

Дирак П.А.М.

**Принципы квантовой
механики**

2-е издание

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Д47

Д47 **Дирак П.А.М.**
Принципы квантовой механики: 2-е издание / Дирак П.А.М. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 482 с.

ISBN 978-5-458-33292-7

Книга П. А. М. Дирака давно и заслуженно пользуется всемирной известностью. В ней дается совершенно оригинальное, последовательно выдержанное построение квантовой механики, начиная с самых основ и кончая важными физическими приложениями. В книге разобрано с большим математическим изяществом много физических задач. Материал книги изложен исключительно ясно в весьма малом объеме. Второе издание русского перевода отличается от первого, вышедшего в 1960 г. под редакцией В. А. Фока, некоторыми редакционными изменениями и уточнениями текста. Книга дополнена переводом работы П. Дирака «Лекции по квантовой механике», выходившим в 1968 г.

ISBN 978-5-458-33292-7

© 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, кляксы, 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 первозданном 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.

- Зеемана эффект 222, 242
Зоммерфельда формула 356
Импульсное представление 133
Интеграл действия 411
— по путям 176
Канонические переменные 118
Картина движения гейзенберговская 153
— — шредингеровская 152
Касательное преобразование 144, 145, 404—407
Квантовые условия 117
— — основные 121
Кет-вектор 28, 29
— — стандартный 111
Классическая аналогия 117
Лагранжа функция 173, 411
Лагранжиан 411
Ланде формула 244
Магнитная аномалия спина 222
Магнитный момент электрона 348
Матрица 96
— обобщенная 98
— унитарная 143
— эрмитова 97, 98
Матричный элемент 96
Момент орбитальный 191
— спиновый 191
Паблюдаемые 55
— коммутирующие 72
— —, полный набор 82
Песобственная функция 84
Пульевая энергия 307
Оператор антисимметризующий 327
— вращения 191
— Гамильттона 156
— линейный 37
— — вещественный 42, 48
— — самосоираженный 42
— — сопряженный 41
— сдвига 136
— симметризующий 297
— унитарный 143
— физический 376
Орбитальный момент 191
Паули принцип 279
Переменная динамическая — см.
Динамическая переменная
Перенормировки 471
Перестановка 276
Перестановочная функция
электромагнитного поля 367
— — электрон-позитронов 387
Перестановочные соотношения 117
Планка постоянная 120
Плотность вероятности 339
Позитрон 359
Полная система 55
Поляризации состояние 15
Правила отбора 213—220
Представитель 77
Представление 77
— взаимодействия 231
— гейзенберговское 159
— Дпрака 231
— импульсное 133
— ортогональное 79
— симметричное 275
— фоковское 187
— шредингеровское 129
Преобразования унитарные 143
Принцип действия 173, 410
— неопределенности 135
— Паули 279
— суперпозиции 15, 27
Промежуточные состояния 233
Пространство векторов состояний 28, 59
— Гильберта 59
Рассеяния коэффициент 250
Связь 422
— вторичные 418
— второго рода 422
— первичные 413
— первого рода 422
— суперпозиционные 26

- Система атомная 23
 - вырожденная 228
- Система динамическая 27
 - невырожденная 228
- Скобки Пуассона 118, 415
 - квантовые 120
 - —, соотношения 427
- Слабое равенство 377
- Собственная энергия 237
- Собственные векторы 46
 - значения 46
- Состояние 23, 24
 - антисимметричное 276
 - движения 24
 - динамической системы 27
 - квантовое 24
 - нестационарное 249
 - поглощения 249
 - поляризации 15
 - промежуточное 233
 - симметричное 276
 - стационарное 159, 264
- Спин электрона 200
- Суперпозиции принцип 15, 23, 27
 - —, математическая формулировка 30
- Суперпозиция 15, 19, 21, 24, 26
- Унитарное преобразование 143
- Уравнение Гамильтона — Якоби 166
 - Дпрака 338
 - неразрывности 168, 177
 - Шредингера, волновое 152
- Уравнения движения гамильтоновы 415
 - —, гейзенберговская форма 154
 - —, шредингеровская форма 150
- Условие дополнительное 375
 - квантовое 117
 - частот Бора 160
- Фазовое пространство 177
- Фазовый множитель 36
- Фермионы 278
- Функция Гамильтона 155
 - Лагранжа 173
 - преобразования 106
 - упорядоченная 176
- Электромагнитное поле 365 и д.
 - —, дополнительное условие 375
 - —, оператор Гамильтона 366
 - —, перестановочная функция 367—369
 - —, поперечная часть 362
 - —, продольная часть 362
- Элемент диагональный 96
 - матричный 96

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА СЕРИИ

Вторым томом «Библиотеки теоретической физики» мы предлагаем знаменитую книгу одного из крупнейших физиков нашего столетия. Первый вариант ее был создан в конце 20-х годов вскоре после завершения квантовой механики и непосредственно вслед за созданием автором релятивистской квантовой теории электрона.

