

QU'EST-CE QUE LA GRAVITÉ ?

Dirigé par Étienne Klein,
Philippe Brax et Pierre Vanhove

QU'EST-CE QUE LA GRAVITÉ ?

Le grand défi de la physique

DUNOD
POCHE

Crédits iconographiques :
P. 102 : © NASA. P. 103 : © Clowe *et al.* (2006).
P. 106 : © ESA and the Planck Collaboration.
P. 165 : © GBAR/CERN.

Illustrations (intérieur) : Rachid Maraï
Mise en pages : Nord Compo

NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

© Dunod, 2019, 2022, 2023 pour la présente édition
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-085616-9

PROLOGUE

Étienne Klein

*« On écrit la vie d'un homme. Ses œuvres, ses actes.
Ce qu'il a dit, ce qu'on a dit de lui. Mais le plus vécu
de cette vie échappe. Un rêve qu'il a fait ; une sensation
singulière, douleur locale, étonnement, regard ; des images
favorites ou obsédantes ; un air qui vient chanter
en lui, à tels moments d'absence ; tout cela est plus lui
que son histoire connaissable. »*

Paul Valéry, *Mauvaises pensées et autres*, 1942

En novembre 1915, Albert Einstein publiait sa « théorie de la relativité générale », une nouvelle conception de la gravitation. Contrairement à ce que nous apprenons à l'école en utilisant des notions assez facilement accessibles, elle avance, toute bardée de mathématiques, que la gravitation n'est pas une véritable force, mais une manifestation locale de la courbure de l'espace-temps. La géométrie de l'Univers, argumente-t-elle, se trouve déformée, courbée par les masses qu'il contient et, en retour, cette géométrie pilote directement le mouvement des objets matériels. Dans cette perspective, le mouvement de la Terre autour du Soleil ne résulte plus de l'action

instantanée de la force de gravitation invoquée par Newton, mais se trouve guidé le long d'une trajectoire déterminée par la présence déformante du Soleil.

Un siècle plus tard, reconnaissons que cette révolution conceptuelle persiste à nous sembler étrange, et même franchement mystérieuse. Ainsi, lorsque nous faisons tomber une pierre à nos pieds, nous continuons de considérer que c'est la Terre qui l'attire vers le sol, alors qu'en réalité, à rebours des images qui nous viennent à l'esprit, la Terre distord l'espace en son voisinage, d'une façon que seules les équations permettent d'appréhender, et la pierre se contente de glisser le long d'une sorte de toboggan de l'espace-temps...

Par quel cheminement intellectuel Einstein en est-il venu à proposer une théorie aussi révolutionnaire ? Grâce à quelles drôles d'idées ? Comment fut-elle accueillie ? Comment ses prédictions furent-elles vérifiées ? Quel est le statut actuel de la relativité générale ? Résoudra-t-on bientôt le problème de sa contradiction avec les concepts de la physique quantique ?

C'est à ces questions que des physiciens, des philosophes et des historiens des sciences répondent dans cet ouvrage, dans un langage accessible à tous.

En les lisant, on mesure mieux la prouesse d'Einstein. Surtout si l'on prend acte du fait suivant : en 1915, on n'avait que très peu de données sur l'Univers. On ignorait, par exemple, qu'existaient d'autres galaxies que la nôtre, on ne savait pas d'où vient que les étoiles brillent, ni que l'Univers est en expansion, etc. Mais les équations d'Einstein, d'une part se sont parfaitement accommodées de la quantité gigantesque de données recueillies depuis un siècle par les télescopes et les satellites, d'autre part ont permis de fonder une véritable cosmologie scientifique,

capable d'envisager l'Univers comme un véritable objet physique, doté de propriétés qui le caractérisent « en tant que lui-même ». Elles ont même permis de prédire l'existence des ondes gravitationnelles un siècle avant leur première détection, en septembre 2015, ce qui démontre qu'une théorie peut non seulement enrichir l'univers des données, mais également agir comme un « treuil ontologique » capable de faire apparaître de nouveaux éléments de réalité. Imaginons maintenant que les choses se soient passées dans l'ordre inverse, c'est-à-dire que nous ayons commencé avec toutes les données dont nous disposons aujourd'hui, mais sans avoir à notre disposition la théorie de la relativité générale. Pourrions-nous, par une sorte d'induction théorique permettant de passer des données aux lois, découvrir les équations d'Einstein ? Rien n'est moins sûr.

