



WSTĘP DO FIZYKI JADRA ATOMOWEGO

Wykład – 11

Wiedza i Życie

IV ROK FIZYKI - semestr zimowy

Janusz Braziewicz - Zakład Fizyki Atomowej IF AŚ

ENERGIA JĄDROWA

- **SPALANIE WĘGLA W PIECU** – to manipulacja atomami węgla i tlenu tak, że konfiguracja ich zewnętrznych elektronów zmienia się na bardziej trwałą
- **SPALANIE URANU** - to manipulacja jądrami tak, że konfiguracja nukleonów zmienia się na bardziej trwałą

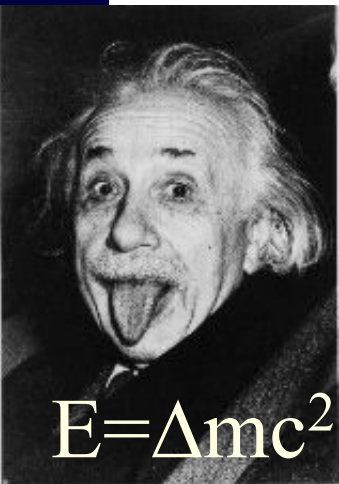
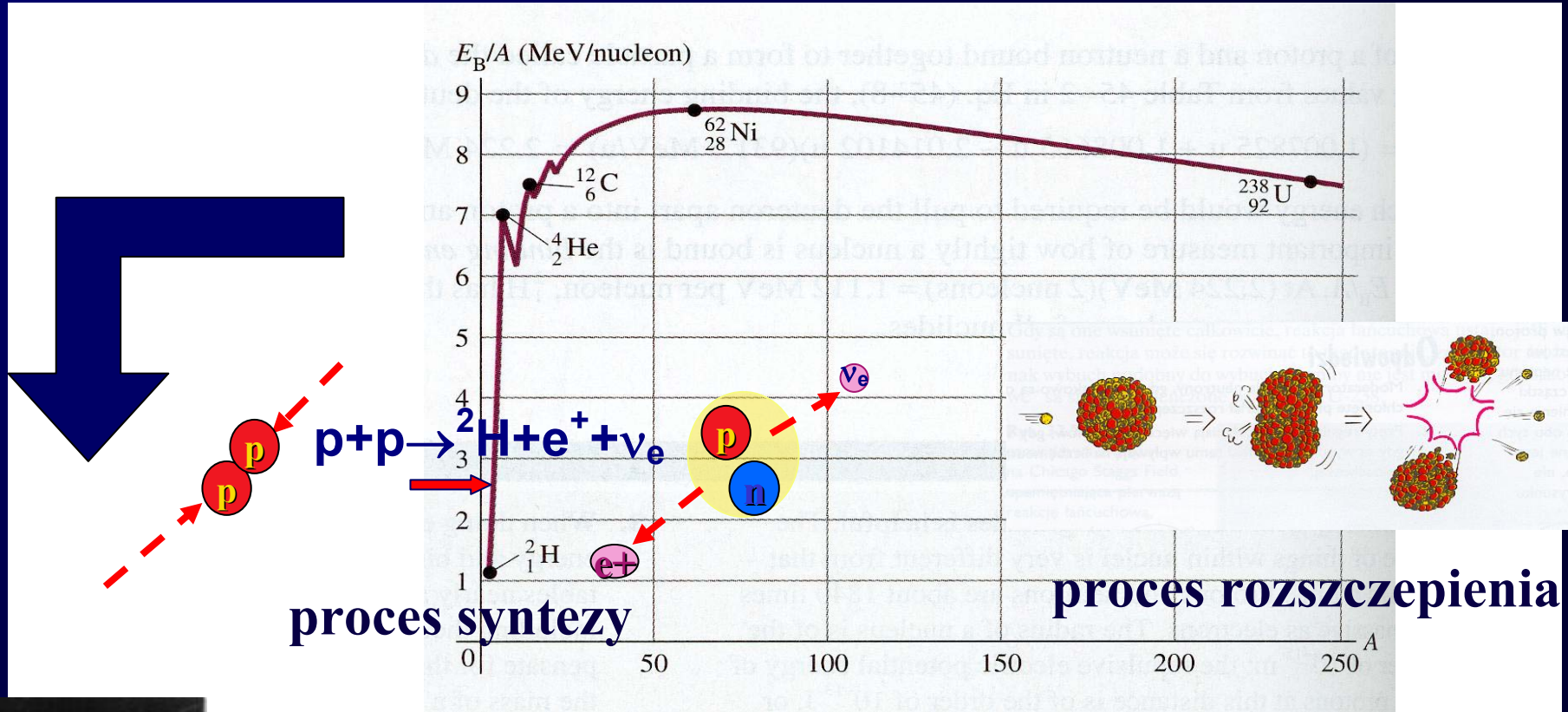


- **różne procesy dają różne rzędy mocy, czyli szybkości dostarczania energii**

Energia wyzwana przez 1 kg materii

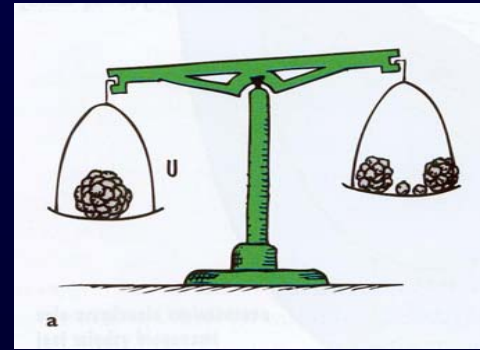
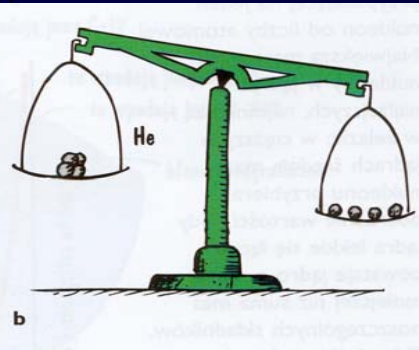
rodzaj materii	proces	czas świecenia żarówki o mocy 100 W
woda	spadek wody z wysokości 50 m	5 s
węgiel	spalanie	8 h
wzbogacony UO_2	rozszczerpieie w reaktorze	690 y
^{235}U	całkowite rozszczepienie	$3 \cdot 10^4$ y
gorący gazowy deuter	całkowita synteza	$3 \cdot 10^4$ y
materia i antymateria	całkowita anihilacja	$3 \cdot 10^7$ y

Uzyskiwanie energii z reakcji jądrowych



$$E = \Delta mc^2$$

$$\Delta m \begin{matrix} \downarrow \\ \uparrow \end{matrix}$$



$$\begin{matrix} \downarrow \\ \uparrow \end{matrix} \Delta m$$

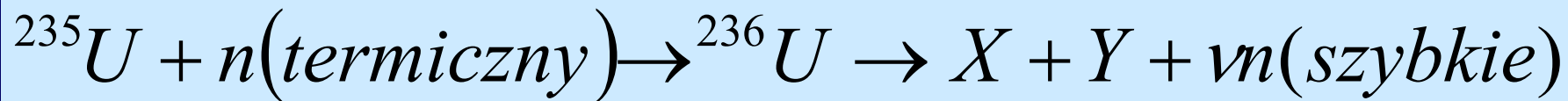
Rozszczepienie jądra – podstawy procesu

- odkrycie neutronu przez Jamesa Chadwicka w 1932 roku
- powstawanie nowych pierwiastków promieniotwórczych w wyniku bombardowania neutronami różnych materiałów – Enrico Fermi
- obserwacja jąder baru w roztworze soli uranu bombardowanej neutronami termicznymi – Lise Meitner, Otto Hahn i Fritz Strassmann w 1939 w Berlinie
- identyfikacja procesu rozszczepienia jądra przez Lise Meitner i Otto Frischa



