

FIZYKA II

Wykład VI

Promieniotwórczość

$k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \quad Z = Z_{ob} \cdot \mu_{ok} = \frac{\Delta \cdot d}{\Delta t} = \frac{\Delta t'}{\Delta t} \mu = \frac{d}{\Delta t} = \frac{d}{m} = N \cdot m_0 = \frac{Q}{N_A} \frac{M_m \phi_e}{\Delta t} \omega = 2\pi f$
 $\log \frac{L}{L_0} = 4 \log \frac{T_{ef}}{K} + 2 \log \frac{R}{R_0} - 4 \log \frac{v_1}{v_2} = \frac{d}{\Delta t} \mu = \frac{d}{m} = N \cdot m_0 = \frac{Q}{N_A} \frac{M_m \phi_e}{\Delta t} \omega = 2\pi f$
 $v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kT N_A}{M_m}} = \sqrt{\frac{3R_m T}{M_r \cdot 10^{-3}}} \quad \rho = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad v = v_1(1 + \beta \Delta t) \quad U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad I = \frac{U_e}{R + R_i}$
 $I_m^2 = U_m^2 \left[\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L} \right)^2 \right] \quad X_L = \omega L = 2\pi f L \quad \vec{F}_g = \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{x}$
 $R = R_0 \sqrt[3]{A} \quad E = mc^2 \quad E_k = \frac{h^2}{8mL^2} \quad \beta = \frac{\Delta I_B}{\Delta S} \rho = \frac{t}{\Delta S} = \frac{m \Delta v}{\Delta S \Delta t} \quad \vec{B} = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad R = \rho \frac{l}{S} \quad M = \vec{F} d \cos \alpha$
 $M_0 = \frac{4\pi^2 r^3}{3T^2} \quad v = \frac{wh}{8mL^2} \quad \phi_e = \frac{L}{4\pi r^2} \int \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad U = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{|E_{PA} - E_{PB}|}{q} = |\phi_A - \phi_B| \quad Q = mc \Delta t \quad pV = nRT$
 $F_d = M_z \frac{v^2}{r} = M_z \frac{4\pi^2 r}{T^2} \quad v_k = \sqrt{\frac{h^2 M_z}{2m_e}} \quad F_x = \frac{1}{2} \rho \frac{d^2 E}{dt^2} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$
 $F_v = \int \frac{F_n}{R} \quad E = \frac{E_c}{a} \int_{-a/L}^{+a/L} \sin(\omega t + \phi) dy \quad \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad \lambda = \frac{h\nu_2}{T} \quad L = 10 \log \frac{I}{I_0}$
 $u = U_m \sin \omega(t - \tau) = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad E_k = \frac{1}{2} m v^2 S = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt} \quad \left(\frac{E_t}{E_0} \right)_{||} = \frac{2 \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2}{\cos(\vartheta_1 - \vartheta_2) \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2)}$
 $\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad E_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \vec{\psi} = \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = AD \quad \left(\frac{E_t}{E_0} \right)_{||} = \frac{2 \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2}{\cos(\vartheta_1 - \vartheta_2) \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2)}$
 $E = \frac{F_e}{\rho_0} = k \frac{Q}{r^2} \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad f' = \frac{\nu_a \cdot \nu_b}{(\nu - 1)(\nu_b - \nu_a)} \frac{\nu_1}{x} + \frac{\nu_2}{x'} = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu} \quad \vec{s} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$
 $E_y = E_0 \sin(kx - \omega t) \quad \beta = \frac{\nu_1}{\nu_2} (\alpha + \nu) + \delta \quad \phi = \frac{2\pi \sin \vartheta'}{\lambda} \quad B_t = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} E_0 \sin(kx - \omega t)$

Promieniotwórczość naturalna

Promieniotwórczość naturalna powstaje na drodze rozpadów jąder atomowych naturalnych pierwiastków radioaktywnych obecnych **w glebie, skałach, powietrzu i wodzie.**

Naturalne pierwiastki radioaktywne :

- 1) Obecne są **w minerałach**, przyswajanych przez rośliny i zwierzęta, a także używanych jako materiały konstrukcyjne,
- 2) Syntetyzowane są w atmosferze i przenikają do hydrosfery wskutek reakcji składników atmosfery z **promieniowaniem kosmicznym**,
- 3) To także skutek promieniowania przenikającego do środowiska wskutek **działalności przemysłowej człowieka** (wydobycie rud uranu, spalanie węgla zawierającego pierwiastki promieniotwórcze).



Źródła tego promieniowania nie da się uniknąć. **W niewielkich dawkach nie są groźne dla organizmu, ponieważ organizm się uodparnia na te pierwiastki.**

Pierwiastki promieniotwórcze

Pierwiastki, których jądra **atomowe samorzutnie rozpadają się** emitując przy tym cząstki (α , β) lub promienie (γ), nazywamy pierwiastkami promieniotwórczymi.

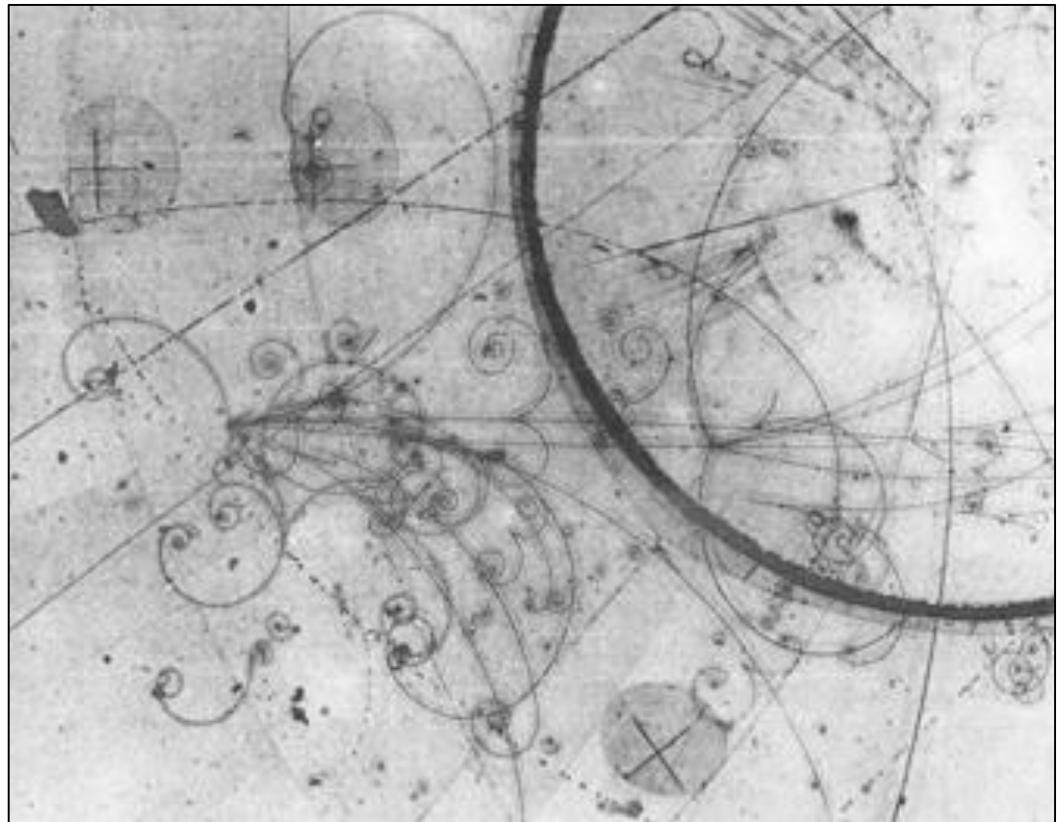
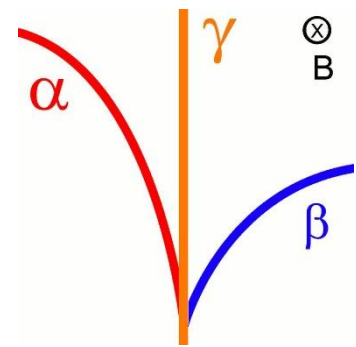
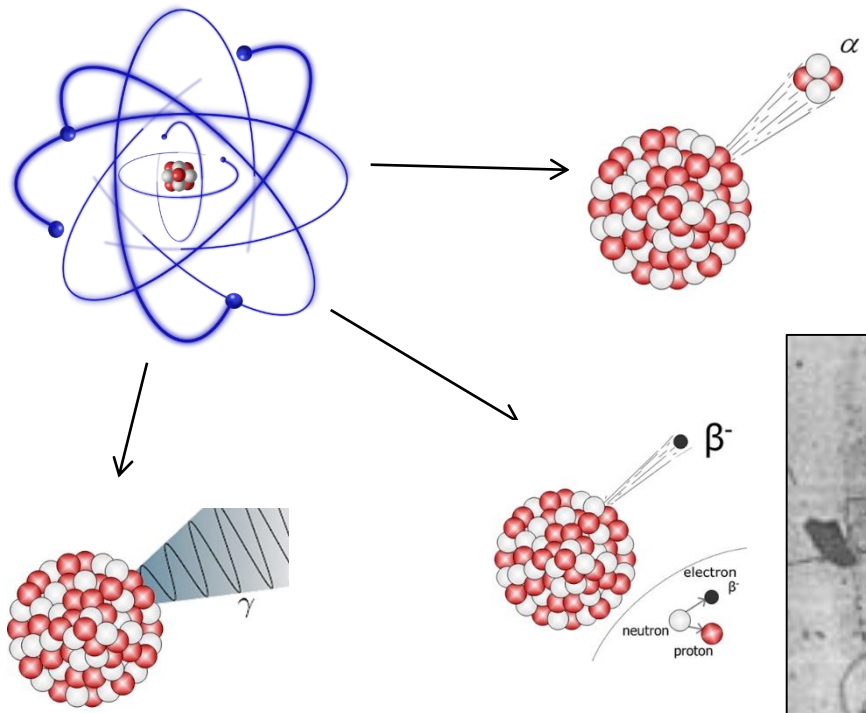
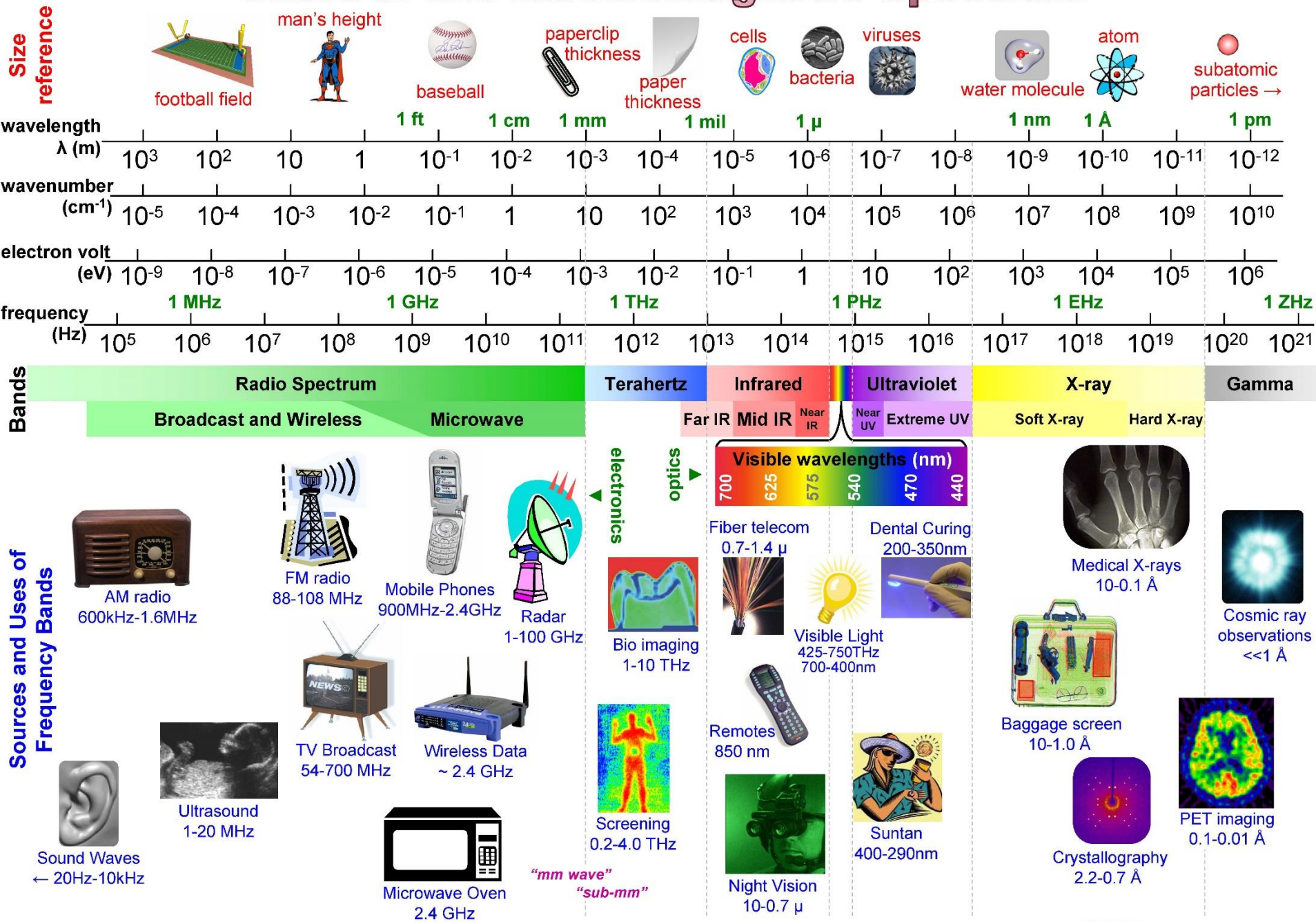


