

COSMOLOGIE & RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Alice Gasparini

COSMOLOGIE & RELATIVITÉ GÉNÉRALE

une première approche

Les Pôles de recherche nationaux (PRN) sont un instrument d'encouragement du Fonds national suisse.



Autres ouvrages disponibles chez le même éditeur:

Comprendre la physique

David Cassidy, Gerald Holton, James Rutherford

De l'atome antique à l'atome quantique

A la recherche des mystères de la matière

Christian Gruber, Philippe-André Martin

L'Odyssée du Zeptoespace

Un voyage au cœur de la physique du LHC

Gian F. Giudice

La face cachée de la Lune

La science et les coïncidences

François Rothen

Surprenante gravité

De la pomme à la lune

François Rothen

Aux limites de la physique

Les paradoxes quantiques

François Rothen

Images de couverture:

En haut: image des fluctuations du CMB obtenue à partir des mesures de la mission européenne Planck, en 2015 (© ESA et Collaboration Planck).

En bas: mesure des fluctuations du CMB sur toute la sphère céleste, par la collaboration américaine WMAP au début des années 2000 (© NASA, Collaborations COBE et WMAP).

La Fondation des Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR) publie principalement les travaux d'enseignement et de recherche de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), des universités et des hautes écoles francophones.

PPUR, EPFL-Rolex Learning Center, CP 119, CH-1015 Lausanne,
ppur@epfl.ch, tél.: +41 21 693 21 30; fax: +41 21 693 40 27.

www.ppur.org

Première édition

ISBN 978-2-88915-209-4

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018

Tous droits réservés

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

Imprimé en Italie

À Florian et Maurice

Préface

Ce livre est l'aboutissement d'un projet pédagogique lancé par le pôle national de recherche « The Mathematics of Physics » (SwissMAP) soutenu par le Fond National Suisse de la Recherche Scientifique, l'Université de Genève et l'ETH-Zurich, à l'occasion du centenaire de la publication de la théorie de la relativité générale (novembre 1915). Ce centenaire a également coïncidé avec la première observation historique d'ondes gravitationnelles, couronnée par le prix Nobel en 2017. Ainsi, le hasard de l'histoire a voulu que la rédaction de cet ouvrage se soit déroulée durant ces deux années exceptionnelles pour la cosmologie moderne. La question fascinante des ondes gravitationnelles et de leur détection y trouve naturellement sa place, traitée de façon accessible pour les élèves des classes pré-bac / pré-maturité.

La théorie de la relativité générale a été élaborée et rédigée en quelques années par Albert Einstein, qui a su dépasser les schémas de l'époque pour résoudre un problème de la physique contemporaine de manière unifiée et élégante : comment rendre invariants, si l'on change de repère, l'ensemble des lois physiques en présence de gravité. Il aura ensuite fallu des décennies pour comprendre la portée et les nouvelles questions ouvertes par cette théorie.

Depuis, la relativité générale a montré qu'elle constituait une nouvelle clé de lecture du phénomène de gravité, mais également une révolution multidisciplinaire de la pensée humaine, témoignant à quel point les mathématiques et la physique sont complémentaires pour faire progresser le savoir : si les mathématiques à la pointe de l'époque ont permis la description de la gravité en termes de géométrie de l'espace-temps, l'interprétation des solutions de cette description ont permis de prévoir l'existence d'objets encore très abstraits au début du 20^e siècle, comme les trous noirs ou les ondes gravitationnelles. Il aura fallu attendre 2015 pour que l'on observe directement la présence de ces deux réalités physiques, avec la première détection d'ondes gravitationnelles, grâce à la collaboration LIGO.

