

Зміст

1. Передісторія ядерної фізики. Основні властивості стабільних ядер.
2. Енергетичні співвідношення в ядерній матерії.
4. Властивості ядер.
6. Моделі ядерної матерії (структура ядра).
8. Модель ядра у формі виродженого Фермі-газу.
10. Оболонкова модель ядра.
13. Узагальнена модель ядра.
14. Характеристика внутрішніх сил.
15. Сильна взаємодія.
16. Схема дослідження мейона.
17. Ефект Казіміра.
20. Слабка взаємодія.
21. Причини великого інтервалу.
22. Спонтанний альфа-розпад.
26. Спонтанний поділ ядер.
27. Умови ділення важких ядер на основі гідродинамічної моделі.
29. Бета-розпад.
30. Гама-випромінювання.
31. Ефект Месбауера.
33. Ядерні реакції.
35. Переріз ядерної реакції.
37. Резонансні ядерні реакції за участю гама-квантів.
40. Ядерні реакції за участю нейтронів.
42. Ланцюгова реакція ділення важких ядер.
45. Конструкція ядерного реактора.
48. Реактор біжучої хвилі.
48. Некерований ядерний вибух.
49. Керований та некерований ядерний синтез. 50
52. Критерій Лоусона.
54. Шлях реалізації керованого термоядерного синтезу.
57. Систематика та природа елементарних частинок.
58. Квантова структура сисм. частинок.
60. Структурна теорія елементарних частинок.
62. Еволюція всесвіту.
65. Гравітаційне лінзування.
66. Сценарій розвитку гарячого всесвіту.
73. Схема еволюції дірок у залежності від...

1 Література:

- 1) Сивухин „Общий курс физики“, т. 5.
- 2) Малахов В. В. „Основы теории атомного ядра“
- 3) Широков Ю. М., Юдин К. Я. „Яд. физика“
- 4) Кащенко Г. М., Пылойко В. А. „Физика атом. ядра та частин.“, К Н У, 2008
- 5) Атаман та ядрна фізика у прикладах та заняттях, 2011

04.09.12.

Тристорія ядерної фізики. Основні в-ні стабільних ядер.

- 1896 - відкрита α -власивість, Беккерель
1911 - побудована планетарна модель атома
1919 - } Резерфорд
 } α ядра азота випускають важкі позитивно заряджені частинки - протони.

Кар-ки протона:

$$m_p = 938,2 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ г} = 1836,1 m_e$$

мас. помилк протона: $\mu_p = 2,79 \mu_n$, $\mu_n = \frac{e \hbar}{2 m_p c} \approx 10^{-13} \text{ ГГСЕ}$ - ядерний магнетон //

Маса \forall ядра краща масі протона:

$$M \approx A m_p$$

1932 - Чагвік, Гемп, Беккерель; відкриття

2 нейтронів; $m_n = 939,5 \text{ MeV} = 1838,6 m_e \approx 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ г}$

1933 - протон-нейтронна модель ядра, Яванен
 КО - Гейзенберг.

$A \leftarrow$ масове число = протон + нейтрон
 $Z \leftarrow$ заряд (к-ть протонів), A - масове число

$^{56}_{26}\text{Fe}$

Ядра (нукліди) поділяються на 4 типи:

- 1) $A = \text{const}$ - ізобари; ^3_2He - великий трійний; ^3_1T
- 2) $Z = \text{const}$ - ізотони; $^1_1\text{p} \equiv M^1$, $^2_1\text{d} \equiv D^2$; $^3_1\text{t} \equiv T^3$
 $^{56}_{26}\text{Fe}$ - 92%; $^{57}_{26}\text{Fe}$ - 2,2% (ізотоп); $^{58}_{26}\text{Fe}$ - 0,2% (діаметр); ^1_1p (протон); ^2_1d (дейтерій); ^3_1t (трицій)
- 3) $A - Z = \text{const}$ - ізотони
- 4) $A = \text{const}$
 $Z = \text{const}$, різ. характ. розміри - ізмери (спин, момент, форми)

$$Z_{\text{opt}} = \frac{A}{1,98 + 0,015 A^{2/3}} - \text{світловим ліній } Z \text{ та } A, \text{ коли}$$

ядра мають найбільшу стабільність.

$$Z > Z_{\text{opt}} \quad Z \text{ } X^A \rightarrow Z-1 \text{ } X^A + \beta^+ + \bar{\nu} \text{ - випром}$$

$$Z < Z_{\text{opt}} \quad Z \text{ } X^A \rightarrow Z+1 \text{ } X^A + \beta^- + \bar{\nu}$$

Шлях розпаду нейтрона: $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$

Енергетичні співвідношення в ядерній матерії

$$E_{\text{зв}} = Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2 - X(A, Z) m c^2$$

3. Атомна одиниця маси: $1 \text{ aom} = \frac{1}{12} M({}_6\text{C}^{12})$

Дефект маси:

- енергетичний: $\Delta M = M(A, Z) c^2 - A \frac{M({}_6\text{C}^{12})}{12} c^2$, MeV
- в одиницях масової тиса:

$$\Delta \equiv \frac{\Delta M}{\frac{M({}_6\text{C}^{12})}{12} c^2} = \frac{M(A, Z)}{\frac{M({}_6\text{C}^{12})}{12}} - A$$

$$\Delta M_n = 8071,43 \text{ KeV}$$

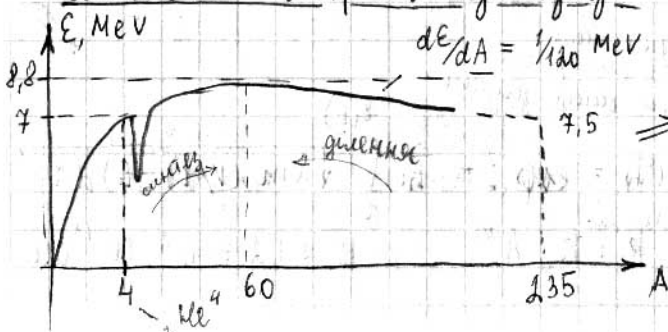
$$\Delta M_p = 7288,03 \text{ KeV}$$

$$\Delta_p = 0,007276, \quad \Delta_n = 0,008663$$

Позначі дефекти маси для всіх ядер:



Тиса енергії зв'язу: $E = \frac{\Delta E}{A}$



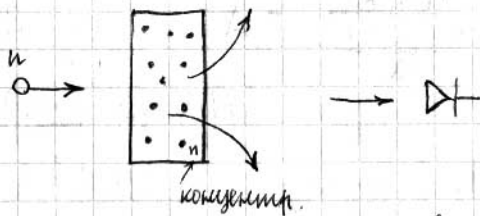
енергія зв'язу
зменшується
коши відношн
стали

Пластивості ядер.

1. Розмір ядер.

- Ембаргівання шв. нейтронами:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv} \approx \sqrt{\sigma}$$



$$dN = -N\sigma n dx$$

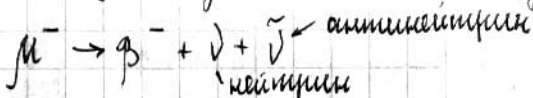
↑ кількість ядер, що розсіялись

$$N = N_0 \exp(-\sigma n x)$$

- метод мурашників:

Е ф-ла Бора: $E_n = \frac{Z^2 e^4 m_e}{2\hbar^2 n^2}$; $W_{nk} = \frac{Z e^2 m_e}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$

Вігеммі μ -мезони (1938 відкриті)



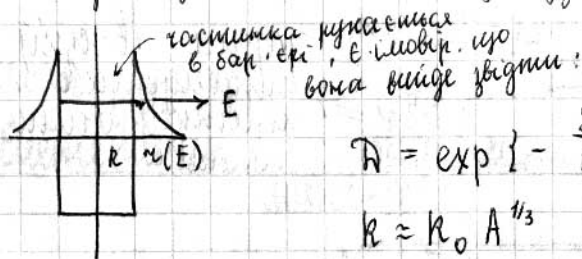
$$\bar{\nu} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ e}$$

$$m_\mu = 207 m_e$$

Радіус Боровської орбіти: $r_n = \frac{\hbar^2}{Z m_e^2} n^2$

Мішень окремлюється пучком мезонів \Rightarrow визм. поглин. аналізують спектор (радіуси) \Rightarrow розміри.

- дослідження \hbar -пропаду



$$R = \exp \left\{ - \frac{2}{\hbar} \int_R^{z(E)} \sqrt{2m(V(r) - E)} dr \right\}$$

$$R \approx R_0 A^{1/3}, \quad R_0 \approx 1,2 \div 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

5 Формула Ферми: $\rho = \frac{\rho_0}{1 + \exp(\frac{\epsilon - \epsilon_F}{kT})}$ - численн. розподіл нуклонів в ядрі

a - діаметр (координата) ядра, $a = 5,5 \cdot 10^{-14}$ см

$k = k_0 A^{1/3}$; $\rho_0 = 1,8 \cdot 10^{38}$ 1/см³ - типова концентрація ядерної матерії.

11.09.12

$$\bar{J} = \bar{L} + \bar{S}$$

$$j = \begin{cases} l + 1/2, & (\bar{S} \bar{L}) > 0 \\ l - 1/2, & (\bar{S} \bar{L}) < 0 \end{cases}$$

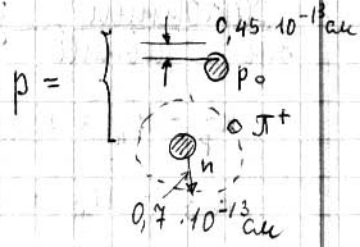
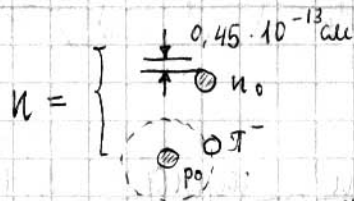
$$J_2 = \hbar \sqrt{j(j+1)}$$

Частинка повинна мати магнітний момент

$$M_2 = \frac{e \hbar}{2 m_e c}$$

$$\mu_n = \frac{e \hbar}{2 m_n c}$$

	j	M
n	$\hbar/2$	$-1,91 \mu_n$
p	$\hbar/2$	$2,79 \mu_n$
$d \equiv {}_1^2\text{H}$	\hbar	$0,86 \mu_n$
$t \equiv {}_1^3\text{H}$	$\hbar/2$	$3 \mu_n$
$\alpha \equiv {}_2^4\text{He}$	0	0
${}_{49}^{115}\text{In}$	$9\hbar/2$	$5,5 \mu_n$



$$m_u \approx 279 m_e$$

T - період переоборудування
 \pm - відповідні коэф. цього періода

$$\bar{M}_n = \left(1 - \frac{\pm}{T}\right) M_{n_0} + \frac{\pm}{T} (M_{p_0} - M_{T^{\pm}})$$

$$\bar{M}_p = \frac{t}{T} M_{\pi^+} + \left(1 - \frac{t}{T}\right) M_{\rho_0} = 2,79 \mu_0$$

$$\mu_{\pi^+} = \pm 7 \mu_0 \quad t/T = 0,3; \quad T = 10^{-23} \text{ c}$$

Дипольні моменти:

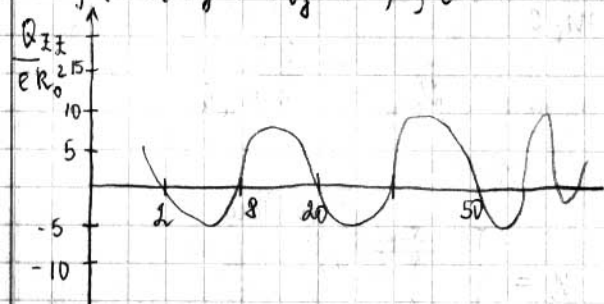
Якщо см-на дискретна:

$$\bar{D} = \sum_i e_i \bar{r}_i$$

$$\int \bar{r} \rho_e(\bar{r}) dV = \bar{D} - \text{неперервна.}$$

Квадратний момент: $Q_{ij} = \sum_i e_i (3x_i x_j - \delta_{ij} r_i^2)$

$$= \int (3x_i x_j - \delta_{ij} r^2) \rho_e dV$$



$$R = R_0 A^{1/3}$$

Барионний заряд: у протонів і нейтронів $\frac{1}{3}$, у античастинок $-\frac{1}{3}$.

$$n_p = n_n = 1$$

$$\sum_i n_i = \text{count} - 33 \text{ барион заряда}$$

$$n_{\bar{p}} = n_{\bar{n}} = -1$$

$$n_{\pi^+} = n_{\pi^-} = 0$$

$$p + \bar{p} \neq 2p^+ + \bar{p}$$

Моделі ядерної матерії (структура ядра)

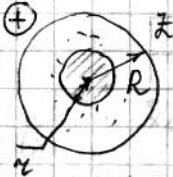
Гідродинамічна (континуальна) модель ядра:

7. Зпол.

$$Z; A - Z \equiv N$$

$$E_{\text{ягма}} = M(A, Z) c^2 = Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2 - E_1 A + 4\pi G S + \frac{3Z^2 e^2}{5R_0 A^{1/3}} + E_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A} \oplus$$

$$E_{\text{ягма}} = Z \bar{E}_1 = Z \int_0^R \frac{(Ze \frac{r^3}{R^3})}{r} 4\pi r^2 dr$$



$$\oplus \frac{\delta}{A^{3/4}}; \delta = \begin{cases} -101, & \text{нн} \\ 0, & \text{нн} \\ 101, & \text{нн} \end{cases}$$

н - норма; н - норма.

$$E_{\text{яг}} = Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2 - M(A, Z) = E_1 A - E_2 A^{2/3} - E_3 \frac{Z}{A^{1/3}} - E_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A} - \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

Титана см. зб'янку: $E = \frac{E_{\text{яг}}}{A} = E_1 - \frac{E_2}{A^{1/3}} - E_3 \frac{Z}{A^{4/3}} - E_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A^2} - \frac{\delta}{A^{7/3}}$

$$E_1 = 15,75 \text{ MeV}$$

$$E_2 = 17,8 \text{ MeV}$$

$$E_3 = 0,71 \text{ MeV}$$

$$E_4 = 94,8 \text{ MeV}$$

$$101 = 34 \text{ MeV}$$

Змагнелю E_{opt} по заданому Z на A :

$$\frac{\partial E}{\partial Z} = - \frac{2 E_3 Z}{A^{4/3}} + \frac{2 E_4 (A/2 - Z)}{A^2} = 0 \quad | A^{2/2}$$

$$- E_3 Z A^{2/3} + E_4 (A/2 - Z) = 0$$

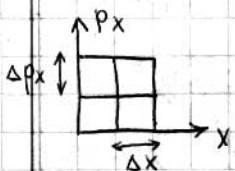
$$Z (E_4 + E_3 A^{2/3}) = \frac{E_4 A}{2} \quad | \frac{2}{E_4}$$

$$Z_{\text{opt}} = \frac{A}{2(1 + E_3/E_4 A^{2/3})} \approx \frac{A}{2 + 0,015 A^{2/3}} = \frac{A}{2 + 0,4} \quad (A = 125)$$

18.09.12

Модель ядра у ферми вырожденного

ферми - газу.



$$N_x = \frac{\Delta \Gamma}{2\pi \hbar} = \frac{\Delta p_x \Delta x}{2\pi \hbar}$$

$$\oint p_i dq_i = 2\pi \hbar n_i$$

$\int p_i dq_i \sim 2\pi \hbar$. Переходим до 3-х измер.

выражу:

$$N = g \frac{\int d^3 p \int d^3 q}{(2\pi \hbar)^3} - \text{количество квантов}$$

$g = 2f + 1$ - кратность вырождения

Для нуклонов $g = 2$ (фермионы)

$$N = 2V \int d\Omega \int_0^p p^2 dp \frac{1}{(2\pi \hbar)^3} = \frac{V \int_0^p p^2 dp}{\pi^2 \hbar^3}$$

$\frac{p^2}{2m} \gg kT$ - условия нерелятивизму

$p_0 c \gg kT$ - условия релятивизму

Плотность состояний у простора импульсов:

$$\rho_p = \frac{\partial N}{\partial p} = \frac{V p^2}{\pi^2 \hbar^3}; \quad p = \frac{\partial N}{\partial E} = \frac{\partial N}{\partial p} \frac{dp}{dE} =$$

$$= \rho_p \frac{1}{(\partial E / \partial p)},$$

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \Rightarrow \frac{dE}{dp}$$

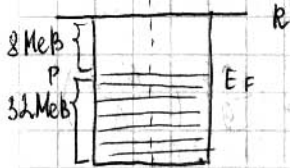
$$\frac{dE}{dp} = \frac{2\pi c^2}{2\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}} = \frac{pc^2}{E}, \text{ где } E = mc^2 \Rightarrow$$

$$\frac{dE}{dp} = p/m, \quad pE = \frac{\partial N}{\partial E} = \frac{V p m}{\pi^2 \hbar^3}$$

ΔE - средняя выдстань між рівнями

$$\Delta E = \partial E / \partial N = \frac{\hbar^2 v}{V p m}$$

Для нейтронов:



$$N = A - Z$$

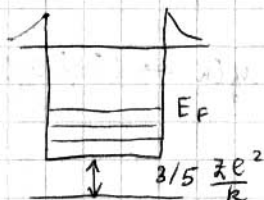
$$N = \frac{V P_{0N}^3}{3 \pi^2 \hbar^3} \Rightarrow p_{0N} = \sqrt[3]{\frac{3 \hbar^3 \pi^2 N}{V}}$$

$$E_{F_N} = \frac{p_{0N}^2}{2m} = \left(\frac{3 \pi^2 N}{V} \right)^{2/3} \frac{\hbar^2}{2m} =$$

$$\approx \left\| V = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \right\| = \left(\frac{9 \pi^2 N}{4 \pi A} \right)^{2/3} \frac{\hbar^2}{2m r_0^2} \approx 32 \text{ MeB}$$

Искали у нас $Z = A/2$

Протоны: треба врасувати поперек енергію відштовхування.



$$\bar{E}_k = \frac{3}{5} \frac{Z e^2}{R}; \quad p_{0Z} = \sqrt{\frac{3 \pi^2 \hbar^3 Z}{V}}$$

$$T_{F_Z} = \frac{p_{0Z}^2}{2m} = \left(\frac{9 \pi^2 Z}{4 A} \right)^{2/3} \frac{\hbar^2}{2m r_0^2}$$

$$\text{При } Z = A/2 \quad T_{F_Z} = 32 \text{ MeB}$$

$$\bar{T} = \frac{\int_0^P T(p) \frac{dN}{dp} dp}{\int_0^P \frac{dN}{dp} dp} = \frac{3}{5} E_F$$

Тобто кінетична енергія протон.-нейтр. газу:

$$T_{\Sigma} = N \bar{T}_N + Z \bar{T}_Z = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m r_0^2} \left(\frac{9 \pi}{4 A} \right)^{2/3} \{ N^{5/3} + Z^{5/3} \}$$

$$\begin{aligned} // \quad N - Z &= \delta & ; \quad N &= (A + \delta)^{1/2} \\ // \quad N + Z &= A & ; \quad Z &= (A - \delta)^{1/2} \end{aligned}$$

$$T_{\Sigma} = \frac{3 \hbar^2}{80 m r_0^2} \left(\frac{9 \pi}{4 A} \right)^{2/3} \frac{1}{2^{5/3}} \{ (A + \delta)^{5/3} + (A - \delta)^{5/3} \} =$$

10 $T_{\Sigma} = \left(\frac{5 \hbar^2}{80 m r_0^2} \right)^{2/3} \cdot (9\pi)^{2/3} \cdot \frac{A^{5/3}}{A^{2/3}} \left((1 + \delta/A)^{2/3} + (1 - \delta/A)^{2/3} \right) =$
 $= 5A \left(1 + \delta/A \cdot 5/3 + 5/3 \cdot 2/3 \cdot 1/2 \delta^2/A^2 + 1 - 5/3 \delta/A + 5/9 \frac{\delta^2}{A^2} \right) =$
 $= 25A \left(1 + \frac{5}{9} \frac{(N-Z)^2}{A^2} \right) = 25A + \frac{10}{9} \frac{\delta(N-Z)^2}{A}$
 В розрахунок на 1 нуклон: $\frac{T_{\Sigma}}{A} = 25 + \left(\frac{10\delta}{9} \right) \left(\frac{N-Z}{A} \right)^2 = \epsilon_4$

Облонова модель ядра.

