

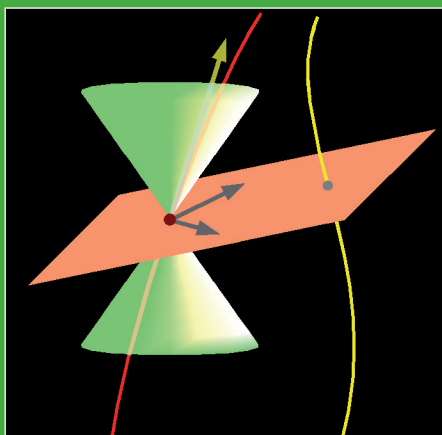
SAVOIRS

PHYSIQUE

ACTUELS

RELATIVITÉ RESTREINTE

DES PARTICULES
À L'ASTROPHYSIQUE



ÉRIC GOURGOLHON


EDP
SCIENCES

CNRS ÉDITIONS

Extrait de la publication

Éricourgoulhon

Relativité restreinte

Des particules à l'astrophysique

S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Illustration de couverture : Cône de lumière et espace local de repos en un point d'une ligne d'univers.

Imprimé en France.

© 2010, **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 978-2-7598-0067-4

ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-07018-0

À Valérie et Maxime

Vj k'r ci g'kpvqpcmf 'ghv'drepm

Table des matières

Préface	xix
Avant-propos	xxi
1 L'espace-temps de Minkowski	1
1.1 Les quatre dimensions	2
1.1.1 L'espace-temps comme espace affine	2
1.1.2 Quelques notations	3
1.1.3 Système de coordonnées affines	4
1.1.4 Constante c	5
1.1.5 L'espace-temps newtonien	5
1.2 Le tenseur métrique	6
1.2.1 Produit scalaire sur l'espace-temps	7
1.2.2 Matrice du tenseur métrique	9
1.2.3 Bases orthonormales	10
1.2.4 Genre des vecteurs	11
1.2.5 Norme d'un vecteur	11
1.2.6 Diagrammes d'espace-temps	12
1.3 Cône isotrope et flèche du temps	15
1.3.1 Définitions	15
1.3.2 Deux petits lemmes bien utiles	16
1.3.3 Classification des vecteurs unitaires	17
1.4 Orientation de l'espace-temps	18
1.4.1 Notion d'orientation	18
1.4.2 Le tenseur de Levi-Civita	19
1.5 Dualité vecteurs-formes linéaires	21
1.5.1 Formes linéaires et espace dual	21
1.5.2 Dualité métrique	22
1.6 Bilan : l'espace-temps de Minkowski	24
1.7 Avant d'aller plus loin...	26

2	Lignes d'univers et temps propre	29
2.1	Ligne d'univers d'un point matériel	29
2.2	Temps propre	32
2.2.1	Définition	32
2.2.2	Horloges idéales	34
2.3	Quadrivitesse et quadriaccélération	35
2.3.1	Quadrivitesse	35
2.3.2	Quadriaccélération	37
2.4	Les photons	39
2.4.1	Géodésiques lumière	39
2.4.2	Cône de lumière	40
2.5	Voyageur de Langevin et paradoxe des jumeaux	41
2.5.1	Lignes d'univers des jumeaux	41
2.5.2	Temps propre de chaque jumeau	43
2.5.3	4-vitesse et 4-accélération	47
2.5.4	Un aller-retour vers le centre de la Galaxie	51
2.5.5	Vérifications expérimentales	55
2.6	Propriétés géométriques d'une ligne d'univers	57
2.6.1	Géodésiques du genre temps	57
2.6.2	Champ de vecteur le long d'une ligne d'univers	59
2.6.3	Courbure et torsions	60
3	Observateurs	65
3.1	Simultanéité et mesure du temps	65
3.1.1	Position du problème	65
3.1.2	Critère de simultanéité d'Einstein-Poincaré	66
3.1.3	Espace local de repos	68
3.1.4	Inexistence d'un temps absolu	71
3.1.5	Projecteur orthogonal sur l'espace local de repos	73
3.1.6	Caractère euclidien de l'espace local de repos	74
3.2	Mesure de distances spatiales	75
3.2.1	Formule de Synge	75
3.2.2	Critère de rigidité de Born	77
3.3	Référentiel local	79
3.3.1	Observateur et son référentiel local	79
3.3.2	Coordonnées relatives au référentiel local	81
3.3.3	Espace de référence d'un observateur	82
3.4	Quadrirotation d'un référentiel local	83
3.4.1	Variation du référentiel local le long de la ligne d'univers	84
3.4.2	Décomposition orthogonale des formes bilinéaires antisymétriques	86
3.4.3	Application à la variation du référentiel local	88
3.4.4	Observateurs inertiels	91
3.5	Dérivée d'un vecteur le long d'une ligne d'univers	92

