énergie négative, a priori sans catastrophe majeure d'instabilité.

À peu près à la même époque, nous avons vu que Brandon Carter avait pris conscience de l'étonnante similitude entre un trou noir chargé et en rotation et une particule élémentaire, chargée et dotée d'un spin – mouvement de rotation interne –, comme un électron. Ces solutions de trous noirs chargés en rotation, les solutions de Kerr-Newman, structures géométriques piégées dans

l'espace-temps, Carter les qualifia de « vortons », afin de rappeler que c'est une structure qui possède un moment cinétique – qui, dans le langage classique, tourne sur elle-même comme une toupie. Avec cinquante ans de recul, les vortons de Carter ressemblent furieusement à des trous de ver microscopiques entre deux espace-temps dont la propriété est d'être conjugués l'un vis-à-vis de l'autre du point de vue de la transformation matière-antimatière : toute particule de matière dans l'un des espaces est associée à une particule d'antimatière dans le deuxième espace. Ces deux espaces ne sont reliés l'un à l'autre qu'à travers les trous de ver des particules et nous n'avons de ce fait que très peu accès à ce deuxième univers[5].

La notion de masse négative peut sembler bizarre, voire paradoxale, mais on en connaît des exemples en physique des solides (pour en savoir plus rendez-vous à la fin de ce chapitre – I). De manière assez étonnante, la masse effective de l'électron peut en effet devenir négative quand les états quantiques du solide, qui se regroupent très généralement avec une structure de bandes, dans le cas où l'équation qui relie énergie à longueur d'onde – appelée équation de dispersion – présente certaines propriétés de courbure. De tels électrons ont alors un comportement inattendu en

5. Il faut noter que Jean-Pierre Petit, reprenant les idées du physicien et Prix Nobel de la paix Andreï Sakharov, a lui aussi eu l'idée de deux univers couplés, mais avec une matière gémellaire de masse négative qu'il considère comme étant a priori indépendante de l'antimatière, ce qui semble une idée assez étrange.

réponse aux forces électriques et magnétiques du fait qu'ils sont accélérés en sens opposé de ce que l'on attendrait d'un électron dans le vide ! De ce fait, ils se déplacent sur des trajectoires qui correspondent à des particules de charge et de masse inertielle positives (au lieu d'une charge négative et d'une masse inertielle positive pour un électron). Ces particules se comportent donc comme des « trous » – des défauts d'électrons –, avec une charge opposée à celle de l'électron tout en conservant une masse inertielle positive[6]. Or les trous « antigravitent » dans un champ de gravitation [7] et constituent donc un excellent exemple de système physique ayant les propriétés que nous recherchons pour l'antimatière : masse inertielle positive, charge opposée à la particule correspondante de matière, masse gravitationnelle négative. Avec ce comportement d'antigravitation, qui existe donc dans un système physique connu, matière et antimatière peuvent échapper à l'annihilation dans l'univers transparent qui est le nôtre et la plus forte contrainte à l'encontre d'un monde avec autant de matière que d'antimatière disparaît.

L'origine d'un univers peuplé des particules trous de ver de Carter peut être comprise de la façon suivante : plus la densité des particules est élevée et plus les particules sont

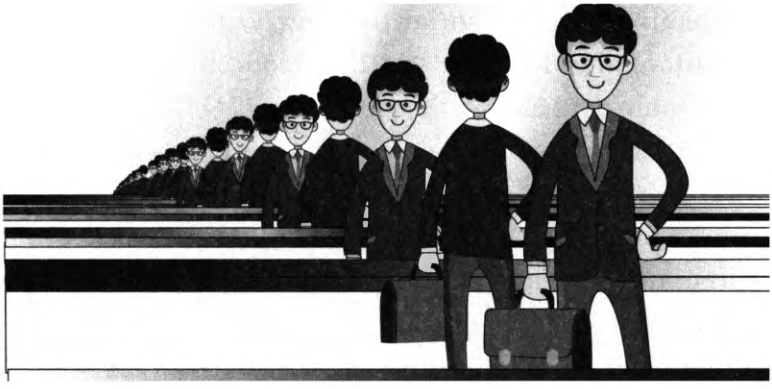
---

6. On les appelle d'ailleurs « trous de la bande de valence » dans la physique des semi-conducteurs.

7. À ma connaissance, ce phénomène d'antigravitation des « trous » n'a jamais été démontré expérimentalement, même s'il a été prédit, par exemple dans :
I.M. Tsidil'kovski˘i, « Electrons and holes in an inertial-force field », *Soviet Physics Uspekhi*, 18, 161 (1975).

proches l'une de l'autre. La taille de l'anneau-particule, proportionnelle à l'inverse de sa masse, est évidemment un paramètre essentiel dans la détermination de ce qui constitue la densité maximale envisageable associée aux instants initiaux de l'Univers. Mais l'idée nouvelle et essentielle est que plus les particules sont proches, plus elles se voient entre elles de multiples fois, de façon assez similaire à un individu qui se trouve au centre d'une salle dont les murs sont tapissés de miroirs (ci-dessous). La limite de densité maximale est la situation où une seule particule crée en quelque sorte l'univers entier en se voyant elle-même un nombre infini de fois, en alternant la particule et son renversé dans le miroir – en une symétrie parfaite et ordonnée matière-antimatière.

Une idée partiellement similaire avait été introduite en électrodynamique quantique par John Wheeler, qui considérait que les allers-retours dans l'espace-temps d'un seul électron pouvaient constituer l'ensemble des électrons



et positrons de tout l'univers. L'objection que lui avait presque immédiatement opposée Richard Feynman, alors thésard de Wheeler, avait été : « Mais professeur Wheeler, dans ce cas, où sont tous les positrons qui sont, dans votre modèle, en nombre égal aux électrons ? » Dans le récit qu'en fit Feynman, Wheeler resta un peu interloqué par la question et suggéra : « Peut-être sont-ils cachés dans les protons ? »

En un sens très profond, on peut dire que l'univers que j'ai décrit brièvement naît effectivement de « rien », ou plus exactement d'une seule particule en ordre parfait face à de multiples copies et miroirs d'elle-même.

Ceci permet par ailleurs de mentionner un aspect important qui permet de comprendre comment un univers comme l'univers de Dirac-Milne peut émerger à température essentiellement infinie et malgré tout avec un ordre parfait. La cosmologie standard fait en effet intervenir pour les particules au voisinage du temps de Planck, alors que l'Univers n'est âgé que d'environ 10^{-44} seconde, une température de l'ordre de 10^{19} GeV, correspondant à une température d'environ 10^{32} degrés, avec un désordre important dès le début de l'Univers en raison de la température très élevée.

La thermodynamique nous enseigne cependant que la température la plus élevée n'est pas l'infini positif, comme on pourrait naïvement le croire, mais que toute température négative est supérieure à une température positive quelconque, et en particulier à une température infinie positive ! Cette propriété surprenante est due au

fait que si l'on souhaite classer les températures de la plus chaude à la plus froide, on effectue la comparaison via l'inverse de la température. Quand on compare deux températures positives, cela ne change rien à la définition habituelle de qui est le plus chaud ou le plus froid, mais ce n'est plus le cas quand on inclut dans la comparaison au moins une température négative. Cela veut dire aussi que la température la plus élevée possible est la température infiniment proche du zéro absolu, mais par valeur négative, noté 0-, car son inverse est moins l'infini, pour lequel il n'existe pas de valeur inférieure ! Il serait incorrect de parler de démonstration, mais l'introduction d'un ordre parfait « cristallin » d'une particule en miroir infini avec elle-même permet de comprendre comment l'Univers peut à la fois démarrer dans une phase infiniment chaude – la température 0- dont nous avons parlé plus haut –, infiniment instable et malgré tout parfaitement ordonnée, l'ordre étant associé à la température nulle, ce que ne permet pas le modèle standard.

Historiquement, après les travaux de Carter sur les trous de ver particules, qui culminèrent à la fin des années 1960, il fallut attendre une vingtaine d'années pour que reprennent les coups de boutoir qui allaient définitivement mettre à bas les théorèmes de positivité de l'énergie. Matt Visser, aujourd'hui à l'université de Wellington (Nouvelle-Zélande) fut ainsi l'un des acteurs majeurs qui démontrèrent que des contre-exemples existaient à pratiquement toutes les expressions des théorèmes qui affirmaient la positivité de l'énergie, sous des formes plus ou moins contraignantes.

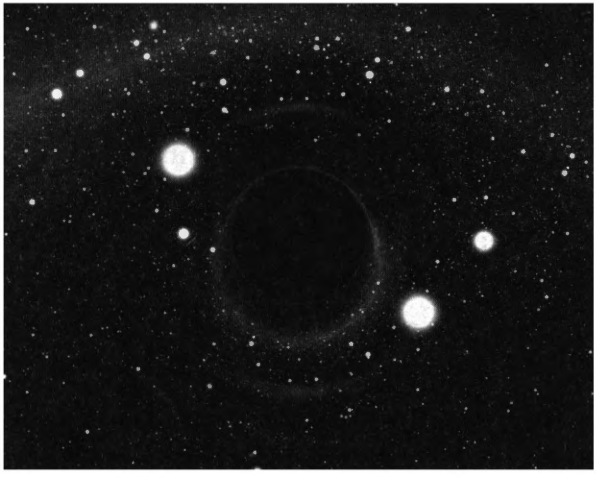
En complément du travail critique majeur qu'effectua Matt Visser, deux gros clous vinrent achever de refermer le cercueil des *energy conditions* et de l'impossibilité supposée de la gravité répulsive. Il s'agit d'une part de la découverte expérimentale en 1998 de l'énergie noire, semblant accélérer l'expansion de l'Univers. Violant plusieurs des credos des théorèmes de positivité de l'énergie, cette énergie noire constitue dans le modèle cosmologique standard la composante majoritaire de notre Univers, qu'il fallut donc accepter comme possible. Très proche de la constante cosmologique qu'Einstein appelait de ses vœux, l'énergie noire semble correspondre à une constante cosmologique positive, associée à une pression négative qui mène à un terme répulsif[8].

D'autre part, les physiciens mathématiciens Saoussen Mbarek et Manu Paranjape démontrèrent en 2014 qu'une solution de masse négative, si elle n'existe peut-être pas dans un univers de Minkowski (espace-temps plat), peut en revanche exister sans catastrophe dans un espace d'Einstein-de Sitter, c'est-à-dire un univers très proche du nôtre, qu'il est par ailleurs difficile de distinguer d'un univers de Minkowski sans parcourir quelques centaines de millions d'années-lumière. L'ensemble de ces résultats montre que si les solutions de masse négative sont probablement instables, leur instabilité, de toute façon inhérente à la gravitation, n'est pas nécessairement catastrophique ni violente.

---

8. Nous avons vu que c'est en effet la densité d'énergie additionnée de trois fois la pression : $\rho_\Lambda + 3\,P$, un terme négatif lorsque $P = -\rho_\Lambda$, qui intervient comme terme de source de « masse effective » dans ces équations.

Un autre élément très important fut apporté par l'analyse de Kip Thorne et de ses collaborateurs, dont le physicien russe Igor Novikov, des trous de vers et autres machines à voyager dans le temps et dans l'espace. Initiée à la fin des années 1980 par un article à vocation éducative dans *American Journal of Physics* et développée théoriquement plus en détail au début des années 1990, l'étude fut, nous l'avons vu, motivée par une discussion de Kip Thorne avec Carl Sagan, physicien et scénariste du film de science-fiction *Contact*, qui lui avait demandé dans quelle mesure la physique autorisait de construire des « portes » permettant de voyager rapidement dans l'espace-temps (comme le permet le trou de ver représenté dans le film *Interstellar*, voir la figure ci-dessous). Le groupe de Thorne étudia les conditions imposées par la relativité générale



© Riazuelo, CNRS/IAP

pour la construction de trous de ver, permettant d'aller instantanément – pour l'observateur qui les traverse – d'un point à un autre. La conclusion principale de leur étude fut que, pour construire une telle machine hypothétique, il faut nécessairement utiliser une matière « exotique » en ce sens qu'elle viole les conditions de positivité de l'énergie.

Soyons clair sur le fait que le physicien ne croit généralement pas que de telles portes existent car elles sont très vraisemblablement instables. Ceci dit, Thorne et ses collaborateurs ne trouvèrent rien qui interdisait en principe, en dehors de son instabilité, la construction de telles portes. Si des portes macroscopiques, suffisamment larges pour laisser le passage à une navette spatiale comme dans *Interstellar*, sont très probablement impossibles à construire, peut-être existent-elles au niveau microscopique ? Rappelez-vous les solutions de Kerr-Newman étudiées par Carter (je vous renvoie au chapitre consacré aux trous noirs), qui peuvent représenter des particules élémentaires comme un électron, ou plutôt ce qui ressemble furieusement à un couple électron-positron, la bouche entrante du trou de ver étant de masse positive, la bouche sortante de masse et de charge opposées.

Or, l'antimatière n'apparaît-elle pas dans la théorie, comme l'avaient d'ailleurs noté Dirac et Wheeler, comme étant d'énergie négative et ne remonte-t-elle pas en arrière dans le temps ? Cette matière exotique, nécessaire à la construction des trous de ver, qui viole la positivité de l'énergie et qui permet de voyager plus vite que la vitesse

de la lumière – et donc de remonter dans le temps – l'évoque donc fortement, et il est curieux que cette hypothèse n'ait jamais été sérieusement étudiée.

Au passage, le travail de Thorne et de son groupe permet de tordre le cou à l'idée que le retour en arrière dans le temps induisait nécessairement des paradoxes, comme le fameux paradoxe du grand-père : un voyageur dans le temps remonte dans son passé et tue son grand-père, mais de ce fait ne peut pas ensuite naître, et donc pas non plus assassiner son grand-père… Ce « paradoxe » bien connu et popularisé dans de nombreux films de science-fiction a été mis sous une forme plus contrôlable par le physicien Joseph Polchinski dans un scénario impliquant des boules de billard, plus prédictibles dans leur comportement qu'un grand-père (*cf.* le chapitre « Trous de ver et machines à voyager dans le temps »)…

Le lecteur souhaitant étudier en détail la solution que fournit Thorne au paradoxe apparent de Polchinski pourra se référer à son ouvrage cité en référence. Le cœur de leur démonstration tient dans le fait qu'ils acceptent pleinement l'idée qu'une particule puisse se choquer elle-même (à un autre moment de son existence), sans aucun paradoxe.

Cette multiplication des particules sous l'action du champ gravitationnel d'un trou de ver évoque ce qui a initialement été considéré en électromagnétisme comme un autre paradoxe, le paradoxe de Klein, dans l'étude des phénomènes de polarisation du vide en présence de champs électriques très intenses. Et comme dans le cas de

l'électromagnétisme, les trous de ver ne conduisent jamais à des impossibilités ou à des paradoxes, mais au contraire à une multiplicité de solutions compatibles avec les mêmes conditions initiales (ce qui est très inattendu dans une description classique) et dont le caractère aléatoire – on ne sait pas à l'avance de quelle manière la boule de billard va se choquer avec elle-même – ressemble très fortement au caractère aléatoire de la mécanique quantique.