$\frac{dN}{dE} \sim \rho \sim \sqrt{E}$

Базові закономірності в атомі:

- 1) \hbar єдиний квантовий центр - ядро
- 2) в нульовому наближенні не враховується взаємодія між електронами
- 3) дві принципи Паулі
- 4) спін-орбітальна взаємодія: jj зв'язок \leftrightarrow LS зв'язок

Базові закономірності в ядрі:

- 1) немає такого центру
- 2) лише сильна взаємодія.
- 3) дві принципи Паулі
- 4) лише сильна спін-орбіт. взаємодія: jj -зв'язок.

зв'язок вільного протону: $\bar{l} = \frac{1}{\sigma n}$

Зв'язок вільного протона нуклона в ядрі:

$\bar{\sigma} \approx \frac{\lambda^2}{2\pi}$; $\bar{E} = \frac{3}{5} F_{\max} = 20 \text{ MeV}$; $\lambda = 10^{-12} \text{ см}$; $\sigma = 10^{-25} \text{ см}^2$
 $n = 1,8 \cdot 10^{38} \text{ см}^{-3} \Rightarrow \bar{l} = \frac{1}{2 \cdot 10^{38} \cdot 10^{-24}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$

11 Штатал : $\mu_i = 10^{23} \text{ см}^{-3}$; $\sigma = 10^{-16} \text{ см}^2$; $\bar{v}_{\text{теор}} = 10^{-7} \text{ см}$
 $\bar{v} = 10 \div 30 \text{ см}$

Зривання в ядрі повністю заборонене.

Маліші маса: 2, 8, 20, 28, 52, 82, 126.

Ці істоти, які мають протони та нейтрони такої кількості, мають аномальні властивості

Двічі маліші елементи: ${}^2_2\text{He}^4$, ${}^8_8\text{O}^{16}$, ${}^{20}_{20}\text{Ca}^{40}$, ${}^{28}_{28}\text{Ca}^{48}$, ${}^{52}_{52}\text{Pb}$, ${}^{82}_{82}\text{Sn}$, ${}^{126}_{126}\text{Ba}$

- ${}^2_2\text{He}^4$ - 99,9988% - концентрація в природі
- ${}^3_2\text{He}$ - 0,00013%
- ${}^4_2\text{He}$ - нестаб.
- ${}^5_2\text{He}$ - нестаб.
- ${}^8_8\text{O}^{16}$ - 99,76%
- ${}^{17}_8\text{O}$ - 0,038%
- ${}^{15}_8\text{O}$ - нестаб.

10 стаб. ізотопів

Вони (маліші) дуже поширені в природі.

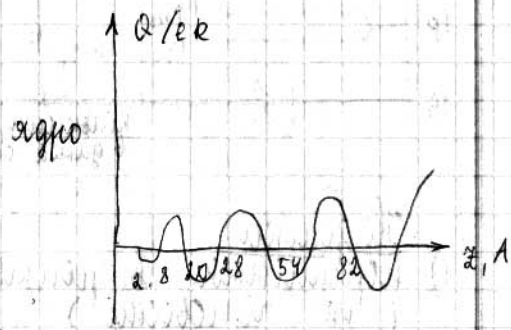
- Fe^{54} - 92,3%
- Fe^{55} - нестаб.
- Fe^{57} - 2,2%

Ядра, які лежать поблизу мал. ядер, мають більше стаб. ізотопів

$$Q_z = \int (3z^2 - r^2) \rho(r) dV$$

$Q = 0$ $Q > 0$
 $Q < 0$

квадратичний момент



25.09.12

Повна енергія ядра: $V = U + U_{LS}(r) + U_R(r)$

$U = \frac{V_0}{1 + \exp(-\frac{r-R}{a})}$, $R = r_0 A^{1/3}$, $a \approx 0,5 \cdot 10^{-13}$ см

U_{LS} зб. згодн орбіт. і спинв. мом.

пункт в якому, що у всіх цих пунктах.

$U_{LS}(r) = \frac{\hbar^2}{2m^2c^2} \frac{1}{2} \frac{\partial U_0}{\partial r} (5\bar{L})$

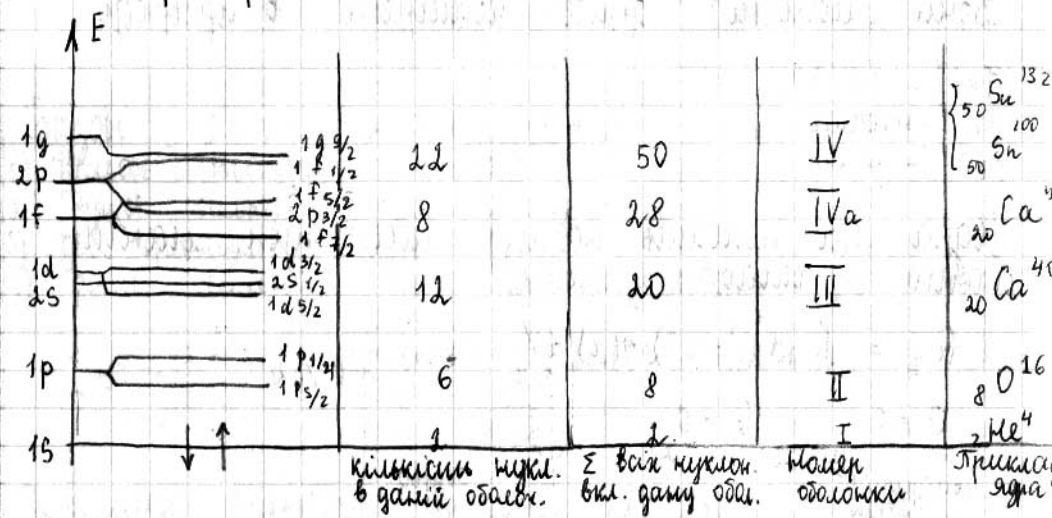
$U_R(r) = \begin{cases} \frac{(Z-1)e^2}{R} (\frac{3}{2} - \frac{1}{2} (\frac{r}{R})^2) & , r < R \\ \frac{(Z-1)e^2}{r} & , r > R \end{cases}$

кулонівський

$(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(r)) \Psi(r, \theta, \varphi) = E \Psi(r, \theta, \varphi)$

$\Psi = R_{nl}(r) P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi}$

Спектр рівнів:



Недашки:

- 1) порушення в регулярності заповнення рівнів (не чіткості)
- 2) деякі парно-парні ядра мають остаточно оболонку що залежить від орбіт. квантового числа. Мають не сферич. форму (квадрат. лан

- 3) модель дає заміншені значення квадрату.
маленьку.
- 4) час життя в моделі значно менше, ніж очікувалося.

Упрощена модель ядра.

(за основу обрано модель фінансних країн моделі)

$$\Delta T = \frac{L^2}{2m v^2} = \frac{\hbar l(l+1)}{2m R^2} = \frac{10^{-54} \cdot 2 \cdot 10}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-24} \cdot 3 \cdot 10^{-23}} =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ ерн} \cdot \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-12}} = 0,1 \text{ МеВ}$$

$l = 4$
 $A = 100$
 $R \approx 6 \cdot 10^{-13}$



Оцінимо ΔT :

Нехай $l = 4$, $A = 100$, $R = 1,3 \cdot 10^{-13}$, $4,5 \times 6 \cdot 10^{-13}$

$$\Delta T = \frac{10^{-54} \cdot 2 \cdot 10}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-24} \cdot 3 \cdot 10^{-23}} = 0,16 \cdot \frac{10^{-53}}{10^{-47}} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ ерн}$$

$$\cdot \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-12}} = 0,1 \text{ МеВ}$$

За проміжок ΔT відбувається розпадання ядра.

Хвильова ф-ція всього ядра:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{vmatrix} \Psi_{n_1}(\vec{r}_1) & \Psi_{n_1}(\vec{r}_2) & \dots & \Psi_{n_1}(\vec{r}_N) \\ \Psi_{n_2}(\vec{r}_1) & \Psi_{n_2}(\vec{r}_2) & \dots & \Psi_{n_2}(\vec{r}_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_{n_N}(\vec{r}_1) & \Psi_{n_N}(\vec{r}_2) & \dots & \Psi_{n_N}(\vec{r}_N) \end{vmatrix}$$

1.4 Характеристика внутримышечных сил

Классификация сил взаимодействия:

1) гравитационна	$\Delta t = 10^9 \text{ c}$	через коэф. 10^{-33}
2) слабка	$\Delta t = 10^{-10} \text{ c}$	10^{-44}
3) електростатична	$\Delta t = 10^{-21} \text{ c}$	10^{-3}
4) сильна	$\Delta t = 10^{-24} \text{ c}$	1

Δt - типовий час характерною типу взаємодії

$\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$; $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

$\Delta E = \frac{\hbar^2 \Delta \omega}{\hbar} \approx \frac{\hbar}{2 \Delta t}$ - можливість випромінювання

$\Delta x = \frac{c \Delta t}{2} = \frac{c}{4 \hbar \Delta \omega}$ - відстань, на яку може рухнутися частина (протон) від заряду, помітний повороту

$\Delta t \approx \frac{1}{2 \Delta \omega}$

Використов. співвідношення : $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \Big|_{m=0}$

$= pc \Rightarrow E^2 = p^2 c^2$

Оператор : $\hat{E} = i \hbar \frac{\partial}{\partial t}$; $\hat{p} = -i \hbar \nabla$

$\Delta \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \varphi = 0$ - рівняння ел/м поля без джерела

$\Delta \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \varphi = 4\pi \rho_e$ - р-н Д'Аламбера

При $\omega = 0$, $\frac{\partial}{\partial t} = 0 \Rightarrow \Delta \varphi = 4\pi \rho_e$, де $\rho_e = q \delta(\vec{r})$
поле $\varphi = e/r$

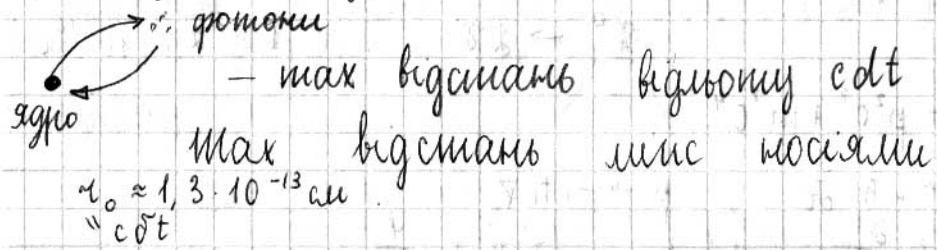
E-я взаємод. з-ос зар. : $V = q \varphi = \frac{e^2}{r}$

Сильная взаимодействие

Властивості:

- е-я притягуються на великій відстані і е-ею відштовх. на малій;
- короткодіючі;
- її величина більша, ніж кулонівська взаємодія;
- має спінову та спірбитаьну взаємод.;
- спінова взаємодія інваріантна віднос заряду;
- характеризується насиченням.

Част. що приймають участь у сильній взаємодії — адрони (протони, нейтрони)

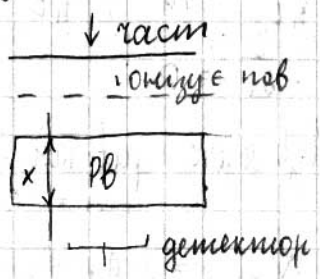
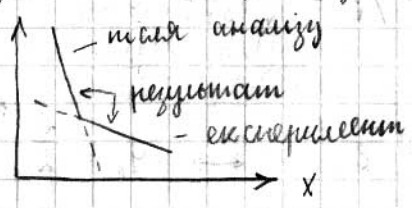


$$\delta E = \frac{hc}{2r_0} = \delta m \cdot c^2 \Rightarrow \delta m \approx 200 \div 250 \text{ ме}$$

маса нукл сильної взаємод.

Крім того має бути $S_z = 0$

У 1936 - 1937 рр. було відкрито част. з $m_\mu = 207 \text{ ме}$, звани μ -мезон = мезон.



16 схема дослідження мезона

$$p + p + \Delta E = p + n + \mu^- + \tilde{\nu}_\mu - \text{утворення мезона}$$

$\tilde{\nu}_\mu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ c}$ - час життя

$$\mu^\pm \rightarrow \beta^\pm + \nu_e + \tilde{\nu}_e - \text{розпад мезона} \Rightarrow \mu^- \text{ ферміон,}$$

якога нуклеона бозон бозони

$$p + p + \Delta E \rightarrow 2p + X$$

Це виявилось π^\pm, π^0 - мезони (вони є бозонами)

$$q = \pm e ; S_z = 0 ; m_\pi = 273 m_e$$

Розпад част.: $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \begin{cases} \tilde{\nu}_\mu \\ \nu_\mu \end{cases} \quad \tau = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ c}$

$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad \tilde{\tau} = 2,8 \cdot 10^{-16} \text{ c}$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$E \rightarrow i \hbar \frac{\partial}{\partial t} ; p \rightarrow -i \hbar \nabla$$

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} = -\hbar^2 c^2 \Delta + m^2 c^4 \quad \left| \frac{\psi}{\hbar^2 c^2} \right.$$

$$\Delta \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi = 0$$

$$p_{\pi^\pm} = g_{\pi^\pm} + \delta(\vec{r}) \quad k^2 = 1/\lambda^2$$

$g_{\pi^\pm} = \sqrt{10} k e$ - величина піонного заряду

$$\frac{g_{\pi^\pm}}{\hbar c} = 10 ; \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137} ; g_{\pi^\pm}/e = \sqrt{1370} \approx 35$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

Вузь атоку рівня: $\psi_\pi = \frac{g_{\pi^\pm}}{2} e^{-2/\lambda} \leftrightarrow \psi_e = \frac{e}{2}$

$\lambda = 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}$

$$W_{\pi^\pm} = -g_{\pi^\pm} \psi_\pi = -\frac{g_{\pi^\pm}^2}{2} e^{-2/\lambda} , \quad \tau \geq 0,4 \cdot 10^{-13} \text{ c}$$

Три $\tau < 0,4 \cdot 10^{-13} \text{ см}$

17. Якіс частинки 3: η -мезон, ρ -мезон, ω -мезон.

$$m_\eta = 549 \text{ MeV}$$

$$m_\rho = 770 \text{ MeV}$$

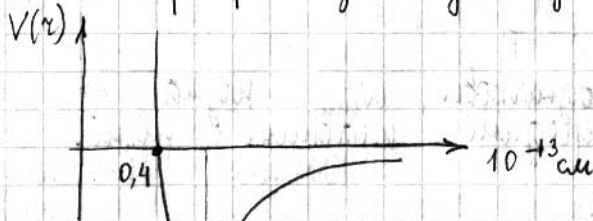
$$m_\omega = 782 \text{ MeV}$$

радіус екранув.: $\lambda_\eta = 0,36 \cdot 10^{-13} \text{ см}$

$$\lambda_\rho = 0,25 \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

$$\lambda_\omega = 0,25 \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

Заряд-р взаємодії від відстані:



Поміж е. і маг. моменти в протонах і нейтронах залежно від радіуса (з урахування цього вище сказано):

Ел. заряд:

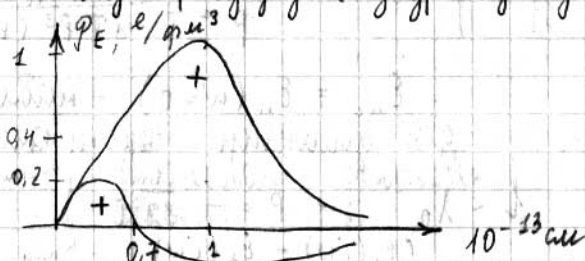
$$\sqrt{\langle r_e^2 \rangle} |_p = (0,86 \pm 0,01) \text{ фм}$$

$$\sqrt{\langle r_e^2 \rangle} |_n = (0,1 \pm 0,01) \text{ фм}$$

$$\sqrt{\langle r_m^2 \rangle} |_p = (0,86 \pm 0,06) \text{ фм}$$

$$\sqrt{\langle r_m^2 \rangle} |_n = (0,89 \pm 0,07) \text{ фм}$$

маг. заряд



$$\phi \cdot \omega = 10^{-13} \text{ см}$$

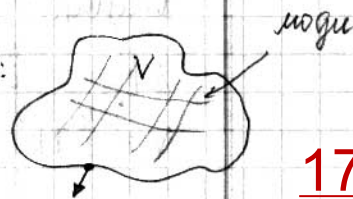
Ефект Казіміра:

2 металеві пластини, що знаходяться у вакуумі притягуються:

$$P = -\frac{\partial W^0}{\partial x} = -\frac{F}{S} = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 e^4}$$



E об'єм (резонатор):



Линейна густина енергії: $\frac{\partial h}{\partial w} = \frac{V w^2}{\pi^2 c^3}$
 Повна енергія циліндра: $E = V \int_{w_{\min}}^{w_{\max}} \frac{h w}{2} \frac{\partial h}{\partial w} dw$

Мін. частота - функція об'єму: $w_{\min} = f(V)$

тиск, який буде стисненнями нає на поверхні об'єма: $\Pi = \frac{\partial E}{\partial V} = -P$

w_{\max} - найвища однакова, w_{\min} - найнижча \Rightarrow тиски ззовні; всередині тиски різні.

Розглянемо варіант:



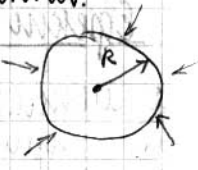
Якщо $l > \lambda_0$, то тиску: $P = - \frac{KT \cdot (\epsilon_{10} + \epsilon_{30}) (\epsilon_{20} - \epsilon_{30})}{8\pi l^3 (\epsilon_{10} + \epsilon_{30}) (\epsilon_{20} + \epsilon_{30})}$

$\epsilon_{n0} = \epsilon_n(w=0)$ - набл. дуже низьких частот для діелектр. проникності

$l < \lambda_0$; $P = - \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \int_{w_{\min}}^{w_{\max}} S(w) dw$
 $S(w) = \frac{(\epsilon_1(iw) - \epsilon_3(iw))}{(+)} \cdot \frac{(\epsilon_2(iw) - \epsilon_3(iw))}{(+)}$

Якщо: $(\rightarrow \leftarrow)$ - сила притягування
 $(\leftarrow \rightarrow)$ - відштовхування.

