

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

АТОМ ШРЁДИНГЕРА

А. Д. Власов

(Московский радиотехнический институт РАН)

(Статья поступила 4.09.92 г.)

1. Введение. Создание нерелятивистской квантовой механики было завершено в основном к концу 1927 г. и стало уже достоянием истории. Принятые тогда радикальные вероятностно-волновые концепции детально и всесторонне изложены в монографиях и учебниках. В противоположность этому до сих пор остаются недостаточно известными альтернативные идеи и решения, выдвигавшиеся в тот же период. Некоторые из них, предложенные Эйнштейном, Дуэном, Шрёдингером и Гейзенбергом, по-видимому, заслуживают внимания.

В этой статье рассматривается роль Шрёдингера, которую освещают обычно далеко не в полной мере. Шрёдингер не только построил фундаментальное сравнение, носящее его имя. Он предложил свою модель атома и физическое истолкование волновой функции, названное им электродинамической интерпретацией.

Шрёдингеровская модель атома в то время не получила признания и была отвергнута в сущности без сколько-нибудь серьезного обсуждения. Интерес к ней возродился лишь спустя многие десятилетия в связи с развитием нового плодотворного направления II квантовой электродинамике (см. п. 4).

С января по июнь 1926 г. Шрёдингер направил в печать четыре сообщения, объединенных под общим названием «Квантование как задача о собственных значениях» [1].

Шрёдингер исходил из идей де Бройля о волнах материи, хотя и не разделял гипотезы о двойственной корпускулярно-волновой природе частиц. С целью описать движение электронов в атоме он искал уравнение, подобное волновому. И ему удалось найти уравнение в частных производных, описывающее дискретные стационарные состояния атомных

систем. В первом сообщении приведено уравнение для атома водорода, во втором — общее уравнение для систем в стационарных состояниях

$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + (E - U) \psi = 0; \quad (1)$$

здесь U — потенциальная энергия электронов во внешнем поле, E — энергия системы. В качестве граничных условий Шрёдингер принял естественные требования вещественности, однозначности, ограниченности и двукратной дифференцируемости функции ψ . Условие вещественности вскоре отпало. Со временем выяснилось, что почти всегда достаточно квадратичной интегрируемости ψ . В четвертом сообщении было построено и уравнение для нестационарных систем

$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi - U \psi = i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}. \quad (2)$$

В промежутке между вторым и третьим сообщениями Шрёдингер опубликовал также статью, в которой показал математическую эквивалентность своего уравнения и матричной механики Гейзенберга [2], заложив тем самым основы теории преобразований. Нельзя не согласиться со словами М. Джеммера: «Новую механику... создал практически целиком и всего лишь за несколько месяцев не кто иной, как Шрёдингер» [3].

Уравнение Шрёдингера было с энтузиазмом встречено физиками мира, и особенно теми, кто придерживался классических научных принципов, — Эйнштейном, Планком, Зоммерфельдом. Новый метод был гораздо удобнее и привлекательнее совершенно абстрактной матричной механики и алгоритма Дирака. Современников поражало, что «целочисленность» и дискретность энергетических спектров получаются из условий, в которых не было никакого

произвола, в отличие от непостижимых и противоречивых постулатов планетарной теории Бора. Появился универсальный метод расчета атомных систем, чрезвычайно сильный, логически последовательный и довольно наглядный.

Свою теорию Шрёдингер первоначально называл «микромеханикой» и «ундуляторной механикой», а функцию ψ — «механическим скалярным полем» и «полевым скаляром». Лишь в дальнейших сообщениях он перешел к названиям «волновая механика» и «волновая функция».

Для завершения теории было необходимо раскрыть физический смысл волновой функции и найти адекватную модель атома.

Собственно, уже поставленная Шрёдингером цель — описать волны материи — предполагала непрерывное распределение электронной материи по объему атомной системы. Но вместе с тем предполагались и волнообразные изменения электронного заряда в пространстве и времени. «Довольно естественно связывать функцию ψ с некоторым колебательным процессом в атоме», — пишет Шрёдингер в первом сообщении. Как он сначала полагал, при излучении света атом колеблется одновременно с двумя частотами, что приводит к биениям. Разумеется, в этом сказалось влияние идей де Бройля. Впрочем, Шрёдингер не воспринимает их буквально. Он называет колебательный процесс в атоме «гипотетическим», а ряд своих положений — «произвольными». Во втором сообщении, отступая от первоначальных взглядов, он представляет электрон в виде «волновой группы» (волнового пакета).

