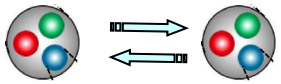
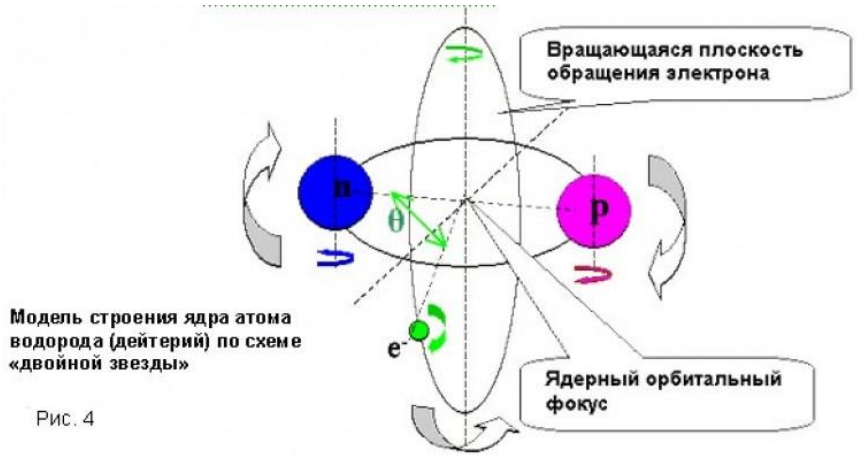
Основы ядерной физики и дозиметрии





Модель строения ядра атома водорода (дейтерий) по схеме «двойной звезды»

Рис. 4

Структура АЯ

Энергия связи и массы ядер
Размеры ядер
Форма ядра. Квадрупольный момент.
Распределение заряда
Спин и магнитный момент АЯ
Свойства ядерных сил.

Платыгина Е.В. каф.РТ

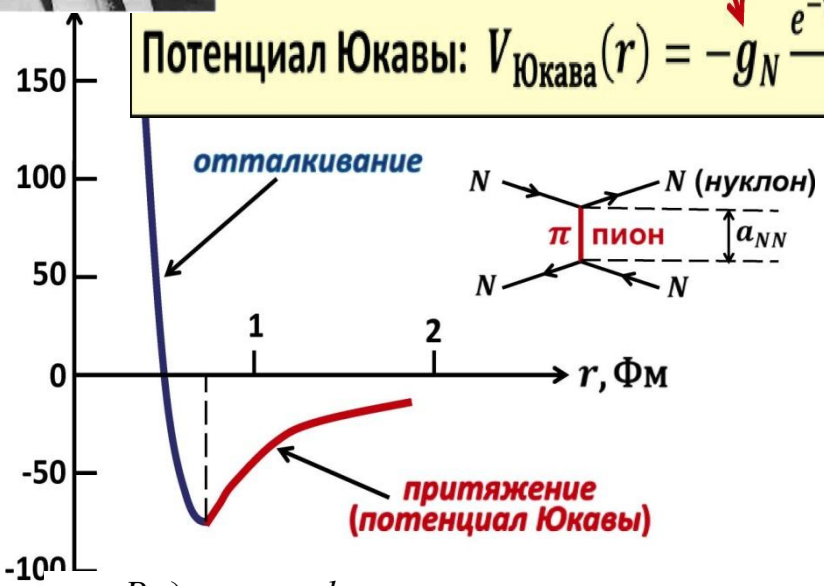
1935 г.Гипотеза Юкавы о кванте ядерного поляNobel Prize 1949 г

Основная идея: ***нуклон-нуклонное (NN) взаимодействие осуществляется, как и электромагнитое, обменом соответствующей частицей – квантом поля***

Согласно модели Юкавы, механизм ядерного взаимодействия заключается в обмене виртуальным π-мезоном между нуклонами.

ядерный заряд нуклона

Потенциал Юкавы: $V_{Юкава}(r) = -g_N \dfrac{e^{-r/a_{NN}}}{r}$



Радиальная форма нуклон-нуклонного потенциала

где $g_{яд}$ - константа ядерного взаимодействия (аналог элементарного заряда e в электромагнитном взаимодействии). Константа ядерного взаимодействия (константа связи)

$g^2_{яд}/\hbar c \simeq 10$.

За время ядерного взаимодействия Δt вблизи нуклона образуется виртуальный π-мезон с массой m_π.

Используя *соотношение неопределенности* $\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar$ (1), можно оценить ***величину массы*** виртуального мезона

$m_\pi = \Delta E/c^2 = \hbar/c^2\Delta t$ (2).

За время взаимодействия виртуальный мезон отойдёт от нуклона на расстояние

$a_{NN} = c\Delta t = c\hbar/\Delta E = \hbar/m_\pi c$ (3).

a_{NN} - радиус ядерного взаимодействия

Время ядерного взаимодействия Δt и массу мезона можно оценить, используя (3) *и* (2)

$-\Delta t = a_{NN}/c = 1.4\cdot10^{-13}/3\cdot10^{10} \simeq 0{,}5\cdot10^{-23}$ с,

$m_\pi c^2 = \hbar/\Delta t = 6{,}6\cdot10^{-22}/0{,}5\cdot10^{-23} \simeq 130$ МэВ.

Экспериментально измеренные массы π-мезонов близки к этой оценке.

Почему так мал радиус действия ЯС?

Каковы основные характеристики π-мезонов?

Атомное ядро – система плотно упакованных протонов и нейтронов, двигающихся со скоростью 10^9-10^{10} см/сек и удерживаемых мощными и короткодействующими ядерными силами взаимного притяжения (область их действия ограничена расстояниями $\approx 10^{-13}$ см).

≈ 99.9% массы атома

Плотность числа частиц в многонуклонных ядрах порядка 10^{44} нуклонов/м^3, а плотность массы 10^{17} кг/м^3.

Массы ядер всегда несколько меньше суммы масс свободных нуклонов, составляющих ядро.

Это релятивистский эффект, определяющий энергию связи ядра.

***Энергия связи ядра* W(A, Z) - это минимальная энергия, необходимая для разделения ядра на составляющие его нуклоны (протоны и нейтроны)**:

$$W(A,Z) = (Z \cdot m_p c^2 + N \cdot m_n c^2) - M(A,Z)\, c^2 ,$$

где M(A,Z) - масса ядра.

