

Fizyka jądrowa

Budowa jądra atomu

- Jądro atomowe składa się z **protonów i neutronów** związanych siłami jądrowymi, niezależnymi od ładunku.
- Neutron i proton określa się wspólną nazwą **nukleon**.
- Jądra o tej samej liczbie protonów, różniące się liczbą neutronów nazywamy **izotopami**.
- Łączna liczba protonów i neutronów w jądrze → **liczba masowa A** jądra.
- Liczba neutronów jest dana równaniem $A - Z$, (Z jest liczbą protonów zwaną **liczbą atomową**).
- Wartość liczby A dla jądra atomowego jest bardzo bliska **masie** odpowiadającego mu atomu.

Atom pierwiastka X o liczbie atomowej Z i liczbie masowej A oznaczamy

symbolem A_ZX

Pomiary rozpraszania wysokoenergetycznych protonów lub neutronów na jądrach atomowych → jądra mają kształt kulisty

$$R = (1.2 \cdot 10^{-15}) A^{1/3} \text{ m}$$

średni promień jąder (oprócz najmniejszych)

Liczba nukleonów (na jednostkę objętości) dla jądra o promieniu R i liczbie masowej A

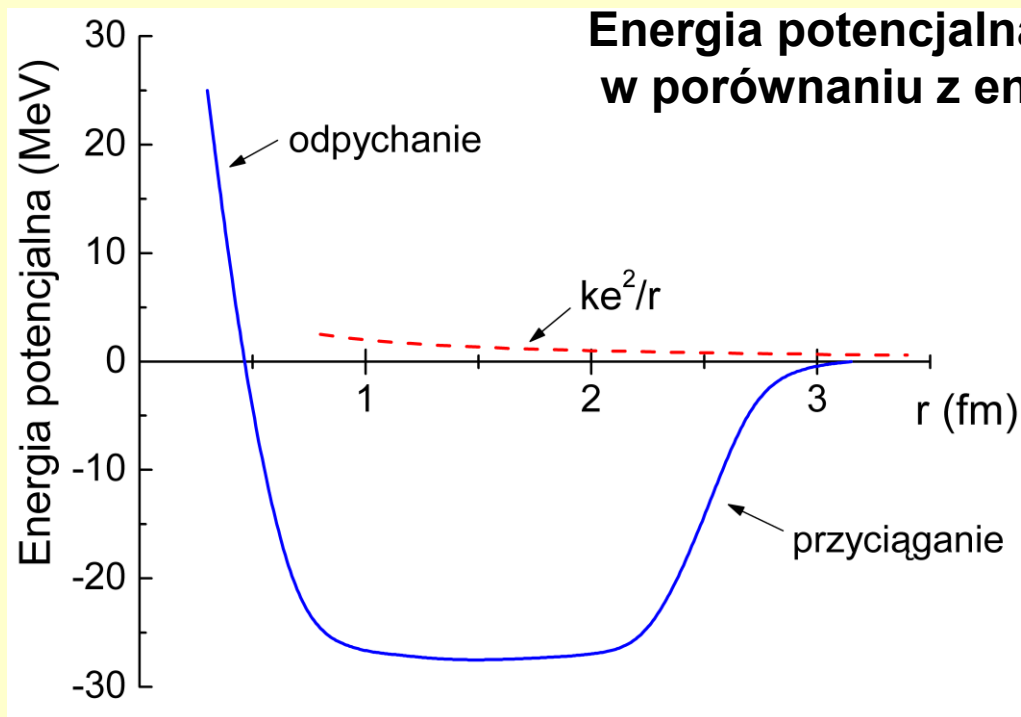
$$\begin{aligned} N &= \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi [(1.2 \cdot 10^{-15} \text{ m}) A^{1/3}]^3} = \\ &= 1.38 \cdot 10^{44} \text{ nukleonów/ m}^3 \end{aligned}$$

gęstość $\rho = NM = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$

Masa protonu = masie neutronu → $M = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Oddziaływanie nukleon-nukleon

Siła jądrowa (oddziaływanie silne) → wiąże nukleony w jądrach atomowych → większa niż siła odpychania elektrostatycznego występująca pomiędzy protonami.



Oddziaływania proton - proton, proton - neutron i neutron - neutron są identyczne i nazywamy je **oddziaływaniami nukleon - nukleon**.

Masy atomowe i energie wiązań można wyznaczyć doświadczalnie w oparciu o spektroskopię masową lub bilans energii w reakcjach jądrowych.

Jednostki

Masa jest podawana w jednostkach masy atomowej (u). Za wzorzec przyjmuje się 1/12 masy atomowej węgla.

	Z	A	Masa (u)	ΔE (MeV)	$\Delta E/A$
${}^1_0\text{n}$	0	1	1.0086654	-	-
${}^1_1\text{H}$	1	1	1.0078252	-	-
${}^4_2\text{He}$	2	4	4.0026033	28.3	7.07
${}^9_4\text{Be}$	4	9	9.0121858	58.0	6.45
${}^{12}_6\text{C}$	6	12	12.0000000	92.2	7.68
${}^{16}_8\text{O}$	8	16	15.994915	127.5	7.97
${}^{63}_{29}\text{Cu}$	29	63	62.929594	552	8.50
${}^{120}_{50}\text{Sn}$	50	120	119.9021	1020	8.02
${}^{184}_{74}\text{W}$	74	184	183.9510	1476	8.02
${}^{238}_{92}\text{U}$	92	238	238.05076	1803	7.58

Przykład: porównujemy masę atomu ${}^4_2\text{He}$ z sumą mas jego składników

$$M({}^4_2\text{He}) = 4.0026033 \text{ u}$$

$$2M({}^1_1\text{H}) + 2M({}^1_0\text{n}) = 2 \cdot 1.0078252 \text{ u} + 2 \cdot 1.0086654 \text{ u} = 4.0329812 \text{ u}$$

