

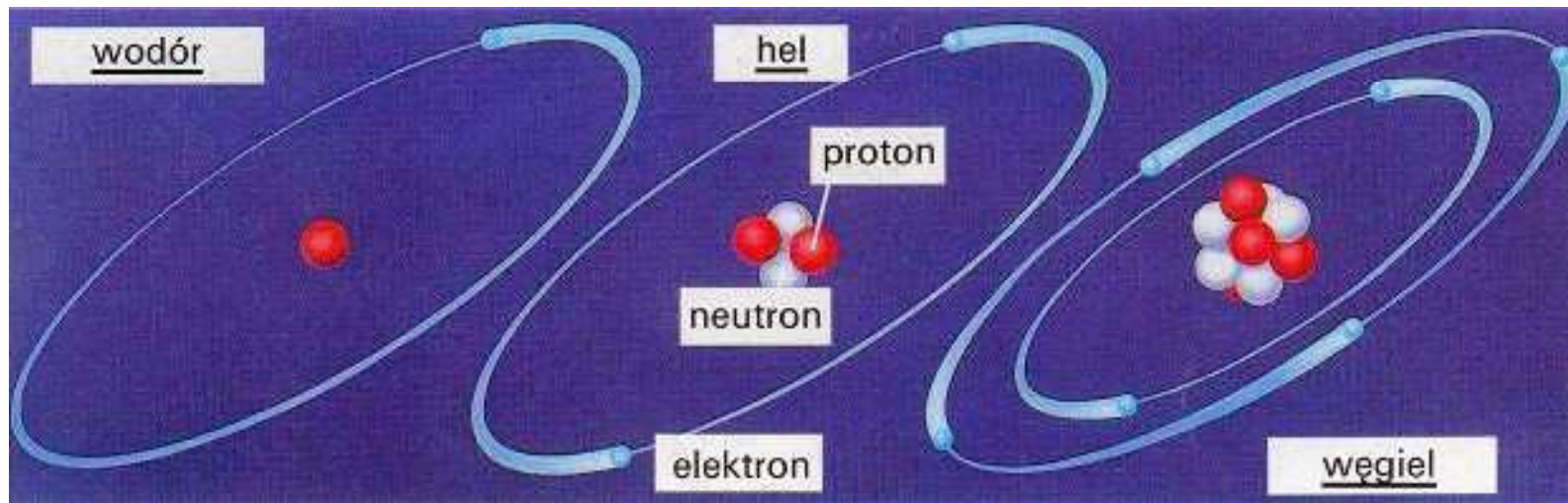
**Wykład IX-X**

Podstawy Procesów i  
Konstrukcji Inżynierskich

# Fizyka jądrowa

## Budowa jądra atomowego

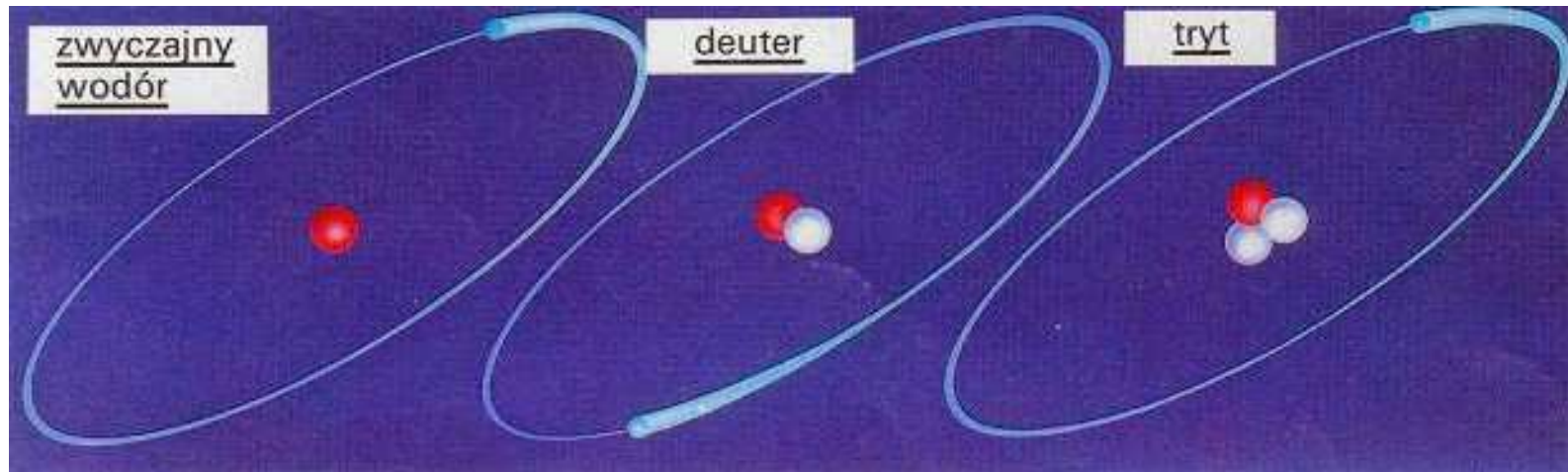
- każde jądro atomowe składa się z dwóch rodzajów **nukleonów**: protonów i neutronów, wiązanych siłami jądrowymi
- **nuklidy** to jądra większe niż nukleon



## Budowa jądra atomowego

Jądra atomowe o jednakowej liczbie protonów, lecz różnej liczbie neutronów nazywa się **izotopami**

Izotopy wodoru:  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  (deuter),  $^3\text{H}$  (tryt)



## Budowa jądra atomowego

**A**  
**Z** **X**

**A** – **liczba masowa** – sumaryczna ilość protonów i neutronów wchodzących w skład jądra

**Z** – **liczba atomowa** – liczba protonów w jądrze równa liczbie porządkowej pierwiastka w układzie okresowym

**A-Z** – liczba neutronów

${}^{14}_6\text{C}$  izotop węgla składający się z 6 protonów i 8 neutronów

---

Do określenia masy atomu stosuje się jednostkę masy atomowej **u**

$$u = \frac{1}{12} M_{{}^{12}_6\text{C}} = 1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

## Budowa jądra atomowego

Masa [ $10^{-30}$ kg]		
elektron	proton	neutron
0,9109	1672,62	1674,50

Gęstość materii jądrowej  $\rho \sim 10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>, stała dla wszystkich jąder

Średni promień dla wszystkich jąder

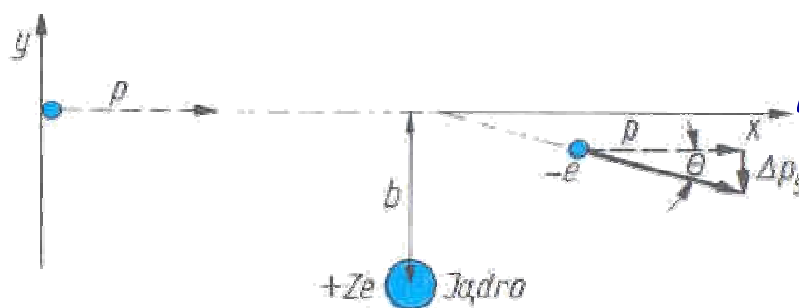
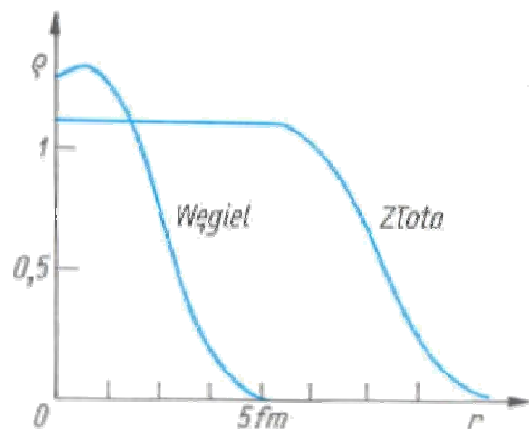
$$R \approx (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}) A^{1/3}$$

1 fermi = 1 fm =  $10^{-15}$  m

**A** – liczba masowa

## Rozpraszanie elektronów wysokiej energii

- oddziaływanie elektronów przechodzących przez materię jądrową ma charakter elektromagnetyczny (zależy od ładunku jądra) dzięki czemu można określić rozkład ładunku elektrycznego lub rozkład protonów wewnątrz jądra
- elektrony są odchylane pod większymi kątami jeśli ładunek skupiony jest w pobliżu środka jądra niż jeśli ten sam ładunek jest rozłożony w całej kuli



$$b = \frac{k_0 Z e^2}{p v \operatorname{tg}(\theta/2)}$$

Jeśli cały ładunek jądra jest rozłożony na powierzchni sfery o promieniu  $R$  to promień jądra wynosi:

$$R = \frac{k_0 Z e^2}{p v \operatorname{tg}(\theta_{max}/2)}$$

## Budowa jądra atomowego

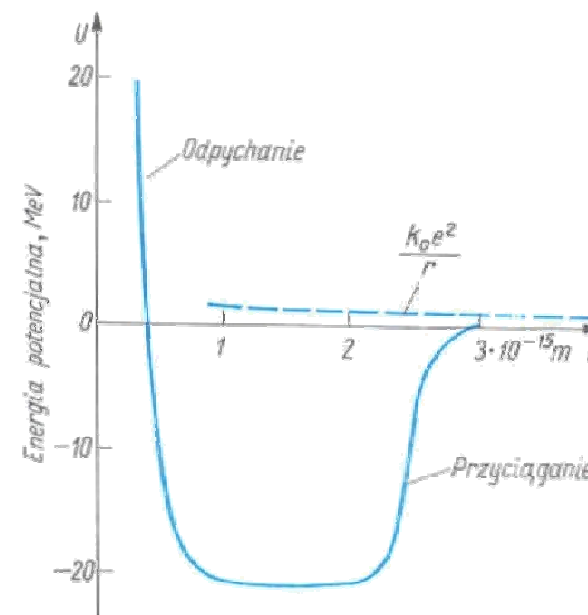
Siły wiążące nukleony w jądrze atomowym nazywa się **siłami jądrowymi** lub **oddziaływaniami silnymi**. Siły jądrowe są:

**a) krótkozasięgowe** – ich zasięg działania jest rzędu  $10^{-15}\text{m}$

**b) niezależne od ładunku elektrycznego**

- identyczne są oddziaływania typu proton-proton, neutron-neutron czy proton-neutron

