

Reakcje rozszczepienia jądra i ich wykorzystanie

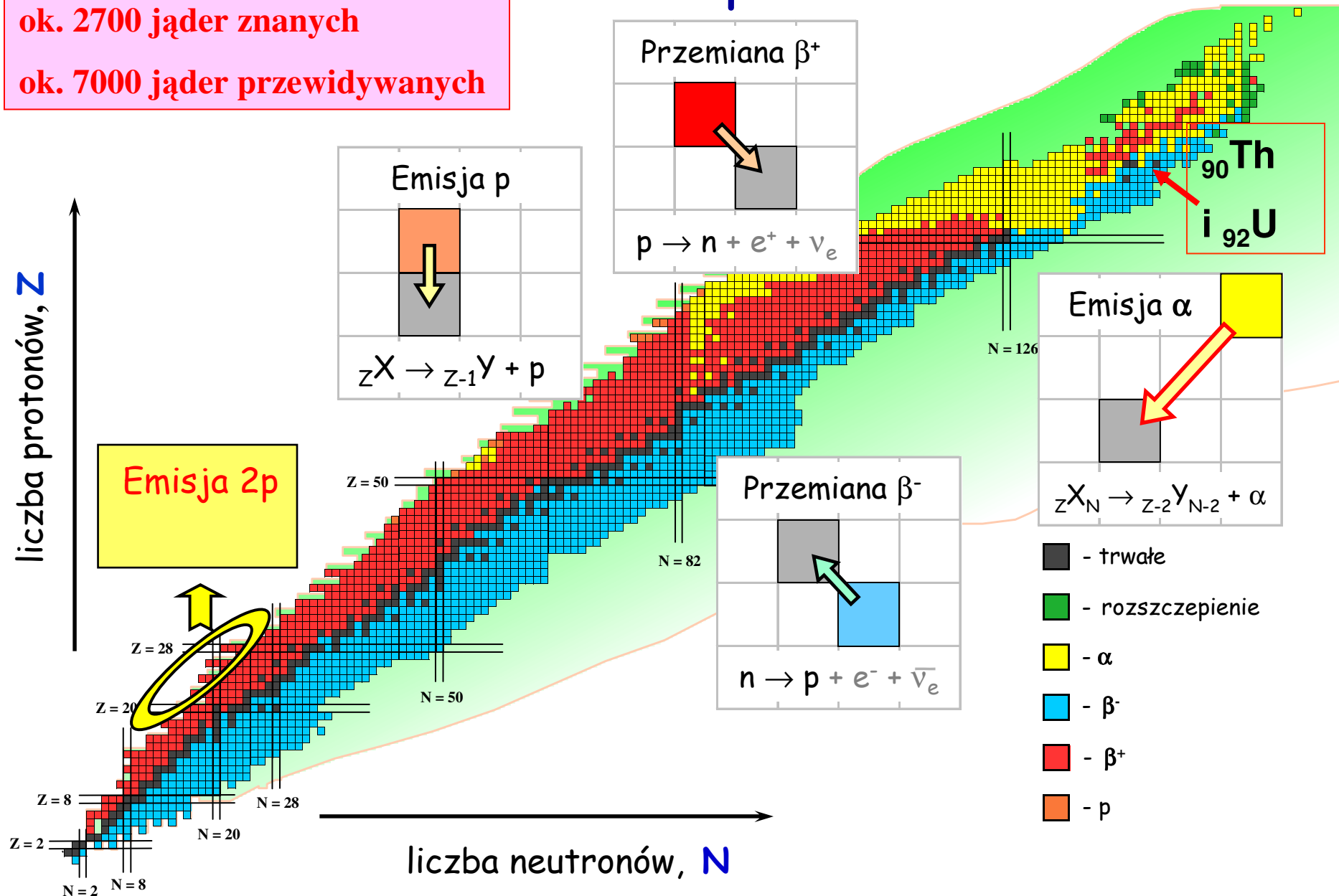
1. Warunki wystąpienia procesu rozszczepienia
2. Charakterystyka procesu rozszczepienia
3. Kontrolowana reakcja rozszczepienia
4. Zasada konstrukcji reaktora jądrowego
5. Broń jądrowa
6. Problemy energetyki jądrowej

264 jądra stabilne

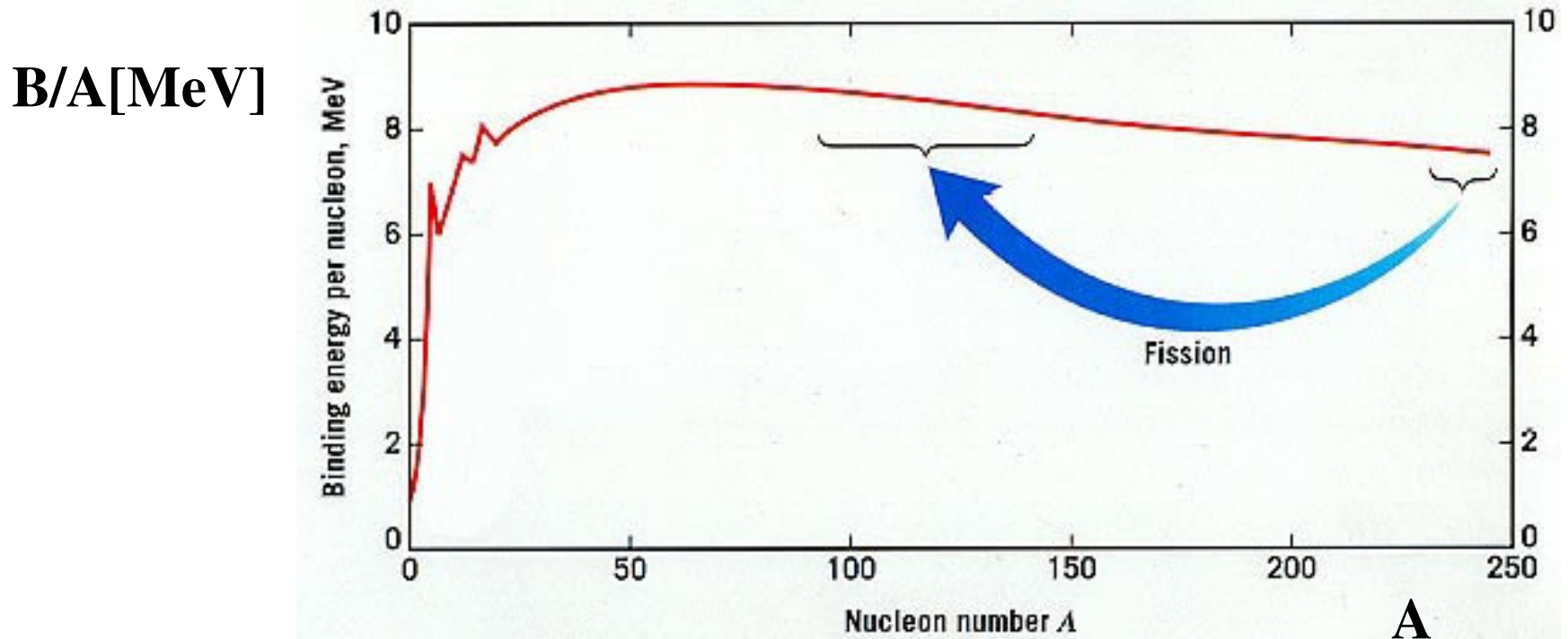
ok. 2700 jąder znanych

ok. 7000 jąder przewidywanych

Mapa nuklidów



Rozszczepienie jąder ciężkich



Rozszczepienie jądra ^{238}U ($B/A \approx 7,6 \text{ MeV/u}$) na dwa fragmenty np. ^{119}Pd ($B/A \approx 8,5 \text{ MeV/u}$):

$$\begin{aligned} Q &= E_f = 2 B(A/2, Z/2) - B(A, Z) \\ &= 238 (8,5 - 7,6) \text{ MeV} = 214 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Rozszczepienie jąder ciężkich

Przy rozszczepieniu jądra o (A, Z) na dwa fragmenty o równych masach: Energia rozszczepienia (w modelu kropkowym):

$$Q/c^2 = E_f/c^2 = M(A, Z) - 2 M(A/2, Z/2)$$

$$M(A, Z) = ZM_H + (A - Z)m_n - B(A, Z)$$

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

$$E_f/c^2 = a_s A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + a_c Z^2 A^{-1/3} (1 - 2^{-2/3})$$

$E_f/c^2 \geq 0$ dla jąder o A i Z większym od ^{90}Zr

Przy rozszczepieniu jądra ^{238}U na dwa fragmenty np. ^{119}Pd

$$\mathbf{Q = E_f = 191 \text{ MeV}}$$

Warunki wystąpienia procesu rozszczepienia

Rozszczepienie - wynik konkurencji między siłami jądrowymi i kulombowskimi

$$B \sim A$$
$$F_{\text{kul}} \sim Z^2$$

^{238}U

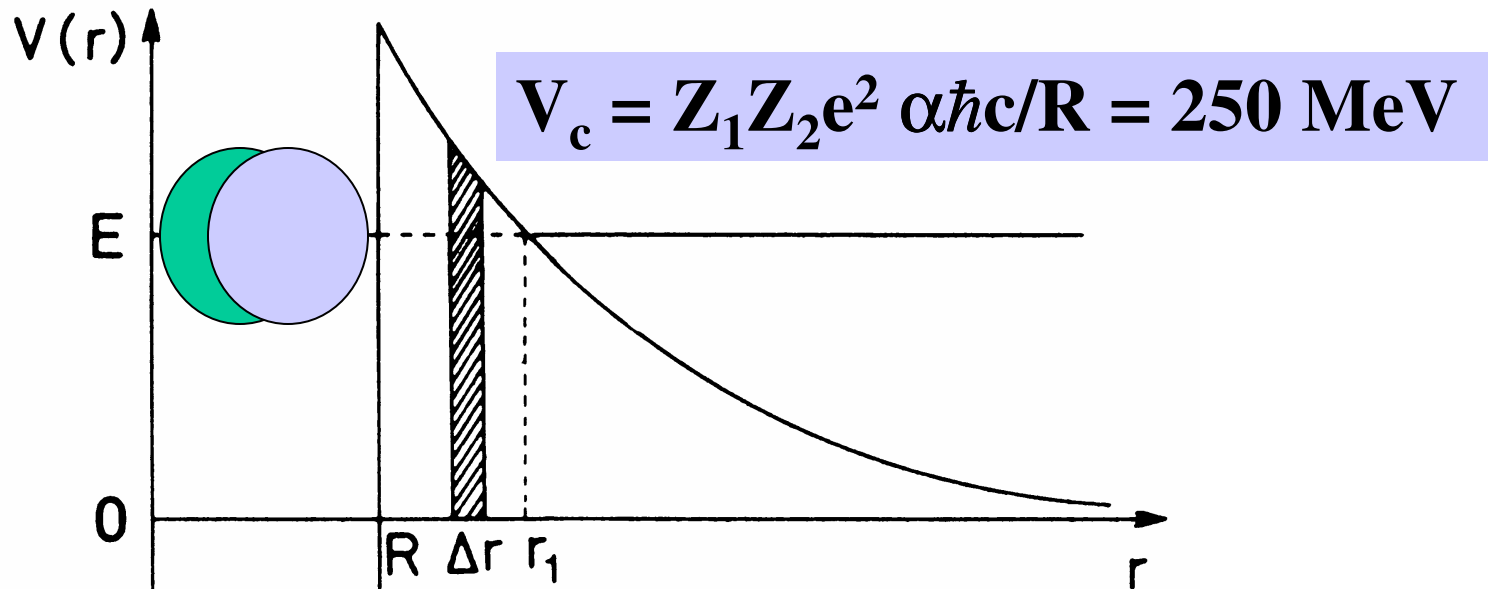
rozszczerzenie $T_{1/2} = 6 \cdot 10^{15}$ lat

rozpad α $T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$ lat

Warunki wystąpienia procesu rozszczepienia

Rozszczepienie jądra ^{238}U na dwa fragmenty np. ^{119}Pd :