$$E_{св}(Z,A) = [Zm_p + Nm_n - M(Z, A)]c^2$$

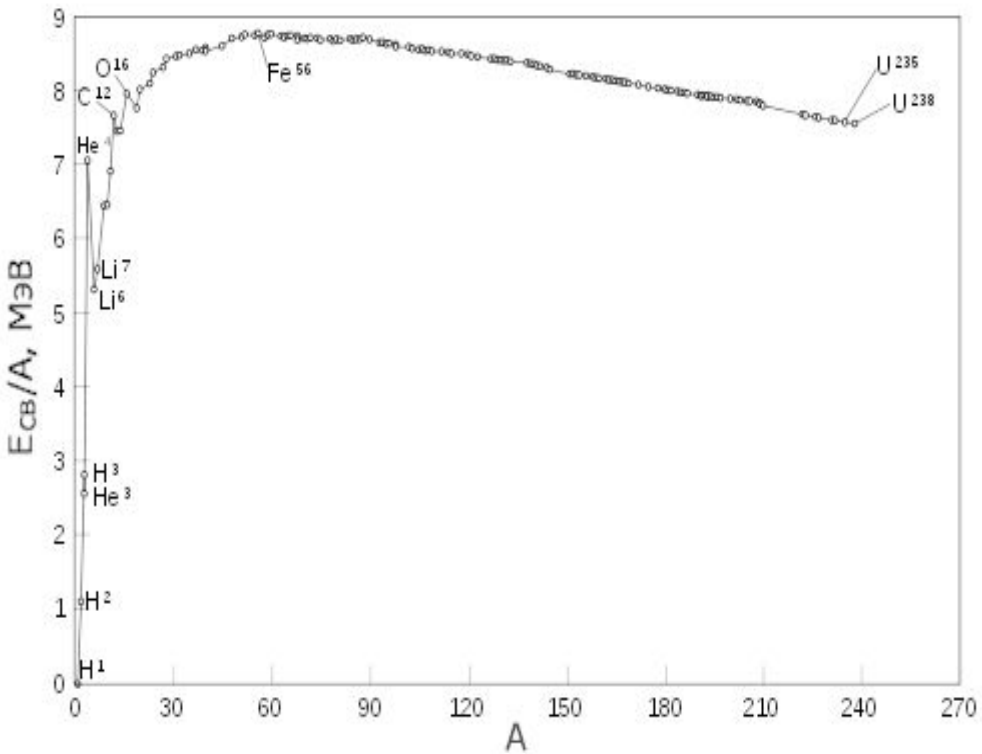
Энергия связи– важнейшая статическая характеристика атомных ядер

Энергия связи Дефект массы

Удельная энергия связи ядра $\varepsilon = W(A, Z)/A$

Массы ядер всегда несколько меньше суммы масс свободных нуклонов, составляющих ядро.

Разность $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M(Z, A)$ ***называют <u>дефектом массы</u>.*** $W(A, Z) = \Delta M \cdot c^2$



Энергия связи зависит от атомного номера ядра, поэтому удобно ввести удельную ***энергию связи*** $\varepsilon = W(A, Z)/A$ ($\varepsilon = E_{св}/A$), *приходящуюся на один нуклон.*

Энергия отделения нуклона B_N (B_n **или** B_p)

- это минимальная энергия, необходимая для вырывания нуклона из ядра.

Это энергия наиболее слабо связанного нуклона (сидящего наиболее высоко в ядерной потенциальной яме).

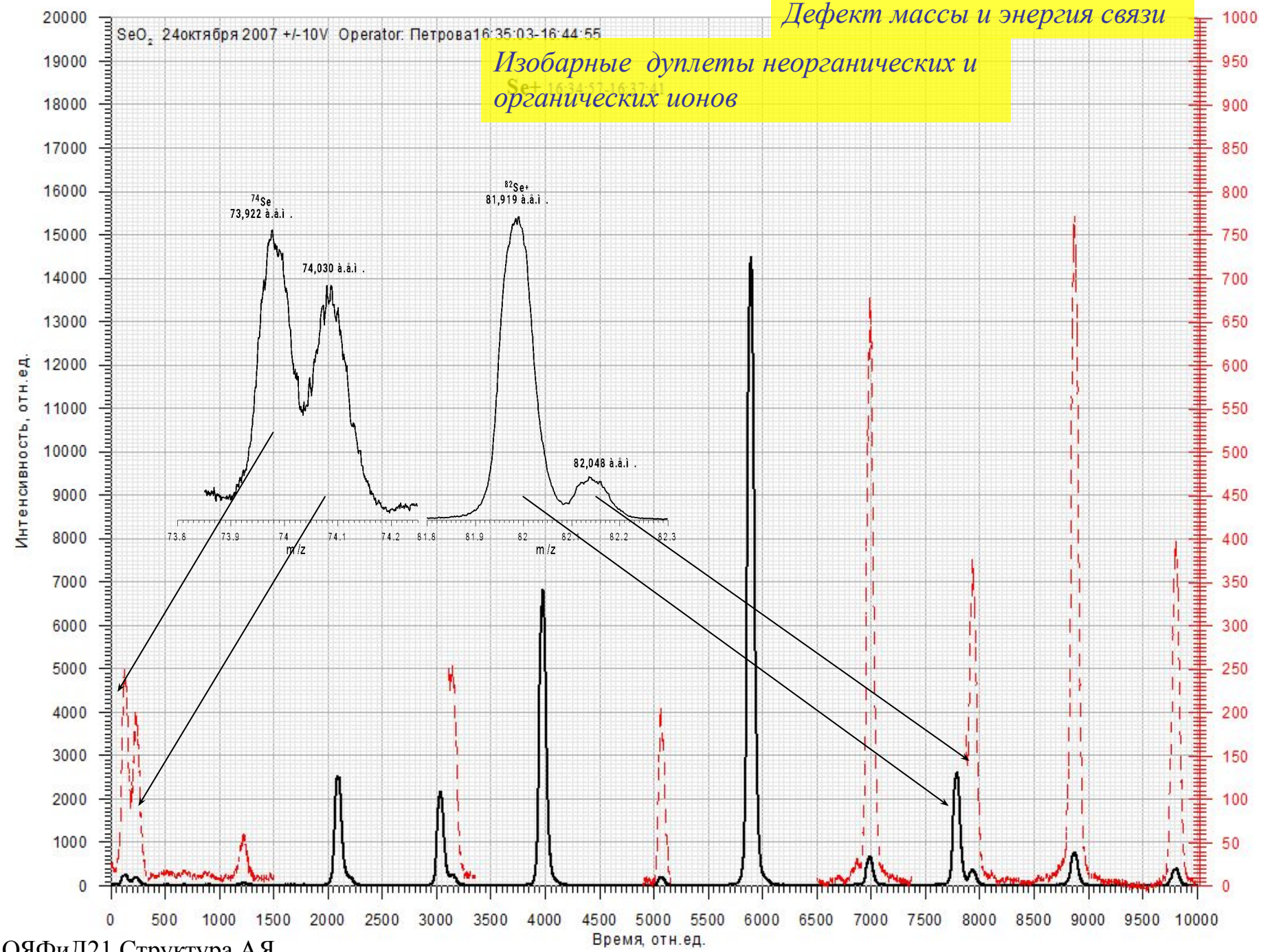
Отделению нейтрона отвечает процесс (A,Z) →(A-1,Z) +n. Энергия, необходимая для такого процесса, определяется разностью масс системы (в энергетических единицах) после и до процесса, т. е. энергия отделения нейтрона

$$B_n = M(A-1,Z)\,c^2 + m_n c^2 - M(A,Z)\,c^2 = W(A,Z) - W(A-1,Z).$$

Аналогично, энергия отделения протона $B_p = W(A,Z) - W(A-1,Z-1)$.

