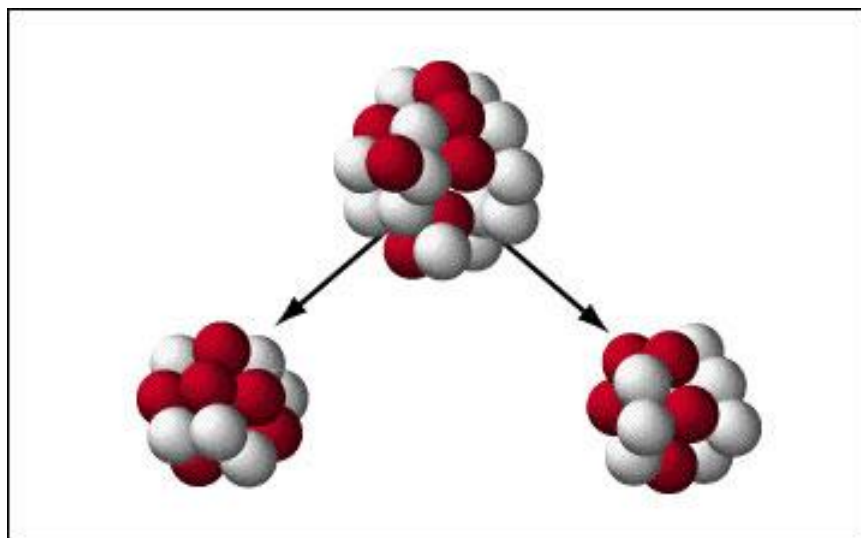


Elementy Fizyki Jądrowej

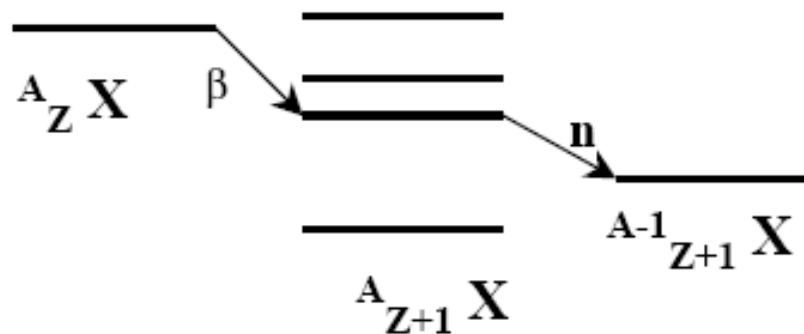
Wykład 9 – Fizyka neutronów i reakcja łańcuchowa



Charakterystyka procesu rozszczepienia

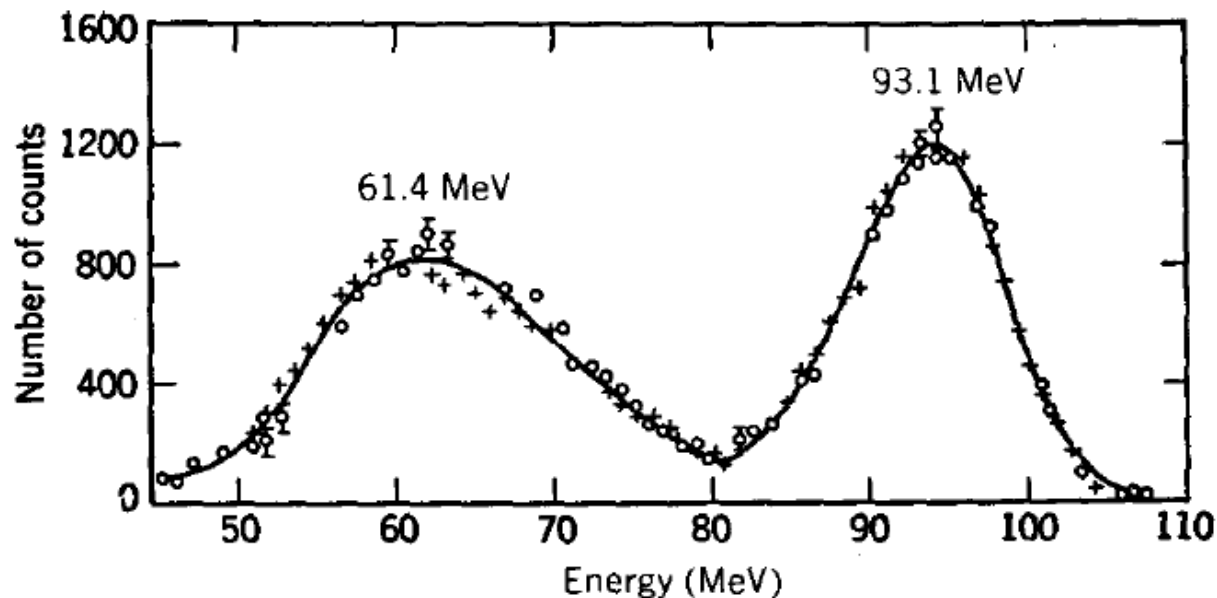
Emisja neutronów

1. natychmiastowa, średnio 2,5 neutronów, $\tau \approx 10^{-16} s$
2. opóźniona, emisja neutronów po rozpadzie fragmentów, $\sim 0,7\%$ liczby neutronów, średnio $\tau \approx 12,5 s$

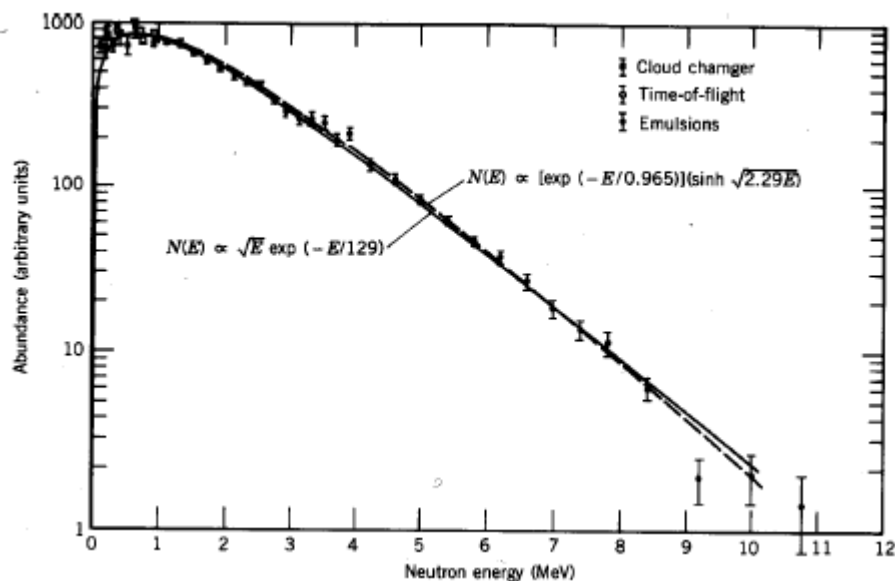


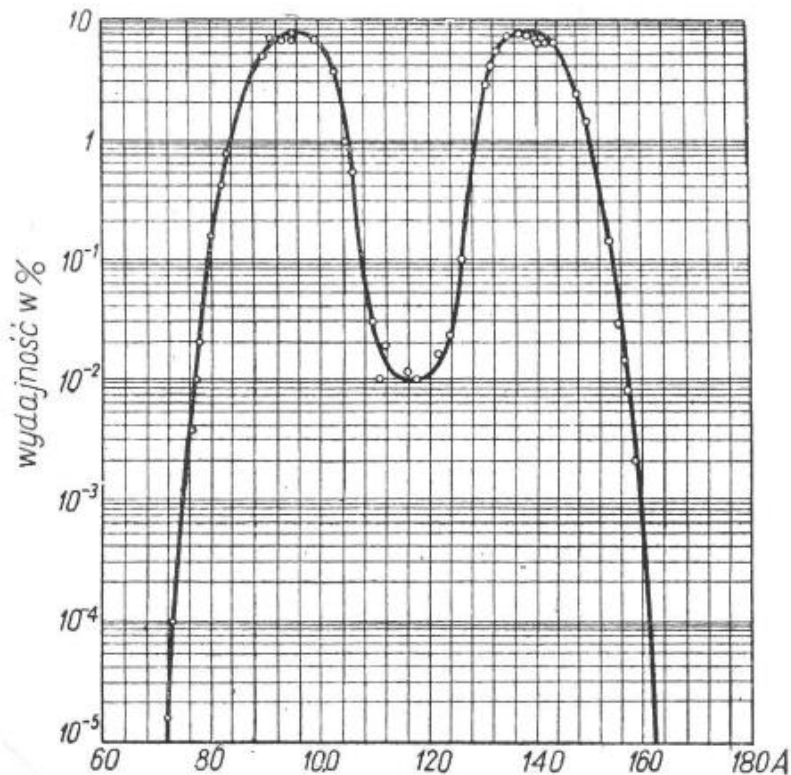
Charakterystyka procesu rozszczepienia

Rozkład energii
kinetycznej fragmentów
(w sumie ok. 180 MeV)



Widmo energetyczne
emitowanych neutronów
(średnio ok. 2 MeV)





Jądro ^{235}U może dzielić się na 40 różnych sposobów.

Powstałe fragmenty mają duży nadmiar neutronów.

Jądro	$^{16}_8\text{O}$	$^{40}_{20}\text{K}$	$^{108}_{47}\text{Ag}$	$^{137}_{56}\text{Ba}$	$^{238}_{92}\text{U}$
$\frac{N_n}{N_p}$	1	1	1,3	1,45	1,6

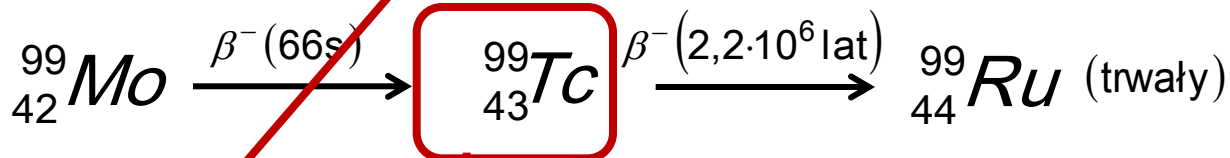
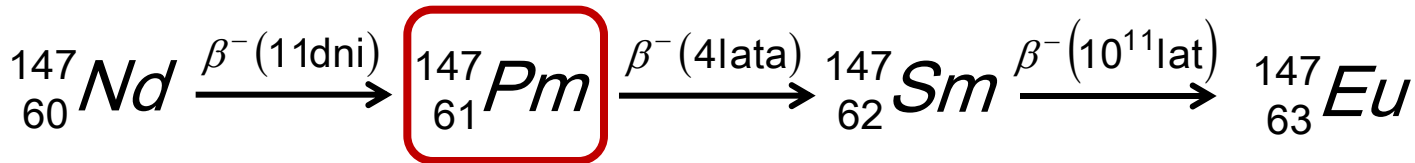
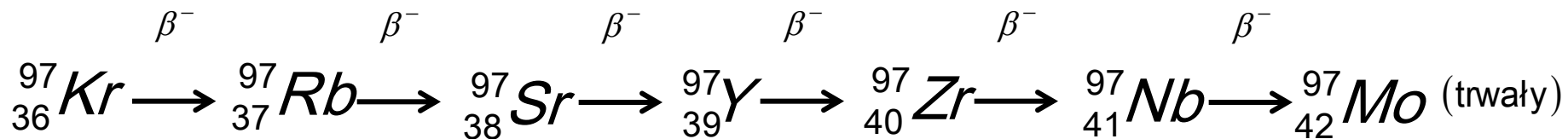
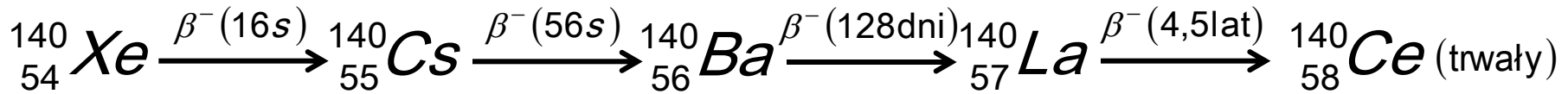
Nadmiar neutronów usuwany przez

1. przemianę β^-
2. emisję neutronów opóźnionych

Rozpady fragmentów rozszczepienia

Przykłady:

Dlaczego $T_{1/2}$ coraz większe?

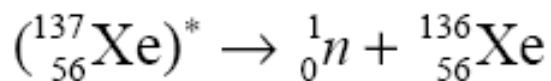
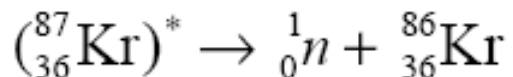
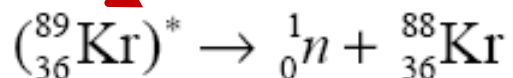


promed, technet - odkryte w 1942 r. w łańcuchach promieniotwórczych produktów rozszczepienia.

