

Более того, классические концепции зачастую оказываются хорошим приближением для рассмотрения *некоторых* особенностей микрофизических явлений. Очень важно, что мы понимаем пределы применимости классических концепций. В этой главе мы дадим читателю лишь общее представление об этих пределах. По мере расширения знаний он познакомится в последующих главах с квантовыми явлениями и приобретет более точное понимание этой важной проблемы.

Классические теории, как было с определенностью установлено огромным числом опытов, выполненных в нашем столетии, не имеют универсальной применимости. Мы познакомим читателя с некоторыми экспериментальными доказательствами, и он убедится в том, что действительно таковы свойства нашего мира.

6. Размышляя об изменениях, происшедших в физике в течение этого столетия, мы должны иметь в виду, что классическая физика не дала нам *исчерпывающей* теории строения вещества. Законы классической физики являются хорошими феноменологическими законами, но они не говорят нам всего о макроскопических телах. С помощью этих законов мы можем описать поведение (движение) механизмов, состоящих из пружин, рычагов, маховых колес и т. д., если мы располагаем такими «физическими константами», как плотность, модуль упругости и т. д., характеризующими вещество, из которого эти механизмы сделаны. Но классическая теория не может ответить, *почему* плотность или модуль упругости имеют именно такие значения, *почему* стержень ломается, когда напряжение становится больше определенного предела, и т. д. Она не объясняет, почему медь плавится при  $1083^{\circ}\text{C}$ , почему пары натрия испускают желтый свет, почему водород обладает присущими ему химическими свойствами, почему светит Солнце, почему ядро урана спонтанно делится, почему серебро — проводник, а сера — изолятор и почему постоянные магниты можно делать только из стали. Можно без конца перечислять обычные экспериментальные факты, о которых классическая теория может сказать мало или совсем ничего не говорит.

7. Читатель спросит, обладаем ли мы *сейчас* исчерпывающей теорией строения вещества? Ответ будет отрицательным: у нас нет детальной теории, которая могла бы объяснить *все* явления в нашем мире. Но за последнее столетие наше понимание природы вещей чрезвычайно расширилось. Мы узнали о новых свойствах природы, о которых не имели ни малейшего представления, и успешно решили множество старых проблем. С удовлетворением можно сказать, что теперь мы понимаем химические явления и макроскопические свойства вещества. В этих областях физики мы уже можем ответить на те вопросы, которые не могла разрешить классическая теория.

## Атомы и элементарные частицы

8. Перейдем к идее элементарных частиц. Греческим философам принадлежит заслуга введения в теорию вещества идеи об атомах. (Не исключено, что аналогичные соображения развивались другими

народами гораздо раньше.) Следует сразу же отметить, что «атомы» древних сильно отличаются от атомов, с которыми имеем дело мы. Нелегко точно понять, что подразумевали греческие философы под этим термином, но основной проблемой, интересовавшей их, был вопрос о том, бесконечна ли делимость вещества. Если вещество нельзя дробить бесконечно, то в конце концов мы приходим к идее об элементарной частице вещества, т. е. об «атоме». Возьмем некоторое вещество и будем делить его на всё более мелкие части. В конце концов настанет предел, когда дальнейшее деление невозможно. Слово «атом» как раз означает «неделимый».

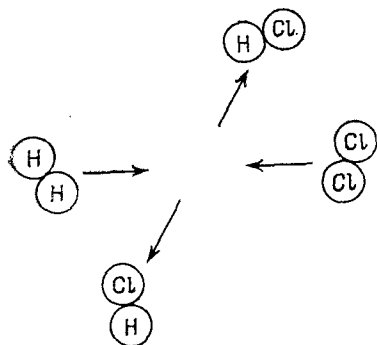


Рис. 9А. Схематическое представление химической реакции  $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$ , показывающее, что она заключается в перераспределении исходных «элементов». В действительности процессы, происходящие при «сгорании» газообразного водорода в атмосфере хлора, очень сложны: происходит выделение энергии в форме света и кинетической энергии продуктов реакции, газы нагреваются, и молекулы  $H_2$  и  $Cl_2$  диссоциируют на атомы, которые соединяются в молекулы  $HCl$ . Играть роль и другие процессы, которые заключаются в возбуждении атомов и молекул светом или через столкновение

Греческие атомисты верили, что любое вещество построено из «атомов», и, вероятно, чувствовали, что бесконечное многообразие свойств вещества должно быть объяснено конфигурацией (и движением?) «атомов». Эти идеи довольно близки к современным, но существует огромное различие между нашими количественными теориями, основанными на опыте, и туманными размышлениями древних.

