

Wykład VI



Atom

- Atom: protony, neutrony, elektrony
- 99.9999999999999%

atomu jest pustą przestrzenią

- lokalizacja elektronów jest opisywana funkcją prawdopodobieństwa
- w skład jądra wchodzi protony i neutrony



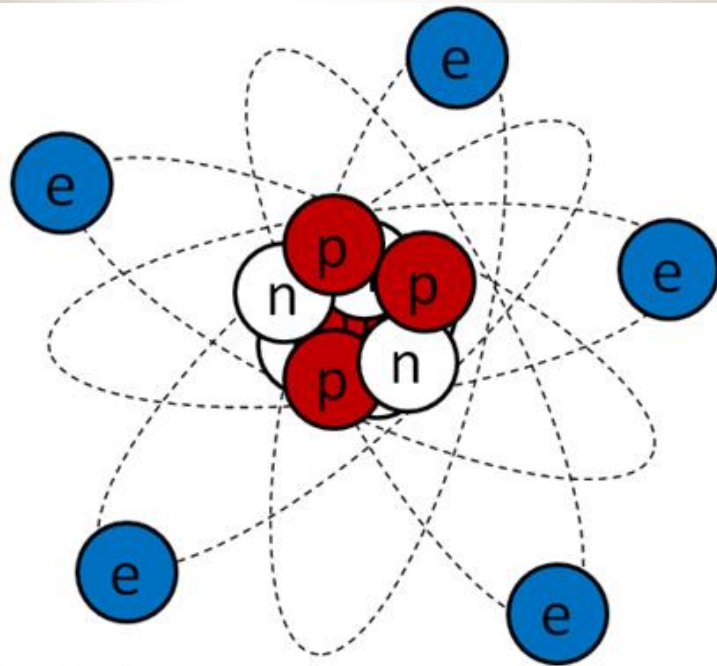
A – liczba masowa (suma mas protonów i neutronów)

Z- liczba atomowa (ładunek jądra)

X - pierwiastek



Jądro atomowe



Matt Strassler 2012

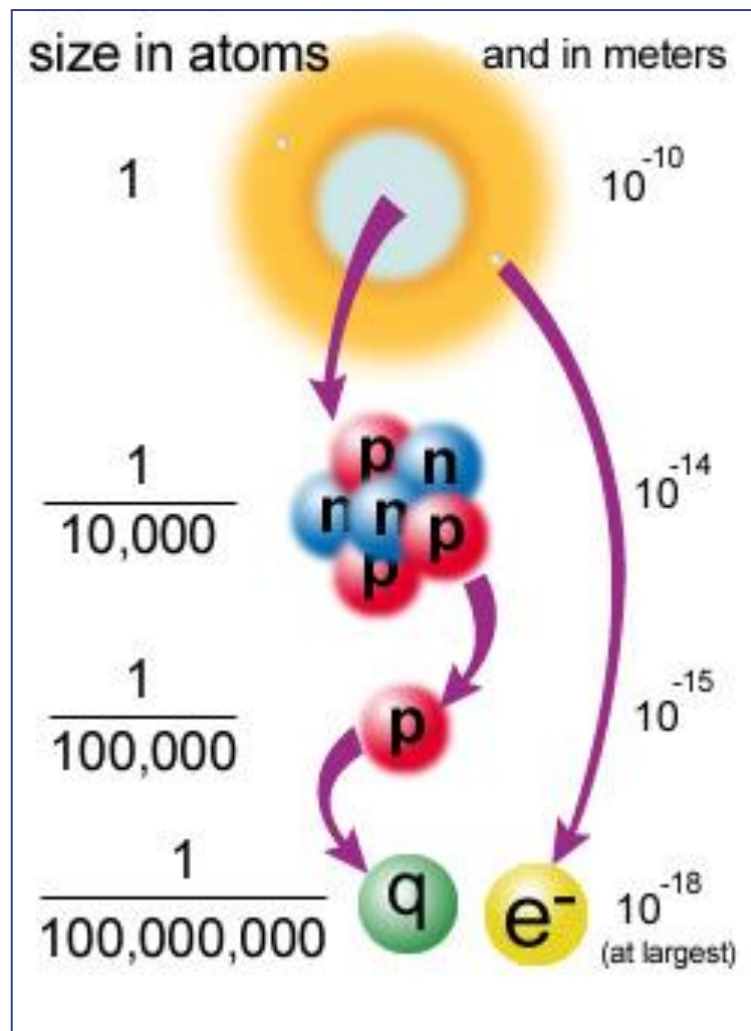
Atom

e - elektron
n - proton
p - neutron

W jądrze liczba protonów jest równa liczbie neutronów. W izotopach pierwiastków liczba neutronów jest większa od liczby protonów. Takie pierwiastki są promieniotwórcze.

- Jądro atomowe składa się z protonów i neutronów.
- Liczba protonów w jądrze określa jego liczbę atomową Z. Liczba neutronów w jądrze określa liczbę neutronową N. Całkowita liczba nukleonów w jądrze to liczba masowa A.
- Jądra atomowe o tej samej liczbie atomowej, ale o różnych liczbach neutronowych, to izotopy tego samego pierwiastka. Symbol jądra: A_ZX