Лишь в четвертом сообщении Шрёдингер окончательно отказался от концепции «флуктуирующей материи» и порвал с весьма живучим представлением об атоме как «осцилляторе».

2. Электродинамическая интерпретация. Согласно концепции Шрёдингера, сформулированной в его четвертом сообщении, заряды электронов и образуемые ими токи непрерывно распределены по объему атома, молекулы или кристалла с плотностями, выражающимися через волновую функцию ψ . В стационарном состоянии атомной системы пространственное распределение электронных зарядов и токов постоянно во времени, постоянны и их электрическое и магнитное поля. «Можно в известном смысле говорить о возвращении к электростатической и магнитостатической модели атома», — пишет Шрёдингер.

Таким образом, электроны — не точечные заряды и не малы по сравнению с атомом. «При этой гипотезе заряд электрона фактически ограничен областью

в несколько ангстрем», — указывает Шрёдингер. Размеры электрона — того же порядка, что и размеры атома.

Для стационарного состояния системы необходимо, чтобы силы действия электрического и магнитного полей уравнивались силами неэлектродинамической природы, представленными в уравнении Шрёдингера слагаемым, содержащим постоянную Планка $\hbar$. Равновесие достигается не при любых, а лишь при некоторых избранных распределениях электронных зарядов и токов, определяемых дискретными решениями (собственными функциями) уравнения Шрёдингера с соответствующими уровнями энергии E .

Плотности электронных зарядов и токов наиболее просто выражаются через волновую функцию ψ в случае атома водорода и других одноэлектронных систем:

$$\rho = -e\psi\psi^*, \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = -\frac{ie\hbar}{2m}(\psi \text{grad} \psi^* - \psi^* \text{grad} \psi). \quad (4)$$

Одно из возражений, выдвигавшихся против шрёдингеровской интерпретации, сводилось к ее непригодности для многоэлектронных атомных систем. В самом деле, применительно к атому с Z электронами функция ψ зависит не от трех координат в реальном трехмерном пространстве, а от $3Z$ координат в конфигурационном пространстве $3Z$ измерений.

Однако Шрёдингер сумел преодолеть возникшие трудности. В четвертом сообщении он представил волновую функцию в виде $\psi = \psi(x, x')$, где x — совокупность координат одной из частиц, x' — совокупность координат всех остальных частиц. Это позволило выразить плотности распределенного заряда и тока данной α -й частицы через три ее обычных координаты в виде интегралов

$$\rho_\alpha(x) = q_\alpha \int \psi\psi^* dx', \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_\alpha(x) = \frac{i\hbar q_\alpha}{2m_\alpha} \int (\psi \text{grad} \psi^* - \psi^* \text{grad} \psi) dx'. \quad (6)$$

Суммирование выражений (5), (6) для всех частиц дает искомые плотности электронных зарядов и токов ρ , $\mathbf{J}$ в зависимости от трех пространственных координат. Шрёдингер вывел также и уравнение непрерывности

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_\alpha(x) + \text{div}_\alpha \mathbf{J}_\alpha(x) = 0. \quad (7)$$

Построив интегралы типа (5), (6), Шрёдингер фактически ввел впервые понятие матриц плотности. Но это достижение осталось незамеченным. Спустя некоторое время матрицы плотности были независимо вновь введены в теорию и только тогда получили свое название.

Отметим одно удивительное обстоятельство. На протяжении многих последовавших десятилетий пространственное распределение заряда электронов характеризовалось в литературе как неприемлемое на том основании, что оно пригодно лишь для одно-электронных систем. Обобщение этой концепции на многоэлектронные системы, произведенное Шрёдингером, не было замечено не только современниками, но и более поздними поколениями исследователей. В литературе утвердилось мнение о непригодности электродинамической интерпретации для сложных систем [3, 5, 6].

