

SAVOIRS

PHYSIQUE

ACTUELS

MÉCANIQUE QUANTIQUE

TOME II
Nouvelle édition

●
CLAUDE COHEN-TANNOUJJI
BERNARD DIU
FRANCK LALOË

CNRS ÉDITIONS



edp sciences

MÉCANIQUE QUANTIQUE II

CLAUDE COHEN-TANNOUJJI
BERNARD DIU
FRANCK LALOË

Cet ouvrage, issu de nombreuses années d'enseignements universitaires à divers niveaux, a été conçu afin de faciliter le premier contact avec la physique quantique et d'aider ensuite le lecteur à progresser continuellement dans la compréhension de cette physique. Les deux premiers tomes, publiés il y a plus de 40 ans, sont devenus des classiques dans le monde entier, traduits dans de multiples langues. Ils se placent toutefois à un niveau intermédiaire et ont été complétés par un troisième tome d'un niveau plus avancé. L'ensemble est systématiquement fondé sur une approche progressive des problèmes, où aucune difficulté n'est passée sous silence et où chaque aspect du problème est discuté (en partant souvent d'un rappel classique).

Cette volonté d'aller au fond des choses se concrétise dans la structure même de l'ouvrage, faite de deux textes distincts mais imbriqués : les « chapitres » et les « compléments ». Les chapitres présentent les idées générales et les notions de base. Chacun d'entre eux est suivi de plusieurs compléments, en nombre variable, qui illustrent les méthodes et concepts qui viennent d'être introduits ; les compléments sont des éléments indépendants dont le but est de proposer un large éventail d'applications et prolongements intéressants. Pour faciliter l'orientation du lecteur et lui permettre d'organiser ses lectures successives, un guide de lecture des compléments est proposé à la fin de chaque chapitre.

Le tome II se situe à un niveau un peu plus élevé que le tome I, en abordant des problèmes plus délicats comme la théorie des collisions, le spin et les calculs des perturbations indépendante ou dépendante du temps. Il fait une première incursion dans l'étude des particules identiques. Dans ce tome, comme dans le précédent, toute notion théorique est immédiatement illustrée par des applications diverses présentées dans des compléments. Comme le tome I, il a bénéficié de quelques corrections mais il a également été augmenté : le chapitre XIII traite maintenant des perturbations aléatoires et un complément entier sur la relaxation y a été ajouté.

Claude Cohen-Tannoudji a été chercheur CNRS, puis professeur successivement à l'Université de Paris et au Collège de France, donnant des cours dont l'influence scientifique a été considérable. Il a été lauréat du Prix Nobel en 1997, avec Steve Chu et Williams Phillips, pour ses nombreuses contributions à la recherche, en particulier dans le domaine du refroidissement et du piégeage d'atomes par des faisceaux laser.

Bernard Diu a été professeur à l'Université de Paris et y a enseigné divers domaines de la physique, en particulier la mécanique quantique et la physique statistique, sur laquelle il a écrit un ouvrage de référence avec trois co-auteurs. Il a toujours montré un intérêt soutenu pour l'enseignement et la diffusion des sciences. Son domaine de recherche principal est la physique des particules.

Franck Laloë a été maître-assistant attaché aux cours de mécanique quantique, puis chercheur CNRS au sein du Laboratoire Kastler Brossel. Ses travaux de recherches ont porté sur divers effets liés aux statistiques quantiques, l'orientation nucléaire de l'hélium trois par pompage optique, les ondes de spin dans les gaz à basse température, et divers aspects de la mécanique quantique fondamentale.

Série Physique dirigée par Michèle LEDUC et Michel LE BELLAC

SAVOIRS ACTUELS

Collection dirigée par Michèle LEDUC

CNRS ÉDITIONS

www.cnrseditions.fr



edp sciences
www.edpsciences.org

Création graphique : Béatrice Couëdel



64 €

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-2286-7
ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-12502-6

Ces ouvrages, écrits par des chercheurs, reflètent des enseignements dispensés dans le cadre de la formation à la recherche. Ils s'adressent donc aux étudiants avancés, aux chercheurs désireux de perfectionner leurs connaissances ainsi qu'à tout lecteur passionné par la science contemporaine.

Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu
et Franck Laloë

Mécanique quantique

Tome II

Nouvelle édition

Collection dirigée par
Michèle Leduc et Michel Le Bellac

SAVOIRS ACTUELS

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Dans la même collection :

Analyse dans les espaces métriques

Hervé Pajot et Emmanuel Russ

Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ? 2^e édition

Franck Laloë

Mécanique quantique - Tomes I et III

Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu et Franck Laloë

Cohomologie galoisienne

David Harari

Optique non linéaire

François Hache

Chimie verte

Jacques Augé et Marie-Christine Scherrmann

Ouvrage publié grâce au mécénat du
Centre National de la Recherche Scientifique,
de Paris-Sciences-et-Lettres et du Collège de France.

Ouvrage publié avec le soutien du laboratoire Kastler-Brossel.

Imprimé en France

© 2018, **EDP Sciences**, 17 avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

et

CNRS Éditions, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

EDP Sciences, ISBN (papier) : 978-2-7598-2286-7, ISBN (ebook) : 978-2-7598-2285-0

CNRS Éditions, ISBN (papier) : 978-2-271-12502-6, ISBN (ebook) : 978-2-271-12504-0

Avertissement important : “mode d’emploi”

L’exposé qui va suivre est composé de deux parties distinctes, bien qu’imbriquées : les chapitres et les compléments.

– Les *chapitres* contiennent les notions de base : à quelques développements et quelques variations près, leur niveau correspond à celui d’un cours en Licence 3 pour le premier tome, Master 1 pour le second, et Master 2 pour le troisième. Ces chapitres, au nombre de 21 en tout, *forment un tout*, qui peut être étudié indépendamment des compléments.

– Les *compléments* suivent chacun des chapitres ; ils sont repérés par une lettre à laquelle, en indice, est adjoint le numéro du chapitre auquel ils sont attachés (par exemple, les compléments qui suivent le Chapitre V sont notés, dans l’ordre : A_V , B_V , C_V , etc.), et peuvent être immédiatement distingués par un signe ● figurant en haut des pages correspondantes. A la fin de chaque chapitre figure un guide de lecture et une liste de ses compléments, dont le nombre est variable (de 2 à 14).

Les compléments sont de *types divers* : certains sont par exemple destinés à faciliter l’assimilation du chapitre auquel ils sont attachés, ou à préciser certains points ; d’autres peuvent également indiquer des applications physiques concrètes, ou encore ouvrir des perspectives sur différents domaines de la physique ; l’un de ces compléments (généralement le dernier) regroupe des exercices.

Les compléments sont de *niveaux variés* : tous peuvent être compris à partir des chapitres qui les précèdent, mais certains en sont des applications ou des prolongements très simples, alors que d’autres sont plus difficiles (quelques uns peuvent même se situer au niveau du Master 2 ou s’intéresser à des sujets proches de la recherche).

En aucun cas il n’est conseillé d’étudier l’ensemble des compléments d’un chapitre dans l’ordre où ils se présentent. Suivant ses préoccupations et ses intérêts, le lecteur en choisira un petit nombre (par exemple 2 ou 3), plus quelques exercices ; les autres compléments pourront être réservés pour une lecture ultérieure. Il pourra s’appuyer pour cela sur le guide de lecture des compléments qui figure à la fin de chaque chapitre.

Signalons enfin que, dans le texte des chapitres et des compléments, certains passages pouvant être sautés en première lecture sont imprimés en petits caractères.

Avant-propos

La mécanique quantique est une branche de la physique dont l'importance n'a cessé de s'accroître au cours des dernières décennies. Elle est bien sûr essentielle pour comprendre la structure et la dynamique des objets microscopiques comme les atomes, les molécules, ainsi que leurs interactions avec le rayonnement électromagnétique. Mais elle est aussi à la base du fonctionnement de nombreux systèmes nouveaux comme les sources laser (communications, médecine, usinage, etc.), les horloges atomiques (essentiels, en particulier, pour le GPS), les transistors (et donc les communications, l'informatique), l'imagerie par résonance magnétique, la production d'énergie (capteurs solaires, nucléaire), etc., donc des applications pratiques innombrables. Elle permet également d'expliquer des phénomènes surprenants comme la superfluidité ou la supraconductivité. Un grand intérêt est actuellement porté aux états quantiques intriqués, dont les propriétés de non-localité et non-séparabilité sont peu intuitives, et permettent d'envisager des applications remarquables dans le domaine de l'information quantique. Notre civilisation devient ainsi de plus en plus imprégnée par les applications technologiques qui découlent des concepts quantiques. Il est par suite clair qu'une attention particulière doit être portée à l'enseignement de la mécanique quantique. L'objet de ces trois tomes est de concourir à cet objectif.

