

Gianfranco Bertone
Préface de Françoise Combes

ENTRE

DEUX

INFINIS

Les ondes gravitationnelles et l'origine quantique
des plus grands mystères de l'Univers

ENTRE
DEUX
INFINIS

Gianfranco Bertone

ENTRE DEUX INFINIS

Les ondes gravitationnelles
et l'origine quantique des plus
grands mystères de l'Univers

Traduction
Sophie Lem

quanto

Version originale : Sospesi Tra Due Infiniti
Longanesi & C. © 2019, Milano
Gruppo editoriale Mauri Spagnol
ISBN 978-88-304-5192-6

Traduction française : Sophie Lem

Direction éditoriale : May Yang
Mise en page : Kim Nanette
Graphisme de couverture : Kim Nanette
Image de couverture : Garry Killian, © Freepik

Première édition française 2023
© Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne
Quanto est un label des Presses polytechniques et universitaires romandes
ISBN 978-2-88915-508-8

Tous droits réservés
Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support
que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur

Les Presses polytechniques et universitaires romandes bénéficient d'un soutien
structurel de l'Office fédéral de la culture pour les années 2021-2024.

Questo libro è stato tradotto grazie a un contributo per la traduzione assegnato
dal Ministero degli Affari Esteri italiano

Die Publikation der Übersetzung erfolgt mit der freundlichen Unterstützung
des italienischen Ausussenministeriums.

Publié avec le soutien du ministère italien des Affaires étrangères
et de la Coopération internationale.

*Pour Antonio, toujours stoïque.
À ma femme, Nadia, qui rend tout possible.
Et à nos deux infinis, Francesco et Luna.*

Préface

En astronomie, les découvertes se succèdent à une vitesse vertigineuse. Comment s'imaginer que les galaxies ne sont connues que depuis 1926 ? Il y a moins d'un siècle, notre Univers se bornait à la Voie lactée, avec toutes ses nébuleuses. Aujourd'hui nous avons pu remonter le temps jusqu'au Big Bang, et détecter les premières galaxies en formation, grâce aux grands télescopes comme Hubble, Webb ou ALMA. La cosmologie est devenue une science de précision depuis quelques décennies. Nous avons recensé le contenu de l'Univers, découvert l'existence de la matière noire et de l'énergie sombre, mesuré sa courbure et déterminé son âge, 13,8 milliards d'années. Nous pouvons même prédire son avenir, une expansion qui s'accélère de façon exponentielle, avec la fuite et la dilution des milliers de milliards de galaxies contenues dans notre horizon.

Gianfranco Bertone fait le point sur les fascinantes découvertes de ces dernières années, les ondes gravitationnelles, l'image de l'ombre des trous noirs. De tout temps, le principal outil pour connaître l'Univers était les ondes électromagnétiques, c'est-à-dire la lumière. Au début, il s'agissait uniquement des ondes visibles, la vision humaine étant restreinte à la perception de la lumière jaune du Soleil. Par la suite, le spectre lumineux dans sa totalité – des ondes radio aux ondes infrarouges, ultraviolettes, rayons X et gamma – est venu participer à notre compréhension de l'Univers. D'autres messagers des astres ont également été identifiés, comme

les neutrinos ou les rayons cosmiques (protons, électrons) provenant du Soleil, par exemple. Mais les ondes gravitationnelles nous ouvrent un domaine inconnu, et nous permettent aujourd'hui d'être les témoins de la fusion de trous noirs, invisible autrement, ou de celle d'objets très compacts comme les étoiles à neutrons. Peu d'astronomes croyaient en l'existence des trous noirs au début du XX^e siècle, même pas Einstein. Ce n'est que vers la fin du siècle qu'ils ont fait l'unanimité. Et plus récemment encore que des images de l'ombre des trous noirs ont pu être réalisées. Ces astres mystérieux engloutissent toute la lumière à proximité, engendrant une ombre délimitée par la lumière du gaz tournant autour.