La réponse d'Einstein à cette question aurait en tout cas été négative, du moins si l'on en croit la lettre qu'il écrivit un jour à son ami Maurice Solovine : « Aucune méthode inductive ne peut conduire aux concepts fondamentaux de la physique. L'incapacité à le comprendre est la plus grave erreur philosophique de nombreux penseurs du XIX^e siècle. »¹

En la matière, les prochaines décennies, toutes gorgées de *very big data*, viendront-elles contredire l'apparente pertinence de cet avis ?

BRÈVE HISTOIRE DE LA PENSÉE COSMOLOGIQUE

Ugo Moschella

*« L'Univers (que d'autres appellent la Bibliothèque)
se compose d'un nombre indéfini, et peut-être infini,
de galeries hexagonales, avec au centre de vastes puits
d'aération bordés par des balustrades très basses.
De chacun de ces hexagones on aperçoit les étages
inférieurs et supérieurs, interminablement. »¹*

Ἀγεωμέτροτος οὐδεὶς εἰσὶτω²

Ce que nous pouvons voir en observant le ciel d'une nuit étoilée à l'œil nu est cela même que voyaient Platon, Aristote, Ptolémée et Copernic, puis Bruno, Kepler, Galilée et Newton (et Einstein aussi, si on fait abstraction de la pollution lumineuse !). Le paysage terrestre a beaucoup changé mais le ciel n'a pas changé, car cinq mille ans sont à l'échelle cosmique « comme le jour d'hier, quand il n'est plus, et comme une veille de la nuit »³. Pourtant les narrations et les représentations de l'Univers faites par ces grands hommes sont très différentes les unes des autres et surtout sont radicalement différentes de celle qui est censée être la vision

scientifique moderne du monde : la nôtre. L'histoire des idées qui mène à cette vision est extraordinairement fascinante, dramatique et parfois tragique et elle a été mille fois racontée dans des ouvrages qui sont à juste titre devenus classiques⁴. Nous allons retracer certains de ses grands traits.

L'idée d'univers n'est pas une idée primitive. Si, comme c'est la coutume, on fait commencer la période historique avec l'invention de l'écriture vers l'année 3 000 av. J.-C., alors l'être humain a pu se passer de l'idée d'univers, ou pour mieux dire de sa thématisation explicite, pendant la moitié de son histoire : en effet, un mot pour désigner la totalité d'une façon unifiée n'est apparu que vers l'année 500 av. J.-C. en Grèce. Auparavant, on avait recours à une énumération plus ou moins exhaustive des choses contenues dans la totalité ou bien à une opposition binaire – la formule biblique et homérique *Le ciel et la terre* étant la plus connue. C'est seulement quand cette distinction entre les choses sur lesquelles nous pouvons avoir – en principe – une influence et celles qui nous dépassent complètement est mise entre parenthèses que le « monde » peut apparaître (« Le sujet n'appartient pas au monde, mais il est une frontière du monde » – L. Wittgenstein).

La tradition fait remonter le choix du nom propre à Pythagore : *cosmos*, qui, chacun le sait, s'oppose à *chaos* et désigne⁵ l'ordre et la beauté qui dérive de l'ordre. « Pythagore fut le premier à appeler *cosmos* l'englobement de toutes choses, à cause de l'ordre qui règne en lui » (*Aetius, Placita – I sec. a C.*).

Le nom latin « *mundus* » a exactement la même signification que *cosmos*, comme nous le dit Pline l'Ancien dans sa *Naturalis Historia* : « Les Grecs ont donné à l'ensemble de toutes choses le nom de “*cosmos*”⁶ et nous l'avons appelé “monde” en vertu de son élégance parfaite et

absolue. Nous disons “ciel” sans aucun doute en relation à sa ciselure. » Le nom univers, contraction poétique de *unus* et *versus*, apparaît pour la première fois dans le quatrième livre du *De Rerum Natura* de Lucrèce (*Unvorsum*). Le sens que Lucrèce donne à ce mot est celui d'un ensemble de particules qui forment un tout tournant ensemble.