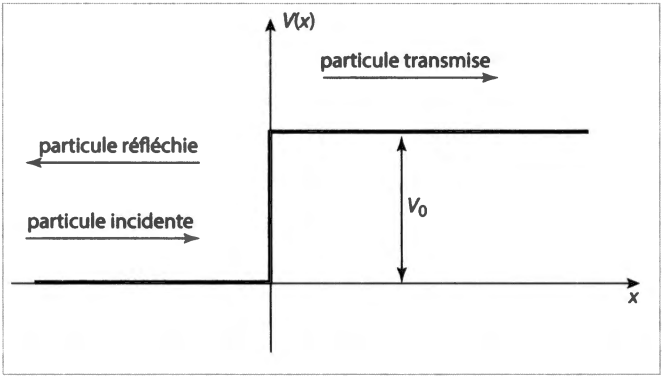
Du fait de sa proximité avec le paradoxe de Polchinski, et en raison de son lien indiscutable avec l'antimatière, je discute dans la suite le paradoxe de Klein, qu'il peut être utile d'étudier pour les pistes qu'il nous fournit sur la notion d'antimatière et d'énergie négative en relativité générale.

Le paradoxe de Klein

Comme je l'ai indiqué, en dépit de son nom, le paradoxe de Klein n'est pas du tout paradoxal et est au contraire aujourd'hui bien compris. Cependant, le résultat qui sortait des équations était initialement tellement surprenant, semblant violer les règles les plus profondes de la physique, qu'on l'a d'abord traité de paradoxe et l'appellation est restée. Aujourd'hui, ce « paradoxe » permet au contraire de mieux comprendre la notion d'antimatière, son lien avec des états d'énergie négative et ce que l'on appelle l'« unitarité », c'est-à-dire la règle qui indique que la somme des probabilités qui doit être égale à 1 reste vérifiée au cours des processus de diffusion – c'est-à-dire de transmission et de réflexion – d'une particule lorsqu'elle tombe sur une

barrière de potentiel. La solution du paradoxe de Klein constitue par ailleurs une confirmation que les théorèmes de positivité de l'énergie étaient trop forts dans leur expression, et surtout faux.

Pour mettre en scène le « paradoxe » de Klein, prenons un simple électron. Dans le vide, loin de tout champ, sa masse est d'environ 511 000 électron-volts (nous utilisons l'équivalence masse-énergie d'Einstein, et sa relation célèbre, que nous avons déjà citée, $E = mc^2$). Essayons de confiner l'électron grâce à un champ électrique, dans ce que l'on appelle un



Une barrière de potentiel est-elle d'autant plus étanche et efficace à confiner les particules qu'elle est élevée ? Une réponse positive semble évidente. Mais elle est fausse dans le cas de la mécanique quantique relativiste car lorsque la hauteur V_0 de la barrière dépasse deux fois l'énergie de masse de la particule que l'on essaye de confiner, un flux de particules apparaît dans la zone sensée être interdite, et cela même si la particule incidente a une énergie cinétique nulle. Ce « paradoxe » a une explication simple : il est avantageux d'extraire une paire particule-antiparticule de cette marche très haute de potentiel dès lors qu'elle dépasse deux fois l'énergie de masse, ce qui constitue la résolution du « paradoxe » de Klein.

« puits de potentiel », rectangulaire et de profondeur ajustable (figure), que l'on prend initialement égale à V_0 = 100 000 électron-volts. Quand on abaisse doucement l'électron dans le puits de potentiel de cette profondeur, on peut récupérer du travail de l'électron « descendant » la colline de potentiel, une énergie égale à 100 000 électron-volts (la profondeur du puits). On peut considérer, même si c'est un abus de langage, que, d'une certaine façon, l'électron n'a alors plus que la masse 411 000 électron-volts, qui traduit la diminution de la masse vue de l'extérieur du puits[9].

Mais que se passe-t-il maintenant si le puits de potentiel atteint une profondeur supérieure à 511 000 volts, mettons 600 000 volts ? Car alors l'électron, vu de l'extérieur, n'a plus qu'une masse *négative* de 89 000 électron-volts environ... Eh bien, il ne se passe rien.

Peut-on continuer indéfiniment à rendre l'électron captif d'énergie aussi négative que l'on veut ? Une chose étonnante se produit si on cherche à confiner encore plus l'électron, dans un puits de potentiel dont la profondeur dépasse *deux fois* 511 000 volts, soit un peu plus d'un mégavolt. Car alors, si on place un seul électron dans le piège, un plus grand nombre de particules en émerge. Comment cela est-il possible ? Au-delà des équations de mécanique quantique relativiste que nous ne chercherons pas à résoudre ici, mais dont le lecteur intéressé pourra suivre la démonstration dans les références données

9. Phénomène que l'on retrouve également dans la masse des noyaux atomiques, qui est inférieure à la somme des masses de leurs constituants protons et neutrons libres.

en fin d'ouvrage, lorsque la profondeur du puits censé confiner l'électron dépasse deux fois la masse de l'électron, on se retrouve bien avec plus de particules que ce qu'on a mis au départ. C'est simplement que si l'on cherche à rendre trop négative l'énergie d'un électron le «vide» va produire spontanément une paire électron-positron, le positron étant violemment repoussé par ce qui constitue pour lui une montagne répulsive (et non un puits attracteur), très haute de potentiel – l'électron supplémentaire étant quant à lui précipité dans le puits et venant diminuer l'état de charge du puits[10].

Le paradoxe de Klein avait surpris les physiciens : une seule particule dans un puits de potentiel menait à plusieurs particules, une violation apparente de l'unitarité, ou conservation des probabilités, à laquelle tiennent très fort les physiciens. Mais quand on prend en compte les flux de probabilité opposés pour matière et antimatière – où l'on retrouve là l'antimatière en tant que matière qui remonte le temps, avec un flux qui va changer de signe quand on regarde le mouvement dans la même direction temporelle –, la violation disparaît et on retrouve un bon suivi des flux de particules (et d'antiparticules). La même violation apparente d'unitarité dans le problème des trous de ver, où une particule peut se heurter elle-même en de multiples instances, conduisant de façon effective à la création de particules, évoquait déjà l'antimatière et les paires particules-antiparticules qui peuvent être créées par le trou de ver.

---

10. Dans la réalité, le phénomène de création de paires se poursuit tant que l'accumulation d'électrons dans le piège n'a pas abaissé la profondeur de potentiel en dessous de deux fois 511 000 volts, soit 1,022 mégavolts.

Antimatière, masses négatives et principe d'équivalence

Certaines expressions du principe d'équivalence sont clairement incompatibles avec l'antigravité qui est présente dans l'univers de Dirac-Milne. Ainsi, si on exprime le principe d'équivalence sous la forme : « Tous les corps et toutes les particules ont la même trajectoire dans un champ de gravitation », clairement matière et antimatière doivent suivre les mêmes trajectoires et l'antigravité, c'est-à-dire des trajectoires différentes pour matière et antimatière, quel que soit son sens technique précis, est impossible.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre sur « L'histoire de la gravitation » qui décrivait les expériences d'Eötvös et les expériences qui ont suivi, et notamment les expériences du groupe Eöt-Wash et du satellite *Microscope*, d'une précision extraordinaire, les contraintes expérimentales sont extrêmement fortes sur le respect du principe d'équivalence par la matière ordinaire : en effet, quelle que soit la composition atomique des corps de matière utilisés pour le tester (*i.e.* quels que soient les noyaux et les éléments composant le matériau testé), les trajectoires sont les mêmes, à une excellente précision en tout cas, alors qu'on pourrait s'attendre à ce que le « contenu d'antimatière » soit différent selon le numéro atomique de corps étudié, en raison des effets de polarisation du vide[11].

11. Naïvement, après l'étude du paradoxe de Klein, on s'attend à ce que le contenu d'antimatière – quel que soit le sens que l'on peut donner à cette phrase – soit assez différent entre un élément léger comme le carbone ou le béryllium et pour des matériaux lourds comme l'uranium – où ce contenu serait plus fort. Notons cependant que personne n'a réussi

Nous avons vu que la géométrie de Kerr-Newman étudiée par Carter apparaît non pas comme une particule unique, mais comme une sorte de paire électron-positron, masse positive-masse négative, avec également renversement de la charge – lien avec l'antimatière que n'avait en revanche pas noté Brandon Carter. Dans ces solutions, ces masses négatives, présentes en relativité générale, repoussent gravitationnellement tous les objets. Mais si on met une telle masse négative dans le champ de gravitation terrestre elle va tomber exactement à la même vitesse qu'une particule de masse positive – du moins si sa masse est négligeable devant celle de la Terre. Il semble donc y avoir une différence forte de comportement entre les antiparticules que nous considérons, et dont nous voulons qu'elles soient repoussées par la Terre, et les particules de masse négative de la relativité générale. En apparence seulement, car le comportement de ces masses négatives devient très différent dès lors qu'elles ne sont plus seules dans un vide idéalisé mais liées à d'autres objets...

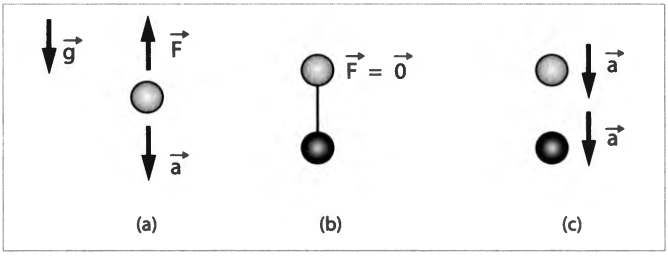
Reprenons l'analyse du physicien Richard Price et relions entre elles une masse positive et une masse négative, égales en valeur absolue. Comme les deux tombent de la même façon dans le champ de gravitation de la Terre, on peut se dire qu'évidemment les deux liées ensemble vont aussi tomber avec exactement la même vitesse... Si cela semble évident, c'est néanmoins totalement faux ! En effet,

---

de manière convaincante à quantifier ce que l'on appelle le « contenu d'antimatière » d'un bloc de matière.

si les deux particules sont liées, un bilan simple des forces s'exerçant sur le système montre que l'ensemble des deux particules lévite, la particule de masse négative restant légèrement au-dessus de la particule de masse positive en l'empêchant de tomber. Mais si on coupe la liaison entre les particules les deux particules tombent à nouveau (figure) !

Les prédictions de la relativité générale en ce qui concerne les masses négatives sont donc hautement non intuitives. Mais si nous prenons en compte le fait que les masses



Cette figure illustre le comportement très surprenant des masses négatives en relativité générale. Il est en effet possible de définir en relativité générale des masses négatives qui respectent le principe d'équivalence, les masses dites « de Bondi », du nom du physicien Hermann Bondi qui les a étudiées. (a) Placée dans le champ de gravitation terrestre, la force de gravitation sur une masse négative $-m$ (où m est positive) s'exerce vers le haut mais celle-ci accélère vers le bas car sa masse (inertielle comme gravitationnelle) est négative. (b) Que se passe-t-il maintenant si on lie, par exemple par une interaction électrostatique, une masse $-m$ et une masse m, égales et opposées ? La relativité générale nous indique que ce système *lévite* (milieu de la figure), c'est-à-dire reste stationnaire dans un champ quelconque de gravitation, la masse négative tirant vers le haut la masse positive et flottant de ce fait légèrement au-dessus de la masse positive (ce qui veut dire que le système est polarisé gravitationnellement). (c) Mais si l'on parvient à « couper la ficelle » qui relie les deux particules, elles tombent à nouveau (partie gauche de la figure) !

positives et négatives de la relativité générale ne constituent pas les réels objets physiques, mais n'existent que comme des particules virtuelles dans le vide – avec une symétrie entre les termes d'énergie positive et d'énergie négative, d'ailleurs également présente dans la supersymétrie –, on peut prévoir que va se produire une polarisation du vide entre ces masses positives et négatives, selon le schéma représenté par Price. Par ailleurs, en champ fort, au voisinage de l'horizon d'un trou noir par exemple, la polarisation du vide pourrait même aboutir à la création de paires particules-antiparticules, et en premier lieu de paires électron-positron, ces particules étant les moins massives et coûteuses à produire.

Survient alors un lien étonnant et initialement totalement inattendu avec la théorie de MOND de la gravité modifiée de Milgrom. En effet, le physicien Luc Blanchet et son étudiant Alexandre Le Tiec, de l'Institut d'astrophysique de Paris, ont noté que la théorie de MOND modifiait la théorie de Newton selon une forme qui s'apparente à la modification qui se produit dans les équations de Maxwell en présence d'effets de polarisation dans la matière[12]. Cette explication aurait l'immense avantage d'expliquer la raison pour laquelle les courbes de rotation de la Galaxie semblent indiquer de grandes quantités de matière noire qui échappent jusqu'ici totalement à la détection. Selon

12. Luc Blanchet a estimé que la densité des dipôles gravitationnels (par analogie avec les dipôles électriques) permettant d'expliquer MOND est énorme – 10^{42} dipôles environ par mètre cube – ce qui, de façon remarquable, correspond à la densité de quarks et leptons légers dans le milieu « vide » de l'électrodynamique quantique.

cette explication, la matière noire galactique n'existerait pas : sa présence apparente serait due à la modification de la loi de gravitation aux faibles accélérations en raison de la structure – gravitationnellement mais non électriquement – dipolaire du vide. Car alors qu'une charge électrique voit sa charge effective écrantée et *diminuée* par les charges dipolaires environnantes, le champ gravitationnel va au contraire être *amplifié* par une telle polarisation du vide[13].

Cette propriété est importante car l'univers de Dirac-Milne ne comporte ni matière noire ni énergie noire. Mais le vide « di-gravitationnel » qui est sa caractéristique – avec autant de masses positives que de masses négatives – pourrait permettre de justifier la modification des lois de Newton qui expliquerait, sans aucune matière noire, les courbes de rotation des galaxies.

Pour le lecteur qui douterait que le « vide » soit un milieu matériel avec une structure matière-antimatière cachée, notons que les lasers qui seront mis en œuvre dans deux ou trois générations d'expériences devraient finalement parvenir à faire « claquer » le vide, c'est-à-dire à produire des paires électron-positron sans aucun milieu matériel autour,

13. La théorie phénoménologique de MOND pourrait donc trouver une explication fondamentale : si le vide est composé de particules autant de masses positives que de masses négatives, leur polarisation, prédite par la relativité générale, modifie la gravité de Newton aux très faibles accélérations. Pas besoin donc d'invoquer une modification de la relativité générale : le seul élément nécessaire est la présence, dans le vide quantique, d'éléments de masse négative autant que positive, et la polarisation s'effectue naturellement, comme le montre l'analyse de Price.

à partir du seul « vide ». Mais le champ électrique à partir duquel ce phénomène se produit (de l'ordre du mégavolt sur une distance de quelques longueurs d'onde de Compton de l'électron, soit des champs électriques de l'ordre de 10^{18} volt par mètre) est encore supérieur de plusieurs ordres de grandeur à ceux atteints par les plus puissants lasers actuels.

