

Неутронна физика

Ядрено делене

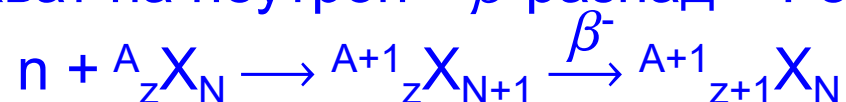
Ядрени реактори и експлозиви

История

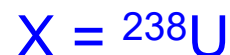
1930 – откриване на неутрона – Chadwick (N.P. 1932)

Какво се случва когато се облъчат ядра с неутрони?

1934 - 6 – захват на неутрон + β -разпад – Fermi (N.P. 1938)



Може ли да синтезираме елемент с по-голям атомен номер от 92?



1939 – получения елемент е Ba – Hahn&Strassmann

1939 – ядрено делене – Meitner&Frisch

1942 – първи ядрен реактор – Fermi

1945 – атомна бомба

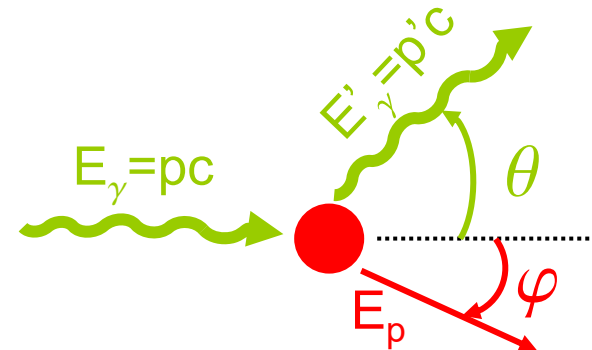
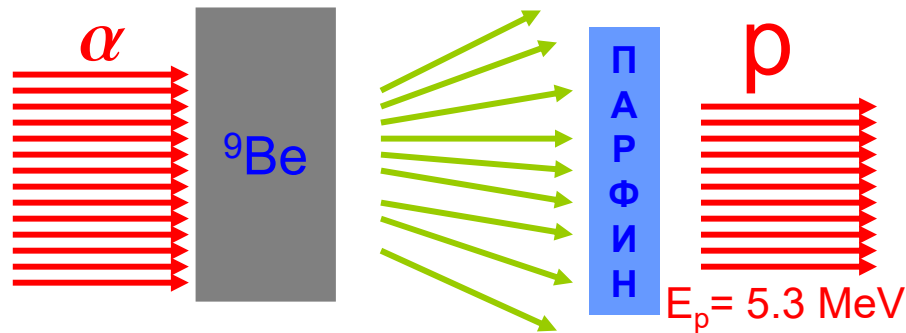
1954 – водородна бомба

Откриване на неутрона

1930 – Bothe & Becker

дълбоко проникващо лъчение
слабо йонизиращо действие
Curie & Joliot

~~γ = лъчи?~~



$$E_{\gamma} + m_p c^2 = E'_{\gamma} + \sqrt{p_p^2 c^2 + m^2 c^4} \quad (\vec{p}_p)^2 = (\vec{p}_{\gamma} - \vec{p}'_{\gamma}) \cdot (\vec{p}_{\gamma} - \vec{p}'_{\gamma}) = p_{\gamma}^2 + p_{\gamma}'^2 - 2 p_{\gamma} p_{\gamma}' \cos(\theta)$$

$$\vec{p}_{\gamma} = \vec{p}'_{\gamma} + \vec{p}_p \quad \theta = 180^{\circ} \quad = p_{\gamma}^2 + p_{\gamma}'^2 + 2 p_{\gamma} p_{\gamma}'$$

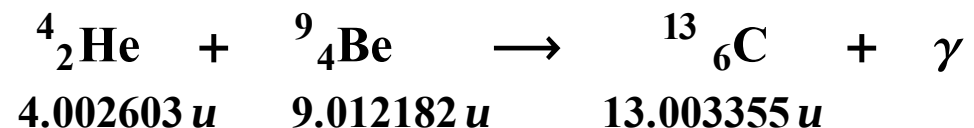
$$(E_{\gamma} - E'_{\gamma}) + m_p c^2 = \sqrt{p_p^2 c^2 + m^2 c^4} \quad (cp_p)^2 = (cp_{\gamma})^2 + (cp'_{\gamma})^2 + 2 (cp_{\gamma}) (cp'_{\gamma})$$

$$E_{\gamma}^2 + E_{\gamma}'^2 - 2 E_{\gamma}' E_{\gamma} + 2 m_p c^2 (E_{\gamma} - E'_{\gamma}) = (cp_p)^2 = E_{\gamma}^2 + E_{\gamma}'^2 + 2 E_{\gamma}' E_{\gamma}$$

$$E'_{\gamma} = \frac{m_p c^2 E_{\gamma}}{m_p c^2 + 2 E_{\gamma}} \quad T_p = E_{\gamma} - E'_{\gamma} = \frac{2 E_{\gamma}^2}{m_p c^2 + 2 E_{\gamma}} \quad 5.3 \text{ MeV} = \frac{2 E_{\gamma}^2}{938.28 \text{ MeV} + 2 E_{\gamma}}$$

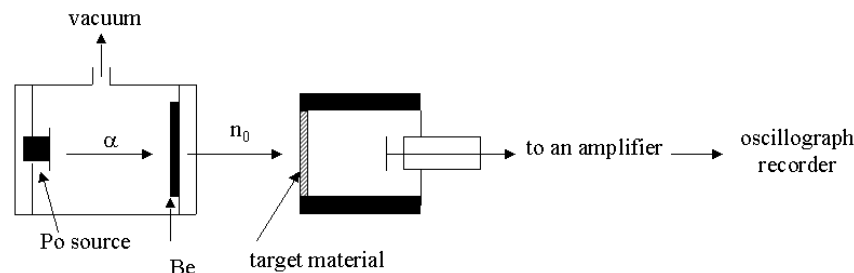
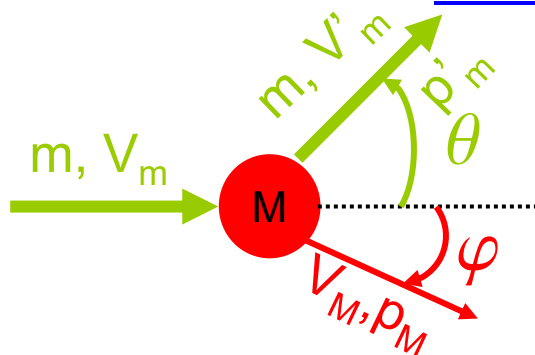
$$E_{\gamma} = 52.58 \text{ MeV}$$

$$E_{\gamma} = 10.64 \text{ MeV}$$



Откриване на неутрона

1932 - Chadwick Нобелова награда 1935



Каква е максималната скорост на отсочилото ядро – V_M ?

$$\frac{p_m^2}{2m} = \frac{p_m'^2}{2m} + \frac{p_M^2}{2M} \quad (\vec{p}_M)^2 = \frac{M}{m} (p_m^2 - p_m'^2) \quad V_M = V_{M \max} \Leftrightarrow p_M = p_{M \max} \quad \theta = 180^\circ$$

$$\vec{p}_m = \vec{p}_m' + \vec{p}_M \quad (\vec{p}_M)^2 = p_m^2 + p_m'^2 - 2 p_m' p_m \cos(\theta) = p_m^2 + p_m'^2 + 2 p_m' p_m$$

$$\frac{M}{m} (p_m^2 - p_m'^2) = p_m^2 + p_m'^2 + 2 p_m' p_m \quad p_m' = \frac{M - m}{m + M} p_m \quad \frac{p_m^2}{(M + m)^2} = \frac{p_M^2}{4 M^2} \quad \frac{p_m}{(M + m)} = \frac{p_M}{2 M}$$

$$\frac{m V_m}{(M + m)} = \frac{M V_M}{2 M}$$

$$V_M = \frac{2 m V_m}{(M + m)}$$

$$\frac{M}{m} = \frac{p}{14} \quad v_p = 3.3 \cdot 10^7 \text{ m/s} \quad v_N = 4.7 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$\frac{v_p}{v_{14N}} = \frac{m + M_{14N}}{m + M_p}$$

$$\frac{m(=M_n)}{M_p} = 1.14(10)$$

- електрически неутрална частица
- с маса близка до масата на протона ($m_n/m_p=1.00138$)
- нестабилна в свободно състояние - $T_{1/2} = 10.6 \text{ min}$
- ненулев магнитен момент - $\mu=-1.19304184\mu_N$