Un premier contact avec la mécanique quantique peut cependant être très déroutant. Le présent ouvrage, issu de plusieurs enseignements auprès des étudiants, a été conçu dans le but de faciliter une approche initiale, et d'aider ensuite le lecteur à progresser continûment vers un niveau avancé de mécanique quantique. Les deux premiers tomes, publiés il y a plus de 40 ans, ont été utilisés dans le monde entier et traduits dans de multiples langues. Ils restaient toutefois à un niveau intermédiaire ; l'ouvrage est maintenant complété par un troisième tome qui permet au lecteur d'aller plus loin. L'ensemble est systématiquement fondé sur une approche progressive des problèmes, où aucune difficulté n'est passée sous silence, et où chaque aspect des diverses questions est discuté en détail (en partant souvent d'un rappel classique).

Cette volonté d'aller au fond des choses « sans tricher ni prendre de raccourci » se concrétise dans la structure même de l'ouvrage, construite à l'aide de deux textes distincts mais imbriqués : les *chapitres* et les *compléments*. Les chapitres se suivent pour présenter les idées générales et les notions de base. Chaque chapitre est suivi de plusieurs compléments, en nombre variable, qui illustrent les méthodes et concepts qui viennent d'être introduits. Les compléments sont indépendants les uns des autres, et leur but est de proposer un large éventail d'applications diverses et prolongements intéressants. Pour faciliter l'orientation du lecteur et lui permettre d'organiser ses lectures successives, un guide de lecture comprenant une liste de commentaires des compléments un par un est proposée à la fin de chaque chapitre.

Le tome I présente une introduction générale du sujet, suivie d'un chapitre détaillé qui décrit les outils mathématiques de base de la mécanique quantique. Ce chapitre peut paraître un peu long et dense, mais l'expérience d'enseignement des auteurs a montré que cette présentation est à terme la plus efficace. Les postulats sont clairement énoncés à partir du troisième chapitre, avec de nombreuses illustrations en compléments. Ensuite sont décrites quelques grandes applications de la

mécanique quantique, par exemple l'oscillateur harmonique, qui donne lieu à de très nombreuses applications (vibration des molécules, phonons, etc.), dont bon nombre font l'objet d'un complément spécifique.

Le tome II poursuit dans cette voie, en élargissant sa portée, et à un niveau un peu plus élevé. Il aborde la théorie des collisions, le spin, la composition des moments cinétiques et les calculs des perturbations indépendantes ou dépendantes du temps. Il fait une première incursion dans l'étude des particules identiques. Dans ce tome, comme dans le précédent, toute notion théorique est immédiatement illustrée par des applications diverses présentées dans des compléments. Comme le tome I, il a bénéficié de quelques corrections récentes, mais il a également été augmenté : le chapitre XIII comprend maintenant deux §§ D et E qui traitent des perturbations aléatoires, et un complément entier sur la relaxation a été ajouté à ce chapitre.

Enfin le tome III vient maintenant compléter les deux premiers, en se situant à un niveau plus élaboré. Il se base sur l'usage du formalisme des opérateurs de création et d'annihilation (deuxième quantification), d'utilisation courante en théorie quantique des champs. Dans une première partie, on étudie les systèmes de particules identiques, fermions et bosons. Les propriétés des gaz parfaits en équilibre thermique sont exposées. Pour les fermions, la méthode de Hartree-Fock est présentée en détail ; elle est à la base d'un nombre considérable d'études en chimie, physique atomique ou du solide, etc. Pour les bosons, l'équation de Gross-Pitaevskii et la théorie de Bogolubov sont discutées. Une présentation originale qui regroupe les effets d'appariement dans les fermions et les bosons permet d'obtenir la théorie BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) et de Bogolubov dans un cadre unifié. Une seconde partie du tome III est consacrée à l'électrodynamique quantique, son introduction générale, l'étude des interactions entre atomes et photons, et diverses applications (émission spontanée, transitions multi-photoniques, pompage optique, etc.). La méthode de l'atome habillé est présentée et illustrée dans des cas concrets. Un dernier chapitre discute la notion d'intrication quantique et certains aspects fondamentaux de la mécanique quantique, en particulier les inégalités de Bell et leur violation.