„Teraz stałem się Śmiercią, niszczycielem światów” - Robert Oppenheimer

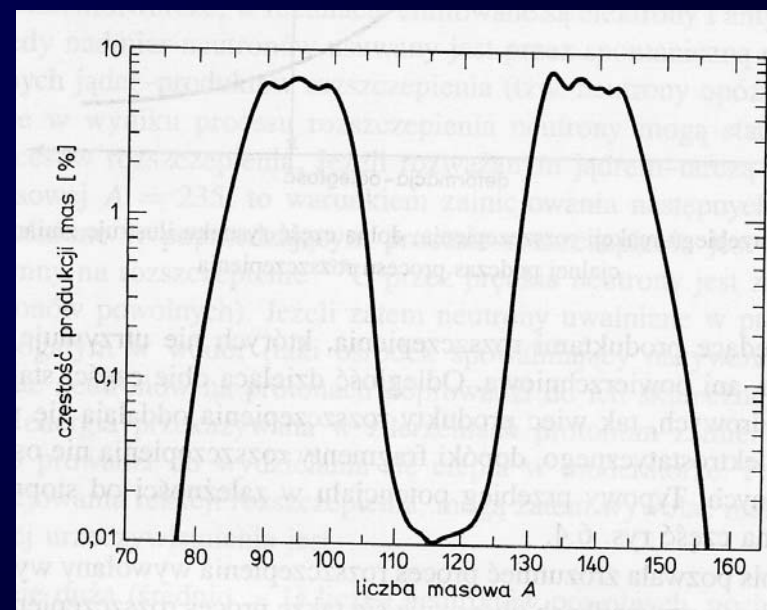
ROZSZCZEPIENIE



$$\nu = 2.43$$

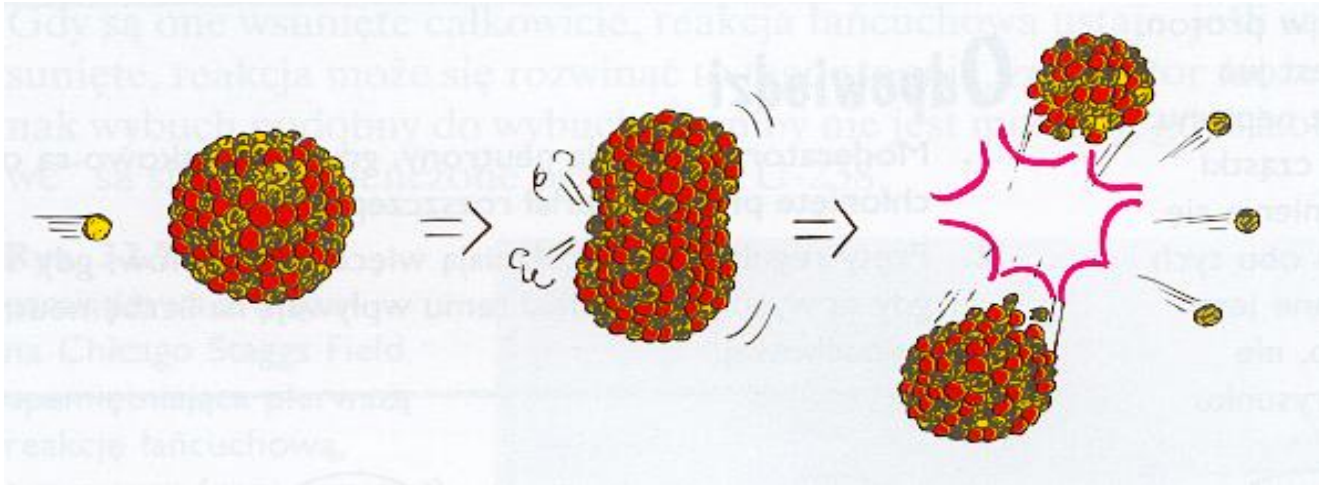
	^{140}Xe	^{140}Cs	^{140}Ba	^{140}La	^{140}Ce
T1/2	14s	64s	13d	40h	trwały
Z	54	55	56	57	58

	^{94}Xe	^{94}Cs	^{94}Ba
T1/2	75s	19min	trwały
Z	38	39	40



Rozkład mas fragmentów powstałych w wyniku rozszczepienia jąder ^{235}U .

Ciężkie jądra – proces rozszczepienia



$E \sim 200 \text{ MeV}$

W jakich jądrach jest to możliwe bez dużych nakładów energetycznych?

${}_{92}^{233}\text{U}$

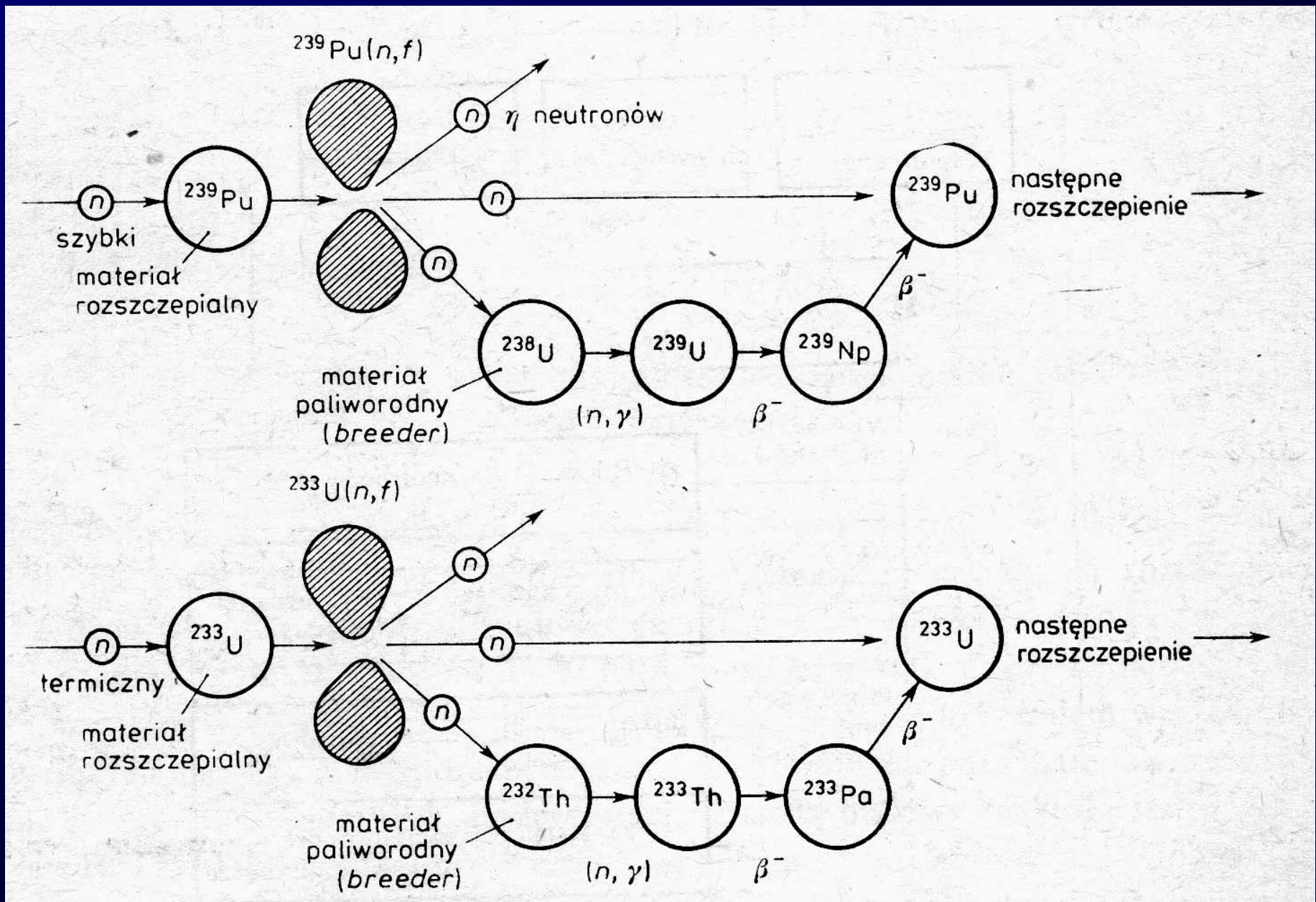
<liczba neutronów>

${}_{92}^{235}\text{U}$

2.52

${}_{94}^{239}\text{Pu}$

2.95



Łańcuchy reakcji wykorzystywane w reaktorach rozmnażających.⁹

Uzyskiwanie energii z reakcji jądrowych

ROZSZCZEPIENIE

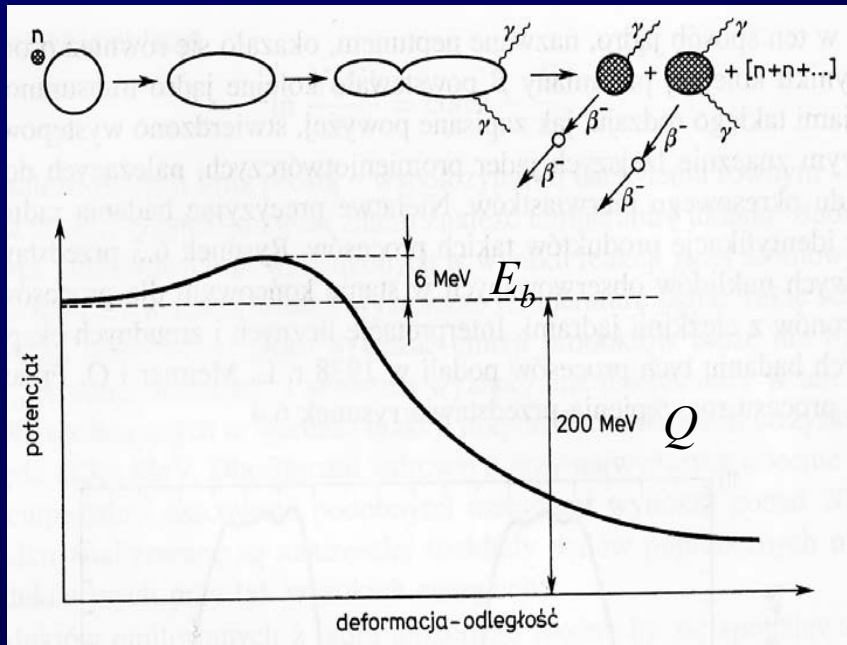
$$Q = \left[\begin{array}{c} \text{całkowita końcowa} \\ \text{energia wiązania} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{początkowa} \\ \text{energia wiązania} \end{array} \right]$$

$$Q = \left[\begin{array}{c} (8.5 \text{ MeV/u}) \\ (2 \text{ jądra}) \\ (120 \text{ u/jądro}) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} (7.6 \text{ MeV/u}) \\ (240 \text{ u/jądro}) \end{array} \right] = \sim 200 \text{ MeV}$$

Energia $\sim 200 \text{ MeV}$ z jednego rozszczepienia to:

- energia kinetyczna jąder-produktów $\sim 165 \text{ MeV}$
- energia unoszona przez neutrony $\sim 5 \text{ MeV}$
- energia ‘natychmiastowych’ kwantów γ $\sim 7 \text{ MeV}$
- energia unoszona przez elektrony i γ ze wzbudzonych jąder β -promieniotwórczych $\sim 25 \text{ MeV}$

Uzyskiwanie energii z reakcji jądrowych

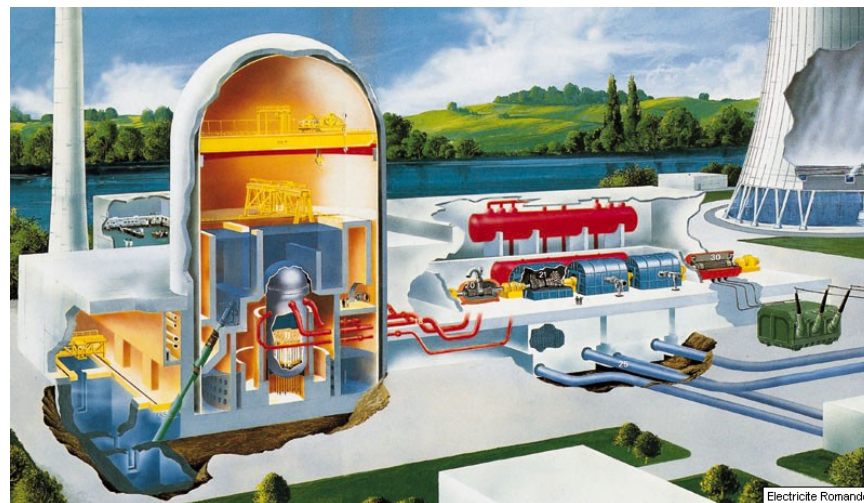


Energia potencjalna E_b jądra na różnych etapach reakcji rozszczepienia według przewidywań modelu Bohra i Wheelera.

