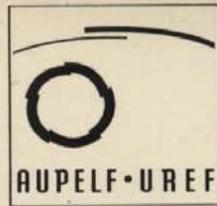
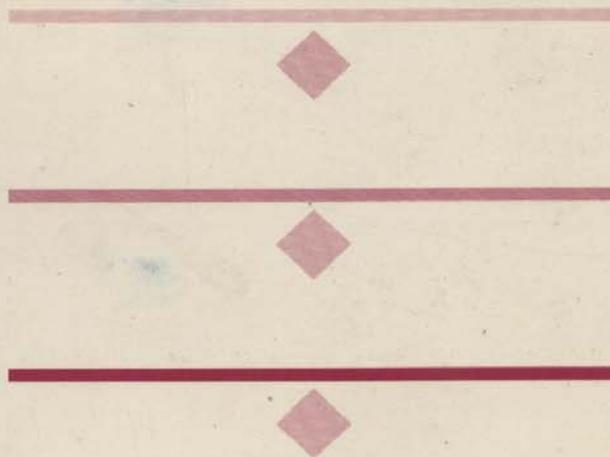


UNIVERSITÉS FRANCOPHONES



# PHYSIQUE QUANTIQUE

J.-L. Basdevant J. Dalibard



ELLIPSES  
AUPELF/UREF

## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Pages</i>
<b>AVANT PROPOS</b> .....	11
<b>CHAPITRE I – PHÉNOMÈNES QUANTIQUES</b> .....	21
1 - Diffraction des rayons X et des électrons .....	23
2 - Expérience de Stern et Gerlach .....	33
3 - Désintégration d'un système instable .....	37
4 - Résumé de quelques idées importantes .....	40
Table de valeurs numériques .....	42
<b>CHAPITRE II – MÉCANIQUE ONDULATOIRE I : FONCTION D'ONDE, ÉQUATION DE SCHRÖDINGER</b> .....	43
<i>A - Description physique d'une particule : Fonction d'onde</i> .....	45
1 - Fonction d'onde .....	45
2 - Mesure de la position de la particule .....	46
3 - Ondes de de Broglie .....	46
4 - Paquets d'ondes (particules libres) .....	47
5 - Loi de probabilité des impulsions, relations d'incertitude de Heisenberg .....	50
6 - Exemple : le paquet d'ondes Gaussien .....	52
7 - Calcul des phénomènes d'interférences et de diffraction .....	53
<i>B - Équation du mouvement ; Équation de Schrödinger</i> .....	54
1 - Équation de Schrödinger .....	54
2 - Paquet d'onde pour une particule dans un potentiel : relations d'incertitude .....	54
3 - Premières applications : Franchissement de barrières de potentiel .....	56
<b>CHAPITRE III – MÉCANIQUE ONDULATOIRE II. GRANDEURS PHYSIQUES ; MESURE</b> .....	63
1 - Considérations générales .....	63
2 - Position et impulsion .....	66
3 - Grandeurs physiques, observables et opérateurs .....	67
4 - Autres observables ; principe de correspondance .....	68
5 - Commutation des observables .....	69
6 - Fonctions propres et valeurs propres d'une observable .....	69
7 - Fonctions propres de l'énergie - États stationnaires .....	70
8 - Courant de probabilité .....	72
9 - Problème de la mesure - Cohérence de la mécanique quantique .....	73
Résumé des Chapitres II et III .....	76