Mentionnons enfin que nous n'avons abordé, ni la discussion des implications philosophiques de la mécanique quantique, ni celle des diverses interprétations de cette théorie, malgré le très grand intérêt qui s'attache à ces sujets. Nous nous sommes en fait limités à présenter que l'on appelle souvent "le point de vue orthodoxe", et seul le Chapitre XXI s'approche un peu de certaines questions touchant les fondements de la mécanique quantique (sa non-localité, etc.). Nous avons fait ce choix car il nous semble que l'on peut s'intéresser aux questions relatives aux fondements de façon plus efficace une fois que l'on a acquis au préalable une bonne aisance dans le maniement pratique de la mécanique quantique, ainsi que de ses applications si nombreuses. Ces sujets sont abordés dans l'ouvrage *Comprenons-nous vraiment la Mécanique Quantique ?* (F. Laloë, EDP Sciences, 2017) ; voir également la section 5 de la bibliographie des Tomes I et II.

Remerciements :

Tomes I et II : l'enseignement qui est à l'origine de cet ouvrage résulte d'un travail d'équipe qui s'est poursuivi pendant plusieurs années. Nous tenons à remercier ici tous les membres des diverses équipes dont nous avons fait partie, et tout particulièrement Jacques Dupont-Roc et Serge Haroche, pour leur collaboration amicale, les discussions fructueuses que nous avons eues ensemble lors de nos réunions hebdomadaires, les idées de problèmes et d'exercices qu'ils nous ont suggérées. Sans leur enthousiasme et leur aide précieuse, nous n'aurions jamais pu entreprendre et mener à bien la rédaction de cet ouvrage. Nous ne saurions également oublier tout ce que nous devons aux physiciens qui nous ont initiés à la recherche, Alfred Kastler et Jean Brossel pour deux d'entre nous, Maurice Lévy pour le troisième. C'est dans l'ambiance de leurs laboratoires que nous avons découvert la beauté et la puissance de la mécanique quantique. Nous n'oublions pas non plus l'importance qu'a eue pour nous l'enseignement de la physique moderne dispensé au C.E.A. par Albert Messiah, Claude Bloch et Anatole Abragam, à une époque où le troisième cycle n'avait pas encore fait son apparition dans l'enseignement supérieur.

Tome III : Nicole et Dan Ostrowsky ont, à l'occasion de leur traduction du texte en anglais, proposé de nombreuses améliorations ou clarifications, et nous leur en sommes très reconnaissants. Nombreux sont en fait les collègues et amis qui ont grandement contribué à la mise au point de cet ouvrage. Cela nous a d'autant plus aidés que chacun, dans son style propre, nous a apporté des remarques et suggestions complémentaires, et toujours utiles. Tous nos remerciements vont donc en particulier à :

Pierre-François Cohadon
Jean Dalibard
Sébastien Gleyzes
Markus Holzmann
Thibaut Jacqumin
Philippe Jacquier
Amaury Mouchet
Jean-Michel Raimond
Félix Werner

De plus, Marco Picco et Pierre Cladé nous ont grandement aidés à maîtriser certains aspects délicats de la typographie Latex, et à vectoriser des figures. Roger Balian, Edouard Brézin et William Mullin nous ont fait bénéficier d'utiles conseils et suggestions. Enfin, pour un certain nombre de figures, nous remercions vivement pour leur aide Geneviève Tastevin, Pierre-François Cohadon et Samuel Deléglise.

Tome I

I ONDES ET PARTICULES. INTRODUCTION AUX IDÉES FONDAMENTALES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	1
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	35
A _I Ordre de grandeur des longueurs d'onde	37
B _I Contraintes imposées par la relation de Heisenberg	41
C _I Relation de Heisenberg et paramètres atomiques	43
D _I Une expérience illustrant la relation de Heisenberg	47
E _I Paquet d'ondes à deux dimensions	51
F _I Lien entre les problèmes à une et à trois dimensions	55
G _I Paquet d'ondes gaussien	59
H _I Potentiels carrés à une dimension	65
J _I Paquet d'ondes dans une marche de potentiel	77
K _I Exercices	85

II LES OUTILS MATHÉMATIQUES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	89
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	161
A _{II} Inégalité de Schwarz	163
B _{II} Rappel de quelques propriétés utiles des opérateurs linéaires	165
C _{II} Opérateurs unitaires	175
D _{II} Etude plus détaillée des représentations $\{ r\rangle\}$ et $\{ p\rangle\}$	183
E _{II} Quelques propriétés générales de deux observables Q et P dont le commutateur est égal à $i\hbar$	189
F _{II} Opérateur parité	195
G _{II} Application des propriétés du produit tensoriel; puits infini à deux dimensions	203
H _{II} Exercices	207