**c) wykazują własność wysycenia** – każdy nukleon oddziałuje tylko z ograniczoną liczbą innych nukleonów



Wykres energii potencjalnej elementarnego oddziaływania nukleon-nukleon

## Energia wiązania jądra

- **energia wiązania** jądra atomowego jest to praca jaką należy wykonać, aby rozdzielić jądro atomowe na swobodne nukleony bez nadania im energii kinetycznej
- **defekt masy** – masa jądra atomowego jest zawsze mniejsza od sumy mas swobodnych neutronów i protonów wchodzących w jego skład; jest to wynikiem wydzielania się energii podczas tworzenia się jądra

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n - M]$$

$m_p, m_n, M$  – masy protonu, neutronu i jądra

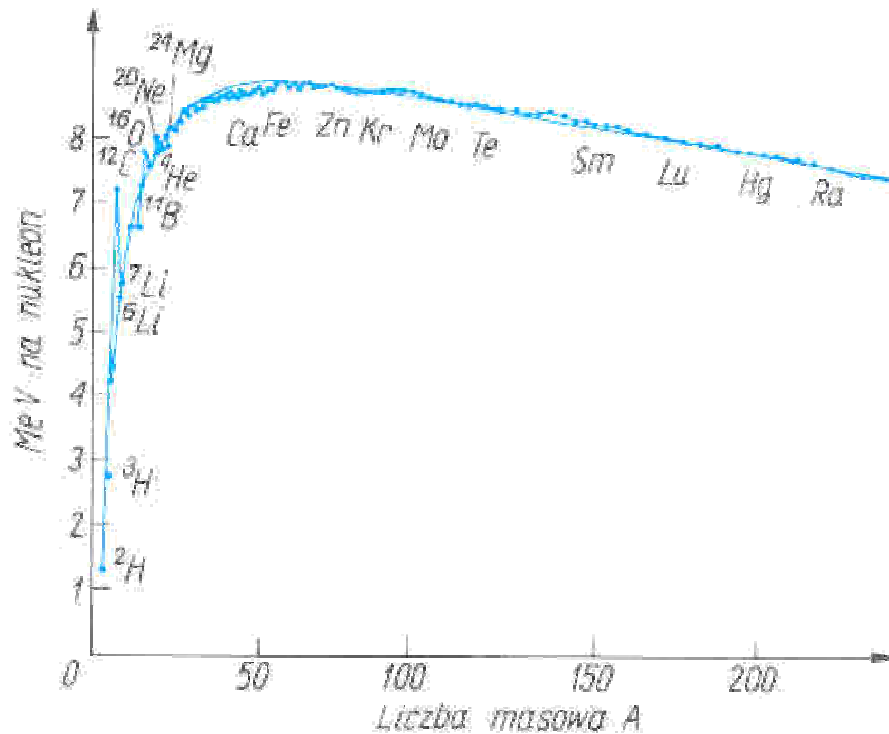
- z równości Einsteina:  $\Delta E = E_w = \Delta mc^2$
- zamiana masy w energię potencjalną zwaną **energiją wiązania jądra atomowego**

1 jednostka masy atomowej odpowiada  $1,491 \cdot 10^{-10} \text{J} = 931,44 \text{ MeV}$



# Energia wiązania jądra

- średnia energia wiązania przypadająca na nukleon



$$E_{w,śr} = \frac{E_w}{A} \approx 7 - 8 \text{ MeV}$$

Energia wiązania przypadająca na jeden nukleon w funkcji liczby masowej

## Modele jądra atomowego

**Model kropłowy** – jądro jest konfiguracją ciasno ułożonych protonów i neutronów, z których każdy oddziałuje tylko z najbliższymi sąsiadami. Z tego modelu można przewidzieć np.: rozszczepienie jąder ciężkich i obliczyć energie wyzwalaną podczas tego procesu

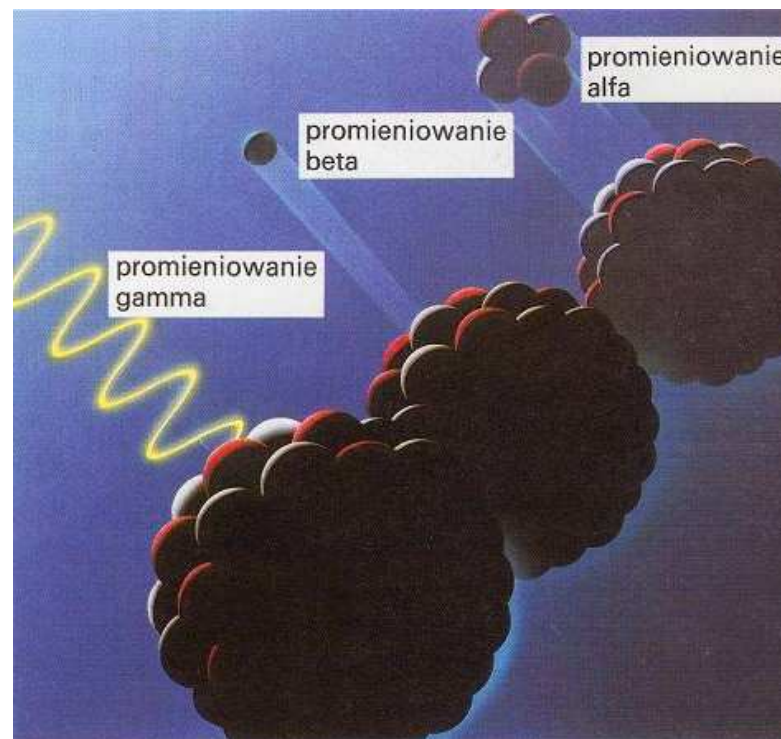
**Model powłokowy** - powstał przez analogię do powłokowej budowy atomu. Przyczyną stworzenia tego modelu było to, że jądra mające 2, 8, 20, 50, 82, 126 nukleonów jednego rodzaju, są bardzo trwałe. Liczby te nazywamy *magicznymi*. Odkrycie liczb magicznych sugerowało istnienie wewnątrz jądra powłok związanych z określonymi stanami energetycznymi jądra. Nukleony znajdują się na poziomach scharakteryzowanych przez określone liczby kwantowe i obsadzają je zgodnie z zasadą Pauliego, przy czym protony i neutrony zapełniają oddzielnie układy poziomów.

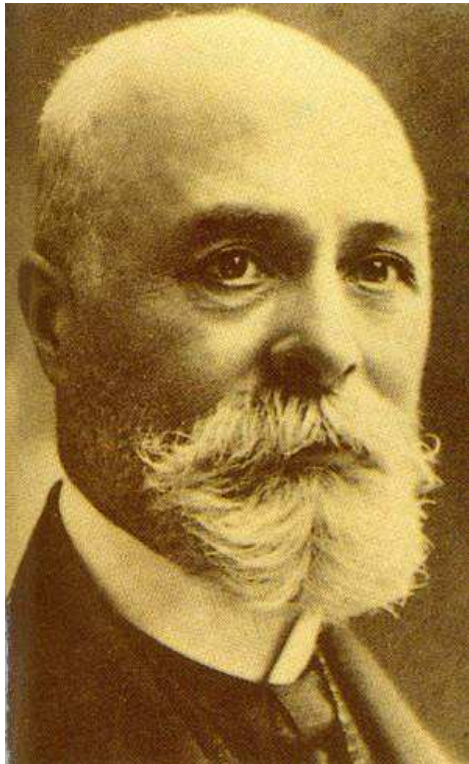
## Promieniotwórczość

**Promieniotwórczością naturalną** nazywa się samorzutną emisję cząstek  $\alpha$  (jądra helu), oraz promieniowania  $\beta$  (elektrony lub pozytony) i  $\gamma$  (fotony) z jąder atomowych. Prowadzi ona do przekształcenia się tych jąder w jądra innych pierwiastków.

Wszystkie pierwiastki powstające w wyniku kolejnych rozpadów promieniotwórczych tworzą pewien szereg nazywany rodziną promieniotwórczą. Na czele rodziny stoi pierwiastek, który jako pierwszy ulega rozpadowi. W przyrodzie znane są trzy rodziny promieniotwórcze :

- uranowa
- aktynowa
- torowa





Antoine Henri **Becquerel**

(1852-1908), francuski fizyk i chemik; odkrył w 1896r. zjawisko promieniotwórczości



Maria **Skłodowska-Curie**

(1867-1934) fizyk i chemik, współtwórczyni nauk o promieniotwórczości

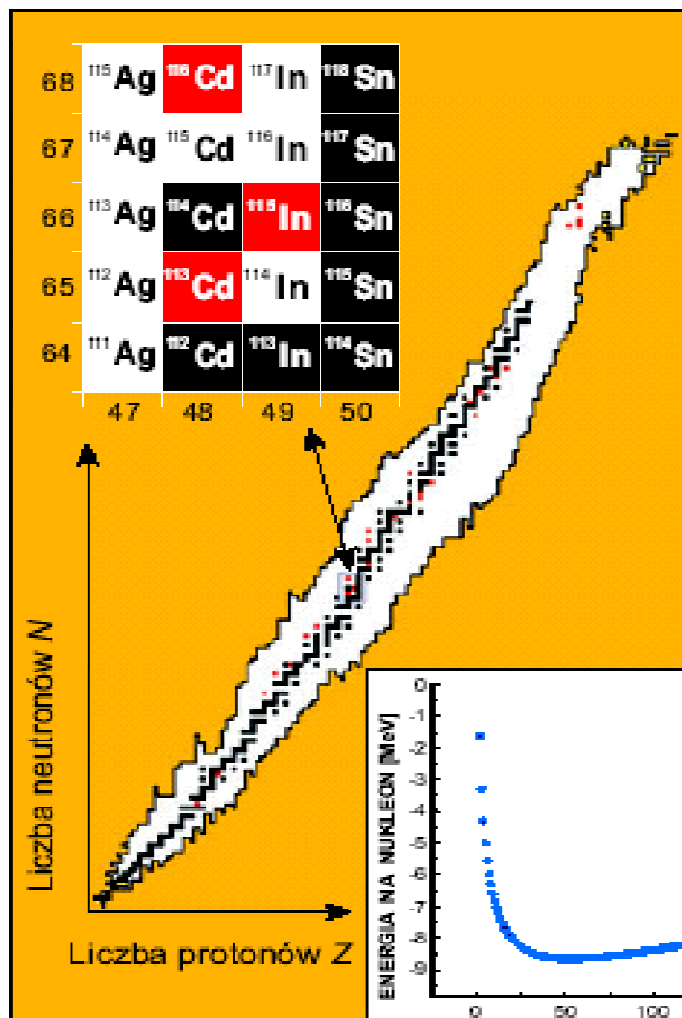


Pierre **Curie**

(1859-1906) fizyk francuski współtwórca podstaw promieniotwórczości

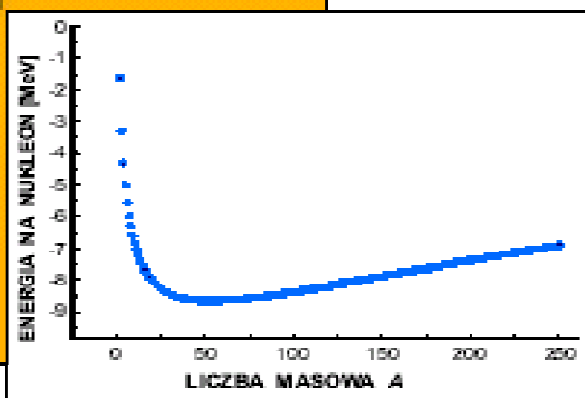
W 1903 r trzech naukowcy otrzymali nagrodę Nobla

