

# Тэма 6 Фізіка атамарнага ядра

## § 1 Састаў ядра. Нуклоны.

*Нуклоны* – гэта пратон (p) і нейтрон (n). Масы нейтрона і пратона практычна аднолькавыя:  $m_p=1,672 \cdot 10^{27}$  кг;  $m_n=1,675 \cdot 10^{27}$  кг.

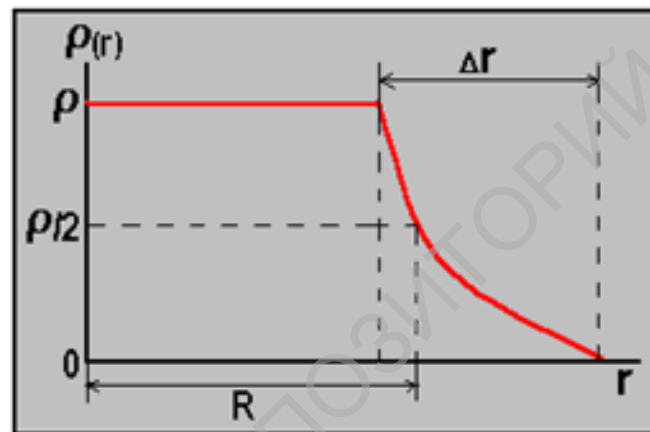
$m_{\text{нукл}}/m_e \approx 1836$  разоў. Зарад пратона +e.

Пратон мае спін  $S_p=1/2$  і ўласны магнітны момант  $\mu_p=+2,79\mu_{\text{я}}$ , дзе

$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p}$  - адзінка магнітнага моманту нуклона – ядзерны магнетон

$\frac{\mu_B}{\mu_{\text{я}}} = 1836$  разоў.

Нейтрон:  $\mu_n = -1,91 \mu_j$ . Знак “-” показує, що напрямки спіна і магнітного моменту протилежні. Атомне ядро має спин  $\vec{S} = \sum_N \vec{S}_p + \sum_N \vec{S}_n$ .



Ядро стабільне, коли воно володіє найменшою магнітною енергією. Убуджані стани ядра нестабільні. Ядра володіють статичними і динамічними властивостями.

Статичні – властивості стабільних ядер.

Динамічні – властивості ядер при їх перетвореннях.

## § 2 Заряд і маса ядра. Ізотопы і ізабары.

$$Q_{\text{я}} = \sum_{i=1}^n q_p,$$

$$\sum_{i=1}^n q_p = \sum_{i=1}^n -q_e$$

Колькасць пратонаў у ядры вызначаецца *зарадавым лікам*  $Z$ , г.зн.  $Z=N_p$ , дзе  $Z$  – парадкавы нумар хімічнага элемента ў перыядычнай сістэме элементаў Мендзялеева. Таму  $Q_{\text{я}} = +Ze$ .

Напрыклад, у вуглеродзе  $Z=6$ , г.зн.  $Q_{\text{я}} = +6e$ .

$$1 \text{ а.а.м} = 1/12 m_{\text{C}}^{12}$$

*Масавы лік* паказвае колькі пратонаў і нейтронаў знаходзяцца ў атамным ядры.

Таму колькасць нейтронаў  $N_n = A - Z$ .

Т.ч. атамнае ядро абазначаецца  ${}^A_Z X$ . Напрыклад,  ${}^4_2 \text{He}$ ,  ${}^{16}_8 \text{O}$ .

У сучасны момант мы ведаем:  $Z=1 \div 108$

$$A=1 \div 263$$

*Атамнае ядро ў ядзернай фізіцы называецца нуклід.*

Ізатоны – гэта атамныя ядры, якія маюць аднолькавае  $Z$ , але рознае  $A$ .

Напрыклад:  ${}^1_1H$  - процій (лёгкі вадарод);  ${}^2_1H$  - дэйтэрыў (цяжкі вадарод);  
 ${}^3_1H$  - трыцій (звышцяжкі вадарод).

${}^1_1H$  - стабільнае;  ${}^2_1H$ ,  ${}^3_1H$  - нестабільныя, радыёактыўныя.

Ядро проція – пратон (p) (1p;n=0)

Ядро дэйтэрыя – дэйтрон (d) (1p+n)

Ядро трыція – трытон (t) (1p+2n).

Ізабары – ядра, для якіх аднолькавае  $A$ , але розныя  $Z$ ,

ч.в.  ${}^{40}_{18}Ar$ ,  ${}^{40}_{20}Ca$ .

Ізатоны – у якіх  $N_n$  ( $N_n=A-Z$ ) аднолькавае (аднолькавы лік нейтронаў)  
 ${}^{14}_7N$ ,  ${}^{13}_6C$ .

Ізамеры – гэта ядры з аднолькавымі  $Z$  і  $A$ , але з рознымі перыядамі паўраспаду  $T$ .

Частным выпадкам:  ${}^{80}_{35}Br$  - мае два ізамеры  $T=18$  хвілін,  $T=4,4$  гадзіны.

