



Greiner

MÉCANIQUE QUANTIQUE

UNE INTRODUCTION

Traduit et adapté par Francis Jundt
Université Louis Pasteur, Strasbourg

Avant-propos de Hubert Curien



Springer

Table des matières

1. La quantification de grandeurs physiques	1
1.1 Quanta de lumière	1
1.2 L'effet photoélectrique	1
1.3 L'effet Compton	3
1.4 Le principe de combinaison de Ritz	4
1.5 L'expérience de Franck–Hertz	5
1.6 L'expérience de Stern et Gerlach	5
1.7 Notes biographiques	6
2. Les lois du rayonnement	11
2.1 Aperçu du rayonnement des corps	11
2.2 Quel est le rayonnement dans une cavité?	12
2.3 La loi de rayonnement de Rayleigh–Jeans : Les modes propres électromagnétiques d'une cavité	16
2.4 Loi de Planck	18
2.5 Notes biographiques	29
3. Aspects ondulatoires de la matière	31
3.1 Ondes de de Broglie	31
3.2 Diffraction des ondes de matière	36
3.3 L'interprétation statistique des ondes de matière	40
3.4 Valeurs moyennes en mécanique quantique	46
3.5 Trois opérateurs de la mécanique quantique	49
3.6 Le principe de superposition en mécanique quantique	51
3.7 Le principe d'incertitude de Heisenberg	54
3.8 Notes biographiques	68
4. Bases mathématiques de la mécanique quantique	71
4.1 Propriétés des opérateurs	71
4.2 Combinaison de deux opérateurs	72
4.3 Notations de Dirac : Bra et Ket	73
4.4 Valeurs propres et fonctions propres	74
4.5 Mesure simultanée d'observables différentes	81
4.6 Opérateurs position et quantité de mouvement	83
4.7 Relations d'incertitude de Heisenberg pour des observables quelconques	84

4.8	Opérateur moment cinétique	86
4.9	Énergie cinétique	90
4.10	Énergie totale	90
4.11	Notes biographiques	108
5.	Complément mathématique	111
5.1	Différentielles propres et la normalisation des fonctions propres pour des spectres continus	111
5.2	Développement en fonctions propres	114
6.	L'équation de Schrödinger	123
6.1	Conservation du nombre de particules en mécanique quantique	150
6.2	États stationnaires	152
6.3	Propriétés des états stationnaires	153
6.4	Notes biographiques	160
7.	L'oscillateur harmonique	163
7.1	La solution de l'équation de l'oscillateur	169
7.2	La description de l'oscillateur harmonique par les opérateurs de création et d'annihilation	179
7.3	Propriétés des opérateurs \hat{a} et \hat{a}^+	180
7.4	Représentation du hamiltonien de l'oscillateur en termes de \hat{a} et \hat{a}^+	181
7.5	Interprétation de \hat{a} et \hat{a}^+	182
7.6	Notes biographiques	188
8.	Transition de la mécanique classique à la mécanique quantique ..	191
8.1	Déplacement des valeurs moyennes	191
8.2	Théorème d'Ehrenfest	192
8.3	Constantes du mouvement, lois de conservation	193
8.4	Quantification en coordonnées curvilignes	196
8.5	Notes biographiques	209
9.	Particules chargées dans des champs magnétiques	211
9.1	Couplage au champ électromagnétique	211
9.2	L'atome d'hydrogène	223
9.3	Densités électroniques à trois dimensions	229
9.4	Le spectre des atomes d'hydrogène	232
9.5	Courants dans l'atome d'hydrogène	234
9.6	Le moment magnétique	235
9.7	Atomes hydrogénoïdes	236
9.8	Notes biographiques	250
10.	Les fondements mathématiques de la mécanique quantique II ...	253
10.1	Représentations position, impulsion et énergie	253
10.2	Représentation d'opérateurs	257
10.3	Le problème des valeurs propres	266