Шрёдингер отметил ряд достоинств своей интерпретации. «Предположение, по которому при квантовом переходе энергия преобразуется из одной колебательной формы в другую, значительно более удовлетворительно, чем представление о перескакивающем электроны. Изменение формы колебаний всегда может происходить непрерывно в пространстве и времени, оно может длиться время, равное экспериментально определенному времени процесса излучения», — пишет Шрёдингер в первом сообщении.

А в третьем сообщении он указывает: «Необходимо попытаться применить идеи Уленбека и Гаудсмита в волновой механике... так как в ней электрон не является более точечным зарядом, но непрерывным потоком заполняет пространство, так что устраняется неприятное представление о «вращающейся точечной массе». И действительно, спин электрона, равный $\hbar/2$, естественно объяснить его вращением вокруг собственной оси с моментом импульса $m\nu R$. Средний радиус R можно принять ориентировочно равным первому боровскому радиусу $a_1 = \hbar^2/me^2 = 0,529 \cdot 10^{-8}$ см. Тогда нетрудно убедиться, что достаточно линейных скоростей вращения порядка $v = \hbar/2ma_1 = \alpha c/2$, малых по сравнению со скоростью света ($\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ — постоянная тонкой структуры).

3. Неизлучающие электроны и классическая электродинамика. Среди достоинств своей интерпретации Шрёдингер называет и еще одно. «Механическое скалярное поле (обозначенное мною через ψ) вполне пригодно для того, чтобы выступить в роли «источника» векторного электромагнитного поля даже в том случае, когда последнее удовлетворяет неизменным уравнениям Максвелла—Лоренца». Как можно видеть, Шрёдингер допускал, что классическая электродинамика действует также и внутри атома.

В дальнейшем это предположение Шрёдингера полностью подтвердилось. В литературе можно

встретить в нескольких вариантах математически строгое доказательство уравнений классической электродинамики на основе специальной теории относительности, закона сохранения электрического заряда и закона Кулона (или принципа наименьшего действия) [7—9]. Довольно компактное доказательство изложено М. Боулером (см. приложение). Правда, такого рода доказательства не предназначались для применения к атому. Но внутри атома и других атомных систем выполняются все указанные исходные положения. И приходится заключить, что классическая электродинамика сохраняет силу внутри атомных систем, хотя и заведомо недостаточна для описания атома [10].

«Вместе с тем отсутствие излучения в нормальном состоянии находит во всяком случае простое объяснение», — пишет Шрёдингер в четвертом сообщении. Действительно, оказывается возможным естественно и просто объяснить, каким образом, несмотря на действие электродинамики Максвелла, движущиеся вокруг атомных ядер электроны не теряют энергии на излучение.

В простейшем случае атома водорода стационарное пространственное распределение электронных зарядов и токов обладает круговой симметрией относительно оси, проходящей через атомное ядро. Электрическое и магнитное поля внутри и вне атома при этом также осесимметричны и постоянны во времени. Векторы электрического и магнитного поля **E**, **H** везде лежат в плоскостях, проходящих через ось атома. Поток электромагнитной энергии, плотность которого выражается вектором Умова—Пойнтинга $[\mathbf{E} \times \mathbf{H}] c/4\pi$, везде перпендикулярен к этим аксиальным плоскостям, т.е. направлен по азимуту и замкнут сам на себя. Электромагнитная энергия, не излучаясь, лишь циркулирует внутри атома и в его ближайшей окрестности. Такой атом можно назвать «ротационным» ввиду свойственной ему круговой симметрии электронных зарядов и токов, электрического и магнитного полей и, наконец, потоков энергии.

Очевидно, круговая симметрия системы не обязательна. Существуют и не обладающие круговой симметрией распределения электронных зарядов и токов вокруг атомных ядер, не излучающие энергии и постоянные во времени. Необходимо лишь, чтобы электромагнитная энергия циркулировала внутри и около них по замкнутым контурам, не удаляясь в окружающее пространство. При наличии двух или большего числа атомных ядер такие распределения электронных зарядов и токов образуют молекулы или кристаллы.

