

MÉCANIQUE QUANTIQUE

Exercices corrigés et commentés

1

Ibrahima Sakho

Préface par Jacques Bouche

531 - 70.1


hermann

Introduction

Ce livre est un recueil d'exercices de Mécanique Quantique corrigés et commentés, s'adressant aux étudiants inscrits en deuxième année universitaire. Actuellement, nombre de pays francophones ont adopté le système LMD (Licence Master Doctorat) comme doctrine pour réformer l'enseignement supérieur. Les compétences de savoirs faire théoriques indispensables à la résolution des exercices proposés dans cet ouvrage, sont celles exigibles par les programmes de Mécanique Quantique en Deuxième année universitaire de l'ancien système (PC2, MP2) et en Licence 2 MPC1 (Mathématiques Physique Chimie Informatique) pour ce qui concerne le nouveau système LMD.

La Mécanique Quantique, la Physique fondamentale de l'infiniment petit (microcosme) est souvent opposée à la Mécanique Classique ou Physique des corps macroscopiques (macrocosme). C'est ainsi que les exercices proposés dans ce livre visent à donner à l'étudiant, les outils de base indispensables pour une bonne compréhension des propriétés physiques des atomes, des noyaux, des molécules, des lasers, des solides, des matériaux de l'Électronique, bref, de tout l'infiniment petit. De nombreux exercices sont articulés sur la compréhension des propriétés des atomes en particulier. Ce qui fait de cet ouvrage un outil fondamental de travail pour les étudiants désireux poursuivre les études en Licence 3 de Physique puis en Master de Physique Atomique pouvant déboucher sur une thèse.

Dans le cours introductif de Mécanique Quantique en deuxième année, l'objet porte principalement sur l'étude de l'interaction matière rayonnement et des états quantifiés de la matière. Pour répondre à ce besoin, les thématiques développées dans ce livre s'articulent principalement sur l'étude des propriétés du photon, de la théorie quantique des systèmes hydrogénoïdes (atome d'hydrogène et ions assimilés), de l'équation fondamentale de la Mécanique Quantique ou équation de Schrödinger et sur l'étude du formalisme de base de la Mécanique Quantique. C'est ainsi que cet ouvrage est structuré en sept chapitres couronnés par un ensemble de compléments comme notes de cours permettant au lecteur d'approfondir sa compréhension des phénomènes physiques étudiés dans ce présent ouvrage.

Le chapitre 1 fait l'objet d'étude des propriétés du photon. Il débute sur une étude du rayonnement du corps noir et sur la théorie des quanta de Planck permettant d'introduire l'énergie du photon en tant que quantum de lumière et d'établir l'expression de la densité spectrale d'énergie électromagnétique traduisant la loi de Planck. Par la suite, l'étude porte sur l'effet photoélectrique mettant en évidence l'énergie du

photon à travers l'interprétation selon Einstein. Enfin est abordée l'étude de l'effet Compton qui met en évidence l'impulsion du photon. Le chapitre 1 vise donc à mettre en exergue les propriétés corpusculaires de la lumière constituée d'un flux de photons ainsi que le caractère discontinue de la matière.

Le chapitre 2 est réservé à l'étude des modèles atomiques et du spectre de l'atome d'hydrogène. Il débute par une revue succincte de l'atome pudding de Thomson, de l'atome planétaire de Rutherford et de l'atome quantifié de Bohr qui a permis d'introduire la quantification des états de la matière. Le premier nombre quantique, le nombre quantique principal n sort de « terre » dans ce chapitre à travers le principe de quantification de Bohr du moment cinétique de l'électron de l'atome d'hydrogène. Par la suite, le chapitre est consacré à l'étude du spectre de l'atome d'hydrogène qui a permis de rendre compte du caractère discontinu de l'interaction matière-rayonnement. Y sont étudiés notamment la théorie de Bohr de l'atome d'hydrogène, l'expérience de Franck et Hertz confirmant le modèle de Bohr, les séries spectrales de l'atome d'hydrogène pour une bonne compréhension du spectre de raies de certaines étoiles. Ce chapitre est parachevé par une étude sur l'effet d'entraînement du noyau qui a conduit à la découverte du deuton (noyau du deutérium, isotope de l'hydrogène).

