

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.

Cette deuxième édition suit le même parcours que la précédente, 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 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, la première image de M87* en 2019, ou la remise du prix Nobel en 2020 suite à la découverte du trou noir au cœur de notre galaxie sont naturellement venues compléter cet ouvrage.

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. Ces deux chapitres et le deuxième, sont ceux qui ont 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 sur l'influence de la gravitation sur la mesure des durées. D'autres sections, comme celle sur la loi de Hubble ou celle 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 (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 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 ses contenus lorsqu'elles sont nécessaires à la compréhension du texte principal.

Table des matières

Avant-propos	vii
Table des matières	ix
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	18
1.4 Matière baryonique non lumineuse	20
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
2 Expansion	27
2.1 Le paradoxe de la nuit noire	27
2.2 Décalage spectral vers le rouge ou redshift	29
2.2.1 Effet Doppler et redshift cosmologique	31
2.3 Loi de Hubble-Lemaître	32
2.3.1 Interprétation de la constante de Hubble	33
2.3.2 Vitesse de la lumière dépassée	35
2.3.3 Rayon de Hubble et univers observable	35
2.3.4 Temps caractéristique	38
2.4 Modèle du Big Bang	39
2.5 Fond diffus cosmologique (Cosmic Microwave Background)	42
2.5.1 Découplage	42
2.5.2 Inhomogénéités	43
2.5.3 Spectre de puissance	46
2.6 Énergie noire	50
2.6.1 Explosion de supernova Ia	50

2.6.2	Expansion accélérée	52
2.7	Répartition de l'énergie de l'univers	55
3	Principe d'équivalence	57
3.1	Masse grave et masse inerte	57
3.2	Équivalence de référentiels	58
4	Courbure de l'espace-temps	61
4.1	Courbure d'un arc	61
4.2	Courbure de Gauss en un point d'une surface	63
4.3	Courbure totale d'une surface	64
4.4	Caractéristiques des surfaces courbes	65
4.4.1	Géodésiques et distance minimale	65
4.4.2	Mesure de la courbure totale d'une surface	68
4.4.3	Volumes, surfaces et périmètres	69
4.4.4	Triangles	71
4.5	Une nouvelle inertie	73
4.6	Courbure de l'univers	74
5	Lentilles gravitationnelles	77
5.1	Angle de déflexion	77
5.2	Microlentille	81
5.3	Lentille forte	82
5.4	Position et amplification de l'image	84
5.4.1	Rayon d'Einstein	84
5.4.2	Equation de la lentille	86
5.4.3	Coordonnées sphériques	89
5.4.4	Amplification du signal lumineux	92
5.5	Lentille faible	97
5.5.1	Effet de lentille faible sur le CMB et matière noire	98
6	Trous noirs	101
6.1	Énergie potentielle gravitationnelle	101
6.2	Vitesse de libération	103
6.3	Horizon des événements	106
6.4	Densité d'un trou noir	111
6.5	Effet de marée près de l'horizon	115
6.6	No-hair theorem	117
6.7	Évaporation d'un trou noir	118
6.7.1	Température d'un trou noir	119
6.7.2	Estimation du temps d'évaporation	121
6.7.3	Interprétation microscopique	123
6.7.4	Interprétation par effet tunnel quantique	125
6.8	Effets de la gravitation sur l'écoulement du temps	128
6.8.1	Gravité artificielle	128
6.8.2	Dilatation temporelle	132
6.8.3	Redshift gravitationnel	133

7	Équations cosmologiques	137
7.1	Distance propre et distance comobile	137
7.1.1	Facteur d'échelle et loi de Hubble-Lemaître	138
7.1.2	Facteur d'échelle et redshift d'une source	138
7.2	Première équation cosmologique	139
7.3	Densité critique	141
7.4	Deuxième équation cosmologique	142
7.5	Équation d'état	144
7.6	Solutions particulières	145
7.6.1	Univers de matière	145
7.6.2	Univers de rayonnement	147
7.6.3	Univers d'énergie noire et constante cosmologique Λ	149
7.7	Cas limites de la solution générale	150
7.8	Paramètres de densité	152
7.9	Époques d'équivalence	155
7.10	Distances cosmologiques	156
7.10.1	Distance de traversée D_T	158
7.10.2	Distance comobile D_0	159
7.10.3	Distance propre au moment de l'émission D_{em}	160
7.10.4	Distance angulaire D_A	160
7.10.5	Distance de luminosité D_L	162
7.10.6	Résumé des formules des distances cosmologiques	163
8	Chronologie du Big Bang	165
8.1	Ère de Planck ($t < 10^{-43}$ s)	166
8.2	Grande unification (10^{-43} s $< t < 10^{-35}$ s)	168
8.3	Ère des quarks (10^{-35} s $< t < 10^{-9}$ s)	169
8.3.1	Modèle de l'inflation (10^{-35} s $< t < 10^{-32}$ s)	169
8.4	Ère des hadrons (10^{-9} s $< t < 1$ s)	174
8.4.1	Confinement des quarks en hadrons	174
8.4.2	Annihilation des nucléons	175
8.5	Ère des leptons (1 s $< t < 10^2$ s)	176
8.5.1	Annihilation des leptons	176
8.5.2	Découplage des neutrinos	176
8.6	Ère des photons (10^2 s $< t < 10^6$ ans)	177
8.6.1	Nucléosynthèse primordiale	177
8.6.2	Recombinaison	179
8.6.3	Découplage entre rayonnement et matière	179
8.7	Ère de la matière (10^6 ans $< t < 10^{10}$ ans)	180
8.7.1	Âges sombres	181
8.7.2	Réionisation et formation des premières structures	181
9	Ondes gravitationnelles	187
9.1	Système binaire en mouvement	187
9.1.1	Système binaire comme distribution de masse quadrupolaire	188
9.2	Effet d'une onde gravitationnelle sur un corps	189

9.2.1	Déformation	189
9.2.2	Amplitude	190
9.3	Détection des ondes gravitationnelles	193
9.3.1	Le système binaire Hulse-Taylor	194
9.3.2	Détecteurs terrestres : les interféromètres	194
9.3.3	Première détection, GW150914	198
9.4	Conséquence de l'astronomie des ondes gravitationnelles	200
9.4.1	Astrophysique	200
9.4.2	Physique fondamentale	202
9.4.3	Cosmologie moderne	205
Annexes		209
A Conversions et grandeurs utiles		209
B Effet de marée		211
B.1	Effet axial	211
B.2	Effet latéral	214
B.3	Spaghettification	217
C Bases de relativité restreinte		219
C.1	Invariance galiléenne et universalité du temps	219
C.2	Électromagnétisme classique et propagation de la lumière	221
C.3	Principe de relativité et universalité de la vitesse de la lumière	222
C.4	Transformations de Lorentz et relativité des grandeurs	223
C.5	Masse et énergie relativistes	227
D Radiation du corps noir		231
D.1	Loi de déplacement de Wien	231
D.2	Loi de Stefan-Boltzmann	232
D.3	Flux lumineux observé	233
E Équation d'état d'un gaz parfait		235
E.1	Principe d'équipartition de l'énergie	237
F Particules fondamentales		239
F.1	Leptons	240
F.2	Quarks et hadrons	240
F.3	Bosons	240
G Effet tunnel quantique		243
G.1	Puits de potentiel	244
G.2	Mur de potentiel coulombien et fusion nucléaire	244
G.3	Mur de potentiel coulombien et radioactivité α	245
Bibliographie		247