Забавяне на неутрони

Топлинни 0.025 eV. Бавни ≈ 1 keV, Бързи 100 keV-10MeV

$$\frac{T'_n}{T_n} = \frac{A^2 + 1 + 2 A \cos(\vartheta)}{(A + 1)^2}$$

$$\vartheta = 0 \quad \frac{T'_n}{T_n} = 1$$

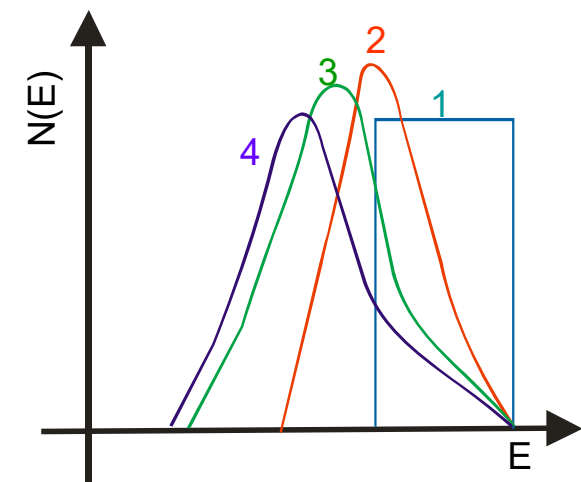
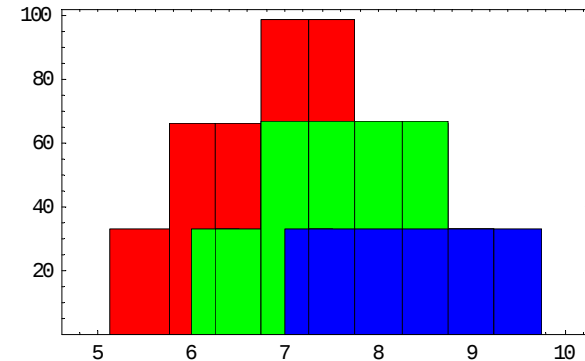
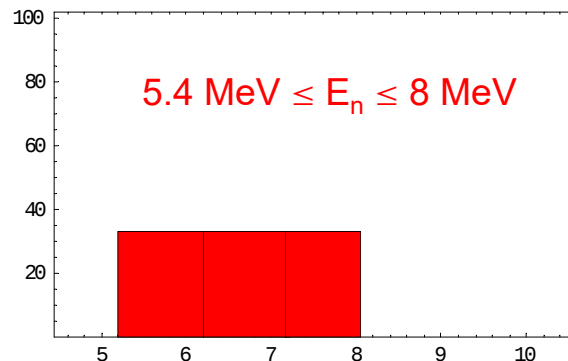
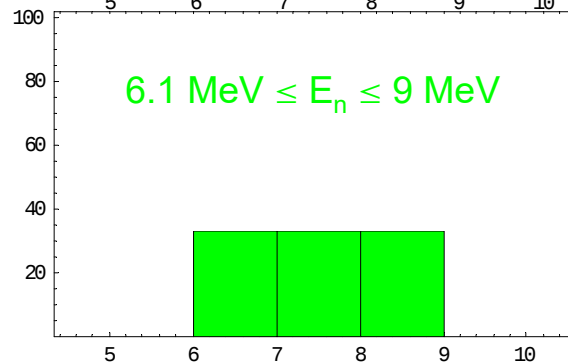
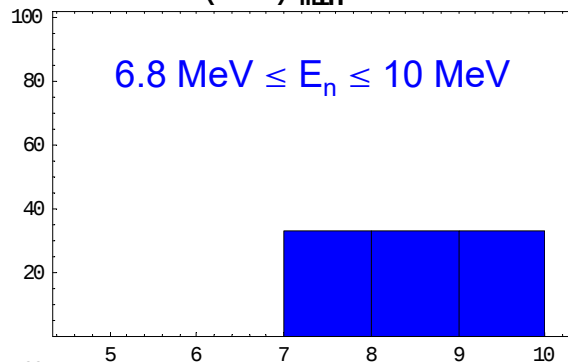
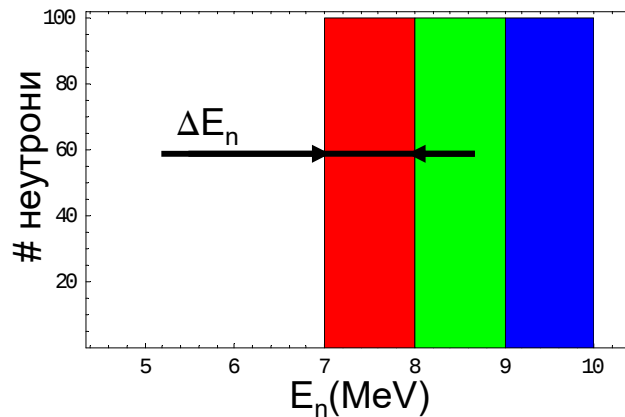
$$\vartheta = \pi \quad \left(\frac{T'_n}{T_n} \right)_{\min} = \left(\frac{A - 1}{A + 1} \right)^2$$

T'_n е равномерно разпределена

$$\left(\frac{A - 1}{A + 1} \right)^2 T_n \leq T'_n \leq T_n$$

300 Моноенергетични неутрони
 $E_n = 10$ MeV се забавят в ^{12}C

Първо взаимодействие
 $7.2 \text{ MeV} \leq E_n \leq 10 \text{ MeV}$



Забавяне на неутрони

$$\xi = \left[\log \frac{E}{E'} \right]_{av} = \frac{\int \log \left[\frac{(A+1)^2}{A^2 + 1 + 2A \cos(\vartheta)} \right] d\Omega}{\int d\Omega} \quad n - \text{удара (поколения неутрони)} \quad \log E' = \log E - n\xi$$

Характеристика на забавителя (модератора)

Колко удара са необходими за термализацията ($E' \sim 0.025$ eV) на неутрони
получени при делене ($E \sim 2$ MeV)?