Le trentième fragment d'Héraclite nous donne un aperçu de l'ordre cosmique éternel, celui d'une totalité autosuffisante qui ne nécessite pas d'instances extérieures : « Ce cosmos, le même pour tous, nul des dieux ni des hommes ne l'a fait, mais toujours il était, il est, il sera : feu toujours vivant, s'allumant en mesure et s'éteignant en mesure. »⁷ Chez Platon au contraire, l'ordre ne préexiste pas dans le chaos primordial de la *chora* mais il résulte de l'action créatrice d'un démiurge. Le *Timée* raconte la naissance mythique de « notre cosmos, vivant, visible, comprenant les vivants visibles, dieu sensible, image d'un dieu intelligible, très grand, très bon, très beau, et très parfait, ciel unique qui est seul de sa race ». L'ordre de l'Univers est non seulement la manifestation visible du dieu intelligible ; c'est aussi le modèle à imiter pour revenir à l'état original d'excellence qui a été perdu par l'incarnation de l'âme. La cosmologie va garder cette dimension éthique pendant deux millénaires jusqu'à la naissance de la vision scientifique du monde.

Le mot cosmos – ordre – contient donc déjà une « cosmologie ». Il donne une description de la totalité qui n'est pas neutre mais implique un jugement de valeur. Peut-être est-il intéressant de comparer cette idée avec le point de vue moderne, exemplifié ici à nouveau par la pensée de Wittgenstein : « Le sens du monde doit être en dehors de lui. Dans le monde, tout est comme il est, et tout arrive

comme il arrive ; il n'y a en lui aucune valeur – et s'il y en avait une elle serait sans valeur. »

Quant aux moyens pour décrire et essayer de comprendre l'ordre du cosmos, les Grecs nous expliquent aussi les rôles relatifs de la physique et des mathématiques (l'astronomie) : « La tâche de la contemplation de la nature (*theoría phusikè*) est d'examiner la substance du ciel et des astres, la puissance et la qualité de la génération et de la corruption, et, par Zeus !, elle est capable de mener des démonstrations au sujet de la grandeur, de la forme et de l'ordre des choses. Quant à l'astronomie elle n'entreprend de parler de rien de tel, mais elle démontre l'ordre des choses célestes, ayant déclaré que le ciel est véritablement un cosmos ; elle parle des formes, des grandeurs, des distances de la Terre par rapport au Soleil et à la Lune, des éclipses, des conjonctions des astres, sur la quantité et la qualité qui se manifestent dans leur révolutions. » (Posidonios, 135-51 avant J.-C.). C'est donc la physique qui a la tâche d'examiner « la substance du ciel et des astres ». En revanche, les mathématiques doivent se limiter à *sauver les apparences*. Cette mise en garde va revenir dramatiquement dix-sept siècles plus tard.

La physique débute en cosmologie avec Aristote : les fondements physiques du modèle cosmologique standard du monde ancien sont en effet à rechercher dans la dynamique et la gravitation de la physique aristotélicienne. Le Stagirite opère la distinction entre trois types de mouvements. Deux d'entre eux adviennent dans le monde sublunaire : les mouvements naturels de chute des corps lourds (faits en prévalence de terre et d'eau) et de montée des corps légers (faits en prévalence d'air et de feu) sont causés par la tendance que ces corps ont à

se rendre à leur « lieu naturel » ; le mouvement violent demande au contraire une force externe comme cause. L'existence même d'un lieu naturel explique la position centrale et la sphéricité de la Terre et, aussi, ce qu'est la gravité. Une pomme tombe parce qu'elle veut se rendre à l'endroit où doit naturellement aller tout ce qui est lourd. Ce lieu se trouve nécessairement au centre du monde, où se trouve maintenant la Terre qui est le premier corps pesant (autrement celle-ci finirait aussi par y tomber). De plus, la Terre ne peut pas tourner sur elle-même, ni accomplir une révolution autour du Soleil, parce que le mouvement circulaire, qui est parfait, ne peut pas exister dans le monde sublunaire qui est changeant et corrompible. Les trajectoires des créatures terrestres sont rectilignes et irrégulières parce que ces créatures, limitées et imparfaites, doivent chercher nourriture et secours en dehors d'elles-mêmes.