<b>TRE IV – QUANTIFICATION DES ÉNERGIES DE QUELQUES SYSTÈMES SIMPLES</b> .....	79
1 - Généralités .....	79
2 - Oscillateur harmonique à une dimension .....	81
3 - Puits de potentiel carré .....	87
4 - Particule dans une boîte .....	90
5 - Puits double - Modèle de la molécule d'ammoniac .....	93
6 - Généralisations du puits double - Ordres de grandeur .....	98
<b>TRE V – ESPACE DE HILBERT, FORMALISME DE DIRAC - POSTULATS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE</b> .....	103
1 - Espace de Hilbert .....	104
2 - Représentations matricielles .....	108
3 - Résultats possibles de la mesure d'une grandeur .....	110
4 - Postulats de la Mécanique Quantique .....	111
5 - Représentations dans les bases particulières - Fonction d'onde .....	116
6 - Structure de l'espace de Hilbert - Produits tensoriels d'espaces .....	117
<b>TRE VI – SYSTÈMES À DEUX ÉTATS PRINCIPE DU MASER À AMMONIAC</b> .....	119
1 - Espace de Hilbert à deux dimensions .....	119
2 - Système à deux niveaux d'énergie : retour sur le modèle de molécule d'ammoniac .....	120
3 - Molécule $NH_3$ dans un champ électrique .....	123
4 - Champ oscillant .....	127
5 - Principe et applications du Maser .....	130
6 - Remarques finales .....	131
<b>TRE VII – THEORIE DES BANDES ; CONDUCTIBILITE DES CRISTAUX</b> .....	135
1 - Electron dans un potentiel périodique .....	136
2 - Bandes d'énergie ; états stationnaires .....	139
3 - Propagation de l'électron dans le cristal .....	140
4 - Réseau à trois dimensions .....	142
5 - Cristal de dimension finie .....	143
6 - Effet d'une impureté dans un cristal .....	144
7 - Isolants ; Semi-conducteurs ; Conducteurs .....	147
<b>TRE VIII – COMMUTATION DES OBSERVABLES</b> .....	155
1 - Relations de commutation .....	156
2 - Relations d'incertitude .....	156
3 - Évolution dans le temps de la valeur moyenne d'une observable : Théorème d'Ehrenfest .....	157
4 - Observables qui commutent .....	160
5 - Résolution algébrique de l'oscillateur harmonique, Opérateurs de création et d'annihilation .....	162
<b>TRE IX – L'EXPÉRIENCE DE STERN ET GERLACH</b> .....	167

5 - Description complète de l'atome (variables d'espace et de moment magnétique) .....	173
6 - Évolution de l'atome placé dans un champ magnétique .....	175
7 - Conclusion .....	179
<b>CHAPITRE X – MÉTHODES D'APPROXIMATION</b> .....	181
1 - Méthode des perturbations .....	181
2 - Méthode variationnelle .....	185
<b>CHAPITRE XI – LE MOMENT CINÉTIQUE EN MÉCANIQUE QUANTIQUE</b> .....	191
1 - Moment cinétique orbital d'une particule, relation de commutation .....	192
2 - Valeurs propres d'une observable $\hat{J}$ telle que $\hat{J} \wedge \hat{J} = i \hbar \hat{J}$ .....	192
3 - Valeurs propres et fonctions propres du moment cinétique orbital .....	197
4 - Relation fondamentale entre moment cinétique et moment magnétique d'un système quantique .....	200
Formulaire .....	204
<b>CHAPITRE XII – PREMIÈRE DESCRIPTION DES ATOMES</b> .....	207
1 - Système à deux corps - Mouvement relatif .....	208
2 - Électron dans un potentiel central - Nombres quantiques - Dégénérescences .....	209
3 - L'atome d'hydrogène .....	213
4 - Atomes hydrogénoïdes .....	220
5 - Atomes muoniques .....	220
6 - Spectre des alcalins .....	222
Formulaire .....	225
<b>CHAPITRE XIII – FORMALISME DU SPIN 1/2 - RÉSONANCE MAGNÉTIQUE</b> .....	227
1 - Espace de Hilbert du spin 1/2 .....	228
2 - Description complète d'une particule de spin 1/2 .....	230
3 - Moment magnétique de spin .....	231
4 - Cas particulier : Variables d'espace et de spin non corrélées .....	234
5 - Résonance magnétique .....	234
<b>CHAPITRE XIV – LAGRANGIEN ET HAMILTONIEN, FORCE DE LORENTZ EN MÉCANIQUE QUANTIQUE</b> .....	243
1 - Formalisme Lagrangien, Principe de moindre action en Mécanique Classique .....	244
2 - Formalisme canonique de Hamilton et Jacobi .....	246
3 - Lien entre Mécanique Analytique et Mécanique Quantique - Règles de Quantification .....	248
4 - Particule chargée dans un champ électromagnétique (cas classique) .....	249
5 - Force de Lorentz en Mécanique Quantique .....	250
6 - Hamiltonien d'une particule de spin 1/2 dans un champ électromagnétique .....	252