Jądro atomowe – rozmiary

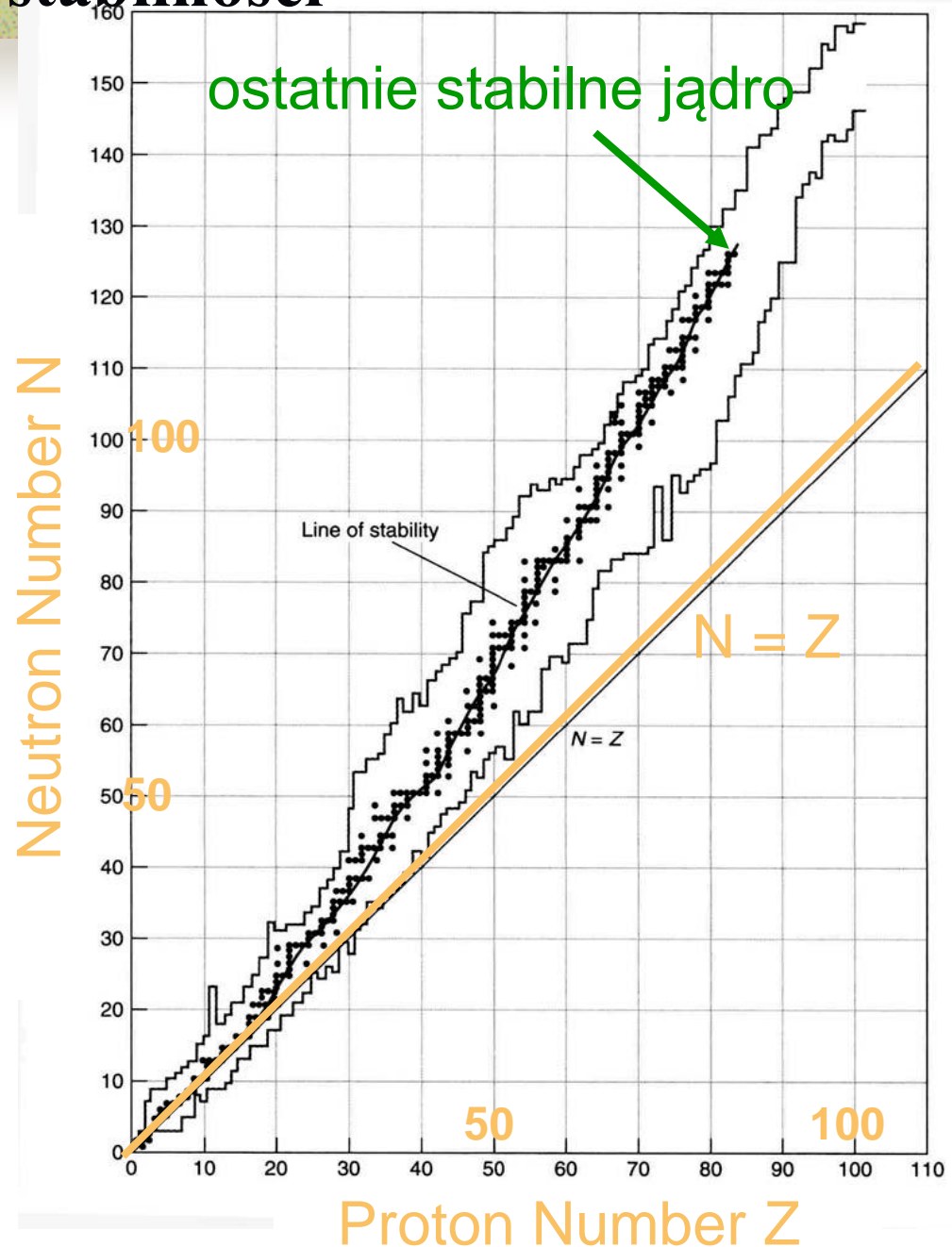


Ścieżka stabilności



Izotopy tego samego pierwiastka różnią się liczbą masową (A - łączną liczbą neutronów i protonów w jądrze), ale mają tę samą liczbę atomową (Z - liczbę protonów w jądrze)

- 3000 znanych izotopów ale jedynie 266 stabilnych
 - jądra o $Z > 83$ nie są stabilne
- Wyjątkowa stabilność dla „liczb magicznych”
 - $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$



Defekt masy

Masa jądra atomowego jest mniejsza od sumy mas neutronów i protonów. Różnica tych mas to tzw. defekt masy:

A_ZX

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_j,$$

Gdzie m_p jest całkowitą masą protonów, m_n całkowitą masą neutronów, a m_j to masa jądra. Według szczególnej teorii względności Einsteina masa jest miarą całkowitej energii układu (m_0c^2). Oznacza to, że całkowita energia jądra jest mniejsza niż suma energii tworzących je nukleonów. Utworzenie jądra z pewnej liczby swobodnych protonów i neutronów jest wobec tego reakcją egzotermiczną, co oznacza, że uwalniana jest energia. Energia wyemitowana (wypromieniowana) w tym procesie wynosi Δmc^2 .