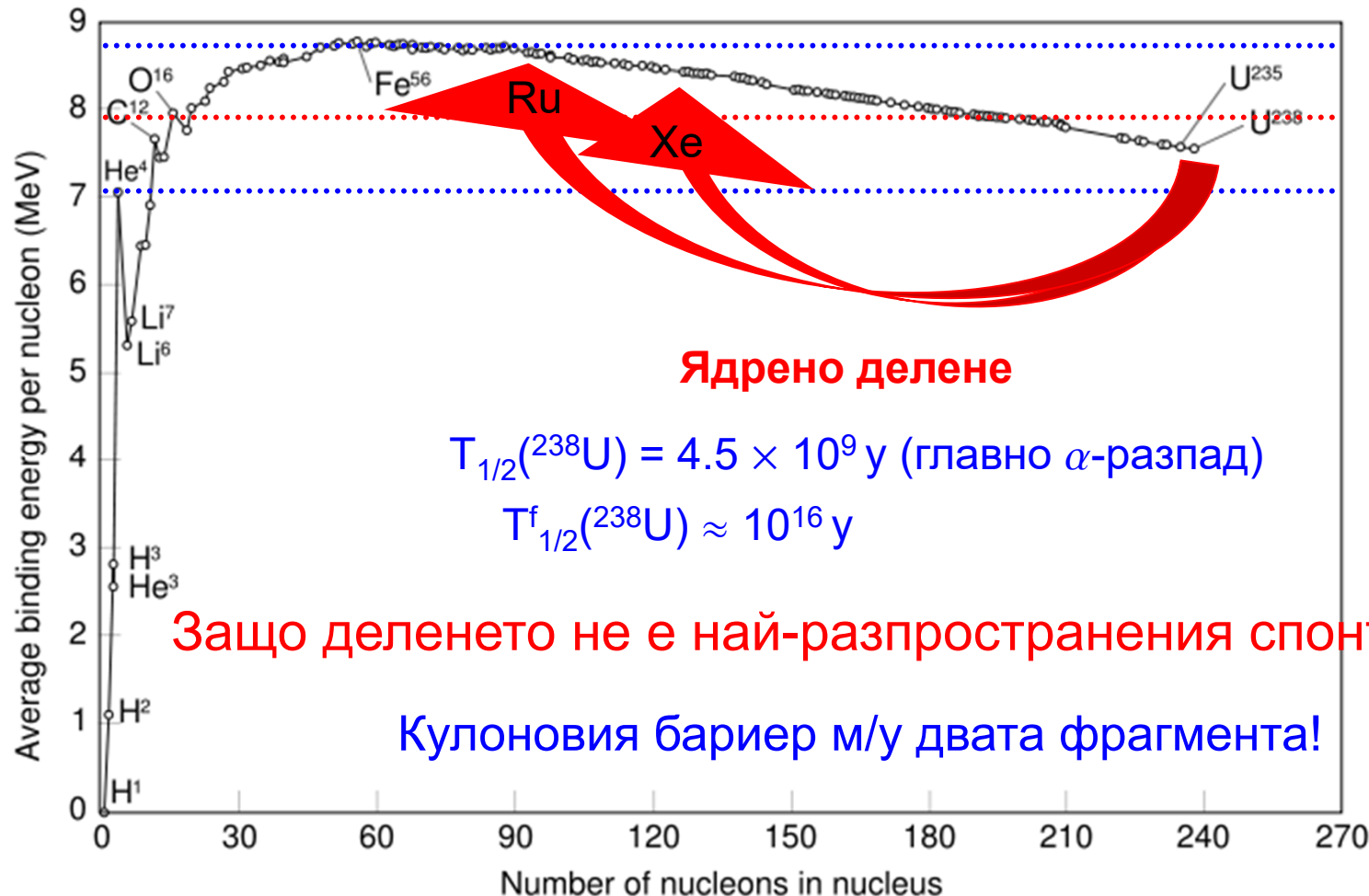
Забавител	ξ	n (термализация)
^1H	1.00	18
^2H	0.725	25
^4He	0.425	43
^{12}C	0.158	110
^{238}U	0.0084	2200

Забележка: при ниско енергетични неутрони е необходимо да се отчита и температурното движение на атомите на забавителя.

Защо ядрата се делят?

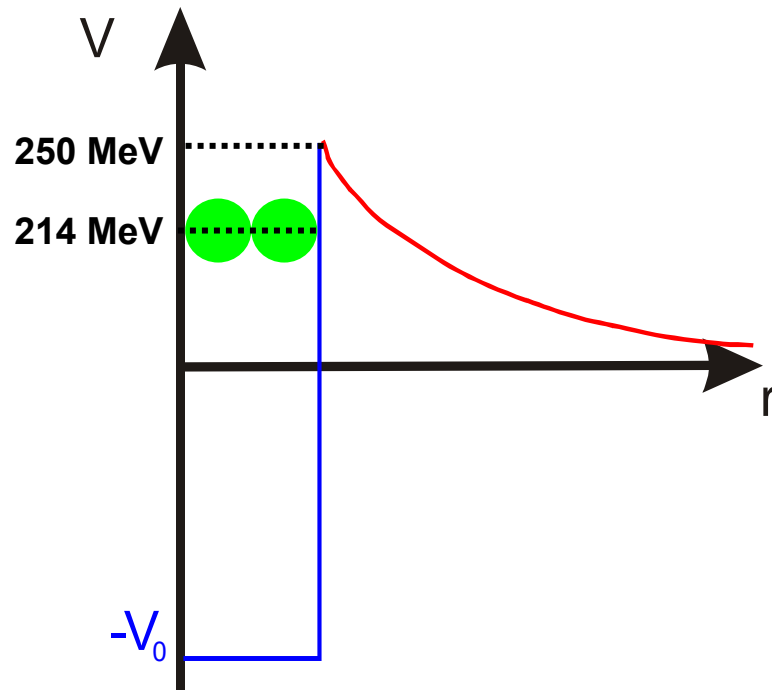
$$m({}_Z^A X_N) = Nm_n + Zm_p - \frac{1}{c^2} B(N, Z) \quad \Delta = (m - A) c^2$$

$${}^{238}\text{U} \rightarrow 2 \times {}^{119}\text{Pd} \quad E = 238 \times (-7.6 \text{ MeV/n}) - 2 \times (119 \times (-8.5)) = 214 \text{ MeV}$$



Кулонов бариер

- разглеждаме двата фрагмента (^{119}Pd) като система с енергия на взаимодействие 0 когато $R=\infty$;
- при формирането си (делене на ^{238}U) тази система има енергия 214 MeV; Какъв е Кулоновия бариер?



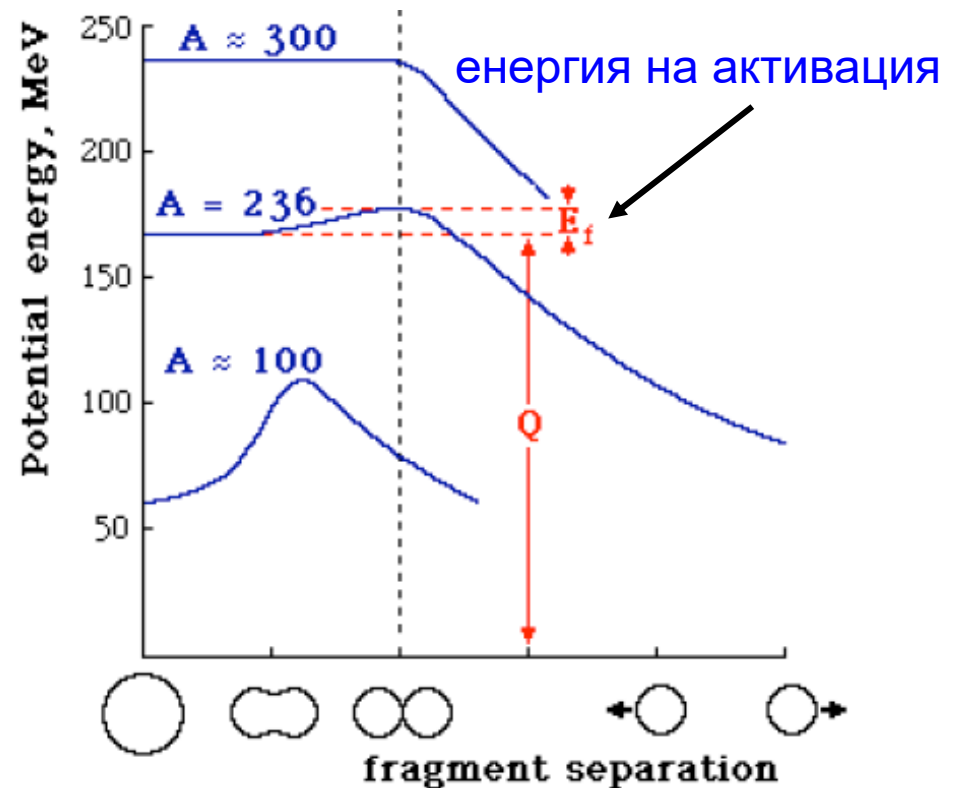
Енергията, освободена при делене е приблизително равна на височината на Кулоновия бариер!