$\Pi|_{r > R} = - \frac{\partial}{\partial V} V \int_0^{w_{\max}} \frac{h w}{2} \frac{\partial h}{\partial w} dw \equiv F_1$
 $\Pi|_{r < R} = - \frac{\partial}{\partial V} V \int_{w_{\min}}^{w_{\max}} \frac{h w}{2} \frac{\partial h}{\partial w} dw = F_2$

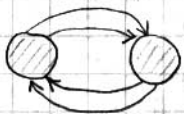


Результуюча сила (які діють на зовн. та внутр. поверхні)

$\Delta F = - \frac{\partial}{\partial V} V \int_0^{w_{\min}} \frac{h w}{2} \frac{w^2}{\pi^2 c^3} dw = / w_{\min} = \frac{2\pi c}{2\pi R} = \frac{c}{R}$
 $V = \frac{4}{3} \pi R^3$; $R = (\frac{3V}{4\pi})^{1/3}$; $/ = - \frac{\partial}{\partial V} V \frac{\hbar}{2\pi^2 c^3} \frac{w^4}{4} \Big|_0^{w_{\min}} =$

$$= - \frac{\partial}{\partial V} \frac{V h}{8 \pi^2 c^3} \frac{c^4}{R^4} = - \frac{\partial}{\partial V} \frac{h c}{8 \pi^2} \frac{(3/4 \pi)^{-4/3}}{V^{1/3}} \dots$$

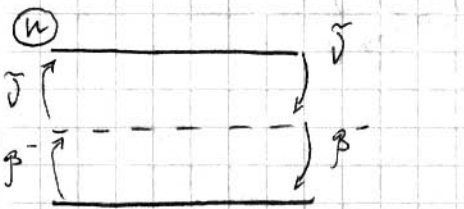
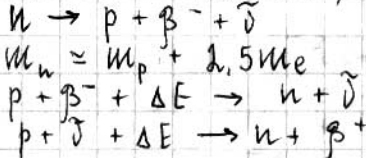
сильно притягивая; виртуальн. → наличие виртуальных частиц (обмен π -мезонами)



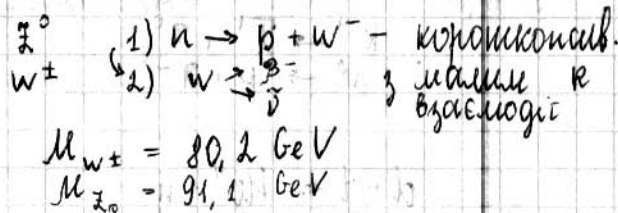
⇒ об. виртуальной поля → притягиваемые виртуальное поле - физ. объект, который порождает.

Слабая взаимодействия

(на 10^{15} слабее, чем сильная)



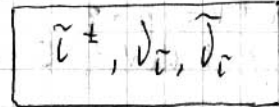
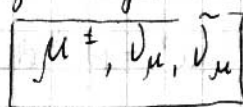
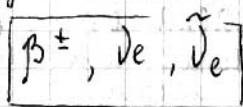
носители слабой взаимодействия - калибровочные векторы бозоны.



$$W^\pm R = 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}$$

$$\begin{aligned} M_{W^\pm} &= 80.2 \text{ GeV} \\ M_{Z^0} &= 91.1 \text{ GeV} \end{aligned}$$

Лептоны - τ -ки, які не приймають участі у сильній взаємодії.



лептоны

20 таблца взаємодія.

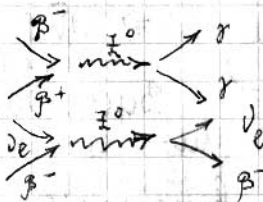
1) лептонна:

$$\begin{aligned} \cdot \mu^- &\rightarrow \beta^- + \bar{\nu}_{e\mu} \\ \cdot \tau^- &\rightarrow \beta^- + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\tau \end{aligned}$$

аніляція: $\beta^+ + \beta^- = 2\gamma$

кричає

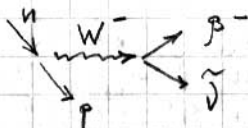
розсіяння: $\nu_e + \beta^- \rightarrow \nu_e + \beta^-$



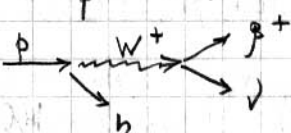
Діаграми Фейнмана:

2) нуклеонна:

$$\cdot n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$$



$$\cdot p + \Delta E \rightarrow n + \beta^+ + \nu$$



3) мезонна таблца (піоніони)

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

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

//

$$d + t = Me^4 + n$$

$$E = 100 \text{ keV}$$

$$G = 5 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 5 \text{ бч}$$

сильна взаємод.

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$n + \bar{\nu} = p + \beta^-$$

$$E = 1 \text{ MeV}, G = 10^{-43} \text{ cm}^2 = 10^{-19} \text{ бч}$$

слабка вз. (мала шв., час машин)

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-, \Delta E = 100 \text{ GeV}$$

$$G = 10^{-27} \text{ cm}^2$$

керівні краєви:

$$21 \gamma = \beta^0 \cos \theta_w + w^0 \sin \theta_w$$

θ_w - кут Вайбена

$$z^0 = -\beta^0 \sin \theta_w + w^0 \cos \theta_w$$

$\theta_w = 0$ для сильної

09.10.12

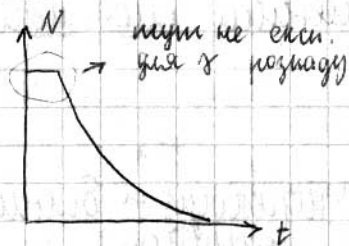
К. р.
через
ядро.

α, β, γ розпади; спонтанний поділ; кріон-ма; нейтронна радіоактивність.

Вестаб. ядра беруть участь в р/а перетв.

$$\Delta N = -N(t) \lambda \Delta t$$

$$\Delta t \rightarrow 0 \quad dN = -N(t) \lambda dt \Rightarrow N(t) = N(0) e^{-\lambda t} \quad \text{— спонт. поділ}$$

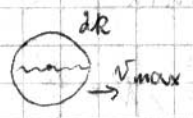


Середній час життя

$$\bar{t} = \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t \frac{dN}{dt} \cdot dt}{\int_0^{\infty} \frac{dN}{dt} \cdot dt} = \frac{1}{\lambda}$$

зменшення кількості ядер в е разів

Зменшен. кільк. ядер в 2 рази:



$$T_{1/2} = \ln 2 \cdot \bar{t} = \frac{\ln 2}{\lambda} < \bar{t}$$

$$10^{-22} \text{ c} = \frac{2R}{v_{\max}} < T < 10^{11} \text{ років} \approx 10^{19} \text{ сек}$$

кільк. зверсу не обчисл. ; $\frac{T_{\max}}{T_{\min}} = 10^{40}$

$${}^{238}\text{U}, \quad \bar{t} = 7 \cdot 10^9 \text{ років} = 2,1 \cdot 10^{17} \text{ c}$$

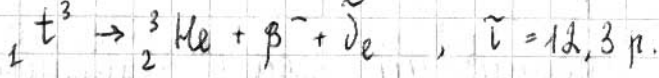
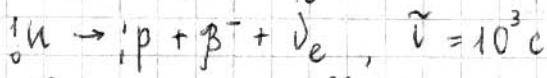
$$10^{-22} \text{ c} < \bar{t} < 10^{18} \text{ c}$$

Тривалий такого великого інтервалу.

1) наявність кулонівської бар'єру (для заряд. частинки)

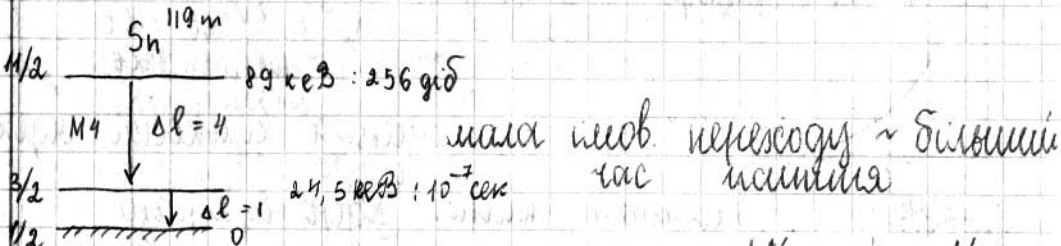
22 мала інтенсивність α , β , γ дуже яскраві
випроб. розпад;

сильна - короткі часи життя; слабка - великі



3) мала енергія, що виділяється при розпаді - мала енергія, що виділяється, більше час життя.

4) велика різниця спінів між станом, мала яскраві випроб. радіоактив. перехід
більша різниця спінів \rightarrow менша шов. перех.



мала шов. переходу ~ більший час життя

Активність джерела: $\lambda = - \frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{N}{\tau}$

Беккерель (Ci) $1 \text{ Бк} = 1 \text{ розп./с}$

кюри $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ розп./с}$ (актив. Ra²²⁶)

Спонтанний α -розпад

$\lambda_{\alpha} \tilde{\nu} = C + \frac{B}{\sqrt{E}}, \quad \tilde{\nu} \sim \exp(B/\sqrt{E})$

Властивості α -розпаду:

1) має місце для 20х типів ядер:

23 > 82, A > 110 i при 100 < A < 120 (редко-земельні Sm, Dy, Ho, Er)

2) при α -розп. випромін. частинки з енергією:

$$E_{\alpha} = 4 \div 9 \text{ MeV} \quad \text{при} \quad A > 110$$

$$E_{\alpha} = 2 \div 4 \text{ MeV} \quad \text{при} \quad 100 < A < 120$$

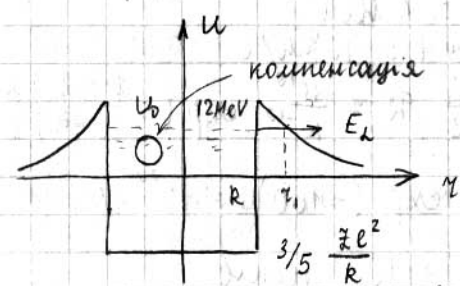
3) час життя: $10^{-7} \text{ сек} < \tau_{\alpha} < 10^{17} \text{ сек}$

зменшення $\frac{\Delta E_{\alpha}}{E_{\alpha}} = 1\%$ приводить до злими зменшення $\Delta r / r = 2 \div 3$ рази.

4) всі α -частинки θ монохроматичними: $E_{\alpha} = \text{const.}$

Модель

1929 р., Гамов - теорія α -розпаду



$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \left(\frac{Z R}{v_0} \right)^{-L} \text{ A } [\text{с}^{-1}]$$

$$^{235}\text{U} : Z = 92, R = 1,3 \cdot 10^{-13} \cdot 235^{1/3}$$

$$U = \frac{3}{5} \cdot \frac{Z e^2}{R} = 20 \text{ MeV}$$

слабкий шовірн. E
вист комплекс біля поверхні

шовірність тунельного ефекту:

$$D = \exp \left\{ - \frac{2}{\hbar} \int_R^{r_1} \sqrt{2\mu (V(r) - E)} dr \right\}$$



$$\int X^A \rightarrow \int_{A-2}^{A-4} + \int_{A-2}^A$$

материнське ядро нерухоме

24 $P_{A-4} = P_4$

$T_\alpha = \frac{P_\alpha^2}{2m_\alpha} ; T_{A-4, Z-2} = \frac{P_{A-4}^2}{2M(A-4, Z-2)}$

Кинематика E пизми рефр маси : $T_\alpha \gg T_\gamma$

$\int_R^{r_1} \sqrt{2m_\alpha (Z_1 Z_2 e^2 / r - E_\alpha)} dr = \sqrt{2m_\alpha E_\alpha} \int_R^{r_1} \sqrt{r_1 / r - 1} dr$

$\mu = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} = \frac{\mu_2}{1 + \mu_2 / \mu_1} = \mu_2 \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_1}$

$\mu_1 \gg \mu_2 ; E_\alpha = U(r_1) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_1}$

$\frac{2}{\hbar} \int_R^{r_1} \sqrt{2m(V-E)} dr = \frac{2 Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v} (\pi - 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0) \ominus$

$\sin \varphi_0 = \frac{E_\alpha R}{Z_1 Z_2 e^2} \ll 1 ; v - \text{швиг. } E_\alpha = \frac{m_\alpha v^2}{2}$

⊕

1) $E_\alpha = 8 \text{ MeV}$
 $Z = 92$
 $v_p = 1,7 \cdot 10^9 \text{ см/с}$
 $v_0 = 10^{10} \text{ см/с}$

2) $E_\alpha = 4 \text{ MeV}$
 $v = 1,3 \cdot 10^9 \text{ см/с}$
 $\lambda = \frac{v_0}{2R} D = \frac{10^{10}}{10^{-12}} \exp(-\frac{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 10^9}{10^{-27} \cdot 1,3 \cdot 10^9})$
 $= 10^{22} \exp(-160) = 10^{22} \cdot 10^{-62}$

$= 10^{-40} \text{ с}^{-1} \Rightarrow \tilde{\tau} = 10^{40} \text{ сек} \approx 10^{33} \text{ років}$

$E_\alpha = 8 \text{ MeV}, \tilde{\tau} = 10^{15}$ $E = 4 \text{ MeV}, \tilde{\tau} = 10^{40} \text{ сек}$
 ці значення для "швидк" ядер

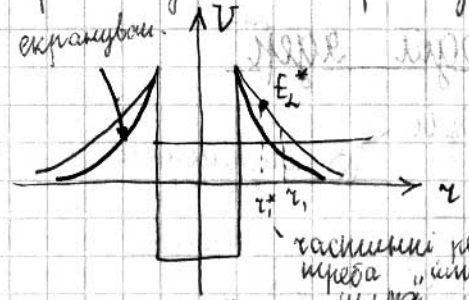
Напрявки треба врасхувати екрануван

$\frac{M\alpha}{Vp} = \frac{e^2}{c} = \frac{2,5 \cdot 10^{-19}}{0,7 \cdot 10^{-8}} = 3,5 \cdot 10^{11} \text{ ем} = 20 \text{ eV}$

$V(r) = \frac{e^2}{r} e^{-r/a} \Big|_{r \ll a} = \frac{e^2}{r} (1 - \frac{r}{a}) = \frac{e^2}{r} - \frac{e^2}{a}$
 екранув.

25 $\lambda/a = \frac{2e^2 \cdot 10^{-8}}{0,5 \cdot 10^{-8}} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см} = 30 \text{ eV}$

Врасовуємо екранування:



E_2^* - эффективная энергия
ширина бар'ера истон-
чилась, неясно высота

$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \exp(-r/a)$

Радиус экранирования в разных средах:

плазма

$a = \begin{cases} \sqrt{kT / (4\pi n_e e^2)} & \text{- не вырожден. газ} \\ \sqrt{E_F / (3\pi e^2 n_e)} & \text{- вырожденный газ} \end{cases}$

$D = \exp \left\{ - \frac{2}{h} \int_R^{r_1} \sqrt{2m(V(r) - E)} dr \right\} =$
 $= \exp \left\{ - \frac{2}{h} \langle \sqrt{2m(V(r) - E)} \rangle (r_1 - R) \right\}$

Берем той максим. бар'ер \Rightarrow для эффектив. E_2^* (можно зростати в 2-3 рази) ширина бари зшиває

Тому всі показники можна зменшити в $\sqrt{3}$ разів

$E_2 \rightarrow E_2^* = 3 E_2$

$v \rightarrow v^* = 1,7 v$

$E_2 = 4 \text{ MeV} \quad \lambda = 10^{22} \cdot 10^{-62/1,7} = 10^{-16}; \quad \tau = 10^{16} \text{ сек} = 10^9 \text{ років}$
 $E_2 = 8 \text{ MeV} \quad \lambda = 10^{22} \cdot 10^{-37/1,7} = 1; \quad \tau = 1 \text{ сек.}$

Для іонізації атом з розпад мейонівий

26 Наймайн будищення таке може з'являтися тільки. \Rightarrow з'являється радіоактивність.

Спонтанний поділ ядер

2 механізми \rightarrow ① кв-мес. модель, ② крайня модель

① $\lambda \propto X^A \rightarrow \lambda = \frac{v_0}{2R} \exp \left\{ - \frac{2Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v} \right\}$ (1)

v - швидкість відносного руху

Енергія відносного руху: $E = \frac{\mu v^2}{2} = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \frac{v^2}{2} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_1}$ $\Rightarrow v = \sqrt{\frac{2Z_1 Z_2 e^2 (\mu_1 + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2}}$ з (1)

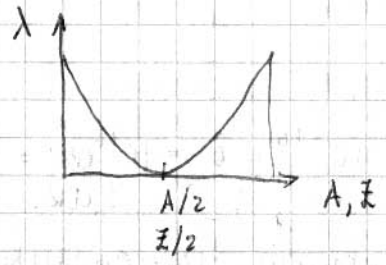
Три ядра Z_1, Z_2, μ_1, μ_2 найбільш розмаї

$\lambda = \frac{v_0}{2R} \exp \left\{ - \frac{\sqrt{Z_1 Z_2} e^2 \sqrt{\mu_1 \mu_2} r_1}{\hbar \sqrt{\mu_1 + \mu_2}} \right\}$

$Z_1 = Z(1/2 + \delta)$
 $Z_2 = Z(1/2 - \delta)$
 $\mu_1 = \mu(1/2 + \delta)$
 $\mu_2 = \mu(1/2 - \delta)$

опириаемо: $\lambda \sim \exp \left\{ - \frac{cT}{\hbar} \sqrt{(1/4 - \delta^2)(1/4 - \delta'^2)} \right\} \times \sqrt{\mu_1 \mu_2} r_1$

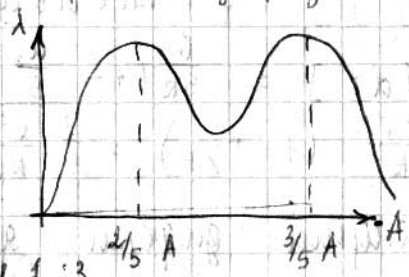
Найбільша швидкість: $\lambda_{opt} = \delta_{opt} = 1/2$



найбільш швидкість для якої, там є легкі частинки це не зовсім так, бо при цій моделі треба враховувати власний заряд ядра матері.

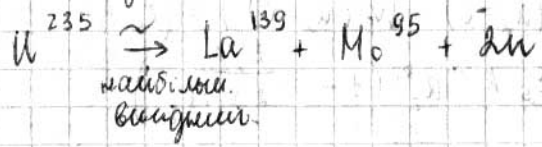


енергетич. виш. по E_{zv}
 Треба усереднити ці 2 графіки



$L_{opt} = \sigma_{opt} = 1/\omega$

Найд. вигляд ділення з масами 1:3

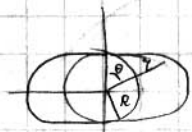


Числа ділення важких ядер на основі
інерціальної моделі.

16.10.