10.4	Transformations unitaires	268
10.5	La matrice S	270
10.6	L'équation de Schrödinger sous forme matricielle	272
10.7	Le point de vue de Schrödinger	275
10.8	Le point de vue de Heisenberg	275
10.9	Image d'interaction	276
10.10	Notes biographiques	277
11.	Théorie des perturbations	279
11.1	Théorie des perturbations stationnaires	279
11.2	Dégénérescence	283
11.3	Méthode variationnelle de Ritz	298
11.4	Théorie des perturbations dépendante du temps	301
11.5	Perturbation constante sur un intervalle de temps	306
11.6	Transitions entre états du continuum	308
11.7	Notes biographiques	333
12.	Spin	335
12.1	Dédoublage de raies spectrales	336
12.2	L'expérience d'Einstein-de Haas	338
12.3	Description mathématique du spin	339
12.4	Fonctions d'onde avec spin	342
12.5	L'équation de Pauli	345
12.6	Notes biographiques	358
13.	Une équation d'onde non-relativiste avec spin	361
13.1	La linéarisation de l'équation de Schrödinger	361
13.2	Particules dans un champ externe et le moment magnétique	369
13.3	Notes biographiques	372
14.	Aspects élémentaires du problème à plusieurs corps	373
14.1	Conservation de l'impulsion totale d'un système de particules	377
14.2	Mouvement du centre de masse d'un système de particules en mécanique quantique	379
14.3	Conservation du moment angulaire total dans un système à plusieurs corps	383
14.4	Petites oscillations dans un système à plusieurs particules	396
14.5	Notes biographiques	407
15.	Particules identiques	409
15.1	Le principe de Pauli	411
15.2	Dégénérescence d'échange	411
15.3	Le déterminant de Slater	413
15.4	Notes biographiques	427

16. Le cadre formel de la mécanique quantique	429
16.1 Les bases mathématiques de la mécanique quantique – espace de Hilbert	429
16.2 Opérateurs dans l'espace de Hilbert	432
16.3 Valeurs propres et vecteurs propres	433
16.4 Opérateurs avec des spectres continus ou discrets-continus (mixtes)	437
16.5 Fonctions d'opérateur	439
16.6 Transformations unitaires	442
16.7 L'espace de produit direct	443
16.8 Les axiomes de la mécanique quantique	444
16.9 Particules libres	447
16.10 Résumé de la théorie des perturbations	461
17. Problèmes conceptuels et philosophiques de la mécanique quantique	465
17.1 Déterminisme	465
17.2 Localité	466
17.3 Théories des variables cachées	468
17.4 Théorème de Bell	471
17.5 Théorie de la mesure	474
17.6 Le chat de Schrödinger	478
17.7 Théories subjectives	478
17.8 Mesures classiques	479
17.9 L'interprétation de Copenhague	480
17.10 Enregistrement indélébile	480
17.11 L'Univers dédoublé	483
17.12 Le problème de la réalité	484
Index	487

Table des exemples et des exercices

2.1	Rayonnement dans une cavité	14
2.2	Établissement de la loi du rayonnement selon la méthode de Planck	21
2.3	Rayonnement du corps noir	23
2.4	Loi de déplacement de Wien	26
2.5	Énergies émises par un corps noir	27
2.6	Rayonnement du corps noir cosmique	28
3.1	Images de diffraction générées par des rayons X monochromatiques	38
3.2	Diffusion d'électrons et de neutrons	39
3.3	Valeur moyenne de l'énergie cinétique	50
3.4	Superposition d'ondes planes, probabilité d'impulsion	52
3.5	Mesure de la position à l'aide d'une fente	57
3.6	Mesure de la position en enfermant la particule dans une boîte	58
3.7	Mesure de la position avec un microscope	59
3.8	Mesure de la quantité de mouvement avec un réseau de diffraction	59
3.9	Complément physique : le pouvoir séparateur d'un réseau plan	60
3.10	Propriétés d'un paquet d'ondes gaussien	63
3.11	Normalisation des fonctions d'onde	65
3.12	Melons dans le monde des quanta (Quantalie)	67
4.1	Hermiticité de l'opérateur quantité de mouvement	79
4.2	Le commutateur des opérateurs position et impulsion	79
4.3	Règles de calcul pour les commutateurs	80
4.4	Fonctions propres de l'impulsion	81
4.5	Inégalité d'opérateurs	91
4.6	Différences entre les relations d'incertitude	92
4.7	Développement d'un opérateur	92
4.8	Polynômes de Legendre	94
4.9	Complément mathématique : harmoniques sphériques	102
4.10	Théorème d'addition des harmoniques sphériques	106
5.1	Normalisation des fonctions propres de l'opérateur quantité de mouvement \hat{p}_x	115
5.2	Une représentation de la fonction δ	117
5.3	Valeur principale de Cauchy	119
5.4	La fonction δ comme limite d'une courbe en cloche	120