Dans le chapitre 3, l'étude est réservée à la relation de de Broglie et aux inégalités de Heisenberg. On y traite notamment la dualité onde – corpuscule conciliant les propriétés ondulatoires et corpusculaires du photon, l'hypothèse de de Broglie ainsi que sa confirmation expérimental à travers l'expérience de Davisson et Germer. De plus, il est traité dans ce chapitre, les propriétés des ondes de de Broglie relatives à la vitesse de phase et à la vitesse de groupe dans les cas classique et relativiste, la déduction de l'hypothèse de de Broglie de la condition de quantification de Bohr et enfin une étude quantique de l'atome d'hydrogène. L'ensemble des idées développées dans ce chapitre permettent de comprendre les étapes importantes ayant conduit à l'élaboration de l'équation fondamentale de la Mécanique Quantique appelée encore équation de Schrödinger.

Le chapitre 4 est consacré à l'étude de l'équation de Schrödinger et à ses applications. Divers phénomènes physiques liés aux comportements des particules élémentaires sont étudiés dans ce chapitre. On y étudie notamment, l'énergie quantifiée des systèmes hydrogénoïdes, le comportement d'une particule, dans un puits de potentiel (profondeur infinie, puits carré), soumise à diverses marches de potentiel, soumise à une barrière de potentiel pour une mis en évidence de l'effet tunnel et confinée dans une boîte cubique. À chaque fois qu'il est possible, l'attention est attirée sur la différence fondamentale entre les précisions classiques et quantiques relativement au comportement de la particule étudiée. Le chapitre est parachevé par une étude sur l'émission froide et sur l'oscillateur harmonique unidimensionnel qui est l'un des systèmes physiques parmi les plus importants en ce sens qu'un grand nombre de systèmes sont régis de façon approchée par les équations de l'oscillateur harmonique : vibration des atomes dans une molécule, vibration des ions dans un cristal, quantification du champ du rayonnement électromagnétique dans le spectre d'émission du corps noir, etc.

Au chapitre 5, l'objet porte sur l'étude des moments cinétiques et magnétiques de l'électron et sur l'interaction spin-orbite. Les expériences qui ont permis de découvrir les trois autres nombres quantiques de l'électron (nombre quantique orbital, nombre quantique magnétique et le spin) ont été présentées en priorité : l'expérience Zeeman pour les nombres quantiques orbital et magnétique et l'expérience de Stern et Gerlach pour le spin. Par la suite, sont étudiés les effets Zeeman normal (spin électronique ignoré) et anormal (prise en compte du spin électronique) et l'interaction spin-orbite justifiant la structure fine des niveaux d'énergies des systèmes atomiques. De plus, la notation spectroscopique des niveaux d'énergie des systèmes atomiques à un seul électron figure en bonne place dans ce chapitre. Cette notation, indispensable à la compréhension des spectres atomiques fait l'objet de plusieurs illustrations dans le cas de l'atome d'hydrogène et de l'atome de sodium. Enfin, l'illustration de l'effet Zeeman complexe sur la raie jaune du sodium parachève le chapitre.

Au chapitre 6 sont présentés les outils mathématiques ou le formalisme de base de la Mécanique Quantique ainsi que l'algèbre des commutateurs. Sont d'abord traitées dans ce chapitre, les notions d'opérateur linéaire, d'opérateur hermitique et de bases orthonormées discrètes constituées par les vecteurs propres d'opérateurs hermitiques, la notation de Dirac, l'équation aux valeurs propres d'opérateurs hermitiques, la notion d'observable et enfin les représentations matricielles des vecteurs et des opérateurs. Par la suite de nombreux exercices sont proposés pour une bonne compréhension des propriétés des opérateurs linéaires : commutation, produit scalaire, trace, fonction d'opérateurs, règles de dérivation, opérateur unitaire, matrices de Pauli, opérateur densité, opérateur d'évolution, observables associées au spin et évolution d'un spin $1/2$ dans un champ magnétique uniforme. Le chapitre est couronné par une étude sur la quantification du moment cinétique orbital de l'électron et sur la détermination de l'énergie de l'atome d'hydrogène dans le cas général.

