

Неутрони, реактори, бомби

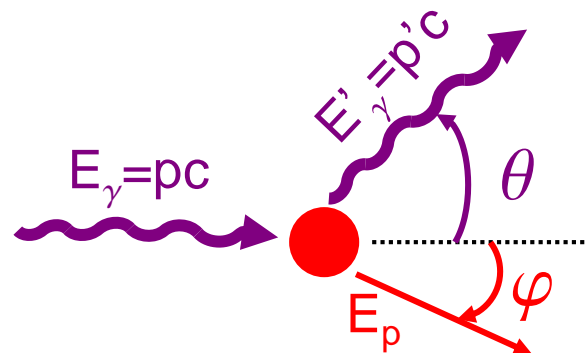
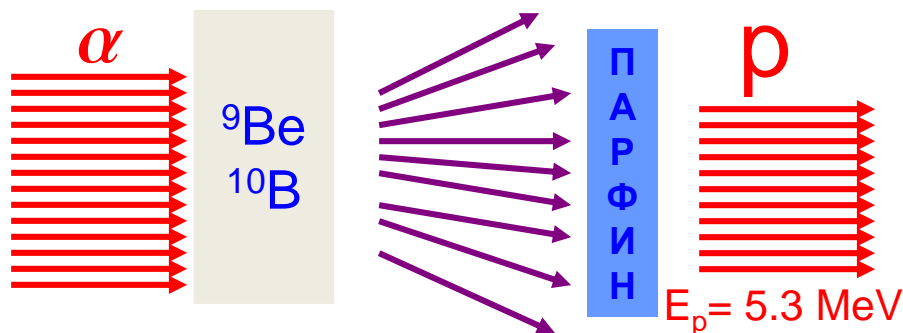
Откриване на неутрона

1930 – Bothe & Becker

дълбоко проникващо лъчение
слабо йонизиращо действие

Curie & Joliot

~~γ - ЛЪЧ~~?



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

$$\vec{p}_{\gamma} = \vec{p}'_{\gamma} + \vec{p}_p$$

$$\theta_{\max} = 180^{\circ} \rightarrow$$

$$(\vec{p}_p)^2 = (\vec{p}_{\gamma})^2 + (\vec{p}_{\gamma}')^2 + 2 (\vec{p}_{\gamma}) (\vec{p}_{\gamma}') \cos(\theta)$$

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

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

$$= E_{\gamma}^2 + E_{\gamma}'^2 + 2 E_{\gamma} E_{\gamma}'$$

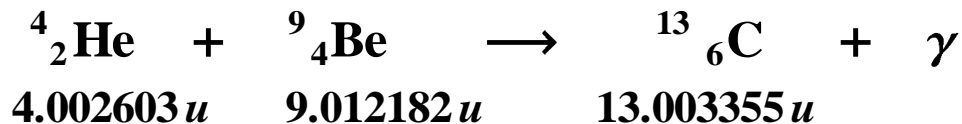
$$E_{\gamma}' = \frac{m_p c^2 E_{\gamma}}{m_p c^2 + 2 E_{\gamma}}$$

$$T_p = E_{\gamma} - E_{\gamma}' = \frac{2 E_{\gamma}^2}{m_p c^2 + 2 E_{\gamma}}$$

$$5.3 \text{ MeV} = \frac{2 E_{\gamma}^2}{938.28 \text{ MeV} + 2 E_{\gamma}}$$

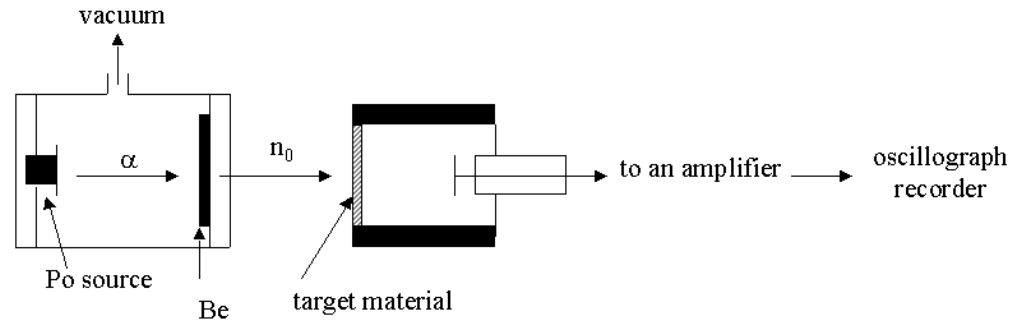
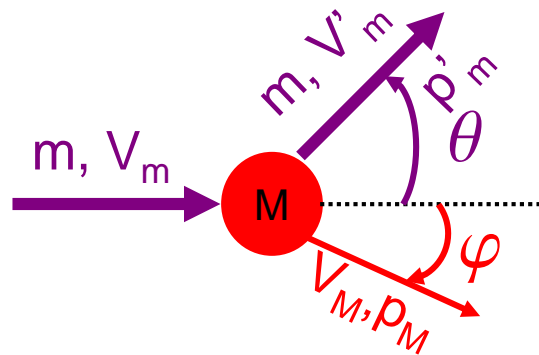
$$E_{\gamma} = 52.58 \text{ MeV}$$

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



Откриване на неутрона

1932 - Chadwick Нобелова награда 1935



Каква е максималната скорост на отскочилото ядро – V_M ?

$$\frac{p_m^2}{2m} = \frac{p'_m{}^2}{2m} + \frac{p_M^2}{2M}$$

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

$$\vec{p}_m = \vec{p}'_m + \vec{p}_M \quad (\vec{p}_M)^2 = p_m^2 + p'_m{}^2 - 2p'_m p_m \cos(\theta) = p_m^2 + p'_m{}^2 + 2p'_m p_m \\ \frac{M}{m} (p_m^2 - p'_m{}^2) = p_m^2 + p'_m{}^2 + 2p'_m p_m \quad p'_m = \frac{M-m}{m+M} p_m \quad \frac{p_m^2}{(M+m)^2} = \frac{p_M^2}{4M^2} \quad \frac{p_m}{(M+m)} = \frac{p_M}{2M}$$

$$\frac{mV_m}{(M+m)} = \frac{MV_M}{2M}$$

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

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

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

$$m/M_p = 1.14(10)$$

- електрически неутрална частица
- с маса близка до масата на протона ($m_n/m_p = 1.00138$)
- нестабилна в свободно състояние - $T_{1/2} = 10.2 \text{ min}$
- ненулев магнитен момент - $\mu = -1.91304184 \mu_N$

Забавяне на неутрони

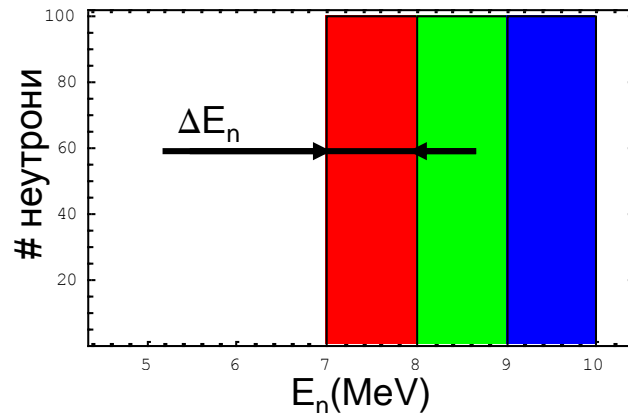
Топлинни 0.025 eV. Бавни ≈ 1 keV, Бързи 100 keV-10MeV

Кинетична енергия след удар
с ядро с масово число A

$$\frac{T_n'}{T_n} = \frac{A^2 + 1 + 2A \cos(\vartheta)}{(A+1)^2}$$

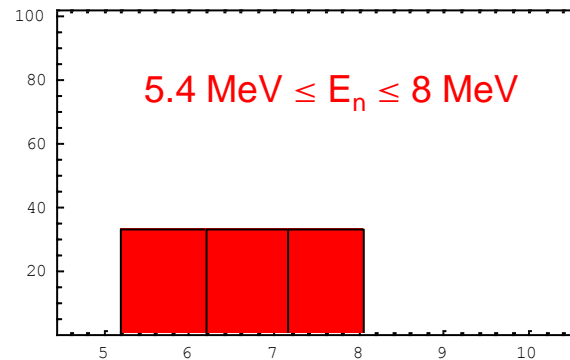
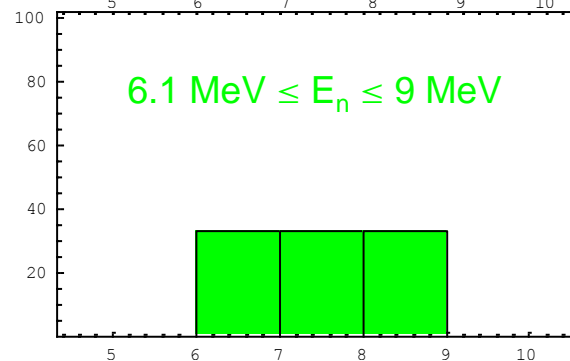
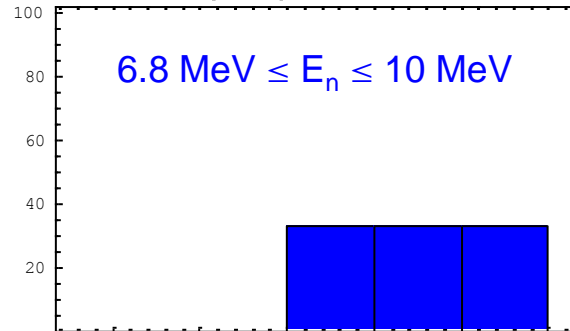
300 моноенергетични неутрони
 $E_n = 10$ MeV се забавят в ^{12}C

