

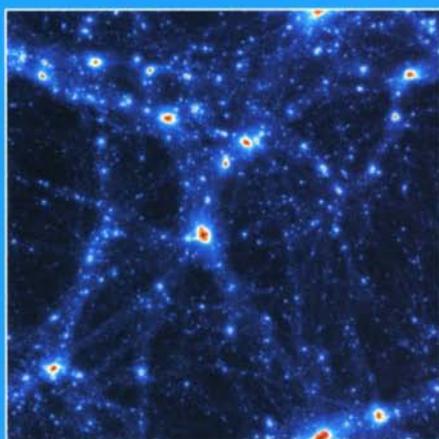
SAVOIRS

ASTROPHYSIQUE

ACTUELS

COSMOLOGIE ●

DES FONDEMENTS THÉORIQUES
AUX OBSERVATIONS



●
FRANCIS BERNARDEAU


EDP
SCIENCES

CNRS ÉDITIONS

Francis Bernardeau

Cosmologie

Des fondements théoriques
aux observations

S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Illustration de couverture : Tranche de 25 mégaparsecs de côté montrant la croissance des structures dans l'Univers. Cette image a été construite à partir d'une simulation numérique dite N-corps. Crédit : C. Pichon, Projet Horizon 2007.

© 2007, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A
et
CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 978-2-86883-954-1

ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-06564-3

À *Élise.*

Préface

La cosmologie et plus généralement l'astrophysique sont des sciences appliquées qui ont pour objectif ultime une compréhension complète de la nature. Elles font appel aux domaines les plus avancés de la physique et, grâce aux technologies développées à la fin du vingtième siècle, il devient possible de sonder l'Univers de multiples manières et sur ses plus grandes échelles. La cosmologie observationnelle connaît ainsi un essor prodigieux en s'appuyant sur une masse de données considérable et de précision inégalée, provenant non seulement de télescopes géants, mais aussi de satellites ou de détecteurs de particules. L'étude et la compréhension de l'histoire de l'objet « Univers » s'apparentent ainsi à une modélisation globale. Elles font appel à la théorie des champs, à la relativité générale, à la mécanique des fluides, à l'interaction de la matière et du rayonnement. La cosmologie moderne peut ainsi poser un ensemble de questions débouchant sur de nouvelles avancées en physique, voire à une remise en cause de ses bases les plus fondamentales. C'est là qu'est probablement son attrait principal dans la période exceptionnelle que nous vivons. L'interprétation de ce vaste ensemble de mesures, pour être cohérente, nécessite cependant des analyses statistiques rigoureuses. C'est le prix à payer pour dégager le plus clairement possible ce qui pourrait être authentiquement en rupture avec le cadre de la physique contemporaine. L'ambition du livre de Francis Bernardeau est précisément d'établir l'inventaire des concepts et des outils nécessaires à la cosmologie moderne.

Au milieu des années 1960, lorsque j'ai commencé à m'intéresser à l'astrophysique, l'Univers semblait pouvoir être décrit par un modèle cosmologique sans courbure d'espace et sans constante cosmologique. Nous avons comme héritage les apports de la relativité générale et l'hypothèse de l'atome primitif proposée en 1931 par Georges Lemaître. Hubble et Slipher avaient mis en évidence l'expansion de l'Univers et Chandrasekhar avait ensuite montré que les éléments chimiques légers comme le lithium, le béryllium et le bore n'avaient pu être synthétisés que dans un milieu plus chaud que celui du centre des étoiles. Ils avaient fait appel à un processus instable de décroissance très rapide de la température, qui pouvait s'identifier avec la phase initiale d'un modèle d'expansion de l'Univers décrit par un Big Bang chaud. Gamow et ses élèves, en particulier Alpher, avaient tiré toutes les conséquences de cette hypothèse dans les années 1950 en proposant les premiers modèles de

nucléosynthèse primordiale incluant la dynamique de l'expansion de l'Univers. Ils érigèrent ainsi le premier pilier observationnel sur lequel tout modèle cosmologique doit s'appuyer. Une remarquable prédiction du modèle de Big Bang chaud était l'existence d'un rayonnement micro-onde fossile (le « Cosmic Microwave Background » ou CMB), relique de la période du découplage de la lumière et de la matière quand l'univers avait environ trois cent mille ans. Aussi, quand Penzias et Wilson annoncèrent en 1965 la détection de ce rayonnement fossile, notre compréhension de l'évolution cosmique de l'Univers s'appuya définitivement sur des modèles d'évolution purement thermique.