3.5.1	Dérivée absolue	92
3.5.2	Dérivée par rapport à un observateur	92
3.5.3	Dérivée de Fermi-Walker	93
3.6	Localité du référentiel d'un observateur	95
4	Cinématique	99
4.1	Facteur de Lorentz	99
4.1.1	Définition	99
4.1.2	Expression en terme de 4-vitesses et 4-accélération . . .	103
4.1.3	Dilatation des temps	105
4.2	Vitesse relative à un observateur	106
4.2.1	Définition	106
4.2.2	4-vitesse et facteur de Lorentz en fonction de la vitesse	108
4.2.3	Vitesse relative maximale	110
4.2.4	Expressions en terme de composantes	112
4.3	Vérifications expérimentales de la dilatation des temps	113
4.3.1	Muons atmosphériques	113
4.3.2	Autres tests	115
4.4	Accélération relative à un observateur	115
4.4.1	Définition	115
4.4.2	Relation avec la dérivée seconde du vecteur position . .	116
4.4.3	Expression de la 4-accélération	118
4.5	Mouvement des photons	122
4.5.1	Direction de propagation d'un photon	123
4.5.2	Vitesse de la lumière	124
4.5.3	Vérifications expérimentales de l'invariance de la vitesse de la lumière	127
5	Changement d'observateur	135
5.1	Relations entre deux observateurs	135
5.1.1	Réciprocité de la vitesse relative	135
5.1.2	Contraction des longueurs	138
5.2	Loi de composition des vitesses	141
5.2.1	Forme générale	141
5.2.2	Décomposition en parties parallèle et transverse	144
5.2.3	Cas des vitesses colinéaires	147
5.2.4	Formule alternative	147
5.2.5	Vérification expérimentale : expérience de Fizeau	149
5.3	Loi de composition des accélérations	151
5.4	Effet Doppler	152
5.4.1	Dérivation	153
5.4.2	Vérifications expérimentales	156
5.5	Aberration	157
5.5.1	Expression théorique	157

5.5.2	Distorsion de la sphère céleste	161
5.5.3	Vérifications expérimentales	161
5.6	Images des objets en mouvement	163
5.6.1	Image et position instantanée	163
5.6.2	Rotation apparente	164
5.6.3	Image d'une sphère	166
5.6.4	Mouvements superluminiques	169
6	Groupe de Lorentz	173
6.1	Transformations de Lorentz	174
6.1.1	Définition et caractérisation	174
6.1.2	Groupe de Lorentz	175
6.1.3	Propriétés des transformations de Lorentz	176
6.2	Sous-groupes de $O(3,1)$	178
6.2.1	Groupe de Lorentz propre $SO(3,1)$	178
6.2.2	Transformations de Lorentz orthochrones	178
6.2.3	Transformations de Lorentz restreintes	180
6.2.4	Réduction du groupe de Lorentz à $SO_o(3,1)$	180
6.3	Classification des transformations de Lorentz restreintes	182
6.3.1	Direction lumière invariante	182
6.3.2	Décomposition à partir d'une direction lumière invariante	183
6.3.3	Rotations spatiales	187
6.3.4	Transformations de Lorentz spéciales	189
6.3.5	Rotations lumière	191
6.3.6	Quadrivis	193
6.3.7	Vecteurs propres d'une transformation de Lorentz restreinte	194
6.3.8	Bilan	195
6.4	Décomposition polaire	197
6.4.1	Énoncé et démonstration	197
6.4.2	Formes explicites	199
6.5	Compléments sur les transformations de Lorentz spéciales	200
6.5.1	Interprétation cinématique	200
6.5.2	Expression dans une base générale	203
6.5.3	Rapidité	204
6.5.4	Valeurs propres	207
6.6	Composition des transformations spéciales et rotation de Thomas	208
6.6.1	Transformations de même plan	209
6.6.2	Rotation de Thomas	211
6.6.3	Expressions de l'angle de la rotation de Thomas	216
6.6.4	Bilan	220