9. В этой книге мы не будем заниматься ранней историей атомной теории, но читатель должен вспомнить, что в XIX веке атомная гипотеза привела к замечательным успехам в понимании ряда явлений. Она объяснила основной факт, известный химикам: данное сложное химическое вещество состоит из определенных химических элементов, причем пропорции, в которых входят эти элементы, определяют вещество. Рассмотрим, в частности, тот замечательный факт, что химически сложные вещества можно представить такими простыми формулами, как  $H_2O$ ,  $H_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$  или  $NaOH$ . Замечательным в этих формулах является появление небольших целых чисел, показывающих, например, что *две единицы* водорода, объединяясь с *одной единицей* кислорода, образуют *одну единицу* воды, и т. п. Этот опытный факт легко объяснить, предположив, что вещество состоит из атомов; химические соединения состоят из молекул, которые в свою очередь являются сложными системами, состоящими из небольшого числа атомов. Два атома водорода совместно с одним атомом кислорода образуют молекулу воды. Ясно и просто.

Дальнейшие подтверждения атомной гипотезы связаны с успехами *кинетической теории газов*, развитой в работах Максвелла и

Большмана. Эта теория смогла объяснить многие свойства газов, исходя из предположения, что газ в сосуде представляет собой рой молекул, беспорядочно движущихся и непрерывно сталкивающихся со стенками и друг с другом. Кинетическая теория позволила оценить постоянную Авогадро:  $N_0 = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>, представляющую собой число молекул в моле любого газа. (Модем любого химического соединения мы называем такое его количество, масса которого, выраженная в граммах, равна молекулярной массе соединения \*.) Первая грубая оценка значения  $N_0$  была сделана Лошмидтом в 1865 г.

Имея такие указания о существовании атомов, трудно поверить, что вплоть до конца прошлого века некоторые ученые отрицали атомную гипотезу на основании отсутствия *прямых* (!) доказательств атомного строения вещества.

10. «Атомы» греческих философов не идентичны атомам нашего времени. Прежде всего, наши атомы нельзя считать неделимыми: они построены из протонов, нейтронов и электронов. Роль «атомов» в понимании греков в какой-то степени играют именно протоны, нейтроны, электроны и множество других элементарных частиц. Что мы понимаем под «элементарной частицей»? Точный смысл этого понятия в настоящее время спорен, но для наших целей практически достаточно простого ответа на поставленный вопрос: частицу можно считать элементарной, если ее нельзя описать как сложную систему, состоящую из других, более элементарных объектов. Мы не в состоянии указать на «части» элементарной частицы, она не «построена» из чего-то более простого. На ней наши попытки мысленного деления закончились. При таком определении элементарны протон, нейтрон и электрон, но не атом водорода и не ядро урана.

Итак, вот в чем суть идеи, что вещество не может быть бесконечно делимо: невозможно понять строение вещества, исходя из принципа, что сколь угодно малая часть по своим свойствам подобна целому. В конце концов такой процесс деления теряет смысл; мы приходим к неделимым объектам, и они являются нашими элементарными частицами.

11. Как доказать, что электрон действительно элементарен? Окажется ли объект, представляющийся сегодня элементарным, завтра сложным? В конце концов, то, что мы сегодня считаем атомами, в прошлом столетии было элементарными частицами. Не может ли история повториться?

Существует большое число экспериментальных фактов, показывающих, что история не повторится: частицы, подобные электрону, протону или нейтрону, никогда не окажутся сложными в том же смысле, в каком сложен атом водорода. Попытаемся понять смысл этих фактов.

Если два кусочка мрамора, направленные навстречу с большой скоростью, столкнутся, то они разлетятся на более мелкие осколки.

