



LICENCE 3 & MASTER
SCIENCES DE LA MATIÈRE
ÉCOLES D'INGÉNIEURS

La physique quantique et ses applications

par Jean-Louis Basdevant

- Cours complet
- Exercices et problèmes d'application
- Tous les corrigés détaillés

Vuibert

Table des matières

Avant propos	1
Partie A. Physique atomique et moléculaire	3
1 Addition des moments cinétiques	5
1.1 Addition de deux moments cinétiques	5
1.1.1 L'opérateur moment cinétique total	5
1.1.2 Base découplée et base couplée	6
1.1.3 Un cas particulier simple : l'addition de deux spins 1/2	7
1.1.4 Addition de deux moments cinétiques quelconques	9
1.1.5 Atomes monoélectroniques, notation des spectroscopistes	13
1.2 Structure fine des atomes monovalents	14
1.3 Raie à 21 cm de l'hydrogène	16
1.3.1 Énergie d'interaction	16
1.3.2 Théorie des perturbations	17
1.3.3 Diagonalisation de \hat{H}_1	18
1.3.4 La raie de 21 cm en astrophysique	19
1.3.5 Exercices	21
1.4 Problème. Les horloges atomiques	22
1.4.1 Le clivage hyperfin du niveau fondamental	22
1.4.2 La fontaine atomique	23
1.4.3 Le système GPS.	25
1.4.4 La dérive des constantes fondamentales	25
1.4.5 Carrigé	25
2 Evolution des systèmes	29
2.1 Perturbations dépendant du temps	29
2.1.1 Probabilité de transition	29
2.1.2 Équations d'évolution	30
2.1.3 Résolution perturbative	30
2.1.4 Solution au premier ordre : l'approximation de Born	31
2.1.5 Cas particuliers	31
2.1.6 Solution perturbative et solution exacte	32
2.2 Désintégration d'un système	33
2.2.1 La radioactivité du ^{57}Fe	33

2.2.2	La règle d'or de Fermi	35
2.2.3	Ordres de grandeur	36
2.2.4	Comportement pour des temps longs	37
2.2.5	Exercices	39
3	Interactions électromagnétiques d'un atome, Lasers	43
3.1	Interaction d'un atome avec une onde lumineuse	43
3.1.1	L'approximation dipolaire électrique	44
3.1.2	Justification du couplage dipolaire électrique	44
3.1.3	Absorption d'énergie par un atome, émission induite	45
3.1.4	Règles de sélection	48
3.1.5	Emission stimulée de bosons et effet laser	49
3.2	Emission spontanée et Emission induite : coefficients d'Einstein	49
3.3	Problème. Lasers moléculaires	52
3.3.1	Préliminaires	53
3.3.2	Lasers moléculaires.	53
3.3.3	Corrigé	55
3.4	Problème. La manipulation d'atomes par laser	58
3.4.1	Équations de Bloch optiques pour un atome au repos	59
3.4.2	La force de pression de radiation	60
3.4.3	Le refroidissement Doppler	60
3.4.4	La force dipolaire	61
3.4.5	Corrigé	62
B.	Noyaux et Particules	68
4	Concepts de base de la physique nucléaire	71
4.1	Etendue de la physique nucléaire	71
4.2	Les noyaux atomiques	73
4.2.1	Généralités	73
4.2.2	Rayons nucléaires	75
4.2.3	Energies de liaison	76
4.3	Réactions nucléaires, lois de conservation	80
4.3.1	Lois de conservation	80
4.3.2	Nombres quantiques additifs.	81
4.3.3	Bilan énergétique	81
4.4	États excités des noyaux	82
4.5	Forces nucléaires	83
4.5.1	Aspects qualitatifs	84
4.5.2	Le potentiel de Yukawa et ses généralisations	85
4.5.3	Origine du potentiel de Yukawa	85
4.6	Indépendance de charge : l'isospin	87
4.6.1	L'indépendance de charge des forces nucléaires	87
4.6.2	L'isospin	87
4.6.3	Origine de la symétrie d'isospin : différence de masse neutron-proton	91
4.7	Noyaux déformés	92

