

вычисления привели бы к изменению лэмбовского сдвига $2s_{1/2} - 2p_{1/2}$ на величину, большую существующей ошибки измерения. На основании этого можно заключить, что на атомных расстояниях $|\gamma|$ не может быть больше 10^{-9} (ср. т. III, § 6, пункт 4). На самом деле отступления от закона Кулона при взаимодействии электрона с ядром начинаются тогда, когда включаются ядерные силы. Для случая же, когда у взаимодействующих частиц ядерные взаимодействия отсутствуют (электроны и позитроны), в настоящее время на ускорителях с встречными пучками закон Кулона проверен до расстояний $\sim 10^{-16}$ см.

§ 45. Физический вакуум и объяснение лэмбовского сдвига

1. Лэмбовский сдвиг был объяснен и рассчитан Бете (р. 1908) в квантовой электродинамике. Поскольку последняя нами не излагалась, в нашем курсе можно дать только качественное представление о теории лэмбовского сдвига.

Предварительно необходимо остановиться на вопросе о *физическом вакууме* и *виртуальных частицах* — важнейших понятиях квантовой теории поля. Согласно квантовой теории поля вакуум не есть абсолютная «пустота», в которой ничего нет. Вакууму присущи многие физические свойства, и он может находиться в различных физических состояниях. Поэтому-то он и получил почетное название «физического вакуума». В отличие от гипотетического эфира 19-го века, которому приписывались механические свойства, принципиально не отличающиеся от механических свойств обычных материальных сред, современная физика пытается устанавливать свойства физического вакуума только на основе твердо установленных экспериментальных фактов и проверенных опытом физических теорий. Никаких механических свойств физическому вакууму не приписывается.

Строго говоря, следует различать не один вакуум, а несколько, в зависимости от того, с какими частицами и полями он связан. Так, электромагнитное поле, или поле фотонов, может отдавать свою энергию квантами величиной $h\nu$. При каждой такой отдаче число фотонов уменьшается на единицу. В результате последовательности таких процессов в конце концов возникает состояние, в котором число квантов в системе равно нулю. Однако, в отличие от классических представлений, электромагнитное поле при этом не исчезает, а переходит в состояние с наименьшей энергией, отнять которую от поля уже нельзя. Это заключение является следствием существования нулевой энергии, т. е. в конце концов принципа неопределенностей. Состояние электромагнитного поля с наименьшей возможной энергией, в котором фотонов нет, называется *вакуумным состоянием электромагнитного поля* или *фотонным вакуумом*. Электромагнитное

поле в вакуумном состоянии не может быть поставщиком энергии, но из этого не следует, что оно вообще никак не может проявить себя. Оно может быть причиной различных наблюдаемых физических явлений, как об этом уже упоминалось выше и подробнее будет сказано дальше.

Аналогично и для других частиц вводится представление о вакууме как о низшем энергетическом состоянии поля соответствующих частиц. Так, различают *электронно-позитронный вакуум*, где такими частицами являются электрон и позитрон, отличающиеся друг от друга только знаками электрических зарядов. Существует *вакуум π -мезонов* и т. д. При рассмотрении взаимодействия полей вакуумом можно назвать низшее энергетическое состояние всей системы этих полей.

Если полю, находящемуся в вакуумном состоянии, сообщить достаточную энергию, то происходит его возбуждение, т. е. рождение частицы — кванта этого поля. Так, в вакууме происходит, например, рождение электронно-позитронных пар. Рождение частицы можно описать как переход из «ненаблюдаемого» вакуумного состояния в состояние реальное.

2. Согласно современным представлениям взаимодействие между частицами осуществляется посредством обмена какими-то другими частицами, которым соответствует свой вакуум. Так, электромагнитное взаимодействие между электрически заряженными частицами осуществляется посредством электромагнитного вакуума. Один электрический заряд испускает фотон, поглощаемый другим зарядом, который в свою очередь испускает фотон, поглощаемый первым зарядом. Таким образом, между зарядами происходит обмен фотонами. В результате этого изменяется нулевое (т. е. невозбужденное) состояние вакуума, что по современным представлениям проявляется в силе взаимодействия между частицами, обменивающимися фотонами. Аналогично, до недавнего времени считалось, что взаимодействие между нуклонами (протонами и нейтронами) осуществляется посредством вакуума π -мезонов. Один из нуклонов испускает π -мезон, а другой его поглощает, и наоборот. Со времени принятия кварковой модели ядерные силы сводят к взаимодействию кварков.

Изложенные представления о взаимодействии на первый взгляд находятся в противоречии с тем, что утверждалось в пункте 5 § 1. Будем для конкретности иметь в виду взаимодействие электрических зарядов, хотя все сказанное ниже будет относиться и ко всем другим типам взаимодействий. Пока взаимодействие не началось, каждая из частиц является свободной, а свободная частица ни испустить, ни поглотить квант не может. В противном случае в процессах испускания и поглощения кванта нарушался бы либо закон сохранения энергии, либо закон сохранения импульса. Однако приведенное утверждение отно-

сится к испусканию истинных частиц. Взаимодействие же осуществляется не реальными, а *виртуальными частицами*, и приведенное выше противоречие устраняется. Поэтому в предыдущем абзаце точнее надо было бы везде говорить не просто о частицах, обменом которых осуществляется взаимодействие, а о виртуальных частицах.