Promieniowanie neutronowe

– neutrony opóźnione

* stan metastabilny

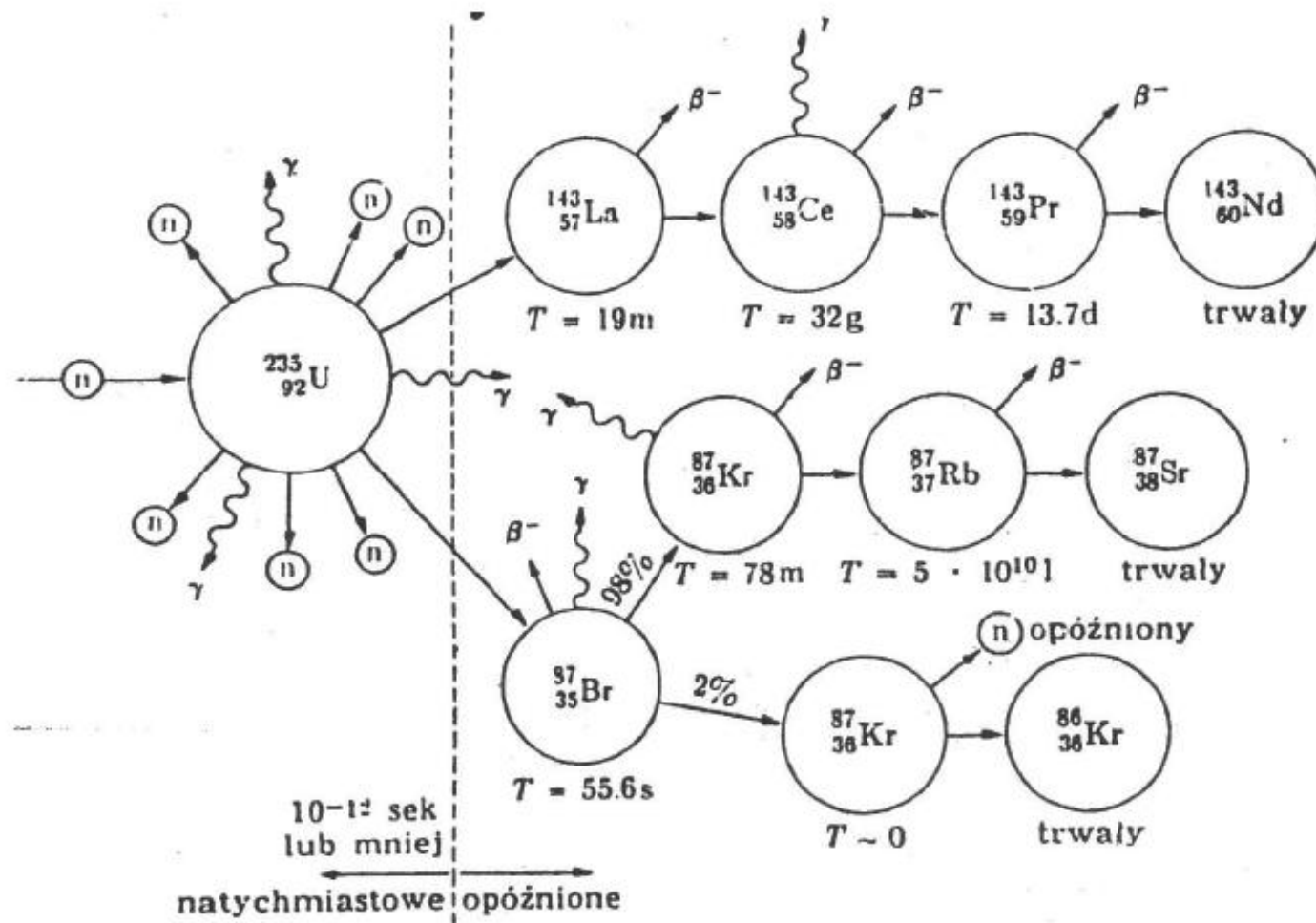


neutrony opóźnione emitowane
po rozszczepieniu jądra ${}^{235}\text{U}$

Półokresy trwania: 0,43 s; 1,525 s; 4,51 s; 22,0 s; 55,6 s.

*Taka przemiana występuje tylko dla nuklidów
powstałych podczas rozszczepienia.*

Emisja neutronów opóźnionych



Neutronów natychmiastowych jest **99,27%**, opóźnionych **0,73%**

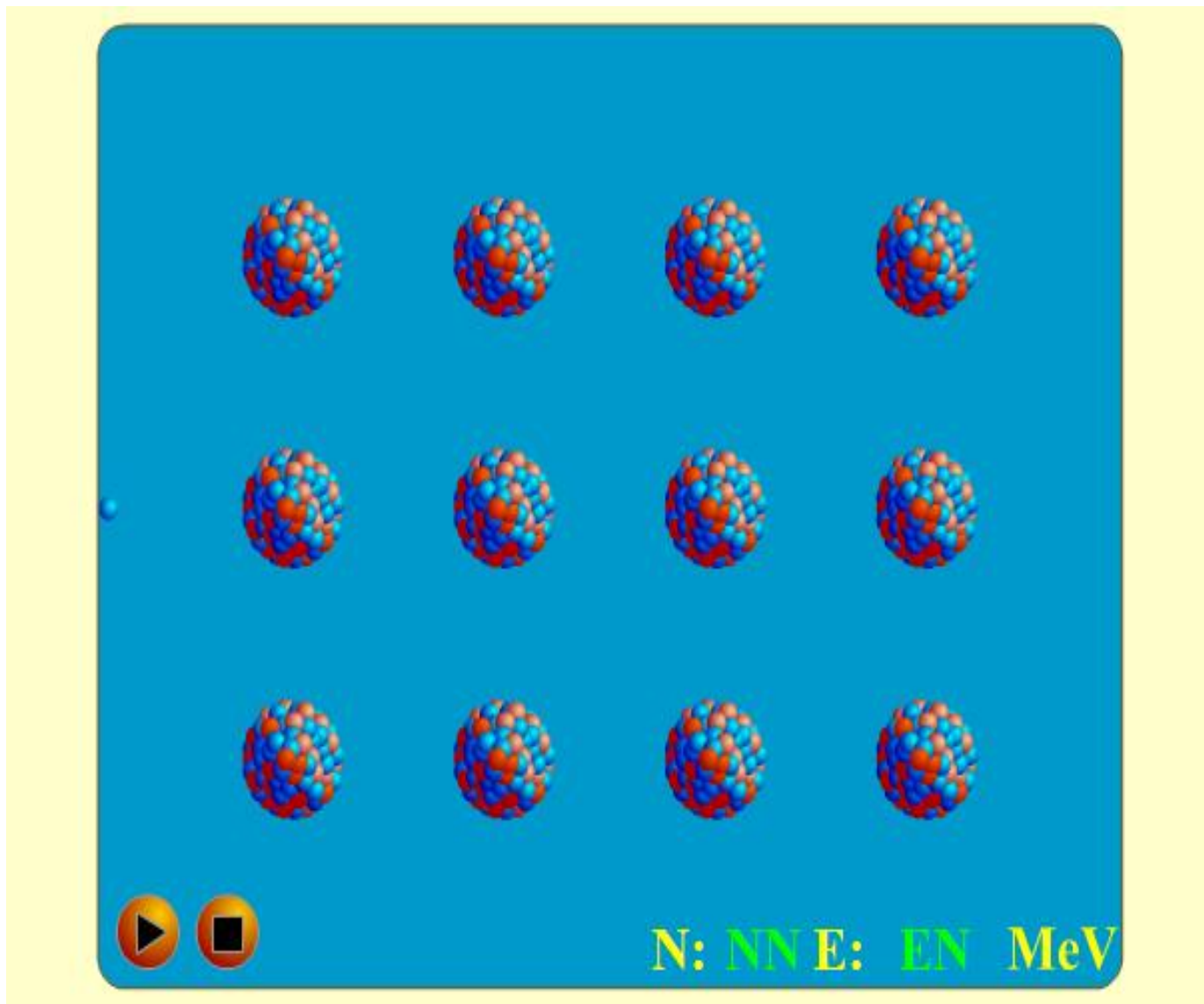
Neutrony

Przekrój czynny na rozszczepienie $^{235}_{92}\text{U}$ przez zderzenie z neutronem maleje ze wzrostem energii neutronów.

Z punktu widzenia skuteczności działania neutrony dzielimy na:

- Neutrony **prędkie** o energii większej niż 0,5 MeV
- Neutrony **pośrednie** o energii 0,1 eV - 0,5 MeV
- Neutrony **termiczne** o energii ok. 0,025eV

Reakcja łańcuchowa



Uran naturalny

Uran naturalny zawiera:

•99,29% ^{238}U

•0,71% ^{235}U

Jądro ^{238}U ulega rozszczepieniu pod wpływem neutronów o energii 0,6 MeV, podczas rozszczepienia emitowanych jest średnio 2,56 neutronów natychmiastowych o energii ~ 2 MeV. Jednak w uranie naturalnym reakcja łańcuchowa nie rozwija się.

Dlaczego?

Reakcja łańcuchowa

Warunki wystąpienia reakcji łańcuchowej:

- Reakcja egzotermiczna
- Czynniki wywołujące reakcję musi być produktem reakcji (neutrony)
- Liczba neutronów nie może zmniejszać się w czasie

Współczynnik powielania (mnożenia) neutronów:

$$k = \frac{n_{i+1}}{n_i}$$

liczba neutronów **wywołujących rozszczepienie** w pokoleniu (i+1)

liczba neutronów *i*-tego pokolenia

Reakcja łańcuchowa

Liczba neutronów wywołujących rozszczepienie w danym pokoleniu:

$$n_{i+1} = kn_i$$

Przyrost liczby neutronów w ramach jednego pokolenia:

$$dn = kn - n$$

$$dn = (k - 1)n$$

Przyrost liczby neutronów w jednostce czasu:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(k - 1)n}{\tau}$$

τ - średni czas życia jednego pokolenia neutronów – czas między kolejnymi aktami rozszczepienia jądra

(dla neutronów termicznych $\tau = 10^{-3}$ s, dla szybkich $\sim 10^{-9}$ s)

Reakcja łańcuchowa

$$\frac{dn}{n} = \frac{(k-1)}{\tau} dt$$

$$\int \frac{dn}{n} = \frac{(k-1)}{\tau} \int dt$$

$$\ln n = \frac{k-1}{\tau} t + \ln C$$

Stała całkowania z warunków początkowych: $n(t=0) = n_0$

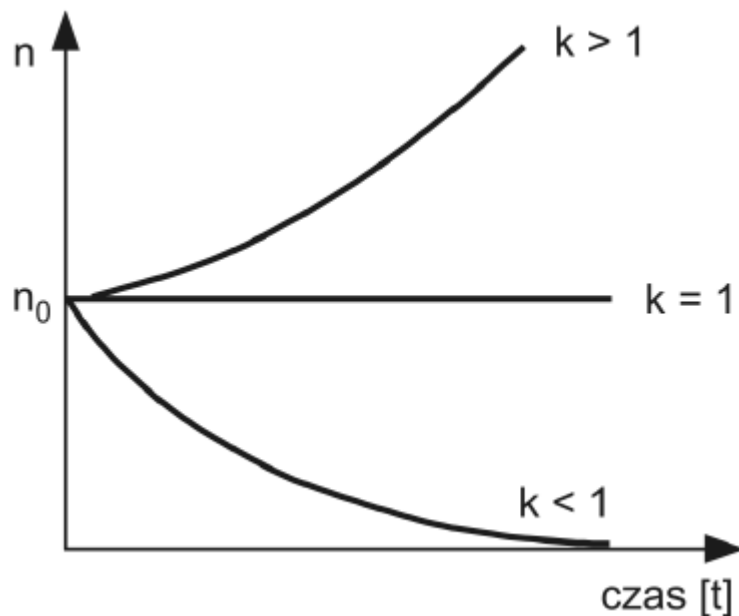
$$\ln n_0 = \frac{k-1}{\tau} \cdot 0 + \ln C \longrightarrow n_0 = C$$

$$n = n_0 e^{\frac{k-1}{\tau} t}$$

$$n = n_0 e^{\frac{k-1}{\tau} t}$$

Grozi wybuchem

Liczba neutronów powstających w reaktorze zwiększa się wykładniczo.



W reaktorze zachodzi kontrolowana, samopodtrzymująca się, reakcja łańcuchowa.

Liczba neutronów powstających w reaktorze w jednostce czasu jest równa liczbie neutronów traconych.

Reakcja wygasa

Liczba neutronów powstających w reaktorze w jednostce czasu jest mniejsza niż liczba neutronów traconych.