III	LES POSTULATS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	215
	GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	271
A _{III}	Particule dans un puits de potentiel infini : étude physique	275
B _{III}	Etude du courant de probabilité dans quelques cas particuliers	287
C _{III}	Ecart quadratique moyens de deux observables conjuguées	293
D _{III}	Mesures portant sur une partie d'un système physique	297
E _{III}	L'opérateur densité	303
F _{III}	Opérateur d'évolution	317
G _{III}	Points de vue de Schrödinger et de Heisenberg	321
H _{III}	Invariance de jauge	325
J _{III}	Propagateur de l'équation de Schrödinger	339
K _{III}	Niveaux instables. Durée de vie	347
L _{III}	Exercices	351
M _{III}	Etats liés dans un "puits de potentiel" de forme quelconque	363
N _{III}	Etats non liés d'une particule en présence d'un puits ou d'une barrière de potentiel de forme quelconque	371
O _{III}	Propriétés quantiques d'une particule dans une structure périodique à une dimension	379

IV	APPLICATION DES POSTULATS À DES CAS SIMPLES : SPIN 1/2 ET SYSTÈMES À DEUX NIVEAUX	397
	GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	427
A _{IV}	Les matrices de Pauli	429
B _{IV}	Diagonalisation d'une matrice hermitique 2×2	433
C _{IV}	Spin fictif 1/2 associé à un système à deux niveaux	439
D _{IV}	Système de deux spins 1/2	445
E _{IV}	Matrice densité d'un spin 1/2	453

F _{IV}	Résonance magnétique	459
G _{IV}	Modèle simple pour la molécule d'ammoniac	473
H _{IV}	Effets d'un couplage entre un état stable et un état instable	489
J _{IV}	Exercices	495

V	L'OSCILLATEUR HARMONIQUE À UNE DIMENSION	501
	GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	529
A _V	Etude de quelques exemples physiques d'oscillateurs harmoniques	531
B _V	Etude des états stationnaires en représentation $\{ x\rangle\}$. Polynômes d'Hermite	551
C _V	Résolution de l'équation aux valeurs propres de l'oscillateur harmonique par la méthode polynomiale	559
D _V	Etude des états stationnaires en représentation $\{ p\rangle\}$	567
E _V	L'oscillateur harmonique isotrope à trois dimensions	573
F _V	Oscillateur harmonique chargé placé dans un champ électrique uniforme	579
G _V	Etats cohérents "quasi classiques" de l'oscillateur harmonique	587
H _V	Modes propres de vibration de deux oscillateurs harmoniques couplés	603
J _V	Modes de vibration d'une chaîne linéaire indéfinie d'oscillateurs harmoniques couplés ; phonons	615
K _V	Modes de vibration d'un système physique continu. Application au rayonnement ; photons	635
L _V	Oscillateur harmonique à une dimension en équilibre thermodynamique à la température T	651
M _V	Exercices	667

VI	MOMENTS CINÉTIQUES EN MÉCANIQUE QUANTIQUE	673
	GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	709
A _{VI}	Les harmoniques sphériques	711

B _{VI} Moment cinétique et rotations	723
C _{VI} Rotation des molécules diatomiques	745
D _{VI} Moment cinétique des états stationnaires d'un oscillateur harmonique à deux dimensions	761
E _{VI} Particule chargée dans un champ magnétique. Niveaux de Landau	777
F _{VI} Exercices	801

VII PARTICULE DANS UN POTENTIEL CENTRAL. ATOME D'HYDROGÈNE	809
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	839
A _{VII} Systèmes hydrogénéoïdes	841
B _{VII} Exemple soluble de potentiel central : l'oscillateur harmonique isotrope à trois dimensions	851
C _{VII} Courants de probabilité associés aux états stationnaires de l'atome d'hydrogène	861
D _{VII} Atome d'hydrogène plongé dans un champ magnétique uniforme. Paramagnétisme et diamagnétisme. Effet Zeeman	865
E _{VII} Etude de quelques orbitales atomiques. Orbitales hybrides	879
F _{VII} Niveaux de vibration-rotation des molécules diatomiques	895
G _{VII} Exercices	909

INDEX	911

Tome II

VIII THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES COLLISIONS	931
A Introduction	931
B Etats stationnaires de diffusion. Calcul de la section efficace	936
C Diffusion par un potentiel central. Méthode des déphasages	949
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	965
A_{VIII} La particule libre : états stationnaires de moment cinétique bien défini	967
1 Equation radiale	967
2 Les ondes sphériques libres	969
3 Relation entre les ondes sphériques libres et les ondes planes	976
B_{VIII} Description phénoménologique des collisions avec absorption	979
1 Principe de la méthode	979
2 Calcul des sections efficaces	980
C_{VIII} Exemples simples d'application de la théorie de la diffusion	985
1 Approximation de Born pour un potentiel de Yukawa	985
2 Diffusion par une sphère dure à basse énergie	988
3 Exercices	989