\*) В настоящее время *моль* определяется как количество вещества системы, содержащей столько структурных элементов, сколько содержится атомов в нуклиде <sup>12</sup>C массой 0,012 кг.— *Прим. ред.*

Аналогично, две молекулы водорода, если их энергия достаточно велика, сталкиваясь, образуют осколки. Если энергия не была *слишком* велика, то среди осколков мы обнаружим атомы водорода, протоны, электроны, — иными словами, объекты, из которых построены молекулы водорода. То, что произошло в этих случаях, может быть описано следующим образом. При столкновении действовали

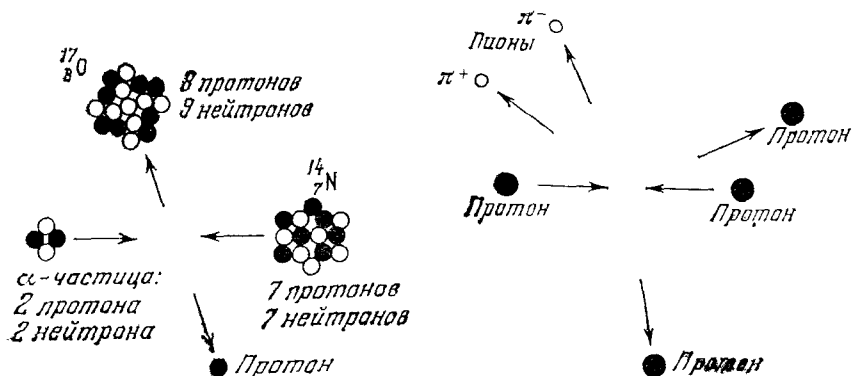


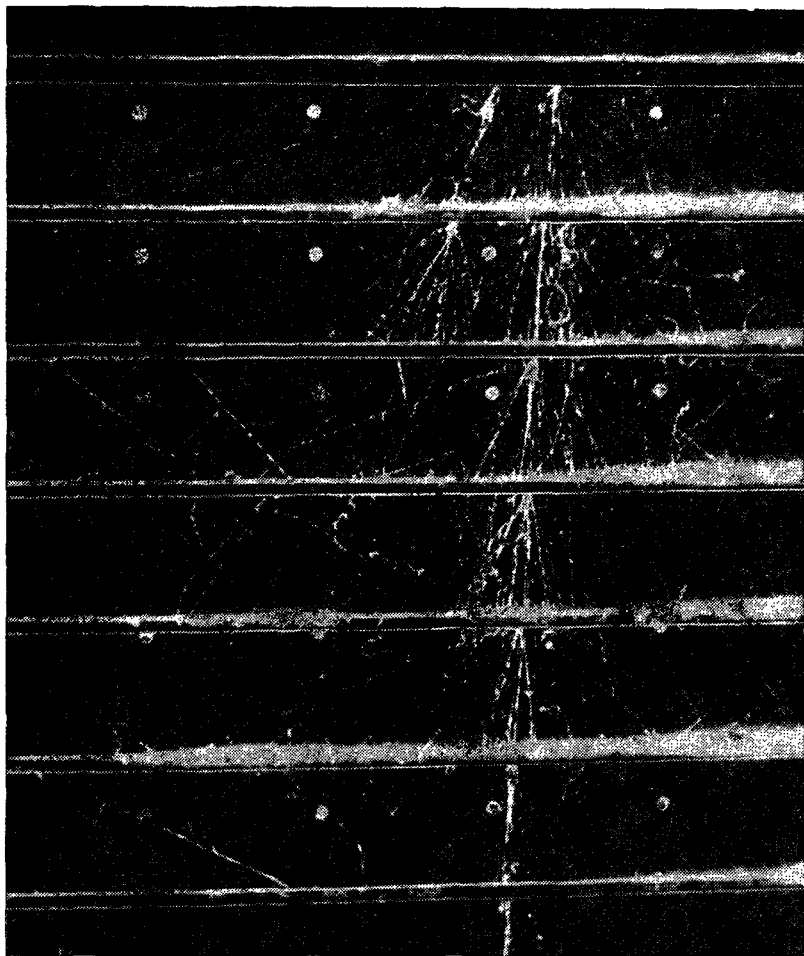
Рис. 11А. Схематическое представление ядерной реакции:  $\alpha$ -частица (ядро гелия) сталкивается с ядром азота, в результате образуется ядро кислорода и протон. Именно эта реакция, открытая Резерфордом в 1919 г., была первым наблюдаемым превращением одних стабильных ядер в другие (Rutherford E. — Phil. Mag., 1919, v. 37). В опыте Резерфорда азот бомбардировался  $\alpha$ -частицами радиоактивного источника, а реакция идентифицировалась по наблюдению испущенных протонов. Этот рисунок аналогичен рис. 9А и показывает, что ядра состоят из протонов и нейтронов, а ядерная реакция заключается (при малых энергиях) в перераспределении этих частиц между ядрами. Такой рисунок не следует понимать буквально: ядра «не похожи» на то, что показано на рисунке