вираз для поверх. кулон. енергії еліпсоїдного ядра (симетр.) запишемо:



$r(\theta) = R(1 + a_0 + a_2 P_2(\cos \theta) + a_4 P_4(\cos \theta) + \dots)$

Вираз для V деформов. ядра (еліпсоїда) = V звич. ядра.
 $V = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{r(\theta)} r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr = \frac{4\pi R^3}{3} (1 + 3a_0 + \frac{3}{5} a_2^2) = \frac{4\pi R^3}{3}$
 $a_0 = -a_2^2/5$

Площа еліпсоїда:

$S = 2\pi \int_0^\pi \sin \theta r^2 \sqrt{1 + 1/4 r^2 (dr/d\theta)^2} d\theta = 4\pi R^2 (1 + 2a_0 + 4/5 a_2^2) = 4\pi R^2 (1 + 2/5 a_2^2)$

Пов. і об'єм енергія еліпсоїда:

поверх.: $W_s = \sigma S = 4\pi R^2 \sigma (1 + 2/5 a_2^2) = 4\pi R_0^2 A^{2/3} \sigma (1 + 2/5 a_2^2)$

коэф. що ~ деформ
 коэф. з ф-ли Гемте-Вейцзекера $\rightarrow \epsilon_s$

Купон: $W_g = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j=1}^z \frac{e^2}{r_{ij}} = \frac{1}{2} z(z-1) e^2 < 1/r > \approx z^2 e^2 < 1/r >$

$$\langle 1/r \rangle = \left[\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{r(\theta)} \frac{1}{r} r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr \right] / \left[\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{r(\theta)} r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr \right] = \frac{6}{5k} \left(1 - \frac{a_2^2}{5} \right)$$

$$W_g = \frac{3z^2 e^2}{5k} \left(1 - \frac{a_2^2}{5} \right) = \left(\frac{3}{5} \frac{e^2}{k_0} \right) \frac{z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{a_2^2}{5} \right)$$

Разность энергии групп. атомов и молекул: $= E_g$

$$\Delta W = (W_g + W_s - W_g(a_2=0) - W_s(a_2=0)) = (E_s A^{2/3} \frac{2}{5} a_2^2 - E_g \frac{z}{A^{1/3}} \frac{a_2^2}{5}) = \frac{2}{5} E_s A^{2/3} a_2^2 \left(1 - \frac{z^2/A}{2 E_s/E_g} \right)$$

$$E_s = 17,8 \text{ МэВ}$$

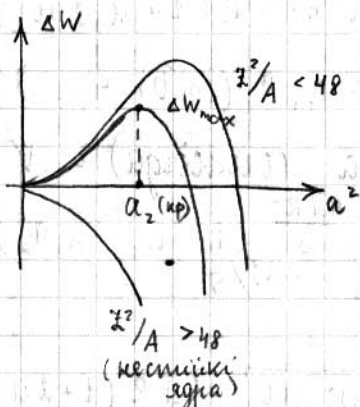
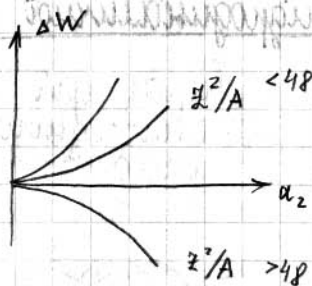
$$E_g = 0,71 \text{ МэВ}$$

$$\Rightarrow \Delta W = \frac{2}{5} E_s A^{2/3} a_2^2 \left(1 - \frac{z^2/A}{48} \right)$$

условия
длина
вандерваальс
эфф

$$\rightarrow \boxed{\frac{z^2}{A} < 48} - \text{несинхронизация}$$

$$\frac{\partial \Delta W}{\partial a_2} > 0$$



$$W_s = E_s A^{2/3} \left(1 + \frac{2a_2^2}{5} - \frac{4a_2^3}{105} \right)$$

$$W_g = E_g \frac{z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{a_2^2}{5} - \frac{4a_2^3}{105} \right)$$

$$\Delta W = \frac{2}{5} a_2^2 E_s A^{2/3} \left\{ 1 - \frac{z^2/A}{2 E_s/E_g} \left(1 + \frac{2a_2}{35} \right) - \frac{2a_2}{35} \right\}$$

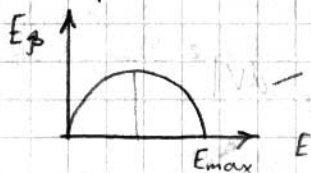
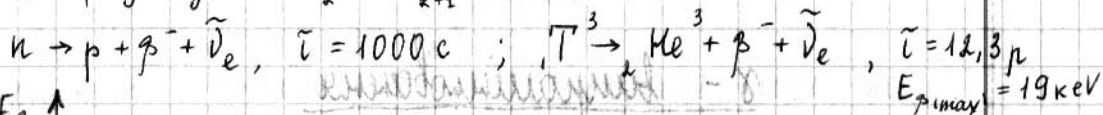
$$a_{2(\text{кр})} = 7 \frac{1-x}{1+2x}, \quad x = \frac{z^2/A}{2 E_s/E_g}$$

$$\Delta W_{\text{max}} = \frac{98}{15} E_s A^{2/3} (1-x)^3 (1+2x) \approx 116,3 A^{2/3} \frac{(1-x)^3}{(1+2x)}$$

	Z^2/A	τ
${}_{90}^{230}\text{Th}$	35	$1,5 \cdot 10^{17} \mu$
${}_{92}^{235}\text{U}$	35,6	$3,5 \cdot 10^9 \mu$
${}_{100}^{240}\text{Fm}$	41	$2,7 \cdot 10^{-3} \text{c}$
${}_{104}^{254}\text{Ku}$	43	$5 \cdot 10^{-4} \text{c}$

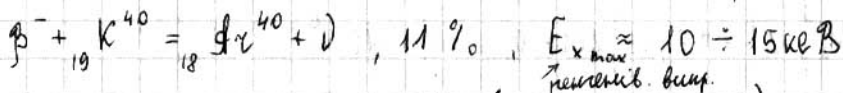
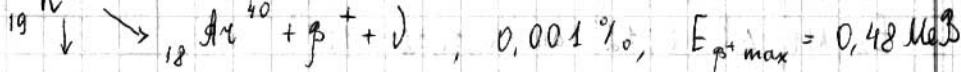
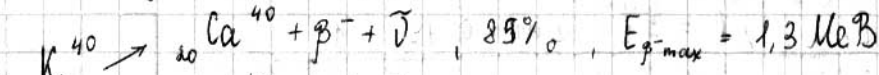
β - радиоактивность

① β^- -радиоактивность: ${}_Z^A X^A \rightarrow {}_{Z+1}^A Y^A + \beta^- + \tilde{\nu}_e$ (1)

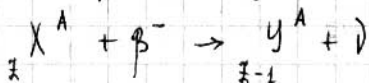


— типовой радиоактивность

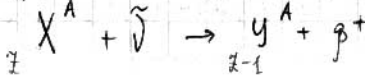
② β^+ -радиоактивность: ${}_Z^A X^A \rightarrow {}_{Z-1}^A Y^A + \beta^+ + \nu_e$

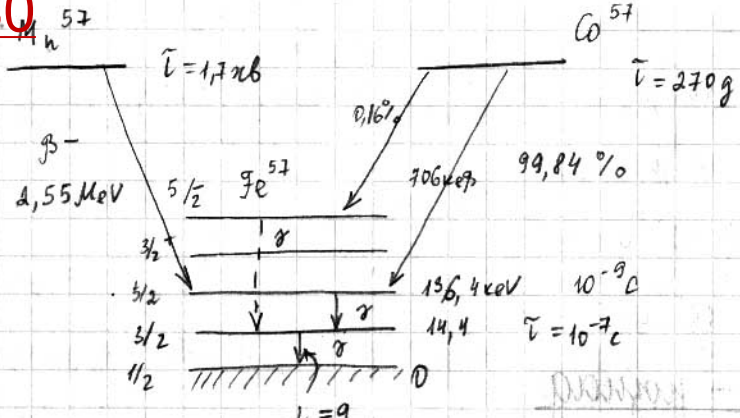


③ Электронные захватывания (к-захватывания)



④ нейтринный захватывания:





⑤ електронна конверсія

γ- випромінювання

$$W_{ij} \sim A |\int \Psi_i^* \exp(i\vec{k}\vec{r}) (\vec{e}_k \hat{p}) \Psi_j dV|^2$$

$$\exp(\pm i\vec{k}\vec{r}) = 1 \pm i\vec{k}\vec{r} - \frac{(\vec{k}\vec{r})^2}{2}$$

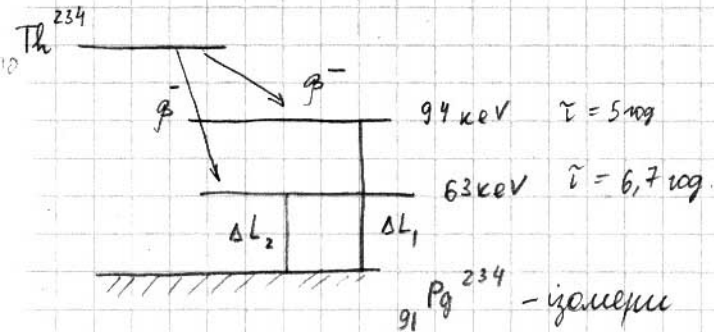
$$|a/\lambda| \ll 1$$

E_i	$\Delta l = \pm 1$	$\Delta m = 0, \pm 1$	
$E_2, M1$	$\Delta l = 0; \pm 2$	$\Delta m = 0, \pm 1; \pm 2$	10^{-3}
$E_3, M2$	$\Delta l = \pm 1; \pm 3$	$\Delta m = 0, \dots \pm 3$	10^{-6}
$E_4, M3$	$\Delta l = 0; \pm 2, \pm 4$	$\Delta m = 0, \dots \pm 4$	10^{-9}
$E_5, M4$	$\Delta l = \pm 1; \pm 3, \pm 5$	$\Delta m = 0, \dots \pm 5$	10^{-12}

шов. дим. спонт. переходу:

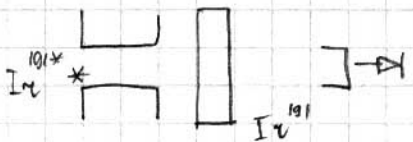
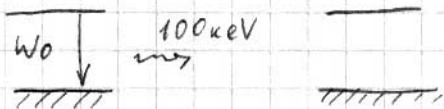
$$f_{eg} = \frac{1}{\tau} = \frac{4 \omega_{eg}^3 |d_{eg}|^2}{3\hbar c^3}, E_1$$

для вищих порядків: $|d_{eg}|^2 = \left[\frac{6\hbar(1+L)}{2(2L+1)!!} \right]^2 \left(\frac{\omega_{eg}}{c} \right)^{2L-1} \cdot |Q_{eg}|$



Ефекти П. Месбауера

Γ_{γ}^{191} $E_{\gamma} = 100 \text{ keV}$
 (резонансне ядра, але одне в зб. стані, інше - в основі.)
 поглин. кванта, випущене тим же



$\rightarrow W_{\text{вип.}} \leftarrow$ квант, що випр.

$$W_{\text{вип. погл.}} = W_0 \mp \Delta W$$

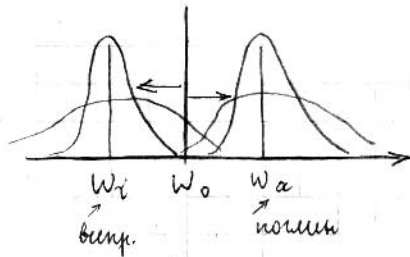
$$\Delta W = \frac{\hbar \omega_0^2}{2mc^2}$$

$$m = 4 \cdot 10^{-22} \text{ г}$$

$$\Delta W = 10^{-27} \cdot 10^{10} / (2 \cdot 4 \cdot 10^{-22} \cdot 10^{21}) = 10^{13} \text{ с}^{-1} - \text{зуб}$$

$$\omega_0 = 10^{20} \text{ с}^{-1}$$

Природна ширина ліній : $\Delta \omega_0 = \Gamma = \frac{1}{\tau} = 10^9 \text{ с}^{-1}$



при розірві. ширини має ширини.

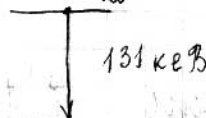
Домеровська ширина ліній:

$$\Delta W_D = w_0 \sqrt{\frac{kT \ln 2}{mc^2}}$$

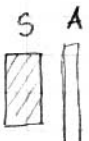
1957 Мессбауер:

$$Os^{191} \rightarrow Re^{191} + \beta^- + \tilde{\nu}$$

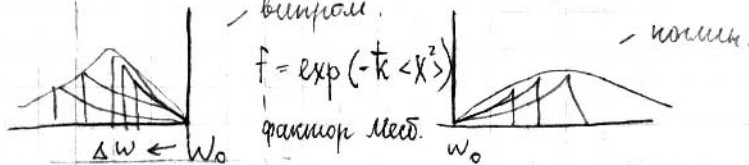
термостабілізація



(при зрост. t фотони зб., при пониж. t - стагати)



Реальний спектр в твердому тілі має вигляд



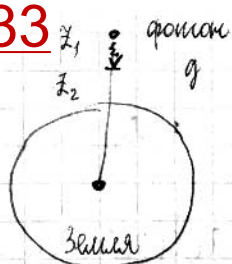
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \overline{x^2} \sim T$$

$$Re^{191} \quad f|_{T \approx 3\%}, \quad T = 4K$$

$$Fe^{57}, \quad E = 14,4 \text{ кеВ}, \quad \tau = 10^{-7} \text{ с}, \quad f|_{273} \approx 0,5$$

$$\frac{\Gamma}{w_0} = 3 \cdot 10^{-14}, \quad \Gamma = 1/\tau = 10^7 \text{ с}^{-1}$$

Ефекти М. полягає в резонансному поглинанні квантів амплот. ядрами.



$$\Delta t = \Delta z / c$$

$$\Delta v = g \Delta t; \Delta w = w \frac{\Delta v}{c} = w \frac{g \Delta z}{c^2}$$

$$w = 1; \Delta w / w = \frac{g \Delta z}{c^2}$$

$$g = 10^3 \text{ см/с}^2; \frac{\Delta w}{w} = \frac{10^3 \cdot 10^3 \cdot 2}{10^{21}} = 10^{-5} \cdot 2$$

$$\frac{\Delta v}{c} = w = \frac{r}{d}$$

$$\Delta v = \frac{r}{d} \frac{c}{w} = \frac{10^7 \cdot 3 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 8 \cdot 10^{19}} = 5 \cdot 10^{-3} = 50 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

$$w = \frac{w_0}{\gamma(1 - \beta n \cos \theta)} = \frac{w_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2} (1 - v/c n \cos \theta)}$$

$$v \ll c$$

$$w = w_0 (1 + v/c n \cos \theta) (1 + v^2/(2c^2))$$

$$\bar{w} = w_0 (1 + \frac{v^2}{2c^2}) = \left| \frac{m \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \right| = w_0 (1 + \frac{3kT}{2mc^2})$$

$$w_0 \frac{3kT}{2mc^2} = \frac{1}{c} \Rightarrow T - \text{градус. температур, при каких линии не искривляются}$$

Ядерні реакції

- процес перетвор. ядра при його взаєм. з іншими ядрами (част.)

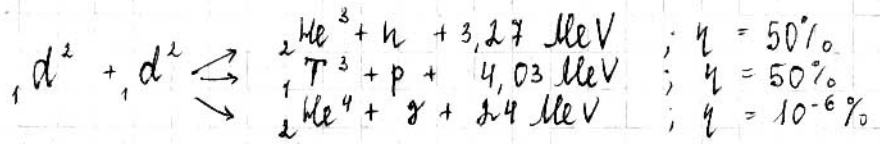
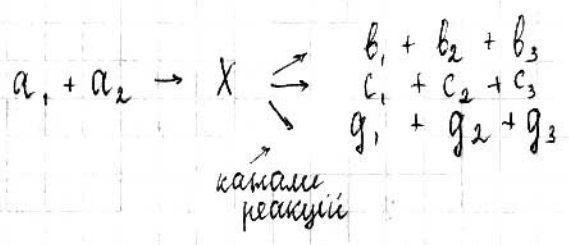
Бувають ними:

- з нейтрал. част. взаєм.
- з зарядженими;
- з квантами.

34. Классы реакций.

1) краша (выбух. без затрешки : $a_1 + a_n \rightarrow b_1 + b_n$)

2) через стадию крашичного складового ядра $a_1 + a_2 \rightarrow X \rightarrow b_1 + b_2 + b_3$



Зак. баланс реакции:

$$W_{a_1, a_2} + T_{a_1, a_2} = W_{b_1, b_2} + T_{b_1, b_2}$$

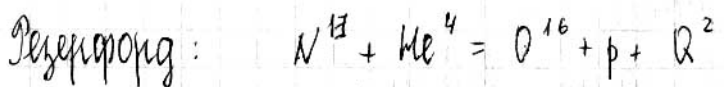
↑
энергия покоя
частиц складовые

↑
энергия
кин. энерг.
якоо зрешки

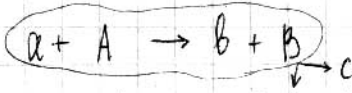
Энергия реакции - разница энергий покоя до реакции и после.