Masses négatives dans les simulations de structures cosmologiques

En fait, de façon assez semblable à M. Jourdain qui usait de la prose sans en prendre conscience, les physiciens simulant la formation des structures cosmologiques utilisent eux aussi journellement, le plus souvent sans en prendre conscience, les masses et les densités négatives. Une des techniques couramment employées dans les simulations consiste en effet à commencer par calculer la densité moyenne de l'Univers sur l'ensemble de l'espace, puis à considérer ensuite les variations locales, positives autant que négatives, par rapport à cette densité moyenne. La connaissance de la densité moyenne permet de calculer l'évolution de l'expansion globale de l'Univers, ce que l'on appelle le « facteur d'échelle ». Une fois soustraite la densité moyenne qui, intégrée sur le volume, fournit la masse totale, il y a par construction autant de masses négatives que de masses positives, la somme des masses après soustraction de la densité moyenne étant devenue nulle. Si l'on raisonne uniquement en termes de masses positives, comme on le fait habituellement, les zones de sous-densité les plus fortes

se dépeuplent en s'étendant, mais de façon d'autant plus lente que l'on est au voisinage d'un minimum de densité : les grands vides se dépeuplent mais très lentement. Par contre, les zones de surdensité les plus fortes s'effondrent de façon violente et concentrent la matière dans de petits volumes, comme les galaxies qui ont à notre époque une densité environ un million de fois plus forte que la densité moyenne de l'Univers. Si l'on décrit maintenant les choses en utilisant des masses positives pour décrire le processus de rassemblement dans les zones de surdensité et des masses négatives pour décrire le processus d'étalement dans les zones de sous-densité, comme le font les simulateurs de structures, les masses positives ont bien le comportement habituel, mais dans notre nouvelle perspective les masses négatives, qui, pour reproduire le même flux de masse qu'avec des masses positives doivent suivre un mouvement opposé, refusent de se concentrer et essayent au contraire d'occuper le maximum d'espace dans les zones de faible densité, appelés usuellement « vides ».

Les premiers physiciens à avoir renversé le point de vue habituel et à avoir considéré l'évolution de masses négatives qui repoussent leur environnement, ce qui constitue une répulsion gravitationnelle effective exercée par les zones de sous-densité, en parallèle du comportement habituel de masses positives qui s'effondrent avec une concentration de plus en plus grande, furent les physiciens Tsvi Piran, alors à l'université hébraïque de Jérusalem, et John Dubinski, alors à l'institut Smithsonian de Harvard. Piran et Dubinski

furent les premiers à formuler ce que l'on peut considérer comme les principes d'évolution des masses négatives dans les structures, qui s'étendent jusqu'à occuper quasiment tout l'espace, par opposition à la description habituelle de masses positives se concentrant dans une toute petite fraction du volume – ainsi, comme on l'a indiqué plus haut, la densité d'une galaxie est-elle aujourd'hui, quatorze milliards d'années après le Big Bang, environ un million de fois plus forte que la densité moyenne de l'Univers, essentiellement constitué de zones pratiquement vides, ou dans le modèle que nous allons décrire, occupées par des nuages d'antimatière froide et de très faible densité.

Arguments d'impossibilité contre les cosmologies matière-antimatière

L'univers que nous allons décrire est un univers qui comporte autant de matière que d'antimatière. À plusieurs reprises, dans les années 1960, puis à la fin des années 1980 et au début des années 1990, des équipes se sont attachées à essayer de comprendre si un univers comportant autant de matière que d'antimatière constituait une alternative viable ou était au contraire contredit par les observations.

Dans les années 1960, le groupe dirigé par le professeur Roland Omnès, de l'université d'Orsay, s'attaqua à ce problème en supposant qu'au moment de la transition QGP (quark-gluon plasma), aux alentours d'une température de 2000 milliards de degrés, se formait une émulsion matière-antimatière. La conclusion de leur étude, après plusieurs

années d'efforts, fut que l'Univers primordial, au moins dans son scénario standard, ne laisse pas assez de temps à un univers matière-antimatière pour mettre en place des structures assez étendues qui résistent ensuite à l'annihilation. Par ailleurs, si matière et antimatière possèdent des masses gravitationnelles toutes deux positives et respectent le principe d'équivalence, l'annihilation matière-antimatière continue à se produire après que l'Univers est devenu transparent, conduisant à un fond diffus gamma de haute énergie qu'il était déjà difficile de justifier aux début des années 1970, alors que pour la première fois le satellite américain *SAS-2* tentait de le mettre en évidence. À l'époque où le groupe de Roland Omnès achevait son étude, le rayonnement gamma conséquence des modèles matière-antimatière n'était clairement pas observé par *SAS-2*, et encore moins aujourd'hui par les satellites actuels, beaucoup plus sensibles, de détection du rayonnement gamma (comme le satellite international *Fermi*).

À la fin des années 1980 et au début des années 1990, les physiciens Sheldon Glashow, Andrew Cohen et Álvaro de Rujula reprirent l'étude du groupe de Roland Omnès et se focalisèrent sur les périodes postérieures à la transition au cours de laquelle l'Univers cesse d'être une étoile – au sens où la matière a jusque-là l'état d'un plasma qui, avec ses électrons libres, ne permet pas à la lumière de se propager sans diffusions multiples – pour devenir transparent – soit à un âge de 380 000 ans environ après le Big Bang dans la cosmologie standard. Ils conclurent à nouveau que si l'Univers primordial était parvenu à créer dans ses moments primordiaux un

monde symétrique entre matière et antimatière, la diffusion de la matière et de l'antimatière aux frontières des domaines de l'un et de l'autre conduirait, dès que l'Univers devient transparent, à une telle annihilation entre matière et antimatière que ce scénario serait en forte contradiction avec la rareté du rayonnement gamma dans notre Univers. La seule échappatoire consisterait à supposer que les domaines de matière et d'antimatière s'étendent individuellement sur des distances supérieures à plusieurs milliards d'années-lumière, ce qu'il ne semble pas possible d'expliquer avec les lois de la physique que nous connaissons, et qui repousse par ailleurs le problème de l'existence de domaines d'antimatière aux limites de notre Univers observable.

Une importante activité scientifique se mit en place également à partir du milieu des années 1980, après la suggestion par Edward Witten qu'une transition de phase du premier ordre – similaire à la transition entre gaz et liquide –, au moment où quarks et antiquarks cessent d'exister comme dans une «soupe» indifférenciée, pouvait mener à des poches d'antimatière au milieu de la matière. La phase initiale de l'Univers dont nous savons qu'elle est nécessairement presque exactement symétrique entre matière et antimatière cesse en effet lorsque la température tombe en dessous d'environ 170 méga-électron-volts, qui correspond à la température assez fantastique de 2000 milliards de degrés que nous évoquions plus haut, moment auquel les quarks et antiquarks, en se refroidissant dans un Univers en expansion, ne sont tout d'un coup plus assez nombreux pour occuper

tout l'espace qui leur est offert et doivent alors s'assembler en protons, neutrons – assemblages de trois quarks –, antiprotons et antineutrons – assemblages de trois antiquarks –, au milieu d'une forêt encore très dense d'électrons, de positrons, de masse environ mille huit cent fois plus faible, et de photons. C'est cette période que l'on appelle la « transition de phase du plasma quark-gluon », et dans le modèle cosmologique standard l'Univers n'a alors qu'un âge d'environ 10^{-5} seconde, dix millionièmes de seconde.

Quelques années plus tard, une étude similaire considéra également la possibilité que de telles poches d'antimatière se créent, non pas cette fois à la transition de création de la matière nucléaire, mais au moment de la transition électrofaible, à des températures encore mille fois plus fortes que celle de la transition précédente – environ un million de milliard de degrés[14].

À la différence du modèle que nous développons ici, toutes ces études supposaient que matière et antimatière avaient toutes deux une masse gravitationnelle positive, et que donc l'univers était à ces époques reculées dans une phase de décélération extrêmement violente, tous les termes de masse étant positifs et la densité étant énorme. Aujourd'hui, la découverte d'une gravité répulsive, mise en évidence à travers

14. Par un mécanisme de brisure de symétrie, l'interaction électrofaible se différencie très tôt – vers 10^{-12} seconde dans le modèle cosmologique standard – entre interactions faibles d'une part, et interactions électromagnétiques d'autre part, deux de ses manifestations très différentes à basse température, même si elles étaient indifférenciées jusqu'alors.

les observations de supernovae de type 1a, qui a conduit à l'introduction de ce que nous appelons l'énergie noire, incite à beaucoup plus de prudence : en effet, ce qui paraissait impossible auparavant, la gravité répulsive, est l'objet majeur d'étude de milliers de physiciens et mathématiciens à travers l'étude de cette mystérieuse énergie noire.

L'univers de Dirac-Milne, ingrédients d'un modèle alternatif au modèle cosmologique standard

Nous avons vu qu'en relativité générale la notion d'énergie négative semble étroitement associée à la possibilité de construire une machine à remonter le temps. Le physicien des particules, quant à lui, sait que l'antimatière *est* la matière à remonter le temps. Ajoutés à l'étrangeté de la composition de l'univers prédite par le modèle cosmologique standard, ces éléments m'ont amené à construire une alternative au modèle de concordance. Je décris dans la suite cet univers non conventionnel matière-antimatière, dont j'ai étudié la cosmologie avec un de mes étudiants, Aurélien Benoit-Lévy. Nous verrons que la cosmologie de ce modèle présente des éléments importants de concordance avec l'Univers qui est le nôtre, et cela de façon beaucoup plus économe en hypothèses que ne le fait le modèle cosmologique standard, qui nécessite l'introduction de matière noire et énergie noire et, comme on l'a vu, un degré élevé d'ajustement des paramètres (l'univers de Dirac-Milne, de son côté, ne dispose d'aucun paramètre ajustable).

Nous avons choisi d'appeler l'univers matière-antimatière que nous avons étudié l'« univers de Dirac-Milne », du nom du physicien mathématicien Paul Dirac et du physicien Edward Arthur Milne. Paul Dirac avait associé l'antimatière aux solutions d'énergie négative de son équation relativiste quantique, alors qu'Edward Milne avait démontré qu'un univers plat, au sens de l'espace-temps plat, donc vide et sans gravitation, pouvait lui aussi constituer une géométrie correspondant à une cosmologie homogène et isotrope, comportant un Big Bang, ce qui semblait initialement paradoxal. Dans notre univers de Dirac-Milne, les particules possèdent toujours comme d'habitude une masse positive, mais on suppose que les antiparticules contribuent de façon négative à la masse gravitationnelle.

J'ai rappelé plus haut qu'il apparaissait initialement surprenant, mais finalement assez naturel, de tenter d'attribuer une masse gravitationnelle négative aux particules d'antimatière. Il est également tentant d'appliquer ce comportement au milieu « vide », qui est en fait un bouillonnement de processus virtuels particule-antiparticule, et de le considérer comme un milieu gravitationnellement polarisable, dont les éléments sous-jacents, quarks et antiquarks, leptons et anti-leptons, sont tout autant de masses positives que de masses négatives.

Comportant autant de matière que d'antimatière, l'univers de Dirac-Milne apparaît gravitationnellement vide à grande distance, aux échelles supérieures à une centaine de mégaparsecs. Mais notre Univers n'est évidemment

pas totalement vide, et c'est son contenu de matière et d'antimatière, cette dernière présentant une masse gravitationnelle négative, qui pourrait permettre d'expliquer la gravité répulsive à l'œuvre dans notre Univers, équilibrant la gravité attractive de la matière qui nous est familière.

La disparition, au moins apparente, de l'antimatière dans notre Univers constitue, aujourd'hui encore, un mystère non résolu. Dans l'univers de Dirac-Milne, l'antimatière est toujours là, mais étalée en gaz froid dans ce que le modèle standard considère comme des zones vides. Bien entendu, nous avons des pistes plus conventionnelles que celle que je décris ici pour expliquer un univers où l'antimatière semble avoir totalement disparu. Notons cependant que dans le modèle standard on n'est pas parvenu jusqu'ici à expliquer le très léger déséquilibre entre matière et antimatière permettant à un milliardième de matière de survivre, au prix de la disparition de l'ensemble de l'antimatière. Si la violation de la symétrie CP matière-antimatière, observée dans le système de particules instables et exotiques que sont les mésons neutres, met bien en évidence une petite différence de comportement entre matière et antimatière, ces processus ne permettent pas de fournir d'explication convaincante à l'heure actuelle justifiant que un milliardième de matière survive à son annihilation avec l'antimatière. En effet, l'intensité et le taux des interactions dans l'Univers primordial sont trop intenses pour permettre d'engendrer une telle asymétrie, aussi petite soit-elle, mais néanmoins nécessaire à notre existence.

Dès le milieu des années 1980, comme je l'ai raconté dans l'ouvrage *L'Antimatière, la matière qui remonte le temps*, j'avais étudié la possibilité que l'antimatière antigravite, sans en étudier à l'époque les conséquences cosmologiques. Tous les arguments semblaient converger vers l'identité et le respect du principe d'équivalence, indifféremment pour matière et antimatière. Ceci dit, l'introduction d'une antigravité, qui correspondrait au fait qu'une antiparticule au repos dans le champ de gravitation terrestre remonterait et apparaîtrait donc être repoussée par la Terre au lieu d'être attirée par elle, ne semblait pas conduire à des problèmes nécessairement très visibles, conduisant simplement a priori à une instabilité du vide en présence d'un champ de gravitation très semblable à celle que prédit le mécanisme d'évaporation des trous noirs mis en évidence par Stephen Hawking, et dont nous avons parlé dans le chapitre consacré au lien entre gravité et information.

Rappelons que cette situation, qui peut sembler bizarre, se rencontre dans la physique du solide : dans un semi-conducteur, les électrons sont légèrement plus lourds que le milieu ambiant, alors que les trous, qui ont une charge opposée à celle de l'électron et correspondent à l'absence d'électrons, possèdent une masse gravitationnelle négative, car légèrement inférieure à la densité du substrat semi-conducteur. Dans un champ de gravitation, même si à ma connaissance la mesure n'a jamais été réalisée effectivement, un trou se comporte effectivement comme une particule de masse gravitationnelle négative et de masse inertielle positive (il faut fournir une énergie positive pour accélérer le trou)

et le trou «antigravite», c'est-à-dire qu'il remonte au lieu de tomber quand le semi-conducteur est placé dans un champ de gravitation[15]. Dans ce système, où, comme dans un jeu de taquin, le trou qui remonte peut également être interprété comme un électron qui tombe et comble un trou qui se déplace dans l'autre sens, personne ne s'étonne de l'antigravité des trous, qui ont plusieurs des caractéristiques des positrons.

Je supposerai par ailleurs que cet univers de Dirac-Milne a à toute époque conservé globalement sa symétrie matière-antimatière, et comporte encore, même aujourd'hui, un nombre égal de particules de masse positive et d'antiparticules de masse négative. C'est ce qui justifie que, à grande distance, l'Univers apparaît comme un univers vide, de densité nulle. Il s'apparente donc fortement à l'univers vide qu'avait conçu Milne, même si à l'évidence, du simple fait de notre présence et par exemple de notre Galaxie, notre Univers n'est évidemment pas complètement vide, mais seulement gravitationnellement vide à très grande distance (plus d'une centaine de mégaparsecs).

Il faut néanmoins reconnaître que cette représentation des antiparticules comme des particules de masse gravitationnelle négative met en danger deux apparemment sacro-saints principes de la physique contemporaine: le théorème CPT et le théorème de la conservation de l'énergie. Cependant, comme l'a noté par exemple le physicien

15. On suppose ici bien entendu que le champ électrique est nul et que les seules forces en présence sont dues au champ de gravitation.

mathématicien Robert Wald, le théorème CPT, dont l'une des conséquences est que les propriétés globales d'une particule et d'une antiparticule, comme sa durée de vie, sa masse, sa charge et son moment cinétique doivent être égales en valeur absolue, ne se démontre pas dans le cas des espaces-temps courbes, ce qui est le cas dès que l'on parle de l'espace en présence de gravitation.