1. Energia uwalniana w procesie rozszczepienia $E_f = Q \approx 200 \text{ MeV}$
2. Bariera kulombowska dla 2 fragmentów

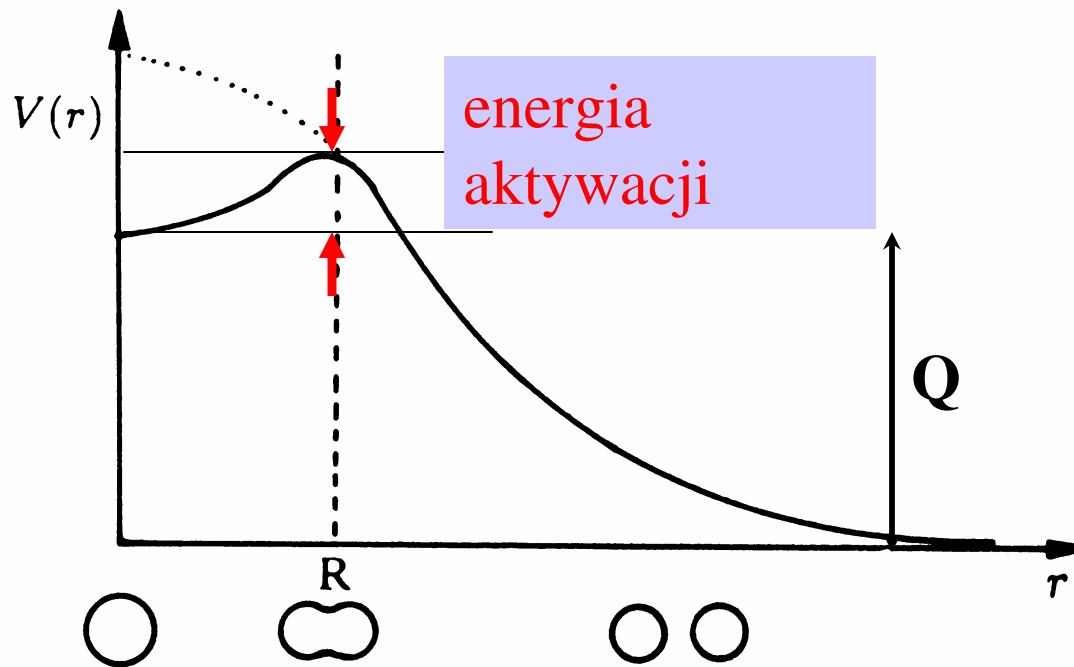


Bardzo małe prawdopodobieństwo rozszczepienia i duży $T_{1/2}$!

Warunek
na rozszczepienie
samoistne

energia aktywacji = 0

$$Q \geq V_c$$



Warunek na rozszczepienie samoistne

$$Q/c^2 = E_f/c^2 = a_S A^{2/3} (1-2^{1/3}) + a_C Z^2 A^{-1/3} (1-2^{-2/3})$$

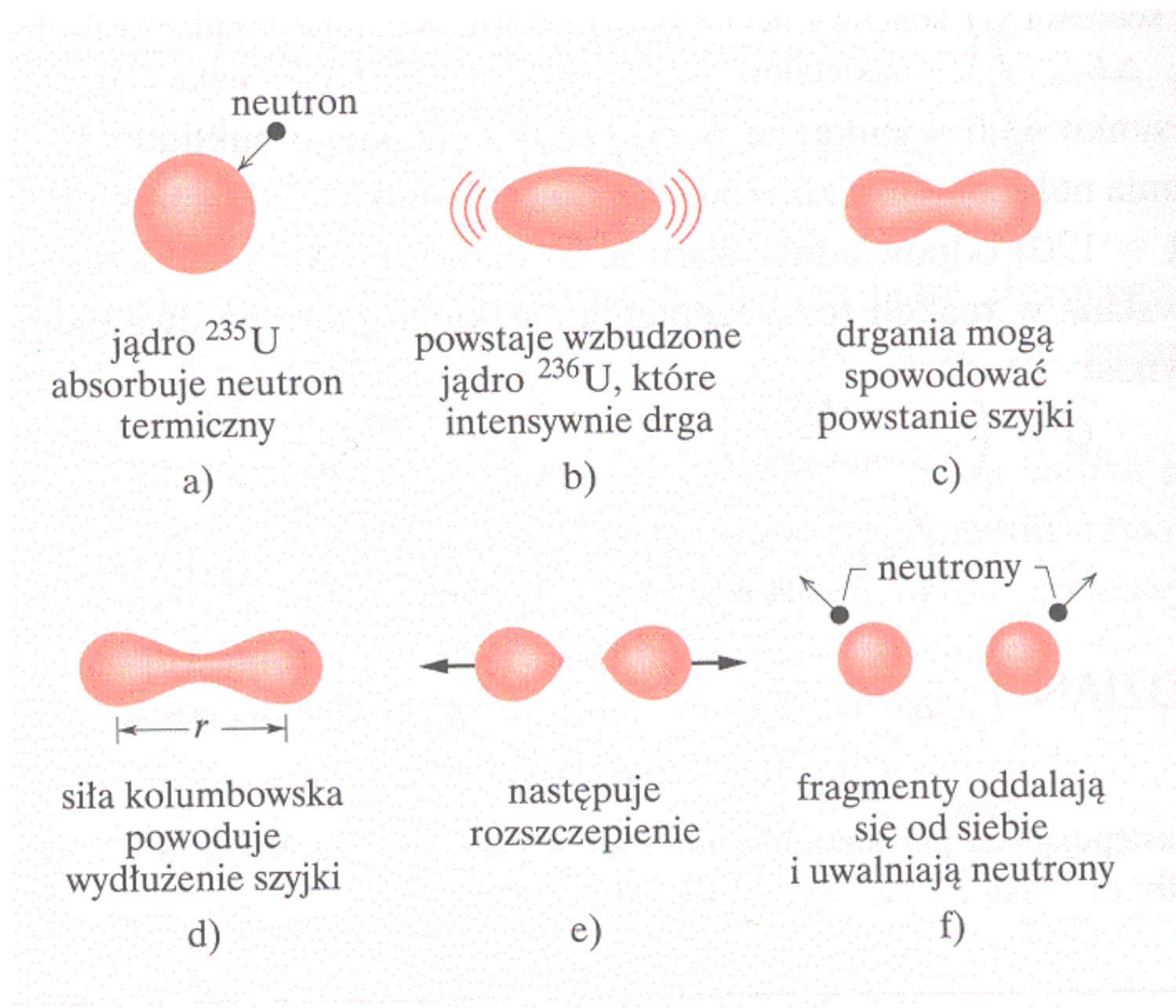
$$V_c = (Z/2)^2 e^2 \alpha \hbar c / [2r_0 (A/2)^{1/3}] = C Z^2 A^{-1/3}$$

$$Q \geq V_c \quad \rightarrow \quad a'_S A^{2/3} + a'_C Z^2 A^{-1/3} \geq C Z^2 A^{-1/3}$$

warunek niestabilności:

$$Z^2 / A \geq a'_S / (C - a'_C)$$

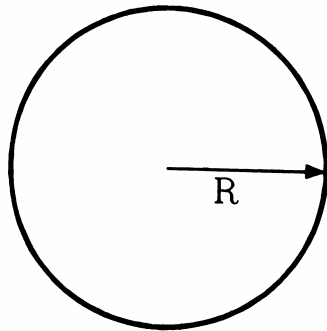
Warunki wystąpienia procesu rozszczepienia



Warunek na rozszczepienie samoistne

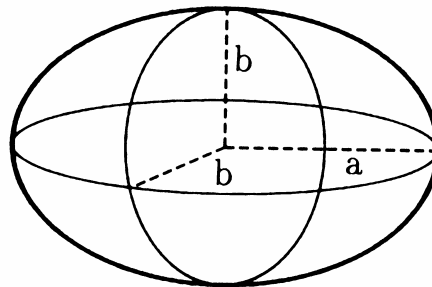
Wpływ deformacji na energię wiązania:

sfera



→

elipsoida



$$B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

warunek: $V = (4/3)\pi ab^2 = (4/3)\pi R^3$

$$a = R(1 + \varepsilon)$$

$$b = R\left(1 - \frac{\varepsilon}{2}\right)$$

$$S = 4\pi R^2 [1 + (2/5) \varepsilon^2 + ..]$$

Warunek na rozszczepienie samoistne

Zmiana energii wiązania jądra przy wzroście deformacji ε :

$$\Delta E = - [B(\varepsilon) - B(0)]$$

energia „powierzchniowa” $E_s(\varepsilon) = a_s A^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2 + \dots \right)$

energia kulombowska $E_c(\varepsilon) = a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{1}{5} \varepsilon^2 + \dots \right)$

różnica energii względem jądra sferycznego $\Delta E = E_s(\varepsilon) + E_c(\varepsilon) - [E_s(0) + E_c(0)]$

$$\Delta E = \frac{\varepsilon^2}{5} \left(2a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right)$$

warunek niestabilności: $\Delta E \leq 0$

Warunek na rozszczepienie samoistne

$$\Delta E = 0$$

$$2a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} = 0$$

$$\frac{Z^2}{A} \geq \frac{2a_s}{a_c} \approx 48 \Rightarrow \text{rozszczepienie}$$

parametr rozszczepienia:

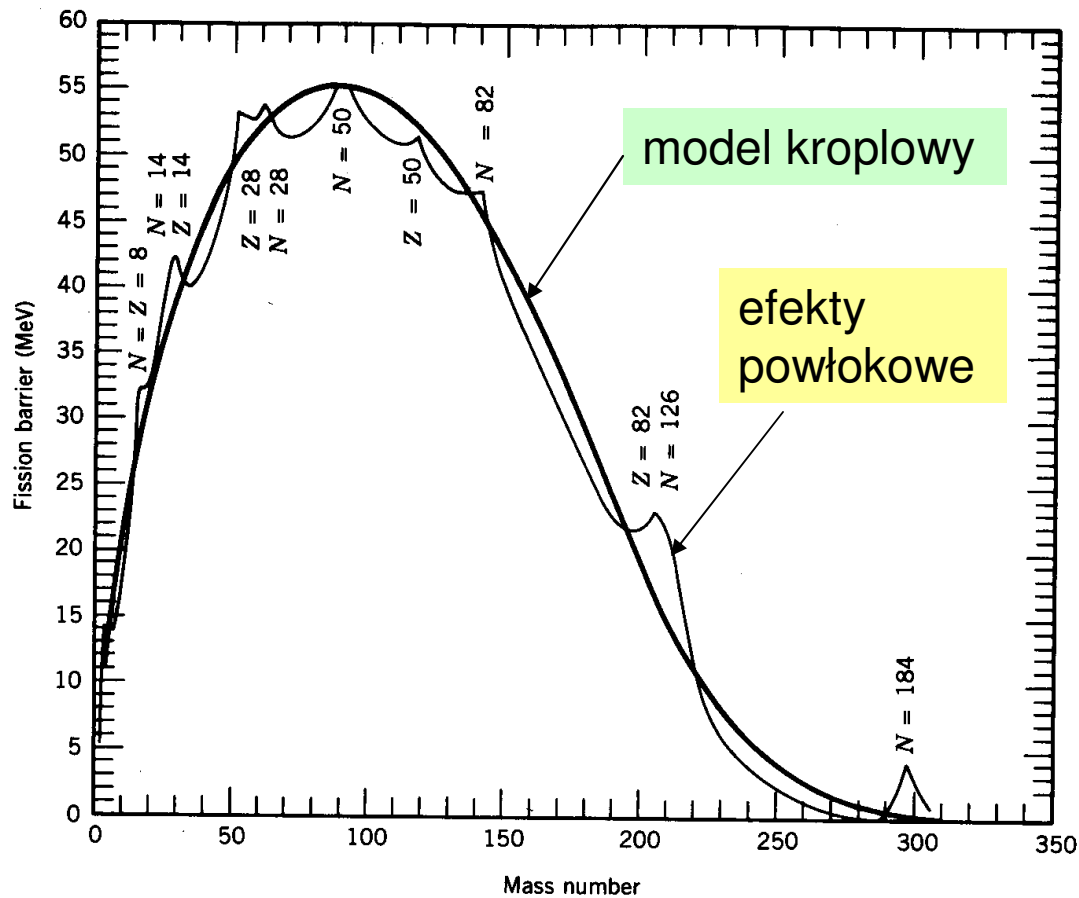
$$x = Z^2 / (48A)$$


$$Z > 114$$

$$A > 270$$

Dla jąder występujących w przyrodzie rozszczepienie samoistne nie zachodzi

Energia aktywacji



*parametr
rozszczenia:*

$$x = Z^2 / (48A)$$

dla ^{238}U $Z^2 / A = 35.5$

$$x = 0.74$$

Prawdopodobieństwo rozszczepienia

- Czas połowicznego zaniku ze względu na rozszczepienie silnie zależy od Z^2/A

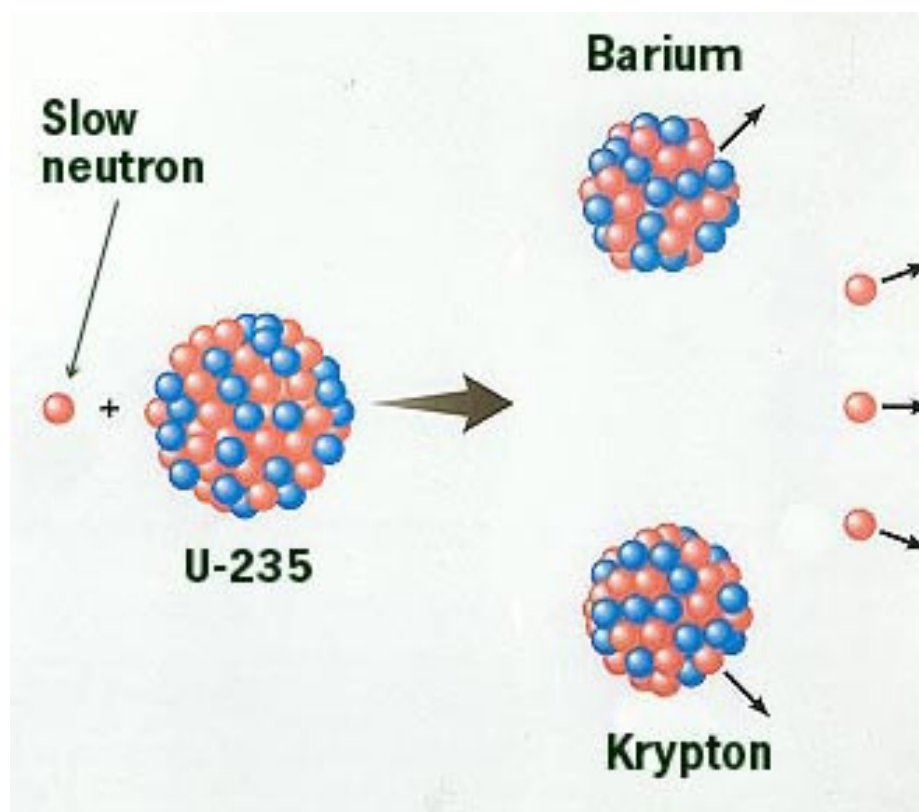
parametr rozszczepialności $x = Z^2/(48 A)$

x	Jądro	$T_{1/2}$
0,74	^{238}U	$6 \cdot 10^{15}$ lat
0,82	^{254}Fm	220 dni
0,87	$^{258}\text{104}$	0,01 s

Rozszczepienie wymuszone

- Energia aktywacji > 0

neutrony termiczne (0.025 eV, 2200 m/s)



Rozszczepienie wymuszone

W wyniku wchłonięcia przez ^{235}U neutronu powstaje ^{236}U o energii wzbudzenia $E_x = [m(^{236}\text{U}^*) - m(^{236}\text{U})]c^2$

$$m(^{236}\text{U}^*) = m(^{235}\text{U}) + m_n \quad ; \quad E_n^{\text{kin}} - \text{b. mała}$$

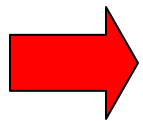
$$m(^{236}\text{U}^*) = 235,043924 \text{ u} + 1,008665 \text{ u} = 236,052589 \text{ u}$$

$$m(^{236}\text{U}) = 236,045563 \text{ u}$$

$$E_x = (236,052589 \text{ u} - 236,045563 \text{ u}) 931,502 \text{ MeV/u} =$$

$$\mathbf{6,5 \text{ MeV}}$$

Energia aktywacji (energia progowa) dla ^{236}U : **6,2 MeV**



^{235}U może ulegać rozszczepieniu już dla $E_n^{\text{kin}} = 0$.

Rozszczepienie wymuszone

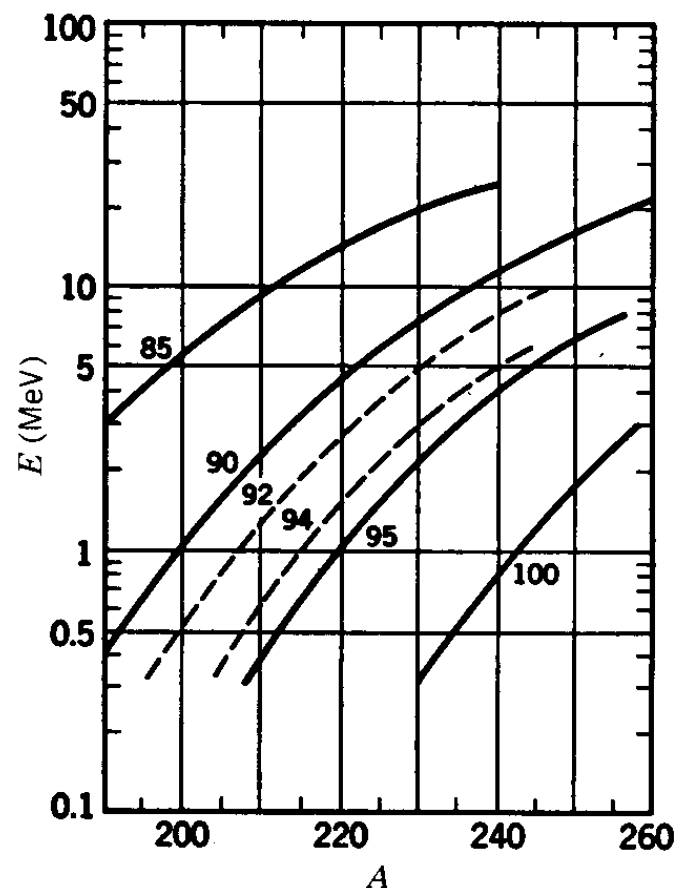
Dla $n + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{U}^*$

$$E_x = 4,8 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{prog}}({}^{239}\text{U}) = 6,6 \text{ MeV}$$