Table des exemples et des exercices

6.1	Une particule dans un puits de potentiel infini	125
6.2	Une particule dans un puits de potentiel fini à une dimension	129
6.3	Le potentiel delta	131
6.4	Fonctions de distribution en statistique quantique	133
6.5	Le gaz de Fermi	141
6.6	Un gaz parfait classique	143
6.7	Une particule dans un potentiel à deux centres	144
6.8	Densité de courant d'une onde sphérique	154
6.9	Une particule dans un potentiel périodique	155
7.1	Complément mathématique : fonctions hypergéométriques	165
7.2	Complément mathématique : polynômes d'Hermite	171
7.3	L'oscillateur harmonique à trois dimensions	183
8.1	Relations de commutation	194
8.2	Théorème du viriel	195
8.3	L'opérateur énergie cinétique en coordonnées sphériques	201
8.4	Rappel de quelques relations utiles de la mécanique classique : crochets de Lagrange et de Poisson	202
9.1	Les équations de Hamilton dans un champ électromagnétique	215
9.2	Le lagrangien, le hamiltonien d'une particule chargée	218
9.3	États de Landau	220
9.4	La partie angulaire de la fonction d'onde de l'hydrogène	238
9.5	Spectre d'une molécule diatomique	242
9.6	Coordonnées de Jacobi	246
10.1	Distribution en impulsion du niveau fondamental de l'hydrogène	256
10.2	Représentation impulsion de l'opérateur position	262
10.3	L'oscillateur harmonique dans l'espace des impulsions	263
11.1	L'effet Stark	285
11.2	Comparaison d'un résultat de la théorie des perturbations avec un résultat exact	289
11.3	Croisement de niveaux de deux états	290
11.4	Perturbation harmonique d'un oscillateur harmonique	294
11.5	Oscillateur harmonique avec une perturbation linéaire	296
11.6	Application de la méthode variationnelle de Ritz : l'oscillateur harmonique	300
11.7	Probabilité de transition par unité de temps – règle d'or de Fermi	316
11.8	Diffusion élastique d'un électron par un noyau atomique	318
11.9	Limite du transfert de petites impulsions	326
11.10	Propriétés de la fonction $f(t, \omega)$	327
11.11	Théorie élémentaire de la constante diélectrique	329
12.1	Précession du spin dans un champ magnétique uniforme	348
12.2	L'expérience de Rabi (résonance de spin)	350
12.3	L'effet Zeeman normal (champs magnétiques faibles)	353

13.1	Les matrices de Pauli	366
13.2	Règle de calcul pour les matrices de Pauli	366
13.3	Spineurs satisfaisant à l'équation de Schrödinger	368
14.1	L'effet Zeeman anormal	391
14.2	Mouvement du centre de masse dans les atomes	393
14.3	Deux particules dans un champ externe	403
15.1	L'atome d'hélium	413
15.2	La molécule d'hydrogène	417
15.3	L'interaction de van der Waals	422
16.1	Trace d'un opérateur	436
16.2	Une preuve	437
16.3	Fonction d'opérateur	439
16.4	Méthodes de la série de puissances et de la valeur propre	440
16.5	Opérateur position dans l'espace des moments	449
16.6	Calcul de l'intégrale du propagateur	454
16.7	L'oscillateur à une dimension dans différentes représentations	455

Greiner

MÉCANIQUE QUANTIQUE · UNE INTRODUCTION

L'ouvrage *Mécanique Quantique - Une Introduction* jette les bases du cours de mécanique quantique et de la théorie des champs. En partant du rayonnement du corps noir, de l'effet photoélectrique et de la dualité onde-corpuscule, l'auteur poursuit son exposé par les relations d'incertitude de Heisenberg, le spin et les systèmes à plusieurs corps. Il inclut des applications à l'étude de l'atome d'hydrogène, à celle des expériences de Stern et Gerlach et d'Einstein-de Haas. Les aspects mathématiques de la théorie des représentations, les matrices S , la théorie des perturbations, les équations aux valeurs propres et les équations différentielles hypergéométriques sont également présentés en détails.

Le lecteur trouvera aussi plus de 80 exemples et exercices entièrement développés dans le but de consolider les propos du livre. Chaque exercice a été soigneusement choisi et résolu pour que l'ouvrage soit un outil de base et de référence pour son lecteur.



Walter Greiner est né le 29.10.1935 à Neuenburg en Thuringe (Allemagne). Après l'apprentissage du métier de serrurier, il a effectué des études de physique et de mathématiques aux Universités de Francfort et de Darmstadt. En 1959, il obtient son diplôme de l'Université technique (TH) de Darmstadt (Allemagne). Thèse de doctorat en 1961 à l'Université de Fribourg en Brisgau (Allemagne). Professeur assistant de 1962 à 1964 à l'Université du Maryland, College Park (USA). Depuis 1964 professeur titulaire à l'Université de Francfort. À partir de 1965 professeur et directeur de l'Institut de Physique théorique de l'Université Johann Wolfgang Goethe (Francfort/Main).

ISBN 3-540-64347-8



9 783540 643470

<http://www.springer.de>