Le centre immobile du Cosmos n'est donc pas un lieu de délices, il ressemble plutôt à un dépotoir à ordures⁸ où tombe toute la lourdeur du monde sublunaire. Et pourtant il est le centre unique et privilégié autour duquel tournent les sphères du monde supralunaire, entraînant avec elles, dans leur course sans début ni fin, les astres. Ces cieux sont des sphères cristallines emboîtées les unes dans les autres et constituées d'un cinquième élément éternel, inaltérable et incorruptible : l'éther ou quintessence. L'éther n'a pas de poids ni de légèreté et par conséquent ne peut pas aller vers le centre ni s'en éloigner : son mouvement est par nature circulaire et uniforme. Contrairement à Eudoxe, le disciple de Platon qui les avait inventées comme artifice de calcul, Aristote considère les sphères des cieux comme physiquement existantes. Elles sont au nombre de cinquante-cinq et la dernière, celle des fixes,

borde l'Univers fini ; d'ailleurs, si l'Univers a un centre, il ne peut qu'être fini. Peut-on se pencher au dehors de cette dernière frontière ? La question n'a pas de sens, car il n'y a pas un dehors. Il n'y a *rien*⁹. Même pas le vide. « Il est manifeste que nulle masse corporelle ne se trouve hors du ciel ni ne peut y naître. La totalité du monde est composée de toute la matière qui lui est propre... Il est clair qu'il n'y a ni lieu ni vide hors du ciel. Le vide est, d'après la définition vulgaire, l'endroit où il n'y a pas de corps, mais où il peut en exister un. »¹⁰

Il faudra attendre Giordano Bruno pour « dissiper les murailles imaginaires des première, huitième, neuvième, dixième et autres sphères qui auront pu leur être ajoutées sur le rapport de vains mathématiciens et par l'aveuglement des philosophes vulgaires »¹¹.

Perfectionné par Ptolémée dans l'*Almageste* et les *Hypothèses planetarum*, le système des sphères (et autres épicycles) a été le fondement de la vision standard du monde pendant des siècles. Il rend compte avec une certaine précision des mouvements célestes des astres. Il donne aussi une base cosmologique à l'anthropologie et à l'éthique, prolongeant la représentation « scientifique » en une réponse à la question de l'être dans le monde¹². Un monde qui allait s'écrouler sous les coups mortels portés par le *De Revolutionibus Orbium Coelestium* de Nicolas Copernic.

Pourtant, le chanoine Copernic n'était pas un révolutionnaire. Son inspiration et ses principes cosmologiques, qui étaient d'abord la perfection des mouvements circulaires mais aussi la finitude et la sphéricité de l'Univers et la solidité des sphères cristallines, étaient fortement liés aux traits de l'aristotélisme que je viens de décrire. Et Copernic, en bon humaniste,

recherchait ses sources dans les classiques plus qu'il n'observait le ciel : « Je pris la peine de lire les livres de tous les philosophes que je pus obtenir, pour rechercher si quelqu'un d'eux n'avait jamais pensé que les mouvements des sphères du monde soient autres que ne l'admettent ceux qui enseignèrent les mathématiques dans les écoles. Et je trouvai d'abord chez Cicéron que Nicétus pensait que la terre se mouvait. Plus tard je retrouvai aussi chez Plutarque que quelques autres ont également eu cette opinion. »

En effet, la révolution copernicienne « qui pose la terre comme mobile et le soleil, par contre, comme immobile au centre de l'Univers », se fonde exactement sur les mêmes données astronomiques de l'*Almageste*¹³. Il n'y avait rien de nouveau sous le Soleil (ni au-dessus). Sauf qu'une fois la Terre écartée du centre de l'Univers, une question qu'on croyait tranchée se repose avec force : qu'est-ce que la gravité ?