Masa helu jest mniejsza od masy składników o 0.0303779 u

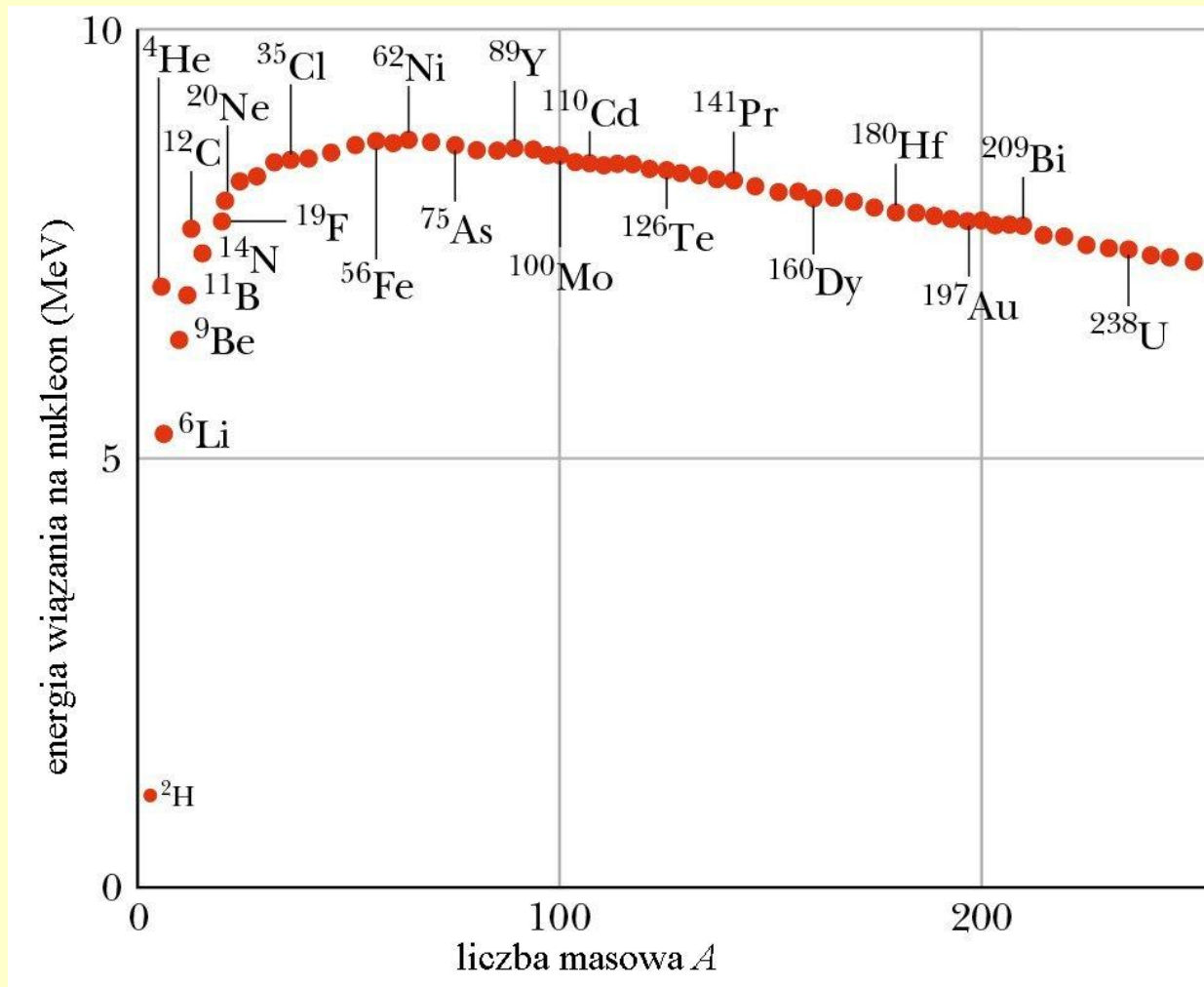
Dla każdego atomu jego masa jest mniejsza od masy składników o wielkość ΔM zwaną niedoborem masy lub **defektem masy**.

Gdy układ oddzielnych swobodnych nukleonów łączy się w jądro - energia układu zmniejsza się o wartość ΔE energii wiązania jądra.

Z teorii względności: $E = mc^2$



$$\Delta E = \Delta M c^2$$



Najsilniej są wiązane nukleony w jądrach pierwiastków ze środkowej części układu okresowego.

Krótki zasięg sił jądrowych $\rightarrow$ wielkość $\Delta E/A$ nie jest stała !!!

Rozpady jądrowe

Rozpady jądrowe zachodzą jeśli jądro znajdzie się w stanie energetycznym, nie będącym najniższym możliwym dla układu o danej liczbie nukleonów.

Jądra nietrwałe pochodzenia naturalnego są nazywane promieniotwórczymi, a ich rozpady noszą nazwę rozpadów promieniotwórczych.