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



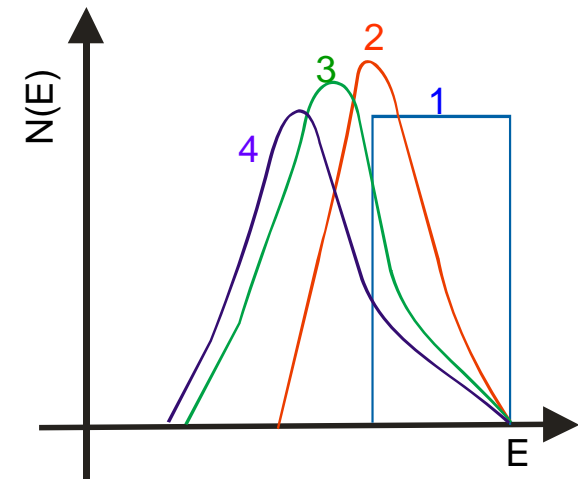
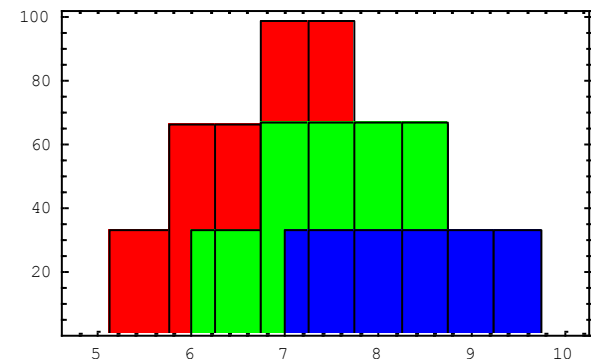
$$\vartheta = 0 \quad \frac{T_n'}{T_n} = 1$$

$$\vartheta = \pi \quad \left(\frac{T_n'}{T_n} \right)_{\min} = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$



Разсейване в s-състояние \rightarrow не
зависи от $\theta_{\text{цм}} \rightarrow T_n'$ има равномерно
разпределение

$$\left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 T_n \leq T_n' \leq T_n$$



Забавяне на неутрони

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

ξ е характеристика на забавителя (модератора).

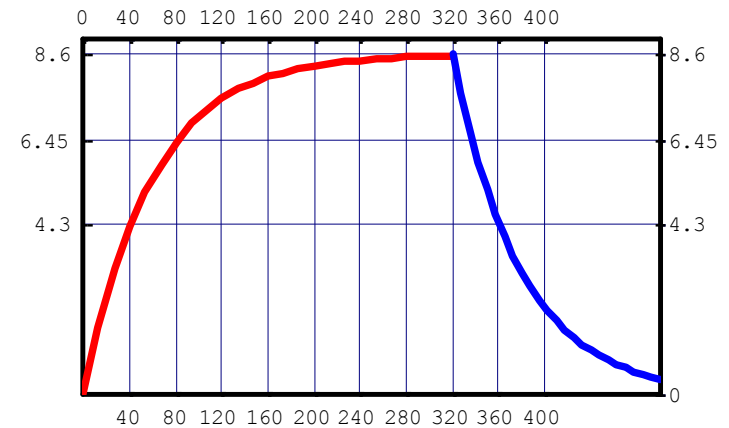
Колко удара са необходими за термализацията ($E' \sim 0.025$ eV) на неутрони, получени при делене ($E \sim 2$ MeV)?

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.

Неутронно-активационен анализ

$$A_1(t) = \lambda_1 N(t) = Y(1 - e^{-\lambda_1 t})$$



Тънко фолио от изследвания материал се активира от топлинни неутрони – (n,γ) реакции. Получените нестабилни изотопи търпят β- и γ-превръщания. Чрез измерване на γ-спектъра може да се определи елементният състав.

Element	Isotope (Abundance)	σ (b)	Activity (s^{-1}) per μg	$t_{1/2}$	Prominent γ (MeV)	Detection Counts/h	Limit (μg)
Mn	55 (100%)	13.3	3×10^5	2.58 h	0.847 (99%)	1×10^8	10^{-5} – 10^{-6}
Ag	107 (51%)	35	1×10^6	2.4 min	0.633 (2%)	4×10^5	10^{-3} – 10^{-4}
Au	197 (100%)	99	3×10^4	2.7 d	0.412 (95%)	1×10^7	10^{-4} – 10^{-5}
Sc	45 (100%)	13	6×10^2	84 d	0.889 (100%)	2×10^5	10^{-3} – 10^{-4}
Cu	65 (31%)	2.3	7×10^4	5.1 min	1.039 (9%)	3×10^5	10^{-3} – 10^{-4}
Ir	193 (61%)	110	8×10^4	17 h	0.328 (10%)	3×10^6	10^{-4} – 10^{-5}
Sb	121 (57%)	6	2×10^3	2.8 d	0.564 (66%)	4×10^5	10^{-3} – 10^{-4}
Ni	64 (1.2%)	1.5	4×10^2	2.5 h	1.481 (25%)	3×10^4	10^{-1} – 10^{-2}
Pb	206 (25%)	0.03	2×10^2	0.8 s	0.570 (98%)	2×10^1	10^{-1} – 10^{-2}
Zr	96 (2.8%)	0.05	4×10^0	17 h	0.747 (92%)	1×10^3	10^{-1} – 10^0
As	75 (100%)	4.5	9×10^3	26 h	0.559 (43%)	1×10^6	10^{-3} – 10^{-4}
Hg	202 (30%)	4	2×10^1	47 d	0.279 (77%)	6×10^3	10^{-2} – 10^{-3}

Activity and counting rate are based on irradiating a 1- μg sample for one hour in a flux of 10^{13} neutrons/cm²/s. The detection limit is based on accumulating 100 counts in one hour using a detector with an efficiency of 10%.

Добив Y

$$= \sigma n_{\text{target}} V_{\text{target}} \Phi_{\text{beam}}$$

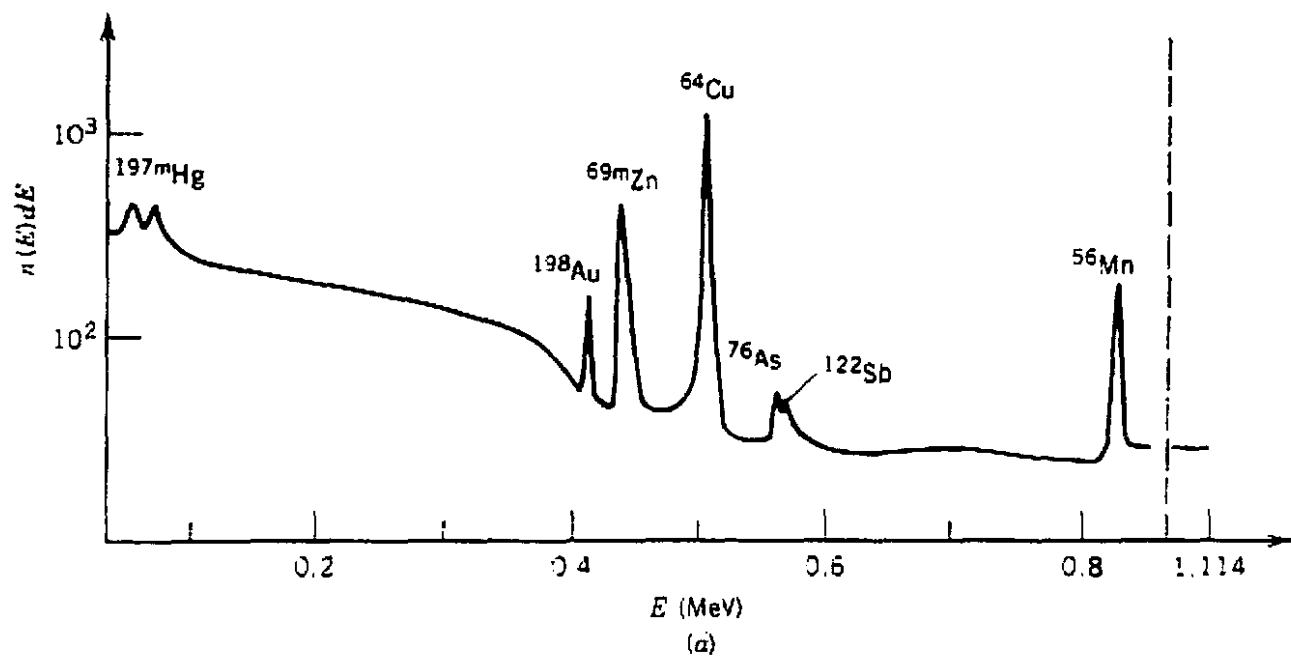
$$\Phi_{\text{beam}} \sim 10^{13} \text{ neutrons/cm}^2/\text{s}$$

Само 8-те най-леки

елемента (H-O) и P, S, Ti и Bi

не се “поддават” на неутронно-

активационен анализ.



Производство на радиоактивни ИЗОТОПИ

Да се подготви самостоятелно.