Якоо : $Q = W_{a_1, a_2} - W_{b_1, b_2} > 0$ - экзотерм. (выд. энергии)

< 0 - эндотермическая (пошл.)



$$Q = -1,193 \text{ MeV} ; Q = (m_N + m_{He} - m_O - m_p) c^2$$



$m_a c^2 + m_A c^2 + T_{aA} = m_b c^2 + m_B c^2 + T_{bB}$

Енергія реакції: $Q = E_{\alpha A} - E_{\beta B}$

$T_{bB} = Q + T_{aA}$

$Q > 0$ - ендотермічна реакція (немає порогу)
 $Q < 0$ - екзотермічна (є певний поріг);

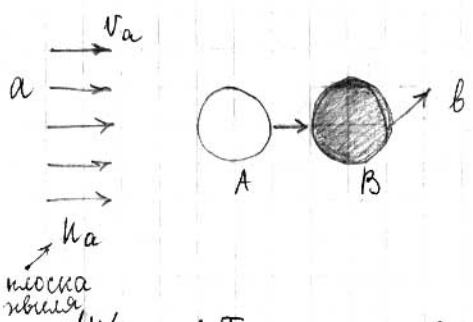
$T_{min} = T_{\alpha A}^* = \frac{m_A + m_a}{m_A} |Q|$ - порогова енергія

$N^{14} + He^4 = O^{17} + p + Q, Q = -1,193 \text{ MeV}$

3-ми зберігс. які повинні виконув. що реакція відбувається:

- 1) енергія
- 2) імпульс
- 3) момент імпульсу
- 4) кил-ть нуклонів
- 5) заряд
- 6) парність

Теорія ядерної реакції



$n_a = 1/v_a$

$dW_{aA, bB} = \sigma n_a v_a dt$

$\sigma = \frac{1}{n_a v_a} \frac{dW_{aA, bB}}{dt}$ - ймовірність ядерної реакції

$\frac{dW_{aA, bB}}{dt} = \frac{d\mathcal{T}}{dt} |K_{aA, bB}|^2 \cdot \delta((E_{\alpha A} + T_{\alpha A}) - (E_{\beta B} + T_{\beta B})) \rightarrow$
 $\mathcal{T} = \int \Psi_a^* \Psi_A^* \hat{H} \Psi_b \Psi_B d\vec{r}$

процес передачі
 з 1-го стану
 в інший

$$\psi_a = \frac{1}{\sqrt{V_a}} \exp(i \bar{p}_a \bar{r} / \hbar)$$

$$\psi_b = \frac{1}{\sqrt{V_b}} \exp(i \bar{p}_b \bar{r} / \hbar)$$

Повна імовірність \Rightarrow сумуван, по всіх станах, які задов. 33E:

$$\frac{dW_{aA, bB}}{dt} = \int \frac{dW_{aA, bB}(E_b)}{dt} \rho(E_b) dE_b \Rightarrow$$

Кількість станів: $N = g \frac{\int d^3p \int d^3q}{(2\pi\hbar)^3}$

$$\rho = \frac{\partial N}{\partial p_b} = (g V_b p_b^2 4\pi) / (8\pi^3 \hbar^3)$$

$$dN = \frac{g V_b p_b^2}{2\pi^2 \hbar^2} dp_b = \frac{g V_b p_b}{2\pi^2 \hbar^3} \frac{m_b}{p_b} dE_b$$

енергія частинки, яка виміряє:

$$E_b = \frac{p_b^2}{2m_b}; \quad dE_b = p_b / m_b \cdot dp_b$$

$$\rho(E_b) = \frac{g V_b p_b m_b}{2\pi^2 \hbar^3}$$

$$\Rightarrow \frac{2\pi}{\hbar} |M_{aA, bB}(E_b)|^2 \frac{g V_b p_b m_b}{2\pi^2 \hbar^3} \quad \text{об'єм квант.}$$

$$G_{aA, bB} = \frac{|M_{aA, bB}(E_b)|^2 g (V_b) V_b m_b^2 (V_a)}{\pi^2 \hbar^4 V_a} \quad \text{об'єм квант.}$$

$$M = \int \frac{1}{\sqrt{V_a}} e^{-i \bar{p}_a \bar{r} / \hbar} \psi_a^* \hat{H} \frac{1}{\sqrt{V_b}} e^{i \frac{\bar{p}_b \bar{r}}{\hbar}} \psi_b d\bar{r}$$

g - кратність виродж.

$$g = (2I_a + 1)(2I_b + 1)$$

$$\text{об'єм квант.}$$

$$G_0 = \frac{V_a V_b (M_{aA, bB})^2 m_b^2}{\pi \hbar^4} g$$

1)

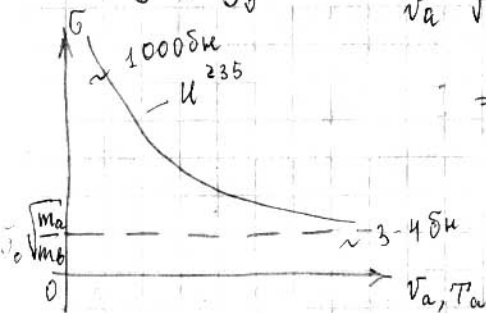
$$\sigma_{Aa, Bb} = \sigma_0 \frac{v_b}{v_a}$$

① притисне розсіяв : $a = b$; $v_a = v_b$; $A = B \Rightarrow \sigma = \sigma_0$

② екзомерит. реакція : розп. мали шв. ; $Q > 0$

$$T_{bb} = Q + T_{aa} ; T_{aa} \ll Q \Rightarrow \frac{m_b v_b^2}{2} = Q + T_{aa} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_b = \sqrt{2(Q + T_{aa}) / m_b} \Rightarrow \sigma = \sigma_0 \frac{\sqrt{2Q + (m_a v_a^2)/2}}{v_a \sqrt{m_b}} \approx \sigma_0 \frac{\sqrt{2Q}}{v_a \sqrt{m_b}}$$



\Rightarrow видно працювати при малій енергії нейтронів

$$1 \text{ барн} = 1 \text{ бн} = 10^{-24} \text{ см}^2$$

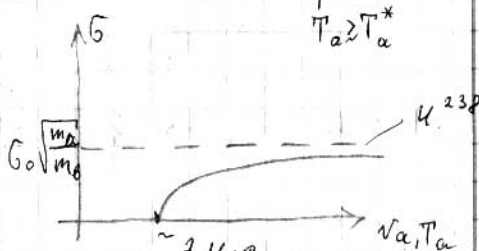
③ ендомеритична реакція : $Q < 0$, потрібна порогова енергія налітаючої частинки.

$$T_a > T_a^* = \frac{m_a + m_A}{m_A} |Q|$$

біля порогу реакції :

$$v_b : \frac{v_b^2 m}{2} = T_a - T_a^* \Rightarrow \sigma = \sigma_0 \frac{\sqrt{2(T_a - T_a^*) / m_b}}{\sqrt{2T_a^* / m_a}}$$

$$v_a : \frac{v_a^2 m_a}{2} = T_a \Rightarrow T_a \approx T_a^* \text{ if } T_a \geq T_a^*$$



Резонансні ядерні реакції за часів з - квантів.

ϵ - збугне. τ

ω - частота
 I - інтенс.

$$\frac{dW}{dt} = P_{eg} = \frac{4\pi^2 y}{3h^2 c} |\overline{\text{дег}}| \delta(\omega_{eg} - \omega)$$

$$\tilde{\nu} = \frac{3 \hbar c^3}{4 \omega_{eg}^3 |\text{deg}|^2} \quad (1)$$

$$\frac{dW}{dt} = \int \frac{dW}{dt} (\omega_{eg}) f(\omega_{eg} - \omega_0) d\omega_{eg} \quad \ominus$$

$$f(x) = \frac{\Gamma/2\pi}{x^2 + \Gamma^2/4}$$

$$\int f(x) dx = 1$$

(1) → (2), а помим інтерв'єно, маємо:

$$\ominus \frac{\pi I c^2}{\hbar \omega_0^3 \tilde{\nu}} \frac{\Gamma/2\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2/4} - \text{мов. переходу в одні мг гвен пошыку інтенсив. I}$$

$$I = \hbar \omega I [1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})]; \quad I = \hbar \alpha \cdot c$$

$$\frac{dW}{dt} = P = \frac{\pi \hbar \omega I c^2}{\hbar \omega_0^3 \tilde{\nu}} \frac{\Gamma/2\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2/4} = \hbar \alpha c \frac{\pi c^2 \lambda^2}{4\pi^2 c^2 2\pi \tilde{\nu}} \frac{\Gamma/2\pi}{[(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2/4] (1/(\Gamma^2/4))} = \hbar \alpha c \frac{\lambda^2}{2\pi^2}$$

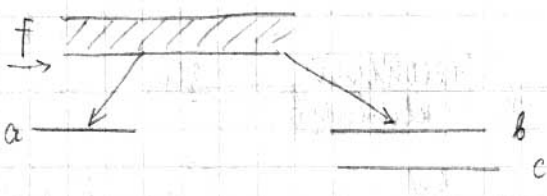
$$\cdot \left(\frac{1}{2 \frac{\omega - \omega_0}{\Gamma} + 1} \right) \cdot \frac{1}{(\Gamma^2)} = \text{Бег - перепис збудж. атома.}$$

Γ - ширинка лінії ; $\Gamma = \Gamma_0 = 1/\tilde{\nu}$

$$f(x) = \frac{\Gamma/2\pi}{x^2 + \Gamma^2/4} \rightarrow \delta(x)$$

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Delta \Gamma \quad \text{чму г'ї іншим механізмів}$$

$$\gamma \rightarrow \omega, \quad \lambda \rightarrow \lambda = \frac{2\pi \hbar}{m v}, \quad \omega \rightarrow E/\hbar$$

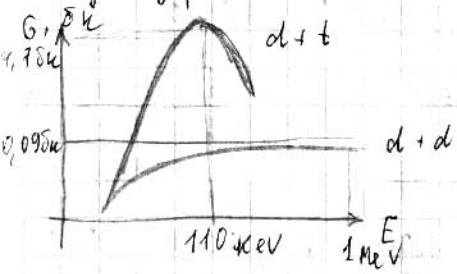


$$\Gamma = \Gamma_f = \sum_i \Gamma_i; \quad \Gamma_i = \frac{\hbar \omega}{\Gamma}$$

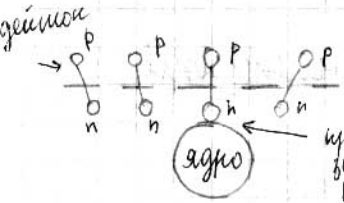
$$P_{ab} = \hbar \omega_a \Gamma_{af}$$

$a \rightarrow f$ - випускний
 $f \rightarrow b$ - спонтанний

39) Важність крив. бар'єру - основ. відмін. зар.



1) Реакція зриву



Шнейтмейер - Філіпс

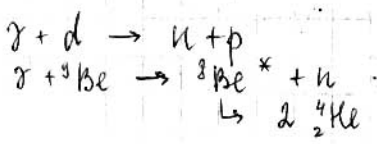
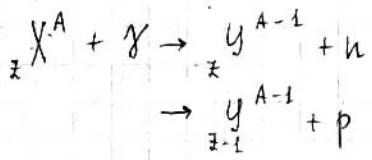
проходить дуже швидко, а нейтрон може потрапити на ядро, а протон дає 1 велику енергію (при малій енергії може відбув.) - зрив

2) Реакція підвину

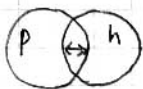
бар'єра, енергетично вигідно з протона, яким заважає з ядра.



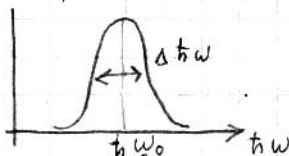
06.11.12



Гіамітський резонанс (2 підсистеми ками відносно одної):

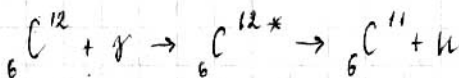


ширина цього ками;



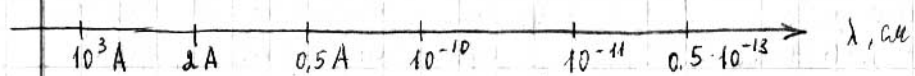
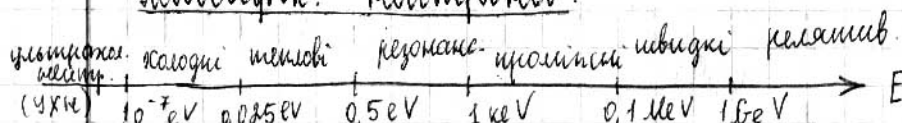
$\hbar \omega_0 \approx 10 \div 20 \text{ MeV}$
 $\Delta \hbar \omega = 6 \div 8 \text{ MeV}$

кама, кама, а ками випаа. γ -кама або частинка якась

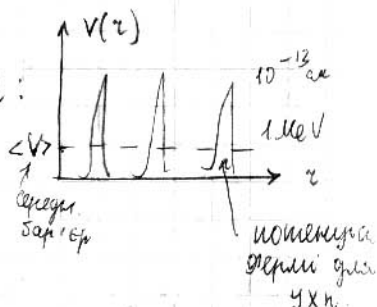


Ядерні реакції під дією нейтронів

Класифік. нейтронів:



Взаємодія нейтронів з ядрами: щоб не провалувати з коняними шкоча окремо, їх усереднюють



10^{-28} см^2 - розмір ядра
 10^{-24} - розмір ками

\Rightarrow має вигляд: $V(r) = \frac{\hbar^2}{2Tm} b \delta(r) = \delta(x) \delta(y) \delta(z)$

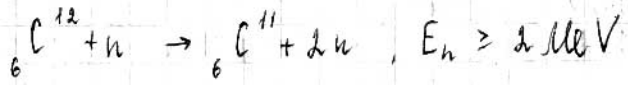
$\langle V \rangle = \frac{\hbar^2}{2Tm} b \cdot n$
 концентр. ядер

довжина ками
 $\sigma_{розс} = 4\pi b^2$

$\langle V \rangle = \frac{m v_{гр}^2}{2}$

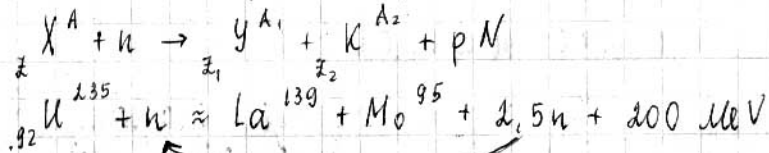
42 з утворенням нейтронів:

$n \rightarrow 2n$, штов $E_{kin} \geq 10 \text{ MeV}$



$n \rightarrow Nn$, $E_n > 100 \text{ MeV}$

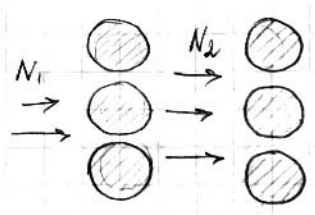
5) реакції ділення важких ядер під дією нейтр. (проходять при \neq енергях)



ланцюгова реакція ділення важких ядер

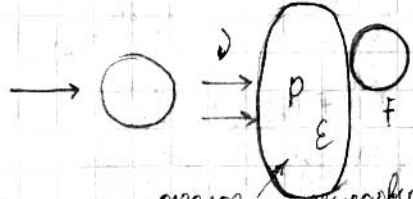
Є сис-ма ядер, на них падає потік нейтр. N_1 ; потік 2 сис-ма i т.г. кількість втор. нейтр. $>$ кількість первен. для того, щоб реакція відбув. (при певн. висотк. повинні бути такі, що здатні ділитися)

$\bar{\nu}$ - середня кіль-ть вторин. нейтр., які виділяють ся.

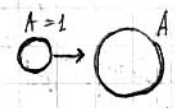


$k = N_2/N_1$

- > 1 - надкрит.
- $= 1$ - критич.
- < 1 - підкритич.



$\frac{\Delta E}{E} = \frac{4A}{(A+1)}$



енергію важливо передавати великими порціями позіов. (або чатки.) на важк. ядрах поамо, бо

ослодіє. середовище (добре розсіює і поама поглинає)

на монето витрати нейтрон. Крайне на млик.

H_2O $\sigma_{розв} = 20,4 \text{ бк}$ - лема вода
 $\sigma_{пош.} = 0,33 \text{ бк}$

D_2O $\sigma_{розв} = 3,4 \text{ бк}$ - ванска вода
 $\sigma_{пош.} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ бк}$

Параметр, який враховує усі витрати: ρ - шовір. маю, що нейтрон під час гальм. не зупинився (не поглин.)
 ϵ - шовір. ділення масивних ядер шов. нейтро-наши.

f - коэф. використ. теплов. нейтр. (врахув. цього і не розважився). Ядро поглин. нейтрон і поділиться шов. цього.

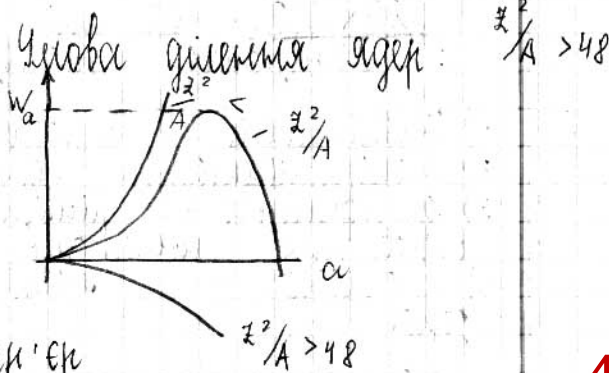
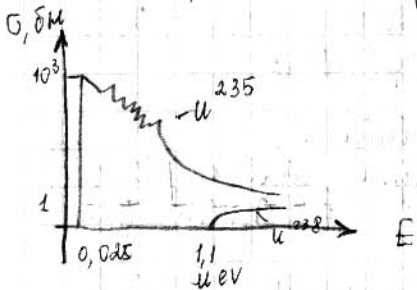
$f = \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_{пк}}$ - шовір. поділу
 - шовір. коэф. з витрат. ρ - шовір.

Коэф. критичності (мл-шв шовір. ел.) : $k = \rho \epsilon f$ -
 ф-ла 4-х коефіцієнтів.

U^{235} $\rho = 2,47$ $p = 0,54$ $k = 1,07$ для максим. великої сис.-ш.
 $\epsilon = 1,02$ $f = 0,88$

13.11.12

U^{235} $\tau = 0,71 \cdot 10^9 \text{ р.}$ $\eta \approx 0,72\%$ - крит. концентр.
 U^{238} $\tau = 4,5 \cdot 10^9 \text{ р.}$ $\eta = 99,27\%$
 P^{232} $\tau = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ р.}$

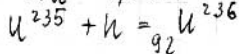


W - активационний бар'єр

U^{235}

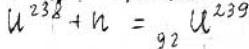
$$\bar{\nu}^2/A = 35,9$$

$$W_{0a} = 6,1 \text{ MeV}$$

 U^{238}

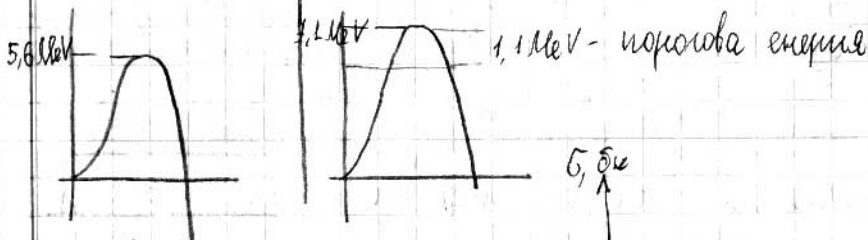
$$\bar{\nu}^2/A = 35,4$$

$$W_{0a} = 7,1 \text{ MeV}$$

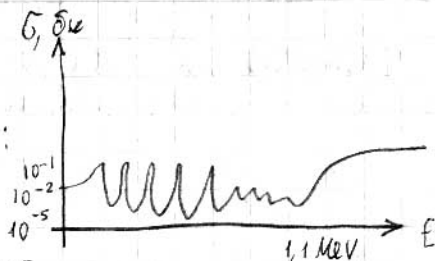


Товна енергія: $E = m_n c^2 (A - \bar{\nu}) + m_p c^2 \bar{\nu} - E_1 A + E_2 A^{2/3} + E_3 \frac{\bar{\nu}^2}{A^{1/3}} + E_4 \frac{(A/2 - \bar{\nu})^2}{A} - \delta/A^{3/4}$, $\delta = \begin{cases} +34 & \text{нн} \\ 0 & \text{нн} \\ -34 & \text{нн} \end{cases}$

$$\delta/A^{3/4} \approx 0,56 \text{ MeV} \quad \delta/A^{3/4} = 0$$



Глибокопроникне ділення:



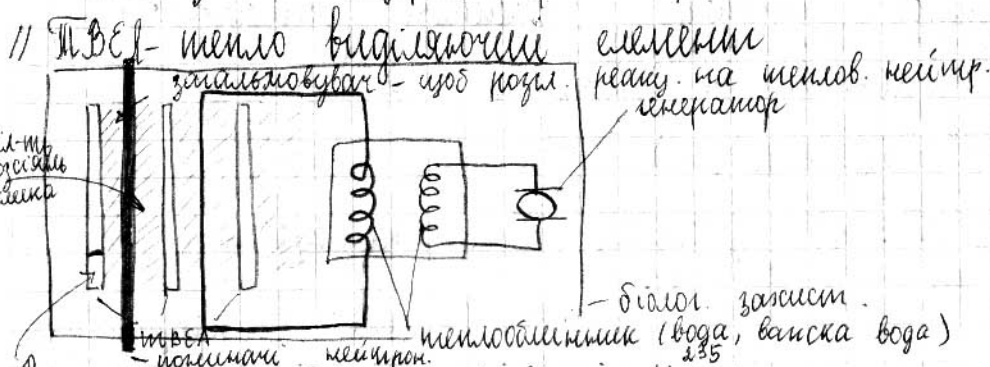
↓
Ділилися лише U^{235} .