Nuklid tarczy	Nuklid rozszczepialny	E_n (MeV)	E_b (MeV)	Rozszczepienie przez neutrony termiczne?
^{235}U	^{236}U	6.5	5.2	tak
^{238}U	^{239}U	4.8	5.7	nie
^{239}Pu	^{240}Pu	6.4	4.8	tak
^{243}Am	^{244}Am	5.5	5.8	nie

wykorzystanie reakcji rozszczepienia

- w reaktorach produkcja energii i silnych wiązek neutronowych



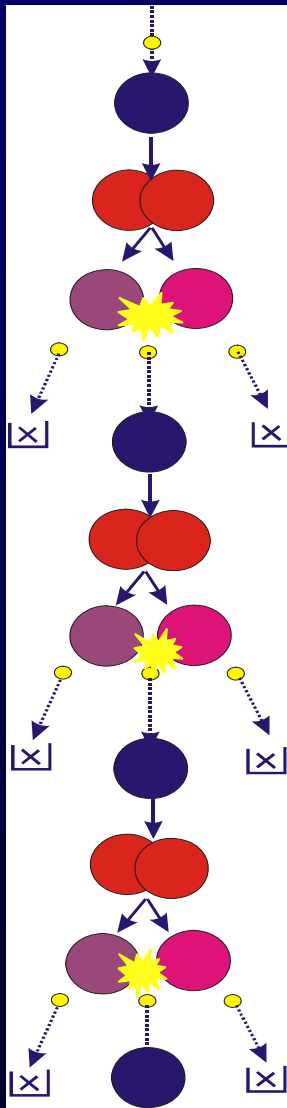
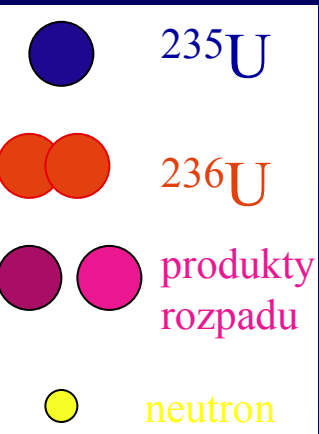
- w bombie atomowej (A-bomb)



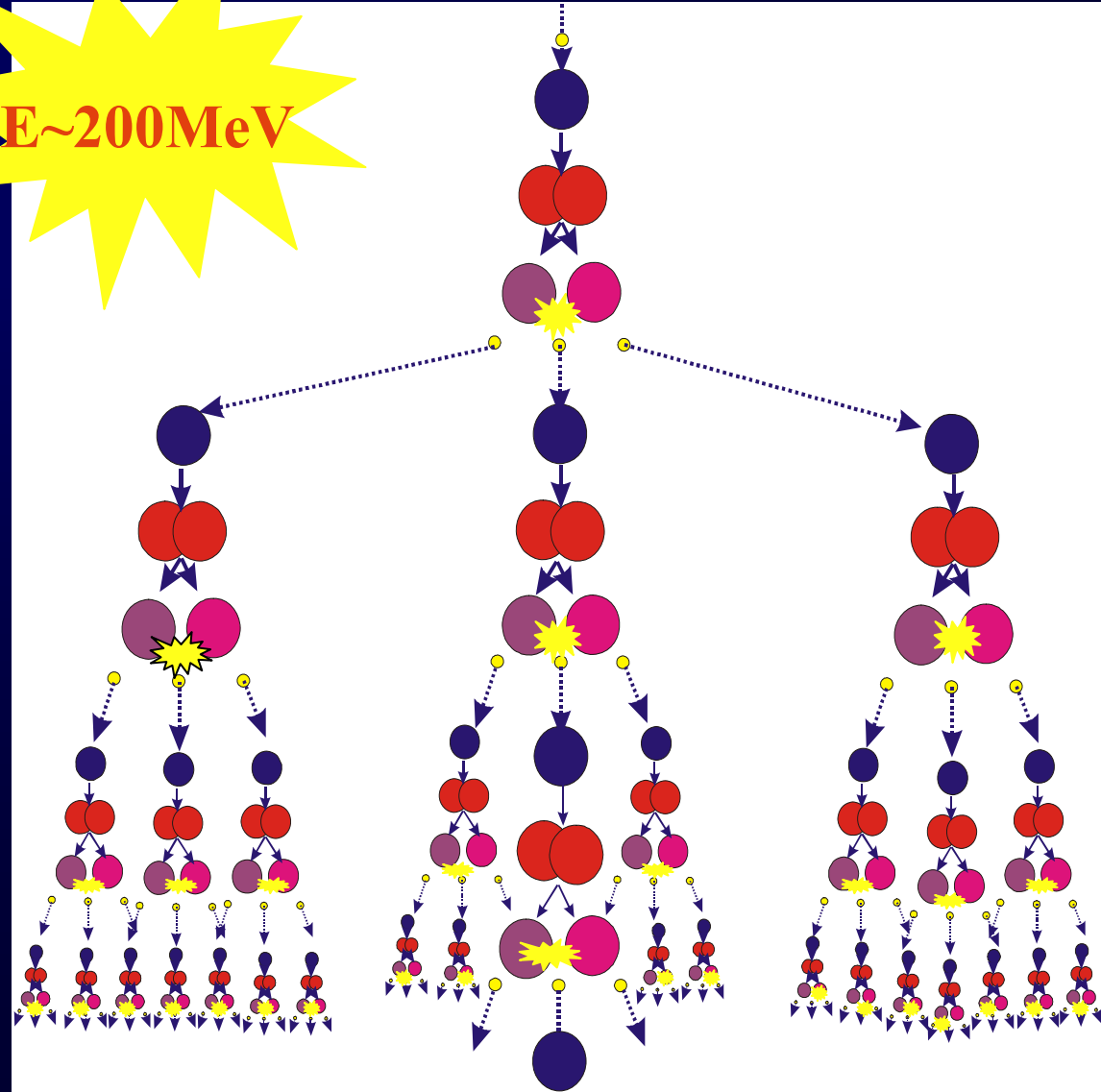
Podstawa wykorzystania reakcji rozszczepienia to reakcja łańcuchowa

$k=1$

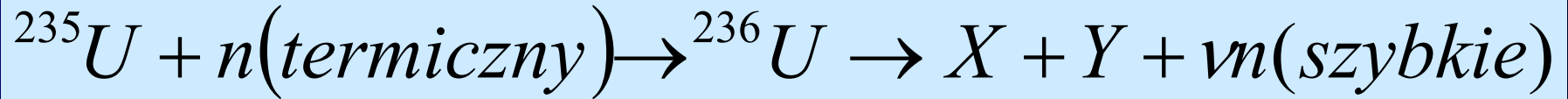
$k>1$



$E \sim 200 \text{ MeV}$



ROZSZCZEPIENIE



$$\nu = 2.43$$

Uran naturalny to

0.7%	-	^{235}U
99.3%	-	^{238}U

Dla neutronów termicznych mamy:

$$\sigma_f(235) = 582\text{b}$$

$$\sigma_r(235) = 112\text{b}$$

$$\sigma_a(235) = \sigma_f(235) + \sigma_r(235) = 694\text{b}$$

$$\sigma_r(238) = \sigma_a(238) = 2.8\text{ b}$$

ROZSZCZEPIENIE

Liczba nowych neutronów powstających przy pochwyceniu w uranie naturalnym jednego neutronu termicznego (liczba neutronów rozszczepienia do liczby neutronów pochłoniętych

$$\eta = \nu \frac{R\sigma_f(235)}{R\sigma_a(235) + (1-R)\sigma_a(238)} = 1.34$$

gdzie $R=0.007$

Reakcja łańcuchowa zajdzie gdy $\eta > 1$

Liczba wszystkich rozszczepień wywołanych przez neutrony w uranie naturalnym jest większa od liczby rozszczepień wywołanych przez termiczne – określa to czynnik

$$\varepsilon = \frac{\text{liczba rozszczepień wywołanych przez neutrony prędkie i termiczne}}{\text{liczba rozszczepień wywołanych przez neutrony termiczne}} \approx 1.03$$

ROZSZCZEPIENIE

Rzeczywisty współczynnik rozmnożenia neutronów jest mniejszy od wartości $\epsilon\eta$ na skutek:

- **prawdopodobieństwa p** , że w procesie spowalniania neutron uniknie pochwylenie rezonansowego
- **czynnika f** , będącego stosunkiem prawdopodobieństwa pochwylenie przez uran do prawdopodobieństwa pochwylenia przez uran i inne materiały
- **prawdopodobieństwa l** uniknięcia przez neutron ucieczki z reaktora

Współczynnik rozmnożenia neutronów to

$$k = \epsilon\eta p l f$$

Dla jednorodnej mieszaniny uranu naturalnego i grafitu jako moderatora

$p_f < 0.79$ więc dla $\eta = 1.34$ i $l < 1$ zawsze $k < 1$

k – to wzrost liczby neutronów następnej generacji, więc dla k nieznacznie większego od jedności

$$k = 1 + (k-1) = e^{k-1}$$

τ – czas dzielący kolejne dwie generacje, to w czasie t wystąpi t/τ generacji i liczba neutronów wzrośnie do

