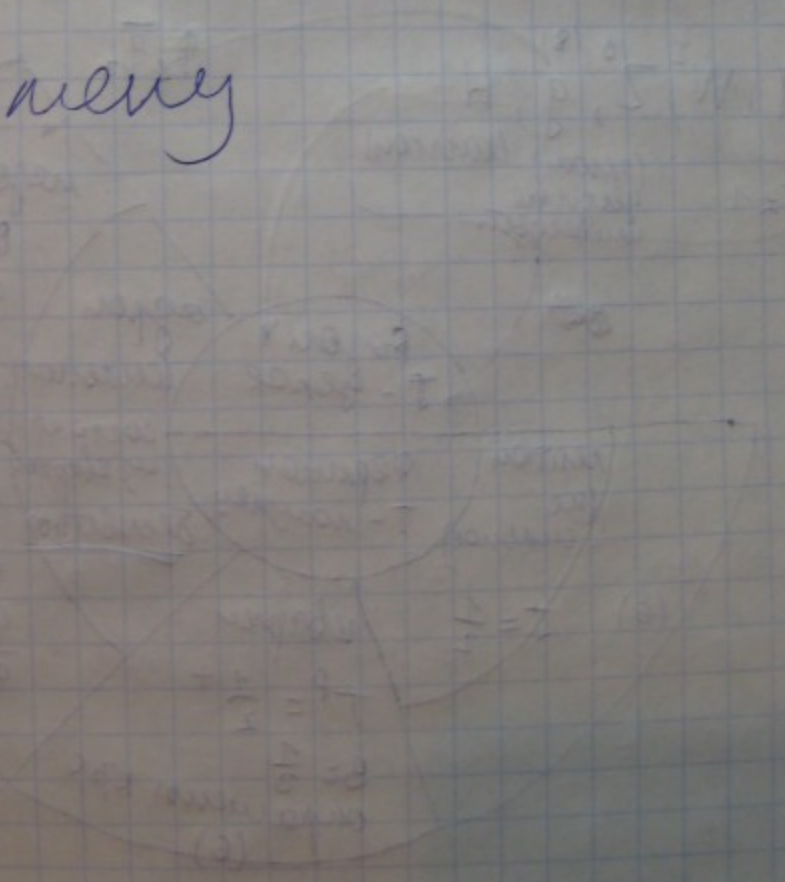


подробна

и

класификация



Бозон (T-целое)

Фермион (T-полуцелое)

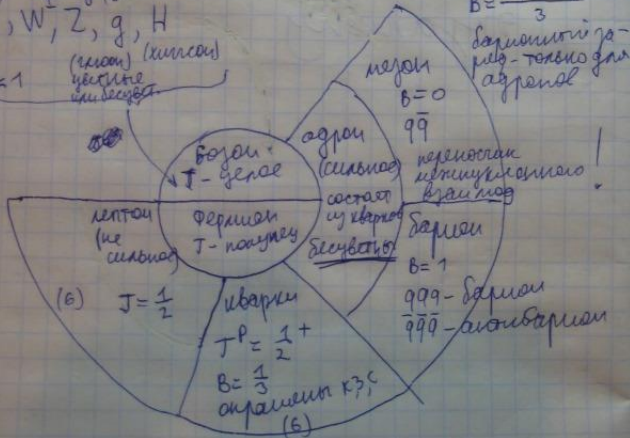
Адрон - сильно взаимодействующий

Лептон - сильно не взаимодействующий

Мезон (B=0) (qq̄)

Барийон (B=1) (qqq, q̄q̄q̄)

γ, W^{\pm}, Z, g, H
(кванты) (кванты)
T=1
участники
или не участвуют



$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{длина волны де Бройля}$$

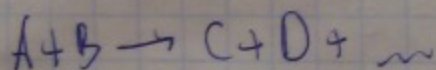
$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{e^2}{200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}} = \frac{1}{137} \quad \text{const. тонк. структура}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{привед. const. Планка}$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} \quad \text{магнетон Бора}$$

$$\begin{cases} E = T + mc^2 \\ E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \end{cases} \Rightarrow p = \sqrt{\frac{E^2}{c^2} - 2Tm} \quad \begin{matrix} \text{переносит.} \\ \text{слагаем.} \end{matrix} \approx \sqrt{2Tm}$$

$$\Gamma \tau \approx \hbar \quad \text{спектр}$$



$$\text{ЛСК: Энергия} = (T_A)_{\min} = |Q| \left(1 + \frac{m_A}{m_B} + \frac{|Q|}{2m_B c^2} \right)$$

$$\text{СЦУ: Энергия} = (T_A + T_B)_{\min} = -Q = |Q|$$

$$\text{ЛСК: Энергия} = \frac{(m_C + m_D + \dots)^2 c^4 - (m_A + m_B)^2 c^4}{2m_B c^2}$$

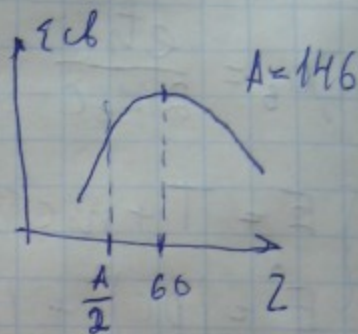
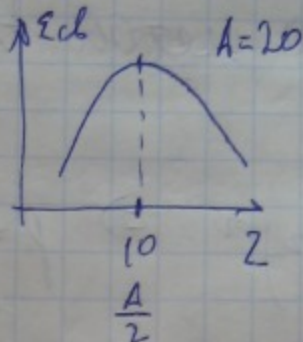
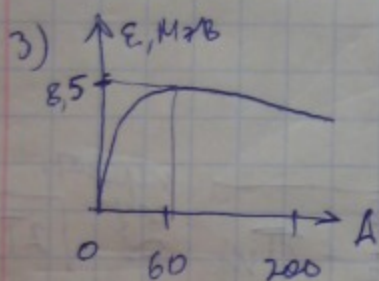
$$Q = (m_A + m_B) c^2 - (m_C + m_D + \dots) c^2$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4T} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad - \text{ф-но Резерфор}$$

$$1) W(A, Z) = [Z \cdot m_p + (A-Z) m_n] c^2 - M(A, Z) c^2 \quad \text{энер. связи}$$

$$2) m_p c^2 = 938,27 \text{ МэВ}$$

$$m_n c^2 = 939,57 \text{ МэВ}$$



$$\epsilon(A, Z) = \frac{W(A, Z)}{A}$$

$$4) \begin{cases} Q_\alpha = T_\alpha + T_{A-4} \\ P_\alpha = P_{A-4} \end{cases}$$

$$Q = \frac{1}{e} \int (3z^2 - r^2) \rho(\vec{r}) dV = \frac{1}{e} \int (3\cos^2\theta - 1) \rho(r) r^2 dr$$

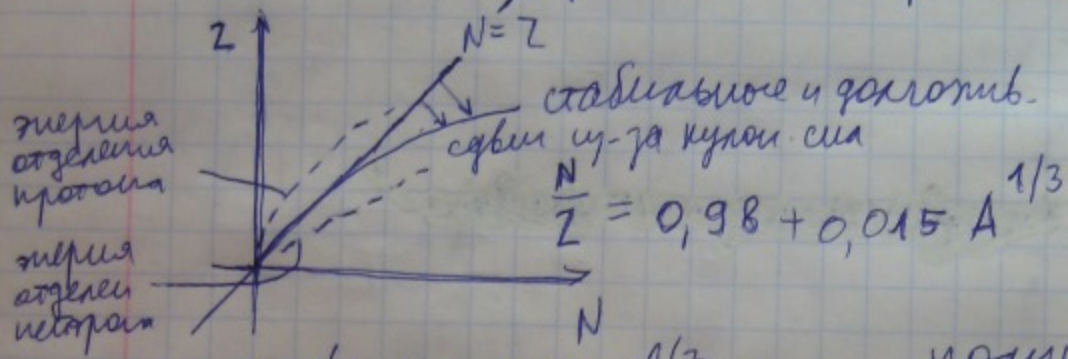
векторный квадратный момент заряда dV от z - вдоль оси симметрии тела



Билеты к экзамену

① Состав и размер ядра. N-Z-диаграмма

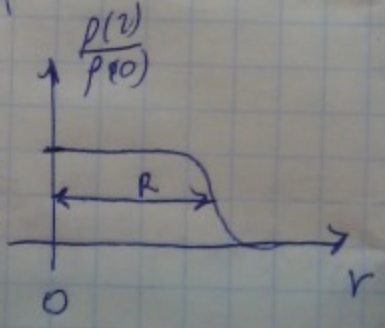
состоит из нуклонов: n, p.



$R_n \approx (1.0 \div 1.1) A^{1/3} \text{ Фм}$ — по численности
 $R_p \approx 1.2 \cdot A^{1/3} \text{ Фм}$ — в распр. Ферми
 — аппроксимация
 размер ядра $\approx 1 \text{ Фм}$ — сферич. однород. плотн.

известные ядра:

- 1) стабильные и долгожив. (285)
 $(T_{1/2} > 5 \cdot 10^8 \text{ лет и долгоживущи})$
- 2) радиоактивные (3200)
 $(T_{1/2} < 5 \cdot 10^8 \text{ лет})$



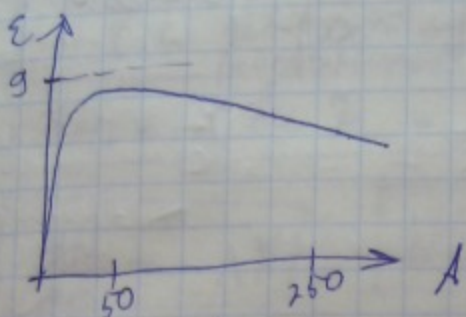
$A_1 = A_2$ — изобары
 $Z_1 = Z_2$ — изотопы

(5) =

② Масса и энергия связи ядра.
 Формула Вайцзеккера.

.11-22
 1226

$$E = mc^2$$



энергия связи $W(A, Z)$ -
 мин энергия, необход для
 деления ядра на нуклоны

$$W(A, Z) = [Zm_p + Nm_n]c^2 - M(A, Z)c^2$$

$$\epsilon = \frac{W(A, Z)}{A} \quad \text{- удельная энергия связи}$$

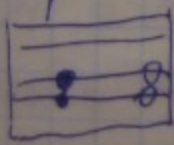
$$W(A, Z) = a_v A + a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{sym} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

объемная
поверх.
кулонов.
симметрии
нейтр.

(ч.ч.)
сферич.

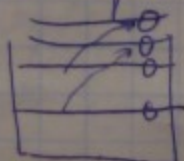
- Ф-ла Вайцзеккера (модель жидк. капли)

(а) энергия симметрии = запрет Паули



pp nn

(а)



nn pp

(б)

$$W_{(a)} > W_{(б)}$$

(б) энергия нейтрального (протонного) шарика

$$\delta = +34 \text{ МэВ} - \overset{u}{\nu_e} - \overset{u}{\nu_e}$$

$$\delta = 0 \text{ МэВ} - \overset{\nu}{\nu_e}$$

$$\delta = -34 \text{ МэВ} - \overset{\nu}{\nu_e} - \overset{\nu}{\nu_e}$$

нейтрини или протон париларов

$$a_1 = 15,6 \text{ МэВ}$$

$$a_2 = 17,2 \text{ МэВ}$$

$$a_3 = 0,72 \text{ МэВ}$$

$$a_4 = 23,6 \text{ МэВ}$$

③ радиоактивный распад ядер.
Закон радиоактив. распада.

