

PIERRE **BINÉTRUY**

À LA POURSUITE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Dernières nouvelles de l'Univers

DUNOD

Crédits photographiques

p. 60: R. Hurt (SSC), JPL-Caltech, NASA; p. 63: NASA, ESA, R. Ellis (Caltech), and the UDF 2012 Team; p. 64: NASA, ESA, the Hubble Heritage Team; p. 67: V. Springer/Virgo Consortium; p. 71 gauche: NASA; p. 73: Niedzwiedek78; p. 75: John Dubinski/University of Toronto; p. 112: james633-Fotolia.com; p. 115: NASA/WMAP Science Team/ NASA/ JPL-Caltech/ESA; p. 116-117: ESA and the Planck Collaboration; p. 118: ESA, HFI & LFI consortial; p. 119: NASA/JPL; p. 126: NASA/CXC/M. Weiss; p. 127: Hubble Space Telescope NASA; p. 144: bennnn-Fotolia.com; p. 145: Attila Csorgo; p. 154: NASA/CXC-Digitized Sky Survey; p. 156: ESO; p. 157: Hubble ESA/NASA; p. 184: Caltech-Cornell; p. 197: University of Maryland (College Park, Md.); p. 219: ESA; p. 233: ESA.

Illustrations de l'intérieur: Rachid Maraï

Illustration de couverture: © Sakkmasterke/Shutterstock

Photo de plat 4 de couverture: Mary Erhardy

© Dunod, 2015, 2016
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-076013-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

AVANT-PROPOS

Ce livre est une introduction à l'univers de la gravité. Il ne nécessite pas de connaissance scientifique particulière; il évite toute la formulation mathématique qui constitue l'ossature de la théorie d'Einstein, la relativité générale. Mais il cherche toutefois à en présenter les idées et les concepts, ceux qui sont les mieux établis comme ceux qui sont l'objet des recherches les plus actuelles et de débats au sein de la communauté scientifique. Les comprendre nécessite un investissement personnel, mais, en principe, tous les outils nécessaires sont présents dans ce livre.

Le prologue donne une vision d'ensemble, une feuille de route de ce qui vous attend. La lecture peut se poursuivre de façon linéaire, de chapitre en chapitre. Vous y trouverez des encadrés qui précisent une notion, ou des informations plus techniques. Ils peuvent satisfaire votre curiosité ou bien être laissés de côté.

Mais peut-être serez-vous impatients de connaître la suite... Les focus en fin de chapitre se feuilletent à votre guise. Ils gagnent bien sûr à être lus à la suite du chapitre associé. Toutefois, ils se concentrent sur un aspect particulier et doivent pouvoir être découverts séparément.

J'ai porté une attention particulière à deux outils de lecture importants, situés en fin de volume : le glossaire et l'index. Ce dernier relie les différents thèmes couverts par le livre : vous y verrez que les concepts réapparaissent sous des éclairages divers qui permettent de mieux en cerner les contours. Au gré de vos futures lectures (je ne doute pas que les prochaines années seront fertiles en découvertes dans ce domaine), vous pourrez rapidement retrouver grâce à l'index les explications adéquates, ou les scientifiques qui ont contribué au développement des idées et aux découvertes.

Ce livre se veut donc aussi un outil pour comprendre aujourd'hui et demain les clés de notre Univers.

Je souhaite terminer en remerciant tous ceux qui m'ont permis de construire peu à peu cette synthèse de nos connaissances sur la physique de l'Univers grâce à leurs questions et leurs interrogations : spectateurs des diverses conférences grand public que j'ai pu donner, participants aux laboratoires Origins organisés par Marie-Odile Monchicourt et Michel Spiro, journalistes, étudiants, amis... Anne Bourguignon, des éditions Dunod, et Jean-Luc Robert ont su me convaincre d'écrire ce livre. Qu'ils soient aussi remerciés pour leur lecture attentive, ainsi que Gorka Alda, Gérard Auger, Marie Verleure. Ceci m'a été d'une aide précieuse.

