

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 vorticité	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-Wolfe 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 efolds : 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	