

зительно на три порядка. Таким образом, соображения размерности не дают обнадеживающего результата, не говоря о том, что невозможно придумать классический механизм, который дал бы формулу (46а). Это никому не удалось сделать, и законы фотоэффекта являются сильнейшим доводом в поддержку идеи Эйнштейна о *квантовании энергии* *).

В дальнейшем нам станет ясно, что в формуле (46а) выражен фундаментальный принцип квантовой физики, а именно имеющая *универсальный* характер связь между энергией и частотой:

$$E = h\nu.$$

Эта связь полностью чужда классической физике, и мистическая константа $X_2 (=h)$ в (46а) есть проявление непостигнутого в то время тайн природы.

Проблема стабильности и размера атомов

47. Обратимся теперь к третьей проблеме, а именно к вопросам о стабильности и размерах атомов. Остановимся в особенности на последнем вопросе. Мы можем определить «размер» атома как расстояние между двумя соседними атомами твердого тела или жидкости. Из опыта известно, что эта величина имеет порядок $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$. Очевидно, что порядок этой величины определяется постоянной Авогадро N_0 . Действительно, масса 1 см^3 жидкости или твердого тела имеет порядок 1 г. Весьма приблизительно можно считать, что в этом объеме содержится N_0 атомов, и тогда линейные размеры атомов имеют порядок $(1/N_0)^{1/3} \text{ см} \approx 1 \text{ \AA}$. Мы отмечали уже, что *точные* измерения межатомных расстояний в кристаллах дают значение постоянной Авогадро.

Вопрос теперь в том, можно ли в рамках классической физики объяснить размеры атомов, иными словами, можно ли вычислить «радиус» атома, опираясь на основные константы классической физики.

48. В 1910 г. Г. Гейгер и Е. Марсден выполнили опыты по рассеянию α -частиц. Анализ этих опытов привел Резерфорда **) к выводу, что атом состоит из очень малого центрального ядра, окруженного электронами, и что большая часть массы атома заключена в его ядре. Из этих опытов следовало также, что размеры ядра и электронов очень малы по сравнению с размером всего атома, они меньше 10^{-11} см . После работ по рассеянию α -частиц ядрами естественно было представлять себе атом как нечто подобное Солнечной системе, где ядро играет роль Солнца, а электроны — роль планет. Эти частицы движутся под действием электростатических сил, и большая часть атома представляет собой «пустое пространство». Размер атома определяется радиусом орбит внешних электронов.

*) Заметим, что в своей работе Эйнштейн не пользовался термином *фотон* для кванта электромагнитной энергии. Это название появилось много позже.

**) *Rutherford E. The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom.*— Phil. Mag., 1911, v. 21, p. 669; см. также том I этого курса: *Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика.*— 3-е изд.— М.: Наука, 1983.

Примем временно такую модель атома и допустим также, что скорость частиц в атоме столь мала, что позволяет ограничиться нерелятивистской механикой. Теперь мы должны ответить на следующий вопрос: чем определяется размер орбиты внешнего электрона? Заметим, что в нашей модели нет места для скорости света. Но в этом случае из наших основных классических констант e , m и M_H нам не удастся получить величину с физической размерностью длины, и возникает подозрение, что наша задача не может быть решена в рамках классической физики. Из дальнейшего это станет яснее.

49. Рассмотрим атом, состоящий из Z электронов (заряд каждого электрона равен $-e$) и ядра (с зарядом $+Ze$). Мы можем считать что центр масс всей системы этих частиц покоится. Такое предположение не уменьшает общности наших рассуждений. Каждая частица движется по определенной орбите, описываемой функцией $r_k(t)$. Эта функция задает радиус-вектор частицы в момент t (за начало координат примем центр масс системы).