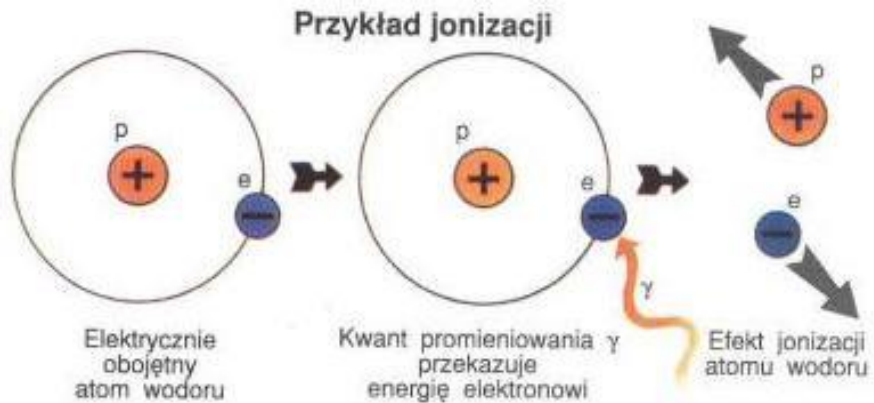
Chart of the Electromagnetic Spectrum



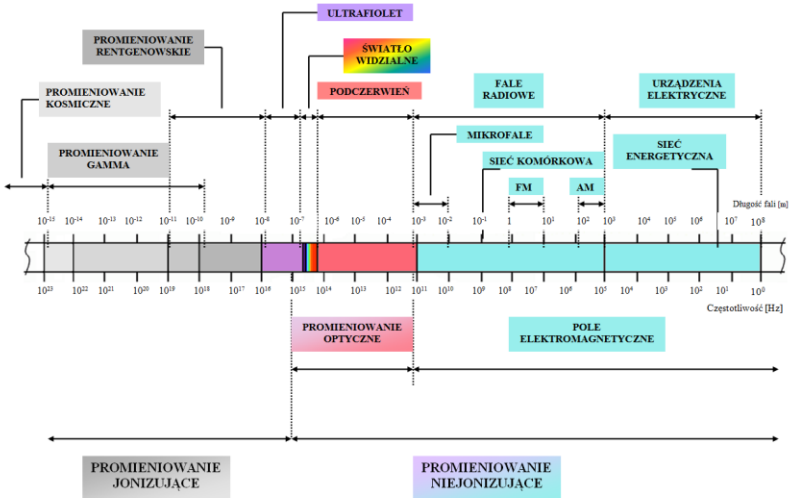
$$\lambda = 3 \times 10^8 / \text{freq} = 1 / (\text{wn} \times 100) = 1.24 \times 10^{-6} / \text{eV}$$

Promieniowanie jonizujące

Wszystkie rodzaje promieniowania (w tym α , β oraz γ) które wywołują jonizację ośrodka materialnego, tj. oderwanie przynajmniej jednego elektronu od atomu lub cząsteczki albo wybicie go ze struktury krystalicznej.



WIDMO ELEKTROMAGNETYCZNE



Za promieniowanie elektromagnetyczne jonizujące uznaje się promieniowanie, którego fotony mają energię większą od energii fotonów światła widzialnego.

- SILNIE JONIZUJĄCE** – promieniowanie α , β^- i β^+
- SŁABO JONIZUJĄCE** – promieniowanie γ i X, UV
- NIE JONIZUJĄCE** – fale radiowe, mikrofae, podczerwień, światło widzialne

Jądra promieniotwórcze

- ▶ **Nuklidy** to ogólna nazwa jąder atomowych o określonej liczbie protonów Z i neutronów N

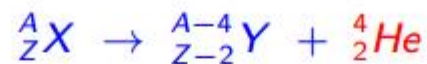


Suma $A = Z + N$ to liczba masowa jądra.

- ▶ **Izotopy** danego pierwiastka zawierają jądra o tej samej liczbie protonów Z , a różnej liczbie neutronów N .
- ▶ Większość nuklidów jest **niestabilna**, podlegając spontanicznej przemianie promieniotwórczej której towarzyszy emisja **promieniowania jądrowego**.
- ▶ Zdolność jąder do emitowania promieniowania jądrowego nazywamy **promieniotwórczością** lub radioaktywnością.

Promieniowanie jądrowe: rozpady α , β , γ

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



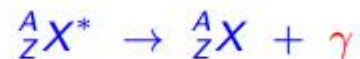
- ▶ Promieniowanie β^- - emisja elektronu e^- oraz antyneutrino $\bar{\nu}_e$



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



- ▶ Promieniowanie γ - emisja wysokoenergetycznego fotonu γ

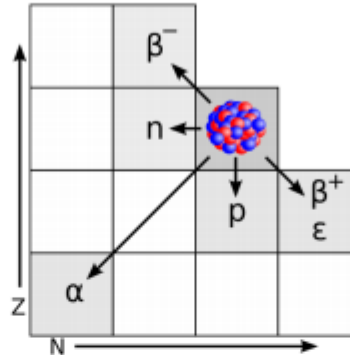


- ▶ Jądra z nadwyżką protonów lub neutronów emitują proton lub neutron,



Energia promieniowania jonizującego

- ▶ Promieniowaniu jądrowemu towarzyszy zmiana jądra lub jego stanu.



- ▶ Promieniowanie jądrowe jest **promieniowaniem jonizującym** materię o energii $\gg 13.6 \text{ eV}$ (energia jonizacji atomu wodoru).

Rodzaj promieniowania	Energia
jądrowe α	4 – 8 MeV
jądrowe β^\pm	$\sim 10 \text{ keV} - \sim 1 \text{ MeV}$
jądrowe γ	100 keV – 10 MeV
roentgenowskie X	10 eV – 100 keV

Czas połowicznego rozpadu

- ▶ Rozpad jądra jest procesem **statystycznym** - jego prawidłowości można ustalić jedynie na podstawie obserwacji bardzo dużej liczby rozpadów.
- ▶ Prawo rozpadu promieniotwórczego (Becquerel, Rutherford, Soddy)

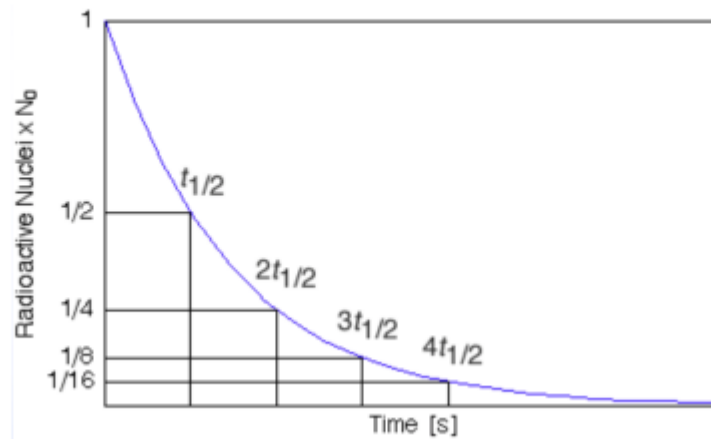
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 to liczba jąder na początku obserwacji, a $N(t)$ to liczba jąder po czasie t . λ to **stała rozpadu** o jednostce $[1/\text{czas}]$.

- ▶ **Czas połowicznego rozpadu** $T_{1/2}$, po którym liczba jąder spada o połowę

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \Rightarrow \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

- ▶ Dla $T_{1/2}, 2T_{1/2}, 3T_{1/2}, 4T_{1/2}, \dots$ liczba jąder spada 2, 4, 8, 16, ... razy



Czas połowicznego rozpadu

Table 28-1

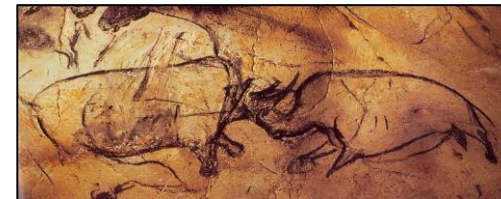
Half-Life and Decay Mode of Selected Nuclides					
Nuclide	Half-Life	Decay Mode	Nuclide	Half-Life	Decay Mode
${}^3_1\text{H}$	12.3 years	β^-	${}^{129}_{55}\text{Cs}$	32.1 hours	K-capture and γ
${}^6_2\text{He}$	0.802 seconds	β^-	${}^{149}_{61}\text{Pm}$	53.1 hours	β^- and γ
${}^{14}_6\text{C}$	5730 years	β^-	${}^{145}_{64}\text{Gd}$	25 minutes	β^+ and γ
${}^{19}_8\text{O}$	29.1 seconds	β^- and γ	${}^{183}_{76}\text{Os}$	12.0 hours	K-capture and γ
${}^{20}_9\text{F}$	11.6 seconds	β^- and γ	${}^{212}_{82}\text{Pb}$	10.6 hours	β^- and γ
${}^{26}_{14}\text{Si}$	2.1 seconds	β^+ and γ	${}^{194}_{84}\text{Po}$	0.5 seconds	α
${}^{39}_{17}\text{Cl}$	55.5 minutes	β^- and γ	${}^{210}_{84}\text{Po}$	138 days	α
${}^{49}_{21}\text{Sc}$	57.5 minutes	β^- and γ	${}^{228}_{88}\text{Fr}$	1602 years	α and γ
${}^{60}_{26}\text{Fe}$	3×10^5 years	β^-	${}^{227}_{92}\text{U}$	1.3 minutes	α and γ
${}^{71}_{30}\text{Zn}$	2.4 minutes	β^- and γ	${}^{235}_{92}\text{U}$	7.1×10^8 years	α and γ
${}^{84}_{34}\text{Se}$	3.2 minutes	β^-	${}^{238}_{92}\text{U}$	4.51×10^9 years	α and γ
${}^{87}_{37}\text{Rb}$	4.8×10^{10} years	β^-	${}^{236}_{94}\text{Pu}$	2.85 years	α and γ
${}^{91}_{42}\text{Mo}$	15.5 minutes	β^+ and γ	${}^{242}_{94}\text{Pu}$	3.79×10^5 years	α
${}^{100}_{46}\text{Pd}$	4.0 days	K-capture and γ	${}^{244}_{100}\text{Fm}$	0.0033 seconds	Spontaneous fission

- **datowanie:** radiowęgiel (${}^{14}\text{C}$), pierwiastki szeregu uranowo – torowego (${}^{232}\text{Th}/{}^{234}\text{U}$)
- **rekonstrukcje zmian środowiska:** wodór (${}^2\text{H}/\text{H}$), węgiel (${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$), azot (${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$), tlen (${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$), siarka (${}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}$).

Metoda	Zastosowanie	Zakres wieku
${}^{14}\text{C}$	Szcątki i osady organiczne, osady węglanowe	Do 50 tys. lat
${}^{210}\text{Pb}$	Osady w zbiornikach wodnych	Do 150 lat
${}^{137}\text{Cs}$	Osady jeziorne, gleby	Do 60 lat



Bizon
30800 ±1500
Masa próbki: 0,42 mg



Lewy nosorożec
30940 ±610
Masa próbki: 0,80 mg

Prawy nosorożec
30790±600
Masa próbki: 1,22 mg

Szybkość rozpadu jądra

- ▶ **Szybkość rozpadu** jądra $R(t)$ to liczba jego rozpadów na sekundę w danej chwili t

$$R(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad R(t) = \lambda N(t)$$

Szybkość rozpadu jest proporcjonalna do liczby jąder $N(t)$ w próbce.

- ▶ **Aktywność** próbki $A(t)$ to suma szybkości rozpadów nuklidów i w próbce

$$A(t) = \sum_i R_i(t)$$

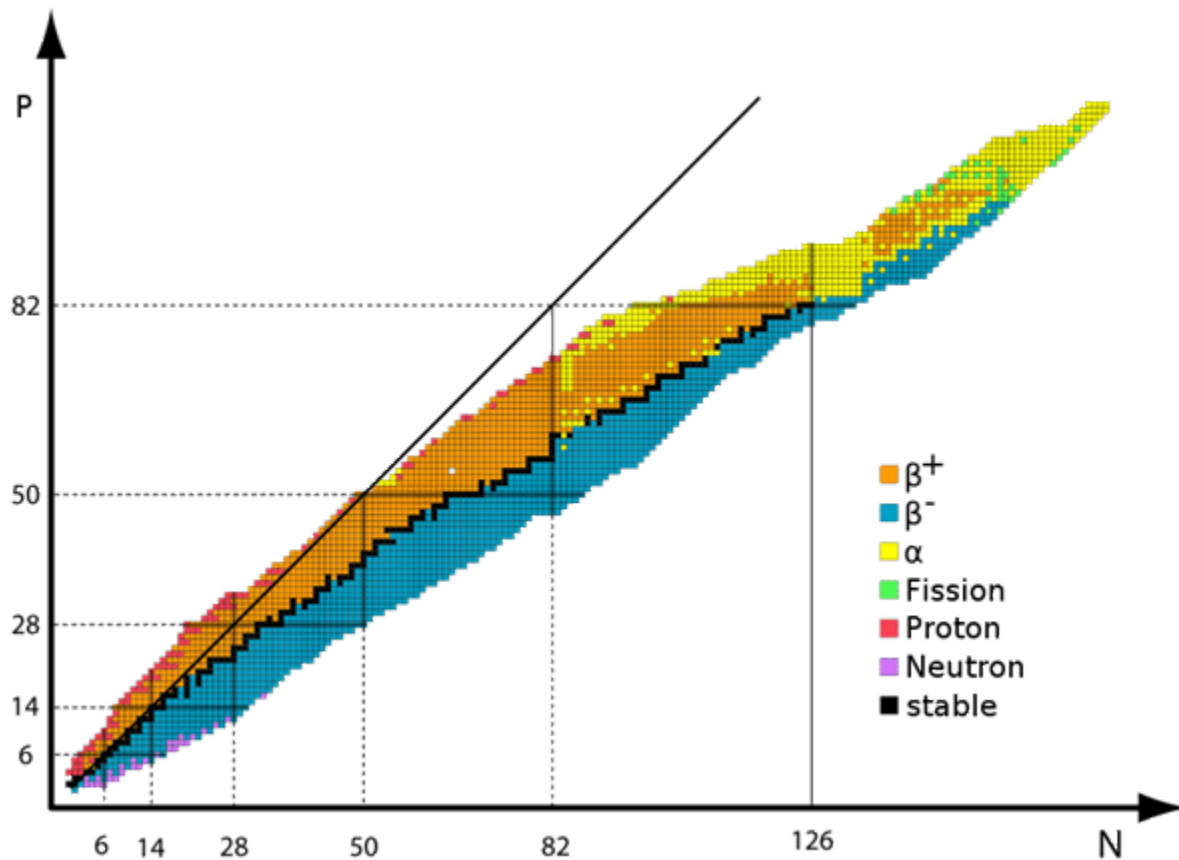
- ▶ **Jednostki** aktywności:

1 bekerel = 1 Bq = 1 rozpad na sekundę

1 kiur = 1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq

1 Ci to aktywność 1 g radu.

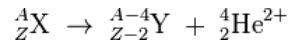
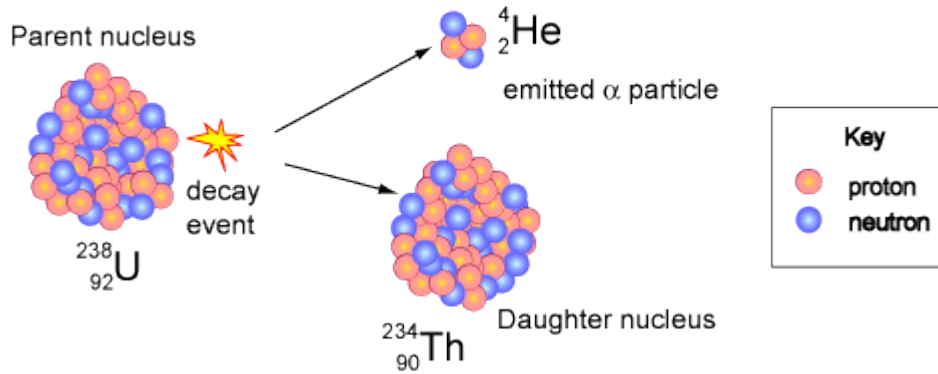
Mapa nuklidów



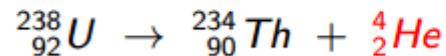
- ▶ Punkty o stałym Z to izotopy tego samego pierwiastka.
- ▶ Nadmiar liczby neutronów nad liczbą protonów w jądrach.
- ▶ 266 stabilnych nuklidów i około 3000 niestabilnych.
- ▶ Widoczna ścieżka stabilności.
- ▶ Obecnie nuklid z $Z_{max} = 116$.
- ▶ Nuklidy powyżej $Z = 92$ (uran) nie występują w warunkach naturalnych.
- ▶ Powyżej $Z = 83$ (bizmut) nie istnieją trwałe nuklidy.

Rozpad α

Alpha Decay of a Uranium-238 nucleus

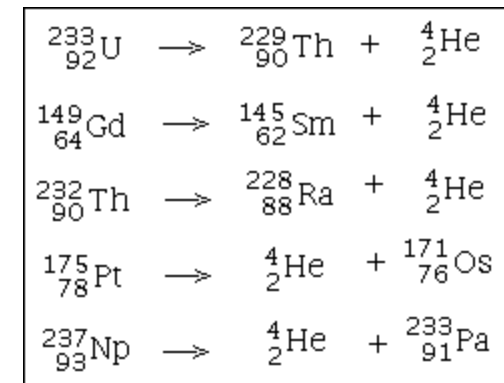


- ▶ Rozpad uranu ${}_{92}^{238}\text{U}$ o czasie rozpadu $T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$ lat.



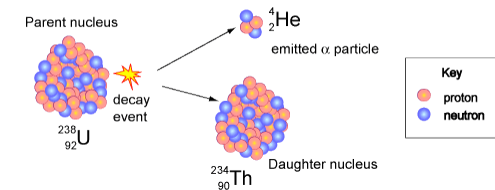
- ▶ Energia rozpadu Q_{α} w formie energii kinetycznej głównie cząstki α

$$Q_{\alpha} = m_{\text{U}}c^2 - (m_{\text{Th}}c^2 + m_{\text{He}}c^2) = 4.25 \text{ MeV}$$



Rozpad α

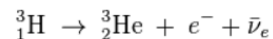
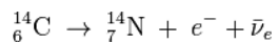
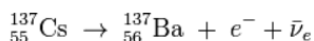
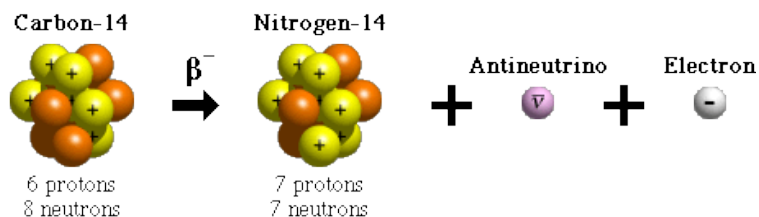
Alpha Decay of a Uranium-238 nucleus



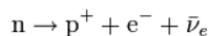
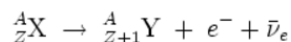
- W wyniku tej reakcji powstające jądro ma **liczbę atomową mniejszą o 2, a liczbę masową o 4 od rozpadającego się jądra**.
- Spośród izotopów spotykanych w naturze wiele jąder należących do łańcuchów uranowego oraz torowego jest emiternami cząstek α . Natomiast wśród ogółu jąder atomowych (także wytworzonych syntetycznie) rozpadowi α ulegają głównie jądra cięższe - powyżej masy 200, ale także w wśród pierwiastków ziem rzadkich oraz wśród bardzo egzotycznych izotopów cyny, telluru oraz ksenonu (okolice masy 100).
- Emitowane cząstki mają zazwyczaj energię kinetyczną około **5 MeV**, co odpowiada prędkości **15000km/s**. W rozpadzie α , cząstka α formuje się już w jądrze i jest równocześnie odpychana siłami elektrostatycznymi a przyciągana oddziaływaniami silnymi pozostałej części jądra. W niewielkiej odległości od jądra siły przyciągania jądrowego przeważają, w większej zaś przeważają siły odpychania. Cząstka α ma energię mniejszą od energii potrzebnej na pokonanie sił przyciągania, ale dzięki kwantowemu zjawisku **tunelowania** przenika przez wąską barierę potencjału.
- Energia cząstek alfa emitowanych z danego atomu ma określoną wartość, ponieważ rozpad jest dwuciałowy i prowadzi do określonych poziomów energetycznych powstającego jądra. W przypadku niektórych radionuklidów (np. ^{265}Sg , ^{266}Sg) możliwy jest rozpad α do kilku różnych poziomów energetycznych jądra, dzięki czemu energie emitowanych cząstek alfa są również ściśle określone. W takim przypadku udział procentowy cząstek alfa o danej energii zależy od prawdopodobieństwa zajęcia przez powstające jądro odpowiadającego poziomu energetycznego.
- Rozpad α jest dość powszechnym zjawiskiem w przyrodzie, odpowiada za niemalże połowę promieniotwórczości naturalnej skorupy ziemskiej.

Rozpad β

Beta-minus Decay

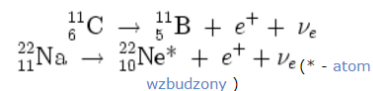
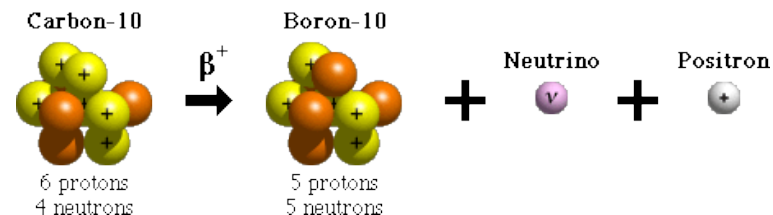


Ogólnie:

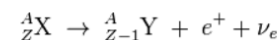


W wyniku tej przemiany **liczba masowa pozostaje bez zmian a liczba atomowa wzrasta o 1**. W czasie tej przemiany **1 neutron w jądrze rozpada się na 1 elektron, 1 proton i 1 antyneutrino elektronowe**. Elektron i antyneutrino opuszczają jądro atomowe. Rozpadowi beta minus towarzyszy promieniowanie gamma oraz dla niektórych jąder emisja protonów lub neutronów.

Beta-plus Decay



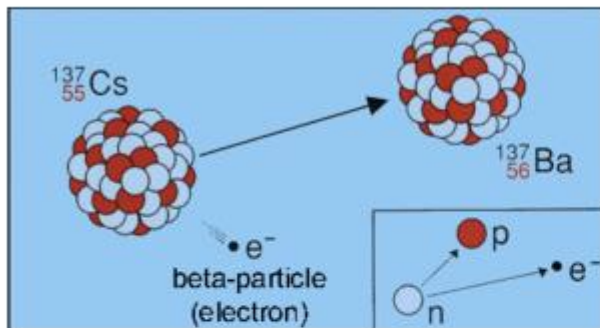
Ogólnie:



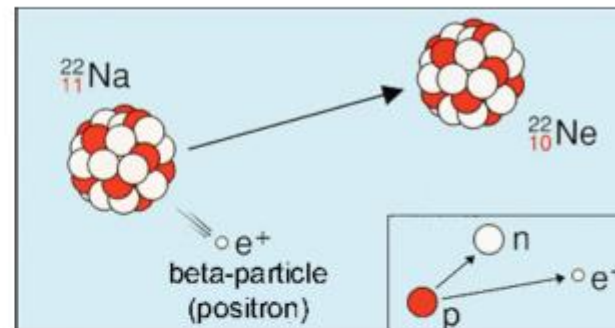
Podczas tej przemiany **1 proton przemienia się na 1 neutron, 1 pozyton (antyelektron) i 1 neutrino elektronowe**. W wyniku tej przemiany **liczba atomowa jądra maleje o 1, a liczba masowa pozostaje bez zmian**.

Rozpad β

rozpad β^- neutronu w jądrze



rozpad β^+ protonu w jądrze



- ▶ Swobodny proton poza jądrem nie rozpada się, $T_{1/2} > 10^{34}$ lat.
- ▶ Swobodny neutron ulega rozpadowi β^- z czasem $T_{1/2} = 885.6$ s.



Rozpad jest możliwy, gdyż $m_n > m_p$.

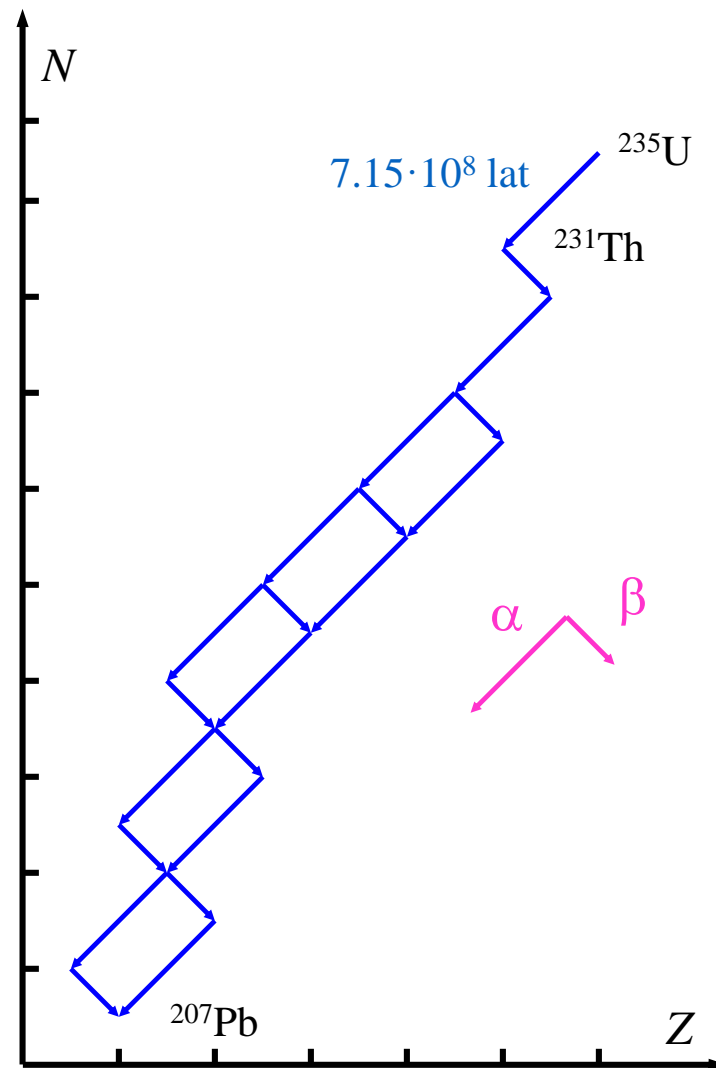
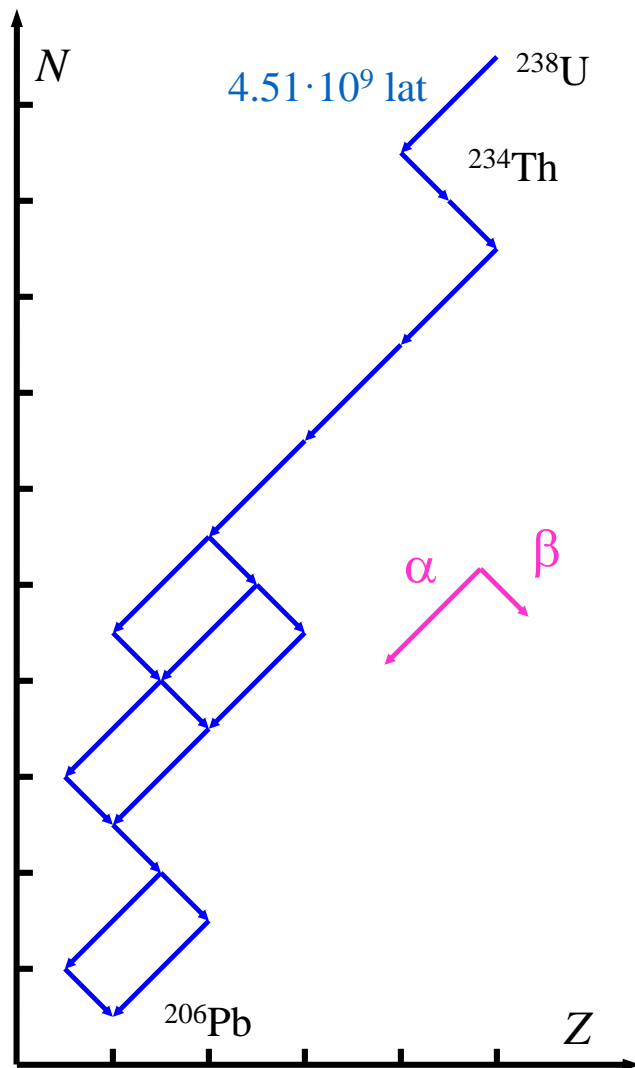
Rozpad γ