Annecy, 30 décembre 2014

Je n'imaginai pas en écrivant cet avant-propos à la première édition que l'histoire de l'Univers gravitationnel s'écrivait si rapidement et que seulement neuf mois plus tard, une onde gravitationnelle serait enfin détectée, cent ans après la prédiction d'Einstein. Un événement majeur qui ne rend que plus nécessaire une vision globale de l'Univers gravitationnel telle que celle présentée dans ce livre.

Je profite de cette nouvelle édition pour remercier les quelques 90 000 participants au cours en ligne «Gravité!» (en français et en anglais) avec lesquels j'ai eu tant de plaisir à partager ces heures si excitantes.

PIERRE BINÉTRUY, Paris, septembre 2016

à G. A., G. G. et S. H.

PROLOGUE

LA NUIT TRANSFIGURÉE

Tâchez de garder toujours un morceau de ciel au-dessus de votre vie.

Marcel Proust, *Du côté de chez Swann*, 1913.

Nous sommes tous déjà sortis un soir d'été par une belle nuit sans lune, et nous sommes extasiés au spectacle des étoiles qui semblaient moucher le ciel noir de scintillements. Après quelques minutes d'attention, nous avons repéré la bande laiteuse de la Voie Lactée, quelques constellations, identifié des couleurs différentes, et deviné un fourmillement de lumières en arrière-plan, laissant entrevoir d'autres étoiles plus lointaines encore. L'Univers s'étend sous nos yeux, dans toute sa majesté et son immuabilité. Et nous nous sentons bien peu de chose, grain de poussière jeté parmi ces grains de lumière, pour une durée dérisoire au regard du temps cosmique. Pendant des siècles, poètes, philosophes, artistes, conteurs ont rêvé, écrit, débattu sur cette perspective vertigineuse s'offrant à celui qui prend le temps de relever la tête et d'observer la nuit étoilée. Tout semble avoir été dit. Et pourtant...

Et pourtant, la physique de ce dernier siècle nous a montré que l'Univers observable est beaucoup plus riche que ce que nos yeux nous révèlent, et que cette richesse est accessible, ici, sur Terre, et maintenant. Accessible par des moyens de détection plus puissants que nos yeux, comme les grands télescopes (cela, nous le savons depuis l'époque de Galilée et de sa lunette). Mais aussi accessible par des moyens de

détection différents, qui ne sondent pas la lumière mais d'autres types de radiation. Et de ceci, nous commençons seulement à en entrevoir les possibilités : voir l'Univers différemment ou accéder à sa nature plus fondamentale.

Revenons à notre nuit étoilée. Chaque grain de lumière est appelé familièrement étoile, mais nous savons depuis longtemps que certains d'entre eux sont les planètes de notre propre système solaire : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Nous savons aussi depuis une centaine d'années que certains de ces points lumineux sont des galaxies, énormes accumulations d'étoiles. Notre propre étoile, le Soleil, fait partie d'un tel ensemble, la Voie Lactée, qui est notre galaxie. Parce que le Soleil est quelque peu à la périphérie de cette galaxie, nous voyons la Voie Lactée par la tranche. D'où sa forme étirée à travers le ciel. L'aspect laiteux est dû à la concentration d'étoiles dans cette direction : un lait d'étoiles. Nous voyons aussi des étoiles de la Voie Lactée dans d'autres directions, bien qu'elles soient plus dispersées. Toutes les étoiles que nous pouvons distinguer dans le ciel font partie de notre galaxie. D'autres points lumineux sont de nature *extragalactique*, c'est-à-dire localisés hors de notre galaxie. En fait, ce sont des galaxies à part entière : elles sont situées tellement loin que l'on ne peut discerner individuellement les étoiles qui les forment.

La découverte de la nature extragalactique de ces sources de lumière – en un mot, la découverte d'autres galaxies – s'est accompagnée dans les années 1920 d'une découverte encore plus surprenante : ces galaxies s'éloignent de nous. Ainsi, l'Univers qui nous avait frappés par son apparente immuabilité est au contraire dynamique. Et puisque toutes les galaxies s'éloignent de nous, il faut bien en déduire que, si nous ne sommes pas à un endroit privilégié, c'est la structure même de l'Univers qui est dynamique : toute galaxie s'éloigne de toute autre galaxie. On traduit ceci en disant que *l'Univers est en expansion*.