31
120

τ - сред. вр. жизни атомов ядра

$\lambda = \frac{1}{\tau}$ - конст. распада в ед. времени
(постоянная распада)

$T_{1/2} = \tau \ln 2 = \frac{\ln 2}{\lambda}$ - период полураспада

$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$; $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ - зак. распада

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{1}{\lambda} \quad - \text{из определений мат. ожидания.}$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$A = -\frac{dN}{dt} = +\lambda N$ - активность образца

1 Бк = 1 распад/с

1 кБк = $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов/с - активность 1 г радия

масса урана распада; $M > \sum m_i$

энергия распада; $Q = (M - \sum m_i) c^2$

(4) Альфа-распад. Курановский и центробежный барьеры,

α -распад обуслов. сильным взаимодействием.
 Характеристики для туннел. эдгера (Курановский и центр. барьеры)

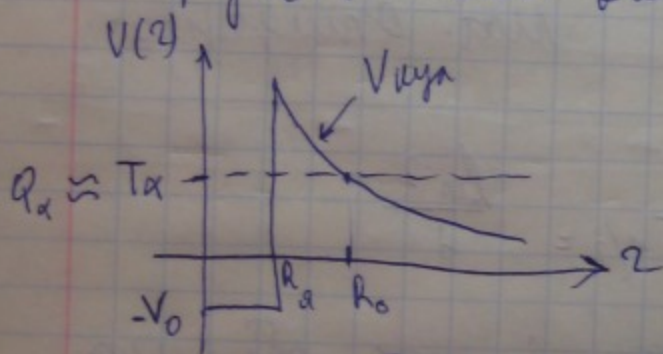
$$Q_\alpha = (M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - m_\alpha) c^2$$

$Q_\alpha > 0$ - условие распада — энергия распада

$$Q_\alpha \approx T_\alpha = 2 \div 9 \text{ МэВ}$$

$$T_{1/2} = 10^{-8} \div 10^{19} \text{ лет}$$

Курановский барьер



возможно
 туннелирование
 (при $T_\alpha < V_{\text{кур}}$)

Центробежн. энергия препятствует выходу
 α -частицы из ядра — создаем зон. барьер.
 Для α и σ м.м.а:

$$T_{\text{вр}} = \frac{L^2}{2\mu r^2} \approx \frac{\hbar^2 L(L+1)}{2\mu r^2}$$

при $T < T_{\text{вр}}$ α может
 пот. барьер туннели-
 ровать.

$$\lambda \approx \partial P = \frac{V_\alpha}{2R_\alpha} P$$

вращ. б.т.о. у границы (равног.)
 $P = \exp\left\{-\frac{\hbar^2}{2} \int_0^{R_0} \sqrt{2\mu(V(r)-T)} dr\right\}$
 вращ. движение через границу

5) Бета-распад экспериментальное обнаружение (антинейтринно). 34 и 91

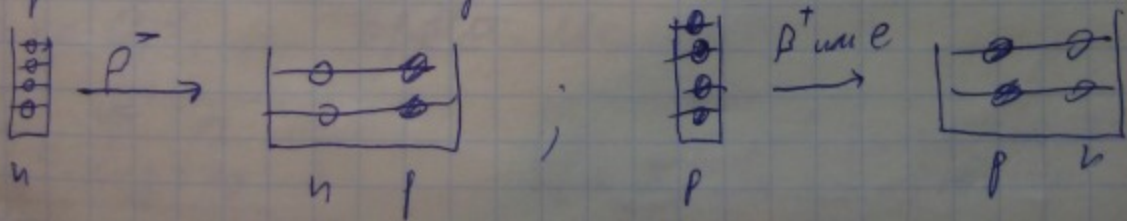
β -распад обусловлен слабым взаимодействием
 β -распад — испускание лептонов $e^\pm, \nu_e, \bar{\nu}_e$
 или поглощением e
 энергии:

- виды:
- 1) β^- : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
 - 2) β^+ : $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
 - 3) e -захв.: $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- $Q_{\beta^\pm} = (M(A, Z) - M(A, Z \mp 1) - m_e)c^2$
 $Q_e = (M(A, Z) - M(A, Z - 1) + m_e)c^2$

спектр e -захв. дискретный (2 продукта)
 спектры β^\pm непрерывный (более 2 продуктов)

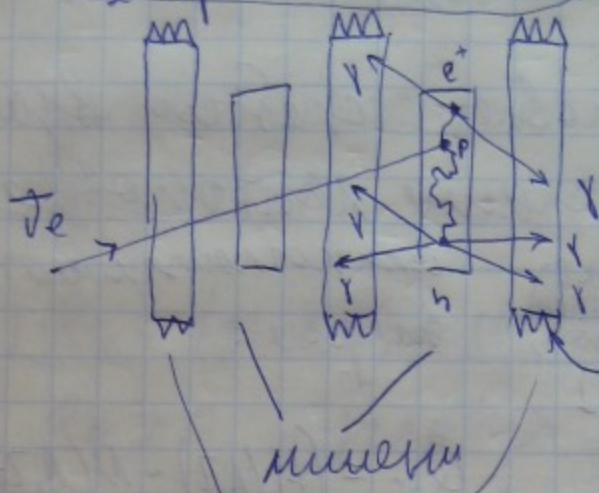
β -распад внутримуклонной.

Его реализует принцип Паули: минимизация энергии системы нуклонов



обнаружение антинейтрино

$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ - захват нейтрино



$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$
(но 0,511 МэВ)

фотоумножители

цинтилляторы (перестроены в поиски γ-квантов)
(детекторы)

проверка симметричности $\nu_e, \bar{\nu}_e$
 $p + e^- \rightarrow n + \nu_e \stackrel{-t}{\Leftrightarrow} \nu_e + n \rightarrow p + e^-$ (?)
 $\bar{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$ - не зарегистрировано

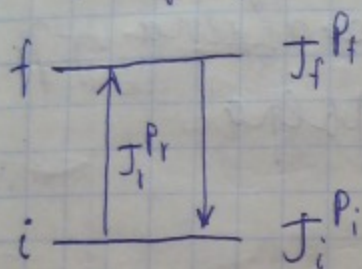
⑤ Гамма-переходы в атомах.

37
ИЗ61

Эт. и магнитные гамма-переходы

γ -излучение возникает при распаде возб. сост. атом.
дискретность энерг. уровней \Rightarrow дискрет. γ .

γ -излучение - электромагнитное



$$E_\gamma = E_f - E_i$$

$$\vec{J}_f = \vec{J}_i + \vec{J}_\gamma \Rightarrow |J_i - J_f| \leq J_\gamma \leq J_i + J_f$$

$$P_f = P_i \cdot P_\gamma \Rightarrow P_\gamma = P_i P_f$$

γ -излучение $\stackrel{-t}{\Leftrightarrow}$ γ -поглощение

J-момент кол. вл. движения - мультипольность

(J=1 - диполь, 2 - квадруполь, 3 - октуполь, ...)

$$J \neq 0$$

(сферически симметр. сост. не удов. непрерывности волн $\approx \mu$) \Rightarrow 0 \rightarrow 0 переходы не возм!

$$S_\gamma = 1$$

спин фотона

$L_\gamma = 0, 1, 2, \dots$ орбит. момент

$$\vec{J}_\gamma = \vec{L}_\gamma + \vec{S}_\gamma$$

$$P = \pi (-1)^l$$

- четность фотона

(-1) - квант векторного поля

$$P_\gamma = (-1)^J$$

$$P_\gamma = (-1)^{J+1}$$

- EJ-фотон

- MJ-фотон

$$\left[\tau = \frac{h}{p} = \frac{h c}{p c} = \frac{h c}{E} \right] - \text{длина волны } \lambda$$

$\frac{R_a}{\tau} \ll 1$ - геометрическое приближение

$$w(MJ) \approx \frac{1}{\tau} \left(\frac{R}{\tau} \right)^{2J+2}$$

$$w(EJ) \sim \frac{1}{\tau} \left(\frac{R}{\tau} \right)^{2J}$$

вероятности
э-м перехода

Вероят. λ с большим J подавлена из-за наличия центрального барьера.

$$\frac{w(MJ)}{w(EJ)} = (kR)^2 \ll 1$$

$$\frac{w(MJ+1)}{w(MJ)} = \frac{w(EJ+1)}{w(EJ)} \approx (kR)^2 \ll 1$$

7. Дейтрон - связанное состояние нейтрона и протона.

${}^2_1\text{H} \equiv d$ связанная ме-я н-р.
 стабилен. Не имеет возб. сост.
 непрерывен

$m c^2 = 1$ МэВ - масса

$W = 2,224$ МэВ - связь энергии

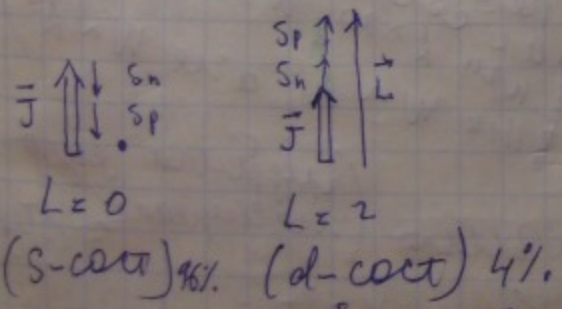
$R_a = 4,3 \text{ Фм}$ $\vec{J} = \vec{S}_p + \vec{S}_n + \vec{L}$

$J^P = 1^+$ $P = \prod_{p=1}^n \prod_{n=1}^n (-1)^{l_n} = (+1) \Rightarrow L = 0, 2, \dots \Rightarrow \vec{S}_p + \vec{S}_n = 1$
 (четно) (??)

$M = 0,875 \text{ мн}$ - маг. моменты

$Q = 0,282 \text{ Фм}^2$ - эл. квадрат. моменты

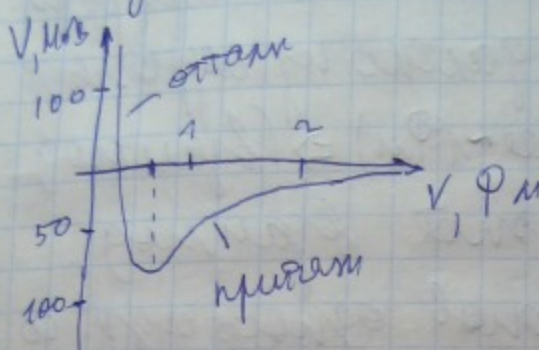
т.е. дейтрон был в сост. с перекр. спинами (??)
 $(p \uparrow, n \downarrow)$, $(p \downarrow, n \uparrow)$, но едер. связь раз от
 нуля (?? - притяжение) сильнее



необязательно. не сферич. симметр $\Rightarrow Q \neq 0$.
 \Rightarrow едер. связь не чистая

8) свойства нуклон-нуклонного взаимодействия

13,46
1302



получим V_{NN} -взаимог.

$$V_{NN} = \underbrace{V(r)}_{\text{от расст. (цент-ральная)}} + \underbrace{V_{SS}}_{\text{спин-спин}} + \underbrace{V_T}_{\text{тензорная}} + \underbrace{V_{SL}}_{\text{спин-орбитальная}} + \dots$$

сред. расст. между нуклонами $\approx 2 \text{ fm}$

нукл. взаимодействие осуществляется обменом частицами - мезонами

$$V_{Yukawa}(r) = -g_N \frac{e^{-\frac{r}{a_{NN}}}}{r}$$

$$a = \frac{\hbar}{m_\pi c} \text{ - радиус сил}$$

g_N - ядер заряд нуклона



$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \Leftrightarrow m_\pi c^2 \cdot \frac{a_{NN}}{c} \approx \hbar \Leftrightarrow a_{NN} = \frac{\hbar c}{m_\pi c^2}$$

св-ва ядер взаимодействия:

- не центрально (сдвигает 7)
- притяжение (не всегда?)
на коротк-отстан?

8

нуклон-нуклонный потенциал Юкавы:

$$V_{NN} = \underbrace{V_1(r)} + \underbrace{V_2(r) \cdot (\vec{s}_1 \vec{s}_2)} + \underbrace{V_3(r) \cdot (\vec{s}_1 \vec{n})(\vec{s}_2 \vec{n})} + \underbrace{V_4(r) \cdot (\vec{l}, \vec{s})}$$

св-ва ядер
бранаго:

квадратичная момен
у дейтрона



- тензорный кер-р (ненормальность)
- зав. от спина частиц
- зарядовая независимость

напр. пов. нуклон бранаго
не со всеми остальными,
а с соседями:
при $A > 20$ $W \approx \epsilon A$
и $W \sim A$, а не $W \sim A^2$

- насыщаемость
- большая величина (глубина ядер потенциал ≈ 40 МэВ)
- короткодействие (≈ 1 Фм)

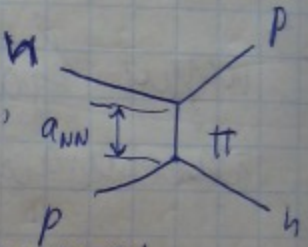
ИЗЛОЖИТЕ 9) Мезонная теория ядер. сил

NN-Взаимодействие кварк-мезонной природы
 цветные гласные кварки и глюоны не вылетают. (более ~1 Фм) ⇒ (взаимодействие глюонов - коллективное взаимодействие всех кварков и глюонов одного адрона со всеми кв. и глюонами др) ⇒

$\Delta E_{\Delta t} \approx \hbar$
 \downarrow
 $m_{\pi} c^2 \approx \frac{q_{NN}}{c} \approx \hbar$

Следует адроны -

мезоны $(q\bar{q})$ - виртуальные



$a_{NN} \approx \frac{t_{\pi}}{m_{\pi} c^2} \approx \frac{t_{\pi}}{m_{\pi} c^2} \approx 1,5 \text{ Фм} \Rightarrow (m_{\pi} c^2 \approx 130 \text{ МэВ})$

самый легкий мезон - пион - только он обеспечивает



ядер взаимодействие на характерной

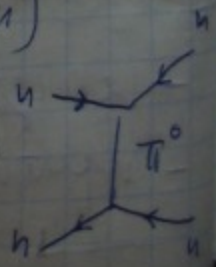
длинах порядка $1,5 \div 2 \text{ Фм}$

одноименных обмен.

$$V(r) = -g_N \frac{e^{-\frac{r}{a_{NN}}}}{r}$$

(где $\frac{r}{a_{NN}} > 0,8 \text{ Фм}$)

квант.	состав	$m c^2$	время жизни, с	$J^P (I)$	распад
π^+, π^-	$u\bar{d}, d\bar{u}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\nu_{\mu}^+ \bar{\nu}_{\mu}^-$
π^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134,98	$8,4 \cdot 10^{-17}$	$0^-(1)$	2γ

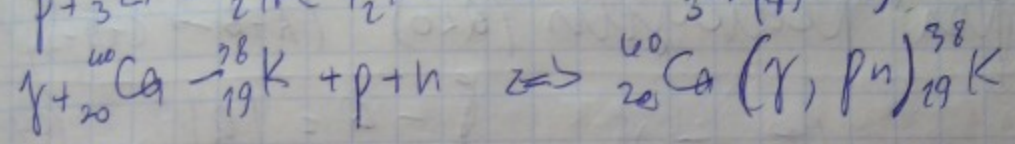
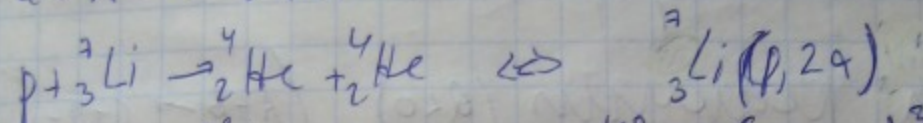


10) Ядер реакции. Закон сохранения энергии.

