

# **Лекция №6**

## **СВОЙСТВА ЯДЕРНЫХ СИЛ**

# Свойства ядерных сил

## *Вводные замечания*

Одной из основных задач ядерной физики с момента ее возникновения является объяснение природы ядерного взаимодействия. Особенности микромира не позволяют напрямую измерять силу действующую между двумя нуклонами.

*Источниками сведений о свойствах ядерных сил являются экспериментальные исследования:*

*Исследование свойств атомных ядер;*

*Изучение структуры дейтрона;*

*Опыты по нуклон-нуклонному рассеянию.*

До настоящего времени природа ядерных сил не выяснена. Многообразие свойств ядерных сил не позволяет создать законченную теорию.

# Свойства ядерных сил

## *Притяжение*

Ядерные силы носят в основном характер притяжения – это следует из самого факта существования ядер.

## *Интенсивность*

По сравнению с остальными известными взаимодействиями ядерные являются наиболее сильными.

*Удельная энергия связи ядер составляет ~8 МэВ/нуклон. Энергия связи простейшего ядра  $H^2$  составляет 2,22 МэВ, тогда как энергия связи электрона в атоме водорода составляет 13,6 эВ. Величина ядерного потенциала имеет порядок десятков МэВ.*

## *Короткодействие*

Важным свойством ядерных сил является их малая область действия, по порядку величины равная  $10^{-13}$  см.

# Свойства ядерных сил

## *Потенциал нуклон-нуклонного взаимодействия*

Экспериментально не удается установить детальную форму потенциала ядерного взаимодействия. Причина заключается в чрезвычайной малости области взаимодействия и его большой интенсивности.

*Изучая свойства дейтрона - простейшей ядерной системы можно подобрать потенциал, описывающий свойства нуклон-нуклонного взаимодействия.*

В качестве первого приближения, можно использовать широкий круг функций, которые достаточно быстро убывают с расстоянием. Например:

*Прямоугольная потенциальная яма;*

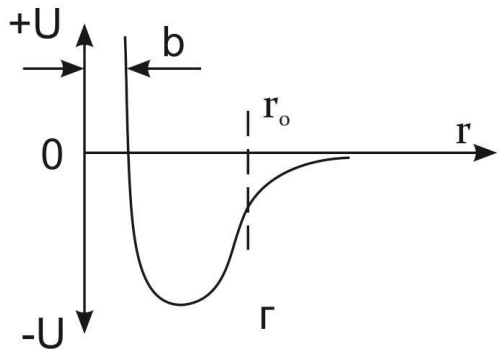
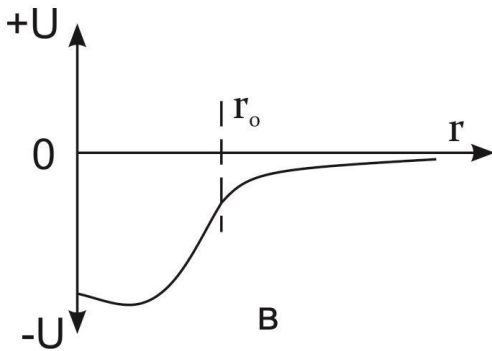
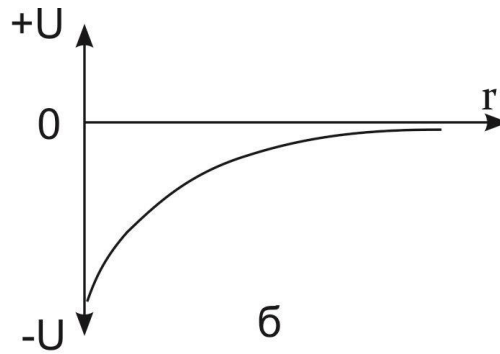
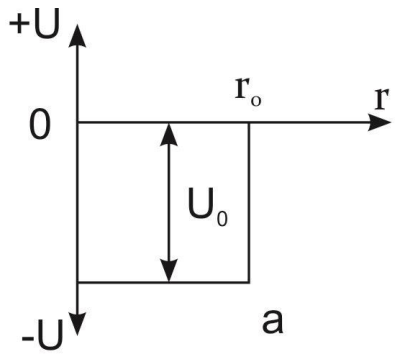
*Экспоненциальная яма;*

*Мезонный потенциал Юкава;*

*Потенциал с твердой отталкивающей сердцевиной.*

# Свойства ядерных сил

## Потенциал нуклон-нуклонного взаимодействия



Модельные формы потенциалов нуклон-нуклонного взаимодействия

Детальное изучение структуры рассеяния и сравнение с теоретическими расчетами говорит в пользу последнего из рассмотренных потенциалов. В настоящее время используют более сложные формы потенциала, обеспечивающие лучшее согласие с экспериментальными результатами.