4.8	Exercices	94
4.9	Bibliographie	95
5	Modèles nucléaires, stabilité des noyaux	97
5.1	Modèle du potentiel nucléaire moyen	97
5.2	La formule de masse semi-empirique	102
5.2.1	La goutte liquide de Bohr	102
5.2.2	La formule de masse de Bethe-Weizsäcker	102
5.3	Structure en couches des noyaux : nombres magiques	106
5.3.1	Nombres magiques	106
5.3.2	Couplage spin-orbite et modèle en couches	108
5.3.3	Quelques conséquences de la structure en couches des noyaux	110
5.4	Radioactivité bêta	112
5.5	Répulsion coulombienne et radioactivité α	114
5.5.1	Radioactivité α	115
5.5.2	Modèle de Gamow de l'émission α	116
5.6	Vallée de stabilité et désintégrations	119
5.7	Exercices	120
5.8	Bibliographie	121
6	Exploration de la matière nucléaire	123
6.1	Notion de section efficace	123
6.1.1	Définition de la section efficace	123
6.1.2	Calcul classique	124
6.1.3	Découverte du noyau	126
6.1.4	Généralités sur les sections efficaces	126
6.2	Calcul quantique à l'approximation de Born	127
6.2.1	Probabilités de transition	127
6.2.2	Fonctions tendant vers la distribution de Dirac	128
6.2.3	États asymptotiques; normalisation des états	129
6.2.4	Passage à la limite du continu : section efficace de diffusion	130
6.3	Forme des sections efficaces	132
6.3.1	Forme générale	132
6.3.2	Diffusion de deux particules dans l'approximation de Born	133
6.4	Exploration des systèmes composés	135
6.4.1	Diffusion sur un état lié, facteur de forme	135
6.4.2	Diffusion coulombienne sur une distribution de charges	138
6.4.3	Distribution de charge dans les noyaux	139
6.4.4	Structure interne électrique et magnétique du proton et du neutron	140
6.4.5	Dissociation de l'état lié	143
6.5	Les résonances	143
6.5.1	Section efficace résonante	144
6.5.2	Exemples de sections efficaces résonantes	146
6.6	Exercices	147
6.7	Bibliographie	148

7	Radioactivité, applications	149
7.1	Généralités	149
7.2	Effets des rayonnements ionisants	150
7.2.1	Perte d'énergie d'une particule ionisée passant dans la matière	151
7.2.2	Pouvoir de ralentissement	152
7.3	Les prodiges de la médecine nucléaire	152
7.3.1	La thérapie par ions lourds, tumeurs du cerveau	152
7.3.2	La protonthérapie et les tumeurs oculaires	154
7.3.3	Autres rayonnements	155
7.4	Comment doser la radioactivité?	157
7.5	Applications de la radioactivité dans le domaine civil	159
7.5.1	Conservation du patrimoine artistique et culturel	159
7.5.2	La datation	160
7.6	Bibliographie	161
7.6.1	Radioactivité	161
7.6.2	Effets biologiques des rayonnements ionisants	162
7.7	Exercices	162
7.8	Problème. Perte d'énergie d'une particule ionisée	163
7.8.1	Solution	167
8	Interactions électro-faibles, quarks et leptons	171
8.1	Désintégrations, généralités	171
8.1.1	Largeur naturelle, taux de branchement	171
8.1.2	Calcul des taux de désintégration	172
8.1.3	Espace des phases et désintégration en deux corps	173
8.2	Désintégrations radiatives	173
8.2.1	Coefficients d'Einstein,	174
8.2.2	Radioactivité γ des noyaux	174
8.3	Désintégrations faibles; constante de Fermi	175
8.3.1	Désintégration du neutron	176
8.3.2	Radioactivité bêta des noyaux	178
8.4	Familles de quarks et de leptons	179
8.4.1	Universalité des interactions faibles des leptons	179
8.4.2	Les quarks	179
8.4.3	Quasi-universalité des interactions faibles des quarks	183
8.4.4	L'angle de Cabibbo	184
8.4.5	Matrice de Cabibbo, Kobayashi et Maskawa	184
8.4.6	Unification des interactions fondamentales	185
8.4.7	Conclusion	186
8.5	Exercices	187
8.6	Problème. Interactions des neutrinos dans le Soleil, effet MSW.	189
8.6.1	Oscillations des neutrinos dans le vide	189
8.6.2	Interaction des neutrinos avec la matière	190
8.6.3	Corrigé	191
8.7	Bibliographie	195