И413
И406
59

Ядр. реакц. - мод. процесс столкновения элементар частицы с ядром или ядра с ядром

$$a + A \rightarrow b + B$$



Появляющаяся частица - мишень.

На встреч. ускорителях нет покалывания

$$p = {}^1_1\text{H}, \quad d = {}^2_1\text{H}, \quad t = {}^3_1\text{H}, \quad \alpha = {}^4_2\text{He}$$

Зак. сохр. (+ см. билет 16)

$$(1) \vec{T}_a + \vec{T}_A + \vec{L}_{aA} = \vec{T}_b + \vec{T}_B + \vec{L}_{bB}$$

T - скорость
L - относ. орбит. момент

(если $a = \gamma$, то $\vec{L}_{aA} = 0$, так T_γ считаем)
(всегда $\vec{L}_{\gamma A}$. то не верно для $\gamma = b$.)

$$(2) \pi_a \pi_A (-1)^{l_{aA}} = \pi_b \pi_B (-1)^{l_{bB}}$$

- четность P (не для слабых)

$$(3) \vec{I}_a + \vec{I}_A = \vec{I}_b + \vec{I}_B$$

спин

- угловой момент (только в сильных)

$$(I_3)_a + (I_3)_A = (I_3)_b + (I_3)_B$$

спин. угловой момент нет!

- энергия

$$(4) (T_a + T_A) + (m_a + m_A)c^2 = (T_b + T_B) + (m_b + m_B)c^2$$

(5) импульса \vec{p}

(6) э. заряда Q

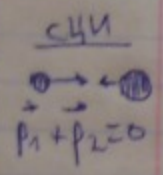
(7) числа нуклонов (го нуклеона нафта нуклеон-аони)

(8) барионного заряда B

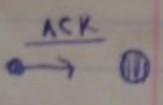
(9) лептонного заряда L

() - универсальны
) - не универсальны

Пары мезоны ($Q < 0$) ($A+B \rightarrow C+D+\dots$)



$$E_{\text{пары}} = (T_A + T_B)_{\text{мин}} = \begin{cases} -Q = |Q| & (\text{ЦМ}) \\ |Q| \left(1 + \frac{m_A}{m_B} + \frac{|Q|}{2m_B c^2} \right) & \end{cases}$$



$$E_{\text{пары}} = \frac{(m_C + m_D + \dots)^2 c^4 - (m_A + m_B)^2 c^4}{2m_B c^2}$$

$$Q = (m_A + m_B) c^2 - (m_C + m_D + \dots) c^2 \quad \text{энергия реакции}$$

$$V_{\text{ЦМ}} = \frac{m_A v_A}{m_C + m_D + \dots}$$

- скорость центра инерции

11) Механизм ядер реакции.

и416

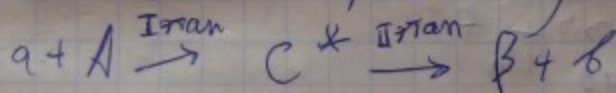
Прямые реакции. Составное ядро. 62

$$T_a = \frac{2k}{v} \approx 10^{-22} \text{ с}$$

ядерное время -
время преодоления
расстояния через ядро.

- 1) $t_{\text{ямы}} \approx T_a$ - прямая реакция
- 2) $t_{\text{ямы}} \gg T_a$ - через составное ядро.

- 1) частица передает свою E ядру - транзитная, и они тут же покидают ядро
- 2) частица оседает в ядре, энергия распределяется, ядро живет до распада. (когда α -я функция, энергия одной из частиц не хватает ей)



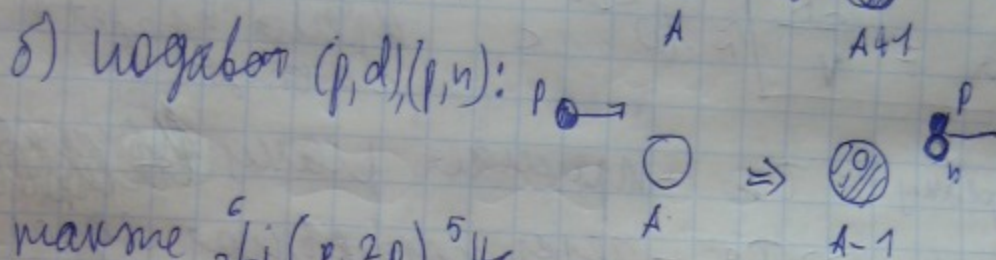
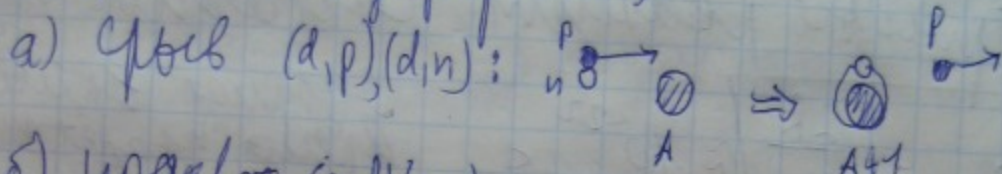
$$E_{C^*} \approx T_a + B_a$$

энергия возбуждения составного ядра кинетическая энергия a и составного ядра энергия отделения a и составного ядра

$$\frac{E_{C^*}}{A} \approx \frac{T_a + B_a}{A} < B_{n,p}$$

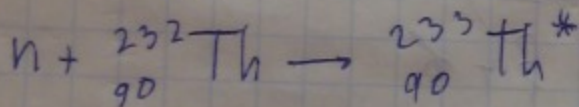
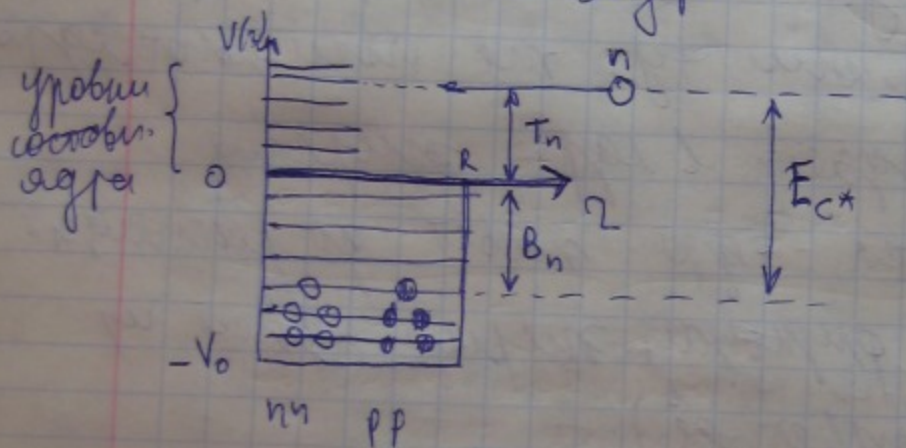
средняя энергия на нуклон меньше энергии его отделения

1) типичные ядерные реакции.



например ${}^6_3\text{Li} (p, 2p) {}^5_2\text{He}$

2) сечение ядерной реакции



12. Деление зер

И 381

Деление - распад на два осколка
равной массы

Спонтанное или вынужденное
(кампендровская)

$$\varepsilon = \frac{W(A, Z)}{A}$$



$$A \rightarrow A_1 + A_2$$

$$Z \rightarrow Z_1 + Z_2$$

$$M(A, Z)c^2 = (Zm_p + Nm_n)c^2 - W(A, Z)$$

$$E_{дел} = M(A, Z)c^2 - M_1(A_1, Z_1)c^2 - M_2(A_2, Z_2)c^2 =$$

$$= W_1(A_1, Z_1) + W_2(A_2, Z_2) - W(A, Z)$$

иметь осколки одинак. ($A_1 = A_2 = \frac{A}{2}, Z_1 = Z_2 = \frac{Z}{2}$)

$$E_{дел} = 2W\left(\frac{A}{2}, \frac{Z}{2}\right) - W(A, Z) \text{ вычурнее.}$$

$$= [E_{ноб}(A, Z) + E_{кш}(A, Z)] - 2[E_{ноб}\left(\frac{A}{2}, \frac{Z}{2}\right) + E_{кш}\left(\frac{A}{2}, \frac{Z}{2}\right)]$$

$$= \beta \left[A^{2/3} - 2\left(\frac{A}{2}\right)^{2/3} \right] + \gamma \left[\frac{Z^2}{A^{1/3}} - 2\frac{(Z/2)^2}{(A/2)^{1/3}} \right]$$

$$= \beta A^{2/3} (1 - \sqrt{2}) + \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \sqrt{2}\right) \approx 0,37 \beta \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 0,26 \gamma A^{2/3}$$

↓

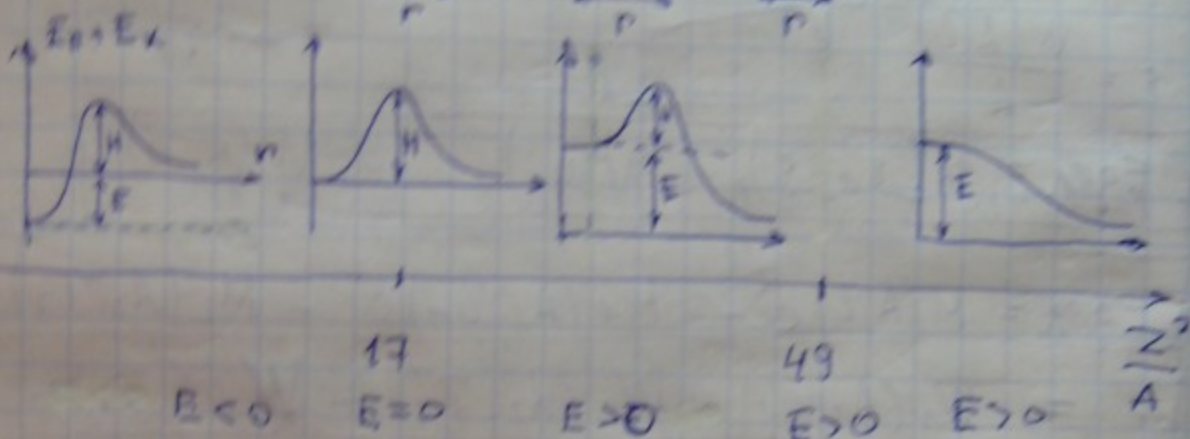
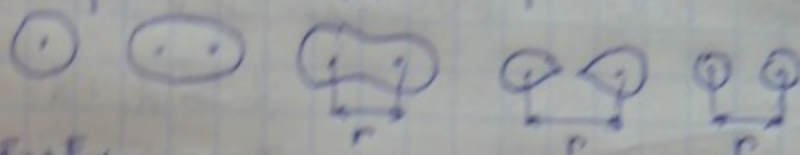
$$E_{дел} > 0 \text{ при } \frac{Z^2}{A} > \frac{0,26 \beta}{0,37 \gamma} \approx 17$$

$\frac{Z^2}{A}$ - параметр
- фактор

($A > 90$) - энергетически выгодно
для распада зер.

Осколки непрерывно нейтронами
 ионизируют β^- -раствор

Формы эдра при земном



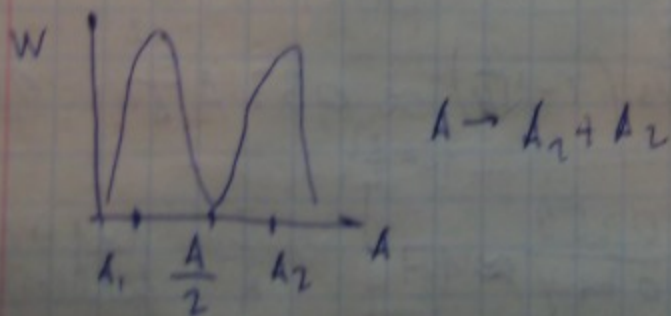
здесь функция
 функции равны
 выше земли $\rightarrow w$

$$w \sim \frac{z^0}{A}$$

или вынуждено
 ($\gamma, \mu, \rho, d, \alpha$, когда $T > H$)

на верхней по-
 делье горные рас-
 падаться сразу

у оловяк может
 есть остроты ста-
 ности (оболочки
 передано разно-
 шелью)



осколки разн. масс, или они ближе к
 лонгеским эдрам.