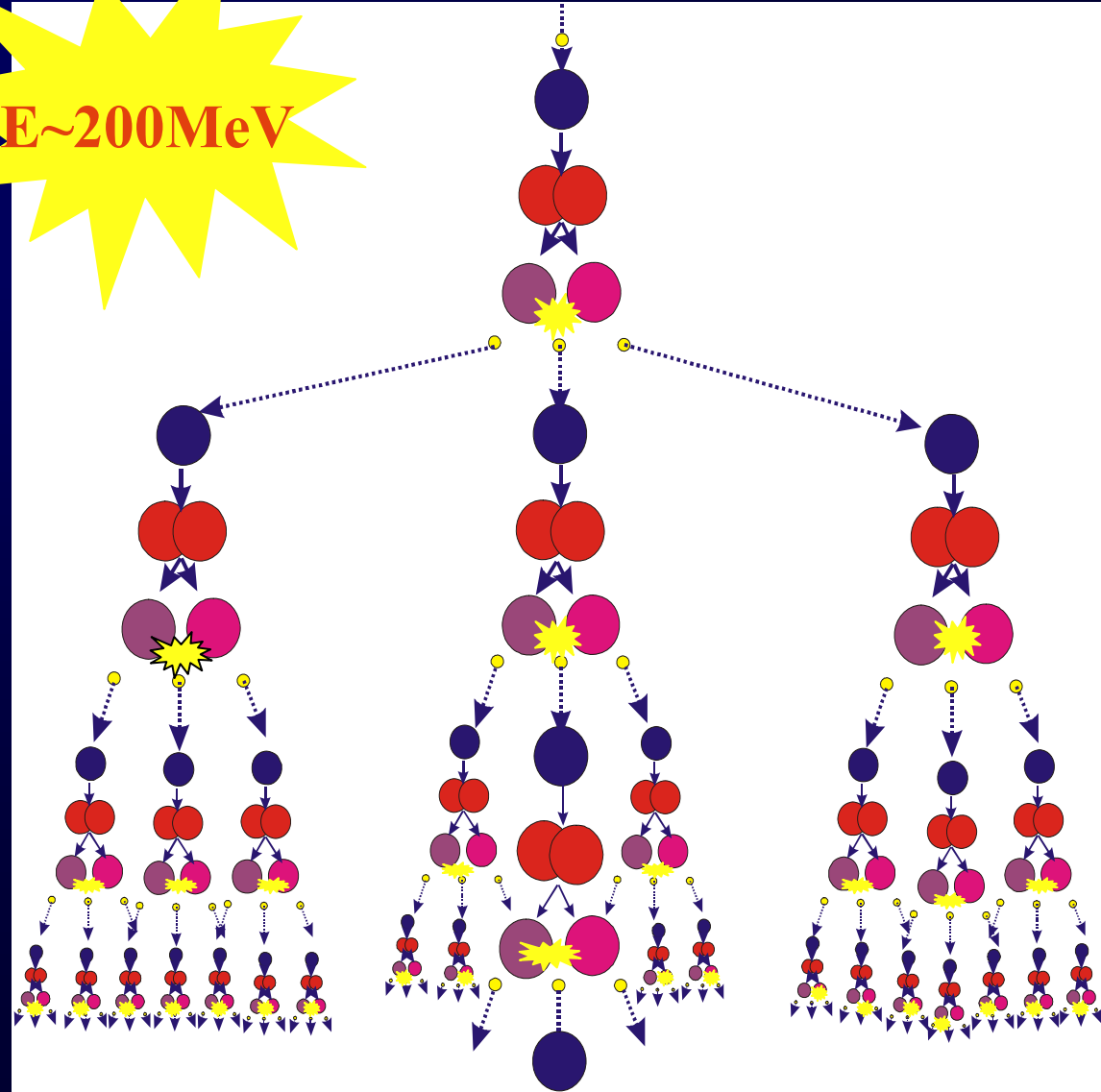
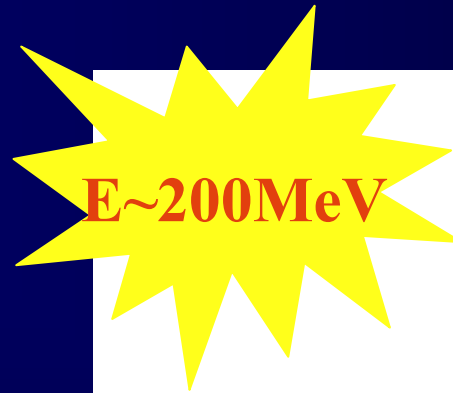
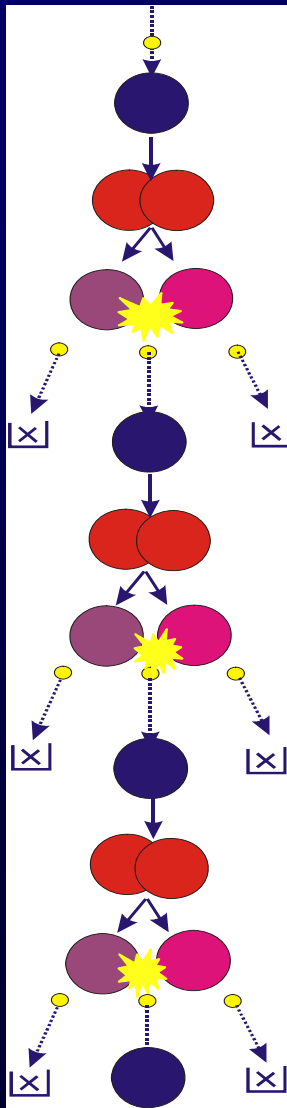
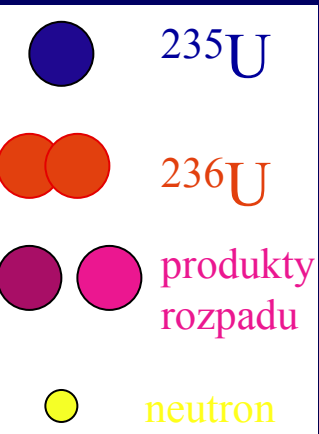
$$n = n_0 e^{(k-1)t/\tau}$$

więc dla $t \sim 10^{-3} \text{ s}$ i $k = 1.05$ już po 1 sekundzie liczba neutronów wzrosłaby $e^{50} = 10^{22}$ razy

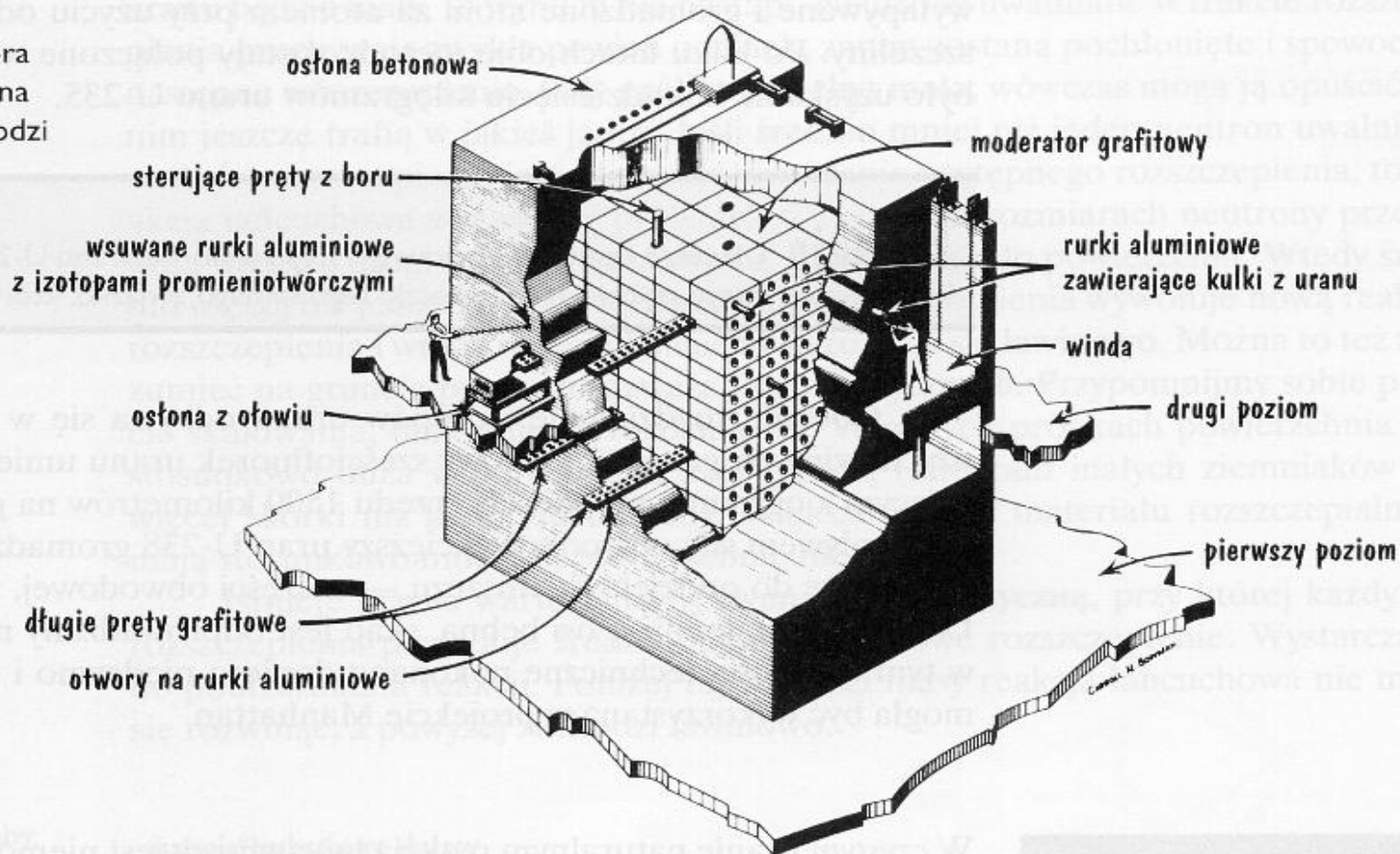
Podstawa wykorzystania reakcji rozszczepienia to reakcja łańcuchowa

$k=1$

$k>1$



Rys. 33.6. Szczegółowy widok pierwszego reaktora atomowego. Kontrolowana reakcja łańcuchowa zachodzi w prętach uranowych wsuniętych do grafitu