9 La fission	197
9.1 Energie nucléaire	197
9.2 Energie de fission	198
9.3 Produits de fission	198
9.4 Le danger de l'énergie différée dans un réacteur	201
9.5 Mécanisme de la fission, barrière de fission	202
9.6 Matériaux fissiles et matériaux fertiles	205
9.7 Réactions en chaîne, principe des réacteurs	205
9.8 Modérateur, ralentissement des neutrons	208
9.8.1 Divergence, masse critique	210
9.9 Les réacteurs nucléaires	212
9.10 Les réacteurs thermiques	214
9.11 Les réacteurs du futur	218
9.11.1 European Pressurized Reactors	218
9.11.2 La filière des réacteurs à neutrons rapides	219
9.12 Le combustible après utilisation	222
9.12.1 Déchargement, désactivation et transport du combustible	222
9.12.2 Le retraitement	223
9.12.3 Le stockage des produits de fission	223
9.13 La génération IV	224
9.14 Bibliographie	225
10 La fusion	227
10.1 Réactions de fusion	227
10.1.1 Barrière coulombienne, énergie « thermonucléaire »	228
10.1.2 Taux de réaction dans un milieu	230
10.1.3 Chauffage et confinement du plasma	232
10.1.4 Une condition nécessaire : le critère de Lawson	233
10.2 La fusion par confinement magnétique	234
10.3 Confinement Inertiel par Laser	237
10.4 Bibliographie	240
Partie C. Semiconducteurs	241
11 Structure de bandes des semiconducteurs	243
11.1 Introduction	243
11.2 Electron dans un potentiel périodique simple.	244
11.2.1 Particule dans un potentiel périodique	244
11.2.2 Bandes d'énergie	247
11.2.3 Propagation de l'électron dans le cristal	249
11.2.4 Réseau à trois dimensions	251
11.2.5 Effet d'une impureté dans un cristal	252
11.3 Etats quantiques de l'électron dans un solide cristallin	256
11.3.1 Formation de bandes d'énergie	256
11.3.2 Approximation des électrons indépendants	257
11.4 Métaux, isolants, semiconducteurs	260

11.5	Structure de bandes des semiconducteurs	262
11.6	Masses effectives	265
11.7	Exercices	268
11.8	Problème. Chaîne périodique et oscillations de Bloch	268
11.8.1	Le problème à deux sites	269
11.8.2	Les états stationnaires de la chaîne périodique infinie	269
11.8.3	Évolution sur la chaîne infinie	270
11.8.4	Les oscillations de Bloch	271
11.8.5	Corrigé	272
12	Semiconducteurs intrinsèques et extrinsèques	279
12.1	Introduction	279
12.2	Electrons et trous libres	279
12.3	Semiconducteurs intrinsèques	281
12.3.1	Cas non dégénéré	281
12.3.2	Cas dégénéré	283
12.4	Semiconducteurs extrinsèques	284
12.4.1	Donneurs et accepteurs	284
12.4.2	Bande d'impuretés	288
12.4.3	Densités de porteurs libres à l'équilibre thermodynamique	288
12.5	Exercices	292
13	Phénomènes de transport, jonction $p - n$	295
13.1	Introduction	295
13.2	Modèle de Drude	296
13.2.1	Conduction électrique	296
13.2.2	Diffusion des porteurs	297
13.3	Equation de Boltzmann	299
13.4	Mobilité dans les semiconducteurs	300
13.5	La jonction $p - n$	301
13.5.1	Potentiel électrostatique dans un semiconducteur inhomogène	301
13.5.2	La jonction $p - n$ à l'équilibre thermodynamique	301
13.5.3	La jonction $p - n$ hors d'équilibre	304
13.6	Exercices	306
14	Hétérostructures	309
14.1	Hétérostructures semiconductrices	309
14.1.1	Puits quantique	311
14.1.2	Hétérojonction à dopage modulé	317
14.1.3	Autres hétérostructures semiconductrices	322
14.2	Structures métal-isolant-semiconducteur	323
14.2.1	Structure MIS sans tension appliquée	323
14.2.2	Structure MIS soumise à une tension appliquée	328
14.2.3	Niveaux d'énergie électronique	331
14.2.4	Structure métal-semiconducteur	333
14.3	Problème. Le double puits quantique asymétrique	335
14.3.1	Structure des niveaux d'énergie en absence d'effet tunnel	335

14.3.2	Prise en compte de l'effet tunnel en physique ondulatoire	336
14.3.3	Champ électrique externe et mise à résonance des niveaux	337
14.3.4	Oscillation dans le double puits et émission de rayonnement	338
14.3.5	Corrigé	339
15	Propriétés optiques	345
15.1	Introduction	345
15.2	Conservation du vecteur d'onde et de l'énergie	346
15.3	Absorption, émission stimulée et émission spontanée	348
15.4	Emission stimulée et gain optique	352
15.5	Puits quantiques semiconducteurs	353
15.6	Exercices	356
15.7	Bibliographie	357
15.8	Problème. Etude d'une boîte quantique	358
15.8.1	Rappel : l'oscillateur harmonique uni-dimensionnel	358
15.8.2	La boîte quantique	359
15.8.3	Boîte quantique dans un champ magnétique	360
15.8.4	Etude expérimentale	361
15.8.5	Anisotropie d'une boîte quantique	362
15.8.6	Corrigé	363
16	Appendices	373
16.1	A. Théorème de Bloch, Réseau réciproque, Zone de Brillouin	373
16.2	B. Masse effective	377
16.3	C. Fonction de Fermi-Dirac; Densité d'états	379
16.4	D. La jonction $p - n$	381
16.5	E. Recombinaison et longueur de diffusion	394
16.6	F. Transistors à effet de champ : MOSFET, TEGFET	396
17	Solutions des exercices	399
	Index	409