### § 3 Енергія сувязі ядра.

$$m_{\text{я}} \neq \sum (m_p + m_n)$$

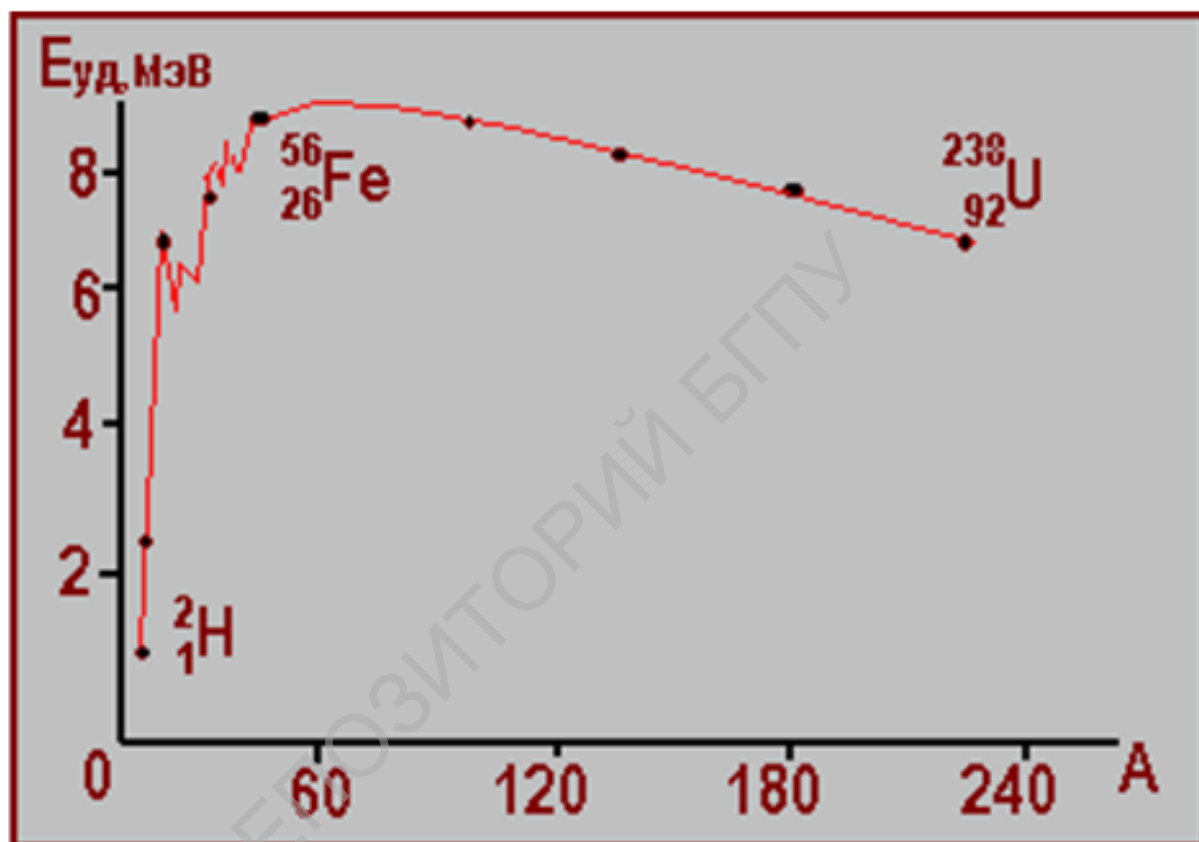
$$m_{\text{я}} < Zm_p + (A - Z)m_n$$

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}} \quad (*)$$

$$\varepsilon_{\text{суб}} = \Delta m c^2$$

З улікам (\*) 
$$\varepsilon_{\text{суб}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}] c^2$$

$$\varepsilon_{\text{уд}} = \frac{\varepsilon_{\text{суб}}}{A}$$



Калі б нуклон мог адначасова ўзаемадзейнічаць з усімі астатнімі

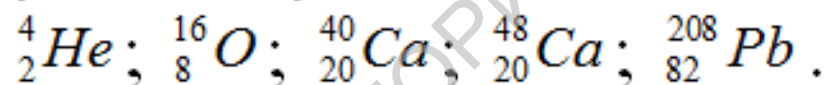
( $A-1$ ) нуклонамі, то было бы  $\epsilon_{суб} \sim A(A-1) \approx A^2$ , а ў нас  $\epsilon_{суб} \sim A$  па лінейным законе.

Пры  $A < 30$  большая частка нуклонаў знаходзіцца каля паверхні ядра, дзе іх сувязі непоўнаасцю насышчаны і  $\epsilon_{\text{уд}}$  не вялікая. З  $A \uparrow$  стасунак паверхні да аб'ёму ядра паменшаецца і  $\epsilon_{\text{уд}} \uparrow$ .

Калі  $A$  блізка да 56, то ядры найбольш стабільныя.

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

А ядры, у якіх і  $Z$  і  $N_p$  вызначаецца адным з гэтых лікаў, называецца двойчы магічнымі. Іх у прыродзе усяго пяць:



З залежнасці  $\epsilon_{\text{уд}}(A)$  вынікае, што пры рэакцыях дзялення цяжкіх ядзер і сінтэзе лёгкіх ядзер атрымліваюцца ядра больш устойлівыя (трывалыя), чым зыходныя ( $\epsilon_{\text{уд}} \uparrow$ ). Гэта значыць, што пры такіх працэсах адбываецца выпраменьванне энергіі.

Апісаныя працэсы ляжаць у аснове атрымання атамарнай энергіі пры дзяленні цяжкіх ядзер і тэрмаядзернай энергіі – пры сінтэзе лёгкіх ядзер, таму што цяжкім ядрам энергетычна невыгодна дзяліцца, а лёгкім злівацца адно з другім.

## § 4 Мадэлі атамнага ядра.

У 1936 годзе Фрэнкель (Расія) і Бор распрацавалі і стварылі *кропельную мадэль* атамнага ядра, згодна якой ядро ўпадабляецца зараджанай кроплі вадкасці.

### Асноўныя палажэнні:

- 1) Сілы, якія дзейнічаюць паміж малекуламі ў вадкасці і нуклонамі ў ядры – *караткадзейныя*.  
У ядры нуклоны ўтрымліваюцца моцнымі ядзернымі сіламі прыцягнення, якія падобны на сілы межмалекулярнага ўзаемадзеяння ўнутры кроплі вадкасці. І каб раздзяліць кроплю і ядро трэба патраціць значную энергію, якая роўная энергіі сувязі.
- 2) Няўстойлівасць ядра і кроплі вызначаецца *лікам часціц*. Кропля можа падзяліцца на мелкія кроплі або некалькі кропель могуць зліцца ў адну. У ядры таксама лёгкія ядры зліваюцца і ўтвараюць цяжкія і наадварот.
- 3) Практычная несціскальнасць ядра і кроплі. У кропельнай мадэлі нуклоны ўнутры ядра не рухаюцца адносна адзін другога, а знаходзяцца ў нейкіх станах раўнавагі, як і малекулы у кроплі вадкасці.
- 4) Для ядзерных сіл і сіл межмалекулярнага прыцягнення ў кроплі вадкасці характэрна ўласцівасць насычэння.

Галоўным недахопам кропельнай мадэлі з'яўляецца вельмі прыблізнае падабенства ядзернага рэчыва і вадкасці. Калі ў кроплі знаходзіцца каля  $\sim 10^9$  атамаў, то ў ядры нуклонаў не больш за 300.



У 1950 годзе Гёперт-Майер і Іенсан пабудавалі  
абалонкавую мадэль ядра.