Реактор на теплових нейтронах розпадає (на U^{235}):

// реактор - сис-ма для того щоб розпаяти ланцюгову реакцію. Бувають:

- 1) енергетичні - вироблення енергії;
- 2) експериментальні (для досягн. певних реакц.);
- 3) дослідницькі - реакт., що використов. для вироблення нейтронів;
- 4) промислові - мета: виробництво ізотів, зброї.

45 Конструкція ядерного реактора:



Возможні енергії при ділянці μ :

- кінет. енергія уламків 167 MeV
- β -розпад 5 MeV
- миттєві нейтрони $5-6 \text{ MeV}$
- антинейтрони 10 MeV
- миттєві γ -випром. 7 MeV
- γ -випром. уламків 6 MeV

при розштовхув. з зарядженіс уламків $\sim 200 \text{ MeV}$
 утворюється 1-исл.

Замальчування μ

	λ (довжина вільного пробігу до 1 розсіяння)	τ (часу життя)
H_2O	1,1 см	10^{-6} c
D_2O	2,6 см	$4,6 \cdot 10^{-5} \text{ c}$
Be	1,6 см	$6,7 \cdot 10^{-5} \text{ c}$
C (графіт)	2,6 см	$1,5 \cdot 10^{-4} \text{ c}$

$\delta t \approx 10^{-4} \text{ c}$ в залеж. від типу реактора.

$$\Delta t = 1 \text{ c} \quad \frac{N}{N(0)} = k^{\Delta t / \delta t} = (1 + (k-1))^{\Delta t / \delta t} = \left(1 + \frac{\alpha}{N} \right)^N = e^{\alpha} \quad (\alpha \gg 1)$$

$$= \left(1 + \frac{(k-1) (\Delta t / \delta t)}{(\Delta t / \delta t)} \right)^{\Delta t / \delta t} = \exp((k-1) \Delta t / \delta t) - \text{зростає.}$$

$$\frac{N}{N(0)} = e^{-10^{-2} \cdot 10^4} = e^{100} = 10^{40} \quad (\text{за } 1 \text{ сек})$$

46 Висна велика кількість нейтронів, до 9000 нейтронів. ширини (поширами нейтронів)

Використов. Co^{60} ($\tau_n = 2 \cdot 10^4 \text{ дн}$)

B^{10} ($\tau_n = 4 \cdot 10^2 \text{ дн}$)

Ще ϵ 3-4% зашумлює нейтронів

U^{235}

$\Sigma = 1,98\%$
4% - 0,23 сек
40% - 2,3 сек
2,2% - 0,2 сек

іаме за реакторний цикл нейтронів

Температура

- велика теплоємність
випуско безпечний
не токсичний

H_2O
рідкий на зрідженні та
за CO_2, He

Тривалість

- висока очиска води

Розміри реактора : $\varnothing = 10 \text{ м}$, $h = 20 \text{ м}$

1 т $\text{U}^{235} \Rightarrow 24 \text{ МВт} \cdot 10^4 = 10^{11} \text{ Дж}$

$P_{\text{тепл}} = 3000 \text{ МВт}$
 $P_{\text{эл}} = 1000 \text{ МВт}$

0,03% $\text{U}^{235} \sim 300 \text{ т/году} = 100 \text{ т/рік}$

Збагачують

U^{235} від 0,72% до 2,5%

Мортовий

100 тонн природний
5 тонн U^{235} \rightarrow 50 років
кальцо \sim 5 років (стимуль викор.)

лише 10%)

1. Чи може реактор працювати на природному урані і на шв. нейтронмас?

$k = \nu \epsilon p f$, ν - к-ть вторинних нейтронів;
 ϵp - втрами на гальмування; f - відношен.
 шов. каналу ділення відносно швидк.

$99,28\%$ U^{238}
 $0,72\%$ U^{235}

$$k_{(235)} = \frac{\nu \sigma_{nf}}{\sigma_{nf}^{235} + \sigma_{ng}^{235} + \frac{99,28}{0,72} (\sigma_{nf}^{238} + \sigma_{ng}^{238})} = 0,3$$

$\nu^{235} = 2,05$; $\sigma_{nf}^{235} = 1,3 \text{ бн}$ $\sigma_{nf}^{238} = 0,6 \text{ бн}$, $\sigma_{ng}^{238} = 0,2 \text{ бн}$
 $\nu^{238} = 1,40$ $p = 0,12$

$k_{(238)} \text{ (шв. нейтрони)} = \frac{\nu \sigma_{nf}^{238} \cdot 140 \cdot p}{\sigma_{nf}^{235} + \sigma_{ng}^{235} + 140(\sigma_{nf}^{238} + \sigma_{ng}^{238})} = 0,27$

$k_{шв}^{крит} = 0,3$

На природному урані шв. нейтронів не менше ніж. реакція

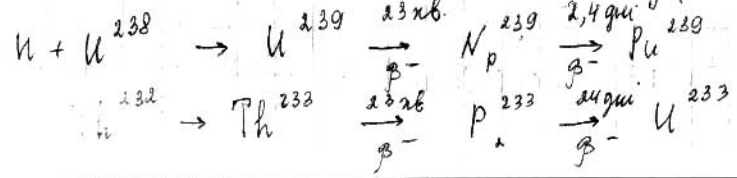
На повільних n : $k_{нов}^{(238)} = 0$

$k_{нов}^{(235)} = 1,32$; $\nu^{235} = 2,47$ $\sigma_{ng}^{238} = 2,8 \text{ бн}$
 $\sigma_{nf}^{235} = 580 \text{ бн}$ $\sigma_{nf}^{238} = 0$
 $\sigma_{ng}^{235} = 112 \text{ бн}$

$k_{шв}^{швидк}^{235} = 2,65 \cdot 0,7 \approx 1,8$

На швидких n діляться всі ізотопи $U(235, 238)$ і ^{238}U ціле ділиться.

CANDU - канадський реакт. на природному U , швидкозвичайна вода (але вона дорога)

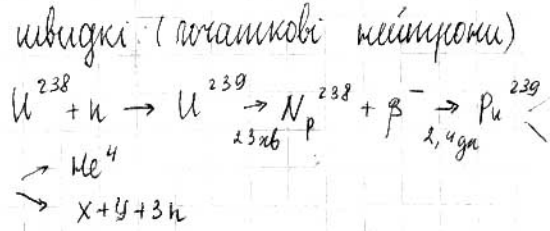
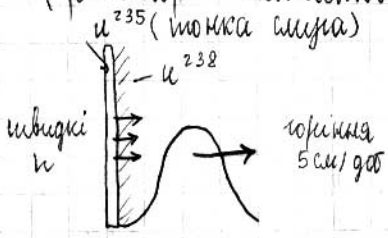


на 1 кг U^{235} утв от U^{233} : Pu^{239}



Реактор біязної явилі

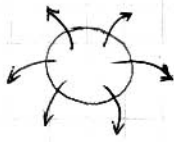
(реактор Батісидва, реактор майбутнього)



Некерований ядерний вибух

$$k = \nu \cdot f \cdot F(k)$$

$F(k)$ - виключає нейтрони, що вийшли за межі сфери.



$$F(k) < 1$$

$$F \approx 0,8$$

$$\bar{l} \approx \frac{1}{\nu \sigma_{nf} \cdot N_a}$$



$$U^{235}$$

$$\nu = 2,47$$

$$\sigma_{nf} = 18 \text{ б}$$

$$N_a \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$$

$$\bar{l} = 8 \text{ см}$$

На \bar{l} n утворює сам себе \Rightarrow ланцюгова реакція

$$U^{235} : R_{кр} = 8,5 \text{ см}$$

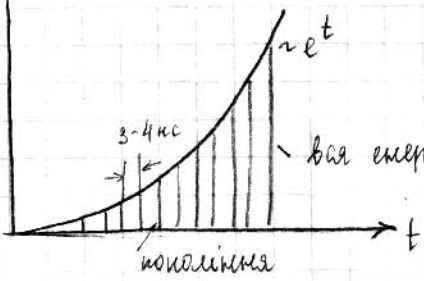
$$m_{кр} = 47 \text{ кг}$$

$$Pu^{239} : R_{кр} = 4,1 \text{ см}$$

$$m_{кр} = 5 \text{ кг}$$

Радиус $> R_{кр} \rightarrow$ краще під реакція

$$\delta t = \frac{\bar{l}}{\nu} \text{ (швид. і покращення)} = \frac{8 \text{ см}}{2 \cdot 10^9 \text{ см/с}} = 4 \text{ нс}$$



вся энергия выг. в ост. покаяния.

1 м крошкы = 2000 Дж
 10 к Т = 2 · 10¹³ Дж

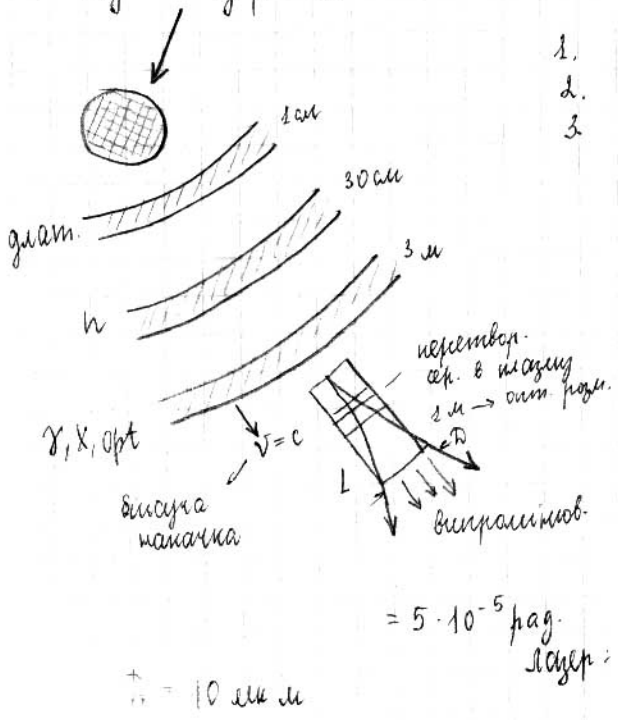
Мас выдигення : Δt ≈ 2 Бt ≈ 10⁻⁸ сек

$P_{tot} = \frac{2 \cdot 10^{13}}{10^{-8}} = 2 \cdot 10^{21}$ Вт - сумарна потужн. ядерного видусу.

в повітрі - 70% уд. обвля.

$P_{x+opt} = 20\% P_{tot} = 4 \cdot 10^{20}$ Вт - дисерело пот. ренн. с опт. вибран.

Видусс ядерний → як лазерна накачка



- ванскі ділячки $v = 10^{-2} c$
- нейтроны $v = 10^{-1} c$
- γ, x, opt $v = c$

$\Delta \theta = \frac{P/L}{\text{реан.}} + \frac{\lambda/D}{\text{дифр.}}$
 $\frac{\partial \Delta \theta}{\partial D} = 1/L - \lambda/D^2 = 0$
 $D_{opt} = \sqrt{\lambda L}$

$\Delta \theta_{opt} = \sqrt{\lambda/L} + \sqrt{\lambda/L} = 2 \sqrt{\lambda/L}$

$\lambda = 14 \text{ \AA}$; $\Delta \theta_{opt} = 2 \sqrt{\frac{14 \cdot 10^{-7}}{10^2}} =$

$= 5 \cdot 10^{-5}$ рад.
 Lопер: $\tau = 10 \text{ нс м}$

$W_x = 10 \text{ кА.}$
 $\Delta t = 10^{-8} \text{ с}$
 $P_x = 10^{12} \text{ Вт}$

Ядерна фізика

(продовження лекцій)

27.11.12

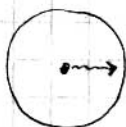
$$R_{кр} = \frac{1}{\nu \sigma_{nf} n}$$



$$R_{кр} \approx 8,5 \text{ см}, \quad M_{кр} \approx 47 \text{ кІ}$$



$$R_{кр} \approx 4,1 \text{ см}, \quad M_{кр} = 5 \text{ кІ}$$



$$D \geq 2R_{кр}$$

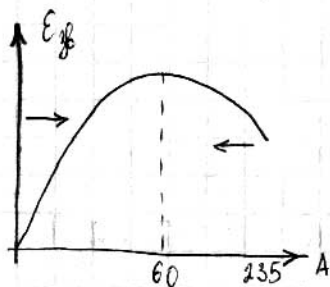
Ізотоп	U^{235}	Pu^{239}	Am^{241}
$M_{кр}$	0,37 кІ	0,51 кІ	17 т
τ	$7 \cdot 10^8$ р	$24 \cdot 10^3$ р	16 років

$$M_{кр} = \frac{4}{3} \pi R_{кр}^3 \rho = \frac{4\pi}{3} \frac{\rho m_a^2}{\nu \sigma_{nf} \rho^3} \sim 1/\rho^2$$

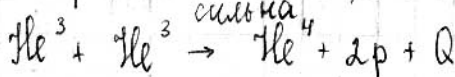
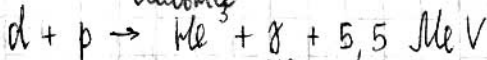
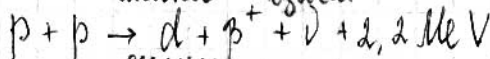
$$R_{кр} = \frac{1}{\nu \sigma_{nf} n} \quad n = \rho / m_a$$

Стискаючи певними приладами до землем'я крихіткої маси \Rightarrow при зг. відбув \Rightarrow оптим. інтенсив. днс. лазерної випромінюв.

Керований та некерований ядерний синтез



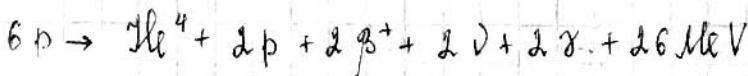
Процеси, що відбув на Сонці (Сонце, 75% р)
слабка взаєм.



$$G = 10^{-23} \text{ Дж}$$

$$G = 10^{-6} \text{ Дж}$$

$$G = 10^{-2} \text{ Дж}$$

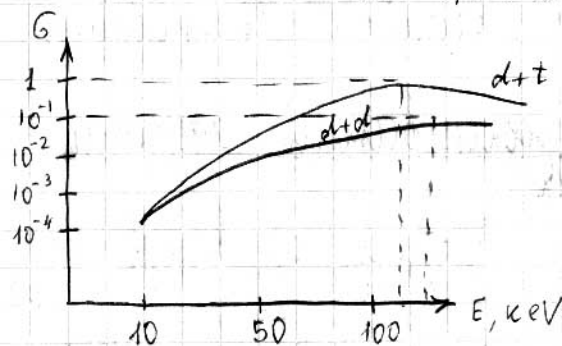
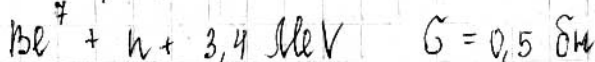
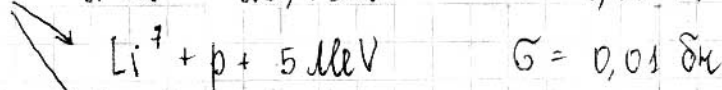
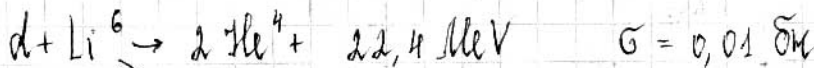
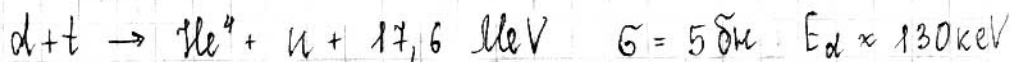
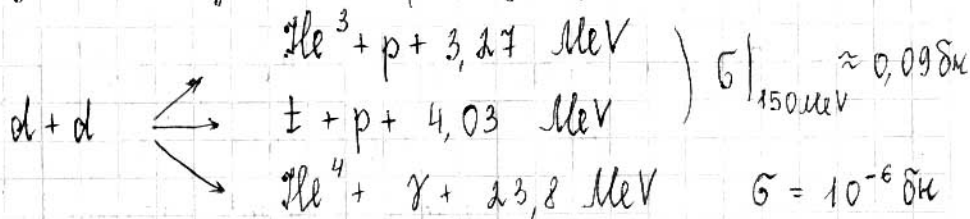


малые вогенные энергии на Солнце:

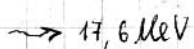
$$\frac{dR}{dm} = 20 \frac{ep^2}{c \cdot t} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/кг} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/кг}$$

$\frac{dR}{dm} \approx 2 \text{ Вт/кг}$ - малые воген. мощностью

В земные условия реакция с Солнца неопытна:



150 keV



выраим в 100 раз

$$\bar{l}_f = \frac{1}{\sigma_{nf} n} = \frac{1}{5 \cdot 10^{24} \cdot 10^{23}} = 20 \text{ см}$$

$$\bar{l}_n = \frac{1}{\sigma_{nn} n} = \frac{1}{10^{-16} \cdot 10^{23}} = 10^{-7} \text{ см}$$

52. На $\bar{\nu}_\mu = 20 \text{ см}$ атом випромінює енергію $(1 \div 10) \text{ eV}$ ($\bar{\nu}_\mu / \bar{e}_s$) = $2(10^8 - 10^9) \text{ eV} = 200 - 1000 \text{ MeV}$

Випромінює в 50 разів більше ніж вся енергія, тому ця реакція не підходить. Використовується як дисеріо $\bar{\nu}$.

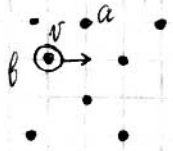
Менше випрати буде, ніж середовище - плазма.

Критерій Лоусона

- критерій енерговидатних реакцій.

n_a, n_b

$v \rightarrow$



Шов атом b проваєлює з a за час τ

$$W_{ab} = \frac{v\tau}{\lambda_a} = \sigma_{ab} n_b v \tau$$

$Q_{1ab} = W_{ab} Q$ - енергія однократної взаємодії.

Товна енергія взаємодії: $Q_{ab} = n_b \cdot Q_{1ab} = n_a n_b v \tau Q$

- ширіє енергіє в од. об'єму за час t

Щоб реакція була вигідна потрібно, щоб:

$$Q_{ab} \geq \frac{3}{2} kT (n_a(1+\lambda_a) + n_b(1+\lambda_b)) + n_b n_a \sigma_{ab} v \tau Q$$

козієвіє і газамки \rightarrow і ядро; λ_a вкєєтр. випромін.

