

Préface

Pratiquement toutes et tous les jeunes s'intéressent aux grandes questions de la cosmologie : Qu'est-ce qu'est le monde ? Où se termine-t-il ? Comment était-il dans le passé ? Quel est son destin ? La relativité générale fascine aussi. Cette célèbre et mystérieuse théorie de Einstein dont on dit qu'elle est si difficile à comprendre : est-ce qu'un étudiant ou une étudiante du secondaire peut en percevoir l'essentiel ?

Je me rappelle encore vivement de mon premier cours de physique au cycle d'orientation. Notre professeur nous expliquait que toute matière était composée d'atomes ; j'ai été très surprise : comment est-il possible que des substances aussi différentes que de l'eau, une pierre, de l'air ou du bois soient composés des mêmes briques élémentaires ? Je voulais en savoir plus sur cette question et toutes celles qui suivaient après avoir trouvé des réponses bien que partielles. En fin de compte c'est cette première exposition au sujet qui m'a motivée à faire des études en physique.

Bien sûr, toutes et tous les élèves ne feront pas des études de physique, mais il est important de leur montrer la fascination qu'on peut éprouver quand on constate que la nature semble suivre des lois mathématiques et la satisfaction ressentie à appréhender des phénomènes sur la base d'arguments logiques. Convaincre les élèves qu'avoir un esprit critique et investigateur permet de comprendre le monde d'une façon beaucoup plus approfondie et efficace que la croyance en les affirmations d'une autorité supérieure doit ou devrait être l'un des objectifs principaux de l'enseignement scientifique.

C'est cet esprit critique et investigateur – en bref la méthode scientifique – qui est développé dans ce livre en traitant un sujet tellement fascinant. L'auteure ne réussit pas seulement à passionner les lecteurs et lectrices pour la cosmologie, mais elle l'aborde de façon non triviale, tout en étant adapté aux connaissances d'un ou d'une élève motivé-e du secondaire. De plus, une jeune personne qui a étudié ce livre, n'aura pas uniquement développé ses connaissances scientifiques et mathématiques, mais elle aura absorbé suffisamment d'informations sur la cosmologie moderne pour comprendre les grands problèmes de la recherche actuelle dans ce domaine.

Je connais bien l'auteure, qui a fait sa thèse de doctorat partiellement dans mon groupe. Elle est l'un de ces esprits critiques et investigateurs dont nous avons tellement besoin dans ce monde. Elle sait analyser ses résultats scientifiques en les mettant en question, en étudiant leurs limites et elle ne se satisfait pas d'arguments approximatifs, mais va toujours au fond des choses comme elle le montre bien dans ce livre.

Je ne citerai que deux exemples du contenu du livre : Elle démontre pourquoi l'expansion de l'Univers n'est pas simplement l'éloignement des galaxies d'un centre commun, mais que ce phénomène est dû à une vraie expansion de l'espace

lui-même entre les galaxies. Ceci est un exemple du soin de rigueur pratiqué par l'auteure, malgré la volonté de ne pas utiliser les outils mathématiques à disposition dans un cours universitaire du 2^e cycle, là où cosmologie et relativité générale sont normalement enseignées pour la première fois. Un autre exemple est l'introduction de la notion de courbure qui commence avec des exemples en une et deux dimensions faciles à illustrer et proches de l'expérience des élèves. Cependant, elle arrive ensuite à expliquer les géodésiques et leur visualisation dans un espace-temps courbé. Dans ce chapitre aussi, la rigueur scientifique que l'auteure peut obtenir avec des outils mathématiques modestes est impressionnante.

Ce livre est précieux. Je le recommande très fortement et non seulement aux jeunes collégiennes et collégiens mais aussi à leurs professeurs et leurs professeurs et à tout un chacun intéressé par la cosmologie et la relativité générale.

Professeure Ruth Durrer
Département de Physique Théorique de l'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 ont été pensés pour que le lecteur puisse s'y immerger graduellement et, par le biais d'exercices complémentaires disponibles en ligne (<https://physalice.ch/cosmologie/>), décider dans quelle mesure il souhaite appliquer et/ou approfondir certaines notions, sans pour autant renoncer à une compréhension globale.

