

Нуклон - нуклонное взаимодействие и свойства ядерных сил.

Открытие атомного ядра

- **1887 г.**, Д. Томсон, изучая характеристики газового разряда, открыл **электрон**.
- **1904 г.**, Д. Томсон, атом - нейтральная система - из заряженного шара с зарядом $+Ze$, внутри Z отрицательно заряженных электронов. Размер атома $\sim 10^{-8}$ см.
- **1911 г.**, Э. Резерфорд: положительно заряженное атомное ядро с радиусом $< 10^{-12}$ см и электронная оболочка с радиусом $\sim 10^{-8}$ см. 99.98% массы в ядре.
- **1919 г.**, Э. Резерфорд, первая ядерная реакция, открытие протона.
- **1932 г.**, Д. Чедвик, открытие нейтрона.
- **1932 г.**, Д. Иваненко и В. Гейзенберг: протон-нейтронная модель ядра.

Что уже понятно?

- Атомы состоят из ядер и электронных оболочек.
- Атомное ядро – связанная система протонов и нейтронов.
- A – массовое число – суммарное число протонов и нейтронов в ядре,
- Z – заряд ядра – число протонов в ядре,
- число электронов = Z (положение в таблице Д.И. Менделеева),
- обозначения: ^{48}Ca , ^{257}Fm , ^{272}Rg , ^{277}Cn ; $^{294}118$.

Характеристики протона, нейтрона и электрона

Характеристика	Протон	Нейтрон	Электрон
Масса mc^2 , МэВ	938.272	939.565	0.511
Электрический заряд (в единицах элементарного заряда)	+1	0	-1
Спин (в единицах \hbar)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Чётность	+1	+1	
Статистика	Ферми-Дирака		
Магнитный момент (для нуклонов - в ядерных магнетонах, для электрона - в магнетонах Бора)	+2.79	-1.91	+1.001
Время жизни	$> 10^{32}$ лет	885.7 ± 0.8 с	$> 4.6 \cdot 10^{26}$ лет
Тип распада		$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	

- **Нейтрон нестабилен!**
- **Атомные ядра существуют!**

Периодическая таблица элементов

Д.И. Менделеева (2012)

1																		18											
IA																		VIIIA											
Водород 1 H 1,00794 Hydrogen																		Гелий 2 He 4,0026 Helium											
Литий 3 Li 6,941 Lithium			Бериллий 4 Be 9,01218 Beryllium																Неон 10 Ne 20,1797 Neon										
Натрий 11 Na 22,989768 Sodium		Магний 12 Mg 24,3050 Magnesium																Аргон 18 Ar 39,948 Argon											
IIA																		VIIIA											
IIIB																		VIIIA											
Калий 19 K 39,0983 Potassium		Кальций 20 Ca 40,078 Calcium		Scandium 21 Sc 44,95591 Scandium		Титан 22 Ti 47,88 Titanium		Ванадий 23 V 50,9415 Vanadium		Хром 24 Cr 51,9961 Chromium		Марганец 25 Mn 54,93805 Manganese		Железо 26 Fe 55,847 Iron		Кобальт 27 Co 58,93320 Cobalt		Никель 28 Ni 58,6934 Nickel		Медь 29 Cu 63,546 Copper		Цинк 30 Zn 65,39 Zinc							
IIIB																		VIIIA											
Рубидий 37 Rb 85,4678 Rubidium		Стронций 38 Sr 87,62 Strontium		Иттрий 39 Y 88,90585 Yttrium		Цирконий 40 Zr 91,224 Zirconium		Нобелий 41 Nb 92,90638 Niobium		Молибден 42 Mo 95,94 Molybdenum		Технеций 43 Tc [98] Technetium		Рутений 44 Ru 101,07 Ruthenium		Родий 45 Rh 102,90550 Rhodium		Палладий 46 Pd 106,42 Palladium		Серебро 47 Ag 107,8682 Silver		Кадмий 48 Cd 112,411 Cadmium							
IIIB																		VIIIA											
Цезий 55 Cs 132,90543 Cesium		Барий 56 Ba 137,327 Barium		Лантан 57 La 138,9055 Lanthanum		Гафний 72 Hf 178,49 Hafnium		Тантал 73 Ta 180,9479 Tantalum		Вольфрам 74 W 183,84 Tungsten		Рений 75 Re 186,207 Rhenium		Осмий 76 Os 190,23 Osmium		Иридий 77 Ir 192,22 Iridium		Платина 78 Pt 195,08 Platinum		Золото 79 Au 196,96654 Gold		Ртуть 80 Hg 200,59 Mercury							
IIIB																		VIIIA											
Франций 87 Fr [223] Francium		Радий 88 Ra [226,025] Radium		Актиний 89 Ac [227] Actinium		Резерфордий 104 Rf [261] Rutherfordium		Дубний 105 Db [261] Dubnium		Сиборгий 106 Sg [266] Seaborgium		Борий 107 Bh [264] Bohrium		Хассий 108 Hs [265] Hassium		Мейтнерий 109 Mt [268] Meitnerium		Дармштадтий 110 Ds [289] Darmstadtium		Рентгений 111 Rg [289] Roentgenium		Коперниций 112 Cn [284] Copernicium							
IIIB																		VIIIA											
																		113		114 Fl [284] Flerovium		115		116 Lv [293] Livermorium		117		118	