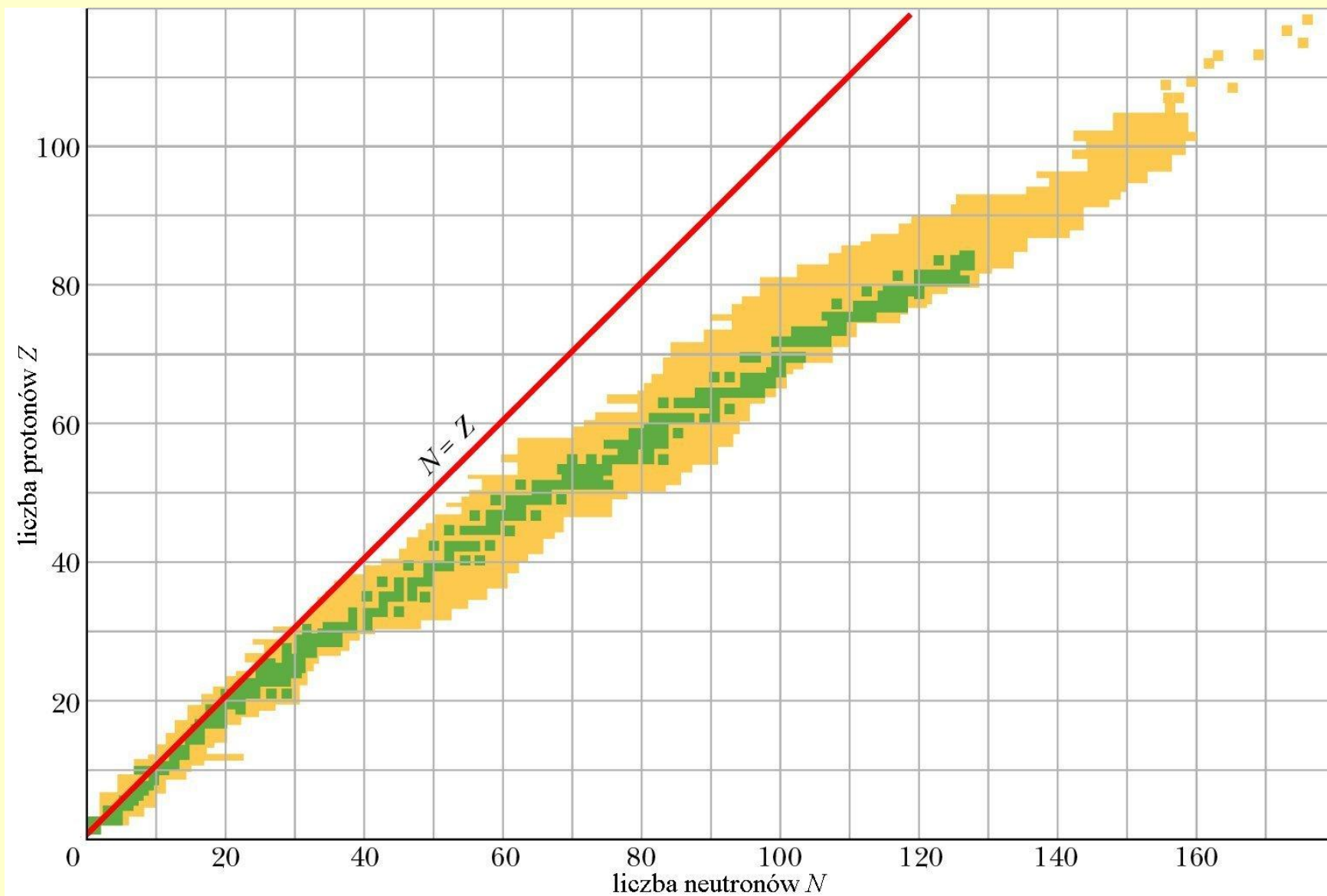
Informacje o jądrach atomowych, ich budowie, stanach energetycznych, oddziaływaniach; również informacje o pochodzeniu Wszechświata.

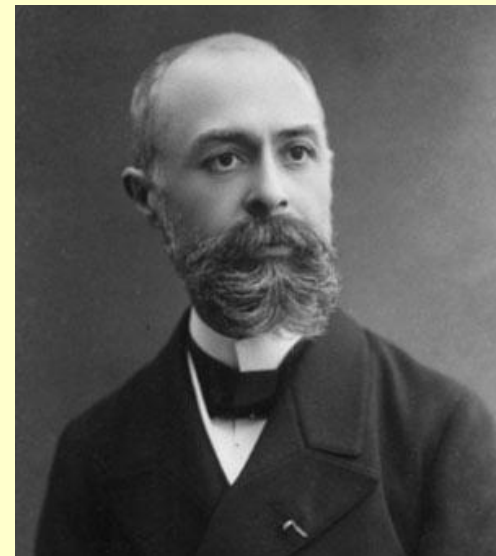
Znane są trzy rodzaje promieniowania:

- **alfa (α)** - jądra helu,
- **beta (β)** - elektrony lub pozytony,
- **gamma (γ)** - fotony.

■ jądra stabilne

■ jądra promieniotwórcze





Maria Curie Skłodowska, Pierre Curie i Antoine Henri Becquerel

Maria Curie – Skłodowska została dwukrotnie uhonorowana **Nagrodą Nobla:**

W dziedzinie fizyki w 1903 r. wraz z mężem Piotrem Curie oraz Becquerelem za prace nad promieniotwórczością (Becquerel odkrył promieniotwórczość).

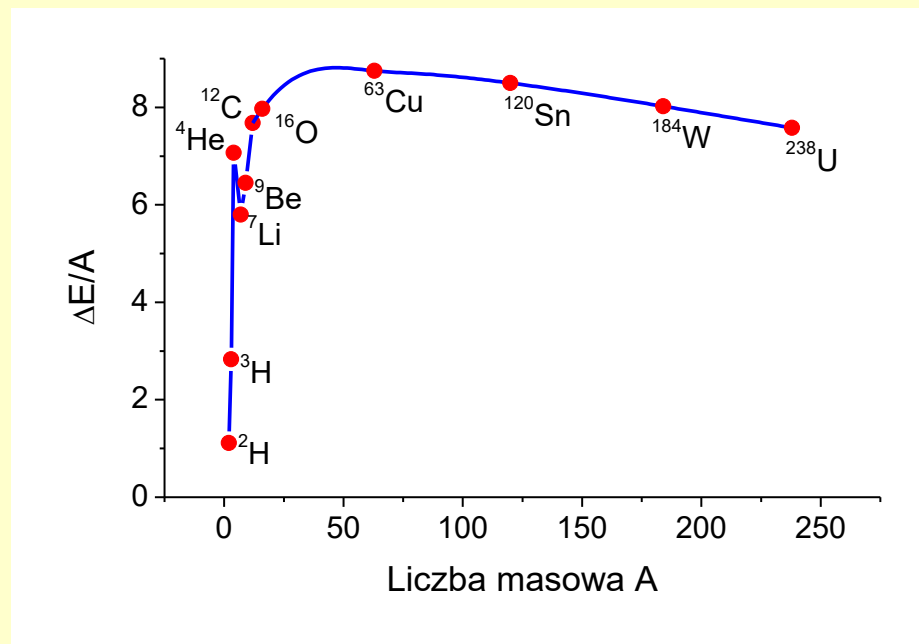
W dziedzinie chemii 1911 r. za rozwój chemii dzięki odkryciu polonu i radu oraz za zbadanie metalicznego radu i jego związków chemicznych.

Rozpad alfa

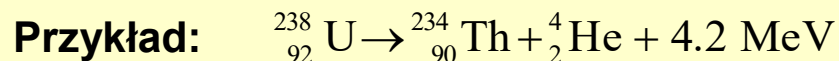
Rozpad alfa → przemiana niestabilnego jądra w nowe jądro przy emisji jądra ${}^4\text{He}$ tzn. cząstki α . Występuje zazwyczaj w jądrach o $Z \geq 82$.