7	Le groupe de Lorentz en tant que groupe de Lie	223
7.1	Structure de groupe de Lie	223
7.1.1	Définition	223
7.1.2	Dimension de $O(3,1)$	224
7.1.3	Topologie de $SO_o(3,1)$ et $O(3,1)$	225
7.2	Générateurs et algèbre de Lie	226
7.2.1	Transformations de Lorentz infinitésimales	226
7.2.2	Structure d'algèbre de Lie	227
7.2.3	Générateurs	229
7.2.4	Lien avec la variation du référentiel local d'un observateur	232
7.3	Réduction de $O(3,1)$ à son algèbre de Lie	233
7.3.1	Application exponentielle	233
7.3.2	Génération des transformations de Lorentz spéciales	235
7.3.3	Génération des rotations spatiales	238
7.3.4	Constantes de structure	239
7.4	Liens entre le groupe de Lorentz et $SL(2,C)$	242
7.4.1	L'application spineur	242
7.4.2	L'application spineur de $SU(2)$ vers $SO(3)$	247
7.4.3	L'application spineur et les transformations de Lorentz spéciales	250
7.4.4	Revêtement de $SO_o(3,1)$ par $SL(2,C)$	251
7.4.5	Existence de vecteurs propres lumière	253
7.4.6	Algèbre de Lie de $SL(2,C)$	254
7.4.7	Application exponentielle sur $sl(2,C)$	257
8	Observateurs inertiels	259
8.1	Caractérisation des observateurs inertiels	259
8.1.1	Définition	259
8.1.2	Ligne d'univers	260
8.1.3	Globalité de l'espace local de repos	261
8.1.4	Réseau rigide d'observateurs inertiels	262
8.2	Groupe de Poincaré	263
8.2.1	Changement de coordonnées inertielles	263
8.2.2	Transformations de Poincaré actives	265
8.2.3	Structure de groupe	266
8.2.4	Le groupe de Poincaré en tant que groupe de Lie	268
9	Énergie et impulsion	273
9.1	Quadri-impulsion, masse et énergie	273
9.1.1	Quadri-impulsion et masse d'une particule	273
9.1.2	Énergie et impulsion relatives à un observateur	275
9.1.3	Cas d'une particule massive	278
9.1.4	Énergie et impulsion d'un photon	282

9.1.5	Relation entre P , E et la vitesse relative	283
9.1.6	Composantes de la 4-impulsion	284
9.2	Conservation de la 4-impulsion	285
9.2.1	4-impulsion totale d'un système de particules	285
9.2.2	Système isolé et collisions entre particules	287
9.2.3	Principe de conservation de la 4-impulsion	288
9.2.4	Application à une particule isolée : loi d'inertie	289
9.2.5	4-impulsion totale d'un système isolé	291
9.2.6	Énergie et impulsion d'un système	294
9.2.7	Application : effet Doppler	295
9.3	Collisions de particules	296
9.3.1	Interactions localisées	296
9.3.2	Collision entre deux particules	297
9.3.3	Collision élastique	298
9.3.4	Effet Compton	303
9.3.5	Diffusion Compton inverse	305
9.3.6	Collisions inélastiques	308
9.4	Quadriforce	313
9.4.1	Définition	313
9.4.2	Décomposition orthogonale de la 4-force	314
9.4.3	Force mesurée par un observateur	315
9.4.4	Version relativiste de la relation fondamentale de la dynamique	317
9.4.5	Évolution de l'énergie	318
9.4.6	Expression de la 4-force	318
10	Moment cinétique	321
10.1	Moment cinétique d'une particule	321
10.1.1	Définition	321
10.1.2	Vecteur moment cinétique relatif à un observateur	322
10.1.3	Composantes du moment cinétique	324
10.2	Moment cinétique d'un système	325
10.2.1	Définition	325
10.2.2	Changement d'origine	326
10.2.3	Vecteur moment cinétique d'un système par rapport à un observateur	326
10.3	Conservation du moment cinétique	328
10.3.1	Loi de conservation	328
10.3.2	Moment cinétique d'un système isolé	329
10.3.3	Conservation du vecteur moment cinétique relatif à un observateur inertiel	329
10.4	Centre d'inertie et spin	330
10.4.1	Centroïde d'un système	330
10.4.2	Centre d'inertie d'un système isolé	331