Лантаноиды Lanthanides

Церий 58 Ce 140,115 Cerium	Прометий 59 Pr 140,90765 Promethium	Неодим 60 Nd 144,24 Neodymium	Прометий 61 Pm [145] Promethium	Самарий 62 Sm 150,36 Samarium	Европий 63 Eu 151,965 Europium	Гадолиний 64 Gd 157,25 Gadolinium	Тербий 65 Tb 158,92534 Terbium	Диспрозий 66 Dy 162,50 Dysprosium	Гольмий 67 Ho 164,93032 Holmium	Эрбий 68 Er 167,26 Erbium	Тулий 69 Tm 168,93421 Thulium	Иттербий 70 Yb 173,04 Ytterbium	Лютеций 71 Lu 174,967 Lutetium
-------------------------------------	--	--	--	--	---	--	---	--	--	------------------------------------	--	--	---

Актиноиды Actinides

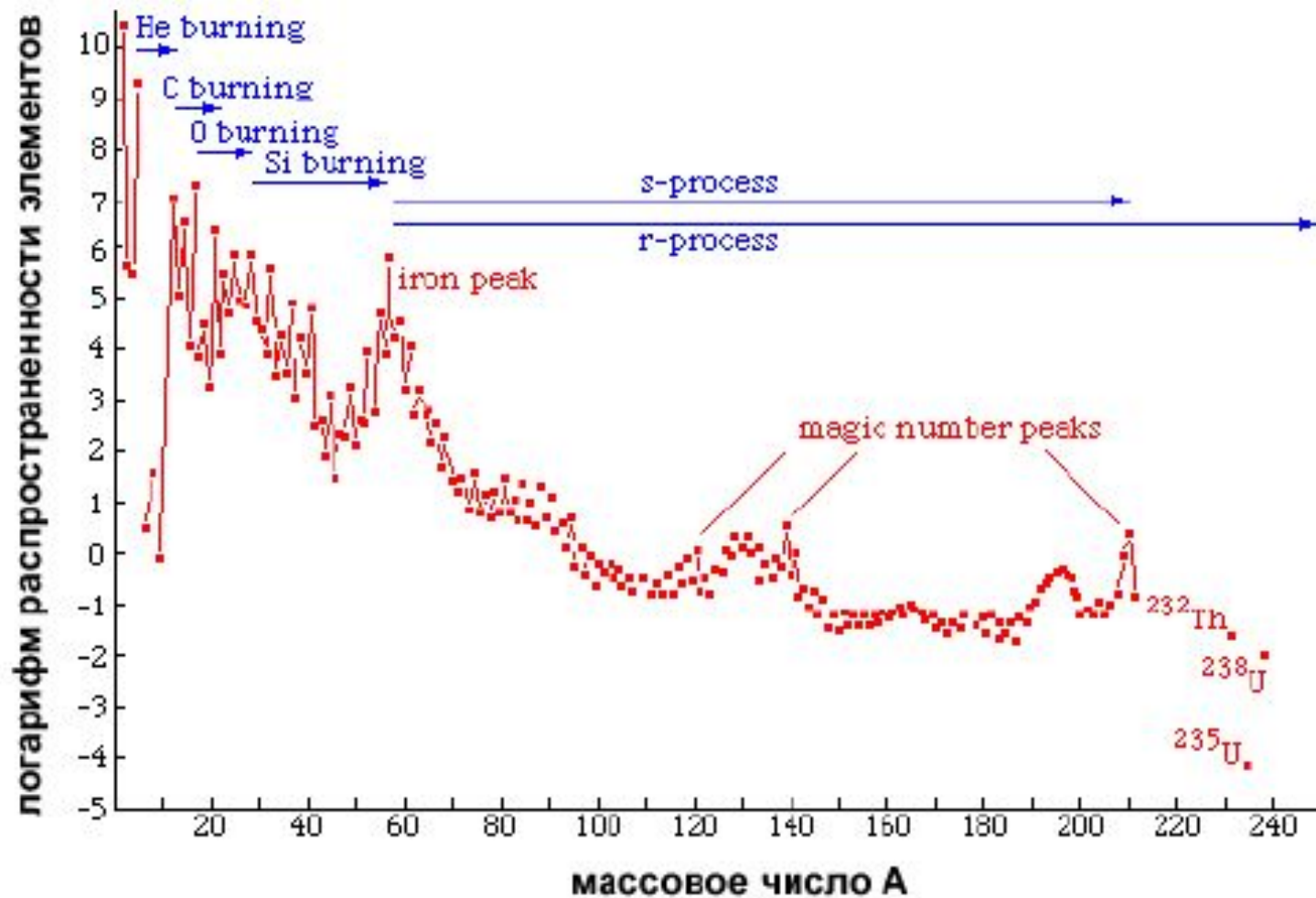
Торий 90 Th 232,0381 Thorium	Протактиний 91 Pa [231,03688] Protactinium	Уран 92 U 238,0289 Uranium	Нептуний 93 Np [237] Neptunium	Плутоний 94 Pu [244] Plutonium	Америций 95 Am [243] Americium	Кюрий 96 Cm [247] Curium	Берклий 97 Bk [247] Berkelium	Калифорний 98 Cf [251] Californium	Эйнштейний 99 Es [252] Einsteinium	Фермий 100 Fm [257] Fermium	Менделевий 101 Md [258] Mendelevium	Нобелий 102 No [259] Nobelium	Лоуренсий 103 Lr [262] Lawrencium
---------------------------------------	---	-------------------------------------	---	---	---	-----------------------------------	--	---	---	--------------------------------------	--	--	--

