

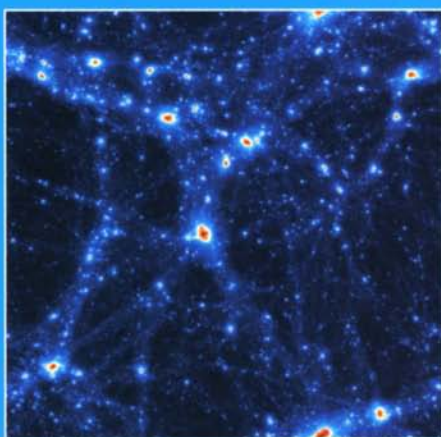
SAVOIRS

ASTROPHYSIQUE

ACTUELS

COSMOLOGIE ●

DES FONDEMENTS THÉORIQUES
AUX OBSERVATIONS



●
FRANCIS BERNARDEAU



Extrait de la publication

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
 - tétrades, 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

Extrait de la publication