10.4.3	Spin d'un système isolé	334
10.4.4	Théorème de König	335
10.4.5	Taille minimale d'un système avec spin	336
10.5	Évolution du moment cinétique	339
10.5.1	Quadricouple	339
10.5.2	Loi d'évolution du vecteur moment cinétique	340
10.6	Particule avec spin	342
10.6.1	Définition	342
10.6.2	Loi d'évolution du spin	345
10.6.3	Gyroscope libre	346
10.6.4	Équation BMT	347
11	Principe de moindre action	349
11.1	Principe de moindre action pour une particule	349
11.1.1	Rappels de mécanique lagrangienne non-relativiste	349
11.1.2	Généralisation relativiste	350
11.1.3	Lagrangien et action d'une particule	351
11.1.4	Principe de moindre action	352
11.1.5	Action d'une particule libre	354
11.1.6	Particule dans un champ vectoriel	356
11.1.7	Autres exemples de lagrangien	358
11.2	Théorème de Noether	359
11.2.1	Théorème de Noether pour une particule	360
11.2.2	Application à une particule libre	361
11.3	Formulation hamiltonienne	364
11.3.1	Rappels de mécanique hamiltonienne non-relativiste	364
11.3.2	Quadri-impulsion généralisée d'une particule relativiste	368
11.3.3	Hamiltonien d'une particule relativiste	369
11.4	Systèmes de plusieurs particules	372
11.4.1	Principe de moindre action	373
11.4.2	Formulation hamiltonienne	376
12	Observateurs accélérés	379
12.1	Observateur uniformément accéléré	379
12.1.1	Définition	379
12.1.2	Ligne d'univers	380
12.1.3	Changement d'observateur inertiel de référence	383
12.1.4	Mouvement perçu par l'observateur inertiel	386
12.1.5	Espaces locaux de repos	387
12.1.6	Horizon de Rindler	388
12.1.7	Référentiel de l'observateur uniformément accéléré	390
12.2	Écart entre l'espace local et l'hypersurface de simultanéité	394
12.2.1	Cas d'un observateur quelconque	395
12.2.2	Cas d'un observateur uniformément accéléré	397
12.3	Physique dans un référentiel accéléré	398

12.3.1	Synchronisation des horloges	398
12.3.2	4-accélération des observateurs comobiles	401
12.3.3	Règle rigide en mouvement accéléré	402
12.3.4	Trajectoires des photons	406
12.3.5	Décalage spectral	406
12.3.6	Mouvement des particules libres	409
12.4	Précession de Thomas	412
12.4.1	Dérivation	412
12.4.2	Application à un gyroscope	418
12.4.3	Gyroscope en orbite circulaire	419
12.4.4	Équation de Thomas	420
13	Observateurs en rotation	425
13.1	Vitesse de rotation	425
13.1.1	Réalisation physique d'un observateur sans rotation	426
13.1.2	Mesure de la vitesse de rotation	427
13.2	Disque tournant	427
13.2.1	Observateur en rotation uniforme	427
13.2.2	Observateurs cotournants	429
13.2.3	4-accélération et 4-rotation de l'observateur cotournant	431
13.2.4	Simultanéité pour un observateur cotournant	434
13.3	Désynchronisation des horloges	438
13.3.1	Introduction	438
13.3.2	Synchronisation locale	438
13.3.3	Impossibilité d'une synchronisation globale	440
13.3.4	Transport d'une horloge sur le disque tournant	444
13.3.5	Mesures expérimentales de la désynchronisation	448
13.4	Paradoxe d'Ehrenfest	450
13.4.1	Circonférence du disque tournant	450
13.4.2	Rayon du disque	451
13.4.3	Le « paradoxe »	452
13.4.4	Mise en rotation du disque	453
13.5	Effet Sagnac	456
13.5.1	Délai Sagnac	456
13.5.2	Dérivation alternative	460
13.5.3	Temps propre de parcours de chaque signal	461
13.5.4	Interféromètre de Sagnac optique	462
13.5.5	Interféromètre de Sagnac à ondes de matière	466
13.5.6	Application : gyromètres	467
14	Les tenseurs en toute généralité	471
14.1	Tenseurs : définition et exemples	472
14.1.1	Définition	472
14.1.2	Tenseurs déjà rencontrés	472
14.2	Opérations sur les tenseurs	473