IX LE SPIN DE L'ÉLECTRON	993
A Introduction du spin de l'électron	994
B Propriétés particulières d'un moment cinétique $1/2$	998
C Description non relativiste d'une particule de spin $1/2$	1000
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	1007
A_{IX} Opérateurs de rotation pour une particule de spin $1/2$	1009
1 Opérateurs de rotation dans l'espace des états	1009
2 Rotation des états de spin	1010
3 Rotation des spineurs à deux composantes	1013
B_{IX} Exercices	1017

X COMPOSITION DES MOMENTS CINÉTIQUES	1023
A Introduction	1023
B Composition de deux spins $1/2$. Méthode élémentaire	1027
C Composition de deux moments cinétiques quelconques. Méthode générale	1033
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	1049

A_X	Exemples de composition de moments cinétiques	1051
1	Composition de $\mathbf{j}_1 = 1$ et $\mathbf{j}_2 = 1$	1051
2	Composition d'un moment cinétique orbital l entier et d'un spin $1/2$	1054
B_X	Coefficients de Clebsch-Gordan	1059
1	Propriétés générales des coefficients de Clebsch-Gordan	1060
2	Conventions de phase. Réalité des coefficients de Clebsch-Gordan	1062
3	Quelques relations utiles	1064
C_X	Composition des harmoniques sphériques	1067
1	Fonctions $\Phi_J^M(\Omega_1; \Omega_2)$	1067
2	Fonctions $\mathbf{F}_l^m(\Omega)$	1068
3	Décomposition d'un produit d'harmoniques sphériques; intégrale d'un produit de trois harmoniques sphériques	1070
D_X	Opérateurs vectoriels : Théorème de Wigner-Eckart	1073
1	Définition des opérateurs vectoriels; exemples	1074
2	Théorème de Wigner-Eckart pour les opérateurs vectoriels	1075
3	Application : calcul du facteur de Landé g_J d'un niveau atomique	1080
E_X	Moments multipolaires électriques	1085
1	Définition des moments multipolaires	1085
2	Éléments de matrice des opérateurs multipolaires électriques	1093
F_X	Deux moments cinétiques \mathbf{J}_1 et \mathbf{J}_2 couplés par une interaction	
	$a\mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{J}_2$	1099
1	Rappels classiques	1100
2	Equations d'évolution des valeurs moyennes quantiques $\langle \mathbf{J}_1 \rangle$ et $\langle \mathbf{J}_2 \rangle$	1102
3	Cas particulier de deux spins $1/2$	1103
4	Etude d'un modèle simple de collision entre deux spins $1/2$	1108
G_X	Exercices	1113

XI	THÉORIE DES PERTURBATIONS STATIONNAIRES	1121
A	Exposé de la méthode	1122
B	Perturbation d'un niveau non dégénéré	1126
C	Perturbation d'un niveau dégénéré	1130
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS		1135
A_{XI}	Oscillateur harmonique à une dimension soumis à un potentiel perturbateur en x, x^2, x^3	1137
1	Perturbation par un potentiel linéaire	1137
2	Perturbation par un potentiel quadratique	1139
3	Perturbation par un potentiel en x^3	1140

B_{XI}	Interaction entre les dipôles magnétiques de deux particules de spin 1/2	1147
1	Hamiltonien d'interaction W	1147
2	Effets de l'interaction dipôle-dipôle sur les sous-niveaux Zeeman des deux particules supposées fixes	1150
3	Effets de l'interaction dans un état lié	1155
C_{XI}	Forces de Van der Waals	1157
1	Hamiltonien d'interaction électrostatique entre deux atomes d'hydrogène	1158
2	Forces de Van der Waals entre deux atomes d'hydrogène dans l'état fondamental $1s$	1160
3	Forces de Van der Waals entre un atome d'hydrogène dans l'état $1s$ et un atome d'hydrogène dans l'état $2p$	1164
4	Interaction d'un atome d'hydrogène dans l'état fondamental avec une paroi conductrice	1166
D_{XI}	Effet de volume : influence de l'extension spatiale du noyau sur les niveaux atomiques	1169
1	Correction énergétique au premier ordre	1170
2	Application à quelques systèmes hydrogénoïdes	1173
E_{XI}	La méthode des variations	1177
1	Principe de la méthode	1177
2	Application à un exemple simple	1180
3	Discussion	1183
F_{XI}	Bandes d'énergie des électrons dans les solides : modèle simple	1185
1	Première approche du problème : discussion qualitative	1186
2	Etude plus précise sur un modèle simple	1190
G_{XI}	Exemple simple de liaison chimique : l'ion H_2^+	1199
1	Introduction	1199
2	Calcul variationnel des énergies	1202
3	Critique du modèle précédent. Améliorations possibles	1211
4	Autres orbitales moléculaires de l'ion H_2^+	1214
5	Origine de la liaison chimique ; théorème du viriel	1219
H_{XI}	Exercices	1231