Водород 1 H 1,00794 Hydrogen

H - символ
1,00794 - атомный номер
1s² - электронная конфигурация
13,59844 - 1-й потенциал ионизации, эВ
0,0899 - плотность, г/см³
-259,34 - температура плавления, °C
-252,87 - температура кипения, °C

s-элементы
p-элементы
d-элементы
f-элементы

Распространенность нуклидов во Вселенной



- Распространенность Si принята равной 10^6 .

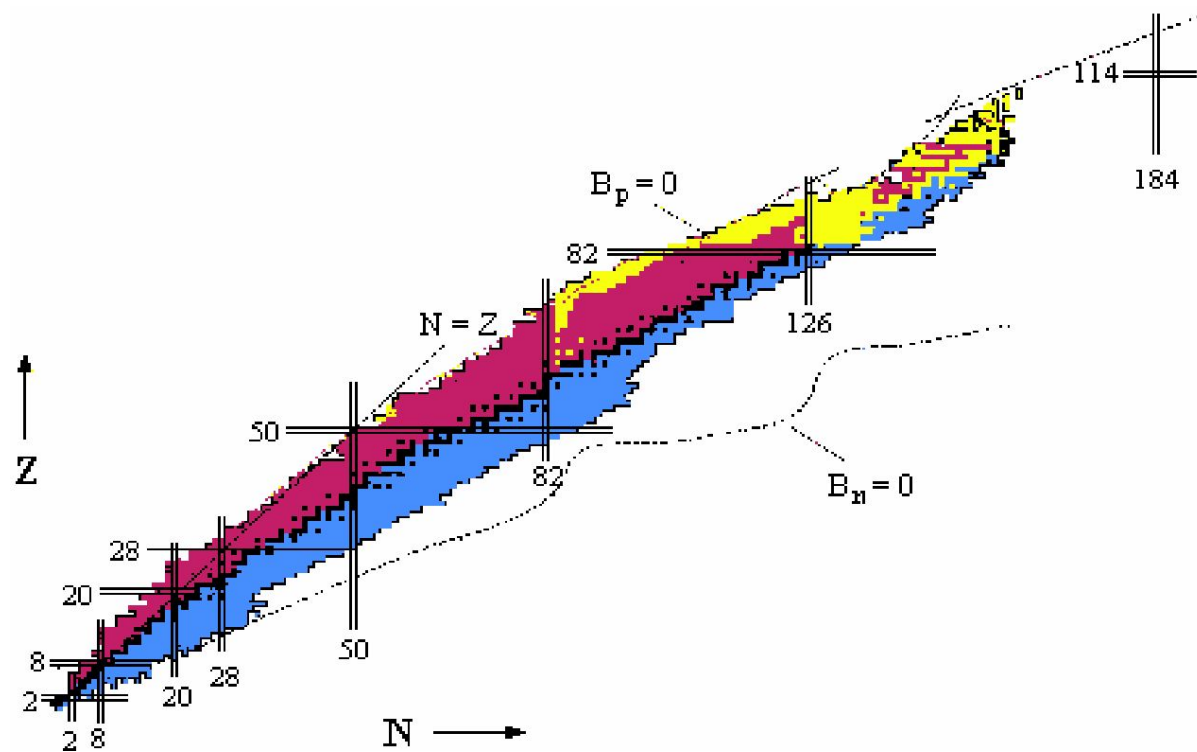
Распространенность элементов

- Элементное вещество Вселенной в основном состоит из водорода – 91% всех атомов.
- Гелий составляет $\approx 9\%$ всех атомов.
- Существует глубокий минимум, соответствующий литию, бериллию и бору.
- Сразу за этим минимумом следует резкий подъём повышенной распространённости углерода и кислорода.
- За кислородным максимумом идёт скачкообразное падение вплоть до скандия ($Z=21$, $A=40$).
- Наблюдается повышенная распространённость элементов в районе железа («железный пик»).
- После $A \approx 60$ уменьшение распространённости происходит более плавно, причём наблюдаются локальные максимумы в районе чисел протонов или нейтронов 50, 82, 126 (магические числа).
- Как правило, распространённость чётно-чётных нуклидов (чётные Z и N) выше, чем соседних нуклидов с нечётным числом нуклонов.

Атомные ядра

- Существуют ли ограничения на массу атомов (A) ?
- Стабильные ядра - известно около 300;
- Что такое стабильные ядра?
- Радиоактивные ядра - известно около 3500;
- Изотопы – ядра с одинаковым Z;
- Изотоны – ядра с одинаковым N;
- Изобары – ядра с одинаковым A;
- Стабильные и долгоживущие ядра образуют узкую полосу, называемую линией или долиной стабильности;
- Где границы $B_n=0$, $B_p=0$?