Интересен доклад за състоянието в САЩ

2009 г.: <http://atomic.phys.uni-sofia.bg/Members/tsenov/npp/literatura/medicalisotopeproductionanduse.pdf/view>

Ядрени реактори и експлозиви (делене на ядрата)

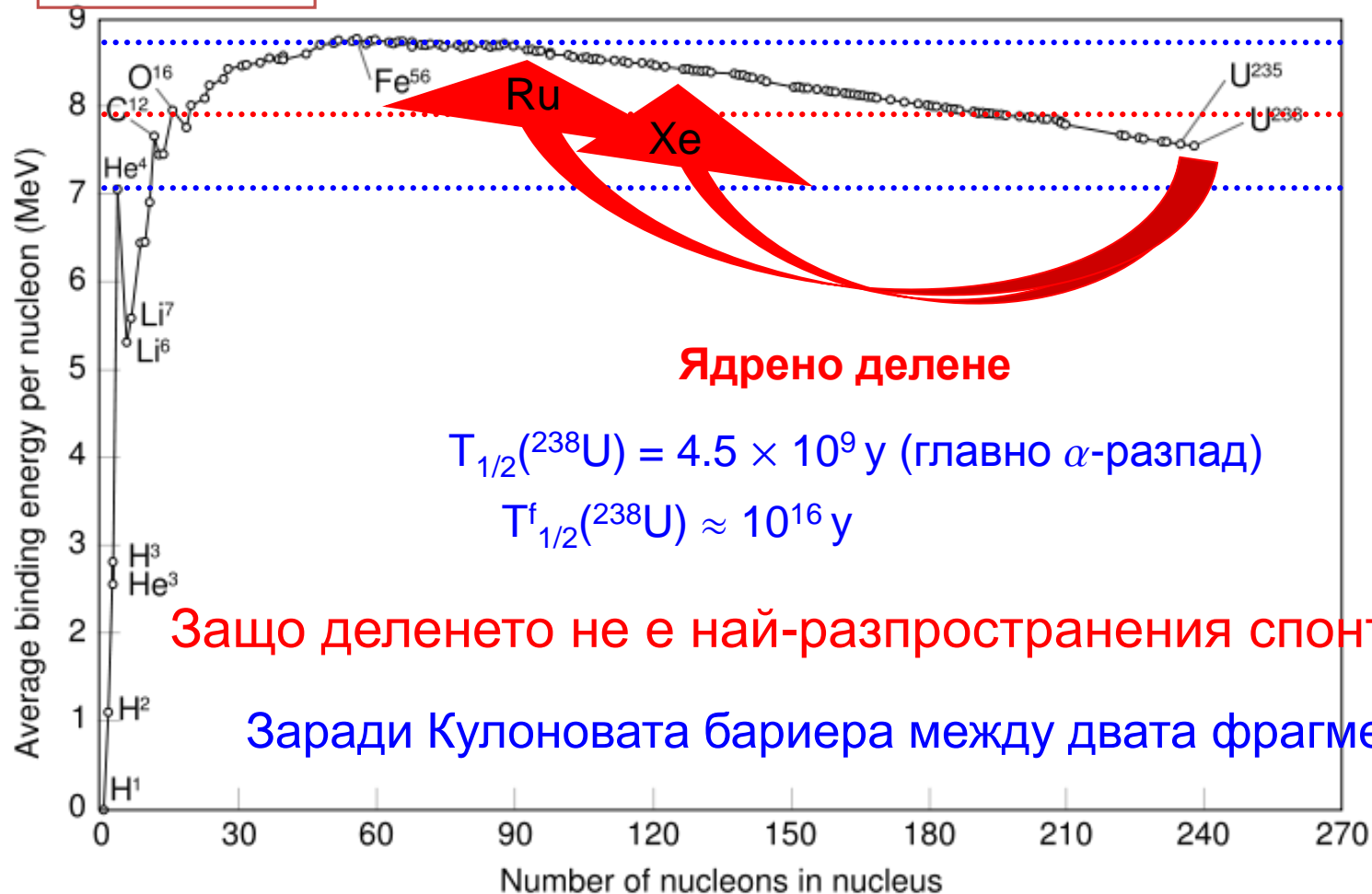
Защо ядрата се делят?

$$m({}^A_Z X_N) = N m_n + Z m_p - \frac{1}{c^2} B(N, Z)$$

$$\Delta = (m - A) c^2$$

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

Pd - паладий

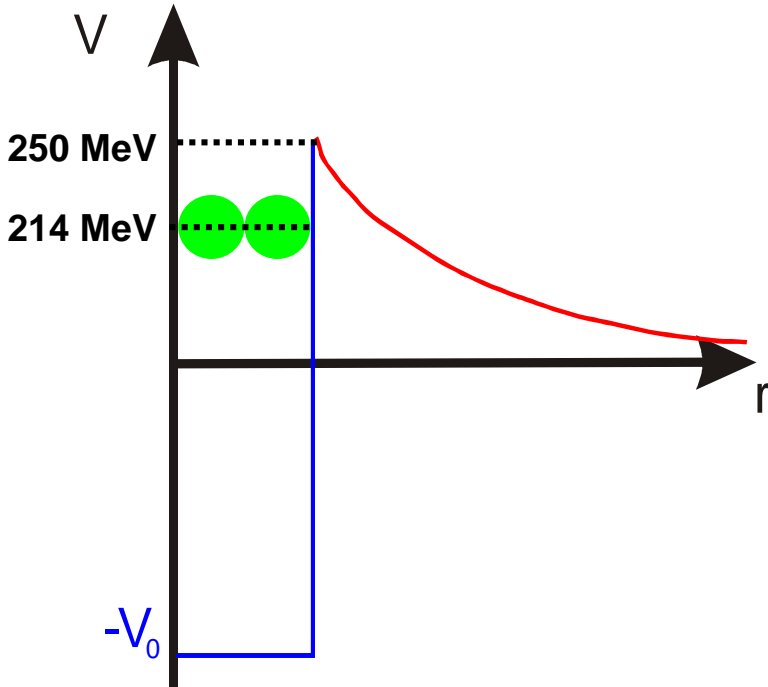


Защо деленето не е най-разпространения спонтанен разпад?

Заради Кулоновата бариера между двата фрагмента.

Кулонова бариера

- 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; Каква е Кулоновата бариера?



Енергията, освободена при делене е приблизително равна на височината на Кулоновия барьер.

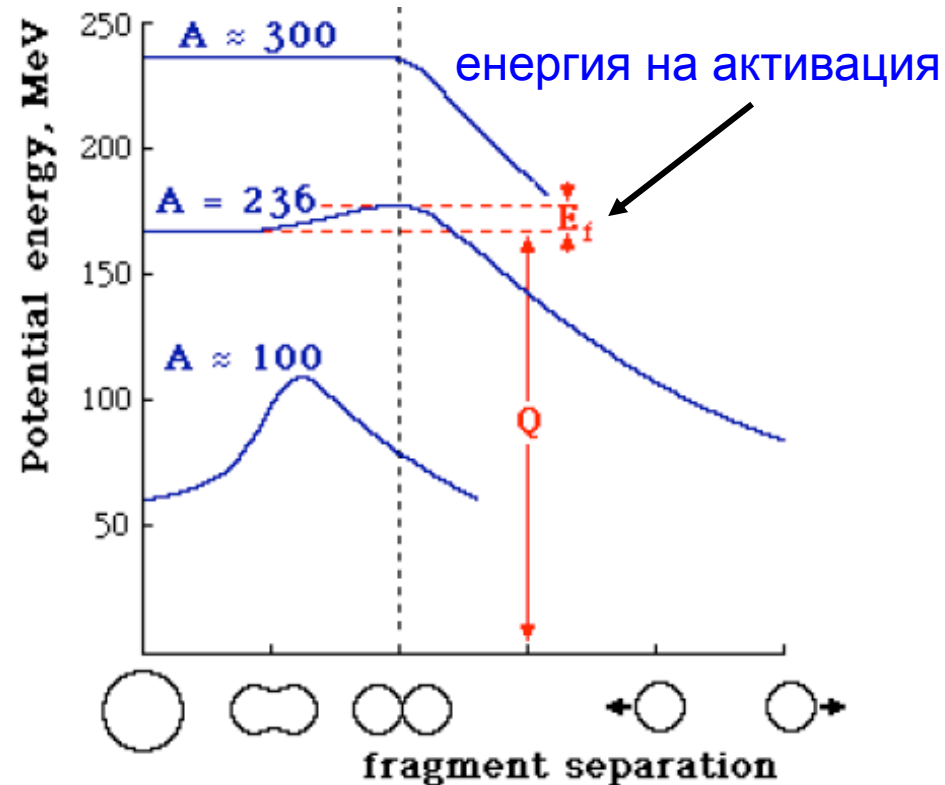
$$R_1 = R_2 = 1.25 (119)^{1/3} = 6.1 \text{ fm}$$