Совокупность функций $r_k(t)$ ($k=1, 2, \dots, Z+1$) образует одно решение уравнений движения системы. Из этого единственного решения можно построить целое семейство *новых* решений простым изменением масштаба. Пусть q — любая не равная нулю постоянная; тогда функция

$$r'_k(t) = q^2 r_k(t/q^3) \quad (49a)$$

также удовлетворяет уравнениям движения. Другими словами, функция $r'_k(t)$ описывает траекторию k -й частицы в новом состоянии движения системы. Это легко показать следующим образом. Сила F_{ij} , с которой j -я частица действует на i -ю, равна

$$F_{ij} = Q_i Q_j \frac{r_i - r_j}{|r_i - r_j|^3}. \quad (49b)$$

Здесь Q_i и Q_j — заряды частиц i и j . Новое решение получается из старого умножением всех расстояний на множитель q^2 . Это значит, что силы в новом состоянии движения получаются умножением сил в старом состоянии движения на множитель q^{-4} , и, следовательно, в том же масштабе должно измениться и ускорение. Поскольку линейные масштабы умножаются на q^2 , все скорости умножаются на q^{-1} , а все времена — на q^3 . Именно это и выражает уравнение (49a), которое определяет новое решение.

Заметим теперь, что все моменты импульса умножаются на q , а потенциальная и кинетическая энергии, а следовательно и полная энергия, — на q^{-2} .

Тот факт, что описанным изменением масштаба можно из данного решения получить новое, есть обобщение третьего закона Кеплера. В приложении к частному случаю одиночного электрона, движущегося вокруг неподвижного ядра, из наших рассуждений следует, что для двух эллиптических орбит с одним и тем же эксцентриситетом отношение квадратов периодов пропорционально отношению кубов полуосей.

Поскольку величине q можно придать любое значение, то мы имеем семейство решений, и нет оснований отдать предпочтение какому-либо из них. Это значит, что мы не располагаем принципом, который позволил бы нам выбрать «размер» атома. Остается допустить, что осуществленный природой выбор размера «случайный», но в это трудно поверить. Каким образом такой «случайный» выбор всегда приводит к тому, что атомы данного сорта имеют одинаковые размеры? Почему, например, для атомов водорода не осуществляется непрерывное распределение возможных размеров?

50. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо понять, почему мы решили рассматривать нашу проблему в нерелятивистском приближении. Заметим, что если в число классических констант включить и скорость света, то из них можно образовать выражение, имеющее размерность длины:

$$e^2/mc^2 = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ см.} \quad (50a)$$

Эта величина носит название «классического радиуса электрона», и мы говорили о ней в п. 18. Итак, если релятивизм в атоме действительно играет существенную роль, т. е. если электроны движутся со скоростью, близкой к скорости света, то размер атома должен быть порядка e^2/mc^2 . В действительности эта величина на четыре порядка (10^4) меньше размеров атома, и поэтому кажется, что релятивистский подход не может дать нужного результата. Конечно, наши простые масштабные соображения из п. 49 не могут быть непосредственно перенесены на релятивистский случай. Но все же очевидно, что у нас принципа, который помог бы понять, почему реализуются лишь определенные орбиты, соответствующие наблюдаемым размерам атома.

51. Мы можем назвать нашу проблему «тайной потерянной константы». Предположим, что эта тайна связана с рассмотренной выше и что в описании строения атома должна играть какую-то роль постоянная Планка. Она имеет размерность момента импульса, и мы можем сделать специальное предположение, что в природе осуществляются лишь такие решения уравнений движения, для которых полный момент импульса атома является целым кратным h . Приняв этот принцип, мы освобождаемся от масштабных соображений, заключенных в формуле (49a). Теперь момент импульса определен и его нельзя умножить на коэффициент q . Это означает, что у нас имеются выделенные решения, и, таким образом, мы обладаем принципом, который позволяет определить размеры атома.

В 1913 г. Нильс Бор предложил теорию атома водорода, основанную на следующих соображениях *). В своей простейшей форме теория считает, что движение электрона в атоме водорода происходит по круговой орбите радиуса a_0 вокруг протона. Эта орбита определяется уравнением движения

$$mv^2/a_0 = e^2/a_0^2 \quad (51a)$$

*) Bohr N. On the Constitution of Atoms and Molecules.— Phil. Mag., 1913, v. 26, p. 1.

