

В. Г. ЛЕВИЧ  
Ю. А. ВДОВИН  
В. А. МЯМЛИН

**Курс**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
ФИЗИКИ**

**Том II**



В. Г. ЛЕВИЧ, Ю. А. ВДОВИН, В. А. МЯМЛИН

# КУРС ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Том II

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА. КВАНТОВАЯ  
СТАТИСТИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ  
КИНЕТИКА

Под редакцией чл.-корр. АН СССР В. Г. ЛЕВИЧА

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ

*Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР  
в качестве учебного пособия для студентов физико-технических специальностей  
высших учебных заведений.*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1971

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию . . . . .	9
--	---

### ЧАСТЬ V

### КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Глава I. Основы квантовой механики . . . . .	11
§ 1. Физические основы квантовой механики . . . . .	11
§ 2. Волновая функция . . . . .	18
§ 3. Принцип суперпозиции. Разложение по плоским волнам . . . . .	24
§ 4. Соотношения неопределенности и связь квантовой механики с классической . . . . .	28
§ 5. Принцип причинности в квантовой механике . . . . .	32
Глава II. Уравнение Шредингера . . . . .	35
§ 6. Волновое уравнение Шредингера . . . . .	35
§ 7. Плотность потока вероятности . . . . .	39
§ 8. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме . . . . .	41
§ 9. Частица в трехмерной прямоугольной потенциальной яме . . . . .	45
§ 10. Линейный осциллятор . . . . .	46
§ 11. Трехмерный осциллятор . . . . .	51
§ 12. Отражение и прохождение через потенциальный барьер . . . . .	53
§ 13. Одномерное движение . . . . .	59
§ 14. Уравнение Шредингера для системы частиц . . . . .	63
Глава III. Математический аппарат квантовой механики . . . . .	67
§ 15. Линейные операторы . . . . .	67
§ 16. Собственные значения и собственные функции операторов . . . . .	71
§ 17. Эрмитовы операторы . . . . .	73
§ 18. Ортогональность и нормировка собственных функций эрмитовых операторов . . . . .	76
§ 19. Разложение по собственным функциям . . . . .	78
§ 20. Квантовомеханические величины и операторы . . . . .	80
§ 21. Волновая функция и вероятность результатов измерений . . . . .	82
§ 22. Средние значения . . . . .	84
§ 23. Коммутация операторов . . . . .	87
§ 24. Неравенства Гейзенберга . . . . .	91
§ 25. Скобки Пуассона . . . . .	92
§ 26. Операторы и собственные функции координаты и импульса . . . . .	95
§ 27. Оператор Гамильтона . . . . .	100
§ 28. Стационарные состояния . . . . .	102
§ 29. Интегральная форма уравнения Шредингера . . . . .	104
§ 30. Собственные значения и собственные функции операторов момента и квадрата момента . . . . .	109

§ 31. Дифференцирование операторов по времени . . . . .	115
§ 32. Интегралы движения . . . . .	118
§ 33. Четность . . . . .	121
§ 34. Соотношение неопределенности для времени и энергии . . . . .	124
<b>Глава IV. Движение в поле с центральной симметрией . . . . .</b>	<b>128</b>
§ 35. Уравнение Шредингера . . . . .	128
§ 36. Свободное движение частицы с заданным моментом количества движения . . . . .	136
§ 37. Сферическая яма . . . . .	137
§ 38. Движение в кулоновском поле . . . . .	140
<b>Глава V. Квазиклассическое приближение . . . . .</b>	<b>149</b>
§ 39. Предельный переход к классической механике . . . . .	149
§ 40. Решение уравнения Шредингера вблизи точки поворота . . . . .	154
§ 41. Движение в потенциальной яме в квазиклассическом приближении . . . . .	158
§ 42. Прохождение через потенциальный барьер . . . . .	161
§ 43. Квазиклассическое движение в центрально-симметричном поле . . . . .	165
<b>Глава VI. Матричная форма квантовой механики . . . . .</b>	<b>167</b>
§ 44. Операторы и матрицы . . . . .	167
§ 45. Основы матричного исчисления . . . . .	170
§ 46. Геометрическая интерпретация волновой функции и канонические преобразования . . . . .	178
§ 47. Собственные функции и собственные значения оператора, заданного в матричной форме . . . . .	181
§ 48. Непрерывные матрицы. Обозначения Дирака . . . . .	184
§ 49. Представления Шредингера, Гейзенберга и представление взаимодействия . . . . .	191
§ 50. Линейный осциллятор (матричное представление) . . . . .	197
§ 51. Матричные элементы оператора момента . . . . .	200
§ 52. Сложение моментов количества движения . . . . .	205
<b>Глава VII. Теория возмущений . . . . .</b>	<b>210</b>
§ 53. Теория возмущений, не зависящих от времени . . . . .	210
§ 54. Теория возмущений при наличии вырождения . . . . .	214
§ 55. Теория нестационарных возмущений . . . . .	220
§ 56. Переход системы в новые состояния под влиянием возмущений . . . . .	222
§ 57. Адиабатическая теория возмущений . . . . .	230
§ 58. Теория возмущений в интегральной форме . . . . .	232
<b>Глава VIII. Спин и тождественность частиц . . . . .</b>	<b>234</b>
§ 59. Спин элементарных частиц . . . . .	234
§ 60. Операторы спина . . . . .	236
§ 61. Собственные функции операторов проекций спина частиц. Матрица поворота . . . . .	240
§ 62. Полный момент количества движения . . . . .	247
§ 63. Уравнение Паули. Вектор плотности потока вероятности . . . . .	250
§ 64. Тождественность частиц. Принцип тождественности частиц. Симметричные и антисимметричные состояния . . . . .	253
§ 65. Волновые функции для системы фермионов и бозонов. Принцип Паули . . . . .	257
§ 66. Волновая функция системы из двух тождественных частиц со спином $1/2$ . . . . .	260
§ 67. Обменное взаимодействие и понятие о химическом и сильном ядерном взаимодействии . . . . .	263