### Асноўныя палажэнні:

- 1) нуклоны ў ядры рухаюцца ва ўсярэдненым цэнтральнасіметрычным полі самога ядра незалежна адзін ад другога. Гэта ядзерная структура падобна да абалонкі атама. І нуклоны ствараюць у ядры гэтыя абалонкі.
- 2) Пераход нуклона з 1 на 2 абалонку ўзнікае ў выніку ўзбуджэння атамнага ядра. На наяўнасць абалонак унутры ядра ўказвае існаванне магнічных і двойчы магнічных ядзер. Магнічныя – ядра з поўнасцю запоўненымі абалонкамі. Т.ч. ядро з поўнасцю запоўненымі ядзернымі абалонкамі – гэта аналаг атама інэртнага газа.
- 3) Спін нуклона =  $1/2$  ( $S=1/2$ ). Т.ч. нуклоны з'яўляюцца ферміонамі і падпарадкоўваюцца прынцыпу паўлі.

Недахопы: рух нуклонаў унутры ядра з'яўляецца ўсё ж такі залежным у выніку дзеяння паміж нуклонамі ядзерных сіл.

## § 5 Ядзерныя сілы.

### Уласцівасці ядзерных сіл:

- 1) Ядзерныя сілы з'яўляюцца кароткадзеячымі. Яны праяўляюцца на адлегласці  $\approx 10^{-15}\text{м}$ . На адлегласцях меншых  $10^{-15}\text{м}$  сілы прыцягнення замяняюцца сіламі адштурхнення паміж нуклонамі.
- 2) Сілы валодаюць зарадавай незалежнасцю.  $n \leftrightarrow n$ ;  $p \leftrightarrow p$ ;  $n \leftrightarrow p$  – сілы аднолькавыя.
- 3) Ядзерныя сілы з'яўляюцца самымі магутнымі сярод усіх сіл. Нуклоны – крыніцы ядзернага поля. Яны валодаюць ядзрным зарадам неэлектрычнай прыроды.

$$\text{Ч.В. дэйтон } {}^2_1\text{H} - E_{\text{св}} \sim 2,23\text{МэВ}$$

$$\text{атам вадарода } {}^1_1\text{H} - E_{\text{св}} \sim 13,6\text{эВ} \text{ (барыонны зарад).}$$

У кожнага нуклона  $B=1$ . Закон захавання  $B$  – стабільн. атамн. ядзер.

- 4) Ядзерныя сілы праяўляюць спінавую залежнасць. У залежнасці ад арыентацыі спінаў ядро можа ўтвараць ці не ўтварыць  $d$ .
- 5) Ядзеныя сілы не з'яўляюцца цэнтральнымі. Яны не дзейнічаюць уздоўж ліній, што злучаюць цэнтры нуклонаў. Нецэнтральнасць сіл выцякае з таго факту, што яны залежаць ад арыентацыі спінаў нуклонаў.

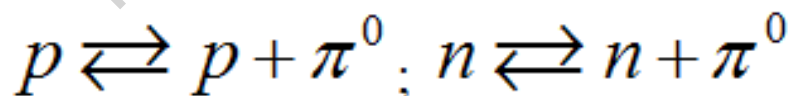
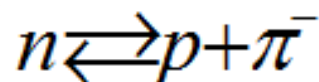
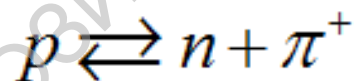
6) Уласцівасці насышчанасці. Гэта значыць, што кожны нуклон у ядры можа ўзаемадзейнічаць толькі з тымі нуклонамі, якія знаходзяцца ад яго на  $\approx 10^{-15}$  м.

$$\Rightarrow \varepsilon_{\text{уд}} = f(A)$$

7) Ядзеныя сілы носяць абменны характар. Пераносчыкі ядзернага ўзаемадзяння – віртуальныя часціцы  $\pi$ -мезоны або піоны.

Існуе 3 тыпа  $\pi$ -мезонаў:  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^+$ . Кожны нуклон стварае вакол сябе поле і бузупынна выпускае і паглынае піоны. Т.ч. адзінакавы нуклон акружаны мезонным “футрам” (воблакам). Таму пры прыбліжэнні двух нуклонаў да сутыкнення іх мезонных футраў адбываецца абмен піонамі.

Схемы ўзаемадзеяння:



Тэорыя ядзерных сіл, якая раскрывае іх абменны характар нызваецца мезоннай тэорыяй.

## § 6 Радыеактыўнасць. Закон радыеактыўнага распаду.

*Працэс пераўтварэння адных атамных ядзер у іншыя з выпраменьваннем часціц рэчыва (элементарных часціц) і высокачастотнага э/м выпраменьвання называецца радыеактыўнасцю.*

*Разлічаюць два тыпа радыеактыўнасці:*

- 1) Прыродную (естественная)
- 2) штучную (искусственная)

Прыродная радыеактыўнасць адкрыта ў 1896 годзе Бекерэлем, а штучная – у 1934 годзе Жоліо-Кюры.

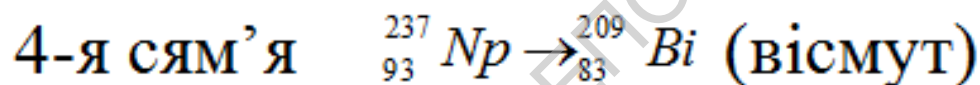
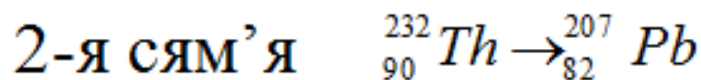
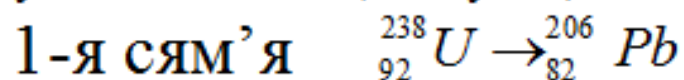
*Да з'явы радыеактыўнасці адносяцца:*

- 1)  $\alpha$ -распад
- 2)  $\beta$ -распад
- 3)  $\gamma$ -выпраменьванне
- 4) дзяленне цяжкіх ядзер
- 5) пратонная радыеактыўнасць.

*Прычына распаду – перанасычанасць нейтронамі, т.е. павялічэнне адноснага ліку нейтронаў у ядры з павелічэннем масавага ліку А.*

*Т.ч. сукупнасць усіх ізатопаў шэрага элементаў, што ўзнікаюць пры паслядоўных радыёактыўных ператварэннях з аднаго матчыннага ядра, называюцца радыёактыўнай сям'ёй.*

У сучасны момант існуюць 4 радыёактыўныя сям'і, у трох з якіх (уран, торый, актанауран) матчынымі ядрамі з'яўляюцца прыродныя элементы, у 4-й – штучны элемент (нептуній).