Kontrola nad reakcją → kontrola współczynnika k

Reakcja łańcuchowa

- ^{238}U ma duży przekrój czynny na **rozpraszanie niesprężyste**



Już po pierwszym zderzeniu energia neutronu może spaść poniżej 0,6 MeV

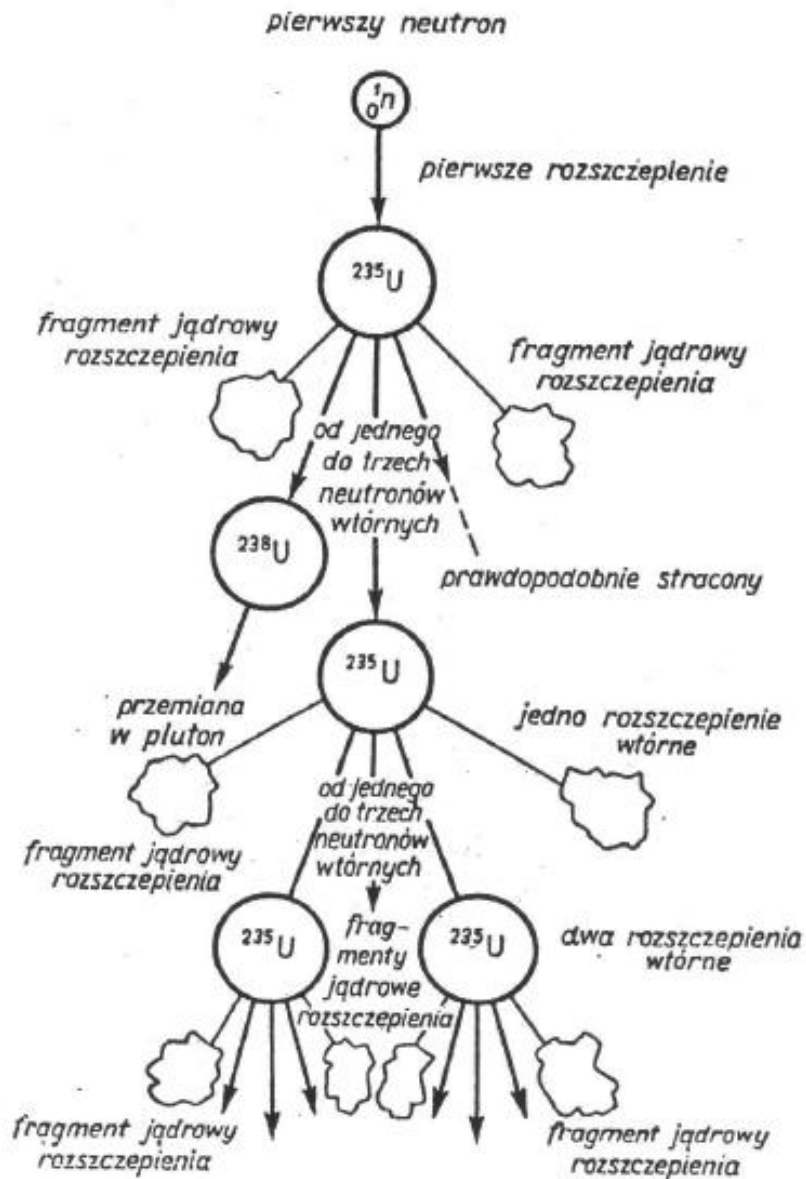
- ^{238}U ma duży przekrój czynny na **wychwyty rezonansowy**



4/5 neutronów straconych dla rozszczepienia

Reakcja łańcuchowa w ^{238}U mogłaby się rozwinąć, gdyby podczas rozszczepienia powstawało co najmniej 5 neutronów.

Reakcja łańcuchowa



Reakcję łańcuchową umożliwia obecność ^{235}U – rozszczepienie neutronami termicznymi.

Przekroje czynne dla neutronów termicznych (w barnach)

Jądro	Absorpcja σ_A	Rozproszenie σ_s	Rozszczepienie σ_f
Uran naturalny	7,42	8,2	3,92
^{233}U	593	—	524
$^{235}\text{U}^*$	698	8,2	590
^{238}U	2,8	8,2	0
^{239}Pu	1032	8,0	729

*— 85% neutronów schwytanych przez ^{235}U powoduje podział jąder.

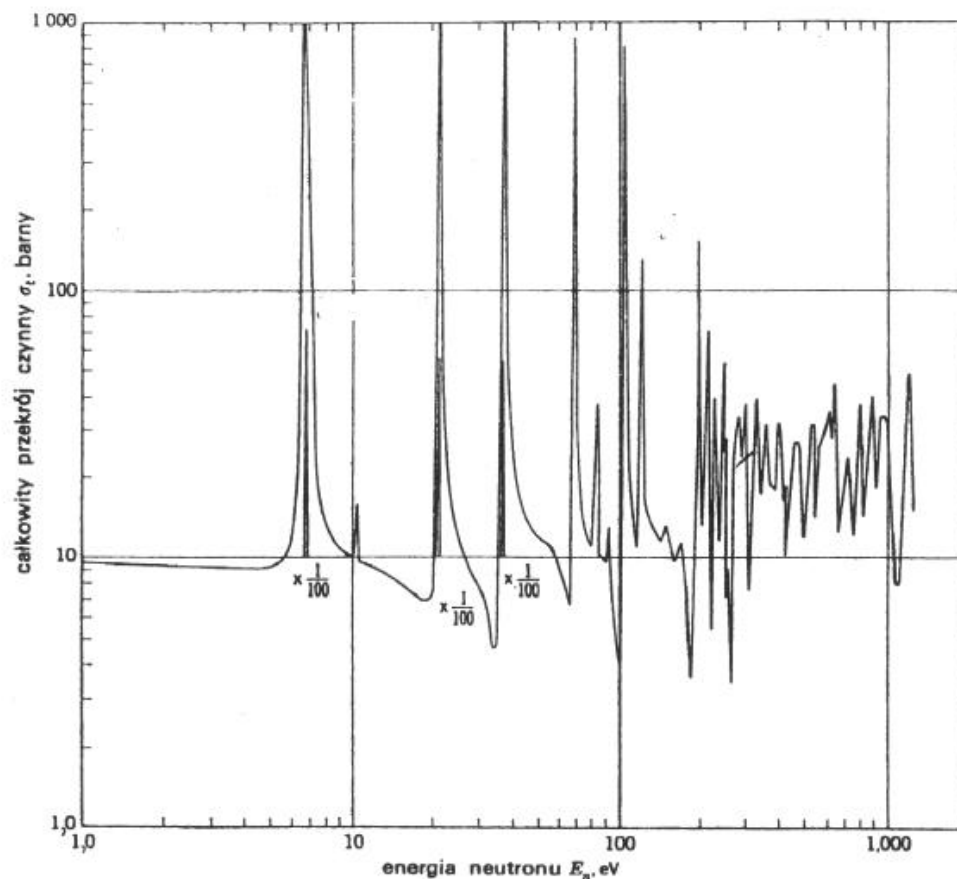
$$\frac{590}{698} = 0,85$$

Duży przekrój czynny ^{238}U na rozpraszanie sprężyste, ale jądro nieprzydatne do spowalniania neutronów.

Tabela 8. Zdolności spowalniające wybranych jąder.

Spowalniacz (moderator)	Liczba zderzeń potrzebnych do osiągnięcia energii termicznej przez neutron natychmiastowy o energii 2 MeV
${}^1_1\text{H}$	18
${}^2_1\text{D}$	28
${}^7_3\text{Li}$	67
${}^{12}_6\text{C}$	114
${}^{238}_{92}\text{U}$	2172

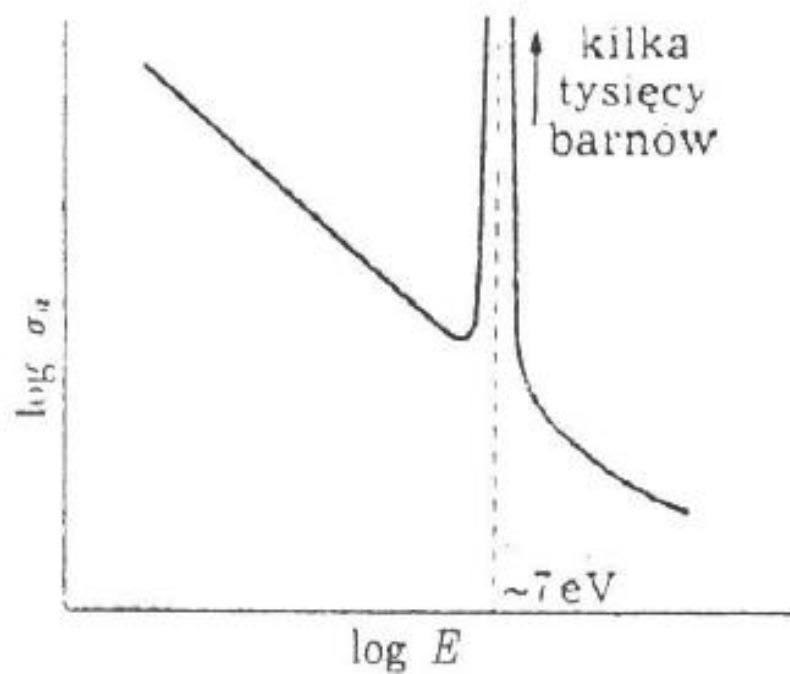
Neutron w zderzeniach z jądrami ${}^{238}\text{U}$ traci energię małymi porcjami i z dużym prawdopodobieństwem uzyska energię rezonansową – absorpcja i utworzenie ${}^{239}\text{U}$.



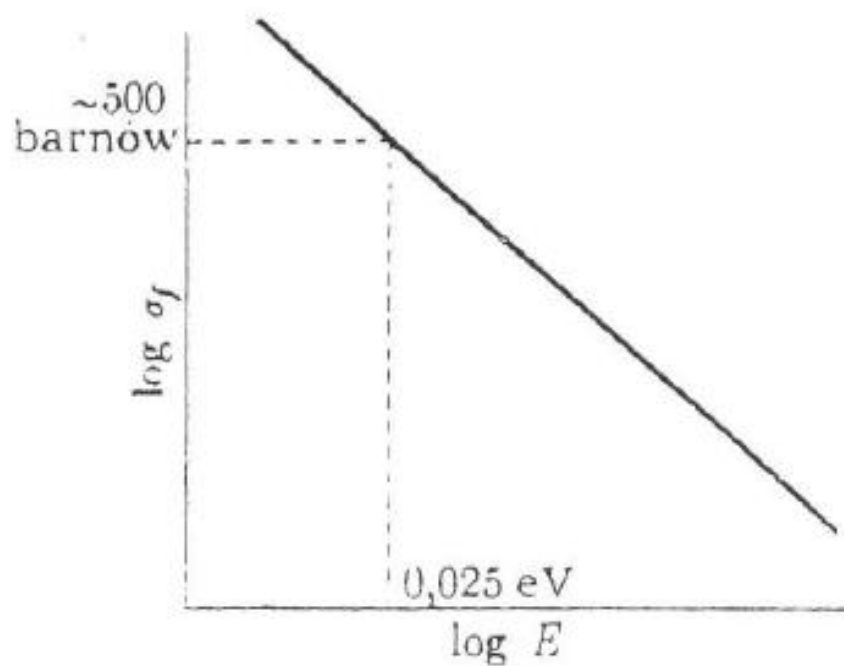
Przekrój czynny ${}^{238}\text{U}$ w funkcji energii neutronów.

Porównanie przekrojów czynnych na...

...wychwyt neutronów
powolnych przez ^{238}U



...rozszczerpienie ^{235}U przez
neutrony powolne



energia neutronów

2 sposoby umożliwienia reakcji łańcuchowej

1. Termalizacja neutronów

Moderatory (jądra o małym A):

- H_2O – łatwo dostępna, może absorbować neutrony (radioliza)
- D_2O – droga, mały przekrój czynny σ_a na pochłanianie, może powstać radioaktywny, niebezpieczny tryt,
- C (grafit) – mały przekrój czynny σ_a , tani.

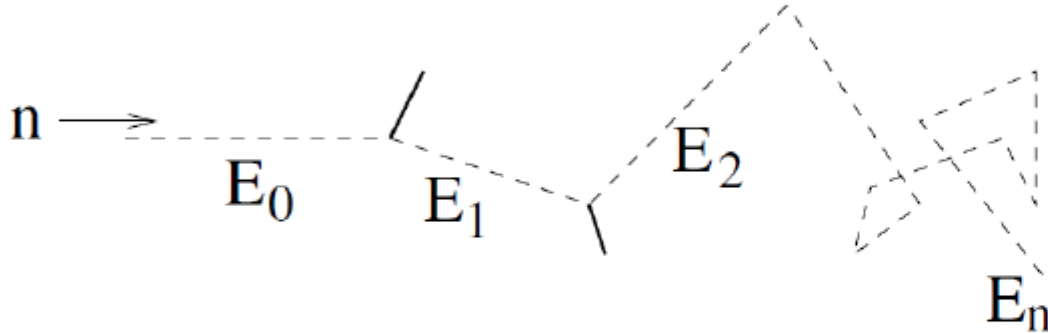
2. Wzbogacanie paliwa

Termalizacja neutronów

Spowolnienie neutronu można otrzymać doprowadzając do szeregu reakcji rozpraszania

=> ośrodek spowalniający => **moderator**

elastic scatters



Uwaga: mogą zachodzić również inne procesy niż rozpraszanie elastyczne!