C'est en fait la lumière qui nous a fourni la preuve de cette expansion. On peut étudier les corps présents dans chaque astre lumineux en analysant la lumière qu'ils émettent, en particulier sa couleur (liée à sa fréquence). Or, les travaux de Lemaître et Hubble dans les années 1920 montrent que la lumière émise par des corps connus est légèrement

décalée en fréquence vers le rouge, un effet qui serait dû à leur mouvement relatif par rapport à nous. Les objets astrophysiques qui les émettent sont en mouvement par rapport à nous, et ce sont précisément les objets extragalactiques.

Mais la lumière a une autre propriété que sa couleur (fréquence) : elle a une vitesse finie. Et ceci a des conséquences tout à fait remarquables pour notre observateur du ciel étoilé. La lumière émise par un astre met un temps fini pour nous atteindre : 8,32 minutes du Soleil, 100 000 années des confins de la Voie Lactée, 2,5 millions d'années de la galaxie d'Andromède. Ceci signifie donc que, lorsque nous regardons le ciel, nous ne voyons pas l'Univers tel qu'il est aujourd'hui mais plutôt une série de clichés d'autant plus anciens qu'ils sont plus éloignés. Une sorte de film statique qui se déploierait devant nos yeux !

C'est un formidable avantage pour celui qui s'intéresse à l'histoire de l'Univers : celle-ci se déroule sous nos yeux, ici et maintenant. Les astres les plus éloignés que nous voyons aujourd'hui (à environ quatorze milliards d'années-lumière) sont dans l'état où ils étaient au tout début de l'Univers. Que sont-ils devenus aujourd'hui ? Pour le savoir, il faudrait attendre encore quatorze milliards d'années pour que la lumière qu'ils émettent actuellement nous atteigne. À l'inverse, un observateur dans la galaxie d'Andromède voit aujourd'hui la Terre telle qu'elle était il y a 2,5 millions d'années, c'est-à-dire au moment de l'apparition d'*Homo erectus*.

C'est donc une véritable coupe à travers l'espace et le temps que nous fournit la lumière des étoiles et des galaxies. À nous ensuite de reconstituer l'Univers dans son intégralité spatiale et temporelle, un peu comme les cernes d'un tronc fraîchement coupé nous permettent de reconstruire l'histoire de l'arbre et de son environnement.

Mais qu'est-ce qui est responsable de l'expansion de l'Univers ? D'où vient l'énergie nécessaire pour dilater les distances ? La réponse nous est donnée par Einstein. En 1915, il cherche à écrire un système d'équations qui unifierait la description des phénomènes gravitationnels dans le cadre de sa théorie de la relativité restreinte, conçue dix ans auparavant. Ce seront les fameuses équations d'Einstein qui quantifient la déformation de l'espace-temps sous l'effet d'une masse, ou plus

généralement d'une concentration d'énergie, et permettent de calculer la trajectoire d'un objet près d'un corps très massif. Elles forment le cœur de ce qu'on appelle la théorie de la relativité générale.

Einstein cherche très rapidement à appliquer ces équations, non pas seulement à des objets (des astres par exemple) en interaction gravitationnelle, mais à l'Univers tout entier. Et précisément, des solutions existent pour lesquelles l'Univers est en expansion. L'origine de l'expansion est donc à chercher du côté de la force gravitationnelle elle-même. En d'autres termes, l'Univers dans son ensemble est mû par la gravitation ! En paraphrasant Aristote, selon qui Dieu était le premier moteur de l'Univers, nous pouvons dire que *la gravité est le premier moteur de l'évolution de l'Univers*.