# Свойства ядерных сил

## Независимость от электрического заряда

Силы взаимодействия между нуклонами не зависят от их электрических зарядов.

*Это свойство ядерных сил носит фундаментальный характер и указывает на глубокую симметрию, существующую между нейтроном и протоном. Симметрия позволяет рассматривать протон и нейтрон как два состояния одной и той же частицы – нуклона. У нуклона есть зарядовая степень свободы по отношению к которой возможны два состояния: протон и нейтрон. Формально описание этой степени свободы аналогично описанию спина. Математически зарядовую степень свободы нуклона описывают с помощью условного трехмерного пространства, которое называется изотопическим. Состояние нуклона в этом пространстве характеризуется **изотопическим спином**.*

Зарядовая независимость - **изотопическая инвариантность**.

# Свойства ядерных сил

## *Независимость от электрического заряда*

У легких стабильных ядер, когда электромагнитным отталкиванием можно пренебречь количество нейтронов равно количеству протонов (основное правило).

Легкие зеркальные ядра (получающиеся заменой нейтронов на протоны и наоборот)  ${}_6\text{C}^{13}$ ,  ${}_7\text{N}^{13}$  имеют одинаковые энергетические уровни.

Энергия связи зеркальных ядер  ${}_1\text{T}^3$  и  ${}_2\text{He}^3$  в приближении изотопической инвариантности были бы равны. На самом деле  $\Delta E_{св}({}_1\text{T}^3)=8,48$  МэВ, а  $\Delta E_{св}({}_2\text{He}^3)=7,72$  МэВ, различаются на величину энергии кулоновского отталкивания двух протонов.

# Свойства ядерных сил

## Зависимость от спинов

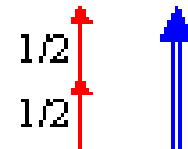
Одно и то же ядро в состояниях с различными спинами обладает различными энергиями связи.

*Например, энергия связи дейтрона, в котором спины протона и нейтрона параллельны, равна **2,23** МэВ. При антипараллельной ориентации спинов связанного состояния вообще не образуется.*

Зависимость ядерных сил от спинов такова, что они сильнее, когда спины параллельны и слабее в обратном случае.

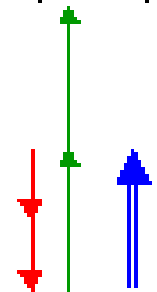
Спин и четность дейтрона  $1^+$ , нуклоны находятся в  $s$ -состоянии ( $l=0+0$ ).  $\mu(s) = 0,8796\mu_{\text{я}}$  близко к экспериментальному  $\mu_{\text{д}} = 0,85742\mu_{\text{я}}$ . Различие объясняется примесью (0.03)  $d$ -состояния ( $l=1+1$ ) в волновой функции.  $\mu(d) = 0,1204\mu_{\text{я}}$ .

$$S = 1, L = 0, J = 1$$



$$J = |\vec{L} + \vec{S}| = 0 + 1 = 1$$

$$S = 1, L = 2, J = 1$$



$$J = |\vec{L} + \vec{S}| = 2 - 1 = 1$$

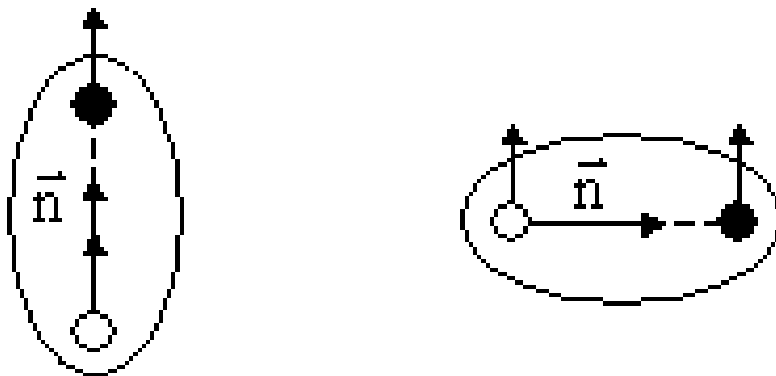


# Свойства ядерных сил

## Нецентральный характер

Наличие примеси  $d$ -состояния и квадрупольного момента ( $0,282 \text{ Фм}^2$ ) у дейтрона свидетельствуют о нецентральном характере ядерных сил. Такие силы называют **тензорными**.

*Тензорные силы зависят от величины проекций спинов  $s^1$  и  $s^2$ , нуклонов на направление вектора соединяющего эти два нуклона.*



Положительный квадрупольный момент (вытянутый эллипсоид) соответствует притяжению нуклонов, сплюснутый эллипсоид соответствует отталкиванию.

