

А.А. Соколов

Квантовая механика

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
С59

С59 **Соколов А.А.**
Квантовая механика / А.А. Соколов – М.: Книга по Требованию, 2021. –
640 с.

ISBN 978-5-458-26435-8

2-е издание

ISBN 978-5-458-26435-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

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 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.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

переработке подвергся раздел, посвященный квантовым генераторам. Мы уточнили некоторые принципиальные вопросы, связанные с философским обоснованием квантовой механики. В частности, в задаче 31.3 рассмотрена новая попытка (конечно, далеко еще не апробированная) обосновать соотношение неопределенности как результат воздействия вакуума на точечную заряженную частицу.

Первая часть этого курса была написана мною совместно с Ю. М. Лоскутовым, вторая — совместно с проф. И. М. Терновым. Большую помощь при написании курса оказала М. М. Колесникова, составившая конспекты моих лекций по квантовой механике. Кроме того, она оказала существенную помощь при подготовке рукописи к печати; ею же подготовлен и предметный указатель ко второму изданию настоящей книги.

Отдельные параграфы рукописи, а именно § 25 и 28, внимательно просмотрел Н. Н. Колесников, сделавший ряд важных замечаний. Мне хотелось бы также отметить большую и весьма плодотворную работу С. И. Ларина по редактированию рукописи первого издания.

А. А. Соколов

Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
март 1964 г.

ВВЕДЕНИЕ

Квантовая механика, представляющая собой один из важнейших разделов современной теоретической физики, была создана сравнительно недавно — в 20-х годах нашего столетия. Ее основной задачей является изучение поведения микрочастиц, например движения электронов в атоме.

По своей сущности квантовая механика представляет собой дальнейшее развитие классической механики, электродинамики (включая электронную теорию и теорию относительности), кинетической теории материи и других разделов теоретической физики.

В истории развития каждого раздела теоретической физики следует различать два основных этапа: во-первых, накопление экспериментальных фактов, открытие отдельных полуэмпирических законов и создание предварительных гипотез и теорий, во-вторых, открытие общих закономерностей, позволяющих с единой точки зрения понять совокупность многих явлений. Так, например, первый (доньютоновский) этап развития механики был связан с открытием отдельных, казалось бы, не связанных между собой законов: закона инерции, закона свободного падения тел, законов Кеплера, определяющих движения планет, и т. д.

Необходимо отметить, что открытие каждого из этих законов сопровождалось, как правило, кропотливой работой многих ученых в течение десятков, а порой даже и сотен лет. Например, открытию законов Кеплера предшествовали многочисленные астрономические наблюдения за движением планет. Вспомним, сколько трудов было вложено Коперником, Бруно, Галилеем и другими для доказательства того, что в центре нашей планетной системы находится Солнце, а не Земля, которая сама является такой же планетой, как и Марс, Венера или Юпитер. И только на основе весьма ценного экспериментального материала, полученного Тихо де Браге при наблюдении движения планет, Кеплер в результате пятнадцатилетней обработки этих экспериментальных данных сумел, наконец, открыть правильные (правда, полуэмпирические) законы движения планет вокруг Солнца. Лишь после такого предвари-

тельного этапа Ньюто́ну удалось под все эти казавшиеся несвязанными законы подвести единый фундамент. С этого момента начинается новый этап развития теоретической механики, основанной на трех законах движения Ньютона и на законе всемирного тяготения. На базе ньютоновских законов механики были объяснены законы Кеплера и интенсивно начала развиваться теоретическая астрономия. Триумфом развития механики Ньютона является предсказание французским ученым Леверье (по возмущениям движения планеты Юпитер) новой планеты Нептун, которая сразу же была обнаружена астрономами по вычислениям Леверье.

Точно так же созданию электродинамики Максвелла предшествовало (в XVIII в. и в первой половине XIX в.) открытие различных эмпирических законов электрических и магнитных явлений. По аналогии с ньютоновским законом тяготения были открыты законы Кулона для электрических зарядов и магнитных полюсов¹⁾, а также законы электрического тока и его взаимодействия с магнитными полюсами (закон Био—Савара) и т. д. Все эти явления находили объяснение с точки зрения дальнего действия, согласно которой один электрический заряд действует непосредственно на другой заряд через все разделяющее их пространство.