Pendant les quinze années qui suivirent, les astronomes s'employèrent à mesurer le plus exactement possible la vitesse d'expansion de l'Univers. Les nouvelles déterminations de la constante de Hubble furent d'ailleurs l'objet d'une belle controverse. L'existence des courbes de rotation plates pour les galaxies spirales, puis la détection avec les caméras CCD des premières images gravitationnelles de galaxies très lointaines au centre des amas de galaxies, confirmèrent d'une façon spectaculaire la présence d'une grande quantité de matière noire de nature inconnue. Le bilan de matière dans l'Univers commençait à se préciser mais ne permettait que difficilement d'atteindre la densité critique d'un modèle Einstein-de Sitter. À la même époque les physiciens des particules, à la suite de Guth, introduisirent et développèrent progressivement le concept d'inflation. Ce concept permettait d'engendrer un Univers plat et pouvait justifier l'existence d'une constante cosmologique. En parallèle, certaines observations astronomiques fournissaient les prémisses d'un modèle dit de concordance, incluant une matière noire froide et faisant intervenir une constante cosmologique non nulle conduisant à un Univers plat. Ce scénario avait aussi l'avantage de donner à l'Univers un âge compatible avec celui des étoiles les plus vieilles.

Les années 1990 furent marquées par plusieurs observations spectaculaires. D'abord en 1998 celle de la luminosité des supernovae mit en évidence l'accélération de l'expansion de l'Univers dans les derniers milliards d'années. Puis les premières mesures de l'astigmatisme cosmique (le « Cosmic Shear ») en 2000, suivies de celles des fluctuations de température du CMB en 2004 observées par le satellite WMAP, conduisirent à un modèle cosmologique remarquablement proche du modèle de concordance. En particulier les résultats sur le CMB permirent de développer des modèles de l'évolution dynamique de l'Univers comportant un nombre accru de paramètres physiques pouvant être reliés aux observations. Ainsi, avec les études conjointes des supernovae, des lentilles gravitationnelles et du CMB, nous sommes entrés de plain-pied dans l'ère de la cosmologie de précision. Il est maintenant possible de mesurer des paramètres cosmologiques fondamentaux comme l'indice et l'amplitude du spectre de fluctuations initiales de densité au moment de la période de recombinaison, l'abondance des diverses composantes de masse-énergie, l'évolution de leur équation d'état ou l'effet de la période de ré-ionisation de l'Univers. L'obtention d'une précision de l'ordre du pour cent sur certains de ces

paramètres devient envisageable dans les prochaines années, mais la tâche sera ardue. Il faut en effet des mesures sans biais observationnels sur la quasi totalité du ciel et il faut aussi être en mesure de combiner des observations de nature très variable.

La période actuelle est particulièrement excitante pour les cosmologues. Les premières interprétations de ces nouvelles données semblent apporter aux théoriciens toujours plus d'énigmes de physique fondamentale, telles que l'origine de l'asymétrie matière/anti-matière dans l'Univers, la nature de la matière noire et maintenant l'existence quasi avérée d'une énergie noire responsable de l'accélération de l'Univers. Celle-ci ne correspond peut-être qu'à une constante cosmologique pure, mais elle pourrait aussi se révéler d'une nature dynamique tout autre ; on ne pourrait alors en rendre compte qu'en élargissant les théories physiques actuelles. Des bouleversements de la physique qui décrit la nature la plus profonde de l'Univers et de son espace-temps seront probablement nécessaires pour surmonter les questionnements introduits par le modèle cosmologique. Toutefois, avant de s'aventurer sur ces futures voies de recherche, il importe de bien avoir assimilé l'ensemble des acquis de la discipline et de bien maîtriser les outils d'interprétation des observations. Le présent ouvrage réussit, remarquablement me semble-t-il, la performance de dresser un panorama complet de la cosmologie observationnelle actuelle et de fournir les outils théoriques rigoureux pour son interprétation.