14.2.1	Produit tensoriel	473
14.2.2	Composantes dans une base vectorielle	474
14.2.3	Changement de base	475
14.2.4	Composantes et dualité métrique	477
14.2.5	Contraction	477
14.3	Formes alternées	478
14.3.1	Définition et exemples	478
14.3.2	Produit extérieur	480
14.3.3	Base de l'espace des p -formes	481
14.3.4	Composantes du tenseur de Levi-Civita	482
14.4	Dualité de Hodge	484
14.4.1	Tenseurs associés au tenseur de Levi-Civita	484
14.4.2	Étoile de Hodge	487
14.4.3	Étoile de Hodge et produit extérieur	489
14.4.4	Décomposition orthogonale des 2-formes	489
15	Champs sur l'espace-temps	491
15.1	Coordonnées quelconques sur l'espace-temps	491
15.1.1	Système de coordonnées	491
15.1.2	Base naturelle	492
15.1.3	Composantes du tenseur métrique	494
15.2	Champs tensoriels	498
15.2.1	Définitions	498
15.2.2	Champ scalaire et gradient	499
15.2.3	Gradients des coordonnées	499
15.3	Dérivation covariante	500
15.3.1	Dérivée covariante d'un vecteur	500
15.3.2	Généralisation à tous les tenseurs	501
15.3.3	Coefficients de connexion	503
15.3.4	Symboles de Christoffel	504
15.3.5	Divergence d'un champ vectoriel	506
15.3.6	Divergence d'un champ tensoriel	507
15.4	Formes différentielles	508
15.4.1	Définition	508
15.4.2	Dérivée extérieure	508
15.4.3	Propriétés de la dérivation extérieure	511
15.4.4	Décomposition sur un système de coordonnées	512
15.4.5	Dérivée extérieure d'une 3-forme et divergence d'un champ vectoriel	513
16	Intégration dans l'espace-temps	515
16.1	Intégration sur un volume quadridimensionnel	515
16.1.1	Élément de volume	515
16.1.2	Quadrivolume d'une partie de l'espace-temps	516
16.1.3	Intégrale d'une 4-forme différentielle	517

16.2	Sous-variétés de \mathcal{E}	518
16.2.1	Définition d'une sous-variété	518
16.2.2	Sous-variétés à bord	520
16.2.3	Orientation d'une sous-variété	521
16.3	Intégration sur une sous-variété de \mathcal{E}	521
16.3.1	Intégrale d'une forme différentielle quelconque	521
16.3.2	Élément de volume d'une hypersurface	524
16.3.3	Élément d'aire d'une surface	526
16.3.4	Élément de longueur d'une courbe	528
16.3.5	Intégrale d'un champ scalaire sur une sous-variété	529
16.3.6	Intégrale d'un champ tensoriel	530
16.3.7	Intégrales de flux	530
16.4	Théorème de Stokes	531
16.4.1	Énoncé et exemples	531
16.4.2	Applications	533
17	Champ électromagnétique	537
17.1	Tenseur champ électromagnétique	537
17.1.1	Champ électromagnétique et 4-force de Lorentz	537
17.1.2	Le champ électromagnétique comme 2-forme	539
17.1.3	Champ électrique et champ magnétique	539
17.1.4	Force de Lorentz relative à un observateur	541
17.1.5	Dual métrique et dual de Hodge	542
17.2	Changement d'observateur	544
17.2.1	Loi de transformation des champs électrique et magnétique	544
17.2.2	Invariants du champ électromagnétique	547
17.2.3	Réduction à des champs électrique et magnétique parallèles	549
17.2.4	Champ créé par une charge en translation	551
17.3	Particule dans un champ électromagnétique	554
17.3.1	Champ électromagnétique uniforme : cas général	555
17.3.2	Champs électrique et magnétique orthogonaux	561
17.3.3	Cas $I_2 = 0$ et $I_1 > 0$ (filtre de Wien)	562
17.3.4	Cas $I_2 = 0$ et $I_1 = 0$ (champ électromagnétique du genre lumière)	565
17.3.5	Cas $I_2 = 0$ et $I_1 < 0$ (champ à dominante électrique)	567
17.4	Application : accélérateurs de particules	569
17.4.1	Accélération par un champ électrique	569
17.4.2	Accélérateurs linéaires	569
17.4.3	Cyclotrons	570
17.4.4	Synchrotrons	572
17.4.5	Anneaux de stockage	575

