

но из рис. 82. Линия  $H_\beta$  расщепляется на 20 компонент, линия  $H_\gamma$  — на 27, линия  $H_\delta$  — на 32 и т. д. (Центральные компоненты при расщеплении  $H_\beta$ ,  $H_\delta$  не появляются, с чем и связано уменьшение числа компонент соответственно с 21 до 20 и с 33 до 32.) Расщепление линий  $H_\alpha$  и  $H_\beta$  при эффекте Штарка, предсказываемое теорией (согласующейся с опытом), показано на рис. 83. Аналогично расщепляются линии  $H_\gamma$ ,  $H_\delta$  ...

6. Описанная картина штарковского расщепления получается, если *не учитывать спин электрона*, т. е. пренебречь *тонкой структурой* спектральных линий.

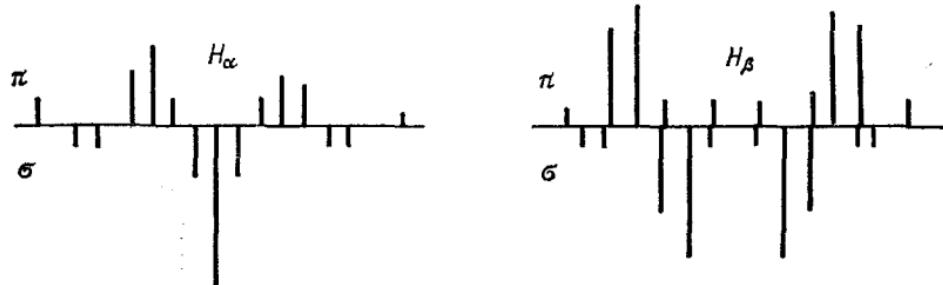


Рис. 83

ний. Это можно делать, когда штарковское расщепление значительно превосходит ширину тонкой структуры спектральной линии. В полях порядка десятков тысяч В/см и выше тонкая структура практически не играет роли. Такие электрические поля (как и в случае магнитных полей в эффекте Зеемана) можно назвать *сильными*. Когда же штарковское расщепление становится сравнимым или меньше ширины тонкой структуры, то электрическое поле называют *слабым*. Таким образом, приведенные выше результаты относятся к *сильным* (в указанном смысле) электрическим полям. В слабых полях эффект Штарка осложняется *тонкой структурой*.

#### § 44. Лэмбовский сдвиг уровней атомных электронов

1. В § 38 указывалось, что, согласно релятивистской квантовой теории Дирака, энергии водородных и водородоподобных атомов и ионов с одинаковыми квантовыми числами  $n$  и  $j$  должны *точно совпадать* независимо от того, каково значение квантового числа  $l$ . При заданном  $j$  число  $l$  может принимать значения  $j - 1/2$  и  $j + 1/2$  в зависимости от того, как ориентирован спин электрона. Так, главному квантовому числу  $n = 2$  (нижний терм водородной серии Бальмера) соответствуют три уровня  $2s_{1/2}$ ,  $2p_{1/2}$  и  $2p_{3/2}$ . Два первых уровня по теории Дирака должны совпадать, так как они имеют одно и то же квантовое число  $j = 1/2$ .

Действительно ли совпадают уровни  $2s_{1/2}$  и  $2p_{1/2}$  — этот вопрос пытались решить методами оптической спектроскопии, изучая тонкую структуру водородной линии  $H_\alpha$ , возникающую при переходах с уровней с главным квантовым числом  $n = 3$  на уровни с  $n = 2$ . Однако результаты получались противоречивыми. Одни исследователи находили полное согласие наблюдаемой тонкой структуры с теорией Дирака, тогда как другие приходили к результату, что уровни  $2s_{1/2}$  и  $2p_{1/2}$  смешены относи-

