

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	5
Chapitre 1	
DESCRIPTION DE L'UNIVERS OBSERVABLE	9
1. Le système solaire	9
2. Les étoiles	14
3. Les galaxies	16
Quelques constantes utiles	23
Chapitre 2	
LE MICRO-UNIVERS DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES	25
1. Introduction	25
2. Les interactions fondamentales	27
2.1. L'interaction gravitationnelle	28
2.2. L'interaction électromagnétique	29
2.3. L'interaction faible	30
2.4. L'interaction forte nucléaire	30
3. Classification des particules élémentaires	32
3.1. Les leptons	32
3.2. Les hadrons	34
3.2.1. Les baryons	34
3.2.2. Les mésons	37
3.3. Désintégration des particules élémentaires	38
3.4. Les quarks	40
3.4.1. Modèle de l'octet	40
3.4.2. Saveur des quarks	40
3.4.3. Couleur des quarks	42
3.5. L'interaction forte et le gluon	43
3.6. Quarks et leptons	44
4. Vers une théorie unifiée de toutes les interactions?	47

Appendice A

Sous-structure commune aux leptons et aux quarks	61
1. Les isihons	61
2. Pseudo-scalaire d'hypercouleur	62
3. Leptons et quarks de première génération	63
3.1. Les leptons	63
3.2. Bosons électrofaibles	65
3.3. Les quarks	66
4. Générations de leptons et de quarks	66

Appendice B

Existe-t-il une cinquième interaction fondamentale?	60
--	-----------

Chapitre 3

ANALYSE TENSORIELLE	63
1. Composantes contravariantes d'un vecteur	63
2. Composantes contravariantes d'un tenseur	65
3. Composantes covariantes d'un vecteur	65
4. Composantes d'un tenseur	67
5. Opérations sur les tenseurs	68
5.1. Combinaison linéaire	68
5.2. Produit direct	68
5.3. Contraction	68
5.4. Différentiation	68
5.5. Tenseurs particuliers	69
5.6. Symétrisation et antisymétrisation	70
6. Changement de base	71
7. Produit scalaire de deux vecteurs	72
8. Métrique d'un espace	73
8.1. Tenseur métrique	73
8.2. Coordonnées localement plates	74
9. Dérivation covariante	75
9.1. Définition	75
9.2. Propriétés du symbole de Christoffel	77
9.3. Dérivée covariante du tenseur métrique	82
9.4. Dérivée covariante d'un tenseur antisymétrique	83
10. Opérateurs vectoriels et dérivées covariantes	83
10.1. Gradient	83
10.2. Rotationnel	83
10.3. Divergence	83
10.4. Cas particulier: espace cartésien à trois dimensions	84
11. Tenseur de courbure	86
11.1. Tenseur de Riemann-Christoffel	86
11.2. Propriétés du tenseur de courbure	88
11.3. Tenseur de courbure entièrement covariant	88
11.4. Tenseur de Ricci	89
11.5. Courbure scalaire de l'espace	89
11.6. Exemples	89

Appendice

Tenseur de courbure dans une métrique diagonale	91
--	----

Chapitre 4

RELATIVITÉ RESTREINTE	94
1. Principe fondamental	94
2. Transformation de Lorentz	95
3. Espace-temps de Minkowski	98
4. Dynamique	101
4.1. Définition	101
4.2. Formulation lagrangienne	102
4.3. Tenseur des contraintes énergie-impulsion	103
5. Électrodynamique	104
5.1. Densité de courant et de charge	104
5.2. Électrodynamique classique	106
5.3. Formulation lagrangienne de l'électrodynamique classique	108
5.4. Tenseur des contraintes électromagnétiques	110
6. Hydrodynamique	111

Appendice

Description microscopique des interactions fondamentales	119
---	-----

Chapitre 5

EFFET DE LA GRAVITATION EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE	123
1. Principe d'équivalence	123
2. Effet de la gravitation sur le mouvement d'une particule	124
3. Principe de correspondance de la relativité générale	126
4. Géodésique	127
4.1. Extremum de longueur	127
4.2. Principe de moindre action	128
4.3. Relation entre la métrique et les géodésiques	129
5. Application du principe de covariance	130
5.1. Exemple 1: géodésique dans l'espace de Schwarzschild	130
5.2. Exemple 2: déplacement du périhélie des planètes	132
5.3. Exemple 3: déviation des rayons lumineux	137
6. Effet de la gravitation sur la dynamique	140
7. Effet de la gravitation sur l'électromagnétisme	141
7.1. Électrodynamique	141
7.2. Tenseur des contraintes	143
7.3. Exemple: plasma dans un champ de gravitation	143
8. Effet de la gravitation sur l'hydrodynamique	144
8.1. Équations covariantes	144
8.2. Exemple: hydrostatique	144

Chapitre 6

ÉQUATIONS D'EINSTEIN	146
1. Limite newtonienne	146
2. L'équation d'Einstein	148
3. Coordonnées harmoniques	151
4. Contenu physique des équations d'Einstein	153
4.1. Tenseur énergie-impulsion global $\tau^{v\lambda}$	153
4.2. Propriétés du tenseur $\tau^{v\lambda}$	154

Chapitre 7

ONDES GRAVITATIONNELLES	156
1. Ondes électromagnétiques	156
1.1. Équation de propagation	156
1.2. Ondes planes	157
2. Champ gravitationnel faible	160
2.1. Équations d'Einstein	160
2.2. Transformation des coordonnées	161
2.3. Condition d'harmonicité	162
3. Ondes gravitationnelles	164
4. Tenseur de polarisation des ondes gravitationnelles	164
5. Le graviton, boson d'échange de l'interaction gravitationnelle	168
6. Énergie transportée par les ondes gravitationnelles	169
7. Production d'ondes gravitationnelles	171
8. Diffusion et absorption d'ondes gravitationnelles	174
8.1. Système de particules en interaction gravitationnelle soudaine	174
8.2. Sections efficaces	177
9. Détection des ondes gravitationnelles	179