XII	APPLICATION DE LA THÉORIE DES PERTURBATIONS : STRUCTURE FINE ET HYPERFINE DE L'ATOME D'HYDROGÈNE	1241
A	Introduction	1241
B	Termes supplémentaires dans l'hamiltonien	1243
C	Structure fine du niveau $n = 2$	1249
D	Structure hyperfine du niveau $n = 1$	1256

E	Effet Zeeman de structure hyperfine du niveau fondamental $1s$	1262
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS		1277
A_{XII} Hamiltonien hyperfin magnétique		1279
1	Interaction de l'électron avec les potentiels scalaire et vecteur créés par le proton	1279
2	Forme détaillée de l'hamiltonien hyperfin	1280
3	Conclusion : hamiltonien de structure hyperfine	1285
B_{XII} Calcul des valeurs moyennes de l'hamiltonien de structure fine dans les états $1s$, $2s$ et $2p$		1289
1	Calcul de $\langle 1/R \rangle$, $\langle 1/R^2 \rangle$ et $\langle 1/R^3 \rangle$	1289
2	Valeurs moyennes $\langle W_{mv} \rangle$	1291
3	Valeurs moyennes $\langle W_D \rangle$	1292
4	Calcul du coefficient ξ_{2p} associé à W_{SO} dans le niveau $2p$	1292
C_{XII} Structure hyperfine et effet Zeeman du muonium et du positronium		1293
1	Structure hyperfine du niveau fondamental $1s$	1293
2	Effet Zeeman du niveau fondamental $1s$	1294
D_{XII} Influence du spin électronique sur l'effet Zeeman de la raie de résonance de l'hydrogène		1301
1	Introduction	1301
2	Diagrammes Zeeman des niveaux $1s$ et $2s$	1302
3	Diagramme Zeeman du niveau $2p$	1302
4	Effet Zeeman de la raie de résonance	1305
E_{XII} Effet Stark de l'atome d'hydrogène		1311
1	Effet Stark du niveau $n = 1$	1311
2	Effet Stark du niveau $n = 2$	1312

XIII MÉTHODES D'APPROXIMATION POUR LES PROBLÈMES DÉPENDANT DU TEMPS		1315
A	Position du problème	1316
B	Résolution approchée de l'équation de Schrödinger	1317
C	Cas particulier important : perturbation sinusoïdale ou constante	1321
D	Perturbation aléatoire	1332
E	Comportement aux temps longs pour un atome à deux niveaux	1336
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS		1349
A_{XIII} Interaction d'un atome avec une onde électromagnétique		1351
1	Hamiltonien d'interaction. Règles de sélection	1352
2	Excitation non résonnante. Comparaison avec le modèle de l'électron élastiquement lié	1362
3	Excitation résonnante. Absorption et émission induite	1365

B_{XIII}	Réponses linéaire et non linéaire d'un système à deux niveaux soumis a une perturbation sinusoïdale	1369
1	Description du modèle	1370
2	Résolution approchée des équations de Bloch du système	1373
3	Discussion physique	1376
4	Exercices d'application de ce complément	1385
C_{XIII}	Oscillations d'un système entre deux états discrets sous l'effet d'une perturbation sinusoïdale résonnante	1387
1	Principe de la méthode : approximation séculaire	1387
2	Résolution du système d'équations	1388
3	Discussion physique	1389
D_{XIII}	Désintégration d'un état discret couplé à un continuum d'états finals	1391
1	Position du problème	1391
2	Description du modèle considéré	1392
3	Approximation des temps courts. Lien avec la théorie des perturbations au premier ordre	1396
4	Une autre méthode de résolution approchée de l'équation de Schrödinger	1398
5	Discussion physique	1399
E_{XIII}	Perturbation aléatoire dépendant du temps, relaxation	1405
1	Evolution de l'opérateur densité	1406
2	Relaxation d'un ensemble de spins 1/2	1414
3	Conclusion	1424
F_{XIII}	Exercices	1425