13) Модель ядр. оболочек (одночастичная модель)

67
И 303

Наиболее устойчивые ядра - с магическими числами протонов или нейтронов (2, 8, 28, 50, 82; 126 (только нейтроны))

связанные с ф-лами Вайнштейна

их оболочки замкнуты

наличие ядра - сферическое (сферич. моменты)

Для всех нуклидов - одинак.

потенциал притяжения (сила);

внутри ядра нуклоны расем как независимые

можно решить ур. Шрёд. для одной частицы (1):

$$V(r) = -V_0 + \frac{1}{2} M \omega^2 r^2$$

гарм. осцилл.

$$V(r) = -\frac{V_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$$

выдса-Самсона



$$\hat{H} \Psi(r) = \left[\frac{\hat{p}^2}{2m} + V(r) \right] \Psi(r) = E \cdot \Psi(r)$$

$$\hat{p}^2 = -\hbar^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \equiv -\hbar^2 \Delta$$

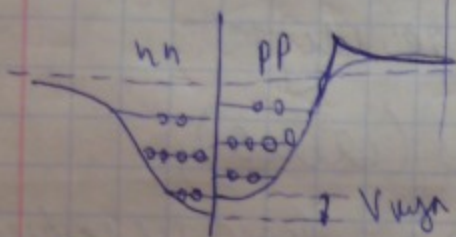
- оператор квадрата импульса нуклона E, m - его энергия, масса

В сферич. потенциале сост. частицы хар-ся орбит. моментом l , n -ое состояние термин повторяется. n - число повторений
 так, l под составными l сф. потенциале характеризуется только n и l .

$n = 1, 2, 3, \dots$

$l = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$
 s, p, d, f, g, h, \dots

j



двухвалентные металлы:

$2He$, $16O$, $40Ca$, $208Pb$
 $n/p: 2/2, 8/8, 20/20, 126/82$

чет-чет: $J^P = 0^+$

чет-неч: $J^P = j^-, P = (-1)^l$

неч-неч: $|j_p - j_n| \leq J \leq j_p + j_n$
 $P = (-1)^{l_p + l_n}$

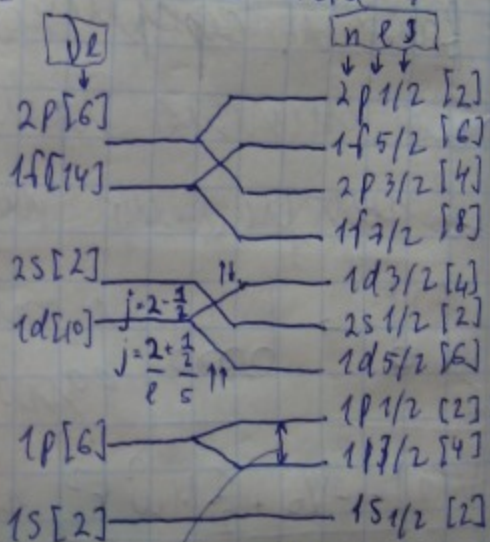
тип корр. спаривания

заполнение n и p независимое
 заполнение по принципу Паули

$$V_l = 2(2l+1)$$

число орбитальных l орбит. моментов.

$$s = 1/2$$



$$\left. \begin{aligned} [4] &= \frac{[6]}{2} + 1 \\ [2] &= \frac{[6]}{2} - 1 \end{aligned} \right\}$$

спин-орбитальное расщепление
 (ls -сильно $\rightarrow 1/2$)

$\uparrow\uparrow$ сильное расщепление
 \uparrow слабое расщепление

$$U(r) = V(r) + a \cdot \vec{l} \cdot \vec{s}$$

⑭) одночастичные и коллективные уровни возбуждения ядер

24
4314

В коллектив яду возбуждение происходит синхронно.

Оболочечная модель \Rightarrow энергия сильно дискретна. Но набор энергий шире:

- оболочечная
 - вибрации
 - вращение
- } одночастичные (переход одно-несколько нуклонов на высокие уровни)
} коллективные

они намагничиваются (суперпозиция)

1) Вращательные уровни $J \pm 1 - J \pm 1$ ядер

$$E_{\text{вр}} = \frac{G \omega^2}{2} = \frac{L^2}{2G}$$

- масса энергии вращения

G - грав. момент инерции

L - орбитальный момент

$$E_{\text{вр}} = \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2G}$$

если ядро вращается, то $J = L$

(так Ψ не ро от $\frac{1}{2}\hbar$)
если Z - ось симметрии!

вращение не может быть вокруг оси симметрии. Только вокруг осей, перпендикулярных к оси симметрии

Вращательные уровни ℓ -но-
 ℓ -ного ядра имеют ℓ -ные J !

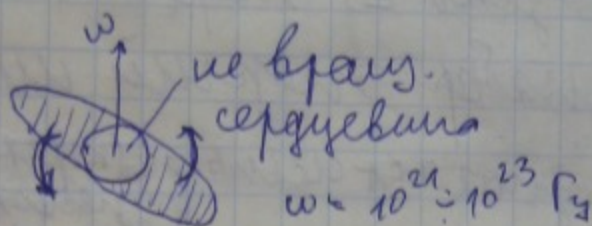
$$J = 0, 2, 4, 6, \dots$$

$$P = +1$$

(нечётные исключены
 из-за симметрии)

- ℓ -ность вращат.
 состояний

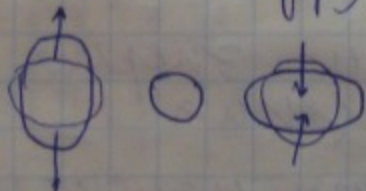
$$\boxed{0^+, 2^+, 4^+, 6^+, \dots}$$



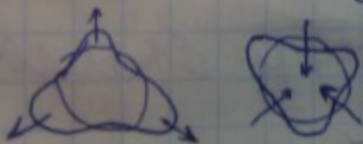
6^+	—	...
4^+	—	...
2^+	—	0,309
0^+	—	0
J^P		E, Hz/B

2) Колебательные (вибрационные)
 уровни ℓ -но- ℓ -т. сферич. ядер

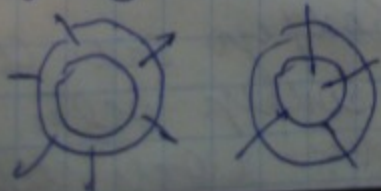
$J = 2$ (квадрупольные колебания)



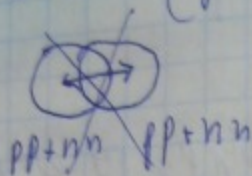
$J = 3$ (октупольные колебания)



$J = 0$ (монопольные колебания)



$J \neq 1$ (дипольное колеб, p и n синфазно)

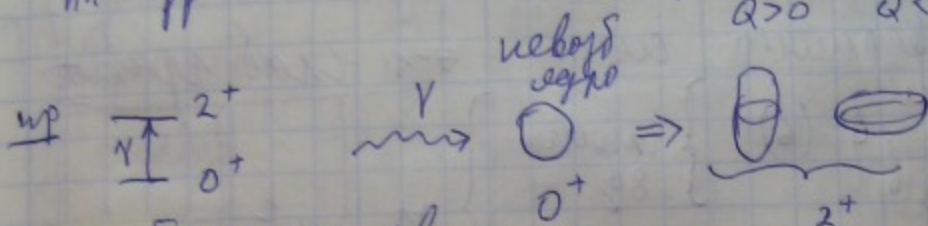


невозможно переименование неразделенных n и p , так как спин системы не меняется

$J = 1$ (дипольное, p и n противофазно)



фаза $\psi > 0$ фаза $\psi < 0$
 $Q > 0$ $Q < 0$



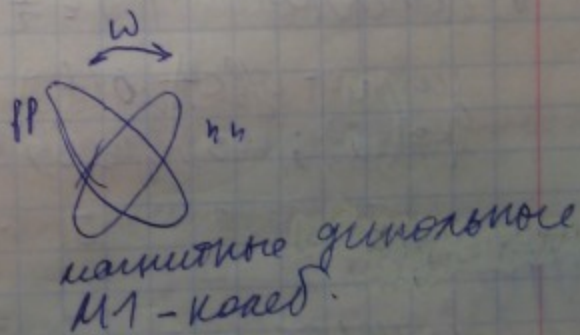
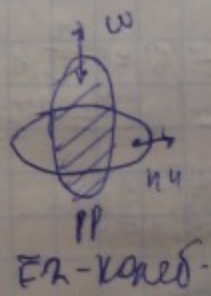
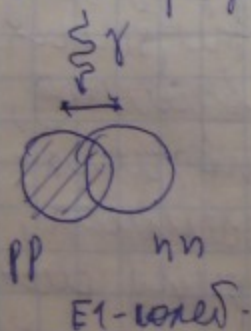
колебания квантуются, $\hbar\omega$ - фазон-квант колебания данной мультипольности.

может быть несколько фазонов разн. мультипольности

$$E = \sum_j n_j \hbar\omega_j$$

n_j - число фазонов мультипольности j
 $\hbar\omega_j$ - энергия этой мультипольности

Поляризованные колебания



U89
80
и 37

(15) Фунг. частицы стандартной модели

Фунг. частицы (бесструктур., точечн)
кварки, лептоны, калибровочн. бозоны

Фунг. фермиона	силы	7-и	слаб	гравит.
кварки d s b (6) u c t	сильн 8g	γ	W [±] Z	гравит. G
лептоны: (6) e ⁻ , μ ⁻ , τ ⁻ ν _e , ν _μ , ν _τ				

Q = -1/3 →
Q = +2/3 →
Q = -1 →
Q = 0 →

I II III - поколения
↑ ↑ ↑
рост массы покоя
лептонов и кварков

• Кварки (T^P = 1/2⁺, B = 1/3)
имеют цветовой заряд (к, 3, c); все сум. в свобод. сост.

+H⁰, H[±] - Хиггсовы Ганг. модель-фунг. частиц калибров. подгруппа - квант. электродинам.

к
3
c

• лептоны ($J = \frac{1}{2}$)
не участвуют в сильных взаимодействиях,
участв. в слабых.

• калибров. бозоны (кванты калибровочных полей)
($J = \text{целое}$)
спин

взаимодействие	на что действуют	калибров. бозоны
сильн.	все цветные	8 безмассов. глюонов ($J = 1$ - спин)
γ -м	все заряженные	фотон ($J = 1$)
слаб	кварки, лептоны калибров. бозоны: W^\pm, Z	массовые бозоны W^\pm, Z ($J = 1$)
гравит.	все	безмассовый гравитон ($J = 2$)

глюоны (несут цвет)

	K	$\bar{3}$	\bar{c}
K	$K\bar{K}$	$K\bar{3}$.
$\bar{3}$.	$3\bar{3}$.
\bar{c}	.	.	$c\bar{c}$

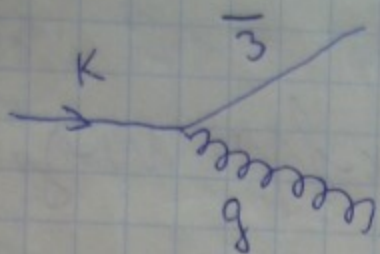
недиагональные смешиваются
диагональные смешиваются
(свобод. переходят $K\bar{K} \leftrightarrow 3\bar{3} \leftrightarrow c\bar{c}$)
и порождаются глюоны со строг. цветом

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(K\bar{K} - 3\bar{3}), \quad \frac{1}{\sqrt{6}}(K\bar{K} + 3\bar{3} - 2c\bar{c}),$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(K\bar{K} + 3\bar{3} + c\bar{c})$$

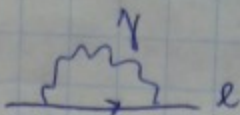
итого: 8.

up

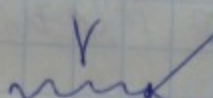


$\Rightarrow g = k_3$

• Фотон



может быть:



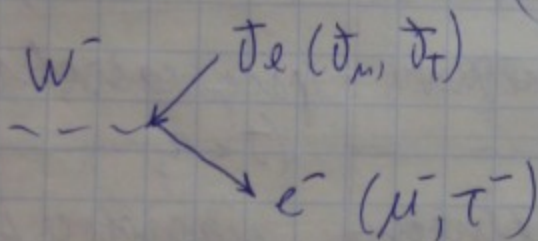
фермион f

антифермион \bar{f}

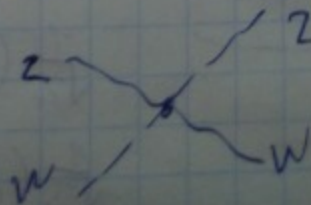
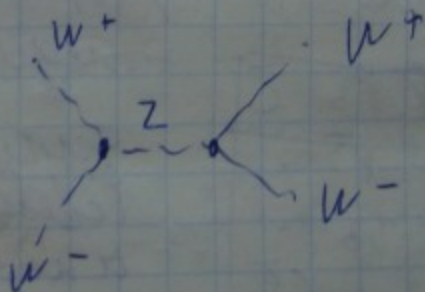
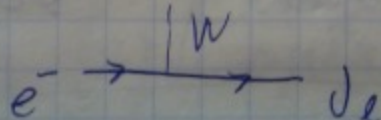
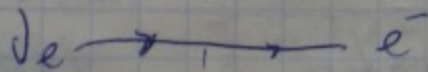
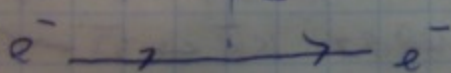
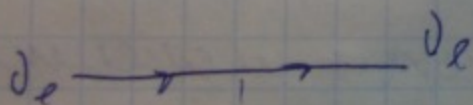
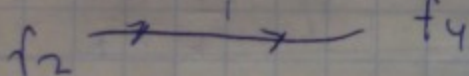
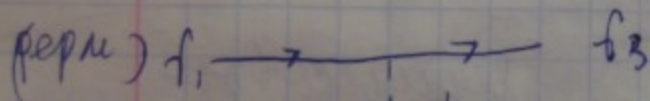
фотон не имеет заряда!