Dla ciężkich jąder energia wiązania nukleonu **maleje ze wzrostem liczby masowej** → **zmniejszenie liczby nukleonów** (w wyniku wypromieniowania cząstki α) → powstanie **silniej związanego jądra**.

Proces zachodzi samorzutnie bo jest korzystny energetycznie.



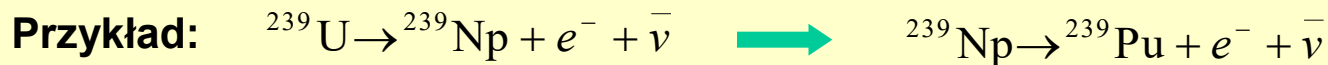
Energia wyzwolona w czasie rozpadu (energetyczny równoważnik niedoboru masy) jest unoszona przez cząstkę α w postaci energii kinetycznej.



Rozpad beta

Jeżeli jądro ma większą od optymalnej liczbę neutronów to w jądrze takim zachodzi **przemiana neutronu w proton - rozpad beta (minus) β^-** .

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad \bar{\nu} - \text{antyneutrino}$$



Gdy jądro ma nadmiar protonów to zachodzi proces przemiany protonu w neutron - **rozpad beta (plus) β^+** .

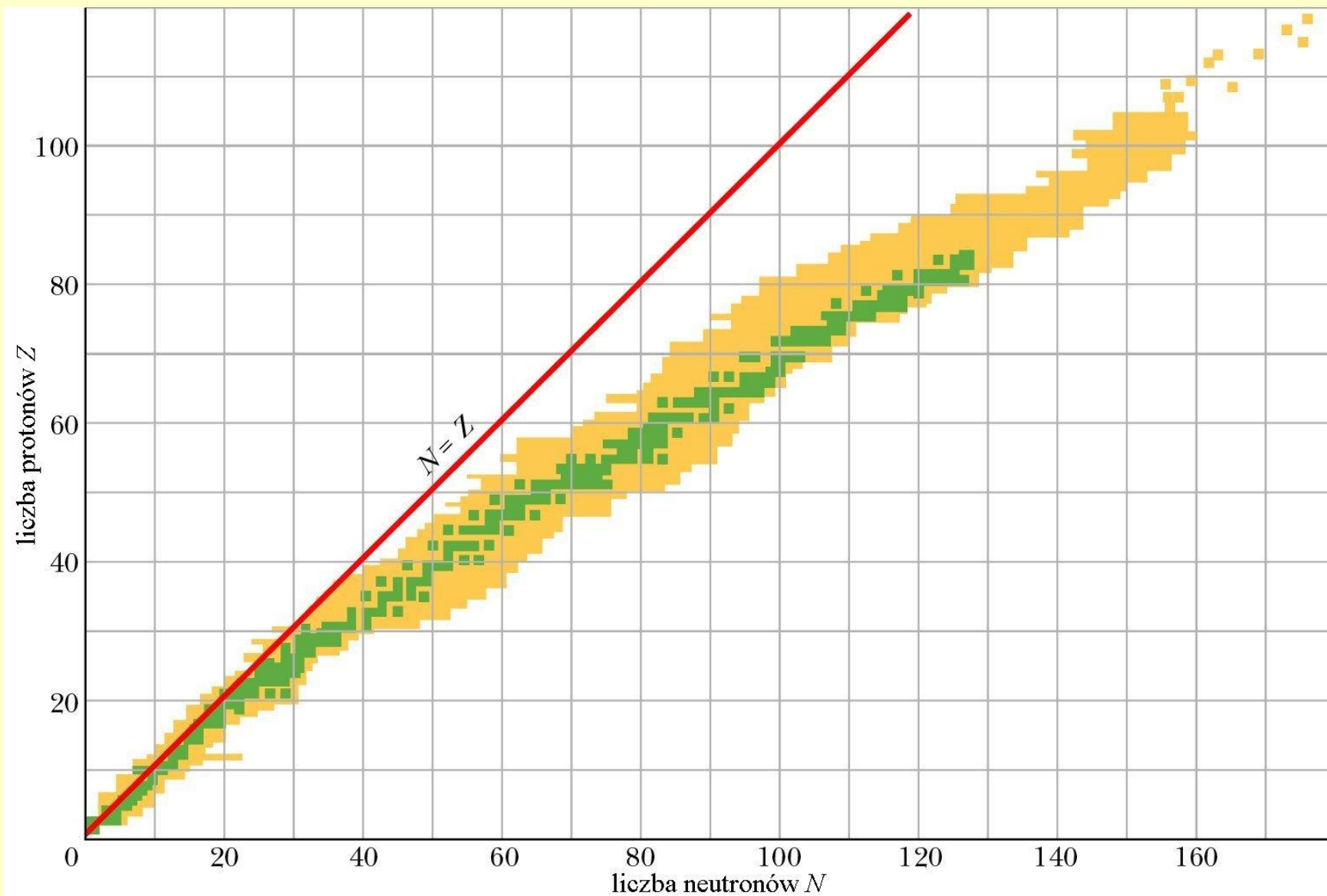
$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \quad \nu - \text{neutrino}$$

Promieniowanie gamma

Rozpadom alfa i beta towarzyszy zazwyczaj emisja **wysokoenergetycznego promieniowania elektromagnetycznego** zwanego promieniowaniem **gamma (γ)**. Kwanty promieniowania γ mają **bardzo wysoką energię** (tysiące razy większą od energii fotonów wysyłanych przez atomy).

■ jądra stabilne

■ jądra promieniotwórcze



Prawo rozpadu nuklidów

Eksperyment → liczba jąder rozpadających się w jednostce czasu jest proporcjonalna do aktualnej liczby jąder N .

$$dN = -\lambda N dt$$

λ - stała rozpadu

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$$\int_{N(0)}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad \Rightarrow \quad \ln N(t) - \ln N(0) = \ln \frac{N(t)}{N(0)} = -\lambda t \quad \Rightarrow \quad \frac{N(t)}{N(0)} = e^{-\lambda t}$$

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$

$N(0)$ jest liczbą jąder w chwili $t = 0$, a $N(t)$ liczbą jąder po czasie t .

lub:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

N można opisać poprzez średni **czas życia jąder τ** :

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$

Szybkość rozpadu $\rightarrow$ czas połowicznego rozpadu (zaniku) T .