Дефект массы и энергия связи

Изобарные дуплеты неорганических и органических ионов



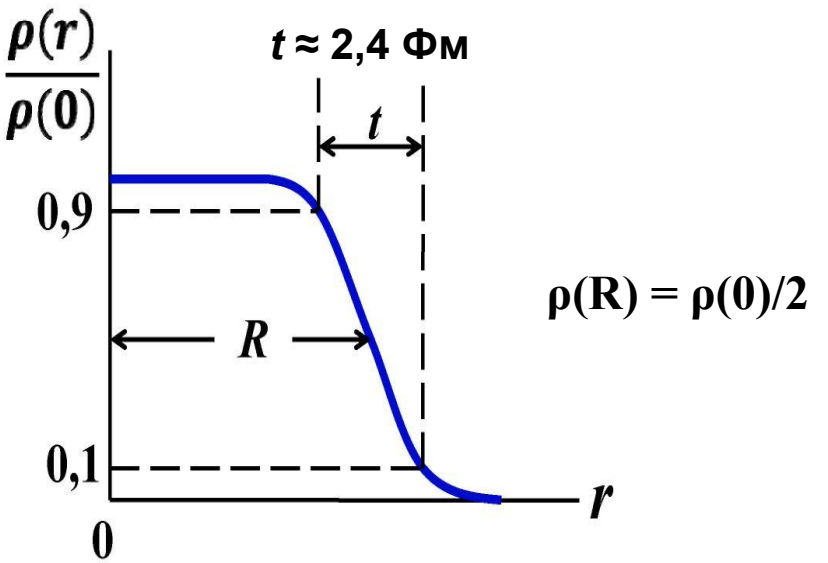
Атомное ядро– положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома

Размеры ядер можно определить такими способами, как рассеяние α-частиц, быстрых нейтронов или быстрых электронах на ядрах, по энергии α-частиц и др.

Плотность распределения как заряда, так и массы ядра приближенно описываются распределением Ферми

$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$$

$a \approx 0{,}55$ Фм



Радиус ядра $R = r_0 \cdot A^{1/3}$

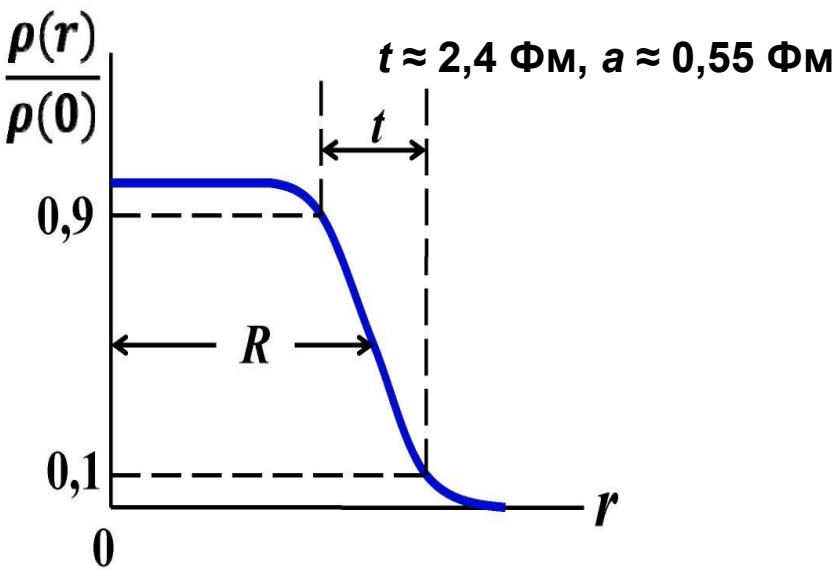
Радиус ядра конкретного элемента равен $R=(1{,}2 \div 1{,}3)\cdot 10^{-13}\cdot A^{1/3}$ см $= 1{,}25A^{1/3}$ Фм

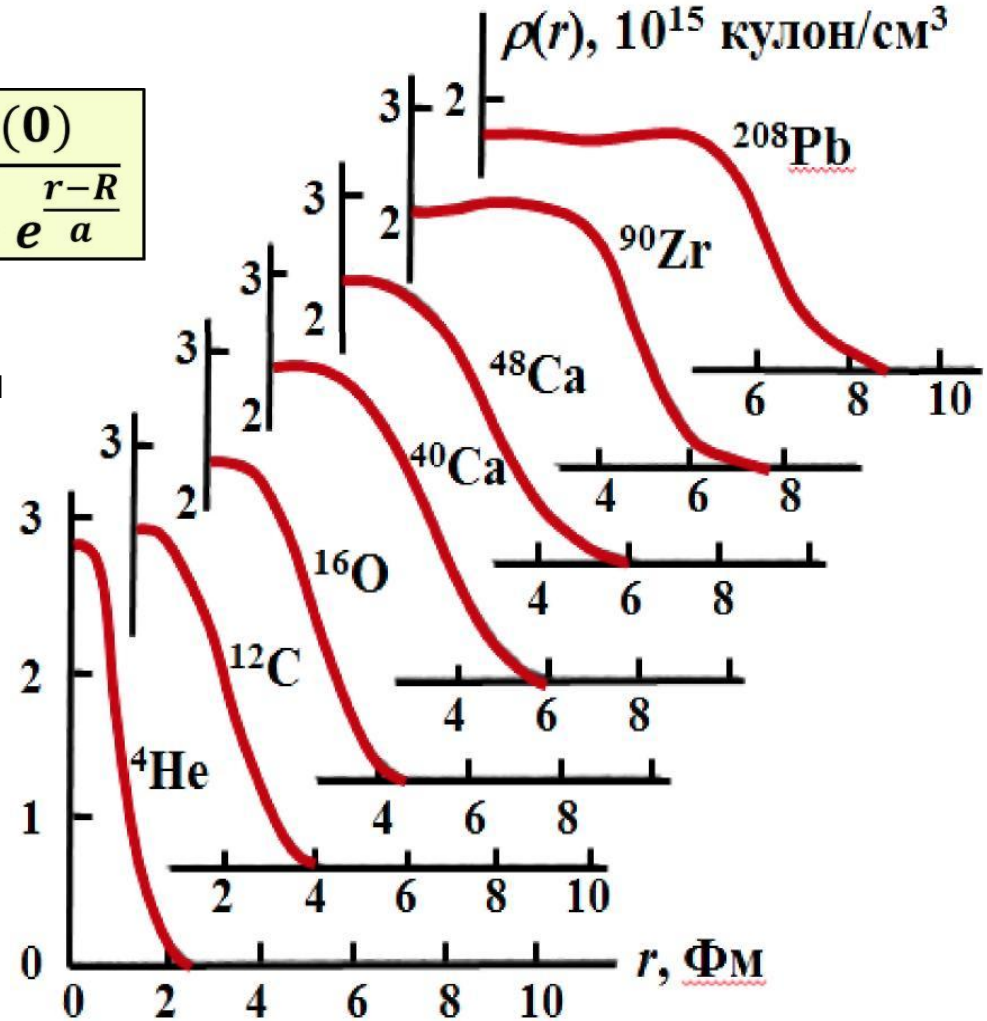
Объем ядра намного меньше объема атома, например, радиус атома водорода составляет $4{,}6\cdot 10^{-2}$ нм, а радиус ядра атома дейтерия (протон ***p*** + нейтрон ***n***) - $2\cdot 10^{-7}$ нм.