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

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

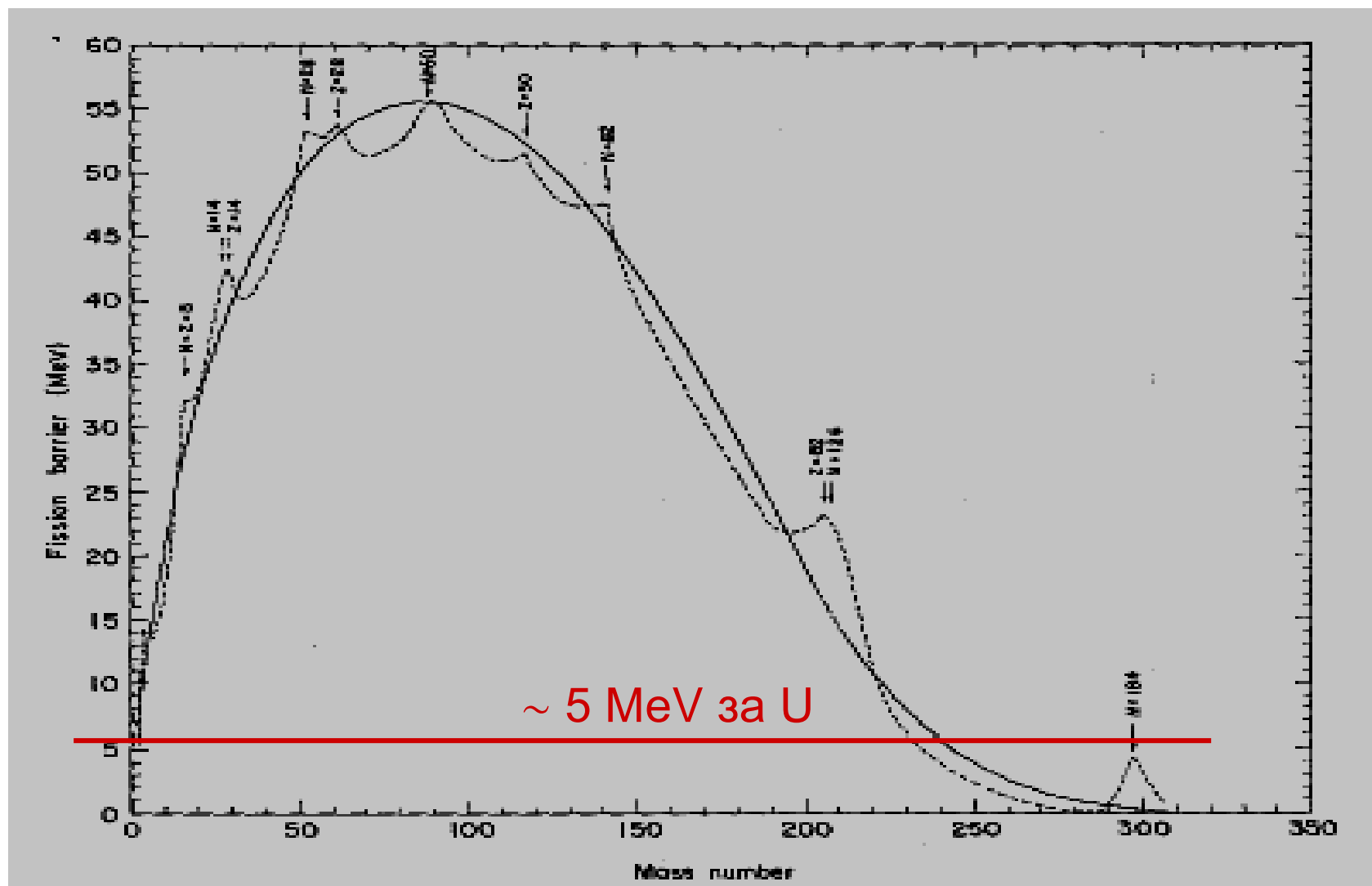
Субатомна физика

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 с енергия равна или по-висока от тази на бариерата.

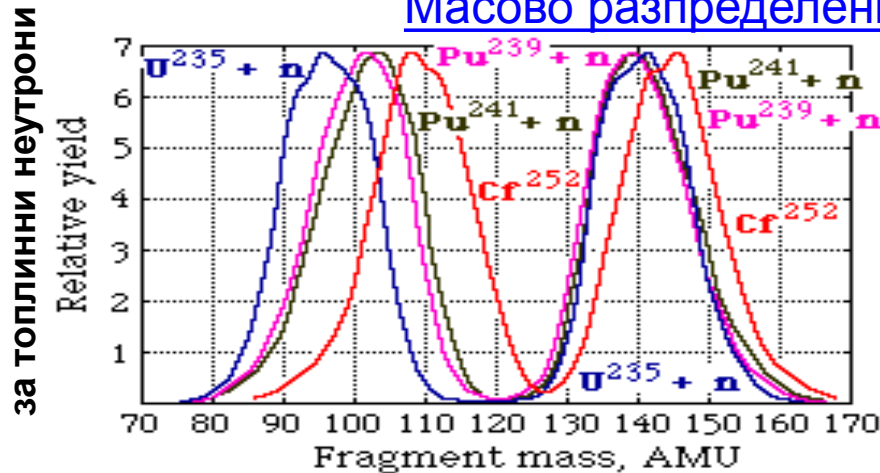
Енергия на активация



Характеристики на ядреното делене

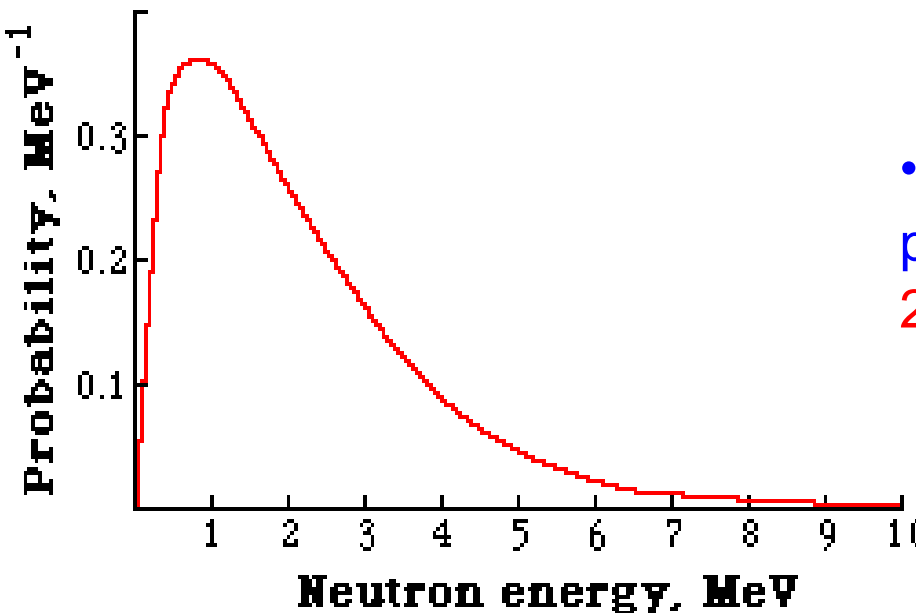


Масово разпределение на фрагментите



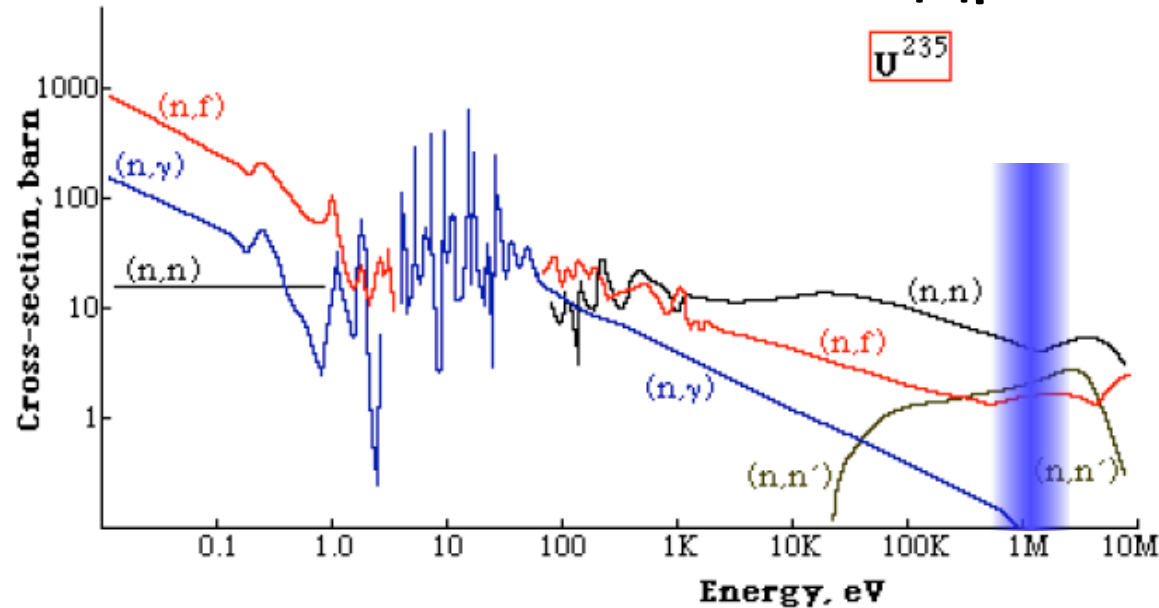
- симетрично около $A_1 \approx A_2$
- минимум около $A_1 \approx A_2$
- с нарастване на енергията на неутрона разпределението се симетризира около $A_1 \approx A_2$

Излъчване на неутрони – основа за получаване на верижна реакция



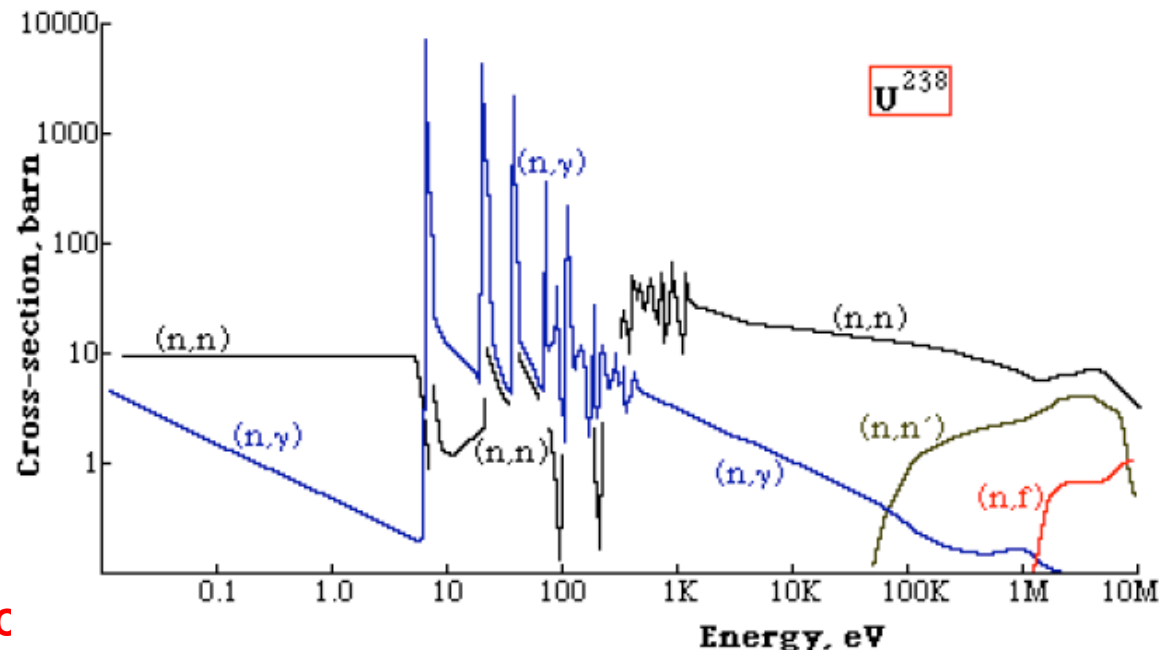
- фрагментите са неутронно богати $Z/A \sim 0.41$ – мигновени неутрони (10^{-16});
- броят излъчени неутрони е гаусово разпределен около средна стойност ν :
2.48 за ^{233}U , 2.42 за ^{235}U , 2.86 за ^{239}Pu ;
- забавени неутрони – от разпада на фрагментите – 1n/100 деления;
- повечето от излъчените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