T czas, po którym liczba jąder danego rodzaju maleje do połowy

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-T/\tau} \qquad 2 = e^{T/\tau}$$

$$T = \tau \ln 2 = 0.693 \tau$$

Czasy połowicznego zaniku pierwiastków leżą w bardzo szerokim przedziale.

$^{238}\text{U} \rightarrow T = 4.5 \cdot 10^9$ lat (porównywalny z wiekiem Ziemi), $^{212}\text{Po} \rightarrow T = 10^{-6}$ s.

Datowanie

Znajomość czasu połowicznego rozpadu → rozpad radionuklidów = zegar

Przykłady:

- **$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ z $T = 1.25 \times 10^9$ lat → pomiar proporcji $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ w skałach pozwala ustalić ich wiek. Podobnie $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ (cykl rozpadów).
Pomiary meteorytów, skał ziemskich i księżycowych → wiek Ziemi około 5×10^9 lat**

Krótsze okresy czasu → datowanie radioaktywnym węglem ^{14}C ($T = 5730$ lat)

^{14}C powstaje w atmosferze w wyniku bombardowania przez promieniowanie kosmiczne azotu. 1 atom ^{14}C przypada na 1013 atomów ^{12}C → w organizmach żywych równowaga izotopowa.

Po śmierci wymiana z atmosferą ustaje → ilość radioaktywnego węgla maleje (rozpad) → określenie wieku materiałów pochodzenia biologicznego.

Przypomnienie/podsumowanie:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Prawo rozpadu
promieniotwórczego

(λ - stała rozpadu)

N_0 jest liczbą jąder w chwili $t = 0$, a $N(t)$ liczbą jąder po czasie t .

$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$

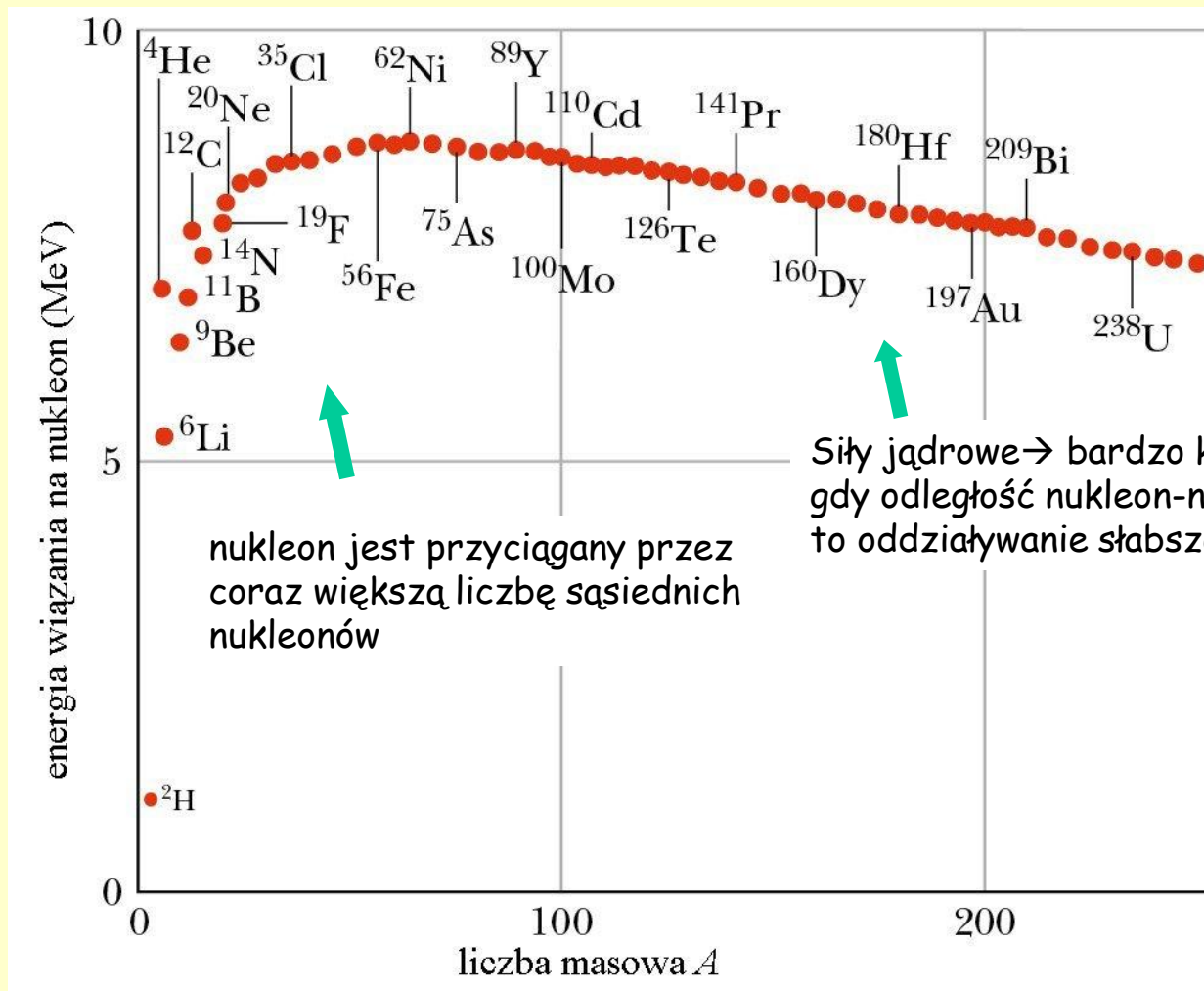
$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

τ - średni czas
życia jąder

$$T = \tau \ln 2 = 0.693 \tau$$

czas połowicznego zaniku
(okres połowicznego rozpadu)

Reakcje jądrowe



Zjawiska rozszczepienia i syntezy jądrowej

Reakcja rozszczepienia

Jeżeli ciężkie jądro rozdzielimy na dwie części → dwa mniejsze jądra są silniej wiązane od jądra wyjściowego → te dwie części mają masę mniejszą niż masa jądra wyjściowego.