## Izotopy stabilne i promieniotwórcze



Spośród znanych nam około 2500 izotopów, zaledwie 10% to izotopy stabilne (czarne punkty na rysunku). Pozostałe mają niekorzystną proporcję neutronów do protonów, co skutkuje nietrwałością jąder. Punkty zaznaczone na czerwono wskazują izotopy promieniotwórcze, których okres połowicznego zaniku jest porównywalny z wiekiem Ziemi. Wnoszą one stałą porcję promieniowania do naszego środowiska.

Wszystkie układy fizyczne dążą do osiągnięcia minimum energii. Z wykresu energii potencjalnej jądra przypadającej na nukleon wynika, że zarówno ciężkie jądra jak i bardzo lekkie będą zmniejszały energię układu albo w drodze rozpadów (jądra ciężkie) albo przez łączenie się (syntezę jądra lekkie). Pokazana tu zależność energii od liczby masowej jest przybliżona. W rzeczywistości jest ona mniej gładka.

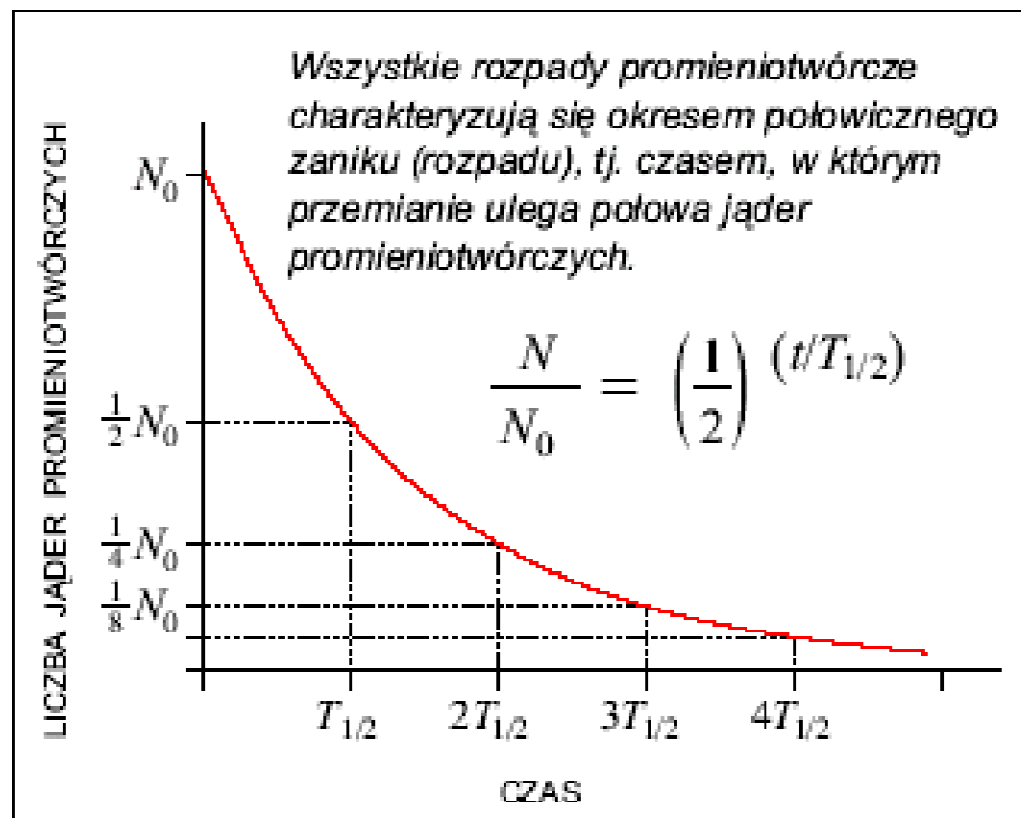


# Promieniotwórczość

## Prawo rozpadu promieniotwórczego:

ubytek liczby jąder pierwiastka promieniotwórczego w jednostce czasu, wynikający z ich promieniotwórczego rozpadu, jest proporcjonalny do liczby jąder, które jeszcze nie uległy rozpadowi

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



## Promieniotwórczość

- przez **aktywność** materiału promieniotwórczego rozumiemy liczbę jąder atomowych, które ulegają rozpadowi w czasie 1 sekundy. Jednostką aktywności jest **bekerelel (Bq)**

Jeśli dla przykładu w określonej substancji rozpadają się 403 jądra na sekundę, to jej aktywność wynosi 403 Bq.

- wcześniej używaną jednostką był curie (Ci):  $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
- promieniowanie, występujące podczas przemian jądrowych, stanowi strumień energii całkowicie lub częściowo absorbowany, czyli pochłaniany przez materię. Ilość energii, wchłoniętej przez każdy kg napromieniowanej materii nazywamy **dawką**. Jej jednostką jest **gray (Gy)**:  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ dżul/kg} = 1 \text{ J/kg}$  Wcześniej używano jednostki rad (rd):  $1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ Gy} = 1/100 \text{ Gy}$ .
- choć dawka wielkości  $1/100 \text{ Gy}$  odpowiada wzrostowi temperatury ciała ludzkiego zaledwie o  $0,0001 \text{ }^\circ\text{C}$ , to jednak u istot żywych może ona spowodować znaczne uszkodzenia radiacyjne.

Typowa dawka promieniowania przy:

- prześwietleniu: 0,1-2,5 mGy,
- tomografii jamy brzusznej: 8 mGy,
- tomografii miednicy: 25 mGy,
- napromieniowanie przedtransplantacyjne szpiku kostnego (FTBI): 12 Gy (porcjami, nie na raz)
- radioterapia: 20-80 Gy w porcjach jednorazowych 1,5-2,5 Gy

# Promieniotwórczość

**Równoważnik dawki  $H_{T,R}$**  (ang. Equivalent dose) - dawka pochłonięta w tkance lub narządzie  $T$ , z uwzględnieniem rodzaju i jakości promieniowania  $R$ .

$$H_{T,R} = \sum \omega_R D_{T,R}$$

współczynnik wagowy promieniowania  $R$

dawka pochłonięta od promieniowania  $R$ , uśredniona w tkance lub narządzie  $T$

Jednostka: siwert (1 Sv = 1 J/kg)

Rodzaj i zakres energii promieniowania	$\omega_R$
Fotony wszystkich energii	1
Elektrony i miony wszystkich energii	1
Neutrony < 10 keV	5
> 10 keV do 100 keV	10
> 100 keV do 2 MeV	20
> 2 MeV do 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protony > 2 MeV	5
Cząstki $\alpha$ , ciężkie jony	20

**Dawka efektywna  $E$**  (ang. Effective dose)

- suma dawek równoważnych od napromienienia zewnętrznego i wewnętrznego we wszystkich tkankach i narządach z uwzględnieniem odpowiednich współczynników wagowych.

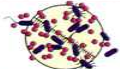











$$E = \sum_T \omega_T H_{T,R} = \sum_T \omega_T \sum_R \omega_R D_{T,R}$$

współczynnik wagowy tkanki lub narządu  $T$

dawka pochłonięta od promieniowania  $R$ , uśredniona w tkance lub narządzie  $T$

współczynnik wagowy promieniowania  $R$

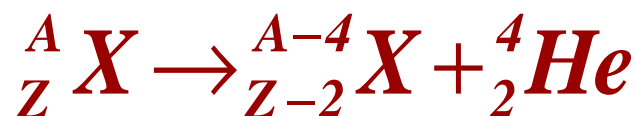
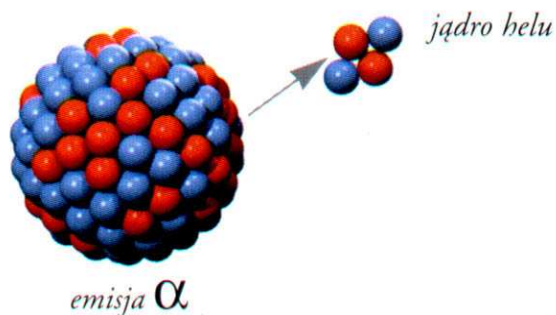
Dawki  $LD_{50}^{30}$  [Sv]

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

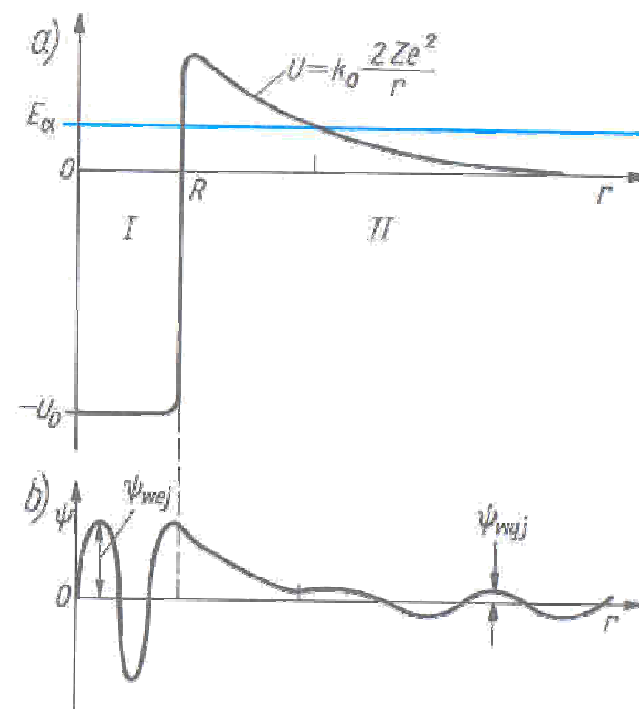
Średnie śmiertelne dawki dla różnych grup taksonomicznych