Совершенно независимо от изучения электрических и магнитных явлений примерно со времен Ньютона усиленно развивалась оптика — наука о свете²⁾. Хотя сравнительно быстро было установлено, что свет представляет собой поперечные волны, распространяющиеся с конечной скоростью $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/сек, природа световых волн долгое время оставалась невыясненной.

Все эти предварительные исследования можно отнести к первому этапу развития электродинамики, подготовившему почву для создания теории Максвелла, играющей в электродинамике примерно такую же роль, какую играют законы Ньютона в механике.

Уравнения Максвелла оказались мощным орудием в руках физиков при исследовании электрических, магнитных и световых явлений. Было предсказано существование электромагнитного поля, переносящего взаимодействия непрерывно от точки к точке,

¹⁾ Поскольку свободных магнитных полюсов пока что не обнаружено, то непосредственно закон Кулона в магнетизме проверяется в применении к магнитным диполям.

²⁾ Волновая теория света была предложена Гюйгенсом в конце XVII века. Ньютон же, не отвергая волновую теорию, развивал главным образом корпускулярную теорию света, рассматривая свет как поток мельчайших частиц (теория истечения). В связи с тем, что большинство экспериментальных фактов в особенности после работ Френеля (начало XIX века) в основном укладывались в рамки волновой теории, корпускулярная теория Ньютона была по существу забыта. Только в начале XX века, когда появились новые экспериментальные факты, приведшие к открытию квантовой теории, ученым пришлось вновь, но уже на новой основе вернуться к построению корпускулярно-волновой теории света.

т. е. появилась теория близкодействия, которая нанесла решающий удар дальному действию. Одним из важнейших следствий теории Максвелла является предсказание существования электромагнитных волн, открытых впоследствии Герцем. В настоящее время теория распространения электромагнитных волн лежит в основе всей современной радиотехники, начало которой было положено изобретением радио А. С. Поповым. Открытие электромагнитных волн было первым триумфом теории Максвелла.

Вторым важнейшим следствием теории Максвелла является доказательство того, что свет представляет собой те же электромагнитные волны, но с малой длиной волны ($\lambda \sim 10^{-5}$ см); таким образом, теория Максвелла ознаменовала новый этап в развитии учения о свете.

Наконец, большую роль в появлении квантовой механики сыграло также развитие атомистического учения о веществе вообще и в особенности об атомизме электричества. Атомистическая гипотеза о строении вещества была высказана еще в античное время. Научное же обоснование она получила сравнительно недавно, когда был открыт фундаментальный закон химии — закон кратных отношений. Большую роль в развитии атомизма сыграло построение кинетической теории материи и, в частности, кинетической теории газов. В основе этой теории лежит созданная Больцманом и Максвеллом классическая статистика.

Следует заметить, что классическая статистика Максвелла — Больцмана, основанная на теории вероятности, не может быть полностью объяснена механикой Ньютона и содержит новые закономерности, свойственные совокупности большого числа частиц (например, необратимость некоторых процессов).

С помощью статистических методов удалось объяснить ряд макроскопических свойств вещества (температуру, теплоемкость и т. д.), что представляет собой лишь косвенное доказательство его атомного строения.

Одним из решающих доказательств в пользу атомизма явилось открытие флуктуаций, т. е. обусловленных движением отдельных молекул отклонений физических характеристик вещества от средних макроскопических значений. В первую очередь здесь следует отметить открытие броуновского движения, которое со всей очевидностью подтверждает наличие молекулярного движения в жидкости.

Еще более внушительным доказательством атомистического строения твердого тела явилось открытие Лауэ дифракции рентгеновских лучей в кристаллах и масс-спектрографического анализа, с помощью которого Астону удалось измерить атомный вес каждого изотопа в отдельности, а не в среднем, как это делалось прежде.

Из атомизма вещества, как неизбежное следствие, вытекает атомизм электричества. Исходя из анализа законов электролиза Фарадея, Гельмгольц показал, что должны существовать атомы положительного и отрицательного электричества, абсолютное значение заряда которых одинаково и всегда равно или кратно элементарному заряду $e_0 = 4,8 \cdot 10^{-10}$ CGSE.