W reakcji rozszczepienia wydzielą się energia.

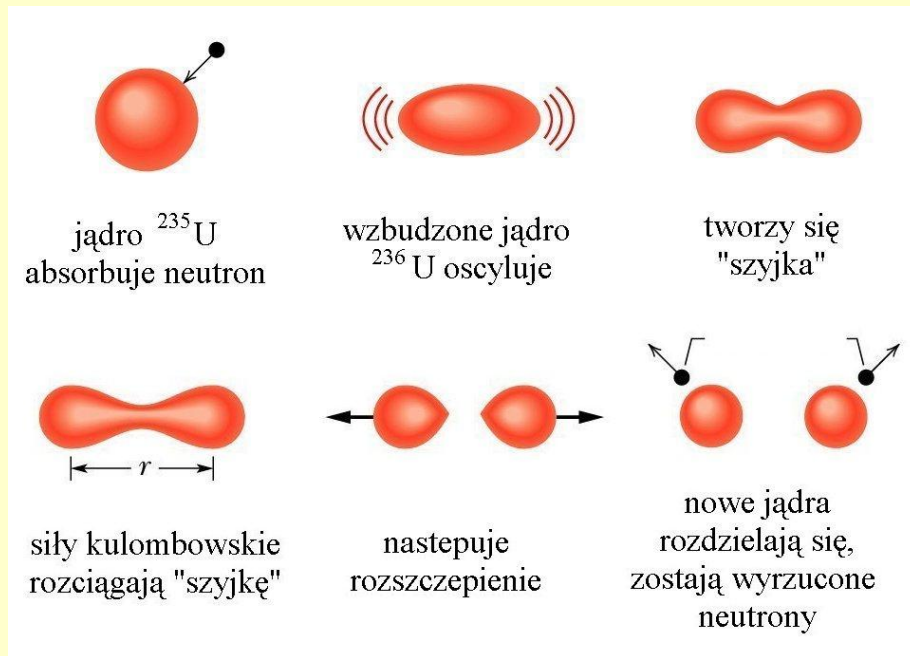


Źródło energii reaktora jądrowego

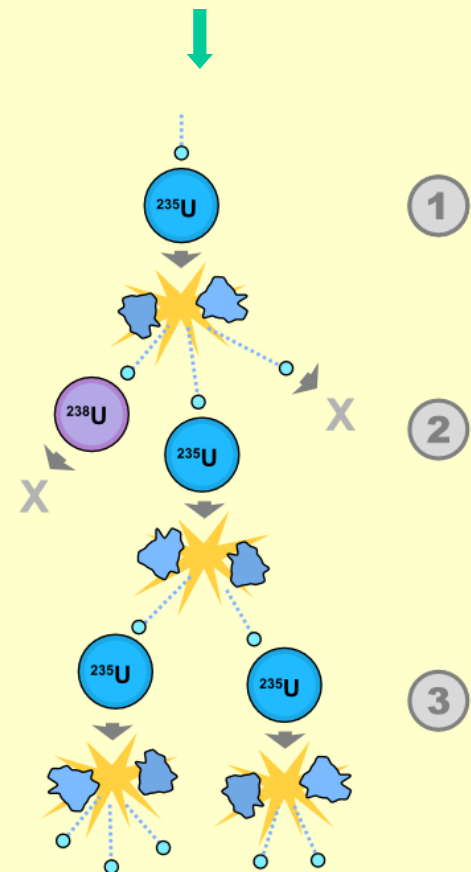
Spontaniczne rozszczepienie naturalnego jądra jest na ogół mniej prawdopodobne niż rozpad α tego jądra.

Bombardowanie jądra neutronami o niskiej energii → rozszczepienia uranu ^{235}U i plutonu ^{239}Pu .

typowa reakcja rozczepienia: $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow ^{140}\text{Xe} + ^{94}\text{Sr} + 2n$