18 Équations de Maxwell	577
18.1 Quadricourant électrique	578
18.1.1 Vecteur quadricourant électrique	578
18.1.2 Intensité électrique	580
18.1.3 Densité de charge et densité de courant	583
18.1.4 Quadricourant d'un milieu continu	583
18.2 Équations de Maxwell	584
18.2.1 Énoncé	584
18.2.2 Formes alternatives	585
18.2.3 Expression en terme des champs électrique et magnétique	586
18.3 Conservation de la charge électrique	589
18.3.1 Dédution à partir des équations de Maxwell	589
18.3.2 Expression en fonction des densités de charge et de courant	592
18.3.3 Théorème de Gauss	592
18.4 Résolution des équations de Maxwell	594
18.4.1 Quadripotentiel	594
18.4.2 Potentiels électrique et magnétique	595
18.4.3 Choix de jauge	597
18.4.4 Ondes électromagnétiques	598
18.4.5 Solution pour le 4-potentiel en jauge de Lorenz	598
18.5 Champ créé par une charge en mouvement	602
18.5.1 4-potentiel de Liénard-Wiechert	602
18.5.2 Champ électromagnétique	606
18.5.3 Champs électrique et magnétique	608
18.5.4 Charge en mouvement inertiel	609
18.5.5 Partie radiative	611
18.6 Principe de moindre action	613
18.6.1 Principe de moindre action en théorie classique des champs	613
18.6.2 Cas du champ électromagnétique	617
19 Tenseur énergie-impulsion	619
19.1 Tenseur énergie-impulsion	619
19.1.1 Définition	619
19.1.2 Interprétation	622
19.1.3 Symétrie du tenseur énergie-impulsion	624
19.2 Conservation de l'énergie-impulsion	626
19.2.1 Énoncé	626
19.2.2 Version locale	627
19.2.3 Densité de quadriforce	628
19.2.4 Conservation de l'énergie et de l'impulsion par rapport à un observateur	630

19.3	Moment cinétique	631
19.3.1	Définition	631
19.3.2	Conservation du moment cinétique	631
20	Énergie-impulsion du champ électromagnétique	633
20.1	Tenseur énergie-impulsion du champ électromagnétique	634
20.1.1	Introduction	634
20.1.2	Quantités relatives à un observateur	636
20.2	Rayonnement d'une charge accélérée	637
20.2.1	Tenseur énergie-impulsion électromagnétique	637
20.2.2	Énergie rayonnée	638
20.2.3	Quadri-impulsion rayonnée	640
20.2.4	Distribution angulaire du rayonnement	643
20.3	Rayonnement synchrotron	648
20.3.1	Introduction	648
20.3.2	Spectre du rayonnement synchrotron	650
20.3.3	Applications	651
21	Hydrodynamique relativiste	655
21.1	Le modèle du fluide parfait	656
21.1.1	Tenseur énergie-impulsion	656
21.1.2	Quantités relatives à un observateur quelconque	658
21.1.3	Fluide sans pression (poussière)	659
21.1.4	Équation d'état et relations thermodynamiques	660
21.2	Conservation du nombre baryonique	664
21.2.1	Quadricourant baryonique	664
21.2.2	Principe de conservation du nombre baryonique	665
21.2.3	Expression par rapport à un observateur inertiel	667
21.3	Conservation de l'énergie et de l'impulsion	667
21.3.1	Introduction	667
21.3.2	Projection sur la 4-vitesse du fluide	668
21.3.3	Partie orthogonale à la 4-vitesse du fluide	669
21.3.4	Évolution de l'énergie relative à un observateur	670
21.3.5	Équation d'Euler relativiste	671
21.3.6	L'hydrodynamique relativiste comme un système de lois de conservation	672
21.3.7	Vitesse du son	673
21.4	Formulation basée sur le calcul extérieur	674
21.4.1	Équation du mouvement	674
21.4.2	Vorticité d'un fluide simple	676
21.4.3	Forme canonique de l'équation du mouvement	677
21.4.4	Limite non-relativiste : ��quation de Crocco	679
21.5	Lois de conservation	680
21.5.1	Théorème de Bernoulli	680
21.5.2	écoulement irrotationnel	682