$$R_1 = R_2 = 1.25 (119)^{1/3} = 6.1 \text{ fm}$$

$$V_c = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R}$$

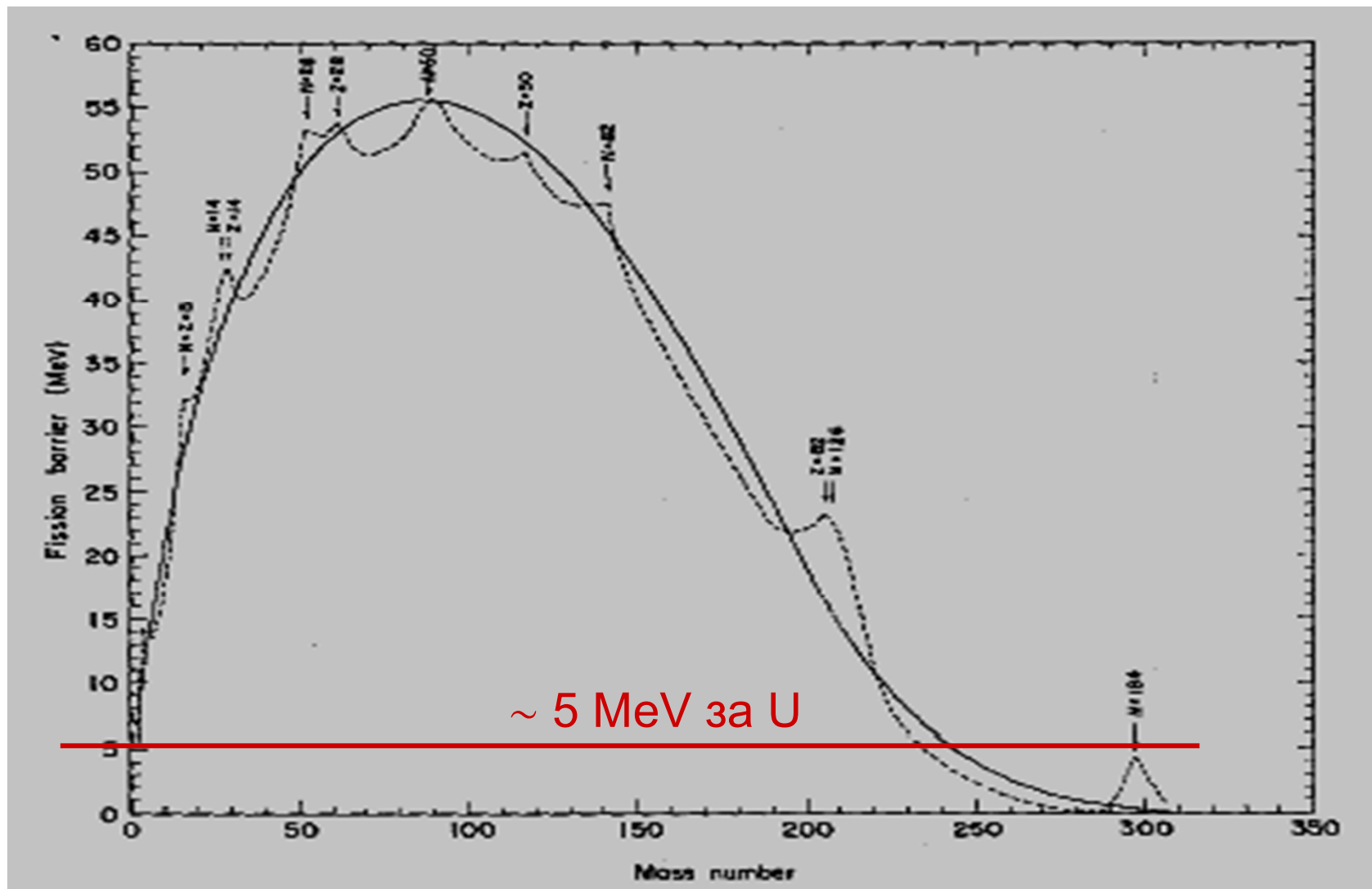
$$= (1.44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}) \frac{46^2}{12.2 \text{ fm}} = 250 \text{ MeV}$$

Вероятността за делене ще зависи от енергията на междинното състояние!



Индукцирано делене – чрез поглъщане на ниско енергетичен неутрон или фотон, ядро, стабилно по отношение на делене, формира междинно състояние със енергия равна или по-висока от тази на бариера.

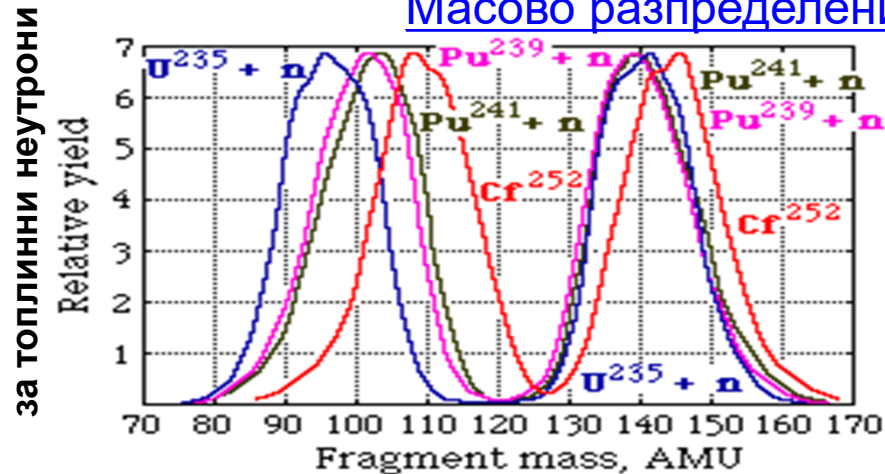
Енергия на активация



Характеристики на ядреното делене

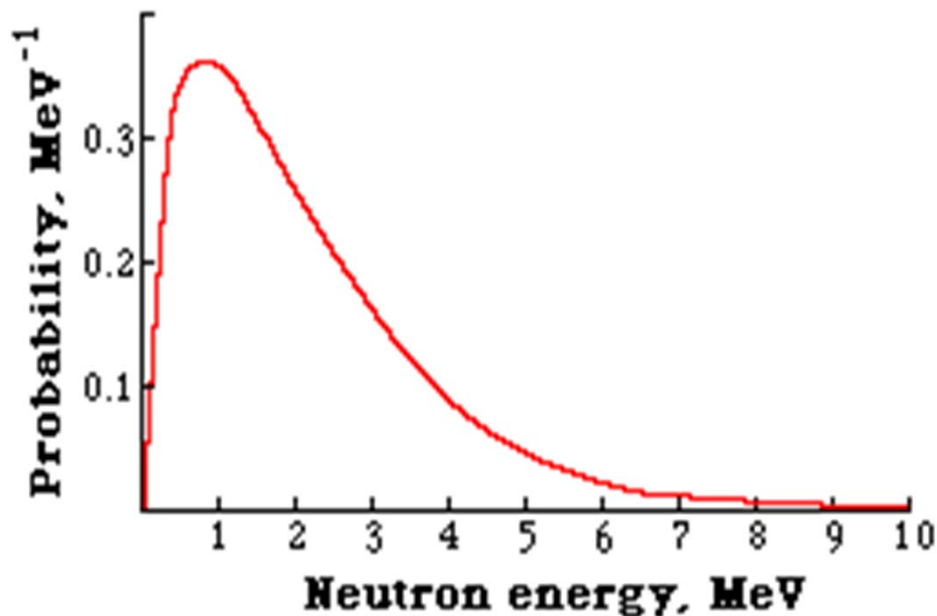


Масово разпределение на фрагментите



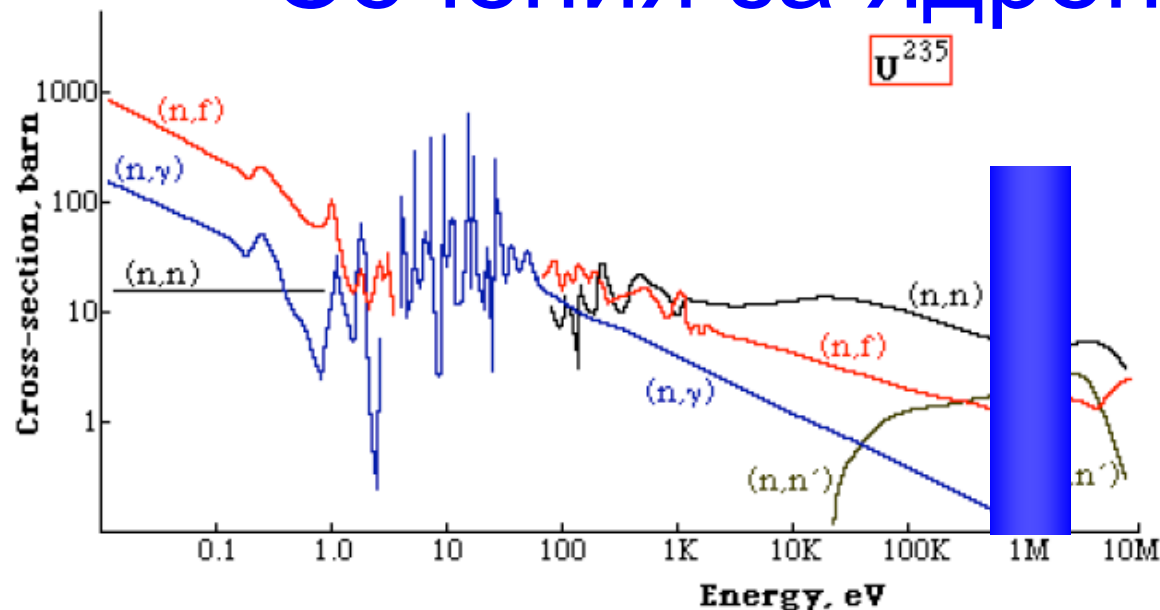
- симетрично около $A_1 \approx A_2$
- минимум около $A_1 \approx A_2$
- с нарастване на енергията на неутрона разпределението се симетризира около $A_1 \approx A_2$