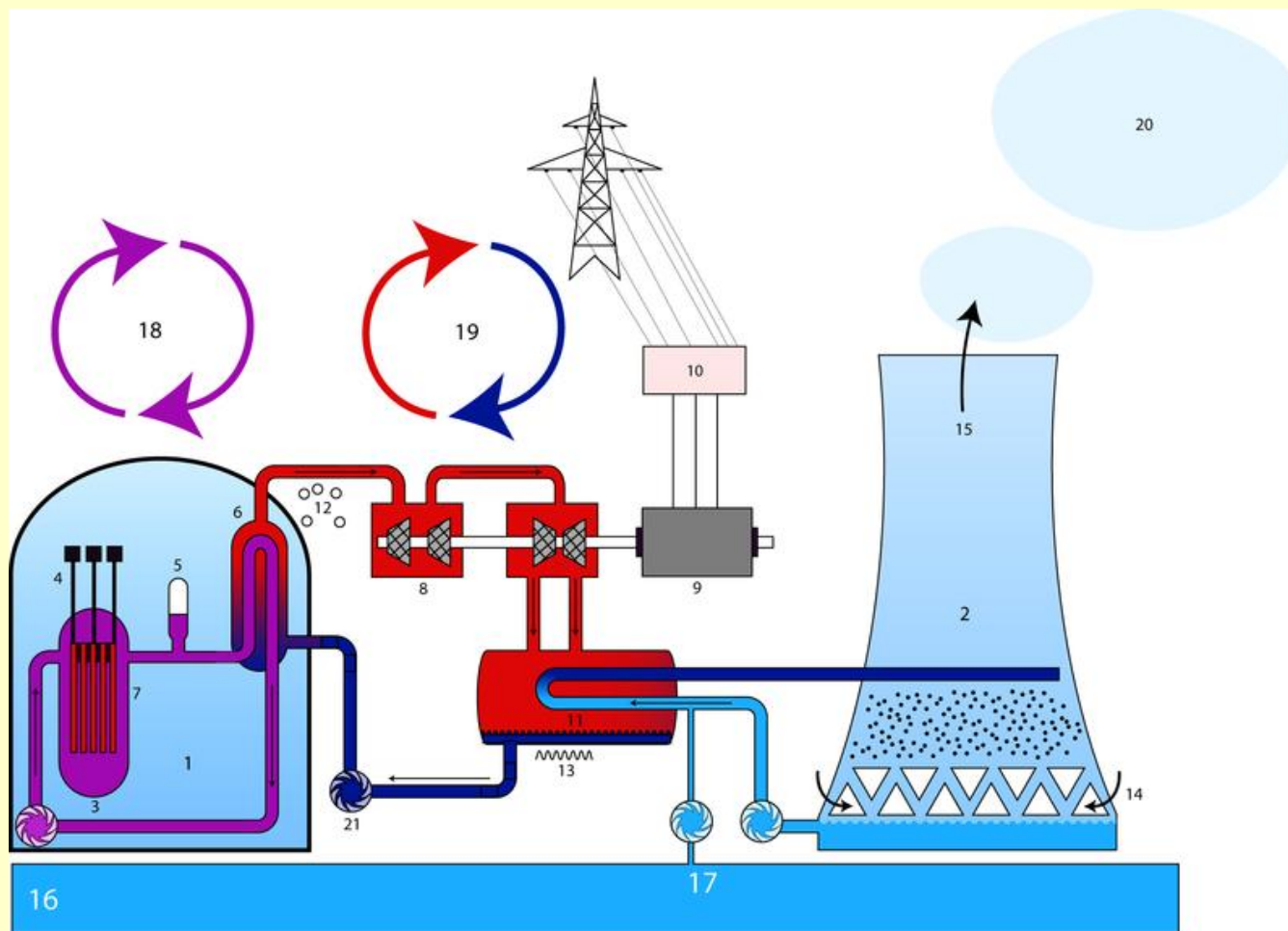


W reakcji rozszczepienia powstaje na ogół kilka neutronów.



Mamy do czynienia z **lawinową reakcją łańcuchową**.

Elektrownia jądrowa



1. Blok reaktora 2. Komin chłodzący 3. Reaktor 4. Pręty kontrolne 5. Zbiornik wyrównawczy ciśnienia 6. Generator pary 7. Zbiornik paliwa 8. Turbina 9. Prądnicza 10. Transformator 11. Skraplacz 12. Stan gazowy 13. Stan ciekły 14. Powietrze 15. Wilgotne powietrze 16. Rzeka 17. Układ chłodzenia 18. I obieg 19. II obieg 20. Para wodna 21. Pompa

Reakcja syntezy jądrowej

Masa dwóch lekkich jąder > masa jądra powstającego po ich połączeniu.



Wydziela się energia związana z różnicą mas.

Przykład: połączenie dwóch deuteronów ${}^2_1\text{H}$ w jądro helu $\rightarrow$ 0.6% masy zostaje zamienione na energię.

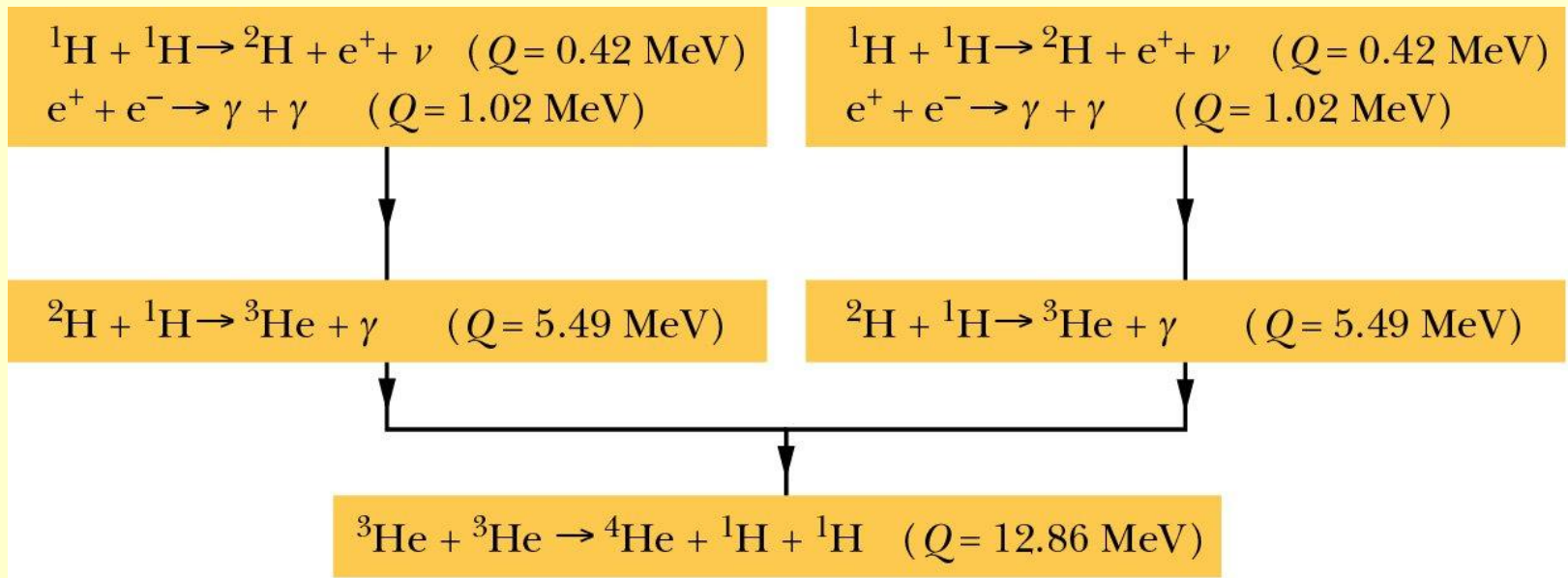
Metoda perspektywiczna - dysponujemy nieograniczonym źródłem deuteru w wodzie mórz i oceanów.

Przeszkoda $\rightarrow$ **odpychanie kulombowskie** $\rightarrow$ protony trzeba zbliżyć na $2 \cdot 10^{-15}$ m

Reakcja jest możliwa w temperaturze około $5 \cdot 10^7$ K.

