

В.Г. Левич, Ю.А. Вдовин, В.А. Мямлин

**Курс теоретической
физики**

Том 2

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
В11

В.Г. Левич
В11 Курс теоретической физики: Том 2 / В.Г. Левич, Ю.А. Вдовин, В.А. Мямлин –
М.: Книга по Требованию, 2013. – 936 с.

ISBN 978-5-458-41098-4

Курс теоретической физики. В двух томах. Том 2. Квантовая механика. Квантовая статистика и физическая кинетика. Первое издание книги «Курс теоретической физики» (1962 г.) использовалось в ряде высших учебных заведений в качестве учебного пособия. Полученные многочисленные замечания и пожелания ряда коллег, преподавателей и учащихся, были, по возможности, учтены в процессе подготовки книги к переизданию.

ISBN 978-5-458-41098-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

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	345
§ 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 магнит- ный момент частицы	481
§ 119. Атом водорода в теории Дирака	484
§ 120. Инвариантность уравнения Дирака по отношению к отраже- нию, повороту и лоренцеву преобразованию координат	486
§ 121. Законы преобразования билинейных комбинаций, составлен- ных из волновых функций	489
§ 122. Понятие о слабых взаимодействиях. Несохранение четности	491
§ 123. Теория двухкомпонентного нейтрино. Универсальное четырех- фермионное 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	533
§ 132. Изогруппа $SU(2)$ и ее представления	543
§ 133. Изомультиплеты элементарных частиц	548
§ 134. Волновые функции системы нуклонов и π -мезонов	554
§ 135. Изотопически-инвариантное взаимодействие	558
§ 136. Рассеяние нуклонов и π -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

КВАНТОВАЯ СТАТИСТИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА

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
Глава II. Физическая кинетика	626
§ 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
Глава III. Кинетическая теория газов и газоподобных систем	665
§ 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 вариантов	680
§ 18. Уравнения переноса массы, импульса и энергии	633
§ 19. Закон возрастания энтропии	687
§ 20. Равновесное и локально равновесное распределение в идеальном газе	639
§ 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 неоднородных 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
Глава IV. Методы временных коррелятивных функций и теория Онзагера	765
§ 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
Глава V. Теория твердого тела	799
§ 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
Глава VI. Кинетические свойства твердых тел	863
§ 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
Глава VII. Взаимодействие излучения с газом свободных электронов	912
§ 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

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Быстрое развитие теоретической физики и расширение области ее приложений сделало актуальным такие ее разделы, которые еще несколько лет назад находились в начальной стадии развития. Это определило необходимость существенной переработки второго тома «Курса теоретической физики».

Часть IV, посвященная теории электромагнитного поля в веществе, перемещена в том I. В часть V — квантовую механику включена теория S-матрицы, переработан и написан заново ряд параграфов. В настоящее время «Курс теоретической физики» был бы не полным, если бы в нем не нашло отражение современное состояние теории элементарных частиц. Поэтому часть V завершает глава XV, посвященная основам теории. Естественно, что сложность проблемы и стремление избежать вульгаризации привели к тому, что глава XV потребует от читателя больших усилий для усвоения. Однако для чтения этой главы не требуется какой-либо специальной подготовки.

Во втором издании «Курса теоретической физики» помещена новая, VI часть, «Квантовая статистика и физическая кинетика». Поскольку наиболее актуальные приложения теории связаны с использованием расчетного аппарата квантовой механики, физическая кинетика следует за квантовой механикой.

Часть V, «Квантовая механика», в основном написана Ю. А. Вдовиным и В. А. Мямлиным под общим руководством В. Г. Левича. При этом Ю. А. Вдовиным были написаны главы II, IV, V, VI, VIII, XII и §§ 9, 95, 97, 98; В. А. Мямлиным главы IX, X, XI, XIII. Главы I, III, VII В. Г. Левичем и Ю. А. Вдовиным совместно. Глава XIV совместно Ю. А. Вдовиным и В. А. Мямлиным. В. Г. Левичем написаны §§ 67, 69, 70, 94, 96, 100, 119 и 128. Глава XV «Основы теории элементарных частиц» целиком написана А. И. Наумовым, которому мы выражаем за

это искреннюю благодарность. В. Г. Левичем проведено редактирование всего материала части V. Часть VI — «Квантовая статистика и физическая кинетика» написана В. Г. Левичем кроме §§ 48, 62, 63, написанных В. А. Мямлиным, и §§ 5 и 64, написанных всеми авторами совместно.