Jusque récemment, l'on croyait¹⁴ le *De revolutionibus* de Nicolas Copernic déjà achevé en 1530. Aujourd'hui, on sait¹⁵ que le sixième livre a été écrit seulement après 1539. L'impression, en 400 exemplaires, ne se fit qu'en 1543, peu de temps avant la mort de son auteur. Le tirage initial ne fut pas épuisé. Le texte est précédé d'une préface « Au lecteur sur les hypothèses de cet ouvrage », écrite anonymement par Andreas Osiander qui avait été chargé par Georg Rheticus, l'auteur de la *Narratio prima*¹⁶, de surveiller la publication du livre. Osiander était un ancien prêtre catholique devenu théologien luthérien, très actif et vaguement hérétique. Par déformation professionnelle, il voyait assez bien les risques inhérents aux thèses de Copernic, thèses qui minaient les bases scientifiques de l'ordre cosmique que philosophie

et théologie concevaient comme anthropocentrique. Pour contrer ces risques, Osiander, dans sa préface anonyme, répète en des termes encore plus drastiques les arguments de Posidonius :

« Je ne doute pas que certains savants – puisque déjà s'est répandu le bruit concernant la nouveauté des hypothèses de cette œuvre, qui pose la terre comme mobile et le soleil, par contre, comme immobile au centre de l'Univers – ne soient fortement indignés et ne pensent qu'on ne doit pas bouleverser les disciplines libérales, bien établies depuis très longtemps déjà. Si cependant ils voulaient bien examiner cette chose de près, ils trouveraient que l'auteur de cet ouvrage n'a rien entrepris qui mériterait le blâme. En effet, c'est le propre de l'astronome de colliger, par une observation diligente et habile, l'histoire des mouvements célestes. Puis d'en rechercher les causes, ou bien – puisque d'aucune manière il ne peut en assigner de vraies – d'imaginer et d'inventer des hypothèses quelconques, à l'aide desquelles ces mouvements (aussi bien dans l'avenir que dans le passé) pourraient être exactement calculés conformément aux principes de la géométrie. Or, ces deux tâches, l'auteur les a remplies de façon excellente. En effet, il n'est pas nécessaire que ces hypothèses soient vraies ni même vraisemblables ; une seule chose suffit : qu'elles offrent des calculs conformes à l'observation. »

Une hypothèse calculatoire, donc, qui ne concerne que les mathématiciens, voilà c'est tout. La révolution c'est tout autre chose !

Et pourtant la révolution était secrètement en marche. Le soir du 11 novembre 1572, en sortant du laboratoire alchimique souterrain de son oncle et regardant vers le zénith, Tycho Brahe, le plus grand observateur du ciel à

l'œil nu de tous les temps, vit une « *nova et nullius ævi memoria prius visa Stella* », une nouvelle étoile plus brillante que Vénus dans la constellation de Cassiopée. C'était du jamais vu ! Il douta de sa vision et demanda aux paysans qui passaient s'ils voyaient la même étoile que lui dans le ciel. Cet événement allait changer la vie de Tycho en faisant de lui le premier des astronomes modernes. La *Stella nova* allait surtout détruire l'idée de l'immuabilité des cieux, car il y avait bien des changements dans le monde supralunaire. Des étoiles pouvaient naître et peut-être mourir...

Par la suite, ce fut au tour des sphères cristallines de voler en éclats sous les coups de la grande comète de 1577. Tycho l'observa pendant plusieurs mois ; la parallaxe de la comète lui permit de trancher une question millénaire : les comètes étaient bien des corps célestes. L'orbite de la comète était « bien au-delà de la Lune et pas dans le monde sublunaire, comme Aristote et ses disciples ont voulu nous faire croire pendant des siècles ». Et comme la trajectoire de la comète, qui n'était pas du tout circulaire, recoupait les orbites des planètes, « la réalité de sphères cristallines doit être exclue des cieux »¹⁷.

Mais, une fois détruites les sphères cristallines, *a quo moventur planetae* ? Quelle est la cause du mouvement des planètes et des autres corps célestes ?