Итак, согласно шрёдингеровской интерпретации атомы и молекулы представляют собой своеобразные

самоограниченные в пространстве «резонаторы» — пространственные распределения электронных зарядов и токов вокруг атомных ядер, имеющие дискретный ряд возможных стационарных конфигураций с соответствующими уровнями энергии. Разумеется, переходы от одного стационарного состояния к другому сопровождаются излучением или поглощением фотонов с частотой, пропорциональной разности энергетических уровней в исходном и конечном состояниях.

4. Собственное поле и внешние задачи. По Шрёдингеру, как уже упоминалось, распределенные электронные заряды и токи являются источниками их собственного электромагнитного поля [2]. В уравнении Шрёдингера (1) к величине U следует прибавить U_s — потенциальную энергию электронного заряда в его собственном поле,

$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + (E - U - U_s) \psi = 0. \quad (8)$$

Величина U_s определяется из уравнения Пуассона

$$\Delta U_s = -\frac{1}{2} e \Delta V_s = 2\pi e \rho, \quad (9)$$

где V_s — потенциал собственного электрического поля электрона, или выражается через функцию Грина,

$$U_s(x) = e \int D(x-y) \rho(y) dy.$$

С добавлением U_s уравнение Шрёдингера перестает быть линейным, и решение его усложняется. Величина U_s сравнительно мала, так как вблизи ядра собственное поле электронов ничтожно по сравнению с полем ядра, а на периферии атома, где эти поля одного порядка, они оба весьма слабы. Поэтому уравнение Шрёдингера и без добавления U_s дает довольно точные результаты.

Однако наличие U_s заметно влияет на некоторые характеристики атома. Так, плотность электронного заряда на периферии атома убывает не экспоненциально, а быстрее, и обращается в нуль на конечном расстоянии от ядра. Атом имеет четко очерченные границы, распределенный заряд электронов не простирается в бесконечность.

Далее, концепция пространственно распределенного электронного заряда вызвала к жизни новое направление в квантовой электродинамике. Одна из ее задач — расчет так называемых радиационных поправок, обусловленных собственным полем электронов. Как известно, ранее эта область теоретической физики не была удовлетворительной по логической структуре [11]. Шрёдингеровская интерпретация позволила свести задачу к учету собственной потенциальной энергии U_s . Смещение энергетиче-

ских уровней атомов и спектральных линий (лэмбовский сдвиг), аномальный магнитный момент электрона и другие радиационные эффекты вычисляют теперь более действенными, точными и физически ясными методами, без расходимостей, перенормировки и вторичного квантования [12—16]. Разумеется, желателен учет релятивистских факторов [14].

Среди задач квантовой механики целесообразно различать внутренние и внешние. К внутренним задачам относится изучение характера распределения электронных зарядов и токов по объему атомной системы — атома, молекулы, кристалла и др. (например, потенциальной ямы). Эти задачи решаются на основе уравнения Шрёдингера. Именно для такой цели оно предназначалось его автором, выдвинувшим электродинамическую интерпретацию функции ψ .

К внешним задачам относится исследование атомных явлений, при которых частицы движутся через сравнительно протяженные области пространства, свободные от распределенного заряда электронов. Таковы процессы столкновений и рассеяния частиц, дифракция частиц на кристаллах и т.п. При решении внешних задач используют законы квантования энергии и импульса, связь между частотой и импульсом фотона и другие закономерности.

Уравнение Шрёдингера для решения внешних задач непосредственно не предназначалось. Тем не менее оно широко применяется и во внешних задачах, при вероятностной интерпретации функции ψ , давая результаты, подтверждаемые на опыте. Однако эти результаты на проверку могут оказаться и чисто иллюзорными. Так, для процесса рассеяния α -частиц на атоме уравнение Шрёдингера приводит к той же формуле Резерфорда, что и классическое рассмотрение. Формула эта вовсе не содержит постоянной Планка $\hbar$, уравнение Шрёдингера как бы выпадает в ходе выкладок. Получаемое при этом дополнительное слагаемое, содержащее $\hbar$, дает лишь кажущееся уточнение, поскольку производимый расчет не учитывает собственного поля распределенного заряда электронов.

