

Table des matières

1	État des connaissances	1
1.1	Observation fondamentale : le décalage vers le rouge	1
1.2	Propriétés générales de l'Univers	2
1.2.1	Paramètres cosmologiques	3
1.2.2	Principales sondes observationnelles	5
1.3	Une histoire du Cosmos	9
2	Prélude : cosmologie newtonienne	13
2.1	Quelques éléments de dynamique	17
2.2	Équation de Friedmann	18
2.3	Commentaire sur la validité du modèle	20
3	Concepts fondamentaux	23
3.1	Définition de l'Univers et de la cosmologie	23
3.2	Principe cosmologique	23
3.2.1	Tautologie	24
3.2.2	Principe cosmologique pragmatique	25
3.3	Relativité générale : notions	25
3.3.1	Principe d'équivalence	26
3.3.2	Référentiel inertiel	27
3.3.3	Qu'est-ce que la gravitation ?	29
3.3.4	Espace-temps et métrique	31
3.3.5	Métrique de Friedmann-Robertson-Walker	32
3.3.6	Facteur d'expansion, loi de Hubble	36
3.3.7	Décalage vers le rouge	39
3.3.8	Source de la gravitation	40
3.4	Équations de Friedmann	43

4	Dynamique de l'Univers homogène	45
4.1	Fluides cosmologiques	45
4.1.1	La matière non relativiste	48
4.1.2	La matière relativiste	49
4.1.3	Le « volume »	50
4.2	Époques de domination	51
4.2.1	Paramètre de densité Ω	54
4.2.2	Valeurs expérimentales des paramètres de densité	55
4.3	Modèles d'Univers	56
4.3.1	Modèle d'Einstein-de Sitter : $\Omega_m = 1$	56
4.3.2	Univers-lumière, $\Omega_r = 1$	58
4.3.3	Univers de Sitter, $\Omega_v = 1$	58
4.3.4	Cas général, modèle standard Λ CDM	59
5	L'Univers chaud	63
5.1	Équilibre & gel de réactions	63
5.2	Statistique d'un gaz	65
5.3	Les photons	68
5.4	Histoire de la température	69
5.5	Évolution des abondances	71
5.6	Abondances résiduelles	73
5.7	Asymétrie matière-antimatière	75
6	Histoire thermique de l'Univers	79
6.1	Quelques étapes	79
6.2	Synthèse de l'hélium	82
6.3	Nucléosynthèse et cosmologie	85
7	Le fond diffus cosmologique	89
7.1	Recombinaison	89
7.2	Surface de dernière diffusion	91
7.3	Corps noir cosmologique	94
7.4	Anisotropies du CMB	96
7.4.1	Principe de l'analyse des anisotropies du CMB	96
7.4.2	Avant-plans	99
7.4.3	Anisotropies intrinsèques	99
7.4.4	Anisotropies secondaires	103

8	La matière noire	107
8.1	Dynamique interne des structures	107
8.1.1	Courbe de rotation des galaxies	107
8.1.2	Amas de galaxies et théorème du viriel	110
8.1.3	Halos de matière noire	112
8.2	Matière non-collisionnelle	114
8.2.1	Temps caractéristiques	114
8.2.2	Lentilles gravitationnelles	118
8.3	Matière noire et fond diffus cosmologique	122
8.4	Matière noire froide et masse de Jeans	124
8.4.1	Température dynamique	124
8.4.2	Masse de Jeans : cas d'un système non collisionnel	124
8.5	Halos de matière noire et galaxies : difficultés	128
8.5.1	La fonction de masse des halos	129
8.5.2	Le problème des sous-structures	131
9	Formation des grandes structures	135
9.1	Densité et spectre de puissance	137
9.2	Longueur de Jeans	139
9.2.1	Effondrement et oscillations	141
9.2.2	Cas cosmologique	142
9.3	Croissance des perturbations : cas sub-horizon	146
9.3.1	Matière sans pression	147
9.3.2	Matière avec pression	148
9.4	Croissance des perturbations : cas super-horizon	151
9.5	Synthèse et spectre de puissance	152
9.6	Et après?	157
10	Formation des « petites » structures	159
10.1	Le modèle d'effondrement sphérique	159
10.2	Propriétés génériques des halos	166
11	Simulations cosmologiques	173
11.1	De la discrétisation et de la résolution	175
11.2	Dynamique non-collisionnelle	176
11.3	Hydrodynamique	181
11.4	Processus physico-chimiques	185
11.5	Formation et rétroaction stellaire	187

12 Entropie et Univers	193
12.1 Configurations et probabilités	193
12.2 Entropie et perception du temps	197
12.3 Entropie et complexité	199
12.4 Entropie et formation des grandes structures	200
12.5 Le défi de l'entropie actuelle	202
13 L'Inflation	207
13.1 Pourquoi l'Inflation ?	207
13.1.1 Le problème de l'horizon de causalité	207
13.1.2 Le problème de la platitude	209
13.1.3 L'origine des fluctuations cosmiques	210
13.1.4 Les particules reliques	211
13.2 Modèles d'Inflation	212
13.2.1 Propriétés désirées	212
13.2.2 L'inflaton	213
13.3 Quelques contraintes	215
14 La Réionisation	219
14.1 Chronologie de la Réionisation et propriétés globales	219
14.2 Les régions HII	220
14.3 Éléments de transfert radiatif	225
14.4 Observer la Réionisation de l'Univers	227
14.4.1 Le milieu intergalactique, la forêt Lyman-Alpha	227
14.4.2 L'opacité Thomson du CMB	229
14.4.3 Le signal à 21 cm	230
14.5 Réionisation et physique fondamentale	233
A Quelques grandeurs utiles	237
A.1 Constantes physiques	237
A.2 Masses	237
A.3 Distances	237
A.4 Énergies	237
A.5 Quantités cosmologiques	238
B Les paramètres cosmologiques de Planck 2016	239
Annexes	237
Bibliographie	241
Index	243