# Свойства ядерных сил

## Элементарная теория дейтрона

Дейтрон – простейшее ядро в котором реализуется ядерное взаимодействие между 2-мя нуклонами (нейтроном и протоном) с отрицательной энергией. Вспомним его главные свойства:

Характеристика	Величина
<i>Энергия связи</i>	2,224 МэВ
<i>Спин</i>	1
<i>Четность</i>	+
<i>Магнитный момент</i>	0,85742 $\mu_n$
<i>Электрический квадрупольный момент</i>	0.282 Фм <sup>2</sup>

*Рассмотрим перечисленные свойства еще раз:*

# Свойства ядерных сил

## Элементарная теория дейтрона

Энергия связи дейтрона  $\Delta E$  очень мала. Она совпадает с энергией отделения от дейтрона и протона ( $\varepsilon_p$ ) и нейтрона ( $\varepsilon_n$ ).

Спин дейтрона равен **1**, а магнитный момент **примерно равен** сумме магнитных моментов протона и нейтрона ( $\mu_p + \mu_n = 0,8796\mu_j$ ). Именно из этого **равенства** следует что протон и нейтрон в дейтроне находятся в *s*-состоянии, которое должно характеризоваться сферической симметрией. Об этом же говорит очень малое значение квадрупольного электрического момента.

**В первом приближении** можно считать что дейтрон является **сферически-симметричным ядром**, волновая функция которого есть решение уравнения Шредингера со сферически-симметричным потенциалом и сама обладает сферической симметрией\*.

\* Как уже отмечалось на самом деле основное состояние дейтрона является смесью *s*- и *d*-состояний (96%, 4%).

# Свойства ядерных сил

## Элементарная теория дейтрона

Для определения вида волновой функции дейтрона  $\Psi(\mathbf{r})$ , необходимо решить уравнение Шредингера для определенного вида потенциала  $V(\mathbf{r})$ :

$$\Delta\Psi + \frac{2\mu}{\hbar^2}(E - V)\Psi = 0$$

где  $\mu$  - приведенная масса протона и нейтрона,  $E$  - полная энергия.

Тогда  $|\Psi(\mathbf{r})|^2$  - есть вероятность нахождения протона и нейтрона на расстоянии  $r$  друг от друга.

Записав уравнение в сферических координатах, учитывая сферическую симметрию (равенство **нулю** частных производных по азимутальному и полярному углам) и используя новую функцию  $u(r) = r\Psi(r)$ , получим

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{2\mu}{\hbar^2}(E - V(r)) \cdot u = 0$$

# Свойства ядерных сил

## Элементарная теория дейтрона

Последнее уравнение решено для широко спектра модельных потенциалов включая рассмотренные нами ранее.

*Оказалось, что основные результаты **слабо зависят** от выбора потенциала.*

***Единственное** возможное объяснение этого заключается в том, что из-за малого радиуса потенциала, нуклоны в дейтроне значительную часть времени находятся **за пределами** потенциальной ямы.*

В связи с вышесказанным рассмотрим решение уравнения для простейшей формы потенциала (прямоугольной ямы):

$$V(r) = \begin{cases} -V_0 & \text{для } r \leq r_0, E = -\Delta E \\ 0 & \text{для } r > r_0, E = -\Delta E \end{cases}$$

# Свойства ядерных сил

## Элементарная теория дейтрона

Тогда можем записать два уравнения:

$$\text{для } r \leq r_0. \quad \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{2\mu}{\hbar^2} (V_0 - \Delta E) \cdot u = 0$$

$$\text{для } r > r_0. \quad \frac{d^2 u}{dr^2} - \frac{2\mu}{\hbar^2} \Delta E \cdot u = 0$$

Функции:

$$u(r) = A \sin(\kappa \cdot r) + B \cos(\kappa \cdot r)$$

$$u(r) = C e^{-\lambda r} + D e^{\lambda r}$$

являются решениями 1-го и 2-го уравнений соответственно.

$$\text{где } \kappa = \sqrt{2\mu(V_0 - \Delta E)} / \hbar$$

$$\lambda = \sqrt{2\mu \cdot \Delta E} / \hbar$$

# Свойства ядерных сил

## Элементарная теория дейтрона

Очевидно что коэффициент  $B=0$ , так как функция  $\Psi(r)=u(r)/r$  должна быть **ограниченной** при  $r \rightarrow 0$ . Аналогично коэффициент  $D=0$ , во избежание расхождения  $\Psi(r)$  при  $r \rightarrow \infty$ .