${}^{238}\text{U}$ może ulegać rozszczepieniu dla E_n^{kin} od ok. 2 MeV

- **Energia aktywacji**



Rozszczepienie wymuszone

- Przekrój czynny na rozszczepienie indukowane neutronami dla ^{235}U i ^{238}U

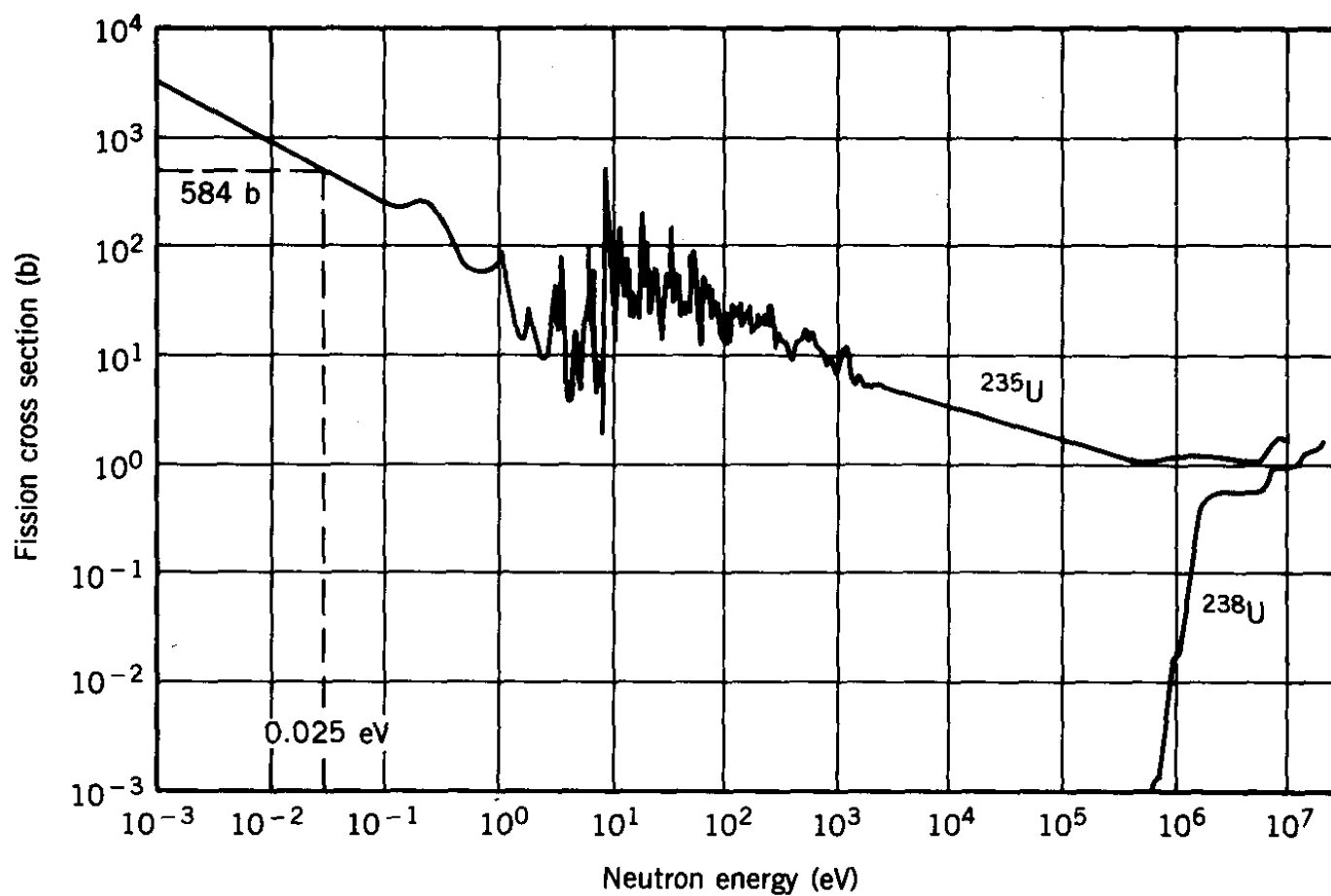
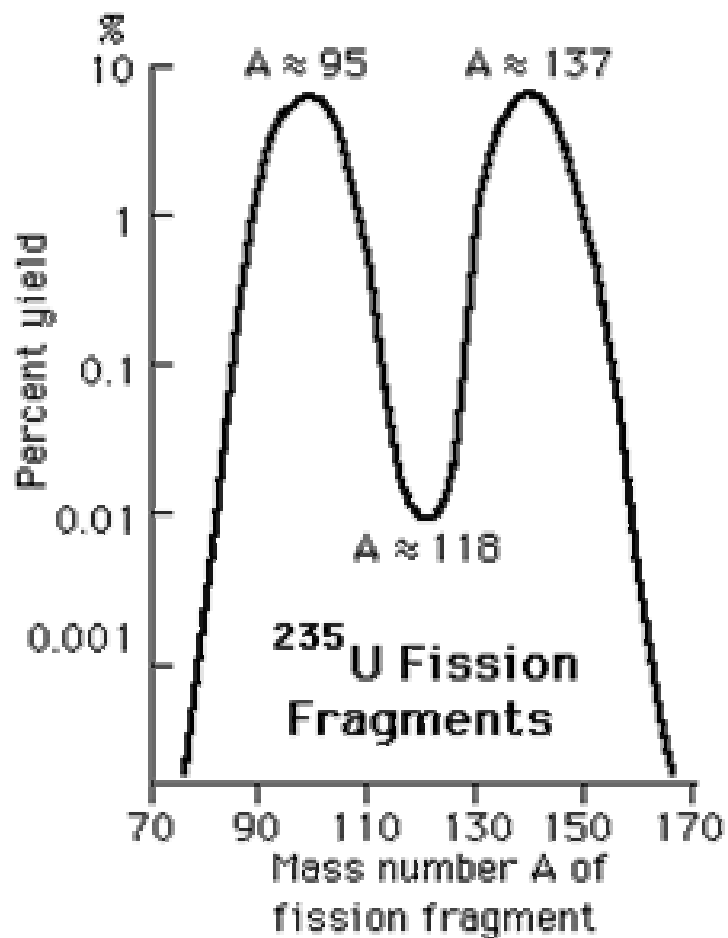


Figure 13.9 Cross sections for neutron-induced fission of ^{235}U and ^{238}U .

Charakterystyka procesu rozszczepienia

1. Rozkład masy fragmentów rozszczepienia



Rozszczepienie nie jest procesem symetrycznym.

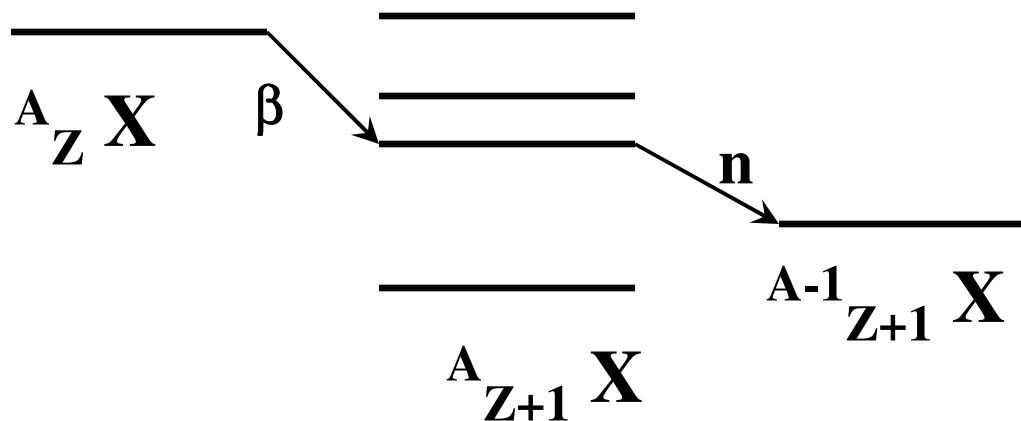
Silnie uprzywilejowany jest rozpad na dwa fragmenty znacznie różniące się masą.

Charakterystyka procesu rozszczepienia

2. Emisja neutronów

a) natychmiastowa, średnio 2,5 n, $\tau \approx 10^{-16}$ s

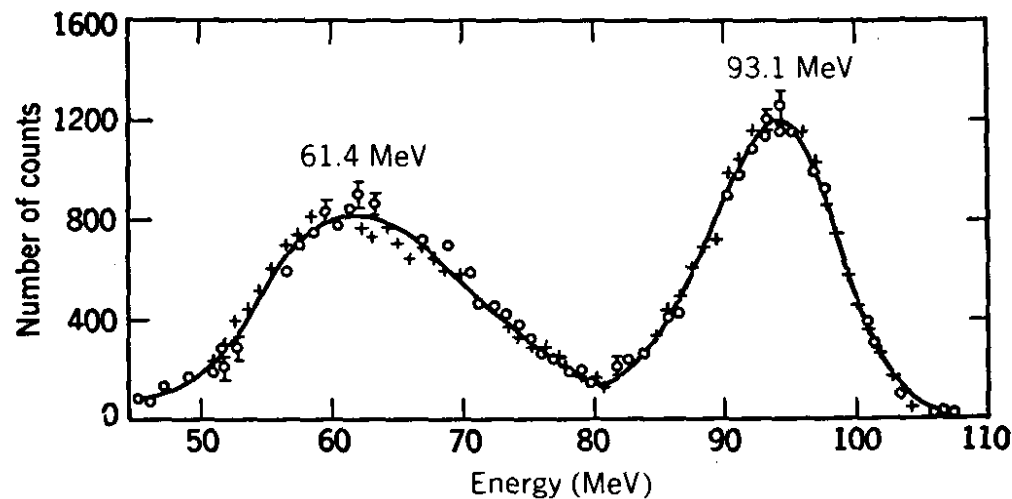
b) opóźniona, emisja n po rozpadzie β fragmentów, ok. 0,7% liczby n, średnio $\tau \approx 12,5$ s.



Charakterystyka procesu rozszczepienia

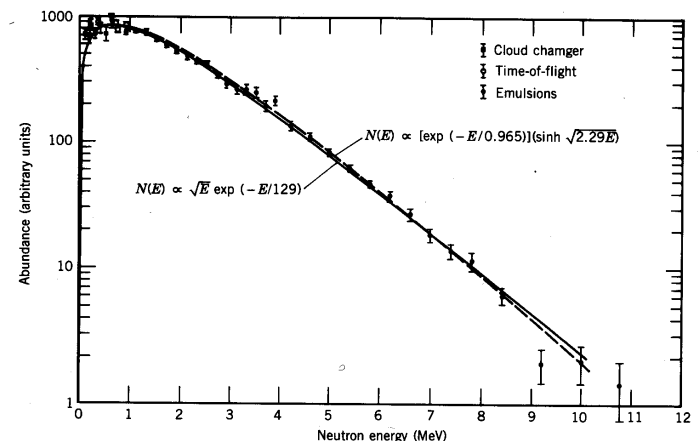
3. Rozkład energii kinetycznej fragmentów

Całkowita energia kinetyczna emitowanych cząstek wynosi ok. 180 MeV



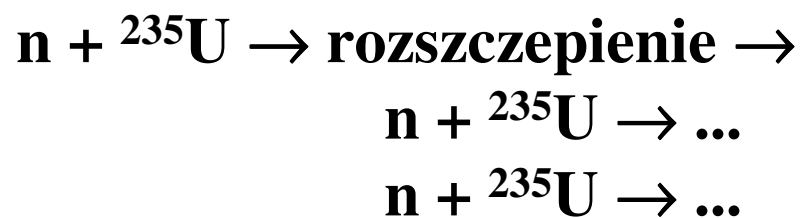
4. Widmo energetyczne neutronów

średnia $E_n = 2$ MeV



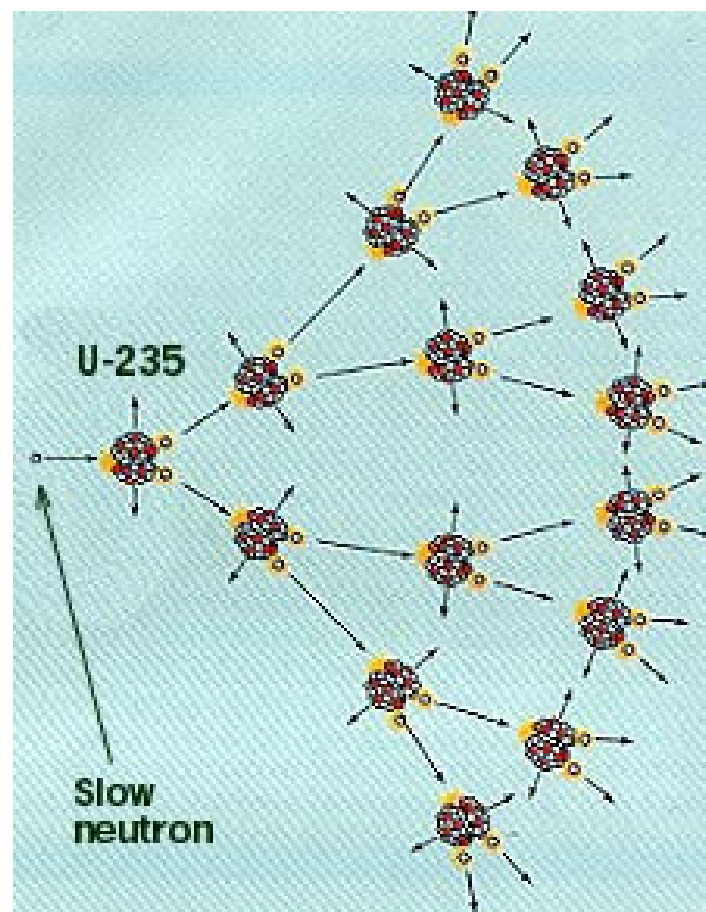
Kontrolowana reakcja rozszczepienia

Dla zapoczątkowania **reakcji łańcuchowej** konieczne jest aby liczba neutronów była > 1 .



