

Table des matières

Chapitre 1. Relativité générale	1
Brahim LAMINE	
1.1. Les fondements de la relativité générale	1
1.1.1. Principe d'équivalence	1
1.1.2. Fondement de la géométrie non euclidienne	14
1.2. Analyse tensorielle et courbure d'espace-temps	33
1.2.1. Espace tangent	33
1.2.2. Dérivation et transport parallèle	44
1.2.3. Courbure	53
1.3. Équations de la relativité générale	69
1.3.1. Principe de covariance	69
1.3.2. Tenseur énergie-impulsion	71
1.3.3. Équations d'Einstein	80
1.3.4. Solution de Schwarzschild	86
1.4. Bibliographie	106
Chapitre 2. Objets compacts	109
Natalie WEBB	
2.1. Introduction	109
2.1.1. Compacité	111
2.2. Naines blanches	112
2.2.1. Formation	112
2.2.2. Dégénérescence des électrons	113
2.2.3. Caractéristiques	118
2.2.4. Observations	121
2.3. Étoiles à neutrons	123
2.3.1. Formation	123
2.3.2. Détachement des neutrons et dégénérescence des baryons	124

2.3.3. Structure des étoiles à neutrons	125
2.3.4. Équation d'état	126
2.3.5. Caractéristiques	129
2.3.6. Pulsars	133
2.3.7. Paramètres post-képlériens	138
2.3.8. Observations	140
2.4. Trous noirs	144
2.4.1. Formation	145
2.4.2. Masse	147
2.4.3. Rayon	149
2.4.4. Spin du trou noir	150
2.4.5. Température	151
2.4.6. Décalage gravitationnel vers le rouge	152
2.4.7. Observations	152
2.5. Systèmes binaires	159
2.5.1. Lobes de Roche	159
2.5.2. Évolution des binaires	162
2.5.3. Fonction de masse binaire	163
2.5.4. Accrétion	167
2.5.5. Éjection	171
2.5.6. Observations	174
2.6. Bibliographie	176

Chapitre 3. Ondes gravitationnelles 185

Patrice HELLO

3.1. Les ondes gravitationnelles dans le contexte de la relativité générale	185
3.1.1. Un peu d'histoire	185
3.1.2. Propriétés des ondes gravitationnelles	188
3.1.3. Génération	191
3.1.4. Sources astrophysiques et signaux attendus	198
3.2. Détection des ondes gravitationnelles	208
3.2.1. Effet d'une onde gravitationnelle sur la matière	208
3.2.2. Détecteurs interférométriques (LIGO et Virgo)	211
3.2.3. Autres détecteurs (LISA, chronométrage des pulsars)	224
3.2.4. Éléments de techniques d'analyse des données	227
3.3. Astronomie des ondes gravitationnelles	234
3.3.1. Les fusions de trous noirs, GW150914 et les autres	235
3.3.2. GW170817 et la naissance de l'astronomie multimessager	239
3.3.3. Contraintes sur les théories de la gravitation	241
3.3.4. Implications astrophysiques	248

3.3.5. Cosmologie	254
3.4. Le futur	257
3.5. Bibliographie	257

Chapitre 4. Univers de Friedmann-Lemaître et expansion cosmologique 261

Richard TAILLET

4.1. Géométrie	262
4.1.1. Coordonnées comobiles	263
4.1.2. Distances et coordonnées	263
4.1.3. Métrique sur une sphère	264
4.1.4. Métrique de FLRW	266
4.1.5. Aire d'une sphère de rayon r	267
4.1.6. Volume d'une sphère de rayon r	268
4.2. Expansion cosmologique	269
4.2.1. Décalage vers le rouge	269
4.2.2. Loi de Hubble-Lemaître	271
4.2.3. Valeur de la constante de Hubble	272
4.2.4. Remarque sur l'interprétation de la loi de Hubble-Lemaître	273
4.2.5. Lien avec l'effet Doppler	274
4.2.6. Domaine de validité	274
4.2.7. Précision fondamentale	275
4.2.8. Diminution des vitesses physiques	276
4.3. Équations de Friedmann-Lemaître	276
4.3.1. Écriture des équations	276
4.3.2. Contenu de l'Univers	277
4.3.3. Densité critique et paramètres de densité	279
4.3.4. Valeurs actuelles	281
4.3.5. Composante dominante	281
4.3.6. Problème de la platitude	282
4.4. Évolution temporelle	283
4.4.1. Évolution du facteur d'échelle	283
4.4.2. Avertissement	283
4.4.3. Cas d'un univers plat à une seule composante	284
4.4.4. Singularité initiale et âge de l'Univers	285
4.4.5. Big Bang	287
4.4.6. Cas d'un univers vide et plat avec constante cosmologique	287
4.4.7. Univers plat contenant matière et rayonnement ($\Lambda = 0$)	288
4.4.8. Cas d'un univers de matière non plat	289
4.4.9. Matière et constante cosmologique : notre Univers actuel	294

4.4.10. Âge de l'Univers	294
4.4.11. Plan $\Omega_m^0 - \Omega_\Lambda^0$	298
4.5. Horizons	302
4.5.1. Horizon des particules	302
4.5.2. Problème de l'horizon	304
4.5.3. Horizon et décalage vers le rouge	305
4.5.4. Horizon des événements	306
4.5.5. Univers visible	311
4.6. Distances	311
4.6.1. Échelle des distances cosmologiques	311
4.6.2. Ambiguïté de la notion de distance	312
4.6.3. Distance comobile – Relation entre r et z	313
4.6.4. Distance physique et taille angulaire	314
4.6.5. Remarque sur la vitesse de récession	318
4.7. Relation redshift-luminosité	320
4.7.1. Flux lumineux	320
4.7.2. Exemple d'un univers plat composé de matière et rayonnement	321
4.7.3. Exemple d'un univers plat composé d'une constante cosmologique	324
4.7.4. Calcul et tracé de la courbe	324
4.8. Distance de taille angulaire	326
4.9. Supernovae cosmologiques	328
4.9.1. Supernovae	330
4.9.2. Images	334
4.9.3. Magnitudes	335
4.9.4. Bandes spectrales	337
4.9.5. Correction K	339
4.9.6. Chandelles standardisables	339
4.9.7. Contraintes sur les paramètres cosmologiques	340
4.10. Conclusion	341
4.10.1. Sondes cosmologiques	341
4.10.2. Quintessence	342
4.10.3. Et après ?	343
4.11. Bibliographie	344

Symboles et constantes	345
---	------------

Liste des auteurs	347
------------------------------------	------------

Index	349
------------------------	------------