Рис. 12А. Схема, иллюстрирующая рождение двух пионов при столкновении двух протонов большой энергии. Заряд одного пиона равен  $+e$ , второго  $-e$  ( $e$  — элементарный заряд). Полный заряд в рассматриваемой реакции, конечно, сохраняется. После столкновения оба протона продолжают существовать и возникают две новые частицы. Очевидно, что наивные модели, подобные показанным на рис. 9А и 11А, здесь не годятся: явление нельзя рассматривать как «перегруппировку» неких элементов, из которых «состоят» протоны

силы, превосходящие силы сцепления, удерживающие отдельные части как мрамора, так и молекулы водорода, и эти объекты развалились. Аналогичным образом можно интерпретировать множество ядерных реакций. Ядра состоят из протонов и нейтронов, и если протон, обладающий большой энергией, попадает в ядро, он может выбить из него несколько протонов и нейтронов.

12. Однако если мы изучаем столкновения двух элементарных частиц, например двух протонов, при достаточно большой энергии, то обнаружим явления, *качественно отличные* от рассмотренных выше. Например, если протон очень большой энергии сталкивается с другим протоном, то после столкновения оба протона останутся протонами, но мы обнаружим также среди продуктов реакции одну или несколько новых элементарных частиц, например  $\pi$ -мезоны. Мы говорим, что в такой реакции *родились*  $\pi$ -мезоны (их называют также пионами). Но этим не исчерпываются явления, вызванные столкновением протона с протоном: протоны могут исчезнуть, вместо них могут возникнуть новые частицы, называемые  $K$ -мезонами и гиперонами.

Аналогично, при столкновениях двух быстрых электронов конечными продуктами распада могут оказаться *три* электрона и один позитрон (позитрон отличается от электрона только знаком своего



ис. 13А. Фотография каскадного ливня в камере Вильсона. Большая часть видимых следов принадлежит электронам и позитронам, движущимся сверху вниз. Частица в верхнем правом углу камеры, проходящая до остановки через три пластины, может быть пионом. Дальнейшее обсуждение см. в тексте

электрического заряда). Но, с другой стороны, столкновение электрона с позитроном может привести и к исчезновению обеих частиц (это явление носит название *аннигиляции*), сопровождающемуся возникновением электромагнитного излучения в виде  $\gamma$ -квантов.

13. Интересным примером процесса рождения является появление электронно-позитронных пар при прохождении  $\gamma$ -квантов в электрическом поле атома. Процесс заключается в рождении материаль-

ных частиц из электромагнитного излучения. На рис. 13А, представляющем собой фотографию так называемого каскадного ливня в камере Вильсона, «видны» многие примеры такого явления. Объяснение тому, что видно на рисунках (см. также рис. 13В и 13С), заключается в следующем. Если заряженная частица большой энергии (электрон или позитрон) проходит через одну из горизонтальных свинцовых пластин, видимых на снимке, то она может слегка отклониться в поле одного из атомов. При таком отклонении скорость частицы меняется и соответственно возникает электромагнитное излучение в виде  $\gamma$ -квантов. (Частица в пластинке может, конечно, испытать последовательные отклонения в поле нескольких атомов. В этом

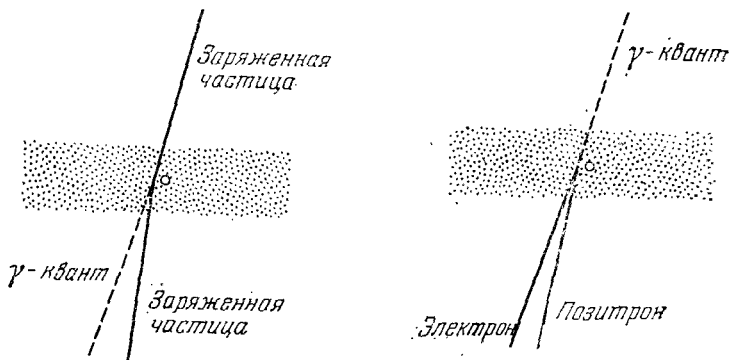


Рис. 13В. Заряженная частица большой энергии (например, позитрон или электрон) отклоняется электрическим полем атома. В результате полученного ускорения она испускает  $\gamma$ -квант. Это явление носит название тормозного излучения. Заштрихованная часть рисунка соответствует веществу, например свинцовой пластине в камере Вильсона