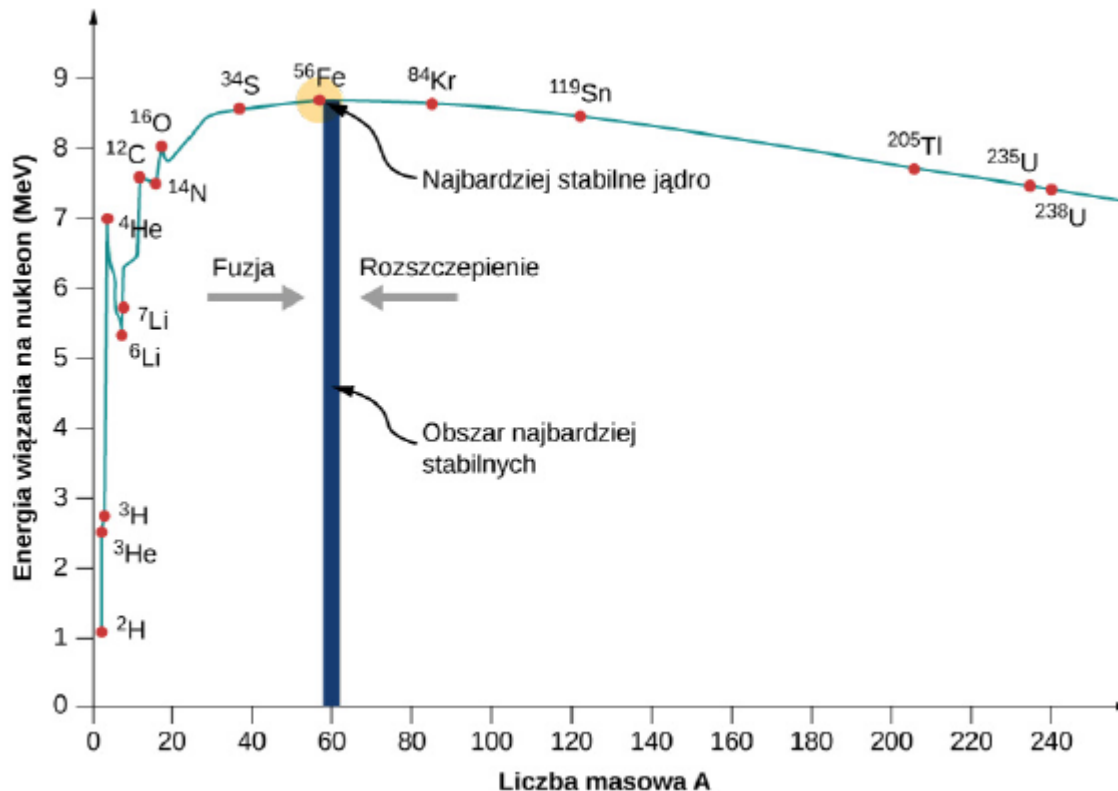
Teraz wyobraźmy sobie, że proces przebiega w odwrotnym kierunku. Zamiast tworzyć jądro, dostarczamy do układu energię, by je rozbić na poszczególne nukleony. Ilość niezbędnej do tego energii nazywa się całkowitą energią wiązania E_w (ang. binding energy).

Energia wiązania na nukleon – energia potrzebna do oderwania jednego nukleonu od jądra.

Energia wiązania jądra jest równa ilości energii uwalnianej przy tworzeniu jądra, czyli wartości defektu masy pomnożonej przez prędkość światła podniesioną do kwadratu.

Energia wiązania/nukleon

Dla małych wartości A przyciągające siły jądrowe pomiędzy nukleonami dominują nad siłami elektrostatycznego odpychania między protonami. Natomiast dla dużych wartości A siły odpychania elektrostatycznego pomiędzy nukleonami zaczynają dominować, dążąc do rozbicia jądra na części.



Żelazo (Fe) ma najwyższą wartość energii wiązania na jeden nukleon.

Wykres energii wiązania na nukleon w zależności od liczby atomowej wskazuje, że przy podziale lub łączeniu jąder wyzwolana jest ogromna ilość energii.

Reakcje syntezy i rozszczepienia

- ▶ Jądra poniżej żelaza ^{56}Fe łączą się z wydzieleniem energii - **reakcje syntezy**



Reakcje syntezy w gwiazdach to źródło pierwiastków we Wszechświecie.

- ▶ Jądra powyżej ^{56}Fe rozpadają się z wydzieleniem energii - **reakcje rozpadu**.



Reakcje rozpadu to źródło energii w obecnych reaktorach jądrowych.

Prawo rozpadu promieniotwórczego

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

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

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

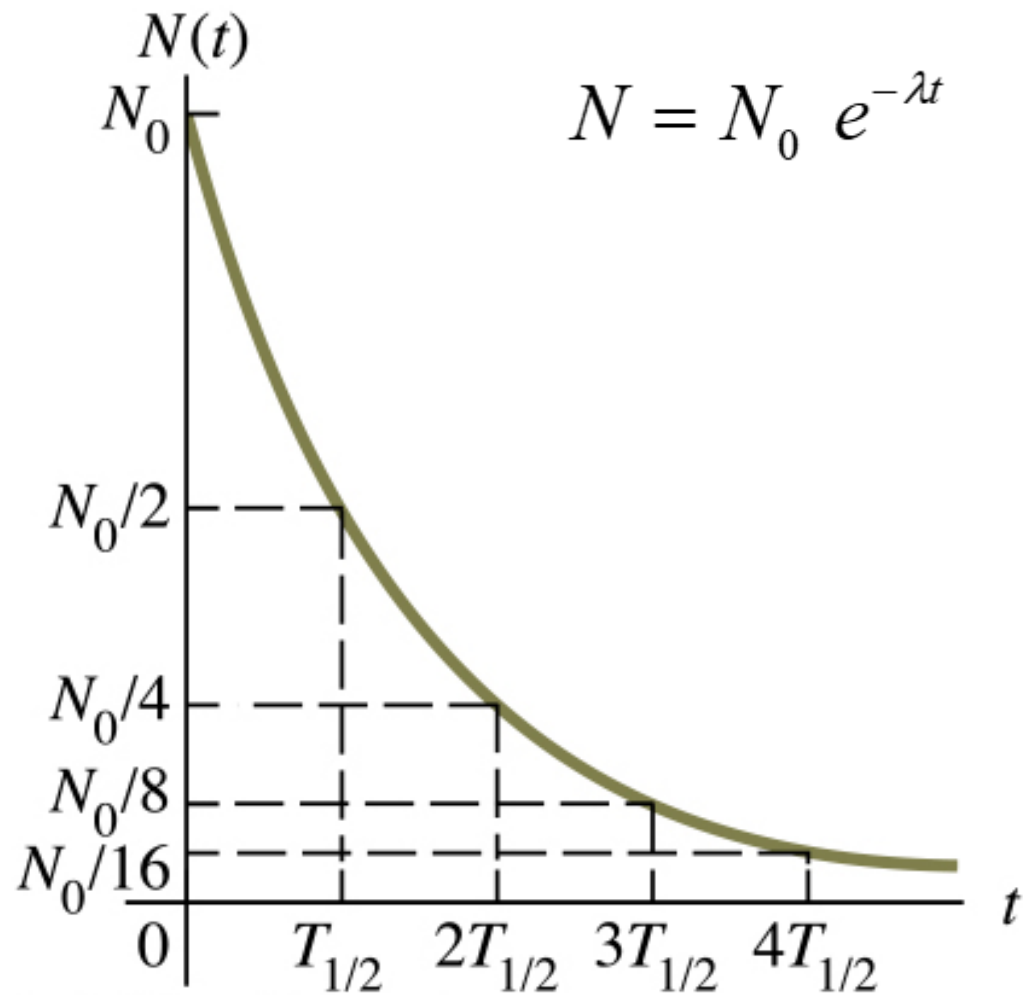
$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