Si la première édition de ce cours a été un essai – quelque peu audacieux – de proposition d'un nouveau niveau de vulgarisation de ces sujets à un public élargi, cette deuxième édition en constitue le complètement et l'épanouissement. Le parcours reste le même que dans la précédente édition, tout en ayant bénéficié d'une part de l'application sur terrain de l'enseignement dans les classes des lycées de plusieurs pays, d'autre part de la relecture soignée de la part scientifiques passionnés par les sujets traités – qu'ils soient dans leurs domaines de recherche ou pas. C'est précisément la confrontation croisée de lectorats très différents qui constitue la richesse principale de ce texte : que cela soit par les questions des étudiantes et étudiants ou par les suggestions des collègues. Tout au long des dernières années, les occasions ont été nombreuses d'apporter des modifications importantes au texte, allant de l'ajouts d'explications à celui de sections entières.

En outre, les observations dans ces domaines de la connaissance étant en constante évolution, les découvertes faites depuis 2018 ont été une source d'inspiration de nouvelles activités et explications, ce qui a conduit à un enrichissement du livre et du répertoire d'exercices. Par exemple, l'image de M87* par le télescope terrestre Event Horizon en 2019, ou la toute première image de champ profond du télescope spatial James Webb en 2022, sont naturellement venues compléter cet ouvrage. Cette évolution est par ailleurs continuelle, c'est pourquoi les séries d'exercices disponibles en ligne sont constamment mises à jour.

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 motivant l'introduction des concepts de relativité générale, qui suivent dans le chapitre 3, réunissant en un seul deux chapitres de l'édition de 2018. 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.

Le deux chapitres suivants, le quatrième sur l'effet de lentille gravitationnelle et le cinquième sur les trous noirs, concernent deux applications remarquables des idées de la relativité générale. Avec le deuxième chapitre, il s'agit des parties ayant bénéficié des changements les plus profonds, incluant l'ajout de sections entières : par exemple celle sur le spectre de puissance du CMB, celle sur l'amplification dans l'effet de lentille ou encore celle traitant l'influence de la gravitation sur la mesure des durées. D'autres sections, comme celle sur la loi de Hubble-Lemaître, celle sur le principe d'équivalence ou celle sur l'évaporation des trous noirs, ont été complètement revues et améliorées. En particulier, l'évaporation des trous noirs reste pour moi l'un des sujets à la fois parmi les plus fascinants et les plus difficiles à comprendre – et donc aussi à expliquer. C'est pourquoi il se révèle également particulièrement fécond d'un point de vue pédagogique. Il s'agit en effet d'un des exemples saillants de comment, avec des moyens relativement simples – comme le raisonnement semi quantitatif – il est possible d'estimer des grandeurs dans des domaines très éloignés des sujets étudiés traditionnellement, réunissant les théories physiques les plus avancées à ce jour. Ces estimations sont le fruit de l'application de différentes notions transversales à toute la physique (entre autres la radiation, la gravitation ou l'énergie) et aident à reconnaître quand et comment il est possible de faire des approximations dans la modélisation, en donnant un portrait exemplaire de la démarche scientifique, dont les non-experts ont souvent une image biaisée.

Avec les chapitres 6 et 7, 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 enjeux principaux 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 en mettant à disposition les bases de ses contenus lorsqu'elles sont nécessaires à la compréhension du texte principal.

REMERCIEMENTS

Ce livre a vu le jour grâce au soutien du pôle national de recherche « The Mathematics of Physics » (SwissMAP), financé par le Fond National Suisse de la Recherche Scientifique, l'Université de Genève et l'ETH-Zurich, ainsi qu'à la collaboration au sein de l'équipe de Didactique de la Physique de l'Institut Universitaire de Formation des Enseignants à l'Université de Genève. Je suis particulièrement reconnaissante à Andreas Müller, qui n'a jamais arrêté d'encourager l'avancement de ce projet avec enthousiasme, ainsi qu'à Anton Alekseev, Camille Bonvin, Ruth Durrer et Martin Kunz pour leur précieux appui et leur bienveillance.

Un grand merci également à Florian Dubath qui, depuis le début de mes réflexions, a constamment été un soutien et un interlocuteur remarquable, de tout point de vue.