Як любы квантавы працэс радыёактыўнасць – з'ява статыстычная. Аднолькавыя ядра распадаюцца за розны час і для асобна ўзятага ядра можна толькі ўказаць імавернасць распаду за дадзены час. Т.ч., можна лічыць, што колькасць ядзер  $dN$ , якія распадаюцца за малы прамежутаку часу  $dt$  – як ліку ядзер  $N$ , так і прамежутку часу  $dt$ .

$$(*) \quad dN = -\lambda N dt$$

- закон радыёактыўнага распада ў дыф-най форме, дзе  $dN$  – колькасць ядзер, якія распадаюцца за час  $dt$  пры іх перашапачатковай колькасці  $N$ ;

$\lambda$  – пастаянная радыёактыўнага распаду.

$$\lambda = -\frac{dN}{N dt}$$

- імавернасць распаду (доля распаду) ядра  $\frac{dN}{N}$  за адзінку часу.

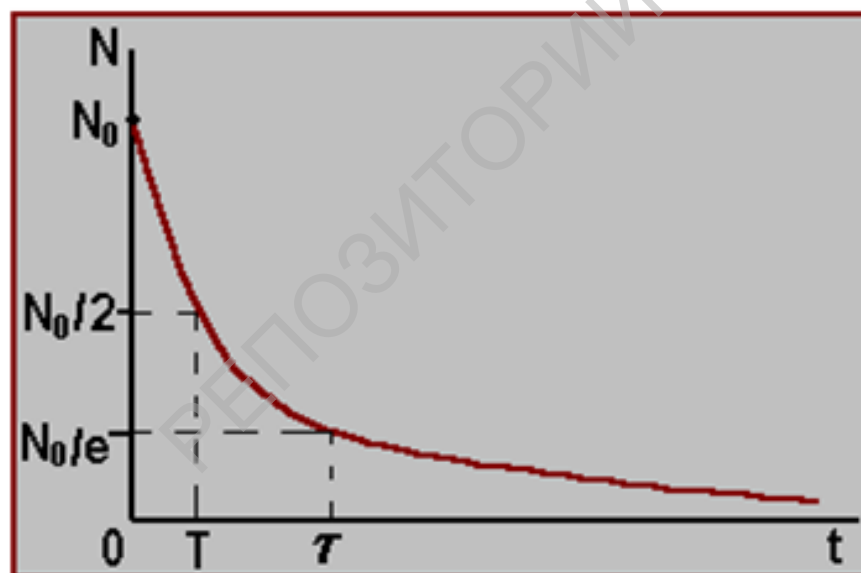
Раздзелім пераменныя ў (\*) і правядзем інтэграванне, атрымаем:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt ; \quad \int_{N_0}^t \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

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

– закон у інтэгральнай форме, дзе  $N_0$  – колькасць атамных ядзер у момант часу  $t=0$ ;  $N$  – колькасць ядзер, якія *не распаліся* і засталіся пасля праходжання часу  $t$ . Гэты лік ядзер, што не распаліся, з часам памяншаецца паводле экспаненты.

Час  $T$ , за які лік радыя nukлідаў зыходнага элемента памяншаецца ўдвая ў дадзеным аб'ёме, называецца перыядам паўраспаду.



З закона радыёактыўнага распаду  $t=T$  і

$$e^{-\lambda T} = \frac{1}{2} \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$T$  змяняецца ў вельмі шырокіх межах ад  $10^{-7}$  да  $10^{15}$  год.

Ядро	${}_{84}^{214}\text{Po}$	${}_{53}^{131}\text{I}$	${}_{38}^{90}\text{Sr}$	${}_{55}^{137}\text{Cs}$	${}_{94}^{241}\text{Pu}$	${}_{92}^{238}\text{U}$	${}_{49}^{115}\text{In}$
$T$	$1,64 \cdot 10^{-4}$ с	8 сутак	28 год	33 гады	18 год	$4,5 \cdot 10^9$ ГОД	$5,1 \cdot 10^{14}$ год

Велічыня, якая вызначае хуткасць распаду  $-\frac{dN}{dt}$  ці лік распадаў за гадзіну часу называецца актыўнасцю.

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$



$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

– сярэдні час жыцця радыяактыўнага ядра;

было

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

$$T = \tau \ln 2$$

$\tau$  – вызначаецца як час, за які лік радыянуклідаў памяншаецца ў  $e \approx 2,72$  раза.

$$\left[ N = N_0 e^{-\lambda t} = |t = \tau| = N_0 e^{-1} = \frac{N_0}{e} \right]$$

За адзінку актыўнасці прыняты *бекерэль* (Бк).

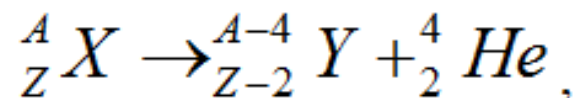
1 Бк = 1 распад за секунду = 1 распад/с

1 *Кюры* [Кю] =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк, што прыкладна адпавядае актыўнасці 1 г.

чыстага радыю  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ .

## § 7 $\alpha$ -распад

Схема распада

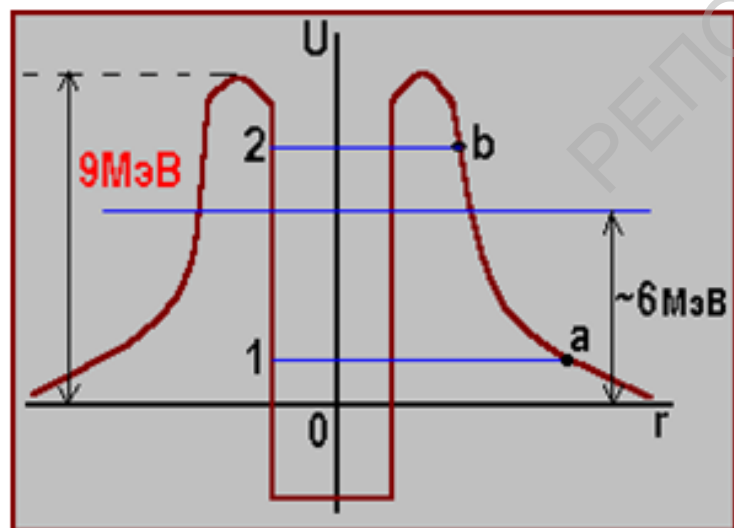


дзе  ${}^4_2 \text{He}$  -  $\alpha$ -часціца;  $X$  – матчынае ядро;  $Y$  – даччынае ядро.

