

ЛЕКЦИЯ 9

Квантовая физика

Мы рассматривали атом в магнитном поле и его влияние на спектр излучения. Впервые эти процессы рассмотрел Зееман, поэтому расщепление уровней энергии в магнитном поле называется эффектом Зеемана.

В атоме также существуют внутренние магнитные поля, которые появляются из-за спин-орбитального взаимодействия.

Спин электрона взаимодействует с орбитальным движением. Если орбитальный момент равен нулю, то этого взаимодействия нет.

Внешние поля делят на сильные и слабые по сравнению с внутренним.

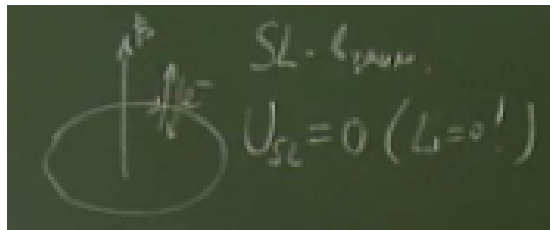


Рис. 9.1.

Например, для атома натрия получается такая система уровней. За счет спин-орбитального взаимодействия, возникает расщепление на уровне p . Почему же уровень p лежит выше, чем уровень s , хотя главное квантовое число у них одинаковое. Энергия водородоподобных атомов должна зависеть только от него.

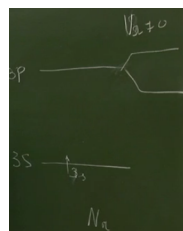


Рис. 9.2.

В s -состоянии, электрон часть времени проводит вблизи ядра, а для p -состояния ψ -функция другая. Если электрон часть времени проводит вблизи ядра, то для него $Z_{\text{эфф}}$ оказывается больше из-за того, что за данным электроном есть другие, создающие такое же по направлению действие, как и ядро.

$$Z_{\text{эфф}}(s) > Z_{\text{эфф}}(p).$$

Лекция 9. Квантовая физика

Говорят, что уровни расщепляются из-за экранирования электронами заряда ядра.

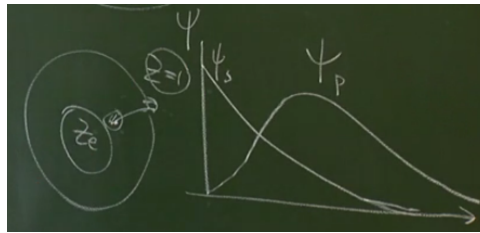


Рис. 9.3.

Тогда уровни энергии для s - и p -состояния будут выглядеть следующим образом.

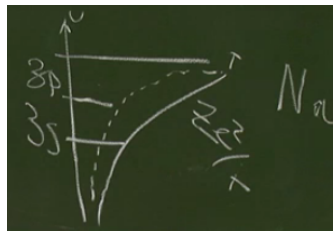


Рис. 9.4.

При отсутствии внешнего поля, наблюдаются желтый дублет натрия. Именно из-за наличия дублета, ввели понятие спина.

Теперь поместим атом в магнитное поле, тогда полный потенциал будет выглядеть так:

$$U = U_0 + U_{SL} + U_{SH} + U_{LH}.$$

Если поле слабое ($U_{SH} \ll U_{SL}$), внешнее поле лишь немного изменит внутренние уровни. При этом энергия

$$E = E_0 - \vec{\mu} \vec{B} = E_0 + g_{\Lambda} \mu_B \vec{J} \vec{B} = E_0 + g_{\Lambda} \mu_B m_j B.$$

Получается, что энергия зависит от числа m_j , т. е. проекции вектора j на выделенное направление, в данном случае — на вектор магнитного поля. Именно поэтому число m_j называется магнитным квантовым числом.

Если $J = \frac{3}{2}$, то возможны 4 проекции: $\frac{3}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2}$. Каждый уровень расщепится на $2J + 1$ уровня и получится следующая картина. Всего 8 уровней, между которыми могут быть переходы. Но тут нужно учитывать правила отбора. Если $\lambda_{\text{свет}} \gg R_{\text{ат}}$, то невозможно сильно изменить структуру и возможны только дипольные переходы $E1$, т. е. $\Delta J = 0, \pm 1, \Delta m_s = 0$ (магнитные).

