

tr

Mécanique quantique

Le présent tome traite de la mécanique quantique non relativiste. Il comprend, outre ses fondements, de multiples applications de la mécanique quantique dans une plus large mesure que dans les cours généraux.

Dans leur exposé des questions générales, les auteurs dégagent au maximum l'essence physique de la théorie, à partir de laquelle ils développent l'appareil mathématique.

Contrairement au schéma habituel allant des théorèmes mathématiques relatifs aux opérateurs linéaires, les auteurs déduisent les exigences mathématiques auxquelles doivent répondre les opérateurs et les fonctions propres à partir de la position physique du problème.

Des compléments mathématiques sont donnés en appendice.

ISBN 5-03-000199-9

ISBN 5-03-000197-2

L.LANDAU
E.LIFCHITZ

Mécanique quantique

3

438/L

L.LANDAU
E.LIFCHITZ

Physique théorique

TOME

3

Mécanique quantique

ÉDITIONS MIR MOSCOU

tr

**L.LANDAU
E.LIFCHITZ**

Physique théorique

En 10 tomes

Tome 3

**L.LANDAU
E.LIFCHITZ**

Mécanique quantique

3^e édition

remaniée et complétée
avec la participation
de L.PITAYEVSKI



ÉDITIONS MIR MOSCOU

Л.Д. ЛАНДАУ и Е.М. ЛИФШИЦ
Теоретическая физика в 10 томах

Том III
Квантовая механика
Нерелятивистская теория

Издание третье,
переработанное и дополненное
при участии Л. Питаевского

Издательство "Наука"
Москва

Traduit du russe
par ÉDOUARD GLOUKHIAN

Première édition 1966
Deuxième édition 1967
Troisième édition 1975
Réimpression 1980
Réimpression 1988

На французском языке

Imprimé en Union Soviétique

© Главная редакция физико – математической
литературы издательства "Наука", 1974,
с изменениями

© traduction française, Editions Mir 1975

ISBN 5-03-000199-9
ISBN 5-03-000197-2

EXTRAIT DE LA PRÉFACE DE LA PREMIÈRE ÉDITION RUSSE

Le présent tome du cours de Physique théorique est consacré à la mécanique quantique. Vu l'abondance des matériaux, il nous a semblé bon de les diviser en deux parties. La première, ici publiée, traite de la théorie non relativiste, la théorie relativiste constituant la deuxième.

Par théorie relativiste nous entendons, au sens le plus large, la théorie de tous les phénomènes quantiques qui dépendent essentiellement de la vitesse de la lumière. Partant, elle impliquera non seulement la théorie relativiste de Dirac et les questions qui en relèvent, mais aussi la théorie quantique du rayonnement tout entière.

Concurremment aux fondements de la mécanique quantique, nous avons exposé ses nombreuses applications avec beaucoup plus d'ampleur qu'il n'est d'usage dans les cours généraux de mécanique quantique. Seules sont restées en marge les questions dont l'étude relève d'une analyse détaillée de données expérimentales, ce qui sortirait du cadre de ce livre.

Nous nous sommes efforcés d'être le plus complets possible dans l'exposé des questions concrètes. Ceci étant, nous avons jugé superflus les renvois aux ouvrages originaux, nous bornant à indiquer leurs auteurs.

Ainsi que dans les tomes précédents, nous avons aussi cherché à exposer les questions générales de façon à dégager avec le maximum de clarté l'essence physique de la théorie et à édifier sur cette base l'appareil mathématique. Ceci a laissé sa marque sur les premiers paragraphes du livre, qui traitent des propriétés quantomécaniques générales des opérateurs. Contrairement au schéma d'exposition usuel partant de théorèmes mathématiques sur les opérateurs linéaires, nous déduisons les exigences mathématiques imposées aux opérateurs et aux fonctions propres en partant de la position physique de la question.

Force est de remarquer que dans maints cours de mécanique quantique l'exposé s'est notablement compliqué en comparaison des ouvrages originaux. Bien qu'une telle complication soit habituellement motivée par la généralité et la rigueur, un examen attentif montre que l'une et l'autre sont en réalité souvent illusoire à tel point qu'une bonne partie de ces théorèmes « rigoureux » est fausse. Une telle complication nous paraissant absolument injustifiée, nous avons, au contraire, tenu à la simplicité et souvent sommes revenus aux ouvrages d'origine.