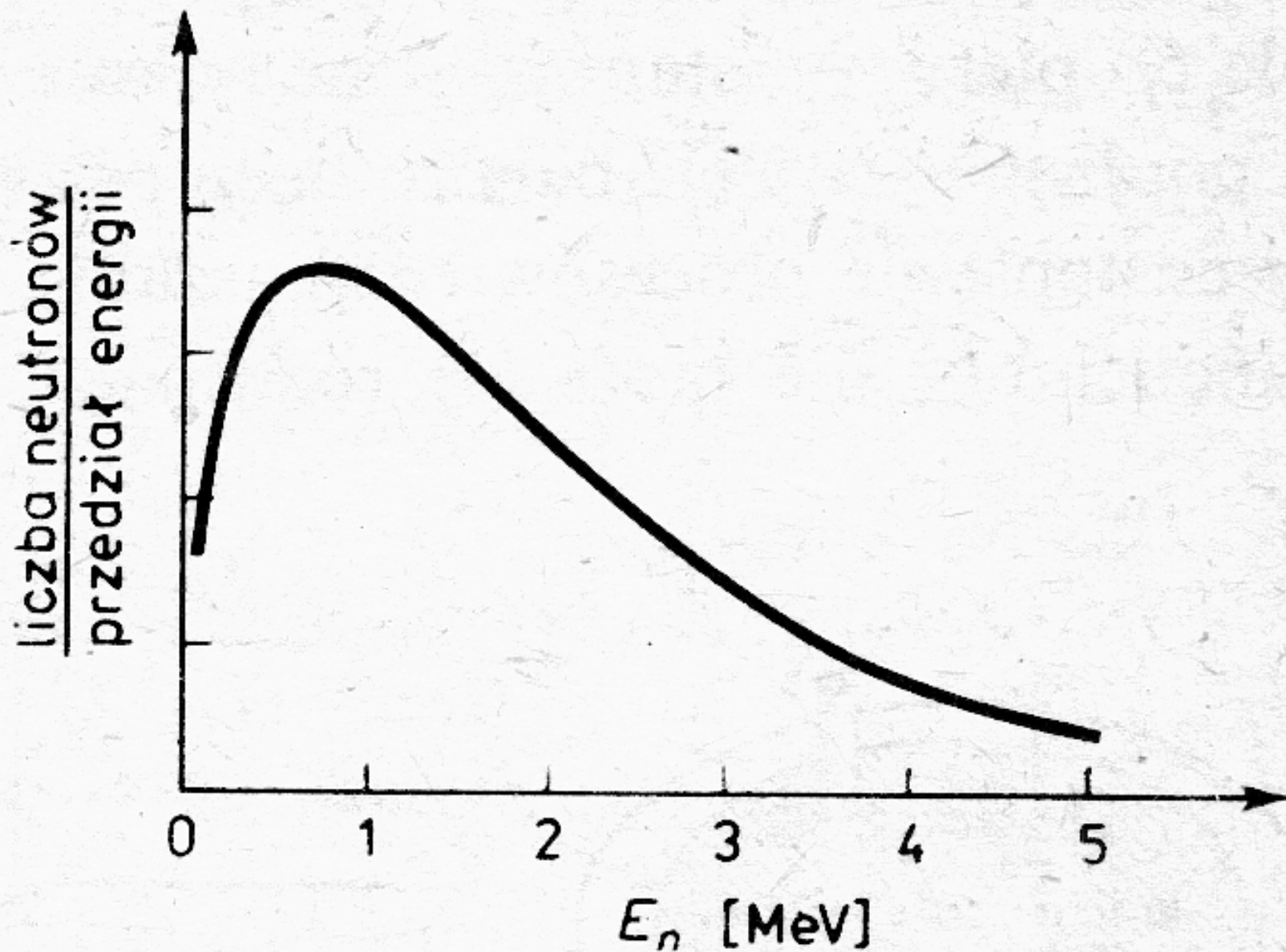
Pierwszy reaktor jądrowy zbudowany przez zespół Enrica Fermiego w hali sportowej uniwersytetu w Chicago. Reaktor, który osiągnął stan krytyczny 2 grudnia 1942 roku. Posłużył on jako prototyp późniejszych reaktorów , wykorzystywanych do produkcji plutonu przeznaczonego dla rozszczepialnych głowic bojowych.

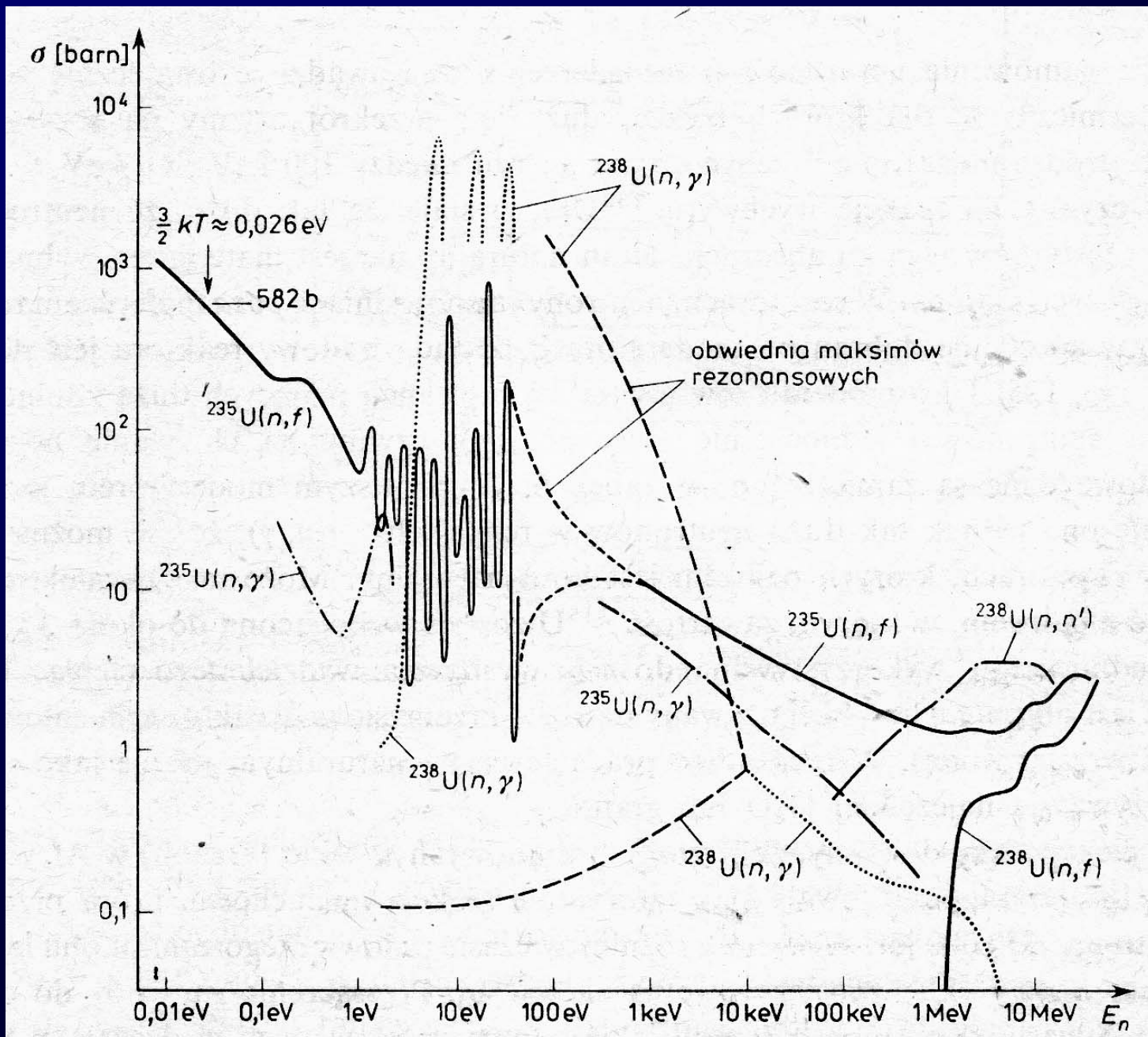
Aby zbudować reaktor trzeba rozwiązać trzy problemy:

1. *Ucieczka neutronów*. Ucieczka odbywa się z powierzchni, której pole jest proporcjonalne do kwadratu rozmiaru reaktora. Neutrony wytwarzane są w objętości reaktora. Można dowolnie zmniejszyć ułamek traconych neutronów, budując reaktor o dużym rdzeniu, co redukuje stosunek jego powierzchni do objętości.

2. *Energia neutronów*. W reakcji rozszczepienia powstają neutrony prędkie o energiach kinetycznych bliskich 2 MeV. Spowalnia je się w substancji nazywanej moderatorem, który efektywnie je spowalnia dzięki wielokrotnym zderzeniom sprężystym i nie absorbuje neutronów. Moderatorem są zwykle – woda, ciężka woda, grafit.

3. *Wychwyt neutronów*. W czasie spowalniania neutronów do energii $\sim 0.04\text{eV}$ trzeba pokonać krytyczny przedział energii 1-100 eV, w którym istnieje duże prawdopodobieństwo wychwytu radiacyjnego przez ^{238}U . Aby to zredukować paliwo uranowe i moderator nie są dosłownie zmieszane, lecz tworzą „przekładaniec”, zajmując różne miejsca w objętości reaktora.





Wybór elektrowni atomowej oznacza oznacza:

- kilka lat intensywnych prac inżynierskich w miejscu
- lokalizacji elektrowni, w tym transport ciężkich elementów materiałów, hałas, pył i inne zakłócenia;
- wydobywanie, przetworzenie, wzbogacenie oraz przekształcenie w paliwo uranu w innych zakładach przemysłowych;
- gromadzenie się zużytego paliwa uranowego, obejmującego odpady radioaktywne i pluton;
- gromadzenie się innych stałych odpadów radioaktywnych wymagających likwidacji;
- przenikanie materiałów radioaktywnych w niskich stężeniach do wody i atmosfery;
- końcowe wstrzymanie pracy reaktora i likwidacje powstałych ten sposób odpadów radioaktywnych;

Czy jesteśmy bezpieczni bez żadnej elektrowni jądrowej?