Par analogie avec la *Divine Comédie* de Dante, Gianfranco Bertone nous plonge dans l'infiniment petit, en franchissant plusieurs cercles, comme les jalons de l'enfer. Peu à peu, nous descendons vers des échelles de plus en plus petites, jusqu'à la taille de Planck, qui appartient au domaine de la physique quantique. De l'autre côté, nous gravissons plusieurs étapes, ou ciels, vers le paradis, ou l'infiniment grand, jusqu'à l'horizon de notre Univers. La Terre et les humains se situent à mi-chemin entre ces deux infinis. La solution aux mystères que nous avons découverts, matière noire et énergie sombre, réside peut-être dans une meilleure compréhension de ces deux infinis : la gravité domine dans l'infiniment grand, et la physique quantique dans l'infiniment petit. Pourtant, ces deux théories n'étant pas compatibles aux petites échelles, il nous reste beaucoup à découvrir, à comprendre. « À mesure que s'étend l'île de la connaissance, grandissent aussi les rivages de notre ignorance », disait le grand physicien américain John Wheeler.

Au cours de ce voyage, Gianfranco Bertone nous raconte de façon passionnante l'origine des découvertes et comment

la science progresse par hypothèses, observations et déductions. Il nous montre surtout que rien n'est jamais acquis. Il suffirait d'observations nouvelles pour que nos connaissances soient remises en cause, du jour au lendemain. Les grands physiciens, acteurs de ces découvertes, ne sont jamais pétris de certitudes et se trompent souvent. Depuis un siècle, les découvertes se sont succédé et ont permis d'établir un édifice solide de connaissances, qui s'emboîtent et s'étayent entre elles, dans un modèle cosmologique permettant d'expliquer toutes les observations, et même d'en prédire d'autres. Pourtant une tension s'est installée récemment, et occasionne une fissure qui pourrait faire s'écrouler cette cathédrale du savoir. Des télescopes au sol et dans l'espace vont, dans la décennie qui vient, dévoiler une moisson de données qui permettront de trancher. Ces découvertes à venir mettront en lumière le secteur sombre de l'Univers et permettront de répondre aux questions que nous nous posons sur son origine. Il est fascinant de penser que l'Univers s'est peut-être développé en une fraction de seconde, à partir des fluctuations de l'énergie du vide.

Françoise Combes

Professeure du Collège de France
sur la chaire galaxies et cosmologie
et chercheuse à l'Observatoire de Paris

Table des matières

Préface	7
Avant-propos	13
Introduction	19

PREMIÈRE PARTIE

1	L'architecture du cosmos	25
	Les neuf sphères du paradis	26
	Des fondations obscures	31
	L'Enfer cosmique	34
2	Des histoires d'une certaine gravité	39
	La reine du cosmos	40
	L'ordre des cieux	43
	La plus belle théorie	61
3	Les nouveaux messagers	69
	Les ondes gravitationnelles	72
	Le dernier cadeau d'Einstein	78
	Des particules fantômes	85

SECONDE PARTIE

4	Les trous noirs	91
	Phénoménologie de l'absurde	95
	Effets quantiques	99
	Les ondes à venir	104
5	Matière noire	107
	Halos, courants stellaires et lentilles	109
	Une nouvelle physique	116
	De nouveaux portails	120

6	Énergie noire	123
	Explications possibles	125
	Des origines quantiques	128
	L'avenir	131
7	Genèse quantique	135
	Au commencement	136
	L'inflation	140
	Des ondes primordiales	145
	Épilogue	149
	Notes	155
	Bibliographie	168

Avant-propos

Les avancées spectaculaires de l'astronomie moderne ont élargi notre horizon et révélé un cosmos inattendu : un univers sombre, mystérieux, peuplé d'entités énigmatiques sur lesquelles nous savons très peu de choses, comme les *trous noirs*, voire rien du tout, comme la *matière noire* et l'*énergie noire*.

Les scientifiques qui, comme moi, se sont lancés dans la recherche à l'aube du nouveau millénaire n'auraient pas pu souhaiter mieux. L'exploration de ces mystères représentait un défi difficile et passionnant, que nous abordions armés des idées et réflexions de nos prédécesseurs, une sorte de carte au trésor aux indications plus ou moins précises.

L'entreprise s'est toutefois avérée bien plus ardue que prévu. Au lieu de faire la lumière sur cet univers obscur, les observations et les expériences que nous avons réalisées ces dernières années n'ont fait qu'ajouter à son mystère, engendrant plus de questions qu'elles n'ont apporté de réponses. Avions-nous mal lu la carte au trésor ? Ou bien celle-ci contenait-elle des informations erronées ?

Dans ce livre, j'explique comment l'essor d'une nouvelle discipline, l'*astronomie multimessenger*, est en train de révolutionner notre compréhension du cosmos en combinant notre approche traditionnelle, fondée sur l'observation de la *lumière* des objets célestes, avec une nouvelle approche reposant sur d'autres « messagers », comme les ondes gravitationnelles, les neutrinos ou les rayons cosmiques qui transportent

des informations en provenance de régions de l'Univers autrement inaccessibles.