En ce qui concerne la non-conservation de l'énergie impliquée par l'antigravité, on peut la mettre en évidence de la façon suivante, où je réadapte un argument développé par Philip Morrison dès 1958 : si l'on considère dans son ensemble une particule de masse positive et une antiparticule de masse négative opposée, les équations d'Einstein laissent entendre que cet ensemble est équivalent à un morceau de vide, d'énergie nulle.

Cependant, l'expérience montre clairement que si on fait se rencontrer une particule et une antiparticule on observe leur annihilation presque immédiate, qui libère leur énergie de masse sous forme de rayonnement. Énergie nulle d'un côté et énergie positive de l'autre. Mais est-ce réellement un problème ? En effet, nous avons vu que dans le cas de la gravitation c'était le second principe de la thermodynamique, et non pas le premier principe et la conservation de l'énergie, qui était le théorème fondamental, avec des relations extrêmement fortes entre gravité et information. Supposons donc que l'on cherche à profiter de ce petit déséquilibre, provenant du fait que d'un côté un couple particule-antiparticule apparaît globalement comme

de masse nulle alors que si on les met en contact deux photons d'énergie positive sont produits (dans le cas d'un électron et d'un positron, il s'agira dans la très grande majorité des cas d'une désintégration en deux ou trois photons, mais je ne rentre pas dans ces détails). Comme on sait que les photons gagnent de l'énergie quand ils tombent dans un champ gravitationnel, on pourrait imaginer le mécanisme suivant d'extraction d'énergie du vide au voisinage d'un corps massif : prenons par exemple un électron et un positron à une altitude de 1 kilomètre. Réalisons leur annihilation en les mettant en contact. Supposons que leur annihilation produise deux photons, dont l'énergie va être, lorsqu'elle est mesurée localement, égale exactement à l'énergie de masse de l'électron ou du positron, soit une énergie d'environ 511 kilo-électron-volts. Propageons maintenant les deux photons à l'altitude zéro, un kilomètre en dessous de l'altitude où ils se sont annihilés : ils ont alors gagné chacun une énergie qui peut s'exprimer par la formule : $\Delta E = m_e g \Delta z$, où m_e est la masse de l'électron, g l'intensité du champ de pesanteur et Δz représente la différence d'altitude entre le point initial et le point final. Si donc on réutilise les deux photons pour fabriquer en sens inverse un électron et un positron, on aura gagné dans l'opération un peu d'énergie, $2 m_e g \Delta z$, et il semble que l'on peut ainsi extraire indéfiniment de l'énergie du « vide », ce qui peut sembler un argument définitif à l'encontre de l'antigravité. Il a d'ailleurs été utilisé par plusieurs auteurs pour « démontrer » que l'antimatière doit tomber de la même façon que la matière.

On pourrait en effet se dire que le vide lui-même devient instable du fait qu'en permanence des paires électrons et positrons, ou quarks et antiquarks, se font et se défont à l'intérieur du vide. De ce fait, on peut craindre que le vide ne s'évapore violemment à travers cette instabilité qui permet de produire de l'énergie dès lors que l'on est simplement au voisinage d'un corps massif. Mais si, comme je le décris à la fin de ce chapitre, on cherche à préciser le type de rayonnement émis et ses caractéristiques énergétiques dans le cas du champ de gravitation de la Terre, on s'aperçoit que cette instabilité est extrêmement limitée, et très semblable à l'instabilité que la très grande majorité des physiciens est prête à accepter à travers le mécanisme d'évaporation des trous noirs proposé par Stephen Hawking. Par exemple, pour un hypothétique trou noir de même masse que la Terre, l'émission thermique serait extrêmement réduite, la surface rayonnante de l'horizon étant de l'ordre du centimètre carré, et émettant à une température de l'ordre de 1 kelvin, soit une puissance de l'ordre du cent-milliardième de watt (10^{-11} W), pratiquement impossible à détecter. Il est donc très probable que les deux arguments du théorème CPT et de conservation de l'énergie ne soient pas des arguments valides contre l'antigravité.

Je suis conscient que pour certains cette façon de considérer un ensemble particule antiparticule comme un système de masse et d'énergie nulle à grande distance peut sembler une violation flagrante de la conservation de l'énergie. Cependant, si nous y réfléchissons, c'est déjà ce qui se passe

dans la théorie standard : reprenons en effet notre positron et notre électron que nous annihilons derechef, ce qui produit deux photons de 511 kilo-électron-volts. Ne réalisant pas l'expérience sur la Terre, endroit exceptionnel avec une grosse concentration de matière, mais dans les conditions habituelles de l'Univers, c'est-à-dire dans le vide intersidéral, les deux photons d'annihilation de 511 kilo-électron-volts ont toutes les chances de ne plus jamais interagir avec la matière et de se propager pratiquement jusqu'à l'infini, où, en raison de l'expansion de l'Univers, leur énergie deviendra justement nulle. De ce fait, en raison de l'expansion de l'Univers et de la gravitation, l'énergie d'un électron et d'un positron est *déjà nulle* dans la théorie standard.

Test observationnels de l'univers de Dirac-Milne

Jusque dans les années 1990, la cosmologie était une science très imprécise, dont les paramètres étaient souvent définis au mieux à un facteur 2 près. Pendant plusieurs dizaines d'années en effet, deux écoles s'affrontaient sur la valeur de la constante de Hubble, qui mesure le taux d'expansion de l'Univers. L'une de ces écoles – celle d'Allan Sandage – prétendait que la valeur était de 50 kilomètres par seconde et par mégaparsec, alors que l'autre école – celle de Gérard de Vaucouleurs – prétendait que la valeur correcte était de 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Ironiquement, la valeur considérée aujourd'hui comme la bonne valeur est très proche de la moyenne géométrique de ces deux valeurs,

qui est égale à la racine carrée du produit des deux, ou environ 70 kilomètres par seconde et par megaparsec...

Aujourd'hui, l'explosion des données issues des programmes de cosmologie fournit des résultats dont la précision est en revanche de l'ordre du pourcent. Et pour tester la validité d'un modèle d'Univers, nous avons à notre disposition une collection de tests sur l'âge de l'Univers, sa vitesse d'expansion, la nucléosynthèse (production d'éléments légers dans l'Univers) ou encore le spectre du son dans l'Univers primordial et la distance de luminosité des supernovæ.

Arriver à concevoir un univers qui reproduise l'ensemble de ces tests à la précision actuelle des mesures est donc devenu une tâche extrêmement ardue, et nous allons donc passer en revue les différents tests pour notre univers de Dirac-Milne, dont je vais montrer dans les pages qui suivent qu'il présente plusieurs caractéristiques remarquablement concordantes avec celles de notre Univers.

Âge de l'Univers

Commençons par étudier l'âge d'un tel univers. Nous prenons pour référence l'expansion de l'Univers tel que nous l'observons aujourd'hui, soit environ 70 km/s et par megaparsec. Un raisonnement simple montre que l'âge de l'Univers sans accélération ni décélération est simplement donné par le rapport entre la vitesse de la lumière 300 000 km/s divisée par le taux d'expansion de Hubble, ce qui donne une durée d'environ 14 milliards d'années (en se rappelant qu'un parsec vaut à peu près 3,26 années-lumière).

De façon remarquable, cet âge est presque exactement égal à l'âge de l'Univers du modèle cosmologique standard. Rappelons en effet que c'est cette question de l'âge de l'univers d'Einstein-de Sitter, égal seulement à deux tiers de ces 14 milliards d'années, soit un âge d'environ 9,3 milliards d'années, qui avait été la première indication, au milieu des années 1990, de l'existence d'une composante répulsive dans l'Univers : en effet, certaines étoiles avaient clairement un âge supérieur à l'âge prédit pour l'univers d'Einstein-de Sitter. Cette coïncidence a été notée par plusieurs auteurs, favorisant l'univers sans accélération ni décélération – appelé *coasting* par les Anglo-Saxons, comme un bateau qui accoste en ayant coupé son moteur. Cependant, aucun de ces auteurs n'a avancé jusqu'ici de motivation justifiant cet univers, comme nous le faisons dans le cadre d'un univers matière-antimatière. On peut noter que si l'Univers cosmologique standard présente également cet âge de 14 milliards d'années, c'est au prix d'une contorsion qui correspond à une décélération extrêmement forte dans les premières phases de l'Univers, époque à laquelle la gravité répulsive de « l'énergie noire » ne joue pratiquement aucun rôle, suivie d'une courte période pendant laquelle décélération et accélération s'équilibrent approximativement il y a quelques milliards d'années et où l'Univers ressemble à un univers *coasting*, avant de céder la place à la période actuelle d'accélération de l'expansion. À noter également qu'au fur et à mesure que l'expansion s'accélère les galaxies vont, dans cette description du modèle cosmologique standard, se trouver séparées par des

distances de plus en plus grandes, l'Univers devenant de ce fait essentiellement vide, sauf dans des îlots de matière isolés comme notre Galaxie.

Distance de luminosité des supernovæ

Comme nous l'avons vu, les supernovæ de type 1a sont des objets émetteurs d'énorme puissance, donc visibles à de très grandes distances, et de luminosité suffisamment reproductible pour être utilisées comme des chandelles standard, c'est-à-dire des références de luminosité. Comme dans le cas de l'âge de l'Univers et de la nucléosynthèse, plusieurs auteurs ont noté qu'un univers *coasting*, c'est-à-dire sans accélération ni décélération et faisant aussi parfois référence à l'univers – vide – de Milne[16], présente une variation de la luminosité en fonction de la distance (autre test cosmologique) remarquablement proche du modèle cosmologique standard Lambda CDM, comme le montre la figure page 424 tirée d'un article de Michau Chodorowski, de l'université de Varsovie. Cette nouvelle coïncidence est un argument fort pour considérer sérieusement l'univers de Dirac-Milne car la différence est infime (quelques pourcents) entre les deux univers.

Par ailleurs, cette différence résiduelle de quelques pourcent pourrait s'expliquer si, comme l'a publié le projet SNLS (SuperNova Legacy Survey), des facteurs d'évolution

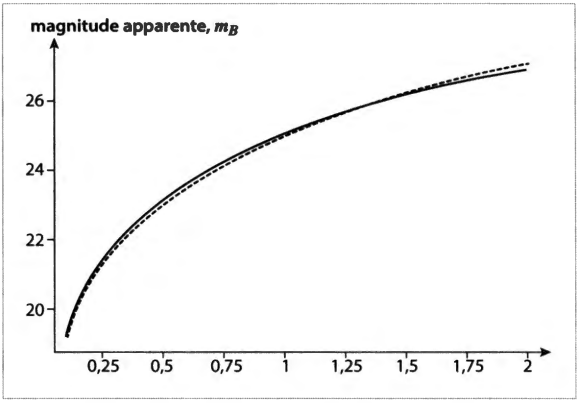
16. Comme dans l'étude de Sarkar et son groupe en 2016 sur les supernovæ.

peuvent venir modifier la luminosité des supernovæ, celle-ci semblant par exemple dépendre de la composition de la galaxie hôte. Comme le dit de façon assez provocante Subir Sarkar, le libellé du prix Nobel 2011, attribué « ...pour la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers à travers des observations de supernovæ distantes », pourrait bien être faux...

Nucléosynthèse primordiale

Étudions maintenant ce que devient la production des éléments nucléaires légers, la nucléosynthèse à laquelle nous avons fait brièvement allusion dans le chapitre sur le principe de Mach, dans l'univers de Dirac-Milne. La tâche qui consiste à reproduire la composition en éléments légers, c'est-à-dire la proportion entre hydrogène, hélium, deutérium et lithium pour les éléments légers qui sont produits de la façon la plus abondante dans l'Univers primordial peut sembler sans espoir. En effet, l'Univers standard, possédant une densité critique, est soumis à une décélération extrêmement forte dans les phases initiales de forte densité lorsque la température est de l'ordre des 100 kilo-électron-volts – soit environ 1 milliard de degrés – nécessaires à la cuisson des éléments nucléaires, période ni trop chaude ni trop froide qui correspond approximativement aux « trois premières minutes de l'Univers », selon le titre de l'ouvrage célèbre de Steven Weinberg.

L'univers de Dirac-Milne, n'étant en revanche pas soumis à la décélération du fait qu'à grande distance les masses positives et les masses négatives se compensent, passe un



Luminosité apparente d'une supernova en fonction de la distance – mesurée par son *redshift* (« décalage vers le rouge ») – comparée pour le modèle standard cosmologique (densité de matière 28 %, densité d'énergie noire 72 %, ligne continue) et l'univers « vide » de Dirac-Milne (ligne pointillée). De façon étonnante, l'univers vide s'ajuste remarquablement bien au modèle cosmologique standard pour les supernovæ, en étant pratiquement indistinguable.

temps énorme (en comparaison de ces trois minutes) dans la phase où la température, de l'ordre du milliard de degrés, est adaptée à la production des éléments nucléaires les plus légers. La durée de cette période est en effet, comme le montre le calcul que l'on peut adapter du calcul de l'âge de l'Univers, d'une bonne trentaine d'années au lieu des trois minutes canoniques. Comment dans ces conditions serait-il possible d'arriver à une composition similaire à celle que nous observons si les temps de cuisson nucléaire sont aussi différents ? La réponse à cette question, et la coïncidence qu'elle constitue, a été notée par plusieurs auteurs que l'on trouvera cités en référence : à condition que la densité de matière dans cet univers sans

décélération soit égale à l'époque de la nucléosynthèse à environ dix fois celle de l'Univers du modèle cosmologique standard à la même température, la quantité d'hélium produite, ainsi d'ailleurs que la quantité de lithium produite, correspond bien à celle qui est observée. Cette coïncidence assez miraculeuse est due au fait que, bien que les neutrons aient une durée de vie de seulement 900 secondes, ridicule devant les trente ans de la nucléosynthèse dans l'univers de Dirac-Milne, ils sont néanmoins régénérés thermiquement à très faible dose, et dans ce cas capturés presque immédiatement par un proton pour produire un noyau de deutérium, et les noyaux de deutérium vont eux-mêmes se combiner pour produire l'hélium, beaucoup plus stable, ce qui va lui permettre de survivre à la fournaise ambiante. Le rapport entre les deux temps de nucléosynthèse, trois minutes par rapport à trente ans, soit un facteur d'environ 5 millions, permet juste d'expliquer la production d'hélium cosmologique.

En ce qui concerne le lithium, dont seul le lithium 7, relativement stable, perdure dans l'Univers en des quantités faibles mais détectables, il faut noter que, si l'ordre de grandeur de la quantité produite est le bon, il existe néanmoins une différence importante entre la prédiction du modèle cosmologique standard, celle de l'univers de Dirac-Milne et la valeur observée. Aucun des deux modèles ne reproduit donc exactement la quantité de lithium observée, mais c'est l'univers de Dirac-Milne qui fournit la réponse la plus proche de la quantité observée. L'origine de cette différence n'est pas complètement comprise à l'heure

actuelle, mais la réponse habituelle à cette différence est généralement attribuée au fait que le lithium, observé dans des atmosphères stellaires, pourrait voir sa fraction observée modifiée de façon forte par le phénomène d'astration – l'incorporation au cœur des étoiles.