тельно друг друга приблизительно на величину порядка  $0,03 \text{ см}^{-1}$  или около 1000 Гц. Эта величина примерно в 10 раз меньше расстояния между указанными уровнями и лежащим выше уровнем  $2p_{3/2}$ . Трудность исследования тонкой структуры состояла в исключительной близости спектральных линий, обладавших довольно большой шириной. Наблюдавшееся небольшое несогласование уровней  $2s_{1/2}$  и  $2p_{1/2}$  лежало в пределах экспериментальных ошибок. Вопрос был решен в 1947 г. Лэмбом (р. 1913) и Ризерфордом (р. 1912) методами радиоспектроскопии. Ожидаемые смещения уровней  $\sim 1000$  Гц лежат в области сверхвысоких частот (СВЧ), где можно воспользоваться методами радиоспектроскопии, а последние позволяют обеспечить точность измерений до 1 Гц.

2. Идея опыта Лэмба и Ризерфорда основана на том, что возбужденный уровень  $2p_{1/2}$  является нестабильным, а возбужденный уровень  $2s_{1/2}$  — метастабильным. Время жизни на уровне  $2s_{1/2}$  примерно в  $10^8$  раз больше, чем на уровне  $2p_{1/2}$ . Действительно, радиационный переход с уровня  $2p_{1/2}$  на невозбужденный уровень  $1s_{1/2}$  с испусканием одного фотона *разрешен правилом отбора*  $\Delta l = \pm 1$ . Переход же с уровня  $2s_{1/2}$  на уровень  $1s_{1/2}$  *запрещен*, поскольку при этом  $\Delta l = 0$ . Такой переход возможен только с испусканием *двух фотонов*, а потому он совершается примерно в  $10^8$  раз медленнее, чем переход  $2p_{1/2} \rightarrow 1s_{1/2}$ . По сравнению с переходом  $2s_{1/2} \rightarrow 1s_{1/2}$  переход  $2p_{1/2} \rightarrow 1s_{1/2}$  происходит примерно в  $10^8$  раз быстрее, т. е. практически мгновенно.

В опытах Лэмба и Ризерфорда молекулы водорода диссоциировались под действием высокой температуры в печи  $K$  (рис. 84). В результате получался пучок атомов водорода в основном состоянии  $1s_{1/2}$ , направлявшийся на металлическую пластинку (мишень)  $P$ , соединенную с гальванометром. Поскольку атомы пучка не были возбуждены, они не могли передавать энергию электронам мишени  $P$ . Вырывания электронов из мишени не происходило, и гальванометр не обнаруживал электрического тока.

Но часть атомов (примерно одну стомиллионную) можно было перевести в возбужденные состояния  $2s_{1/2}$  и  $2p_{1/2}$ , заставив пучок атомов пересекать электронный пучок  $\mathcal{E}$ . Возбуждение атомов производится ударами электронов, так что правила отбора при излучении *не действуют*. Энергия возбуждения составляет 10,2 эВ. Атомы в состоянии  $2p_{1/2}$  на мишень  $P$  не попадают, так как они практически мгновенно переходят в основное состояние  $1s_{1/2}$ . На мишень из возбужденных атомов могут попасть только