Beaucoup a été écrit sur le potentiel extraordinaire de cette nouvelle discipline, surtout depuis que le prix Nobel de physique a été attribué en 2017 pour la détection directe des ondes gravitationnelles. J'adopterai cependant ici un angle d'approche différent pour explorer comment les ondes gravitationnelles et d'autres messagers pourraient contribuer d'une part à faire sortir la physique fondamentale de l'impasse dans laquelle elle se trouve depuis quatre décennies, et d'autre part à consolider les fondements de la cosmologie moderne.

Dans la première partie de ce livre, je retracerai la découverte des ondes gravitationnelles et la naissance de l'astronomie multimessager. En empruntant à Dante la structure du *Paradis* et de l'*Enfer*, je présenterai les plus grands mystères de la cosmologie moderne et je soutiendrai que l'astronomie multimessager, en particulier les ondes gravitationnelles, détiennent peut-être la clé qui nous permettra d'éclaircir ces mystères et de jeter un pont entre le domaine de la gravité et celui de la physique quantique (chapitre 1).

Toutefois, avant de plonger dans les ondes gravitationnelles, je raconterai l'histoire fascinante de la gravité en neuf épisodes centrés sur la vie et les contributions de scientifiques et d'astronomes de premier plan. J'évoquerai ainsi l'existence aventureuse et la mort grotesque de Tycho Brahe, les intuitions et la prose passionnée de Johannes Kepler, ou encore la volonté de Newton de trancher, grâce à sa théorie de la gravitation universelle, le nœud gordien de l'origine de la gravité, sans oublier la lutte héroïque d'Einstein pour établir les équations de la relativité générale (chapitre 2).

Je présenterai dans le chapitre 3 la découverte capitale des ondes gravitationnelles, annoncée en 2016, en partant

des volte-face d'un Einstein légèrement confus, qui croit, même en 1936, avoir prouvé que les ondes gravitationnelles n'existent pas (!), pour illustrer ensuite les extraordinaires intuitions et les progrès capitaux qui ont conduit les lauréats du prix Nobel 2017, B. Barish, K. Thorne et R. Weiss, à ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Comme nous le verrons, ce succès marque le début de l'exploration d'un champ immense pour la science et les expériences à venir pourraient véritablement révolutionner notre compréhension du cosmos.

Dans la seconde partie du livre, j'essaierai de démontrer que les racines des quatre plus grands mystères de la physique et de l'astronomie modernes – la matière et l'énergie noires, les trous noirs et le Big Bang – plongent dans la physique de l'infiniment petit. Les ondes gravitationnelles apportent un nouvel éclairage sur chacun d'entre eux et contribueront peut-être même à les résoudre. Je commencerai par présenter le problème de la matière noire, cette substance mystérieuse qui imprègne l'Univers à toutes les échelles, pour décrire ensuite les observations des ondes gravitationnelles qui pourraient élucider sa nature dans un futur proche (chapitre 4).

J'exposerai ensuite le problème de l'énergie noire, une substance qui semble pousser l'Univers à s'étendre de plus en plus vite, et je détaillerai les efforts considérables déployés actuellement pour comprendre son origine. J'évoquerai la surprenante et récente découverte d'une faille dans la cathédrale de la cosmologie moderne, qui va s'élargissant et résulte de la mesure du taux d'expansion de l'Univers, et je soutiendrai que les observations des ondes gravitationnelles sont en mesure de nous aider soit à colmater cette brèche, soit à faire tomber ce magnifique édifice, si le défaut de construction se révélait fatal (chapitre 5).

Je m'intéresserai ensuite aux trous noirs, ces objets astronomiques extrêmes qui avalent toutes les formes de matière et de rayonnement qui les entourent et ne laissent derrière eux, selon l'expression du physicien John A. Wheeler, que leur « aura gravitationnelle ». Ces objets infiniment fascinants sont des portails où la gravité rencontre la physique quantique. Depuis les travaux pionniers de scientifiques comme Stephen Hawking, les trous noirs sont devenus des « laboratoires théoriques » pour explorer de nouvelles théories de la physique. J'expliquerai comment la découverte des ondes gravitationnelles provenant des trous noirs et la première image d'un trou noir révélée en 2019 ont transformé l'étude de ces objets et pourraient bientôt conduire à des progrès spectaculaires (chapitre 6).