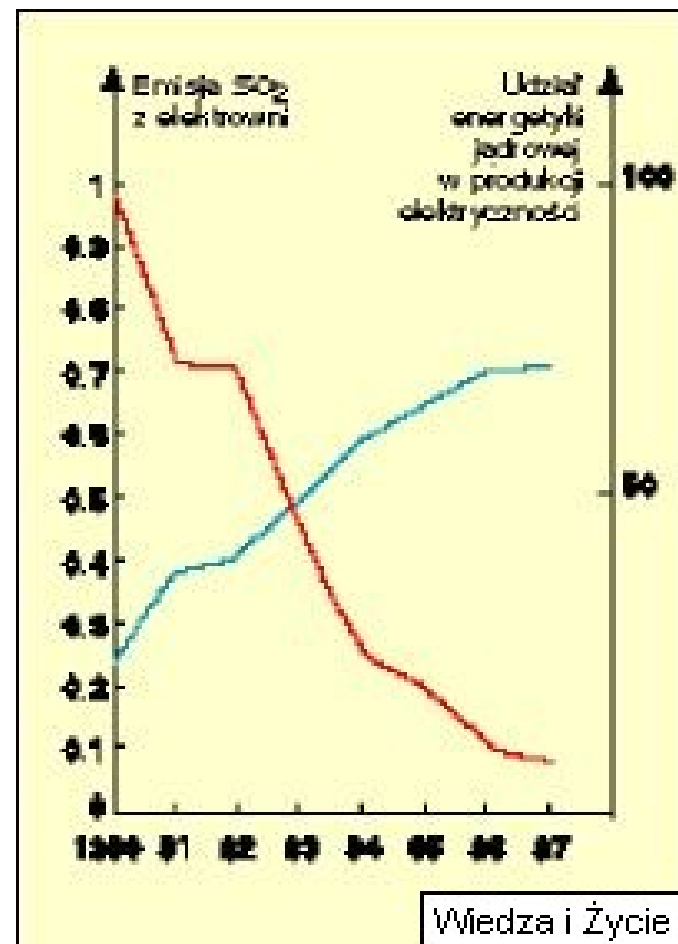


Promieniotwórczość "elektrowni klasycznej"

Warto również przypomnieć, że spalony węgiel zawiera znaczne domieszki substancji radioaktywnych, w szczególności uranu i toru. **W 1 mln ton węgla znajduje się około 1 t ^{238}U i 2 t ^{232}Th** , które w procesie spalania wydostają się do atmosfery lub powodują skażenie otoczenia siłowni węglowej. Należy także pamiętać, że **wydobyciu węgla towarzyszy wypompowywanie kolosalnych ilości wód kopalnianych zawierających sole różnych szkodliwych pierwiastków**, między innymi radu. Z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego do zlewni Wisły oraz Odry **odprowadza się dziennie około 1 mln m³ tych wód**.

Nikommu również nie spędzają snu z powiek ilości uranu i toru zawarte w spalonym w Polsce węglu. W spalanych rocznie około 170 mln ton węgla kamiennego i brunatnego znajduje się około 500 ton uranu i toru łącznie, które są usuwane na wysypiska w popiołach lub wydmuchiwane do atmosfery w postaci pyłu. Groźnym produktem rozpadu ^{226}Ra jest radon ^{222}Rn , gaz szlachetny o czasie połowicznego zaniku 3.82 doby, który wydostaje się z gleby i materiałów zawierających ślady uranu, a więc m.in. z materiałów budowlanych. Od rodzaju użytych materiałów i charakteru podłoża zależy stężenie radonu w naszych mieszkaniach. Brak wymiany powietrza z otoczeniem znacznie je zwiększa. Wdychane ^{222}Rn i pyły zawierające promieniotwórcze produkty jego rozpadu stanowią główny udział w naturalnej dawce promieniowania otrzymywanego przez ludzi.

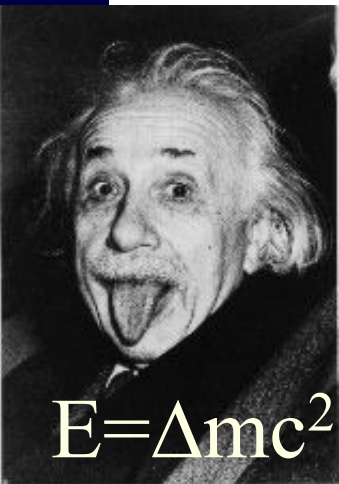
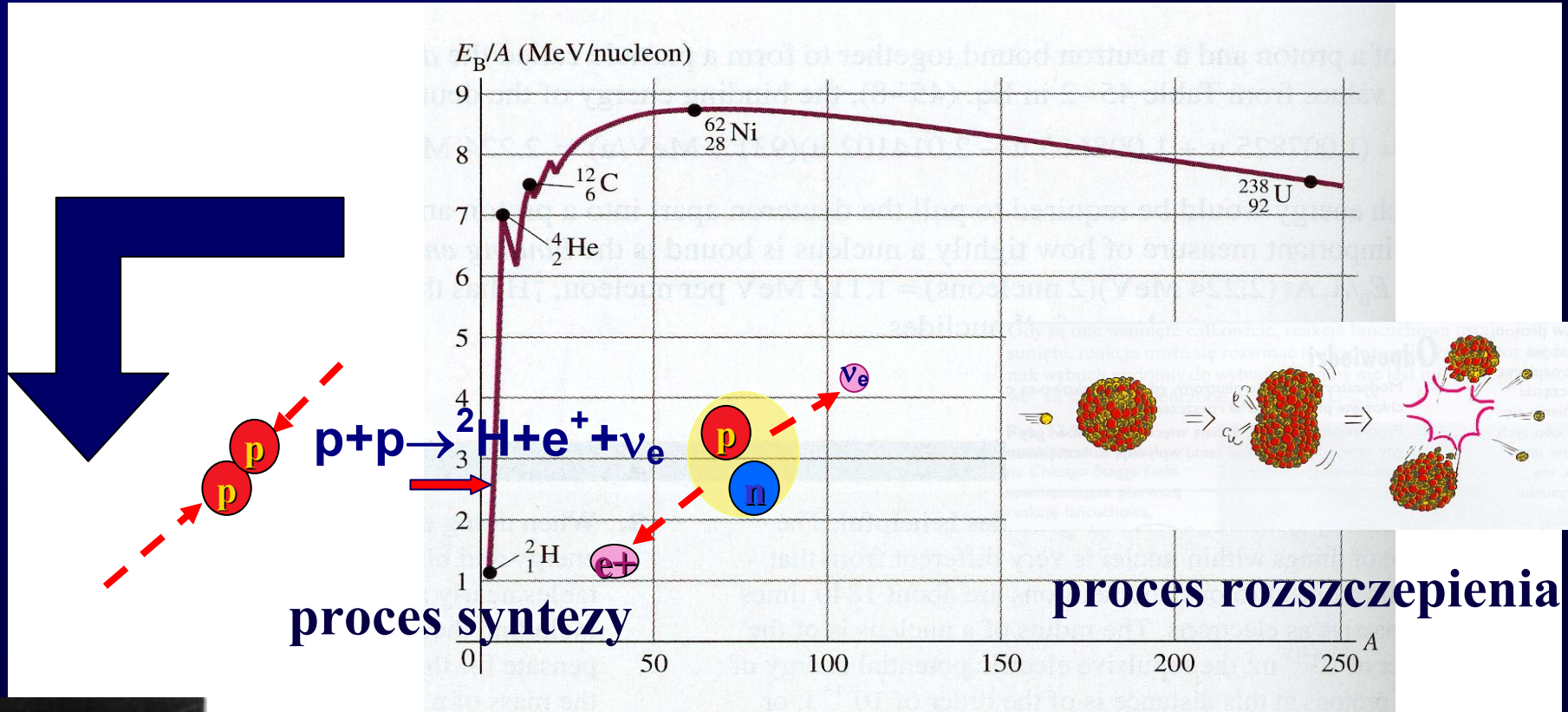
**Na przykładzie Francji widać
najwyraźniej,
że rozwój energetyki jądrowej
sprzyja środowisku.
Wzrostowi produkcji
elektryczności
towarzyszył związany z tym
procesem
spadek emisji dwutlenku
siarki**



Uzyskiwanie energii z reakcji jądrowych

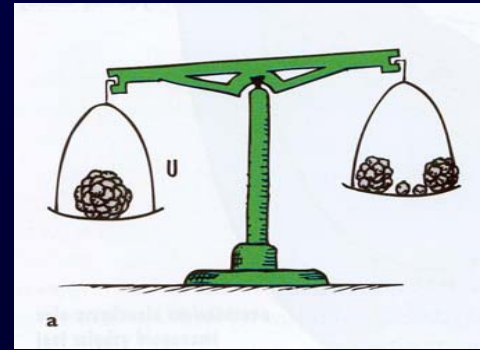
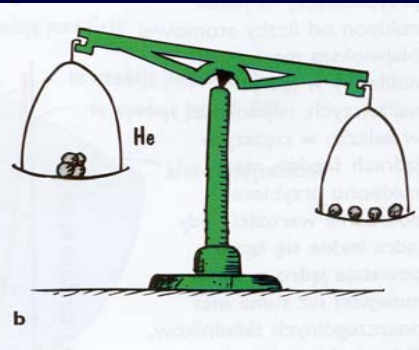