$\alpha$ -часціца ўяўляе сабой ядро атама гелія, якое складаецца з 2-х пратонаў і 2-х нейтронаў.

$Q_\alpha = +2e$ ; энергія  $\alpha$ -часціцы 4 – 9 МэВ;  $E_{\text{ср}} \approx 6$  МэВ.

Існуе сувязь паміж пачатковай хуткасцю  $\alpha$ -часціц і перыядам паўраспаду  $T$  радыёактыўных элементаў: чым менш  $T$ , тым больш хуткія  $\alpha$ -часціцы выпускаюць радыёнуклід.



$\alpha$ -часціца ў гатовым выглядзе не існуе ўнутры ядра, а ўзнікае толькі ў момант яго распаду.

Гэты працэс падобны на працэс узнікнення фатона пры выпраменьванні атама. Т.ч.  $\alpha$ -часціца ўзнікае, калі ядро пераходзіць з аднаго стану ў другі.

Пры выльце з ядра  $\alpha$ -часціцы назіраецца тунэльны эфект.

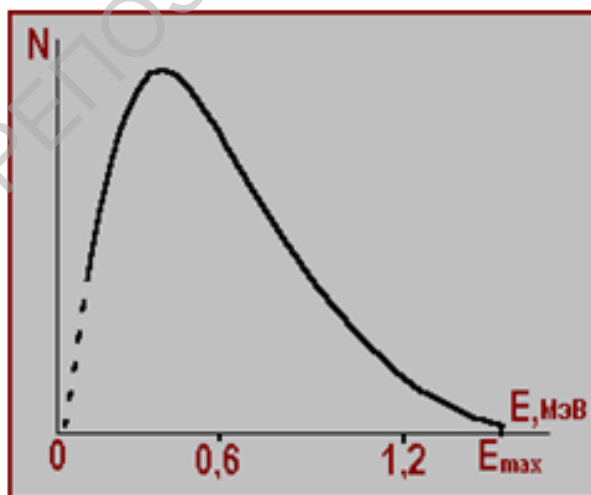
## § 8 $\beta$ -распад

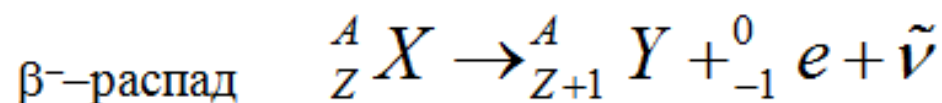
*Існуюць тры разнавіднасці  $\beta$ -распада:*

1.  $\beta^-$ -распад (электронны распад)
2.  $\beta^+$ -распад (пазітронны распад)
3. электронны захват.

Адметнай рысай  $\beta$ -распаду з'яўляецца яго ўнутрынуклоннае, а не ўнутрыядзернае пераўтварэнне.

У выніку  $\beta$ -распаду ўзнікаюць патокі электронаў ці патокі пазітронаў, якія распаўсюджваюцца з хуткасцю  $\sim 3 \cdot 10^8$  м/с і маюць шырокі спектр энергіі ад 0 да  $E_{\max}$  (да дзесятка МэВ).

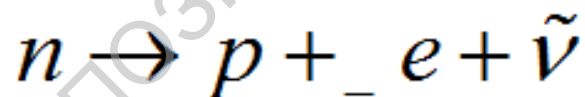




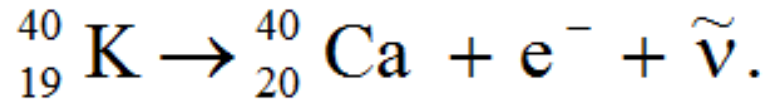
$\tilde{\nu}$  (антинейтрино) – вельмі малая маса; без зараду.  $S_{\tilde{\nu}} = \frac{1}{2}$

Пры  $\beta^-$ -распадзе колькасць нуклонаў да распада і пасля застаецца пастаяннай  $A = \text{const}$ .

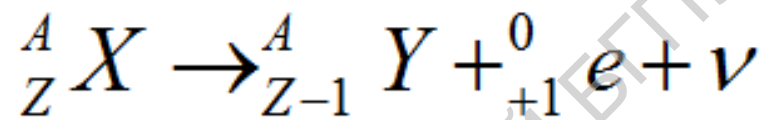
Т.ч. пры  $\beta^-$ -распадзе адбываецца пераўварэнне:



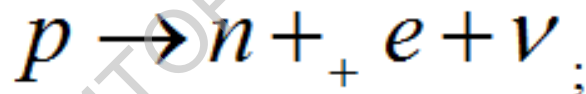
$m_n > m_p$  і гэты працэс магчымы, таму што свабодны нейтрон мае масу большую чым пратон. У сувязі з чым свабодныя нейтроны з'яўляюцца  $\beta$ -радыёактыўны.



$\beta^{+}$ -распад

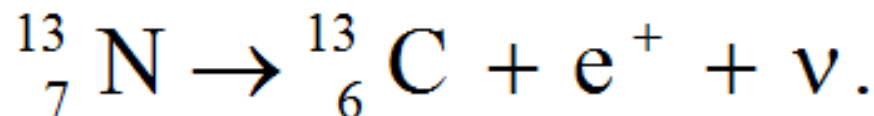


Пры гэтым  $A = \text{const}$ , а  $Z \downarrow$  на 1, выпраменьваецца пазітрон і нейтрына, а

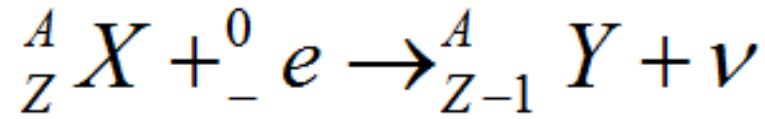


гэта значыць:

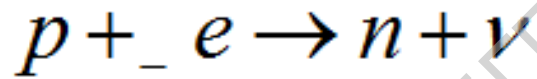
$m_p < m_n \Rightarrow$  пратон у свабодным стане не радыёактывен (не можа пераўтварацца). Калі ж пратон знаходзіцца ўнутры ядра (звязаныя пратоны), ён можа атрымаць частку энергіі ад іншых нуклонаў і перайсці ва ўзбуджаны стан і толькі такі ўзбуджаны пратон можа пераўтварыцца ў нейтрон.