Cette coïncidence remarquable sur la nucléosynthèse a été notée pour la première fois par un groupe de physiciens indiens, autour de Daksh Lohiya. L'histoire de leur publication est illustrative de la résistance de la communauté aux nouvelles idées. En effet, après avoir publié leur preprint décrivant cette coïncidence remarquable de la nucléosynthèse comparant les cosmologies selon la loi de puissance de leur taux d'expansion en fonction du temps, leur article fut violemment critiqué par l'un des grands spécialistes de la nucléosynthèse, Gary Steigman et son étudiant Manoj Kaplinghat, qui publièrent une critique de ce manuscrit des physiciens indiens. Dans cette première publication, Steigman et Kaplinghat commettaient une erreur assez grossière qui démontrait qu'ils n'avaient pas compris l'argument des physiciens indiens, qui publièrent en réponse un deuxième preprint, critiquant l'article de Steigman et Kaplinghat, et démontrant l'erreur qu'ils avaient commise. Ce deuxième preprint ne fut pas plus publié que le premier, mais suscita une réponse de Steigman et Kaplinghat sous la forme d'un deuxième article, reconnaissant leur erreur initiale mais pointant deux défauts apparemment rédhibitoires de l'univers *coasting* étudié par le groupe indien : la très grande quantité de matière

baryonique (ordinaire) nécessaire pour arriver à produire la bonne proportion d'hélium, et l'impossibilité de produire du deutérium, très fragile et donc détruit presque totalement dans l'univers à cuisson lente (*simmering universe*) qui passe plus de trente ans, au lieu de trois minutes, dans la phase assez chaude pour produire l'hélium à partir du deutérium (presque immédiatement détruit par incorporation dans l'hélium).

Si le groupe indien n'avait pas de réponse à ces deux critiques, l'univers de Dirac-Milne peut quant à lui y répondre de façon simple. En effet, l'annihilation matière-antimatière va conduire à la production de deutérium et d'hélium-3 à travers l'annihilation antiproton-hélium et antihélium-hélium bien au-delà de l'époque de la nucléosynthèse. S'il faut reconnaître que l'hélium-3 est produit en trop grande quantité par ce processus, on peut se demander si c'est réellement un problème, car fort peu d'équipes se sont intéressées sérieusement à la mesure de l'hélium-3, qui peut être produit mais aussi être détruit dans les mécanismes stellaires, et n'est donc pas considéré comme une sonde fiable de la nucléosynthèse primordiale. Devant la prédiction théorique du taux d'hélium-3 dans l'univers Lambda-CDM, il peut en effet être tentant pour une équipe de suivre le conseil d'Einstein : « Si les faits ne correspondent pas à la théorie, changez les faits… » et d'affirmer qu'il a bien trouvé le résultat attendu, même s'il faut bien reconnaître qu'il faut aussi parfois changer la théorie[17]… Concernant la très grande

17. Un éditorial de Nicolas Prantzos en 2016 dans *Nature* a d'ailleurs attiré

quantité de matière – environ dix fois la quantité habituellement admise – nécessaire à la nucléosynthèse de la quantité correcte d'hélium, le problème disparaît si l'on prend en compte que l'annihilation matière-antimatière se poursuit bien au-delà de la période de la nucléosynthèse. Conduisant à la disparition d'environ 90 % de la matière et de l'antimatière entre cette période de la nucléosynthèse et la fin de l'annihilation, l'Univers de Dirac-Milne a retrouvé au moment où l'univers devient transparent la bonne densité de matière.

Fond diffus cosmologique

Comme nous l'avons signalé, le spectre du son dans l'Univers primordial a été mesuré de façon remarquablement précise par le satellite *Planck*. Ce spectre constitue désormais un test de référence pour toute cosmologie, et l'étude de ce spectre dans l'univers de Dirac-Milne n'en est encore qu'à ses débuts. On peut néanmoins dès à présent noter une nouvelle coïncidence assez extraordinaire pour cet univers. On peut en effet calculer la distance de propagation du son qui résulte de l'annihilation matière-antimatière dans l'univers de Dirac-Milne, ce son étant produit depuis un début bien défini à la température de 170 MeV environ, et sa production s'achevant à l'époque où les domaines de matière et d'antimatière deviennent suffisamment froids et massifs pour cesser de s'annihiler (à une température un

---

l'attention sur le fait que les mesures précises de la quantité d'hélium-3 manquaient cruellement.

peu inférieure à un million de kelvins). Le calcul montre en effet que la distance de propagation de ce son d'annihilation va correspondre sur le ciel à une échelle d'environ un degré, qui est effectivement l'échelle mesurée dans le fond diffus cosmologique, coïncidence totalement inattendue, la géométrie de l'univers de Dirac-Milne, dont nous avons vu qu'il correspondait à un espace-temps plat, étant violemment différente de celle de l'univers Lambda-CDM ou de celle de l'univers d'Einstein-de Sitter (où c'est l'espace à un temps donné qui est plat, alors que l'espace-temps n'y est pas du tout plat, raison pour laquelle on s'attend naïvement à une différence de plus de deux ordres de grandeur entre les deux univers). Un travail très important reste néanmoins à effectuer afin de prédire un spectre complet des oscillations sonores dans l'univers de Dirac-Milne.

Autres tests cosmologiques

Parmi les autres différences notables entre l'univers de Dirac-Milne et l'univers du modèle cosmologique standard, on peut noter un mécanisme extrêmement différent de formation des structures. Ainsi, si la formation des structures est poussive et lente dans l'univers Lambda-CDM, avec une intervention nécessaire de « grumeaux » hypothétiques de matière noire, les masses négatives et positives contrastées de l'univers de Dirac-Milne n'ont aucun mal à s'effondrer et à former très rapidement des structures, le contraste de densité entre les domaines de matière et d'antimatière étant dès le départ de l'ordre de l'unité, contre quelque cent-

millièmes seulement dans le modèle standard. De ce fait, les structures dans l'univers de Dirac-Milne sont beaucoup plus « vieilles » que dans l'univers standard, les premières étoiles se formant quelques millions d'années à peine après la phase de transparence de l'univers. On peut par ailleurs beaucoup mieux comprendre la hiérarchie de formation des structures, passant d'une étoile individuelle à un mini-cluster d'une dizaine d'étoiles, puis à des assemblages de groupes plus importants, selon une hiérarchie bien définie. Cette histoire très différente dans la formation des structures pourrait expliquer la très grande cohérence des mouvements que Rodrigo Ibata et son fils Neil avaient détectée dans les mouvements des galaxies naines dans le voisinage de la galaxie d'Andromède – et très probablement également dans le voisinage des autres galaxies. Mais le test le plus dramatique de la validité des hypothèses de l'univers de Dirac-Milne pourrait provenir dans les toutes prochaines années d'une mesure réalisée au CERN, que nous décrirons par la suite.

Peser l'antimatière

L'un des tests les plus importants du modèle d'univers de Dirac-Milne que je viens de décrire réside en effet dans la mesure de la masse gravitationnelle de l'antimatière. En effet, pour qu'une cosmologie matière-antimatière soit viable, il est absolument nécessaire que ces frères ennemis soient séparés dès que la température tombe en dessous de

quelques centaines de milliers de degrés environ. La mesure de la masse de l'antimatière est un vieux rêve de physicien. Dès les années 1970, le physicien William Fairbank, de l'université de Stanford, se lança avec son étudiant Fred Witteborn dans cette mesure extrêmement difficile, d'autant plus difficile qu'il chercha à la réaliser sur l'électron et sur son antiparticule, le positron. La force de gravité que la Terre exerce sur un électron, doté d'une masse environ mille huit cent fois plus faible que celle du proton, correspond à l'action d'un champ électrique extrêmement faible, de l'ordre d'un cent-milliardième de volt par mètre. Pour ne pas être brouillée par des champs électriques parasites, la maîtrise des champs électromagnétiques au voisinage des particules mesurées doit donc être extrême et, comme nous allons le voir, probablement impossible à réaliser en pratique...

La mesure effectuée par Witteborn et Fairbank consistait à mesurer les temps d'arrivée des électrons dans un tube métallique et conducteur (afin de se protéger des champs électriques ambiants) à partir d'une impulsion d'électrons bien définie dans le temps. Sur le tube métallique d'une hauteur d'un peu moins d'un mètre qu'ils utilisèrent, un électron qui aurait eu juste l'énergie cinétique à son lancement lui permettant d'atteindre la partie haute du tube, dans un vol parabolique, aurait un temps d'ascension d'environ 0,45 seconde, aisément mesurable. L'idée de Witteborn et de Fairbank était donc de lancer de grosses bouffées d'électrons et de repérer les électrons disposant juste de l'énergie pour arriver au sommet de leur parabole, où ils seraient détectés

par un système de comptage. Parvenant à vitesse nulle au sommet, ces électrons seront les plus lents à atteindre le système de comptage, les électrons encore plus lents n'y parvenant jamais. Même si le but ultime de leur expérience était de mesurer la force de gravitation sur les positrons, Witteborn et Fairbank commencèrent par mettre en œuvre l'expérience sur des électrons, plus commodes à produire en abondance, et annoncèrent que la force totale (électrique plus gravitationnelle) s'exerçant sur un électron était nulle, un champ électrique venant compenser la force de gravitation.

Witteborn et Fairbank pensaient en effet qu'un tel champ électrique venant compenser exactement l'effet de la gravité, faisant léviter les électrons, était prédit par l'effet dit « Schiff-Barnhill », du nom des deux physiciens, Leonard Schiff et Maurice Barnhill, ayant étudié cet effet. Un tel champ électrique peut se comprendre de la façon suivante : dans les atomes, la force gravitationnelle s'exerce beaucoup plus fortement sur les noyaux que sur les électrons, ce qui engendre un petit effet dipolaire – les ions pendent un peu plus bas que les électrons sous l'action du champ de gravité terrestre… –, dont Schiff et Barnhill avaient cru pouvoir démontrer qu'il était juste suffisant pour faire léviter un électron. On peut noter que pour un positron ce champ électrique agit en sens inverse et vient s'ajouter à la force de gravitation. Cependant, peu après les premières mesures de Witteborn et Fairbank sur les électrons, un groupe de théoriciens, sous l'abréviation DMRT pour Dessler, Michel, Rorschach et Trammell, nota que l'effet devait être des milliers de fois plus important que l'effet

annoncé par Schiff et Barnhill. Il était donc pour le moins très difficile de comprendre le résultat de Witteborn et Fairbank. Ceux-ci invoquèrent ensuite des comportements dépendant de la température, mais avec des incohérences telles au niveau expérimental que Witteborn jugea bon quelques années plus tard de publier un démenti partiel dans la prestigieuse revue *Physical Review Letters*, sans jamais renoncer cependant à la revendication de la mesure proprement dite...

L'opinion est aujourd'hui que les mesures effectuées par Witteborn et Fairbank étaient fausses, très probablement par plusieurs ordres de grandeur. En effet, en admettant même qu'aucune charge parasite ne vienne créer un champ supérieur à la force de gravitation – ce qui suppose qu'aucune charge non contrôlée ne se situe à moins d'une dizaine de mètres au minimum du dispositif de mesure, ce qui est pratiquement impossible –, il existe un effet que Witteborn et Fairbank n'avaient pas pris en compte: le champ électrique aléatoire et non contrôlable, appelé «bruit Johnson», associé au mouvement thermique des électrons dans tout conducteur. En effet, un tube métallique, même s'il est un bon conducteur, a néanmoins une résistance finie et induit un champ électrique aléatoire, dont on peut montrer qu'il va exercer sur l'électron une force a priori toujours très supérieure à la force de gravitation. L'analyse moderne de cette expérience est que la mesure sur l'antiproton, tentée par une équipe au CERN pendant une dizaine d'années dans l'expérience PS-200 auprès du décélérateur d'antiprotons LEAR (Low Energy Antiproton Ring), dirigée par le physicien Michael Holzscheiter, était déjà

épouvantablement difficile, et proche de l'impossible. Dans le cas d'un électron – ou d'un positron –, la force de gravitation étant deux mille fois plus faible, la mesure sur l'électron que tentaient de réaliser Witteborn et Fairbank semble à jamais hors de portée des expérimentateurs.

En 1996, alors que l'expérience PS200 n'avait pas encore abandonné l'idée de peser l'antiproton, une conférence eut lieu à Molise, dans le sud de l'Italie, motivée par la proposition du « pape » du positron Allen Mills, alors au Bell Labs de Murray Hill, de mesurer la force de la gravitation sur le positron en analysant sa trajectoire dans un gigantesque tube métallique, à nouveau afin de se protéger des champs électriques extérieurs. Pour les raisons que j'ai indiquées plus haut, Allen Mills lui-même jeta l'éponge à l'issue de la conférence, une fois qu'il se fut convaincu que le bruit Johnson était toujours nettement plus grand que la force gravitationnelle. L'attention des physiciens se dirigea alors sur les particules neutres, comme l'antihydrogène atomique, ainsi que les atomes exotiques que sont le positronium (composé d'un électron et d'un positron) ou encore le muonium (atome composé d'un électron et d'un antimuon). Mais ces deux derniers systèmes étant instables[18] en raison

18. Il est possible d'augmenter considérablement, au-delà de plusieurs secondes, le temps de vie du positronium en utilisant les états excités dits « de Rydberg », à nombre quantique élevé, où électron et positron se recouvrent suffisamment peu pour que l'annihilation soit considérablement atténuée. De ce point de vue, la mesure de la force de gravitation sur un positronium constituerait le test le plus pur de la théorie que je présente ici, signant le fait que la masse gravitationnelle du

de leur composition matière-antimatière, et le muon lui-même étant instable, la majorité des efforts se concentre aujourd'hui sur la fabrication de l'antihydrogène froid, suffisamment froid en tout cas pour qu'il devienne possible de mesurer sur lui l'influence de la force de gravitation. En effet, même à la température de l'hélium liquide (4 kelvins environ), un atome d'hydrogène ou d'antihydrogène a une vitesse thermique aléatoire de l'ordre de la centaine de mètres par seconde. La taille de la chambre d'expérience étant pour des raisons pratiques limitée à environ un mètre, il faut que la vitesse de l'antihydrogène soit abaissée à quelques mètres par seconde environ, afin que l'action de la gravitation soit suffisamment visible sur cette distance d'un mètre. Ceci nécessite donc de réduire la température de l'antihydrogène à des températures de l'ordre du millième de kelvin, ce qui n'est pas une mince affaire.