L'ouvrage décrit de manière complète l'origine et l'évolution des grandes structures de l'Univers telles qu'on peut les comprendre dans le cadre de la physique actuelle. Il s'articule en particulier autour de la description des conditions initiales les plus plausibles que l'on peut adopter actuellement, compte tenu des données observationnelles et de nos connaissances théoriques. Dans cette construction, la période de recombinaison constitue un temps de référence privilégié pour qui s'intéresse à l'observation des grandes structures de l'Univers. Cette époque est en effet directement observable au travers des anisotropies de température du CMB et porte encore la signature de la physique de l'Univers primordial, tout en servant de condition initiale à l'émergence des grandes structures de l'Univers telles qu'on peut les observer par ailleurs. Une grande importance est donc donnée dans cet ouvrage aux études du CMB, qui bénéficieront bientôt d'un apport de données nouvelles avec le lancement prochain du satellite européen PLANCK. Une large partie de l'ouvrage est ensuite consacrée à l'étude des instabilités gravitationnelles et à l'émergence des grandes structures de l'Univers. C'est l'occasion pour l'auteur de mettre en place tous les outils d'analyse statistique portant sur les corrélations et les spectres de puissance d'un champ. La maîtrise de ces méthodes est indispensable à l'interprétation de la distribution des galaxies, à celle du CMB ou des cartes de cisaillement gravitationnel des images des galaxies du fond de l'Univers. Un chapitre original et d'une grande actualité est consacré aux lentilles gravitationnelles et à l'effet d'astigmatisme cosmique résultant de la distribution inhomogène des condensations de masse dans les grandes

structures. Ce sujet, peu développé dans les ouvrages de cosmologie antérieurs, est d'autant plus important que l'astigmatisme cosmique aux petites et aux grandes échelles fournit une description particulièrement élégante de la croissance des condensations de masse, reliées de façon cruciale à la fois à la densité moyenne de l'Univers et à l'amplitude des fluctuations de densité. Le couplage de cette nouvelle méthode d'optique gravitationnelle avec les analyses des supernovae et du CMB sera incontournable pour construire des modèles cosmologiques. Celui qui s'imposera dans le futur devra inévitablement, comme pour la nucléosynthèse primordiale, s'appuyer sur ces trois nouveaux piliers de la cosmologie observationnelle. Ceux-ci sont présentés ici avec une extrême rigueur. Ils font maintenant partie intégrante du bagage que tout cosmologue se doit de posséder.

Ce livre s'adresse en priorité à des étudiants en fin de maîtrise ou à des chercheurs confirmés, mais il a aussi naturellement sa place dans le fonds d'ouvrages indispensable à tout physicien abordant un travail de recherche en cosmologie. Il pourra également être consulté par tout public éclairé curieux des grandes questions de la cosmologie moderne. Je pense qu'il est de nature à susciter des vocations de chercheur pour un des domaines de l'astrophysique probablement le plus fascinant de tous. Il était important qu'un tel livre soit écrit et je me réjouis que ce travail ait été mené à bien par un spécialiste mondialement reconnu.

Bernard Fort

Directeur de recherches au CNRS

Ancien directeur de l'Institut d'astrophysique de Paris

Remerciements

Au moment où s'achève la rédaction de cet ouvrage, je tiens à remercier les collaborateurs et les amis sans qui ce livre n'aurait probablement jamais vu le jour.

Mes remerciements vont ainsi à Richard Schaeffer, Roger Balian, Roman Juszkiewicz et François R. Bouchet qui m'ont guidé lors de mes débuts. Ils vont aussi à Stéphane Colombi, Román Scoccimarro, Enrique Gaztañaga avec qui j'ai partagé la peine et la satisfaction de la rédaction d'un bel article de revue dont cet ouvrage a largement profité. Je suis également redevable à Yannick Mellier et Ludovic van Waerbeke de m'avoir entraîné dans une belle aventure scientifique, qui se poursuit encore aujourd'hui : celle de l'étude des effets de lentille gravitationnelle. Je suis tout particulièrement reconnaissant à Yannick Mellier pour sa générosité, sa disponibilité et ses immenses connaissances astronomiques dans lesquelles j'ai largement puisé. J'ai aussi grand plaisir à remercier Lev Kofman et Jean-Philippe Uzan pour leur amitié et pour le plaisir que j'ai à explorer les aspects les plus spéculatifs de la cosmologie théorique contemporaine avec eux. Au delà des collègues que je viens de citer, mes remerciements vont aussi à nombre de chercheurs du service de physique théorique de Saclay et de l'Institut d'astrophysique de Paris avec qui j'ai eu plaisir à travailler et à discuter.

Cet ouvrage a aussi profité du soutien de Michèle Leduc, qui m'a lancé dans cette aventure en premier lieu, et de Michel Le Bellac pour sa lecture attentive du manuscrit. Je tiens finalement à remercier Bernard Fort pour m'avoir accueilli à l'Institut d'astrophysique de Paris comme chercheur associé quand il en était le directeur, pour sa curiosité scientifique et son enthousiasme communicatif, et enfin pour avoir accepté d'écrire la préface de ce livre.