Несмотря на такой солидный возраст, книга и по сей день представляет большую ценность как для специалистов, так и для студентов.

Русский перевод последнего четвертого английского издания вышел в 1960 г. под редакцией академика В. А. Фока. Настоящая публикация отличается от предыдущей рядом технических деталей. Терминология приближена к оригиналу. Кроме того, в данном томе воспроизведен перевод работы Дирака «Лекции по квантовой механике», опубликованный в 1968 г. издательством «Мир». В этой небольшой по объему, но емкой по содержанию, книжке разработан вопрос о квантовании систем со связями, вопрос, который в последние годы приобрел актуальность в квантовой теории поля в связи с появлением неабелевых калибровочных полей (полей Янга—Миллса).

Д. В. Ширков

8 марта 1979 г.

ОТ РЕДАКТОРА РУССКОГО ИЗДАНИЯ

Книга П. А. М. Дирака «Принципы квантовой механики» давно и заслуженно пользуется всемирной известностью. Первое английское издание ее вышло в 1930 г. (русский перевод его в 1932 г.) последнее — четвертое — в 1958 г. В ней дано совершенно оригинальное, последовательно выдержанное построение квантовой механики, начиная с самых основ и кончая важными физическими приложениями. Если оставить в стороне первые четыре параграфа, то можно сказать, что автор строит теорию по методу «математической гипотезы»: сперва вводится математический аппарат (начиная с теории линейных операторов), а затем для него подыскивается физическое толкование. Блестящим примером применения метода математической гипотезы является открытая Дираком теория позитронов.

В книге разобрано с большим математическим изяществом много физических задач, причем некоторые из них впервые. Рассмотрена не только задача одного тела, включая электрон со спином и теорию столкновений, но и теория систем одинаковых частиц, описываемых симметричными и антисимметричными волновыми функциями. В конце книги излагается релятивистская теория электрона и позитрона и квантовая электродинамика, причем автор подробно останавливается и на затруднениях теории.

Глава о квантовой электродинамике заново написана автором для четвертого издания.

Однако необходимо указать и на недостатки книги. Едва ли можно согласиться с некоторыми философскими высказываниями Дирака (в частности, с теми, которые содержатся в его предисловии к первому английскому изданию). У читателя могут возникнуть также затруднения при чтении вводной части, составляющей начало гл. I, озаглавленной «Принцип суперпозиции». В первых четы-

рех параграфах этой главы сделана попытка ввести понятия квантового состояния и суперпозиции состояний раньше, чем дано определение для волновой функции. По нашему мнению, такое построение невозможно, и эти места книги (в особенности § 4) несомненно останутся для читателя непонятными. Само понятие состояния трактуется по всей книге так, как если бы оно принадлежало атомному объекту самому по себе, в отрыве от средств наблюдения. Такая абсолютизация понятия «квантовое состояние» приводит, как известно, к парадоксам. Эти парадоксы были разъяснены Нильсом Бором на основе представления о том, что необходимым посредником при изучении атомных объектов являются средства наблюдения (приборы), которые должны описываться классически.

Чтобы читатель мог восполнить имеющийся в книге Дирака пробел в физическом обосновании квантовой механики, можно рекомендовать ему чтение работ Бора «Дискуссии с Эйнштейном»*) и «Квантовая физика и философия», напечатанных в журнале «Успехи физических наук»**). Кроме того, по поводу некоторых утверждений Дирака редактором сделаны подстрочные примечания***). В приложении дано отсутствующее в тексте исследование связи канонических преобразований классической и квантовой механики.

Несмотря на отмеченный здесь пробел, книга Дирака обладает огромными достоинствами, которые связаны, прежде всего, с цельностью точки зрения автора на квантовую механику и ее математический аппарат. В книге содержится очень большой материал, исключительно ясно изложенный в малом объеме. Эта сжатость книги является непревзойденной. Несомненно, что книга Дирака, хотя и написанная давно, надолго останется ценным пособием для всех изучающих квантовую механику.

B. Фок

*) УФН, 1958, т. 66, с. 571; УФН, 1959, т. 67, с. 37.