Несмотря на такие маленькие размеры ядра, в нем сосредоточена основная масса атома ≈99,9%.

Распределение Ферми:

$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$$



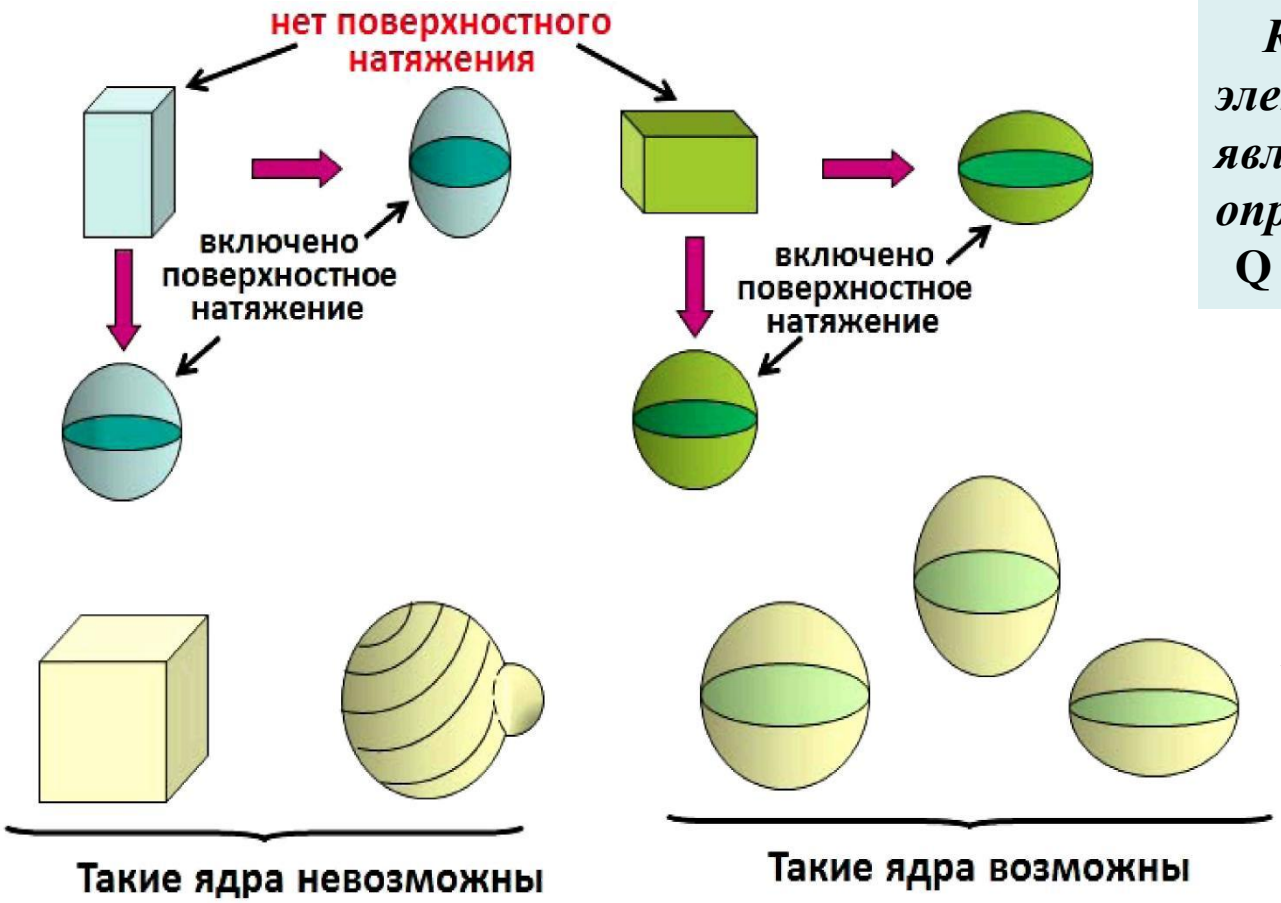


«***Радиусы ядер***» *изменяются от* $2 \cdot 10^{-15}$ *м (ядро гелия) до* 7.10^{-15} *м (ядро урана).*

Экспериментальное распределение плотности заряда ρ(r) в ядре

Атомному ядру как капле ядерной жидкости присуще поверхностное натяжение, которое и определяет возможную форму.

***Поверхностное натяжение минимизирует площадь ядерной поверхности при фиксиро-ванном объёме*, оставляя возможными либо сферические ядра, либо не очень сильно от них отличающиеся – аксиально симметричные слегка вытянутые или сплюснутые (эллипсоидальные).** *Мерой несферичности ядра является величина электрического квадрупольного момента Q.*



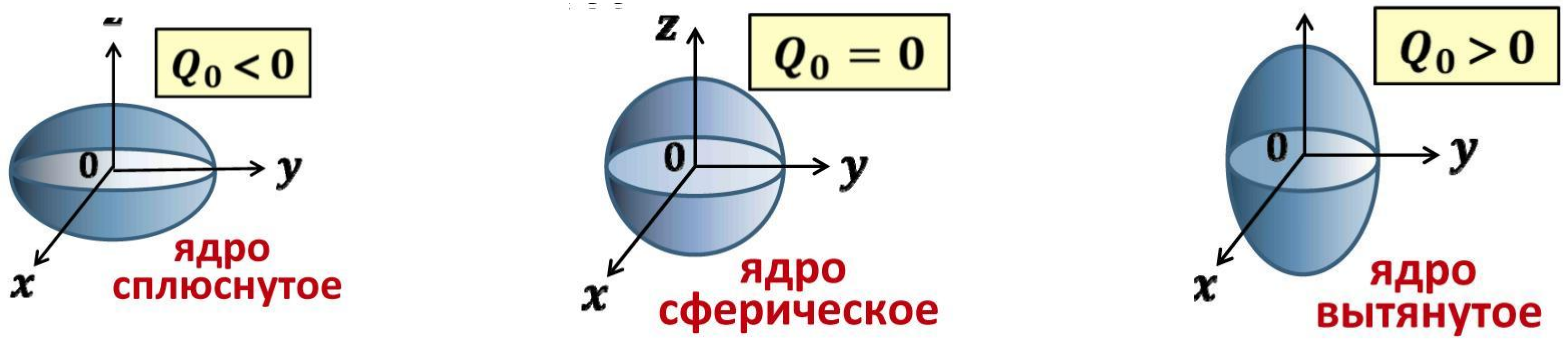
Квадрупольный электрический момент ядра является тензором и определяется соотношением

$$Q = Z \int r^2 \rho(r) (3 \cos^2 \theta - 1) d^3r,$$

где θ – *полярный угол радиуса вектора относительно оси симметрии ядра,*

r – *расстояние элемента заряда от начала координат.*

Тяжелые ядра отклоняются от сферической формы. Они вытягиваются вдоль направления спина. Мерой несферичности ядра является величина электрического квадрупольного момента Q.