Enfin, je m'attaquerai à ce qui est sans doute le plus grand mystère de tous : l'origine de l'Univers. Paraphrasant J. L. Borges (« Comment transmettre aux autres l'Aleph infini que ma craintive mémoire embrasse à peine ? »), je soulignerai l'extraordinaire défi que représente la traduction en mots des théories époustouflantes proposées par les physiciens pour expliquer les tout premiers instants de l'Univers. Et je discuterai de la possibilité exaltante d'identifier l'origine de tout ce qui existe dans le cosmos en mesurant le signal des ondes gravitationnelles émises juste après le Big Bang dans l'Univers primordial (chapitre 7).

Dans un épilogue, je résumerai les principales conclusions et j'envisagerai leurs implications pour notre compréhension de l'Univers et du rôle que nous y jouons.

J'ai essayé de rendre ce livre accessible à un public n'ayant aucune connaissance préalable du sujet. J'espère en particulier qu'il trouvera sa place entre les mains de jeunes lecteurs et qu'il les inspirera à suivre les passionnantes découvertes

scientifiques qui nous attendent dans les prochaines décennies, et peut-être même à y contribuer.

Les collègues et les lecteurs experts trouveront des explications plus complètes et des énoncés plus précis dans les notes relativement nombreuses rassemblées à la fin de l'ouvrage. J'ai également inclus une bibliographie détaillée pour les lecteurs qui souhaiteraient se plonger dans la littérature scientifique originale.

Ce livre n'aurait jamais été écrit sans l'aide, le soutien et les encouragements de nombreuses personnes. Je tiens à remercier Emanuela Minnai, qui a suivi sa publication dans toutes ses phases, ainsi que Guglielmo Cutolo et Giuseppe Strazzeri chez Longanesi, qui ont cru en ce projet. Un merci particulier à mon frère Antonio Bertone, pour sa lecture attentive de la première version du texte et ses nombreuses suggestions ; à Nadia Dominici, Lorenzo Tripodi, Roberto Trotta et Licia Verde, qui ont eux aussi trouvé le temps de lire et commenter mes écrits, m'aidant à les améliorer sans cesser de m'encourager. Merci également aux nombreux collègues avec lesquels j'ai longuement discuté des contenus présentés dans l'ouvrage. Ce fut notamment un plaisir et un privilège de parler d'histoire de la science avec Jeroen van Dongen et Frans van Lunteren et de cosmologie avec Daniel Baumann.

Nous vivons à une époque où il est possible d'accéder depuis le confort de son salon aux principales sources de l'art, de la science et de la littérature, depuis les reproductions en haute définition des papyrus du British Museum jusqu'aux versions numérisées des textes scientifiques les plus importants de l'Histoire. C'est une chance extraordinaire. Je tiens à remercier les développeurs et ceux qui soutiennent les bibliothèques numériques, Internet Archive, arXiv.org, les revues

scientifiques en libre accès, ainsi que tous ceux qui, dans le monde entier, s'efforcent de rendre le patrimoine culturel et scientifique de l'humanité facilement accessible à tous.

Introduction

Les fantastiques découvertes faites par l'astronomie moderne depuis les années 1920 jusqu'à récemment peuvent être décrites comme un long voyage à la découverte des couleurs de l'Univers, que l'œil humain ne peut percevoir.

Nous ne voyons en effet qu'une toute petite partie des *ondes électromagnétiques* qui composent la lumière. Et ce que notre cerveau interprète comme des *couleurs* n'est autre que de minuscules différences dans l'énergie produite par ces ondes. L'énergie associée au bleu de la mer ne diffère par exemple que de 15 % de celle du vert de la forêt.

C'est grâce à cette lumière *visible* que nos ancêtres ont appris à connaître l'Univers, en observant pendant des millénaires à l'œil nu le mouvement régulier et constant des planètes et des étoiles. Sur les traces de Galilée, les astronomes ont construit des télescopes de plus en plus puissants afin de capter la lumière visible qui pleut de l'espace offrant ainsi à l'humanité des yeux neufs et plus sensibles pour scruter l'Univers.

À partir des années 1930, la palette de couleurs du cosmos s'est progressivement élargie. Nous avons mis au point de nouveaux instruments astronomiques capables de détecter des couleurs qui nous sont invisibles : les ondes électromagnétiques à des énergies inférieures à celles que nous percevons comme le *rouge*, telles les ondes radio produites par le Soleil et notre galaxie, et les ondes à des énergies supérieures à ce que nous percevons comme le *violet*, comme les rayons X et les rayons gamma.