Глава IX. Приложения квантовой механики к рассмотрению свойств атомных и ядерных систем . . . . .	275
§ 68. Атом гелия . . . . .	275
§ 69. Вариационный принцип . . . . .	279
§ 70. Метод самосогласованного поля (метод Хартри—Фока) . . . . .	281
§ 71. Статистическая модель атома . . . . .	285
§ 72. Квантовые числа, характеризующие состояния электронов в атомах . . . . .	291
§ 73. Периодическая система элементов . . . . .	297
§ 74. Эффект Зеемана . . . . .	306
§ 75. Эффект Пашена—Бака и диамагнетизм атомов . . . . .	311
§ 76. Теория дейтона . . . . .	313
§ 77. Теория ядерных оболочек . . . . .	318
Глава X. Теория двухатомных молекул . . . . .	321
§ 78. Адиабатическое приближение и классификация электронных термов . . . . .	321
§ 79. Молекула водорода и понятие о теории химической связи . . . . .	324
§ 80. Взаимодействие атомов на больших расстояниях . . . . .	331
§ 81. Сопоставление молекулярных термов с атомными . . . . .	334
§ 82. Вращение и колебания молекул . . . . .	336
Глава XI. Теория рассеяния . . . . .	342
§ 83. Амплитуда и сечение рассеяния . . . . .	342
§ 84. Формула Борна . . . . .	346
§ 85. Рассеяние быстрых заряженных частиц атомами . . . . .	351
§ 86. Фазовая теория рассеяния . . . . .	353
§ 87. Рассеяние сферической потенциальной ямой (понятие о резонансном рассеянии) . . . . .	359
§ 88. Упругое рассеяние тождественных частиц . . . . .	363
§ 89. Учет поляризации в процессах рассеяния . . . . .	367
§ 90. Переход к классическому пределу в квантовых формулах рассеяния . . . . .	373
§ 91. Общая теория неупругого рассеяния и поглощения частиц . . . . .	379
§ 92. Дифракционное рассеяние быстрых нейтронов ядрами . . . . .	385
§ 93. Рассеяние медленных частиц. Пороговое приближение . . . . .	388
§ 94. Формула Брейта—Вигнера . . . . .	390
§ 95. Матрица рассеяния ( $S$ -матрица) . . . . .	395
§ 96. $S$ -матрица и теория возмущений . . . . .	401
§ 97. Аналитические свойства $S$ -матрицы . . . . .	404
§ 98. Обращение времени и принцип детального равновесия . . . . .	410
Глава XII. Метод вторичного квантования и теория излучения . . . . .	415
§ 99. Вторичное квантование для систем бозе- и ферми-частиц . . . . .	415
§ 100. Квантовая механика фотона . . . . .	423
§ 101. Квантование поля излучения . . . . .	427
§ 102. Взаимодействие электрона с излучением . . . . .	430
§ 103. Поглощение и излучение света . . . . .	433
§ 104. Дипольные переходы в атомных системах . . . . .	436
§ 105. Квадрупольное и магнитное дипольное излучения . . . . .	438
§ 106. Правила отбора . . . . .	439
§ 107. Фотоэффект . . . . .	442
§ 108. Рассеяние света атомами . . . . .	445
§ 109. Теория естественной ширины линии . . . . .	451