Np. Wychwyt radiacyjny, którego prawdopodobieństwo wynosi:

$$p = \frac{\sigma_{(n,\gamma)}}{\sigma_{el} + \sigma_{(n,\gamma)}}$$

Zatem prawdopodobieństwo spowolnienia neutronu to:

W wyniku badań (eksperymentalne i teoretyczne) otrzymano, że dla moderatora składającego się z jąder o liczbie nukleonów A:

* średnia liczba zderzeń potrzebna do zmniejszenia energii neutronu z $E_{fis} \sim 2\text{MeV}$ do $E_{th} \sim 0.025\text{eV}$ wynosi

$$N_{col} = \frac{\log(E_{fis}/E_{th})}{\langle \log(E/E') \rangle}$$
$$\langle \log(E/E') \rangle = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \log \frac{A+1}{A-1}$$

$$\delta = (1 - p)^{N_{col}}$$

Reakcja łańcuchowa

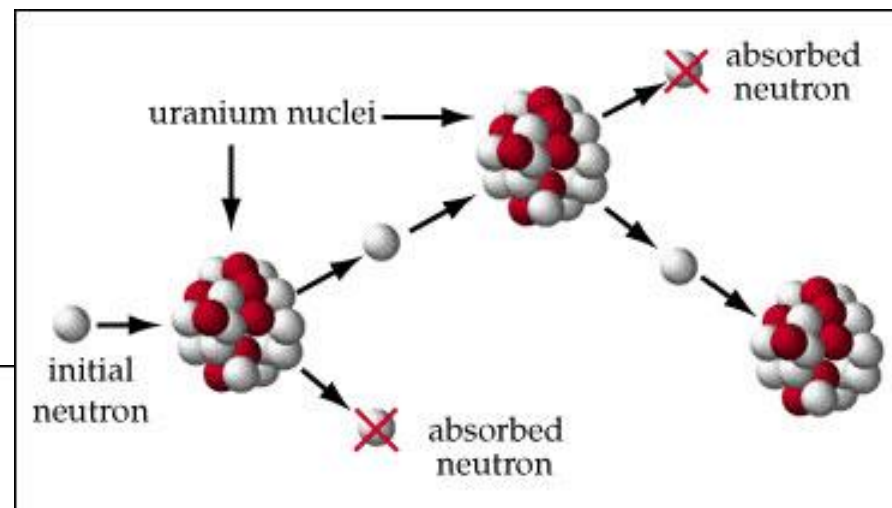
Reakcję łańcuchową ułatwia wzbogacanie uranu naturalnego – zwiększanie udziału jąder ^{235}U

^{235}U	0.07% uran naturalny	1%	2%	5%	10%	100%
k_{∞}	1,08	1,24	1,5	1,69	1,78	1,98

Zależność współczynnika powielania neutronów od udziału ^{235}U w paliwie jądrowym.

Aby otrzymać reakcję łańcuchową stosuje się:

1. Zastosowanie moderatora (np. grafitu) w celu termalizacji neutronów,
2. Wzbogacanie uranu naturalnego (zwykle w granicach 5-15%)



Kontrola reakcji: wychwyt neutronów – zahamowanie reakcji łańcuchowej.

Warunki podtrzymania reakcji:

- masa krytyczna
- spowalnianie neutronów
2 MeV $\rightarrow$ 0,1 eV

1st Generation

2nd Generation

3rd Generation

4th Generation



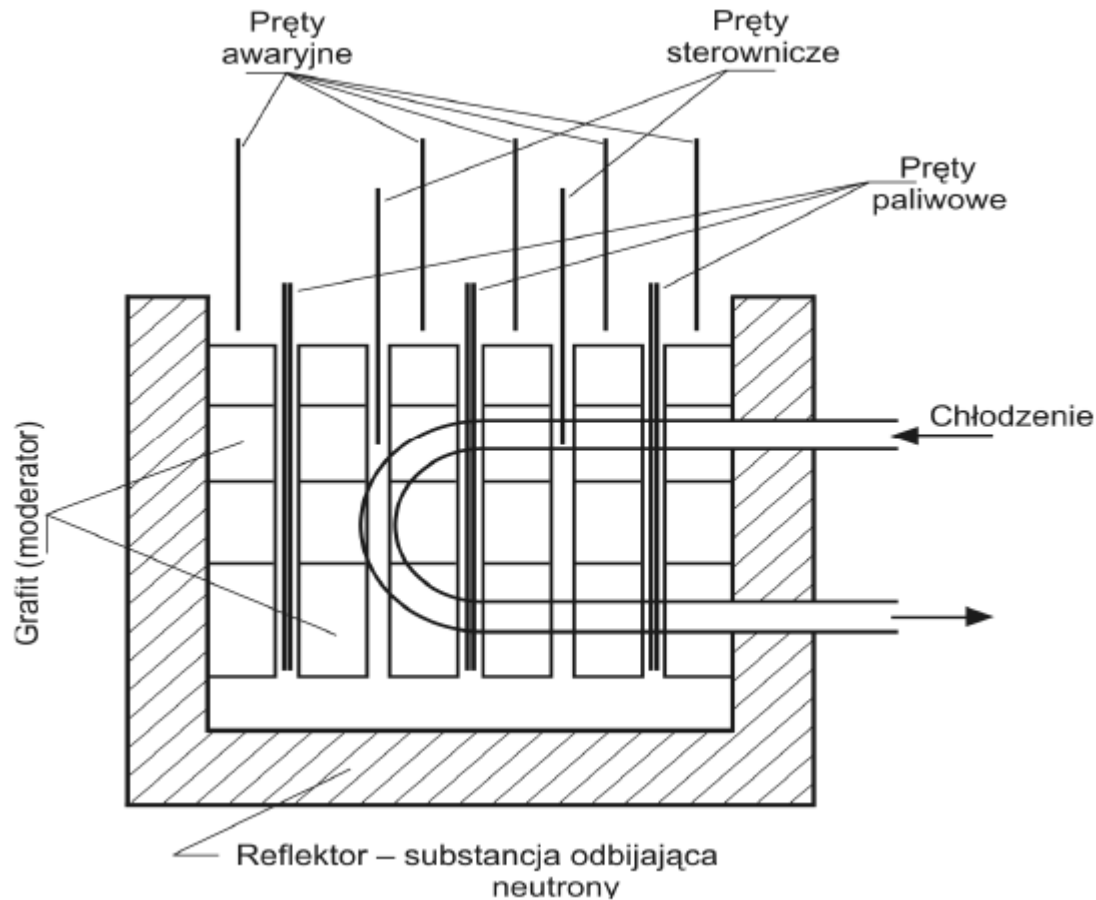
Uranium-235 atom



neutron

Kontrola reakcji łańcuchowej

Kontrola polega na regulowaniu liczby neutronów za pomocą substancji pochłaniającej neutrony (pręty kadmowe)



Bezpieczny przedział pracy reaktora: $1 \leq k \leq 1,075$

Kontrola reakcji łańcuchowej

Bezpieczny przedział pracy reaktora: $1 \leq k \leq 1,075$

Zbyt wysoka wartość k – stopienie reaktora.

Bezwładność układu sterującego strumieniem neutronów ~ 1 s

Ile razy zwiększy się liczba neutronów w czasie $t = 1$ s?

$$n = n_0 e^{\frac{k-1}{\tau} t}$$

Założmy $k = 1,005$

Średni czas życia jednego pokolenia neutronów
natychmiastowych $\tau = 10^{-3}$ s

$$n = n_0 e^{\frac{5 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} \cdot 1} = 148,4 n_0$$

Kontrola reakcji łańcuchowej

Kontrolę ułatwia obecność **neutronów opóźnionych**
– 0,75% neutronów o czasach emisji od ułamka sekundy do kilkudziesięciu sekund - całkowity czas emisji $\tau = 0,1\text{s}$

$$k_{\text{natychmiastowych}} = 0,9975 < 1$$

$$k_{\text{opóźnionych}} = 0,0075 < 1$$

$$k = k_{\text{natychmiastowych}} + k_{\text{opóźnionych}} = 1,005 > 1$$

$$n = n_0 e^{\frac{5 \cdot 10^{-3}}{10^{-1}} \cdot 1} = 1,05 n_0$$

Reakcja narasta powoli

Wydajność reakcji rozszczepienia

Wydajność reakcji rozszczepienia – średnia liczba neutronów natychmiastowych przypadających na 1 absorbowany powolny neutron wywołujący rozszczepienie


$$\eta = \nu \frac{N(235)\sigma_f(235)}{N(235)[\sigma_f(235) + \sigma_c(235)] + N(238)\sigma_c(238)}$$

$N(235)$ – liczba atomów ^{235}U

$N(238)$ – liczba atomów ^{238}U

$\sigma_f(235)$ – przekrój czynny na wychwyt neutronu przez ^{235}U prowadzący do rozszczepienia

$\sigma_c(235)$ – przekrój czynny na wychwyt neutronu przez ^{235}U nie prowadzący do rozszczepienia

Wydajność reakcji rozszczepienia

Jeśli pojawi się n neutronów, to $\eta \cdot n$ może spowodować rozszczepienie.

ale... l_f prędkich neutronów ucieknie, l_s neutronów ucieknie po spowolnieniu, pozostanie $\eta(1-l_f)(1-l_s)n$ neutronów.

Nieliczne neutrony spowodują rozszczepienie zanim zostaną spowolnione, co prowadzi do współczynnika efektu prędkiego ε (nieco większy od 1), niektóre neutrony uzyskają energię rezonansową i zostaną pochłonięte bez rozszczepienia – współczynnik $p < 1$.

Pozostanie $\eta(1-l_f)(1-l_s)n\varepsilon p$ neutronów powolnych.

Tylko część z nich, f , zostanie zaabsorbowana przez paliwo:

$$\eta(1-l_f)(1-l_s)n\varepsilon pf$$

Wydajność reakcji rozszczepienia

Liczba neutronów użytecznych w procesie rozszczepienia:

$$kn = \eta \varepsilon p f (1 - l_f)(1 - l_s)n$$

k - współczynnik mnożenia reaktora

Dla bardzo dużego reaktora znikają czynniki związane z ucieczką neutronów:

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

$$\eta > 1 \quad p < 1$$

$$\varepsilon > 1 \quad f < 1$$

$\eta = 1,33$ dla uranu naturalnego

$\eta = 2$ dla uranu wzbogaconego (5%)

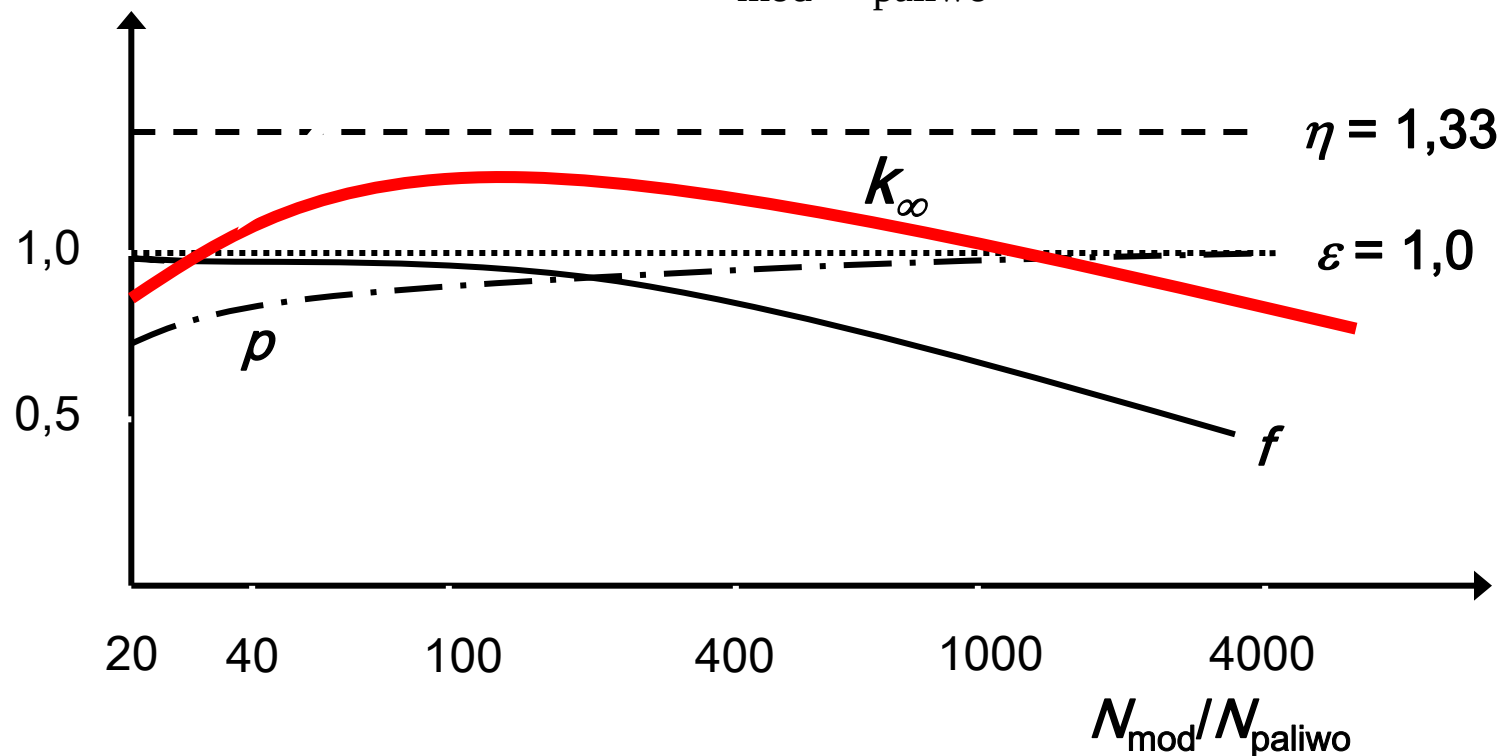
$\eta = 2,08$ dla czystego uranu ^{235}U