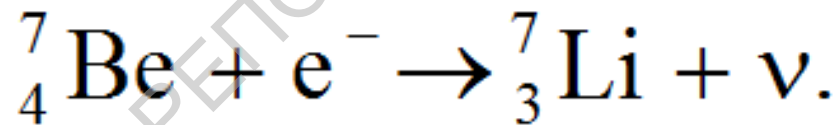
$\bar{e}$ -захват



Гэта значыць,



Пры электронным захваце электрон захватваецца ядром, утвараецца новае ядро і ўзнікае характарыстычнае рэнгенаўскае выпраменьванне, таму што захват электрона з К-абалонкі выклікае эл-ныя пераходы з больш высокіх узроўняў. З L і M-абалонак электрон захватваецца рэдка.



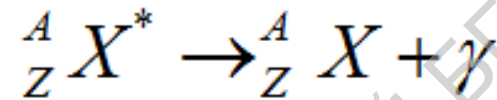
Пранікальная здольнасць для  $\beta$ -выпраменьвання для газаў  $\sim 10$  м, вадкасці  $\sim 10$  мм, цвёрдых цел  $\sim 1$  мм.

Для аховы ад  $\beta$ -прамянёў выкарыстоўваюцца металічныя і пластмасавыя экраны.

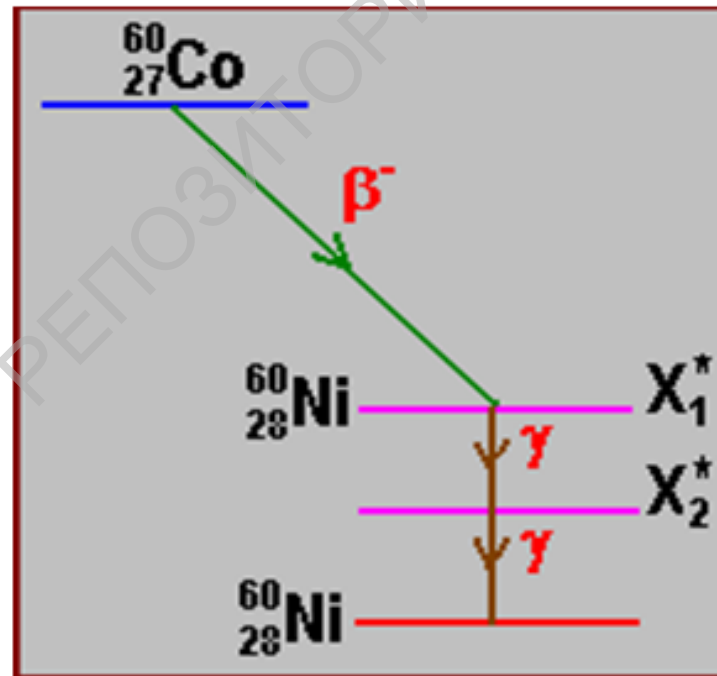
## § 9 $\gamma$ -выпраменьванне

Гамма-выпраменьванне ўзнікае ў працэсе  $\alpha$  або  $\beta$ -распаду ў тым выпадку, калі даччынае ядро знаходзіцца ва ўзбуджаным стане.

Схема:



\* - узбуджаны стан.



*Унутраная канверсія* – гэта працэс выпускання ядром  $\gamma$ -кванта, часцей віртуальнага, які паглынаецца адным з электронаў К, L, M атама. У выніку чаго электрон вылятае з атама, а вакантнае месца запаўняецца электронамі з больш высокіх энергетычных узроўней. Т.ч. узнікае характарыстычнае рэгенаўскае выпраменьванне.

$\gamma$ -прамяні валодаюць вялікай пранікальнай здольнасцю (жорсткае), не адхіляюцца ні электрычным, ні магнітным полем. Маюць энергію  $\sim 1$  МэВ і  $\lambda \sim 10^{-12}$  м.

Найбольш жорсткае  $\gamma$ -выпраменьванне праходзіць слой свінцу таўшчынёй 5 см і слой паветра да некалькі сот метраў.

Закон аслаблення выпраменьвання выглядае наступным чынам:

$$I = I_0 e^{-\mu X},$$

дзе  $\mu$  – лінейны каэфіцыент аслаблення.

Пры  $x=d_{1/2}$ , пры якой  $I=I_0/2$  называецца таўшчанёй слоя палавіннага аслаблення. Для  $\gamma$ -выпраменьвання з  $\sim 1,25$  МэВ  $d_{1/2} \approx 8$  мм са свінцу і  $d_{1/2} \approx 16$  мм для жалеза.



4) Спонтаннае дзяленне цяжкіх ядзер – працэс самавольнага дзялення ядзер урана на дзве прыкладна роўныя часткі. Выяўлены ў 1940 годзе. Па сваім рысам дадзенае дзяленне вельмі блізка да вымушанага дзялення ядзер урана.

5) Пратонная радыёактыўнасць – пераўтварэнне ядра з іспусканнем аднога ці двух (двухпратонная радыёактыўнасць) пратонаў. Упершыню назіралася ў 1963 годзе.

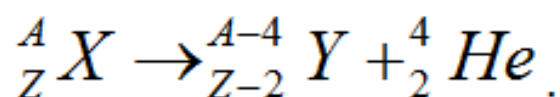
## § 10 Правілы зрушэння

Пры ўсіх радыёактыўных пераўтварэннях ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) строга выконваюцца законы захавання *масы, энергіі, электрычнага зараду, спіну і інш.*

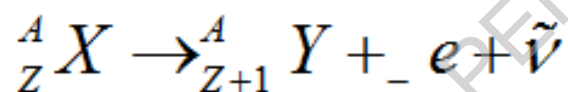
Маса пры пераўтварэннях звязана з лікам нуклонаў, які не змяняецца і вызначаецца масавым лікам  $A$ . На падставе закона захавання масы (колькасці нуклонаў) і электрычнага зараду ўстанаўліваюцца правілы зрушэння. Пры іх фармуліроўцы ўлічваецца:

- а) што масавы лік прадуктаў распаду роўны масавому ліку зыходнага ядра;
- б) зарадавы лік прадуктаў распаду роўны зарадаваму ліку зыходнага ядра.