Du point de vue expérimental, des progrès énormes ont également été accomplis, tant en termes de technique que de mise en réseau de spécialistes issus de branches différentes, afin de tester les prédictions de la relativité ou d'essayer d'en atteindre les limites, lesquelles restent à ce jour à découvrir. Notre univers, qui reste le meilleur laboratoire à cet effet, nous surprend encore et toujours. Chaque découverte ne fait qu'attester de notre ignorance et confirmer qu'il nous reste encore beaucoup à apprendre. Mais la vision relativiste reste valable, élégante, solide et toujours impressionnante de simplicité, en dépit de son formalisme mathématique si abscons pour le grand public.

Aujourd'hui, les projets en cosmologie visant à tester la relativité se multiplient, et les expériences, menées par le biais de collaborations impliquant des centaines de scientifiques, se poursuivent, parfois sur des dizaines d'années.

Le travail d'analyse et d'interprétation des nouveaux résultats et des surprises que l'univers nous réserve est quant à lui entre les mains des nouvelles et des prochaines générations. Raison pour laquelle il est capital que les élèves d'aujourd'hui soient dès à présent conscients des enjeux de la recherche fondamentale. C'est hélas principalement en raison du niveau mathématique sur lequel repose la physique du 20^e siècle que, dans les écoles secondaires, les sujets enseignés sont pour la plupart issus des découvertes jusqu'au 19^e siècle. Alors que la physique est de plus en plus perçue comme une branche « difficile » et « démotivante » par les jeunes, l'idée du projet SwissMAP a été d'ouvrir le monde fascinant de la relativité générale aux élèves du niveau bac / maturité et, par la même occasion, de montrer comment a évolué la démarche scientifique au cours du siècle dernier. Le but n'a pas été de substituer les sujets enseignés durant le curriculum classique en mathématiques ou en physique, mais au contraire d'en améliorer l'appropriation, par le biais d'un sujet qui restera longtemps encore source d'émerveillement, tant pour les élèves que pour chacun d'entre nous.

Professeur Anton Alekseev
Directeur du pôle de recherche nationale SwissMAP
Université de Genève



« Deux choses sont infinies : l'univers et la bêtise humaine. Mais en ce qui concerne l'univers, je n'en ai pas encore acquis la certitude absolue. »

A. Einstein

Avant-propos

L'ouvrage que vous avez sous les yeux a été originairement conçu pour servir de support à des activités destinées aux élèves du collège de Genève (niveau bac/maturité), afin de les motiver à approfondir leurs connaissances en physique et en mathématiques par l'étude de sujets fascinants. Plus généralement, il propose une introduction à la cosmologie et à certaines notions de la relativité générale pour le lecteur non spécialiste, mais ayant une bonne formation pré-universitaire en mathématiques et en sciences, ainsi qu'une curiosité pour ces thèmes. Cependant, cet ouvrage ne doit pas être considéré comme un traité exhaustif de cosmologie, d'astrophysique et/ou de relativité.

Dans l'intention de familiariser une large gamme de lecteurs à ces sujets qui pourraient paraître comme peu accessibles, mes choix se sont avant tout orientés vers la recherche d'un équilibre entre la rigueur scientifique et l'accessibilité pour le public visé. Dans cette perspective, l'ordre et le niveau de difficulté des sujets traités a été pensé pour que le lecteur puisse s'y immerger graduellement et, par le biais d'exercices complémentaires disponibles en ligne (<http://nccr-swissmap.ch/education/highschool/GRcourse>), décider dans quelle mesure il souhaite approfondir certaines notions, sans pour autant renoncer à une compréhension globale.

Les deux premiers chapitres proposent une introduction à l'astrophysique qui permet d'entrer dans le sujet par des contenus familiers, tout en donnant une première prise de conscience des ordres de grandeur en jeu et des éléments observationnels clés développés lors du siècle dernier. Il en ressort la nécessité d'une nouvelle vision de la gravité dans la description de l'univers. Le but de ces deux premiers chapitres est ainsi de poser les bases qui motivent l'introduction des concepts de relativité générale qui suivent, dans les chapitres 3 et 4. Ici, le choix de ne pas se référer aux équations d'Einstein, mais de donner une description des concepts de courbure en se basant uniquement sur les mathématiques du lycée, fait partie des prérogatives de cet ouvrage et de son originalité.