• W^\pm и Z -бозоны

(W^\pm имеют заряд)
(Z не имеет)



для W^\pm не античастицы

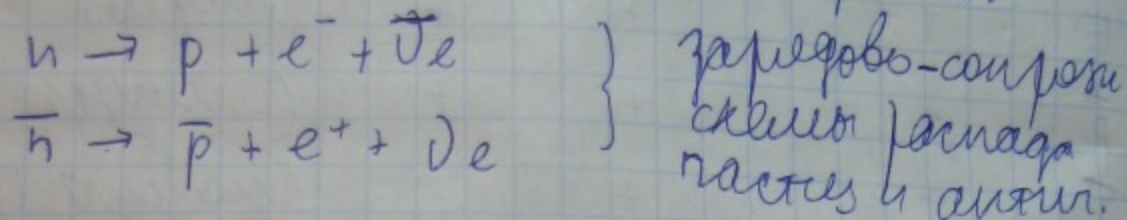
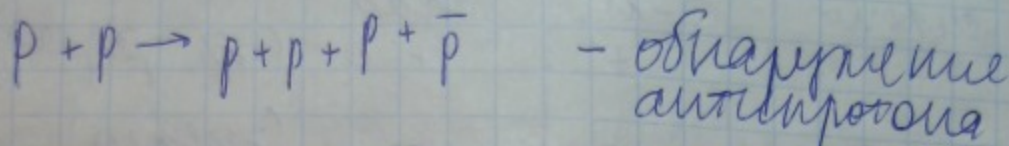


16) Законы сохр. в физике частиц

	сильная	э-м	слаб	
Q	+	+	+	(от заряд)
E	+	+	+	(энергия)
\vec{P}	+	+	+	(импульс)
\vec{J}	+	+	+	(момент импульса)
B	+	+	+	(барийный заряд)
l_e, l_μ, l_τ	+	+	+	(лептонные заряды)
S	+	+	-	странность
C	+	+	-	charm
B	+	+	-	bottomness
T	+	+	-	topness
I_3	+	-	-	изоспин
I_3	+	+	-	третья компонента изоспина
P	+	+	-	простр чет
C	+	+	-	заряд чет.
CP	+	+	-	каудинг чет
T	+	+	-	обращение времени
CPT	+	+	+	(CPT-инвариантность)

ИЗЗ
И 176
103

(17) Частицы и античастицы



Истинно нейтральные: $\hat{C}|n\rangle = |\bar{n}\rangle$
(ν, π^0, Z и др) или зарядово четные: $\begin{pmatrix} +1 \\ -1 \end{pmatrix}_{\text{ч.ч.}}$

зарядово сопряжение:

$$\begin{aligned} \hat{C}|n\rangle &= |\bar{n}\rangle \\ \hat{C}|\bar{n}\rangle &= |n\rangle \end{aligned}$$

Замена всех зарядов на противоположные

$$\hat{C}(x, p, J, Q, B, l_e, L_M, L_T, s, c, b, t) = (x, p, J, -Q, -B, -L, -s, -l_e, -L_M, -L_T, -s, -c, -b, -t)$$

У античастицы тот же способ распада
время жизни, масса, спин, ~~и другие свойства~~
спин, заряд, величина маг. момента

18) Резонансные частицы

резонанс - короткоживущий ($< 10^{-20}$)
распадающийся сильными взаимодействиями.

$\tau_{\text{жизни}} \approx 10^{-22} - 10^{-24} \text{ c}$

$E^2 = (mc^2)^2 + (cp)^2 \Rightarrow mc^2 = \sqrt{E^2 - (cp)^2}$

$\Gamma \approx \frac{1}{\tau}$

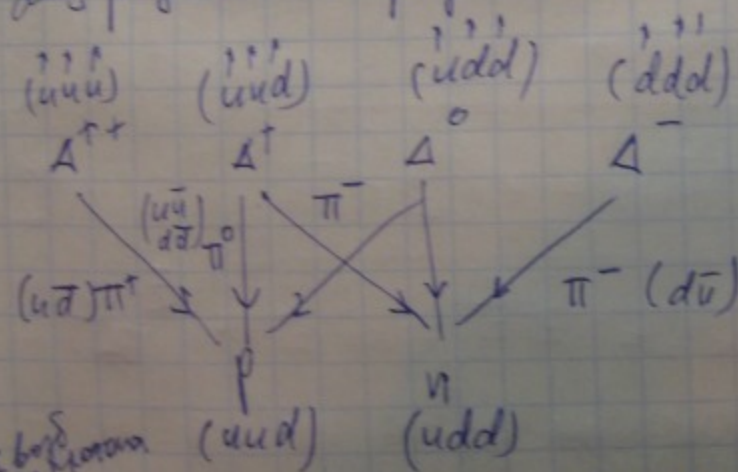


$E_R = E_2 + E_3$
 $\vec{p}_R = \vec{p}_2 + \vec{p}_3$

энергия и импульс
имеют конкретные значения,
хотя и в результате \Rightarrow резонанс

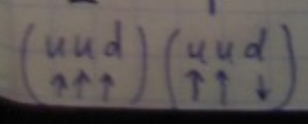
без резон.

с резонансом

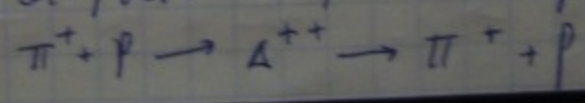


основные
- каналы распада
 Δ -резонансов

Иногда
может происходить



открыто впервые \Rightarrow P.Левин!



K205

(19) Э-м брашмод-я.
Структура нуклона.

КЭД - кварковая т. динамика, даёт результаты, хорошо соглас. с эксперим.

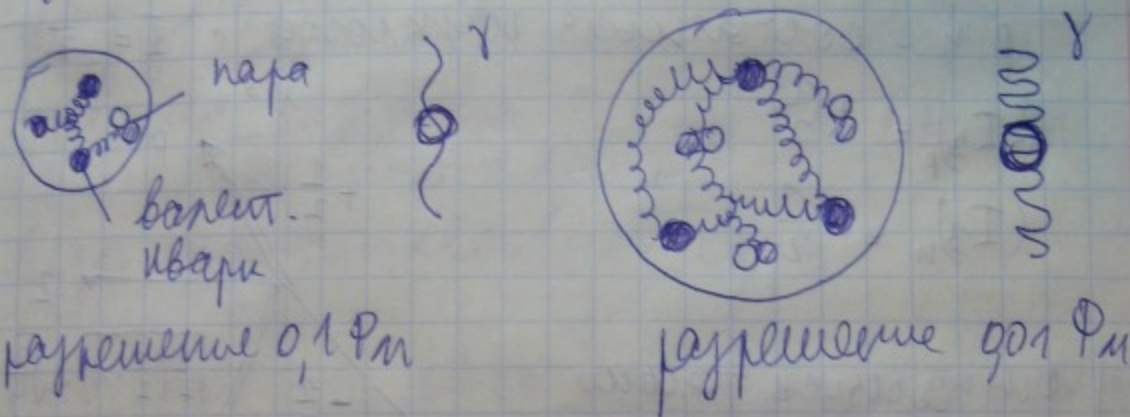
ЭСМ - электрослабая модель - объединение Э-м и слаб. брашмод. кварков и лептонов.

Переносчик Э-м брашмод - γ -квант.

Бозон без массы (\Rightarrow радиус действия ∞)
и без заряда (\Rightarrow с др. ~~состоянием~~ ^{фотонами} не взаимодействует)

см. билет 6 про вид γ -квантов.
см. билет 22 про экранировку.

Нуклон сост. из трех кварков, (валентных)
 между к-рами перектают глюоны,
 иногда рождаются виртуаль-
 ные кварк-антикварковые пары



Состав нуклона (любого адрона)

- 1) валентные кварки
 - 2) морские (плавающие) кварки
 - 3) глюоны
- } бесструктурные части адрона

U85
h288

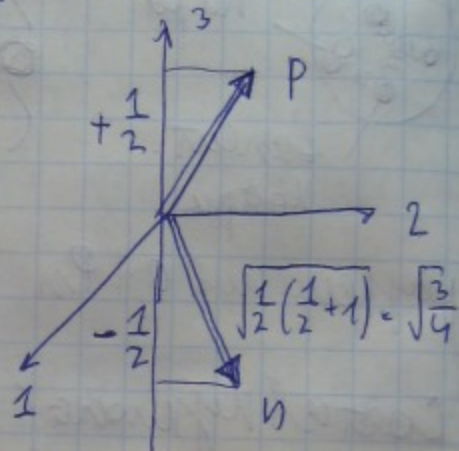
(20) Изомеризм. Изоспиновые мультиплеты
(изобарический)

Изометрия относительно
слабых взаимодействий

p, n - составляющие нуклона с $I = \frac{1}{2}$

$$(I_3)_p = +\frac{1}{2}$$

$$(I_3)_n = -\frac{1}{2}$$



Физ. смысл только
у третьей проекции.

$$g_N = e \left(\frac{1}{2} + I_3 \right)_N$$

заряд нуклона.

Изоспиновые пр. в
трехмерном евклидовом

Изометрия ядра

заряд
ядра:

$$Z \cdot e = \sum_{\alpha=1}^A e \left(\frac{1}{2} + (I_{\alpha})_3 \right) = e \left(\frac{A}{2} + I_3 \right)$$

где $I_3 = \sum_{\alpha=1}^A (I_{\alpha})_3 = Z \left(\frac{1}{2} \right) + N \left(-\frac{1}{2} \right) = \frac{Z - N}{2}$

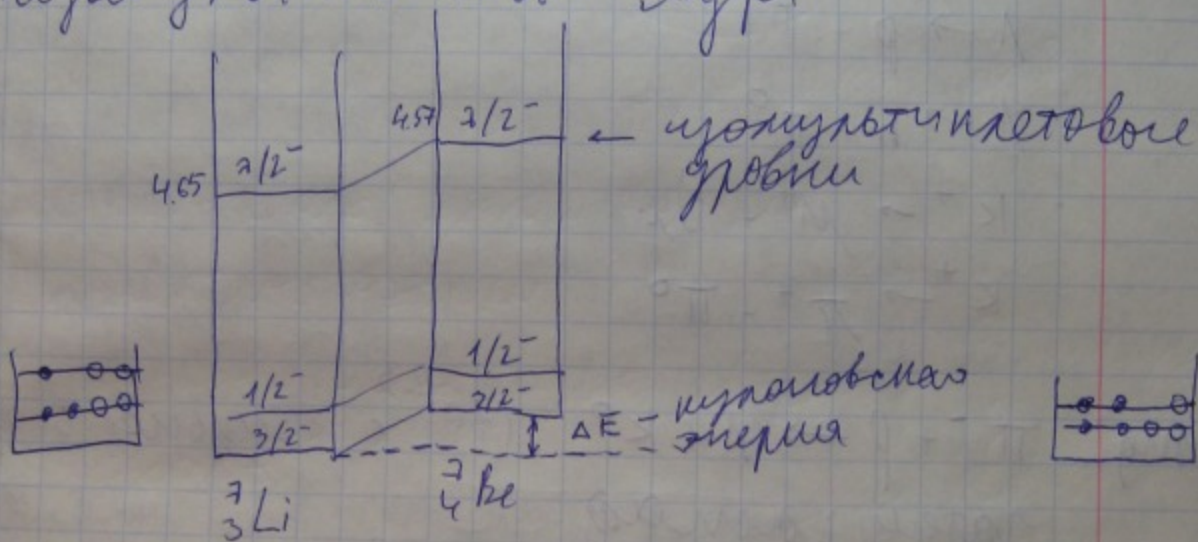
проекции изоспина ядра на ось изоспинового пр. в я

$$\vec{I} = \sum_{\alpha=1}^A \vec{I}_{\alpha}; \quad \frac{Z - N}{2} \leq I \leq \frac{A}{2} \text{ изоспин ядра}$$

$$I_{gs} \approx |I_3| \approx \left| \frac{Z-N}{2} \right|$$

цосний ядра
в осн. осн.
(дел q-ва)

- Цосний типлет - гасцель с
однак I, но разн I₃ (цр: π, ρ ; π^0, π^\pm)
ведут себя одинак, стожки
црешя ядра сн (цр NN, NP, PP)
и шмеро блужне масы
- Цосний типлетовые ядра



ИЗО

(21) Странность. Рождение и распад странных частиц

Странная частица рожд. парами; к-рост не лев. част-антич.; имеют большее время жизни

рожд: $p + p \rightarrow p + \Lambda + K^+$
затем распад:

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

$$\Lambda \rightarrow n + \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

рожд: $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$ (10^{-23} с, сильное: $0+0 \rightarrow -1$)
затем распад

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$
 (10^{-10} с, слабое: $-1 \rightarrow 0+0$)

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

странность частицы - число s-кварков

странность p, π = 0

странность Λ = -1

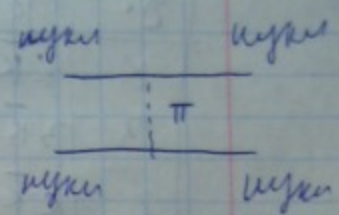
странность K⁰ = +1

странность сохр в сильных и сохр в слаб.