Les découvertes rendues possibles par ces yeux artificiels tout neufs nous ont propulsés dans une nouvelle ère de formidables progrès scientifiques et nous ont enfin apporté des réponses fiables à certaines des questions les plus profondes que l'humanité ait jamais posées. De quoi l'Univers est-il constitué ? Quelle en est l'origine ? Comment les étoiles et les planètes se sont-elles formées ? D'où viennent les éléments chimiques qui composent notre corps ?

Dans le même temps, cependant, ces avancées vertigineuses ont dévoilé un cosmos fascinant, gorgé de formes de matière et d'énergie énigmatiques et insaisissables. Un univers a surgi à partir de (presque) rien, puis a pris sa forme et sa structure actuelles en passant par des processus microscopiques encore nimbés d'un voile d'incertitude et de mystère.

La cathédrale de la cosmologie moderne, cet extraordinaire monument scientifique qui explique avec précision et élégance l'origine et l'évolution de l'Univers, repose donc sur des fondements obscurs et incertains. Elle risque d'être abandonnée, voire de s'effondrer, si nous ne trouvons pas le moyen de consolider ces soubassements.

C'est dans cette situation de doute et d'indétermination que la première détection directe des ondes gravitationnelles a été annoncée le 11 février 2016. La nouvelle a fait l'effet d'une bombe dans la communauté scientifique et pour laquelle le prix Nobel de physique a été décerné en 2017.

L'existence des ondes gravitationnelles ne faisait aucun doute. Prédites par Einstein dans un article célèbre publié en 1917, ces vibrations de la trame fondamentale du cosmos avaient déjà été indirectement observées par deux chercheurs américains, qui avaient obtenu le prix Nobel pour ce résultat en 1993.

En 2016, davantage que les ondes en elles-mêmes, c'est le message dont elles sont porteuses qui électrise les scientifiques : nous avons détecté un signal émis par la collision de deux trous noirs massifs. C'était la preuve qu'il existe des trous noirs d'une masse des dizaines de fois supérieure à celle de notre Soleil, qui provoquent des phénomènes extrêmes lorsqu'ils fusionnent, énième démonstration de la validité de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Mais aussi et surtout, la preuve qu'avec les ondes gravitationnelles, nous pouvions percevoir des phénomènes qui resteraient sinon profondément enfouis dans les ténèbres de l'Univers, hors de notre portée.

Un peu comme si, après avoir épuisé le spectre des couleurs disponibles, l'humanité développait de nouveaux sens pour explorer l'Univers. De même que le toucher, l'odorat, l'ouïe et le goût nous fournissent des informations sur la réalité qui nous entoure dans la vie quotidienne et complètent celles que la vue nous apporte, grâce aux ondes gravitationnelles, nous commençons à recueillir et à analyser des données inédites en provenance de régions inaccessibles du cosmos.

Tout juste un an plus tard, en 2017, nous avons pu « sentir » pour la première fois la fusion de deux autres objets extrêmes, des *étoiles à neutrons*, en observant simultanément les ondes électromagnétiques et les ondes gravitationnelles produites par l'événement.

Cette détection « multisensorielle » a marqué la naissance d'une nouvelle discipline : l'astronomie *multimessenger*, qui étudie le cosmos en analysant la lumière et les ondes gravitationnelles, mais aussi d'autres « messagers », comme les *neutrinos de haute énergie*, des particules fantômes qui sont aujourd'hui couramment détectées par un dispositif situé dans les profondeurs de la couche de glace de l'Antarctique,

et les *rayons cosmiques*, ces particules à haute énergie que nous traquons à l'aide d'instruments placés en orbite autour de la Terre ou dispersés dans la pampa argentine. En poursuivant notre analogie, nous pourrions dire que ces dispositifs, ainsi que ceux construits pour détecter les ondes gravitationnelles, constituent de nouveaux *organes sensoriels* que l'humanité développe pour *percevoir* l'Univers.

Dans ce livre, je soutiendrai que les mystères les plus profonds découlant des observations astronomiques, de la matière noire à l'énergie noire, des trous noirs au Big Bang plongent leurs racines dans un microcosme régi non pas par la gravité, mais par les lois de la physique quantique. Je crois que l'astronomie multimessager détient les clés qui permettront de déverrouiller l'accès à ces mystères et de jeter un pont entre l'infiniment grand et l'infiniment petit.