Сечения за ядрено делене



- за топлинни неутрони сечението следва типичната $1/v$ зависимост;
- 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

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

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



без сдвояване

със сдвояване

$$E_{\text{ex}}(^{236}\text{U}^*) - E_{\text{ex}}(^{239}\text{U}^*) \approx$$

$$\approx 2\delta = 1.2 \text{ MeV}$$

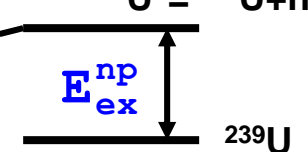
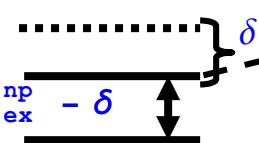
$$E_{\text{ex}} = E_{\text{ex}}^{\text{np}} + \delta$$

Нечетните ядра имат по-високо сечение за делене!



със сдвояване

без сдвояване



Верижна реакция

$$N_{n+1} = \eta \epsilon p f N_n$$

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

k_{∞} - коефициент на размножаване \equiv

промяната на броя топлинни неутрони между поколенията

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

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

$\nu(^{235}\text{U}) = 2.42$ Каква част η от забавените до топлинни енергии неутрони ще предизвикат делене?

поглъщане на топлинни неутрони – (n, γ)

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

(absorption) \nearrow

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 неутрони ще предизвикат делене в ^{238}U ? \rightarrow нарастване на броя неутрони – $\epsilon = 1.03$

необходимост от забавяне - $\sigma \sim 1/v$ $\text{H}_2\text{O}, \text{D}_2\text{O}, ^{12}\text{C}$

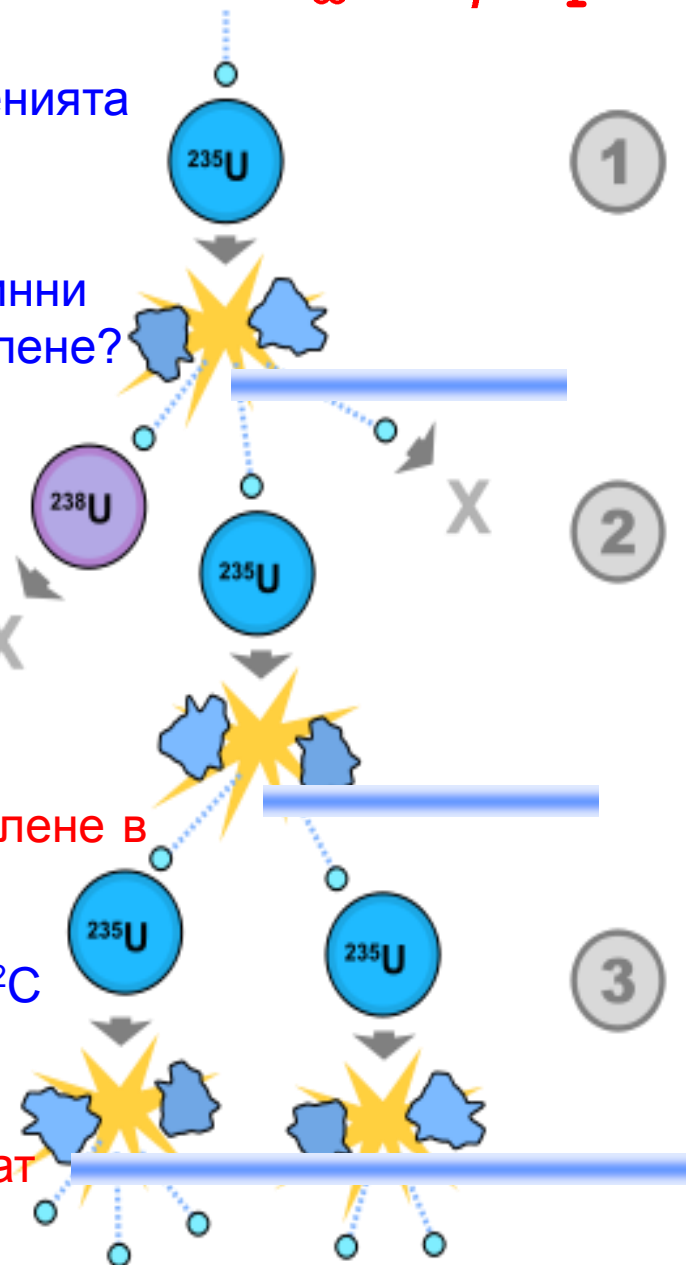
Каква част от забавящите се неутрони ще избегнат

захват от резонанси? - $p = 0.9$

Каква част от термализираните неутрони ще избегнат

захват в поглътителя? - $f = 0.9$

Субатомна физика/2014 - 12



Геометрични и времеви фактори

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

отчита физическите особености на
делящия се материал и забавителя

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

отчита конкретната инженерна
реализация

$k < 1$ – подкритична
реакция

$k = 1$ – критична
реакция

$k > 1$ – надкритична
реакция

изтичане на $l_f, l_t \ll 1$ ($l_f + l_t$) намалява с нарастване на повърхността $\sim R^{-2}$

неутрони $k_{\infty} - k \approx k (l_f + l_t)$ нараства с нарастване миграционния път на неутроните $\sim M^2$

$$k_{\infty} - k \propto \frac{M^2}{R^2} \quad k = 1 \quad R_c = \frac{\pi M}{\sqrt{k_{\infty} - 1}} \quad \leftarrow \text{минимален размер на сфера, осигуряващ критичност}$$

$$\tau = \tau_t + \tau_d \quad \begin{matrix} t & k & t+\tau & t+2\tau \dots \\ N & & kN & k^2N \dots \end{matrix}$$