Les chapitres 5 et 6, sur les lentilles gravitationnelles et les trous noirs, ont cette position dans l'ouvrage car, d'une part, ils font partie des applications astrophysiques fascinantes de la relativité générale et d'autre part, sont des prérequis pour mieux comprendre le traitement des équations cosmologiques et l'histoire thermique de l'univers, qui occupent les deux chapitres suivants. Je considère que la section sur l'évaporation des trous noirs est l'un des sujets parmi les plus fascinants, qui, de plus, se révèle très utile d'un point de vue pédagogique. Il s'agit d'un des exemples les plus remarquables de comment, avec des moyens relativement simples (comme le raisonnement semi-quantitatif), on peut arriver à estimer des grandeurs dans des domaines très éloignés des sujets étudiés traditionnellement. Ces estimations sont le fruit de l'application de différentes notions transversales à toute la physique (radiation du corps noir,



gravitation, énergie) et aident à reconnaître quand et comment il est possible de faire des approximations en physique, en donnant un portrait exemplaire de la démarche scientifique, dont les non-experts ont souvent une image plutôt biaisée.

Avec les chapitres 7 et 8, on entre dans le cœur de la cosmologie. Ici, les considérations observationnelles du début de l'ouvrage sont reprises et approfondies par la modélisation mathématique. Encore une fois, le traitement est simplifié par rapport à un cours universitaire rigoureux, mais l'intuition, s'appuyant sur les résultats obtenus, permet de comprendre les principaux enjeux et les questions irrésolues de la recherche actuelle.

Un chapitre sur les ondes gravitationnelles vient clore cet ouvrage. Ces ondes sont une application remarquable (sinon la plus remarquable) de la relativité générale. De plus, contrairement aux lentilles gravitationnelles et aux trous noirs, les ondes gravitationnelles nécessitent une étude de systèmes gravitationnels dynamiques. La compréhension approfondie de la section finale, sur les conséquences de la détection d'ondes gravitationnelles, complète une vision d'ensemble des enjeux de la cosmologie moderne.

Pour terminer, comme la description de l'univers dans son ensemble demande la connaissance de nombreux chapitres de physique apparemment très éloignés (comme la relativité restreinte, l'effet de marée, la physique de particules ou encore la radiation du corps noir) et qu'il n'est pas évident que le lecteur non spécialiste ait l'ensemble de ce bagage à l'esprit, l'ouvrage est complété par différentes annexes. Leur but est d'assurer une meilleure autonomie dans la lecture de l'ouvrage en mettant à disposition les bases de ces contenus lorsqu'ils sont nécessaires à la compréhension du texte principal.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été produit grâce au financement du pôle national de recherche « The Mathematics of Physics » (SwissMAP), soutenu par le Fond National Suisse de la Recherche Scientifique, l'Université de Genève et l'ETH-Zurich ainsi qu'à la collaboration, les conseils et les encouragements du prof. Andreas Müller, que je remercie profondément. Je suis également très reconnaissante à Florian Dubath pour son soutien et les précieux échanges, ainsi que pour sa précieuse contribution à de nombreux dessins. Je remercie sincèrement pour leur lecture attentive et leurs remarques et conseils constructifs Stefano Foffa, Martin Kunz, Laura Weiss, François Mireval, Jacques Bochet, Danuta Paraficz, Dominique Eckert, ainsi que les professeurs Philippe-André Martin et Jean-Philippe Ansermet. Merci aussi à Mélanie Chappuis pour les échanges encourageants et à Fabio Dubath pour ses dessins.

En terminant ce travail, j'ai une pensée reconnaissante pour les élèves qui ont suivi le cours d'option complémentaire en 4^e année aux collèges Rousseau et A. Chavanne pendant les semestres d'hiver 2015, 2016 et 2017 : le partage de leurs points de vue sur le cours et les sujets étudiés a été très important pour de nombreux choix dans les remaniements du texte, et dans ma motivation personnelle.