Таким образом

$$\begin{aligned} u(r) &= A \sin(\kappa \cdot r) && \text{при } r \leq r_0. \\ u(r) &= C e^{-\lambda r} && \text{при } r > r_0. \end{aligned} \quad \text{где } \kappa > 0 \text{ и } \lambda > 0$$

Теперь можно найти связь между параметрами потенциальной ямы  $r_0$ ,  $V_0$  и энергией связи  $\Delta E$ .

Рассмотрим **возможность** существования связанного состояния в яме. Рассмотрим случай  $\Delta E = 0$ . Так как функция  $u(r)$  и ее производная  $u'(r)$  непрерывны то  $\ln(u(r))$  должна быть **непрерывной**. Вычисляя значение  $u'(r)/u(r)$  в точке  $r = r_0$  из обоих решений и приравнивая их получим:

# Свойства ядерных сил

## Элементарная теория дейтрона

Тогда можем записать два уравнения:

$$\text{для } r \leq r_0. \quad \frac{du}{dr} = A\kappa \cos(\kappa \cdot r) \quad \frac{1}{u} \frac{du}{dr} = \kappa \cdot \text{ctg}(\kappa \cdot r)$$

$$\text{для } r > r_0. \quad \frac{du}{dr} = -\lambda \cdot C \cdot e^{-\lambda r} \quad \frac{1}{u} \frac{du}{dr} = -\lambda$$

$$\text{В точке } r = r_0: \quad \kappa \cdot \text{ctg}(\kappa \cdot r_0) = -\lambda$$

Подставив значения  $\kappa$  и  $\lambda$ , получим трансцендентное уравнение вида:  $\text{ctg}(\kappa \cdot r_0) = \sqrt{\Delta E / (V_0 - \Delta E)}$

Решением которого при  $\Delta E = 0$  является:  $\kappa = \pi / (2r_0)$ .

Так как при  $\Delta E = 0$ :  $\kappa = \sqrt{2\mu(V_0 - \Delta E)} / \hbar = \sqrt{2\mu V_0} / \hbar$

Условие существования уровня с  $\Delta E = 0$  в прямоугольной яме:

$$V_0 \cdot r_0^2 = \pi^2 \cdot \hbar^2 / (8\mu)$$



# Свойства ядерных сил

## Элементарная теория дейтрона

Подставив численные значения констант, получим:

$$V_0 \cdot r_0^2 = \pi^2 \cdot \hbar^2 / (8\mu) = 1,02 \cdot 10^{-24} \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2$$

*Данное условие определяет **минимальную глубину** прямоугольной потенциальной ямы с шириной  $r_0$  которая **необходима** для существования в ней связанного состояния.*

$$V_0^{\text{мин}} = \frac{\pi^2 \cdot \hbar^2}{8\mu \cdot r_0^2} \approx \frac{10^{-24}}{r_0^2} \text{ МэВ}$$

*Принимая, например, радиус ямы равный среднему расстоянию между нуклонами  $r_0 = \sqrt[3]{V_y/A} = 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ , получим  $V_0^{\text{мин}} = 25 \text{ МэВ}$ .*

*Если энергия связи **отлична от нуля**, можно показать, что глубина ямы растет быстрее энергии связи. В случае дейтрона даже такой уровень как **-2,22 МэВ** может существовать, только если глубина потенциальной ямы на **10 МэВ** превосходит минимальную.*

# Свойства ядерных сил

*Элементарная теория дейтрона.*

*Волновая функция и радиус.*

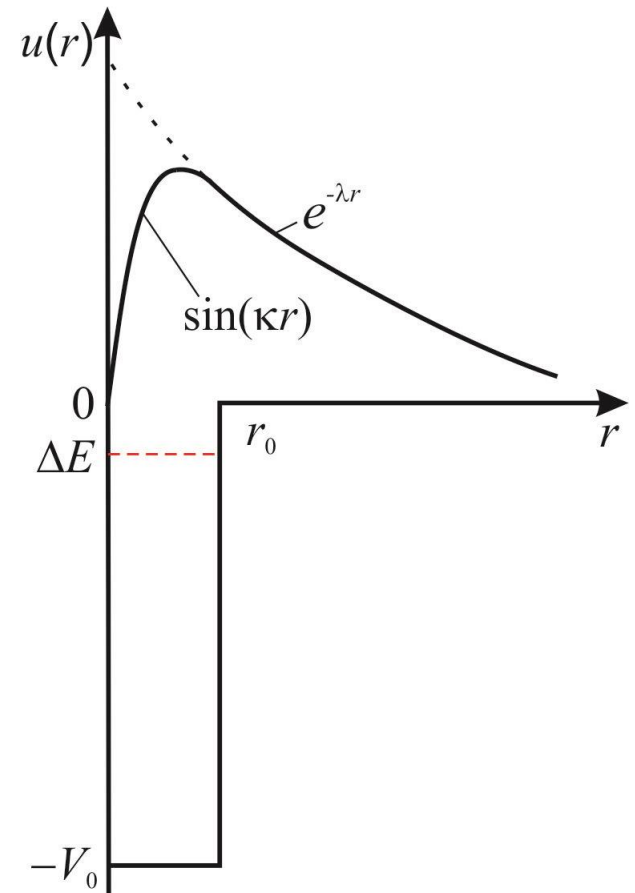
Решение уравнения Шредингера для прямоугольной ямы шириной  $r_0$  и глубиной  $V_0$  имеет вид:

$$u(r) = A \sin(\kappa \cdot r) \quad \text{при } r \leq r_0$$

$$u(r) = C e^{-\lambda r} \quad \text{при } r > r_0$$

Коэффициенты  $A$  и  $C$  могут быть найдены из условий **непрерывности** в точке  $r = r_0$  и условия **нормировки**.

На рисунке изображена волновая функция  $u(r)$ , «сшитая» в точке  $r = r_0$



# Свойства ядерных сил

*Элементарная теория дейтрона.*

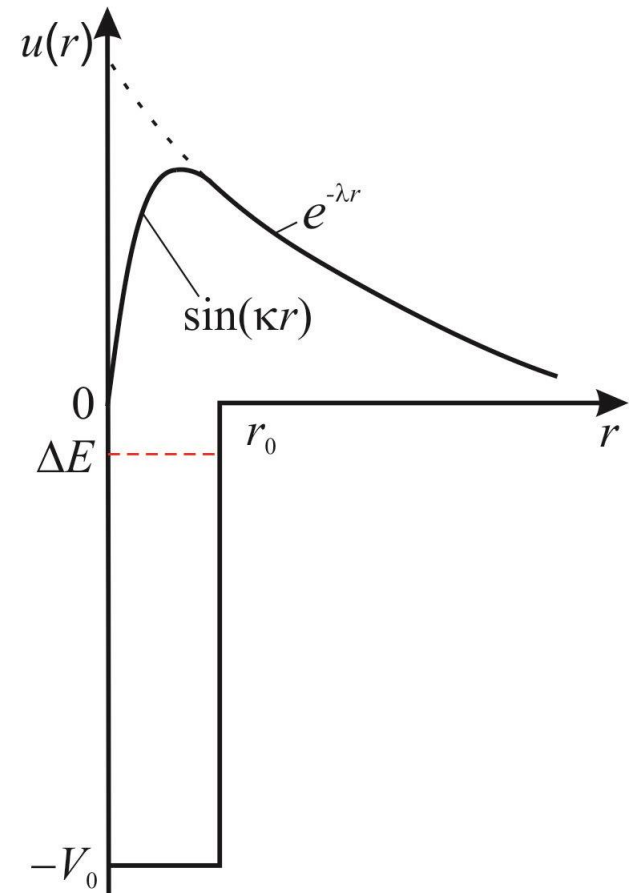
*Волновая функция и радиус.*

При  $r \leq r_0$  функция изменяется по закону синуса и имеет в этой области максимум. В области  $r > r_0$  функция экспоненциально убывает.

Скорость убывания характеризуется коэффициентом  $\lambda$ . **Характерная длина**

$$R_D = \frac{1}{\lambda} = \frac{\hbar}{\sqrt{2\mu \cdot \Delta E}} = 4,2 \cdot 10^{-13} \text{ см},$$

на протяжении которой  $u(r)$  уменьшается в  $e$  раз, принято называть радиусом дейтрона. Значение  $R_D$  более чем в два раза превышает выбранный радиус ямы  $r_0$ .