В заключение мы хотели бы выразить благодарность всем лицам, помогавшим нам при подготовке этой книги, в особенности В. С. Маркину, В. В. Толмачеву, А. М. Бродскому, Р. Р. Догонадзе, А. М. Головину. И. В. Савельев указал ряд опечаток и неточностей предыдущего издания, которые теперь исправлены.

Л. Д. Конкина помогла в оформлении рукописи.

Замечания читателей и студентов, пользовавшихся первым изданием книги, были для нас очень важны и нашли свое отражение во втором издании.

Авторы

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА**ГЛАВА I****ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ****§ 1. Физические основы квантовой механики**

Квантовая механика, как и всякая физическая теория, возникла в тесной связи с развитием новой области экспериментальных исследований. Эти исследования, начавшиеся с изучения свойств излучения черного тела, в начале нашего века быстро распространились на явление фотоэффекта, а затем на атомные системы. В рамках этой книги мы не можем последовательно осветить всю историю развития новых представлений о характере атомных процессов, имевшую своим итогом создание современной квантовой механики. Укажем лишь, что это были мучительные поиски, потребовавшие огромных усилий крупнейших физиков нашего века. Несомненно, что создание квантовой механики было величайшим триумфом современной науки. Трудности, стоявшие на пути развития квантовой механики, были связаны с тем, что свойства частиц, из которых построены атомные системы, кардинальным образом отличаются от свойств макроскопических тел. Законы классической механики и классической электродинамики оказались непригодными для описания поведения отдельных молекул и атомов, а также элементарных частиц — электронов, протонов, нейтронов и т. д. В дальнейшем элементарные частицы, а иногда отдельные атомы и молекулы мы будем объединять термином микрочастицы. Как мы увидим, отличительной особенностью микрочастиц является то, что их движение не подчиняется законам классической механики. С рядом фактов, свидетельствующих о непригодности классических представлений в области атомных процессов, мы познакомимся выше, в частности в теории электромагнитного поля и особенно в статистической физике. Так, в статистической физике мы видели, что основная величина, характеризующая состояние отдельных атомов и молекул — их энергия, пробегает дискретный ряд значений.

Прямое доказательство дискретности состояний атомных систем было получено в опытах Франка и Герца (1913 г.). Как

известно, в опытах Франка и Герца пучок электронов с заданной энергией поступал в сосуд, наполненный газом. Ток электронов, прошедших через газ, как функция ускоряющего потенциала, обнаруживал ряд резких минимумов. Положение этих минимумов характерно для природы атомов газа. Такая зависимость тока от потенциала может быть истолкована следующим образом. Электроны испытывают столкновения с атомами и передают им энергию в тех случаях, когда энергия электронов имеет определенное значение, равное разности энергий двух возможных состояний атома. При этом атом переходит в состояние с большей энергией — возбужденное состояние, а в величине тока электронов появляется минимум. Если энергия электронов имеет другое значение, они испытывают лишь упругие соударения. Таким образом атом, как целое, может получать извне только определенные порции энергии. Это означает, что энергия атома принимает только дискретный ряд значений или, иначе говоря, атом обладает дискретным спектром энергий. Дискретный характер энергетических состояний влечет за собой дискретный характер атомных переходов. При переходе атома из возбужденного в более низкое энергетическое состояние разность энергий излучается в виде светового кванта.

Энергия атома не единственная величина, которая может принимать лишь дискретные или, как говорят, квантованные значения. В опытах Штерна и Герлаха было показано, что таким же дискретным спектром значений обладает и механический момент атома. В этих опытах пучок атомов проходит через неоднородное магнитное поле \mathcal{H} , постоянное по направлению. Выбирая это направление за ось z , можно написать для силы, действующей на атом, выражение $\mu_z \frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial z}$, где μ_z — проекция магнитного момента атома на направление поля. Если считать, что теорема о пропорциональности между магнитным и механическим моментом (см. ч. I, § 22) справедлива для атомов, то из этого следует, что средняя сила оказывается пропорциональной величине L_z , где L_z — проекция момента количества движения атома на направление поля¹⁾.

Опыт Штерна и Герлаха показал, что пучок атомов отклоняется в магнитном поле, разбиваясь на ряд отдельных пучков. Это означает, что проекция механического момента атома на направление поля может принимать лишь дискретный ряд значений. Каждому допустимому значению L_z отвечает свое значение силы и соответствующая величина отклонения в неоднородном магнитном поле. Таким образом, каждый из возникших пучков содержит атомы с данным значением величины L_z .