C'est une nouvelle et passionnante frontière de la connaissance. Mais aussi une aventure extraordinaire qui changera à jamais notre conception de l'Univers et du rôle que nous, les êtres humains, y jouons.

PREMIÈRE
PARTIE

1 L'architecture du cosmos

« Mais quels mots employer pour décrire les couleurs
sommptueuses, inconnues des yeux terrestres ? »

Edgar Rice Burroughs, *Les Dieux de Mars*

Les étoiles. Les trous noirs. Les galaxies. Même les objets célestes les mieux connus sont tellement loin de notre réalité quotidienne que nous pourrions être tentés de les considérer comme des entités abstraites. Et pourtant, ces objets ne sont pas moins réels que ceux qui vous entourent au moment où vous lisez ces lignes.

Le fait est que notre perception de la réalité est limitée par notre condition humaine même qui, comme l'a écrit Primo Levi dans son chef-d'œuvre *Si c'est un homme*, est « hostile à tout infini ». Nous sommes à tous égards le fruit d'un très long processus d'évolution et notre cerveau a évolué pour comprendre des événements à une échelle spatiale et temporelle limitée par l'expérience humaine.

Convoquer ici les nombres ordinaux ou cardinaux, les multiplicateurs, les puissances, ne nous est pas d'un grand secours. Il y a peu de chance que nous réussissions à visualiser la taille d'une galaxie si quelqu'un nous dit que son diamètre est de *mille milliards de milliards* de mètres.

Essayons plutôt de nous inspirer de la littérature, et en particulier de la description que fait Dante de la disposition des cieux dans sa *Divine Comédie* : neuf sphères centrées sur la Terre, d'un diamètre de plus en plus grand. Les sept premières sphères sont associées aux corps célestes connus à l'époque : cinq planètes, plus la Lune et le Soleil. La sixième correspond aux étoiles fixes, et la dernière à ce que Dante appelle le « premier Mobile », *primum mobile*, l'origine du mouvement de toutes les autres sphères.

Les neuf sphères du paradis

Attribuer aujourd'hui une sphère à chaque planète ou à chaque objet céleste n'aurait aucun sens. La cosmologie moderne a ouvert les horizons d'un univers insondable, rempli de myriades de corps célestes, dont le nombre et la diversité étaient inconcevables à l'époque de Dante.

Imaginons donc plutôt que nos neuf sphères concentriques ne correspondent pas à un objet, mais à une portion de l'Univers, une sphère physique dont le rayon est mille fois plus grand que celui de la sphère précédente. Dans la première sphère, nous incluons tout ce qui existe jusqu'à mille mètres au-dessus de la surface de la Terre. Dans la deuxième sphère, tout ce qui se trouve entre mille et un million de mètres au-dessus de nous. Dans la troisième, entre un million et un milliard de mètres, et ainsi de suite. Commençons notre exploration.

I. La Sphère de la « Terre ». La première sphère contient ce que nous voyons dans la vie de tous les jours : des villes, des lacs, des océans, de petites montagnes. Mais aussi l'écrasante majorité des femmes et des hommes de ce monde. Tout

ce dont l'humanité a besoin pour vivre se trouve là et, à l'exception d'une infime partie de la prochaine sphère, c'est littéralement le *seul* endroit naturel de tout l'Univers où nous sommes certains que cela soit possible.

II. La Sphère de l'«Air». Nous commençons à prendre de la hauteur et le paysage devient moins familier. Dans la deuxième sphère, nous trouvons les sommets les plus élevés du monde, la plupart des nuages et les routes que suivent les avions. Mais aussi les extraordinaires voiles de lumière dansants des aurores boréales, l'équipement scientifique sophistiqué de la Station spatiale internationale et son équipage d'astronautes. Dans cette sphère se trouve également l'extrême limite de l'atmosphère que nous respirons.

III. La Sphère de la «Lune». Nous montons encore, pour rencontrer dans la troisième sphère des milliers et des milliers d'objets en orbite autour de la Terre. Ce sont les satellites artificiels que l'humanité utilise depuis des décennies pour communiquer, s'orienter, surveiller le climat ou l'environnement, réaliser des expériences scientifiques ou scruter l'Univers. Ainsi que des millions – littéralement – de débris spatiaux de différentes tailles, constitués de satellites abandonnés, de fragments produits par la collision de satellites artificiels, et bien d'autres choses encore. On y trouve aussi la Lune, seul satellite naturel de la Terre.