Виртуальные частицы существуют только в промежуточных состояниях и притом очень короткое время, что препятствует экспериментальной регистрации их. Но время существования виртуальной частицы Δt связано с неопределенностью ее энергии соотношением $\Delta t \Delta \mathcal{E} \geq \hbar$. Аналогично $\Delta x \Delta p \geq \hbar$. При наличии этих соотношений неопределенности законы сохранения энергии уже не препятствуют более испусканию квантов истинными свободными частицами, если только эти кванты имеют энергию $\Delta \mathcal{E}$ и существуют в течение промежутка времени $\Delta t \sim \hbar/\Delta \mathcal{E}$. Можно сказать, что виртуальная частица есть такая частица, для которой не выполняется обычная классическая связь между энергией и импульсом $\mathcal{E}^2 = (pc)^2 + m_0^2 c^4$.

3. За время Δt естественно принять продолжительность акта обмена между взаимодействующими частицами. Если принять далее, что взаимодействие распространяется с максимальной скоростью c , то $\Delta t = L/c$, где L — радиус переносимого взаимодействия. Поэтому энергия кванта $\Delta \mathcal{E} = m_0 c^2 = \hbar c/L$, где m_0 — масса покоя кванта. Отсюда

$$L = \hbar/m_0 c. \quad (45.1)$$

Чем больше масса m_0 кванта, переносящего взаимодействие, тем короче радиус действия соответствующих сил. О значении этого факта мы намерены говорить в части 2. Отметим только, что для фотона $m_0 = 0$. Поэтому радиус действия кулоновых сил бесконечен.

Таким образом, принцип неопределенности вынуждает принять, что каждая заряженная частица окружена облаком испускаемых и поглощаемых виртуальных фотонов. Другие частицы окружены также соответствующими квантами, переносящими взаимодействие. Такая картина соответствует воззрениям Фарадея и Максвелла о недопустимости непосредственного действия на расстоянии. Для взаимодействия необходимо наличие промежуточного агента. Однако конкретное представление, что таким агентом является классический непрерывный эфир, безнадежно устарело и может быть сохранено только ради исторического интереса.

4. Вакуум является суперпозицией нулевых колебаний поля, т. е. состояний с виртуально возникающими и исчезающими виртуальными фотонами, виртуальными электронно-позитронными парами, а также другими парами частиц и античастиц. Эти виртуальные частицы взаимодействуют между собой и с ис-

тинными частицами. Так, возникший виртуальный фотон может породить электронно-позитронную пару. При аннигиляции последней возникнут новые виртуальные фотоны, и т. п. Во внешнем электрическом поле, например в поле атомного ядра, виртуальные электроны и позитроны располагаются неравномерно. Виртуальные позитроны смещаются преимущественно в направлении электрического поля, виртуальные электроны — против электрического поля. В результате во внешнем электрическом поле возникает явление, называемое *поляризацией вакуума*. Это явление аналогично обычной поляризации диэлектриков во внешнем поле. Только в диэлектриках речь идет о смещении истинных электрических зарядов, а в вакууме — о смещении виртуальных.

5. Теперь можно обратиться к объяснению лэмбовского сдвига. Основной вклад ($\sim \alpha^3 R$, где α — постоянная тонкой структуры, R — постоянная Ридберга) вносят два вакуумных эффекта (называемых иначе *радиационными поправками*). Во-первых, испускание и поглощение связанным электроном виртуальных фотонов, что приводит у него к изменению эффективной массы и появлению аномального магнитного момента. Во-вторых, поляризация вакуума, т. е. рождение и аннигиляция в вакууме виртуальных электронно-позитронных пар, что искажает кулонов потенциал ядра на расстояниях порядка комптоновской длины волны электрона ($\sim 10^{-11}$ см). Поскольку комптоновская длина волны электрона много меньше среднего радиуса боровских орбит в водороде, лэмбовский сдвиг в водороде вызывается преимущественно первой причиной (изменением эффективной массы электрона). Поляризация вакуума приводит к одинаковому для всех уровней сдвигу. Вклад поляризации вакуума в величину лэмбовского смещения уровней незначителен (в водороде $\approx 3\%$ общего смещения для основного уровня).

По теории, согласующейся с опытом, лэмбовский сдвиг уровня пропорционален четвертой степени атомного номера и обратно пропорционален третьей степени главного квантового числа.

Следующее простое рассуждение поясняет влияние главного квантового числа на сдвиг уровней. Образно говоря, *s*-электрон проводит основную часть времени вблизи ядра, где электрическое поле сильное и резко неоднородное, а *p*-электрон в среднем находится на более далеких расстояниях, где поле слабее и менее неоднородно. С другой стороны, взаимодействие с вакуумом (испускание и поглощение виртуальных фотонов) как бы раскачивает (трясет) электрон. На классическом языке орбита электрона не плавная кривая (например, круговая), а извилистая. Электрон то удаляется от ядра, то приближается к нему, и притом хаотически. Потенциальная энергия в поле

ядра $U \sim 1/r$. При увеличении r на Δr энергия U меняется на величину

$$\Delta U \sim \frac{1}{r + \Delta r} - \frac{1}{r} = - \frac{\Delta r}{r(r + \Delta r)},$$

при уменьшении r — на величину

$$\Delta U' \sim \frac{\Delta r}{r(r - \Delta r)},$$

что по абсолютной величине больше ΔU . Это значит, что вакуумное дрожание электрона меняет знак изменения его потенциальной энергии U . Особенно велико изменение потенциальной энергии вблизи ядра, где U велика и резко меняется с расстоянием. Таким образом, вакуумные добавки к полной энергии \mathcal{E} больше для s -электронов, чем для p -электронов. Это в основном и раздвигает энергии s - и p -электронов, которые без этого совпадали бы (если не учитывать сдвиг уровней, вызываемый поляризацией вакуума).