¹⁾ См. однако, гл. VIII.

Дискретный характер допустимых значений основных величин, характеризующих состояние атомных систем, глубоко противоречит всей совокупности представлений классической механики. Из общих положений классической механики следует, что бесконечно малая сила вызывает бесконечно малое изменение равновесного состояния системы. Поэтому все механические величины, зависящие от состояния системы, как, например, энергия, количество движения и т. п., являются непрерывными функциями состояния. Дискретность состояний и скачкообразное изменение состояний микрочастиц непосредственно противоречит указанному общему принципу.

Трудность понимания свойств микрочастиц усугубляется тем, что наряду со свойствами дискретности некоторых величин, характеризующих состояние частиц, в ряде опытов проявлялась ясно выраженная непрерывность этих же величин. Так, например, тормозное рентгеновское излучение электронов в поле ядер имеет непрерывный спектр, что свидетельствует о непрерывном изменении энергии излучающих частиц.

Оказалось, что микрочастицы удивительным образом сочетают в себе свойства обычных частиц — корпускул¹⁾ и свойства волн. Это основное свойство микрочастиц носит название корпускулярно-волнового дуализма.

Основной особенностью корпускул, изучаемых в классической механике, является наличие у них определенной пространственной протяженности. Идеализацией корпускулы служит материальная точка, не имеющая размеров и двигающаяся по определенной траектории.

Свойства волновых процессов в классической физике до известной степени являются обратными свойствам корпускулярных объектов. Монохроматическая волна прежде всего обладает бесконечной протяженностью в пространстве. Поэтому лишено смысла утверждение «монохроматическая волна находится в данной точке пространства». Не имеет также смысла говорить о траектории монохроматической волны. Локализация волнового процесса в пространстве неизбежно связана с созданием волнового пакета (см. ч. I, § 35). Размеры волнового пакета тем меньше, чем большее число волн с различными частотами участвует в его образовании. Это свойство волновых процессов совершенно не зависит от их физической природы, — оно справедливо для упругих, электромагнитных и других волн. Таким образом, в классической физике локализованные корпускулы и делокализованные в пространстве волновые процессы являются в известном смысле антиподами.

¹⁾ Во избежание путаницы, корпускулами мы будем называть частицы, движущиеся по законам классической механики.

Оказалось, что у микрочастиц имеет место сочетание корпускулярных и волновых свойств, необъяснимое с точки зрения обычных наглядных представлений классической физики. Выражаясь точнее, в некоторых условиях микрочастицы ведут себя как корпускулы, а в других условиях те же микрочастицы обнаруживают чисто волновые свойства. Наконец, в некоторых опытах одновременно проявляются и корпускулярные, и волновые свойства.

Корпускулярно-волновой дуализм свойств микрочастиц был первоначально обнаружен в опытах со световыми квантами. Волновые свойства электромагнитного поля достаточно хорошо известны. Отметим лишь, что корпускулярная теория Ньютона могла успешно конкурировать с волновой теорией в объяснении таких явлений, как прямолинейное распространение и преломление света. Однако эта теория была полностью оставлена после открытия интерференции, дифракции и двойного лучепреломления.

Что же касается корпускулярных свойств электромагнитного поля, то они особенно наглядно проявляются в эффекте Комптона (ч. II, § 17; см. также гл. XIV). Действительно, этот эффект допускает только одну интерпретацию — корпускулярную. Никакими соображениями, основанными на волновых представлениях, невозможно объяснить появление электронов отдачи: падающая электромагнитная волна не может вызвать движения одного из атомных электронов, не возмущив при этом движения остальных электронов. Между тем, как мы видели в § 17 ч. II, теория, основанная на представлении о соударении двух частиц — падающего фотона и атомного электрона, правильно передает закономерности процесса.

Корпускулярная природа света проявляется с такой же наглядностью при фотоэффекте, в явлении отдачи при излучении атомов и т. п. Таким образом, волновая теория света, успешно применявшаяся при рассмотрении широчайшего круга электромагнитных явлений, оказалась совершенно непригодной для объяснения ряда процессов, в которых проявлялась корпускулярная природа света.

Создавшуюся ситуацию кратко характеризовали словами — имеется дуализм свойств электромагнитного поля. Иногда свет проявляет волновую природу, иногда ведет себя как поток фотонов.

Совокупность экспериментальных данных показала, что каждому фотону следует приписать энергию E и импульс p , равные соответственно

$$E = \hbar\omega, \quad (1,1)$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} = \frac{\hbar}{\lambda}, \quad (1,2)$$