Исследование анодных лучей показало, что положительные заряды всегда встречаются в виде ионов, т. е. связаны с основной массой атома. Самый легкий положительный ион, а именно ион атома водорода, обладает массой, приблизительно равной массе атома водорода. Он получил название протона. Что касается носителей отрицательного электричества, то ими могут быть как ионы (связанные с основной массой атома), так и отделенные от атомов отрицательно заряженные частицы, получившие название электронов.

В опытах по отклонению катодных лучей, т. е. потока электронов, в электрическом и магнитном полях, была найдена масса электрона, причем она оказалась примерно в 1836 раз меньше массы протона¹⁾.

На основе этих открытий была построена электронная теория Лоренца, явившаяся своеобразным синтезом электродинамики Максвелла для вакуума и атомистических представлений о веществе, как о среде, состоящей из положительно и отрицательно заряженных частиц. Значения диэлектрической и магнитной проницаемостей, проводимости и т. д. получались в теории Лоренца путем усреднения уравнений Максвелла для вакуума по зарядам и токам образующих вещество частиц. В этой теории проводник рассматривался как некоторая среда, заполненная свободными электронами или, как говорят, «электронным газом».

Только с помощью теории Лоренца удалось показать, что диэлектрическая проницаемость не есть в самом деле постоянная величина, как это предполагалось в теории Максвелла, а зависит от частоты электромагнитных волн. Таким образом, теория Лоренца смогла объяснить явление дисперсии света.

Вместе с электронной теорией Лоренца началось развитие электродинамики движущихся сред, завершившееся созданием специальной теории относительности.

¹⁾ Следует заметить, что в 1932 г. был открыт также позитрон, т. е. частица с положительным зарядом и массой, равной массе электрона. В небольшом количестве позитроны образуются при прохождении космических лучей через вещество. Однако в обычных условиях позитрон в окружающем нас веществе не может существовать сколько-нибудь продолжительное время, поскольку, сталкиваясь с электроном, он превращается вместе с последним в гамма-кванты (более подробно см. § 22 и 31).

Как известно, формулируя математически те или иные законы движения материи (будь то законы движения Ньютона или законы движения электромагнитного поля, нашедшие свое отражение в уравнениях Максвелла), мы должны связывать их с какой-либо системой отсчета. В частности, Ньютон считал, что сформулированные им законы механики относятся к абсолютно неподвижной системе отсчета. Вместе с тем такое понятие абсолютно неподвижной системы отсчета оказалось даже в его учении понятием чисто метафизическим. Сам Ньютон открыл в механике принцип относительности, согласно которому невозможно обнаружить равномерного и прямолинейного движения тела (или систем отсчета) относительно этой абсолютной системы, поскольку все системы отсчета, движущиеся равномерно и прямолинейно друг относительно друга (инерциальные системы), равноправны между собой.

В самом деле, переходя от одной инерциальной системы отсчета (нештрихованной), которую мы примем условно за неподвижную, к другой (штрихованной), движущейся вдоль оси x с постоянной скоростью v , в соответствии с преобразованиями Галилея — Ньютона:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t,$$

мы найдем, что ускорения и силы в обеих системах отсчета будут одинаковыми; поэтому уравнения механики (куда выражение для скорости не входит) останутся при этом переходе неизменными, т. е. инвариантными.

Если же преобразование Галилея — Ньютона применить к уравнениям Максвелла — Лоренца, то последние в каждой инерциальной системе координат будут иметь различный вид, поскольку в эти уравнения входит скорость распространения электромагнитных волн, которая согласно закону сложения скоростей в механике Ньютона в каждой инерциальной системе будет иметь свое значение. Однако многочисленные опыты (в первую очередь опыты Майкельсона) показали, что скорость света во всех инерциальных системах координат должна быть по всем направлениям одной и той же. В связи с этим Эйнштейн предложил обобщение ньютоновского принципа относительности, из которого автоматически следовали так называемые преобразования Лоренца:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \\ t' = \frac{t - \beta \frac{x}{c}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c},$$

представляющие собой обобщение преобразований Галилея — Ньютона. Преобразования Лоренца оставляют законы электродинамики во всех инерциальных координатных системах неизменными (инвариантными). В частности, при таких преобразованиях скорость света в различных инерциальных системах отсчета должна иметь по всем направлениям одно и то же значение c .