Certains renseignements purement mathématiques ont été reportés en appendice sous forme de « Compléments mathématiques » pour découper le moins possible l'exposé par des calculs. Ces « Compléments » poursuivent aussi un but documentaire.

Moscou, mai 1947

L. Landau, E. Lifchitz

AVANT-PROPOS DE LA TROISIÈME ÉDITION RUSSE

L'édition précédente de ce tome est le dernier livre auquel il m'a été donné de travailler avec mon maître L. Landau. Un travail considérable a été fait alors pour remanier et compléter le livre en tous ses chapitres.

Il est donc naturel que cette réédition ait exigé un remaniement moindre. Néanmoins, un volume important de matériaux nouveaux (en partie sous forme de problèmes) a été ajouté ; ces matériaux concernent tant les résultats des dernières années que des résultats plus anciens qui sont ces derniers temps l'objet d'une attention accrue.

La maîtrise phénoménale de l'appareil de la physique théorique que possédait Lev Landau lui permettait à tout instant de se passer des travaux d'origine et de reproduire tels ou tels résultats par sa propre voie. Ceci peut expliquer l'absence dans le livre de certaines références nécessaires. Je me suis efforcé dans cette édition de les ajouter. Dans le même temps, j'ai ajouté les références à L. Landau là où sont exposés les résultats ou les méthodes qui lui appartiennent en personne et qui n'étaient pas publiés indépendamment.

Ainsi que dans mon travail de réédition des autres tomes de ce Cours, j'ai joui de l'aide de mes nombreux camarades, qui m'ont indiqué les défauts d'exposé auparavant commis et suggéré d'introduire tels compléments. Un certain nombre d'indications utiles, dont j'ai tenu compte dans ce livre, m'ont été fournies par A. Brodski, G. Droukarev, I. Kaplan, V. Kraïnov, I. Lévinson, P. Némirovski, V. Pokrovski, I. Sobelman, I. Chapiro ; à tous j'exprime ici ma gratitude.

Le travail tout entier de la nouvelle édition de ce tome a été fait par moi avec la participation immédiate de L. Pitayevski. J'ai eu la chance de trouver en sa personne un compagnon de travail formé à l'école de Lev Landau et inspiré par les mêmes idéaux scientifiques.

Moscou, novembre 1973

E. Lifchitz

TABLE DES MATIÈRES

Extrait de la préface de la première édition russe	5
Avant-propos de la troisième édition russe	7
Quelques notations	8
CHAPITRE PREMIER. NOTIONS FONDAMENTALES DE MÉCANIQUE QUANTIQUE	9
§ 1. Principe d'incertitude	9
§ 2. Principe de superposition	15
§ 3. Opérateurs	17
§ 4. Addition et multiplication des opérateurs	23
§ 5. Spectre continu	26
§ 6. Passage à la limite	30
§ 7. Fonction d'onde et mesures	32
CHAPITRE II. ÉNERGIE ET IMPULSION	37
§ 8. Hamiltonien	37
§ 9. Dérivation des opérateurs par rapport au temps	38
§ 10. Etats stationnaires	40
§ 11. Matrices	43
§ 12. Transformation des matrices	49
§ 13. Opérateurs en représentation d'Heisenberg	51
§ 14. Matrice de densité	53
§ 15. Impulsion	56
§ 16. Relation d'incertitude	61
CHAPITRE III. ÉQUATION DE SCHRÖDINGER	65
§ 17. Equation de Schrödinger	65
§ 18. Principales propriétés de l'équation de Schrödinger	68
§ 19. Densité de courant	71
§ 20. Principe variationnel	74
§ 21. Propriétés générales du mouvement à une dimension	76
§ 22. Puits de potentiel	80