Table des matières

Préface	vii
Avant-propos	ix
Table des matières	xi
Introduction	1
1 Aperçu de l'univers astrophysique	7
1.1 Distances	7
1.2 Répartition de la matière baryonique	8
1.2.1 Systèmes planétaires	8
1.2.2 Amas d'étoiles	8
1.2.3 Galaxies	10
1.2.4 Groupes et amas de galaxies	13
1.2.5 Superamas	14
1.2.6 Feuilletés et filaments délimitant des bulles	16
1.3 Composition chimique	18
1.4 Matière baryonique non lumineuse	19
1.5 Matière noire	20
1.5.1 Vitesse de rotation des galaxies	20
1.5.2 Vitesse des galaxies dans les amas	21
1.5.3 Formation de structures	21
1.5.4 Caractéristiques de la matière noire	22
1.6 Principe cosmologique	25
2 Expansion	27
2.1 Le paradoxe de la nuit noire	27
2.2 Décalage spectral vers le rouge ou redshift	29
2.3 Loi de Hubble	31
2.3.1 Interprétation de la constante de Hubble	33
2.3.2 Vitesse de la lumière dépassée	33
2.3.3 Temps caractéristique	34
2.4 Modèle du Big Bang	35
2.5 Fond diffus cosmologique (CMB)	37
2.5.1 Découplage	37
2.5.2 Inhomogénéités du CMB	38
2.6 Énergie noire	41
2.6.1 Explosion de supernova Ia	41
2.6.2 Expansion accélérée	43
2.7 Répartition de l'énergie de l'univers	44

3	Principe d'équivalence	47
3.1	Masse grave et masse inerte	47
3.2	Équivalence de référentiels	48
4	Courbure de l'espace-temps	51
4.1	Courbure d'un arc	51
4.2	Courbure de Gauss en un point d'une surface	53
4.3	Courbure totale d'une surface	54
4.4	Caractéristiques des surfaces courbes	55
4.4.1	Géodésiques et plus courte distance	55
4.4.2	Mesure de la courbure totale d'une surface	58
4.4.3	Volumes, surfaces et périmètres	58
4.4.4	Triangles	60
4.5	Une nouvelle inertie	62
4.6	Courbure de l'univers	64
5	Lentilles gravitationnelles	67
5.1	Angle de déflexion	67
5.2	Microlensing	71
5.3	Strong lensing	72
5.3.1	Rayon d'Einstein	75
5.4	Weak lensing	76
5.4.1	Weak lensing du CMB et matière noire	78
6	Trous noirs	79
6.1	Énergie potentielle gravitationnelle	79
6.2	Vitesse de libération	81
6.3	Rayon de Schwarzschild	84
6.4	Densité d'un trou noir	86
6.5	No-hair theorem	87
6.6	Évaporation d'un trou noir	89
6.6.1	Fluctuations quantiques du vide	89
6.6.2	Effet de marée près de l'horizon	90
6.6.3	Température d'un trou noir	91
6.6.4	Estimation du temps d'évaporation	93
7	Équations cosmologiques	95
7.1	Distance propre et distance comobile	95
7.1.1	Facteur d'échelle et loi de Hubble	96
7.1.2	Facteur d'échelle et redshift d'une source	96
7.2	Première équation cosmologique	97
7.3	Densité critique	99
7.4	Deuxième équation cosmologique	100
7.5	Équation d'état	102
7.6	Solutions particulières	102
7.6.1	Univers de matière	103
7.6.2	Univers de rayonnement	105