Czas życia stanu wzbudzonego: $\tau = 10^{-16} - 10^{-15} \text{ s}$

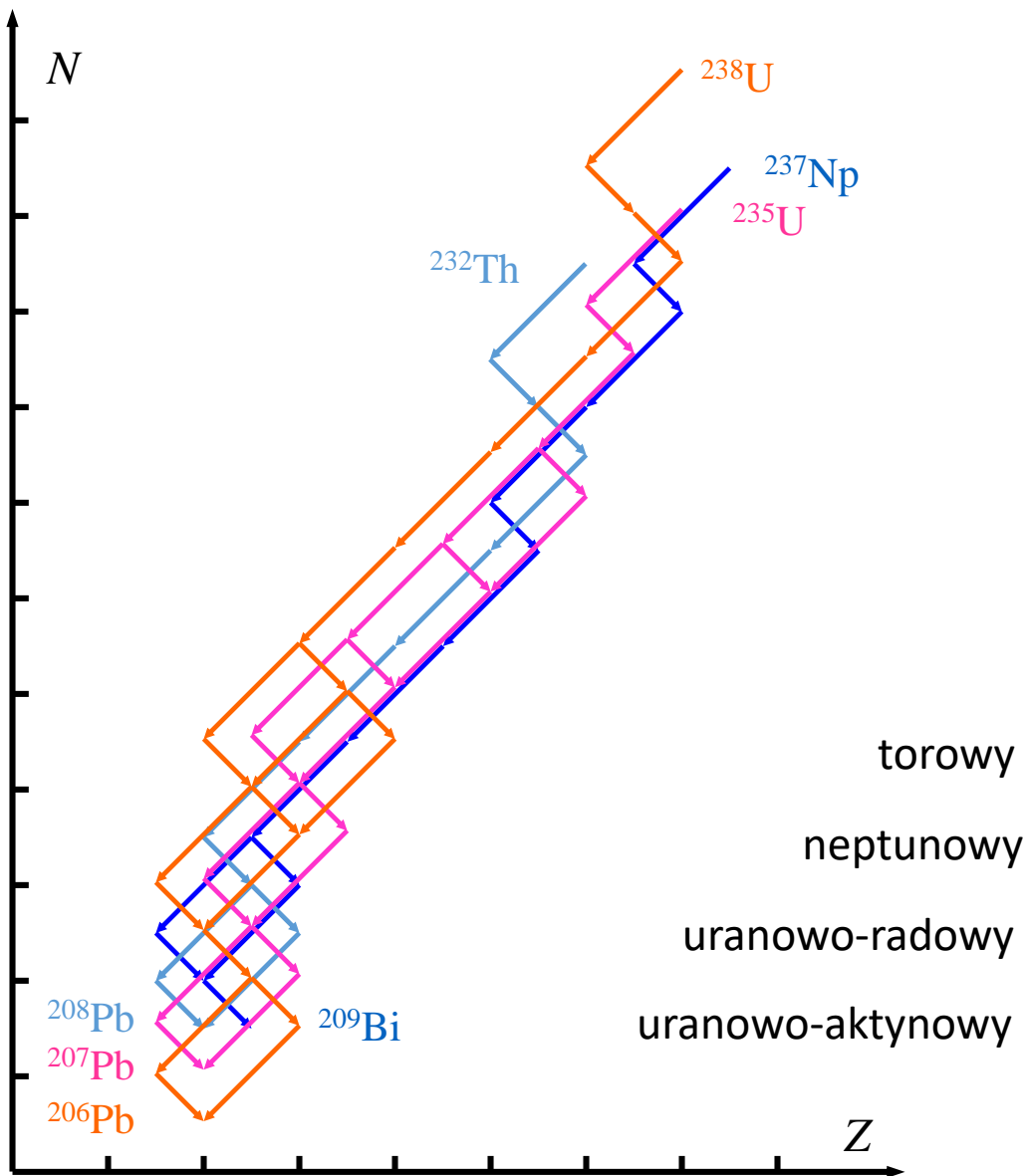
Procesem konkurencyjnym do emisji kwantu γ jest proces wewnętrznej konwersji – energia wzbudzenia jądra jest przekazywana bezpośrednio elektronowi z powłoki bliskiej jądra (K lub L) i elektron wylatuje z atomu.

Współczynnik konwersji: $\frac{N_{e^-}}{N_\gamma} = \frac{\lambda_{e^-}}{\lambda_\gamma}$

Szeregi promieniotwórcze



Szeregi promieniotwórcze



jądro pocz.	A	$t_{1/2}$	jądro końc.
$^{232}_{90}\text{Th}$	$4n$	$1.39 \cdot 10^{10}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$
$^{237}_{93}\text{Np}$	$4n+1$	$2.20 \cdot 10^6$	$^{209}_{83}\text{Bi}$
$^{238}_{92}\text{U}$	$4n+2$	$4.51 \cdot 10^9$	$^{206}_{82}\text{Pb}$
$^{235}_{92}\text{U}$	$4n+3$	$7.15 \cdot 10^8$	$^{207}_{82}\text{Pb}$

Reakcje jądrowe

Ogólnie: $\mathbf{A + x \rightarrow B + y}$



Często reakcje jądrowe przechodzą przez stadium pośrednie

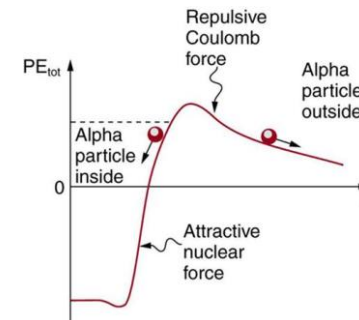


C^* jest stanem pośrednim, jądrem złożonym o czasie życia poniżej 10^{-13} s.

W reakcjach jądrowych energia całkowita jest sumą energii kinetycznych E_k i energii masowych $E_m = mc^2$

$$E_c = \sum E_k + \sum mc^2$$

Aby zaszła reakcja z naładowaną czastką (p, a, ciężkie jądro) musi pokonać barierę kulumbowską.



Wysokość bariery kulombowskiej dla reakcji jądrowych

Reakcja jądrowa	Wysokość bariery kulombowskiej(MeV)
$^{12}\text{C} + ^1\text{H}$	2,19
$^{238}\text{U} + ^1\text{H}$	14,24
$^{14}\text{N} + ^4\text{He}$	4,99
$^{238}\text{U} + ^4\text{He}$	26,65
$^{238}\text{U} + ^{12}\text{C}$	75,78
$^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$	1514,7

Reakcje jądrowe

Dla reakcji $A + x \rightarrow B + y$ bilans energii jest następujący:

$$E_x + m_x c^2 + m_a c^2 = E_b + m_b c^2 + E_y + m_y c^2$$

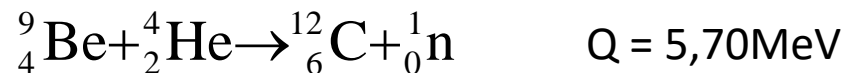
Wyodrębnimy energie kinetyczne cząstek bombardujących i produktów otrzymamy efekt energetyczny reakcji jądrowej Q

$$Q = E_b + E_y - E_x = (m_x + m_a - m_b - m_y)c^2$$

Reakcje mogą być endotermiczne i energia musi być dostarczona (poprzez bombardującą cząstkę α)

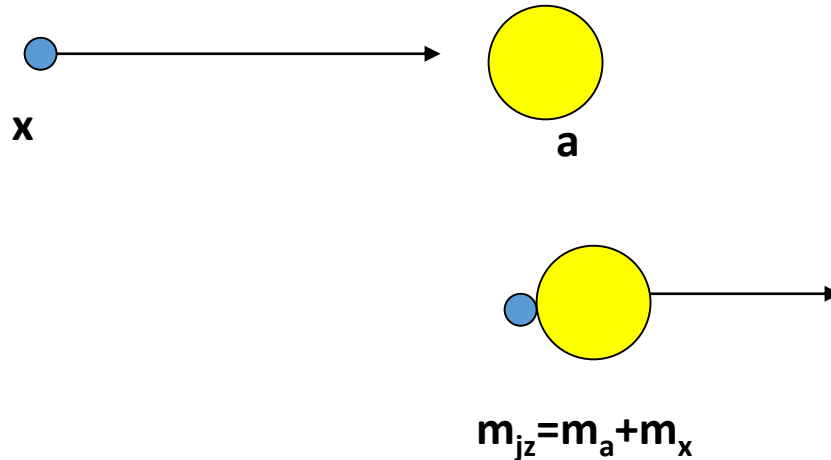


lub egzotermiczne (energia jest odbierana poprzez emisję n i odrzut ${}^{12}\text{C}$)



Reakcje jądrowe

Dla przeprowadzenia reakcji endotermicznej jest potrzebna nieco większa energia niż Q ,
tzw. **energia progowa**. Jest to związane z udzieleniem energii kinetycznej jądra złożonemu.



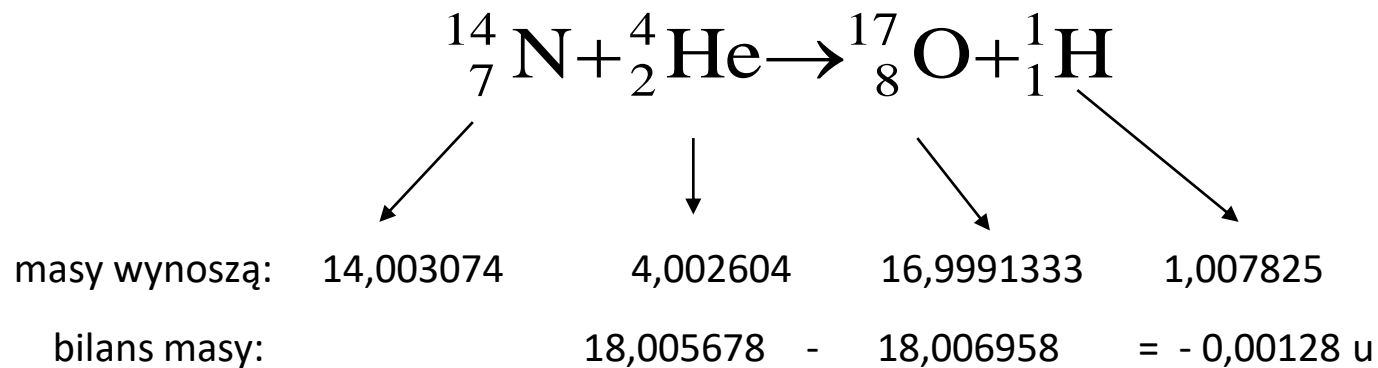
Z prawa zachowania pędu $m_x v_x = m_{jz} v_{jz}$ po podniesieniu do kwadratu mamy: $m_x^2 v_x^2 = m_{jz}^2 v_{jz}^2$
 $E_x m_x = E_{jz} m_{jz}$ aby zaszła reakcja jądrowa energia pocisku E_x musi być większa od Q o wartość energii progowej E_{jz} :

$$E_x = E_{jz} - Q = E_x \frac{m_x}{m_x + m_a}$$

Czyli E_x będącą energią progową wynosi:

$$E_{x(\text{prog})} = -Q \frac{m_x + m_a}{m_a} = -Q \left(1 + \frac{m_x}{m_a} \right)$$

Reakcje jądrowe



$$Q = -0,00128u \cdot 931,5\text{MeV}/u = -1,19\text{MeV}$$

Reakcja jest procesem endotermicznym i trzeba dostarczyć jej energii poprzez energię kinetyczną cząstki α .

$$E_{prog} = 1,19 \frac{14+4}{14} = 1,59\text{MeV}$$

Reakcje jądrowe

Prawdopodobieństwo zajścia reakcji jądrowej określa przekrój czynny, określa on skuteczność zderzeń

Przekrój czynny jest wyrażany w jednostkach powierzchni. Jest to powierzchnia jaka uczestniczy w reakcji jądrowej:

$$\sigma = \frac{L_z}{Nx\varphi}$$

gdzie:

L_z - liczba zderzeń skutecznych

N - ilość jąder na m^3 tarczy mogących brać udział w reakcji

x - grubość tarczy

φ - strumień cząstek bombardujących na m^2 tarczy i 1 s

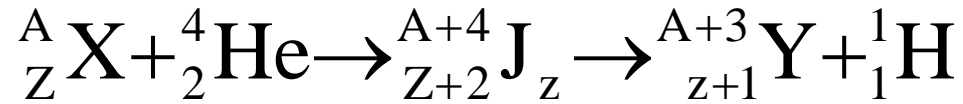
Jeżeli średni promień jądra wynosi 6×10^{-15} m

To przekrój takiego jądra $3,14 \times (6 \times 10^{-15} \text{ m})^2 \approx 10^{-28} \text{ m}^2$ jest jednostką przekroju czynnego (1b - barn)

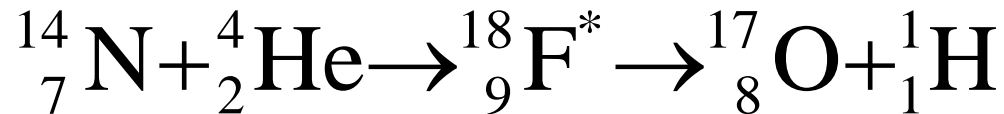
Zazwyczaj przekroje czynne reakcji są rzędu mili i mikro barnów.