Uzyskiwanie energii z reakcji jądrowych



$$E = \Delta mc^2$$

$$\Delta m$$

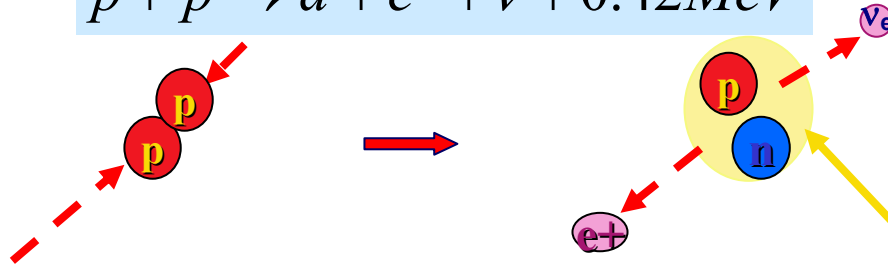


$$\Delta m$$

Uzyskiwanie energii z reakcji jądrowych

FUZJA = synteza termojądrowa

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu + 0.42\text{MeV}$$



$$d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$$

$${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$$

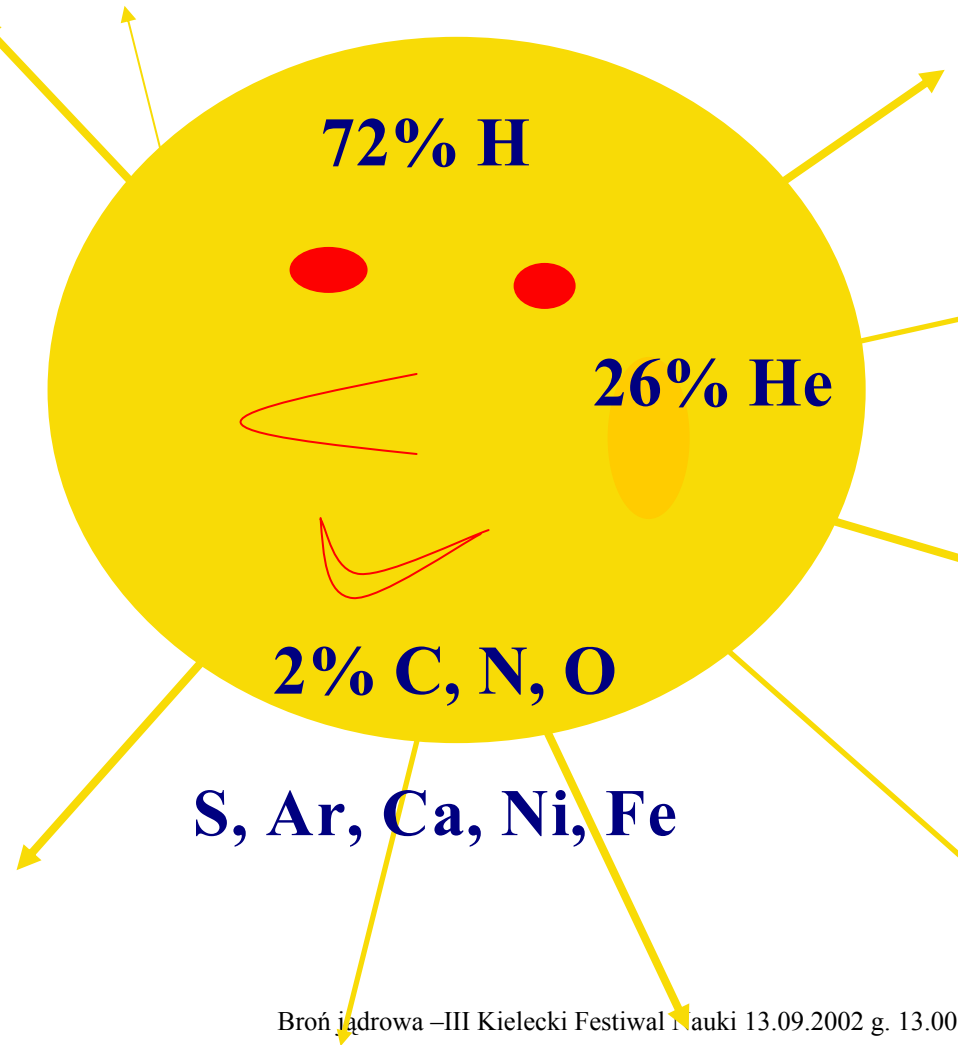
$\downarrow \beta$

$${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2{}^4\text{He}$$

$${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$$

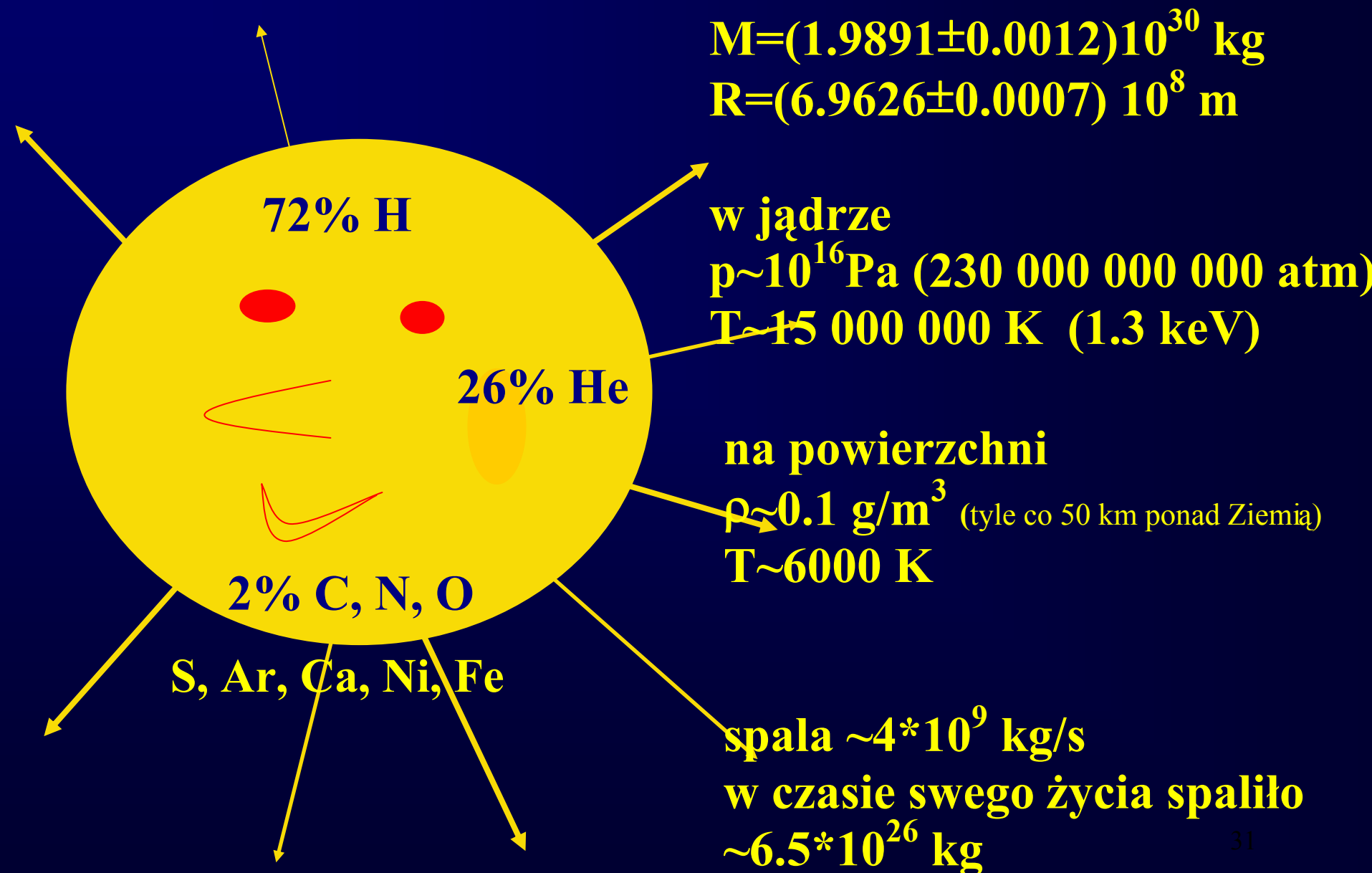
$\downarrow \beta$

$${}^8\text{B} \rightarrow 2{}^4\text{He}$$



Słońce

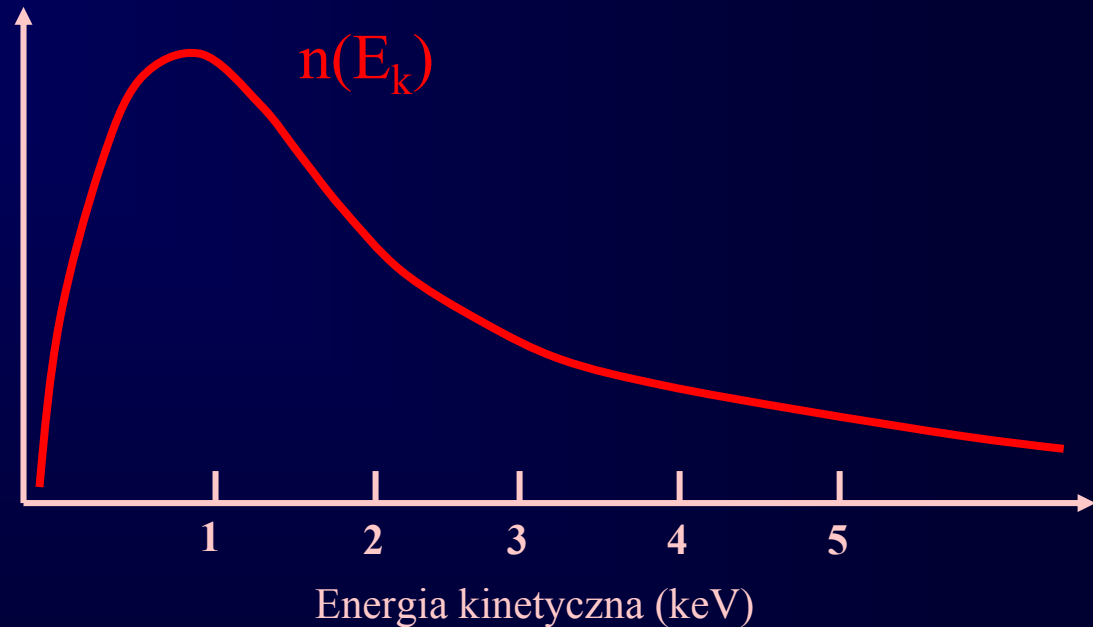
procesy zachodzące w Słońcu



dla reakcji $p+p$ bariera kulombowska wynosi 400keV !!!!!