§ 23. Oscillateur linéaire	85
§ 24. Mouvement dans un champ uniforme	93
§ 25. Coefficient de transmission	95
CHAPITRE IV. MOMENT CINÉTIQUE	102
§ 26. Moment cinétique	102
§ 27. Valeurs propres du moment	106
§ 28. Fonctions propres du moment	111
§ 29. Eléments matriciels de vecteurs	114
§ 30. Parité d'état	118
§ 31. Addition de moments	121
CHAPITRE V. MOUVEMENT DANS UN CHAMP CENTRAL SYMÉTRIQUE	125
§ 32. Mouvement dans un champ central symétrique	125
§ 33. Ondes sphériques	129
§ 34. Développement d'une onde plane	136
§ 35. Chute d'une particule sur un centre	139
§ 36. Mouvement dans un champ coulombien (coordonnées sphériques)	142
§ 37. Mouvement dans un champ coulombien (coordonnées paraboliques)	154
CHAPITRE VI. THÉORIE DES PERTURBATIONS	158
§ 38. Perturbations indépendantes du temps	158
§ 39. Equation séculaire	164
§ 40. Perturbations dépendant du temps	168
§ 41. Transitions sous l'influence d'une perturbation agissant pendant un laps de temps fini	172
§ 42. Transitions sous l'influence d'une perturbation périodique	178
§ 43. Transitions dans le spectre continu	181
§ 44. Relation d'incertitude pour l'énergie	184
§ 45. L'énergie potentielle en tant que perturbation	187
CHAPITRE VII. CAS QUASI CLASSIQUE	193
§ 46. La fonction d'onde dans le cas quasi classique	193
§ 47. Conditions aux limites dans le cas quasi classique	197
§ 48. Règle de quantification de Bohr-Sommerfeld	200
§ 49. Mouvement quasi classique dans un champ central symétrique	206
§ 50. Franchissement d'une barrière de potentiel	210
§ 51. Calcul des éléments matriciels quasi classiques	217
§ 52. Probabilité de transition dans le cas quasi classique	221
§ 53. Transitions sous l'influence de perturbations adiabatiques	227
CHAPITRE VIII. SPIN	231
§ 54. Spin	231
§ 55. Opérateur du spin	236
§ 56. Spineurs	239
§ 57. Fonctions d'onde des particules de spin quelconque	244

§ 58. Opérateur des rotations finies	250
§ 59. Polarisation partielle des particules	256
§ 60. Inversion du temps et théorème de Kramers	258
CHAPITRE IX. IDENTITÉ DES PARTICULES	262
§ 61. Principe d'indiscernabilité de particules identiques	262
§ 62. Interaction d'échange	265
§ 63. Symétrie dans les permutations	270
§ 64. Seconde quantification. Cas de la statistique de Bose	279
§ 65. Seconde quantification. Statistique de Fermi	285
CHAPITRE X. L'ATOME	289
§ 66. Niveaux énergétiques de l'atome	289
§ 67. Etats des électrons dans l'atome	290
§ 68. Niveaux d'énergie hydrogénoïdes	295
§ 69. Champ self-consistent	296
§ 70. Equation de Thomas-Fermi	300
§ 71. Fonctions d'onde des électrons périphériques au voisinage du noyau	307
§ 72. Structure fine des niveaux atomiques	308
§ 73. Système périodique des éléments de Mendéléev	313
§ 74. Termes X	321
§ 75. Moments multipolaires	323
§ 76. Atome dans un champ électrique	328
§ 77. Atome de l'hydrogène dans un champ électrique	333
CHAPITRE XI. MOLÉCULE DIATOMIQUE	345
§ 78. Termes électroniques d'une molécule diatomique	345
§ 79. Intersection de termes électroniques	348
§ 80. Lien entre termes moléculaires et atomiques	352
§ 81. Valence	356
§ 82. Structures oscillatoire et rotatoire des termes singulets de la molécule diatomique	363
§ 83. Termes multiplets. Cas <i>a</i>	370
§ 84. Termes multiplets. Cas <i>b</i>	374
§ 85. Termes multiplets. Cas <i>c</i> et <i>d</i>	378
§ 86. Symétrie des termes moléculaires.	381
§ 87. Eléments matriciels de la molécule diatomique	384
§ 88. Dédoublément Λ	388
§ 89. Interaction des atomes aux grandes distances	391
§ 90. Prédissociation	396
CHAPITRE XII. THÉORIE DE LA SYMÉTRIE	409
§ 91. Transformations de symétrie	409
§ 92. Groupes de transformations	412
§ 93. Groupes ponctuels	416