$$\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) = -\lambda t$$

- λ = stała rozpadu
 $\tau = 1/\lambda$ = czas życia ,
- $t_{1/2}$ = czas połowicznego rozpadu



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Rozpady α , β , γ

Typ rozpadu

alpha α = jądro He (2p + 2n)

beta β = elektron lub pozyton

gamma γ = fotony

Ładunek/masa

$+2e/4m_p$

$-e/m_e$ lub $+e/m_e$

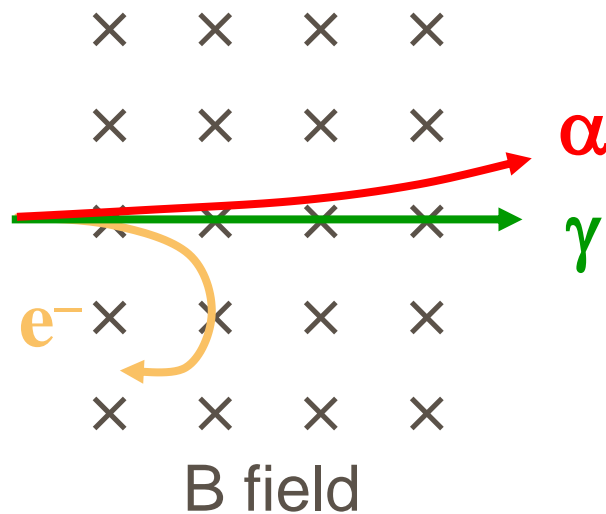
bez ładunku

Zasięg

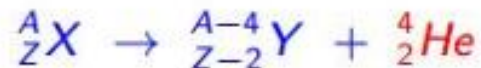
kartka papieru

kilka mm w metalu

kilka cm w ołowiu



- ▶ Promieniowanie α - emisja cząstki α czyli jądra helu ${}^4_2\text{He}$



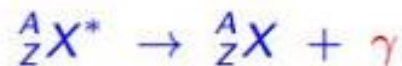
- ▶ Promieniowanie β^- - emisja elektronu e^- oraz antyneutrino $\bar{\nu}_e$



- ▶ Promieniowanie β^+ - emisja pozytonu e^+ oraz neutrino ν_e



- ▶ Promieniowanie γ - emisja wysokoenergetycznego fotonu γ



- ▶ Jądra z nadwyżką protonów lub neutronów emitują proton lub neutron,



Podsumowanie

Liczba masowa atomu

$$A = Z + N$$

Standardowy format oznaczania nuklidu

$$\frac{A}{Z}\text{X}$$

Promień jądra, gdzie r_0 jest promieniem pojedynczego protonu

$$r = r_0 A^{1/3}$$

Defekt masy

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_j$$

Energia wiązania

$$E_w = \Delta mc^2$$

Energia wiązania na nukleon

$$E_{wN} = \frac{E_w}{A}$$

Szybkość rozpadu promieniotwórczego

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

Prawo rozpadu promieniotwórczego

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

Podsumowanie

Stała rozpadu

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$$

Średni czas życia jądra

$$\overline{T} = \frac{1}{\lambda}$$

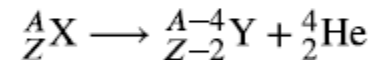
Aktywność substancji promieniotwórczej

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

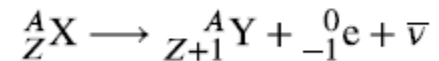
Aktywność substancji promieniotwórczej (postać liniowa)

$$\ln A = -\lambda t + \ln A_0$$

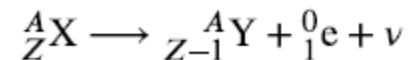
Rozpad alfa



Rozpad beta



Emisja pozytonu



Rozpad gamma

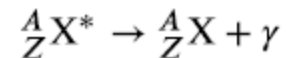


Table 3.7 Half-Lives of Some Radioisotopes

Element	Radioisotope	Half-Life	Type of Radiation
Naturally Occurring Radioisotopes			
Carbon	^{14}C	5730 yr	β
Potassium	^{40}K	1.3×10^9 yr	β, γ
Radium	^{226}Ra	1600 yr	α, γ
Uranium	^{238}U	4.5×10^9 yr	α, γ
Some Medical Radioisotopes			
Carbon	^{11}C	20 min	$\beta^+{}^a$
Chromium	^{51}Cr	28 days	γ
Iodine	^{131}I	8 days	β, γ
Iodine	^{125}I	60 days	γ
Iron	^{59}Fe	46 days	β, γ
Phosphorus	^{32}P	14 days	β
Oxygen	^{15}O	2 min	$\beta^+{}^a$
Potassium	^{42}K	12 hr	β, γ
Sodium	^{24}Na	15 hr	β, γ
Strontium	^{85}Sr	64 days	γ
Technetium	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.0 hr	γ

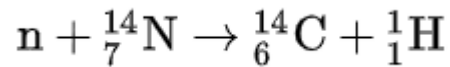
^aNote: β^+ is a positron, which has the same mass as an electron but has a positive charge.