La dernière difficulté à résoudre fut enfin le mouvement circulaire des planètes, déjà mis à mal par les comètes supralunaires. C'est d'autant plus ironique que retrouver la perfection de la géométrie circulaire et sphérique était la motivation principale de l'œuvre de Copernic. Pourtant, les données astronomiques que Tycho Brahe avait confiées à Johannes Kepler et que celui-ci avait étudiées d'arrache-pied pendant six ans disaient autre chose : l'orbite de la

planète Mars n'était pas circulaire, ni réductible à une composition de cercles, mais c'était une ellipse ayant pour foyer le Soleil. Le parcours accidenté vers cette découverte capitale est décrit par Kepler dans un livre¹⁸ qui depuis 1609 marque à jamais l'histoire de l'astronomie. Et pourtant les ellipses de Kepler devaient rester lettre morte pour longtemps. C'est seulement après Newton et sa loi de gravitation universelle que les orbites képlériennes des planètes furent reconnues par tous ; aujourd'hui, elles demeurent toujours elliptiques (à peu près !).

L'*Astronomia Nova* eut la malchance de paraître peu de temps avant la publication du *Sidereus Nuncius* de Galilée en 1610. Le messager céleste galiléen annonce la révolution au grand jour. Il dévoile que l'œuvre de Copernic n'est pas une question réservée aux mathématiciens mais concerne tout le monde. Dès lors, l'affaire Galilée a été l'un des événements les plus marquants de l'histoire de la culture occidentale. D'innombrables ouvrages littéraires, philosophiques et scientifiques ont soutenu à peu près tous les points de vue possibles au sujet de la condamnation de Galilée, de la relation entre science et religion, de la naissance de la science moderne et la « méthode scientifique ». On évoquera ici seulement les quelques aspects qui concernent au plus près notre question cosmologique.

Galilée propage la révolution au moyen d'une lunette à forme de canon, le « *cannocchiale* ». Cet instrument de fabrication hollandaise était à l'origine un objet pour l'amusement des gens riches. Galilée le perfectionne en réussissant à obtenir un agrandissement bien meilleur et le vend au sénat de Venise comme instrument militaire. Puis, le soir du 25 août 1609, il le braque vers le ciel et découvre un monde que personne n'avait jamais vu.

Il observe le paysage lunaire avec monts et vallées ainsi que les myriades d'étoiles de la Voie lactée. Le 7 janvier 1610, il observe trois astres près de Jupiter, puis, le 13 janvier, un quatrième. Leurs positions changent. De toute évidence ils tournent autour de Jupiter, on peut le voir. Nous voici libérés par le *cannocchiale* (*e noi liberati da verbose discussioni*) et la conception millénaire d'un ciel immuable et parfait qui tourne autour de la Terre est finie. Six ans et demi plus tard, le 5 mars 1616, le *De Revolutionibus orbium coelestium* est mis à l'index, soixante-trois ans après sa publication.

Tout cela est bien connu. Mais il y a ici quelque chose qui ne doit pas échapper à nos yeux post-modernes. Aujourd'hui le geste de Galilée d'observer le ciel avec son *cannocchiale* peut nous paraître évident et même obsolète, mais il ne l'était pas du tout à son époque et pour plus d'une raison. D'abord, il n'y avait *rien à voir* au ciel. Tout se passait comme il se passait depuis toujours. Pire, l'instrument utilisé pour observer le ciel était indigne, fabriqué par des mécaniciens et des ingénieurs, et donc peu recommandable pour des gens honnêtes et pour des universitaires (qui souvent refusèrent obstinément même de toucher au télescope). C'est en passant outre au mépris de cette science officielle que, avec son geste solitaire, Galilée abandonne la conception des sens naturels de l'homme comme critère absolu de connaissance et, confiant en ce qu'il voit par l'intermédiaire de son instrument, pose les fondements de la révolution scientifique qui a changé pour toujours l'histoire de l'humanité¹⁹.

Le copernicanisme est aussi le pilier du projet d'établir une science nouvelle. Le renversement copernicien de l'ordre cosmique conduit à l'idée révolutionnaire qu'une seule physique doit régir les mouvements sur la