Тогда, в соответствии с правилами отбора, возможны 10 переходов, т. е. 10 линий. Это называется сложным эффектом Зеемана. Расстояние между всеми соседними зеемановскими подуровнями одинаково. Тогда, если включить поле с частотой, соответствующей энергии перехода между зеемановскими уровнями, то будем наблюдать электронный парамагнитный резонанс.

Лекция 9. Квантовая физика

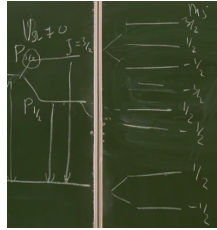


Рис. 9.5.

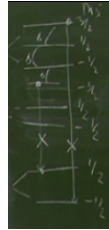


Рис. 9.6.

На самом деле, в слабом поле, расщепление очень маленькое, структура уровней такая же.

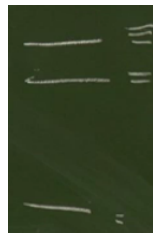


Рис. 9.7.

Теперь, если магнитное поле сильное, то тогда можно игнорировать спин-орбитальное взаимодействие. Говорят, что спин-орбитальная связь разрывается. Тогда энергия зависит отдельно от спиновой и орбитальной ориентации. Тогда картина энергетических уровней будет выглядеть так:

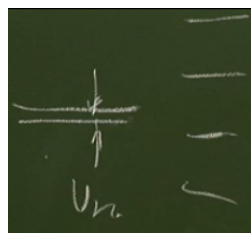


Рис. 9.8.

Как рассчитать энергию?

Условия для сильного поля ($U_{SH} \gg U_{SL}$).

Энергия

$$E = E_0 + g_L^l \mu_B m_L B + g_L^s \mu_B m_L B.$$

Поскольку $g_L^l = 1$, $g_L^s = 2$, то

$$E = E_0 + g_L \mu_B (m_L + 2m_s),$$

Лекция 9. Квантовая физика

$m_l + 2m_s = 2$, если $m_l = 1, m_s = \frac{1}{2}$,
 $m_l + 2m_s = 1$, если $m_l = 0, m_s = \frac{1}{2}$, и т. д.

Получается 5 уровней для p - и 2 уровня для s -орбитали.

Теперь пойдем, сколько переходов возможно.

$$\Delta E = E_{02} + \mu_B(m_{l2} + 2m_s) - E_{01} - \mu_B(m_{l1} + 2m_s) = E_{02} - E_{01} + \underbrace{\mu_B(m_{l2} - m_{l1})}_{\Delta m_l = 0, \pm 1},$$

. Получается, что всего всего возможны 3 линии.

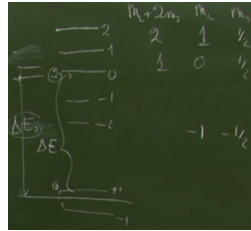


Рис. 9.9.

На этом мы закончим изучение атома и приступим к изучению ядерной физики.

9.1. Ядерная физика

Для того, чтобы получить α -частицы, можно поместить вместе радий и мишени (например алюминиевые), на которые будет осаждаться газовая фаза — радон. Эти пластинки будут источником радиоактивного излучения α -частиц, энергией $E_\alpha = 5\text{МэВ}$. Это называется "доить источник".

Резерфорд исследовал прохождение α -частиц через газ. Он обнаружил, что уширение энергии совсем небольшое. Резерфорд дал задание Гейгеру и его студенту исследовать рассеяние частиц под углом 180 градусов. В качестве детектора α -частиц использовался сцинтиллятор, который светился при попадании на него α -частицы. В качестве рассеивателя была золотая фольга. И Гейгеру действительно удалось обнаружить такое рассеяние. Единственное объяснение, которое мог дать Резерфорд — это то, что в веществе есть центры высокой плотности (ядра). Так появилась планетарная модель атома.

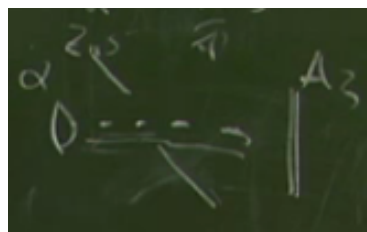


Рис. 9.10.