Table 3.8 Medical Applications of Radioisotopes

Isotope	Half-Life	Medical Application
Ce-141	32.5 days	Gastrointestinal tract diagnosis; measuring myocardial blood flow
Co-60	5.3 yr	External radiation therapy; sterilize surgical instruments and medicines
Ga-67	78 hr	Abdominal imaging; tumor detection
Ga-68	68 min	Detect pancreatic cancer
P-32	4.3 days	Treatment of leukemia, polycythemia vera (excess red blood cells), pancreatic cancer
I-123	13.1 hr	Imaging brain, thyroid, kidney, and heart; measuring cerebral blood flow; and detection of neurological disease
I-125	60 days	Treatment of brain cancer; osteoporosis detection
I-131	8 days	Imaging thyroid; treatment of Graves' disease, goiter, and hyperthyroidism; treatment of thyroid and prostate cancer
Sr-85	65 days	Detection of bone lesions; brain scans
Sr-89	50 days	Alleviation of bone cancer pain; treatment of prostate cancer
Tc-99m	6 hr	Imaging of skeleton and heart muscle, brain, liver, heart, lungs, bone, spleen, kidney, and thyroid; <i>most widely used radioisotope in nuclear medicine</i>
Tl-201	73 hr	Heart imaging; diagnosis and location of myocardial infarction

Datowanie radiowęglowe

- Neutrony pochodzące z promieniowania kosmicznego oddziałują z azotem i generują ^{14}C :

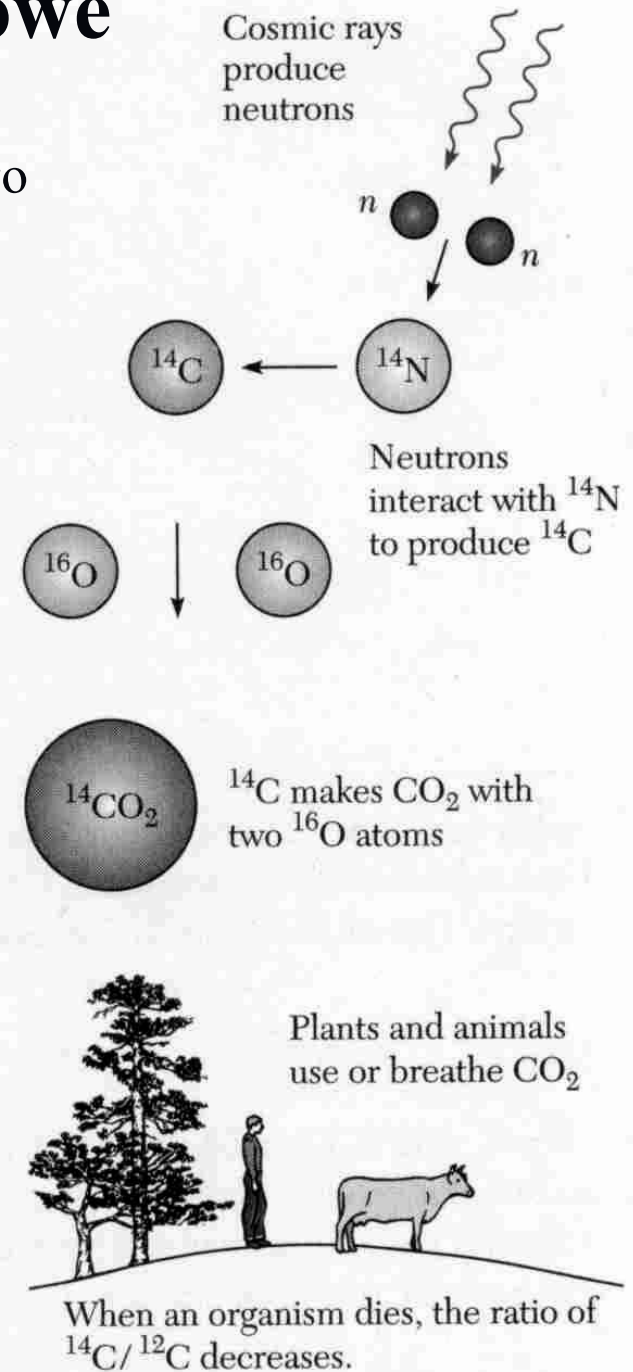


- W gazowym CO_2 stosunek $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ jest stały
 $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C} = 1.2 \times 10^{-12}$

- W organizmach martwych ^{14}C nie jest dalej absorbowane i stosunek $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ maleje z czasem zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego.

- Czas połowicznego zaniku ^{14}C
 $t_{1/2} = 5730$ lat.