σ_{ab} - менє залеєєтє від v
 F - енергіє на випромінюєє. $v \sim \sqrt{kT}$

недвоємо по швидкостям: нехай $\lambda_a = \lambda_b = 1$

58 $n_a = n/2$; $n_b = n/2$ (однокачествен. серединами)

$$\frac{W^2}{4} \overline{\sigma v} \tilde{n} \geq \frac{3}{2} kT n \cdot 4 + \frac{W^2}{4} \overline{\sigma_r v} \tilde{n}$$

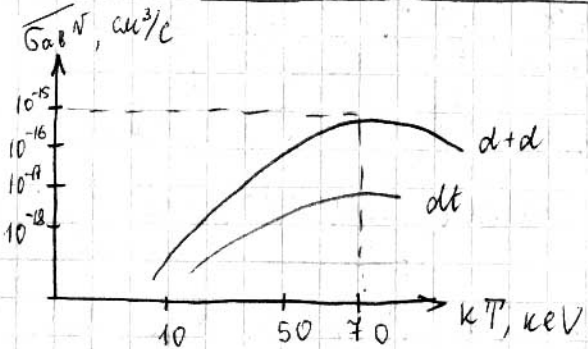
$$k \tilde{n} (R \overline{\sigma v} - \overline{\sigma_r v} f) \geq 12 kT$$

$$k \tilde{n} \geq \frac{12 kT}{R \overline{\sigma v} - 2 \sqrt{kT}} \quad \text{— зар. критерий лоссона}$$

$$\overline{\sigma_{ab}} \sim \frac{1}{v} \exp\left(-\frac{2\pi Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v}\right)$$

$$\overline{\sigma_{ab}} v = \int \overline{\sigma_{ab}}(v) v f(v) dv \Rightarrow f(v) = A v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$

$$\Rightarrow \overline{\sigma_{ab}} v \sim \frac{1}{T^{3/2}} \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{4 Z_1 Z_2 e^2 m}{\hbar^2 kT}\right)$$



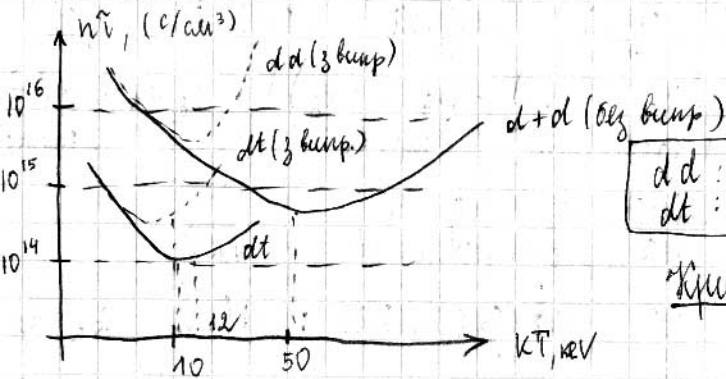
$$T \rightarrow 0 \rightarrow \overline{\sigma_{ab}} v \rightarrow 0$$

$$T \rightarrow \infty \rightarrow \overline{\sigma_{ab}} v \rightarrow 0$$

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-31} \frac{\text{Вм}}{\text{см}^2}$$

(здесь kT в keV)

Здесь не вращиваем вырвнн на вырвнн



$$dd : n \tilde{n} \geq 10^{15} \text{ c/cm}^3$$

$$dt : n \tilde{n} \geq 2 \cdot 10^{14} \text{ c/cm}^3$$

критерий лоссона

54 Термоядерний синтез — для того, щоб іонізувати середовище → плазма, щоб зникли шкідливі втрапи.

Шлях реалізації керованого термоядерного синтезу

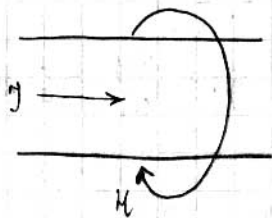
$$n\bar{n} > (10^{14} - 10^{15}) \text{ c/cm}^3$$

1) $\bar{n} \geq 1 \text{ c}$, $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $kT = 10 \text{ keV}$
 утримувати плазму при $kT = 10 \text{ keV}$ дуже важко;

2) інерційне утримання — плазма не встигає розійтись за час $\tau \leq 10^{-9} \text{ c}$

можі $n > 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ (більше ніж в тв. т.)

① Т О Ж А М А Ж



(плазма — хороший провідник (багато вільних носіїв))

Тиск (через лоренц. сили) м. н. на пов. провідника:

$$p = \frac{H^2}{4\pi} = \frac{4j^2}{4\pi R^2 c^2}$$

$$\oint H dl = \frac{4\pi}{c} j$$

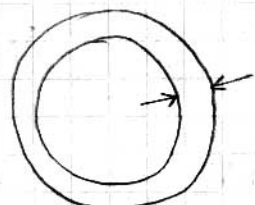
$$2\pi R H = \frac{4\pi}{c} j$$

$$H(R) = \frac{2j}{Rc}$$

провідник зі струмо тиск м. н.

Якщо німа — провідник сам стискається і т. зростає.

Стиск буде поки $P_{зовн} = P_{сер}$.



$n_0 = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
 $R_0 = 3 \text{ cm}$
 $kT_0 = 20 \text{ eV}$

$$\frac{j^2}{\pi R^2 c^2} = \frac{3}{2} n kT$$

$$R^2 n^2 = \text{const}$$

$$R_0^2 n_0 = R^2 n$$

$$\frac{R_0^2 n_0}{T^{\gamma-1}} = \text{const}$$

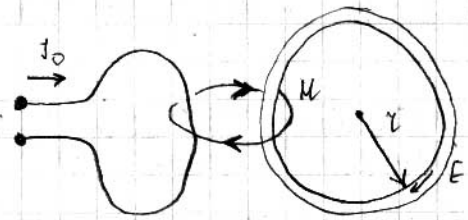
$$T \cdot R^{2(\gamma-1)} = T_0 \cdot R_0^{2(\gamma-1)}$$

$kT = 10 \text{ keV}$
 $n = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$

$\gamma = 3 \text{ eA}$

при такой температуре
 масса покоя электрона

Мас ускорения $\tau = 1 \text{ нс}$



$M(t)$

$$\mathcal{E} = - \frac{d\varphi}{dt} = - \frac{5 dM}{dt}$$

$$S = \pi r^2$$

$$\mathcal{E} = - \pi r^2 \frac{dM}{dt} = E \cdot 2\pi r$$

$$j = \sigma E$$

$$j = \pi R^2 \cdot j = \pi R^2 \sigma \frac{1}{2\pi r} \pi r^2 \frac{dM}{dt} \sim \frac{dM}{dt} \sim \frac{dI_0}{dt}$$

I_0 - макс ток лимит. з-ам.

Не забываем о гравитации, які показує розривати кінце.

② Интегральный термодермий анализ.



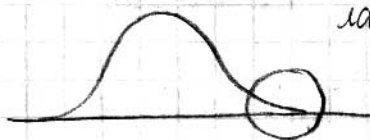
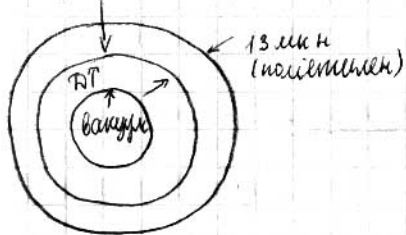
разные
 параметры (192 нм, kT)

$$W = 26 \text{ Дж}$$

$$\tau = 23 \text{ нс}$$

$$\Sigma W = 5 \text{ М Дж}$$

Лазеризация — стимулирование за расщепом реактив.
 курсу, выпарив. атомит



лазерн. пучок

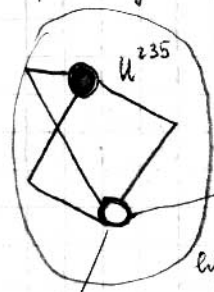
пер. фронт. утв. пучку,
 что не пропускает опти. диат.

Резиновый лазер излучает, все время
 такого сильного лазера.

Е е-ми (за расщепом конденсированных см), які
 мають в цн. і розір. що кажемо, бо розірив
 цн. не дозволяє його стиснути.

③ Многий катализатор.

Термояд. бомба — миск і розірив.

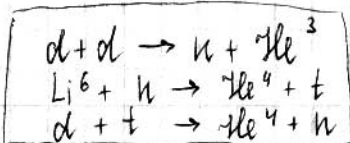


термояд. заряд
 (видук)

литий

LiD при розіриві

великий смисл
 ретинам



Систематика та природа елементарних частинок

Класифікація си-и частинок:

① Не приймають участь в сильній взаємодії.

Типи	Спин	Час життя	Маса
1) Лептони			
β^\pm	$1/2$	∞	10^{-27} г, 0,5 MeV
μ^\pm	$1/2$	$2 \cdot 10^{-6}$ с	207 m_{β^\pm}
τ^\pm	$1/2$	$5 \cdot 10^{-13}$ с	1784 MeV
$\nu_e, \bar{\nu}_e$	$1/2$	∞	$< 0,1$ MeV
$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	$1/2$	∞	$< 0,5$ MeV
$\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$	$1/2$	∞	< 150 MeV
2) Ферміони			
взаємодіє			
$\gamma(\hbar\nu)$	1	∞	$m_0 = 0$
гравітон	2	∞	$m_0 = 0$
w^\pm	1	$3 \cdot 10^{-25}$ с	83 MeV
Z^0	1	$3 \cdot 10^{-25}$ с	93 MeV
мезон	1	∞	?
(циркулюють кванти взаємодії ядра)			
3) Адрони			
(приймають участь у сильній взаємодії)			

слабкі
взаєм.

p^\pm	1/2	$> 10^{33} c$	938,27 MeV
n	1/2	$882 \pm 2 c$	939,57 MeV
A^\pm (нуклон)	1/2	$2,6 \cdot 10^{10} c$	1,115 GeV
300 частиц.			
<u>Мезоны</u>			
π^\pm	0	$3,6 \cdot 10^{-23} c$	139,57 MeV
π^0	0	$8,4 \cdot 10^{-17} c$	134,98 MeV
ρ^\pm	1	$4,4 \cdot 10^{-24} c$	769 MeV
ρ^0	1	$4,4 \cdot 10^{-27} c$	769 MeV
ω	1	$7,8 \cdot 10^{-23} c$	783 MeV
η	1	$5,5 \cdot 10^{-19} c$	547 MeV

Для всех частиц заряды $\pm e$ або 0.

Кварковая структура мезон частиц.

1963 г. - Гурейс, Гейман, теория кварков.

	spin	Q	m
1) $\bar{u} u$ (up, верхний)	1/2	$\pm 2/3$	1-5 MeV
2) $\bar{d} d$ (down, нижний)	1/2	$\mp 1/3$	3-7 MeV
3) $\bar{c} c$ (charm, красивый)	1/2	$\pm 2/3$	1,1-1,3 MeV
4) $\bar{s} s$ (strange, дивный)	1/2	$\pm 2/3$	70-120 MeV
5) $\bar{b} b$ (beauty, красивый)	1/2	$\mp 1/3$	4,1-4,9 MeV
6) $\bar{t} t$ (truth)	1/2	$\pm 2/3$	170-175 MeV

Кварки имеют целый заряд.

Кварка	Структура	Маса
p \bar{p} n \bar{n} π^{\pm} π^0 η ρ^{\pm} ρ^0 w	uud $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ $u'dd$ $u\bar{d} (u\bar{d})$ $u\bar{u}$ $u\bar{u} - d\bar{d} - s\bar{s}$ $u\bar{d} (\bar{u}d)$ $u\bar{u} - d\bar{d}$ $u\bar{u} + d\bar{d}$	139,57 MeV

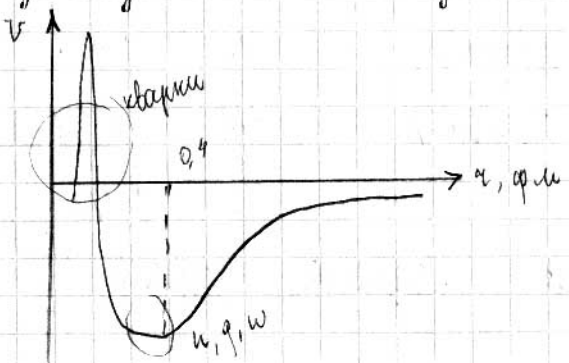
Кварки мають бариони в 3 станах:

- red (r) \bar{r}
- blue (b) \bar{b}
- green (g) \bar{g}

Кварки в барионах мають барионне число з 30 різних квантів (бітів)

Глюони — складається з 2х квантів

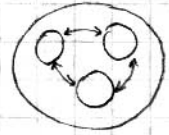
Взаємодія між нуклонами:



$$V(r) = -\frac{g}{r} \exp(-r/r_0)$$

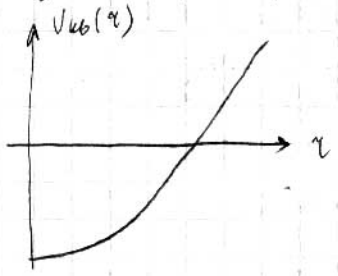
$$g_N = e_n^2 = 10 \hbar c; \quad r_0 = \frac{\hbar}{m_g c}$$

$$V_{\text{кварки}}(r) \approx \frac{4\alpha(r)}{3r} + kr$$



k - стала струни
 $k = 1 \text{ GeV} / \text{ф.м}$

$$d_s(r) = \begin{cases} 0 & r \rightarrow 0 \\ 0,3 & r \geq 0,2 \text{ ф.м} \end{cases}$$



при малих r кварки майже не взаємодіють між собою.

Видивання кварка призв. до утворен. нової частинки - баріон.

Структурна теорія елементарних частин-мок.

1964 - 1969 рр. - Габріель Вентуріо - дослідж. x -ки елементарних частининок.

Маси елем. част. виклад. у вузлас ф.-і , що віднов. повз. з коливан. струни.

Танквівська ас-ма одиниць:

$$c, \hbar, G = 6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{с}^2}$$

$$l_{pl} = \sqrt{G\hbar/c^3} = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}$$

$$m_{pl} = \sqrt{\hbar c/G} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ г}$$

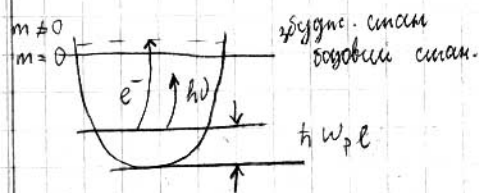
$$= l_{pl}/c = 0,5 \cdot 10^{-43} \text{ с}$$

$$61 \quad W_{pe} = m_{pe} c^2 = 2 \cdot 10^{16} \text{ эрг} = 10^{19} \text{ GeV}$$

$$W_{pe} = \frac{c}{l_{pe}} = 2 \cdot 10^{43} \text{ с}^{-1}$$

$$Q_{pe} = \sqrt{4\pi\hbar c} = 1,8 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}$$

$$U_{pe} = \frac{E_{pe}}{Q_{pe}} = 1,05 \cdot 10^{27} \text{ В}$$



10 миллиарды протонів в
теорії струн
+ 11 мільярдів час.

// Г. Грин. Элементарная Вселенная

С.р. 1) ускор. эл. частиц:

- прямое д.с.;
- циклотрон;

2) особл. взаємод. з пер. ядр. част.

- e- кив;
- вакуумн. іонів;
- нейтронов;
- ренгеновск. я.

§ 24.1

Получена доза
доза отравлен.
эквив. доза.

Астрофізика

11.12.12.

Еволюція Всесвіту

$\bar{v} = H \bar{R}$ — швидкість зриви, ф-ла Хаббла

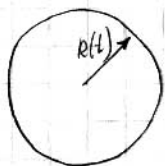
H — стала Хаббла; $H_0 = 72 \pm 2 \frac{\text{км}}{\text{м парсек} \cdot \text{сек}} \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{с}^{-1}$

1 мс (паралакс за сек)

$$1 \text{ мс} = 3,26 \text{ с.р.} = 3 \cdot 10^{16} \text{ м}$$



Уявімо всесвіт у вигляді кулі, масою якої є маса M_0 .



$$M_0 \frac{d^2 R}{dt^2} = -G \frac{M M_0}{R} \Rightarrow \text{через сталю Хаббла}$$

зрівняємо радіальний швидк.

$$\frac{d}{dt} H R = \frac{dH}{dt} R + H \frac{dR}{dt} = H^2 R + \frac{dH}{dt} R = -\frac{GM}{R}$$

$$\frac{dH}{dt} = H^2 -$$

$$\frac{GM}{R} = H^2 - \frac{4\pi}{3} R^2 \rho$$

ρ — середня густина матерії у Всесвіті

$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho$$

$$\rho \ll \frac{3M^2}{4\pi R^2} \rightarrow \frac{dH}{dt} = H^2, H = 1/t$$

$$t_0 = 1/H = 2 \cdot 10^{10} \text{ років}$$

$$\frac{dR}{dt} \Big| \frac{d^2 R}{dt^2} = -G \frac{M}{R^2}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{d}{dt} \left(G \frac{M}{R} \right); \quad \frac{1}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = G \frac{M}{R} = A - 33E$$

сума інтеграл

Уявімо, що в певний час $t = t_0$ існує

$$R = R_0, \quad M = M_0$$

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{dR_0}{dt} \right)^2 - G \frac{M}{R_0} = \frac{1}{2} M_0^2 R_0^2 - G \frac{M}{R_0}, \quad \text{якщо}$$

вимога А В рів-ня

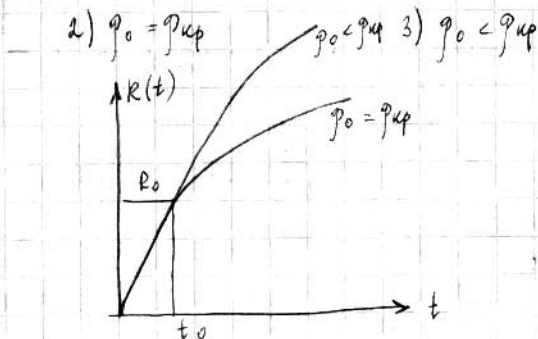
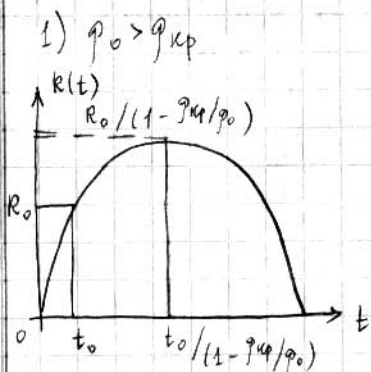
$$\left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = 2G \frac{M}{R} + M_0^2 R_0^2 - 2G \frac{M}{R_0} = 2G \frac{4\pi}{3} \frac{R_0^3}{R} \rho_0 +$$

$$+ M_0^2 R_0^2 - 2G \frac{4\pi}{3} R_0^2 \rho_0 = \frac{8\pi G R_0^3 \rho_0}{R} - \frac{8\pi G R_0^2}{3} (\rho_0 -$$

$$- \frac{3M_0^2}{8\pi G} \rho_{кр})$$

Якщо об'ємний густина при $G \approx 6 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}^2$
 то $\rho_{кр} = 0,7 \cdot 10^{-28} \text{ г}/\text{см}^3$

Розглядаємо випадки:



Для випадку 3: $\left(\frac{dR}{dt} \right)_{t \rightarrow \infty} \rightarrow \sqrt{\frac{8\pi G R_0}{3} (\rho_0 - \rho_{кр})}$