Mes remerciements vont enfin à ma famille, à ma femme Cécile et à notre petite fille Élise qui s'apprête à faire ses premiers pas au moment où j'écris ces lignes. C'est à elle que ce livre est dédié.

Table des matières

Préface	v
Remerciements	ix
Avant-propos	xix
1 Introduction à la cosmologie moderne	1
1.1 Une description succincte de l'histoire thermique de l'Univers . . .	2
1.2 Le modèle cosmologique standard à l'épreuve	8
1.3 Cosmologie standard : les parties manquantes	9
1.3.1 Le contenu en énergie de l'Univers	9
1.3.2 L'Univers inflationnaire	9
2 L'Univers homogène	13
2.1 Énergie et matière dans l'Univers	13
2.2 L'expansion de l'Univers	15
2.2.1 L'expansion de l'Univers : une approche newtonienne . .	16
2.2.2 Éléments de relativité générale et métrique de Friedmann-Robertson-Walker	18
2.2.3 Les équations de Friedmann	20
2.3 La cosmographie	21
2.3.1 Évolution des paramètres cosmologiques	23
2.3.2 Distances et paramètre de décélération	24
2.3.3 Les horizons	27
2.4 Le contenu de l'Univers	29
2.4.1 Les galaxies	30
2.4.2 Mesures de masse dans l'Univers	30
2.5 Éléments d'histoire thermique de l'Univers	34
2.5.1 Grandeurs et équilibres thermodynamiques	35
2.5.2 La densité d'entropie	37
2.5.3 La température du fond de neutrinos	38
2.6 Le « <i>freeze out</i> » : gel des réactions	39
2.6.1 La nucléosynthèse primordiale	43

2.6.2	Quid de la matière baryonique ou de la matière noire ?	48
2.6.3	Matière noire : quels candidats possibles ?	49
2.6.4	La recombinaison	50
2.7	Compléments	52
2.7.1	Conditions sur les paramètres cosmologiques pour ne pas avoir de Big Bang	52
2.7.2	Estimation des masses : théorème du viriel et équilibre hydrostatique	53
2.7.3	Calcul de la densité relique de particules non relativistes	54
2.7.4	Réionisation et fonction de visibilité	55
3	Description statistique des champs	57
3.1	La nécessité d'une approche statistique	57
3.1.1	L'origine des fluctuations dans les modèles inflationnaires	59
3.1.2	Origine physique des fluctuations pour le cas de défauts topologiques	60
3.2	Fonctions de corrélation et spectres de puissance	61
3.2.1	Homogénéité statistique et isotropie	61
3.2.2	Fonction de corrélation à deux points et spectre de puissance	62
3.2.3	Le théorème de Wick pour champs gaussiens	63
3.2.4	Corrélations de grands ordres : diagrammatique	64
3.2.5	Probabilités et fonctions de corrélation	65
3.3	Moments, cumulants et fonctions génératrices	67
3.3.1	Moments et cumulants	67
3.3.2	Filtrage	67
3.3.3	Fonctions génératrices	68
3.3.4	Fonctions de distribution de probabilité	68
3.3.5	Distributions faiblement non gaussiennes : le développement de Edgeworth	69
3.4	Compléments	72
3.4.1	Profil de densité des pics rares	72
3.4.2	Champ de distribution log-normale	74
3.4.3	Marche de Lévy	75
3.4.4	Reconstruction de la PDF à partir des fonctions génératrices des cumulants	77
3.4.5	Fonctionnelles de Minkowski	79
4	Le développement des instabilités gravitationnelles	85
4.1	La croissance des fluctuations en théorie linéaire	86
4.1.1	Équation d'évolution dans l'espace des phases	86
4.1.2	L'approximation newtonienne avec un seul flot	89
4.1.3	La croissance des fluctuations en théorie linéaire	90
4.1.4	Le potentiel gravitationnel en régime linéaire	94
4.1.5	La vortacité	95