Рис. 13С.  $\gamma$ -квант большой энергии в электрическом поле атома образует электронно-позитронную пару. Это явление называется образованием пар. Тормозное излучение и образование пар ответственны за развитие каскадного ливня, показанного на рис. 13А

случае будет испущено несколько  $\gamma$ -квантов.) Возникающие в этом процессе  $\gamma$ -кванты могут рождать электронно-позитронные пары в полях других атомов, с которыми они встречаются при прохождении через пластину. Эти заряженные частицы, сталкиваясь с атомами, в свою очередь образуют новые  $\gamma$ -кванты, а последние образуют новые частицы и т. д.

Таким образом, единичная заряженная частица или единичный  $\gamma$ -квант может дать начало каскаду, состоящему из  $\gamma$ -квантов, электронов и позитронов. Заряженные частицы оставляют в камере видимые следы. Они и образуют наблюдаемую на рис. 13А картину ливня.  $\gamma$ -кванты не оставляют следа на фотографии.

Показанный на правой части снимка каскадный ливень возник от  $\gamma$ -кванта, вошедшего сверху в первую пластину. Энергия этого  $\gamma$ -кванта близка к 20 ГэВ. Слева от этого ливня виден второй ливень. Он был создан заряженной частицей заметно меньшей энергии. По-видимому, происхождение обоих ливней связано с каким-то событием, произошедшим где-то в стенке камеры, вне поля зрения. Большинство заметных на снимке частиц движется сверху вниз. Харак-

терная особенность рассматриваемых процессов заключается в том, что чем больше энергия частицы в ливне, тем ближе направление ее движения к направлению движения первичной частицы; частицы меньшей энергии могут отойти далеко от оси ливня. При внимательном рассмотрении снимка можно заметить, что вторичные ливни, связанные с частицами, ушедшими от основного направления, быстро «вымирают». Каскадный ливень исчезает, когда первичная энергия оказывается раздробленной между столь большим числом вторичных заряженных частиц и  $\gamma$ -квантов, что они уже не способны к дальнейшему рождению пар. В конце концов частицы малых энергий поглощаются в свинцовых пластинах.

Энергию частицы, создавшей ливень, можно оценить по числу созданных ею вторичных заряженных частиц.

14. Описанные процессы рождения и аннигиляции частиц являются важной особенностью природы. Очевидно, что эти явления не имеют аналогии ни в раздроблении куска вещества, ни в химических реакциях. Мы в состоянии описать химическую реакцию, сказав, что новые молекулы образуются из элементов, входивших в состав других молекул. При таком описании атомы можно считать составными частями молекулы. Рассмотрим в противоположность этому случай, когда две сталкивающиеся частицы сохраняются и после столкновения, в котором рождаются также и новые частицы. Очевидно, что такой процесс нельзя описать как перераспределение некоторых элементов, из которых состоят исходные частицы, в новые сложные системы. В равной степени подобное описание не годится для явлений, связанных с исчезновением исходных частиц. Характерным примером такого явления можно считать аннигиляцию электронно-позитронной пары: две материальные частицы, существовавшие вначале, полностью исчезают, и вместо них образуются  $\gamma$ -кванты.

15. Чтобы выяснить экспериментально, является ли частица элементарной или сложной, мы создаем условия для столкновения двух частиц и исследуем продукты реакции. Действуя этим методом, нам удастся расщепить молекулу на отдельные атомы, а атомы — на электроны и ядра. Именно поэтому можно утверждать, что молекулы состоят из атомов, которые в свою очередь построены из электронов и ядер. Физики XIX столетия ошибались, полагая, что атомы неразрушимы и неделимы. Оказалось, что атом можно разрушить. То же следует сказать и о ядре. Его разрушение требует, однако, затраты гораздо большей энергии, чем разрушение атома. В этом смысле ядро несравненно более устойчиво, чем атом.