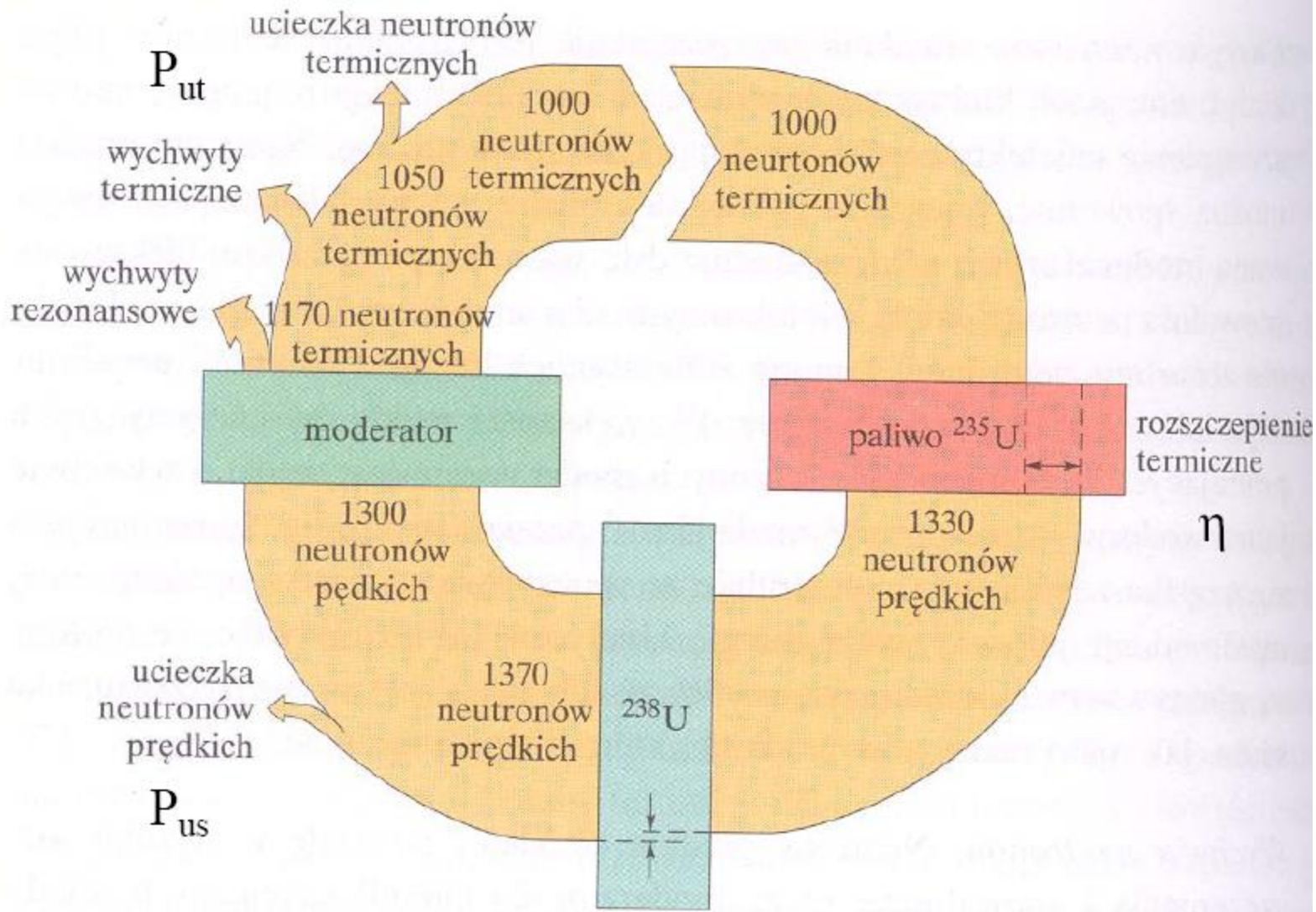
Wydajność reakcji rozszczepienia

k_{∞} - współczynnik mnożenia reaktora w układzie teoretycznie nieskończonym w zależności od stosunku *moderator / paliwo*

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

Gdy temp. rośnie, moderator rozszerza się i $N_{\text{mod}}/N_{\text{paliwo}}$ maleje.





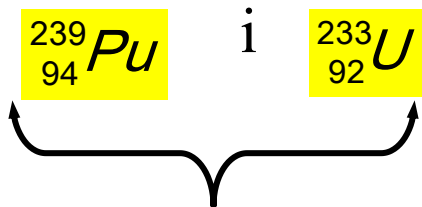
Paliwo reaktora

Izotop $^{235}_{92}\text{U}$ jest jedynym nuklidem występującym w stanie naturalnym w przyrodzie, który można rozszczepić neutronami termicznymi.

$^{235}_{92}\text{U}$ stanowi wagowo 0,71% uranu naturalnego, resztę stanowi izotop $^{238}_{92}\text{U}$

wzbogacanie paliwa

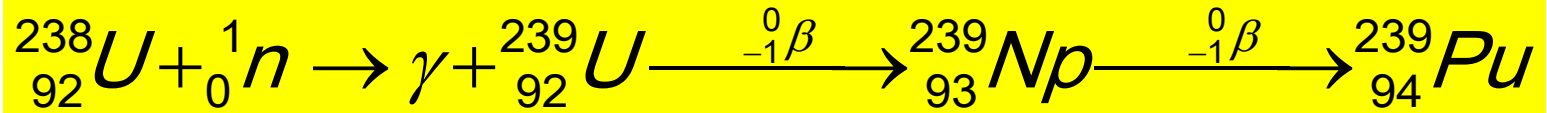
Neutronami prędkimi można rozszczepić także jądra izotopów



nuklidy wytwarzane z toru $^{232}_{90}\text{Th}$ i uranu $^{238}_{92}\text{U}$

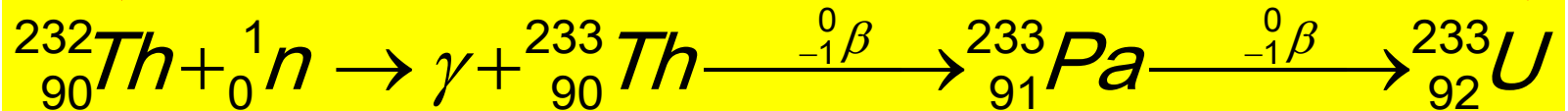
Paliwo reaktora

Reakcje powielania paliwa:

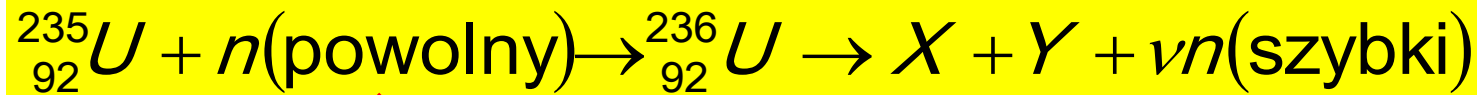


↑
izotopy paliworodne

↑
izotopy rozszczepialne



Reaktor



termiczny (kT ~ 0,025 eV)

energia ~ 2 MeV

dla ${}^{235}\text{U}$: $\nu \approx 2,43$

dla ${}^{239}\text{Pu}$: $\nu \approx 2,87$

dla ${}^{233}\text{U}$: $\nu \approx 2,48$

Jądra X i Y rozpadają się dalej – opóźniona emisja neutronów

Systemy hybrydowe

Bezpieczny reaktor: $k < 1$

Do podtrzymania reakcji potrzebne
dodatkowe źródło neutronów:

spallacja (kruszenie) – jądra bombardowane
protonami o energii 1 GeV emitują neutrony.

System złożony z reaktora i akceleratora.

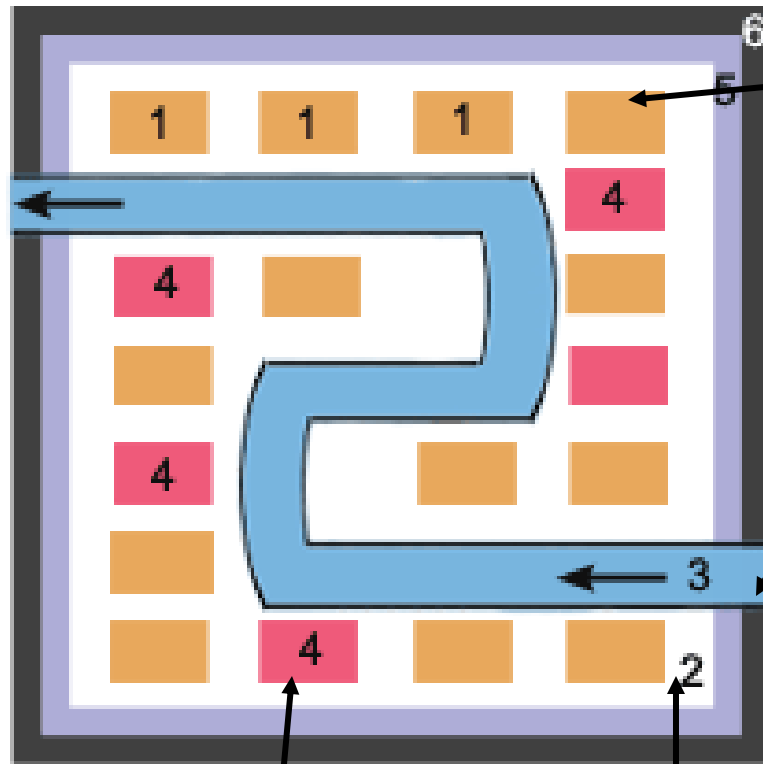
Reaktor

paliwo jądrowe otoczone moderatorem (spowalniaczem neutronów), z odpowiednimi kanałami przepływu czynnika chłodzącego oraz kanałami dla urządzeń sterujących

W rdzeniu jest wytwarzana w procesie rozszczepienia jądra energia cieplna oraz strumień neutronów, niezbędny do podtrzymywania reakcji łańcuchowej.

Pozostałe główne elementy reaktora tworzą: reflektor neutronów, osłona termiczna, zbiornik reaktora i osłona biologiczna.

Reaktor jądrowy

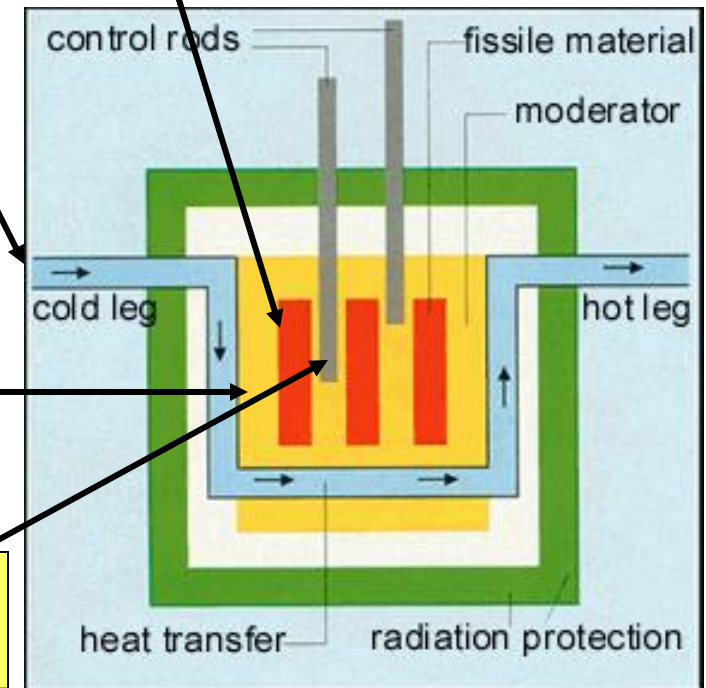


1. Pręty paliwowe – materiał rozszczepialny

3. Kanał chłodzenia -
ciekły sól lub woda

2. Moderator (spowalnia neutrony) -
grafit lub tzw. ciężka woda

4. Pręty regulacyjne (kadm pochłania neutrony -
ma spowalniać lub przyspieszać reakcję)



Reaktor wysokotemperaturowy

Przyszłość energetyki jądrowej?