Chapitre 8

CHAMP DE GRAVITATION STATIQUE ET ISOTROPE	182
1. Forme standard du temps propre	182
1.1. Temps propre	182
1.2. Tenseur métrique	183
1.3. Symboles de Christoffel	183
1.4. Tenseur de Ricci	184
2. Équations de mouvement	184
2.1. Intégrales premières	184
2.2. Orbites des particules	186
2.3. Champ gravitationnel faible. Orbite circulaire	186
2.4. Forme des orbites dans un champ gravitationnel	187
3. Métrique de Schwarzschild	189

3.1. Rayon gravitationnel	189
3.2. Nature de la singularité pour $r = r_g$	191
4. Trous noirs de Schwarzschild	192
4.1. Coordonnées locales	192
4.2. Équations du mouvement	193
4.2.1. Particule de masse m	196
4.2.2. Particule de masse nulle	197
5. Non singularité du rayon de Schwarzschild	199
<i>Appendice</i>	
Sphère de matière et métrique de Schwarzschild	202
Chapitre 9	
STRUCTURES STELLAIRES	209
1. Équation fondamentale de l'astrophysique	209
2. Étude d'une structure stellaire	213
2.1. Métrique à l'intérieur	213
2.2. Métrique à l'extérieur	213
2.3. Nombre de nucléons	214
2.4. Énergie interne	215
2.5. Énergie potentielle	216
2.6. Conditions de stabilité d'une structure stellaire	217
3. Astrophysique newtonienne	217
3.1. Équation fondamentale	217
3.2. Énergie interne	218
3.3. Étoiles polytropes	219
3.3.1. Définition	219
3.3.2. Énergie interne	220
3.3.3. Cas particuliers: densité constante	222
3.3.4. Solution de Lane-Emden	223
4. Limite de Chandrasekhar	225
5. Les états compacts de la matière stellaire	227
6. Les naines blanches	232
6.1. Rappels historiques	232
6.2. Définitions. Densité critique	233
6.3. Densité très inférieure à la densité critique	234
6.4. Densité très supérieure à la densité critique	235
7. Étoiles à neutrons	236
7.1. Densité critique	237
7.2. Densité très inférieure à la densité critique	238
7.3. Densité très supérieure à la densité critique	238
8. Les étoiles supermassives	240
<i>Appendice A</i>	
Condition d'équilibre d'une structure stellaire	243

Appendice B

Rappels de théorie cinétique des gaz	246
1. Fonction de distribution	246
2. Les observables thermodynamiques	247
3. Gaz de Fermi à température nulle	247
4. Gaz en équilibre thermodynamique à la température T	251
4.1. Gaz ultrarelativiste	252
4.2. Gaz relativiste	253

Appendice C

Réactions thermonucléaires dans les étoiles	254
--	-----

Chapitre 10

CHAMP DE GRAVITATION NON STATIQUE ISOTROPE	256
1. Tenseur métrique et tenseur de courbure	256
1.1. Forme standard	256
1.2. Tenseur métrique	257
1.3. Symboles de Christoffel	257
1.4. Tenseur de Ricci	257
2. Théorème de Birkhoff	258
3. Coordonnées comobiles	259
3.1. Définition	259
3.2. Coordonnées comobiles pour des particules initialement au repos	260
3.3. Coordonnées comobiles de symétrie sphérique	261
4. Effondrement gravitationnel	263
4.1. Équation d'Einstein	263
4.2. Métrique de Robertson-Walker	264
4.3. Effondrement gravitationnel	265

Chapitre 11

INTRODUCTION À LA DYNAMIQUE COSMOLOGIQUE ET AU MODÈLE STANDARD DE L'UNIVERS TRÈS PRIMITIF	270
1. Équations fondamentales de la dynamique cosmologique	271
1.1. Les modèles d'Univers	271
1.2. Les équations fondamentales de la dynamique cosmologique	272
1.3. Décalage spectral	275
1.4. La loi de Hubble	277
1.5. Le modèle stationnaire	280
1.6. Le modèle d'Univers non stationnaire	281
2. Entropie à l'équilibre du gaz stellaire	282
3. L'Univers actuel	284

3.1. L'explosion primordiale	284
3.2. La densité de matière théorique actuelle	286
3.3. Problème de la masse manquante	288
3.3.1. Existence d'un gaz intergalactique	289
3.3.2. Présence d'étoiles invisibles	289
3.3.3. Existence de trous noirs	290
3.3.4. Présence de particules hautement relativistes	290
3.3.4. Masse non nulle des neutrinos	290
4. Évolutions possibles de l'Univers	291
4.1. Modèle elliptique	292
4.2. Le modèle de Einstein-De Sitter	294
4.3. Le modèle hyperbolique	295
5. Le rayonnement cosmique fossile	296
6. Le modèle standard de l'Univers Primitif	302
6.1. Températures de l'Univers Primitif	302
6.2. Durée des différents stades d'évolution de l'Univers Primitif	304
7. Formation des galaxies	311
<i>Appendice</i>	
Température de découplage	318
Chapitre 12	
PERSPECTIVES ACTUELLES...	321
BIBLIOGRAPHIE	339
TABLE DES MATIÈRES	342