Таким образом, применимость уравнения Шрёдингера к решению внешних задач требует тщательного исследования, и ее нельзя считать заведомо обоснованной. Для внутренних и внешних задач Барут [14] вводит два разных обозначения волновой функции: ψ и Ψ .

В атоме Томсона (1901 г.) положительный электрический заряд занимал весь объем атома, а электроны были вкраплены в него подобно изюминкам в булке. Резерфорд в 1911 г. показал, что положительный заряд атома сосредоточен в весьма малом его

заряде. Но электроны по-прежнему считались малыми. Наконец, предложенная в 1926 г. шрёдингеровская интерпретация заставляет изменить и представление об электронах. Оказалось, что электроны не малы, и их заряд заполняет весь объем атома. По Шрёдингеру, реальные атомы — это антиподы атома Томсона.

Как уже отмечалось, Шрёдингер не сразу пришел к своей интерпретации. Она вызревала у него постепенно и вначале переплеталась с ошибочными представлениями о колебаниях электронного заряда. На фоне триумфального успеха уравнения Шрёдингера его истолкование смысла функции ψ выглядело путанным и неубедительным. Оно долго предназначалось только для атома водорода. Лишь в четвертом сообщении Шрёдингер распространил свою интерпретацию на многоэлектронные системы. Но к этому времени, очевидно, читатели просто устали следить за беспрерывно меняющимися предположениями Шрёдингера. Вместо опубликования одного только конечного результата он раскрыл весь процесс своих поисков, картину долгого блуждания во тьме. И это имело весьма нежелательные последствия. Кроме того, в середине 1926 г. атом Шрёдингера уже должен был конкурировать с выдвинутой Максом Борном вероятностной интерпретацией волновой функции.

Встретив решительные возражения со стороны Бора, Гейзенберга и Дирака, шрёдингеровская интерпретация была отвергнута.

События развивались драматически. Четвертое сообщение Шрёдингера поступило в редакцию журнала «Annalen der Physik» 21 июня 1926 г. А 25 июня в редакцию другого журнала «Zeitschrift für Physik» поступила краткая заметка Борна, и 21 июля — его подробная статья [17]. По-видимому, Борн до этого так и не ознакомился с четвертым шрёдингеровским сообщением.

По Борну, частицы — материальные точки, и квадрат модуля волновой функции $\psi\psi^*$ есть плотность вероятности обнаружить частицу в данной точке пространства. Согласно этому истолкованию, которое стало общепринятым, квантовая механика может предсказывать не сами события, а лишь степень их вероятности.

5. Реальность концепции Шрёдингера. Шрёдингеровская интерпретация строения атома, как уже упомянуто выше, послужила основой для нового плодотворного направления в квантовой электродинамике. Это важное, но отнюдь не единственное практическое применение концепции Шрёдингера.

В квантовой химии широко используются матрицы плотности, впервые введенные Шрёдингером.

Матрицы плотности дают простое и ясное представление о роли каждого из электронов и атомов в сложной атомной системе. Они оказались гораздо более подходящими характеристиками строения сложных атомов, а также молекул и кристаллов, чем излишне детальные волновые функции [18].

Матрицу плотности, умноженную на суммарный заряд электронов, называют электронным распределением. Понятие электронного распределения используют также при рассмотрении столкновений частиц с атомами [19], при схематическом изображении структуры молекул и кристаллов и т.д.

При расчете многоэлектронных систем вводят понятие самосогласованного поля. Это позволяет приближенно свести задачу многих частиц к задаче движения одной частицы в усредненном поле остальных частиц системы. Применительно к расчету сложных атомов такой метод был предложен Д. Хартри в 1927 г. и усовершенствован В.А. Фоком в 1930 г.

Шрёдингеровская интерпретация находит подтверждение также в возможности просто и естественно объяснить ряд хорошо известных явлений, не допускающих разумного объяснения на иной основе,

Важнейшее из этих явлений — длительное устойчивое существование атомов в стационарных состояниях, т.е. отсутствие потерь энергии на излучение электронами, движущимися вокруг атомных ядер. Для атома Шрёдингера с его пространственно распределенным зарядом электронов это легко объяснить (см. п. 3). Но если считать электроны точечными или малыми по сравнению с атомом, то при действии законов классической электродинамики невозможно рационально объяснить отсутствие излучения движущимися электронами.