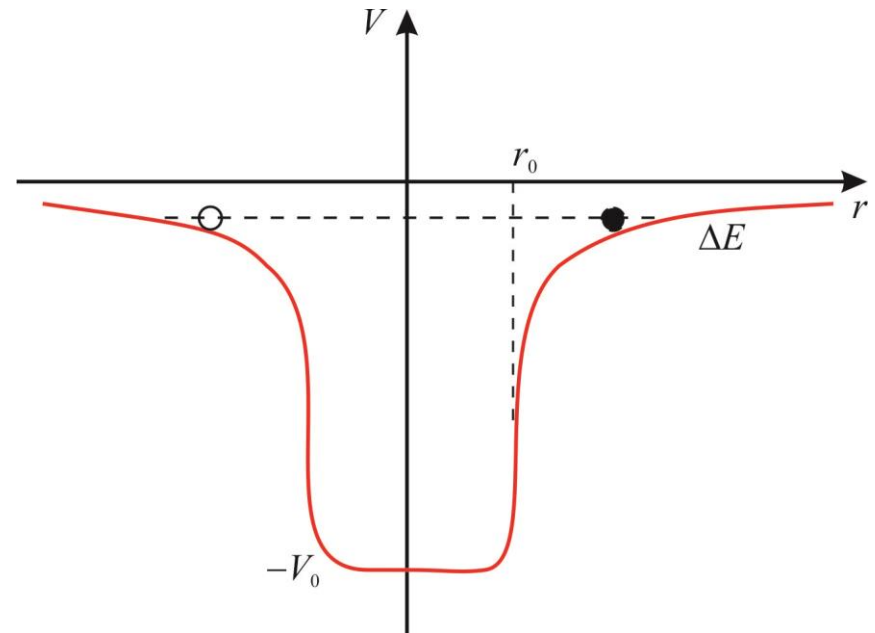
# Свойства ядерных сил

*Элементарная теория дейтрона.*

*Волновая функция и радиус.*

Таким образом нуклоны дейтрона имеют **большую вероятность** находится **вне** потенциальной ямы. В среднем они находятся на ее краях. Из-за этой особенности дейтрон называют «**рыхлым**» ядром.

*Это схематично показано на рисунке для ямы типа **Вудса-Саксона**. Дейтрон имеет радиус аналогичный радиусу ядер с массовыми числами в диапазоне 40-50.*



# Свойства ядерных сил

*Элементарная теория дейтрона.*

*Анализ.*

1. **Большой** радиус дейтрона, приводит к тому что в области  $r > r_0$  находится **большая** часть площади ограниченной функцией  $u(r)$ .
2. При **другой** форме потенциала  $u(r)$  заметно изменяется **только** в области  $r \leq r_0$ .
3. В этом приближении теория дейтрона **допускает** что волновая функция обращается в  $\infty$  при  $r_0=0$ . Приближение нулевого радиуса из-за большого размера дейтрона является достаточно «хорошим», так как волновая функция может быть нормирована:

$$\int |\Psi(r)|^2 d\tau = 4\pi \int_0^{\infty} \frac{|u(r)|^2}{r^2} r^2 dr = 4\pi C^2 \int_0^{\infty} e^{-2\lambda r} dr = \frac{2\pi C^2}{\lambda} = 1$$

# Свойства ядерных сил

*Элементарная теория дейтрона.*

*Нормировка.*

$$\int |\Psi(r)|^2 d\tau = 4\pi \int_0^{\infty} \frac{|u(r)|^2}{r^2} r^2 dr = 4\pi C^2 \int_0^{\infty} e^{-2\lambda r} dr = \frac{2\pi C^2}{\lambda} = 1$$

Следовательно:  $C = \sqrt{\lambda/(2\pi)}$  и

$$u(r) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi}} e^{-\lambda r}$$

$$\lambda = \sqrt{2\mu \cdot \Delta E} / \hbar$$

$$\Psi(r) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi}} \frac{e^{-\lambda r}}{r}$$

*Полученное выражение совпадает с потенциалом Юкавы!*

# Свойства ядерных сил

*Элементарная теория дейтрона.*

*Возбужденные состояния дейтрона.*

Легко показать что дейтрон обладает единственным связанным состоянием.

*В случае  $l=0$  трансцендентное уравнение определяющее условие наличия связанного состояния дает:*

$$V_{02}^{мин} = 9 \frac{\pi^2 \cdot \hbar^2}{8\mu \cdot r_0^2} = 9 V_{01}^{мин} = 225 \text{ МэВ}$$

*это много больше реальной глубины ямы дейтрона.*

*Когда  $l$  отлично от нуля из-за возникновения центробежного барьера, появляется дополнительное отталкивание, которое должно компенсироваться увеличением глубины ямы, по сравнению с со случаем когда  $l=0$ .*

$$V_{ц} = \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2mr^2}$$

# Свойства ядерных сил

## Насыщение

Свойство насыщения состоит в том, что нуклон в ядре притягивает к себе лишь ограниченное количество соседних нуклонов, остальные нуклоны либо отталкиваются либо не подвергаются его влиянию.

*Если бы каждый нуклон в ядре притягивал к себе все остальные, то энергия такого взаимодействия была бы пропорциональна  $A^2$ , а диаметр ядра был бы равен радиусу действия ядерных сил. Однако для большинства ядер энергия связи и объем пропорциональны  $A$ .*

Полностью аналогичным свойством насыщения обладают силы химических связей (обменный характер), а также силы межмолекулярного взаимодействия в жидкостях (наличие отталкивающей сердцевины в потенциале).

*Эксперименты по нуклон-нуклонному рассеянию показывают, что в случае ядерных сил одновременно реализуются обе возможности.*



# Свойства ядерных сил

## Обменный характер

Обменное свойство ядерных сил заключается в том что при столкновении нуклоны могут передавать друг другу такие свои характеристики как заряд, проекции спинов и др.