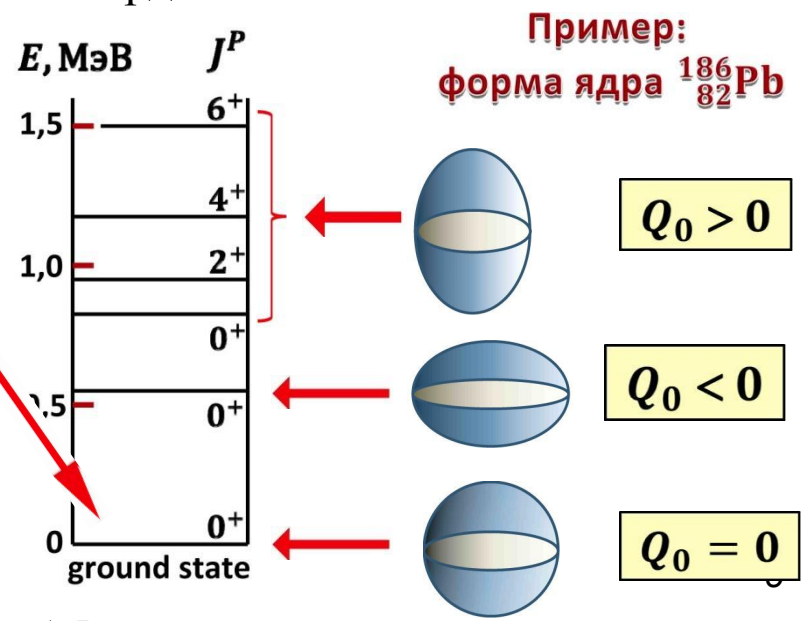
Ось симметрии ядра ориентируют вдоль оси Z и центр масс ядра (его центр симметрии) помещают в начале координат

Большинство ядер вытянутые.

Сферические ядра имеют число нейтронов (и/или протонов) 20, 50, 82 и 126.

Их называют магическими.

т.о., Квадрупольный момент ядра – величина, характеризующая отклонение распределения электрического заряда в атомном ядре от сферически симметричного.



Спин(англ. Spin, букв. – вращение) – *Собственный момент количества движения микрочастицы, имеющий квантовую природу и не связанный с движением частицы как целого; измеряется в единицах постоянной Планка ħ и может быть целым (0, 1, 2,…) или полуцелым (1/2, 3/2,…).*

Спин частицы её неотъемлемая и неизменная внутренняя характеристика (как заряд или масса)

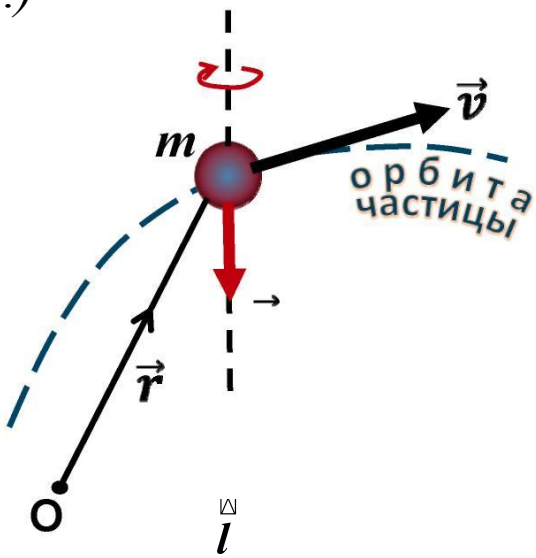
$\vec{j}$ Спин ядра – это полный момент количества движения покоящегося ядра.

Спин ядра:

$$\vec{j} = \sum_{\alpha=1}^{A} (\vec{l}_\alpha + \vec{s}_\alpha)$$

Он является результатом векторного сложения спинов нуклонов ядра $\vec{s}_a$ *и их орбитальных (угловых) моментов* $\vec{l}_a$ *внутри ядра.*

S - Спин частицы



Орбитальный момент частицы

! Ядро неподвижно

Под спинами ядер, частиц и их орбитальными (угловыми) моментами понимают, как правило, их квантовые числа ***l***, **s** *и* **j**, *которые связаны с их истинными величинами соотношениями:*

$$|\vec{l}| = \hbar\sqrt{l(l+1)} \qquad |\vec{s}| = \hbar\sqrt{s(s+1)} \qquad |\vec{j}| = \hbar\sqrt{j(j+1)}$$

Спин нуклона **$s = 1/2\hbar$**, ***спин фотона*** **$s = 1\hbar$**

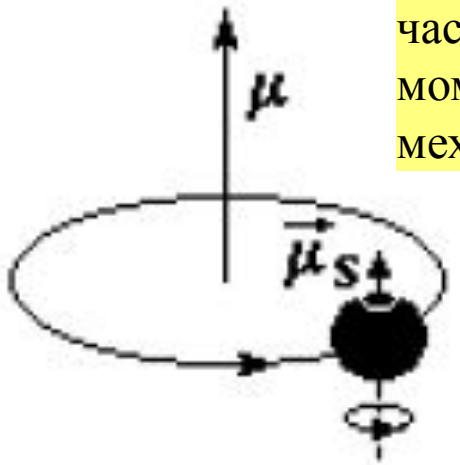
Спин(англ. Spin, букв. – вращение)

Спин ядра определяется количеством нуклонов: при четном числе нуклонов ядро имеет целый спин, при нечетном − полуцелый, т.к. нуклоны являются фермионами с полуцелым спином.

Таким образом, ядра могут быть как фермионами, так и бозонами.

Поскольку нуклоны в ядре движутся и имеют орбитальный момент **L**, то полный момент ядра является суммой орбитального и спинового моментов нуклонов **J** = **L**+ **S**

Согласно классической электродинамике при вращении частицы с зарядом ze и массой m и обладающей механическим моментом ħ**L,** возникает магнитный момент, пропорциональный механическому моменту



аналогом классического момента $\vec{\mu}$ является магнитный момент орбитального движения

$$\vec{\mu} = \frac{e\hbar}{2mc}\frac{\vec{L}}{\hbar}$$

Магнитный момент нуклона измеряется в ядерных магнетонах $\mu_я = e\hbar/2m_pc$,

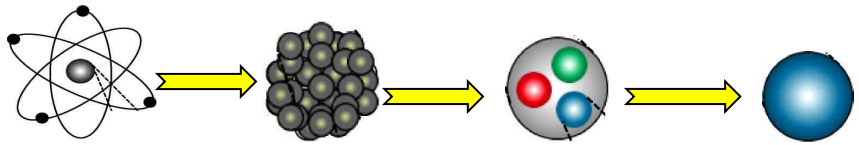
где **eħ/2mc** − магнетон.