Cette nouvelle édition n'existerait pas si la première ne l'avait pas précédée, c'est pourquoi je tiens à renouveler ma gratitude aux nombreuses personnes qui ont contribué à la réalisation de l'édition de 2018, à qui s'ajoutent les collègues qui m'ont fait part de leurs retours, suggestions et conseils au cours des dernières années. En particulier, une grande partie des améliorations sont le résultat de la relecture attentive et critique de l'ensemble du cours de la part de Nicolas Cretton – également en charge de la traduction du texte en italien et en anglais – que je remercie abondamment. Son questionnement a été la base de discussions passionnantes, qui ont largement contribué à la qualité finale du texte, à la fois dans la forme et dans le fond.

Je remercie sincèrement François Gaille pour le soin de ses relectures de la totalité du cours et des exercices – de plus que pour les encouragements, qui ont pour moi beaucoup compté.

Je suis reconnaissante aux nombreux collègues qui ont pris le temps de relire des parties du texte et/ou de me faire part de leurs précieux retours, que cela soit de par leur expérience académique ou dans l'enseignement, en particulier Eugenio-Fiore Alba, Jean-Philippe Ansermet, Sylvain Bréchet, Elisabeth Daix, Dominique Eckert, Christian Ferrari, Damien Gollut, Chiara Mastropietro, Peter Kreuzer, Stéphane Paltani, Pascal Rebetez, Sébastien Roch, Damien Scimeca, Thomas Speer et Luigi Vacondio.

Je remercie aussi Sylvain Collette pour l'aimable collaboration.

Je tiens enfin à exprimer ma gratitude aux étudiantes et aux étudiants qui cultivent leur curiosité scientifique inconditionnelle et savent apprécier la beauté de la démarche en apprenant ces sujets, au delà des difficultés qu'ils peuvent rencontrer au premier abord. Leur fascination et leur espoir sont pour moi une source de motivation inépuisable, que j'ai la chance de savourer au quotidien, avec la redécouverte des sujets me passionnant depuis que j'étais l'une d'entre eux.

Table des matières

Préface	vii
Avant-propos	ix
Table des matières	xiii
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	9
1.2.3 Galaxies	10
1.2.4 Groupes et amas de galaxies	13
1.2.5 Superamas	16
1.2.6 Filaments, murs et vides cosmiques	16
1.3 Composition chimique	19
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	22
1.5.3 Formation de structures	22
1.5.4 Caractéristiques de la matière noire	23
1.6 Principe cosmologique	26
1.6.1 Temps cosmologique	26
2 Expansion	29
2.1 Le paradoxe de la nuit noire	29
2.2 Décalage spectral vers le rouge ou redshift	31
2.2.1 Effet Doppler et redshift cosmologique	33
2.3 Loi de Hubble-Lemaître	34
2.3.1 Interprétation de la constante de Hubble	35
2.3.2 Vitesse de la lumière dépassée	37
2.3.3 Rayon de Hubble et univers observable	37
2.3.4 Temps caractéristique	40
2.4 Modèle du Big Bang	41
2.5 Fond diffus cosmologique (Cosmic Microwave Background)	43
2.5.1 Recombinaison et découplage	43
2.5.2 Inhomogénéités	45

2.5.3	Spectre de puissance	47
2.6	Énergie noire	51
2.6.1	Explosion de supernova Ia	51
2.6.2	Expansion accélérée	54
2.7	Répartition de l'énergie de l'univers	56
3	Bases de relativité générale	59
3.1	Masse grave et masse inerte	59
3.2	Principe d'équivalence	60
3.3	Une nouvelle vision du mouvement inertiel	62
3.4	Surfaces courbes	64
3.4.1	Courbure d'un arc	64
3.4.2	Courbure de Gauss en un point d'une surface	66
3.4.3	Courbure totale d'une surface	67
3.4.4	Géodésiques et distance minimale	68
3.4.5	Mesure de la courbure totale d'une surface	71
3.4.6	Volumes, surfaces et périmètres	72
3.4.7	Triangles	74
3.5	Mouvement inertiel relativiste et géodésiques	75
3.6	Courbure de l'univers	78
4	Lentilles gravitationnelles	81
4.1	Angle de déflexion	81
4.2	Microlentille	85
4.3	Lentille forte	87
4.4	Position et amplification de l'image	89
4.4.1	Rayon d'Einstein	89
4.4.2	Equation de la lentille	91
4.4.3	Coordonnées sphériques	94
4.4.4	Amplification du signal lumineux	96
4.5	Lentille faible	101
4.5.1	Effet de lentille faible sur le CMB et matière noire	103
5	Trous noirs	105
5.1	Énergie potentielle gravitationnelle	105
5.2	Vitesse de libération	107
5.3	Horizon des événements	110
5.4	Densité d'un trou noir	116
5.5	Effet de marée près de l'horizon	121
5.6	No-hair theorem	122
5.7	Évaporation d'un trou noir	123
5.7.1	Température d'un trou noir	124
5.7.2	Estimation du temps d'évaporation	127
5.7.3	Interprétation microscopique	128
5.7.4	Interprétation par effet tunnel quantique	131
5.8	Effets de la gravitation sur l'écoulement du temps	133
5.8.1	Gravité artificielle	133