# Rozpad $\alpha$



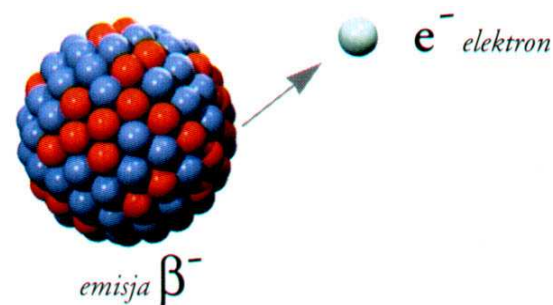
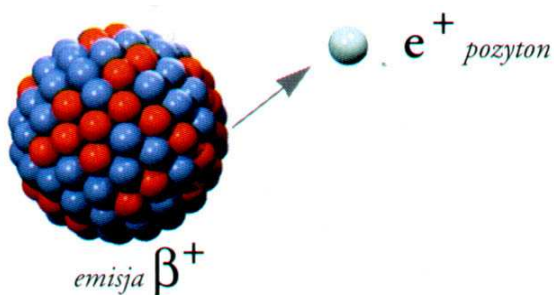
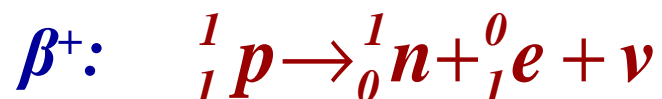
- rozpad  $\alpha$  polega na samorzutnej emisji jąder helu -  ${}^4_2 He$
- rozpad ten jest charakterystyczny dla ciężkich jąder o liczbach masowych  $A > 200$
- przy opuszczaniu jądra cząstka musi pokonać barierę potencjału wytworzoną przez działanie wiążących sił jądrowych i odpychającej siły kulombowskiej.
- wysokość tej bariery jest większa niż energia jaką posiada cząstka  $\alpha$ . Np.: wysokość bariery dla jąder uranu wynosi ok. 30 MeV, a energia emitowanych cząstek  $\alpha$  nie przekracza 10 MeV.
- rozpad  $\alpha$  zachodzi w wyniku tunelowego przejścia cząstki  $\alpha$  przez barierę potencjału



## Rozpad $\beta$

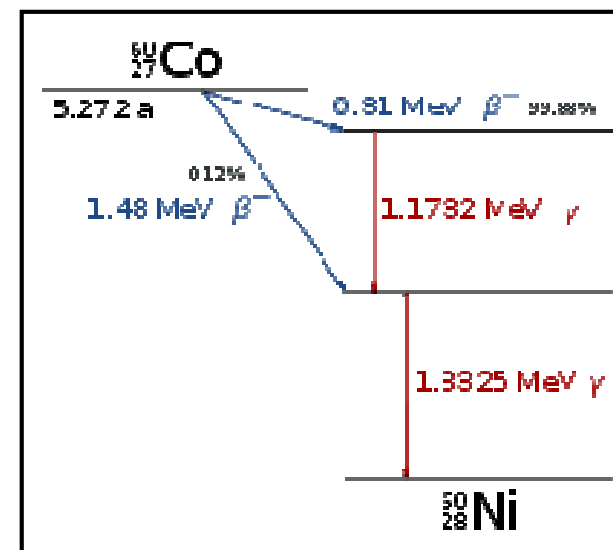
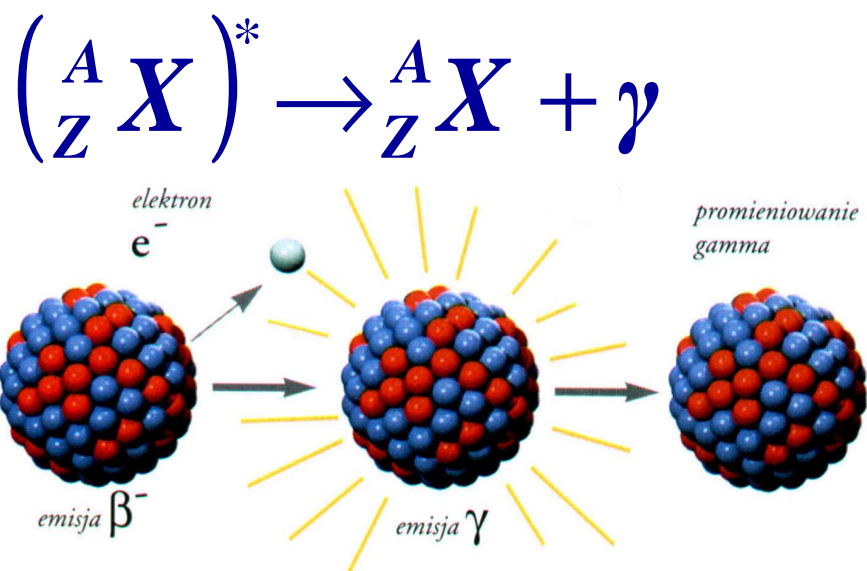


- rozpady  $\beta^-$  i  $\beta^+$  są związane z przemianami w jądrze atomowym:



- niespełnienie zasad zachowania pędu i energii doprowadziło do hipotezy **neutrino** – cząstki nie posiadającej ładunku, o znikomej masie, unoszącej część energii podczas rozpadu  $\beta$  (Pauli 1930 r)

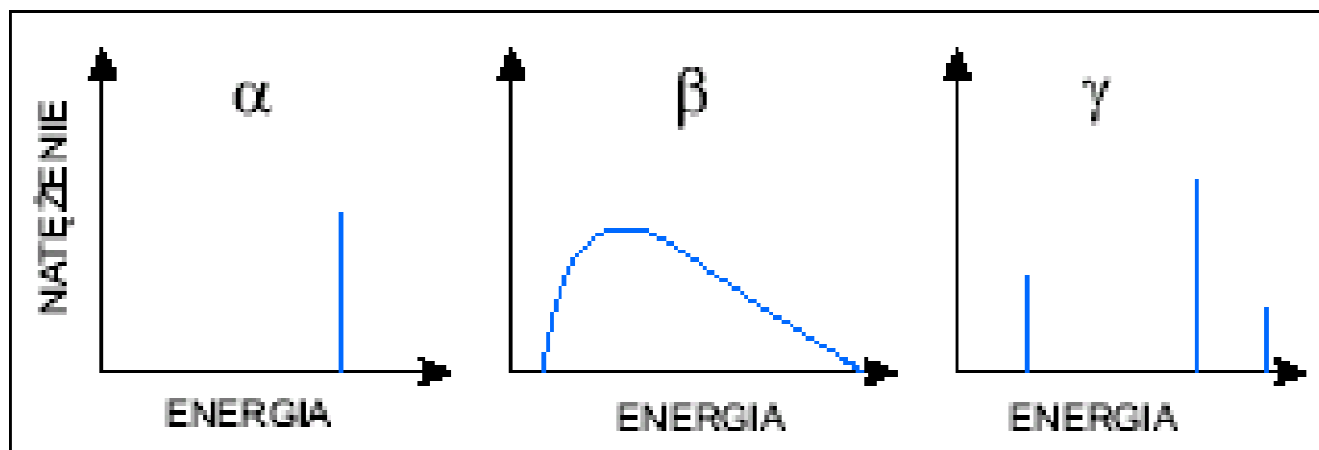
# Rozpad $\gamma$



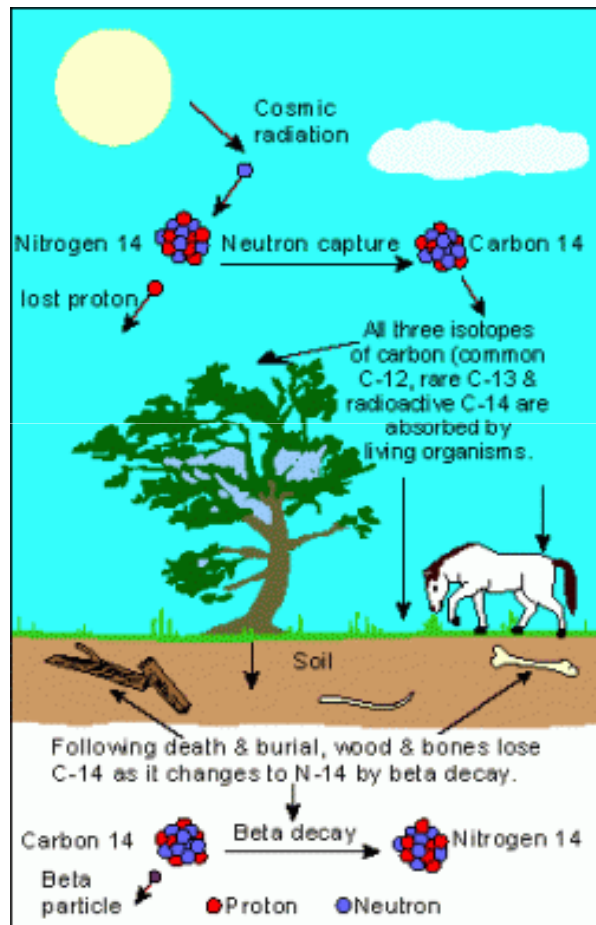
- wzbudzone jądro  $(X)^*$  powracając do stanu podstawowego, emituje promieniowanie  $\gamma$
- promieniowanie  $\gamma$  jest to strumień fotonów o energiach od 1 MeV do 1 GeV. Energie te są o kilka rzędów większe od energii fotonów światła widzialnego np.: energia fotonów światła fioletowego o dł. Fali  $\lambda=0,38 \mu\text{m}$  wynosi 3,26 eV
- energia promieniowania  $\gamma$  nie powoduje zmiany liczby protonów ani neutronów w jądrze atomowym, a tym samym nie zmienia jego ładunku ani liczby masowej

## Energia kinetyczna emitowanych cząstek

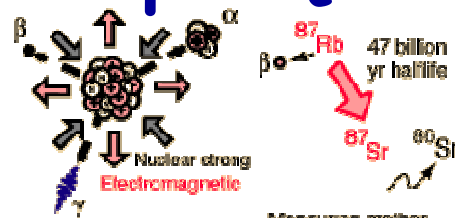
- cząstka  $\alpha$  emitowana w danym rozpadzie ma zawsze jedną, dobrze określoną energię
- w rozpadzie  $\beta$  ze względu na istnienie trzeciej cząstki  $\nu$  (neutrino ) energie cząstek zmieniają się od zera do energii maksymalnej rozpadu
- w przemianach  $\gamma$  jądro, przechodząc z jednego poziomu wzbudzenia na drugi, może emitować szereg kwantów o różnych energiach.