Hel chłodzący reaktor osiąga temperaturę 900 °C.

Moc cieplna reaktora nie przekracza kilkuset MW.

**Mała elektrownia jądrowa - konkurencją
dla elektrowni gazowej, a nie dużej
elektrowni węglowej.**

Reaktor wysokotemperaturowy

W temperaturze 900 °C wodór można produkować z wody wydajnie i bez emisji CO₂ w procesach pośrednich (np. w cyklu siarkowym):



- 95% wodoru wytwarza się z gazu ziemnego
- 50% stosuje się do produkcji nawozów sztucznych
- 40% wykorzystują rafinerie ropy naftowej
- wodór – paliwo przyszłości

Reaktor wysokotemperaturowy

Dzięki wysokiej temperaturze wydajność zamiany ciepła na pracę wynosi 45%



Reaktor



Wodór



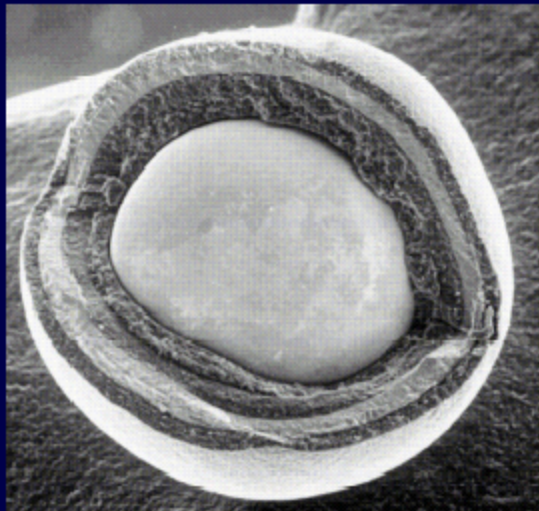
Ciepło
technologiczne
 $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$



Elektryczność

przerób węgla
na paliwa
gazowe i płynne

Problem bezpieczeństwa

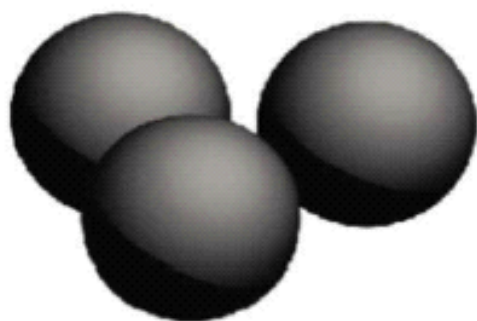


1 mm

Kluczem do obietnicy bezpieczeństwa globalnego jest umieszczenie uranu w niemal niezniszczalnych mikrokapsułkach (TRISO)

Problem bezpieczeństwa

Element paliwowy reaktora



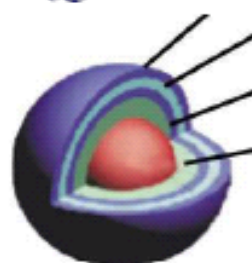
kule z uranem
($\Phi = 6 \text{ cm}$)



przekrój kuli

powłoka węglowa (5mm)

cząstki z uranem osadzone w
węglu



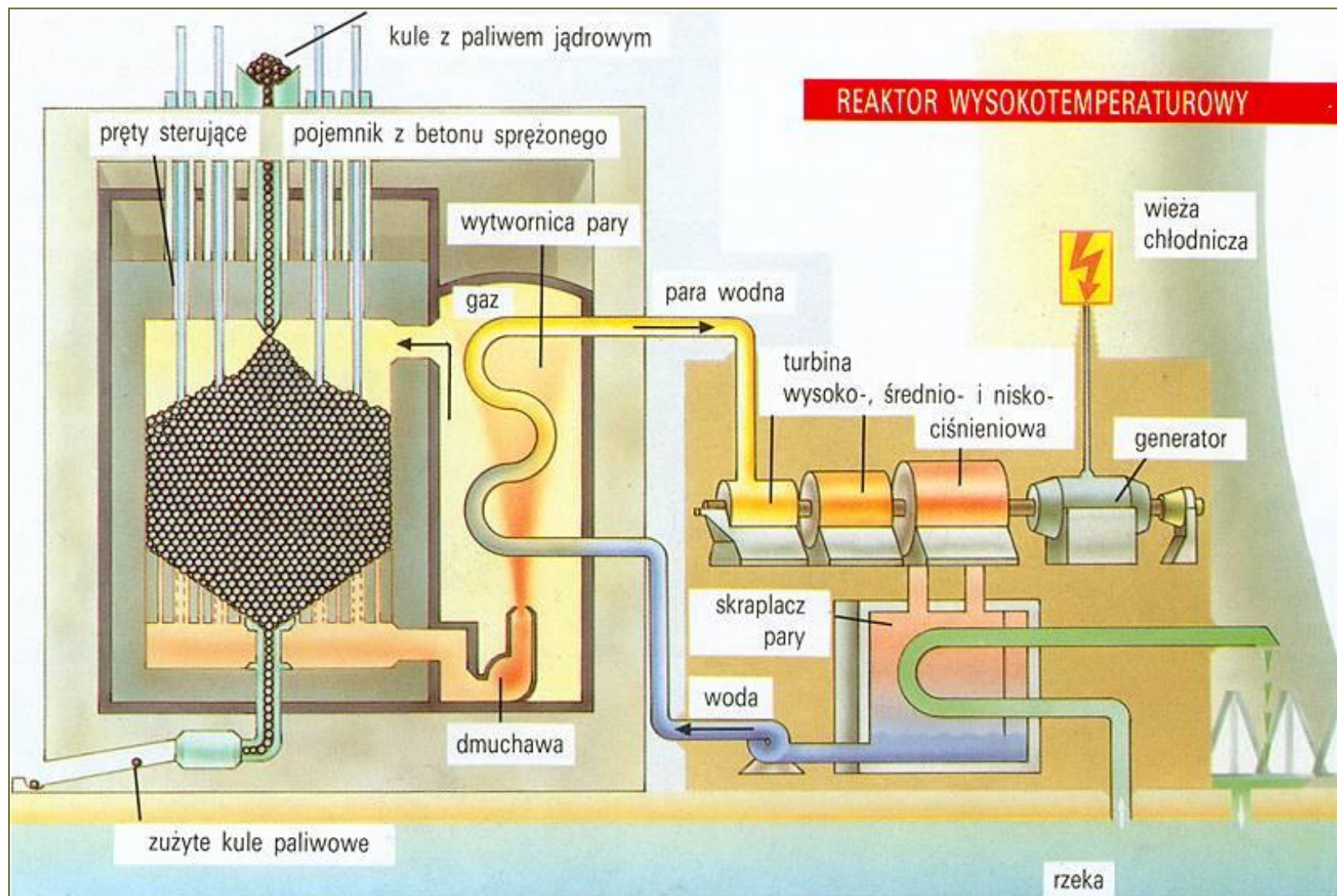
kilka różnych warstw
ochronnych z węgla i
węglika krzemu

cząstki z uranem w
osłonach ($\Phi \approx 1 \text{ mm}$)



kuleczki z dwutlenku
uranu ($\Phi = 0,5 \text{ mm}$)

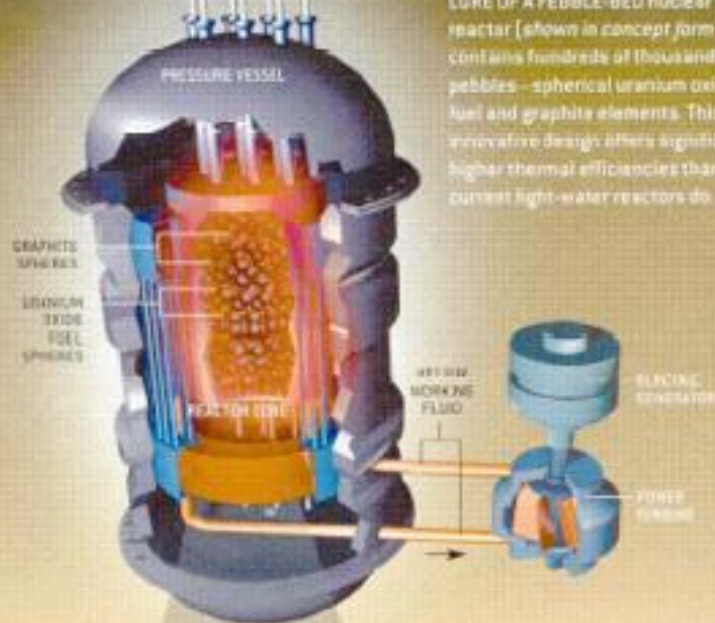
Reaktor wysokotemperaturowy



CONTROL RODS
AND FUEL RODS

GAS-COOLED NUCLEAR REACTOR

CORE OF A PEBBLE-BED nuclear reactor (shown in concept form) contains hundreds of thousands of pebbles—spherical uranium oxide fuel and graphite elements. This innovative design offers significantly higher thermal efficiencies than current light-water reactors do.



FUEL SPHERE
(60-MM DIAMETER)



GRAPHITE LAYER

COATED PARTICLES IN GRAPHITE MATRIX

URANIUM DIOXIDE
FUEL KERNEL
(0.5-MM DIAMETER)

NUCLEAR FUEL PEBBLES

ROUND FUEL ELEMENTS, which permit continuous refueling during operation, cannot melt and degrade only slowly, providing a substantial safety margin.

HALF-SECTION

INNER PYROLYTIC CARBON LAYER

SILICON CARBIDE BARRIER COATING

INNER PYROLYTIC CARBON LAYER

PERIODIC CARBON BUFFER

COATED PARTICLE

COATED PARTICLES IN GRAPHITE MATRIX

GRAPHITE LAYER

COATED PARTICLES IN GRAPHITE MATRIX

URANIUM DIOXIDE
FUEL KERNEL
(0.5-MM DIAMETER)

PERIODIC CARBON BUFFER

COATED PARTICLE

INNER PYROLYTIC CARBON LAYER

SILICON CARBIDE BARRIER COATING

INNER PYROLYTIC CARBON LAYER

Bomba atomowa

Reakcja w czystym paliwie ^{235}U lub ^{239}Pu

Jedyna przeszkoda to ucieczka neutronów na zewnątrz.

Dla kuli strumień neutronów uciekających $\sim r^2$
strumień neutronów powstających $\sim r^3$

Promień krytyczny – promień, dla którego strumień neutronów uciekających można zaniedbać.

Bomba atomowa

Jaka energia może wyzwolić się w czasie 1 s?

Założmy, że $k = 1,05$ $\tau = 10^{-3}$ s. Liczbę neutronów pojawiających się w czasie 1 s otrzymujemy podstawiając do wzoru:

$$n = n_0 e^{\frac{k-1}{\tau} t} = n_0 e^{\frac{1,05-1}{10^{-3}} 1} = n_0 e^{50} = n_0 \cdot 10^{22}$$