Reakcje jądrowe

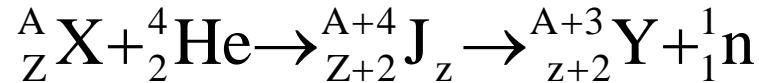
1. α -proton



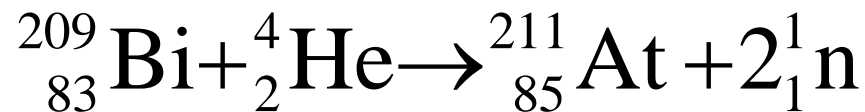
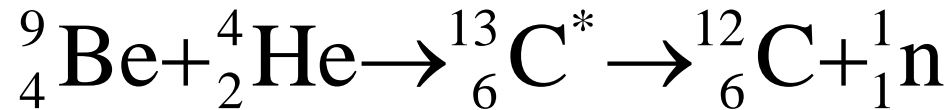
pierwsze doświadczenie Rutherforda



2. α -neutron

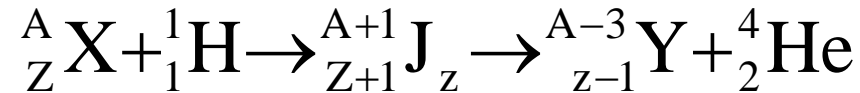


reakcja będąca popularnym źródłem neutronów

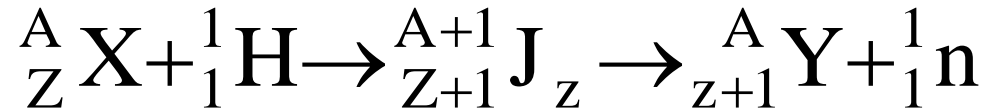


Reakcje jądrowe

3. proton - α

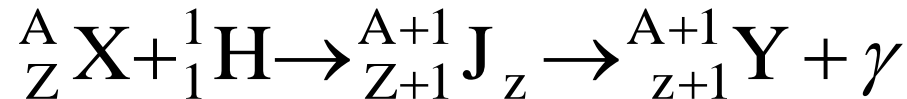


4. proton-neutron



W tej reakcji otrzymuje się jądra izobaryczne np. ${}^{11}B(p,n){}^{11}C$, ${}^{18}O(p,n){}^{18}F$, ${}^{63}Cu(p,n){}^{63}Zn$

5. proton - γ

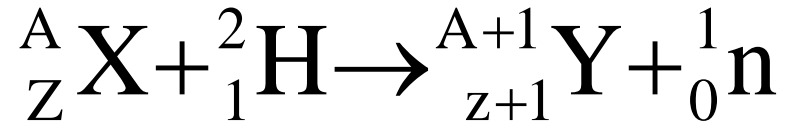
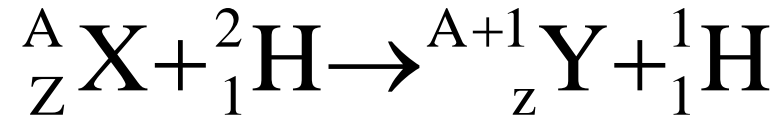
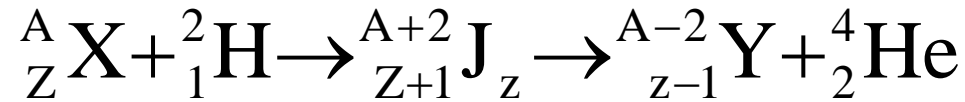


Gdy w wyniku bombardowania protonami tworzy się jądro stosunkowo trwałe (mające liczby magiczne) to wzbudzenie jądra złożonego realizuje się poprzez emisję kwantu γ .



Reakcje jądrowe

6. reakcje deutron- α , deutron - proton, deutron-neutron



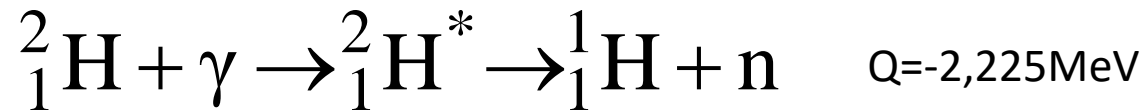
Reakcje jądrowe

7. Reakcje fotojądrowe

Reakcje jądrowe zachodzące pod wpływem bombardowania wysokoenergetycznymi fotonami.

Aby wybita mogła być cząstka z jądra energia fotonu musi być co najmniej większa od energii wiązania cząstki w jądrze.

Dla lekkich jąder, gdzie energia wiązania jest mała fotorozpad może zajść przy stosunkowo małych energiach.



Źródłem wysokoenergetycznego promieniowania γ mogą być akceleratory, tzw. promieniowanie hamowania, niektóre reakcje (p, g) np. ${}^7\text{Li}(p,g){}^8\text{Be}$ emituje kwant γ o energii 17,2 MeV.

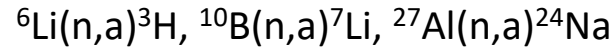
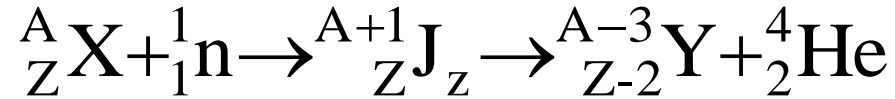
8. reakcje powodowane elektronami

Reakcje te są rzadkie i nie mają znaczenia praktycznego.

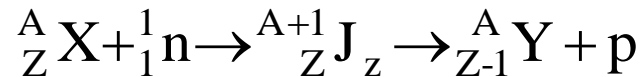
np: ${}^{63}\text{Cu}(e,e,n){}^{62}\text{Cu}$, ${}^{64}\text{Zn}(e,e,n){}^{63}\text{Zn}$, ${}^{109}\text{Ag}(e,e,n){}^{108}\text{Ag}$

Reakcje jądrowe

9. reakcje neutron - α



10. reakcje neutron-proton



Produktami są izobary tarczy.

Tego typu reakcją produkuje się ${}^{14}\text{C}$ stosowany powszechnie w naukach biologicznych ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$

Napromieniowując NH_4NO_3 można otrzymać duże wagowe ilości ${}^{14}\text{C}$

Reakcje jądrowe: reakcje rozszczepienia i syntezy

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

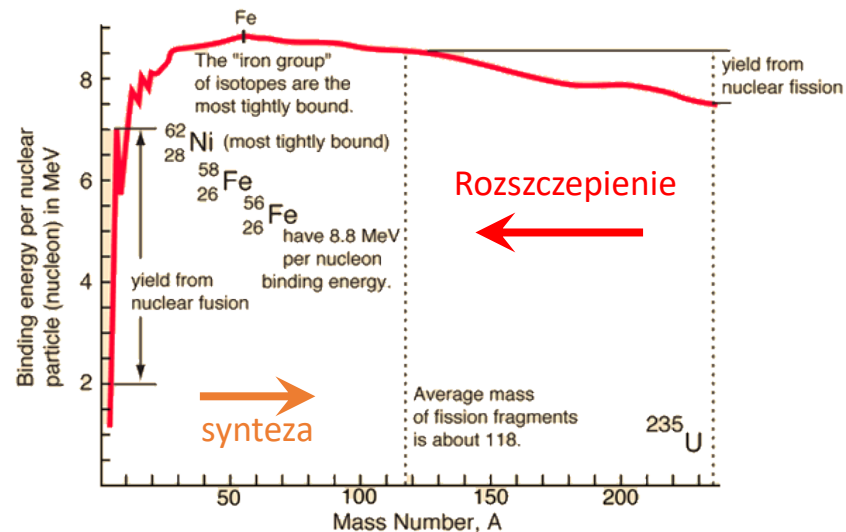


Reakcje syntezy w gwiazdach to źródło pierwiastków we Wszechświecie.

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



Reakcje rozpadu to źródło energii w obecnych reaktorach jądrowych.

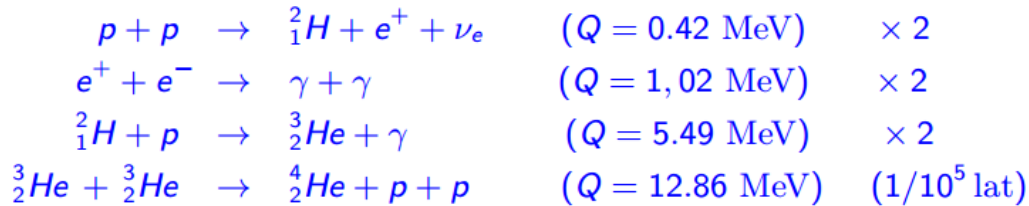


Reakcje jądrowe: reakcje rozszczepienia i syntezy

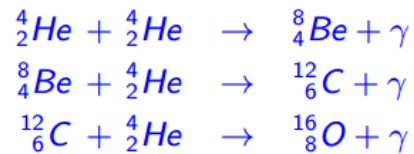
- ▶ Wnętrze Słońca to reaktor jądrowy, w którym zachodzą **reakcje syntezy**

$$T = 1.5 \cdot 10^7 \text{ K}, \quad p = 6 \cdot 10^{11} \text{ atm}, \quad \rho = 150 \text{ g/cm}^3$$

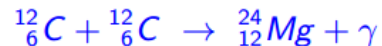
- ▶ Dominuje **cykl protonowo-protonowy (pp)** - 86% energii:



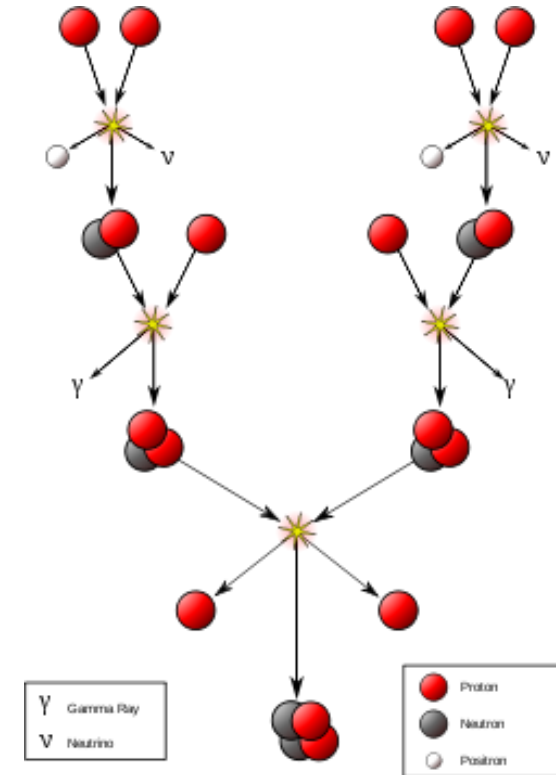
- ▶ Z 4 protonów powstaje stabilne jądro helu i energia **26.7 MeV**, z której **0.5 MeV** jest unoszone **natychmiast** przez neutrino (2.3 s), a fotony są **transportowane** na powierzchnię i emitowane w ciągu 10 000 – 170 000 lat.
- ▶ Pozostałe 14% energii pochodzi z **cyklu węglowo-azotowo-tlenowego (CNO)**, w którym węgiel ^{12}C pełni rolę katalizatora.
- ▶ Po wypaleniu wodoru gwiazda zapada się grawitacyjnie - temperatura rośnie do 10^8 K i rozpoczyna się spalanie helu (**reakcja endoenergetyczna**)



- ▶ Po spalaniu helu następuje ponowna kontrakcja grawitacyjna prowadząca do syntezy cięższych pierwiastków aż do okolic żelaza $^{56}_{26}\text{Fe}$, np.









- ▶ Dla liczby masowej $A > 100$ powstawanie ciężkich pierwiastków zachodzi poprzez wyłapywanie neutronów, a następnie rozpad β^- .