21.5.3	Théorème de Kelvin	684
21.6	Applications	687
21.6.1	Astrophysique : jets et sursauts gamma	687
21.6.2	Plasma quark-gluon dans les collisionneurs	689
21.7	Pour aller plus loin...	696
22	Et la gravitation ?	697
22.1	Gravitation dans l'espace-temps de Minkowski	697
22.1.1	Théorie scalaire de Nordström	698
22.1.2	Incompatibilité avec les observations	704
22.1.3	Théorie vectorielle	706
22.1.4	Théorie tensorielle	708
22.2	Principe d'équivalence	709
22.2.1	Énoncé	709
22.2.2	Effet Einstein et incompatibilité avec la métrique de Minkowski	710
22.2.3	Vérifications expérimentales de l'effet Einstein	712
22.2.4	Déviations des rayons lumineux	714
22.3	La relativité générale	715
Annexe A	: Rappels d'algèbre	719
A.1	Structures de base	719
A.1.1	Groupe	719
A.1.2	Corps	720
A.2	Algèbre linéaire	721
A.2.1	Espace vectoriel	721
A.2.2	Algèbre	722
Annexe B	: Sites web	723
Annexe C	: Livres de relativité restreinte	725
Bibliographie		727
Index des notations		755
Index		759

Vj ku' r ci g'kpvgpvkqpcmf 'igh'dicpm

Préface

La théorie de la relativité restreinte occupe une place à part au sein de la physique. Ce n'est pas une théorie physique particulière, mais plutôt, comme la thermodynamique ou la mécanique analytique, une *théorie-cadre*, c'est-à-dire un cadre théorique général au sein duquel on peut formuler diverses théories dynamiques particulières. À ce titre, un exposé moderne de la relativité restreinte se doit de faire ressortir ses structures essentielles, avant de les illustrer par leurs applications concrètes à divers problèmes dynamiques particuliers. Tel est le pari (ô combien réussi !) du beau livre d'Éricourgoulhon.

Contrairement à la plupart des ouvrages didactiques sur la relativité restreinte qui entremêlent l'exposé de cette théorie avec celui de son développement historique, et qui écrivent parfois la forme concrète des « transformations de Lorentz » avant d'indiquer qu'elles laissent invariante une certaine forme quadratique, le livre d'Éricourgoulhon est centré, dès le début, sur la structure essentielle de la théorie, c'est-à-dire sur la structure chrono-géométrique de l'espace-temps quadridimensionnel de Poincaré-Minkowski. Le but étant d'habituer le lecteur à formuler toute question de relativité en termes de géométrie quadridimensionnelle. Le mot géométrie est pensé ici au sens de « géométrie synthétique » (à la Euclide), par opposition à la « géométrie analytique » (à la Descartes). Sous la houlette experte d'Éricourgoulhon, le lecteur apprendra à poser, et à résoudre, tout problème de relativité en dessinant des diagrammes d'espace-temps, faits de lignes, de droites, de plans, d'hyperplans, de cônes et de vecteurs. Il s'habituera à visualiser le mouvement d'une particule comme une ligne d'espace-temps, à penser le paradoxe des jumeaux comme une application de l'« inégalité des triangles d'espace-temps », à exprimer le référentiel local d'un observateur comme la généralisation quadridimensionnelle du trièdre de Serret-Frenet, à calculer une distance spatiale comme une moyenne géométrique d'intervalles temporels (en utilisant une généralisation hyperbolique de la puissance d'un point par rapport à une sphère), ou à voir l'effet Sagnac comme l'entrelac de deux brins d'hélice s'enroulant, en sens inverses, dans l'espace-temps.

Outre cette particularité pédagogique d'être centré sur une formulation géométrique, l'ouvrage d'Éricourgoulhon est remarquable par beaucoup d'autres aspects. D'abord, il est extrêmement complet et expose la plupart des notions et résultats où la relativité restreinte joue un rôle important : de

von Laue M., 151, 466, 626, 704

vorticité

2-forme, 676

potentielle, 687

voyage

vers le futur, 54

vers le passé, 54

voyageur de Langevin, 41, 43

W

Walker A.G., 91

Walton E., 576

Weinberg S., 709

Wheeler J.A., 82, 375, 419, 703

Wheeler-Feynman

(électrodynamique), 374

Whitrow G.J., 394

Wick (rotation), 205

Wick G.-C., 207

Wiechert E., 606

Wien (filtre de), 565

Wigner

angle de, 216

rotation de, 216, 220

Wigner E.P., 220, 221, 267

Wolf P., 133

Y

Yukawa H., 114

Z

Zeeman P., 150

Zimmerman J.E., 467