

# 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

<b>Avant-propos</b>	<b>vii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>ix</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Aperçu de l'univers astrophysique</b>	<b>7</b>
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
<b>2 Expansion</b>	<b>27</b>
2.1 Le paradoxe de la nuit noire . . . . .	27
2.2 Décalage spectral vers le rouge ou redshift . . . . .	29
2.2.1 <a href="#">Effet Doppler et redshift cosmologique</a> . . . . .	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 <a href="#">Rayon de Hubble et univers observable</a> . . . . .	35
2.3.4 Temps caractéristique . . . . .	38
2.4 Modèle du Big Bang . . . . .	39
2.5 Fond diffus cosmologique ( <a href="#">Cosmic Microwave Background</a> ) . . . . .	42
2.5.1 Découplage . . . . .	42
2.5.2 Inhomogénéités . . . . .	43
2.5.3 <a href="#">Spectre de puissance</a> . . . . .	46
2.6 Énergie noire . . . . .	50
2.6.1 Explosion de supernova Ia . . . . .	50

2.6.2	<a href="#">Expansion accélérée</a>	52
2.7	Répartition de l'énergie de l'univers	55
<b>3</b>	<b>Principe d'équivalence</b>	<b>57</b>
3.1	Masse grave et masse inerte	57
3.2	Équivalence de référentiels	58
<b>4</b>	<b>Courbure de l'espace-temps</b>	<b>61</b>
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
<b>5</b>	<b>Lentilles gravitationnelles</b>	<b>77</b>
5.1	Angle de déflexion	77
5.2	Microlentille	81
5.3	Lentille forte	82
5.4	<a href="#">Position et amplification de l'image</a>	84
5.4.1	Rayon d'Einstein	84
5.4.2	<a href="#">Equation de la lentille</a>	86
5.4.3	<a href="#">Coordonnées sphériques</a>	89
5.4.4	<a href="#">Amplification du signal lumineux</a>	92
5.5	Lentille faible	97
5.5.1	Effet de lentille faible sur le CMB et matière noire	98
<b>6</b>	<b>Trous noirs</b>	<b>101</b>
6.1	Énergie potentielle gravitationnelle	101
6.2	Vitesse de libération	103
6.3	<a href="#">Horizon des événements</a>	106
6.4	Densité d'un trou noir	111
6.5	<a href="#">Effet de marée près de l'horizon</a>	115
6.6	<a href="#">No-hair theorem</a>	117
6.7	<a href="#">Évaporation d'un trou noir</a>	118
6.7.1	<a href="#">Température d'un trou noir</a>	119
6.7.2	<a href="#">Estimation du temps d'évaporation</a>	121
6.7.3	<a href="#">Interprétation microscopique</a>	123
6.7.4	<a href="#">Interprétation par effet tunnel quantique</a>	125
6.8	<a href="#">Effets de la gravitation sur l'écoulement du temps</a>	128
6.8.1	<a href="#">Gravité artificielle</a>	128
6.8.2	<a href="#">Dilatation temporelle</a>	132
6.8.3	<a href="#">Redshift gravitationnel</a>	133

<b>7</b>	<b>Équations cosmologiques</b>	<b>137</b>
7.1	Distance propre et distance comobile . . . . .	137
7.1.1	Facteur d'échelle et loi de <a href="#">Hubble-Lemaître</a> . . . . .	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 $\Lambda$ . . . . .	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
<b>8</b>	<b>Chronologie du Big Bang</b>	<b>165</b>
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	<a href="#">Annihilation des leptons</a> . . . . .	176
8.5.2	<a href="#">Découplage des neutrinos</a> . . . . .	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
<b>9</b>	<b>Ondes gravitationnelles</b>	<b>187</b>
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
<b>Annexes</b>		<b>209</b>
<b>A Conversions et grandeurs utiles</b>		<b>209</b>
<b>B Effet de marée</b>		<b>211</b>
B.1	Effet axial . . . . .	211
B.2	Effet latéral . . . . .	214
B.3	Spaghettification . . . . .	217
<b>C Bases de relativité restreinte</b>		<b>219</b>
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
<b>D Radiation du corps noir</b>		<b>231</b>
D.1	Loi de déplacement de Wien . . . . .	231
D.2	Loi de Stefan-Boltzmann . . . . .	232
D.3	Flux lumineux observé . . . . .	233
<b>E Équation d'état d'un gaz parfait</b>		<b>235</b>
E.1	Principe d'équipartition de l'énergie . . . . .	237
<b>F Particules fondamentales</b>		<b>239</b>
F.1	Leptons . . . . .	240
F.2	Quarks et hadrons . . . . .	240
F.3	Bosons . . . . .	240
<b>G Effet tunnel quantique</b>		<b>243</b>
G.1	Puits de potentiel . . . . .	244
G.2	Mur de potentiel coulombien et fusion nucléaire . . . . .	244
G.3	Mur de potentiel coulombien et radioactivité $\alpha$ . . . . .	245
<b>Bibliographie</b>		<b>247</b>