K 185
K 200

22) сильное взаимодействие.
кварки. Глюоны. Цвет.

см. билет 8 "св. ба NN-взаимодействий"
9 "первичная теория"

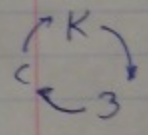


Кварки в барионах Δ^- , Δ^{++} , Ω^- как-ся
(ddd), (uuc), (sss)
в одних и тех же состояниях, паузи недоволен.
Введено понятие цвет $\{K, \bar{3}, C\}$

это те и объясняет существование только $qqq, \bar{q}\bar{q}\bar{q}$.

- Адроны абсолютно бесцветны.
- 3 антикварков-антицвета: $\bar{K}, \bar{3}, \bar{C}$.

$\Psi \begin{pmatrix} p(uud) \\ \bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d}) \\ \pi^-(d\bar{u} + d\bar{u} + d\bar{u}) \end{pmatrix}$



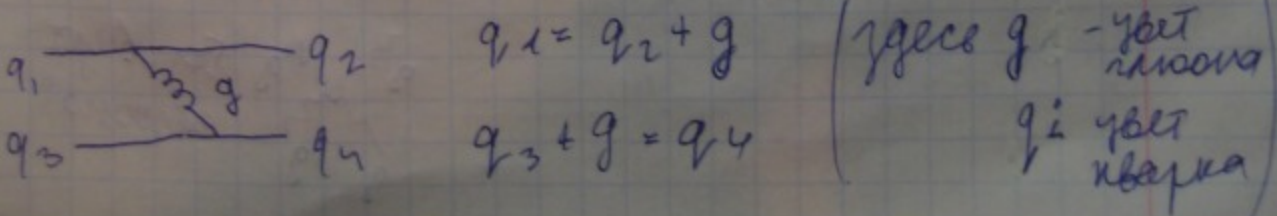
$\bar{K}\bar{K}$ - скрытый цвет

$\bar{K}\bar{K} + \bar{3}\bar{3} + \bar{C}\bar{C}$ - абсолютно бесцветна

Сильное взаимодействие - обмен безмассовыми

• глюонами g ($J=1, P=-1, I=0$) | несут цвет, в т.ч. скрытый ($\bar{K}\bar{K}$)

при ненулевом глюонном цвете сохраняется.



Возможные комбинации цвет-аромата

$\bar{3}$:	\bar{K}	$\bar{3}$	\bar{C}
K	$K\bar{K}$	$K\bar{3}$	$K\bar{C}$
3	$3\bar{K}$	$3\bar{3}$	$3\bar{C}$
C	$C\bar{K}$	$C\bar{3}$	$C\bar{C}$

много 8:

$K\bar{3}, K\bar{C}, 3\bar{C}, 3\bar{K},$
 $C\bar{K}, C\bar{3},$

$\frac{1}{\sqrt{2}}(K\bar{K} - 3\bar{3}), \frac{1}{\sqrt{6}}(K\bar{K} + 3\bar{3} - C\bar{C})$

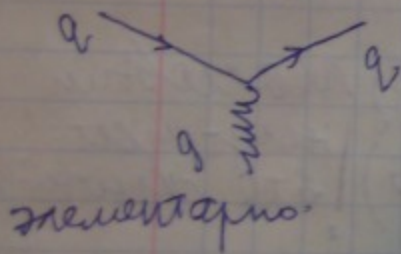
$K\bar{K} \leftrightarrow 3\bar{3} \leftrightarrow C\bar{C}$ свободно переходит. \uparrow
перемешиваются

комбинация $K\bar{K} + 3\bar{3} + C\bar{C}$ запрещена, так как по-настоящему имеет цветного заряда.

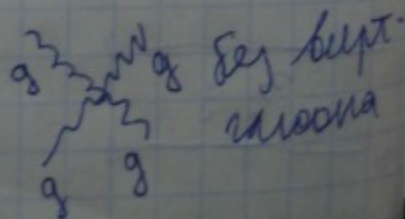
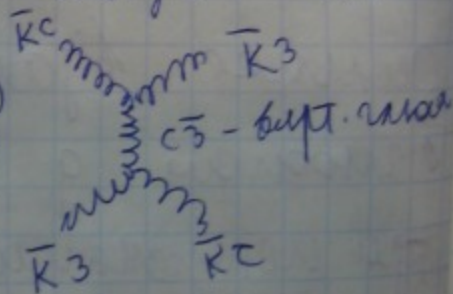
Глюоны безмассовые, но радиус действия ядер сил не ∞ , так глюоны рождаются на цветных кварках, захваченных в адронных адронах.

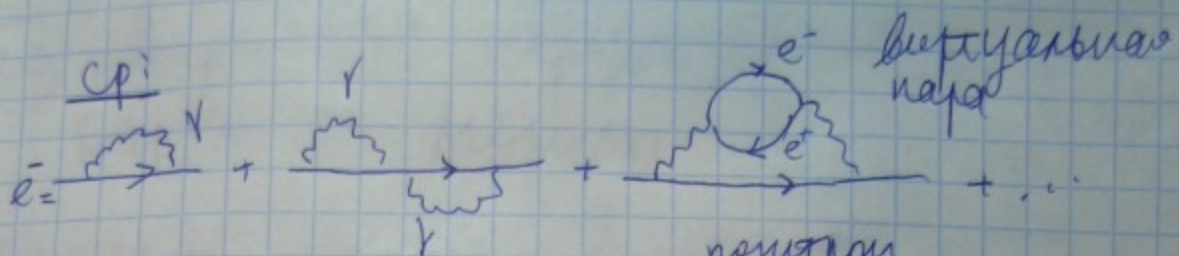
Сравнение

КЭД и КХД	
эл-и	кварк
заряд	цвет
фотон	глюон (8)
нейтральна	нейтральна (0)

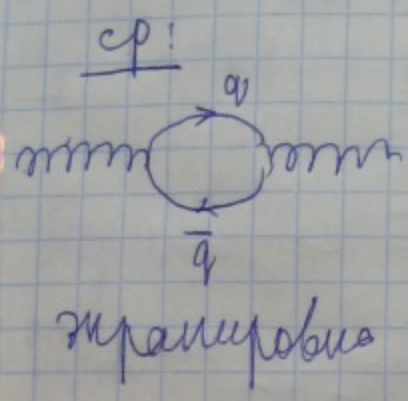


глюоны могут порождаться и испускаться глюонами

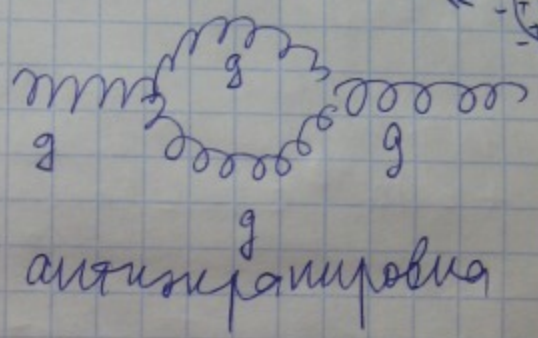




поиск
 блите и рождение
 4-ку; структура
 заряда.

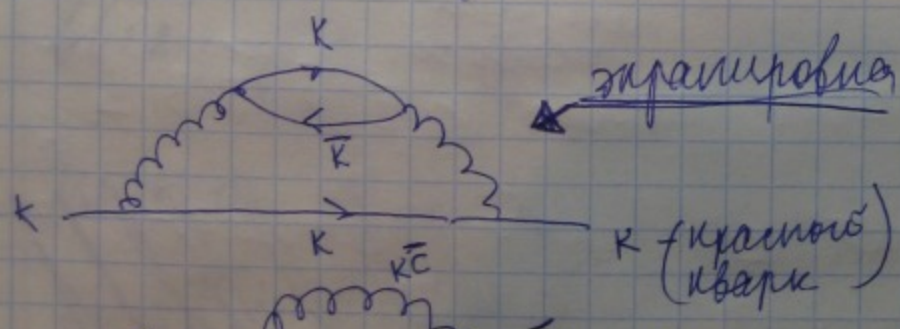


квант

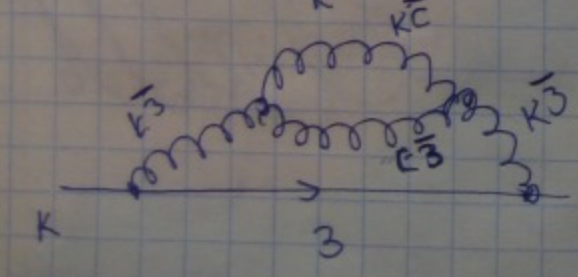


$K \nabla \Delta$: блите пробная частица - меньше
 квантов (больше бранно)

$K \times \Delta$: блите пробная частица - больше
 квантов



квант



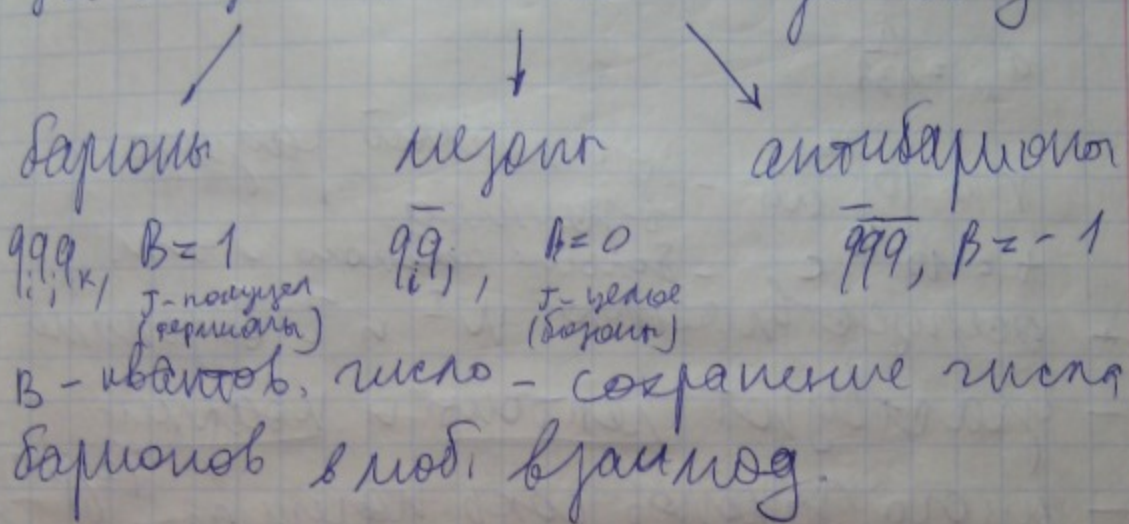
антиквант
 (более вероятный)
 процесс



23) кварковая структура адронов.
 Бароны, мезоны.

U157

адроны - системы связанных кварков.
 участвуют в сильном взаимодействии.



кварки: $J^P = \frac{1}{2}^+$, $B = \frac{1}{3}$.

Для ограничения комбинаций кварков
 ввели унитар. Адроны - бесцветные.
 (к3c)

~~$$\pi^- = \frac{1}{\sqrt{3}} (R\bar{u} + 3\bar{s} + d\bar{d})$$~~

- p (qud)
- n (udd)
- π^+ (u \bar{d})
- π^- ($\bar{u}d$)

K223

(24) Слабые взаимодействия
Промежуточные бозоны

$\alpha_w = 10^{-6}$ - константа слабого

$\alpha_s \approx 1$

$\alpha_e \approx \frac{1}{137}$

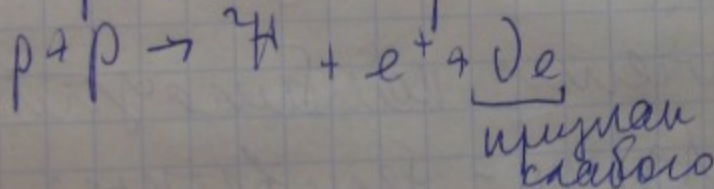
$r \approx 10^{-16}$ см - размер радиуса
бозона

$t \approx 10^{-10}$ с - больше слабого и э.м.