7.6.3	Univers d'énergie noire et constante cosmologique Λ . . .	106
7.7	Cas limites de la solution générale	108
7.8	Paramètres de densité	109
7.9	Époques d'équivalence	112
7.10	Distances cosmologiques	113
7.10.1	Distance de traversée D_T	114
7.10.2	Distance comobile D_0	116
7.10.3	Distance propre au moment de l'émission D_{em}	116
7.10.4	Distance angulaire D_A	117
7.10.5	Distance de luminosité D_L	119
7.10.6	Résumé des formules des distances cosmologiques	120
8	Chronologie du Big Bang	121
8.1	Ère de Planck ($t < 10^{-43}$ s)	122
8.2	Grande unification (10^{-43} s $< t < 10^{-35}$ s)	124
8.3	Ère des quarks (10^{-35} s $< t < 10^{-9}$ s)	125
8.3.1	Modèle de l'inflation (10^{-35} s $< t < 10^{-32}$ s)	125
8.4	Ère des hadrons (10^{-9} s $< t < 1$ s)	130
8.4.1	Confinement des quarks en hadrons	130
8.4.2	Annihilation des nucléons	131
8.5	Ère des leptons (1 s $< t < 10^2$ s)	132
8.5.1	Découplage des neutrinos	132
8.5.2	Annihilation des leptons	132
8.6	Ère des photons (10^2 s $< t < 10^6$ ans)	132
8.6.1	Nucléosynthèse du Big Bang	132
8.6.2	Recombinaison	134
8.6.3	Découplage du rayonnement de la matière	135
8.7	Ère de la matière (10^6 ans $< t < 10^{10}$ ans)	136
8.7.1	Âges sombres	136
8.7.2	Réionisation et formation des premières structures	137
9	Ondes gravitationnelles	139
9.1	Système binaire en mouvement	139
9.1.1	Système binaire comme distribution quadrupolaire de la masse	140
9.2	Effet d'une onde gravitationnelle sur un corps	141
9.2.1	Déformation	141
9.2.2	Amplitude	142
9.3	Détection	145
9.3.1	Le système binaire Hulse-Taylor	146
9.3.2	Détecteurs terrestres : les interféromètres	146
9.3.3	Première détection, GW150914	149
9.4	Conséquence de l'astronomie des ondes gravitationnelles	151
9.4.1	Astrophysique	151
9.4.2	Physique fondamentale	153
9.4.3	Cosmologie moderne	155

Annexes	159
A Conversions et grandeurs utiles	159
B Effet de marée	161
B.1 Effet axial	161
B.2 Effet latéral	164
B.3 Spagettification	167
C Bases de relativité restreinte	169
C.1 Invariance galiléenne et universalité du temps	169
C.2 Électromagnétisme classique et propagation de la lumière	171
C.3 Principe de relativité et universalité de la vitesse de la lumière	172
C.4 Transformations de Lorentz et relativité des grandeurs	173
C.5 Masse et énergie relativistes	177
D Radiation du corps noir	181
D.1 Loi de Wien	181
D.2 Loi de Stefan-Boltzmann	182
E Équation d'état d'un gaz parfait	185
E.1 Principe d'équipartition de l'énergie	187
F Particules fondamentales	189
F.1 Leptons	190
F.2 Quarks et hadrons	190
F.3 Bosons	190
G Effet tunnel quantique	193
G.1 Puits de potentiel	194
G.2 Mur de potentiel coulombien et fusion nucléaire	194
G.3 Mur de potentiel coulombien et radioactivité α	195
Bibliographie	197

Introduction

La cosmologie (du grec ancien *kosmos*, « monde » et *logia*, « discours ») est la branche de l'astrophysique qui étudie l'origine, la nature, la structure et l'évolution de l'univers à grande échelle. Cette branche est reliée à l'astronomie, mais elle se différencie de celle-ci par son analyse de l'univers dans son ensemble, plutôt que de se focaliser sur la description des astres ou d'autres objets astrophysiques particuliers. Ainsi, la cosmologie est une science qui utilise et relie les dernières connaissances en astrophysique observationnelle et dans les domaines les plus fondamentaux de la physique théorique.