4.1.6	Validité de l'approximation à un seul flot, longueur de Jeans	96
4.2	L'approche lagrangienne	97
4.2.1	Formulation générale	97
4.2.2	L'approximation de Zel'dovich	98
4.3	Le spectre de puissance des grandes structures de l'Univers . .	100
4.3.1	Les galaxies comme traceurs du champ de densité	100
4.3.2	Domaine de validité de l'approximation linéaire	101
4.4	Le régime quasi linéaire, effets des couplages de modes	102
4.4.1	Propriétés générales du développement perturbatif	103
4.4.2	Les équations du mouvement en représentation de Fourier	105
4.4.3	Le développement perturbatif aux grands ordres	106
4.4.4	Effets des couplages de mode : <i>skewness</i> et bispectre . .	108
4.4.5	Dépendance avec les paramètres cosmologiques	112
4.4.6	* La hiérarchie des cumulants en régime quasi linéaire .	113
4.4.7	* Modes croissants et modes décroissant en régime quasi linéaire	116
4.5	Le régime fortement non linéaire	119
4.5.1	Solutions autosimilaires et corrélations stabilisées	119
4.5.2	Comportements invariants d'échelle	122
4.5.3	L'évolution non linéaire de la fonction à deux points . .	125
4.5.4	* Les modèles hiérarchiques pour les fonctions de corrélation de grands ordres	127
4.6	Le modèle des halos	128
4.6.1	La dynamique de l'effondrement sphérique	129
4.6.2	Profil de densité des halos	131
4.6.3	La théorie de Press et Schechter	133
4.6.4	La construction du modèle des halos	138
4.7	Compléments	139
4.7.1	La vorticité en approche lagrangienne	139
4.7.2	Le spectre de puissance dans l'approximation de Zel'dovich	141
4.7.3	L'émergence des non gaussianités dans l'approximation de Zel'dovich	143
4.7.4	Effets transitoires	146
4.7.5	Origine de l'effet du filtrage sur la <i>skewness</i>	147
4.7.6	De la dépendance des cumulants par rapport aux paramètres cosmologiques	149
4.7.7	La hiérarchie BBGKY	150
4.7.8	Modèle d'effondrement sphérique	151
4.7.9	Effondrement sphérique autosimilaire	153

5	Des fluctuations de métrique primordiales aux observations	159
5.1	Horizon et rayon de Hubble	161
5.2	Les fluctuations de métrique	162
5.3	Les équations d'Einstein	163
5.3.1	Le tenseur énergie-impulsion	164
5.3.2	Les équations d'Einstein	165
5.3.3	Quantité conservée et modes superhorizon	166
5.3.4	* Le cas de fluctuations isocourbures primordiales	167
5.4	Le calcul des fonctions de transfert	168
5.4.1	Équation de Boltzmann pour des photons sans interaction	169
5.4.2	Les équations de conservation pour les photons	172
5.4.3	L'équation de Boltzmann avec interactions	173
5.4.4	La croissance des fluctuations	178
5.4.5	Propriétés génériques de la fonction de transfert	180
5.5	Sonder les grandes structures de l'Univers avec les galaxies	183
5.5.1	Comment décrire le biais ?	184
5.5.2	* Catalogues angulaires	188
5.5.3	* Catalogues tridimensionnels : espace des <i>redshifts</i>	190
5.6	La situation observationnelle	194
5.7	Compléments	197
5.7.1	Mesurer des spectres dans des catalogues	197
5.7.2	Reconstruire les champs de vitesse cosmologiques	200
5.7.3	Les amas de galaxies pour sonder les grandes structures	202
5.7.4	Les nuages Lyman- α	206
6	Les lentilles gravitationnelles	209
6.1	Les effets de lentille en quelques équations	210
6.1.1	Approximation de Born et approximation de lentille mince	210
6.1.2	Déplacement apparent, matrice d'amplification	210
6.1.3	Le cas d'une distribution de masse ponctuelle	212
6.2	Équation des lentilles dans un contexte extragalactique	216
6.2.1	Courbures et déformations d'un faisceau lumineux	216
6.2.2	La distance angulaire dans une métrique FRW	218
6.2.3	Le cas d'un Univers FRW faiblement inhomogène	220
6.3	Les lentilles gravitationnelles aux distances cosmologiques	222
6.3.1	Galaxies massives, amas de galaxies comme lentilles	223
6.3.2	Les profils de densité des amas	224
6.3.3	Lignes critiques, lignes caustiques pour des distributions de masse réalistes	226
6.4	Le régime des lentilles faibles	229
6.4.1	Convergence et cisaillement	229
6.4.2	* Mesurer des effets de lentilles faibles avec des galaxies	231
6.5	Cisaillement cosmique : effets de lentille faibles pour sonder les grandes structures	233