- Rozpad β^- ^{14}C

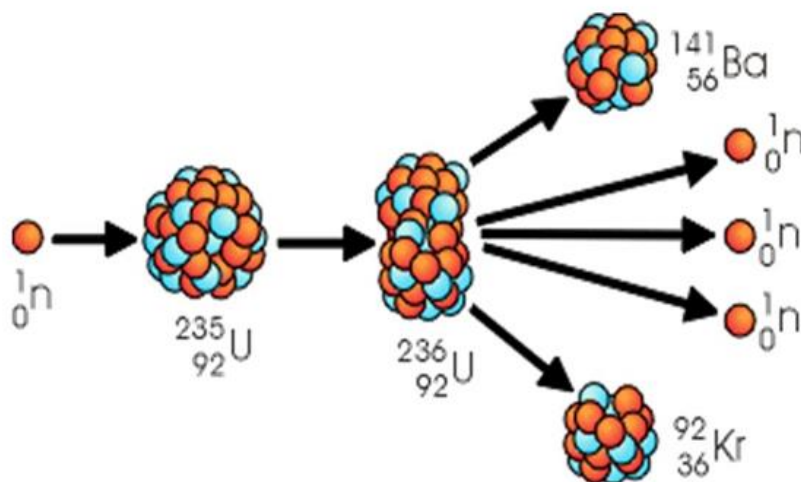


Izotopy promieniotwórcze wykorzystywane w reakcjach jądrowych

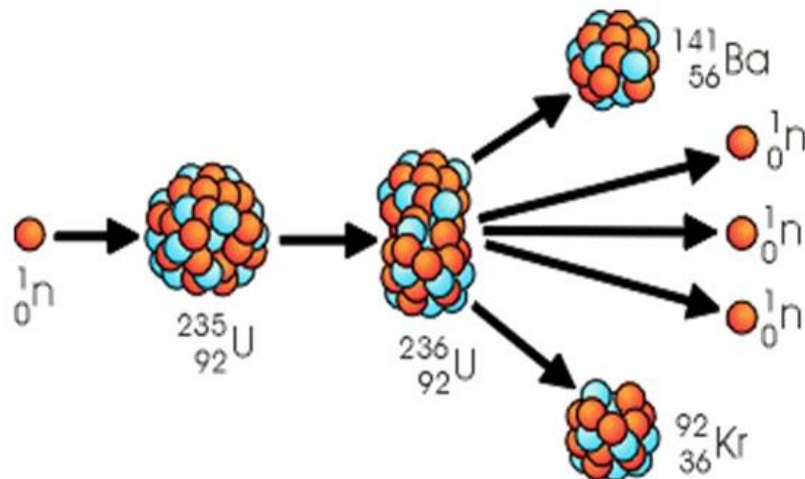
Isotope	Percent	Half-life (years)
^{238}U	99.284	4.46 billions
^{235}U	0.711	704 millions
^{234}U	0.0055	245,000
^{239}Pu	93/57	24,110

Reakcja rozszczepienia

Rozszczepienie ^{235}U może prowadzić do reakcji łańcuchowej (ang. chain reaction). W materiale zawierającym wiele jąder ^{235}U neutrony powstające w wyniku rozszczepienia jednego jądra mogą inicjować rozszczepienia kolejnych jąder ^{235}U . Taka reakcja łańcuchowa może przebiegać w sposób kontrolowany, jak to ma miejsce w reaktorze elektrowni jądrowej, lub w sposób niekontrolowany, jak podczas wybuchu.