Le chapitre 7 est consacré à l'étude des six postulats de la Mécanique Quantique indispensables à la bonne compréhension de l'ensemble des phénomènes physiques évoluant à l'échelle microscopique. C'est ainsi que le chapitre débute par une description de l'état d'un système et des grandeurs physiques. Puis l'étude porte sur la mesure des grandeurs physiques, la réduction du paquet d'ondes et sur l'évolution des systèmes dans le temps. Les propriétés générales de l'équation de Schrödinger sont aussi étudiées dans ce chapitre en plus de divers exercices relatifs au théorème d'Ehrenfest et de son lien avec la mécanique classique, aux systèmes conservatifs, aux constantes du mouvement, à l'évolution des valeurs moyennes des opérateurs, à la mesure simultanée de grandeurs physiques associées à des observables formant un E.C.O.C, à l'évolution de l'opérateur densité et de celle d'un spin $1/2$ dans un champ magnétique uniforme et enfin aux calculs des valeurs moyennes relatives aux propriétés des systèmes hydrogénoïdes avec une confrontation avec les prévisions de Bohr.

Les sept chapitres sont parachévés par un ensemble de six compléments comme notes de cours pour un approfondissement et pour une bonne compréhension des phénomènes physiques étudiés à divers endroits du livre. Ces compléments sont relatifs notamment à l'établissement de la densité spectrale d'énergie électromagnétique traduisant la

formule de Planck, au lien entre la loi de Planck et la théorie d'Einstein des processus d'absorption et d'émission trouvant leurs applications dans le processus de génération de rayonnement laser par les systèmes quantiques, l'établissement de la loi empirique de Stefan par voir thermodynamique puis par la méthode de Boltzmann, aux calculs des termes de l'hamiltonien de structure fine des systèmes hydrogénéoïdes pour une bonne compréhension des effets relativistes et quantiques dans les systèmes atomiques et à l'étude des fonctions d'onde générales des systèmes hydrogénéoïdes. La méthode de résolution de l'équation de Schrödinger par la séparation des variables, la définition et l'étude des propriétés des harmoniques sphériques ainsi que l'établissement des expressions des premières fonctions d'onde normalisées des systèmes hydrogénéoïdes parachèvent les compléments.

Enfin, une bibliographie sommaire est placée à la fin du livre.

Que l'on nous permette de manifester notre profonde gratitude à Monsieur Jean-Marc Bizau du Laboratoire de l'Interaction du Rayonnement X avec la Matière (LIXAM), Monsieur Philippe Masson Doyen de l'UFR des Sciences et à Monsieur Marc Rabaud Professeur de Physique, tous de l'Université Paris Sud 11 (Orsay), qui ont bien voulu nous mettre en rapport avec le Professeur Jacques Bauche pour la relecture du présent ouvrage et de notre livre sur « *l'histoire de l'atome* » publié récemment (2011) aux Éditions Publibook à Paris. Nos remerciements sont aussi chaleureusement adressés à Monsieur Jacques Bauche, ancien Professeur de Physique Atomique à l'Université Paris Sud 11(Orsay) qui, en marge de la rédaction de son ouvrage de recherche sur *l'utilisation de la Physique Atomique dans les Plasmas Chauds*, n'a ménagé aucun effort pour relire divers aspects de ce présent ouvrage dont la préface porte sa signature. Qu'il trouve ici exprimée notre profonde gratitude. Nous adressons aussi nos chaleureux remerciements au Professeur Ahmadou Wagué Directeur de l'Institut de technologie Nucléaire Appliquée de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), au Professeur Louis Marchildon du Département de Physique de l'Université de Québec (Canada), au Professeur Jean Bricmont du Département de Physique de l'Université Catholique Louvain la Neuve (Belgique), au Docteur Mamadi Biaye, Maître de Conférences en Physique au Département de Physique et Chimie de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Éducation et de la Formation de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) et au Docteur Senghane Mbodji du Département de Physique de l'Université de Bambey (Sénégal), pour leurs relectures, leurs remarques et commentaires très aigüés sur de nombreux concepts physiques développés à travers les différents chapitres et compléments que compose ce livre. Leurs apports de hautes factures ont contribué très efficacement à la clarté de l'ensemble des exercices proposés dans ce présent ouvrage.

Ce recueil d'exercices est préparé à l'intention des étudiants inscrits en deuxième année universitaire PC2 ou MP2 ainsi qu'à ceux inscrits en Licence 2 MPC1 dans les universités francophones ayant adoptées le système LMD. Ce livre intéressera également les universitaires responsables des enseignements en Mécanique Quantique et en Physique Atomique pour la préparation des séries de travaux dirigés. Nous espérons qu'ils sauront en tirer le meilleur parti.

Toute œuvre humaine étant perfectible, nous restons à l'écoute de nos lecteurs pour accueillir avec intérêt leurs critiques et suggestions à l'adresse électronique ci-dessous.

Enfin, nous remercions Allah Qui nous a permis de réaliser ce présent travail.