6.5.1	Spectres de puissance et fonctions de corrélation de la convergence et du cisaillement	234
6.5.2	Partie scalaire et partie pseudo-scalaire et relations de consistance	238
6.5.3	Au-delà des fonctions de corrélations à deux points . . .	242
6.5.4	Ce que les effets de lentilles faibles nous apprennent . .	244
6.6	Compléments	248
6.6.1	Recherche des lignes critiques pour une lentille à symétrie sphérique	248
6.6.2	Les expériences de microlentille	249
6.6.3	Couplage de lentilles	251
6.6.4	Modes E , modes B : relations fonctionnelles entre fonctions de corrélation	252
6.6.5	Relation entre ellipticité et cisaillement	253
6.6.6	Effets de corrélations des sources	255
7	Anisotropies de température et polarisation du fond...	257
7.1	L'effet Sachs-Wolfé	258
7.2	Les ondes gravitationnelles	260
7.2.1	Des ondes aux anisotropies de température	261
7.3	Le développement de la polarisation	262
7.3.1	Description de la polarisation	263
7.3.2	Les nouvelles équations de la hiérarchie	264
7.4	Le développement des oscillations plasma	265
7.4.1	Le régime de couplage fort	265
7.4.2	Au-delà du couplage fort	266
7.5	Calcul du spectre des anisotropies de température, C_l	269
7.5.1	Les décompositions en harmoniques sphériques	269
7.5.2	* Des modes propres du laplacien aux harmoniques sphériques	270
7.5.3	La construction des spectres	274
7.5.4	Propriétés génériques	275
7.6	Les anisotropies secondaires	278
7.6.1	Les effets de lentilles gravitationnelles sur les anisotropies de température	280
7.6.2	Les effets de lentilles gravitationnelles sur la polarisation	282
7.7	* Au-delà des spectres, les fonctions de corrélation de grands ordres	283
7.7.1	Fonctions de transfert en espace réel	283
7.7.2	Le bispectre	285
7.8	La situation observationnelle	287
7.8.1	Les mesures de spectres	287
7.8.2	Conséquences sur les paramètres cosmologiques	288
7.9	Compléments	290

7.9.1	Les équations de la hiérarchie avec la polarisation	290
7.9.2	Les équations de la hiérarchie pour les ondes gravitationnelles	292
7.9.3	Effet des neutrinos sur le développement des anisotropies	293
7.9.4	Les effets de projection	293
7.9.5	La fonction de corrélation à quatre points due aux effets de lentille gravitationnelle	294
8	L'origine des structures	297
8.1	Les difficultés d'une cosmologie standard	298
8.1.1	L'Univers est plat	298
8.1.2	Absence de monopôles et autres reliquats indésirables .	299
8.1.3	L'horizon	299
8.1.4	L'inflation, motivations	300
8.1.5	Nombre de e-folds : combien d'inflation ?	302
8.2	L'inflation avec un champ scalaire	303
8.2.1	Évolution de l'inflaton, le roulement lent	304
8.2.2	Potentiels quadratiques et quartiques	305
8.3	Origine des fluctuations en inflation	307
8.3.1	Les fluctuations quantiques de l'inflaton	308
8.3.2	Les fluctuations scalaires	308
8.3.3	Les fluctuations quantiques dans la limite roulement lent	309
8.3.4	Des fluctuations quantiques aux fluctuations de métrique	311
8.3.5	Au-delà de la limite du roulement lent	312
8.3.6	Le spectre de puissance des fluctuations de métrique . .	313
8.3.7	Modes tenseur : le fond stochastique d'ondes gravitationnelles	315
8.4	Quel(s) modèle(s) pour l'inflation ?	317
8.4.1	L'inflation hybride	317
8.4.2	* L'inflation multi-champs	319
8.4.3	* Les champs tests en auto-interaction	320
8.5	La sortie de l'inflation	322
8.5.1	Le réchauffage	323
8.5.2	Le préchauffage	324
8.6	La formation de défauts topologiques	326
8.6.1	Le mécanisme de brisure de symétrie	328
8.6.2	Les cordes cosmiques	329
8.7	Compléments	333
8.7.1	Une réécriture des paramètres de roulement lent	333
8.7.2	Inflation à plusieurs champs	334
8.7.3	Inflation en loi de puissance	335
8.7.4	Champ test dans un univers en expansion : une approche stochastique	337

