

---

---

# ЛЕКЦИЯ 9

---

## АТОМНОЕ ЯДРО

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 (см. рис. 9.1).

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

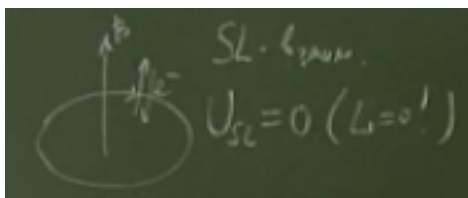


Рис. 9.1

Например, для атома натрия получается такая система уровней. За счет спин-орбитального взаимодействия, возникает расщепление на уровне  $p$  (см. рис. 9.2). Почему же уровень  $p$  лежит выше, чем уровень  $s$ , хотя главное квантовое число у них одинаковое? Энергия водородоподобных атомов должна зависеть только от него.

В  $s$ -состоянии, электрон часть времени проводит вблизи ядра, а для  $p$ -состояния  $\psi$ -функция другая (см. рис. 9.3). 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.

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

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

Тогда уровни энергии для  $s$ - и  $p$ -состояния будут выглядеть следующим образом (см. рис. 9.4).

!

Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

2

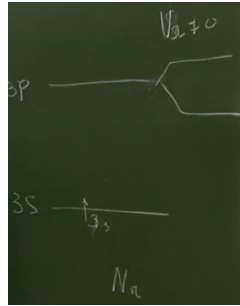


Рис. 9.2

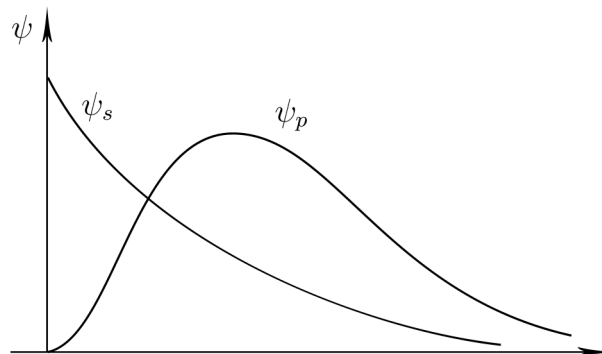
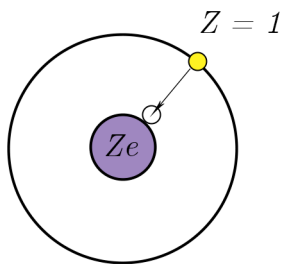


Рис. 9.3

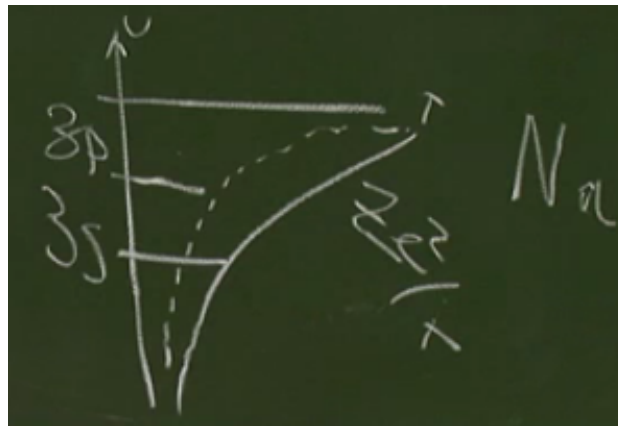


Рис. 9.4

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

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

!

Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

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 (см. рис. 9.5). 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  $E_1$ , т. е.  $\Delta J = 0, \pm 1, \Delta m_s = 0$  (магнитные).