L'expérience Gbar de mesure de la gravité sur l'antihydrogène

Le principal problème initial rencontré avec l'antihydrogène est en effet que, dès qu'il est formé, du fait que sa charge électrique est nulle, la profondeur du piège atomique que l'on parvient à créer, en utilisant des sortes de « bouteilles magnétiques » réalisées avec des gradients de champ, est très faible, ne permettant de piéger que des atomes n'ayant qu'une vitesse inférieure à 100 m/s environ, bien inférieure à la vitesse typique, de plus de 2 km/s, d'un atome d'hydrogène

positron serait négative.

ou d'antihydrogène à température ordinaire. Comme on l'a vu, une vitesse de 100 m/s ne correspond pour un atome d'hydrogène qu'à une température typique d'1 kelvin, en dessous de la température de l'hélium liquide. Or même avec des antiprotons et des positrons à température de 1 kelvin, la recombinaison d'un antiproton et d'un positron en atome d'antihydrogène donne une impulsion aléatoire de recul à l'atome supérieure aux profondeurs de piège que l'on sait réaliser, ce qui va entraîner la perte de la grande majorité des antihydrogènes, durement fabriqués. Par ailleurs, une fois produits, les atomes neutres d'antihydrogène sont extrêmement difficiles à refroidir : des techniques de refroidissement par laser sont bien possibles mais résultent là aussi en des taux de perte très importants. Or, à nouveau, les atomes d'antihydrogène sont très difficiles à produire, d'autant plus si on exige qu'ils aient une température faible.

La véritable avancée fut amenée en 2004 par la proposition très astucieuse faite par le Prix Nobel allemand Theodor Hänsch et son collaborateur Jochen Walz de ne pas chercher à refroidir les antiprotons ou l'antihydrogène, mais de passer par l'étape intermédiaire de l'ion antihydrogène, composé d'un antiproton autour duquel orbitent deux positrons. Cet ion étant un système chargé (de charge + 1), il devient possible de le refroidir en utilisant la méthode appelée du « refroidissement sympathique ». Cette méthode consiste à insérer un petit nombre d'anti-ions positifs au milieu d'un réseau extrêmement froid d'ions de matière également chargés positivement, et comme ce sont des ions de matière

disponibles en grandes quantités, il a été possible de les refroidir à quelques millionièmes de degré. Comme tout le monde a une charge positive et que la température de départ est déjà très faible, l'anti-ion, de façon surprenante, ne s'annihile pratiquement jamais avec les ions de matière, qui le repoussent, mais perd peu à peu son agitation en la cédant aux ions de matière, eux-mêmes refroidis par laser. Une fois l'anti-ion refroidi à quelques millionièmes de degré au contact des ions ultra-froids de matière, on arrache son positron supplémentaire grâce à une impulsion laser strictement horizontale. De cette manière la vitesse verticale de l'anti-ion reste extrêmement faible, de l'ordre du mètre par seconde, correspondant à une température de l'ordre d'une dizaine de millionièmes de degré absolu.

Devenu neutre et soumis à la seule force de gravitation, il ne reste plus qu'à détecter l'annihilation de l'antihydrogène dès qu'il rencontre de la matière, ce qui se produit presque instantanément. Dans cette annihilation, l'antiproton et le noyau avec lequel il s'annihile produisent en moyenne un peu plus de cinq pions, qui s'éloignent en ligne droite du point de désintégration à une bonne fraction de la vitesse de la lumière. On entoure donc la zone de production d'antihydrogène de chambres de détection, et la reconstruction des traces des pions chargés, qui pointent vers le lieu d'annihilation et dont le temps d'émission peut être reconstruit avec une très grande précision (typiquement la nanoseconde), permet alors de déterminer l'éventuelle asymétrie de ces lieux d'annihilation : une accumulation vers le haut de l'appareillage signerait

l'antigravité qui, même si elle constituerait une immense surprise, permettrait d'aborder de façon assez radicalement différente plusieurs questions de cosmologie.

Ce qu'il faut retenir

Le modèle cosmologique standard, s'il propose un excellent ajustement des données de précision accrue enregistrées ces dernières années, le fait au prix de six paramètres largement libres et de l'introduction de l'énergie noire et de la matière noire, censées représenter 96 % du contenu de l'Univers, mais dont on n'a pas la moindre idée de la nature effective. Il est donc essentiel de proposer des alternatives testables à ce modèle standard. Le modèle de Dirac-Milne, dans lequel l'antimatière possède une masse gravitationnelle négative (et une masse inertielle positive), est motivé physiquement – il existe un système similaire en physique du solide – et reproduit de façon excellente plusieurs des tests cosmologiques (âge de l'Univers, nucléosynthèse, distance de luminosité des supernovæ). Concernant le test du fond diffus cosmologique, beaucoup reste à faire, mais il est déjà étonnant et très encourageant que le modèle prédise l'échelle angulaire d'un degré que l'on observe aujourd'hui sur le ciel dans le fond diffus cosmologique et qui est la trace des oscillations acoustiques de l'Univers primordial. Deux tests restent à étudier pour ce modèle : les oscillations acoustiques baryoniques observées aujourd'hui à l'échelle

d'une centaine de mégaparsecs et la quantité d'hélium-3 produite de façon primordiale, probablement mal mesurée jusqu'ici. Ce modèle de Dirac-Milne illustre la méthode scientifique par la construction de modèles alternatifs prédictifs, testables et surtout falsifiables car il suffit d'un seul test que ne vérifie pas une théorie pour l'invalider.

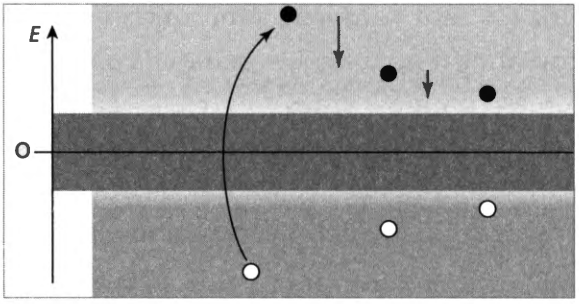
Un univers symétrique matière-antimatière doit clairement prendre en compte l'absence quasi totale d'annihilation matière-antimatière depuis que l'Univers est devenu transparent, ce qui nécessite a priori une violation du principe d'équivalence, au moins tel qu'il est exprimé habituellement, pour l'antimatière. Trois expériences en cours d'implémentation au CERN à Genève, AEgIS, ALPHA-g et Gbar, doivent tester prochainement, peut-être dès 2018, si l'antihydrogène subit une « antigravité » qui lui permettrait d'occuper les grandes zones aujourd'hui considérées comme « vides » entre les galaxies et amas de galaxies, lui permettant d'échapper à l'annihilation avec la matière, et de fournir une explication à la très étrange énergie noire, gravité répulsive découverte à la fin des années 1990.

Pour en savoir plus

I - En physique des solides, certaines masses de particules sont « habillées » par leur interaction avec les constituants du solide, ces masses allant essentiellement de 0 à l'infini, et pouvant même être négatives. Par exemple, du fait que, dans un solide, un électron est environné par de multiples autres particules, ions et électrons,

qui constituent le solide, cet électron, en se déplaçant dans le semi-conducteur, pourra ainsi apparaître avoir une masse très différente de celle qu'il aurait dans le vide, en particulier dans un milieu ordonné comme un solide cristallin. Notons également que dans un semi-conducteur neutre, un électron ne peut se propager que s'il existe par ailleurs une quasi-particule que l'on appelle un « trou », un électron manquant.

Dirac identifiait d'ailleurs l'électron et son antiparticule, le positron, à des quasi-particules « électron » et « trou » dans un solide, arrangés dans une structure appelée la « mer de Dirac ». Si on prend comme unité de référence la masse de l'électron dans le vide ($m_e \approx 9{,}11\ 10^{-31}$ kg), la masse de l'état excité « électron » – habillé par les électrons et les ions voisins dans le solide – peut couramment varier entre un centième de la masse de l'électron, et même être quasiment nulle dans le cas du graphène, mais aussi dépasser nettement la



Dirac se représentait particules et antiparticules de la façon suivante: dans une mer infinie d'états d'énergie négative représentant le vide, sans particules, une particule (rond noir) apparaît comme l'extraction de la mer, à une énergie positive, de l'une des particules piégées dans la mer de Dirac, tandis qu'une antiparticule correspondrait à un « trou » (rond blanc) résiduel dans la mer de Dirac après cette même extraction. Ce modèle pose plusieurs problèmes qui ont résulté en son abandon, mais un semi-conducteur, avec ses « électrons » et ses « trous », constitue une bonne approximation physique de la mer imaginée par Dirac.

masse de l'électron, dépassant assez couramment dix fois sa masse dans le vide, et atteignant même des facteurs de « surpoids » d'un facteur 1 000 dans certains matériaux – on lui donne alors l'appellation de « fermion lourd ».

Conclusion

Nous parvenons ici à la conclusion de cet ouvrage consacré à la gravitation, où j'espère que le lecteur aura pu saisir la vitalité et la force des questions contemporaines liées à ce domaine. Domaine de ce fait fascinant car la solution aux énigmes qui nous sont posées – en particulier par l'énergie noire et par la quantification de la gravitation – n'est pas connue, même si certaines voies vers une solution possible commencent à apparaître.

En effet, autant la théorie de la relativité générale constitue apparemment une excellente théorie classique, autant la quantification de la gravitation a résisté jusqu'ici aux efforts déployés pour y parvenir, ou en tout cas pour parvenir à une quelconque prédiction expérimentale. D'une certaine façon, on peut dire qu'autant les théories des cordes –qu'il faudra un jour se résoudre à renommer la « théorie des membranes » – offrent un cadre quantique qui contient la gravité, autant la conjecture de Maldacena, où l'univers est une sorte d'hologramme sans gravitation à la frontière d'un univers qui ressemble au nôtre – et subissant

la gravitation –, suggère que la gravitation pourrait ne pas être une interaction comme les autres forces, mais une sorte d'effet dû aux conditions aux limites d'un univers à qui il est imposé de se refermer sur lui-même…

L'une des façons d'avancer dans la résolution de cette énigme pourrait provenir de l'étude de la très surprenante gravité répulsive qui semble à l'œuvre, et même être d'ores et déjà majoritaire, dans notre univers et que, faute d'une meilleure compréhension, nous avons affublée du titre d'« énergie noire ». En fait, comme on le sait, aux côtés de cette énergie noire, figure également, au moins formellement, une autre composante importante de notre univers, la matière noire, aussi élusive que l'énergie noire, et que nous comprenons tout aussi peu. Le rôle totalement insignifiant que joue l'énergie noire, si elle existe, dans l'univers primordial, alors que son rôle semble devenir prédominant aujourd'hui – jusqu'à rendre insignifiant et vide notre monde de matière dans quelques milliards d'années –, laisse entendre qu'énergie noire et matière noire ne sont probablement que des avatars des épicycles de Ptolémée, qui avaient été conçus pour coller à la description géocentrique, alors qu'un monde héliocentrique permettait de s'en affranchir.

La consolidation du principe de Mach, dont on dit souvent qu'il est une sorte de principe philosophique sans portée prédictive quelconque, me semble également une ligne à poursuivre, car la possibilité de décrire les forces inertielles comme des forces gravitationnelles est

extrêmement satisfaisante pour l'esprit, la masse inertielle n'étant rien d'autre que la réaction instantanée – mais respectant la relativité d'Einstein – de l'ensemble de l'univers à une modification de son mouvement. J'ai signalé le fait que Stephen Hawking a trouvé, au milieu des années 1960, une autre raison inattendue de travailler avec un regard neuf sur ce principe : la théorie très « machienne » que Hoyle et Narlikar avaient développée est équivalente à la relativité générale – ce qui est en soi un résultat déjà très encourageant pour le Principe de Mach –, mais que des infinis apparaissaient, rendant la théorie inutilisable, sauf, mentionnait Hawking en fin d'article, si jamais l'univers comportait des masses négatives…

Ceci m'amène à la cosmologie de Dirac-Milne, un univers avec autant de masses positives que de masses négatives, et que je décris dans le dernier chapitre de l'ouvrage. Le lecteur doit être conscient que cette cosmologie est à ce stade considérée comme très exotique, car impliquant un univers symétrique matière-antimatière que les études menées dans les années 1960, puis à la fin des années 1980 et au début des années 1990, semblaient avoir définitivement exclu. Mais à cette époque, une gravité répulsive et une violation de la positivité de l'énergie étaient également considérées comme totalement impossibles, alors que la découverte de l'accélération de l'expansion de l'univers en 1998 a mis les physiciens devant le fait accompli : la gravité répulsive est un élément essentiel de notre univers… Au-delà de la question de savoir si cette cosmologie est vérifiée ou non,

on peut constater que l'univers de Dirac-Milne comporte des éléments de ressemblance étonnants avec notre univers sous de nombreux aspects : âge, nucléosynthèse, distance de luminosité en fonction du redshift, et même le fond diffus cosmologique. Que l'antimatière « antigravite » ou non, il me semble que la description de la méthode scientifique utilisée pour proposer et, dans le même temps, mettre à l'épreuve de l'expérience une cosmologie non-standard pouvait intéresser, voire passionner le lecteur, et qu'il me pardonnera d'avoir développé ce thème personnel de recherche, qui m'a passionné moi-même au fil des trente dernières années.

Dans un futur proche, probablement aux alentours de l'année 2020, et dans une hypothèse optimiste dès 2018, trois expériences au CERN, AEgIS, Gbar et ALPHA-g, devraient parvenir à tester l'hypothèse de l'antigravité et mesurer les trajectoires d'atomes d'antihydrogène individuels dans le champ de gravitation terrestre, une performance expérimentale extraordinaire. La mise en évidence de cette antigravité constituerait évidemment une révolution par rapport à l'expression actuelle du principe d'équivalence, même si, comme j'ai essayé de le montrer, la relativité générale elle-même, dès lors qu'elle considère des systèmes composés de masses positives et négatives liées entre elles, viole elle-même le principe d'équivalence dans son expression habituelle, dans le sens où elle sait fabriquer des systèmes qui lévitent…

En définitive, j'espère avoir justifié le titre de ce livre, « L'insoutenable gravité de l'univers », à la fois parce que nos

observations nous révèlent un univers qui ne décélère pas, voire qui accélère, et qui contient donc un ingrédient qui vient compenser la gravité attractive que nous connaissons bien, mais aussi parce que l'étrangeté de notre modèle cosmologique standard, avec sa matière noire et son énergie noire très prédominantes, révèle très probablement notre manque de compréhension d'un élément essentiel de la gravitation.

Pour quelqu'un qui envisagerait de se lancer dans la recherche scientifique, et j'espère que mon livre touchera quelques-uns d'entre eux, quelles que soient les difficultés de l'entreprise, l'époque actuelle se révèle extraordinaire d'opportunités, avec une croissance remarquable des connaissances dans le domaine de la cosmologie : les premières observations, qui s'annoncent de plus en plus nombreuses, par LIGO et VIRGO des ondes gravitationnelles, avec d'étonnants couples de trous noirs de masse de plusieurs dizaines de masses solaires, totalement inattendus, et qui seront étudiés en grand détail dans les années 2030 par LISA dans l'espace et Einstein Telescope au sol, le fonds diffus cosmologique à 2,7 Kelvin, avec les stupéfiantes cartes de température et de vitesse d'effondrement par le satellite Planck, et les grands programmes d'observation comme SDSS ou DES, bientôt renforcés à partir du début des années 2020 par EUCLID dans l'espace et par LSST au sol, devraient permettre de progresser notablement dans notre compréhension de la cosmologie et de la gravitation.