# Datowanie metodą izotopową

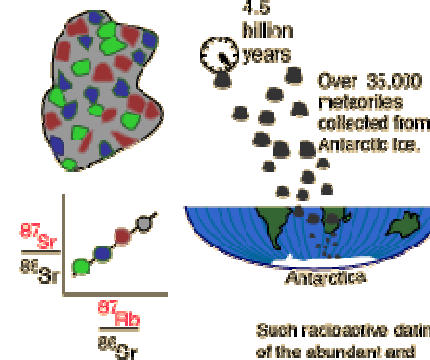


Źródło: <http://www.theenergylibrary.com/node/11296>



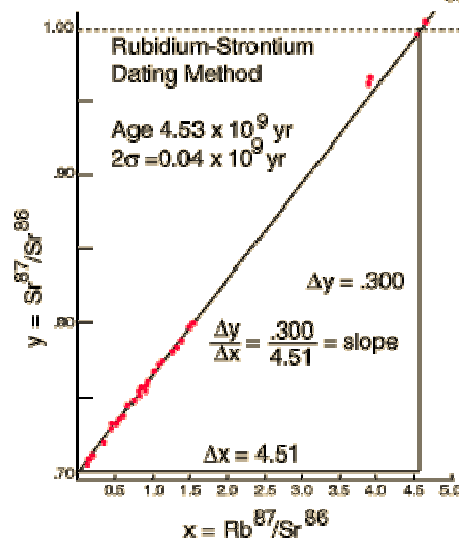
Radioactive decay provides a clock determined by the delicate balance of the two strongest forces known, at a scale inaccessible to ordinary chemical or other natural intervention.

Measuring mother and daughter concentrations gives a time, but depends on initial concentrations. Reference to an isotope that is not from radioactive decay allows one to correct for the initial concentrations.



"Whole rock isochrons" are curves plotted for the different minerals that crystallized together. The slope provides an age independent of initial concentrations.

Such radioactive dating of the abundant and relatively unweathered Antarctic meteorites gives consistent dates of solidification about 4.5 billion years ago.



$$\Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ 1 + \frac{\Delta y}{\Delta x} \right] = \text{calculated age}$$

$$T_{1/2} = 48.8 \times 10^9 \text{ yrs} \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0.693}$$

$$\Delta t = 4.53 \times 10^9 \text{ yrs}$$

Źródło: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/clkroc.html>

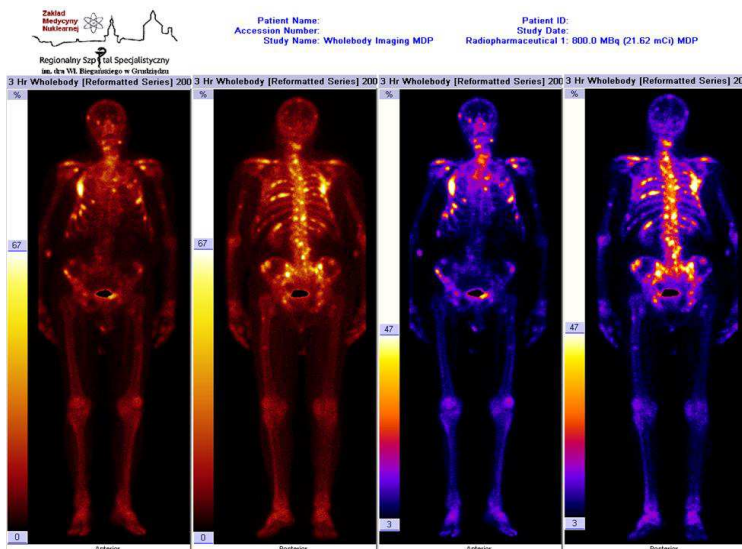
# Radioizotopy, Gamma kamery

The radiotracer, injected into a vein, emits gamma radiation as it decays. A gamma camera scans the radiation area and creates an image.



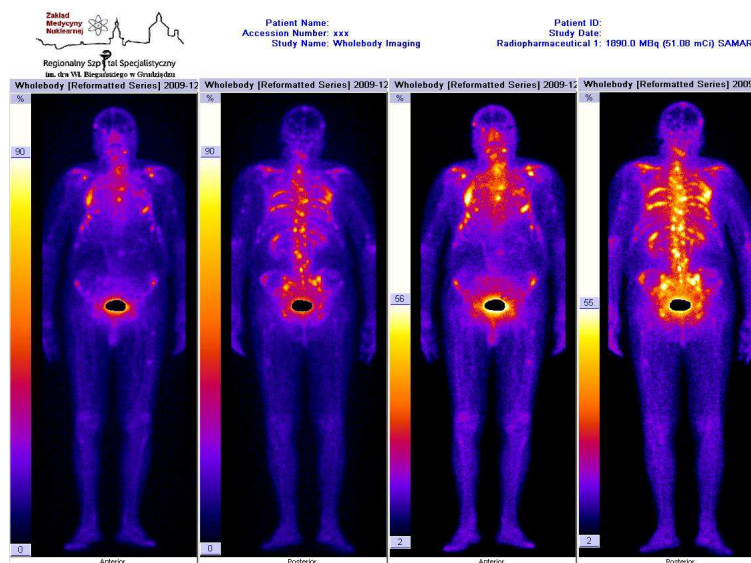
ADAM

Źródło: <http://www.scripps.org/articles/2592-bone-scan>



Scyntygram planarny kośćca osoby z rozszanymi przerzutami nowotworowymi w układzie kostnym; taki obraz świadczy o znacznym zaawansowaniu choroby.

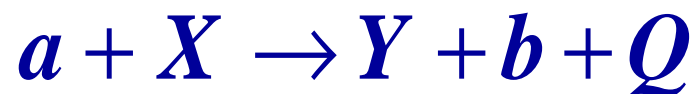
Źródło: <http://www.nuk.bieganski.org/?go=leczy&ter=sm>



Obraz tego samego pacjenta wykonany 50 minut po podaniu  $^{153}\text{Sm-EDTMP}$ . Izotop zaczyna gromadzić się w ogniskach zajętych przez nowotwór.

## Reakcje jądrowe

Reakcjami jądrowymi nazywa się przemiany jąder atomowych wywołane ich wzajemnym oddziaływaniem lub ich oddziaływaniem z cząstkami elementarnymi



- $a, b \rightarrow n, p, \alpha, \gamma$  i in.      $Q$  – wydzielona energia

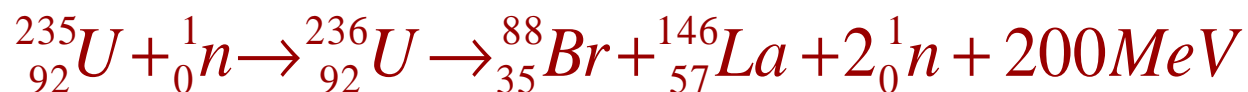
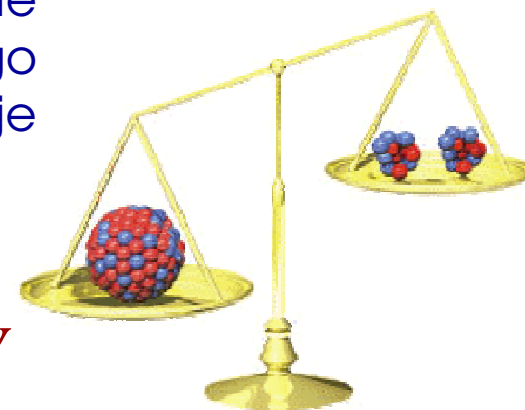
$$Q = (M_X + M_a)c^2 - (M_Y + M_b)c^2$$

- $Q > 0$  – reakcje egzoenergetyczne      ${}^3_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17,6\text{MeV}$
- $Q < 0$  – reakcje endoenergetyczne      ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + p + (-1,19\text{MeV})$

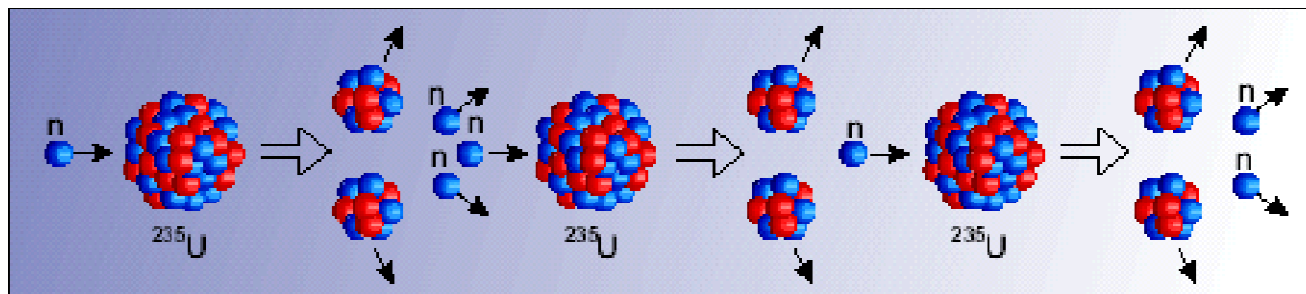
Minimalna energia potrzebna do wywołania takiej reakcji nazywa się **energiją progową**

## Rozszczepienie jąder atomowych

- suma mas dwu jąder wytworzonych w trakcie rozpadu jest mniejsza niż masa jądra ciężkiego ulegającego rozszczepieniu. Deficyt masy zostaje zamieniony na energię



- **fragmenty rozszczepienia** to dwa ciężkie jądra o zbliżonych masach, na które dzieli się jądro uranu. Takimi fragmentami mogą być na przykład: La, Br, lub Xe i Sr.