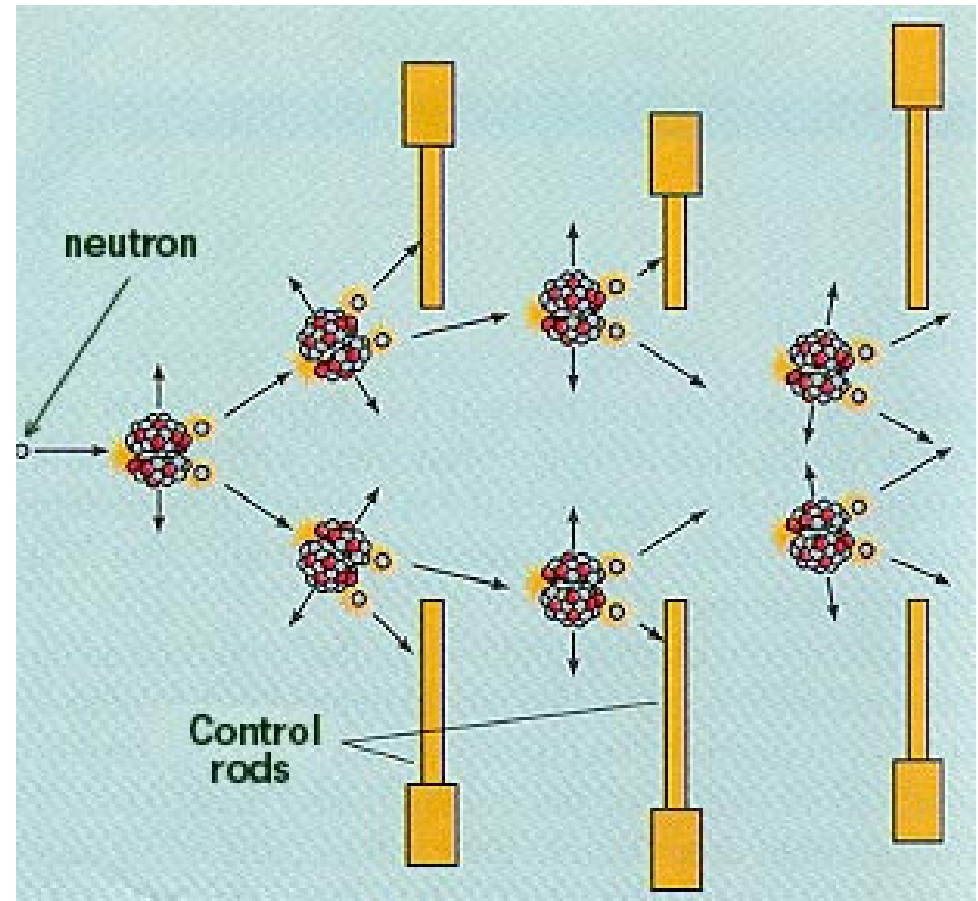
W przypadku ${}^{235}\text{U}$ neutrony muszą zostać spowolnione - moderator

(woda, D_2O , grafit, beryl)



Kontrolowana reakcja rozszczepienia

Regulacja liczby neutronów -
pręty regulacyjne (kadm)



Kontrolowana reakcja rozszczepienia

Bilans liczby neutronów

Straty n: ucieczka z reaktora

absorpcja przez (n, γ)

absorpcja w moderatorze

W chwili początkowej - N neutronów termicznych

ηN neutronów szybkich w wyniku rozszczepienia ^{235}U

$\epsilon \eta N$ neutronów szybkich w wyniku rozszczepienia ^{238}U

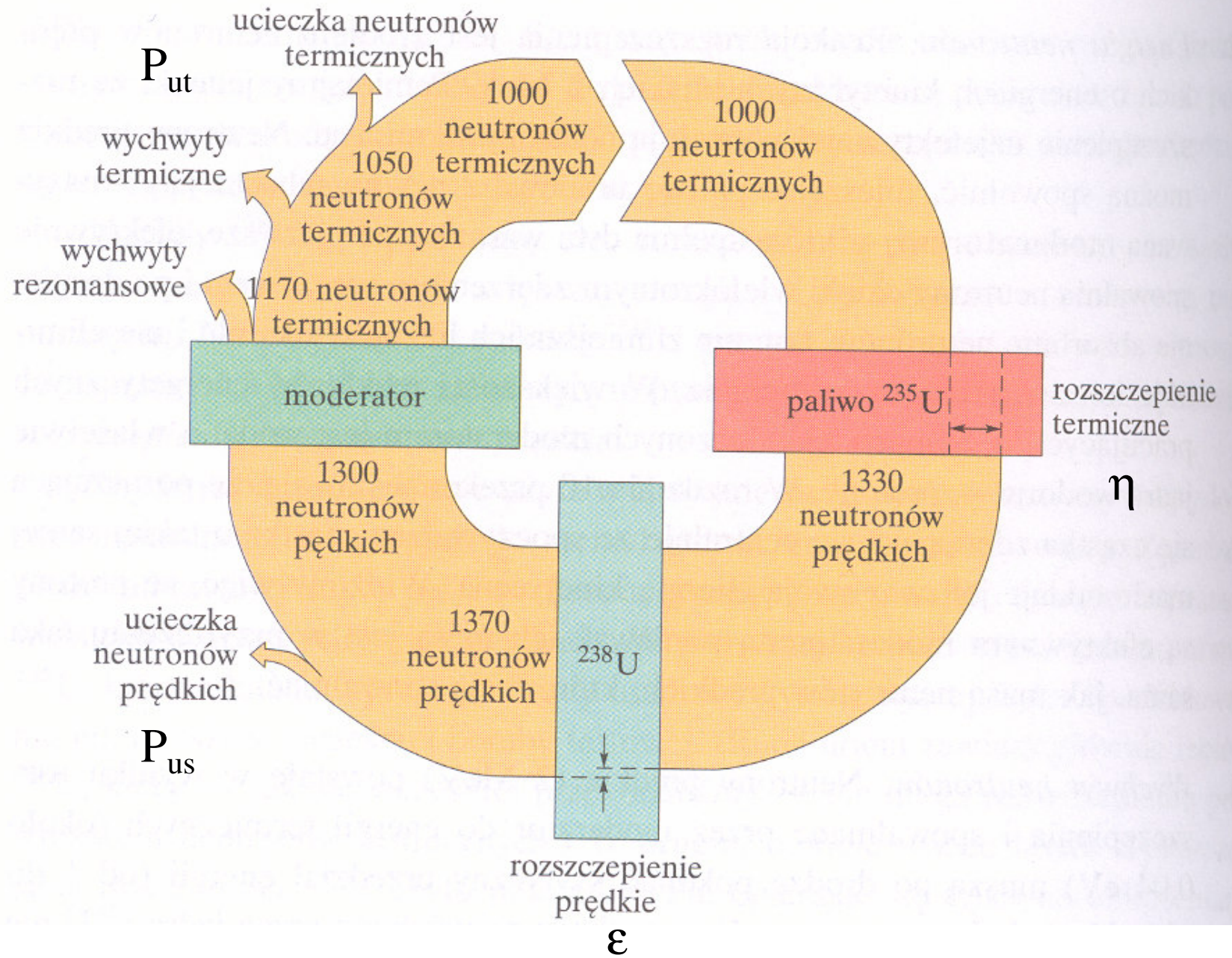
$k_{\text{ef}} N$ neutronów termicznych w wyniku spowolnienia w

moderatorze; $k_{\text{ef}} = \epsilon \eta P_{\text{us}} P_{\text{ut}}$ - **współczynnik powielania n**

$k_{\text{ef}} = 1$ układ jest krytyczny, reakcja przebiega stacjonarnie

$k_{\text{ef}} < 1$ układ jest podkrytyczny, reakcja zanika

$k_{\text{ef}} > 1$ układ jest nadkrytyczny, liczba n rośnie



Zasada konstrukcji reaktora jądrowego

Części reaktora:

paliwo - materiał rozszczepialny

moderator

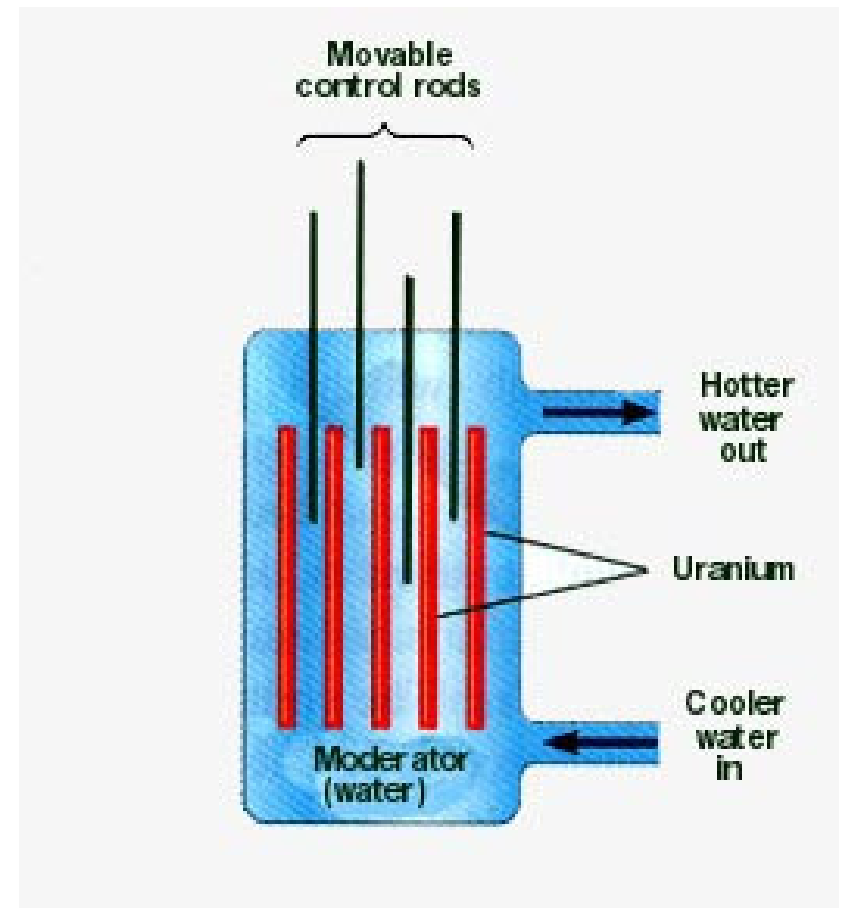
reflektor

zbiornik zabezpieczający

chłodziwo

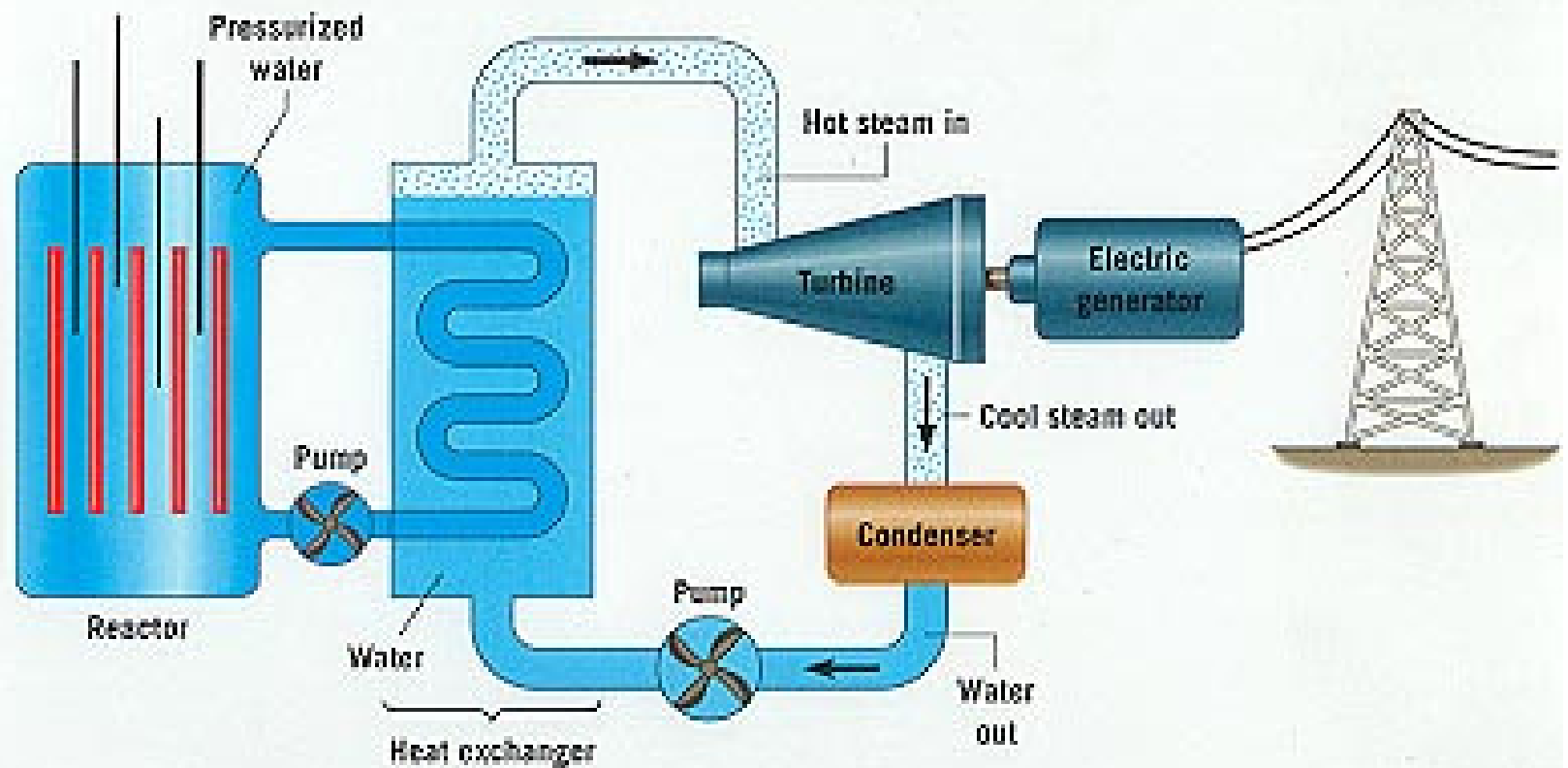
pręty regulacyjne (kontrola mocy)

system bezpieczeństwa



Zasada konstrukcji reaktora jądrowego

Reaktor wodny ciśnieniowy



Elektrownia jądrowa w Niemczech

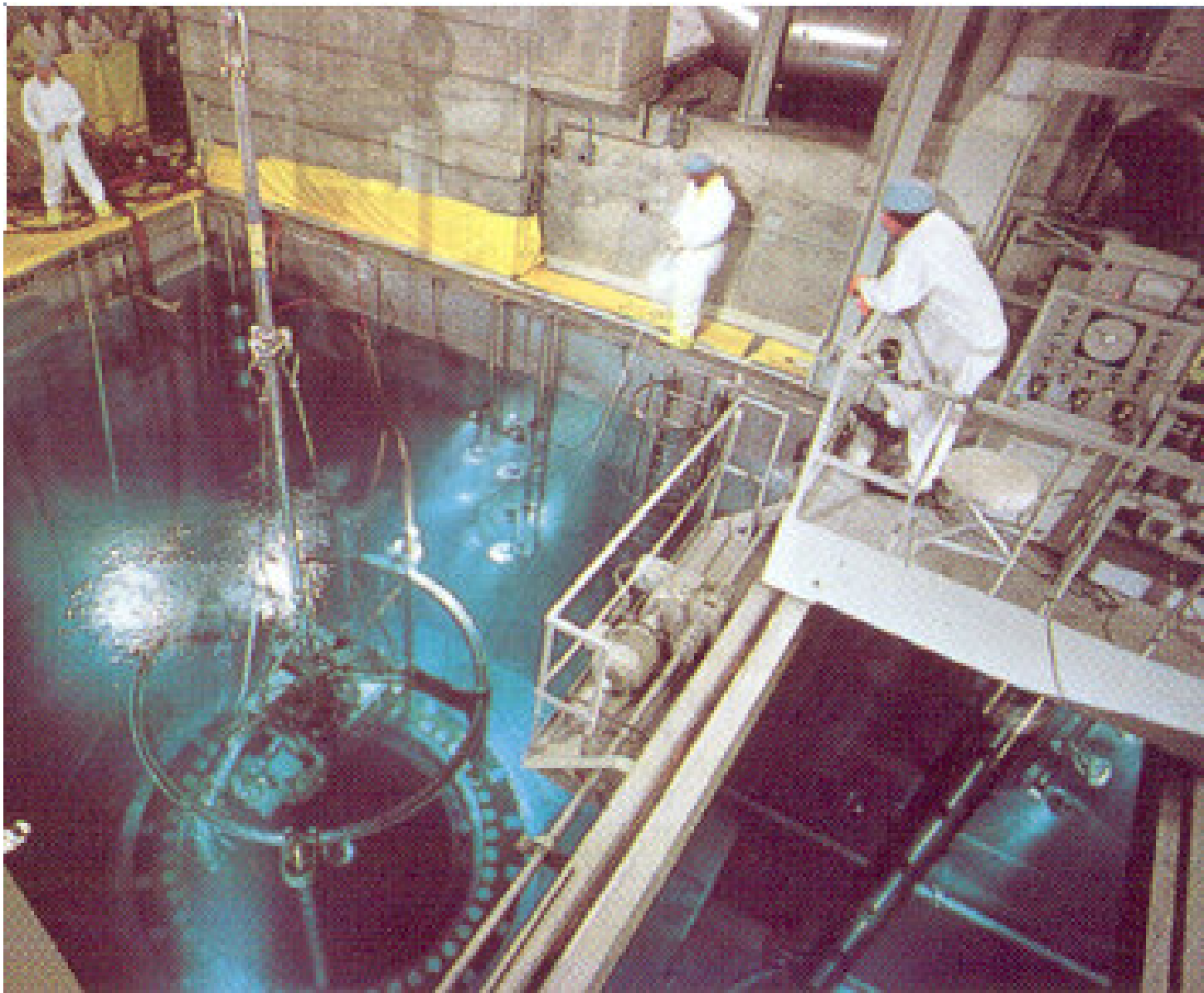
1g węgla - 36 kJ

1g uranu - 86 GJ



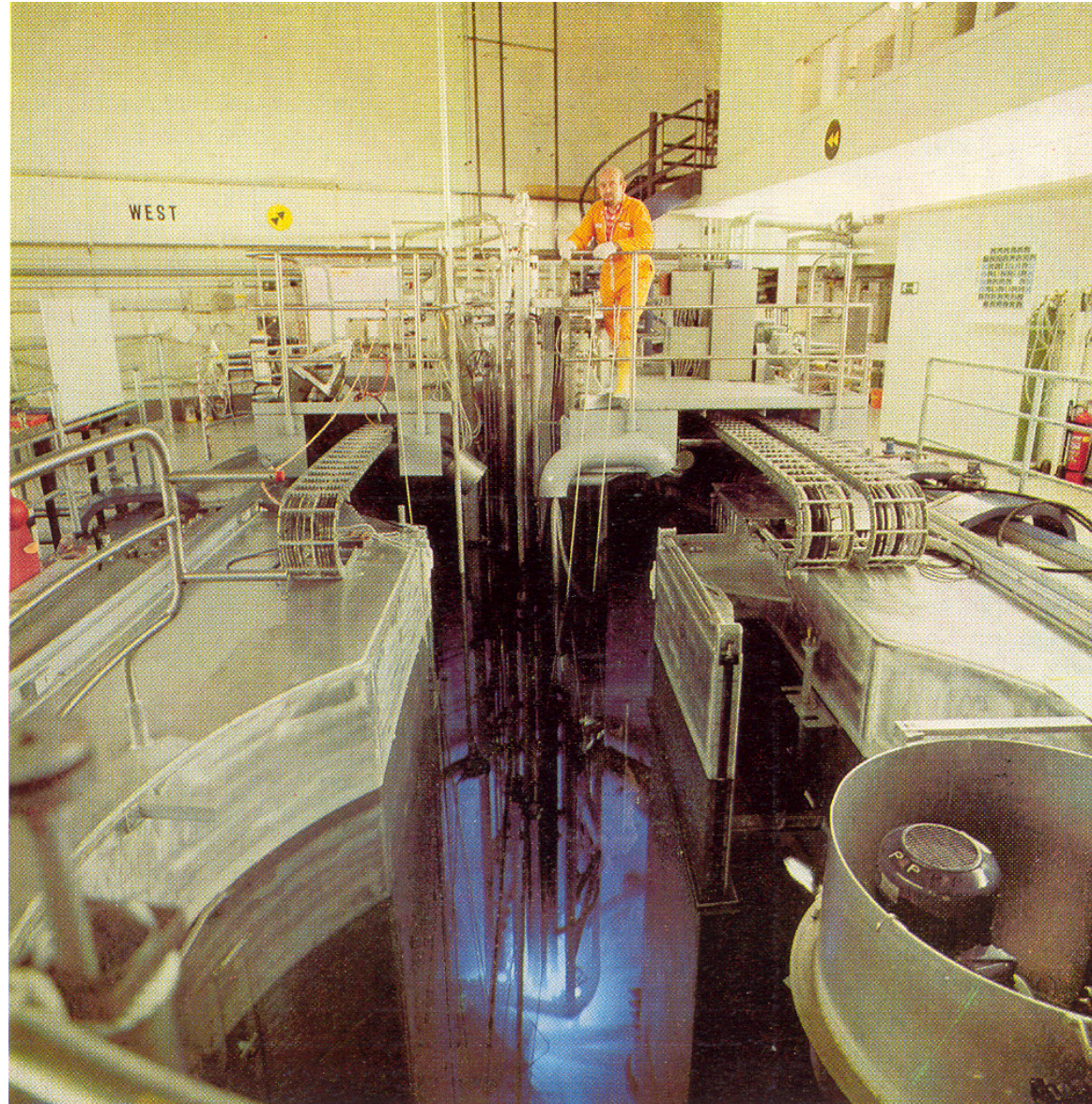
16% produkowanej w świecie energii elektrycznej pochodzi z reaktorów jądrowych.