При шрёдингеровском представлении о «большом» электроны, по размерам сравнимом с атомом, спин электрона легко объясняется его вращением вокруг собственной оси (см. п. 2). Но если приписывать электрону «классический» радиус r_e линейные скорости его вращения должны были бы в сотни раз превышать скорость света.

Возможно и естественное объяснение туннельного эффекта. Преодоление потенциального барьера частицей, не имеющей номинально достаточного запаса энергии, можно представить следующим образом. При конечных и достаточно больших размерах частицы ее заряд ни в какой момент не должен располагаться весь целиком на вершине барьера. Значительная часть заряда все время оказывается на склонах или у подножия барьера, и требуемый для его преодоления запас энергии соответственно снижается.

Так, при прыжке в высоту с шестом спортсмен переносит через планку не все свое тело сразу, а

сначала ноги, затем корпус и, наконец, голову и руки. Центр его тяжести все время находится ниже планки.

Есть и другие аналоги туннельного эффекта из классической механики. Например, состав из железнодорожных вагонов (без локомотива), съехав с сортировочной горки некоторой высоты, может преодолеть затем горку и большей высоты при условии, что состав соответственно длиннее этой второй горки.

Предположение об исчезающе малых размерах электрона, как известно, приводит к так называемым расходимостям. Простейший пример расходимости — обращение в бесконечность энергии внешнего электрического поля электрона, равной e^2/r , при подстановке $r_e = 0$. Приравнивая энергию внешнего поля электрона его массе покоя mc^2 , находят “классический” радиус электрона $r_e = e^2 / mc^2 = 2,8 \cdot 10^{-13}$ см. Поскольку действуют законы классической электродинамики (см. п. 3), приходится заключить, что размеры электрона конечны и, во всяком случае, не меньше r_e .

Из выражений для классического радиуса, комптоновской длины волны и первого боровского радиуса

$$r = \frac{e^2}{mc^2}, \lambda_c = \frac{h}{mc}, a_1 = \frac{\hbar^2}{me^2}$$

видно, что величины с размерностью длины убывают с ростом массы покоя частицы. Масса электрона меньше массы протона, и, естественно, размеры электрона больше, чем протона. При обратной пропорциональности массе радиус электрона составлял бы

$$R_e = R_p m_p / m_e = 1836 R_p = 2,75 \cdot 10^{-10} \text{ см},$$

но ввиду различия внутреннего строения этих двух частиц радиус электрона больше, порядка 10 см.

Сравнительно большие размеры электрона подтверждаются и достигнутым уровнем разрешающей способности электронных микроскопов. В современных микроскопах используется ускоряющее напряжение до 100 киловольт, которому соответствуют волны де Бройля длиной $\lambda = h/p = 3,7 \cdot 10^{-10}$ см. Однако разрешающая способность электронных микроскопов, несмотря на достигнутое их высокое техническое совершенство, не лучше 10^{-8} см. Обычно это объясняют искажениями, которые вносят магнитные линзы. Но к тому же результату должны приводить и реальные размеры электрона, если они порядка 10^{-8} см. Такого порядка размеры электрона подтверждают и появившиеся в 80-х годах электронные микроскопы нового типа — сканирующие туннельные микроскопы Биннига и Рорера [20].

6. Заключение. Предложенная Шрёдингером модель атома выглядит необычно, однако представля-

ется достаточно обоснованной.

Атом Шрёдингера с его пространственно распределенным зарядом электронов — единственная модель атома, в которой движущиеся вокруг атомного ядра электроны не излучают энергии в стационарных состояниях атома, хотя законы классической электродинамики и сохраняют там силу [10].

Идея непрерывного распределения заряда электронов по объему атомной системы фактически уже давно нашла практическое применение при расчете сложных атомов (метод Хартри—Фока) и в квантовой химии («электронное распределение»), а в последнее время на ее основе возникло новое плодотворное направление в квантовой электродинамике [12—16].