N-Z диаграмма атомных ядер

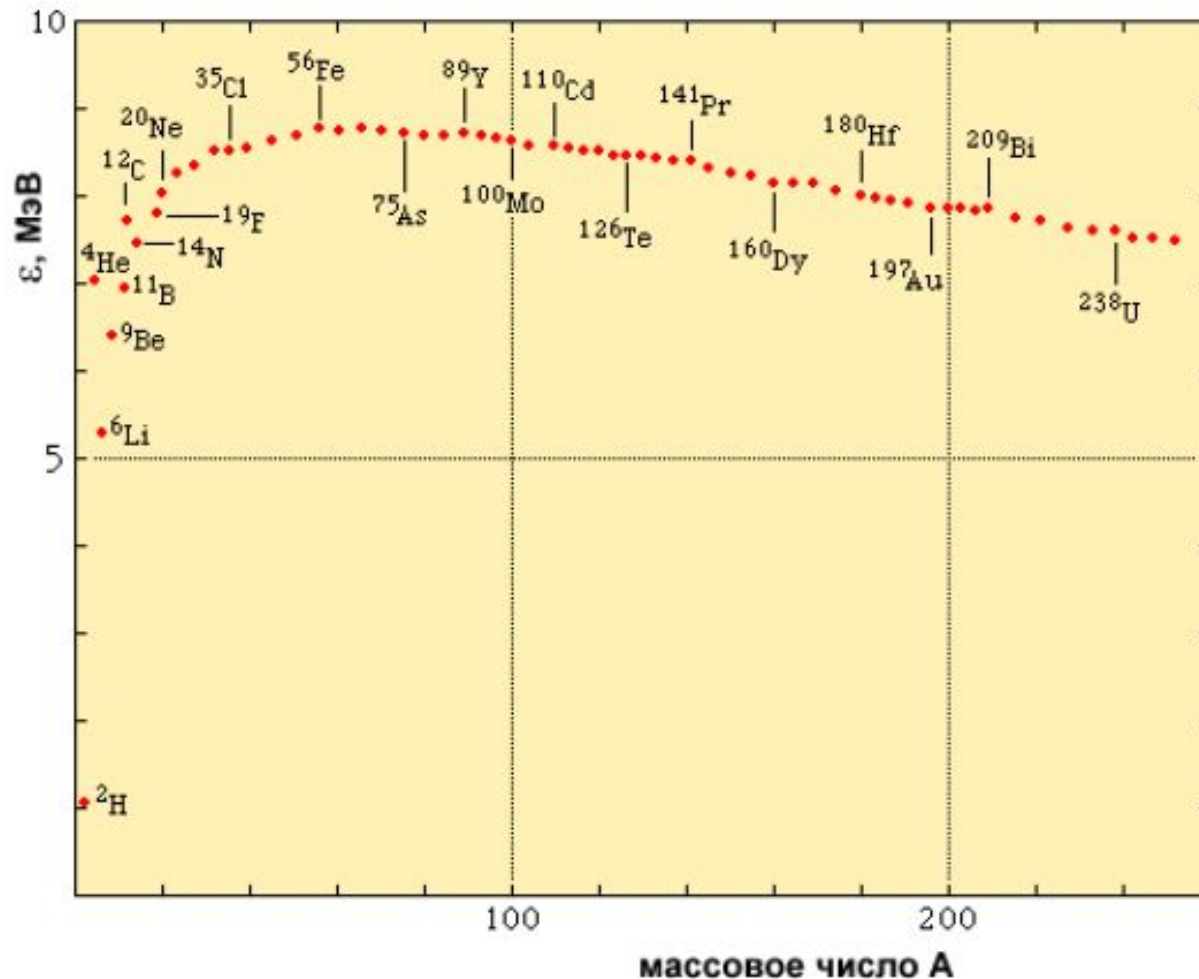


Каждое атомное ядро, имеющее Z протонов и N нейтронов, занимает определенное положение на N-Z диаграмме атомных ядер. Стабильные ядра, образующие узкую полосу, показаны тёмным цветом. Известно порядка 300 стабильных ядер. Красным цветом показаны β^+ -радиоактивные ядра, синим — β^- -радиоактивные ядра, желтым — α -радиоактивные ядра. Известно около 3500 радиоактивных ядер. Это только часть радиоактивных ядер. Всего их может быть порядка 7000.

Что уже понятно?

- Ядра существуют → существуют ядерные силы;
- Ядерные силы – силы притяжения и отталкивания.
- Ядра очень маленькие → ядерные силы имеют маленький радиус действия $<10^{-12}$ см.
- Электроны не падают в ядро → ядерные силы не действуют на электроны.

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



- $\varepsilon = \Delta W/A \approx 8 \text{ МэВ} \rightarrow$ большая интенсивность в $> 10^2$ больше, чем кулоновское взаимодействие.
