

Глава 5. Ядерная физика

5.1. Состав и характеристики атомного ядра



$$\vec{M} = I \vec{S}$$

$$\vec{M} = \int \vec{I} d\vec{S}$$

Ядро = протоны + нейтроны

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} m_c = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

протон p $m_p = 1,00759 \text{ а.е.м.}$ $m_p c^2 = 938,28 \text{ МэВ} = 1836 m_e c^2$
 $q_p = +e$; $S = \frac{1}{2}$; $M_p = +2,793 \mu_N$

$$\mu_N = \frac{e \hbar}{2 m_p}$$

Нейтрон n $m_n = 1,00866 \text{ а.е.м.} = 1839 m_e$; $m_n c^2 = 939,55 \text{ МэВ}$

свободно
распадается за 12 мин

$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$

$$m_n \approx m_p + 2,5 m_e$$

$$S = \frac{1}{2}$$

$$M_n = -1,91 \mu_N$$

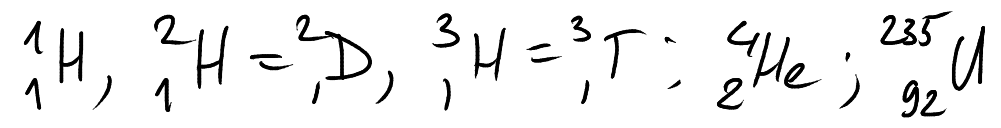
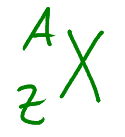
$$\vec{L}_{ns} \updownarrow \vec{M}_{ns}$$

Хар-ки ядра

зарядовое число Z (число p)

массовое число A (число нуклонов $p+n$)

число нейтронов $N = A - Z$

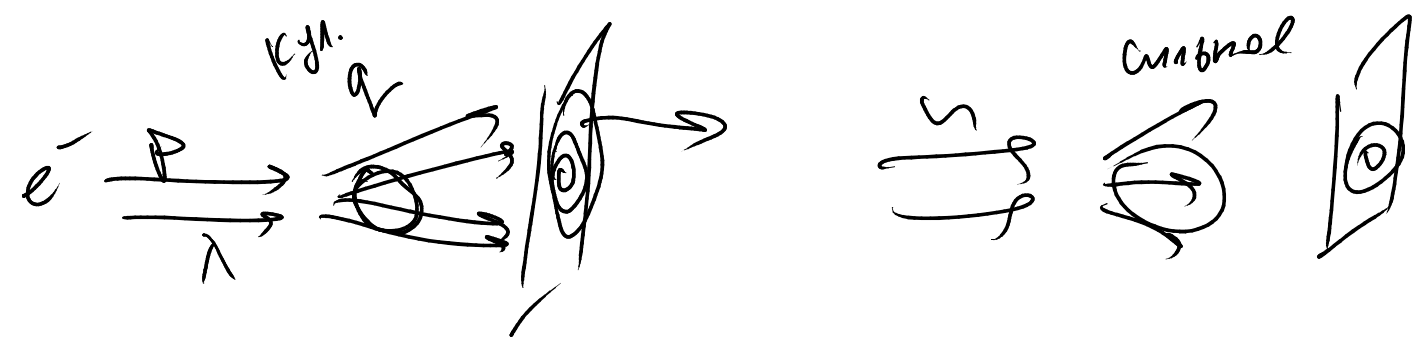


Изотопия Z -одинаковое, A -разное. (${}^1_1\text{H}, {}^2_1\text{D}, {}^3_1\text{T}$) - хим. св-ва совпадают.