Każdy z neutronów powoduje rozszczepienie, wyzwalaając energię około 200 MeV

$$E = n_0 \cdot 10^{22} \cdot 200 \text{ MeV} = n_0 \cdot 10^{30} \text{ MeV}$$

Bomba atomowa

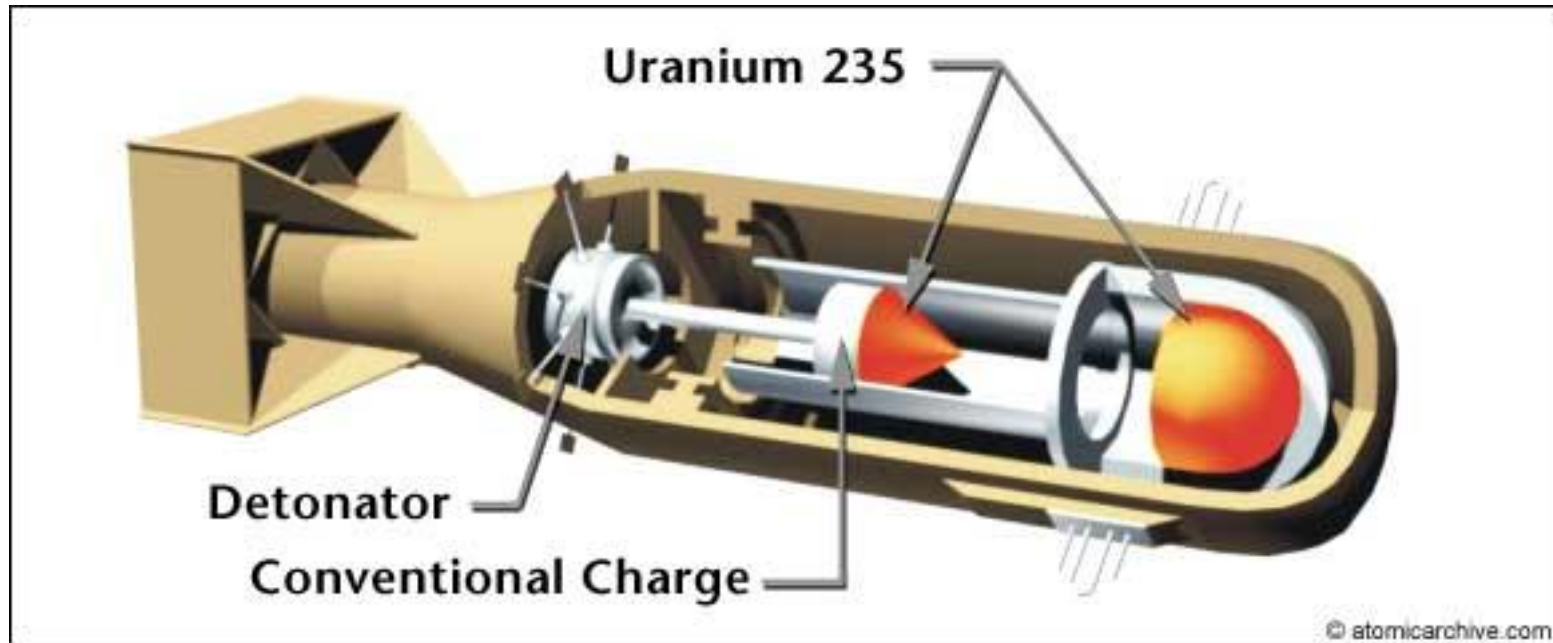
Hiroshima

06.08.45

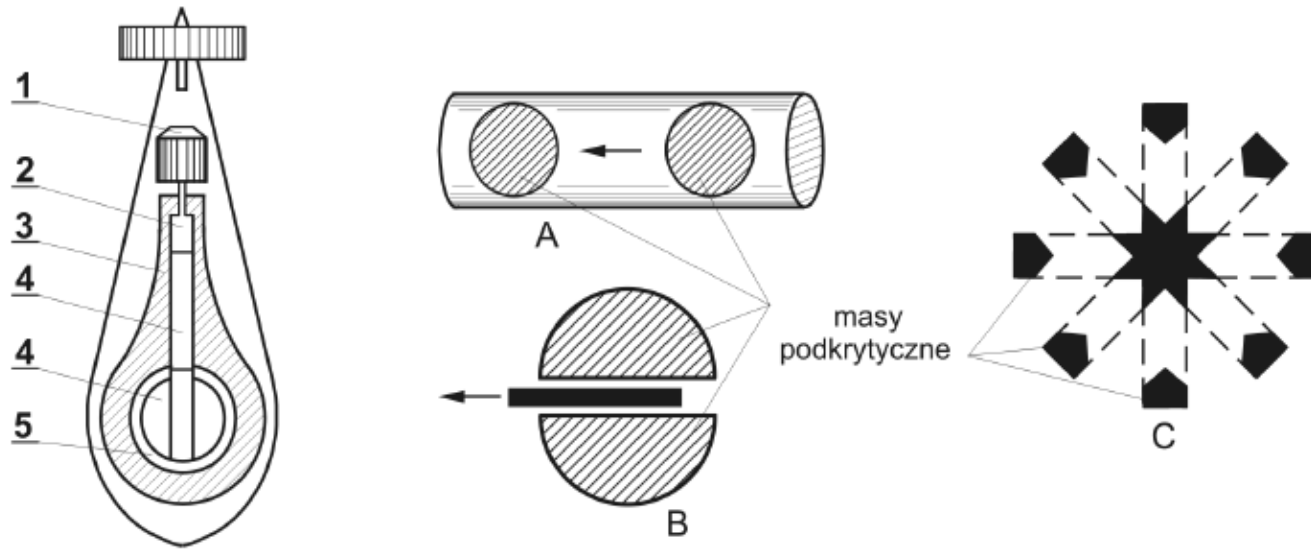
08:16:02

Nagasaki

09.08.45

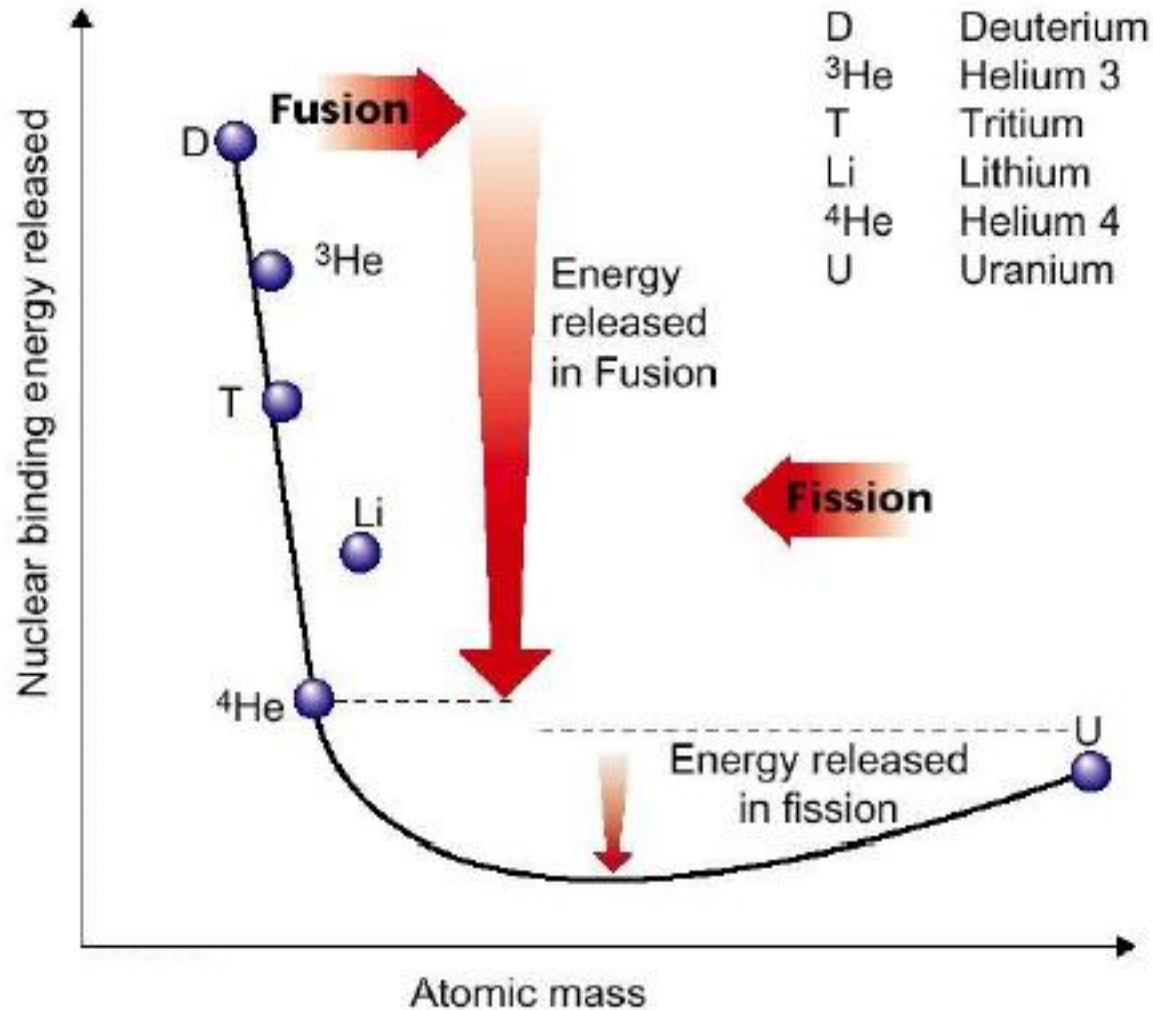


Bomba atomowa

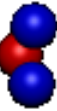
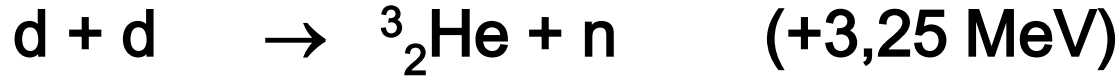


Rys. 33. Przykłady możliwych konstrukcji bomby atomowej [6, 7]. 1 – zapalnik, 2 – materiał wybuchowy, 3 – powłoka, 4 – ładunek jądrowy, 5 – reflektor.

Synteza jądrowa



Synteza jądrowa



Bariera kulombowska wymaga nadania deuteronom energii kinetycznej $E_k \cong 0,01 \text{ MeV}$ ($T = 10^9 \text{ K}$)

Domieszka deuteru w wodorze: 0,015%

Tryt wytwarzany bombardowaniem neutronami litu
(płaszcz litu otaczający plazmę)

Produkcja litu



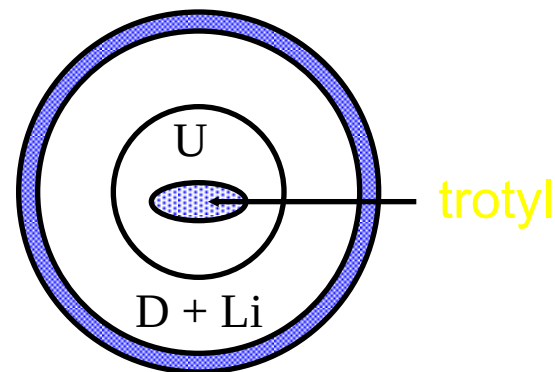
Tritium production



Synteza jądrowa

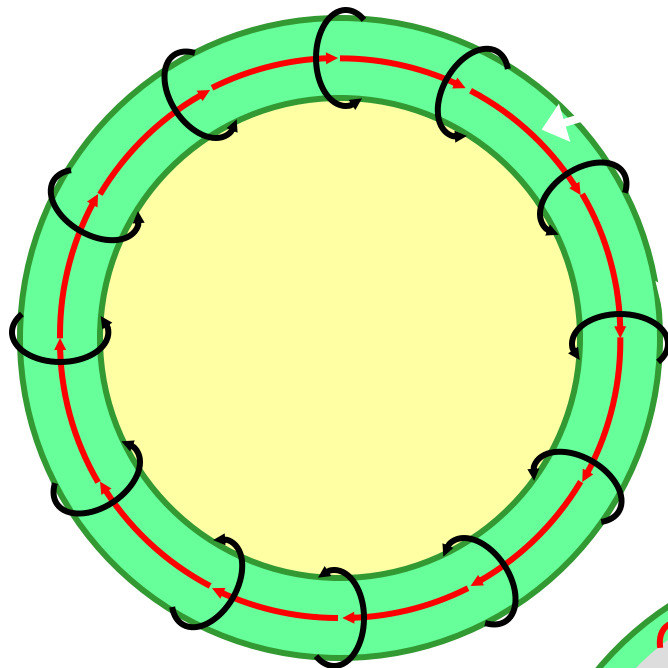
Reakcja termojądrowa $T \cong 10^9$ K

Przy temperaturze $T \cong 10^7$ K materia jest w postaci całkowicie zjonizowanej plazmy

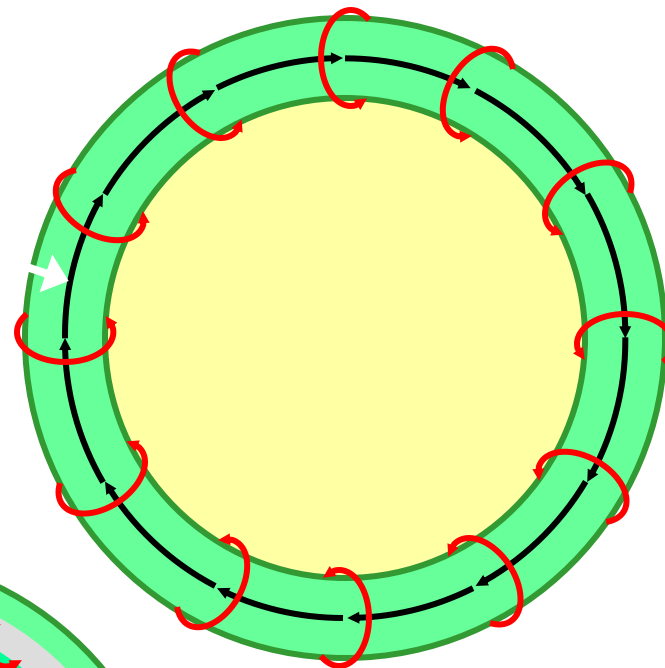


kontrolowana synteza jądrowa?