Легко оценить радиус ядра. Пусть есть α -частица, энергией 5МэВ . Она отразится, при условии

$$\frac{Ze^2}{R} \simeq E_\alpha \Rightarrow R \simeq 10^{-12}\text{см}.$$

На самом деле это радиус потенциала, а не ядра.

Тогда плотность ядра

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \simeq 10^{12} \text{ г/см}^3.$$

Эта плотность больше плотности, например железа, на 11 порядков!

Узнаем, квантовый это объект или классический.

$$\lambda_{\text{дБ}}(\alpha - \text{част}) = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = R_{\text{я}}$$

Оказывается, что длина волны де-Бройля сравнима и даже меньше, чем размер ядра, т. е. это чисто квантовый объект.

Заряд ядра составляется из протонов, но атомная масса в два раза больше, чем заряд ядра, т. е. в ядре есть еще какие-то тяжелые частицы. Вначале думали, что там могут быть электроны. Но тогда:

$$E_{\text{кул}} = \frac{Ze^2}{R_{\text{я}}} \sim 10^5 \text{ эВ}.$$

Если электроны в ядре, то энергия нулевого состояния

$$E_0 \simeq \frac{\hbar^2}{2mR_{\text{яд}}^2} \simeq 10^7 \text{ эВ},$$

т. е. электроны бы сразу выскакивали из ядра.

В 1932г. Чадвик открыл, что в ядре содержатся нейтральные частицы, масса которых чуть больше массы протона, а заряд равен нулю. Их называли нейтронами. $m_p \simeq m_n$; $Z_n = 0$.

Но если протоны и нейтроны удерживаются вместе, то существуют какие-то силы, которые их удерживают, ядерные силы. Они должны быть короткодействующими, в пределах размеров ядра. С точки зрения заряда, эти силы действуют одинаково.

Еще у них есть свойство — насыщение ядерных сил. Введем понятие **«энергия связи»** — энергия, которую необходимо придать системе, чтобы разделить протон и нейтрон.

$$B_{\text{св}} = \frac{E}{c^2} = Nm_n + Zm_p - M_{\text{я}}(Z, N).$$

То есть это насколько масса отдельных протонов и нейтронов больше, чем масса ядра. Удельная энергия связи, т. е. энергия в расчете на одну частицу выглядит следующим образом. Удельная энергия связи практически не зависит от количества частиц: $\frac{B}{A} \simeq \text{const}$. Это свойство называется свойством насыщения ядерных сил.

По идее, нужно просуммировать энергию связи данного нуклона со всеми остальными и просуммировать по всем нуклонам и получилась бы квадратичная зависимость от числа нуклонов:

$$B_{\text{я}} = \sum_N B_{\text{св}}(A-1) \propto A^2.$$

Но в действительности оказывается линейная зависимость. Это, оказывается, возможно из-за того, что радиус взаимодействия меньше радиуса ядра, поэтому эффективно, нуклон взаимодействует лишь с малой частью других нуклонов.

Но оказывается, что максимум удельной энергии связи приходится на железо. Тогда все элементы со временем должны перейти в железо. То есть более тяжелые

Лекция 9. Квантовая физика

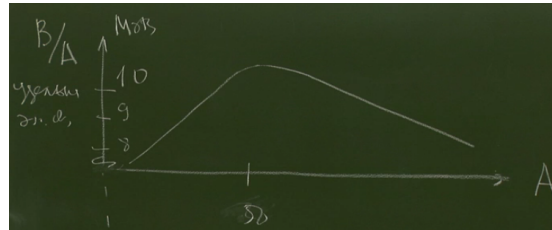


Рис. 9.11.

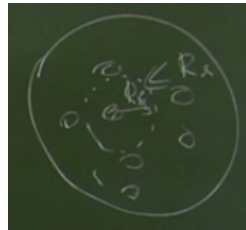


Рис. 9.12.

элементы должны разделяться с выделением энергии. Так работает ядерный реактор с разделением урана. А элементы более легкие, должны объединяться и тоже с выделением энергии. С этим процессом связывают будущее энергетики — термоядерный синтез. Сейчас есть только неуправляемый термоядерный синтез — водородная бомба.