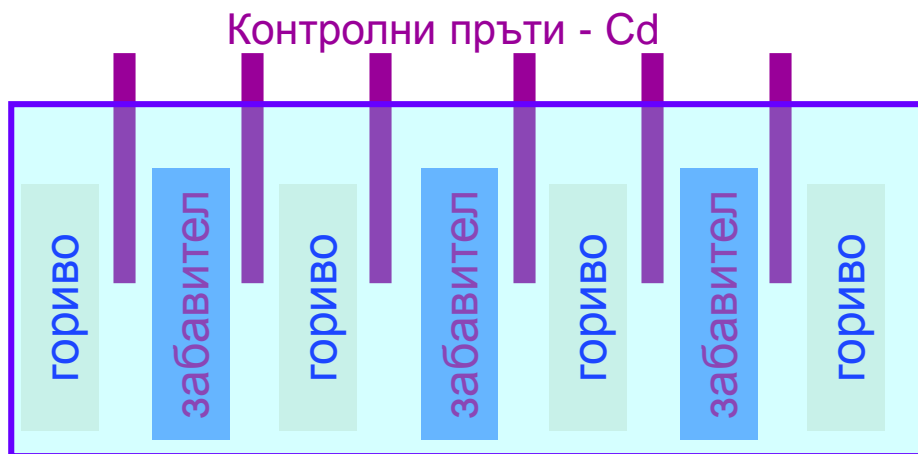
забавяне 10^{-6} s 10^{-3} s дифузия

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

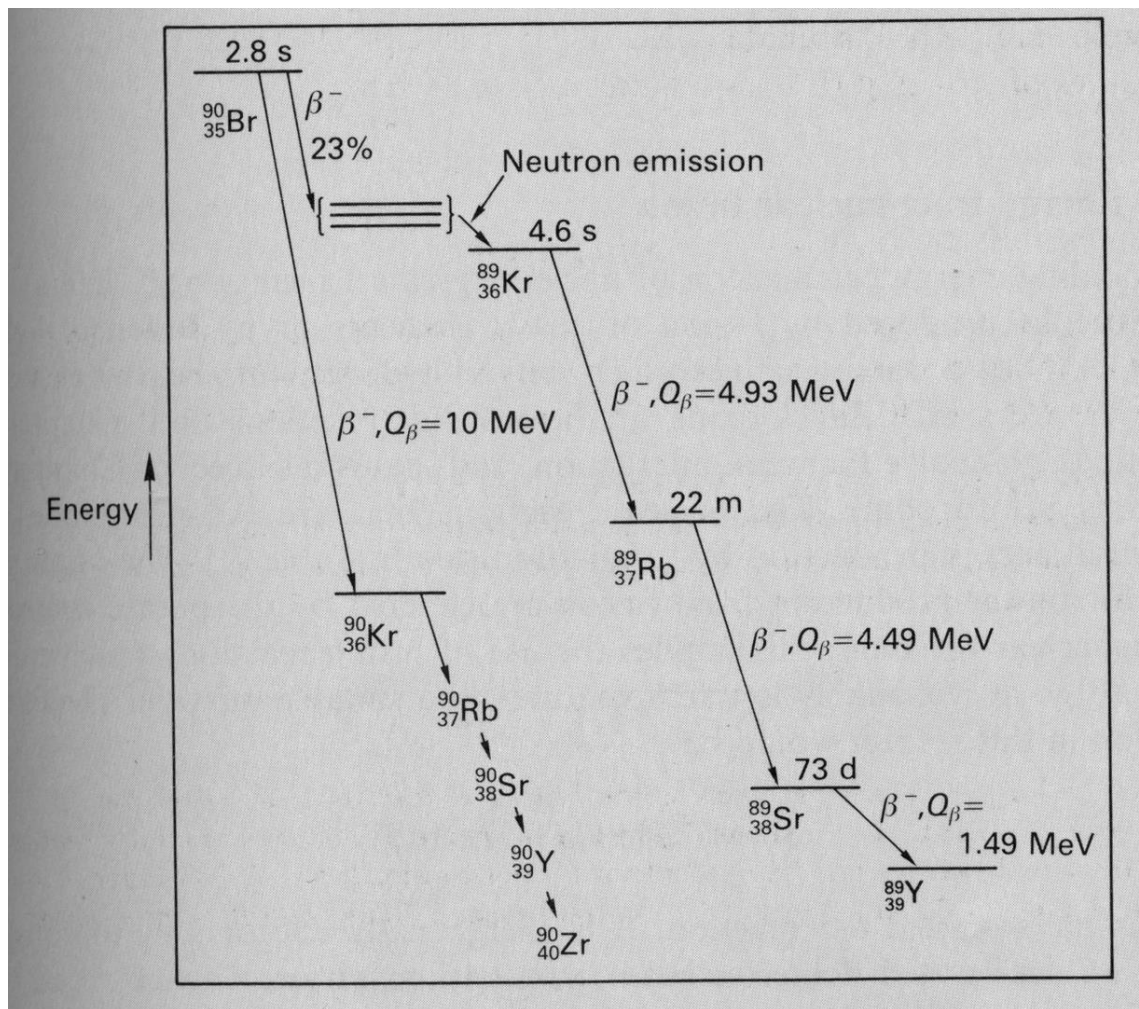
$$N(t) = N_0 e^{\frac{k-1}{\tau} t}$$

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

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



Закъсняващи нейтрони



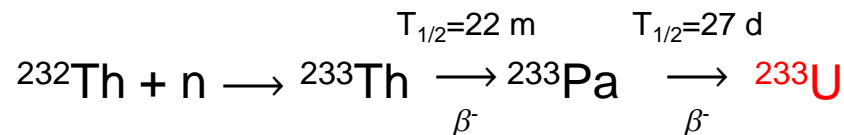
Ядрени реактори: класификация по тип на неутрони

1) Реактори на топлинни неутрони (thermal reactors) – **изискват забавител**
+ могат да работят с естествен или слабо обогатен U
- голяма централна зона (core, ядро) → много радиоактивен отпадък

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

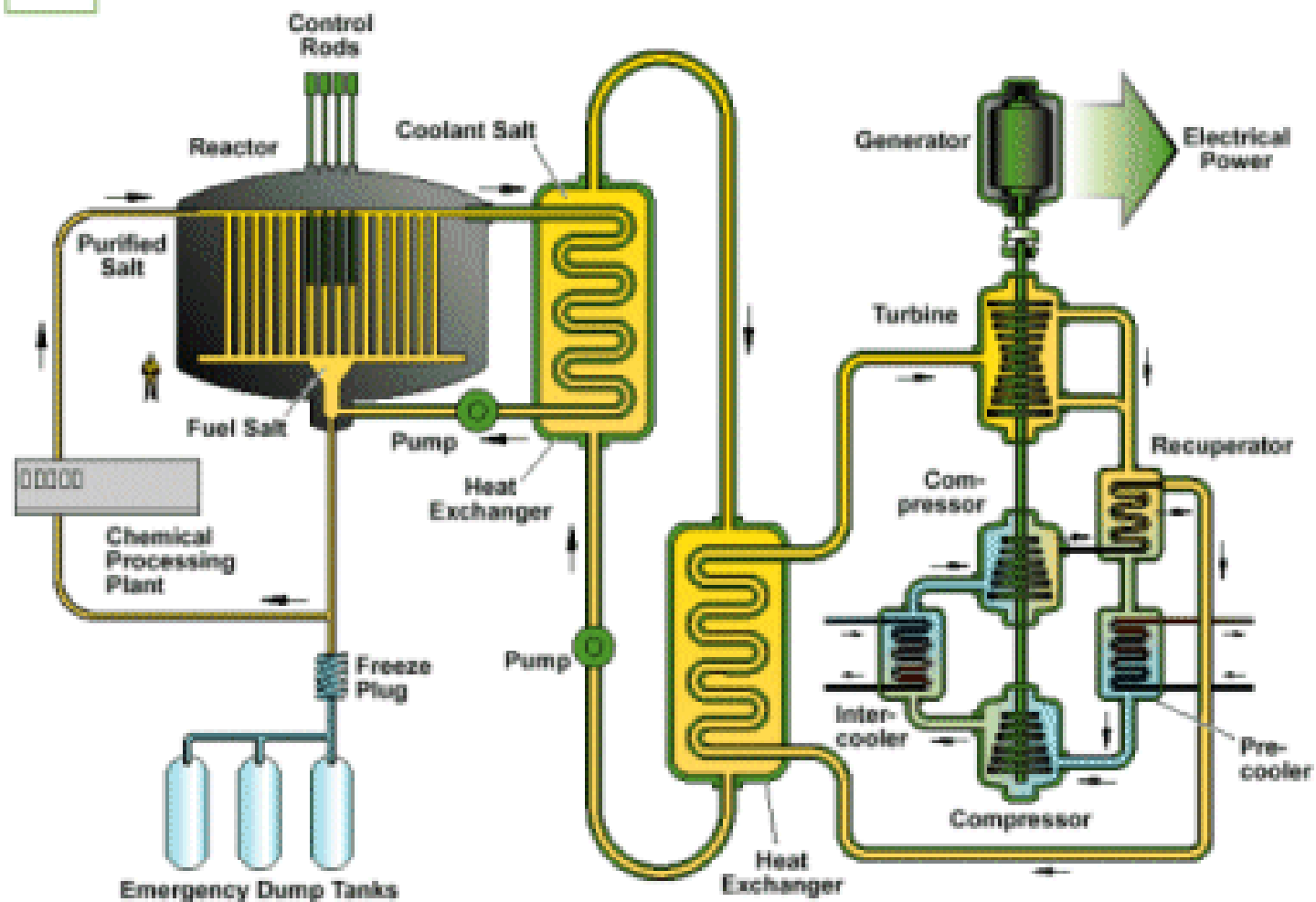
+ по-малко забавител → по-малък обем

+ възможност за използване на ^{232}Th



Molten Salt Reactor

MSR



Гориво:
течно UF_4

Ядрени реактори

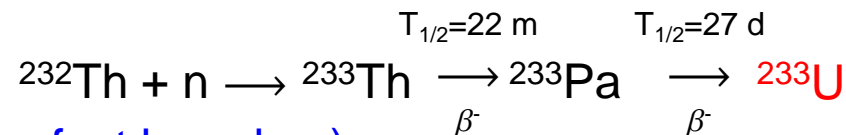
класификация по тип на неутрони

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

- + могат да работят с естествен или слабо обогатен U
- големи активни зони → много радиоактивен отпадък

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

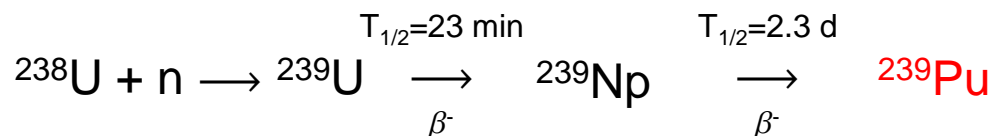
- + по-малко забавител → по-малък обем
- + възможност за използване на ^{232}Th



3) Реактори на бързи неутрони (размножители, fast breeders)