Для того чтобы уравнения механики Ньютона также оставались инвариантными относительно преобразований Лоренца, их пришлось заменить релятивистскими уравнениями, из которых, в частности, следует, что масса m движущейся частицы связана с ее скоростью v и массой покоя m_0 соотношением:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Заметим, что в случае малых скоростей движения, когда можно положить $\beta^2 \approx 0$, уравнения релятивистской механики переходят в уравнения Ньютона.

Уравнения Максвелла — Лоренца для электромагнитного поля и релятивистское уравнение движения электрона оказались завершающим этапом классической электронной теории. Согласно этой теории свет должен представлять собой электромагнитные волны, а электроны — частицы, движение которых должно описываться законами релятивистской механики.

По мере того как с помощью теории Максвелла — Лоренца объяснялось все большее число явлений микромира (распространение света, дисперсия света в средах, движение электронов в электрическом и магнитном полях и т. д.), постепенно стали накапливаться и такие экспериментальные факты, которые уже не укладывались в рамки классических представлений.

Все эти эксперименты будут сравнительно подробно рассмотрены в § 1—3, и поэтому мы здесь ограничимся лишь кратким их перечислением.

С одной стороны, для построения теории равновесного теплового излучения, фотоэффекта и эффекта Комптона необходимо было ввести предположение о том, что свет наряду с волновыми должен обладать также и корпускулярными свойствами. Это было учтено в теории квант Планка — Эйнштейна. Дискретная структура света нашла свое отражение в постоянной Планка $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек. Теория квант была с успехом также использована при построении первой квантовой теории атома — теории Бора, которая опиралась на модель атома, следовавшую из опытов Резерфорда по рассеянию альфа-частиц различными веществами.

С другой стороны, целый ряд экспериментальных данных, таких, как дифракция, интерференция пучка электронов, говорил

о том, что электроны наряду с корпускулярными свойствами проявляют также и волновые. Длина волны электрона, введенная де-Бройлем, также содержала постоянную Планка h . На базе этого позднее возникла целая отрасль науки — электронная оптика, лежащая в основе расчетов разнообразных электронных устройств, и в первую очередь разрешающей способности электронных микроскопов.

Первым обобщающим результатом тщательного анализа всех экспериментальных данных, подтверждающих квантовую природу света и волновые свойства электронов, а также отдельных, носящих предварительный характер теорий (Планка, Эйнштейна, Бора, де-Бройля), явилось волновое уравнение Шредингера (1926), позволившее вскрыть законы движения электронов и других атомных частиц и построить сравнительно последовательную теорию излучения с учетом квантовой природы света¹⁾. С открытием уравнения Шредингера ученые, исследовавшие атом, получили в свои руки такое же мощное оружие, какое в свое время получили астрономы после открытия основных законов механики Ньютона, включая закон всемирного тяготения.

Поэтому не удивительно, что с открытием уравнения Шредингера многие явления, связанные с движением электронов внутри атома и проблемой излучения и поглощения атомом света, получили теоретическое объяснение (см. § 4—14).

Однако, как оказалось в дальнейшем, теория Шредингера описывала далеко не все свойства атомов; с ее помощью нельзя было, в частности, правильно объяснить взаимодействие атома с магнитным полем (например, аномальный эффект Зеемана), а также построить теорию сложных атомов. Это было связано главным образом с тем обстоятельством, что в теории Шредингера не учитывались спинные свойства электрона.

Дальнейшим развитием теории Шредингера явилась релятивистская теория Дирака (см. § 15—17). Уравнение Дирака позволило описать как релятивистские, так и спинные эффекты движущихся электронов (см. § 18—20). При этом оказалось, что если учет релятивистских эффектов в атомах приводит к срав-

¹⁾ Строго говоря, уравнение квантовой механики Шредингера открывает возможность более полно по сравнению с классической механикой Ньютона исследовать движение электронов или других микрочастиц, когда можно пренебречь излучением. Квантовая же теория излучения может быть последовательно сформулирована лишь с учетом квантованных электромагнитных полей (см. § 30). Однако принцип соответствия (см. § 2) позволяет в некоторых простейших задачах теории атома обобщить классические законы излучения непосредственно на квантовую механику и тем самым хотя бы не совсем последовательными методами описать излучение в рамках теории Шредингера (см. § 9).