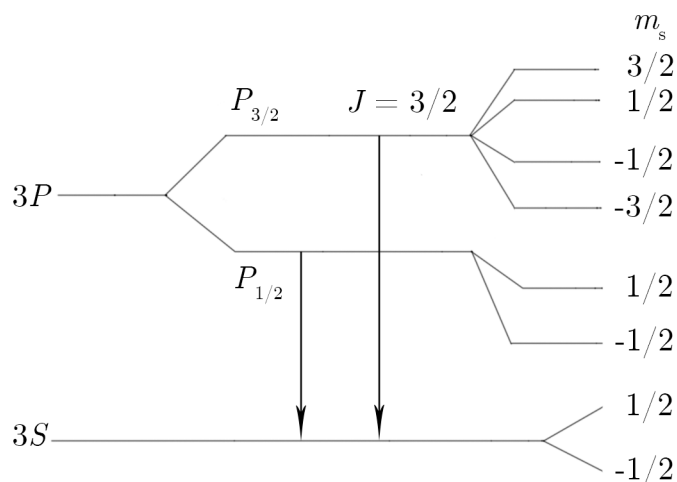


Рис. 9.5

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.

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

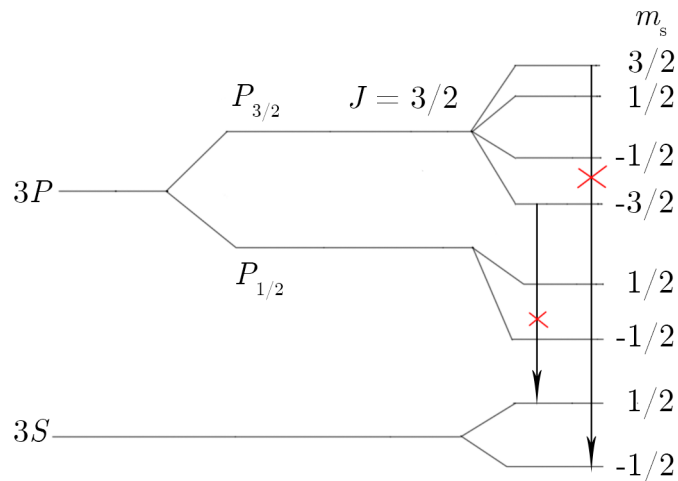


Рис. 9.6

На самом деле, в слабом поле, расщепление очень маленькое, структура уровней такая же (см. рис. 9.7).



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, как на рис. 9.8.

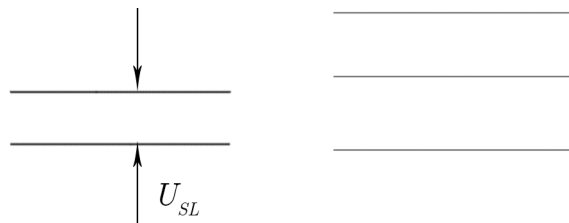


Рис. 9.8

Как рассчитать энергию?

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

Энергия

$$E = E_0 + g_{\Lambda}^l \mu_B m_L B + g_{\Lambda}^s \mu_B m_S B.$$



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

Поскольку  $g_\Lambda^l = 1$ ,  $g_\Lambda^s = 2$ , то

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

$m_l + 2m_s = 2$ , 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 (см. рис. 9.9).

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.

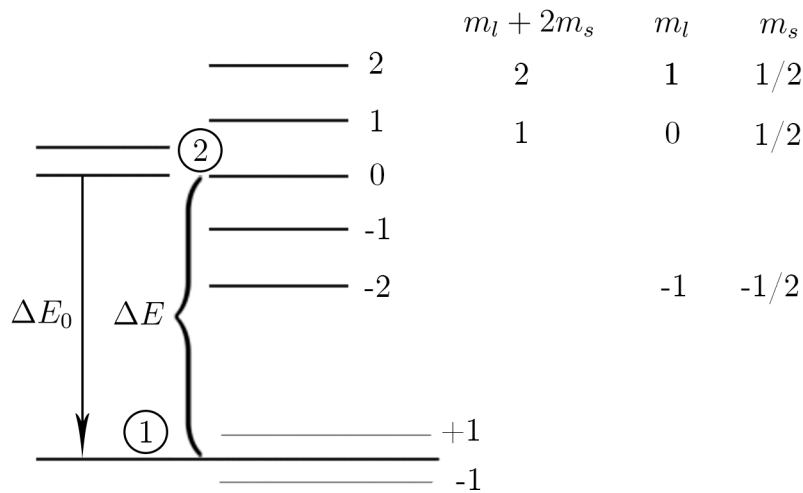


Рис. 9.9

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

## 1. Ядерная физика

Для того, чтобы получить  $\alpha$ -частицы, можно поместить вместе радий и мишени (например алюминиевые), на которые будет осаждаться газовая фаза — радон (см. рис. 9.10). Эти пластинки будут источником радиоактивного излучения  $\alpha$ -частиц, энергией  $E_\alpha = 5\text{МэВ}$ . Это называется "доить источник".