Ceci amène à poser la question du statut de la force gravitationnelle au sein des forces fondamentales. C'est la première force dont nous prenons conscience : rappelons-nous de nos efforts de bambins pour nous dresser et marcher... Et pourtant, c'est la plus faible des forces fondamentales. La raison de cet apparent paradoxe ? La force d'attraction est proportionnelle à la masse et nous vivons à proximité (très) immédiate d'un corps très massif, la Terre. Il y a fort à parier que si nous vivions sur un astéroïde, nous attacherions moins d'importance à la gravité. Parce qu'elle est très faible, c'est la force la moins bien connue. On sait qu'elle a une très longue portée : c'est pour cela qu'elle est le moteur de l'évolution de l'Univers. Mais elle est beaucoup moins connue à courte distance que l'autre force à longue portée, la force électromagnétique.

En fait, la théorie de la gravitation s'est développée de façon assez indépendante de celle des autres interactions au cours du xx^e siècle. Alors que l'électromagnétisme permettait d'étudier l'univers microscopique, par exemple en envoyant des particules chargées sur de la matière, et d'y découvrir les lois de la mécanique quantique, la relativité générale a reçu un certain nombre de confirmations tout à fait convaincantes dans notre univers proche, disons dans le système solaire (courbure des rayons lumineux près du Soleil, mouvement des planètes).

L'exploration de l'infiniment petit s'est poursuivie pendant tout le siècle avec la découverte de la force nucléaire ou force nucléaire forte et de la force faible (responsable de certains types de radioactivité), et la mise au point d'accélérateurs de plus en plus puissants pour les étudier.

Puisque les particules circulent dans les accélérateurs à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, il fallait réconcilier *mécanique quantique* et *relativité restreinte*, ce qui fut réalisé dans les années 1940-1950.

Il est apparu que les concepts développés dans le cadre de l'électromagnétisme se généralisaient à la description des forces faibles et fortes, ce qui a abouti à un schéma théorique unifié connu sous le nom de Modèle Standard. La confirmation de ce Modèle a été la découverte de la particule de Higgs au CERN en 2012, dernière brique élémentaire nécessaire à la cohérence du Modèle.

Mais la relativité générale, théorie de la gravitation, s'est développée en parallèle de façon essentiellement indépendante, principalement par des travaux théoriques sur les singularités. Ces singularités sont des comportements « pathologiques » de la théorie, soit dans un passé très lointain (le fameux Big Bang), soit lors de l'écroulement gravitationnel d'une étoile (les non moins fameux trous noirs). Si certains phénomènes, comme l'évaporation des trous noirs identifiée par Stephen Hawking, ont certains aspects quantiques, la relativité générale se refuse toujours à un traitement quantique. Est-ce une théorie qui est de façon inhérente irréconciliable avec la théorie quantique, ou bien faut-il modifier les lois de la mécanique quantique pour y intégrer la théorie de la gravitation ?

Dans les années 1970-1980, un rapprochement s'est toutefois opéré entre les deux théories. Du côté des trois forces non gravitationnelles, c'était la marche vers l'unification et la possibilité, qualifiée de grande unification, que forces électromagnétique, faible et forte ne soient que les avatars à basse énergie d'une force unique qui ne serait détectable qu'à de très hautes énergies. Du côté de la gravitation, c'était la prise de conscience que, plus on remonte dans le temps, et plus l'Univers est chaud et dense, et se réduit à une soupe de particules élémentaires. Or l'intensité de la force gravitationnelle augmente avec la température ; la conséquence est que, dans les tout premiers instants de l'Univers, l'interaction gravitationnelle entre particules élémentaires était aussi forte que les autres (contrairement à l'époque présente où nous avons souligné combien elle est plus faible que les autres forces), et devait donc être soumise aux lois de la mécanique quantique. Toutes les forces fon-

damentales connues, y compris la gravitation, seraient-elles des aspects différents d'une seule force unificatrice ?