Глава XIII. Релятивистская квантовая механика . . . . .	456
§ 110. Релятивистское волновое уравнение для частицы со спином нуль . . . . .	456
§ 111. Плотность заряда и поток вероятности для частиц со спином нуль . . . . .	458
§ 112. Понятие о поле ядерных сил . . . . .	460
§ 113. Уравнение Дирака . . . . .	464
§ 114. Плотность вероятности и поток вероятности в теории Дирака . . . . .	469
§ 115. Решение уравнения Дирака для свободной частицы . . . . .	471
§ 116. Понятие о позитроне . . . . .	474
§ 117. Спин частиц, описываемых уравнением Дирака . . . . .	479
§ 118. Переход от уравнения Дирака к уравнению Паули и магнитный момент частицы . . . . .	481
§ 119. Атом водорода в теории Дирака . . . . .	484
§ 120. Инвариантность уравнения Дирака по отношению к отражению, повороту и лоренцеву преобразованию координат . . . . .	486
§ 121. Законы преобразования билинейных комбинаций, составленных из волновых функций . . . . .	489
§ 122. Понятие о слабых взаимодействиях. Несохранение четности . . . . .	491
§ 123. Теория двухкомпонентного нейтрино. Универсальное четырехфермионное взаимодействие . . . . .	496
Глава XIV. Некоторые вопросы квантовой электродинамики . . . . .	503
§ 124. Функция Грина уравнения Дирака . . . . .	503
§ 125. Функция Грина для системы из двух частиц . . . . .	509
§ 126. Диаграммы Фейнмана . . . . .	513
§ 127. Комптон-эффект . . . . .	519
§ 128. Смещение термов атома водорода под влиянием поля вакуума (лэмбовское смещение) . . . . .	527
Глава XV. Основы теории элементарных частиц . . . . .	532
§ 129. Элементарные частицы и их свойства . . . . .	532
§ 130. Типы взаимодействий элементарных частиц . . . . .	535
§ 131. Группы симметрии в квантовой механике . . . . .	538
§ 132. Изогруппа $SU(2)$ и ее представления . . . . .	543
§ 133. Изомультиплеты элементарных частиц . . . . .	548
§ 134. Волновые функции системы нуклонов и $\pi$ -мезонов . . . . .	554
§ 135. Изотопически-инвариантное взаимодействие . . . . .	558
§ 136. Рассеяние нуклонов и $\pi$ -мезонов . . . . .	561
§ 137. Унитарная группа $SU(3)$ и ее представления . . . . .	567
§ 138. Восьмеричный формализм и унитарные мультиплеты . . . . .	572
§ 139. Некоторые следствия строгой унитарной симметрии . . . . .	577
§ 140. Понятие о нарушенной унитарной симметрии . . . . .	582
§ 141. Составные модели в схеме унитарной симметрии. Кварки . . . . .	586
§ 142. Общая оценка унитарной симметрии . . . . .	590
ЧАСТЬ VI	
<b>КВАНТОВАЯ СТАТИСТИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА</b>	
Глава I. Квантовая статистика . . . . .	596
§ 1. Статистическая матрица и статистический оператор . . . . .	596
§ 2. Статистическое распределение в квантовой статистике . . . . .	600
§ 3. Статистическое распределение в идеальном газе . . . . .	609