магнитный момент

протона $\mu_p = 2.8\mu_я$,

нейтрона $\mu_n = -1.9\mu_я$.

Спин и Магнитный момент ядра



Атом (10^{-8} см) **Ядро ($\approx 10^{-12}$ см)** **Нуклон ($\approx 10^{-13}$ см)** **Кварк ($<10^{-17}$ см)**

Электромагнитное **Ядерное** ⇐ **Сильное** **Слабое**

Частицы, принимающие участие в сильных взаимодействиях, называются **адронами** (hadrons). Все адроны делятся на два класса: **барионы** (qqq, s~ $\hbar$ /2) и **мезоны** (q,$\bar{q}$ s~ $\hbar$).

Спины и приближенные значения магнитных моментов для некоторых ядер

Ядро	Спин в ħ	μ в μ_B	Ядро	Спин в ħ	μ в μ_B
n	½	-1,91	$_4Be^9$	3/2	-1,2
p	½	+2,79	$_6C^{12}$	0	0
$_1H^2$	1	0,86	$_6C^{13}$	½	+0,7
$_1H^3$	½	+3	$_7N^{14}$	1	+0,4
$_2He^3$	½	-2,1	$_7N^{15}$	½	-0,28
$_2He^4$	0	0	$_8O^{16}$	0	0
$_3Li^6$	1	+0,8	$_{49}In^{115}$	9/2	+5,5
$_3Li^7$	3/2	+3,2	$_{83}Bi^{209}$	9/2	+4

***Спин и Магнитный момент ядра** – Нейтроны и протоны в ядре располагаются таким образом, что их спины и магнитные моменты взаимно компенсируются (в четно-четных ядрах наблюдается полая компенсация).*

Магнитный момент – Векторная величина, характеризующая вещество как источник магнитного поля.

Магнитный момент создают замкнутые электрические токи и упорядоченно ориентированные магнитные моменты частиц (например, у электронов в атомах) и спиновые, связанные со спином частицы. Магнитный момент тела определяется векторной суммой частиц, из которых тело состоит.

Максимальный спин ядра не превышает нескольких единиц, т.е. он гораздо меньше A/2, чему он должен был бы равняться, если бы спины всех нуклонов складывались. Также обстоит дело и с магнитными моментами. При вычислении спина и магнитного момента ядра надо учитывать не только спины и магнитные моменты нуклонов, но и дополнительные механические и магнитные моменты, обусловленные их орбитальным движением в ядре.

Зарядовая независимость ядерных сил. Изоспин

Нуклон-нуклонное рассеяние показало, что если вычесть влияние сил электромагнитной природы, то взаимодействие в парах нейтрон-нейтрон, протон-протон и нейтрон-протон в одинаковых квантовых состояниях неразличимо, т.е. собственно ядерное (сильное) взаимодействие не зависит от типа нуклона. Это свойство ядерных сил формулируют как их зарядовую независимость.

Этой симметрии соответствует новая приближенно сохраняющаяся физическая величина или квантовое число – изобарический (изотопический) спин, для которого используется сокращение ***изоспин***.

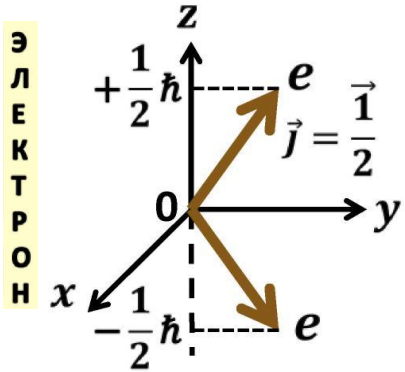
История появления нового квантового числа восходит к 1932 г., когда Гейзенберг стал рассматривать нейтрон и протон как два состояния одной частицы, названной нуклоном. По его идее очень небольшое (≈ 0,1%) различие в массах нейтрона и протона имеет электромагнитную природу. Если «выключить» электромагнитные силы, то массы нейтрона и протона должны совпасть.

Нейтрон и протон можно рассматривать как два зарядовых состояния нуклона

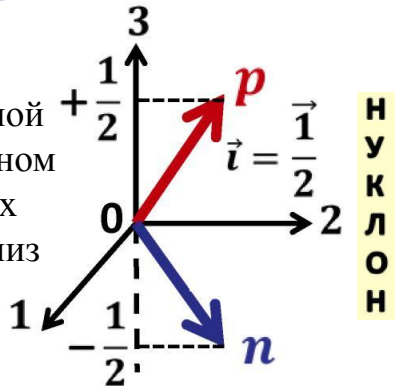
Аналогия спин – изоспин

Два состояния частицы с обычным спином 1/2, различающиеся проекцией на ось z (+1/2 или -1/2), рассматривают не как две разные частицы, а как два состояния одной частицы.

Аналогично ***протон*** и ***нейтрон*** можно считать не двумя разными частицами, а двумя зарядовыми состояниями одной частицы – нуклона [с изоспином 1/2, направленным либо вверх вдоль оси 3 (протон), либо вниз (нейтрон)].



Реальное пространство



Зарядовое пространство

Зарядовая независимость ядерных сил. Изоспин

Зарядовая независимость ядерных сил. Изоспин

Изомультиплеты

Всем элементарным частицам, участвующим в сильных взаимодействиях (кваркам и адронам), можно приписать определённый изоспин *i*.

Все эти частицы можно разбить на группы (так называемые *изомультиплеты*), состоящие из частиц с одним и тем же *i*, но разными проекциями изоспина i_3.

Частицы, образующие изомультиплет, ведут себя одинаково с точки зрения сильного взаимодействия и имеют приблизительно одинаковые массы (небольшие различия в массах имеют электромагнитную природу). ***Все члены изомультиплета соответствуют как бы одной частице, различным образом ориентированной в зарядовом (изоспиновом) пространстве.***

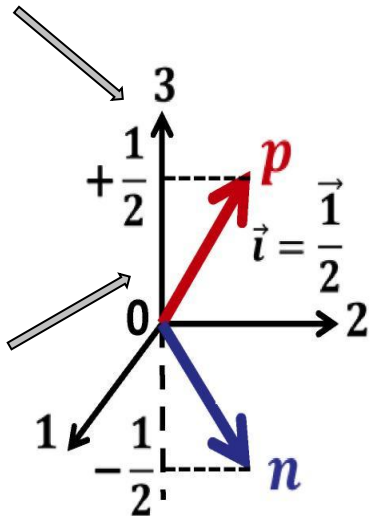
Если известны все члены изомультиплета, то легко найти изоспин мультиплета из соотношения $2i + 1 = n$, где n - число частиц в изомультиплете (равное числу проекций изоспинового вектора на ось 3).