**) Взгляды В. А. Фока на физические основы квантовой теории изложены в его недавно переизданной книге «Начала квантовой механики» (Наука, 1976, гл. 1), явившейся в свое время (1932 г.) одним из первых оригинальных и систематических курсов по квантовой механике. (*Прим. перев.*).

***) Главы I — V переведены Ю. Н. Демковым, а гл. VI—XII — Г. Ф. Друкаревым. О переводе введенных Дираком терминов см. подстрочное примечание на стр. 28.

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

В этой книге делается упор на те принципы квантовой теории, которые, по моему мнению, являются наиболее надежными и, вероятнее всего, сохранятся при будущем развитии теории. Я не включил в книгу современную технику перенормировки, так как ее нельзя обосновать с той же степенью строгости, как остальную теорию, и она едва ли поэтому уцелеет.

Издание русского перевода моей книги радует меня тем, что оно свидетельствует о международном характере научной мысли и о единстве ученых всех наций.

Я одобряю сделанные редактором замечания в сносках и приложении в конце книги; то и другое имеет целью облегчить читателю понимание затруднительных мест.

15 октября 1959

П. А. М. Дирак

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Методы развития теоретической физики претерпели в этом столетии сильное изменение. Согласно классической традиции окружающий нас мир рассматривался как совокупность наблюдаемых объектов (частиц, флюидов, полей и т. п.), движущихся под действием сил согласно определенным законам, так что теория допускала наглядное представление в пространстве и времени. Это приводило к физике, задачей которой было делать предположения о механизме и силах, относящихся к этим наблюдаемым объектам, так, чтобы объяснить их поведение возможно более простым способом. Но в настоящее время становится все более очевидным, что природа действует иначе. Ее основные законы не управляют непосредственно миром наших наглядных представлений, но относятся к таким понятиям, о которых мы не можем составить себе наглядных представлений, не

владая в противоречие. Формулировка этих законов требует применения математической теории преобразований. Величины, соответствующие важным понятиям в природе, являются инвариантами этих преобразований (или, в более общем случае, величинами, которые преобразуются по простым правилам). То, что мы непосредственно воспринимаем, есть отношения этих инвариантов к определенной системе отсчета, которая выбирается обычно так, чтобы добиться тех или иных специальных упрощений, несущих для общей теории.

Возрастающее применение теории преобразований, которая была сначала применена в теории относительности, а затем в квантовой теории, представляет сущность нового метода в теоретической физике. Дальнейший прогресс состоит в том, чтобы делать наши уравнения инвариантными относительно все более широких классов преобразований. Такое положение вещей весьма удовлетворительно с философской точки зрения, так как оно указывает на все возрастающее признание роли наблюдателя в привнесении закономерностей в результаты своих наблюдений и на отсутствие произвола в природе, однако это делает изучение физики менее простым. Новые теории, независимо от их математической формы, построены на основе таких физических понятий, которые не могут быть объяснены с помощью известных ранее понятий, и даже не могут быть объяснены адекватно словами вообще. Подобно тем основным категориям, которыми каждый человек должен овладевать с рождения (например, понятия симметрии, тождества), новые физические понятия можно освоить лишь при продолжительном знакомстве с их свойствами и их употреблением.

С математической стороны ознакомление с новыми теориями не представляет затруднений, так как нужные для этого отделы математики (по крайней мере те, которые были нужны для развития физики до настоящего времени), не отличаются существенно от тех, которые постоянно использовались уже долгое время. Математика есть орудие, специально приспособленное для овладения всякого рода абстрактными понятиями, и в этом отношении ее могущество беспредельно. По этой причине всякая книга по современной физике, если только она не ограничивается чистым описанием экспериментальных работ, должна быть существенно математической книгой. Тем не менее математика есть

лишь орудие, и нужно уметь владеть физическими идеями безотносительно к их математической форме. В этой книге я старался выдвинуть физику на передний план, начав изложение с чисто физической главы и в дальнейшем стараясь, где только возможно, исследовать физический смысл, лежащий в основе математического аппарата. Количество теоретического материала, который следует усвоить, прежде чем подойти к решению практических задач, довольно велико, но это обстоятельство является неизбежным следствием той роли, которую играет в данном случае теория преобразований, и оно будет, по-видимому, усугубляться в теоретической физике будущего.