*Впервые обменный характер установлен у сил химической связи, которая образуется в результате перехода электрона от одного атома к другому. Электромагнитные силы также можно относить к обменным, объясняя взаимодействие зарядов обменом фотонами. В данном случае не наблюдается насыщение, так как обмен не приводит к изменению свойств взаимодействующих частиц.*

Обменный характер нуклон-нуклонных взаимодействий проявляется при рассеянии нейтронов высоких энергий (сотни МэВ) на протонах. В с.ц.м. наблюдается максимум при рассеянии назад, что объясняется «перезарядкой» – обменом зарядом между протоном и нейтроном.

# Свойства ядерных сил

## *Основы мезонной теории ядерных сил*

Экспериментальные результаты по изучению свойств ядерных сил положены в основу попыток создать единую теорию описывающую сильное взаимодействие. При этом используют два разных подхода:

*В феноменологическом направлении теории не ставится вопрос о выяснении природы ядерных сил. Теоретически подбирается потенциал удовлетворяющий совокупности имеющихся экспериментальных данных.*

*Второй подход предполагает, что ядерные силы возникают благодаря обмену  $\pi$ -мезонами.*

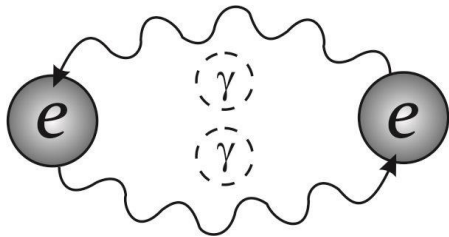
Японский физик Юкава, предположил что должно существовать поле иного типа, сходное с электромагнитным, но имеющее другую природу.

# Свойства ядерных сил

## Основы мезонной теории ядерных сил

Квантовое представление о полях состоит в том что, передача взаимодействия осуществляется как процесс испускания и поглощения квантов некоторого поля.

*В случае электромагнитного поля, заряженная частица испускает фотон который поглощается другой частицей или ей самой. Совокупность процессов поглощения и испускания фотонов и образует электромагнитное поле.*



Это **необычные** фотоны. Покоящийся заряд не может изменить ни свою массу, ни энергию. Следовательно процесс испускания и поглощения фотона должен идти с **нарушением закона сохранения энергии!!!!**

Фотон уносит энергию  $\Delta E = \hbar \nu$ .

**Однако!** Согласно принципу неопределенности, в изменяющейся системе энергия не может быть строго определенной величиной.

# Свойства ядерных сил

## Основы мезонной теории ядерных сил

Рассматривая процесс длительностью  $\Delta t = \hbar / \Delta E$ ,  
Бессмысленно говорить о точном значении энергии, и  
следовательно ее сохранении с точностью большей  $\Delta E$ .

*Обменные взаимодействия происходят за малые промежутки  
времени и не могут быть детально прослежены.*

*Процессы которые идут с кажущимся нарушением ЗСЭ и частицы  
поля, которые не могут обладать энергией и импульсом, принято  
называть **виртуальными**.*

*Увеличивая энергию излучающей частицы, например ускоряя  
электрон, можно виртуальные фотоны превратить в реальные.*

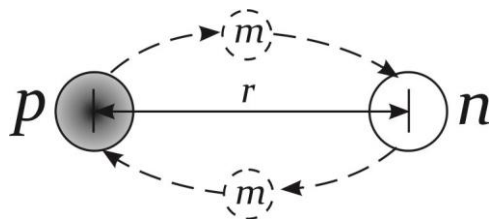
По аналогии с электромагнитным взаимодействием, Юкава  
предположил, что нуклоны являются носителями некоторых  
зарядов  $g$ , создающих поле ядерных сил.

# Свойства ядерных сил

## Основы мезонной теории ядерных сил

Поскольку радиус действия ядерных сил очень мал, потенциал поля нуклонов должен резко уменьшаться с расстоянием. Согласно Юкава он должен иметь вид

$$U = \frac{g^2}{r} e^{-\frac{r}{r_0}}$$



Полная энергия нуклона равна  $Mc^2$ .

Если он испускает частицу массы  $m$ , неопределенность величины полной энергии будет соответствовать  $\Delta E \geq mc^2$ .

Время предназначенное для обмена частицей

$$\Delta t \leq \hbar / mc^2.$$

Если за это время частица **встретит** на пути другой нуклон, произойдет **взаимодействие**, если нет, то частица должна поглотиться нуклоном который ее испустил.