Reaktor jądrowy



Reaktor jądrowy

Promieniowanie
Czerenkowa



Zasada konstrukcji reaktora jądrowego

Paliwo jądrowe

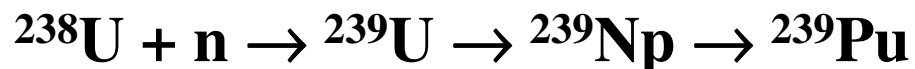
Uran- uran naturalny: 99,3 % ^{238}U , 0,7 % ^{235}U

uran wzbogacony w ^{235}U

wytworzony sztucznie ^{233}U :



Pluton- wytworzony sztucznie ^{239}Pu



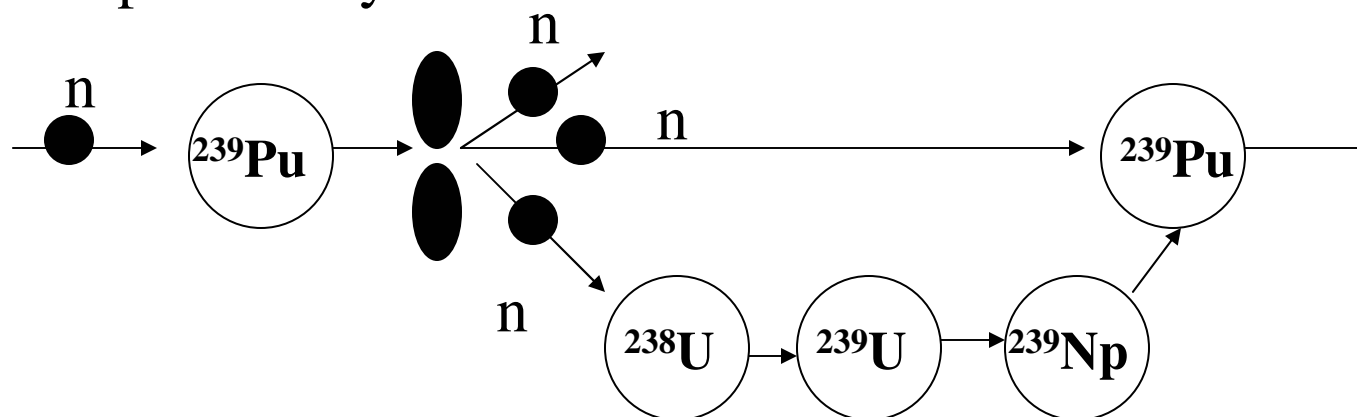
Zasada konstrukcji reaktora jądrowego

Typy reaktorów jądrowych

1. Reaktory termiczne

w Polsce reaktor MARIA w Świerku (uran wzbogacony, początkowo 80% ^{235}U , obecnie 36%)

2. Reaktory prędkie - możliwość powielania paliwa w cyklu uranowo-plutonowym



Historia

1. Pierwsze eksperymenty

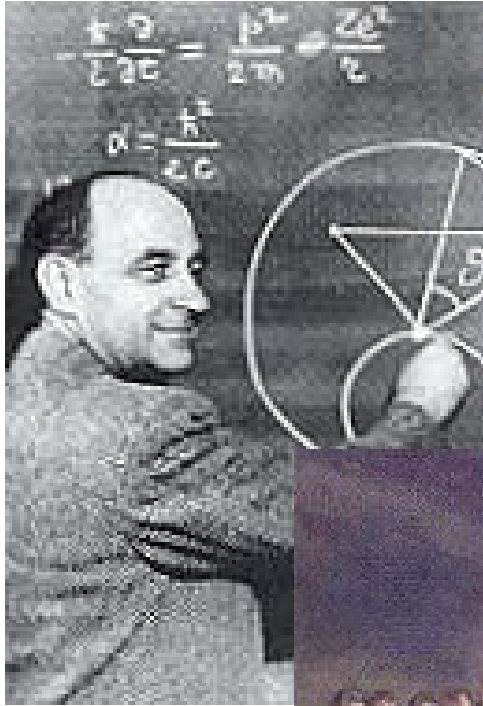
- Enrico Fermi w 1934 r. próba produkcji pierwiastków transuranowych
- Otto Hahn i Fritz Strassmann w 1938 r. - stwierdzenie produkcji Ba i Kr

2. Poprawna interpretacja teoretyczna - Lise Meitner i Otto Frisch w 1939 r.

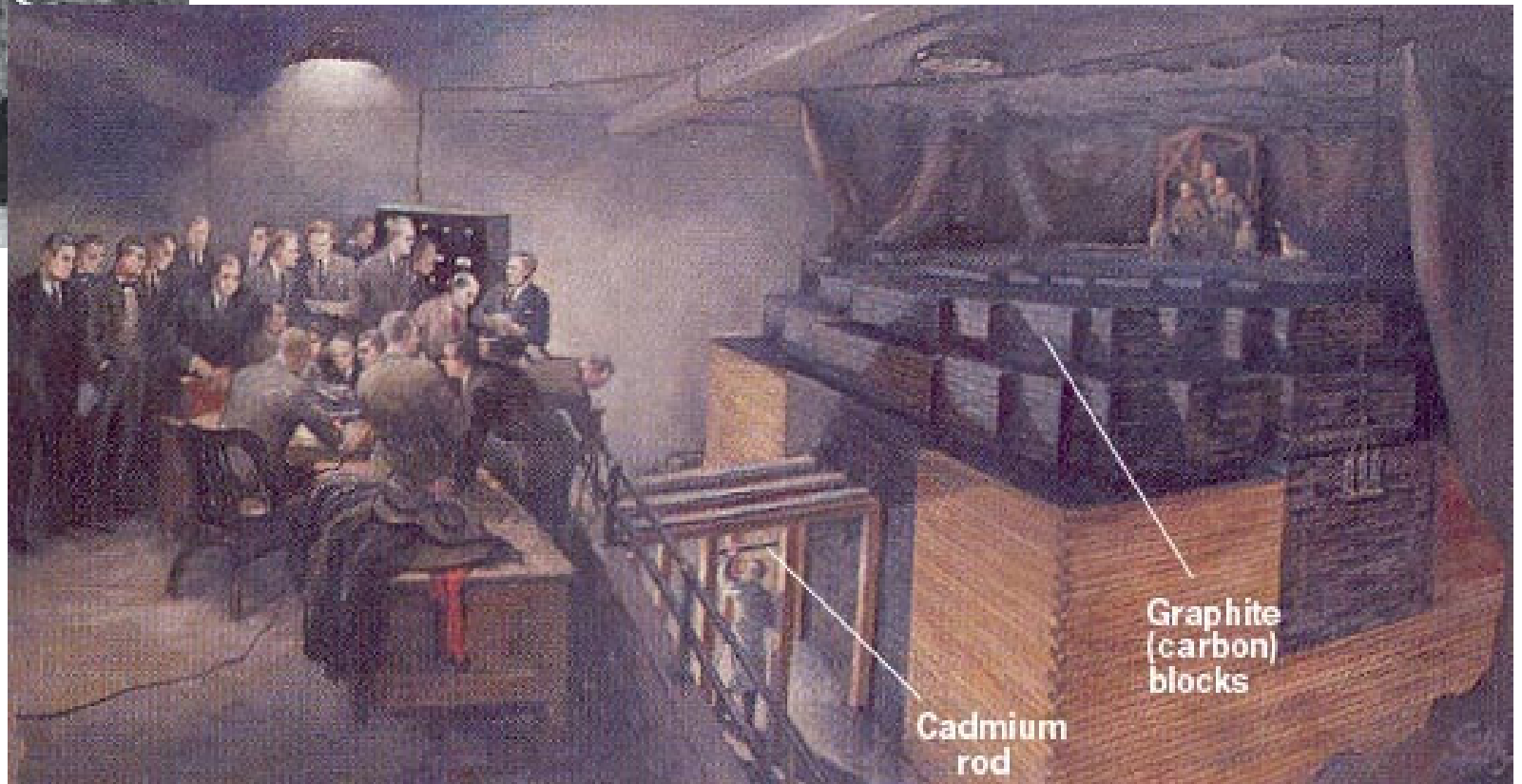
3. Opis teoretyczny rozszczepienia w modelu kropkowym - Niels Bohr i J.A. Wheeler w 1939 r.

4. Pierwsza kontrolowana reakcja jądrowa - E. Fermi 2 grudnia 1942 r.

Kontrolowana reakcja rozszczepienia



Enrico Fermi - w 1934 naświetlał n ^{235}U , w 1942 kierował budową pierwszego reaktora jądrowego w Chicago



Problemy energetyki jądrowej

1. Postępowanie z wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi

a) w świecie zgromadzono ok. 220 tys ton wypalonego paliwa
wyprodukowano z niego 70 tys TWh energii elektrycznej

b) w Polsce 140 TWh energii na rok daje 25 mln ton popiołów

c) składowanie w środowisku wodnym - przez około 50 lat

d) składowanie w głębokich formach geologicznych

e) przetwarzanie chemiczne

f) transmutacja jądrowa długożyciowych izotopów radioaktywnych

Problemy energetyki jądrowej

Spółeczna obawa przed skutkami awarii

Awaria reaktora w Czarnobylu



Kontrolowana reakcja rozszczepienia

Względna liczba n , które uciekają z bryły uranu zależy od wielkości i kształtu tej bryły.

a) procesy zależne od wielkości powierzchni:

ucieczka z bryły

b) procesy zależne od objętości:

rozszczerzenie

absorpcja

Masa krytyczna - masa najmniejszej ilości materiału rozszczepialnego, w której może się rozwinąć reakcja łańcuchowa

Wybuch jądrowy

Warunki wybuchu:

- masa paliwa musi być większa od masy krytycznej
- masa krytyczna musi być osiągnięta w bardzo krótkim czasie (10^{-6} s)

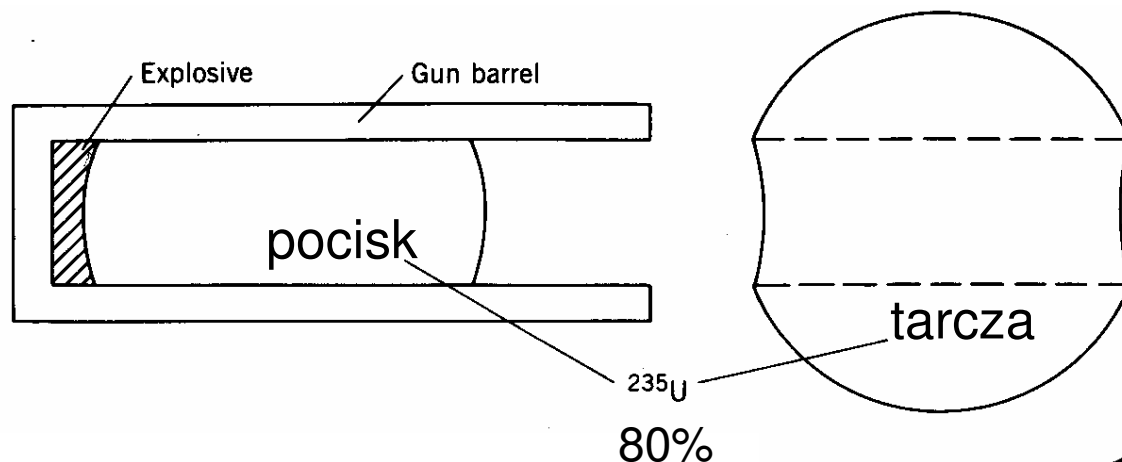
Masa krytyczna dla kształtu sferycznego

	^{235}U	^{239}Pu
dla samej kuli	56 kg	11 kg
dla kuli otoczonej grubym reflektorem	15 kg	5 kg

