

в ядре, тогда как  $\sum$  ядерные силы действуют в противоположном направлении. Ядро существует, и, следовательно, ядерные силы преобладают.

39. Энергия связи ядер имеет порядок 8 МэВ на нуклон, поэтому можно ожидать, что различные превращения ядер требуют энергии порядка 1 МэВ. Действительно, энергии различных частиц и  $\gamma$ -квантов, испускаемых ядрами, лежат в пределах примерно от 100 кэВ до 10 МэВ. Эти величины на 5—7 порядков отличаются от энергий, характерных для химических реакций, и это объясняет нам, почему химические процессы не затрагивают ядер. С точки зрения химии и атомной физики ядро представляет собой очень малую, жесткую, тяжелую и неделимую заряженную сферу.

При рассмотрении атома мы показали, что длина волны оптического  $\gamma$ -кванта велика по сравнению с размерами атома. Аналогичная ситуация существует и в ядерной физике. Рассмотрим  $\gamma$ -квант с энергией 1 МэВ. Эта величина типична для ядерных переходов. Соответствующая длина волны ( $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-10}$  см = = 1200 ферми) велика по сравнению с размерами ядер.

### Гравитационные и электромагнитные силы

40. Теперь мы объясним, почему, рассматривая атомы, молекулы и ядра, можно пренебречь гравитационными силами. Для отношения гравитационной и электромагнитной сил, действующих между двумя протонами, мы имеем следующее выражение:

$$\frac{M_p^2 G / r^2}{e^2 / r^2} = \frac{M_p^2 G}{e^2} = 8,1 \cdot 10^{-37}, \quad (40a)$$

где  $G = 6,6720 \cdot 10^{-8}$  дин·см<sup>2</sup>/г<sup>2</sup> — гравитационная постоянная.

Это отношение чрезвычайно мало, и при наличии электромагнитного взаимодействия силами гравитации можно полностью пренебречь. Они имеют значение только в том случае, если остальные известные нам взаимодействия не играют роли. Примером может служить гравитационное взаимодействие между двумя (большими) электрически нейтральными телами, расстояние между которыми велико по сравнению с характерными атомными размерами.

Общая теория относительности Эйнштейна является чисто *геометрической* теорией гравитации. Это великолепная теория, обладающая внутренней согласованностью. Но, несмотря на многие попытки Эйнштейна и других физиков, до сих пор не удалось охватить этой теорией другие силы природы. Таким образом, явление гравитации занимает особое положение и отделено от взаимодействий, определяющих строение вещества на микроскопическом уровне. Кажется, что к микрофизике гравитация не имеет никакого отношения, поэтому мы исключаем ее из этой книги.

Читатель, возможно, заметил, что отношение (40a) представляет собой отношение гравитационной постоянной в естественных микроскопических единицах к постоянной тонкой структуры. В со-

временной квантовой теории нет места для столь малых параметров, как это отношение. Можно, однако, надеяться, что когда-нибудь будет найдено связующее звено между кажущимися в настоящее время разделенными явлениями гравитации и микрофизики. В настоящее же время у нас нет никаких догадок о том, как эта брешь может быть заполнена.

41. Оценим напряженность электростатического поля на расстоянии боровского радиуса  $a_0$  от протона. Поскольку величина  $a_0$  имеет порядок  $10^{-8}$  см, а электростатическая потенциальная энергия электрона в атоме водорода близка к 10 эВ, то искомая напряженность поля получается порядка  $10^{11}$  В/м. Точное вычисление дает

$$E_{\text{атом}} = 5,14 \cdot 10^{11} \text{ В/м.} \quad (41a)$$

По сравнению с электростатическими полями, которые можно создать в лаборатории (порядка  $10^7$  В/м), поле (41a) весьма сильное. Отсюда следует, что внешние электрические поля не могут иметь большого влияния на атомы и молекулы, а тем более на ядра. Тем не менее такое влияние можно наблюдать: электрическое поле расщепляет спектральные линии атома на несколько близких по частоте линий. Это явление известно под названием *эффекта Штарка*.