IV. La Sphère du «Soleil». Le saut qui nous mène à la sphère suivante, la quatrième, est spectaculaire, car d'un seul coup, notre vision s'élargit jusqu'à inclure les planètes les plus proches du système solaire, comme Mercure, Vénus et Mars, mais aussi le Soleil. C'est à ces échelles que les conséquences

d'une loi de la physique qui sera d'une importance cruciale pour la suite de notre voyage commencent à se manifester de façon évidente : la lumière voyage à une vitesse élevée, mais finie, et rien ne peut aller plus vite qu'elle. Cela signifie notamment que lorsque nous regardons le Soleil, il ne nous apparaît pas tel qu'il est « maintenant », mais tel qu'il était il y a huit minutes, puisque la lumière met huit minutes à parcourir la distance qui le sépare de la Terre.

V. La Sphère des « Planètes ». Continuons notre voyage et passons à la sphère suivante, la cinquième. Elle est si grande qu'elle contient toutes les planètes du système solaire, tous les corps mineurs connus, planétoïdes, satellites naturels et astéroïdes, ainsi que les objets les plus lointains créés par les êtres humains : les sondes *Voyager 1* et *2*, lancées il y a plus de quarante ans et toujours en activité.

VI. La Sphère des « Étoiles ». En rejoignant la sphère numéro 6, nous embrassons désormais du regard plusieurs milliers d'étoiles, chacune accompagnée de son propre cortège de planètes. La plus proche de nous fait partie d'un système stellaire triple, Alpha Centauri, composé d'un couple d'étoiles en orbite l'une autour de l'autre et d'une troisième étoile beaucoup plus petite, Proxima Centauri, qui gravite autour des deux premières sur une orbite très large et qui est actuellement la plus proche de la Terre. Elle est à peine plus grande que Jupiter, mais c'est une étoile à part entière, avec au moins une planète semblable à la Terre en orbite autour d'elle. Proxima Centauri pourrait être la destination de la première mission spatiale hors du système solaire, mais elle reste malgré tout extraordinairement éloignée de la Terre à l'échelle humaine : sa lumière met un peu plus de quatre ans à nous parvenir.

VII. La Sphère de la « Voie lactée ». Nous continuons notre exploration et avec la septième sphère, nous englobons toute la galaxie dans laquelle nous vivons, un disque merveilleux composé d'environ cent milliards d'étoiles. La « Voie lactée » est le nom antique de la bande luminescente que nous voyons dans le ciel nocturne lorsque nous regardons en direction du disque galactique. Cela peut sembler évident aujourd'hui, mais ce n'est qu'au début du XX^e siècle que nous avons compris qu'il s'agissait d'un système d'étoiles en rotation autour d'un centre commun. Et ce n'est que ces vingt dernières années que nous avons pu montrer qu'au centre même de notre galaxie se trouve un trou noir géant, dont la masse équivaut à des millions de fois celle du Soleil.

VIII. La Sphère du « Réseau cosmique ». Un saut de plus et, dans la huitième sphère, nous nous trouvons face à des milliers de galaxies, regroupées en amas de différentes tailles. Parmi les plus proches de nous se trouve la galaxie d'Andromède, très similaire en forme et en taille à la Voie lactée, mais si éloignée qu'il faut 2,5 millions d'années à sa lumière pour nous parvenir. À cette échelle, nous commençons également à entrevoir la structure portante de l'Univers : un réseau de filaments et de nœuds entourant d'immenses « vides ».

IX. La Sphère du « Big Bang ». Nous arrivons enfin à la neuvième et dernière sphère, où nous nous heurtons aux confins de l'Univers observable. Cette limite ultime et inviolable à notre connaissance n'est pas imposée par la faiblesse de la lumière provenant de ces régions éloignées, mais par le fait que l'Univers a un âge fini, que nous savons aujourd'hui être de 13,8 milliards d'années. La lumière provenant de régions de l'Univers plus éloignées que la distance parcourue

par la lumière au cours de cette période ne nous a tout simplement pas encore atteints¹.

De même que les géologues s'enfoncent sous la surface de la Terre pour étudier des roches de plus en plus anciennes, les cosmologistes pointent leurs télescopes vers l'espace lointain pour étudier le passé de l'Univers. Les images provenant du bord de l'Univers observable, en particulier, nous parviennent non seulement de distances énormes, mais aussi d'une époque incroyablement lointaine, lorsque l'Univers venait de naître et que les étoiles, les galaxies et les planètes étaient encore à venir.