L'utilisation du terme « cosmologie » est relativement récente, mais l'intérêt pour l'étude de l'univers est ancien, bien que pas toujours strictement scientifique. Car par le passé la distinction entre cosmologie physique et cosmologie philosophique-religieuse était floue. Les philosophes grecs proposèrent différents modèles expliquant ce qui était observé dans les cieux : le plus célèbre est le système géocentrique de Ptolémée, représenté dans la figure 1, qui fut utilisé pour prédire le mouvement des astres jusqu'au XVI^e siècle, lorsque N. Copernicus puis J. Kepler et G. Galilée introduisirent un système héliocentrique.

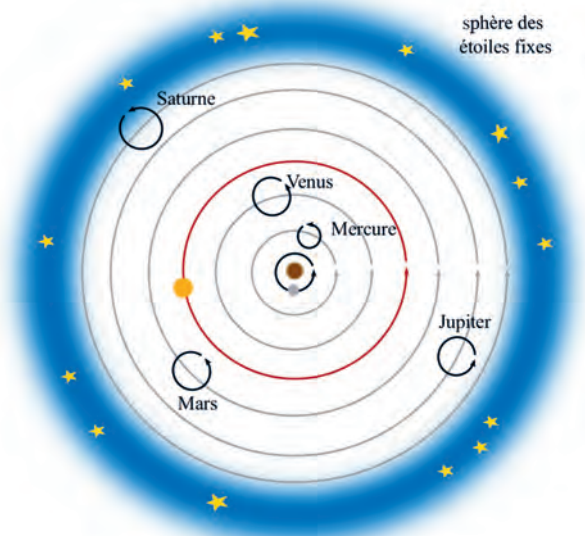


Fig. 1 Schématisation du système géocentrique selon Ptolémée. Les orbites respectives du Soleil et de la Lune sont indiquées en rouge et en noir. Les orbites de certaines planètes du Système Solaire, des épicycles autour de la Terre, sont également indiquées.

En 1687, Isaac Newton publia son ouvrage *Principia Mathematica* où il énonça pour la première fois les lois qui portent son nom aujourd'hui. Les lois de Newton sont à la base de la mécanique newtonienne, elles sont encore utilisées aujourd'hui car, bien que ne s'appuyant que des mathématiques relativement simples, elles permettent de décrire les mouvements de corps allant des molécules aux astres. Ces lois donnèrent un cadre théorique solide au modèle de Copernicus, et aux lois de Kepler.

La théorisation, en 1916, de la relativité générale par Albert Einstein a profondément marqué l'histoire de la cosmologie, au point qu'aujourd'hui nous pouvons parler de cosmologie « prérelativiste » et « postrelativiste » : la cosmologie moderne est celle qui s'est développée à partir de cette date. Bien que la relativité d'Einstein soit, d'un point de vue conceptuel, une vraie révolution par rapport à la mécanique newtonienne, ses prédictions pour les mouvements d'objets ordinaires, à nos échelles, restent quasiment les mêmes. Elles diffèrent par contre pour les mouvements dans lesquels de grandes énergies entrent en jeu, donc de très grandes masses et distances (spatiales et temporelles), et des vitesses qui deviennent non négligeables par rapport à la vitesse de la lumière $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s.

Ainsi l'astrophysique, et en particulier la cosmologie, sont des domaines appropriés pour tester une telle théorie. En effet, la publication par Einstein, en 1917, de la dernière version de sa théorie dans l'article scientifique *Considérations Cosmologiques de la Théorie de la Relativité Générale* encouragea par la suite les chercheurs W. de Sitter, K. Schwarzschild et A. Eddington à rechercher ses implications dans l'étude de la dynamique de l'univers. Il est important de souligner qu'à l'époque on croyait que l'univers était statique, et il n'était pas clair qu'il pouvait exister d'autres galaxies en dehors de la notre : la