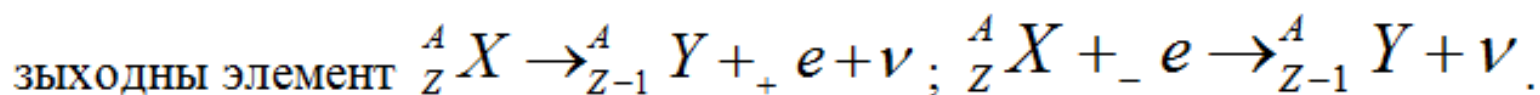
1) У выніку  $\alpha$ -распаду ўзнікае даччынае ядро, якое стаіць на два месцы бліжэй да пачатку ў табліцы Мендзялеева, чым зыходны элемент



2) Пры электронным  $\beta^-$ -распадзе ўзнікае новы элемент, які на адно месца стаіць бліжэй да канца табліцы Мендзялеева, чым зыходны элемент



3) Пры пазітронным  $\beta^+$ -распадзе і электронным захопе ўзнікае даччынае ядро, якое на адно месца бліжэй да пачатку табліцы Мендзялеева, чым



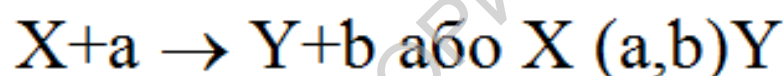
На падставе гэтых 3-х правіл можна вылічыць, якое ядро ўтвараецца ў выніку любога радыёактыўнага пераўтварэння.

## § 11 Ядзерныя рэакцыі

*Працэс штучнага пераўтварэння атамных ядзер пад уздзеяннем элементарных часціц ці іншых ядзер называецца ядзернай рэакцыяй.*

Ядзерныя рэакцыі адбываюцца пры прыбліжэнні часціцы-снарада да ядра-мішэні да  $\approx 10^{-15}$  м.

Схема ядзернай рэакцыі:



Т.ч. пры бомбардзіроўцы часціцай  $a$  ядра  $X$  узнікае ядро  $Y$  і ўтвараецца часціца  $b$ .

$$E = \left( \sum m_1 - \sum m_2 \right) c^2,$$

дзе  $\sum m_1$  - сума мас часціц да рэакцыі;  $\sum m_2$  - сума мас часціц пасля рэакцыі.

Калі  $\sum m_1 > \sum m_2$ , то  $E$  “-“, энергія паглынаецца, гэта рэакцыі эндатэрмічныя.

Існуюць два тыпы рэакцый:

1) Рэакцыі, якія выкліканы часціцамі з невялікай энергіяй і працякаюць за час, значна большы, чым час ядзернага пралёту  $\tau_{\text{я}} \approx 5 \cdot 10^{-22}$  с, праходзяць у два этапа з утварэннем складанага ядра П:

а)  $X+a \rightarrow \text{П}$ , дзе П – прамежкавае ядро, якое знаходзіцца ва ўзбуджанам стане.

Так як  $\tau_{\text{П}} \sim 10^{-14} - 10^{-12}$  с, то за гэты час “забываецца” гісторыя ўтварэння ядра, таму яго распад працякае незалежна ад першага этапа.

б)  $\text{П} \rightarrow Y+b$  або  $X+a \rightarrow \text{П} \rightarrow Y+b$ .

2) Рэакцыі на хуткіх часціцах (прамыя рэакцыі):

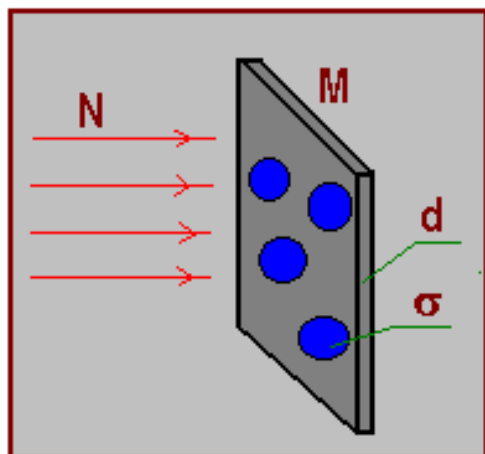
а) Рэакцыя зрыву (срыва). Калі адносна ядра рухаецца дэйтон, то адзін нуклон зрываецца (захопліваецца ядром), а другі пралятае міма.

б) Рэакцыя захвату, адваротная рэакцыі зрыва. Калі міма ядра пралятае нуклон ён захопдівае ў ядра нуклон і пераўтвараецца у дэйтон.

Пры вельмі высокіх энергіях часціц узнікаюць выбуховыя ядзерныя рэакцыі і ядры распадаюцца на шмат дробных асколкаў, якія называюцца *фрагментамі*.

Ядрамі-снарадамі могуць быць:  $\alpha$ -часціцы, нейтроны,  $\gamma$ -кванты, пратоны, дэйтаны і г.д.

Практычна большасць ядзерных рэакцый адбываецца пры сутыкненнях пучкоў часціц з мішэнямі, але расшчапленне кожнага ядра ўяўляе сабой элементарны акт узаемдзеяння ядра і адной часціцы. Таму для характарыстыкі інтэнсіўнасці рэакцыі ці імавернасці ўзаемдзеяння часціцы з ядрамі мішэні, уводзіцца паняцце *эфектыўнага сячэння ядзернай рэакцыі*, якое абазначаюць  $\sigma$ .

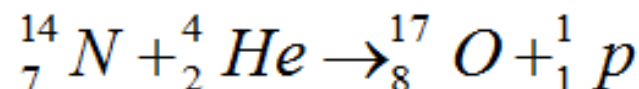


*Пад эфектыўным сячэннем ядзернай рэакцыі разумеюць плошчу мішэні, пры пападанні ў якую абавязкова адбываецца ядзерная рэакцыя.*

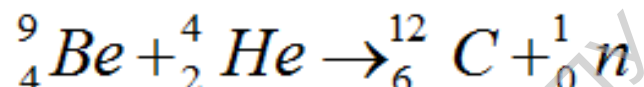
Паколькі ядзерныя сілы кароткадзеючыя, то эфектыўнае сячэнне, якое выражаецца ў адзінках плошчы ( $\text{м}^2$ ) з'яўляецца вельмі малым і для іх уводзіцца спецыяльная адзінка, якая называецца *барн*:  $1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$ .