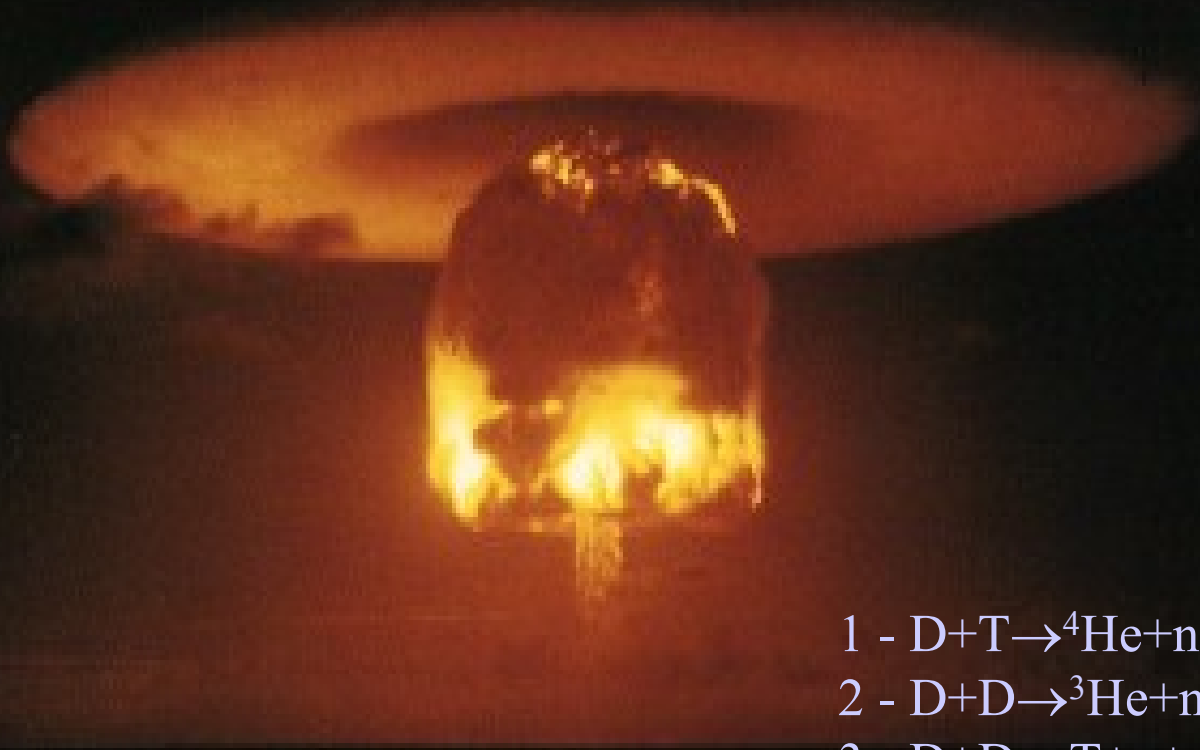
w jądrze Słońca

$T \sim 15\,000\,000\text{ K}$ (1.3 keV)



Gdzie znaleziono odpowiednie warunki do zajścia procesu
rozszczenia i procesu syntezy?

1 listopada 1952 rok



- 1 - $D+T \rightarrow {}^4\text{He}+n+17.6 \text{ MeV}$
- 2 - $D+D \rightarrow {}^3\text{He}+n+3.27\text{MeV}$
- 3 - $D+D \rightarrow T+p+4.03\text{MeV}$
- 4 - ${}^3\text{He}+D \rightarrow {}^4\text{He}+p+18.4 \text{ MeV}$
- 5 - ${}^6\text{Li}+n \rightarrow T+{}^4\text{He}+4.78 \text{ MeV}$
- 8 - ${}^7\text{Li}+n \rightarrow T+{}^4\text{He}+n-2.47\text{MeV}$

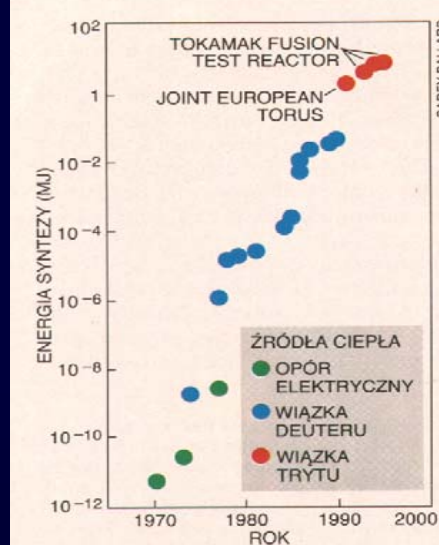
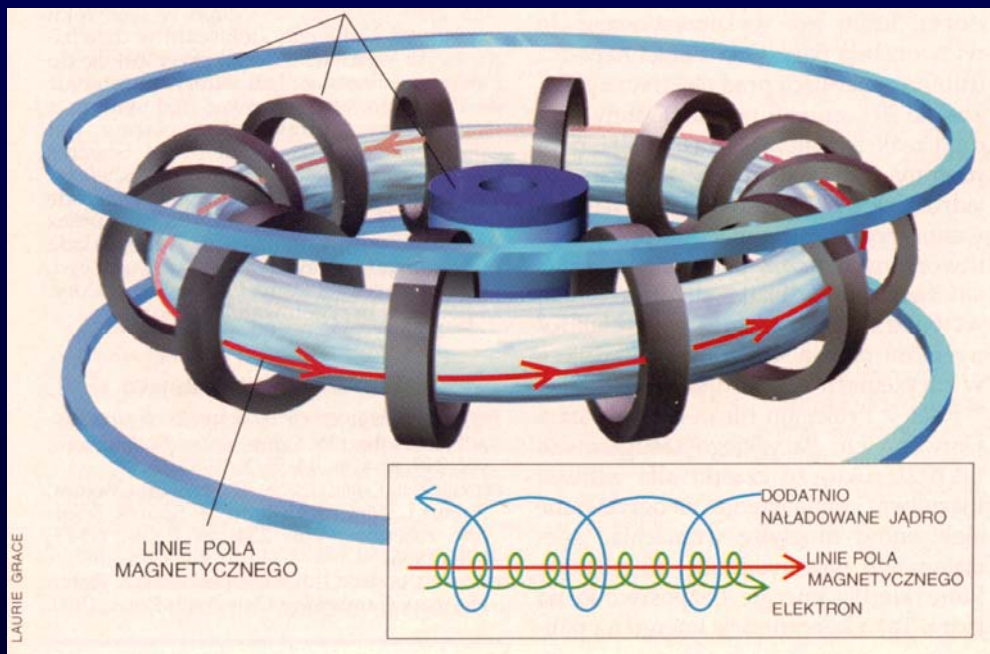
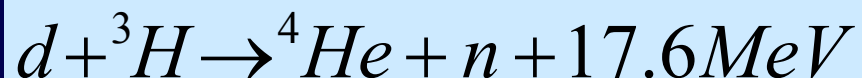
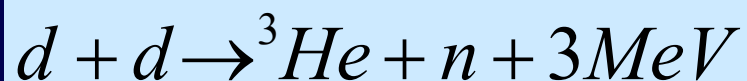
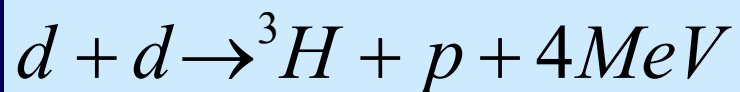
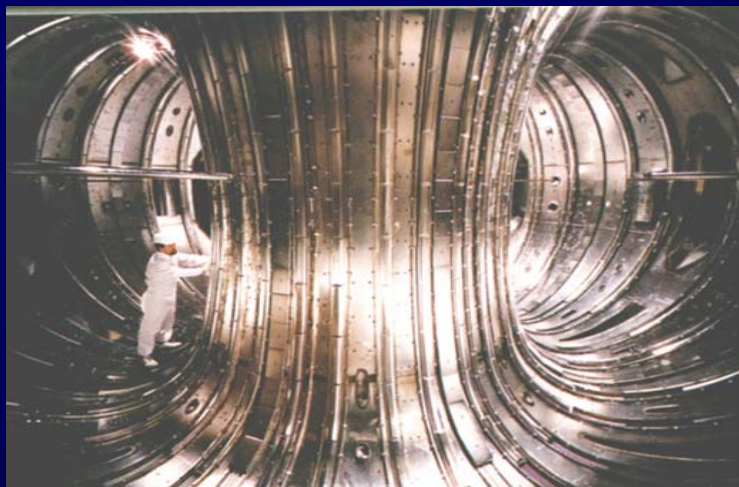
Budowa reaktora termojądrowego to

- duża koncentracja cząstek n – aby zderzenia prowadzące do syntezy zachodziły odpowiedni często
- wysoka temperatura plazmy T – aby zderzające się cząstki mogły pokonać rozdzielającą je barierę kulombowską. W warunkach laboratoryjnych udało się uzyskać plazmę o temperaturze 35 keV, czyli $4 \cdot 10^8$ K co jest wartością 30 razy większą niż temperatura we wnętrzu Słońca.
- długi czas utrzymania τ – zasadniczym problemem jest utrzymanie plazmy o odpowiednio wysokiej gęstości i temperaturze przez czas na tyle długi, żeby w reakcji syntezy mogła wziąć udział znaczna część paliwa – stosuje się dwie metody
- można wykazać, że warunkiem działania reaktora termojądrowego, w którym zachodzi reakcja d-t jest

$$n\tau > 10^{20} \text{s/m}^3 \quad - \quad \text{kryterium Lawsona}$$

Utrzymywanie magnetyczne

Tokamak – pułapka magnetyczna



ENERGIA wyzwolana w syntezie w różnych tokamakach na całym świecie systematycznie zwiększała się w ciągu ostatnich dziesięcioleci. Znaczny postęp osiągnięto, grzejąc paliwo wstrzykiwanymi jonami o wysokiej energii.

Utrzymywanie inercyjne

- polega na „ostrzeliwaniu” ze wszystkich stron stałej kapsułki z paliwem za pomocą światła laserowego o dużym natężeniu
- następuje częściowe odparowanie materii z powierzchni kapsułki, dzięki czemu powstaje skierowana do wnętrza fala uderzeniowa, która ściska paliwo w środku kapsułki
- w Lawrence Livermore Laboratory używa się mniejszych niż ziarenka piasku kapsułek z paliwem d-t
- kapsułki oświetla się za pomocą dziesięciu rozmieszczonych symetrycznie wiązek laserowych
- impulsy dobrano tak, by każda kapsułka otrzymywała 200 kJ energii w czasie krótszym niż 1 ns – odpowiada to mocy w impulsie równej $2 \cdot 10^{14} \text{ W}$, czyli 100 razy więcej niż stała moc wszystkich elektrowni na kuli ziemskiej
- kapsułki z paliwem mają eksplodować niczym miniaturowe bomby wodorowe

PRODUKCJA ENERGII

NIEODŁĄCZNY PROCES NASZEJ CYWILIZACJI

ENERGIA?

Europe by night -
widok z pokładu satelity

Jakie jej formy są niezbędne do naszego życia

- energia elektryczna
- energia cieplna
- żywność jako forma energii

do czego jest wykorzystywana?

GDZIE SĄ ODBIORCY?