Разумеется, необходима более обширная информация о появившихся действенных и физически ясных методах расчета радиационных эффектов. Адекватной оценке атома Шрёдингера способствовало бы и более широкое обсуждение применимости электродинамики Максвелла внутри атома. Ввиду действия классической электродинамики приходится признать представление о точечных электронах несостоятельным — как бы ни двигались в атоме точечные электроны, они неизбежно теряли бы свою энергию на излучение, и атомы разрушались.

Вместе с тем при рассмотрении так называемых внешних задач, и в частности при изучении процессов столкновений и рассеяния, совершенно естественно принимать электроны и другие микрочастицы за материальные точки. Аналогичное упрощение используют, например, в небесной механике по отношению к планетам и Солнцу. Достигаемая при этом высокая точность вычислений, конечно же, никак не свидетельствует о нулевых размерах небесных тел. Точно так же никакие успехи в решении внешних задач нельзя считать доказательством нулевых размеров электрона и других частиц.

Шрёдингеровская электродинамическая интерпретация волновой функции, выдержанная в классическом духе и отвечающая научным принципам причинности и познаваемости (наглядности), была в свое время отвергнута. Возобладала вероятностная интерпретация, основанная на представлении о точечном электроны и отрицающая причинную обусловленность индивидуальных событий и явлений в микромире. Кстати, Макс Борн пришел к вероятностной интерпретации в результате исследования именно процессов столкновений и рассеяния частиц, а не внутреннего строения атома [17].

Едва ли не большинство создателей квантовой механики, — Планк и Эйнштейн, де Бройль и Шрёдингер, Гейзенберг и Дирак, — в разное время и в разной

форме возражали против отхода от классических принципов. По поводу отрицания классической причинности Дирак писал: «Я уверен, что та стадия физики, которая достигнута на сегодняшний день, не является окончательной» [21].

В годы создания теории атомных явлений наряду с вероятностно-волновыми концепциями, ставшими в дальнейшем общепринятыми, были выдвинуты также альтернативные идеи и решения, лежащие в классическом русле. Шрёдингеровская модель атома — только одно из этих решений. История квантовой механики, несомненно, нуждается в более полном освещении и исследовании.

Приложение. М. Боулер приводит доказательство уравнений Максвелла на основе специальной теории относительности, закона Кулона и закона сохранения электрического заряда [8].

Вначале из закона Кулона непосредственно получают законы электростатики, включая уравнение Пуассона

$$\Delta\varphi = -4\pi\rho,$$

связывающее потенциал φ и плотность электрического заряда ρ . Разумеется, это уравнение не удовлетворяет требованию ковариантности по отношению к преобразованиям Лоренца — оно содержит лишь три пространственные координаты x, y, z . Необходимо его дополнить, введя время t в качестве четвертой координаты, т.е. заменив оператор Лапласа Δ оператором Даламбера $\square$:

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \square\varphi = -4\pi\rho.$$

В написанном уравнении φ и ρ должны обладать одинаковыми трансформационными свойствами. С учетом закона сохранения заряда это возможно лишь в случае, когда φ и ρ являются одноименными компонентами двух 4-векторов. Эти 4-векторы можно написать в виде

$$A_\nu = (A, i\varphi), \quad J_\nu = (J, ic\rho).$$

Естественно назвать A вектором-потенциалом, J — плотностью тока. Ясно, что и другие пары одноименных компонент должны быть связаны аналогично тому, как связаны φ и ρ :

$$\square A_\nu = -\frac{4\pi}{c} J_\nu \quad (\nu = 1, 2, 3, 4).$$

Но это и есть система уравнений классической электродинамики в четырехмерной записи. Уравнение для φ получается отсюда при $\nu = 4$. Переход от потенциалов A, φ к векторам поля E, H приводит к

уравнениям Максвелла.