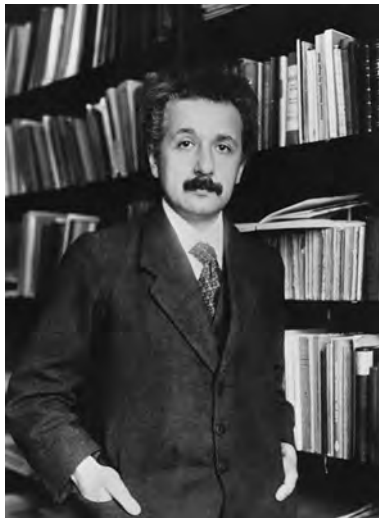


Fig. 2 Albert Einstein, en 1905, avait 26 ans. *Crédit : Topical Press Agency/Getty Images.*

Voie Lactée. Bien sûr les astres pouvaient bouger localement, mais nul ne se doutait que l'espace lui-même pouvait avoir une évolution (dilatation ou contraction). Einstein lui-même pensait que ses équations étaient erronées car non compatibles avec un univers statique, à moins d'ajouter un terme appelé « constante cosmologique ». C'est seulement après la découverte de l'expansion de l'univers, par Edwin Hubble en 1929, que les modèles dynamiques d'univers dérivés des équations d'Einstein par Alexandre Friedmann (1922) et George Lemaître (1927) ont pris leur importance.

Ces nouveaux modèles cosmologiques ont motivé à leur tour une grande avancée dans l'observation astronomique, avancée qui n'a pas cessé jusqu'à aujourd'hui : depuis un siècle les astronomes continuent de sonder les cieux à la recherche de signaux toujours plus distants, pas uniquement dans l'espace-temps, mais aussi dans nos perceptions. Par exemple, il n'était de loin pas imaginable, jusqu'à il y a quelques dizaines d'années, de pouvoir détecter le rayonnement de microondes ou les rayons X émis dans notre univers. Et pourtant ce que nous pouvons observer et les informations qui en découlent révèlent que l'espace que nous habitons n'est pas si « vide », et surtout beaucoup plus mouvementé que ce que l'on pourrait croire à l'œil nu ou avec une simple lunette. De plus, les avancées scientifiques du dernier siècle nous indiquent qu'une grande partie des informations sur notre univers nous est encore difficilement accessible, à cause de limites expérimentales : par exemple nous avons seulement récemment détecté les premières ondes gravitationnelles, alors que leur existence était prouvée depuis des décennies.

Par ailleurs, les mêmes avancées sont à l'origine des grandes questions encore ouvertes, comme nous le verrons dans cet ouvrage. Ces questions restent pour le moment des énigmes, mais en même temps ce sont des indices précieux qui peuvent nous aider dans la recherche d'un nouveau cadre théorique élégant et unifiant, tel que les lois de Newton l'ont été pour le modèle de Copernic.

Nous devons garder à l'esprit que la relativité générale décrit uniquement l'interaction gravitationnelle et que dans l'univers actuel, très dilué et froid, la gravitation est largement prépondérante aux grandes échelles. Mais, comme nous le verrons, cela n'a pas toujours été le cas : en remontant le temps on arrive à un instant où la matière était bien plus dense que maintenant, constituant un milieu de particules élémentaires chaud, dans lequel la gravitation était aussi intense – et peut-être non distinguable – que les autres interactions. Afin de décrire cet état de l'univers, toutes les interactions existantes devraient être prises en considération par une théorie unique, qui unifierait la relativité générale, pour la gravitation, avec le modèle standard (issu de la théorie quantique des champs), qui décrit aujourd'hui les autres interactions en l'absence de gravitation.