нительно небольшим количественным поправкам, то учет спиновых эффектов играет при изучении строения атомов с несколькими электронами решающее значение (см. § 23, 24). Только после того как были приняты во внимание спиновые свойства электронов, удалось, наконец, объяснить правило заполнения электронных оболочек в атоме и дать периодическому закону Менделеева, открытому им при изучении химических свойств атомов (см. § 25, 26), строгое обоснование.

С появлением уравнения Дирака принципиальные вопросы, связанные со строением электронной оболочки атома, можно было считать в основном разрешенными, хотя углубление наших знаний в области отдельных деталей должно все время продолжаться. В связи с этим следует заметить, что в настоящее время подробно изучается влияние так называемого электронно-позитронного вакуума, а также влияние магнитных моментов ядер и размеров ядер на энергетические уровни атомов (см. § 21, 22).

Помимо атома, квантовая механика нашла свое применение при исследовании простейших молекул (см. § 27), при построении теории твердого тела (см. § 6), а также при объяснении ряда явлений в атомном ядре (§ 28—30).

В настоящее время накоплен и продолжает накапливаться обширный экспериментальный материал и начала уже создаваться общая теория элементарных частиц, число которых уже более тридцати (см. § 31).

Одной из характерных особенностей первого этапа теории элементарных частиц, получившей название квантовой теории поля, является описание взаимной превращаемости элементарных частиц. В частности, в теории Дирака было предсказано возможное превращение гамма-квантов в пару электрон-позитрон и обратно, что впоследствии было подтверждено экспериментально.

Таким образом, если в классической теории между светом и электронами было два различия: а) свет — волны, электроны — частицы; б) свет может появляться и поглощаться, число же электронов должно оставаться неизменным, то в квантовой механике со свойственным ей корпускулярно-волновым дуализмом было стерто первое различие между светом и электронами. Однако в ней так же, как и в теории Лоренца, число электронов должно было оставаться неизменным. Только после появления квантовой теории поля, описывающей взаимную превращаемость элементарных частиц, было фактически стерто и второе различие.

Следует заметить, что развитие теоретической физики самым тесным образом связано с математикой. В самом деле, основной метод исследования физика-теоретика — вычисления. Поэтому для изучения теоретической физики необходимо обладать определен-

ной суммой знаний в области математики и уметь применять эти знания для проведения различных расчетов.

Далее, поскольку одной из основных задач теоретической физики является изучение реального мира и прежде всего простейших форм его движения, определяющих также и более сложные явления, то естественно, что все эти вопросы всегда связаны с общеполитическими вопросами и, в частности, с вопросом познаваемости микромира.

Поэтому не удивительно, что многие крупные физики, сделавшие важнейшие открытия в области физики, пытались вместе с тем интерпретировать эти открытия с той или иной философской точки зрения.

К сожалению, предлагавшаяся интерпретация была не у всех удачной. К числу подобных физиков в первую очередь следует отнести Маха и Оствальда. Достаточно сказать, что результаты физических исследований Маха в настоящее время играют исключительно важную роль, например, при изучении движения тел со сверхзвуковыми скоростями. Однако, с другой стороны, Мах, исходя из идеалистической теории «принципиальной координации субъекта и объекта», вместе с Оствальдом до конца жизни боролся против «атомистической гипотезы», рассматривая ее как нечто искусственное, введенное учеными лишь для удобства понимания явлений в микромире.

Точно так же известный французский математик и философ А. Пуанкаре, который независимо и почти одновременно с Эйнштейном сформулировал ряд положений специальной теории относительности, усмотрел в появлении новой физики XX века исчезновение материи, т. е. крах материализма. Все эти неправильные методологические выводы, сильно мешавшие пониманию развития современной физики, подверглись резкой критике В. И. Лениным в его известном труде «Материализм и эмпириокритицизм».

В. И. Ленин показал, что наше познание природы, существующей независимо от сознания субъекта, идет по линии асимптотического приближения к истине, и появление новой теории означает не крушение старой, а лишь ее дальнейшее развитие и уточнение, связанное с получением новых экспериментальных фактов. Поэтому те новые открытия в области физики, которые ограничили применимость механического мировоззрения, никоим образом не означают исчезновения материи. Подобного рода неверные интерпретации были связаны с тем обстоятельством, что физики просто не знали диалектики.

Мысль В. И. Ленина о том, что электрон так же неисчерпаем, как и атом, действительно оказалась той путеводной звездой, которая указывает единственно правильный путь развитию современной физики.