Современные ускорители дают пучки частиц, обладающих огромной энергией. Таким образом, мы располагаем подходящими средствами, чтобы попытаться разрушить электроны, протоны или нейтроны. Оказывается, однако, что, в отличие от атомов или ядер, эти частицы разрушить невозможно. Происходит нечто совсем иное. Приходим к выводу, что при изучении электронов, протонов и нейтронов мы достигли некоторого предела: такие частицы трудно считать построенными из каких-то других, более элементарных частиц.

16. В наше время никто не станет пытаться создать теорию вещества, основанную на предположении о его бесконечной делимости. Такая теория не может быть верной. Допустим, однако, что такая теория существует, и рассмотрим одну ее характерную особенность. Возьмем кусок меди и будем делить его на всё меньшие и меньшие кусочки. Как бы малы эти кусочки ни были, они все же остаются медью. Что это значит? Лишь то, что физические законы, определяющие свойства *больших* кусков меди, не отличаются от законов, управляющих поведением *малых* кусков меди; наша физическая система беспредельно уменьшается, но при этом остается подобной себе. Следует заметить, что классические теории не обязательно обладают этим свойством, но оно будет весьма естественным для теории, списывающей вещество, делящееся бесконечно.

Заметим, что классические теории физики во многих отношениях обладают таким свойством подобия. Законы физики, с помощью которых мы описываем машины массой в тонну, количественно не отличаются от законов, объясняющих действие ручных часов. Размеры макроскопических физических систем могут меняться в огромном интервале значений.

«Сохранение формы физических законов» при изменении масштаба представляет собой естественное свойство бесконечно делимого вещества. Но оно отсутствует, если вещество построено из элементарных частиц. Атом меди ни в каком отношении не похож на макроскопический кусок меди. Это нечто совершенно другое, и нет никаких оснований предполагать, что физические законы, описывающие поведение макроскопических систем, будут пригодны для описания атомов и элементарных частиц.

17. Нетрудно принять в качестве абстрактного принципа, что классические идеи могут оказаться неприменимыми к атому и что электрон действительно есть элементарная частица. Однако гораздо труднее совместить в сознании классические и новые идеи. Обычно мы с большим трудом расстаемся с привычными идеями. Начав изучение физики с явлений в макроскопических системах, мы приобрели ряд «классических предрассудков», которые придется преодолеть, чтобы понять квантовую физику. Смысл этих замечаний станет яснее, если мы рассмотрим две тесно связанные проблемы, бывшие в этом столетии предметом многих дискуссий.

18. Зададим следующий вопрос: какие силы связывают электрон в единое целое? Какая часть массы электрона связана с его *внутренними* свойствами и какая с энергией его собственного электростатического поля? Чтобы иметь возможность рассуждать об этих вопросах, начнем с отнюдь не бессмысленной простой модели, согласно которой электрон является равномерно заряженной сферой радиусом  $r$ . Различные части такой сферы испытывают силы электростатического отталкивания, и поэтому должны существовать силы иного типа, удерживающие электрон от развала. Какова их природа?

В томе II этого курса \*) было показано, как вычислить энергию,

\*) Парселл Э. Электричество и магнетизм. — 3-е изд. — М.: Наука, 1983, гл. 2.



«запасенную» в электрическом поле. Она равна интегралу величины  $E^2/8\pi$  по всему пространству. Здесь  $E$  — напряженность электрического поля в данной точке. Следуя этому правилу, мы найдем, что электростатическая энергия электрона в нашей модели равна

$$W = \frac{3}{5} \frac{e^2}{r},$$

где  $e$  — заряд электрона \*). (Коэффициент  $3/5$  связан с конкретным выбором модели, которая представляет электрон равномерно заряженной сферой. Существенно лишь то, что энергия  $W$  пропорциональна  $e^2/r$ . Такую зависимость  $W$  от  $e$  и  $r$  легко получить также из соображений размерности.) Теперь можно записать, что масса электрона  $m = m_e + m_i$ , где  $m_e = W/c^2$  — электромагнитная масса,  $m_i$  — «внутренняя» масса. Проблема в том, как велика масса  $m_e$ . Может быть,  $m = m_e$  и вся масса электрона имеет электромагнитное происхождение? Приняв эту гипотезу, мы можем вычислить радиус электрона  $r$ , который оказывается равным  $1,7 \cdot 10^{-13}$  см. Существует большое число экспериментальных фактов, показывающих, что размеры электрона чрезвычайно малы, и весьма утешительно, что мы действительно получили столь малое значение  $r$ . Заметим, что его нельзя уменьшить, не предположив, что масса  $m_i$  может быть отрицательной.