5.8.2	Dilatation temporelle	137
5.8.3	Redshift gravitationnel	139
6	Équations cosmologiques	141
6.1	Distance propre et distance comobile	141
6.1.1	Facteur d'échelle et loi de Hubble-Lemaître	142
6.1.2	Facteur d'échelle et redshift d'une source	142
6.2	Première équation cosmologique	143
6.3	Densité critique	145
6.4	Deuxième équation cosmologique	146
6.5	Équation d'état	148
6.6	Solutions particulières	149
6.6.1	Univers de matière	149
6.6.2	Univers de rayonnement	151
6.6.3	Univers d'énergie noire et constante cosmologique Λ	153
6.7	Cas limites de la solution générale	154
6.8	Paramètres de densité	156
6.9	Époques d'équivalence	158
6.10	Distances cosmologiques	160
6.10.1	Distance de traversée D_T	162
6.10.2	Distance comobile D_0	163
6.10.3	Distance propre au moment de l'émission D_{em}	164
6.10.4	Distance angulaire D_A	164
6.10.5	Distance de luminosité D_L	166
6.10.6	Résumé des formules des distances cosmologiques	168
7	Chronologie du Big Bang	171
7.1	Ère de Planck ($t < 10^{-43}$ s)	172
7.2	Découplage gravitationnel (10^{-43} s $< t < 10^{-35}$ s)	174
7.3	Ère des quarks (10^{-35} s $< t < 10^{-9}$ s)	175
7.3.1	Modèle de l'inflation (10^{-35} s $< t < 10^{-32}$ s)	176
7.4	Ère des hadrons (10^{-9} s $< t < 1$ s)	181
7.4.1	Confinement des quarks en hadrons	181
7.4.2	Annihilation des nucléons	181
7.5	Ère des leptons (1 s $< t < 10^2$ s)	182
7.5.1	Annihilation des leptons	182
7.5.2	Découplage des neutrinos	182
7.6	Ère des photons (10^2 s $< t < 10^6$ ans)	183
7.6.1	Nucléosynthèse primordiale	183
7.6.2	Recombinaison	185
7.6.3	Découplage entre rayonnement et matière	185
7.7	Ère de la matière (10^6 ans $< t < 10^{10}$ ans)	187
7.7.1	Âges sombres	187
7.7.2	Réionisation et formation des premières structures	188

8 Ondes gravitationnelles	193
8.1 Système binaire en mouvement	193
8.1.1 Système binaire comme distribution de masse quadrupolaire	194
8.2 Effet d'une onde gravitationnelle sur un corps	195
8.2.1 Déformation	195
8.2.2 Amplitude	197
8.3 Détection des ondes gravitationnelles	199
8.3.1 Le système binaire Hulse-Taylor	200
8.3.2 Détecteurs terrestres : les interféromètres	201
8.3.3 Première détection, GW150914	205
8.4 Conséquence de l'astronomie des ondes gravitationnelles	206
8.4.1 Astrophysique	206
8.4.2 Physique fondamentale	209
8.4.3 Cosmologie moderne	212
Annexes	217
A Conversions et grandeurs utiles	217
B Effet de marée	219
B.1 Effet axial	219
B.2 Effet latéral	222
B.3 Spaghettification	225
C Bases de relativité restreinte	227
C.1 Invariance galiléenne et universalité du temps	227
C.2 Électromagnétisme classique et propagation de la lumière	229
C.3 Principe de relativité et universalité de la vitesse de la lumière	230
C.4 Transformations de Lorentz et relativité des grandeurs	231
C.5 Masse et énergie relativistes	235
D Radiation du corps noir	239
D.1 Loi de déplacement de Wien	239
D.2 Loi de Stefan-Boltzmann	240
D.3 Distance de luminosité et flux observé	241
E Équation d'état d'un gaz parfait	243
E.1 Principe d'équipartition de l'énergie	246
F Particules fondamentales	247
F.1 Leptons	248
F.2 Quarks et hadrons	248
F.3 Bosons	248

