

Carlo Rovelli

Relativité Générale

L'ESSENTIEL

Idées, cadre conceptuel, trous noirs,
ondes gravitationnelles, cosmologie
et éléments de gravité quantique

Traduit de l'anglais par Marc Lachièze-Rey

DUNOD

Du même auteur aux Éditions Dunod :
Et si le temps n'existait pas ?
La naissance de la pensée scientifique : Anaximandre de Milet

Direction artistique (couverture) : Nicolas Wiel
Mise en pages : Lumina Datamatics, Inc.

© 2021 Adelphi Edizioni S.p.A. Milano
© Dunod, 2022 pour la traduction française

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-084993-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Préambule	11
I Bases	13
1 Physique : une théorie des champs pour la gravité	17
1.1 La relativité restreinte	18
1.2 Champs.....	22
2 Philosophie : que sont l'espace et le temps ?	27
2.1 Espace et temps relatifs, comparés à newtoniens ...	27
2.2 L'idée d'Einstein : l'espace et le temps newtoniens sont un champ physique	30
2.3 L'indice d'Einstein : accélération par rapport à quoi ?	32
3 Mathématiques : les espaces courbes	37
3.1 Surfaces courbes.....	37
3.1.1 Géométrie intrinsèque.....	37
3.1.2 La courbure de Gauss.....	40
3.1.3 Coordonnées générales	43
3.1.4 Le champ des repères et la métrique	46
3.2 Géométrie riemannienne.....	53
3.2.1 Géodésiques	60

3.2.2	Champs et dérivées dans les espaces de Riemann	62
3.2.3	La courbure de Riemann	67
3.3	Géométrie	74
3.3.1	Géométrie lorentzienne	75
II	La théorie	81
4	Les équations de base	83
4.1	Le champ gravitationnel	83
4.2	Effets de la gravitation	85
4.3	Les équations du champ	86
4.4	La source dans l'équation de champ	87
4.5	Les équations du vide	88
5	L'action	91
6	Symétries et interprétation	95
6.1	Temps et énergie	99
III	Applications	103
7	La limite newtonienne	105
7.1	La métrique dans la limite newtonienne	105
7.2	La force de Newton	106
7.3	La « dilatation du temps » en relativité générale	107
8	Les ondes gravitationnelles	113
8.1	L'effet sur la matière	117
8.2	Production et détection	120

TABLE DES MATIÈRES

9	Cosmologie.....	127
9.1	La géométrie à grande échelle de l'univers	131
9.2	Les modèles cosmologiques de base	135
10	Le champ créé par une masse	139
10.1	La métrique de Schwarzschild.....	139
10.2	Le problème de Kepler.....	142
10.3	La déflexion de la lumière par le Soleil	148
10.4	Les orbites proches de l'horizon.....	151
10.5	La force cosmologique	155
10.6	La métrique de Kerr-Newman et l'entraîne- ment de l'espace	156
11	Les trous noirs	159
11.1	À l'horizon	161
11.2	À l'intérieur du trou noir.....	166
11.3	Les trous blancs	170
12	Éléments de gravité quantique	179
12.1	Bases empiriques et théoriques de la gravité quantique.....	180
12.2	Caractère discret : des quanta d'espace	183
12.3	Superposition de géométries.....	188
12.4	Transitions : passage du trou noir au trou blanc par effet tunnel, et grand rebond.....	193
12.5	Conclusion : la disparition de l'espace-temps	196
	Index	199

PRÉAMBULE

Il y a des chefs-d'oeuvre absolus, qui nous touchent intensément, comme le Requiem de Mozart, l'Odyssée, la Chapelle Sixtine, ou le Roi Lear... En saisir la splendeur peut demander un apprentissage, mais la récompense est l'accès à une beauté pure. Mais peut-être aussi la possibilité d'une vision nouvelle sur le monde. La Relativité Générale, le joyau d'Albert Einstein, en fait partie.

Ce petit livre offre une introduction compacte à la relativité générale, à sa structure conceptuelle et ses résultats de base.

L'accent est mis sur les idées, sans rentrer dans les détails. Les principaux résultats sont dérivés dans leur forme la plus simple, sans longues manipulations mathématiques. Certaines considérations originales sont incluses et certains sujets sont discutés d'un point de vue difficile à trouver ailleurs. Un dernier chapitre introduit des idées élémentaires sur la gravité quantique. Le livre peut être utilisé pour apprendre les idées clés et les résultats de la relativité générale, sans l'ambition de devenir pleinement expert sur ses vastes ramifications.

Il peut également être utilisé en complément des nombreux manuels¹, en offrant une clarté **conceptuelle** supplémentaire. Il pré-

1. Un bon étudiant motivé consulte de nombreux livres sur le même sujet. Deux classiques que j'utilise toujours comme références sont la : *Relativité Générale* de Bob Wald orientée mathématiquement, elle met l'accent sur la perspective géométrique et contient beaucoup de matériel avancé ; et aussi *Gravitation et cosmologie* de Steven Weinberg, qui met l'accent sur la géométrie. Parmi les manuels modernes, *Espace-temps et géométrie* de Sean Carroll et *Introduction à la relativité générale* de Lewis Ryder sont beaucoup plus complets que la simple introduction donnée ici. Un bon texte orienté mathématiquement est *Introduction to General Relativity, Black Holes and Cosmology* de Yvonne Choquet-Bruhat. En français, une belle introduction est *Relativité générale* :

sente la Relativité Générale telle que je la comprends aujourd'hui, ce qui constitue à mon avis la meilleure perspective pour aborder ses aspects quantiques.

Les étapes mathématiques simples entre les équations sont ignorées, et indiquées par le texte « *[faites-le!]* ». Le lecteur peut faire confiance à l'auteur, comme le font souvent les physiciens lorsqu'ils lisent des mathématiques ; ou travailler les étapes et acquérir des compétences techniques. Cela pourrait permettre à un étudiant d'acquérir une bonne expérience pratique de la technologie de la relativité. Si vous aimez faire des exercices, il existe des livres d'exercices de relativité générale². Les textes en petits caractères sont quelque peu marginaux par rapport aux sujets principaux.

La récente série de prix Nobel de physique pour la relativité générale (ondes gravitationnelles en 2017, cosmologie en 2019, trous noirs en 2020) témoigne de la vitalité et de la fécondité actuelles de cette théorie extraordinaire, joyau d'Einstein. Ici, j'essaie de mettre en lumière la beauté éclatante et la simplicité des idées sur lesquelles elle est basée.

Cours et exercices corrigés par Aurélien Barrau. Je mentionne ici seulement les quelques livres que je connais le mieux.

2. Par exemple Thomas A. Moore, *A General Relativity Workbook*, University Science Books, Etats-Unis, 2012.

PREMIÈRE PARTIE

BASES