Излъчване на неутрони – основа за получаване на верижна реакция



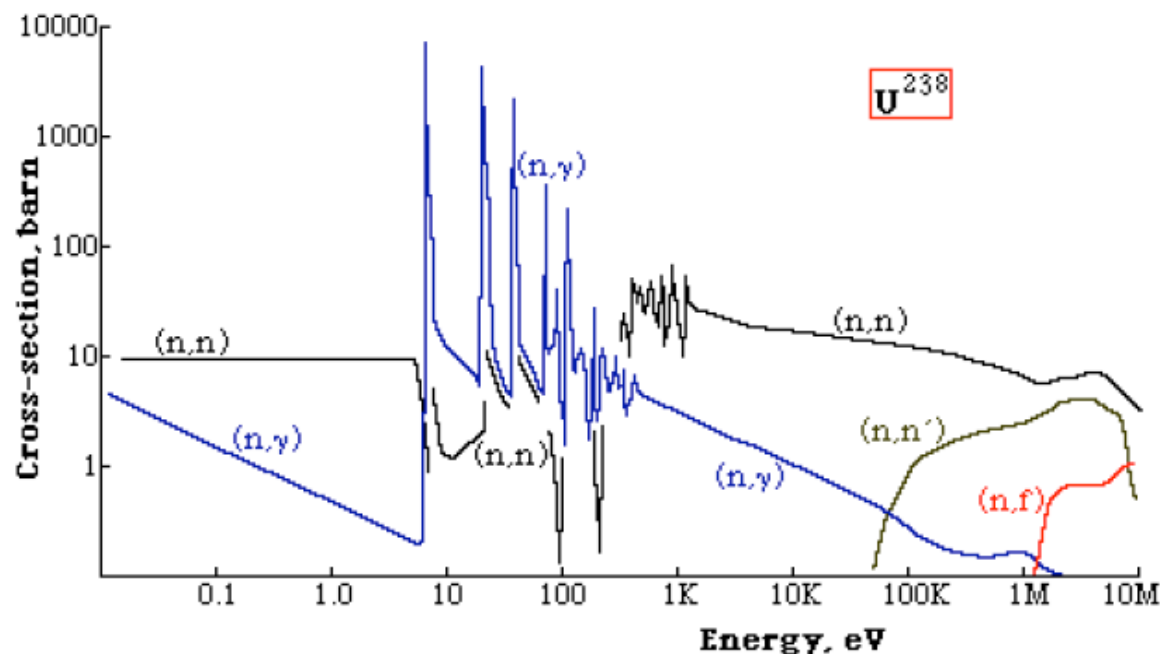
- фрагментите са неутроно богати $Z/A \sim 0.41$ – мигновени неутрони (10^{-16});
- броя излъчени неутрони е гаусово разпределен около средна стойност ν : 2.48 за ^{233}U , 2.42 за ^{235}U , 2.86 за ^{239}Pu ;
- забавени неутрони – от разпада на фрагментите – 1n/100 деления;
- болшинството от излъчените n са с енергии около и над 1 MeV;

Сечения за ядрено делене



- за топлинни неутрони сечението следва $1/v$ зависимостта;
- за топлинни неутрони сечението за делене е **значително по-голямо** от сеченията за разсейване (n,n) и радиационен захват (n, γ)
- в интервала 1-100 eV пълното сечение е доминирано от резонанси водещи предимно до (n, γ) реакции;

За верижна реакция е необходимо неутроните, получени при делене да се забавят до топлинни!



- при ниски енергии деленето липсва като процес;
- делене се наблюдава само за бързи неутрони, но и за тях то не е доминантен процес;

Защо ^{235}U се дели, а ^{238}U не?



$$E_{\text{ex}} = [m(^{236}\text{U}^*) - m(^{236}\text{U})] c^2$$

$$m(^{236}\text{U}^*) = m(^{235}\text{U}) + m_n = (235.043924 \text{ u} + 1.008665 \text{ u}) = 236.052589 \text{ u}$$

$$E_{\text{ex}} = (236.052589 \text{ u} - 236.045563 \text{ u}) 931.494 \text{ MeV/u} = 6.5 \text{ MeV}$$

Енергия на активация за ^{236}U $E_f(^{236}\text{U}) = 6.2 \text{ MeV}$ →

Дори неутрони с нулева кинетична енергия ще предизвикат делене!



$$E_{\text{ex}} = [m(^{239}\text{U}^*) - m(^{239}\text{U})] c^2$$

$$m(^{239}\text{U}^*) = m(^{238}\text{U}) + m_n = (238.050785 \text{ u} + 1.008665 \text{ u}) = 239.059450 \text{ u}$$

$$E_{\text{ex}} = (239.059450 \text{ u} - 239.054290 \text{ u}) 931.494 \text{ MeV/u} = 4.8 \text{ MeV}$$

Енергия на активация за ^{239}U $E_f(^{239}\text{U}) = 6.6 \text{ MeV}$ →

Само неутрони с кинетична енергия по-голяма от 1.8 MeV ще предизвикат делене!

Сдвояване

$$B(N, Z) = a_{\text{vol}} A - a_{\text{surf}} A^{2/3} - a_c Z(Z-1) A^{-1/3} - a_{\text{sym}} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta$$

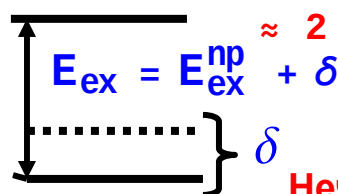
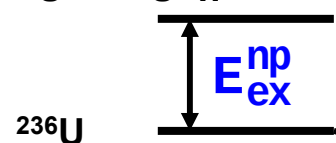
$$n + ^{235}\text{U} \rightarrow ^{236}\text{U}^*$$

$$\delta = \begin{cases} +0.56 \text{ MeV} & \text{even - even} \\ 0 & \text{odd - even} \\ -0.56 \text{ MeV} & \text{odd - odd} \end{cases}$$

без сдвояване

със сдвояване

$^{236}\text{U}^* = ^{235}\text{U} + n$



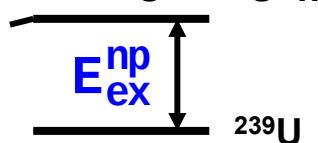
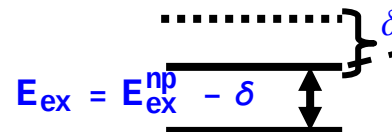
$$E_{\text{ex}}(^{236}\text{U}^*) - E_{\text{ex}}(^{239}\text{U}^*) \approx 2\delta = 1.2 \text{ MeV}$$

Нечетните ядра имат по-високо сечение за делене!



със сдвояване

без сдвояване



Верижна реакция

k_{∞} - коефициент на размножаване

промяната на броя топлини нейтрони между поколенията

$$k_{\infty} = N_{n+1} / N_n \quad k_{\infty} > 1$$

Колко бързи нейтрона имаме в n+1-тото поколение?

$\nu(^{235}\text{U}) = 2.42$ Колко от първоначалните топлините нейтрони ще предизвикат делене?