+ осуществляется W^\pm и Z бозонами

- участвуют лептоны и кварки (адроны)
- много законов сохр. нарушается.

- определяет реакции на Солнце!



- полностью равны: $Q, E, \vec{P}, \vec{J}, B, L_e, N$

см. билет 25: слабого распада

$W^- \left[\begin{array}{l} \bar{d}u, \bar{d}c, \bar{d}t, \bar{s}u, \bar{s}c, \bar{s}t, \bar{b}u, \bar{b}c, \bar{b}t \\ e^- \bar{\nu}_e, \mu^- \bar{\nu}_\mu, \tau^- \bar{\nu}_\tau \end{array} \right]$

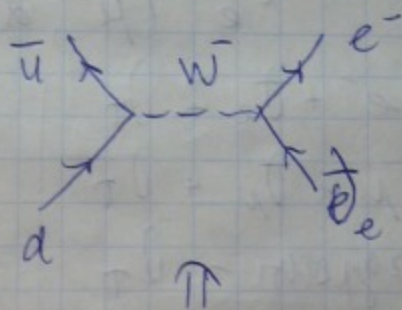
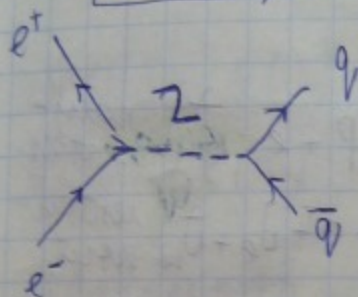
W^+ не анимировано



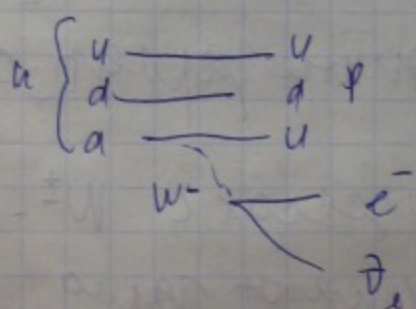
100%
 charged
 fermion

$2 \left[\begin{array}{l} u\bar{u}, d\bar{d}, e\bar{e}, s\bar{s}, b\bar{b}, t\bar{t} \\ e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, \nu_e\bar{\nu}_e, \nu_\tau\bar{\nu}_\tau, \nu_\mu\bar{\nu}_\mu \end{array} \right]$

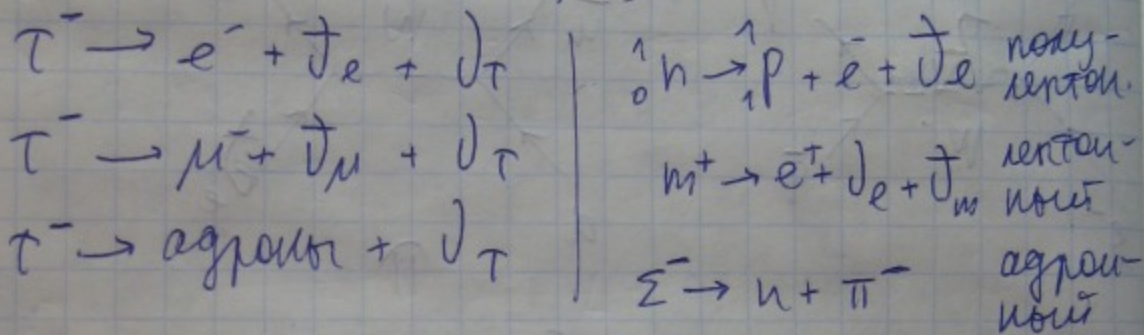
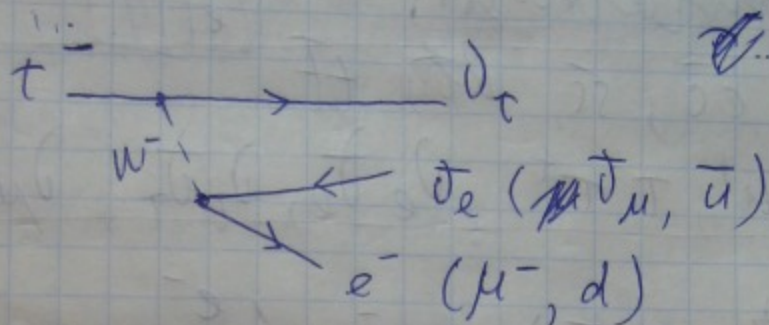
100%
 neutral
 fermion



W Z - транзитные
 80, 91 ГэВ $(J=1)$
 \Downarrow
 ан гольфманов мана



U101 (25) Слабые распады лептонов и кварков.



Лептонные заряды сохраняются

В процессах с W^\pm -бозонами фермионы меняют заряд; с Z -бозонами (нейтральными слаб. течениями) - не меняют

26) пространство вектная инверсия. ЛИН-
р-чётность.

$$\hat{P}\Psi(\vec{r}) = \Psi(-\vec{r})$$

$$\hat{P}\Psi(\vec{r}) = \rho\Psi(\vec{r})$$

(\hat{P} - оператор
пространство
инверсии.)

$\rho = 1$ или -1
простр. чётность.

$\Psi(-\vec{r}) = \Psi(\vec{r})$ чёт

$\Psi(-\vec{r}) = -\Psi(\vec{r})$ нечёт

$\rho = 1$ для всех кварков

чётность состоит из частей:

$$P = \pi_1 \dots \pi_A (-1)^{\sum_{\alpha} l_{\alpha}}$$

π - внутр. чёт. частицы
 l - орбит. момент частицы

$$(x, y, z, \vec{p}, \vec{J}) \xrightarrow{P} (-x, -y, -z, -\vec{p}, \vec{J})$$

Зак. сохр. чётности
мультипликативен.

спиновые
меняется
(полярный
вектор)

↑
аксиальный вектор
не меняется.

ЛММ-А
104

23) зарядовое сопряжение
 зарядовая четность. CP-инверсия
 (правила знаков всех аддитив. квант. чисел)

$$\hat{C}(x, p, J, Q, B, L, \text{аромат}) = \\ = (x, p, J, -Q, -B, -L, -\text{аромат}),$$

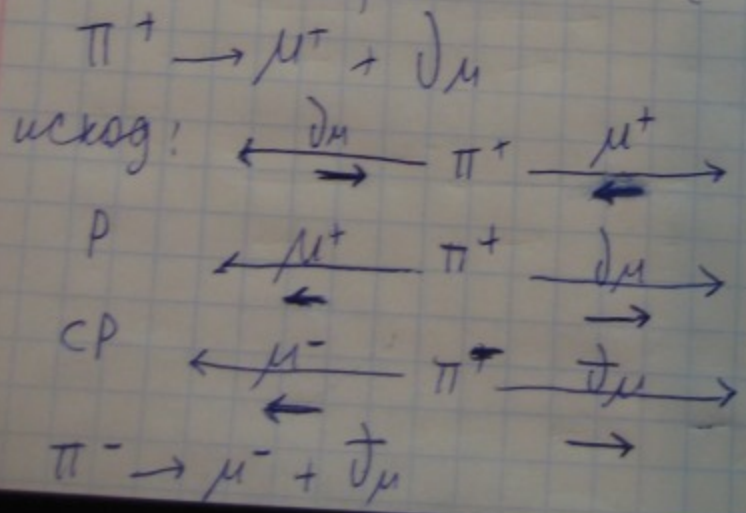
$$\hat{C} | \text{радиуса} \rangle = | \text{антирадиуса} \rangle \\ \hat{C} | \text{антирадиуса} \rangle = | \text{радиуса} \rangle$$

заряд. чет. сим-ия радиус

$$C = (-1)^{L+S} \quad \begin{array}{l} L - \text{цимлар. орбит.} \\ \text{момент} \\ S - \text{цимларный спин} \end{array}$$

$$C(\gamma) = -1$$

кабинированная (CP) четность



по распадам
 CP-инвар.
 ↑
 - симметрии
 южно в
 природе
 проявилась

у J_e, J_e разная коммутация \Rightarrow
в слабом взаимодействии нет зарядовой
симметрии.

$$\hat{c} J_e \equiv \hat{c} |L_e = +1, k_e = -1\rangle = |L_e = -1, k_e = -1\rangle$$

$$\hat{c} J_e \equiv \hat{c} |L_e = -1, k_e = +1\rangle = |L_e = +1, k_e = +1\rangle$$

но CP-инвариантность в слабом

несуществующая
расщепление

Истинно нейтральные расщепления:
все адроны имеют член $\neq 0$

и π расщепление = античастица.

У них есть изменение оператора \hat{c} :

паритетность ($\pi^0: +1, \pi^\pm: -1$)

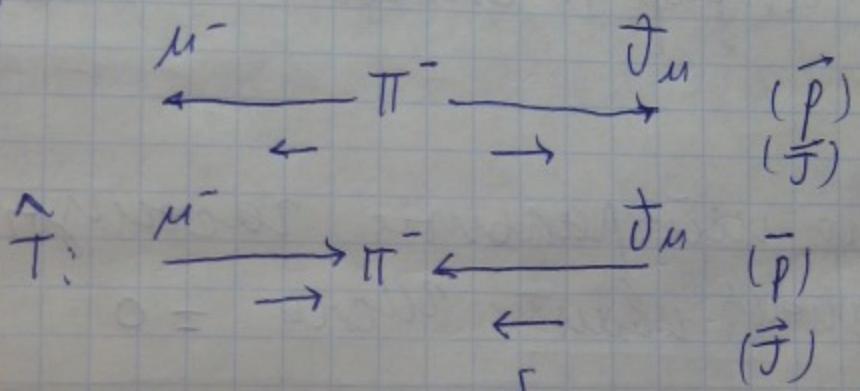
C-четность сохраняется в сильном и η -месе, но не сохраняется в слабом.

105
1414-37

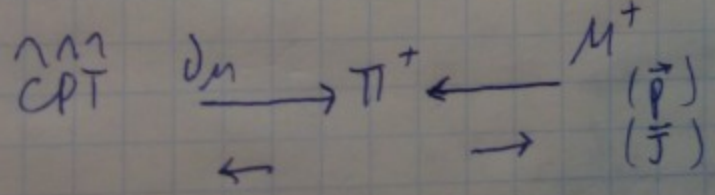
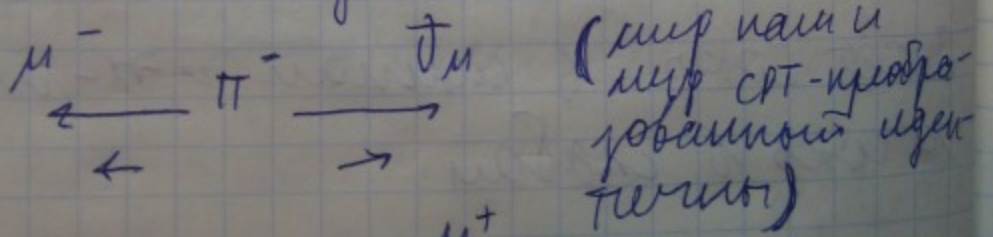
(28) обращение времени
CPT-теорема

$$(t, \vec{p}, \vec{J}, \vec{z}) \xrightarrow{\hat{T}} (-t, -\vec{p}, -\vec{J}, \vec{z})$$

при \hat{T} верная реакция и обрат-
реакция одинаковы, сечение тоже.



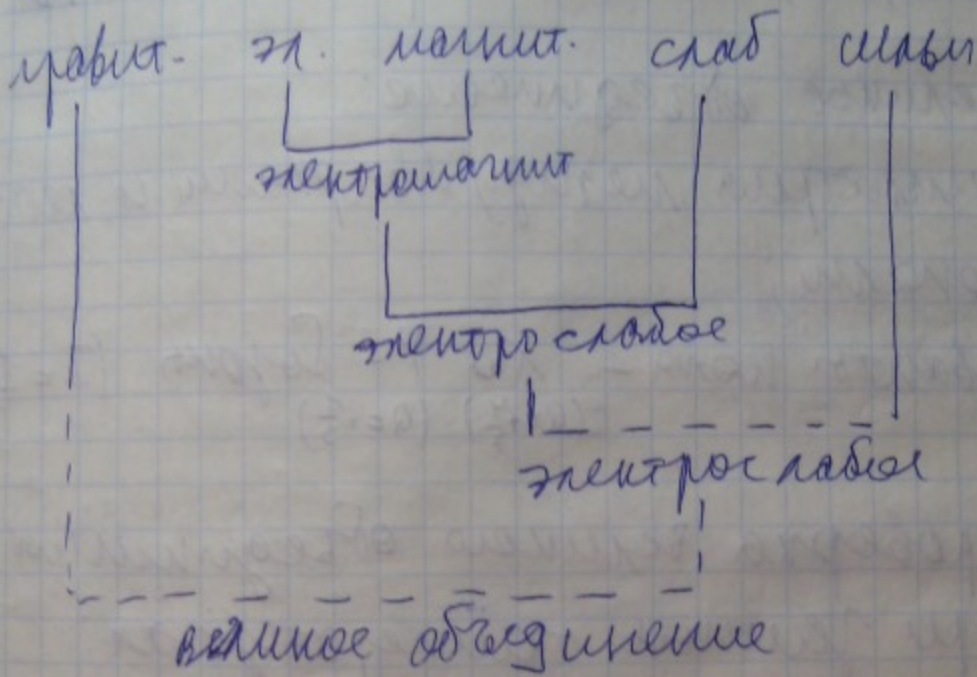
CPT-теорема: ^{люб} в квантовой асим-
метричности относительно CPT-преобр.
в любой последовательности.