C'est la multiplicité de ces données, et l'approfondissement des modèles théoriques que nous avons décrits dans ce

livre, qui permettront peut-être de comprendre en quoi la gravité n'est pas une interaction comme les autres, mais plus probablement une sorte de condition aux limites dans un univers fondamentalement *sans* gravitation. Et pourquoi elle a de ce fait résisté si longtemps au mariage entre relativité et mécanique quantique…

A l'issue de ce livre, je voudrais également remercier mes collègues et amis scientifiques qui ont accepté de relire tout ou partie de cet ouvrage : leurs contributions à corriger les erreurs et imprécisions initiales leur doit beaucoup, et les erreurs ou imprécisions qui ont résisté à leur relecture sont entièrement de ma responsabilité. Que le lecteur qui lit la première édition de cet ouvrage n'hésite pas à m'envoyer ses critiques ou commentaires : ils seront lus avec attention et viendront enrichir et corriger les éditions suivantes.

Cet ouvrage n'aurait pas pu aboutir sans la confiance que m'ont accordée Sophie Bancquart et Juliette Thomas, qui ont su supporter mes retards sur le planning initial. Un énorme merci tout particulier à Juliette pour son énorme travail de critique constructive et d'amélioration constante de ce manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Trous noirs

Alain Riazuelo, *Les trous noirs, à la poursuite de l'invisible*, Paris, Vuibert, 2016.

Kip Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps : l'héritage sulfureux d'Einstein*, Paris, Flammarion, 2009.

Le physicien Kip Thorne, qui a été le coordinateur du projet LIGO de détection des ondes gravitationnelles, pour lequel il a reçu en 2017 le prix Nobel de physique, a par ailleurs été le conseiller scientifique du film *Interstellar*, dont les scènes d'approche d'un hypothétique trou de ver, et de sa traversée vers un deuxième univers, sont réalisées à partir de simulations sur ordinateur utilisant la relativité générale.

Edwin F. Taylor, John Archibald Wheeler, *Spacetime Physics*, 2nd Édition, Londres, W. H. Freeman, 1992.

Marek Artur Abramowicz, « Black holes and the centrifugal force paradox », *Scientific American*, volume 268, n°3, Mars 1993.

Alain Riazuelo, « Voyage au cœur d'un trou noir » :
https://www.youtube.com/watch?v=GWRzVyX53ZU

Les simulations numériques permettent d'imaginer les déformations de la sphère étoilée qui résulteraient de la chute dans un trou noir. Par exemple, Alain Riazuelo, que nous citons plus haut pour son livre sur les trous noirs, a réalisé un film intitulé « Voyage à l'intérieur d'un trou noir », qui montre le rétrécissement de la sphère de photons qui arrive sur l'observateur au fur et à mesure de sa chute dans un trou noir.

Roy P. Kerr, « Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics », *Physical Review Letters*, volume 11, n°5, Septembre 1968, p. 237. L'article original de Kerr, très mathématique, sur la géométrie d'un trou noir en rotation.

Un exposé quelque peu plus pédagogique, mais de niveau encore très élevé, sur les trous noirs de Kerr (en rotation), et de Kerr-Newman (en rotation et chargés) peut se trouver dans les articles suivants de Carter, que je résume dans le texte :

Brandon Carter, « Complete analytic extension of the symmetry axis of a Kerr's solution of Einstein's equations », *Physical Review Letters*, volume 141, n°4, Janvier 1966.

Brandon Carter, « Global structure of the Kerr family of gravitational fields », *Physical Review Letters* , volume 21, n°22, Novembre 1968, p. 1559.

Hal M. Haggard, Carlo Rovelli, « Black hole fireworks : quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling », *Physical Review Letters*, volume 92, n°10, November 2015.

Plus anecdotique, l'article précédent discute la symétrie white hole-black hole.

Trous de ver

Kip S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps. L'héritage sulfureux d'Einstein*, Paris, Flammarion, 2009.

R. Schoen and S.-T. Yau, « On the proof of the positive mass conjecture in general relativity », *Communication in Mathematical Physics*, n°65, 1979, p. 45.

E. Witten, « A new proof of the positive energy theorem », *Communication in Mathematical Physics*, n°80, 1981, n°381.

R. Penrose, « Gravitational collapse and space-time singularities », *Physical Review Letters*, volume 14, n°3, 1965, p. 57.

Brandon Carter, « Complete analytic extension of the symmetry axis of a Kerr's solution of Einstein's equations », *Physical Review Letters*, volume 141, n°4, Janvier 1966, p. 1242.

Brandon Carter, « Global structure of the Kerr family of gravitational fields », *Physical Review Letters*, volume 21, n°22, Novembre 1968, p. 1559.

Nous avons déjà cité dans le chapitre consacré aux trous noirs les deux articles précédents, fondateurs, de Brandon Carter, établissant un lien entre trous de ver et particules élémentaires.

H. I. Arcos, J. G. Pereira, « Kerr-Newman solution as a Dirac particle », *General Relativity and Gravitation*, volume 36, n°11, Novembre 2004, pp 2441–2464. Disponible sur arXiv :hep-th/0210103.

Le lien entre trous de ver et particules élémentaires a été renforcé et précisé par l'article précédent, où la géométrie de Kerr-Newman montre une analogie très forte avec l›équation de Dirac, qui introduit l›antimatière comme la matière d›énergie négative et remontant le temps.

Michael S. Morris, Kip S. Thorne, et Ulvi Yurtsever, « Wormholes, time machines, and the weak energy condition », *Physical Review Letters*, volume 61, n°4, Septembre 1988, p. 1446.

Michael S. Morris et Kip S. Thorne, « Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel : a tool for teaching general relativity », *American Journal of Physics*, volume 56, n°5, Juillet 1988, p. 395.

John Friedman, Michael S. Morris, Igor D. Novikov, Fernando Echeverria, Gunnar Klinkhammer, Kip S. Thorne, et Ulvi Yurtsever, « Cauchy problem in spacetimes with closed timelike curves », *Physical Review Letters*, volume 42, n°6, Septembre 1990, p. 1915.

Matt Visser, Sayan Kar, Naresh Dadhich, « Traversable wormholes with arbitrarily small energy condition violations », *Physical Review Letters*, volume 90, Avril 2003.

Matt Visser, *Lorentzian Wormholes. From Einstein to Hawking*, American Institute of Physics, Maryland, 1996.

Saoussen Mbarek, M. B. Paranjape, « Negative mass bubbles in de Sitter space-time », *Physical Review Letters*, volume 90, n°10, Juillet 2014.

Ondes gravitationnelles

C'est le CNRS qui a financé les équipes françaises impliquées dans la construction de Virgo, projet majoritairement franco-italien, financé en Italie par l'INFN (Institut de physique nucléaire italien), puis d'Advanced Virgo, dont les équipes ont co-signé la première observation de septembre 2015 : https://lejournal.cnrs.fr/ondes-

gravitationnelles, également publié dans le numéro 1 de Carnets de Science

Comme très souvent, la page Wikipedia.fr constitue une très honnête source d'information: https://fr.wikipedia.org/wiki/Onde_gravitationnelle

Le site de Futura-sciences contient également plusieurs bons articles sur les ondes gravitationnelles et leur découverte:

http://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/onde-gravititationnelle-ondes-gravitationnelles-einstein-triomphe-nouveau-61597/

Pour un exposé sur les ondes gravitationnelles et la mise en œuvre historique des premiers moyens de détection, le livre de Joseph Weber est disponible à un prix raisonnable en édition électronique:

Joseph Weber, *General Relativity and Gravitational Waves* , Kindle, Dover, 2004.

Dépassant largement par son contenu les seules ondes gravitationnelles, le livre de Kip Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps*, que j'ai cité par ailleurs, consacre un long chapitre à cette question, ce qui permet de rappeler que Kip Thorne est l'un des fondateurs, dès 1984, du projet LIGO et a été pour cette contribution l'un des récipiendaires du prix Nobel 2017 de physique, aux côtés de Barry Barish et de Rainer Weiss.

Gravité et information

Jacob Bekenstein, le premier à avoir proposé l'expression de l'entropie des trous noirs, décrit avec humour, émotion et modestie l'historique de son idée dans l'article « Black hole thermodynamics » paru dans *Physics Today*, volume 33, page 24, 1980.

Stephen Hawking, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, 2008.

Hawking est le premier qui a décrit le mécanisme de rayonnement thermique des trous noirs, confirmant la cohérence de l'entropie de Bekenstein. Il décrit cette idée, ainsi que ses réflexions sur le paradoxe de l'information qui a suivi, dans cet ouvrage devenu best-seller.

Une littérature abondante existe sur le « paradoxe » de l'information dans les trous noirs. On peut citer en particulier l'article fondateur de Hawking, basé sur le travail de Bekenstein:

S. Hawking, « Breakdown of predictability in gravitational collapse », *Physical Review Letters*. volume 14, n°10, Novembre 1976 p. 2460.

L. Susskind, *The black hole war. My battle with Stephen Hawking to make the world safe for quantum mechanics*, Little, Brown and Company, 2008.

La discussion animée résultant des points de vue opposés entre Kip Thorne et Stephen Hawking, d'une part, et John Preskill et Leonard Susskind, d'autre part, a conduit à une littérature abondante. On pourra en particulier consulter ce livre de vulgarisation.

Stephen Hawking concède que l'information ne se perd pas dans le processus d'évaporation des trous noirs dans l'article suivant :

Stephen Hawking, « Information Loss in Black Holes », *Physical Review*, volume 72, n°8, Octobre 2005. Disponible sur https://arxiv.org/abs/hep-th/0507171

Pour une présentation accessible de la notion d'univers holographique et de la conjecture de Maldacena, on pourra se référer à l'article de Jacob Bekenstein dans Scientific American, numéro d'avril 2007, accessible via le lien :

https://www.scientificamerican.com/article/information-in-the-holographic-univ/

Le lecteur plus expert pourra consulter les articles du site Scholarpedia, qui propose des articles, généralement ardus mais de haute qualité, et qui sont rédigés par les acteurs eux-mêmes des sujets de recherche. Par exemple, la page suivante rédigée sauf erreur par Jacob Bekenstein :

http://www.scholarpedia.org/article/Bekenstein_bound

Erik Verlinde décrit l'idée d'une gravité comme une propriété émergente dans l'article :

« On the Origin of Gravity and the Laws of Newton », *Journal of High Energy Physics*. n°4, Avril 2011. Disponible sur https://arxiv.org/abs/1001.0785

Le théoricien indien Thanu Padmanabhan décrit de son côté la gravité comme une sorte de condition aux limites et une force apparente introduite par l'élasticité de l'espace-temps, considéré comme un solide cristallin, dans l'article disponible en accès libre sur : https://arxiv.org/abs/gr-qc/0408051

T. Padmanabhan, « Gravity as elasticity of spacetime : a paradigm to understand horizon thermodynamics and cosmological constant », *International Journal of Modern Physics* volume 13, n°10, Décembre 2004, p. 2293.

L'article suivant dans Nature constitue une présentation simple du « firewall paradox » posé par Joseph Polchinski en 2012 :

Zeeya Merali, « Fire in the hole », *Nature*, volume 496, Avril 2013, p. 20.

L'idée avancée par John Preskill et Daniel Harlow établissant un lien entre les codes de correction quantiques et la question de l'information d'un trou noir est décrite avec quelques modèles concrets dans l'article suivant, également disponible sur arXiv : https://arxiv.org/abs/1503.06237

F. Pastawski, B. Yoshida, D. Harlow, J. Preskill, « Holographic quantum error-correcting codes », *Journal of High Energy Physics*, n°06, Juin 2015, p. 149.

Théories des cordes

G. Veneziano, « Construction of a crossing-simmetric, Regge-behaved amplitude for linearly rising trajectories », Il Nuovo *Cimento*, n°57, 1968, pp 190-197.

L. Susskind, « The Anthropic Landscape of String Theory », arXiv :hep-th/0302219, disponible sur https://arxiv.org/abs/hep-th/0302219. Les arguments de Susskind sont également développés dans le chapitre éponyme qui figure dans l'ouvrage :

Universe or Multiverse ?, Bernard Carr, Cambridge University Press, 2009.

B. Carter, « Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology », Symposium - International Astronomical Union, volume 63, 1974, pp 291-298.

Théories discrètes

T. Regge, « General relativity without coordinates », *Il Nuovo Cimento*, n°19, 1961, pp 558-571.

La page Wikipedia suivante fournit un bon point d'entrée sur le « Jeu de la vie » (« *Game of Life* ») de John Conway : https://en.wikipedia.org/wiki/Conway%27s_Game_of_Life

Stephen Wolfram, « Statistical mechanics of cellular automata », *Reviews of Modern Physics*, volume 55, n°3, Juillet-Septembre 1983, p. 601.

C. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler, *Gravitation*, W. H. Freeman and Company, 1973, chapitre 44.

Carlo Rovelli, *Par-delà le visible. La réalité du monde physique et la gravité quantique*, Odile Jacob, 2015.

Site *Digital Philosophy* de Edward Fredkin : www.digitalphilosophy.org

G. 't Hooft, « Quantum gravity as a dissipative deterministic system », *Classical and Quantum Gravity*, volume 16, n°10, 1999, pp 3263-3279.

J. Ambjørn, J. Jurkiewicz et R. Loll, « Emergence of a 4D World from Causal Quantum Gravity », *Physical Review Letters*, volume 93, n°13, Septembre 2004.

Principe de Mach

Michael Berry, *Principles of cosmology and gravitation*, CRC Press, 1989.

Ce remarquable petit livre expose avec clarté les principes généraux de la cosmologie, et propose également l'un des très rares exposés sur le principe de Mach, au chapitre 3 de l'ouvrage.

Les deux articles suivants décrivent dans quelles conditions une expression symétrique dans le temps des interactions électromagnétiques, où chaque charge émet avec des amplitudes égales une onde avancée et une onde retardée, permet de réaliser le programme de Mach pour les interactions entre particules chargées :

J.A. Wheeler et R. P. Feynman, « Interaction with the absorber as the mechanism of radiation », *Reviews of Modern Physics*, volume 17, n°2-3, Avril-Juin 1945.

J.A. Wheeler et R. P. Feynman, « Classical electrodynamics in terms of direct interparticle action », *Reviews of Modern Physics*, volume 21, n°3, Juillet 1949.

Une conférence dédiée au principe de Mach s'est tenue en 1993 à Tubingen (Allemagne) et a donné lieu à un volume parfois difficile, mais passionnant par son interdisciplinarité, des principaux auteurs qui ont étudié le principe de Mach :

Julian B. Barbour et Herbert Pfister, *Mach's Principle. From Newton's Bucket to Quantum Gravity*, Einstein Studies, Volume 6, Birkhäuser, 1995.

Univers de Dirac-Milne

L'univers de Dirac-Milne que je décris dans ce chapitre est décrit dans l'article qui passe en revue l'essentiel des tests cosmologiques à l'exception des oscillations acoustiques baryoniques. En ce qui concerne la nucléosynthèse, cet article explique pour quelle raison deutérium et hélium-3 sont produits dans l'univers de Dirac-Milne – alors qu'ils sont détruits dans un univers de Milne sans antimatière –, du fait de l'annihilation matière-antimatière pendant les phases initiales de l'univers, (avec même une surproduction assez forte d'hélium-3).

Aurélien Benoit-Lévy et Gabriel Chardin, « Introducing the Dirac-Milne universe », *Astronomy and Astrophysics* volume 537, n°78, 2012.

