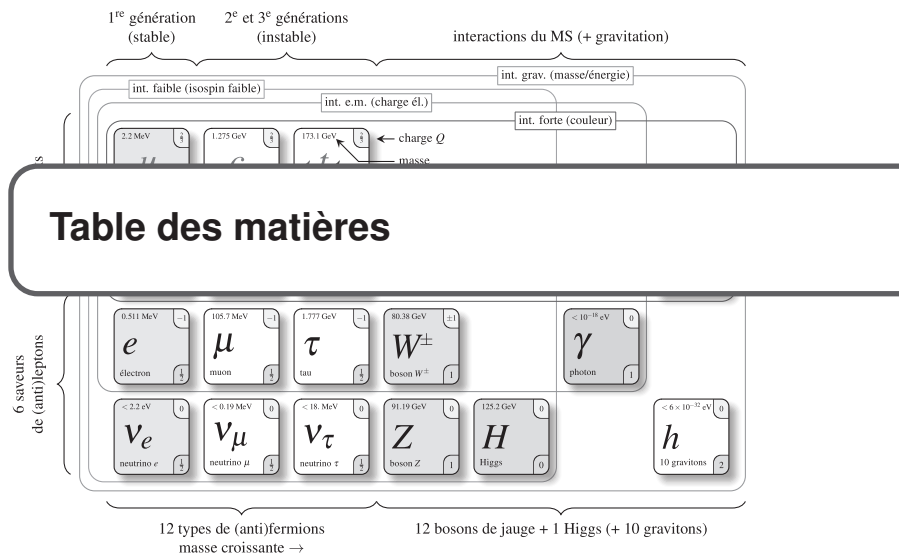


Luc Marleau

Licence

Introduction à la physique des particules





1	Introduction.....	1
1.1	Système d'unités naturelles et de Lorentz-Heaviside.....	2
1.1.1	Unités naturelles	2
1.1.2	Unités de Lorentz-Heaviside.....	5
1.2	Relativité et formalisme quadri-dimensionnel.....	6
1.2.1	Transformations de Lorentz	9
1.3	Notions de physique quantique	10
1.3.1	Bosons et fermions	10
1.3.2	Mécanique quantique relativiste	11
1.3.3	Théorie quantique des champs	16
1.4	Forces et interactions	19
1.4.1	Approche de Yukawa et portée des interactions	20
1.5	Quelques événements historiques	21
1.6	Problèmes.....	23
2	Survol rapide du modèle standard.....	25
2.1	Le modèle standard : modèle ou théorie ?	25
2.2	La matière.....	26
2.2.1	Leptons.....	27
2.2.2	Quarks.....	28

Table des matières

2.2.3	Hadrons.....	29
2.2.4	Particules et antiparticules.....	30
2.3	Les quatre interactions fondamentales.....	31
2.3.1	Particules médiatrices d'interactions.....	31
2.3.2	Interactions électromagnétiques.....	32
2.3.3	Interactions fortes.....	34
2.3.4	Interactions faibles.....	35
2.3.5	Interactions gravitationnelles.....	37
2.4	Sommaire : Le modèle standard et plus.....	39
2.5	Problèmes.....	41
3	Sources et détecteurs.....	43
3.1	Sources.....	43
3.1.1	Radioactivité.....	44
3.1.2	Rayons cosmiques.....	44
3.1.3	Physique de l'accélérateur.....	44
3.1.4	Accélérateurs.....	45
3.2	Détecteurs.....	56
3.2.1	Physique du détecteur.....	57
3.2.2	Instruments de détection.....	61
3.3	Problèmes.....	73
4	Diffusion et désintégration.....	75
4.1	Cinématique d'une réaction – Variables de Mandelstam.....	75
4.1.1	Repère du centre de masse (4 corps).....	80
4.1.2	Repère de la cible fixe (4 corps).....	81
4.1.3	Énergie de seuil.....	83
4.1.4	Rapidité.....	84
4.2	Les interactions en mécanique quantique.....	86
4.3	Matrice de diffusion.....	89
4.4	Espace des phases.....	91
4.5	Section efficace.....	93
4.5.1	Diffusion (4 corps).....	95
4.6	Largeur de désintégration et vie moyenne.....	97
4.6.1	Désintégration en 2 corps.....	100
4.6.2	Désintégration en 3 corps.....	100
4.7	Calcul des éléments de matrice.....	104
4.7.1	Modèle théorique.....	104
4.7.2	Règles et diagrammes de Feynman.....	105
4.8	Problèmes.....	109