Легко понять, почему электростатическое поле, действующее на электрон в атоме, велико по сравнению с макроскопическими полями, которые удается получить в лаборатории. Из уравнений Максвелла следует важное свойство электростатического поля в вакууме: оно достигает своего максимального значения в некоторой точке у проводников. Но проводники состоят из атомов, и если напряженность поля у проводника достигнет напряженности атомного поля, проводник начнет разрушаться. Оценка (41a) является, таким образом, верхним пределом достижимой напряженности макроскопического поля. На практике электрический пробой наступает задолго до достижения этого верхнего предела.

42. Аналогичные рассуждения применимы к макроскопическому магнитостатическому полю. Поля, которые мы в состоянии получить в лаборатории, ограничены сверху условием, что их влияние на атомы не должно быть разрушительным. Магнитное поле, подобно электрическому, расщепляет спектральную линию на несколько компонент. Это явление известно как *эффект Зеемана*.

Чтобы получить верхний предел достижимой индукции магнитного поля, можно положить, что при этом пределе плотность энергии должна быть той же, что и у электрического поля порядка  $10^{11}$  В/м. Это соответствует индукции магнитного поля порядка  $10^7$  Гс. Не очень трудно получить в лаборатории постоянное поле с индукцией, близкой к  $0,5 \cdot 10^6$  Гс. Импульсные поля, действующие в течение очень коротких интервалов времени, могут достигать  $10^8$  Гс. Рассмотрение напряжений, возникающих в проводниках с током, создающим поле, показывает, что постоянные поля, большие  $10^7$  Гс, недостижимы. Такие поля вызовут силы, превосходящие те силы, которые удерживают атомы в твердом теле.

43. Сравним макроскопические поля с полями, определяемыми *естественными единицами квантовой электродинамики*. По сравнению с ними даже электрические поля в атомах оказываются малыми. В качестве естественной единицы поля (электрического или магнитного) можно взять поле, соответствующее плотности энергии, равной

$$\frac{(\text{энергия покоя электрона})}{(\text{комптоновская длина волны электрона})^3}.$$

Этой плотности отвечает единица электрического поля, равная  $4 \cdot 10^{17}$  В/м, и магнитного  $1,3 \cdot 10^{13}$  Гс. Квантовая электродинамика предсказывает заметные отклонения от уравнений Максвелла в вакууме для таких полей. В частности, в таких полях будет нарушен принцип суперпозиции и электромагнитное поле нельзя будет описать линейными уравнениями. Для слабых полей, доступных в лаборатории, квантовая электродинамика также предсказывает отклонения от линейности. Эти отклонения, однако, фантастически малы и в макроскопическом масштабе не имеют практического значения. До сих пор их не удалось наблюдать в макроскопических опытах. Макроскопические поля, измеренные в естественных единицах, чрезвычайно малы. Это связано с малостью постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Благодаря такой малости линейные уравнения Максвелла оказываются чрезвычайно точными.

### О численных оценках

44. Скажем несколько слов о численных оценках некоторых физических величин. Читателю может показаться, что говорить об этом незачем. Вычисления кажутся ему необходимым злом (особенно в домашних заданиях), и он не видит в них никакой физики. Однако это неверно. Существуют «плохие» и «хорошие» вычисления. Последние требуют некоторой *физической интуиции*. Чтобы показать различие между «плохими» и «хорошими» расчетами, рассмотрим пример. При изучении тонких деталей спектра атома водорода было обнаружено, что спектральная линия, которая в спектрометре с плохим разрешением кажется одиночной, при переходе к прибору с лучшим разрешением разделяется на несколько близко расположенных линий. В этом случае говорят, что спектр имеет *тонкую структуру*. При теоретическом изучении тонкой структуры вводится энергия  $E_f$ , характеризующая типичное расстояние между соседними линиями. Теория дает следующее выражение для  $E_f$ :

$$E_f = e^8 m / 32 \hbar^4 c^2. \quad (44a)$$

Можно взять численные константы из табл. 2А и подставить их в выражение (44а). Это было бы, однако, «плохим» способом вычисления. Во-первых, потому, что неприятно вычислять  $e^8$  или  $\hbar^4$ , во-вторых, смысл формулы (44а) сильно затемнен: пока вычисления не окончены, мы не «знаем» порядка величины  $E_f$  и формула