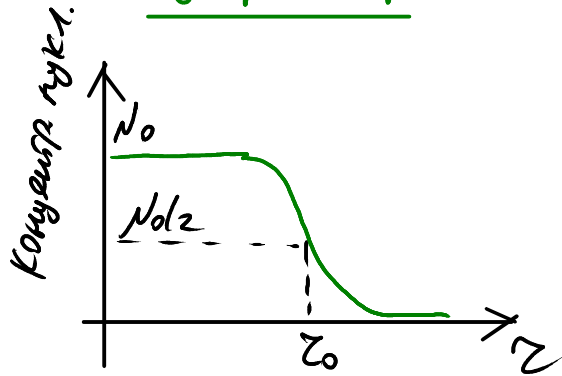
Изотопия N -одинаковое (${}^{13}_6\text{C}, {}^{14}_7\text{N}$)

Изобария A -одинаковое ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ и ${}^{40}_{20}\text{Ca}$

Изотопия все одинаково, разный период полураспада



Размер ядра



Приближенно ядро — сфера радиуса r_0 ,
соотв. концентрации нуклеонов в 2
раза меньше, чем в центре,

$$\begin{aligned} \text{из опыта с } e^-; & \quad r_0 = (1,3 \div 1,4) \cdot A^{1/3} \text{ фм} \\ \text{из опыта с } n; & \quad r_0 = (1,2 \div 1,3) \cdot A^{1/3} \text{ фм} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{из опыта с } e^-; \\ \text{из опыта с } n; \end{aligned}} \right\}$$

примерно;

$$r_0 \approx 1,3 \cdot A^{1/3} \text{ фм}$$

$$1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м} = 1 \text{ Ферми}$$

Спин. $\vec{I} = \sum_i \vec{S}_i$; $S_i = \frac{1}{2}$

I — полуцелый. $I \leq 9/2$

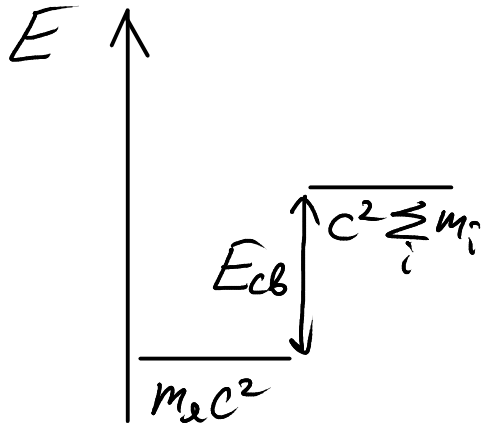
$$\begin{aligned} A &\sim r_0^3; \quad A = \left(\frac{r_0}{1,3}\right)^3 \\ \rho &= \frac{A}{\frac{4}{3}\pi r_0^3} = \frac{3 \cancel{r_0^3}}{4\pi (1,3)^3 \cancel{r_0^3}} = \text{const} \end{aligned}$$

5.2. Масса и энергия связи ядра

$$m_a \neq \sum_i m_i; \quad m_i - \text{масса нуклона}$$

$$E = mc^2$$

Т.с. 3 Энергия связи $E_{св}$ — минимальная энергия (работа), которую надо затратить, чтобы разделить ядро



$$\begin{aligned} E_{св} &= \left(\sum_i m_i - m_a \right) c^2 = \\ &= \left(Z m_p + N m_n - m_a \right) c^2 \approx \\ &\approx \left(Z m_H + N m_n - m_a \right) c^2 \end{aligned}$$