<b>CHAPITRE XV – ADDITION DES MOMENTS CINÉTIQUES, STRUCTURE FINE ET HYPERFINE DES RAIES ATOMIQUES</b> .....	253
1 - Addition des moments cinétiques : moment cinétique total .....	253
2 - Structure fine des atomes monovalents .....	260
3 - Structure hyperfine ; Raie de 21 cm de l'hydrogène .....	262
<b>CHAPITRE XVI – SYSTÈMES DE PARTICULES IDENTIQUES PRINCIPE DE PAULI</b> .....	269
1 - L'indiscernabilité de deux particules identiques .....	270
2 - Système de 2 particules ; Opérateur d'échange .....	271
3 - Principe de Pauli .....	274
4 - Atomes complexes et couches atomiques .....	280
<b>CHAPITRE XVII – PHYSIQUE QUALITATIVE : ORDRE DE GRANDEUR DE QUELQUES PHÉNOMÈNES MICROSCOPIQUES ET MACROSCOPIQUES</b> .....	287
1 - Particule confinée : énergie de l'état fondamental .....	288
2 - Propriétés des matériaux ; Retour sur les objets célestes .....	291
3 - Catastrophe gravitationnelle : naines blanches, étoiles à neutrons .....	294
<b>CHAPITRE XVIII – ÉVOLUTION DES SYSTÈMES</b> .....	297
1 - Probabilité de transition d'un système - Perturbations dépendant du temps .....	298
2 - Interaction Électromagnétique des Atomes .....	303
3 - Perturbation constante ; désintégration d'un système : durée de vie, largeur .....	311
4 - Relation d'incertitude temps-énergie .....	316
<b>CHAPITRE XIX – COLLISIONS, SECTIONS EFFICACES</b> .....	319
1 - Notion de section efficace .....	319
2 - Calcul quantique : l'amplitude de diffusion .....	322
3 - Exploration des systèmes composés .....	327
<b>CHAPITRE XX – INVARIANCES, LOIS DE CONSERVATION</b> .....	335
1 - Opérateurs unitaires ; Transformations unitaires .....	336
2 - Impulsion et translations .....	337
3 - Moment cinétique et rotations .....	338
4 - Evolution dans le temps ; Lois de conservation .....	339
5 - Symétries du Hamiltonien .....	344
<b>CHAPITRE XXI – MECANIQUE QUANTIQUE ET ASTROPHYSIQUE</b> .....	347
1 - Masse minimum d'une étoile .....	351
2 - Les masers cosmiques .....	352
3 - La raie à 21 cm .....	356

**CHAPITRE XXII - HISTORIQUE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE** ..... 367

1 - L'origine des concepts quantiques .....	367
2 - Le spectre atomique .....	371
3 - Le spin .....	373
4 - La mécanique quantique matricielle .....	375
5 - La mécanique ondulatoire .....	377
6 - L'interprétation probabiliste .....	379
7 - Quelques repères dans l'histoire récente .....	379

**SOLUTIONS DES EXERCICES** ..... 383

**INDEX** ..... 395

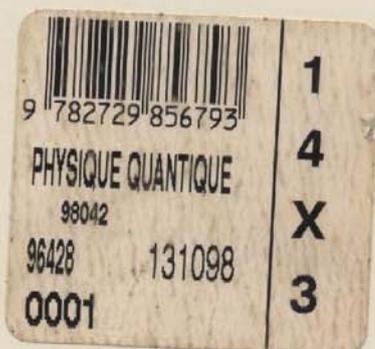
La collection *Universités francophones* créée en 1988 à l'initiative de l'UREF, propose des ouvrages de référence, des manuels spécialisés et des actes de colloques scientifiques aux étudiants de 2e et 3e cycle universitaire ainsi qu'aux chercheurs francophones et se compose de titres originaux paraissant régulièrement.

Leurs auteurs appartiennent conjointement aux pays du Sud et du Nord et rendent compte des résultats de recherches et des études récentes entreprises en français à travers le monde. Ils permettent à cette collection pluri-disciplinaire de couvrir progressivement l'ensemble des enseignements universitaires en français.

Enfin, la vente des ouvrages à un prix préférentiel destinés aux pays du Sud tient compte des exigences économiques nationales et assure une diffusion adaptée aux pays francophones. Ainsi la collection *Universités francophones* constitue une bibliothèque de référence comprenant des ouvrages universitaires répondant aux besoins des étudiants de langue française.

---

*Dans les sciences de l'ingénieur, dans la technologie moderne, comme dans la physique fondamentale, la physique quantique constitue la discipline de base. Elle est donc le fondement de tout enseignement supérieur de physique. Cet ouvrage a pour origine un cours qui a été enseigné depuis une quinzaine d'années à l'École Polytechnique, et qui est utilisé par les étudiants d'autres écoles d'ingénieurs ou de maîtrises des universités.*



Prix : 230 F • Prix préférentiel UREF : 115 F ou 60 F (selon pays)

ISSN 0993-3948 AUPELF/UREF  
ISBN 2-7298-5679-X ELLIPSES

Diffusion France et pays du Maghreb : Ellipses  
Diffusion tous pays (y compris Maghreb) sauf France et Canada :  
Edicef-Hachette diffusion internationale  
Diffusion Canada : DPLU



59.4792.4