5	Symétries et espace-temps	113
5.1	Symétries en mécanique quantique	114
5.2	Invariance sous translation	116
5.3	Rotation en trois dimensions	118
5.4	Parité.....	121
5.4.1	Parité orbitale.....	123
5.4.2	Parité intrinsèque	123
5.4.3	Conservation de la parité totale.....	124
5.4.4	Parité des antiparticules	125
5.4.5	Quelques exemples	126
5.5	Renversement du temps.....	128
5.5.1	Opérateur de renversement du temps.....	128
5.6	Invariance de jauge	132
5.6.1	Transformation de jauge	134
5.6.2	Photons	136
5.7	Exemple récapitulatif	138
5.8	Problèmes.....	141
6	Symétries internes et hadrons	143
6.1	Symétries globales et règles de sélection	144
6.1.1	Charge électrique.....	144
6.1.2	Nombre leptonique.....	145
6.1.3	Nombres électronique, muonique, taonique.....	146
6.1.4	Nombre baryonique	147
6.2	Isospin et hypercharge	148
6.2.1	Symétrie $SU(2)$	151
6.2.2	Générateurs de $SU(2)$	151
6.2.3	Relation de Gell-Mann-Nishijima.....	152
6.2.4	Conservation d'isospin dans les interactions fortes	153
6.3	Étrangeté et autres saveurs.....	155
6.3.1	Étrangeté.....	155
6.3.2	Charme	156
6.3.3	Bottom.....	158
6.3.4	Top	158
6.3.5	Relation de Gell-Mann-Nishijima généralisée.....	159
6.4	Conjugaison de la charge	160
6.4.1	Parité de charge totale.....	161
6.4.2	Invariance sous conjugaison de charge	162
6.4.3	Pions et photons	163
6.4.4	Systèmes particule-antiparticule	164
6.4.5	Violation de CP ou T et théorème CPT.....	166

Table des matières

6.5	Parité-G	167
6.6	Tableau récapitulatif.....	169
6.7	Résonances hadroniques	170
6.8	Problèmes.....	174
7	Modèle des quarks	177
7.1	Rappel historique.....	178
7.2	Théorie des groupes.....	179
7.2.1	Propriétés générales d'un groupe.....	180
7.2.2	Représentations.....	182
7.2.3	Groupes de Lie.....	183
7.2.4	Racine, rang et poids d'un groupe	185
7.2.5	Groupe des rotations $SO(N)$	187
7.2.6	Groupe $U(1)$	189
7.2.7	Groupes $SU(N)$	190
7.3	Quarks et représentations $SU(N)$	197
7.3.1	Lien entre représentation $SU(N)$ et modèle des quarks.....	197
7.3.2	Représentations irréductibles	201
7.3.3	Tableaux de Young	202
7.3.4	Construction des fonctions d'onde	208
7.4	Couleur	215
7.4.1	Groupe $SU_c(3)$ de couleur.....	215
7.4.2	Fonctions d'onde de couleur.....	217
7.4.3	Évidences expérimentales de la couleur	219
7.5	Masses et moments magnétiques	221
7.5.1	Masses des hadrons.....	221
7.5.2	Moments magnétiques.....	227
7.6	Diagrammes de flot de quarks.....	231
7.7	Quark charmé et $SU(4)$	233
7.7.1	Mésons.....	234
7.7.2	Baryons.....	235
7.8	Quark bottom.....	236
7.9	Quark top	238
7.10	Problèmes.....	240
8	Interactions électromagnétiques.....	245
8.1	Diffusion élastique e -Noyau.....	246
8.1.1	Processus sans spin	246
8.1.2	Processus avec spin	252
8.1.3	Diffusion polarisée	253
8.2	Diffusion e - N	254

8.3	Symétries de jauge et QED	255
8.3.1	Théorème de Noether et invariance de jauge globale	256
8.3.2	Invariance de jauge locale	256
8.3.3	Champs de jauge : les photons **	258
8.4	Processus purement leptoniques en QED	260
8.4.1	Processus $e + \bar{e} \rightarrow \mu + \bar{\mu}$	260
8.4.2	Diffusion de Bhabha : $e + \bar{e} \rightarrow e + \bar{e}$	262
8.4.3	Diffusion de Compton $e + \gamma \rightarrow e + \gamma$	263
8.5	Corrections radiatives	264
8.5.1	Divergences et renormalisation	264
8.5.2	Moments magnétiques leptoniques	268
8.5.3	Structure hyperfine et décalage de Lamb	269
8.6	Problèmes	269
9	Interactions fortes	271
9.1	La chromodynamique quantique	272
9.2	Liberté asymptotique et confinement	275
9.3	Diffusion inélastique profonde $e-N$	278
9.4	Invariance d'échelle	279
9.5	Modèle des partons	280
9.5.1	Introduction	280
9.5.2	Nature ponctuelle des partons	281
9.5.3	Spin des partons	284
9.6	Annihilation e^+e^-	285
9.6.1	Événement à deux jets	285
9.6.2	Événement à trois jets	286
9.7	Diffusion $\nu-N$	287
9.7.1	Section efficace	288
9.7.2	Invariance d'échelle	288
9.8	Modèle des quarks-partons et fonctions de structure	289
9.9	Collisions hadron-hadron	292
9.9.1	Processus inclusifs	292
9.9.2	Processus exclusifs	297
9.10	Violation d'échelle et équations DGLAP	298
9.11	Problèmes	300
10	Interactions faibles	303
10.1	Introduction	304
10.1.1	Classification des interactions faibles	304
10.2	Théorie de Fermi	306
10.3	Non-conservation de la parité	308