Дефект массы $\Delta = (m - A)c^2$

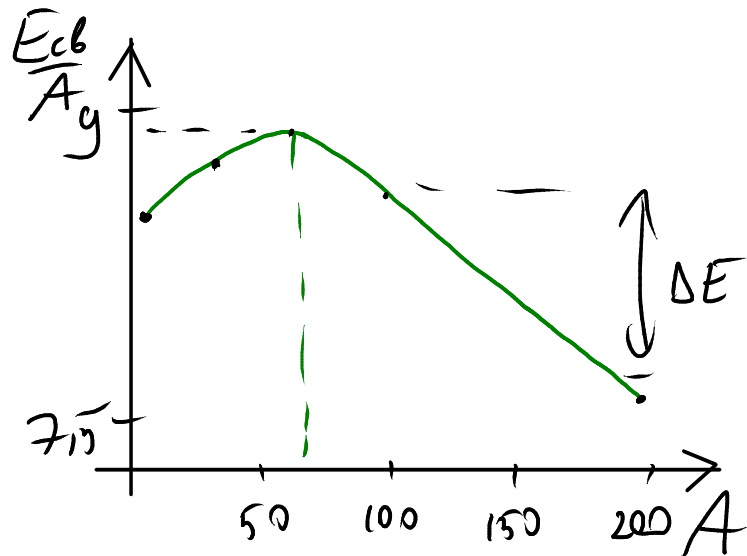
$$m_H = 1 + \frac{\Delta_H}{c^2}$$

$$m_a = A + \frac{\Delta_a}{c^2}$$

$$E_{cb} = \sum_{(p)} \Delta_H + \sum \Delta_n - \Delta_a$$

E_{cb}/A — удельная энергия связи

$$\frac{E_{cb}}{A} \approx f \underline{M_{\pm B}}$$



Наиболее прочные ядра с $A \sim 50 \div 60$.

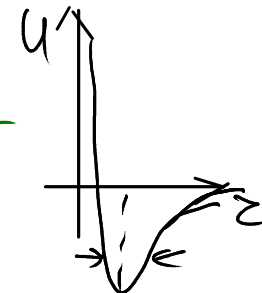
Т.е. $\frac{E_{cb}}{A}$ зависит от A — слабо

\Rightarrow ядерные силы быстро
насыщаются — короткодействие.

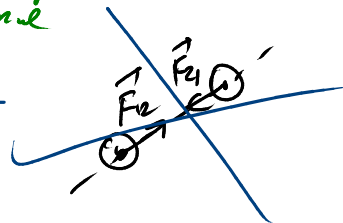
5.3. Ядерные силы

1) короткодействующие. с радиусом $\sim 10^{-15}$ м.

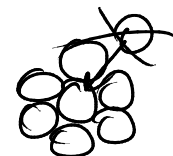
притяжение, к-е при еще большем сближении переходит в отталкивание



2) не являются центральными
зависят от ориентации спинов

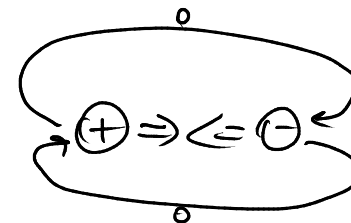
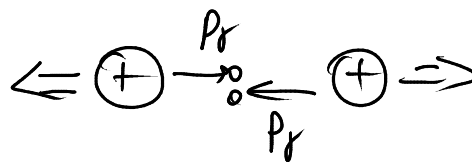


3) обладают свойством насыщения. Нуклон взаимодействует только с ограниченным числом ближайших нуклонов



$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{3} P$$

Особенности ядерных взаимодействий —
— обмен частицами —
— квантами поля —



π м поле — квант — мезон

1935 г. Юкава сильное взаимодействие = обмен заступами с ЭМ. полем ~ 200-300 МэВ
виртуальными

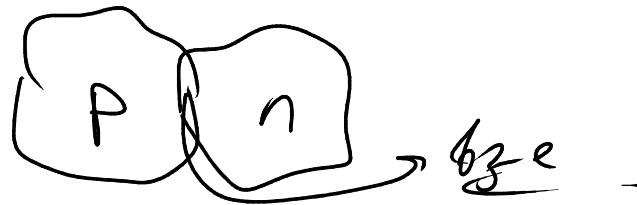
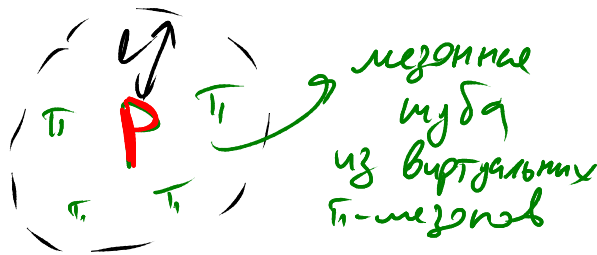
В 1947 г. π -мезоны — обнаружены

Соотн. неопр. Гейзенберга $\Delta E \Delta t \geq \hbar$

За время $\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E}$ могут быть отключены от ЗСЗ
 и их приписывают к резке обнаружения.