L'auteur,

Dakar, le 29 novembre 2011

coursphysique_sakho@yahoo.fr

Table des matières

PRÉFACE DE JACQUES BAUCHE.....	5
PRÉFACE.....	7
LU POUR VOUS.....	9
INTRODUCTION.....	11
PRINCIPALES CONSTANTES PHYSIQUES FONDAMENTALES.....	17
CHAPITRE I – LE PHOTON.....	21
I. Rayonnement du corps noir, formule de Planck.....	21
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant.....	21
B. Choisir la bonne réponse.....	22
C. Exercices.....	23
C. 1 Loi de Stefan-Boltzmann, application.....	23
C. 2 Loi de déplacement de Wien.....	23
C. 3 Formule de Rayleigh-Jeans, « catastrophe ultraviolette ».....	23
C. 4 Formule de Planck.....	24
C. 5 Déduction de la loi de Wien à partir de la formule de Planck.....	24
C. 6 Densité d'énergie électromagnétique.....	25
II. Effet photoélectrique : énergie du photon.....	25
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant.....	25
B. Choisir la bonne réponse.....	26
C. Exercices.....	27
C. 1 Mise en évidence de l'effet photoélectrique.....	27
C. 2 Équation d'Einstein.....	27
C. 3 Cellule photoélectrique, potentiel d'arrêt.....	28
C. 4 Mesure de la constante de Planck, longueur d'onde seuil d'une photocathode émissive.....	29
C. 5 Étude d'une photocathode émissive.....	29
C. 6 Principe de conservation de la quantité de mouvement.....	30
III. Effet Compton : impulsion du photon.....	30
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant.....	30
B. Choisir la bonne réponse.....	31
C. Exercices.....	31

C. 1	Mise en évidence de l'effet Compton	31
C. 2	Diffusion arrière de Compton	32
C. 3	Établissement de la formule de Compton	32
C. 4	Effet Compton inverse	32

CHAPITRE 2 – MODÈLES ATOMIQUES, SPECTRE DE L'ATOME

D'HYDROGÈNE

I.	Modèle de l'atome pudding de Thomson	37
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	37
B.	Choisir la bonne réponse	37
II.	Modèle de l'atome planétaire de Rutherford	37
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	37
B.	Choisir la bonne réponse	38
III.	Modèle de l'atome quantifié de Bohr	38
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	38
B.	Choisir la bonne réponse	38
IV.	Spectre de l'atome d'hydrogène	39
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	39
B.	Choisir la bonne réponse	39
C.	Exercices	40
C. 1	Durée de vie de l'atome planétaire de Rutherford	40
C. 2	Principe de correspondance : quantification du moment cinétique	41
C. 3	Quantification du rayon de l'orbite électronique : rayon de Bohr	42
C. 4	Quantification de l'énergie de l'atome d'hydrogène	43
C. 5	Constante de Rydberg, effet de la masse finie du noyau	43
C. 6	Confirmation expérimentale du modèle de Bohr : expérience de Franck et Hertz	44
C. 7	Ionisation de l'atome d'hydrogène	46
C. 8	Série de Balmer	46
C. 9	Spectre de raies de l'hydrogène des étoiles, nébuleuse d'Orion	47
C. 10	Système hydrogénoïde	48
C. 11	Effet d'entraînement du noyau : découverte du deuton	49

CHAPITRE 3 – RELATION DE DE BROGLIE, INÉGALITÉS DE HEISENBERG

I.	Dualité onde – corpuscule	53
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	53
B.	Choisir la bonne réponse	53
II.	Relation de de Broglie	54
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	54
B.	Choisir la bonne réponse	54