За это время частица сможет пройти расстояние  $R = \Delta t \cdot c \leq \hbar / mc$

# Свойства ядерных сил

## Основы мезонной теории ядерных сил

Таким образом, взаимодействие, вызываемое обменом частицами с конечной массой покоя, принципиально обладает ограниченным радиусом действия.

*Зная радиус действия ядерных сил, можно оценить массу частицы*

$$m \approx 300m_e$$

*Так как масса частиц промежуточная между массами электрона и протона, ей было дано название **мезон** («мезо» -промежуточный).*

*В 1947 г. мезоны были обнаружены в космическом излучении.*

В настоящее время известно много квантов ядерного поля.  $\pi$ -мезон играет особую роль. Это самый легкий из мезонов ответственный за дальнодействующую составляющую ядерных сил. Вплоть до энергии 500 МэВ пион-нуклонное взаимодействие осуществляется в отсутствие влияния других квантов поля.

# Свойства ядерных сил

## Современные теории ядерных сил

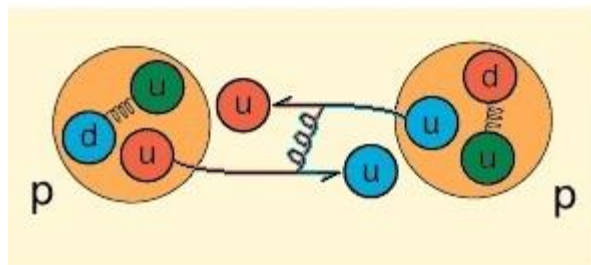
**Стандартная модель** – современная теория сильного и электрослабого взаимодействий фундаментальных фермионов (лептонов и кварков).

**СМ** основана на принципах инвариантности уравнений движения к произвольным изменениям пространственно-временных координат (**принцип локальной калибровочной инвариантности**).

В основе **СМ** лежат две теории:

*Теория электрослабого взаимодействия, описывающая электромагнитные и слабые взаимодействия лептонов и кварков.*

*Квантовая хромодинамика, описывающая цветное взаимодействие кварков.*



Три поколения материи (Фермионы)

	I	II	III	
масса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	верхний	очаровательный	истинный	фотон
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>	<b>γ</b>
	4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	нижний	странный	прелестный	глюон
<b>Кварки</b>	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	<b>g</b>
	< 2,2 эВ	< 0,17 МэВ	< 15,5 МэВ	91,2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау нейтрино	слабое взаимодействие
	<b>ν<sub>e</sub></b>	<b>ν<sub>μ</sub></b>	<b>ν<sub>τ</sub></b>	<b>Z</b>
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электрон	мюон	тау	<b>W<sup>±</sup></b>
<b>Лептоны</b>	<b>e</b>	<b>μ</b>	<b>τ</b>	<b>W<sup>±</sup></b>
				слабое взаимодействие

**Бозоны (переносчики взаимодействия)**

# Свойства ядерных сил

## Современные теории ядерных сил

Кроме полей, отвечающих электромагнитному, сильному и слабому взаимодействиям, - СМ требуется ещё одно поле, которое практически неотделимо от пустого пространства и не совпадает с гравитационным полем. Его принято называть полем Хиггса – носителем которого является **бозон Хиггса**.

Пока нет точных оценок значения массы покоя этой частицы, теоретически она нестабильна и её можно обнаружить только косвенно, с той или иной долей вероятности по «продуктам» распада.

Как добавить к СМ гравитацию, не понятно пока даже теоретически. Определённый прорыв вероятен при развитии **теории струн** и **M-теории**, однако эти теории окончательно не сформулированы.

Три поколения материи (Фермионы)

	I	II	III	
масса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	верхний	очаровательный	истинный	фотон
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>	<b>γ</b>
Кварки	4,8 МэВ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ нижний	104 МэВ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ странный	4,2 ГэВ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ прелестный	0 0 1 глюон
	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	<b>g</b>
	< 2,2 эВ 0 $\frac{1}{2}$ электронное нейтрино	< 0,17 МэВ 0 $\frac{1}{2}$ мюонное нейтрино	< 15,5 МэВ 0 $\frac{1}{2}$ тау нейтрино	91,2 ГэВ 0 1 слабое взаимодействие
	<b>ν<sub>e</sub></b>	<b>ν<sub>μ</sub></b>	<b>ν<sub>τ</sub></b>	<b>Z</b>
Лептоны	0,511 МэВ -1 $\frac{1}{2}$ электрон	105,7 МэВ -1 $\frac{1}{2}$ мюон	1,777 ГэВ -1 $\frac{1}{2}$ тау	80,4 ГэВ ±1 1 слабое взаимодействие
	<b>e</b>	<b>μ</b>	<b>τ</b>	<b>W<sup>±</sup></b>

Бозоны (переносчики взаимодействия)