\Rightarrow Время существования π -мезона $\tau_{\pi} \approx \frac{\hbar}{m_{\pi} c^2}$

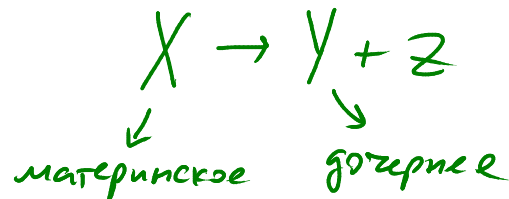
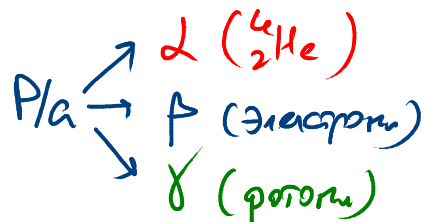
$l \approx c \tau_{\pi} = \frac{\hbar}{m_{\pi} c} = \frac{1}{2\pi} \frac{h}{m_{\pi} c} = \frac{1}{2\pi} \lambda_{\pi}$ Комптоновская длина волны
 компт. длина волны для π -мезона



5.4. Радиоактивность

— самопроизвольный (спонтанный) распад ядер с испусканием частиц

Соств. ядра — радиоактивные



У типа Р/а ядер \exists exp. вероятность λ распада в ед. вр.
Зависит только от типа ядра

$$\Rightarrow \frac{dN}{dt} = -N(\lambda dt)$$

число ядер в данный момент t

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \quad \ln N = -\lambda t + \text{const}$$

$$N = \text{const} \cdot e^{-\lambda t};$$

λ — постоянная распада

$$t=0; \quad N=N_0 \quad \Rightarrow$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Закон Р/а
Резерфорд

$T_{1/2}$ - период полураспада - время, за к-ое распадается $\frac{1}{2}$ атом

$$t = T_{1/2}; \quad N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}; \quad 2 = e^{\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx 0,693 / \lambda$$

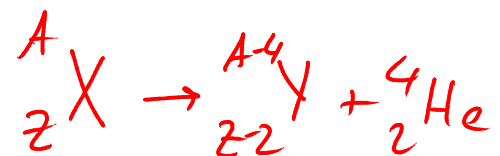
$$N = N_0 2^{-t/T_{1/2}}$$

$\tau = \frac{1}{\lambda}$ - среднее время жизни

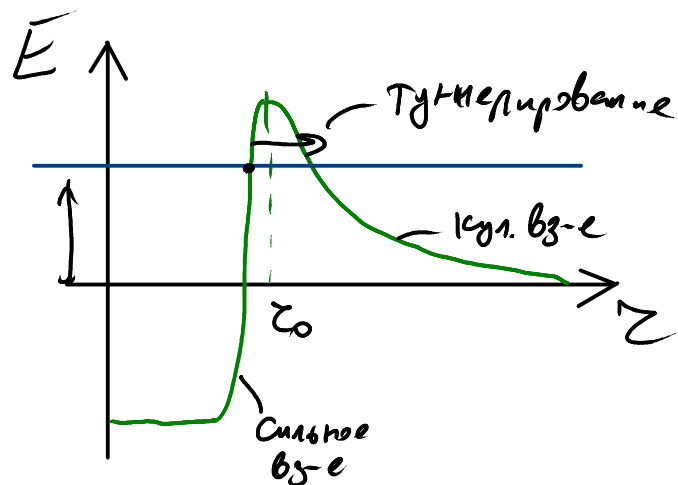
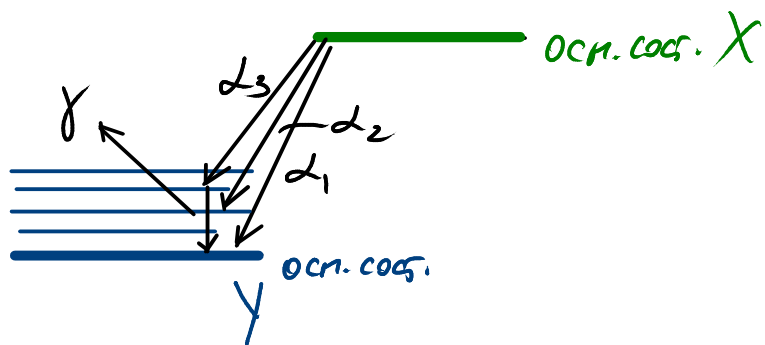
$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$

5.5. Основные типы радиоактивности

α-распад. Испускание ядер ${}^4_2\text{He}$ — α-частиц.