Изодуплет нуклонов

Тип Нуклона	Спин-чётность j^P	Масса, mc^2, МэВ	Заряд, e	Изоспин i	Проекция изоспина i_3
ПРОТОН	$1/2^+$	938,27	+1	1/2	+1/2
НЕЙТРОН	$1/2^+$	939,57	0	1/2	–1/2

Изотриплет пионов

Тип пиона	Спин-чётность j^P	Масса, mc^2, МэВ	Заряд, e	Изоспин i	Проекция изоспина i_3
π^+	0^-	140	+1	1	+1
π^0	0^-	135	0	1	0
π^-	0^-	140	–1	1	–1



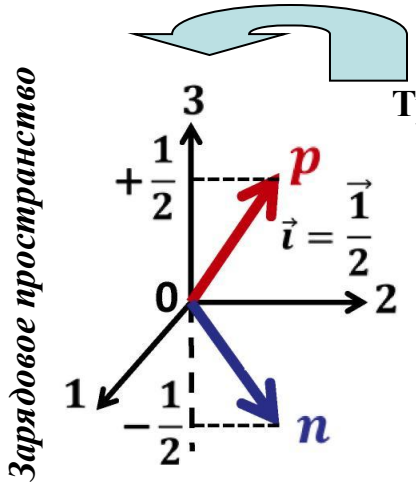
Зарядовое пространство

Зарядовая независимость ядерных сил. Изоспин

Понятие изомультиплета относится и к атомным ядрам

Зарядовая независимость ядерных сил. Изоспин

Изоспин атомного ядра $A = Z + N$

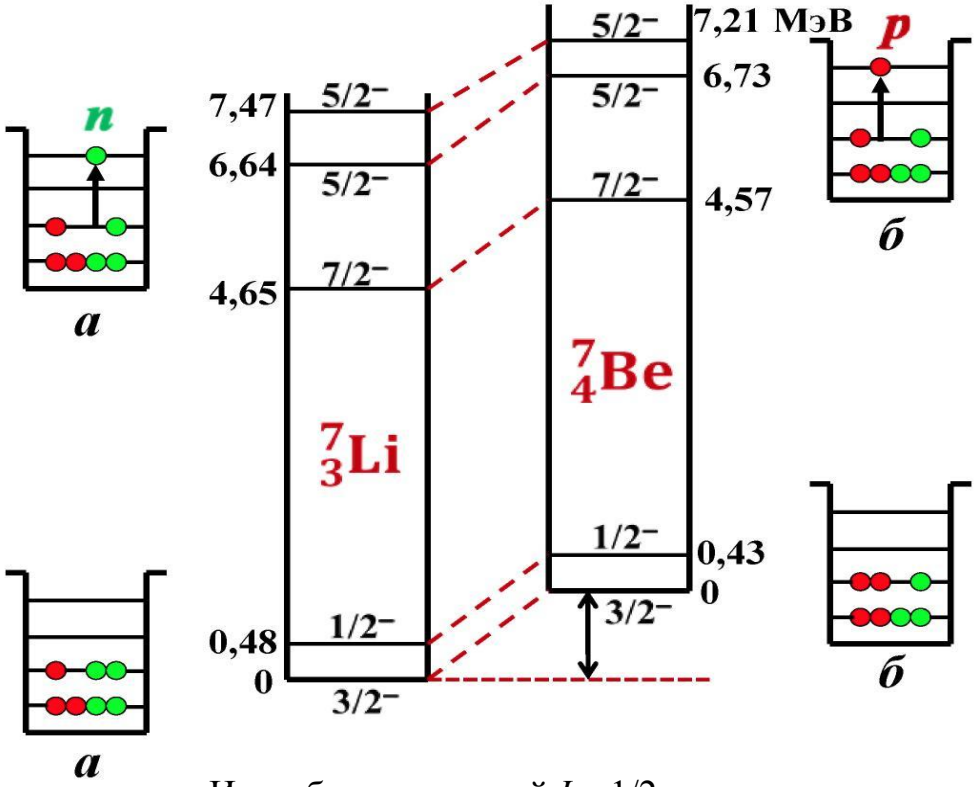


Третья проекция изоспина ядра: $I_3 = Z(+\frac{1}{2}) + N(-\frac{1}{2}) = \frac{Z-N}{2}$

Диапазон изоспинов ядерных уровней: $\left|\frac{Z-N}{2}\right| \le I \le \frac{A}{2}$

Ядерный изомультиплет

формируют уровни ядер с одинаковым числом нуклонов A, т.е. изомультиплет ядерных уровней относится к системам нуклонов, состоящих из разного числа протонов Z и нейтронов N (объединённых лишь условием Z + N = A) и, следовательно, в ядерный изомультиплет входят уровни разных ядер.



Изодублеты уровней $I = 1/2$ ядер

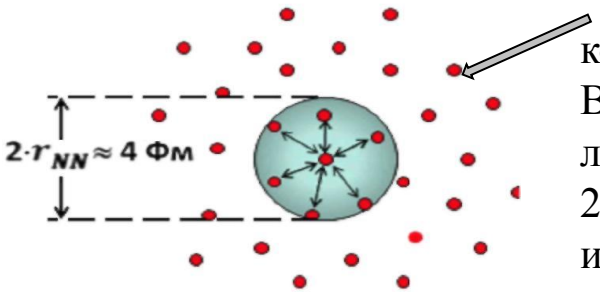
Атомное ядро

$R_я = r_0 A^{1/3}$

$r_0 = 1{,}2 \div 1{,}3$ **Фм**

Некоторые свойства ядерного взаимодействия:

1. Обменный характер (притяжение при r>0,3 Фм и отталкивание на меньших расстояниях)
2. Короткодействие (~1 Фм)
3. Большая величина (интенсивность)
4. **Насыщение**
5. **Зарядовая независимость**



Насыщение Природа насыщения ядерных сил в их короткодействии. Радиус действия ядерных сил $r_{яд}$ ~1÷2 Фм. В системе многих нуклонов каждый нуклон взаимодействует лишь с теми, которые удалены от него не дальше чем на $r_{NN} \approx$ 2Фм и полная энергия W такого взаимодействия фиксирована и равна числу нуклонов n внутри сферы радиуса $r_{яд}$, умноженному на энергию ξ отдельного двухнуклонного взаимодействия: $E = n \cdot \xi$. Полная энергия системы A связанных нуклонов, т.е. её энергия связи $W = A \cdot n \cdot \xi/2 \sim A$.

Если бы нуклон в ядре одинаково взаимодействовал со всеми другими, то при наличии двухтельных сил энергия связи ядра была бы пропорциональна A^2, а не A. Действительно, в этом случае энергия связи была бы пропорциональна числу двухнуклонных связей, т.е. числу сочетаний из A по 2, которое, как известно, равно $A(A - 1)/2 \sim A^2$ (при $A >> 1$).