Reakcje jądrowe: reakcje rozszczepienia i syntezy

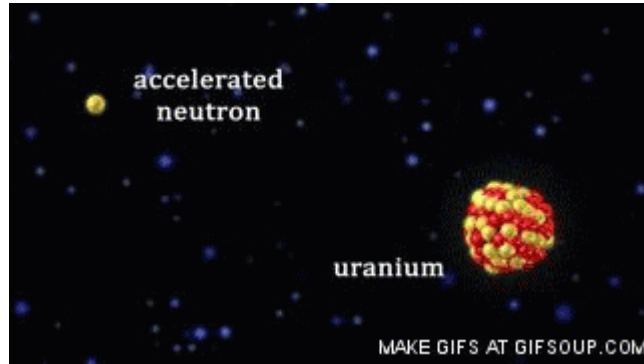
- ▶ najlżejsze pierwiastki powstały na początku ewolucji Wszechświata
- ▶ cięższe pierwiastki powstały w ostatnich fazach ewolucji gwiazd
- ▶ najcięższe pierwiastki są wytworzone sztucznie w laboratorium

1 H	big bang fusion 										cosmic ray fission 						2 He
3 Li	4 Be	merging neutron stars 					exploding massive stars 					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 					exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra																
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U												

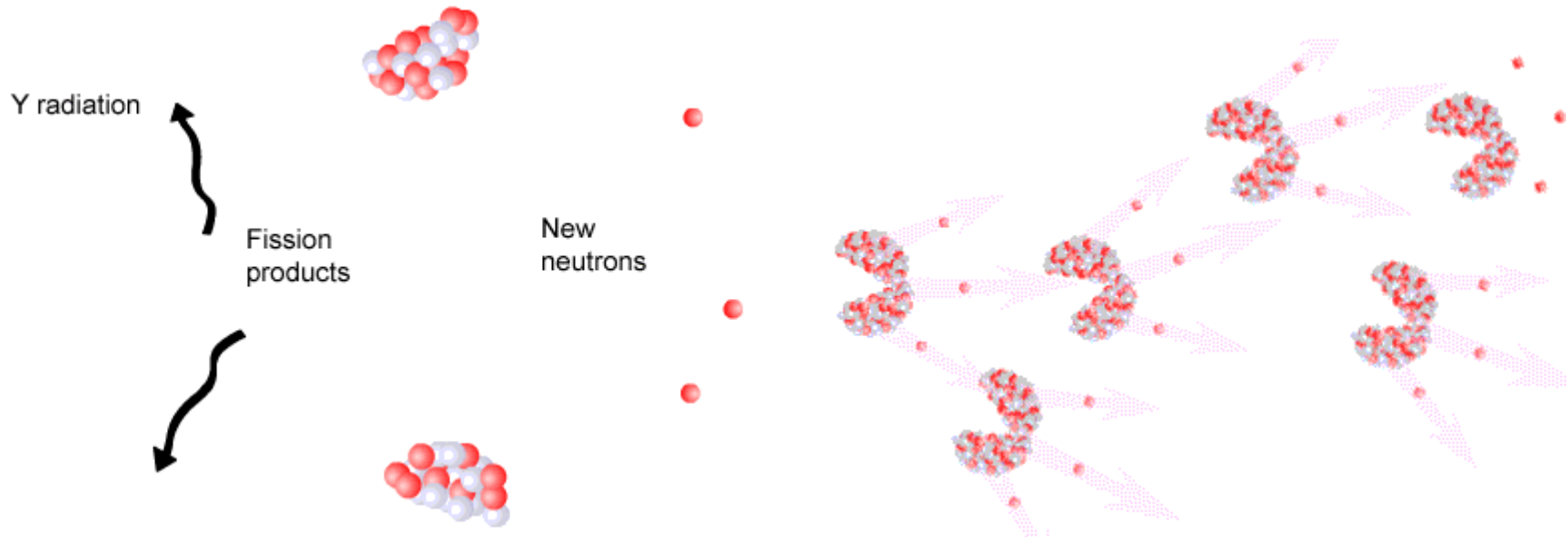
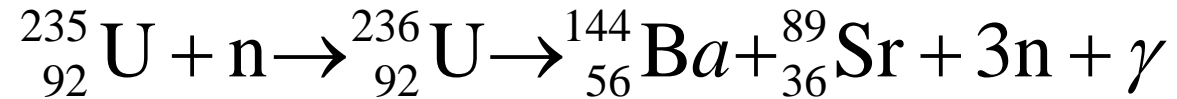
1 H																	18 He
2 Li	4 Be											13 B	14 C	15 N	16 O	17 F	18 Ne
3 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
8 Uue																	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

* lanthanoids
** actinoids

Reakcje jądrowe: reakcje rozszczepienia i syntezy



Reakcje rozszczepienia polegają na wychwycie cząstki przez jądra pierwiastków ciężkich i rozpadzie silnie wzbudzonego jądra na dwa nietrwałe fragmenty oraz neutrony.

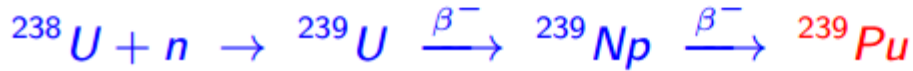


Reakcje jądrowe: reakcje rozszczepienia i syntezy

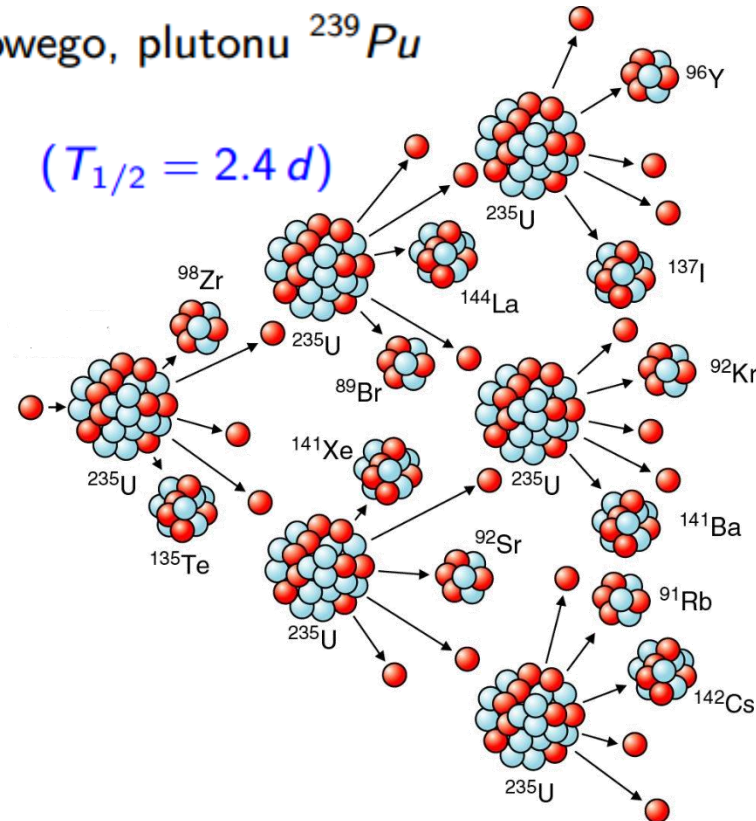
▶ Reakcja łańcuchowa zachodzi przy wystarczającej ilości izotopu uranu ^{235}U w paliwie, która przekracza **masę krytyczną**.

- ▶ W uranie naturalnym ^{238}U znajduje się **0.72 %** uranu ^{235}U .
- ▶ Paliwo reaktorowe to uran wzbogacony z zawartością **1.8 – 20 %** ^{235}U .
- ▶ Wzbogacanie w wirówkach poprzez oddzielenie dwóch izotopów uranu.
- ▶ W uranowych bombach jądrowych zawartość ^{235}U dochodzi do **95 %**.

▶ Bomby **plutonowe** z produktu rozpadu paliwa jądrowego, plutonu ^{239}Pu



($T_{1/2} = 2.4\text{ d}$)



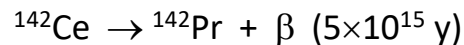
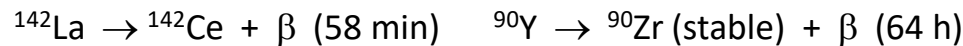
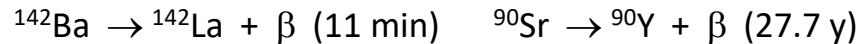
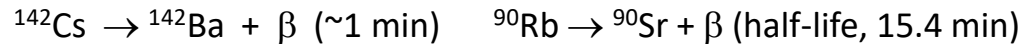
Reakcje jądrowe: reakcje rozszczepienia jądra

Bilans energetyczny reakcji rozszczepienia ^{235}U

zakładamy reakcje rozszczepienia:



Produkty rozszczepienia ulegają dalszym rozpadom β^-



Bilans masy:



$$235.04924 = 141.907719 + 89.904703 + 3 \times 1.008665 + Q$$

$$Q = (235.043924 - 141.907719 - 89.904703 - 3 \times 1.008665) = 0.205503 \text{ amu} \times 931.4812$$

$$= 191.4 \frac{\text{MeV}}{\text{na}} \text{rozpad} \times 1.6022 \times 10^{-13} = 3.15 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Ile energii wydziela się z rozszczepienia 1.0 kg ^{235}U ?

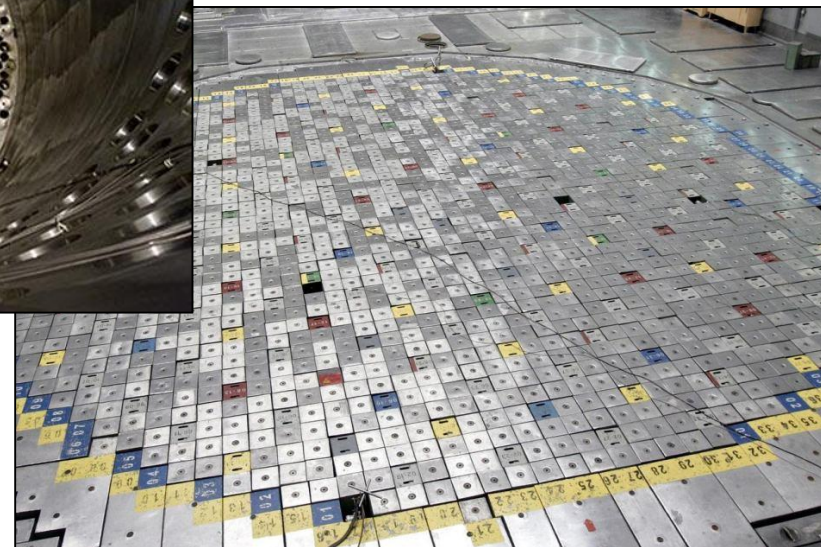
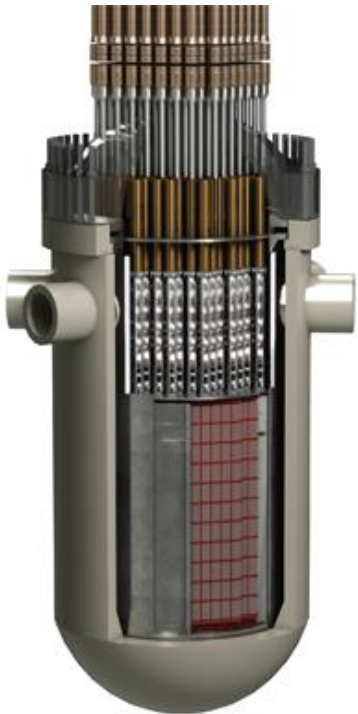
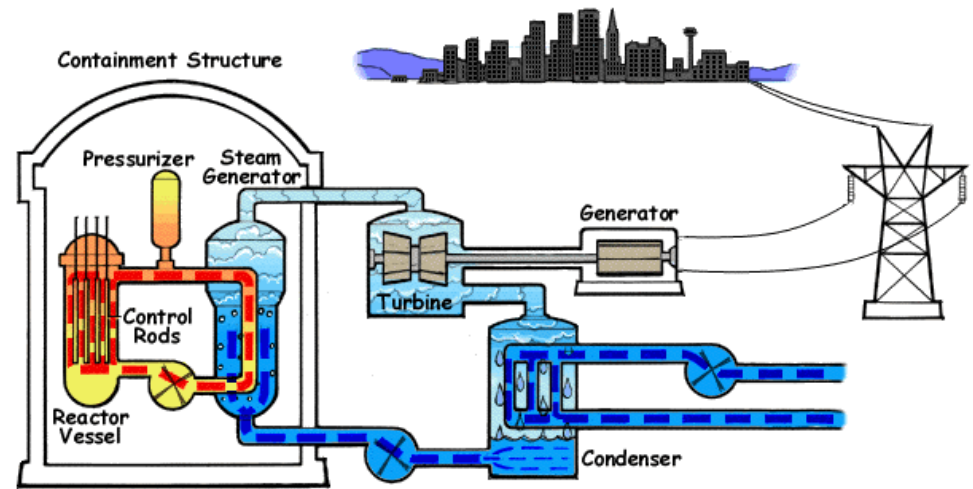
8.061013 J/kg

Jest to równoważnik 2 mln kg węgla

Reakcje jądrowe: reakcje rozszczepienia jądra

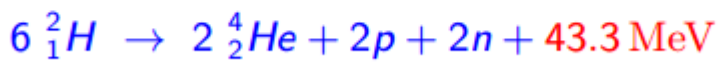
1 kg uranu-235 =

- 3 miliony kg węgla kamiennego
- 10 miliardów kg węgla brunatnego
- 2,3 miliardów kg ropy naftowej
- 2,25 miliardów m³ gazu ziemnego
- 21 milionów kg trotylu !!!