III. Inégalités de Heisenberg	54
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	54
B. Choisir la bonne réponse	55
C. Exercices	55
C. 1 Vitesses de phase et de groupe des ondes de de Broglie	55
C. 2 Dispersion des ondes de de Broglie	55
C. 3 Confirmation expérimentale de l'hypothèse de de Broglie : expérience de Davisson et Germer	56
C. 4 Vitesse de groupe des ondes de de Broglie dans le cas relativiste	58
C. 5 Dédution de l'hypothèse de de Broglie de la condition de quantification de Bohr	58
C. 6 Étude quantique de l'atome d'hydrogène (pour aller plus loin)	58
CHAPITRE 4 – ÉQUATION DE SCHRÖDINGER – APPLICATIONS	63
I. Interprétation de la fonction d'onde	63
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	63
B. Choisir la bonne réponse	63
II. Équation de Schrödinger	64
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	64
B. Choisir la bonne réponse	64
C. Exercices	64
C. 1 Dédution de l'équation de Schrödinger à partir de la relation de de Broglie	64
C. 2 Énergie de l'état fondamental de l'atome d'hydrogène	65
C. 3 Énergie quantifiée d'un système hydrogénoïde	66
C. 4 Particule dans un puits de potentiel de profondeur infinie	67
C. 5 Marche de potentiel de hauteur U_0	67
C. 6 Marche de potentiel de profondeur finie	68
C. 7 Marche de potentiel en escalier	69
C. 8 Barrière de potentiel : effet tunnel	70
C. 9 Potentiel rectangulaire à deux dimensions	71
C. 10 Particule confinée dans une boîte cubique	71
C. 11 Puits de potentiel carré : états non liés	72
C. 12 Puits de potentiel carré : états liés	73
C. 13 Puits infiniment profond	74
C. 14 Émission froide	74
C. 15 Énergie de l'état fondamental de l'oscillateur harmonique	75
C. 16 Énergie quantifiée de l'oscillateur harmonique	76
C. 17 Étude de la molécule HCl	77

CHAPITRE 5 – MOMENTS CINÉTIQUE ET MAGNÉTIQUE – INTERACTION SPIN-ORbite	81
I. Nombres quantiques orbital et magnétique	81

A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	81
B. Choisir la bonne réponse	81
II. Moment cinétique et magnétique de l'électron	81
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	81
B. Choisir la bonne réponse	82
III. Effet Zeeman normal, précession de Larmor	82
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	82
B. Choisir la bonne réponse	82
IV. Spin de l'électron, effet Zeeman complexe	83
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	83
B. Choisir la bonne réponse	83
V. Moment cinétique total d'un électron atomique, interaction spin-orbite	84
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	84
B. Choisir la bonne réponse	84
VI. Terme d'une configuration électronique des systèmes hydrogénéoïdes	84
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	84
B. Choisir la bonne réponse	84
C. Exercices	85
C.1 Expérience de Zeeman : quantification du moment cinétique, nombre quantique magnétique	85
C.2 Effet Zeeman normal sur la raie Lyman-alpha de l'atome d'hydrogène	85
C.3 Moment magnétique orbital : rapport gyromagnétique de l'électron	86
C.4 Magnéton de Bohr	86
C.5 Triplet de Zeeman-Lorentz : application de la règle des fréquences de Bohr, précession de Larmor	88
C.6 Effet Zeeman normal : détermination du triplet de Zeeman-Lorentz par application de l'équation de Schrödinger	89
C.7 Expérience de Stern et de Gerlach	90
C.8 Spin de l'électron : Hypothèse de Goudsmit et Uhlenbeck	91
C.9 Exploitation de l'expérience de Stern et de Gerlach : intensités des tâches	92
C.10 Moment cinétique total de l'électron, termes spectroscopiques	93
C.11 Illustration de l'effet Zeeman normal sur le niveau $2p$ des systèmes hydrogénéoïdes	93
C.12 Illustration de l'effet Zeeman anormal sur le niveau fondamental des systèmes hydrogénéoïdes	93
C.13 Illustration de l'effet Zeeman anormal sur le niveau $2p$ des systèmes hydrogénéoïdes	94
C.14 Notation spectroscopique des états d'un atome monoélectronique	94

C.15	Structure fine de la raie de résonance de l'atome d'hydrogène	94
C.16	Structure fine du niveau $n = 2$ de l'atome d'hydrogène	95
C.17	Illustration de l'effet Zeeman complexe sur la raie jaune du sodium	96
CHAPITRE 6 – FORMALISME DE BASE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE,		
	ALGÈBRE DES COMMUTATEURS	99
I.	Opérateur linéaire, commutation	99
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	99
B.	Choisir la bonne réponse	99
II.	Opérateur hermitique	100
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	100
B.	Choisir la (ou les) bonnes réponses	100
III.	Bases orthonormées discrètes	100
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	100
B.	Choisir la bonne réponse	101
IV.	Notation de Dirac	101
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	101
B.	Choisir la bonne réponse	102
V.	Équation aux valeurs propres, observables	102
A.	Répondre par vrai ou faux tout en justifiant	102
B.	Choisir la bonne réponse	103
VI.	Représentation des vecteurs et des opérateurs	104
B.	Choisir la bonne réponse	104
C.	Exercices	104
C. 1	Propriétés des commutateurs	104
C. 2	Propriétés du produit scalaire	105
C. 3	Trace d'un opérateur	105
C. 4	Fonction d'opérateurs	105
C. 5	Commutateurs de fonctions d'opérateurs	105
C. 6	Règles de dérivation d'opérateurs	106
C. 7	Opérateur unitaire	106
C. 8	Matrices de Pauli	106
C. 9	Opérateur densité	107
C. 10	Opérateur d'évolution	107
C. 11	Observables associées au spin	108
C. 12	Évolution d'un spin $1/2$ dans un champ magnétique uniforme : précession de Larmor	108
C. 13	Opérateur moment cinétique orbital	109
C. 14	Quantification de l'opérateur carré moment cinétique orbital	110
C. 15	Moment cinétique en coordonnées sphériques	110