– **не изискват забавител**

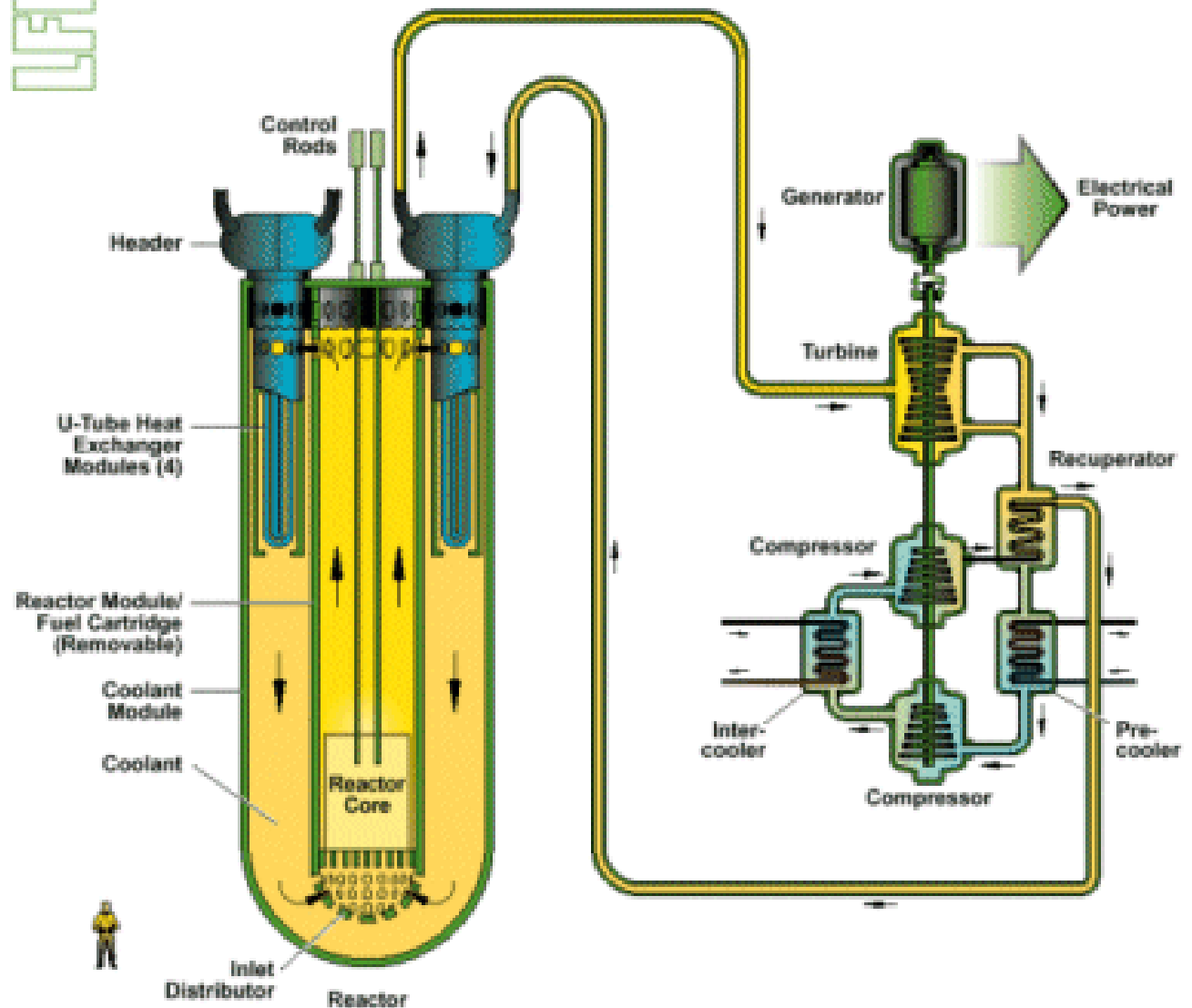
- изискват високо обогатено гориво (>20% ^{239}Pu или ^{235}U)
- + компактни → удобни за двигатели
- + използват тежки материали за охладител → по-високи работни температури (550°C) → по-висока топлинна ефективност
- + по-рядко се нуждаят от презареждане
- + могат да произвеждат горивото си



Lead-Cooled Fast Reactor

LFR

20% PuO_2
80% UO_2



Ядрени реактори

класификация по тип на 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

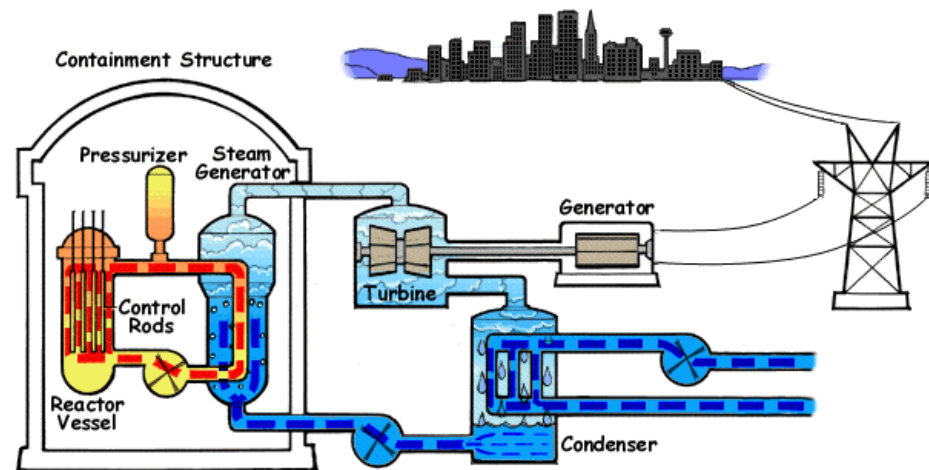
класификация по тип на охладителя

1) Вода под налягане (Pressurized Water Reactors)

+ константно налягане → по-добър контрол върху забавянето на n

+ електрическата част е отделена от ядрената

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



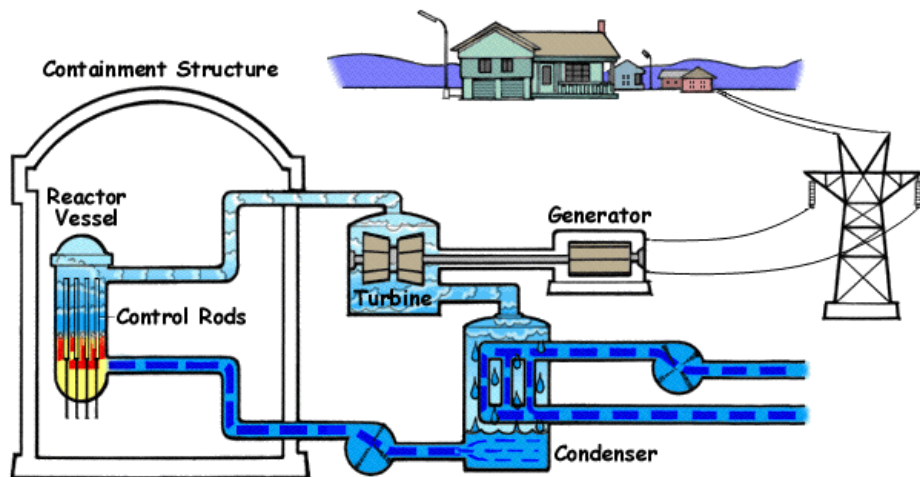
2) Кипяща вода (Boiling Water Reactors)

+ 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 дялящ се материал и конфигурация, при която настъпва критична верижна реакция.

1) Достатъчно материал за достигане на надкритична маса – използва се обогатяване $> 90\%$ (оръжейно качество на обогатения материал, weapon graded)

2) Инициране на реакцията \rightarrow осигуряване на първоначалните неутрони

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

Am-Be смес $^{216}\text{Po} \rightarrow ^{212}\text{Pb} + \alpha$

$^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + \alpha$

Малък линейен ускорител за p
(p,n) реакция



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

СИНХРОНИЗАЦИЯТА е важен елемент от конструкцията.

Ядрени експлозиви

Little boy -Хирошима

Fat Man - Нагазаки



Detonator
Conventional C

са



ives

ive.com

Термоядрен синтез

Термоядрен синтез в звездите (Слънцето)

Енергия, излъчвана от

Слънцето

$$L_{\odot} = 4\pi k I_{\odot} A^2$$

$$k \approx 1$$

$$A = 1 \text{ a.u.} = 1.497 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$I_{\odot} = 1.366 \text{ kW/m}^2$$

$$= 1.96 \text{ cal/min/cm}^2$$

$$L_{\odot} = 3.83 \times 10^{26} \text{ W}$$

Слънчевата енергия,

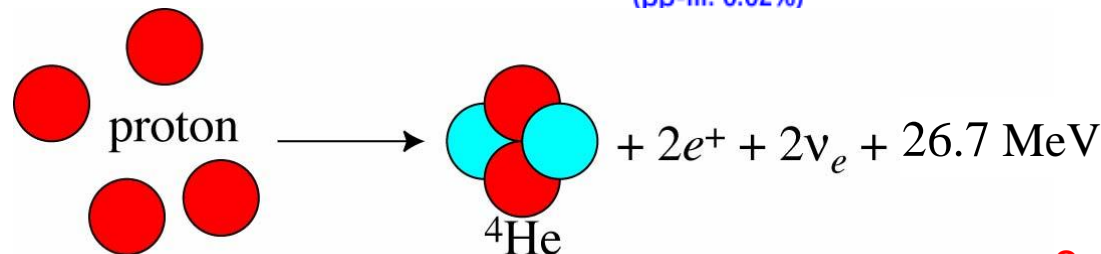
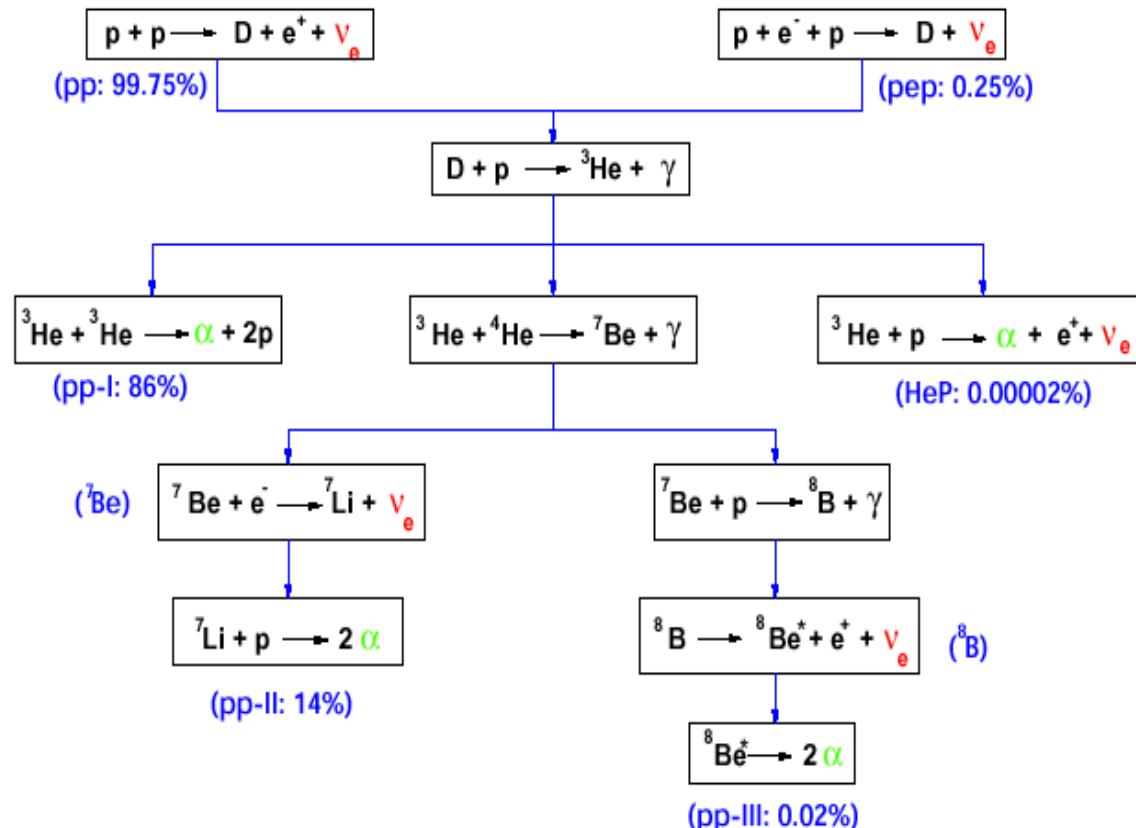
която Земята получава, е средно

$$1.740 \times 10^{17} \text{ W} = 174 \text{ млн. GW.}$$

Световното производство

на електроенергия е ~ 2 хил. GW...