Reakcje jądrowe: reakcje syntezy

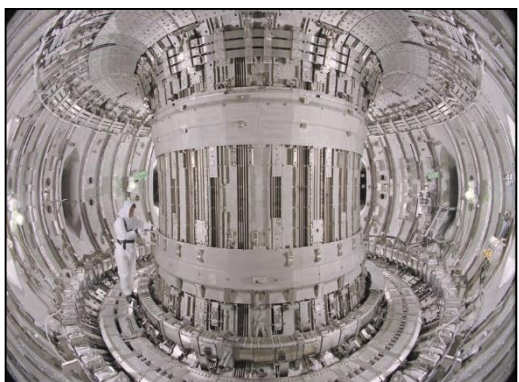
► **Marzenie ludzkości** - kontrolowana energia z syntezy lekkich jąder deuteru



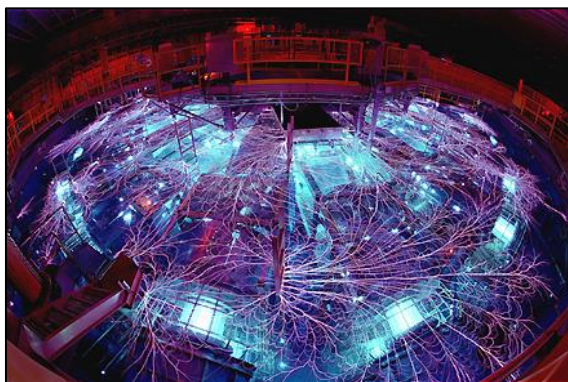
Proton-proton fusion chain process



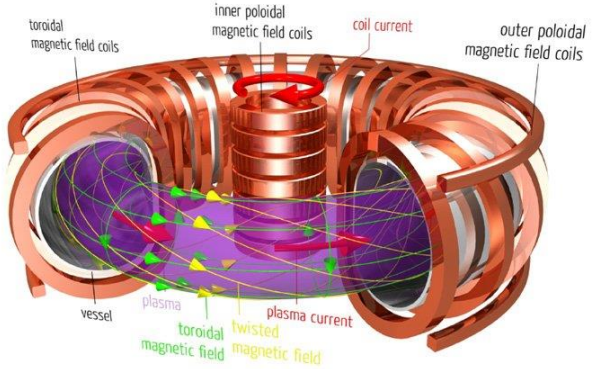
1st step: In two separate reactions, 2 protons in each reaction fuse



tokamaki i stellatory



skurcz plazmy (Maszyna Z)



2003: 6'30''



14 G\$ Cadarache, Francja, ITER (2019, 2020, 2027)

Reakcje jądrowe: reakcje syntezy

National Ignition Facility

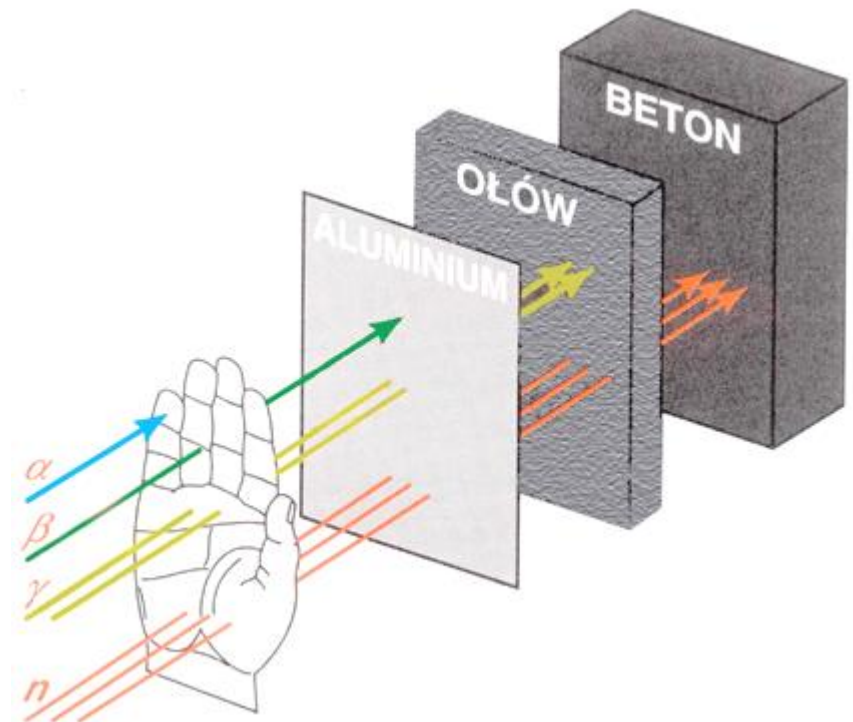


1. Promienie laserów X gwałtownie podgrzewają powierzchnię kapsułki z paliwem (D-T) tworząc plazmą „kopertę”
2. Implozja kapsułki – gorąca powierzchnia wybucha i oddala się ściskając paliwo (jak odrzut w rakiecie)
3. Paliwo jest ściskane do gęstości 20 razy większej niż ołowiu i ogrzewane do temperatury rzędu 100 mln °C (większej niż w słońcu).
4. Następuje reakcja jądrowa, w której uwolniona energia wielokrotnie przewyższa energię dostarczoną przez lasery. Całość trwa ok. 10 ps

- Od 15 marca 2012 laser o największej mocy
- Październik 2012 – zakończenie finansowania projektu NIF (ponad 5 mld \$) – spełniona tylko 1/10 warunków do uzyskania zapłonu
- Kłopoty techniczne: symetria wybuchu, zabrudzenia kapsułki, rozbieżności z wynikami symulacji, kłopoty z optyką laserów
- Dyskusja nad kontynuacją (1 bilion \$ rocznie na utrzymanie infrastruktury energetycznej)
- 29 września 2013 – udało się uzyskać pierwszą syntezę z dodatnim bilansem energetycznym
- Nadal nie ma zapłonu (ang. *ignition*), czyli samopodtrzymującej się syntezy
- Obecnie spełniona jest ok. 1/3 warunków do uruchomienia elektrowni (zapłonu)
- NIF zmieniło cele na badania materiałowe

Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Promieniowanie jonizujące jest przyczyną różnych, nietypowych zjawisk fizyko-chemicznych na poziomie komórkowym, tkankowym oraz w skali całego organizmu prowadzących do **zaburzeń, dezintegracji oraz wyniszczenia.**



Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Aktywność radioizotopu:

$$A = \frac{1 \text{ rozpad}}{1 \text{ sekundę}} = 1 \text{ Bekerel (Bq)}$$

Stężenie radioizotopu to aktywność radioizotopu w jednostce masy lub objętości.
Jednostkami stężenia są **Bq/kg** lub **Bq/m³**

Czas połówkowego zaniku $T_{1/2}$, jest to czas, w którym ulega rozpadowi połowa początkowej liczby jąder danego izotopu promieniotwórczego.

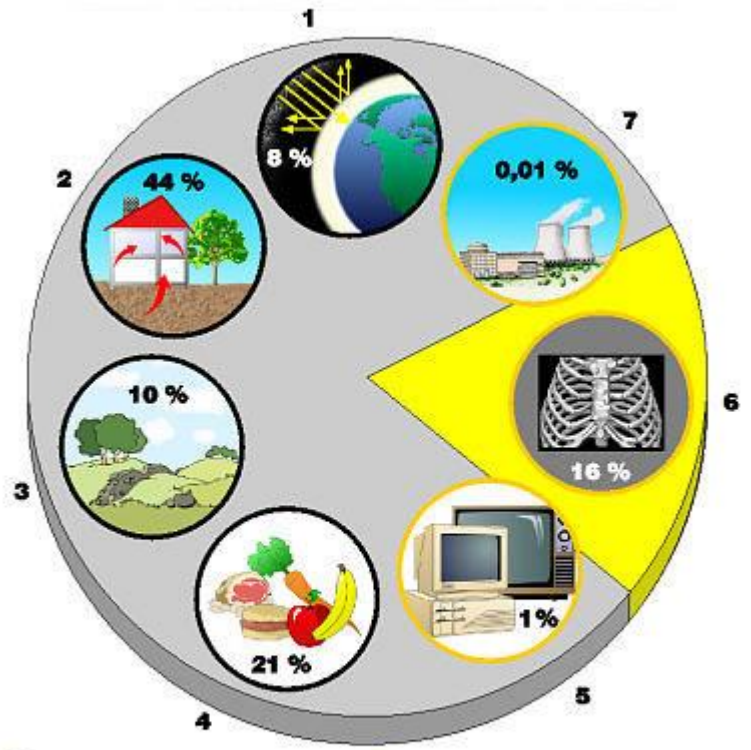
Mierzone czasy $T_{1/2}$ wynoszą od ułamków nanosekund do ~ 1026 lat.

Dawka pochłonięta (D_T) promieniowania to energia przekazana przez promieniowanie jonizujące jednostce masy absorbenta.

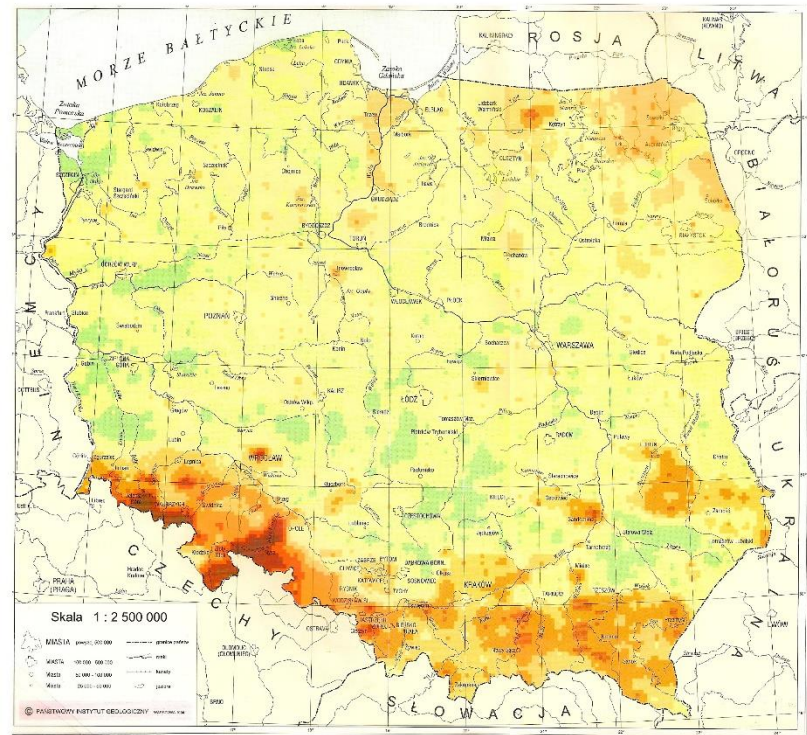
Jednostką jest grej [Gy] = [J/kg] - przekazanie 1 J energii do 1 kg ośrodka.

Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

SOURCES OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIATION



- 1. - Cosmic rays
- 2. - Radon
- 3. - Radiation from earth crust
- 4. - Internal sources
- 5. - Industrial sources
- 6. - Medicine application
- 7. - Radiation resulting from nuclear installation operation



TABLICA PLATE 72

RADIOMETRIA
RADIOMETRY

DAWKĄ PROMIENIOWANIA
GAMMA
GAMMA DOSE RATE

Skala promieniowania gamma (mSv/y)
> 90
80 - 90
70 - 80
60 - 70
50 - 60
40 - 50
30 - 40
20 - 30
< 20

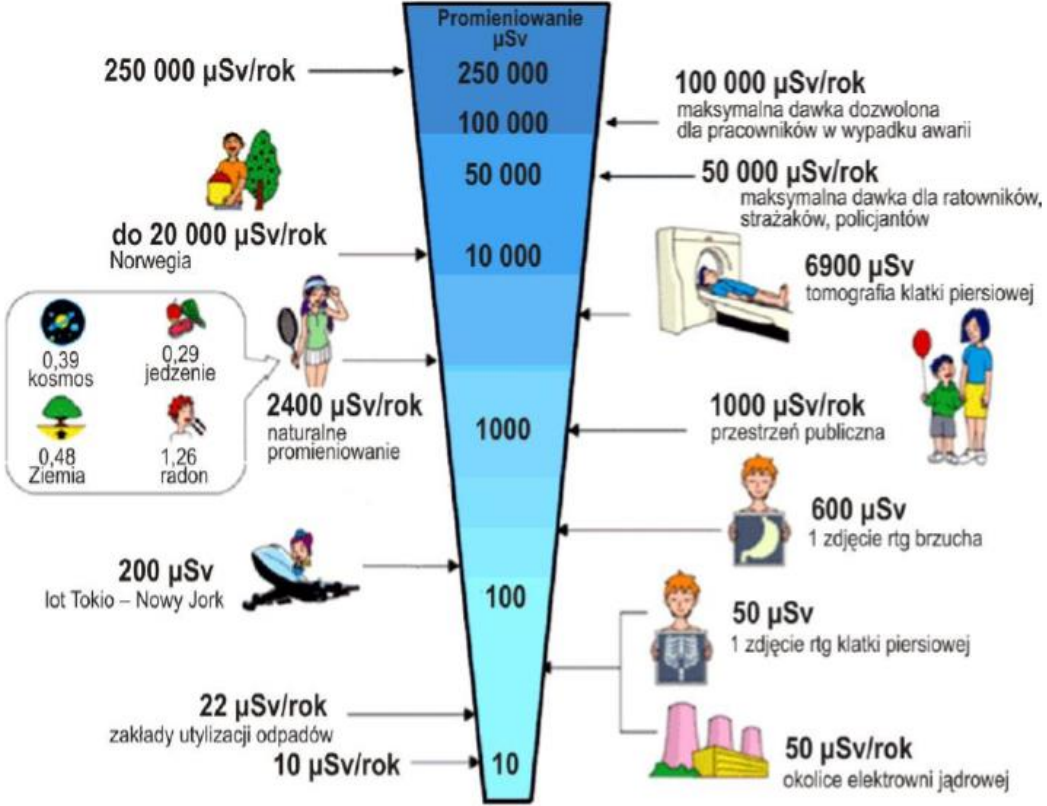
PARAMETRY STATYSTYCZNE
STATISTICS PARAMETERS

Liczba pomiarów	19520	Number of measurements
Minimum	2.3 rSv/y	Minimum
Maksimum	150.2 rSv/y	Maximum
Średnia arytm.	31.1 rSv/y	Arithmetic mean
Średnia geom.	30.2 rSv/y	Geometric mean
Mediana	32.2 rSv/y	Median

HISTOGRAM

Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Przyjmowane dawki promieniowania jonizującego w życiu codziennym



Sv (sievert) = równoważna dawka napromieniowania
 $\mu\text{Sv} = 10^{-6} \text{ Sv}$; $\text{mSv} = 10^{-3} \text{ Sv}$