## Прыклады ядзерных рэакцый:

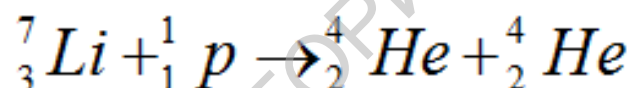
1) 1919 год, Рэзерфорд (штучная)



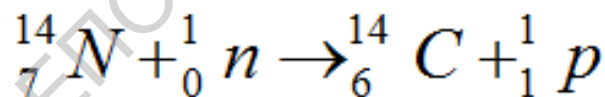
2) 1932 год, Чэдвак, рэакцыя па выяўленні нейтрона



3) Першае расшчапленне ядра пад уздзеяннем штучнага паскораных пратонаў ( $\sim 0,8$  МэВ) было праведзена ў 1932 годзе Кокрафтам і Уолтанам

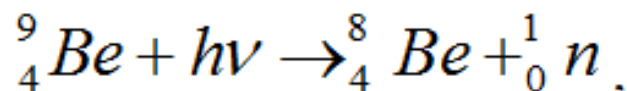


4) У атмасферы пад уздзеяннем нейтронаў з касмічных прамянёў працякае рэакцыя



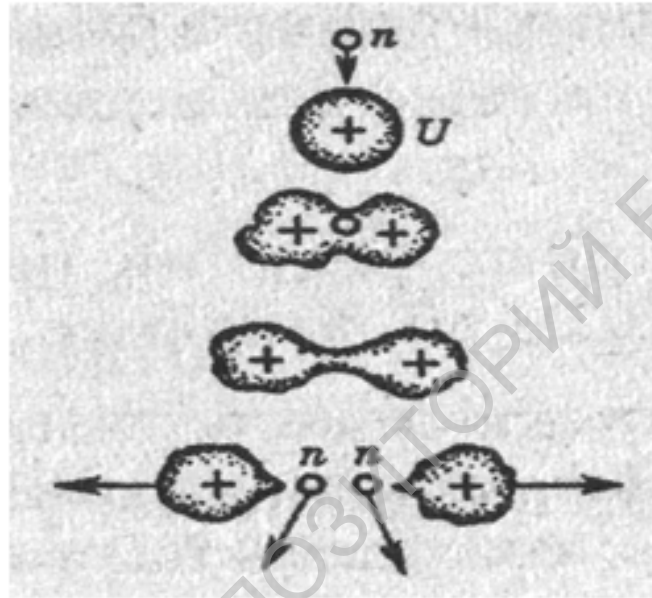
${}^{14}_6\text{C}$  - радыёактыўны з  $T_{1/2}=5670$  гадоў і засвойваецца раслінамі пры фотасінтэзе.

5) Фотаядзерныя рэакцыі:



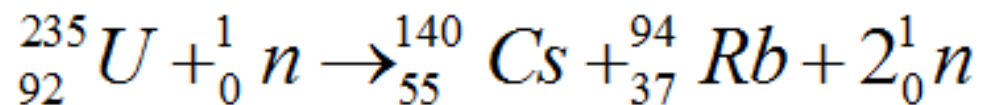
дзе  $h\nu$  --  $\gamma$ -квант (жорсткі) атрыманы з дапамогай бэтатрона.

## § 12 Дзяленне ядзер. Ланцуговая ядзерная рэакцыя



Дзяліцца могуць:  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ;  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ;  ${}_{92}^{233}\text{U}$ ;  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ;  ${}_{90}^{230}\text{Th}$ .

Прыкладам дзялення ядра пад дзеяннем нейтронаў з'яўляецца рэакцыя:









У залежнасці ад кінетычнай энергіі (хуткасці) нейтроны дзеляцца на:

- 1) хуткія ( $0,1 \text{ МэВ}$  і болей)
- 2) павольныя (не больш  $0,1 \text{ МэВ}$ )
- 3) цеплавыя ( $0,5 - 5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$ )
- 4) халодныя ( $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-7} \text{ эВ}$ )

Існуе правіла Бора-Уілера, згодна якому ядры, якія складаюцца з няцотнага ліку нейтронаў, дзеляцца пад уздзеяннем нейтронаў любой энергіі, а ядры, што складаюцца з цотнага ліку нейтронаў, – толькі пад уздзеяннем хуткіх нейтронаў.

Напрыклад:  ${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow N = 143$  (любья нейтроны)

${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow N = 146$  (быстрыя)

Развіццё ланцуговай рэакцыі дзялення характарызуецца каэфіцыентам размнажэння нейтронаў  $K$ :

$$K = \frac{N_i}{N_{i-1}}$$

$K$  вызначаецца стасункам колькасці нейтронаў, якія выклікаюць дзяленне ядзер на адным з этапаў рэакцыі да колькасці нейтронаў, што выклікаюць дзяленне ядзер на папярэднім этапе гэтай рэакцыі. У залежнасці ад велічыны  $K$  могуць працякаць розныя працэсы дзялення.

*Пры  $K < 1$  ядзерная рэакцыя не развіваецца (затухае).*

*Пры  $K = 1$  рэакцыя ідзе з const хуткасцю (стабільная).*

*Пры  $K > 1$  рэакцыя некіруемая (выбух).*

$K$  залежыць ад тыпа ядзернага рэчыва, яго масы і памераў (формы). У выпадку сферычнай формы  $V_{\text{цела}} \sim R^3$ , а  $S_{\text{пав}} \sim R^2$ , дзе  $R$  – радыус сферы.

Гэта значыць, што адносная доля вылятаючых наружу нейтронаў памяншаецца з ростам масы ( $R$  – пав-ца) рэчыва, які дзеляцца як  $S/V \approx 1/R$ .

Маса радыёактыўнага рэчыва, якая адпавядае  $K=1$  называецца крытычнай масай ( $m_{кр}$ ).

Пры гэтым памеры актыўнай зоны – крытычныя памеры. Для  ${}_{92}^{235}U$   
 $m_{кр} = 40$  кг кр. памеры – шар.

Пры  $m \geq m_{кр}$  – рэакцыя ідзе.

Пры  $m < m_{кр}$  – не ідзе.