поглъщане на топлини нейтрони – (n, γ)

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a} \quad \begin{array}{l} \sigma_f(^{235}\text{U}) = 584 \text{ b} \\ \sigma_a(^{235}\text{U}) = 97 \text{ b} \\ \sigma_a(^{238}\text{U}) = 2.75 \text{ b} \end{array} \quad \eta(^{235}\text{U}) = 2.08$$

Естествен уран $\text{U} = 0.72 \% (^{235}\text{U}) + 99.28 \% (^{238}\text{U})$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_f = 0.72 \% 584 \text{ b} + 99.28 \% 0 \text{ b} = 4.2 \text{ b} \\ \sigma_a = 0.72 \% 97 \text{ b} + 99.28 \% 2.75 = 3.43 \text{ b} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \eta(3 \% ^{235}\text{U}) = 1.84 \\ \eta(\text{U}) = 1.33 \end{array}$$

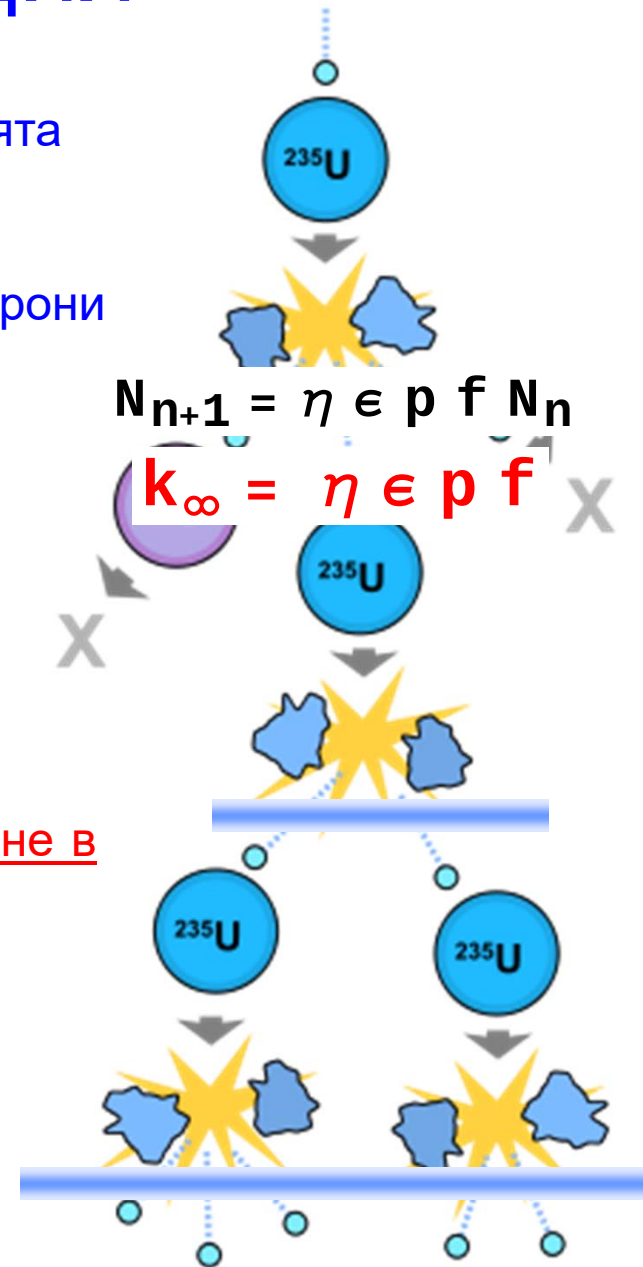
Каква част от бързите нейтрони ще предизвикат делене в ^{238}U ? → нарастване на броя нейтрони – $\epsilon = 1.03$

$\eta \epsilon N_n$ бързи нейтрони, неефективни за делене

необходимост от забавяне - $\sigma \sim 1/v$ H_2O , D_2O , ^{12}C

Каква част от забавящите се нейтрони ще избегнат захват от резонанси? - $p = 0.9$

Каква част от термализираните нейтрони ще избегнат захват в поглътителя? - $f = 0.9$



Геометрични и времеви фактори

$$k_{\infty} = \eta \epsilon p f$$

отчита физическите особености на
делящия се материал и забавителя

$k < 1$ – подкритична
реакция

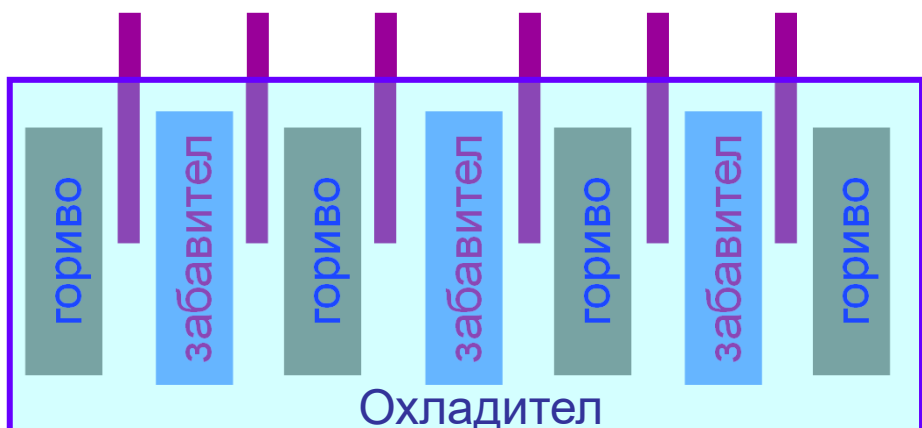
$$l_f, l_t \ll 1$$

$$k_{\infty} - k \approx k (l_f + l_t)$$

$$k_{\infty} - k \propto \frac{M^2}{R^2}$$

$$\tau = \underbrace{\tau_t}_{10^{-6} \text{ s}} + \underbrace{\tau_d}_{10^{-3} \text{ s}}$$

Контролни пръти - Cd



$$k = \eta \epsilon p f (1 - l_f) (1 - l_t)$$

отчита конкретната инженерна
реализация

$k = 1$ – критична
реакция

$(l_f + l_t)$ намалява с нарастване на повърхността – R^2

нараства с нарастване миграционния път на неутроните - M

$$k = 1$$

$$R_c = \frac{\pi M}{\sqrt{1 - k_{\infty}}}$$

минимален размер осигуряващ
критичност

$$\Delta N = (kN - N) \frac{\Delta t}{\tau}$$

$$dN = (kN - N) \frac{dt}{\tau}$$

$$N(t) = N_0 e^{\frac{k-1}{\tau} t}$$

$$k = 1.01 \quad \frac{(k - 1)}{\tau} \approx 10 \text{ s}^{-1}$$

$$N(1 \text{ s}) / N_0 = e^{10}$$

Ядрени реактори

класификация по тип на неутрони

1) Реактори на топлинни неутрони (thermal reactors) – **изискват забавител**

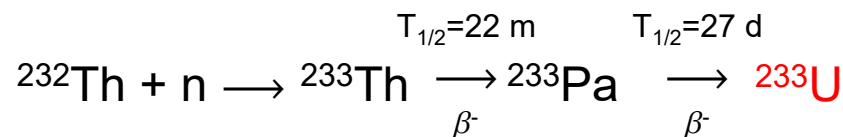
+ могат да работят с естествен или слабо обогатен U