Относительно математической формы, в которой может быть представлена теория, каждый автор вынужден выбирать с самого начала между двумя методами. Один из них — это символический метод, непосредственно оперирующий в абстрактной форме фундаментальными величинами теории; вторым же является метод координат или метод представлений, который оперирует с системами чисел, соответствующих этим величинам. Второй метод использовался обычно для изложения квантовой механики. Этот метод известен под одним из двух названий: «волновая механика» и «матричная механика» в зависимости от того, какие физические понятия выдвигаются на первый план — состояния системы или ее динамические переменные. Преимущество этого изложения заключается в том, что требуемые разделы математики более привычны, кроме того, именно этим путем шло историческое развитие квантовой механики.

Однако символический метод, по-видимому, глубже проникает в природу вещей. Он позволяет выразить физические законы в ясной и сжатой форме и, вероятно, будет применяться во все большей степени по мере того, как его будут больше понимать и будет развиваться соответствующий математический аппарат. По этой причине я выбрал символический метод, используя метод представлений лишь как средство для практических расчетов. Это неизбежно приводит к полному разрыву с исторической линией развития, но зато позволяет подойти к новым идеям возможно более прямым путем.

П. А. М. Д.

Кембридж
29 мая 1930

ГЛАВА I

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

§ 1. Потребность в квантовой теории

Со времен Ньютона классическая механика непрерывно развивалась и применялась ко все более широкому кругу динамических систем, включая электромагнитное поле, взаимодействующее с материяй. Основные идеи классической механики и законы, управляющие применением этих идей, образуют простую и изящную схему. Казалось бы, эта схема не может быть существенно улучшена без утраты всех ее привлекательных свойств. Тем не менее оказалось возможным ввести новую схему, названную квантовой механикой, которая более пригодна для описания явлений атомного масштаба и которая, в известном смысле, более изящна и удовлетворительна, чем классическая схема. Эта возможность возникла потому, что изменения, которые влечет за собой новая схема, носят весьма глубокий характер и не вступают в противоречие с теми свойствами классической теории, которые делают ее столь привлекательной; в результате все эти свойства можно включить в новую схему.

Необходимость в отходе от классической механики с очевидностью следует из экспериментальных данных. Прежде всего, силы, известные в классической электродинамике, непригодны для объяснения замечательной стабильности атомов и молекул, стабильности, которая необходима для того, чтобы вещества вообще могли иметь определенные физические и химические свойства. Введение новых гипотетических сил не спасает положения, так как существуют общие принципы классической механики, справедливые для всех видов сил, которые приводят к результатам, находящимся в прямом противоречии с опытом. Например, если нарушить каким-либо путем равновесие атомной системы,

а затем предоставить ее самой себе, то она начнет колебаться; колебания будут воздействовать на окружающее электромагнитное поле, так что частоты этой системы можно будет наблюдать с помощью спектроскопа. Каков бы ни был характер сил, определяющих равновесие, можно ожидать, что разнообразные частоты могут быть включены в схему, которая содержит некоторые фундаментальные частоты и их гармоники. Однако этого не наблюдается. На самом деле наблюдается новое и неожиданное соотношение между частотами — комбинационный принцип Ритца, согласно которому все частоты могут быть выражены как разности между некоторыми величинами — термами; число этих термов много меньше числа частот. Этот закон совершенно непонятен с классической точки зрения.

Можно было бы попытаться преодолеть эти трудности, не отказываясь от классической механики, предположив, что каждая из спектроскопически наблюдаемых частот есть фундаментальная частота со своей собственной степенью свободы, а законы сил таковы, что высшие гармоники отсутствуют. Однако такая теория неудовлетворительна: не говоря уже о том, что она не дает объяснения комбинационному принципу, она немедленно приводит к противоречию с экспериментальными данными об удельных теплоемкостях. Классическая статистическая механика позволяет установить общее соотношение между полным числом степеней свободы совокупности колеблющихся систем и ее удельной теплоемкостью. Если предположить, что все спектроскопические частоты атома соответствуют различным степеням свободы, то для удельной теплоемкости любого вещества получится величина гораздо больше наблюдаемой на опыте. На самом деле наблюдаемые удельные теплоемкости при обычных температурах получаются достаточно хорошо из теории, которая принимает во внимание лишь движение каждого атома как целого и не приписывает ему никакого внутреннего движения.

Это приводит нас к новому противоречию между классической механикой и результатами опыта. В атоме несомненно должно происходить внутреннее движение, что следует из самого существования атомного спектра; однако внутренние степени свободы по какой-то причине, необъяснимой с классической точки зрения, не вносят вклада в удельную теплоемкость. Аналогичное противоречие встречается