- $\Delta W \sim A \rightarrow$ насыщение ядерных сил.

Атомная единица массы

- Атомная единица массы (а.е.м.) равна $1/12$ массы атома углерода ^{12}C .
- $1 \text{ а.е.м.} = 1,658210 \text{ г} = 931,44 \text{ МэВ}$.

Дефект массы

- Разность Δ между массой ядра в атомных единицах массы и его массовым числом называется дефектом массы:

$$\Delta = \frac{M}{\frac{1}{12}M(^{12}\text{C})} - A$$

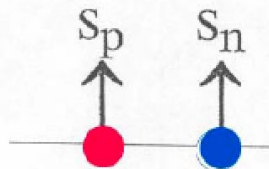
Простейшее ядро - дейтрон $D \equiv {}^2_1\text{H}$

- Дейтрон — связанная система, состоящая из одного протона и одного нейтрона.
- Энергия связи дейтрона $W = \varepsilon_p = \varepsilon_n = 2,2 \text{ МэВ}$
- Спин J , чётность P дейтрона $J^P = 1^+$
- Магнитный момент дейтрона $\mu = 0,86 \mu_{\text{яд}}$
- Квадрупольный момент дейтрона $Q_0 = +0,28 \text{ Фм}^2$

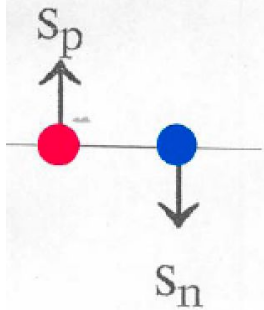
Спиновая зависимость

У дейтрона:

$$\vec{J} = \vec{L}_p + \vec{L}_n + \vec{S}_p + \vec{S}_n$$

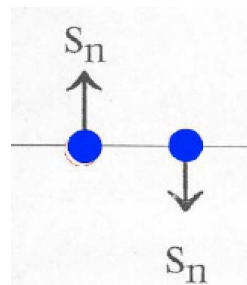


$$L = 0, \quad I = 1$$



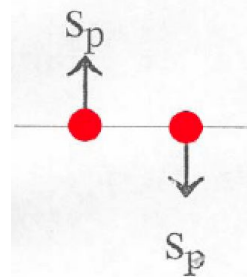
$$L = 0, \quad I = 0$$

Состояние отсутствует



$$L = 0, \quad J = 0$$

Динейтрон не существует

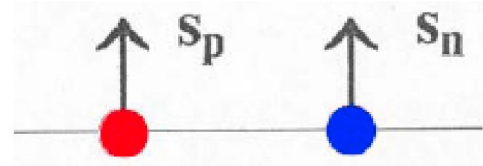


$$L = 0, \quad J = 0$$

Дипротон не существует

Магнитный момент дейтрона

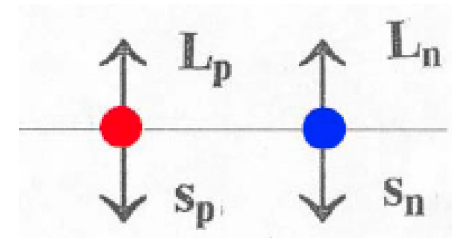
$$L = 0$$



$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \left(g_L(p)\bar{L}_p + g_L(n)\bar{L}_n + g_s(p)\bar{s}_p + g_s(n)\bar{s}_n \right) = \\ &= \mu_0 \left[0 + 0 + 2 \cdot 2,79 \cdot 1/2 + 2 \cdot (-1,91) \cdot 1/2 \right] = 0,88\mu_0 \end{aligned}$$

$$\mu_{\text{теор}} = 0,88\mu_0 \neq \mu_{\text{эксп}} = 0,86\mu_0$$

Есть примесь $L=1$

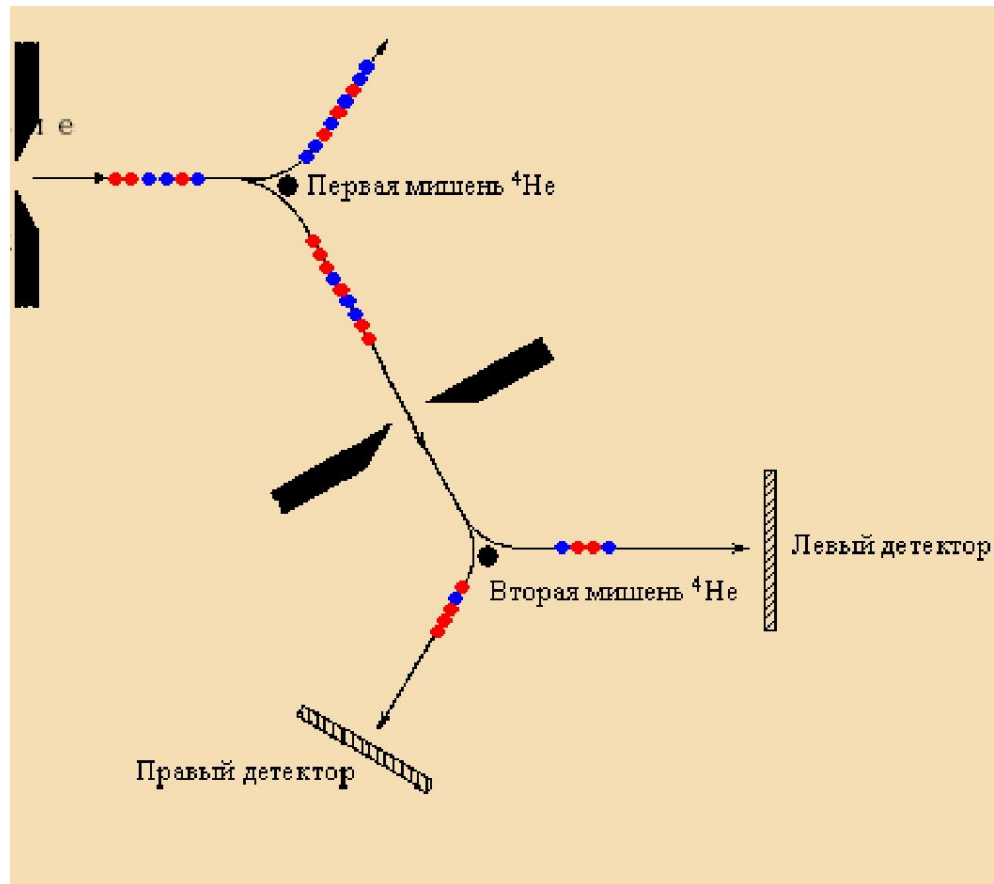


$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \left(g_L(p)\bar{L}_p + g_L(n)\bar{L}_n + g_s(p)\bar{s}_p + g_s(n)\bar{s}_n \right) = \\ &= \mu_0 \left[1 + 0 - 2 \cdot 2,79 \cdot 1/2 - 2 \cdot (-1,91) \cdot 1/2 \right] = 0,12\mu_0 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \alpha_1^2 \cdot 0,88 + \alpha_2^2 \cdot 0,12 = 0,86 \\ \alpha_1^2 + \alpha_2^2 = 1 \end{cases} \quad \alpha_1^2 = 0,96$$