§ 94. Représentations des groupes	424
§ 95. Représentations irréductibles des groupes ponctuels	432
§ 96. Représentations irréductibles et classification des termes	437
§ 97. Règles de sélection des éléments matriciels	440
§ 98. Groupes continus	444
§ 99. Représentations binaires des groupes ponctuels finis	449
CHAPITRE XIII. MOLÉCULES POLYATOMIQUES.	454
§ 100. Classification des vibrations moléculaires	454
§ 101. Niveaux d'énergie vibratoires	461
§ 102. Stabilité des configurations symétriques d'une molécule	464
§ 103. Quantification de la rotation d'une toupie	470
§ 104. Interaction des vibrations et de la rotation d'une molécule	480
§ 105. Classification des termes moléculaires	485
CHAPITRE XIV. ADDITION DE MOMENTS	495
§ 106. Symboles $3j$	495
§ 107. Eléments matriciels de tenseurs	504
§ 108. Symboles $6j$	508
§ 109. Eléments matriciels dans l'addition des moments	515
§ 110. Eléments matriciels pour les systèmes à symétrie axiale	517
CHAPITRE XV. MOUVEMENT DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE	520
§ 111. Equation de Schrödinger dans un champ magnétique	520
§ 112. Mouvement dans un champ magnétique uniforme	524
§ 113. Atome dans un champ magnétique	529
§ 114. Le spin dans un champ magnétique variable	537
§ 115. Densité de courant dans un champ magnétique	539
CHAPITRE XVI. STRUCTURE DU NOYAU ATOMIQUE	542
§ 116. Invariance isotopique	542
§ 117. Forces nucléaires	547
§ 118. Modèle en couches	553
§ 119. Noyaux asphériques	563
§ 120. Déplacement isotopique	569
§ 121. Structure hyperfine des niveaux atomiques	571
§ 122. Structure hyperfine des niveaux moléculaires	574
CHAPITRE XVII. COLLISIONS ÉLASTIQUES	578
§ 123. Théorie générale de la diffusion	578
§ 124. Etude de la formule générale	582
§ 125. Condition d'unitarité de la diffusion	585
§ 126. Formule de Born	589
§ 127. Cas quasi classique	597
§ 128. Propriétés analytiques de l'amplitude de diffusion	602
§ 129. Relation de dispersion.	608

§ 130. Amplitude de diffusion en représentation des impulsions . . .	611
§ 131. Diffusion aux grandes énergies	615
§ 132. Diffusion de particules lentes	622
§ 133. Diffusion résonnante aux petites énergies	629
§ 134. Résonance sur un niveau quasi discret	637
§ 135. Formule de Ruthierford	643
§ 136. Système de fonctions d'onde du spectre continu	647
§ 137. Collisions de particules identiques	651
§ 138. Diffusion résonnante de particules chargées	654
§ 139. Collisions élastiques d'électrons rapides et d'atomes	659
§ 140. Diffusion en interaction spin-orbite	664
§ 141. Pôles de Regge	670
CHAPITRE XVIII. COLLISIONS INÉLASTIQUES	677
§ 142. Diffusion élastique en présence de processus inélastiques . . .	677
§ 143. Diffusion inélastique de particules lentes	683
§ 144. Matrice de diffusion en présence de réactions	686
§ 145. Formules de Breit et Wigner	691
§ 146. Interaction dans l'état final lors de réactions	700
§ 147. Allure des sections au voisinage du seuil de réaction	703
§ 148. Collisions inélastiques d'électrons rapides avec des atomes . . .	710
§ 149. Freinage efficace	721
§ 150. Collisions inélastiques de particules lourdes et d'atomes . . .	725
§ 151. Diffusion de neutrons	728
§ 152. Diffusion inélastique aux grandes énergies	733
APPENDICE. COMPLÈMENTS MATHÉMATIQUES	740
§ a. Polynômes d'Hermite	740
§ b. Fonction d'Airy	743
§ c. Polynômes de Legendre	746
§ d. Fonction hypergéométrique dégénérée	748
§ e. Fonction hypergéométrique	752
§ f. Calcul d'intégrales contenant des fonctions hypergéométriques dégénérées	755
INDEX	759

A NOS LECTEURS

Les Editions Mir vous seraient très reconnaissantes de bien vouloir leur communiquer votre opinion sur la traduction et la présentation de ce livre, ainsi que toute autre suggestion que vous voudriez formuler.

Ecrire à l'adresse :

2, Pervi Rijski péréoulouk,
Moscou, I-110, GSP, U.R.S.S.