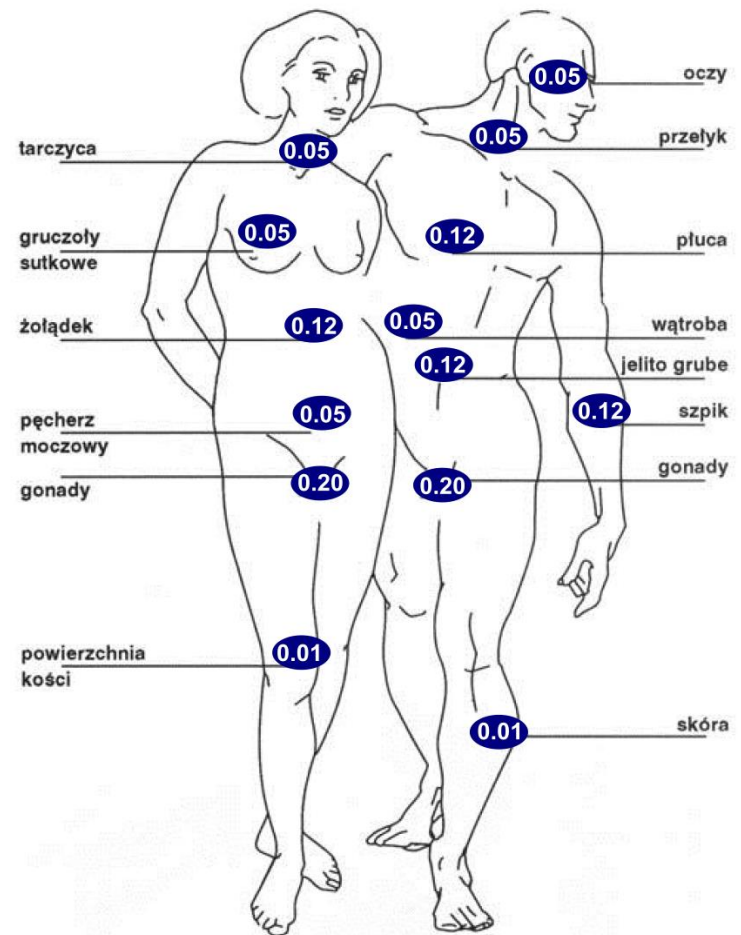
Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Skutki biologiczne występujące przy napromieniowaniu żywych organizmów ocenia się na podstawie tzw. dawki skutecznej (E_H), pochłoniętej w ustalonym przedziale czasowym Δt . **Jednostką jest siwert (Sv).**

Jej miarą jest wartość **dawki pochłoniętej** danego typu promieniowania przez **konkretną tkankę ($D_{T,R}$)** pomnożonej przez współczynnik **wagowy w_R** danego rodzaju promieniowania (razem to daje nam dawkę równoważną: H_T , jednostka Sv) i współczynnik **promieniowrażliwości w_T** wyróżnionego organu na pochłoniętą energię.

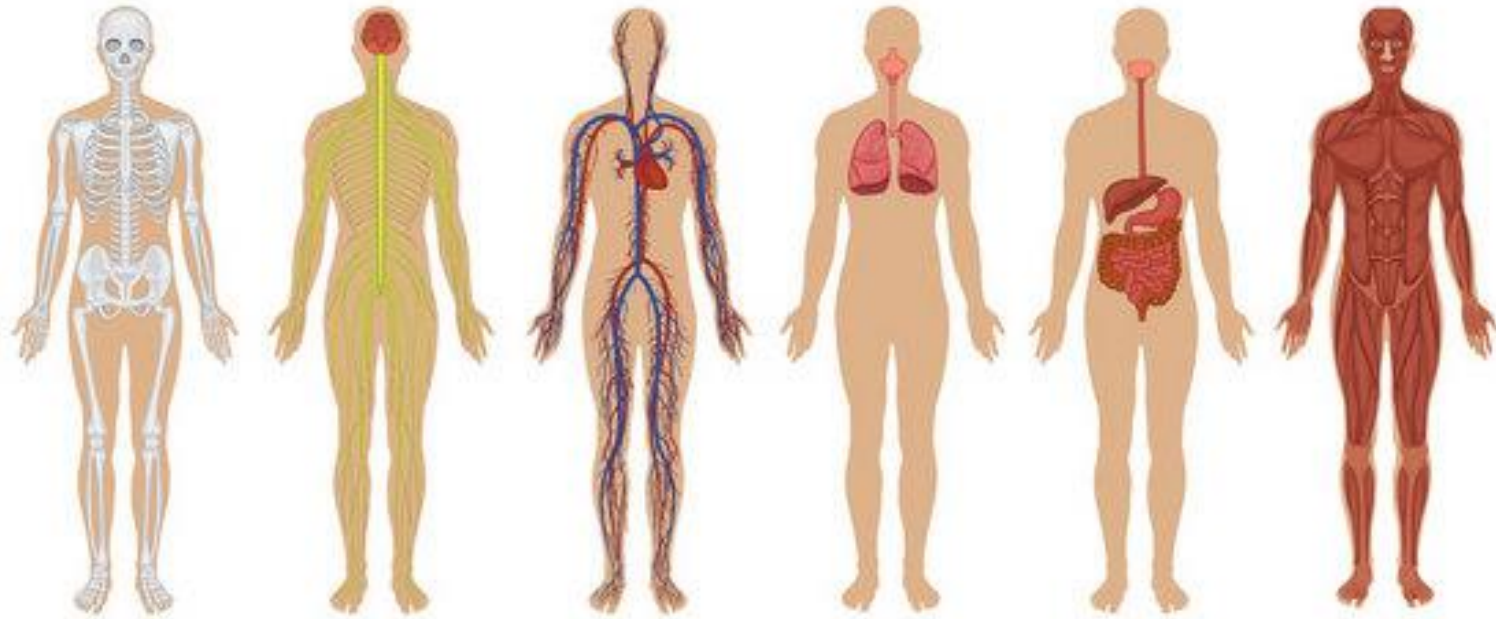
$$E_H = \sum_T w_T \sum_R H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Najbardziej szkodliwe jest **promieniowanie α** radionuklidów wdychanych (np. gazowego Rn-222) o współczynniku **$w_R = 20$** i **promieniowanie neutronowe**, którego w_R w zależności od energii neutronów ma wartości w zakresie od **5 do 20**. Promieniowanie β i γ charakteryzuje **$w_R = 1$** . Najbardziej wrażliwe na promieniowanie jonizujące są komórki szybko namnażające się, np. **komórki gonad**, dla których **$w_T = 0,20$** .



Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Śladowe ilości radioizotopów występujące w organizmie ludzkim:



Przeciętna całkowita aktywność ciała człowieka wynosi **ok. 100 Bq/kg**.

C-14 i K-40, we wszystkich tkankach,

Pu-239 i Sr-90 - w kościach,

U-238(235) - w nerkach,

J-131 - w tarczycy.

Trafiają tam z otaczającego środowiska głównie drogą oddechową i pokarmową.

Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Przeciętne typowe aktywności radioizotopów

W glebach:

U-238 - zawierają się w przedziale 4,8 - 118 Bq/kg (średnio 26 Bq/kg),

Th-228 - w przedziale 3,6 - 77 Bq/kg (średnio 21 Bq/kg),

K-40 - w przedziale 111 - 967 Bq/kg (średnio 413 Bq/kg).

Średnia aktywność radonu **Rn-222**:

w powietrzu przy ziemi: - wynosi ok. 4,4 Bq/m³,

w parterowych zabudowaniach może przekraczać: Rn-222 - 200 Bq/m³.

W następstwie spalania w Polsce ok. 150 mln ton węgla kamiennego rocznie do środowiska trafia ok. 150 ton promieniotwórczego uranu i 300 ton promieniotwórczego toru.

Gromadzą się one głównie w popiołach, skąd przedostają się do wód gruntowych i do gleby. Są również uwalniane bezpośrednio do atmosfery wraz z dymem i kurzem.

Aktywność takich popiołów może przekraczać nawet 2000 Bq/kg.



Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Efekty biologiczne działania promieniowania

Poziom molekularny:

uszkodzenia pośrednie i bezpośrednie

Poziom komórki:

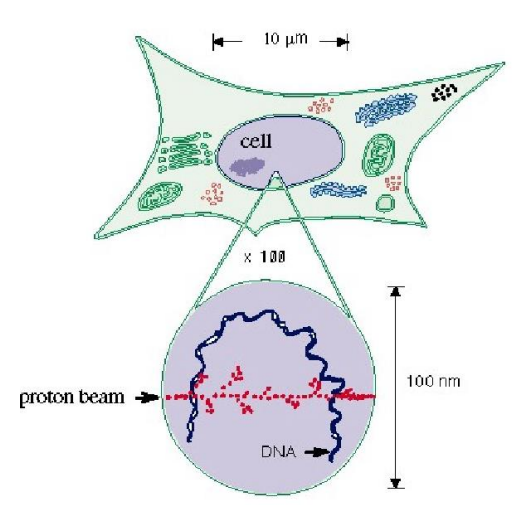
śmierć mitotyczna i interfazalna

śmierć apoptotyczna i nekrotyczna

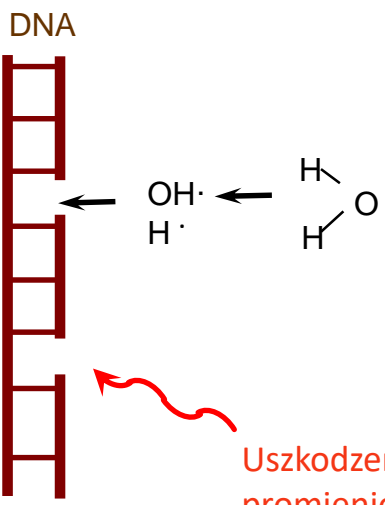
Poziom organizmu:

efekty stochastyczne i deterministyczne

wczesne i późne skutki napromienienia



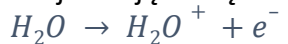
Uszkodzenia DNA



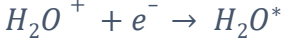
Uszkodzenia pośrednie: oddziaływanie produktów radiolizy wody (wolnych rodników) znajdującej się w jądrze komórkowym z DNA.

Uszkodzenia bezpośrednie: zderzenie cząstki promieniowania z nicią DNA.

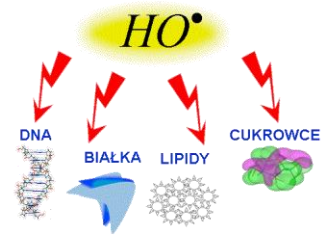
Cząstki promieniowania jonizują wodę:



Zjonizowana cząsteczka wody może np. połączyć się z uwolnionym elektronem, tworząc cząsteczkę wzbudzoną:



Na skutek jej rozpadu powstają produkty silnie reagujące ze związkami chemicznymi wchodzącymi w skład komórek organizmu:



Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

BIOLOGICZNE SKUTKI PROMIENIOWANIA

SOMATYCZNE

WCZESNE

- Choroba popromienna
 - ostra
 - przewlekła
- Miejscowe uszkodzenia skóry

ODLEGŁE

- Zmętnienie soczewek
- Aberracje chromosomowe w komórkach somatycznych
- Niepłodność

GENETYCZNE

MUTACJE GENOWE

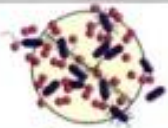











- dominujące
- recesywne

Aberracje chromosomowe w komórkach

Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Wrażliwość organizmów żywych na promieniowanie jonizujące...

Dawki LD_{50}^{30} [Sv]

 5000	 150
 1000	 10
 1000	 8
 800	 5
 200	 2,5 - 3
 8,5	 2,5

Przyjmuje się, że szkodliwy wpływ napromieniowania na zdrowie człowieka w postaci skutków deterministycznych można zaobserwować po **przekroczeniu dawki progowej 200 mSv**, pochłoniętej jednorazowo (w krótkim czasie).

Następuje wtedy zniszczenie na tyle dużej liczby komórek, że funkcjonowanie niektórych organów człowieka może ulec wyraźnemu zaburzeniu.

Jednorazowa dawka śmiertelna LD_{50}^{30} , powodująca chorobę popromienną i po 30 dniach zgon 50% napromieniowanej populacji, oceniana jest na **4-6 Sv**. **Średnia dawka śmiertelna dla człowieka to ~3 Sv w czasie 1-2 godzin**

Promieniowanie jonizujące: szkodliwość

Wrażliwość organizmów żywych na promieniowanie jonizujące...

Ustalenie **szkodliwości małych dawek** (podprogowych), porównywalnych z dawką od tła naturalnego, na tle wielu innych przyczyn wywołujących podobne skutki **jest praktycznie niemożliwe**.

Można jednak przypuszczać, że jest ona znikoma, **gdyż żywe komórki mają naturalną zdolność regeneracji niewielkich uszkodzeń radiacyjnych, którą nabyły, zapewne, obcując z promieniowaniem naturalnym przez tysiące lat**. Uważa się nawet, że małe dawki mogą być pożyteczne dla organizmu człowieka (**hormeza radiacyjna**). Np. wody lecznicze w uzdrowiskach Łącka Zdroju zawierają Rn-222 o aktywności sięgającej 2500 Bq/l.

Wg obowiązujących w Polsce przepisów ⁽¹⁾ dopuszczalna dawka skuteczna, na całe ciało od promieniowania z innych źródeł niż naturalne, wynosi **1mSv/rok** dla ogółu ludności i **20mSv/rok** dla osób narażonych na promieniowanie jonizujące zawodowo.

Systematyczne badanie radioaktywności w środowisku i monitorowanie skażeń promieniotwórczych należy do zadań specjalnych służb ochrony radiologicznej, których stacje pomiarowe rozmieszczone są w wielu miejscach naszego kraju.

(1) Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego ([Dz. U, Nr 20, poz. 168 z 2005 r.](#))