и квантовым условием Бора

$$J = mva_0 = h/2\pi, \quad (51b)$$

Здесь v — скорость электрона, а J — его момент импульса. Квантовое условие означает, что момент импульса должен быть равен $h/2\pi$. Устранив v из написанных уравнений, получаем

$$a_0 = h^2/(2\pi)^2 me^2 = 5,29 \cdot 10^{-9} \text{ см}, \quad (51c)$$

что имеет верный порядок величины. Следует заметить, что размер атома имеет непосредственное отношение к вопросу о его энергии связи. Если расстояние от электрона до ядра известно, то можно оценить работу, необходимую для разделения атома на составные части.

52. Читатель, вероятно, знает, что теория атома Бора позволила продвинуться гораздо дальше. Она дала количественное объяснение спектра атома водорода, и это было большим успехом новых идей. Квантовые условия этой теории совершенно чужды классической физике. Кроме того, Бор предположил, что электрон, находясь в основном состоянии атома водорода, не излучает электромагнитной энергии. В противном случае, согласно классической электромагнитной теории, электрон должен был бы падать на ядро, двигаясь по спирали, и такое падение произошло бы за очень малое время (порядка 10^{-9} с).

Эту планетарную теорию атома нельзя считать серьезной теорией. Она просто неверна. Тот факт, что она приводит к очень хорошим результатам в случае атома водорода, к счастью (или к несчастью), случаен. Этот успех явился для Бора и других теоретиков мощным толчком к развитию квантовой теории атома, но сам Бор никогда не обманывался, он не считал, что атом подобен планетной системе. Он рассматривал свою теорию как промежуточный этап в поисках более верной теории. И такая теория теперь существует.

53. Три рассмотренные проблемы — это три аспекта существования постоянной Планка. Последняя проблема с особенной ясностью показывает, что появление этой постоянной в ряду известных фундаментальных констант должно иметь далеко идущие последствия. Теперь можно надеяться, что мы способны понять не только такие проблемы, как размеры атома и его энергия связи, но и свойства молекул, и нам будет открыт путь к количественной атомной теории вещества в целом.

Следует подчеркнуть, что во всех трех проблемах *существенным* было то, что для разрешения трудностей необходимо было отказаться от классических законов макроскопической физики. Таким образом, *рассмотрение этих проблем приводит к большему, нежели только открытие новой константы, — к открытию новых законов физики.*

После этих открытий развитие физики пошло быстрыми темпами. Стало ясно, что найден ключ к объяснению многих явлений микрофизики. Кульминацией теоретических исследований было появление двух равноценных математических теорий квантовой физики: *матричной механики* (созданной Вернером Гейзенбергом в 1925 г.) и

волновой механики (созданной Эрвином Шредингером в 1926 г.). Обе эти теории оказались полностью эквивалентными и представляют собой лишь различные формы теории, которую мы теперь называем *квантовой механикой* — общепринятой в настоящее время фундаментальной теорией микрофизики.

54. Вероятно, у читателя возникли тревожные вопросы: можем ли мы считать, что квантовая механика есть окончательная истина? Что же тогда остается открытым в физике?

Автор рад еще раз заверить читателя, что его опасения напрасны. Мы никогда не можем быть уверены в том, что данная теория представляет собой окончательное решение проблемы. И мы не знаем, «что еще осталось открыть». По-видимому, весьма многое, ибо мы все еще далеки от того, чтобы иметь единую теорию всех явлений природы. Мы многое узнали, но еще больше осталось познать. В этом одна из причин того интереса, который вызывает физика. Так что читатель может не беспокоиться, что родился слишком поздно, чтобы совершать открытия в физике.

Попытаемся ответить более точно на эти вопросы. *Общие* принципы квантовой механики «истинны» в том смысле, что нет экспериментальных данных, которые бы им противоречили, и существует огромное число успешных предсказаний, основанных на этих принципах.