Фундаментальные взаимодействия:

Сильное **1**

Электромагнитное $\sim 10^{-2}$

Слабое $\sim 10^{-15}$

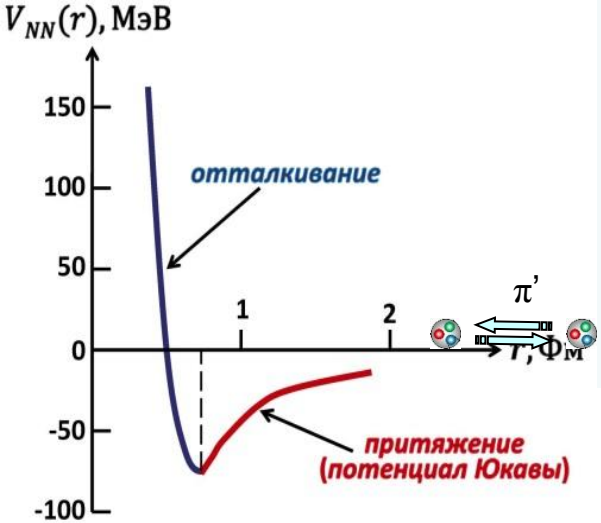
Гравитационное $\sim 10^{-38}$

В настоящее время все взаимодействия элементарных частиц представляются как своеобразная «игра в мячики»: перебросом глюонами осуществляется связь между кварками, обмен фотонами происходит в актах взаимодействия электрически заряженных частиц, массивные промежуточные бозоны ответственны за медленные распады частиц и за чрезвычайно слабое взаимодействие всех типов нейтрино с веществом.

Механизм ядерного взаимодействия на расстояниях > 0,3 Фм заключается в обмене *виртуальным* π-мезоном между нуклонами.

Свойства ядерных сил:

1. Обменный характер
2. Короткодействие (~1 Фм)
3. Большая величина (интенсивность)
4. **Насыщение**
5. **Зарядовая независимость**



Ядра Атомные ядра представляют собой квантовые системы протонов и нейтронов (нуклонов), связанных между собой ядерным взаимодействием.

Свойства атомных ядер определяются совместным действием сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий.

Ядро, как квантовая система, может находиться в различных дискретных ***возбужденных*** состояниях.

В основном состоянии ядра могут быть *стабильными* (устойчивыми) и *нестабильными.*

Квантовые характеристики:

спин и изоспин частиц и ядер, магнитный и квадрупольный моменты.

Дефект массы: ***Массы ядер всегда несколько меньше суммы масс свободных нуклонов, составляющих ядро. Это релятивистский эффект, определяющий энергию связи ядра.***

В отличие от массы электрические заряды ядер строго равны сумме зарядов, входящих в ядро протонов.

Известны ядра с зарядом от 1е до 118 е и с числом нуклонов от 1 до примерно 270.

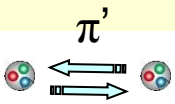
Особенно устойчивыми ядрами, т. е. обладающими наибольшей энергией связи, являются ядра с числами протонов или нейтронов 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, получившими название магических.

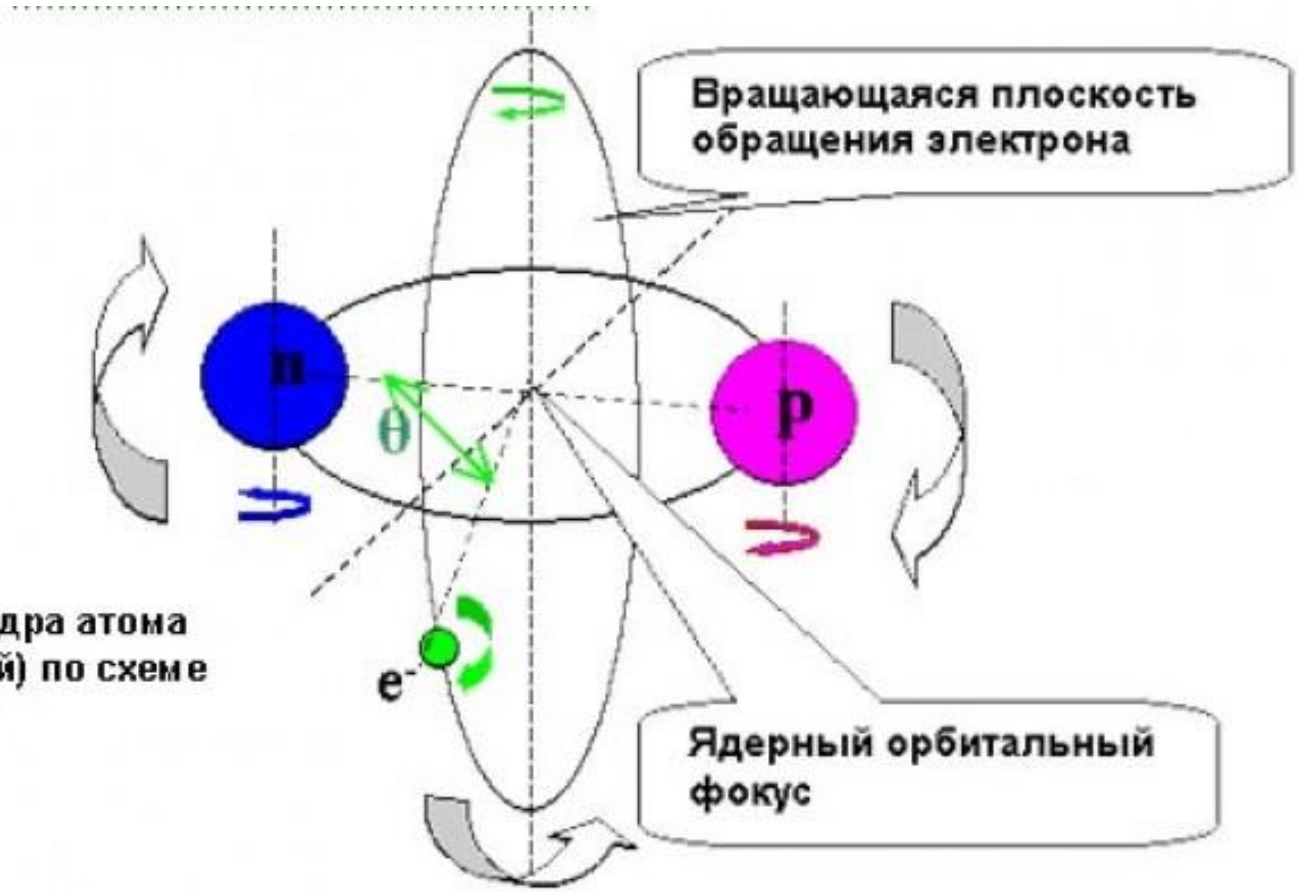
Плотность числа частиц в многонуклонных ядрах порядка 10^{44} нуклонов/м^3, а плотность массы 10^{17} кг/м^3.

«***Радиусы ядер***» *изменяются от* $2\cdot10^{-15}$ *м (ядро гелия) до* $7\cdot10^{-15}$ *м (ядро урана).* **($R=r_0A^{1/3}$)**

Ядра имеют «форму» вытянутого или сплюснутого эллипсоида (или еще более сложную).

Нуклид *– это ядро с определенным числом протонов (Z) и нейтронов (N)*





Модель строения ядра атома водорода (дейтерий) по схеме «двойной звезды»

Рис. 4