Поскольку считаем электрон элементарной частицей, то может показаться особенно привлекательным исследовать модель, в которой его радиус  $r=0$ . В такой модели электрон является «точечной частицей», не имеющей ни протяженности, ни структуры. При этом, однако, собственная электромагнитная энергия электрона  $W$  становится бесконечно большой, а его внутренняя масса  $m_i$  — отрицательной и также бесконечно большой. Трудно понять, какой в этом смысл. (Модель точечного электрона математически проста и привлекательна, но мы видим, что в ней имеются непреодолимые препятствия, которые в литературе получили название «трудностей, связанных с бесконечно большой собственной энергией электрона».)

19. Теперь подвергнем критике приведенные выше рассуждения. Имеют ли они реальный смысл? В поставленных вопросах заключены некоторые явно не высказанные предположения, в которых отразились наши «классические предрассудки». Мы предполагали, что электрон представляет собой малую заряженную сферу, и допускали, что закон Кулона применим к отдельным «частям» этой сферы. Откуда нам известно, что закон Кулона справедлив в этом случае? Имеет ли также смысл представление о том, что существует сила, удерживающая отдельные «части» электрона и действующая против электростатических сил отталкивания? Ведь раньше мы говорили, что электрон — это не составная, а элементарная частица. Задавая вопрос о том, что удерживает электрон от развала, мы предполагаем,

\*) Эта формула написана в системе СГС. В системе СИ мы имеем

$$W = \frac{3}{5} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}.$$

что такой развал возможен, а это весьма сомнительная идея. Заметим, что собственная электростатическая энергия частицы равна работе, которая будет совершена при разделении этой частицы на составные «части». Пользуясь этим определением, мы и получаем, что электростатическая энергия любой системы зарядов равна интегралу от квадрата напряженности электрического поля, взятому по всему пространству. Но если частица *не может быть* разделена, представление о собственной электростатической энергии становится сомнительной идеей. Это в еще большей степени относится к бессмысленной бесконечно большой собственной энергии «точного электрона».

В настоящее время большинство физиков уже понимает, что попытки создать какую-либо классическую модель электрона не имеют смысла. Электрон не ведет себя подобно заряженной сфере, и поэтому все рассуждения о том, что удерживает его в объеме этой сферы или чему равна его классическая собственная энергия, не относятся к делу. Наши «классические предрассудки» заставляют нас ставить вопросы, на которые нельзя ожидать разумных ответов. Следует, однако, заметить, что, как это ни удивительно, дух бесконечно большой собственной энергии не полностью покинул физику, остатки этой путаницы еще существуют в квантовой механике.

### Пределы применимости классической теории

20. В специальной теории относительности скорость света, равная  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с, имеет первостепенное значение. Это верхний предел для скорости любой материальной частицы и для скорости распространения энергии или любой информации в физическом пространстве. Скорость света  $c$  дает нам простой и естественный критерий, с помощью которого можно решить, каково физическое явление — «нерелятивистское» или «релятивистское». Грубо говоря, нерелятивистский подход справедлив, т. е. дает достаточно точные результаты, в тех случаях, когда все относящиеся к задаче скорости малы по сравнению со скоростью света.

Можно спросить, существует ли аналогичный критерий, показывающий, в каких случаях надо использовать квантовую механику и когда можно ограничиться классическими теориями, т. е. существует ли другая мировая постоянная, «аналогичная» скорости света, с помощью которой можно сформулировать этот критерий? Такая постоянная существует и называется *постоянной Планка*. Значение постоянной Планка (ее обозначают буквой  $h$ ) равно

$$h = 6,626 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Физическая размерность постоянной Планка равна  
 (время)  $\times$  (энергия) =  
 = (длина)  $\times$  (импульс) = (момент импульса).