Table des matières

10.4	Interactions $V-A$	310
10.5	Lacunes de la théorie de Fermi.....	312
10.5.1	Bosons d'échange.....	314
10.5.2	Vers une théorie cohérente.....	315
10.6	Théorie électrofaible $SU_L(2) \otimes U_Y(1)$	317
10.6.1	Charge faible des fermions.....	318
10.6.2	Modèle de Glashow-Weinberg-Salam.....	320
10.6.3	Mécanisme et boson de Higgs.....	323
10.6.4	Masses des fermions **.....	330
10.7	Interactions faibles des fermions.....	331
10.7.1	Courants neutres.....	332
10.7.2	Courants chargés et matrice CKM.....	335
10.8	Violation CP.....	341
10.8.1	Système des kaons.....	341
10.8.2	Implications cosmologiques.....	346
10.9	Neutrinos.....	347
10.9.1	Nombre de neutrinos.....	347
10.9.2	Masse des neutrinos **.....	348
10.9.3	Oscillations des neutrinos **.....	354
10.9.4	Paramètres de masse et matrice de mélange **.....	356
10.10	Problèmes.....	359
11	Au-delà du modèle standard.....	361
11.1	Vers une théorie au-delà du modèle standard.....	361
11.1.1	Constituants du modèle standard.....	362
11.1.2	Lacunes du modèle standard.....	363
11.2	Particules exotiques.....	365
11.2.1	Bosons de jauge supplémentaires W'^{\pm} ou Z'^0	365
11.2.2	Autres bosons de Higgs.....	365
11.2.3	Axions.....	365
11.3	Grande unification.....	366
11.3.1	Modèle $SU(5)$	370
11.3.2	Modèle $SO(10)$	374
11.3.3	Autres modèles d'unification.....	375
11.4	Technicouleur.....	376
11.5	Quarks et leptons composites.....	377
11.5.1	Modèle d'Abbott et Farhi.....	378
11.6	Supersymétrie.....	379
11.6.1	Modèles supersymétriques.....	381
11.7	Gravité quantique.....	384
11.7.1	Supergravité.....	386

11.8	Théorie des cordes.....	386
11.8.1	Survol rapide.....	386
A	Références	391
A.1	Manuels de références complémentaires.....	391
A.2	Ressources sur Internet.....	392
A.3	Glossaire et acronymes.....	395
B	Notations, unités et constantes	405
B.1	Notations.....	405
B.2	Unités naturelles.....	406
B.3	Unités de Lorentz-Heaviside	407
B.4	Constantes fondamentales de physique	408
C	Relativité restreinte et Clebsch-Gordan	409
C.1	Relativité restreinte	409
C.1.1	L'intervalle	409
C.1.2	Classification des événements et causalité	410
C.1.3	Formalisme quadridimensionnel.....	411
C.1.4	Transformations de Lorentz	412
C.1.5	Contraction de l'espace et dilatation du temps	414
C.1.6	Cinématique relativiste.....	415
C.2	Coefficients de Clebsch-Gordan.....	416
C.2.1	Tableau de coefficients de Clebsch-Gordan	418
D	Théorie quantique des champs **	419
D.1	Formalisme lagrangien	420
D.1.1	Théorème de Noether.....	421
D.2	Champ scalaire (spin 0) **	421
D.2.1	Propagateur de Klein-Gordon **	423
D.3	Champ fermionique (spin 1/2) **	425
D.3.1	Équation de Dirac *	425
D.3.2	Lagrangien fermionique **.....	428
D.3.3	Propagateur de Dirac **	430
D.4	Règles et diagrammes de Feynman ***	430
D.5	Calcul des éléments de matrice ***	432
D.5.1	Diffusion $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$	432
D.6	Théories de Yang-Mills **	435
D.6.1	Champs de jauge **	437
D.6.2	Terme cinétique pour A_μ **.....	439
D.6.3	Lagrangien et règles de Feynman **	440

Table des matières

E	Particules et collisionneurs.....	443
	E.1 Propriétés des particules	443
	E.1.1 Particules fondamentales	446
	E.1.2 Hadrons : Les mésons.....	447
	E.1.3 Hadrons : Les baryons	453
	E.2 Collisionneurs.....	458
	Index.....	459