Le comportement très contre-intuitif des masses négatives en relativité générale est décrit dans l'article :

R.H. Price, « Negative mass is positively amusing », *American Journal of Physics*, n°61, pp. 216-217 (1993)

J'ai cité plus haut l'article de Saoussen Mbarek et Manu Paranjape construisant une sorte de « bulle » de masse négative dans un espace-temps de Sitter, dont la référence originale est :

S. Mbarek and M.B. Paranjape, *Physical Review*, volume 90, n°10, 2014, p. 1502.

On pourra également consulter l'article plus accessible paru dans *Physics Today*, également, accessible sur http://physicstoday.scitation.org/do/10.1063/PT.6.3.20170524a/full/ :

M.B. Paranjape, « Don't dismiss negative mass », *Physics Today*, May 2014

Les corrélations dans les mouvements des galaxies naines au voisinage d'Andromède ont été étudiées pour la première fois dans l'article suivant de Rodrigo Ibata et son fils Neil, alors que celui-ci n'avait encore que 15 ans :

Neil G. Ibata, Rodrigo A. Ibata, Benoit Famaey & Geraint F. Lewis, « Velocity anti-correlation of diametrically opposed galaxy satellites in the low-redshift Universe », *Nature*, volume 511, 2014, pp 563-566.

Un assez grand nombre d'auteurs ont remarqué que l'univers gravitationnellement vide – c'est-à-dire qui ne décélère ou n'accélère pas – ressemble par de nombreux aspects à notre univers. C'est le cas par exemple pour son âge, comme l'ont noté plusieurs auteurs et notamment:

Marek Kutschera et Michau Dyrda, *Acta Physica Polonica* B, vol 38 (2007), pp 215-217, ainsi que la référence Sethi et al. indiquée ci-dessous

Le fait que la nucléosynthèse – la production des éléments nucléaires légers dans l'univers primordial – puisse être assez remarquablement expliquée – sauf pour le deutérium – dans l'univers gravitationnellement vide de Milne a été remarqué pour la première fois par un groupe de théoriciens indiens. Dans cet article, les auteurs remarquent d'ailleurs que cet univers de Milne satisfait à un grand nombre de tests cosmologiques:

M. Sethi, A. Batra, D. Lohiya, «A "Freely Coasting"» *Universe Physical Review*, volume 60, n°10, 1999.

Les articles suivant ont été ensuite critiqué, avec des arguments incorrects, par Gary Steigman et son groupe, où les auteurs ont noté, de façon correcte, que deutérium et hélium-3 sont détruits de façon très efficace dans la fournaise très lente d'un univers sans décélération, ce qui amène à une contradiction avec l'expérience si on ne trouve pas de moyen de produire plus tard deutérium et hélium-3 (comme c'est le cas dans les phases initiales d'un univers matière-antimatière).:

M. Kaplinghat, G. Steigman, I. Tkachev, T.P. Walker, «Observational constraints on power-law cosmologies» *Physical Review*, volume 59, n°4, Février 1999.

puis, dans un deuxième article:

M. Kaplinghat, G. Steigman, T.P. Walker, «Nucleosynthesis in power-law cosmologies», *Physical Review*, volume 61, n°10, Avril 2000.

Dès 2005, Chodorowski avait noté que l'univers «vide» de Milne fournit une variation de la luminosité des supernovæ de type 1a en fonction de la distance remarquablement proche de l'univers du modèle cosmologique standard.

M.J. Chodorowski, *Publications of the Astronomical Society of Australia* (2005) 22, 287-291

Dans notre article d'Astronomy and Astrophysics cité ci-dessus, nous détaillons plus précisément le point faible de l'analyse des supernovæ, qui se situe probablement dans la détermination de la luminosité absolue des supernovæ SN1a « chandelles standard » à partir des supernovæ proches, ainsi que dans les variations de spectre et de luminosité en fonction de la galaxie sous-jacente. Ce problème d'évolution ou d'influence de l'environnement des chandelles standard que sont censés être les supernovæ de type 1a est abordé dans l'article :

M. Sullivan, A. Conley, D. A. Howell, J. D. Neill, P. Astier, C. Balland, S. Basa, R. G. Carlberg, D. Fouchez, J. Guy, D. Hardin, I. M. Hook, R. Pain, N. Palanque-Delabrouille, K. M. Perrett, C. J. Pritchet, N. Regnault, J. Rich V. Ruhlmann-Kleider, S. Baumont, E. Hsiao, T. Kronborg, C. Lidman, S. Perlmutter, E. S. Walker, « The dependence of Type Ia Supernovae luminosities on their host galaxies », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, volume 406, n°2, Août 2010, pp 782-802.

Subir Sarkar et un petit groupe de collaborateurs à l'université d'Oxford ont repris avec un échantillon plus large de données - mais sans la citer - notre analyse critique des données des supernovæ en détaillant les raisons pour lesquelles l'univers gravitationnellement vide de Milne est pratiquement indistinguable de l'univers du modèle cosmologique standard. Publié dans *Nature*, leur article, abrévié NGS par la communauté scientifique, a créé un « buzz important », même s'il n'apporte en fait pas beaucoup de nouveautés par rapport aux analyses critiques antérieures :

J. T. Nielsen, A. Guffanti & S. Sarkar, « Marginal evidence for cosmic acceleration from Type Ia supernovae », *Nature*, Scientific Reports 6, 35596 (2016).

Ce coup de pied dans la fourmilière a bien sûr été contesté, comme par exemple par Ringermacher et Mead dans l'article (assez faible) :

H. I. Ringermacher, L. R. Mead, arXiv :1611.00999, « In Defense of an Accelerating Universe : Model Insensitivity of the Hubble Diagram », *American Astronomical Society*, et plusieurs autres articles.

Fred Witteborn et William Fairbank ont prétendu avoir mesuré la masse gravitationnelle de l'électron. C'est sans doute l'une des mesures

les plus fausses de toute l'histoire de la revue *Physical Review Letters* entre sa précision réelle et sa précision annoncée:

F. C. Witteborn et W. M. Fairbank, « Experimental Comparison of the Gravitational Force on Freely Falling Electrons and Metallic Electrons », *Physical Review Letters*, volume 19, n°18, Octobre 1967.

Timothy Darling et plusieurs collaborateurs ont étudié dans l'article suivant de la revue de référence *Reviews of Modern Physics* les facteurs qui rendent extrêmement difficiles, pour ne pas dire pratiquement impossibles, la mesure de la masse gravitationnelle de particules chargées:

T. W. Darling, F. Rossi, G. I. Opat, et G. F. Moorhead, « The fall of charged particles under gravity. A study of experimental problems », *Reviews Modern Physics*, volume 64, n°1, Janvier 1992, p.237.

Leonard Schiff et Maurice Barnhill ont été sans doute les premiers à s'intéresser aux champs électriques induit dans un métal par un champ de gravitation:

L. I. Schiff et M. V. Barnhill, « Gravitation-Induced Electric Field near a Metal », *Physical Review*, volume 151, n°4, novembre 1966.

Mais un autre groupe de physiciens, connu sur l'abréviation DMRT (les initiales de leurs noms A. J. Dessler, F. C. Michel, H. E. Rorschach, et G. T. Trammell) ont montré que les champs électriques induits étaient probablement beaucoup plus forts que ceux qu'avaient envisagé Schiff et Barnhill (et qu'avaient cru mesurer Witteborn et Fairbank):

A. J. Dessler, F. C. Michel, H. E. Rorschach, et G. T. Trammell, « Gravitationally Induced Electric Fields in Conductors », *Physical Review* 168, 737 (1968)

Après ces tentatives avortées de mesurer la masse gravitationnelle de particules chargées, l'expérience ALPHA au CERN a publié la première mesure qui se rapproche de la précision nécessaire afin d'être sensible à la masse gravitationnelle de l'antihydrogène, bien que sa sensibilité se situe encore à un facteur 65 de tester l'antigravitation:

The ALPHA Collaboration, A. E. Charman, « Description and first application of a new technique to measure the gravitational mass of antihydrogen », *Nature Communications*, vol 4, 1785 (2013)

La méthode qui a changé la donne pour la mesure de la masse

gravitationnelle de l'antihydrogène a été proposée par le prix Nobel Theodor Hänsch et son collaborateur Jochen Walz dans l'article:

Jochen Walz et Theodor W. Hänsch, «A Proposal to Measure Antimatter Gravity Using Ultracold Antihydrogen Atoms», *General Relativity and Gravitation*, 36 (2004) 561–570.

L'expérience GBAR de mesure de la masse gravitationnelle de l'antihydrogène est décrite dans l'article:

Paul Indelicato, Gabriel Chardin, et al. «The GBAR project, or how does antimatter fall?», *Hyperfine Interactions*, volume 228, n°1–3, Octobre 2014, pp 141–150.

J'ai cité par ailleurs l'ouvrage de Kip Throne:

Kip S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps. L'héritage sulfureux d'Einstein*, Flammarion, Paris, 2009. Un chapitre décrit la solution au «paradoxe du grand-père» dans la version mise en scène par Joseph Polchinski.

Conclusion

S. W. Hawking, *Proceedings of the Royal Society London* Ser. A, 286 (1965) 313.

F. Hoyle et J.V. Narlikar, *Proceedings of the Royal Society London* Ser. A, 282 (1964) 19.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 3

L'INSOUTENABLE GRAVITÉ DE L'UNIVERS, MODE D'EMPLOI 7

LA COSMOLOGIE, D'ARISTOTE À NEWTON 15
- Ératosthène 16
- Aristote 17
- Ptolémée 20
- L'influence de la religion sur les modèles cosmologiques ... 23
- Copernic 25
- Kepler 29
- Galilée 32
- Newton, sur la Terre comme au ciel... 41
- Confirmations et prédictions 46
- Pour en savoir plus 49

LES DEUX THÉORIES DE LA RELATIVITÉ D'EINSTEIN 51
- La mystérieuse constante « c » 51
- La théorie de la relativité, ou la théorie de l'invariance ? 59
- Qui est l'inventeur de la relativité restreinte ? 64
- Quelques conséquences expérimentales de la relativité restreinte 65
- La relativité générale d'Einstein 70
- Les équations d'Einstein et leur signification 78
- L'Univers comme un objet dynamique, la cosmologie de Lemaître 85
- Sommes-nous sûrs de l'existence du Big Bang ? 91
- Tests expérimentaux de la relativité générale 96
- La relativité générale est-elle parfois mise en défaut ? 112

Ce qu'il faut retenir 120
Pour en savoir encore plus 122

LES TROUS NOIRS EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE 129
Une étoile qui piège sa propre lumière... 129
Trous noirs de Schwarzschild et de Kerr,
deux « familles » pleines de surprises 133
La perte du contenu de matière 142
Chute dans un trou noir 144
Autres questions... 152
Ce qu'il faut retenir 160
Pour aller plus loin 161

TROUS DE VER ET MACHINES À VOYAGER DANS LE TEMPS . 165
Du pont d'Einstein-Rosen aux solutions
« pathologiques » du trou de ver de Kerr-Newman 166
Dans quelle mesure l'énergie
peut-elle devenir négative ? 173
Carl Sagan entre en scène :
le temps de la mise en œuvre 182
Les trous de ver conduisent-ils à des paradoxes ? 184
Les trous de ver existent-ils réellement dans la Nature ? ... 189
Ce qu'il faut retenir 192
Pour aller plus loin 194

LA DÉCOUVERTE DES ONDES GRAVITATIONNELLES 197
La découverte, un siècle après Einstein 197
Les ondes gravitationnelles, rides sur l'espace-temps 199
Détecter les ondes gravitationnelles 202
à la recherche des ondes gravitationnelles primordiales 224
Ce qu'il faut retenir 226
Pour aller plus loin 227

GRAVITÉ ET INFORMATION 233
Les quatre principes de la thermodynamique 233
Les principes de la mécanique des trous noirs 238
Le « paradoxe » de l'information des trous noirs 251

Le «*firewall paradox*» 255
La gravitation comme force émergente ou statistique ? 259
Gravitation et intrication quantique 264
Autres liens 267
Ce qu'il faut retenir 270
Pour aller plus loin 271

THÉORIE DES CORDES ET DIMENSIONS CACHÉES 275
Unification des interactions faible, forte et électromagnétique 276
Est-il nécessaire de quantifier la gravitation ? 282
Construction et première révolution de la théorie des cordes 284
Masse de Planck et masses des particules élémentaires 292
Dimensions supplémentaires et espaces de Calabi-Yau 297
La deuxième révolution des cordes : la théorie M et les branes 302
Le paysage de la théorie des cordes 306
Ce qu'il faut retenir 309
Pour aller plus loin 312

GRAVITÉ ET ESPACE-TEMPS DISCRET 317
Qu'est-ce qu'un espace-temps discret ? 317
Quelle quantité d'information dans l'Univers observable ? 322
Spineurs, twistors et autres gravités quantiques à boucles 326
L'Univers est-il un ordinateur ? 331
Le «Jeu de la vie» de John Conway 333
Ce qu'il faut retenir 338

LE PRINCIPE DE MACH 341
Einstein, promoteur puis détracteur du principe de Mach 342
L'univers absorbeur de Wheeler et Feynman 347
La masse inertielle comme un effet de réaction gravitationnelle 354
Coalescence de deux trous noirs 361

Théorie des champs ou action à distance ? 364
Ce qu'il faut retenir 368
Pour aller plus loin 370

L'UNIVERS DE DIRAC-MILNE 373
Pourquoi l'étude de l'univers de Dirac-Milne ? 373
Forces et faiblesses du modèle cosmologique standard 375
Masse négative, pression négative et température négative étranges ; antimatière en relativité générale 385
L'univers de Dirac-Milne, ingrédients d'un modèle alternatif au modèle cosmologique standard 411
Test observationnels de l'univers de Dirac-Milne 419
Peser l'antimatière 430
Ce qu'il faut retenir 438
Pour en savoir plus 439

CONCLUSION 443

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 449

IMPRIM'VERT®

Imprimé en France par la Nouvelle Imprimerie LABALLERY à Clamecy
N° d'imprimeur : 802218 - Dépôt légal : mars 2018
N° d'édition : 74651083-01

Einstein l'a apprivoisée dans sa théorie de la relativité générale mais elle nargue la physique quantique : la gravité, force pourtant la plus immédiate à nos sens (repensez à la pomme de Newton), résiste à l'infiniment petit…

Dès lors, comment avoir une vision unifiée de l'Univers, de ses confins à ses composants les plus infimes, de sa naissance à ses derniers instants ? C'est l'une des dernières grandes énigmes de la cosmologie… et actuellement l'une des aventures scientifiques les plus passionnantes !

Hawking, Maldacena, Thorne, Susskind… Vous allez croiser les chercheurs les plus brillants qui, chacun dans leur domaine, ont contribué à lever un pan du mystère. Mais peut-être faut-il se montrer plus audacieux encore…

Gabriel Chardin propose, carrément, un nouveau modèle d'Univers, dans lequel il donne un rôle de premier plan à l'antimatière, énigmatique jumelle de la matière dont on avait perdu la trace depuis les premières secondes après le Big Bang.

Son hypothèse, aussi révolutionnaire que patiemment élaborée, nous livre alors une histoire de l'Univers sans zones d'ombre. Adieu énergie et matière noires…

Directeur de recherche au CNRS, où il a reçu la médaille d'argent en 2007, **Gabriel Chardin** y préside le Comité des très grandes infrastructures de recherche (TGIR).

9 782746 510838
Diffusion Humensis
74651083
25 €