Reakcje, które wymagają takich temperatur nazywamy **reakcjami termojądrowymi**

Cykl wodorowy



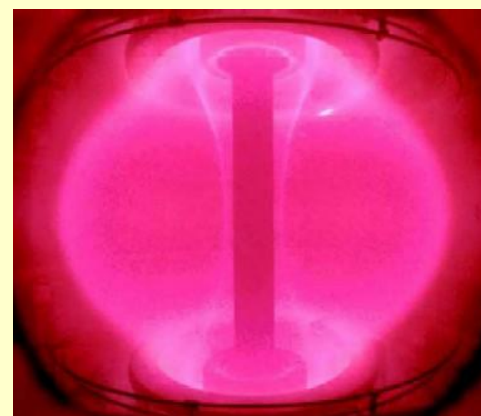
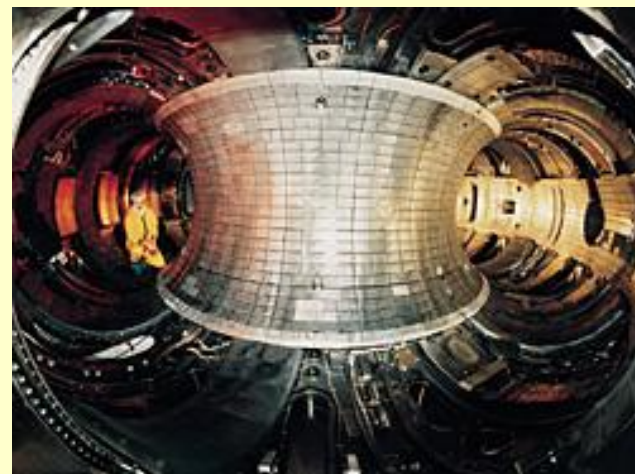
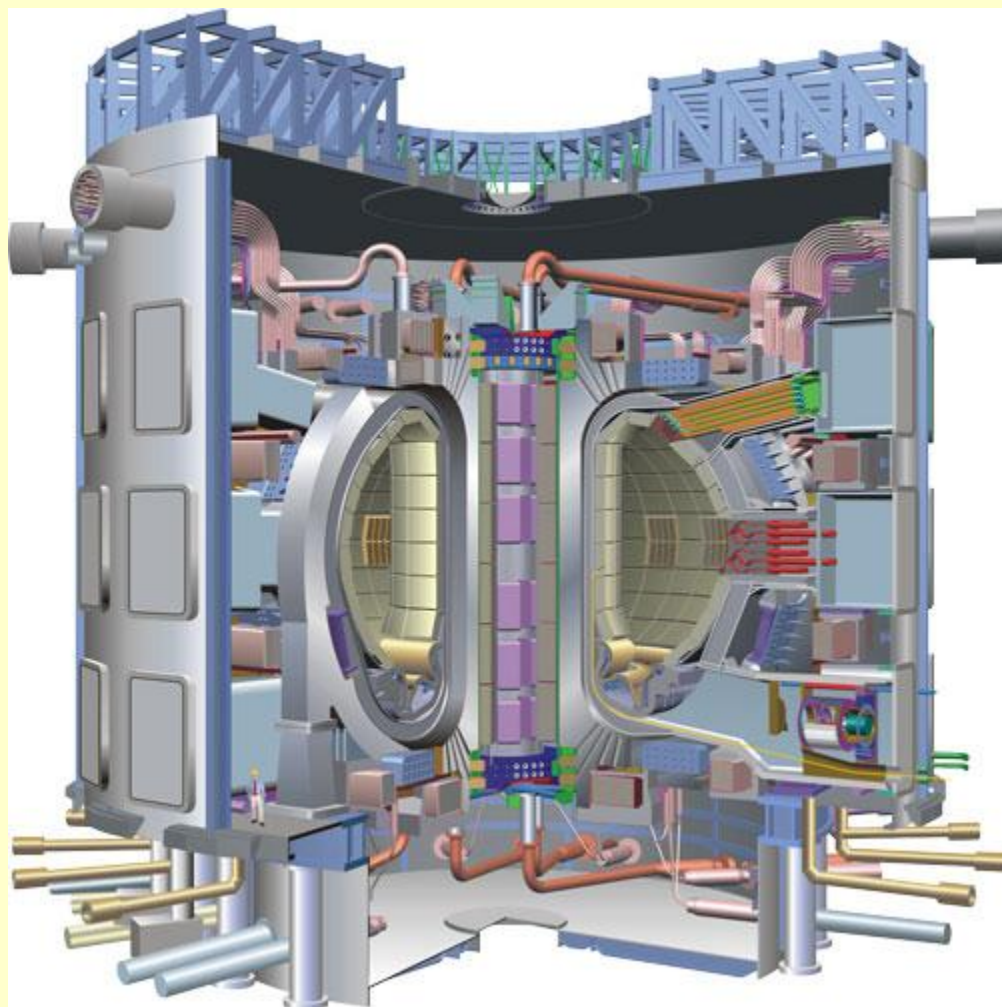
Masa jądra helu stanowi 99.3% masy czterech protonów → wydzielą się energia związana z różnicą mas.

Energia wytwarzana przez Słońce → w ciągu sekundy 592 miliony ton wodoru zamieniają się w 587.9 milionów ton helu.

Różnica tj. 4.1 miliony ton jest zamieniana na energię (w ciągu sekundy). Odpowiada to mocy około $4 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

ITER – reaktor termojądrowy w budowie

International Thermonuclear Experimental Reactor



w pobliżu Marsylii, na południu Francji (koszt 10 miliardów €)

Źródła energii gwiazd

Źródłem energii, które przeciwdziała grawitacyjnemu zapadaniu się gwiazdy są reakcje termojądrowe.

ciśnienie termiczne (wynik reakcji termojądrowych) = ciśnienie grawitacyjne

$$p = \frac{1}{3} n' m \overline{v^2} = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$$

$$\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

$$P_T = \frac{\rho kT}{m_p}$$

m_p - masą protonu
(masa atomu wodoru $\approx$ masa protonu)

$$p = \rho \bar{g} h \quad \bar{g} = \frac{1}{2} g$$

$$P_g = \frac{1}{2} \rho g R \quad g = \frac{GM_s}{R^2}$$

$$\frac{\rho kT}{m_p} = \frac{1}{2} \frac{\rho GM_s}{R}$$

$$P_g = \frac{1}{2} \rho G \frac{M_s}{R}$$

$$R = \frac{GM_s m_p}{2kT}$$

$$R = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$$
$$T \approx 10^7 \text{ K}$$