Если CPT сохр (вроде, всегда она сохр)
а CP-не сохр \Rightarrow T не сохр.

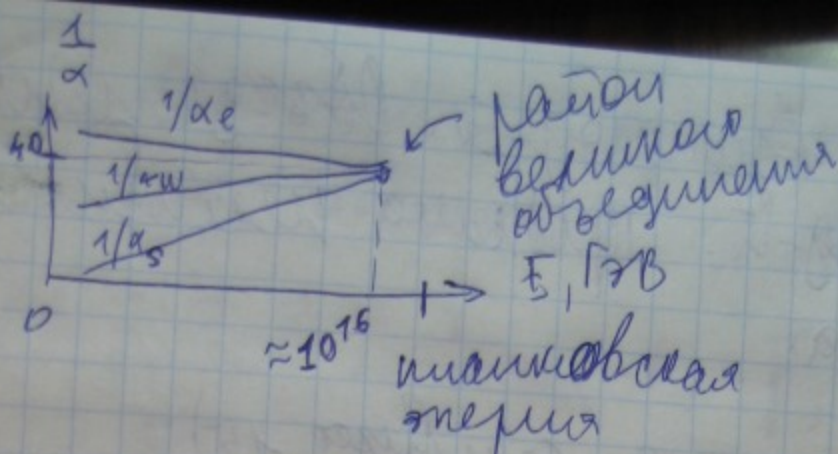
(29) Фунг. Грэнмод-я. Объединение ¹¹⁴⁹⁴₁₀₈
 Грэнмод-й. Проблема неустойчивости
 протона

Фунг. Грэнмод (см. ниже 15)



Константы Грэнмод. при разл. энер.

E, ГэВ	α_s	α_e	α_w
0,01	10	1/137	1/26
0,1	1	1/135	1/27
1	0,4	1/133	1/28
100	0,12	1/128	1/30



$$\alpha_e, \alpha_w, \alpha_s \rightarrow \frac{1}{40} \text{ при } E \rightarrow 10^{16} \text{ ГэВ}$$

Крупные объединения:

- симметрия между кварками и лептонами;
- кванты поля - X и Y - бозоны ($J=1$)
($Q=+\frac{4}{3}$) ($Q=+\frac{1}{3}$)

Проверка великого объединения при высоких температурах:

$$\left. \begin{aligned} p &\rightarrow e^+ + \pi^0 \\ n &\rightarrow \bar{p} + \pi^0 \end{aligned} \right\} \text{в особ. условиях:}$$

нарушение глч сохр
B и L (лептоном)

$$\begin{aligned} B &= 1 & B &= 0 \\ L &= 0 & L &= -1 \end{aligned}$$

но $\tau_p > 10^{32}$ лет, в р. жизни p. - не наблюдаем распад.

Нет фунд. закона, запрещающего
распад протона (легчайшего бариона).
Закон сохр барионного числа не в счёт,
так он эмпирический и не связан
ни с какой пространств-врем. симметрией.

И434

(30) Нуклеосинтез во Вселенной.
Ядер-реакции в звёздах.

Нуклеосинтез - обр-е новых ядер в естеств. условиях.

типы:

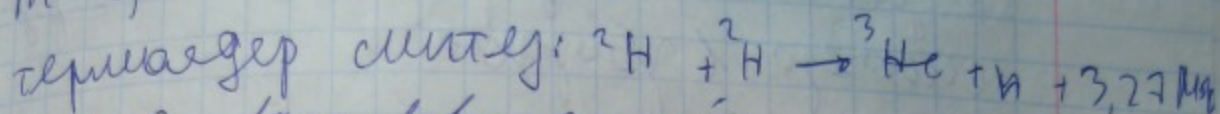
- 1) космохимический (звёздный)
1-3 мин после б. взрыва, термоядер-
синтез при 10^9 K ($p, n \rightarrow d, t, He, Li$)
- 2) в звёздах (2 млрд лет после б. взр.)
 - термоядер. синтез эл-тов от H до Fe;
 - захват нейтронов ядрами и образ-е
тяжёлых эл-тов (до U) при взрыве
звёзд (супернов)
- 3) космические лучи

Состав: H (91%), He (8,9) - во Вселенной
остальное (0,1)

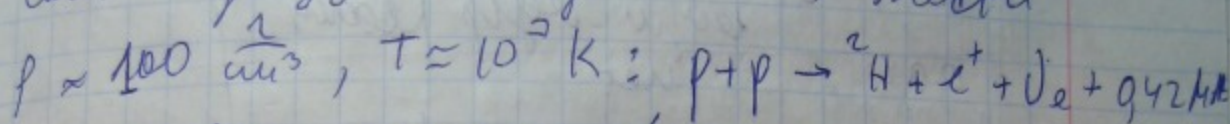
Синтез ядер в звёздах.

- статие
- нелевее облака (много-звёзд)

$m = 0,1 M_{\odot} \Rightarrow T \approx 10^6 \text{ K}$

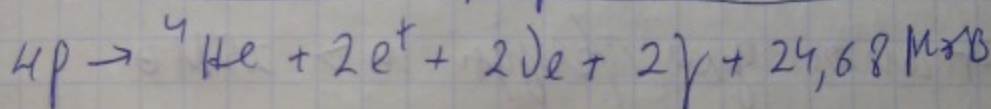
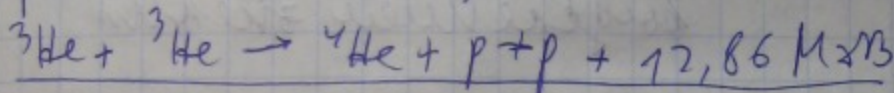
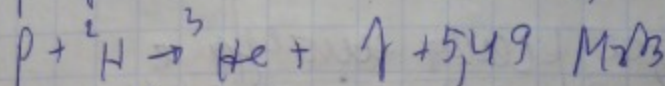
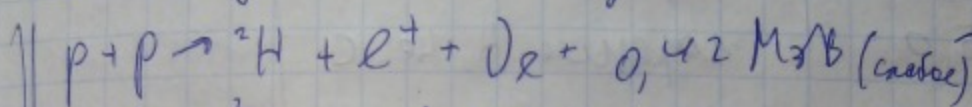


• стадии звезд. в-ва за сней температуры



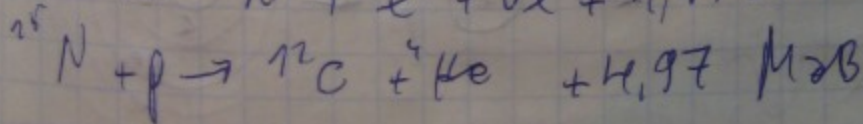
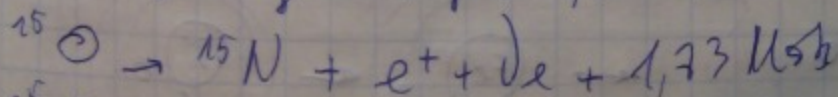
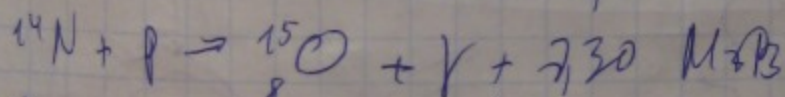
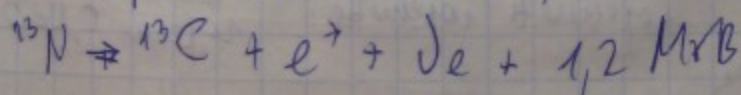
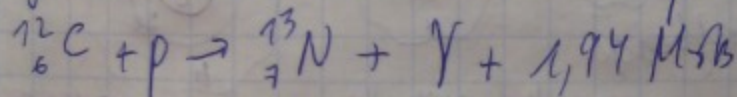
прекращение стадии звезд.

самая длинная стадия.

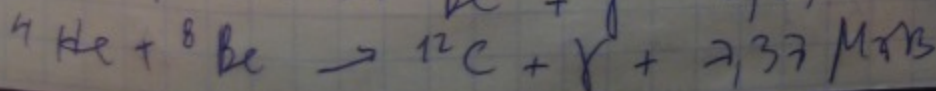
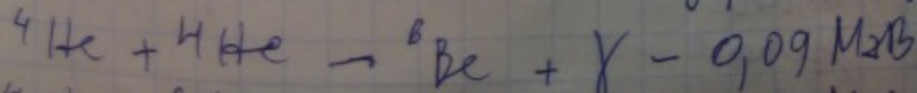


наиболее
активная
реакция
на Солнце
pp-цикл

для более тяжелой звезды: CNO-цикл



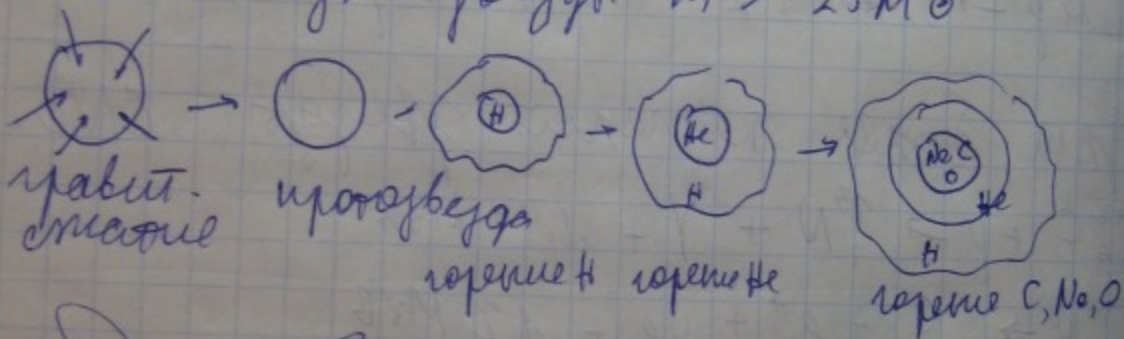
• стадии термоядерного сжигания, и далее



возможное эволюционное развитие звезды в зависимости от массы

m, M_{\odot}	возм. эволюция звезды
0,08	нет
0,3	горение H
0,7	горение H, He
5,0	горение H, He, C
25,0	все элементы синтезируются и выделяется энергия

Эволюция для звезды $m > 25 M_{\odot}$



нейтронная звезда или черная дыра



эволюция звезды в зависимости от массы

~~Нуклеосинтез~~

Этапы образования тяжелых ядер во Вселенной:

- Горение H, образование ${}^4\text{He}$ (pp-цепи)
- CNO-цикл. Взоргов в гелии под действием катализаторов C, N, O.
- Горение ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$
- α -процесс. Захват α , образование ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$,
- e-процесс. $T = 5 \cdot 10^9 \text{ K}$, разнообразие реакций вплоть до Fe и Ni .
- s-процесс. Последовательный захват нейтронов; затем β^- -распад
- r-процесс. Если скорость захв. нейтронов больше скор β^- -распада, ядро переполняется n и затем β^- распадается. Процесс в сверхновых.
- p-процесс. Нейтрондефицитные стабильные ядра несут при захвате p-высвобождения
- ~~r-процесс~~

горение = слияние ядер

3) Космические мур.
Состав и происх-е

К. мур (излучение) - частицы в межзвездном пр-ве. Они бомбардируют Землю.

К. муром называют по традиции поток ат. ядер ($^1\text{H} - \text{Ni}$)

- 1) галактические к. мур
- 2) солнечные к. мур
- 3) метagalaktические к. мур (извне галактики)

хар-ка	галактические	солнечные
поток	$\approx 1 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$до 10^6 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ во время вспышки
состав	1) ядерная композиция (P 95%, 4-5% He, 1% т.д.) 2) e^- 1% от числа ядер 3) e^+ 10% от числа e^- 4) \bar{p} < 0,01%	P 98-99% He 1,5%
энергия	$10^6 - 3 \cdot 10^{20} \text{ эВ}$	$10^5 - 10^{11} \text{ эВ}$

1) Первичные к. м. п. - до входа в атмосферу

2) Вторичные - в результате процессов взаимодействия с атмосферой созд. вторичные:

пионы, протоны, ^{нейтроны} нейтроны, мюоны, π -ионы,

позитроны, фотоны - каскад (широкий

атмосферный ливень. Адроны до Земли почти не доходят, превращаются в μ , ν , γ :

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$