- големи ядра → много радиоактивен отпадък

2) Реактори на междинни неутрони (1-100 keV) – главно експериментални

+ по-малко забавител → по-малък обем

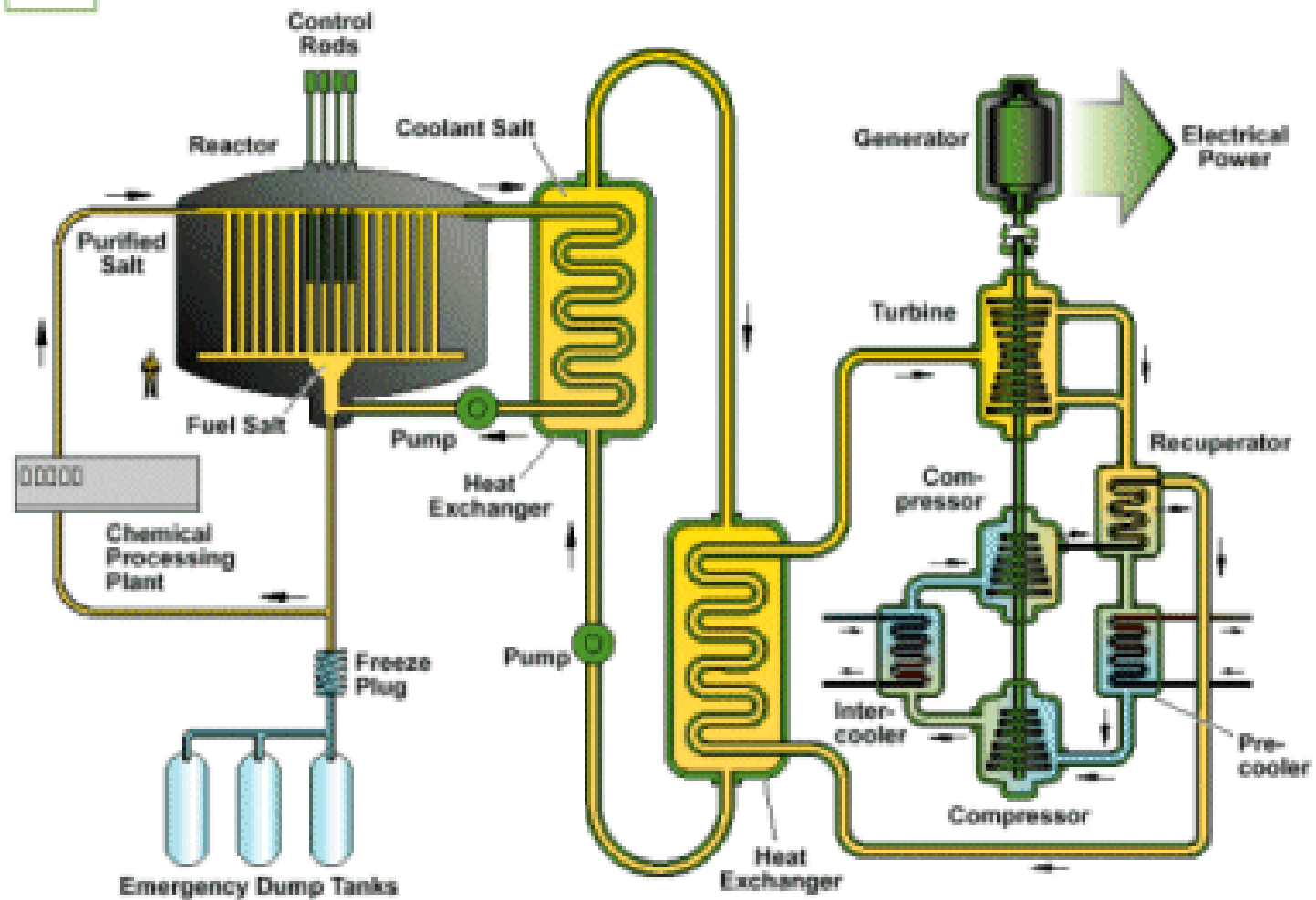
+ възможност за използване на ^{232}Th



Molten Salt Reactor

MSR

Гориво:
течно UF_4



Ядрени реактори

класификация по тип на неутрони

1) Реактори на топлинни неутрони (thermal reactors) – **изискват забавител**

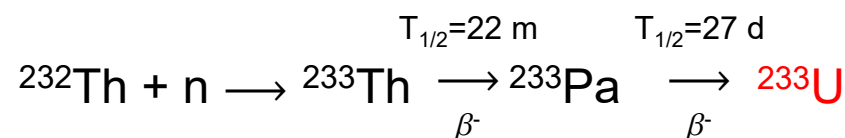
+ могат да работят с естествен или слабо обогатен U

- големи ядра → много радиоактивен отпадък

2) Реактори на междинни неутрони (1-100 keV) – главно експериментални

+ по-малко забавител → по-малък обем

+ възможност за използване на ^{232}Th



3) Реактори на бързи неутрони (fast breeders) – **не изискват забавител**

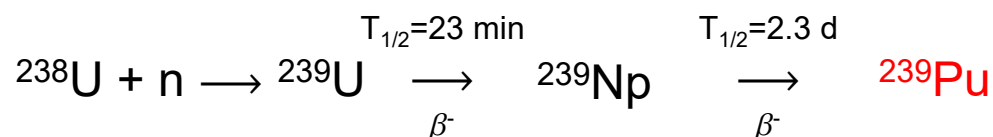
- изискват високо обогатено гориво (>20% ^{239}Pu или ^{235}U)

+ компактни → удобни за двигатели

+ използват тежки материали за охладител → по-високи работни температури (550°C) → по-висока термична ефективност

+ по-рядко се нуждаят от презареждане

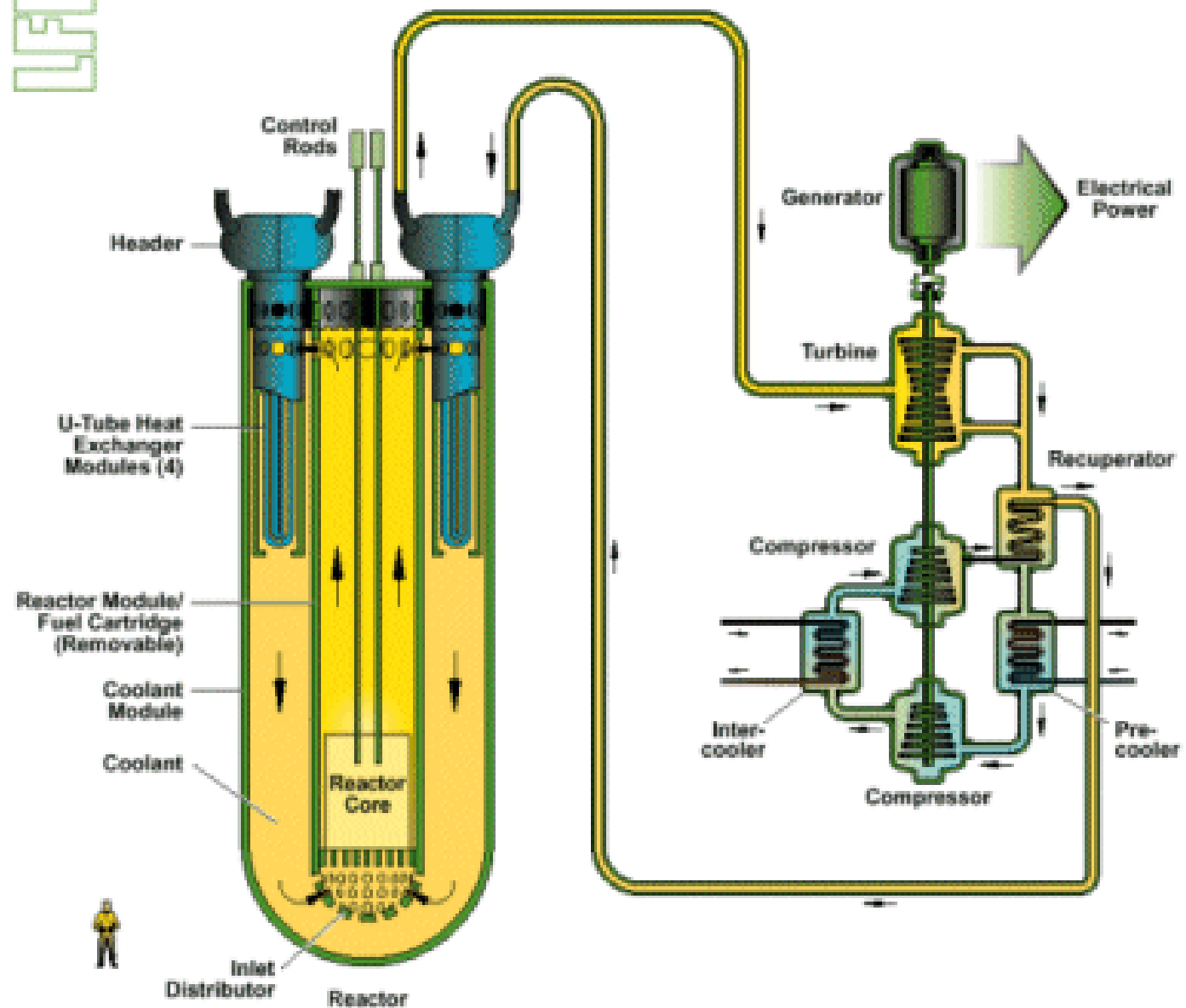
+ могат да произвеждат горивото си



Lead-Cooled Fast Reactor

LFR

20% PuO_2
80% UO_2



Ядрени реактори

класификация по тип забавителя

1) Графитни реактори – ^{12}C

2) Реактори на лека вода (Light Water Reactors)

