



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
<b>Partie A. Physique atomique et moléculaire</b>	<b>3</b>
<b>1 Addition des moments cinétiques</b>	<b>5</b>
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
<b>2 Evolution des systèmes</b>	<b>29</b>
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 $^{57}\text{Fe}$	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
<b>3</b>	<b>Interactions électromagnétiques d'un atome, Lasers</b>	<b>43</b>
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	<b>Problème. Lasers moléculaires</b> . . . . .	<b>52</b>
3.3.1	Préliminaires . . . . .	53
3.3.2	Lasers moléculaires. . . . .	53
3.3.3	Corrigé . . . . .	55
3.4	<b>Problème. La manipulation d'atomes par laser</b> . . . . .	<b>58</b>
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>B.</b>	<b>Noyaux et Particules</b>	<b>68</b>
<b>4</b>	<b>Concepts de base de la physique nucléaire</b>	<b>71</b>
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
<b>5</b>	<b>Modèles nucléaires, stabilité des noyaux</b>	<b>97</b>
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 $\alpha$	114
5.5.1	Radioactivité $\alpha$	115
5.5.2	Modèle de Gamow de l'émission $\alpha$	116
5.6	Vallée de stabilité et désintégrations	119
5.7	Exercices	120
5.8	Bibliographie	121
<b>6</b>	<b>Exploration de la matière nucléaire</b>	<b>123</b>
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

<b>7</b>	<b>Radioactivité, applications</b>	<b>149</b>
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	<b>Problème. Perte d'énergie d'une particule ionisée</b>	<b>163</b>
7.8.1	Solution	167
<b>8</b>	<b>Interactions électro-faibles, quarks et leptons</b>	<b>171</b>
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 $\gamma$ 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	<b>Problème. Interactions des neutrinos dans le Soleil, effet MSW.</b>	<b>189</b>
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

<b>9 La fission</b>	<b>197</b>
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
<b>10 La fusion</b>	<b>227</b>
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
<b>Partie C. Semiconducteurs</b>	<b>241</b>
<b>11 Structure de bandes des semiconducteurs</b>	<b>243</b>
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	<b>Problème. Chaîne périodique et oscillations de Bloch</b> . . . . .	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
<b>12</b>	<b>Semiconducteurs intrinsèques et extrinsèques</b> . . . . .	<b>279</b>
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
<b>13</b>	<b>Phénomènes de transport, jonction <math>p - n</math></b> . . . . .	<b>295</b>
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
<b>14</b>	<b>Hétérostructures</b> . . . . .	<b>309</b>
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	<b>Problème. Le double puits quantique asymétrique</b> . . . . .	<b>335</b>
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
<b>15</b>	<b>Propriétés optiques</b> . . . . .	<b>345</b>
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	<b>Problème. Etude d'une boîte quantique</b> . . . . .	<b>358</b>
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
<b>16</b>	<b>Appendices</b> . . . . .	<b>373</b>
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
<b>17</b>	<b>Solutions des exercices</b> . . . . .	<b>399</b>
	<b>Index</b> . . . . .	<b>409</b>