tokamak

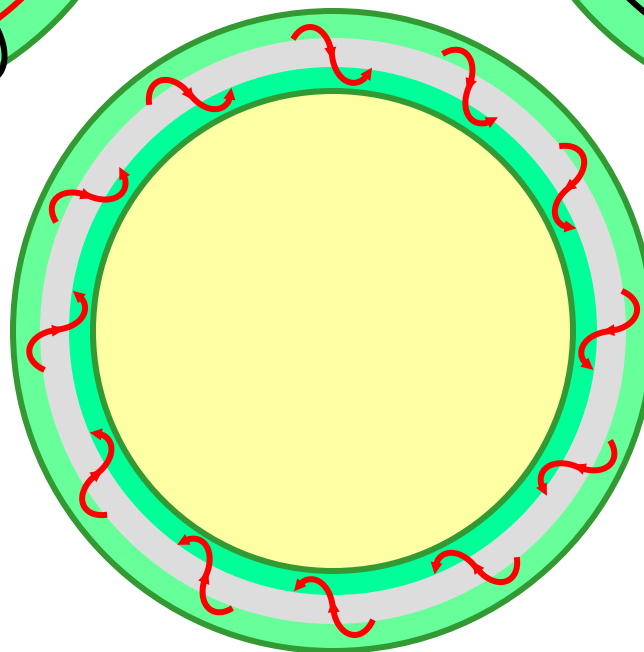


pole
toroidalne



pole
poloidalne

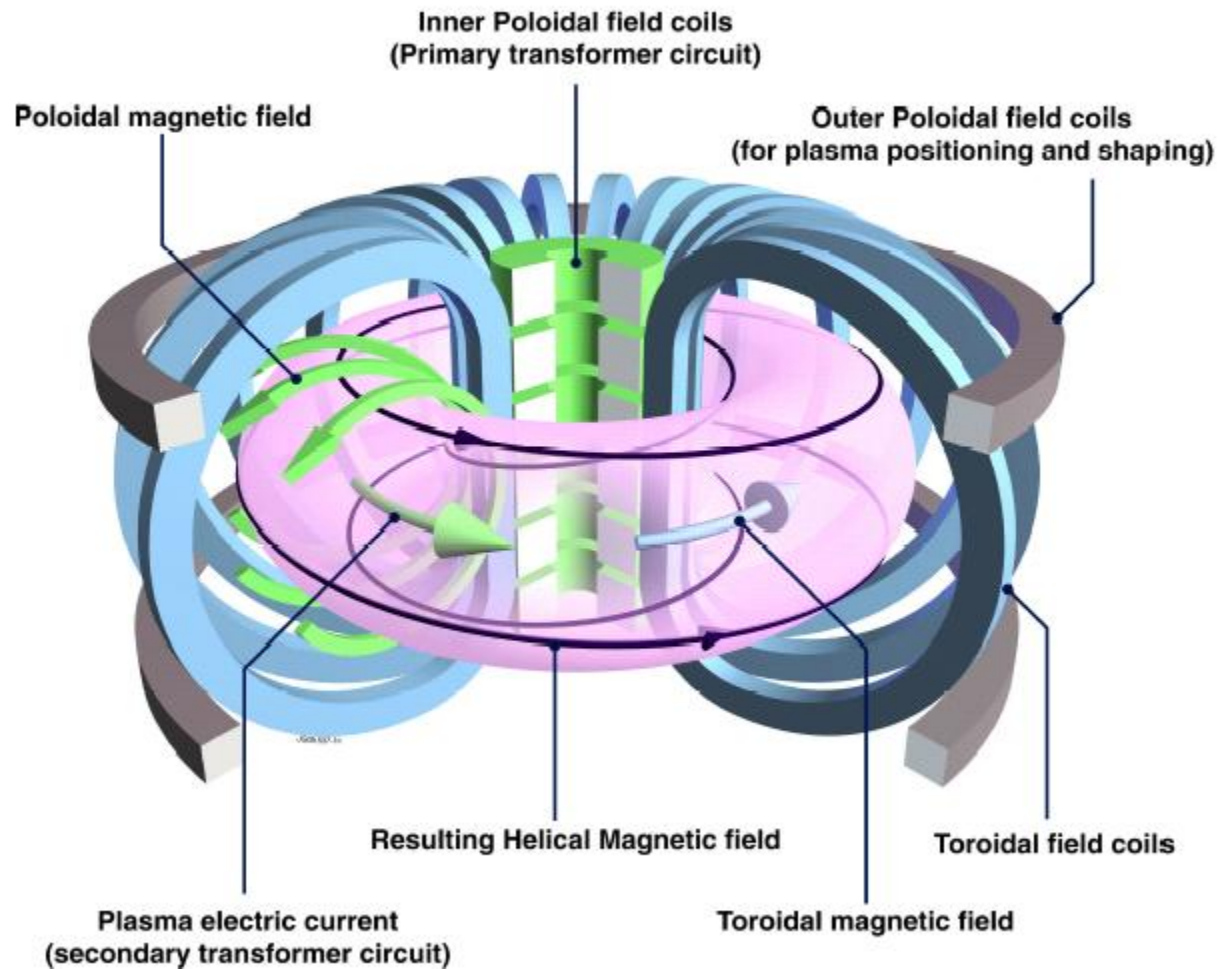
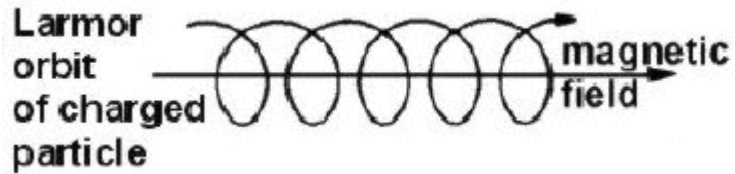
pole typu tokamak –
pułapka magnetyczna



тороидальная камера
в магнитных катушках

I.Tamm, A.Sakharov -
1950

tokamak

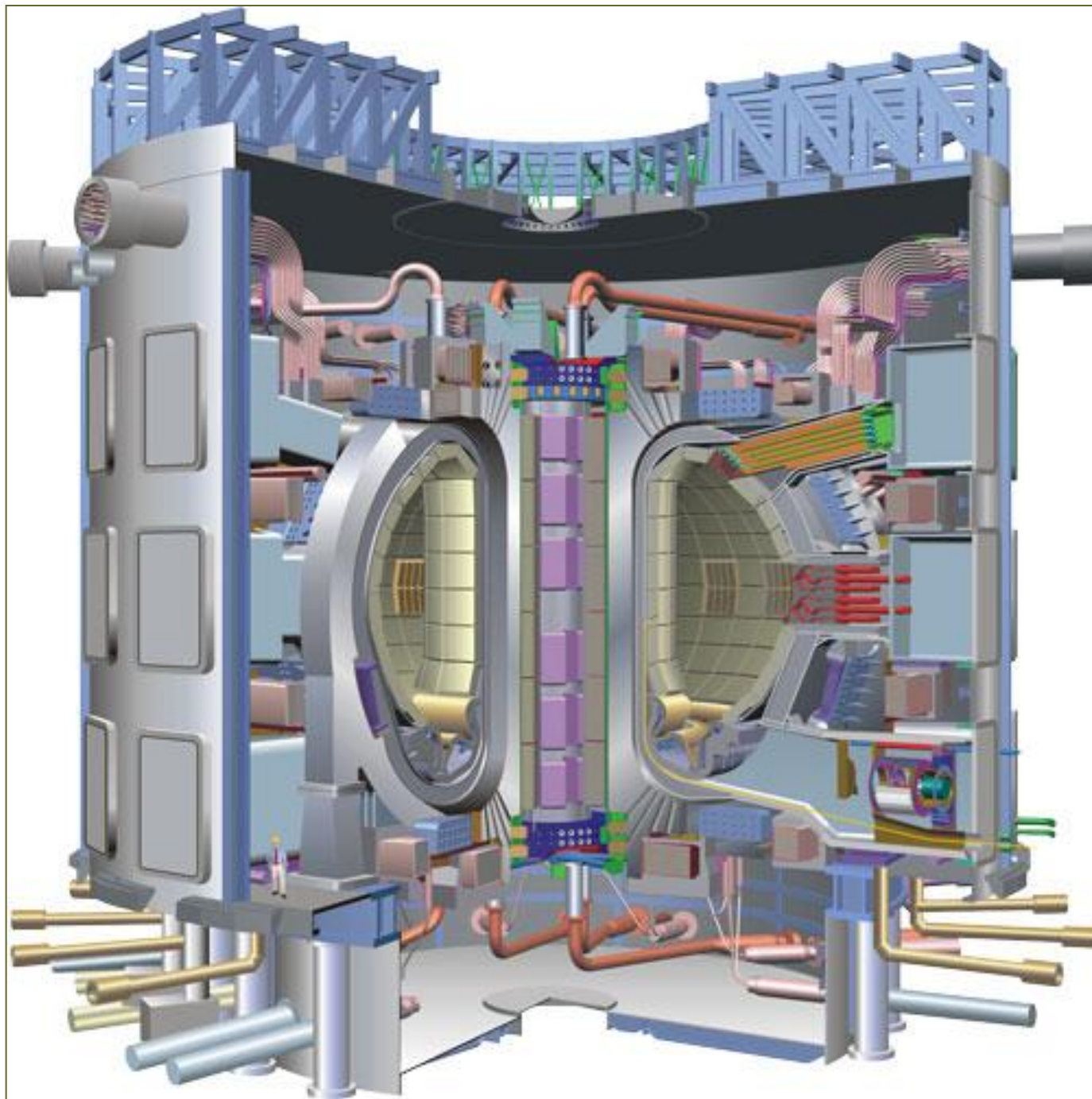




www.iter.org

International Thermonuclear Experimental Reactor

Caradache w
pobliżu
Marsylii
UE, Japonia,
Chiny, Rosja,
Korea Płd.



Ivy Mike



31.10.1952 – Atol Enewetak

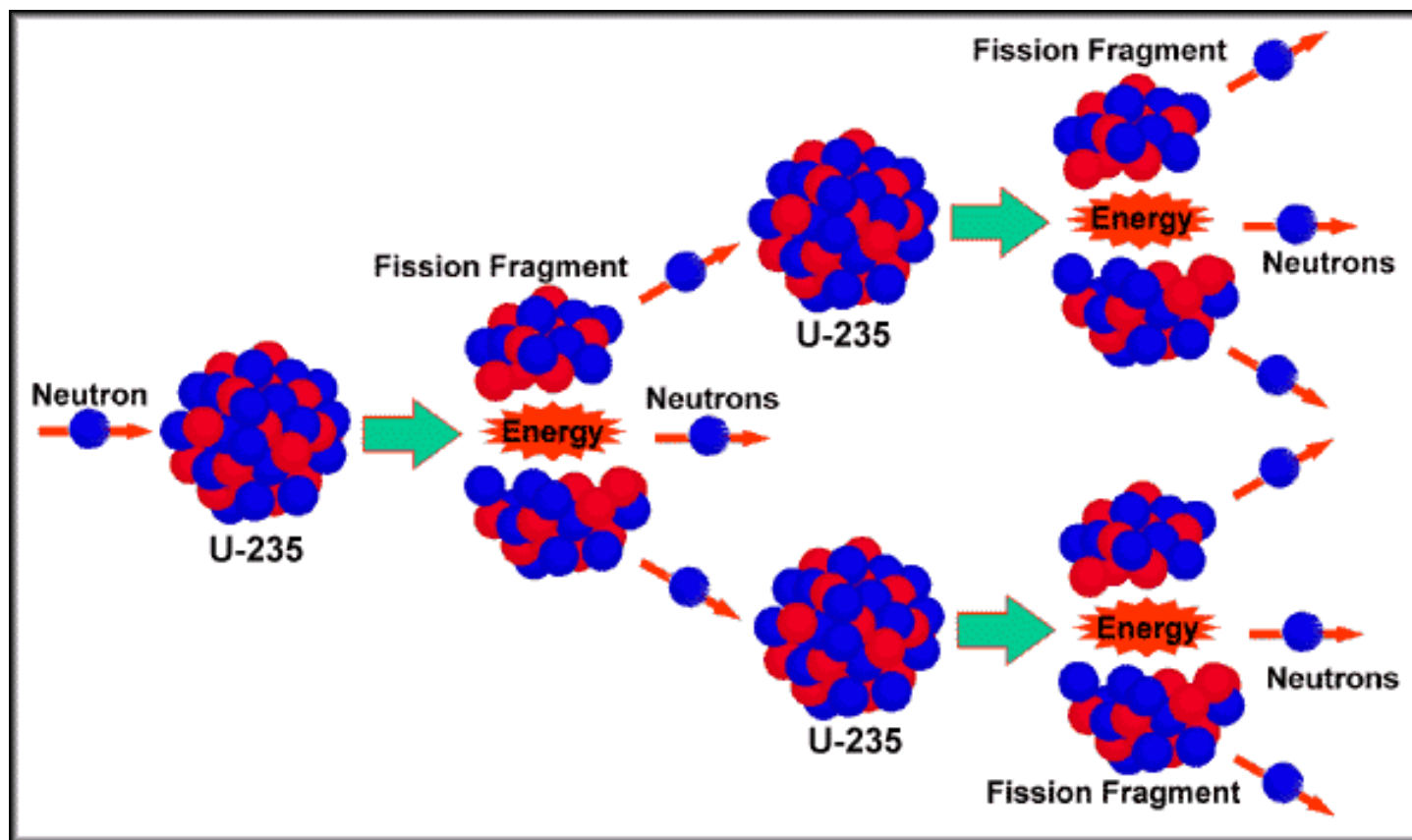
Atol Bikini



01.04.1954, Castle Bravo, 15 Mton

[http://video.google.com/videoplay?
docid=-585716941089093304](http://video.google.com/videoplay?docid=-585716941089093304)

reakcja łańcuchowa



^{235}U – 0,72%