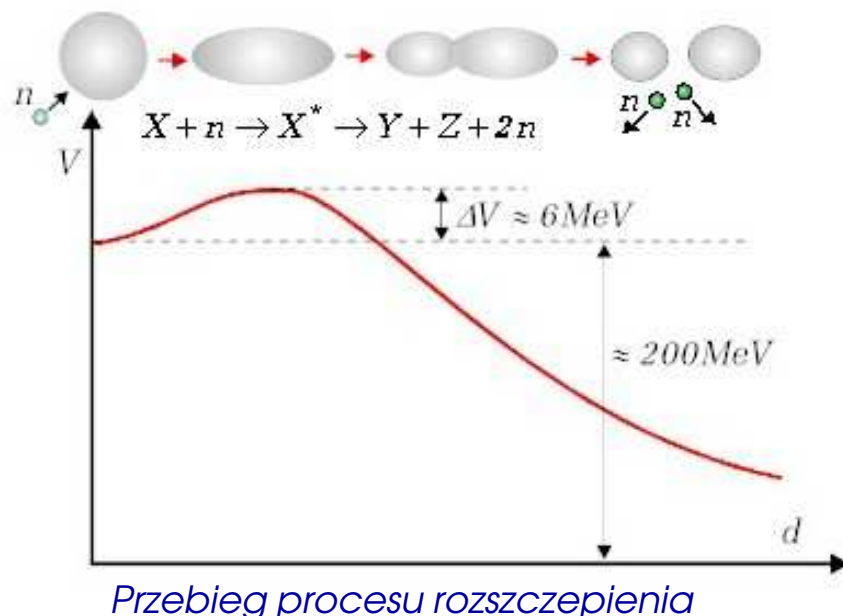


# Rozszczepienie jąder atomowych



- ponieważ w pojedynczej reakcji rozszczepienia powstaje średnio 2,5 neutronów, to jest to reakcja powielająca liczbę swobodnych neutronów w układzie, które mogą być wykorzystane do podtrzymania **reakcji łańcuchowej**

- w tej reakcji wydzieliła się energia około 200 MeV - głównie kinetyczna energia produktów rozszczepienia (energia promieniowania stanowi około 12% całości)
- dla porównania, energia powstająca przy spaleniu jednego atomu węgla, to zaledwie około 6eV



Źródło: <http://www.if.pw.edu.pl>

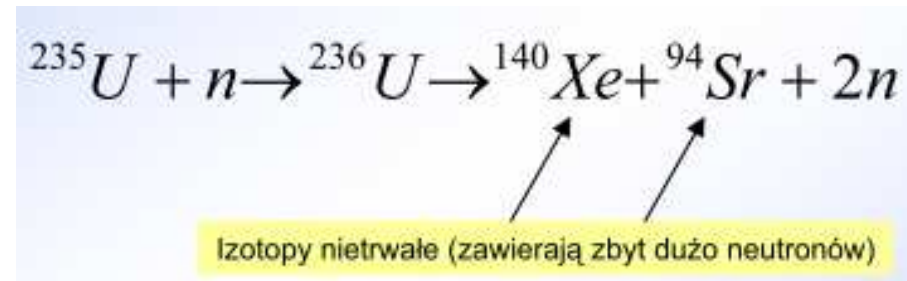
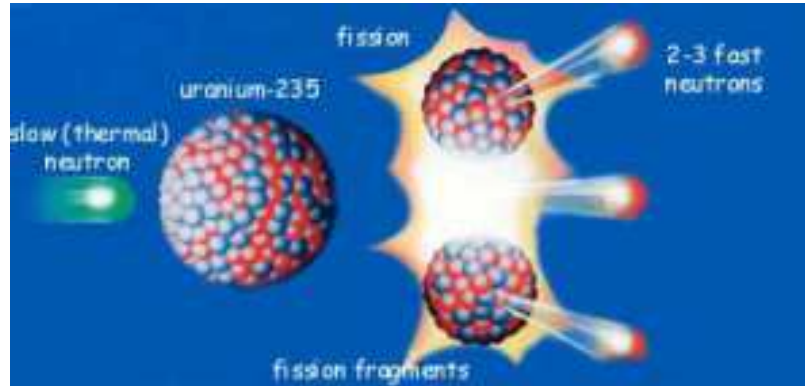
# Masa krytyczna

- jeśli masa materiału rozszczepialnego przekroczy tzw. **masę krytyczną** w układzie zajdzie **reakcja łańcuchowa**, w wyniku której nastąpi wybuch jądrowy.



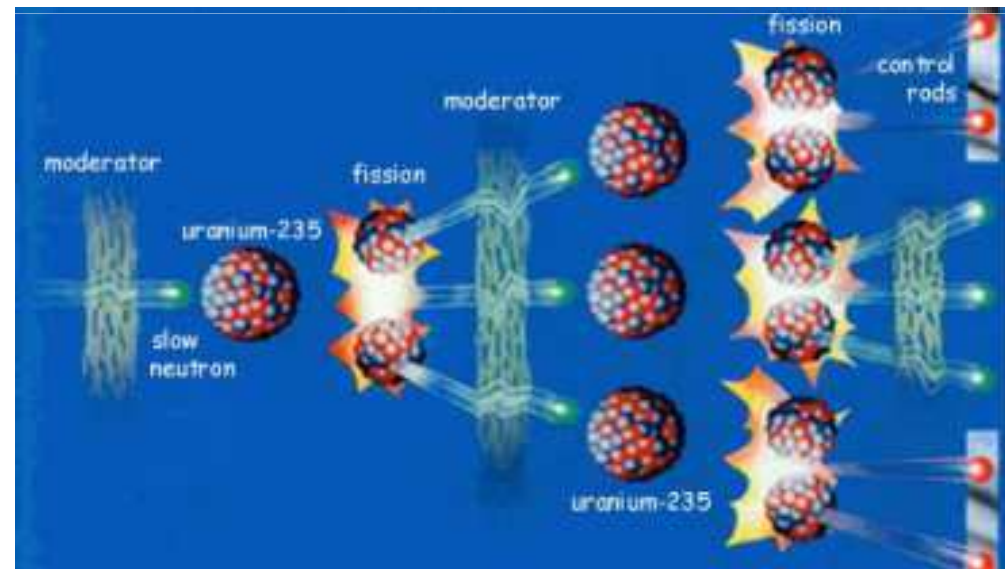
Isotope	Critical Mass	Diameter
protactinium-231	760±180 kg	45±3 cm
uranium-233	15 kg	11 cm
uranium-235	52 kg	17 cm
neptunium-236	7 kg	8.7 cm
neptunium-237	60 kg	18 cm
plutonium-238	9.04–10.07 kg	9.5-9.9 cm
plutonium-239	10 kg	9.9 cm
plutonium-240	40 kg	15 cm
plutonium-241	12 kg	10.5 cm
plutonium-242	75–100 kg	19-21 cm
americium-241	55–77 kg	20-23 cm
americium-242m	9–14 kg	11-13 cm
americium-243	180–280 kg	30-35 cm
curium-243	7.34–10 kg	10-11 cm
curium-244	(13.5)–30 kg	(12.4)–16 cm
curium-245	9.41–12.3 kg	11-12 cm
curium-246	39–70.1 kg	18-21 cm
curium-247	6.94–7.06 kg	9.9 cm
californium-249	6 kg	9 cm
californium-251	5 kg	8.5 cm

# Reaktor jądrowy

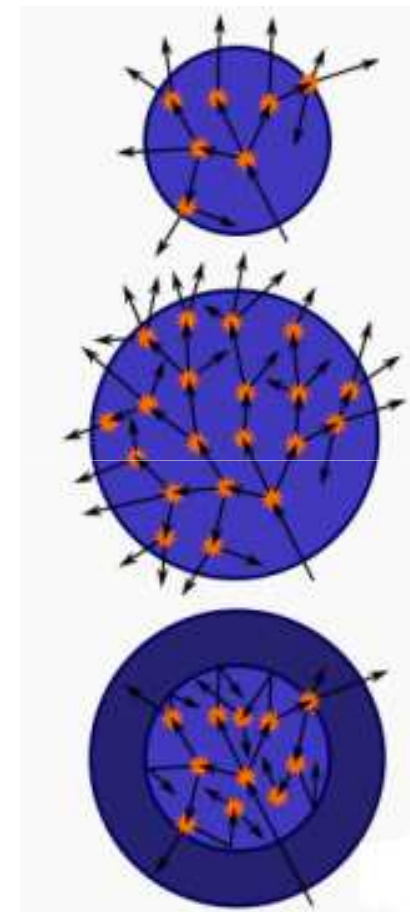
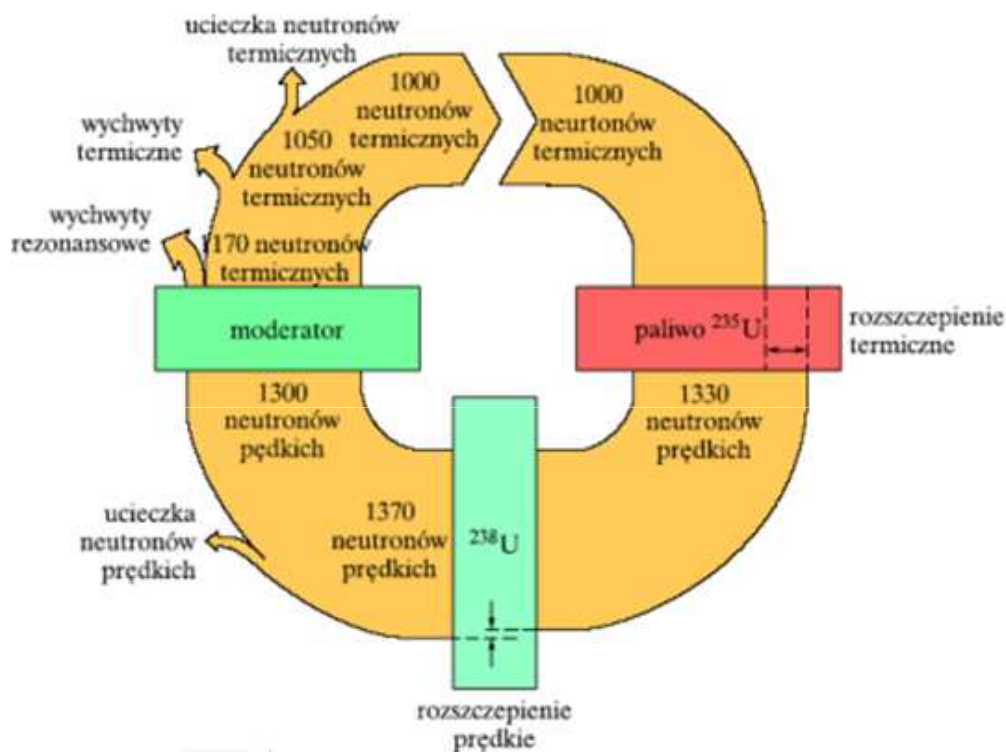