Наконец, Боулер составляет ковариантное уравнение для скорости изменения импульса заряженной частицы в электромагнитном поле и получает в правой части этого уравнения известное выражение для силы Лоренца

$$\frac{dp}{dt} = q(E + \frac{1}{c} [vH]).$$

Вывод уравнений классической электродинамики, опирающийся на специальную теорию относительности — фундаментальный результат, который мог быть получен, однако, уже в 1905—1907 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Schrodinger E.* // Ann. d. Phys. **1926**. Bd. 79. S. 361; Bd. 79. S. 489; Bd. 80. S. 437; Bd. 81. S. 109; перевод соответственно: Шрёдингер Э. Избр. труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976. С. 9, 21, 75 и 116.
2. *Schrödinger E.* // Ibidem. Bd. 79. S. 734; перевод: Шрёдингер Э. // Ibidem. С. 56.
3. *Jammer M.* The Conceptual Development of Quantum Mechanics. — New York: McGraw-Hill, 1967; перевод: Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. — М.: Наука, 1985. С. 251 и 262.
4. *Schrodinger E.* // Phys. Rev. 1926. V. 28. P. 1049; перевод: // [1]. С. 183.
5. *Полок Л.С.* Эрвин Шрёдингер и возникновение квантовой механики // [1]. С. 391.
6. *Спасский Б.И.* История физики. Т. 2. М.: Высшая школа, 1977. С. 261.
7. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. М.: Наука, 1988. С. 11. 69—74, 95—107.
8. *Bowler M.G.* Gravitation and Relativity. Oxford: Pergamon Press, 1976; перевод: Боулер М. Гравитация и относительность. — М.: Мир, 1979. С. 52—60.
9. *Purcell E.M.* Electricity and Magnetism. New York: McGraw-Hill, 1965; перевод: Парселл Э. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1975. С. 181—187.
10. *Власов А.Д.* Препринт МРТИ 9009. Москва, 1990.
- [11] *Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989. С. 10, 18.
12. *Ackerhalt J.R., Eberly J.H.* // Phys. Rev. 1974. V.D10, No. 10. P. 3350.
13. *Barut A.O.* // Ann. d. Phys. 7. Folge. 1988. Bd. 45, 3. 1. S. 31.
14. *Barut A.O.* // Found. Phys. Lett. 1988. V. 1, No. 1. P. 47.
15. *New Frontiers in Quantum Electrodynamics and Quantum Optics.* / Ed. Б.П. Барут. New York: Plenum Press, 1990.
16. *Barut A.O., Bowling J.P.* // Phys. Rev. 1990. V. A41, No. 5. P. 2284; **1991**. V. A43, No. 7. P. 4060.
17. *Born M.* // Zs. Phys. 1926. Bd. 38. S. 803; перевод: Борн М. // УФН. 1977. Т. 122. С. 632.
18. *McWeeny R., Sutcliffe B.T.* Methods of Molecular Quantum Mechanics. London; New York: Academic Press, 1969; перевод: Мак-Вини Р., Сатклиф Б. Квантовая механика молекул. М.: Мир, 1972. С. 102.
19. *Блохинцев Д.И.* Основы квантовой механики. М.: Наука, 1976. С. 330.
20. *Binnig G., Rohrer H.* Scanning tunneling microscopy — from birth to adolescence. — Nobel lecture. Stockholm. December 8, 1986; перевод: Бинниг Г., Рорер Г. // УФН. 1988. Т. 154. вып. 2. С. 261.
21. *Dirac P.A.M.* // Scientific American. **1963**. V. 208, No. 5. P. 45.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В апрельском, юбилейном, номере «Успехи физических наук» (т. 163, № 4), посвященном 75-летию журнала, будут опубликованы статьи:

А.Н. Крылов. Северные сияния и магнитные бури.

Иг. Тамм. Магнетизм и строение атомов.

Гр. Ландсберг. Новое в вопросе о рассеянии света.

Г. А. Гамов. Очерк развития учения о строении атомного ядра (части I, IV).

З.З. Семенов. Газовые взрывы и теория цепных реакций.

П.Л. Капица. Экспериментальные исследования в сильных магнитных полях.

Э.В. Шпольский. Современная фотохимия.

Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харитон. Деление и цепной распад урана.

И.В. Курчатов. Деление тяжелых ядер.

К.А. Летржак, Г.З. Флеров. Спонтанное деление урана.

Апрельский номер «УФН» можно приобрести, обратившись в редакцию до 25 марта 1993 г.

Индекс по каталогу «Росспечати» — 71004.