Якщо $\rho_0 = \rho_{кр}$, то

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = -(M^2 + 6 \cdot \frac{4\pi}{3} \rho) \\ \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi G R_0^3 \rho_0}{R} \end{cases}$$

$$\rho R^3 = \rho_0 R_0^3 - 33 \text{ повної маси}$$

Ці рів-ня можна розв'язати (аналітично) 63

$$R(t) = \sqrt[3]{6\pi G \rho_0 R_0^3} t^{2/3}$$

$$\rho(t) = \frac{1}{6\pi G t^2}$$

$$H(t) = \frac{2}{3} t$$

Дуїмоємо час за часами $\approx 4,5\%$ ρ .
 наша Всесвіту $t_0 = \frac{2}{3H_0} \approx 14 \cdot 10^9$ р.
 оцінками ρ $\approx 3 \cdot 10^{-31}$ г/см³ \approx
 ітерії

$\lambda = 0,6 \cdot 6$ см - радіохвилі - випромінювання.
 $h\nu = \rho c^2$

$\sim 2,7^\circ\text{K}$
 \rightarrow $h\nu$
 розподіл реліктового випромінювання по енергії

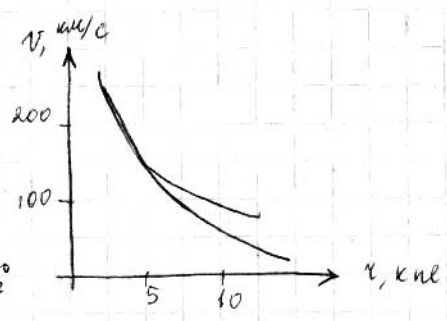
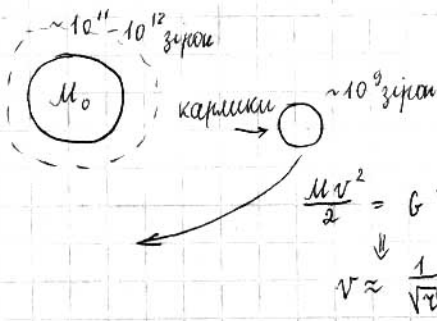
Спектр	Густина енергії	Густина маси
радіо $\omega = 10^6 \div 10^8 \text{с}^{-1}$	10^{-7} (еВ/см ³)	1
мікрохвилі $0,6 \div 6$ см	0,25	$450 \rightarrow \rho = 4 \cdot 10^{-33}$ г/см ³
ІЧ $3 \cdot 10^{11} \div 10^{14} \text{с}^{-1}$	10^{-2}	1
Видимі $3 \cdot 10^{14} \div 10^{16}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}
рентгенове $1-10$ кеВ	10^{-4}	10^{-8}
γ - кванти високоенергетичні > 10 кеВ	$3 \cdot 10^{-5}$	10^{-11}

чи може маса нейтрино бити близу
или много чашими Вселену?

$$\rho_\nu = 450 \cdot \frac{E_\nu}{c^2} \Big|_{E_\nu = 10 \text{ eV}} = 4,5 \cdot 10^2 \cdot 10^1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-21} \approx$$

$$\approx 0,6 \cdot 10^{-23} \text{ г/см}^3$$

$c^2 = (3 \cdot 10^{10})^2$



$$\frac{mv^2}{r} = m G \left(\frac{M_0}{r^2} + \frac{1}{r^2} \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr \right)$$

$$v^2/r = -G \left(\frac{M_0}{r^2} + \frac{A}{r^2} \int_0^r 4\pi r^{n+2} dr \right) \Rightarrow v^2 = G \left(\frac{M_0}{r} + \frac{A}{r} \cdot 4\pi \cdot \frac{r^{n+3}}{n+3} \Big|_0^r \right) = G \left(\frac{M_0}{r} + 4\pi A \frac{r^{n+3}}{n+3} \right)$$

$$v_{\text{линн.}} = \sqrt{4\pi A G} ; \rho(r) = \frac{v_{\text{линн.}}^2}{4\pi G r^2}$$

Гравітаційне линзування.



WIMP

Що ефект густина Казіміра має :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{v w^2}{\pi^2 c^3}$$

$$\frac{66}{V} = \frac{1}{V} \int_{w_{\min}}^{w_{\max}} \frac{dw}{w} \cdot \frac{hw}{2} = \rho/c^2$$

Маса, що пов'язана з нульовими квантами
всіх типів полів, що існують в Всесвіті,
називають **темна матерія**

Видима матерія 4,5% темна енерг. $73 \pm 4\%$

нейтрально темна матерія $< 0,5\%$
 $27 \pm 4\%$ / коли підсумовувати
 $\rho_0 = 1,1 \rho_{кр.}$

18.12.12

Сценарій розширення гарячого Всесвіту.

Радіус Всесвіту: $R_0 \approx 1,5 \cdot 10^{28} \text{ см} = 5 \cdot 10^9 \text{ км} \approx 1,3 \cdot 10^{10} \text{ св.р.}$

Маса: M (без темної мат.) $\approx 10^{54}$ т
темн. енерг.

$$M_{\Sigma} \approx 2 \cdot 10^{55} \text{ т}$$

Видима частина (доладис. част.):

$$R_1 = 1,5 \cdot 10^9 \text{ км}$$

містить 10^9 галактик (кожна $\approx 10^{11} - 10^{13}$ зірок)

4,5% видима матерія.

$$\frac{n_B}{n_\gamma} \approx \frac{n_B}{n_D} = 10^{-9}$$

антинеутрини немає!

① тривалий час: $t = 0 \div 10^{-43}$ стам
речовини вивільнився.
Всесвіт розширюється, як визнач.
тепловий параметр, як визнач.
одоміжками.

67 $\rho_{\text{пл}} = 10^{95} \text{ г/см}^3$

$T_{\text{пл}} = 10^{31} \text{ К} = 10^{13} \text{ GeV}$

$R_0 = l_{\text{пл}} = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}$

$t_{\text{пл}} = 10^{-43} \text{ с}$

$m_{\text{пл}} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ г}$ — максимум

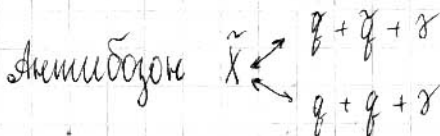
② $10^{-43} - 10^{-36} \text{ с}$, $T(\text{с}) = \frac{10^{10}}{\sqrt{t(\text{с})}}$; $10^{19} \text{ GeV} - 10^{15} \text{ GeV}$

В світі з'являються 1-ші частинки, до цього часу стали реліктовими бозонами: x, y, z ферміони та скалярні бозони.

$m c^2 = 10^{15} \text{ GeV}$, $m = 10^{-9} \text{ г}$

③ $t = 10^{-36} \div 10^{-6} \text{ с}$

$10^{15} \div 1 \text{ GeV} = T$



(нешиповий кварк) розпад б'удь менше шов., ніж шовий)

Кількість антикварків: $\frac{N_{\bar{q}} - N_q}{N_B} = 10^{-9}$

$t \approx 10^{-20} \text{ с}$ $\rho = 10^{75} \text{ г/см}^3$

За рахунок охолодження кварки об'єднуються у кварки та бариони.

Кількість антикварків виявляється в 10^9 разів меншою, ніж кварків, поки t^0 була такою процес став непомітним.

68 $\frac{N_{\tilde{q}} - N_q}{N_q} = 10^{-9}$; $t = 10^{-20}$ c ; $\rho = 10^{75}$ 1/cm³

$P(uud)$ $n(udd)$ $\pi^+(u\bar{d})$
 $\bar{P}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})$ $\bar{n}(\bar{u}\bar{d}\bar{d})$ $\pi^-(\bar{u}d)$

④ $t = 10^{-6} \div 10^{-3}$ сек

t^0 ; 1 GeV - 10 MeV

Аниhilация : 1) $p(uud) + \bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d}) \rightarrow \pi^+(u\bar{d}) + \pi^-(\bar{u}d) + u\bar{u}$

2) $n(udd) + \bar{n}(\bar{u}\bar{d}\bar{d}) \rightarrow \pi^+(u\bar{d}) + \pi^-(\bar{u}d) + d\bar{d}$

3) $\frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}} = 2\pi^0$

4) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

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

6) $\mu^\pm \rightarrow \beta^\pm + \nu_e$

го 1 м сек вся материя в свини майнсе змика

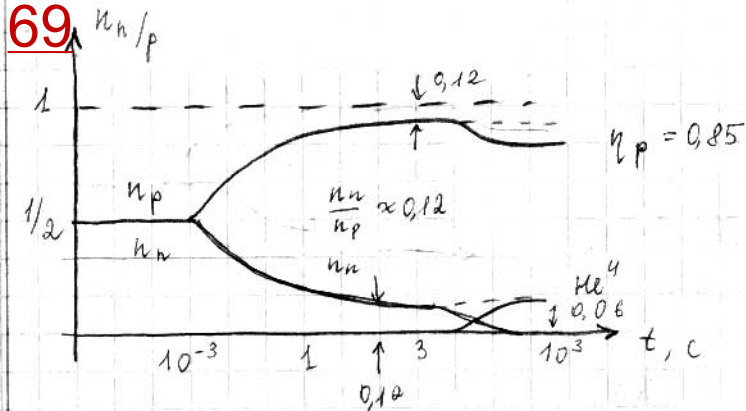
⑤ $10^{-3} \div 3$ c

10 MeV \rightarrow 200 keV

$\bar{n} \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}_e$
 $\Delta E + p \rightarrow n + \beta^+ + \nu_e$

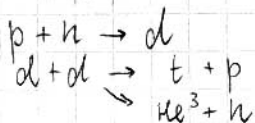
$\begin{matrix} n \\ \nu_e \uparrow \\ \beta^+ \uparrow \end{matrix} \left\{ \right. \beta^- \bar{\nu}_e$

$\frac{n}{n_0} = \exp\left(-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT}\right)$ - розподіл Бальцманна

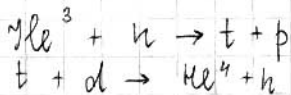


- ⑥ $3 e \div 1000 \text{ сек}$
 $200 \text{ keV} \div 10 \text{ keV}$

Термоядерни реакции:



$$\eta_{Li} = 10^{-9}\%$$



$$\eta_p = 0.85$$

$$\eta_{He^4} = 0.06$$

$$\eta_d = 3 \cdot 10^{-5}\%$$

$$\eta_{He^3} = 2 \cdot 10^{-5}\%$$

замещается:

$(75 \pm 1)\%$	p		75 % p
6 %	He^4		25 % He^4
по к-ти			по-мас.

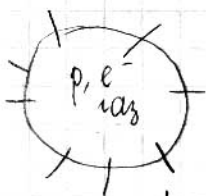
Заканчивая nuclear synthesis

- ⑦ $10^3 \text{ сек} - 10^6 \text{ мин}$
 $10 \text{ keV} - 0.4 \text{ eV}$ ($T = 4500 \text{ K}$) - t^0 рекомбинации -
 \bar{e} начали захватываться p и n \rightarrow упр. атом.
 До этого была плазма.

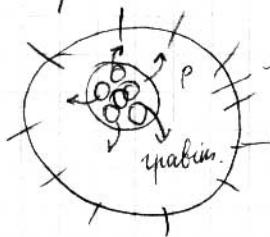
- ⑧ $10^6 \text{ мин} - 5 \cdot 10^9 \text{ мин}$
 Упр. атом. газ, условия для первичного

70. Циклотронна Брестіна.

$$4500 \div (30 \div 50) \text{ К.}$$



$p = k k T = ((n_e + n_p) + n_{нез}) k T$ - тиск,
що розширює цей газ, але
є чистим. сили, що стискають
його.



локально вигинаний об'єкт.

p (тиск) розширює, F чистим стискає

$$W_g = \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R}$$

$$p = - \frac{\partial W_g}{\partial V} = - \left(\frac{3}{5} G \frac{M^2}{V^{4/3}} \left(\frac{4}{3} \pi \right)^{2/3} \right)'_V =$$

$$= \frac{1}{5} \frac{M^2 G}{V^{4/3}} \left(\frac{4}{3} \pi \right)^{1/3} = \frac{1}{5} M^{2/3} G \left(\frac{4}{3} \pi \right)^{1/3} \rho^{4/3}$$

$$p = 2 n_p k T \frac{m_p}{m_p} = \frac{2 k T}{m_p} \rho$$

Тиск відбудеться, якщо:

$$M \rightarrow M_{гравітація} = \left(\frac{3 k T}{G m_p} \right)^{3/2} \frac{1}{\rho^{1/2}}$$

Обл. непроменювання випромінювання \rightarrow

$$\boxed{25.12.12}$$

$$M \geq M_{гравітація} = \left(\frac{3 k T}{G m_p} \right)^{3/2} \frac{1}{\rho^{1/2}}$$

ρ - масова густина

⑨ Зірковий етап еволюції.

M_{\odot} - маса Сонця: $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г.}$

Газови величини:

в згину не перем.

$$0,08 M_{\odot}$$

$$1, \dots$$

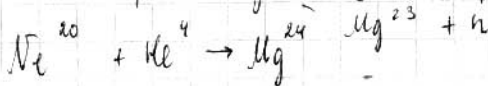
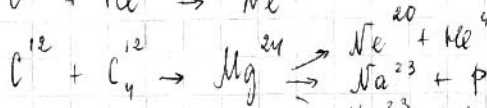
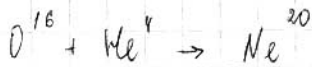
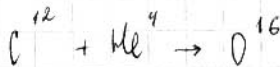
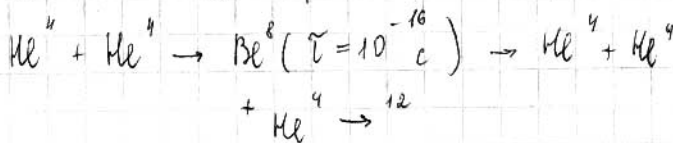
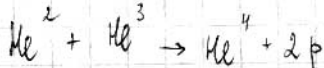
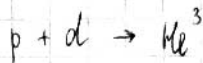
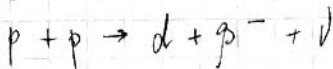
4 M_☉ ^{кажов. 2 мидж. 2 M_☉} ^{чрна дупка}

↑ $\approx 10^{53}$ ^{мил. бил.}
визначена

нов. газан з
P → n
перетворен.

$$M < 0,08 M_{\odot} \quad kT \leq 100 - 300 eV$$

гигантски мас, при такву згину не избор.

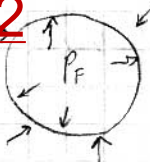


Сума гравитацијом масу:

$$P_{cp} = \frac{G M^{2/3}}{5} \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{m_p}{0,4}\right)^{4/3} n_e^{4/3}$$

Сума гравитацијом масу:

$$P_{Fe} = \frac{(3\pi^2)^{2/3}}{5 m_e} \hbar^2 n_e^{5/3}$$



$$E_F^{(кор.)} = \frac{p_0^2}{2m} = (3\pi^2)^{2/3} \frac{\hbar^2}{2m} n_e^{2/3}$$

$$E_F^{(мет.)} = pc = (3\pi^2)^{1/3} \hbar c n_e^{1/3}$$

$$p_{Fc}^{(мет.)} = \frac{3}{4} \hbar c n_e^{4/3}$$

Три дріски стиснули стисками формується.
 ся новіші тин матері - форма дріски
 з якої кожна інша матеріа виник не
 може. А нині перек. в стани корн.
 дріски за цюв:

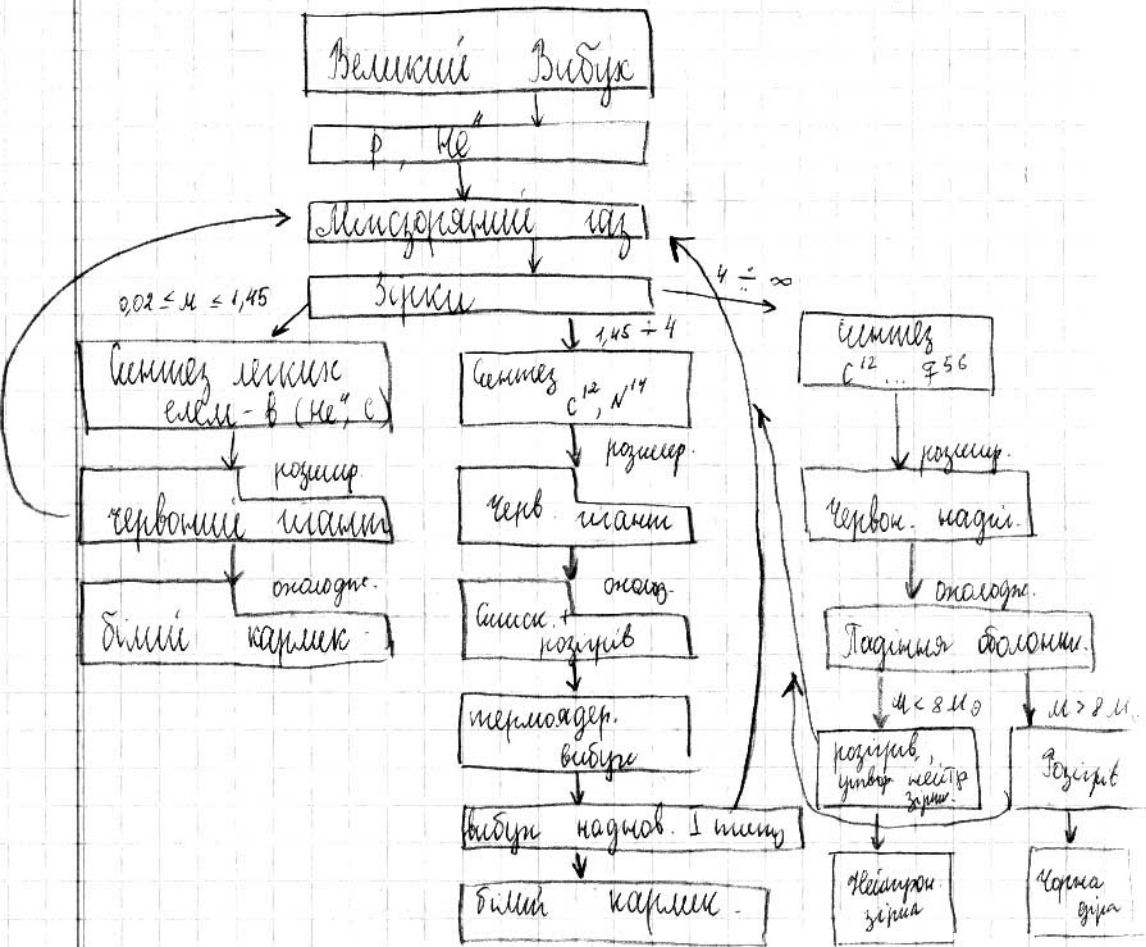
$$\tau_g \leq \frac{2GM}{c^2}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{10^{35}}{M(r)} \text{ см/с}$$

час падіння в корної дріски:

$$\tilde{\tau} = 10^{-35} (M(r))^3 \text{ років}$$

Схема еволюції дірок в зал. від.



Типовий час евол. зростає залежно від маси, чим більша ін. маса, тим більше еволюційного