Reakcja rozszczepienia jądra atomowego



Reaktor jądrowy – kontrolowana łańcuchowa reakcja jądrowa

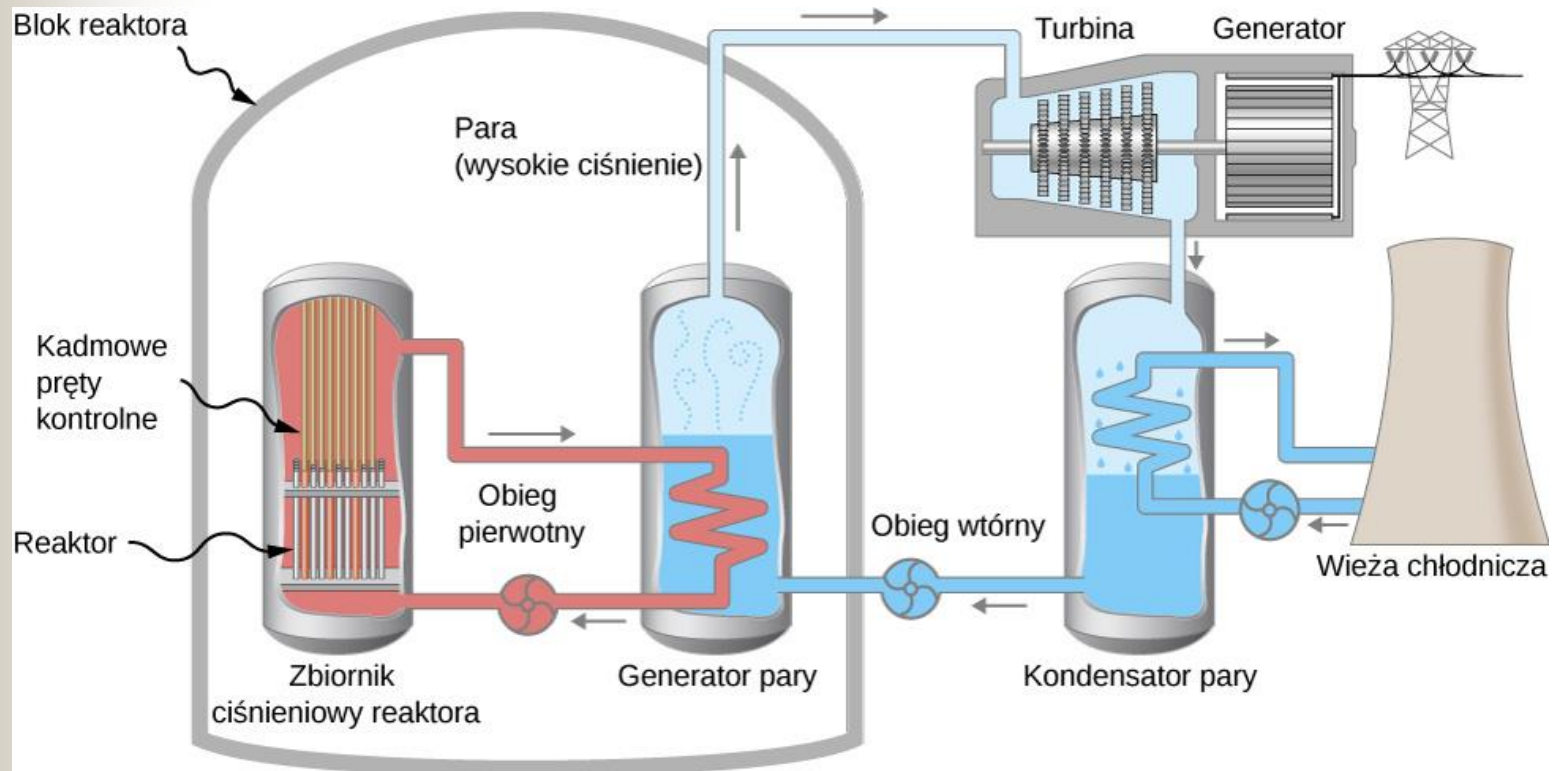
Zalety

- **B. wydajne źródło energii**
- **Emituje ok. 1/6 CO₂ emitowanego przez węgiel**

Wady

- **Złoża uranu wystarczą na ok. 50 lat**
- **Odpady radioaktywne muszą być przechowywane bezpiecznie przez 10,000-240,000 lat!**
- **Groźne - wypadki (ostatnią elektrownię jądrową w USA wybudowano w r. 1978), ataki terrorystyczne**
- **Badania wzbogacają wiedzę na temat broni jądrowej**

Reaktor jądrowy



W obiegu pierwotnym produkowana jest gorąca, sprężona para.

W obiegu wtórnym – para rozpręża się i obraca turbinę, napędzając generator prądu.

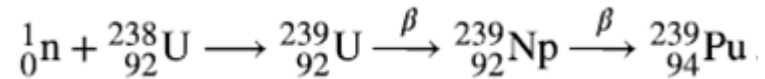
Reaktor jądrowy

Reaktor wodny ciśnieniowy jest przeznaczony do kontrolowanego rozszczepiania dużych ilości ^{235}U . Energia uwalniana w tym procesie ulega pochłonięciu przez wodę przepływającą przez umieszczone w układzie rury (obieg pierwotny), w wyniku tego wytwarzana jest para. Kadmowe pręty sterujące regulują wielkość strumienia neutronów (gęstość strumienia neutronów przechodzących przez układ), i w ten sposób sterują reakcją. W przypadku przegrzania reaktora i zagotowania się wody reakcja łańcuchowa ustaje, ponieważ woda jest niezbędna do termalizacji neutronów (ten mechanizm bezpieczeństwa może nie zadziałać w okolicznościach ekstremalnych). Gorąca woda pod wysokim ciśnieniem przepływa następnie rurą do drugiego zbiornika wody o normalnym ciśnieniu, znajdującego się w wytwornicy pary. Para wytworzona w wytwornicy wypełnia komorę, która zawiera turbinę. Para znajduje się pod bardzo wysokim ciśnieniem. Tymczasem skraplacz pary, podłączony do przeciwległej części komory turbiny, utrzymuje niskie ciśnienie pary. Różnica ciśnień wymusza przepływ pary przez komorę, powodując obrót turbiny. Z kolei turbina napędza generator elektryczny.

Reaktor jądrowy nie zawiera wystarczającej ilości ^{235}U aby mogło dojść do wybuchu.

Reaktory powielające

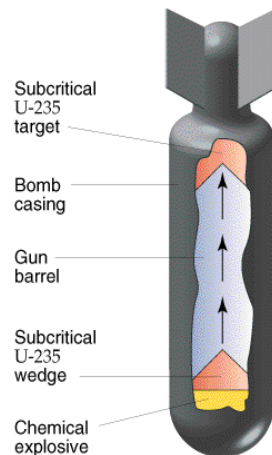
W reaktorze powielającym zachodzi reakcja



**${}^{239}\text{Pu}$ jest wysoce rozszczepialny, więc może służyć jako paliwo jądrowe zamiast ${}^{235}\text{U}$.
Ponieważ 99,3% naturalnie występującego uranu to izotop ${}^{238}\text{U}$, zastosowanie reaktorów powielających powinno ok. stukrotnie zwiększyć nasze zasoby paliwa jądrowego.
Reaktory powielające działają w Wielkiej Brytanii, Francji i Niemczech.**