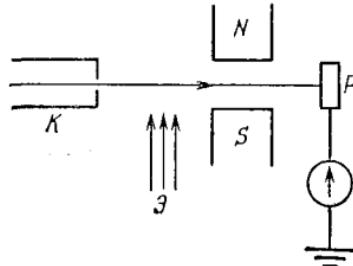
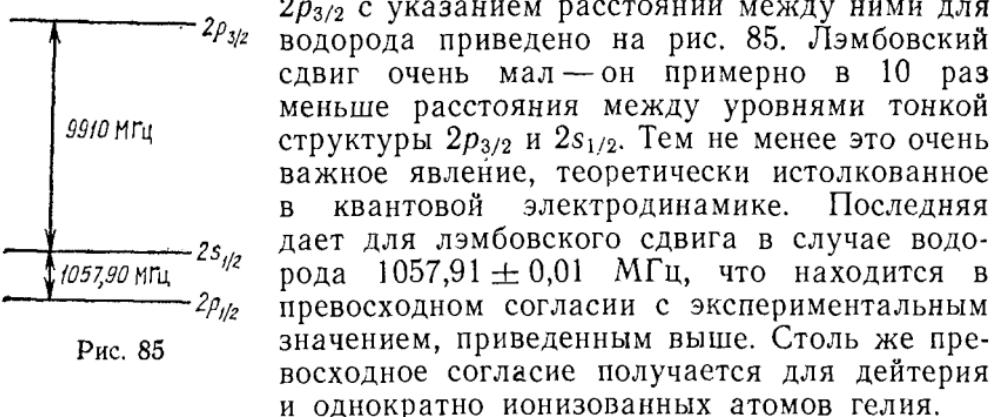


Рис. 84

атомы в состоянии  $2s_{1/2}$ . Энергию возбуждения они при столкновениях передают электронам мишени  $P$ , вырывая последние из мишени. Гальванометр начинает показывать ток, по величине которого можно судить о числе атомов в метастабильном состоянии  $2s_{1/2}$ , попадающих на мишень.

Если теперь на пути пучка атомов водорода включить циклически меняющееся магнитное поле надлежащей частоты, то в случае несовпадения уровней  $2s_{1/2}$  и  $2p_{1/2}$  начнутся вынужденные переходы между ними (см. § 42, пункт 2). Они будут происходить с максимальной скоростью при резонансе, когда частота внешнего магнитного поля будет соответствовать разности энергий между рассматриваемыми уровнями. Перейдя из состояния  $2s_{1/2}$  в состояние  $2p_{1/2}$ , атом почти мгновенно возвращается в невозбужденное состояние  $1s_{1/2}$ . Поэтому число возбужденных атомов в состоянии  $2p_{1/2}$ , попадающих на мишень, начинает убывать. Вместе с тем начинает убывать и ток через гальванометр. По минимуму тока можно определить резонансную частоту поля, а с ней и разность уровней  $2s_{1/2} - 2p_{1/2}$ <sup>1)</sup>.

Опыты Лэмба и Ризерфорда доказали, что уровни  $2s_{1/2}$  и  $2p_{1/2}$  не совпадают между собой. Разность между ними по частотам составляет для водорода  $1057,90 \pm 0,06$  МГц. Эта разность (как и вообще разность между уровнями тонкой структуры с одинаковыми  $n$  и  $j$ , но различными  $l$ ) называется лэмбовским сдвигом. Взаимное расположение уровней  $2s_{1/2}$ ,  $2p_{1/2}$  и  $2p_{3/2}$  с указанием расстояний между ними для водорода приведено на рис. 85. Лэмбовский сдвиг очень мал — он примерно в 10 раз меньше расстояния между уровнями тонкой структуры  $2p_{3/2}$  и  $2s_{1/2}$ . Тем не менее это очень важное явление, теоретически истолкованное в квантовой электродинамике. Последняя



3. Заметим, что лэмбовский сдвиг позволяет судить о точности, с которой оправдывается закон Кулона на расстояниях порядка атомных ( $10^{-8}$  см). Предположим, что истинный закон имеет вид  $E \sim 1/r^{2+\gamma}$ . Предположим далее, что  $|\gamma| = 10^{-9}$ . Тогда

<sup>1)</sup> Уровень  $2p_{1/2}$  оказался лежащим ниже уровня  $2s_{1/2}$ . Поэтому возможны переходы  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  в отсутствие внешнего поля. Однако так как расщепление мало, а вероятность перехода пропорциональна кубу расстояния между уровнями, то эта вероятность крайне мала (соответствующее время жизни — порядка нескольких лет). Поэтому указанный переход можно не принимать во внимание.

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  $\hbar\nu$ . 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