$$T_c \approx 15.7 \times 10^6 \text{ K} = 1.35 \text{ keV}$$



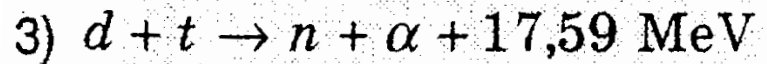
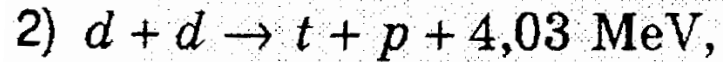
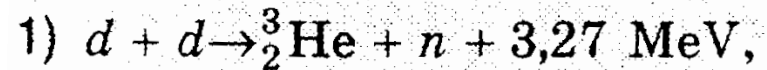
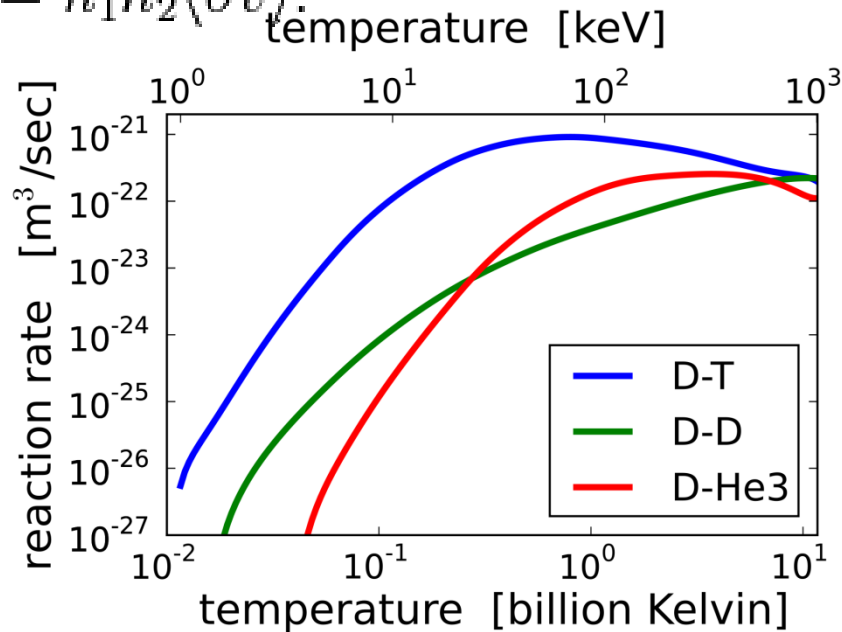
Управляем термоядрен синтез

Кулонова бариера

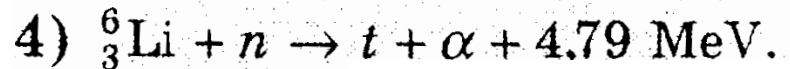
$$V_C = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{|R_1 + R_2|}$$

За реакция (3) $V_C \approx 0.4 \text{ MeV}$.

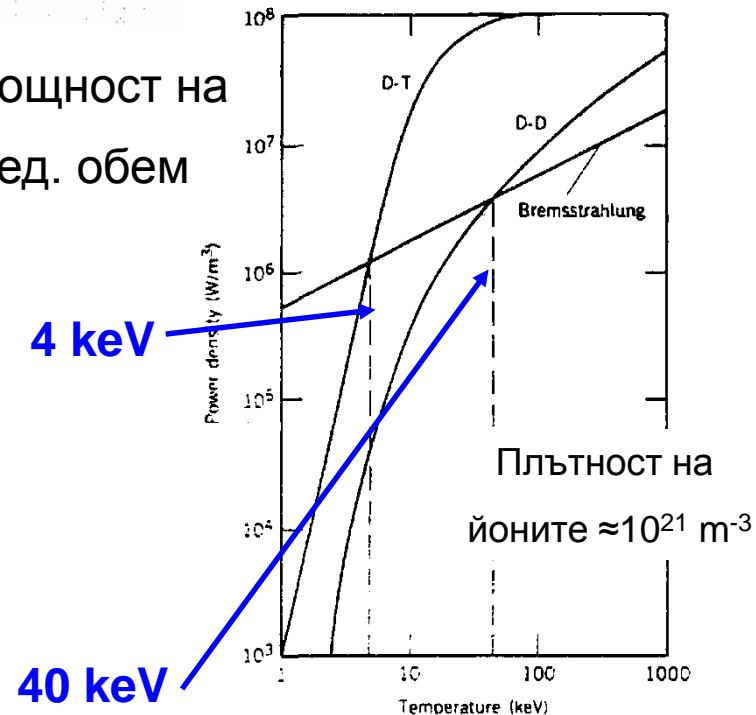
$$f = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle.$$



и за получаване на тритий



Мощност на
ед. обем



Критерии

на Лаусън:

$$n\tau > \frac{12kT}{\langle v\sigma \rangle Q}$$

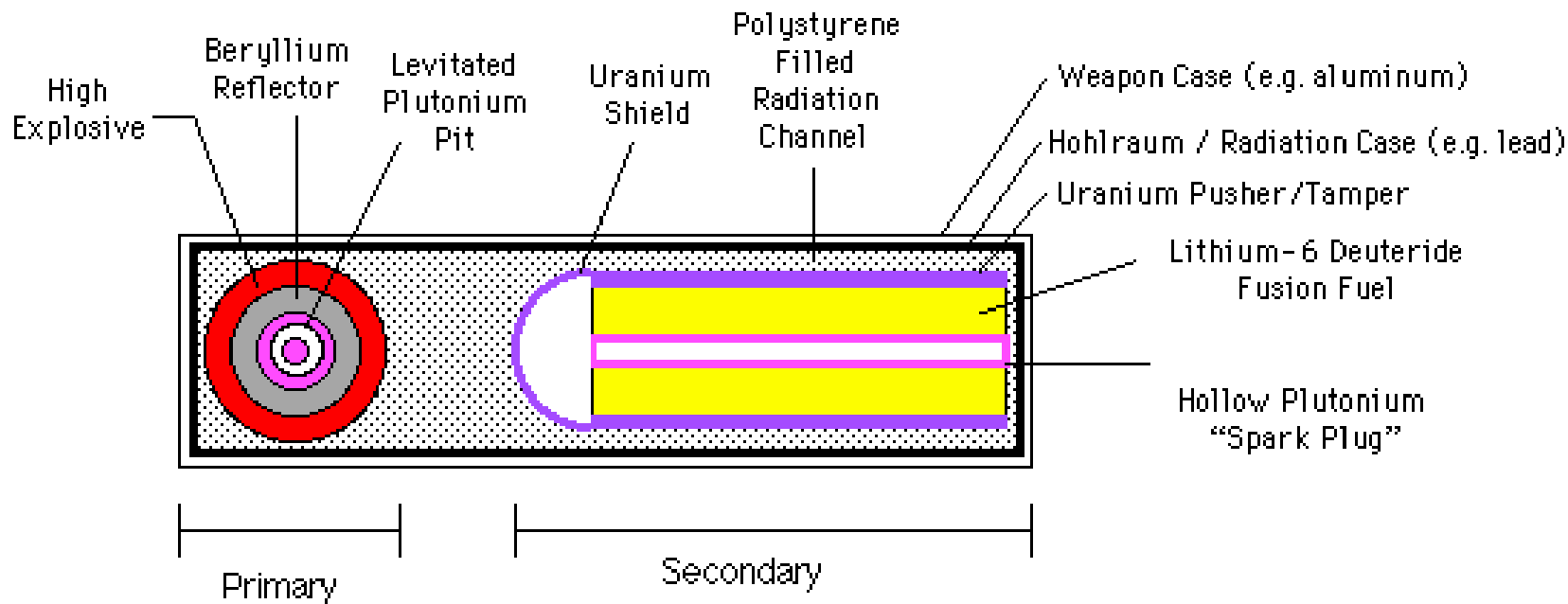
Термоядрена бомба

Най-често се използва LiD (обогатен с ^6Li)
като експлозив.

За “капсул-детонатор” служи “обикновена”
ядрена бомба, осигуряваща $T \sim 3 \times 10^8 \text{K}$.

Най-мощната взривена бомба
е била тристъпкова
с 50 Mt TNT ($=2.1 \times 10^{17} \text{J}$).

Взривът трае $\sim 20\text{-}40 \text{ ns} \rightarrow$
развива се мощност $\sim 5 \times 10^{24} \text{ W}$!



Edward Teller- Stanaw Ulam design (two-stage bomb)