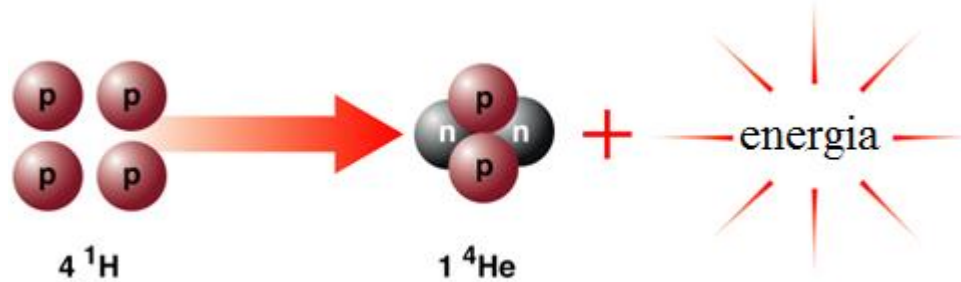
Bomba atomowa

Naturalny uran zawiera 99,3% ^{238}U a tylko 0,7% ^{235}U . Aby podtrzymać kontrolowaną reakcję łańcuchową zawartość ^{235}U musi być większa. Minimalna masa potrzebna do reakcji łańcuchowej nazywa się masą krytyczną. Pierwotnie używano dwóch kawałków ^{235}U poniżej masy krytycznej. Jeden kawałek w kształcie pocisku był wstrzeliwany w drugi i reakcja łańcuchowa rozpoczynała się. ^{239}Pu jest łatwiej rozszczepialny niż ^{235}U , więc wymaga mniejszej masy krytycznej. Bomba miała kształt sfery z kawałkami ^{239}Pu , każdy poniżej masy krytycznej. Poprzez eksplozję chemiczną kawałki ^{239}Pu wstrzeliwano do środka sfery i zachodziła reakcja łańcuchowa. W bombie użytej w Hiroszynie (04.08.1945) paliwem był ^{235}U a w Nagasaki (08.08.1945) ^{239}Pu .



Synteza termojądrowa na Słońcu

Cykl p-p



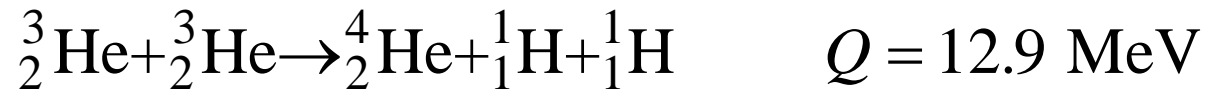
- Synteza 1 kg wodoru jest równoważna ilości 7.1 grama masy zamienionej na energię:

$$E = \Delta mc^2 = 0.0071 \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{s}^2}\right)^2 = 6.4 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

- W każdej sekundzie 675 milionów ton H jest zamieniane na 653 milionów ton He z równoczesną zamianą około 22 milionów ton materii na energię.

Synteza termojądrowa na Słońcu

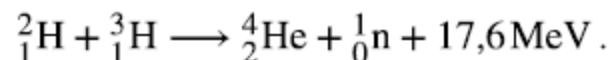
Cykl p-p



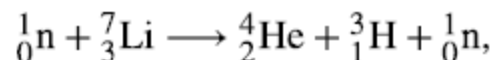
Bomba wodorowa

Bomba wodorowa

W roku 1942 Robert Oppenheimer (1904–1967) zasugerował, że bardzo wysoka temperatura wybuchu bomby atomowej może służyć do wyzwolenia reakcji syntezy termojądrowej deuteru i trytu, tworząc tym samym podstawy teoretyczne pod budowę bomby wodorowej. Reakcję pomiędzy deuterem i trytem (oba są izotopami wodoru) opisuje równanie



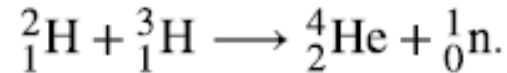
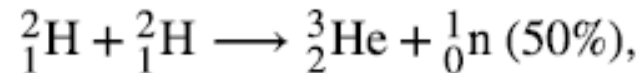
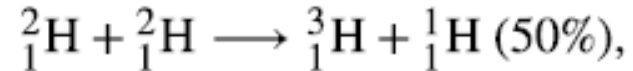
Deuteru jest stosunkowo dużo w wodach oceanów, ale tryt praktycznie nie występuje w przyrodzie. Można go jednak wytwarzać w reaktorze jądrowym, w reakcji z udziałem litu. Neutrony z reaktora wywołują reakcję



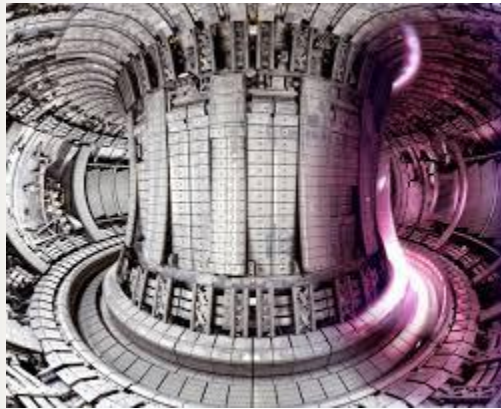
prowadzącą do powstania trytu. Pierwsza bomba wodorowa wybuchła w roku 1952 na odległej wyspie Eniwetok w archipelagu Wysp Marshalla. Bomby wodorowej nigdy nie użyto w czasie działań wojennych. Energia wybuchu współczesnych bomb wodorowych jest około 1000 razy większa niż bomb atomowych zrzuconych na Hiroszimę i Nagasaki w czasie II wojny światowej.

Reaktor termojądrowy

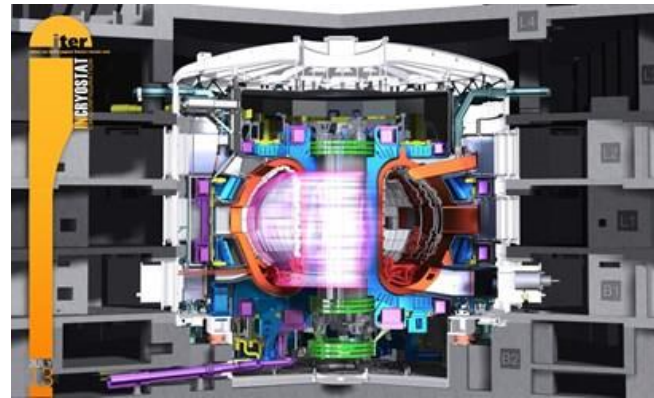
Reakcje w reaktorze termojądrowym:



Do przeprowadzenia tych reakcji potrzebna jest wysoka temperatura $\sim 10^7 \text{ K}$ (ok. 20 razy wyższa niż na Słońcu).



Joint European Torus



International Thermonuclear Energy Reactor