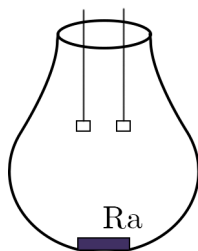


Рис. 9.10

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)



*Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).*

Резерфорд исследовал прохождение  $\alpha$ -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  $\alpha$ -частиц использовался сцинтиллятор, который светился при попадании на него  $\alpha$ -частицы. В качестве рассеивателя была золотая фольга (см. рис. 9.11). 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.

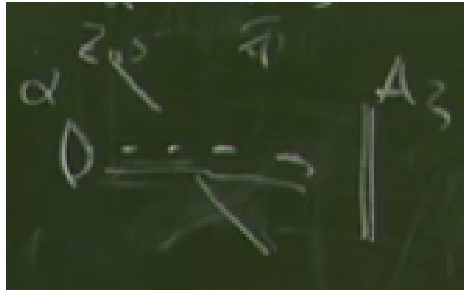


Рис. 9.11

Легко оценить радиус ядра. Пусть есть  $\alpha$ -частица, энергией 5 МэВ, которая летит на ядро (см. рис. 9.12). Она отразится, при условии

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

На самом деле это радиус потенциала, а не ядра.

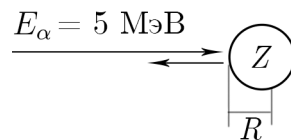


Рис. 9.12

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:

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



*Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)*

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 назвали 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 (см. рис. 9.13). 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:

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

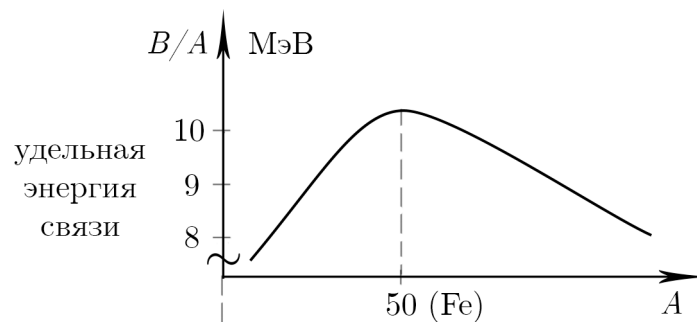


Рис. 9.13

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 (см. рис. 9.14).

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



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

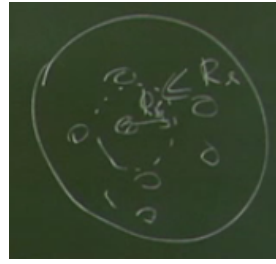


Рис. 9.14

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

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

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:

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

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

Подставим это в волновое уравнение.

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

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

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

где  $q$  — заряд ядра.



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)



**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

Подставим этот потенциал в уравнение Пуассона:

$$\Delta V \rightarrow \frac{q}{rr_0^2} e^{-\frac{1}{\hbar}|r|} = \frac{V}{r_0^2} \neq 0.$$

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

$$V = \frac{q}{r_0} \hbar e^{-\frac{1}{\hbar}|r|} e^{i(kr - \omega t)}.$$

Если подставить в уравнение, то будет

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

Теперь умножим это на  $\hbar^2$ :

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

$$\hbar^2 \omega^2 = \hbar^2 c^2 k^2 + \frac{c^2 \hbar^2}{r_0^2}$$

— 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  $\tau$ :

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

Это значит, что за время  $\tau$  улетела на расстояние:

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

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

!

*Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки.  
Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).*

10

— 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.

!

*Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой.  
Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на  
[pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)*