Problemy:

- ucieczka neutronów,
- neutrony z reakcji rozszczepienia są szybkie
- wychwyt neutronów przez  ${}^{238}_{92}\text{U}$



# Reaktor jądrowy - bilans neutronów



**K - współczynnik mnożenia**

$$K = \frac{\text{L. neutronów w danym pokoleniu}}{\text{L. neutronów w poprzednim pokoleniu}}$$

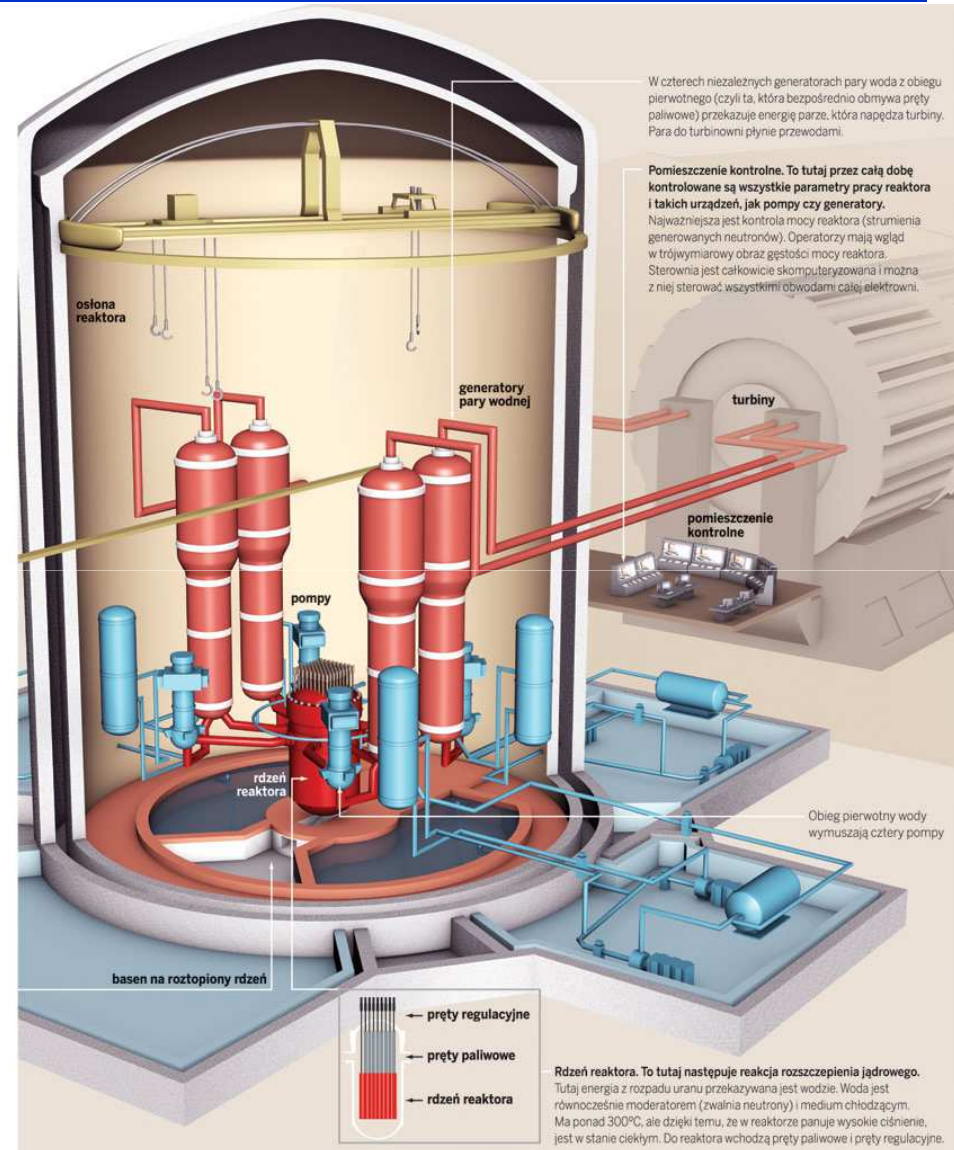
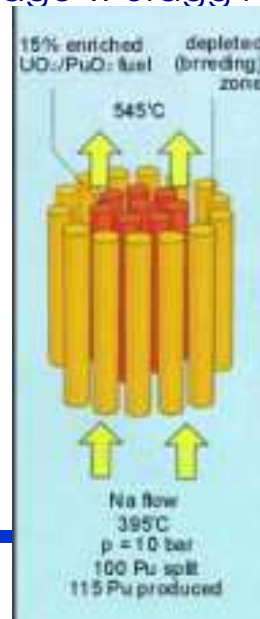
K=1 – stan krytyczny  
K>1 – stan nadkrytyczny

Reflektor neutronów

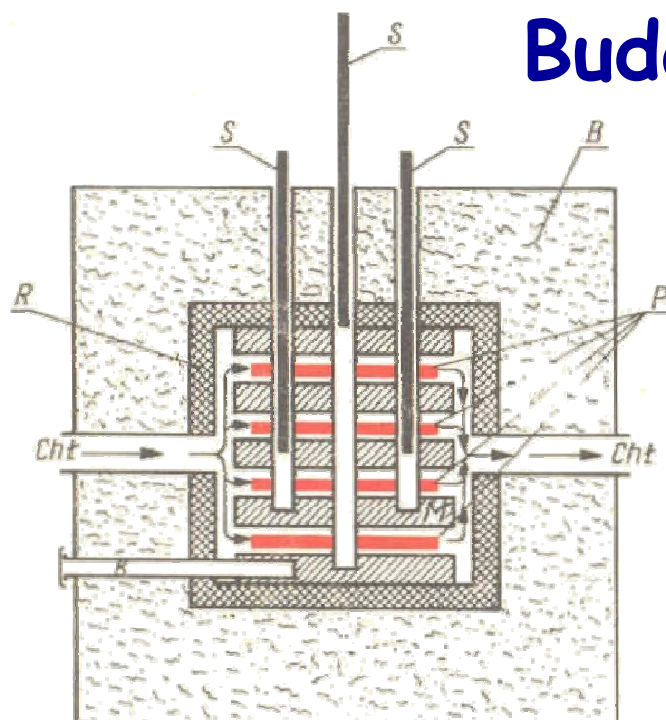
Źródło: <http://www.nuclear.pl>



Pierwszy reaktor wybudowany na stadionie University of Chicago w Stagg Field Chicago Pile 1942



## Budowa reaktora jądrowego

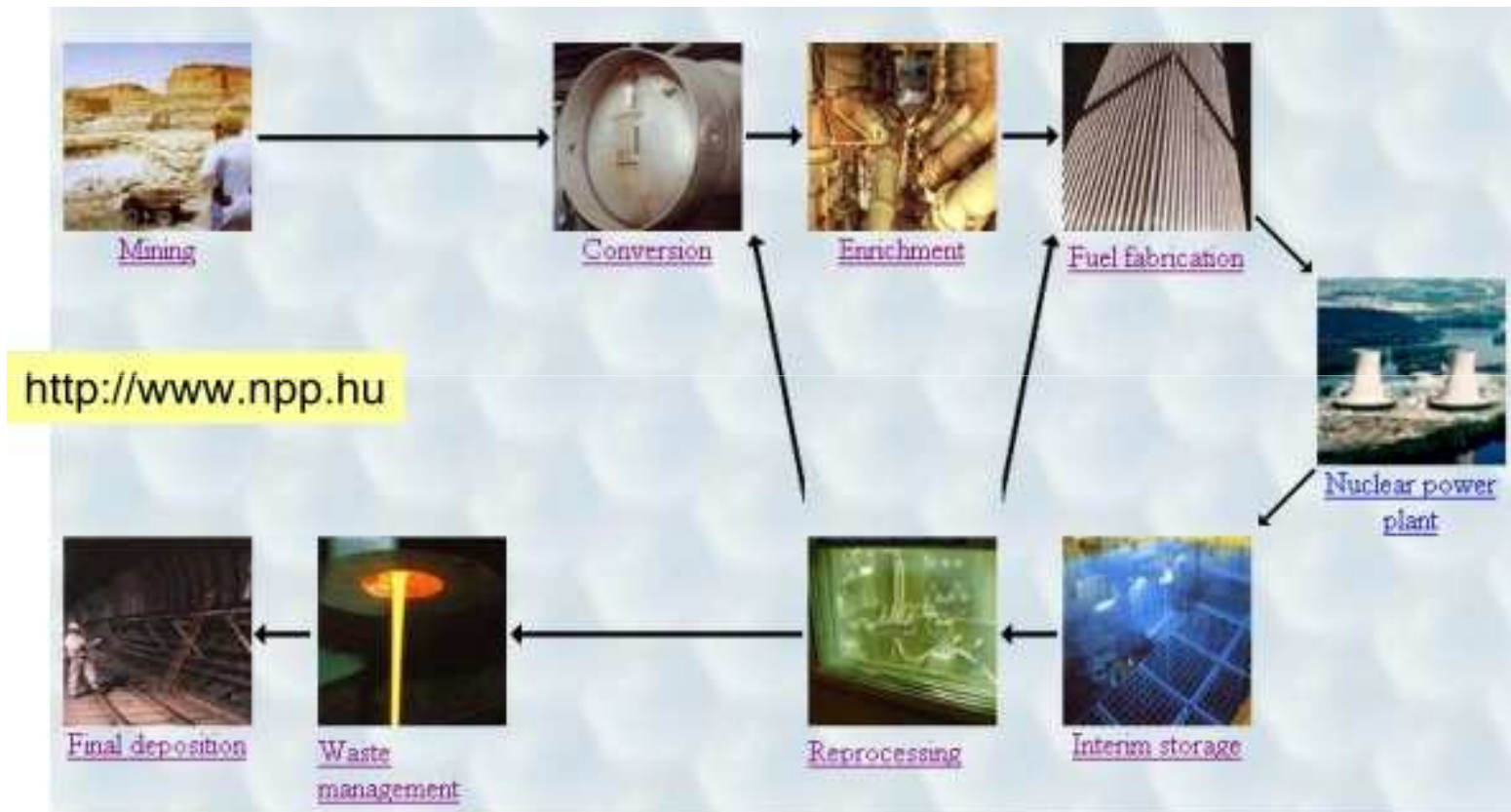


$P$  – pręty uranowe  ${}_{92}^{235}\text{U}$      $S$  – pręty regulacyjne (kadmowe),  $R$  – reflektor grafitowy,  $Chł$  – chłodziwo (np.: ciekły sól),  $B$  – betonowa osłona,  $K$  – kanał wyprowadzający neutrony,  $M$  - moderator