Теперь надо понять, как образуются ядерные силы. Сначала рассмотрим, как взаимодействуют между собой две ядерные частицы. Разноименные заряженные частицы притягиваются. Если заряды движутся, то возникают электромагнитные волны. Это волны, у которых закон дисперсии линейный: $\omega = ck$. Для того, чтобы найти решение электромагнитного уравнения нужно написать волновое уравнение

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0$$

Оно дает кулоновский потенциал

$$\varphi = \frac{e}{r}.$$

Будем искать сферически-симметричное решение этого уравнения:

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) \right]$$

— это радиальная часть.

Будем искать решение в таком виде:

$$\varphi = \frac{e}{r} e^{i(kr - \omega t)} + \varphi_0 e^{i(kr - \omega t)},$$

где $\varphi_0 = \frac{e}{r}$ — статический потенциал.

Подставим это в волновое уравнение.

$$\frac{\omega^2}{c^2} \varphi - k^2 \varphi.$$

Лекция 9. Квантовая физика

Мы нашли уравнение дисперсии электромагнитных волн, т. е. будут излучаться только такие волны, для которых: $\omega = ck$.

Про ядерные силы нам известно, что они короткодействующие. Радиус их действия не больше радиуса ядра. Если кулоны движутся в ядре, то должно быть излучение волн (мезонных), а значит можно написать волновое уравнение для нуклонов.

Сначала надо записать потенциал

$$V_{\text{я}} = \frac{q}{r} e^{-\frac{r}{r_0}},$$

где q — заряд ядра.

Подставим этот потенциал в уравнение Пуассона:

$$\Delta V \rightarrow \frac{q}{rr_0^2} e^{\frac{r}{r_0}} = \frac{V}{r_0^2} \neq 0.$$

Если считать, что нуклоны создают такое же поле (ядерное), как и электромагнитное, то при условии, что потенциал взаимодействия короткодействующий, получается, что не выполняется уравнение Пуассона.

Тогда Юкава предложил изменить уравнение Пуассона, чтобы этот потенциал давал ноль. Как это не парадоксально, получилось **уравнение Клейна – Гордона**

$$\Delta V - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \frac{1}{r_0^2} V = 0.$$

Найдем решения в виде волн

$$V = \frac{q}{r} e^{-\frac{r}{r_0}} e^{i(kr - \omega t)}.$$

Если подставить в уравнение, то будет

$$\omega^2 - \frac{c^2}{r_0^2} = c^2 k^2.$$

Теперь умножим это на \hbar^2 :

$$\begin{aligned} \hbar^2 \omega^2 - \frac{\hbar^2 c^2}{r_0^2} &= \hbar^2 c^2 k^2, \\ \hbar^2 \omega^2 &= \hbar^2 c^2 k^2 + \frac{c^2 \hbar^2}{r_0^2} \end{aligned}$$

— это напоминает релятивистский инвариант.

$$E^2 = p^2 c^2 + m_x^2 c^4.$$

Для потенциала Юкавы.

Получается, что испускаются не волны, а частицы массой m_x и квадратичным законом дисперсии. Переносчиком электромагнитного взаимодействия является фотон, а для ядерных сил — это тяжелая частица, пион.

В электромагнетизме все ясно — электроны переходят из возбужденного состояния и испускается фотон. В случае ядерных сил, никаких возбужденных состояний нет. Но закон сохранения энергии можно нарушить на время τ :

$$\Delta = m_x c^2, \quad \Delta E \tau \simeq \hbar, \quad \tau \simeq \frac{\hbar}{m_x c^2} \rightarrow$$

Это значит, что за время τ улетела на расстояние:

$$R = c\tau = \frac{\hbar}{m_x c} = \frac{\Lambda}{2\pi}$$

— радиус взаимодействия ядерных сил равен де-бройлевской длине волны переносчиков взаимодействия, т. е. пионов.

Взаимодействие нуклонов может быть описано за счет испускания одним нуклоном пиона, и поглощения его другим пионом. Все полевые теории взаимодействия основаны на том, что взаимодействие происходит за счет обмена частицами, являющимися переносчиками. Для электромагнитного излучения — это фотоны. Радиус взаимодействия равен бесконечности. Появлению конечного радиуса взаимодействия, способствует конечная масса переносчиков взаимодействия. Радиус взаимодействия в этом случае, равен де-бройлевской длине волны этих переносчиков.