Такая ситуация особенно характерна для квантовой электродинамики, которая является теоретической основой понимания свойств атомов, молекул, электромагнитного излучения и вещества в целом, по крайней мере на Земле. Мы уже говорили, что в классической физике никогда не было создано столь *общей* теории. Теперь такая теория имеется, и весьма плодотворная. Это означает, в частности, что мы имеем основные принципы, в рамках которых можно объяснить, например, такие явления, как сверхпроводимость и сверхтекучесть. Однако до сих пор не удалось объяснить эти два явления количественно на базе основных принципов. Знание основных принципов — это одно дело, а объяснение сложных явлений, в которых участвует много частиц, — совсем другое. Мы верим в наши основные принципы потому, что, опираясь на них, можно описать поведение простых систем, состоящих из сравнительно небольшого числа частиц (например, отдельные атомы или простые молекулы). Существуют, однако, математические трудности, и по мере того, как увеличивается сложность физической ситуации, эти трудности быстро растут, и вместо количественных предсказаний мы оказываемся в состоянии лишь достичь общего качественного понимания явления. Мы не ошибемся, сказав, что в физике всегда будут существовать трудности такого рода и для их преодоления всегда будут нужны свежие идеи. Возможно, что квантовая электродинамика является почти «закрытым» предметом с фундаментальной точки зрения, но она совершенно не завершена в том смысле, что из нее далеко еще не извлечены все возможные следствия.

55. С точки зрения физики начала века «стабильные и неделимые» атомы являлись элементарными частицами мира. Сегодня атомы по-

теряли это исключительное положение; их свойства объяснила квантовая электродинамика с помощью более элементарных объектов. То же самое можно сказать и о ядрах. Невозможно объяснить свойства ядер на основании некоторых простых принципов, но тем не менее мы твердо уверены, что ядра — сложные системы, образованные из протонов и нейтронов.

После того как стал ясен сложный характер атомов и ядер, число частиц, которые можно считать элементарными, резко уменьшилось. Но затем их число начало неуклонно возрастать, и сейчас их не меньше, чем было в начале века. Место атомов заняли электроны, мюоны, нейтрино, протоны, нейтроны, гипероны, пионы, каоны и многие другие частицы. Мы уже объяснили, в каком смысле эти частицы являются элементарными.

Сейчас еще не существует фундаментальной теории элементарных частиц, и мы не знаем, какую форму примет будущая теория. Эта область широко открыта для новых идей.

Задачи

1. а) Рассмотрите и кратко опишите идеи и опыты, на основании которых можно определить атомные и молекулярные массы.

б) В 1815 г. В. Прут предположил, что все элементы «построены» из водорода, который является, таким образом, первичной материей, из которой сделано все в мире. Что привело его к этой гипотезе и почему в XIX веке она была отвергнута?

2. Многие атомы (точнее, ядра атомов) испытывают спонтанный распад, при котором обычно происходит испускание электрона или α -частицы (ядро атома гелия). В этом заключается явление *радиоактивности*, открытое Беккерелем в 1896 г. Скорость распада определяется статистическим законом, который предсказывает, что из N_0 атомов, существовавших в начальный момент времени ($t=0$), к моменту времени t останется $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ атомов. Постоянная λ , определяющая скорость распада, является характеристикой данного ядра. Время T , по истечении которого останется половина первоначально имевшихся ядер, называется периодом полураспада. Легко показать, что $T = \lambda^{-1} \ln 2$.

а) Покажите, что приведенный выше закон радиоактивного распада можно вывести из предположения, что каждое ядро распадается независимо от остальных, а вероятность того, что атом, выживший до момента времени t , распадется в интервале времени $(t, t+dt)$, не зависит от t .

б) При распаде ядра радия испускается α -частица. При ее падении на экран из сернистого цинка возникает световая вспышка (*сцинтилляция*), что позволяет непосредственно подсчитать число α -частиц, испущенных 1 г радия за 1 с. Это число, впервые определенное Гессом и Лоусоном, равно $3,72 \cdot 10^{10}$. Атомная масса радия равна 226. Воспользовавшись этими цифрами, определите период полураспада радия. (Измерения с радиоактивными веществами были использованы для независимого определения постоянной Авогадро. В приведенной задаче процедура обратная — зная постоянную Авогадро, мы определяем период полураспада радия.)

3. Движущиеся элементы ручных часов весьма «малы». Сделав разумные оценки физических параметров для «типичных» ручных часов, покажите на основании общего критерия, данного в п. 20, что квантовая механика не имеет отношения к искусству изготовления часов.

4. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из конденсатора емкостью 100 пФ и индуктивности 0,1 мГн. Допустим, что в цепи существуют колебания и максимальная разность потенциалов на емкости равна 1 мВ. Найдите «естественную» физическую переменную с размерностью действия и сравните ее значение с постоянной Планка h .