8.7.5	Champs tests en auto-interaction dans un univers de de Sitter	340
8.7.6	Fermions de spin 1/2 dans un univers en expansion . . .	342
8.7.7	Inflation hybride dans un contexte supersymétrique . . .	343
9	Perspectives	349
9.1	L'origine des structures	349
9.2	La matière noire	350
9.3	L'énergie noire	351
9.3.1	De la nécessité d'une énergie noire	351
9.3.2	Un point de vue anthropique	353
9.3.3	Une inflation tardive : la quintessence	355
9.3.4	Changer les lois de la gravité ?	357
9.4	Compléments	359
9.4.1	Solution d'attracteur pour la quintessence	359
9.4.2	Conséquences phénoménologiques d'une modification de la gravité à grande échelle	361
Annexe A	: Éléments de relativité générale	365
A.1	Construction de la métrique et géodésiques	366
A.2	Scalars, vecteurs et tenseurs	367
A.3	Dérivées covariantes	369
A.4	Transport parallèle et tenseur de courbure	370
A.5	Tenseur énergie-impulsion et équations d'Einstein	373
A.5.1	Le tenseur énergie-impulsion	373
A.5.2	Les équations d'Einstein	375
A.6	La limite newtonienne	375
A.6.1	Champ faible et limite newtonienne	375
A.6.2	La déflexion gravitationnelle de la lumière	376
A.7	L'action d'Einstein-Hilbert et ses extensions	377
A.7.1	En présence d'un champ scalaire	378
A.7.2	Action d'une transformée de Lorentz	379
A.7.3	Le formalisme des tétrades	380
A.7.4	Le cas d'un champ de spin 1/2	381
A.7.5	Le cas d'un champ de spin 1	382
A.8	Cosmologie : la métrique de Friedmann-Robertson-Walker (FRW)	383
A.8.1	Perturbations de la métrique en espace de FRW	383
A.8.2	Perturbations scalaires, vecteurs et tenseurs	384
A.8.3	Transformées de jauge	387
A.8.4	Les équations d'Einstein en quantités invariantes de jauge	390

Annexe B : Champs quantiques en cosmologie	393
B.1 Champs scalaires en espace-temps plat	394
B.1.1 Formulation générale	394
B.1.2 Champs libres	395
B.1.3 Règles de quantification	396
B.2 Espace-temps courbe	398
B.2.1 Espace en expansion	398
B.2.2 Espace de de Sitter	400
B.3 Quelles observables ?	401
B.3.1 Fonctions de corrélation en espace de Sitter	401
B.4 Théorie des perturbations : le formalisme <i>In-In</i>	402
B.4.1 Hamiltonien d'interaction et opérateurs d'évolution . . .	403
B.4.2 Développement perturbatif de corrélateurs	405
Annexe C : Champs scalaires et champs spinés	407
C.1 Opérateurs de spin sur le plan	407
C.2 Opérateurs de spin sur la sphère	409
C.3 Décompositions en harmoniques sphériques	411
C.4 Spectres sur la sphère	413
C.5 Bispectres sur la sphère	415
C.6 Limite des petits angles	418
C.7 Compléments	419
C.7.1 Fonctions de corrélation à distance finie	419
C.7.2 Intersection d'un champ stochastique tridimensionnel avec la sphère	420
Annexe D : Formulaire	421
D.1 Fonctions de Bessel du premier type $J_\nu(z)$	421
D.2 Harmoniques sphériques et ondes planes	422
Annexe E : Valeurs utiles	425
Bibliographie	427
Index	445
Planches couleur	

Avant-propos

Les observations-clés qui fondent la cosmologie

La récession des galaxies, la nucléosynthèse primordiale, la distribution en corps noir du fond diffus cosmologique micro-onde et la mesure du spectre de ses anisotropies sont autant d'observations qui fondent la cosmologie moderne. Celle-ci est entrée depuis quelques années dans une nouvelle phase où les paramètres qui donnent les éléments quantitatifs de base des modèles cosmologiques – vitesse d'expansion de l'Univers, contenu en énergie et en matière – sont bien identifiés. Le modèle cosmologique dit concordant demande certes encore à être consolidé. Quoi qu'il en soit, les observations cosmologiques permettent de tester de plus en plus finement les différentes étapes de l'histoire thermique de l'Univers. Laboratoire de physique des hautes énergies, les observations extragalactiques sont en passe de véritablement contraindre la physique des particules au-delà du modèle standard.

De nombreuses pistes s'offrent aux chercheurs dans ce sens, identification de la matière noire, nature de l'énergie noire, exploration de la physique inflationnaire...

Objectifs du livre

Dans cette perspective l'objectif principal de ce livre est de présenter un corpus des connaissances sur lequel les cosmologues s'appuient pour décrire les aspects les plus solides des modèles cosmologiques actuels, son histoire thermique et l'évolution de sa structuration.

