

SCIENCES SUP

Cours et exercices corrigés

Master • Écoles d'ingénieurs

MÉCANIQUE QUANTIQUE

Atomes et noyaux
Applications technologiques

3^e édition

*Jean Hladik
Michel Chrysos
Pierre-Emmanuel Hladik
Lorenzo Ugo Ancarani*

DUNOD

Table des matières

AVANT-PROPOS

IX

CHAPITRE 1 • SOURCES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

1.1 Fonction d'onde

1

1.2 Contenu physique des fonctions d'onde

1

1.3 Particule dans un état stationnaire

7

1.4 Effet tunnel

12

EXERCICES

16

19

CHAPITRE 2 • OPÉRATEURS LINÉAIRES

2.1 Types d'opérateurs linéaires

27

2.2 Vecteurs et valeurs propres

27

2.3 Matrice d'un opérateur

34

2.4 Espaces de Hilbert

37

EXERCICES

42

46

CHAPITRE 3 • FORMALISME DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

51

3.1 Réalisations des fonctions d'onde

51

3.2 Espace des états quantiques

55

3.3	Système complet d'observables qui commutent	63
3.4	Postulats de la mécanique quantique	66
3.5	Propriétés des observables	71
	EXERCICES	75
	CHAPITRE 4 • OSCILLATEUR HARMONIQUE	79
4.1	Approximation harmonique	79
4.2	Niveaux d'énergie	81
4.3	Vecteurs d'état	85
4.4	Fonction d'onde	86
4.5	Système de deux particules en interaction	88
4.6	Vibrations d'une molécule diatomique	90
	EXERCICES	94
	CHAPITRE 5 • LES GROUPES ET LEURS REPRÉSENTATIONS	103
5.1	Définition d'un groupe	103
5.2	Représentation d'un groupe	106
5.3	Représentation en mécanique quantique	111
5.4	Groupe des rotations dans un plan	113
5.5	Groupe des rotations spatiales	117
	EXERCICES	121
	CHAPITRE 6 • MOMENT CINÉTIQUE	128
6.1	Moment cinétique orbital	128
6.2	Opérateurs de moment cinétique	131
6.3	Fonctions propres du moment cinétique orbital	139
6.4	Rotation d'une molécule diatomique	141
6.5	Composition des moments cinétiques	144
	EXERCICES	148
	CHAPITRE 7 • ATOME D'HYDROGÈNE	163
7.1	Historique	163
7.2	Champ central symétrique	165

7.3	Étude en coordonnées sphériques	168
7.4	Étude en coordonnées paraboliques	177
	EXERCICES	179
	CHAPITRE 8 • MÉTHODES D'APPROXIMATION	185
8.1	Perturbations indépendantes du temps	185
8.2	Méthode des variations	190
	EXERCICES	192
	CHAPITRE 9 • SPINEURS	203
9.1	Groupe SU(2)	203
9.2	Matrices de rotation	206
9.3	Les spineurs de l'espace tridimensionnel	208
9.4	Représentation spinorielle de SO(3)	211
	EXERCICES	214
	CHAPITRE 10 • SPIN	220
10.1	Mise en évidence expérimentale	220
10.2	Spin de l'électron	224
10.3	Spin des particules quantiques	232
10.4	Équation de Pauli	237
	EXERCICES	242
	CHAPITRE 11 • STRUCTURE FINE DE L'ATOME D'HYDROGÈNE	253
11.1	Équation de Dirac	254
11.2	Structure fine du niveau $n = 2$	260
11.3	Structure fine des niveaux d'énergie	263
11.4	Structure des transitions	265
11.5	Effet Stark	266
	EXERCICES	268
	CHAPITRE 12 • IDENTITÉ DES PARTICULES	274
12.1	Particules indiscernables	274

12.2 Construction des vecteurs d'états physiques	279
12.3 Atome d'hélium	282
EXERCICES	287
CHAPITRE 13 • ATOMES	291
13.1 Approximation du champ central	291
13.2 Structure fine des niveaux d'énergie : couplage $L - S$	296
13.3 Détermination des termes spectraux	300
13.4 Structure fine des niveaux d'énergie : couplage $j - j$	304
EXERCICES	305
CHAPITRE 14 • ATOME D'HÉLIUM	313
14.1 Hamiltonien, spectre et énergies	314
14.2 Propriétés de l'hamiltonien	317
14.3 Approximation d'Hartree-Fock	323
14.4 État fondamental	327
14.5 États excités	335
14.6 Comparaison avec l'expérience	337
14.7 Propriétés et applications	338
EXERCICES	341
CHAPITRE 15 • TRANSITION SOUS L'ACTION D'UNE PERTURBATION	351
15.1 Perturbation dépendant du temps	351
15.2 Perturbation sinusoïdale	355
15.3 Transitions dipolaires électriques d'un atome	360
15.4 Masers et lasers	365
EXERCICES	369
CHAPITRE 16 • NOYAU ATOMIQUE ET STRUCTURE HYPERFINE DES NIVEAUX ÉLECTRONIQUES	377
16.1 Caractéristiques du noyau atomique	377
16.2 Modèle en couches	381
16.3 Structure hyperfine des niveaux atomiques	386
EXERCICES	396

CHAPITRE 17 • ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE	402
17.1 Énergie de couplage	402
17.2 Effet Zeeman de structure fine de l'atome d'hydrogène	405
17.3 Effet Zeeman de structure hyperfine de l'atome d'hydrogène	411
17.4 Résonance magnétique	415
EXERCICES	419
ANNEXE A • UNITÉS ET CONSTANTES PHYSIQUES	424
A.1 Notation	424
A.2 Unités en dehors du Système International	424
A.3 Constantes physiques fondamentales	425
A.4 Constantes utilisées	426
ANNEXE B • COMPLÉMENTS MATHÉMATIQUES	427
B.1 Polynômes d'Hermite	427
B.2 Polynômes de Laguerre	429
B.3 Fonctions de Legendre associées	431
B.4 Harmoniques sphériques	433
B.5 Fonctions hypergéométriques	436
BIBLIOGRAPHIE	439
INDEX	441