Un problème majeur a toutefois mis en exergue la difficulté de réconcilier gravitation et physique quantique. C'est le problème de *l'énergie du vide*. En théorie quantique, chaque système a un état fondamental, qu'on appelle familièrement le vide, à partir duquel se construisent les autres états de la théorie. L'Univers lui-même aurait son état du vide. Cet état quantique est le siège de fluctuations (quantiques) qui lui confèrent une énergie non nulle. Or, dans le contexte de la relativité générale, chaque forme d'énergie déforme l'espace et le temps, et est donc en principe mesurable. En particulier, l'énergie du vide. Un calcul rapide utilisant les grandeurs caractéristiques de la *physique quantique* et de la *relativité générale* prédit une énergie du vide incommensurablement trop grande (120 ordres de grandeur !) par rapport à ce qui est compatible avec l'observation de l'Univers. Autant dire que nous n'avons pas encore la théorie qui associe relativité générale et physique quantique. L'unification ultime de la *gravitation* et des *autres interactions fondamentales* demandera certainement à reconsidérer de façon fondamentale les deux théories, relativité générale et mécanique quantique. À la fin des années 1990, le sentiment général était que, le jour où la théorie unificatrice serait identifiée, elle conduirait à l'annulation automatique de l'énergie du vide.

Toutefois, cette même énergie du vide est nécessaire pour expliquer une expansion très rapide (exponentielle) de l'Univers juste après le Big Bang. C'est la phase dite d'*inflation* qui permet d'expliquer pourquoi l'Univers que nous observons aujourd'hui a des propriétés si homogènes dans toutes les directions : il serait issu d'une toute petite région de l'espace-temps.

L'histoire s'est accélérée au tournant du siècle avec, en 1999, la découverte d'une *accélération de l'expansion* de l'Univers : les explosions de supernovæ d'un certain type semblent d'autant moins brillantes qu'elles sont plus anciennes. Puisqu'elles avaient été choisies précisément pour la stabilité de leur luminosité, elles sont donc situées plus loin que prévu, ce qui veut dire que l'expansion de l'Univers depuis leur explosion a été plus rapide qu'anticipé : elle a accéléré. L'aspect le plus remarquable de cette découverte

vient du fait que tous les ingrédients connus de l'Univers, matière visible ou sombre (la fameuse matière noire), rayonnement électromagnétique et neutrinos ont tendance à ralentir l'expansion de l'Univers. Si l'Univers subit actuellement une phase d'accélération de son expansion, c'est donc qu'une composante encore inconnue, rapidement baptisée *énergie sombre*, est en train de prendre le pas sur les composantes connues.

Qu'est-ce que cette énergie sombre? L'énergie du vide est pour le moment la meilleure candidate pour expliquer la nouvelle phase d'accélération. Quel sort est alors réservé à notre Univers? Une expansion de plus en plus rapide?

Toutes ces questions ont un intérêt brûlant, en particulier depuis qu'en 2013 les résultats de la mission Planck de l'Agence Spatiale Européenne sont venus conforter les prédictions des modèles d'inflation : il semble que les structures observées dans le fond cosmologique, cette première lumière émise 380 000 ans après le Big Bang, soient bien les vestiges de fluctuations émises au sein du vide quantique pendant la phase d'inflation.

Et, par la même occasion, nous avons atteint le nœud du problème tapi au cœur de l'interface entre les deux grandes théories de la physique du ^{xx}^e siècle, la mécanique quantique et la relativité générale. Mais cette fois-ci, outre les études théoriques, nous avons un ensemble de données observationnelles très riche et qui va continuer à s'enrichir : un large programme d'observation est mis en place au sol et dans l'espace pour essayer d'identifier la nature de l'énergie sombre.

Toutefois, le plus extraordinaire restait à venir! Dès 1916, Einstein avait prédit l'existence d'*ondes gravitationnelles* : de même qu'une charge électrique qui se déplace produit une onde électromagnétique, une masse qui se déplace (comme dans une explosion par exemple) produit une courbure de l'espace-temps qui se propage, un peu comme la chute d'une pierre dans une mare provoque des rides à sa surface. Quand ces ondes traversent le laboratoire, la courbure de l'espace-temps semble mettre en mouvement les objets les uns par rapport aux autres. Parce que la force gravitationnelle est très faible, cet effet est extraordinairement petit mais les techniques de mesure d'accélération ont fait de tels progrès qu'il est devenu envisageable de mesurer ces mouvements. Un réseau d'antennes gravitationnelles s'est mis en place à travers le monde