Si la cosmologie moderne consiste dans une grande mesure à explorer les différentes étapes que l'Univers a traversées au cours de son expansion, et donc de son refroidissement, certains moments de l'histoire thermique de l'Univers sont indéniablement mieux maîtrisés que d'autres. Les étapes les plus tardives ayant lieu à des énergies accessibles en laboratoire sont les mieux comprises ; les étapes les plus précoces, aux plus hautes énergies, apparaissent beaucoup plus spéculatives. Ainsi la structuration de l'Univers local, la formation du fond diffus cosmologique micro-onde sont des mécanismes certes complexes mais qui s'inscrivent dans un cadre théorique bien connu. *A contrario* un cadre théorique bien établi manque pour décrire certaines séquences de l'Univers

spectre Harrison-Zel'dovich, 181, 274, 311, 316
 structure en arbre, 75, 128
 supercordes, 10
 supergravité, 355
 supernovae
 SNLS, XV
 superpotentiel, 344
 supersymétrie, 343
 surface de dernière diffusion, 260
 symbole de Wigner, 286, 415, 417
 symétrie CP, 40

T

taille finie, 200
 taux de croissance, 91
 taux de désintégration, 323
 temps conforme, 161, 308
 tenseur de courbure de Riemann, 371
 tenseur de métrique, 366
 tenseur de Ricci, 371
 tenseur de Weyl, 221, 373
 tenseur énergie-impulsion, 164, 373
 terme de Yukawa, 323, 344
 tetrades, 342
 théorème de Liouville, 87
 théorème de Morse, 82
 théorème de Wick, 294
 théorème du Viriel, 33, 53

théorie de Press et Schechter, 30, 133, 202
 théorie des champs
 température finie, 328
 théorie des perturbations, 103, 116
 théorie ekpyrotique, 12
 théorie linéaire, 90, 101
 topologie
 espace compact, 18, 62
 transformée de Legendre, 201
 transformée de Laplace, 69, 118
 inverse, 78
 transformée de Lorentz, 395
 transition quantique – classique, 311, 322
 transport parallèle, 217, 370, 371

U

univers Einstein-de Sitter, 21–24, 103, 120, 205

V

valeur dans le vide (vev), 317
 variance cosmique, 200, 430
 vide de Bunch et Davies, 398, 401
 vierbins, 342, 380
 vitesse particulière, 87
 vols de Lévy, 75
 vorticité, 96, 106, 139

CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

Sous la direction de
GEORGES PÉDRO

Depuis deux siècles, la poussée démographique et les développements industriels et agricoles provoquent un profond déséquilibre des cycles biogéochimiques de la planète.

La vie est dépendante d'un grand nombre des éléments de la classification périodique. Certaines parties du cycle biogéochimique de ces éléments ont été explorées et une connaissance approfondie des mécanismes qui les font intervenir dans certains processus biologiques a été acquise : comprendre comment les éléments chimiques voyagent d'un règne à un autre permettra de déterminer une nouvelle approche de la nutrition, de la santé, de l'environnement et du climat.

L'Académie des sciences a mené une réflexion multidisciplinaire pour établir l'état de l'art en ce domaine, tant du point de vue des connaissances fondamentales que de celui de la recherche et de ses structures.

Ce rapport décrit plusieurs problèmes biogéochimiques en fonction de leurs impacts actuels sur la société : production de CO₂ en relation avec l'évolution du climat, pollution d'origine industrielle et agricole en relation avec la dégradation des sols et des eaux, en incluant les conséquences d'ordre toxicologique, les phénomènes de phytoremédiation, etc.

L'étude est concentrée sur la biosphère fonctionnelle, celle où se développent des êtres vivants au sein d'écosystèmes bien déterminés mais variés. La biosphère considérée ici est avant tout superficielle, continentale et, à moindre titre, océanique. Cela implique de prendre en compte tout ce qui a trait à la matière organique, présente dans les sols et les sédiments, qui constituent l'interface géochimique entre l'inerte et le vivant et où les micro-organismes jouent un rôle prépondérant.

Le rapport s'articule en une première approche par éléments, puis une approche des milieux, qu'ils soient peu ou fortement anthropisés. La troisième partie traite des secteurs de recherche à développer ; elle est complétée par une argumentation en faveur de la modélisation et du développement de réseaux d'observation de longue durée.

Cette étude est justifiée par la nature d'un sujet très vaste, bien qu'ici volontairement délimité. Elle apporte un éclairage scientifique argumenté sur un sous-ensemble de la question générale de la connaissance de l'environnement et du cadre de toute vie sur la Planète.

ISBN : 978-2-86883-938-1
69,00 euros TTC

Création graphique / Thierry Gourdin



www.edpsciences.org