G Effet tunnel quantique	251
G.1 Puits de potentiel	252
G.2 Mur de potentiel coulombien et fusion nucléaire	252
G.3 Mur de potentiel coulombien et radioactivité α	253
Bibliographie	255

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. En effet, 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 Nicolas Copernic puis Johannes Kepler et Galilée introduisirent un système héliocentrique.

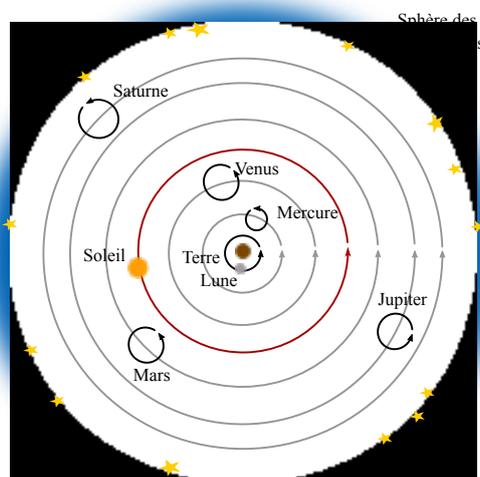


Fig. 1 Schématisation du système géocentrique selon Ptolémée. Les orbites respectives du Soleil et de la Lune sont indiquées en rouge et en noir. Chaque planète se déplace sur un petit cercle (l'épicycle) dont le centre se déplace sur un grand cercle coplanaire (le déférent) centré sur la Terre.

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 sur 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 Copernic 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 $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.



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

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 Willem de Sitter, Karl Schwarzschild et Arthur 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 nôtre :

la 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 suite à l'observation de l'expansion de l'univers en 1929 par Edwin Hubble, 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 à grande échelle. Bien que, comme nous le verrons, cela n'ait 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.

Pour décrire la gravitation, la relativité générale utilise 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 celui-ci. Il y a bien longtemps que les physiciens cherchent à quantifier la gravitation, pour l'instant sans succès. Dans ces conditions, et avec cette

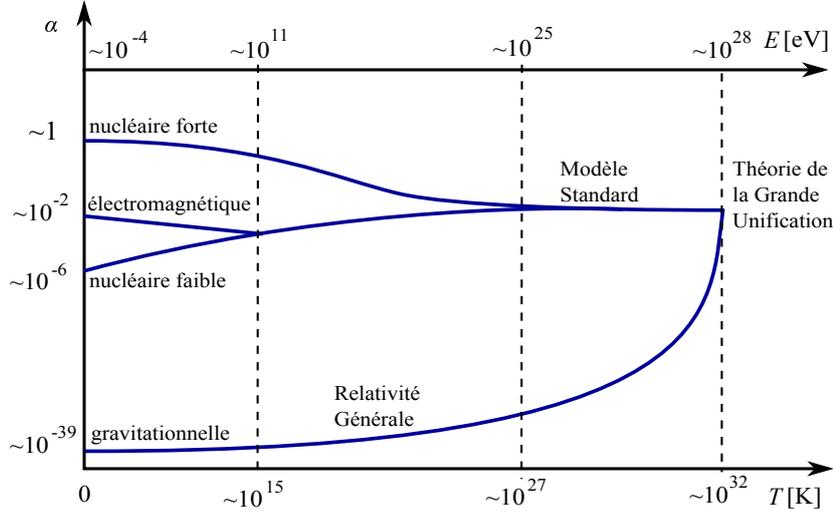


Fig. 3 Intensités des interactions fondamentales en fonction de la température et de l'énergie du milieu. Les axes ne sont pas à l'échelle et l'allure des courbes est indicative. La constante de couplage α relative à chaque interaction est une grandeur sans dimensions comprise entre 0 et 1, qui en définit 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 sur les développements des dernières décennies. En effet, alors que tout au long du XX^e siècle les mesures des 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 est complété par sa série d'exercices ainsi que les corrections, disponibles à l'adresse <https://physalice.ch/cosmologie/>.