Нецентральность (тензорный) характер ядерных сил

- Квадрупольный момент дейтрона: $Q_0 = +0,28 \text{ Фм}^2$
- Примесь компоненты $L=1$ в основное состояние дейтрона и положительная величина квадрупольного момента означает, что дейтрон имеет форму отличную от сферически симметричной, и что ядерные силы между нуклонами зависят от того, как направлены спины нуклонов \vec{s}_1, \vec{s}_2 относительно вектора \vec{n} , направленного от одного нуклона к другому, т.е. ядерные силы – нецентральные (тензорные).
- Спин-орбитальное взаимодействие проявляется в особенностях рассеяния частиц с ненулевым спином на неполяризованных и поляризованных мишенях и в рассеянии поляризованных частиц.



$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

Эффект симметрии

- Для лёгких ядер $Z \approx N \approx A/2$.
- Для тяжёлых ядер $N \approx 1.5 \cdot Z$.

Парные взаимодействия

- Удельная энергия связи ε особенно велика у чётно – чётных ядер (Z – чётное, N – чётное). У ч-ч ядер больше всего изотопов, они более распространены во Вселенной.
- «Магические» ядра.
- Известно только 4 нечётно-нечетных β -стабильных изотопа: ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$.

Зарядовая симметрия

Энергии связи зеркальных ядер

$$\Delta W(^3\text{H}(1p2n)) - \Delta W(^3\text{He}(2p1n)) = e^2/\delta = 0.75 \text{ МэВ.}$$

Так же для

$$^7\text{Li}(3p4n) - ^7\text{Be}(4p3n);$$

$$^{13}\text{C}(6p7n) - ^{13}\text{N}(7p6n);$$

$$(p - p)_{\text{яд}} = (n - n)$$

Изоспиновая инвариантность

- $^{10}\text{Be}(4p+4n)+(n-n);$
- $^{10}\text{B}(4p+4n)+(n-p);$
- $^{10}\text{C}(4p+4n)+(p-p);$

$$(p - p)_{\text{яд}} = (n - n) = (n - p)$$

Обменный характер нуклон-нуклонного взаимодействия

проявляется при рассеянии нейтронов высоких энергий (несколько сот МэВ) на протонах.

Дифференциальное сечение рассеяния нейтронов имеет максимум при рассеянии назад в с.ц.м., что объясняется обменом заряда между протоном и нейтроном.

Свойства ядерных сил

- Атомное ядро – связанная система протонов и нейтронов.
- Ядерные силы - силы притяжения и отталкивания. Притяжение между нуклонами на больших расстояниях ($r > 1$ Фм) сменяется отталкиванием на малых ($r < 0.5$ Фм);
- имеют малый радиус действия 10^{-12} см;
- большая интенсивность в $> 10^2$ больше, чем кулоновское взаимодействие;
- ядерные силы не действуют на электроны;
- ядерные силы насыщаются;
- отношение протонов и нейтронов в ядре не может быть произвольным;
- проявляются чётно – нечётные эффекты;
- проявляются магические числа;
- зависят от спина нуклонов;
- зависят от спин – орбитального взаимодействия;
- зарядовая независимость;
- изоспиновая независимость;
- имеют нецентральный (тензорный) характер;
- ...

Потенциал нуклон-нуклонного взаимодействия

$$V = V_1(r) + V_2(r)(\vec{s}_1\vec{s}_2) \\ + V_3(r)(\vec{s}_1\vec{n})(\vec{s}_2\vec{n}) \\ + V_4(r)(\vec{L}\vec{S})$$

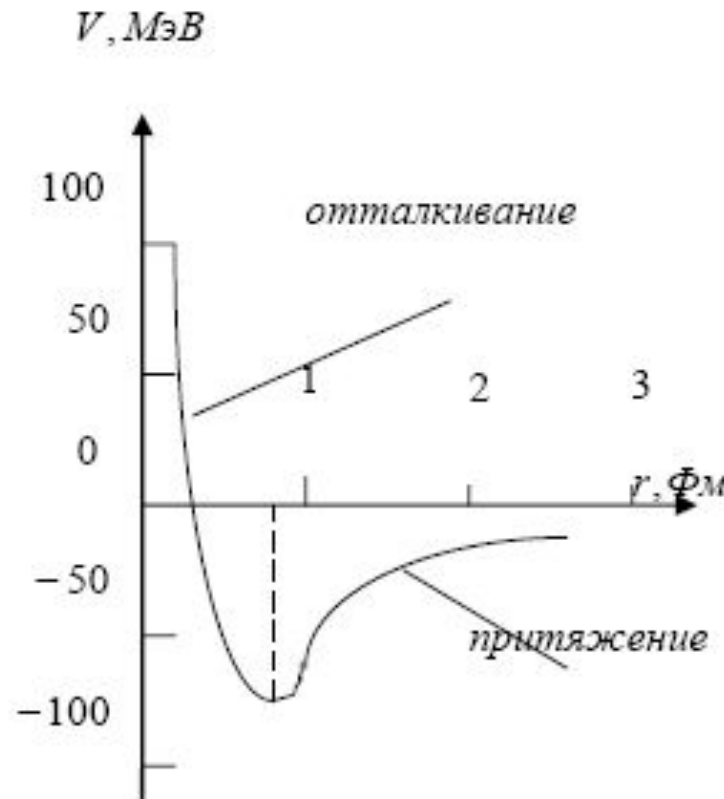
N – N потенциал зависит от:

- расстояния между нуклонами,
- взаимной ориентации спинов нуклонов,
- нецентрального характера ядерных сил,
- величины спин-орбитального взаимодействия.

Мезонная теория ядерных сил (модель Юкавы)

- За время ядерного взаимодействия Δt вблизи нуклона образуется виртуальный мезон с массой m .
- $\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$;
- Масса виртуального мезона: $m = \Delta E / c^2 = \hbar / (\Delta t c^2)$;
- Время ядерного взаимодействия $\Delta t = a/c = 1.5 \cdot 10^{-13} / 3 \cdot 10^{10} = 0.5 \cdot 10^{-23}$ с,
- $mc^2 = \hbar / \Delta t = 6.6 \cdot 10^{-22} / 0.5 \cdot 10^{-23} \simeq 130$ МэВ

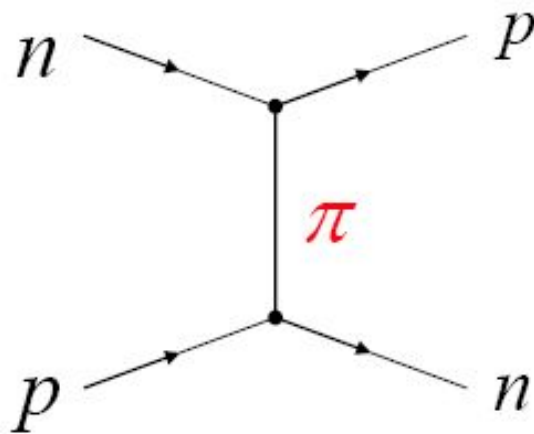
Потенциал Юкавы: $V(r) = g_N \frac{e^{-\frac{r}{a}}}{r}$



где $a = \hbar/mc$, а g_N – ядерный заряд нуклона (аналог элементарного заряда e в электромагнитном взаимодействии).

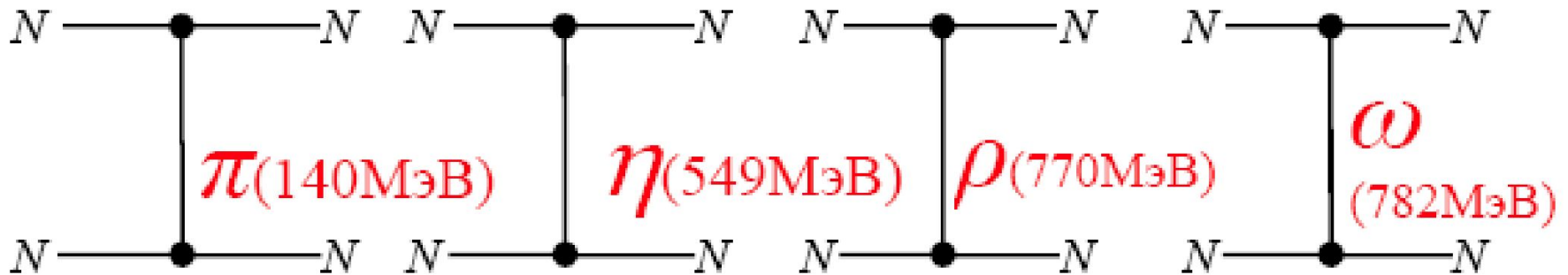
Нуклон-нуклонные взаимодействия можно описать как обмен виртуальными мезонами.

Положительные, отрицательные и нейтральные пионы (π^- , π^+ , π^0) описывают взаимодействие между nn -, pr -, pp -парами на характерных внутриядерных расстояниях 1.5-2.0 Фм.



Однопионное pr -взаимодействие

Диаграммы N-N взаимодействий



Характер взаимодействия зависит от спина частицы, переносящей взаимодействие.

Обмен векторными частицами $J=1$ приводит к отталкиванию между нуклонами.