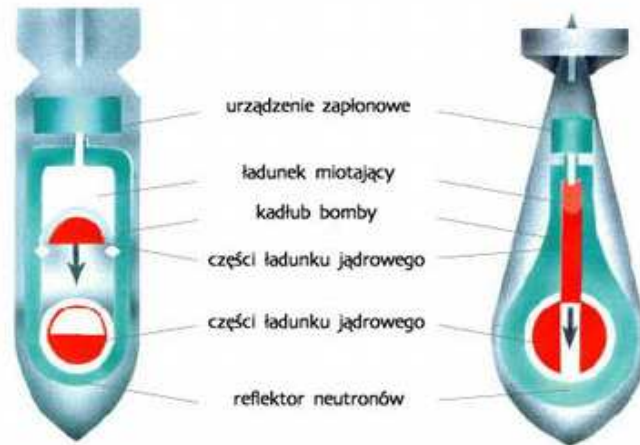
Ze względu na budowę i szczegóły konstrukcyjne możemy wyróżnić następujące typy reaktorów :

- termiczne, prędkie i pośrednie - ze względu na energię neutronów wywołującą rozszczepienie
- jednorodne i niejednorodne – różniące się sposobem umieszczenia paliwa i moderatora
- wodne, gazowe, ciśnieniowe, wrzące - zależne od rodzaju i postaci chłodziwa.

# Energetyka jądrowa



# Bomba atomowa



Bomba atomowa, schemat budowy

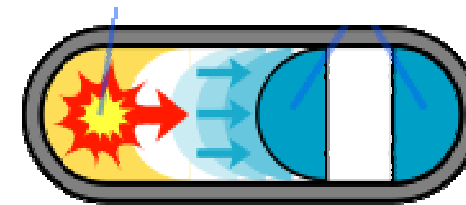
Źródło: <http://netsprint.encyklopedia.pwn.pl/haslo.php?id=1765753>



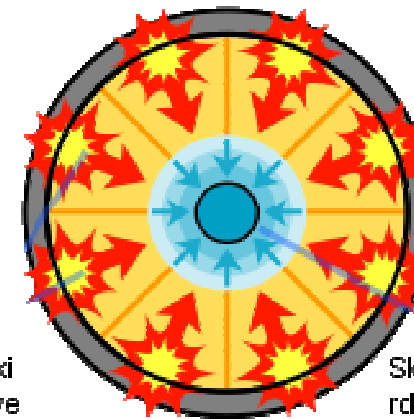
Bomba atomowa Little Boy



Konwencjonalny ładunek wybuchowy    Podkrytyczne masy U-235  
zostają złożone w całość



Metoda działa



Soczewki  
wybuchowe

Skompresowany  
rdzeń plutonowy

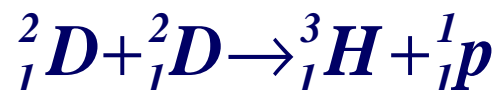
Metoda implozyjna

Źródło: [www.wikipedia.org.pl](http://www.wikipedia.org.pl)



# Synteza jądrowa

Reakcjami syntezy nazywa się proces powstawania nowego jądra atomowego w wyniku zderzenia dwóch lżejszych jąder lub cząsteczek; zjawisku temu towarzyszy wydzielanie się energii i emisja cząstek elementarnych



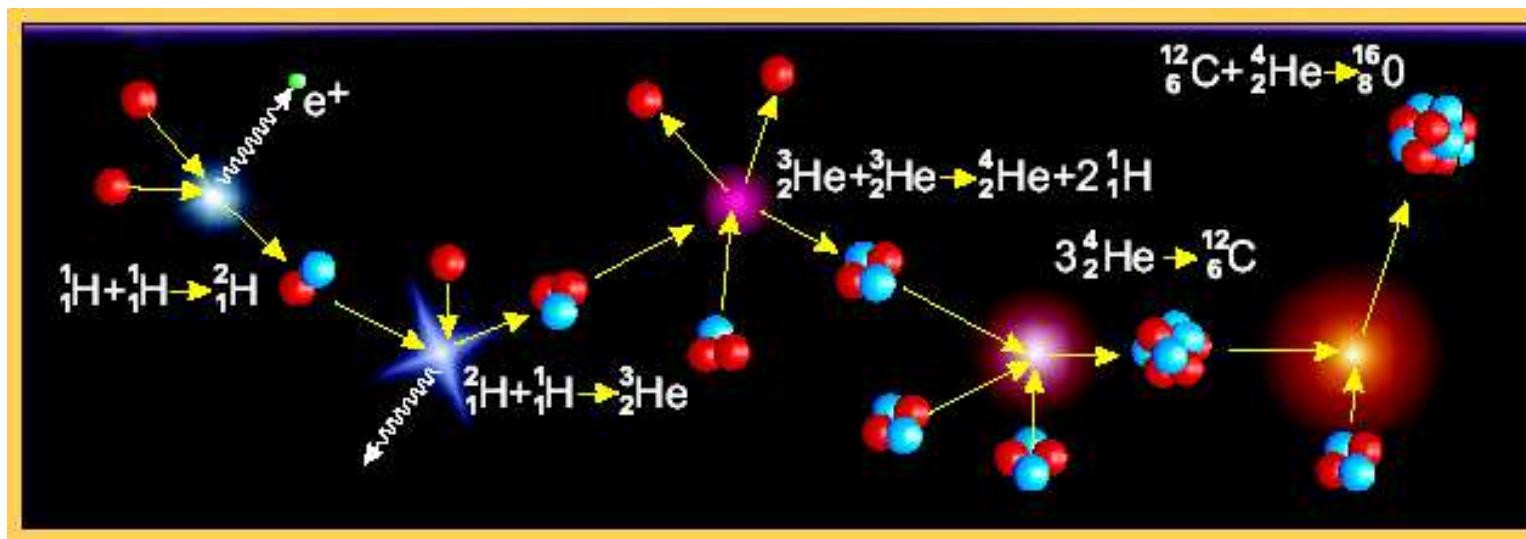
$$Q=4,04 \text{ MeV}$$



$$Q=3,27 \text{ MeV}$$



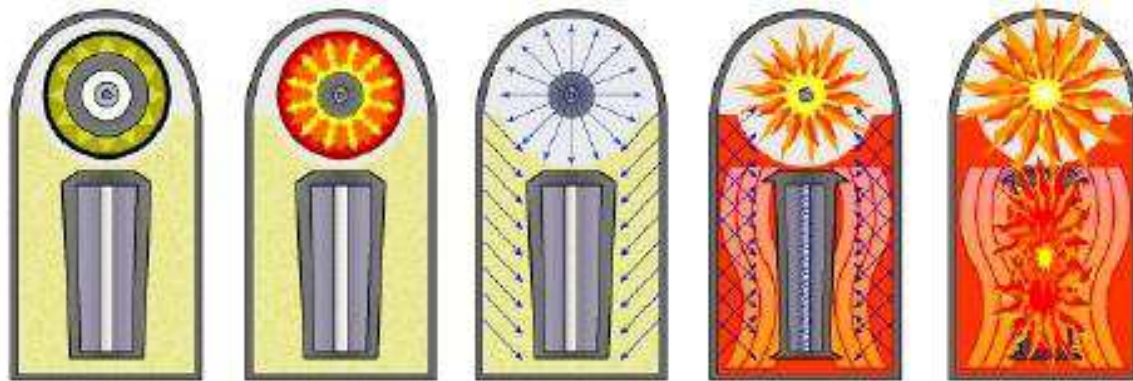
$$Q=17,58 \text{ MeV}$$



## Synteza jądrowa

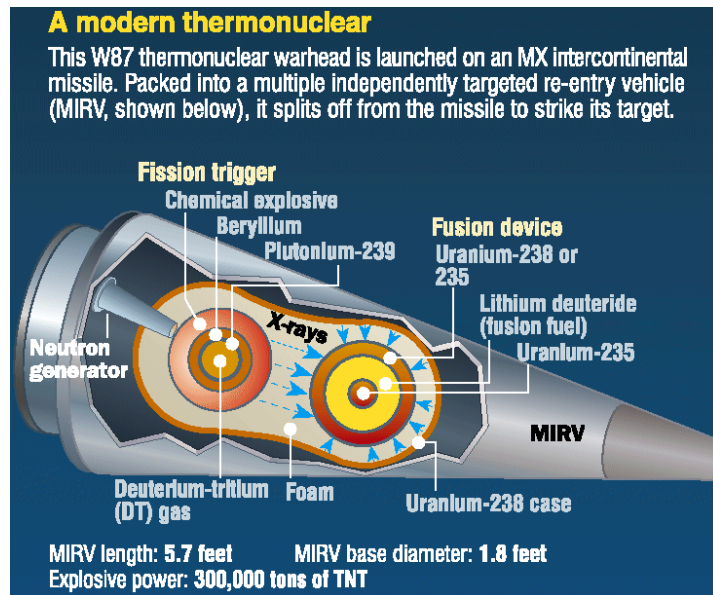
- energia otrzymywana w reakcji syntezy jądrowej jest większa od energii otrzymanej w procesie rozszczepienia jąder atomowych
- źródła deuteru: morza i oceany
- reakcje syntezy zachodzą w temperaturach milionów stopni; **reakcje termojądrowe**
- problemy z kontrolowaniem procesu syntezy jądrowej

# Fizyka jądrowa **Bomba wodorowa - termojądrowa**



1. Bomba przed wybuchem
2. Zapalniki w pierwszym stopniu uruchamiają ścisnienie plutonowego rdzenia, który staje się nadkrytyczny
3. Rozszczepienie wywołuje emisję promieniowania X, które nasświetla piankę polistyrenową
4. Pianka polistyrenowa staje się plazmą, która ścisła drugi stopień i powoduje zapłon Pu: reakcje rozszczepienia
5. W ściśniętym i rozgrzanym <sup>6</sup>LiD zaczyna się synteza. Strumień neutronów inicjuje reakcje rozszczepienia w osłonie. Pojawia się kula ognia.

Uproszczona sekwencja wybuchu bomby wodorowej



## W87 Warhead for Trident D-5 Ballistic Missile