La relativité générale utilise, pour la gravitation, un cadre spatio-temporel continu mais déformable. Elle se base sur l'équivalence entre la structure de l'espace-temps et son contenu en énergie. Or la physique quantique indique que l'énergie est quantifiée (ne s'échange que par valeurs discrètes). Combiner les deux théories reviendrait donc à quantifier la structure même de l'espace-temps, d'où la notion parfois évoquée d'une structure microscopique spongieuse de l'espace-temps. Il y a bien longtemps que les physiciens cherchent à quantifier la gravitation, pour l'instant sans succès. Dans ces conditions, et avec cette

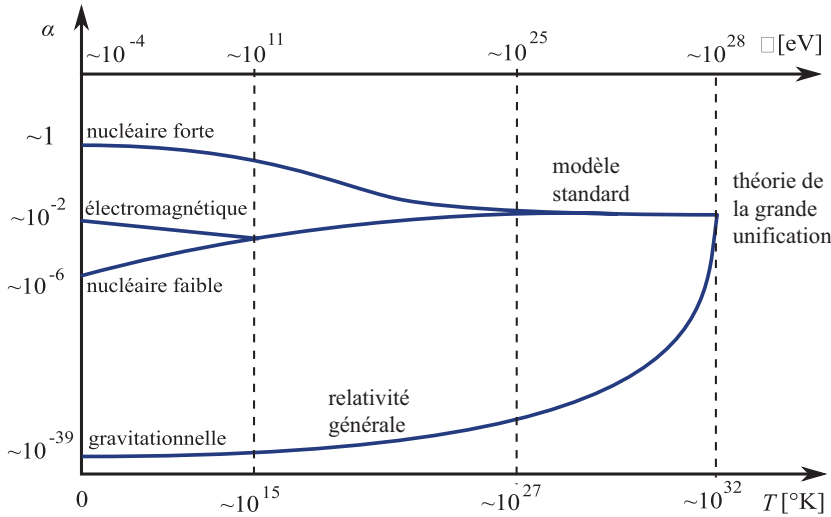


Fig. 3 Intensités des interactions fondamentales en fonction de la température et de l'énergie du milieu. Les axes ne sont pas à l'échelle et l'allure des courbes est indicative. La constante de couplage α relative à chaque interaction est une grandeur sans dimensions comprise entre 0 et 1, qui en définit l'intensité. Par exemple, à des basses températures, pour l'interaction électromagnétique $\alpha_{em} = \frac{ke^2}{\hbar c} = 1/137$, et pour la gravitation $\alpha_g = \frac{Gm_e^2}{\hbar c} \sim 10^{-39}$, où e et m_e sont respectivement la charge et la masse de l'électron et les autres grandeurs sont des constantes fondamentales de la physique (Annexe A).

limitation, la relativité générale reste actuellement le meilleur cadre qui nous permet de décrire l'univers.

Dans cet ouvrage nous proposons une introduction aux modèles cosmologiques élaborés pendant le dernier siècle, incluant un regard aux développements des dernières décennies. En effet, alors que tout au long du XX^e siècle les mesures de paramètres concernant l'expansion de l'univers, sa densité ou sa courbure ont été assez rares et peu précises, vers le début des années 2000 la situation a rapidement évolué, les mesures ont gagné en précision et en fréquence, permettant une analyse statistique pointue.

Les mathématiques de la relativité générale, qui sont derrière ces modèles, sont bien trop poussées pour développer ici une approche rigoureuse du sujet. Les lecteurs intéressés à un traitement plus avancé peuvent trouver cela dans les références [1], [2] ou [3]. Néanmoins, nous rappelons que la relativité générale est en lien avec la mécanique newtonienne dans la mesure où elle en est une généralisation, et souvent elle ajoute au résultat du traitement newtonien des corrections que nous introduirons a posteriori en les justifiant de manière qualitative. De plus, certains concepts à la base de la relativité générale comme la courbure de l'espace-temps ou le principe d'équivalence se prêtent à une description qualitative combinée aux mathématiques du niveau lycéal, le but

étant de familiariser le lecteur avec ces concepts qui restent souvent abstraits et loin des connaissances de base.

Pour une compréhension plus approfondie des sujets, chaque chapitre se complète avec sa série d'exercices ainsi que les corrections, disponibles à l'adresse <http://nccr-swissmap.ch/education/highschool/GRcourse>.