XIV	SYSTÈMES DE PARTICULES IDENTIQUES	1435
A	Position du problème	1436
B	Opérateurs de permutation	1442
C	Le postulat de symétrisation	1451
D	Discussion physique	1460
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS		1473
A_{XIV}	Atomes à plusieurs électrons. Configurations électroniques	1475
1	L'approximation du champ central	1475
2	Configurations électroniques des divers éléments	1479
B_{XIV}	Niveaux d'énergie de l'atome d'Hélium : configurations, termes, multiplets	1483
1	Approximation du champ central. Configurations	1483
2	Effet de la répulsion électrostatique entre électrons : énergie d'échange, termes spectraux	1486
3	Niveaux de structure fine; multiplets	1494

C_{XIV}	Propriétés physiques d'un gaz d'électrons. Application aux solides	1499
1	Electrons libres enfermés dans une "boîte"	1499
2	Electrons dans les solides	1509
D_{XIV}	Exercices	1515

	APPENDICES	1525
I	Séries de Fourier et transformation de Fourier	1525
1	Séries de Fourier	1525
2	Transformation de Fourier	1528
II	La "fonction" δ de Dirac	1535
1	Introduction; principales propriétés	1535
2	La "fonction" δ et la transformation de Fourier	1540
3	Primitive et dérivées de la "fonction" δ	1541
4	La "fonction" δ dans l'espace à trois dimensions	1544
III	Lagrangien et Hamiltonien en mécanique classique	1547
1	Rappel des lois de Newton	1547
2	Fonction de Lagrange et équations de Lagrange	1550
3	Fonction de Hamilton et équations canoniques	1551
4	Exemples d'application du formalisme hamiltonien	1553
5	Principe de moindre action	1559
	BIBLIOGRAPHIE DES TOMES I ET II	1565
	INDEX	1587

Tome III

XV OPÉRATEURS DE CRÉATION ET D'ANNIHILATION POUR DES PARTICULES IDENTIQUES	1607
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	1635
A _{XV} Particules et trous	1639
B _{XV} Gaz parfait en équilibre thermique; fonctions de distribution quantiques	1643
C _{XV} Systèmes de bosons condensés, équation de Gross-Pitaevskii	1663
D _{XV} Équation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps	1679
E _{XV} Systèmes de fermions, approximation de Hartree-Fock	1701
F _{XV} Fermions, Hartree-Fock dépendant du temps	1727
G _{XV} Fermions ou bosons : équilibre thermique en champ moyen	1737
H _{XV} Applications de la méthode du champ moyen à température non nulle	1761

XVI OPÉRATEUR CHAMP	1779
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	1797
A _{XVI} Corrélations spatiales dans un gaz parfait de bosons ou de fermions	1799
B _{XVI} Fonctions de corrélation, fonctions de Green	1811
C _{XVI} Théorème de Wick	1831

XVII ÉTATS APPARIÉS DE PARTICULES IDENTIQUES	1843
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	1877
A _{XVII} Opérateur champ de paires de particules identiques	1879
B _{XVII} Energie moyenne dans un état apparié	1903
C _{XVII} Appariement de fermions, théorie BCS	1923
D _{XVII} Paires de Cooper	1963

E _{XVII} Bosons répulsifs condensés	1969

XVIII RAPPELS D'ÉLECTRODYNAMIQUE CLASSIQUE	1993
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	2013
A _{XVIII} Formulation lagrangienne de l'électrodynamique	2015

XIX QUANTIFICATION DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE	2033
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	2055
A _{XIX} Echanges d'impulsion entre atomes et photons	2057
B _{XIX} Moment cinétique du rayonnement	2083
C _{XIX} Echanges de moment cinétique entre atomes et photons	2097

XX ABSORPTION, ÉMISSION, ET DIFFUSION DE PHOTONS PAR UN ATOME	2109
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	2139
A _{XX} Exemple de processus multiphotonique : absorption à deux photons	2141
B _{XX} Photo-ionisation	2153
C _{XX} Atome à deux niveaux dans un champ monochromatique. Méthode de l'atome habillé	2173
D _{XX} Les déplacements lumineux : un outil pour manipuler les atomes et le champ	2197
E _{XX} Détection de paquets d'ondes à un ou deux photons, interfé- rences	2209

XXI INTRICATION QUANTIQUE, MESURES, INÉGALITÉS DE BELL	2235
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	2263
A _{XXI} Opérateur densité et corrélations ; séparabilité	2265