- + евтина

- + ясни химични свойства

- не позволява използването на естествен U, поради голямото сечение за реакцията $n + p \rightarrow d + \gamma$ обогатено гориво $\sim 3\%$

- + отрицателна температурна обратна връзка

3) Реактори на тежка вода (Heavy Water Reactors) – D_2O

- скъпа

- + позволява използването на естествен U

4) Течни метали

5) Газове

Ядрени реактори

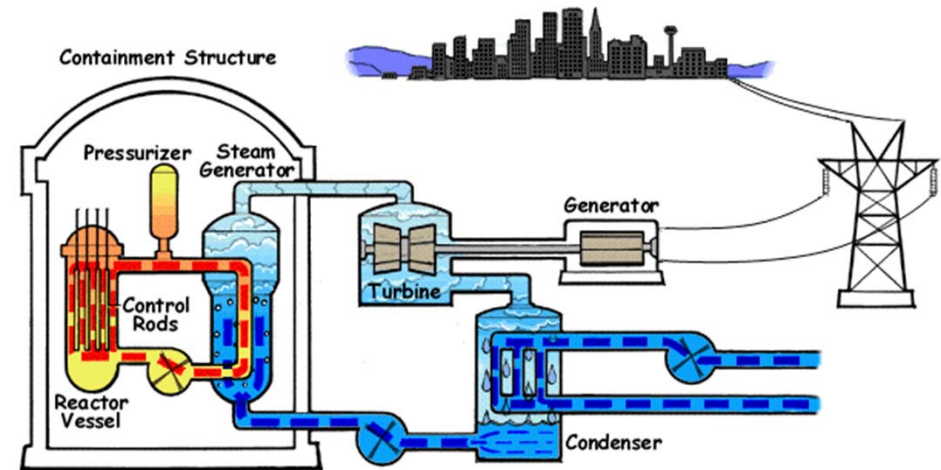
класификация по тип охладител

1) Вода под налягане (Pressurized Water Reactors)

+ константно налягане → по-добър контрол в/у забавянето на n

+ електрическата част е отделена от ядрената

- работи при високо налягане (~100 ат.) и температура (~300°C);



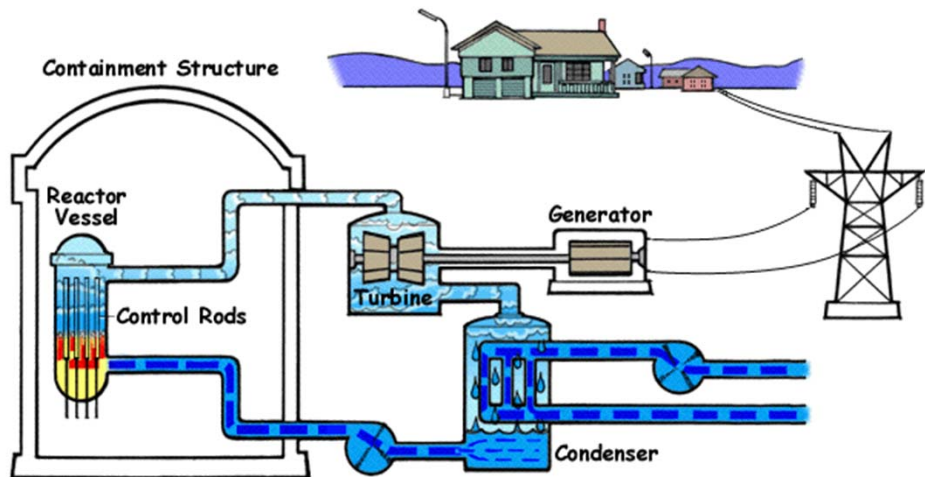
2) Кипяща вода (Boiling Water Reactors)

+ конструктивно по-прост

+ работи при по-ниски температури и налягания

- охладителя/забавителя се намира в две фази

- електрическата част не е отделена от ядрената



3) Тип басейн

Ядрени експлозиви

^{238}U , ^{232}Th – могат да се делят, но само при определени условия; ^{235}U , ^{233}U и ^{239}Pu – се делят от всякакъв вид неутрони;

Критична маса – минималната маса за даден дялещ се материал и конфигурация, при която настъпва критична верижна реакция.

1) Достатъчен материал за достигане на надкритична маса – оръжейно качество (weapon graded) обогатяване на $> 90\%$

2) Инициране на реакцията $\rightarrow$ осигуряване на първоначалните неутрони

Po-Li смес: $^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb} + \alpha$

$^{216}\text{Po} \rightarrow ^{212}\text{Pb} + \alpha$

Am-Be смес $^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + \alpha$

Малък линеен ускорител за p

(p,n) реакция

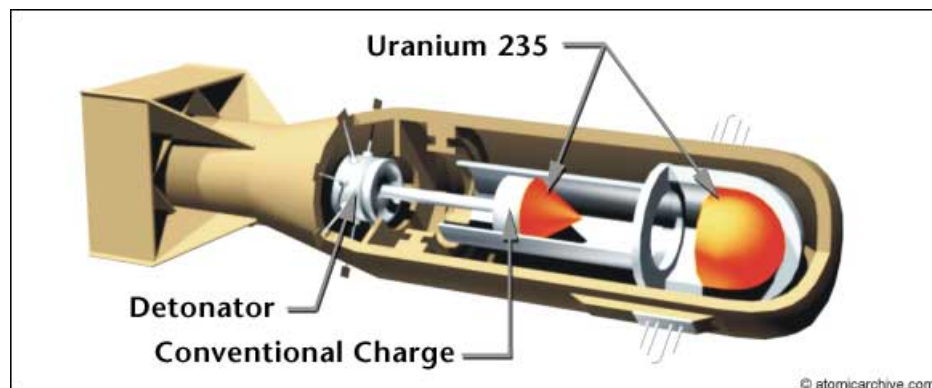


3) Удържане на конструкцията максимално дълго $\rightarrow$ максимално количество от дялящия материал претърпява делене

СИНХРОНИЗАЦИЯ!!!!

Ядрени експлозиви

Little boy -Хирошима



64 kg U (~ 80%)

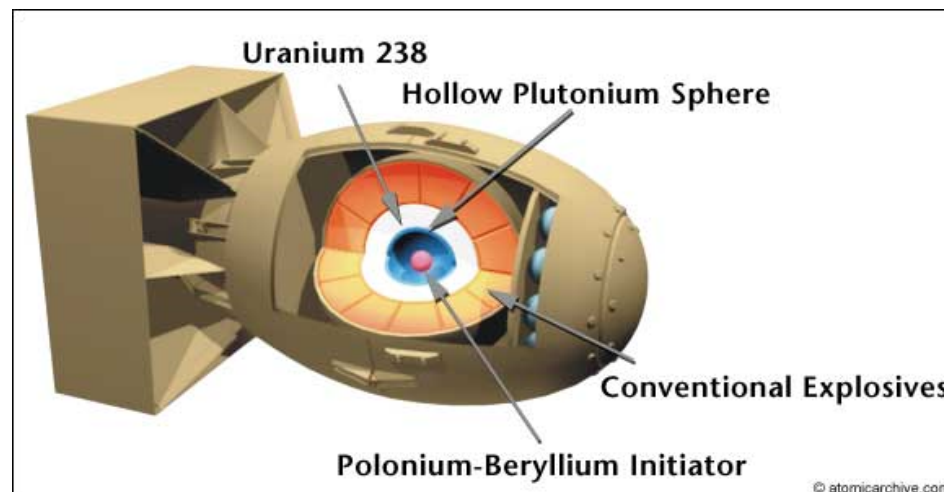
~100% от чистата критична маса

4000 kg

само 1% от него е претърпял делене

13-16 kTNT

Fat Man - Нагазаки



6.2 kg Pu

~39 % от чистата критична маса

4630 kg

само 80% от него е претърпял делене

21 kTNT