характерен для тяжелых ядер



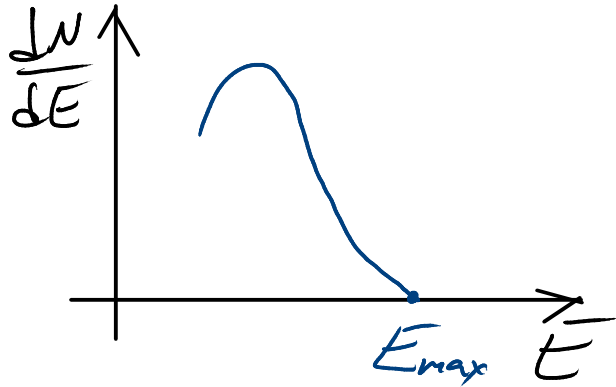
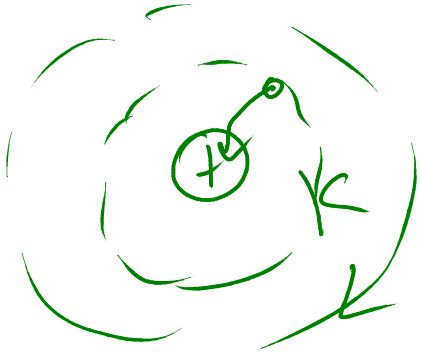
β -распад:

1) β^- -распад. $Z \rightarrow Z + 1$. исп. e^-

2) β^+ -распад $Z \rightarrow Z - 1$. исп. \tilde{e}^+ позитрон

3) K-захват. захват e^- с K-оболочки

$Z \rightarrow Z - 1$



$\exists E_{max}$ — соотв. ΔC^2
разности m_N и $(M_d + m_e)$

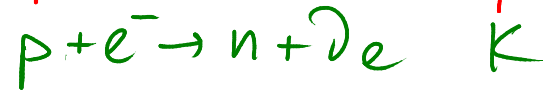
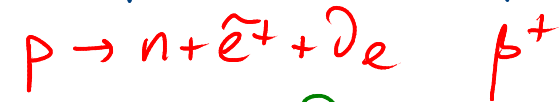
Почему $E < E_{max}$?

1930г. Паули \exists "бор" — частица,
уносящая энергию

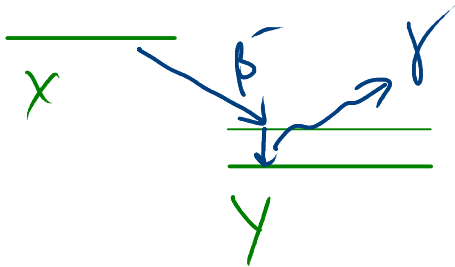
Ферми \rightarrow Нейтрино ∂

$g_0 = 0$; $m_\nu \approx 0$

Схема β -распада:



Гамма-распад. Испускание фотонов высоких энергий



Ускорение - возбужд ядра после
 α или β распада.

5.6. Основные радиологические величины

Активность $A = \left| \frac{dN}{dt} \right|$ число распадов в ед. времени

Если $N = N_0 e^{-\lambda t}$, тогда $A = \lambda \underbrace{N_0 e^{-\lambda t}}_N = \lambda N$

Величина	Ед. изм.		Соотн.
	Внесены	СИ	
Активность	Кюри (Ки)	Беккерель (Бк)	$1 \text{ Бк} = 1 \frac{\text{расп}}{\text{с}}$; $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
Экспозиционная доза	Рентген (Р)	Кулон/кг	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Поглощенная доза	Раг	Грей (Гр) = $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Рг}$
Эквивалентная доза	Бэр	Зиверт (Зв)	$1 \text{ Бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$