§ 4. Вырожденный идеальный бозе-газ . . . . .	612
§ 5. Неидеальный бозе-газ. Сверхтекучесть . . . . .	617
<b>Глава II. Физическая кинетика . . . . .</b>	<b>626</b>
§ 6. Постановка проблемы . . . . .	626
§ 7. Закон сохранения массы и диффузионный поток . . . . .	629
§ 8. Закон сохранения импульса и уравнения движения сплошной среды . . . . .	633
§ 9. Закон сохранения энергии и перенос энтропии в движущейся сплошной среде . . . . .	637
§ 10. Уравнения Фоккера — Планка . . . . .	642
§ 11. Основное кинетическое уравнение . . . . .	650
§ 12. Обсуждение основного кинетического уравнения . . . . .	656
§ 13. Неравновесные системы с отрицательной температурой и усиление ими электромагнитных волн . . . . .	660
<b>Глава III. Кинетическая теория газов и газоподобных систем . . . . .</b>	<b>665</b>
§ 14. Кинетическое уравнение Больцмана . . . . .	665
§ 15. Основное кинетическое уравнение для коррелятивной функции . . . . .	670
§ 16. Вывод уравнения Больцмана из основного кинетического уравнения . . . . .	674
§ 17. Обобщенное уравнение переноса и свойства аддитивных инвариантов . . . . .	680
§ 18. Уравнения переноса массы, импульса и энергии . . . . .	633
§ 19. Закон возрастания энтропии . . . . .	687
§ 20. Равновесное и локально равновесное распределение в идеальном газе . . . . .	689
§ 21. Общая теория решения уравнения Больцмана . . . . .	693
§ 22. Уравнения гидродинамики, вязкость и теплопроводность газов . . . . .	700
§ 23. Время релаксации . . . . .	708
§ 24. Диффузия легкой примеси в основном газе . . . . .	711
§ 25. Термодиффузия в газах . . . . .	717
§ 26. Дисперсия звука . . . . .	719
§ 27. Линеаризованное уравнение Больцмана для квазигазовых систем . . . . .	721
§ 28. Решение уравнения Больцмана для квазигазовых систем во внешнем поле сил . . . . .	725
§ 29. Кинетическое уравнение для неоднoатомных газов . . . . .	727
§ 30. Замедление быстрых нейтронов . . . . .	732
§ 31. Пространственное распределение нейтронов . . . . .	741
§ 32. Кинетическое уравнение в плазме без столкновений . . . . .	745
§ 33. Дисперсия и затухание плазменных волн . . . . .	748
§ 34. Кинетическое уравнение в плазме с учетом столкновений . . . . .	756
§ 35. Установление равновесия в электронно-ионной плазме . . . . .	761
<b>Глава IV. Методы временных коррелятивных функций и теория Онзагера . . . . .</b>	<b>765</b>
§ 36. Реакция системы на внешнее динамическое возмущение. Классический расчет . . . . .	765
§ 37. Реакция системы на внешнее динамическое возмущение. Квантовый расчет . . . . .	771
§ 38. Реакция системы на термическое возмущение . . . . .	773
§ 39. Вычисление кинетических коэффициентов и связь с уравнением Больцмана . . . . .	777
§ 40. Теория Онзагера . . . . .	780
§ 41. Следствия из соотношений Онзагера . . . . .	785
§ 42. Неравновесные процессы в однокомпонентной системе . . . . .	788

§ 43. Неравновесные процессы в многокомпонентных системах (диффузия и термодиффузия) . . . . .	790
§ 44. Флуктуационно-диссипативная теорема . . . . .	794
<b>Глава V. Теория твердого тела . . . . .</b>	<b>799</b>
§ 45. Твердое тело как квантово-механическая система . . . . .	799
§ 46. Кристаллическая решетка . . . . .	802
§ 47. Колебания решетки . . . . .	805
§ 48. Волновая функция электрона, движущегося в периодическом поле . . . . .	811
§ 49. Энергетический спектр электрона, движущегося в периодическом поле . . . . .	813
§ 50. Система электронов в твердом теле . . . . .	827
§ 51. Модель металла, полупроводника и диэлектрика . . . . .	835
§ 52. Магнитные свойства металлов. Парамагнетизм электронного газа . . . . .	839
§ 53. Диамагнетизм электронного газа . . . . .	842
§ 54. Ферромагнетизм . . . . .	846
§ 55. Взаимодействие электронов с колебаниями решетки . . . . .	852
§ 56. Полный гамильтониан твердого тела . . . . .	859
<b>Глава VI. Кинетические свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>863</b>
§ 57. Кинетическое уравнение для электронов в металлах . . . . .	863
§ 58. Электропроводность металлов . . . . .	865
§ 59. Эффект Холла . . . . .	868
§ 60. Оптические свойства системы электронов проводимости . . . . .	873
§ 61. Длина свободного пробега электрона в металлах . . . . .	874
§ 62. Интеграл столкновений для электронов в металле . . . . .	881
§ 63. Решение кинетического уравнения . . . . .	884
§ 64. Сверхпроводимость . . . . .	888
§ 65. Теория ферми-жидкости . . . . .	897
§ 66. Электроны в кристаллах диэлектриков . . . . .	903
§ 67. Внешний фотоэффект с поверхности металла . . . . .	907
<b>Глава VII. Взаимодействие излучения с газом свободных электронов . . . . .</b>	<b>912</b>
§ 68. Разреженная плазма в поле низкочастотного излучения . . . . .	912
§ 69. Кинетические уравнения для электронов и фотонов . . . . .	917
§ 70. Кинетика бозе-конденсации фотонного газа . . . . .	922
§ 71. Подвижность электрона в поле излучения . . . . .	925
§ 72. Система электронов в произвольном поле излучения . . . . .	931
§ 73. Обсуждение результатов и области применимости теории . . . . .	933