C.16 Quantification de l'énergie de l'atome d'hydrogène dans le cas général.....	111
--	-----

CHAPITRE 7 – POSTULATS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

I. Description de l'état d'un système.....	115
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant.....	115
II. Description des grandeurs physiques.....	115
B. Choisir la bonne réponse.....	115
III. Mesure des grandeurs physiques.....	116
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant.....	116
B. Choisir la bonne réponse.....	116
IV. Réduction du paquet d'ondes.....	116
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant.....	116
B. Choisir la bonne réponse.....	117
V. Évolution des systèmes dans le temps.....	117
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant.....	117
B. Choisir la bonne réponse.....	117
VI. Propriétés générales de l'équation de Schrödinger.....	117
A. Répondre par vrai ou faux tout en justifiant.....	117
C. Exercices.....	118
C. 1 Théorème d'Ehrenfest, lien avec la mécanique classique.....	118
C. 2 Système conservatif.....	118
C. 3 Constante du mouvement, bons nombres quantiques.....	119
C. 4 Évolution des valeurs moyennes des opérateurs associés à la position et à l'impulsion : étalement d'un paquet d'ondes libres.....	119
C. 5 Évolution des valeurs moyennes des opérateurs associés à la position et à l'impulsion : lien avec la mécanique classique.....	119
C. 6 Influence des états excités sur la distance moyenne entre les atomes de la molécule HCl.....	120
C. 7 Puits de potentiel infini : mesures des énergies, évolution du paquet d'ondes, relation d'incertitude temps-énergie.....	120
C. 8 Étude d'un système conservatif.....	122
C. 9 Mesure simultanée de grandeurs physiques associées à des d'observables formant un E.C.O.C.....	122
C.10 Ensembles complets d'observables qui commutent (E.C.O.C).....	123
C.11 Évolution de l'opérateur densité.....	123
C.12 Évolution d'un spin 1/2 dans un champ magnétique uniforme.....	124
C.13 Valeurs moyennes relatives aux propriétés des systèmes hydrogénoïdes, confrontation avec les prévisions de Bohr.....	125

COMPLÉMENTS

A. Densité spectrale d'énergie électromagnétique : formule de Planck	129
1. Caractéristiques du photon.....	129
2. Loi de Planck.....	131
B. Loi de Planck et théorie d'Einstein	140
1. Principaux processus d'interaction matière-rayonnement optique.....	140
2. Théorie d'Einstein des processus d'absorption et d'émission.....	142
C. Loi de Stefan	146
1. Établissement de la loi empirique de Stefan par voir thermodynamique.....	146
2. Établissement par Boltzmann de la loi de Stefan.....	150
D. Calcul des termes de l'hamiltonien de structure fine des systèmes hydrogénéoïdes	154
1. Énergie de Bohr des systèmes hydrogénéoïdes.....	154
2. Énergie semi-relativiste des systèmes hydrogénéoïdes.....	157
3. Énergie relativiste des systèmes hydrogénéoïdes.....	159
4. Calculs des termes de l'hamiltonien de structure fine.....	166
E. Fonctions d'onde générales des systèmes hydrogénéoïdes	189
1. Nécessité d'utiliser les coordonnées sphériques.....	189
2. Résolution de l'équation de Schrödinger.....	190
3. Premières fonctions d'onde normalisées.....	204
SOLUTIONS DES EXERCICES	207
Chapitre 1	209
Chapitre 2	231
Chapitre 3	255
Chapitre 4	267
Chapitre 5	311
Chapitre 6	339
Chapitre 7	373
BIBLIOGRAPHIE	407