Masa krytyczna maleje, gdy gęstość materiału rozszczepialnego rośnie

Broń jądrowa - bomba atomowa

1. Typ „gun” (Hiroshima) ^{235}U



a) detonacja

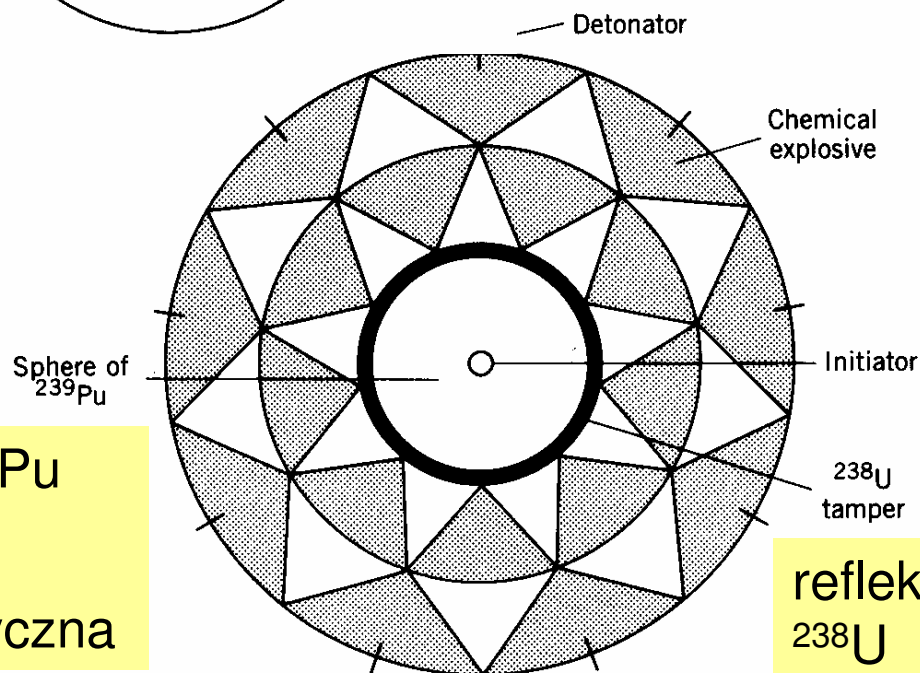
b) utworzenie masy nadkrytycznej o normalnej gęstości z 2 mas podkrytycznych

2. Typ „implosion” (Nagasaki)

a) detonacja

b) fala uderzeniowa - kompresja masy do masy nadkrytycznej o zwiększonej gęstości

kula z ^{239}Pu
lub ^{235}U
-podkrytyczna



Broń jądrowa - bomba atomowa

**Broń jednofazowa -
rozszczerzenie pierwiastków
ciężkich**

Materiał rozszczepialny:

^{233}U i ^{235}U lub ^{239}Pu

**Osiągnięcie masy
nadkrytycznej:**

- a) przez zmianę geometrii
- b) przez zmianę stosunku V/S i gęstości

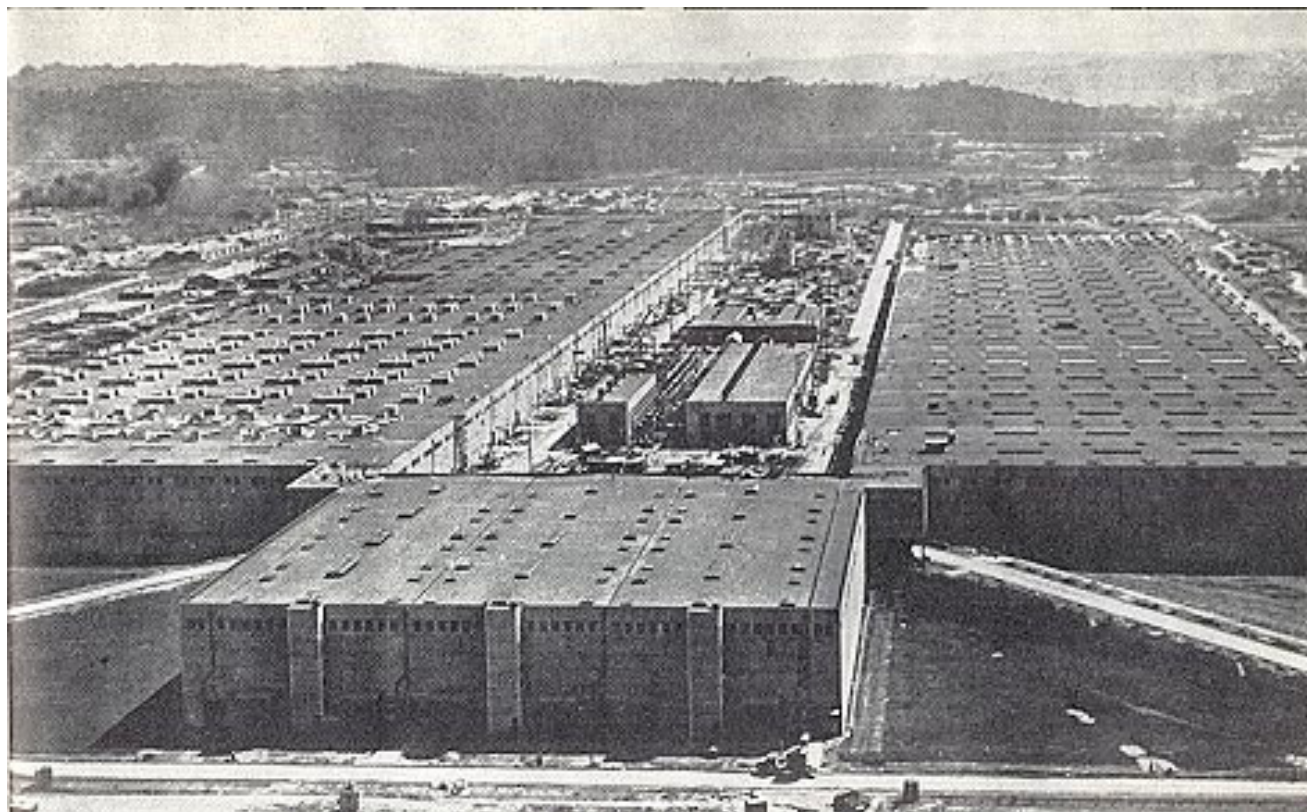
**Zapalnik - konwencjonalne
materiały wybuchowe**



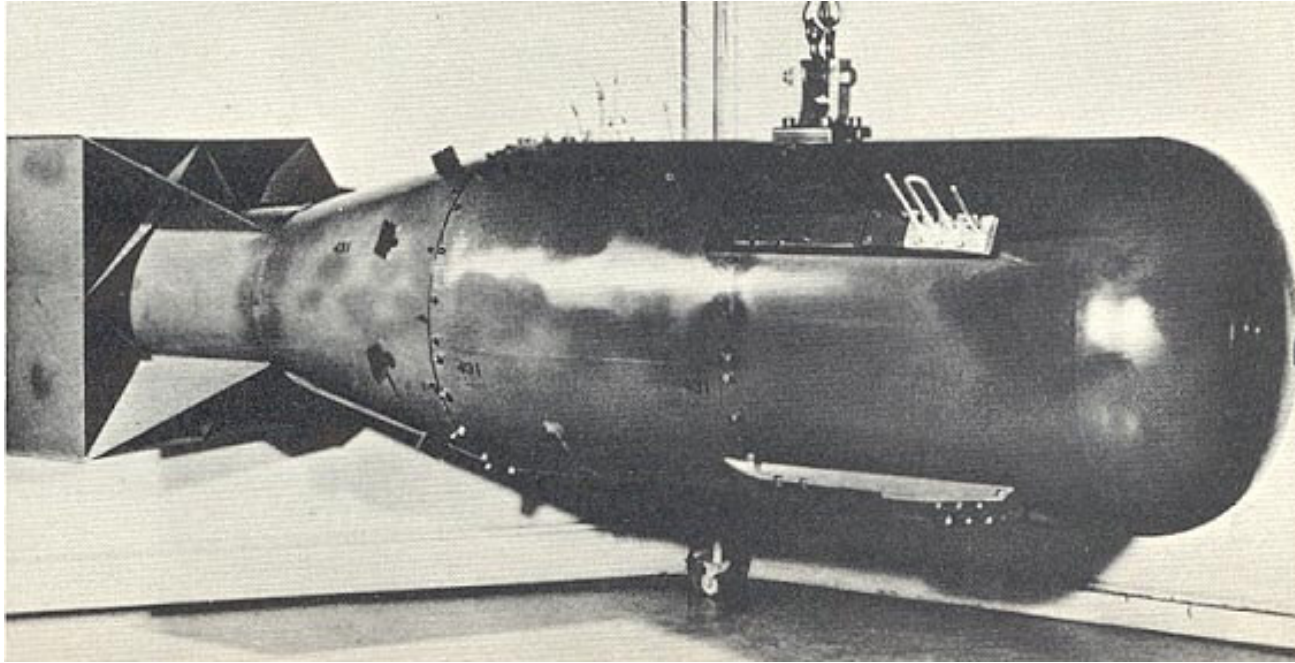
Manhattan Project

Oak Ridge, USA

60 tys robotników pracowało przez 3 lata,
aby wyseparować 2 kg ^{235}U



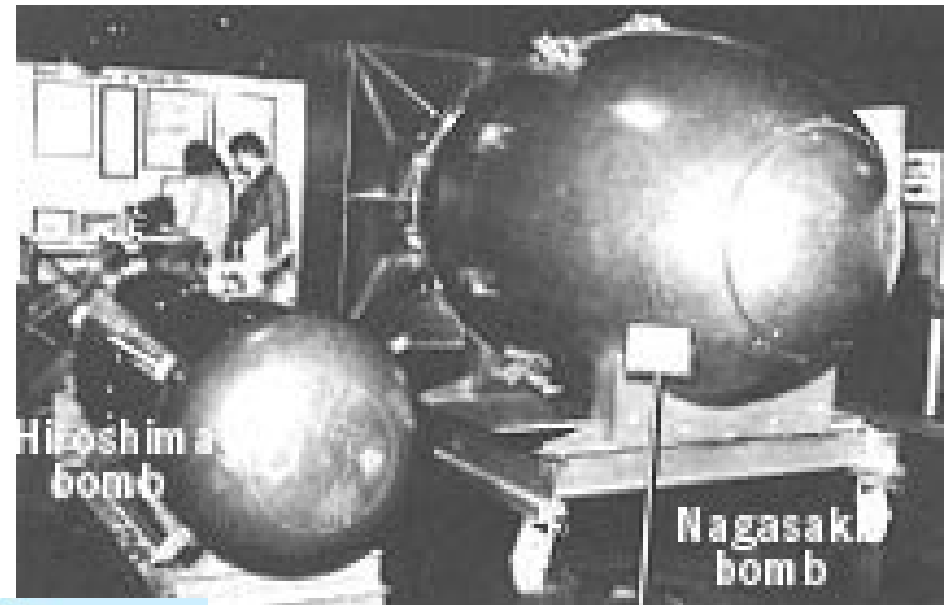
Pierwsza bomba atomowa



“Little Boy” bomba uranowa (typ “gun”) zrzucona na Hiroshimę (6 sierpnia 1945 r.):

długość 3m, średnica 60 cm, 64 kg uranu wzbogaconego do 80% w ^{235}U

Bomby atomowe zrzucone na Japonię w 1945



„Fat Man” - bomba plutonowa typu „implosion” zrzucona na Nagasaki (9 sierpnia 1945 r.): długość 3,3 m, średnica 1,3 m, 6,2 kg ^{239}Pu

Bombardowanie Nagasaki 9 sierpnia 1945

Skutki eksplozji:

podmuch - 40-60% energii

promieniowanie termiczne -
30-50% energii

promieniowanie jonizujące -
5% energii

opad radioaktywny - 5-10%
energii



Nagasaki po wybuchu