Le grand voyage de l'humanité à la découverte de l'architecture du cosmos a débuté il y a longtemps, lorsque nos ancêtres ont commencé à s'interroger sur le mouvement des corps célestes. Mais l'exploration des sphères les plus extérieures, au-delà de la sixième, qui constituent l'écrasante majorité du volume de l'Univers, a commencé il y a à peine une centaine d'années et beaucoup reste à découvrir.

L'architecture de ces sphères s'appuie sur un formidable cadre théorique, le *modèle cosmologique standard*, qui nous permet d'assembler, tel un gigantesque puzzle, une énorme quantité d'informations et de les interpréter de manière complète et cohérente.

Mais le prix à payer pour adopter ce modèle est très élevé : nous devons accepter l'existence de formes d'énergie et de matière mystérieuses qui façonnent la structure et l'évolution de l'Univers, et d'un incroyable mécanisme à l'œuvre dans l'Univers primitif qui désigne le chaos quantique comme l'origine de toute la réalité que nous observons autour de nous.

La prise de conscience de notre ignorance est l'un des résultats les plus importants de la physique et de l'astronomie

des cinquante dernières années. La tâche des scientifiques de ma génération est précisément de faire la lumière sur ces composantes mystérieuses de l'Univers, consolidant ainsi les fragiles fondations de cette architecture cosmique.

Des fondations obscures

Nous pouvons faire remonter le début de la cosmologie moderne à 1915, lorsque, après un long combat, Albert Einstein formule sa célèbre théorie de la relativité générale. Dix ans plus tôt, il avait déjà bouleversé le monde de la physique avec sa théorie de la relativité restreinte, faisant voler en éclats le concept de temps comme paramètre absolu et indépendant des dimensions spatiales et le faisant fusionner avec ces dernières en une seule entité appelée *espace-temps*.

Avec la relativité générale, Einstein fait un saut encore plus vertigineux et démontre comment cet espace-temps *s'incurve* en présence de matière et que la gravité est précisément une manifestation de cette *courbure* de l'espace (voir chapitre 2). Cette théorie stupéfiante se révélera encore plus ingénieuse que l'homme qui l'a découverte, au point de permettre des découvertes scientifiques qu'Einstein lui-même croyait impossibles, ou qu'il ne pouvait même pas imaginer.

Pourtant, malgré sa nature révolutionnaire, la théorie d'Einstein a longtemps été considérée comme impénétrable et de peu d'utilité pratique. Les cosmologistes – les scientifiques qui exploraient son application à l'origine et à la structure de l'Univers – étaient regardés de haut par les physiciens, Lev Landau, le célèbre physicien soviétique, allant même jusqu'à affirmer que « les cosmologistes ont souvent tort, mais ne doutent jamais ».

Dans les années 1950, les choses commencent à changer : la palette des « couleurs » du cosmos s'étend pour inclure les ondes électromagnétiques dont l'énergie est inférieure à celle de la lumière visible, comme les micro-ondes et les ondes radio de l'Univers, et les ondes aux énergies bien plus grandes, comme les rayons X et les rayons gamma. De nouvelles découvertes ne tardent pas à se produire.

La percée la plus spectaculaire est peut-être celle réalisée en 1964, de façon complètement fortuite, par Arno Penzias et Robert Wilson. Les deux physiciens américains avaient construit un récepteur radio, une sorte de grande « oreille » en aluminium de 15 mètres de long qui devait permettre de capter le faible rayonnement radio de notre galaxie. Mais quand ils commencent à effectuer leurs mesures et malgré tous leurs efforts, quelque chose ne colle pas : un étrange bruit de fond, toujours identique quel que soit la direction dans laquelle ils pointent le récepteur, semble perturber les mesures. Ils remuent alors ciel et terre pour trouver la source du bruit et vont même jusqu'à nettoyer soigneusement les fientes de pigeons qui couvrent l'appareil pour s'assurer que la substance ne perturbe pas les mesures. Sans succès ; l'étrange bourdonnement persiste.

Le hasard veut que, non loin de l'endroit où l'antenne de Penzias et de Wilson est installée, un groupe de cosmologistes de l'université de Princeton de premier plan développe un programme de recherche visant à vérifier l'une des prédictions principales de la cosmologie moderne. Si l'Univers était autrefois très dense et très chaud, comme semble l'indiquer le fait qu'il soit actuellement en expansion, un rayonnement résiduel devrait exister, une forme de lumière très ancienne ayant été émise directement par l'Univers primitif.