



Proszę o uwagę

35. Podstawy fizyki jądrowej

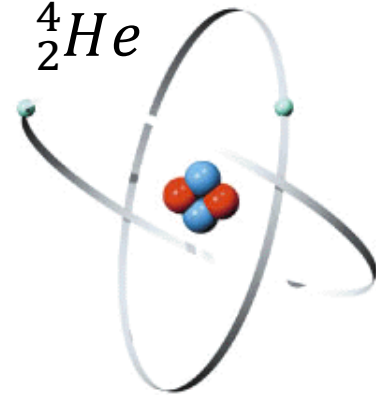
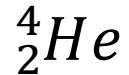
- siły jądrowe,
- modele budowy jądra atomowego,
- promieniotwórczość,
- przemiany i reakcje jądrowe.



Podstawowe pojęcia

- jądra atomowe (**nuklidy**) dzielimy na:
 - trwałe (stabilne)
 - nietrwałe (promieniotwórcze)
- jądro składa się z **nukleonów**:
 - protonów $m_p = 1.672 \cdot 10^{-27}$ kg
 - neutronów $m_n = 1.674 \cdot 10^{-27}$ kg
- ${}^A_Z X$ oznaczenie nuklidu
 - A liczba masowa (liczba nukleonów)
 - Z liczba atomowa (protonów)
 - N liczba neutronów ($N = A - Z$)

ATOM HELU



$$A = 4$$

$$Z = 2$$

$$N = 2$$

Izotopy

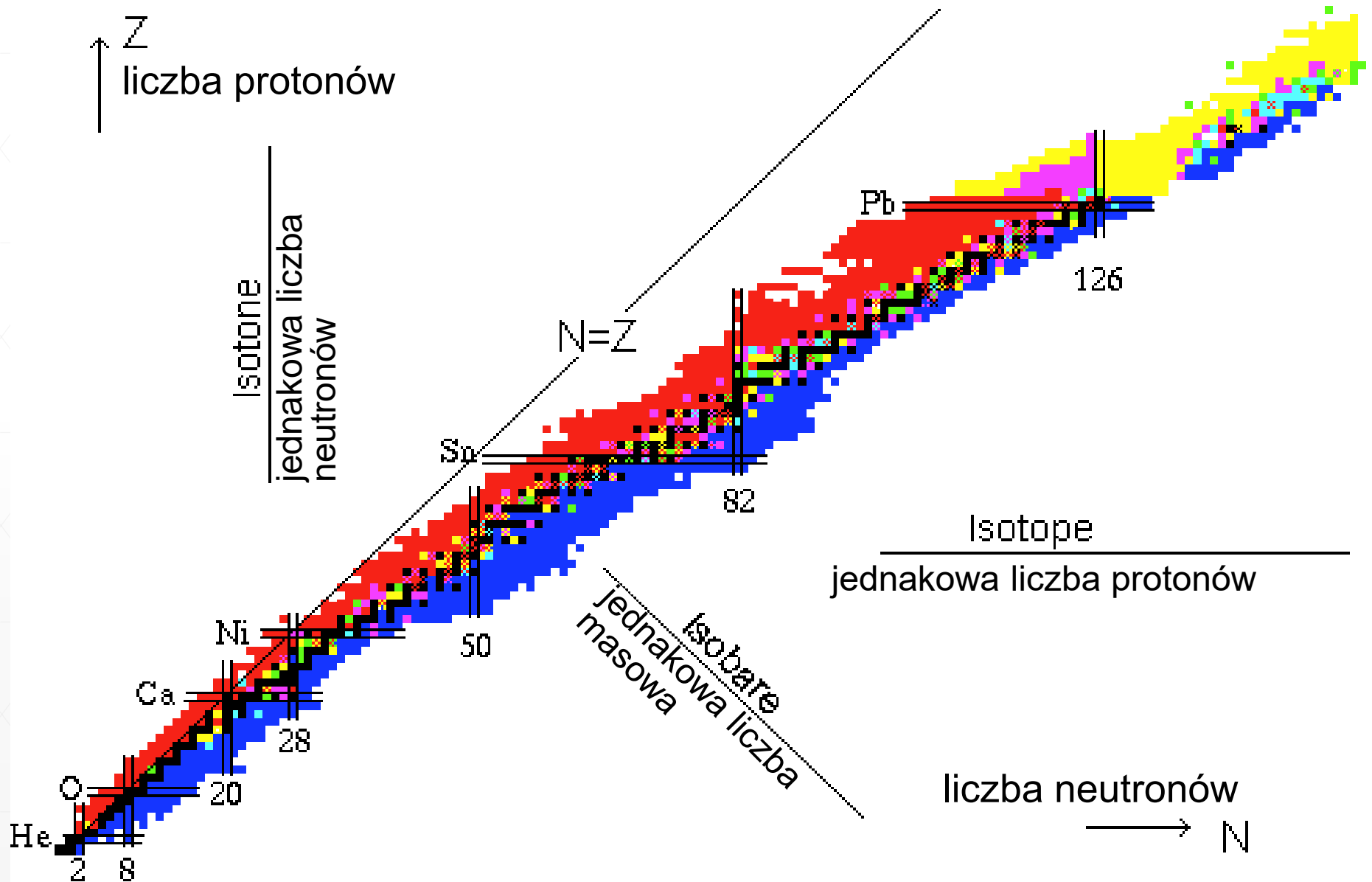
znamy około 300 trwałych nuklidów
i ponad 1000 promieniotwórczych

- jądra atomów tego samego pierwiastka różniące się masą nazywamy **izotopami**
- izotopy mają jednakową liczbę protonów ($Z = \text{const.}$) zbliżone właściwości fizyczne i chemiczne
- **izobary** ($A = \text{const.}$), **izotony** ($N = \text{const.}$)

IZOTOPY WODORU



Mapa znanych nuklidów



Rozmiar i masa jądra

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

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

Objętość jądra jest wprost proporcjonalna do liczby masowej A

Masę jądra M wyraża się w jednostkach masy atomowej u

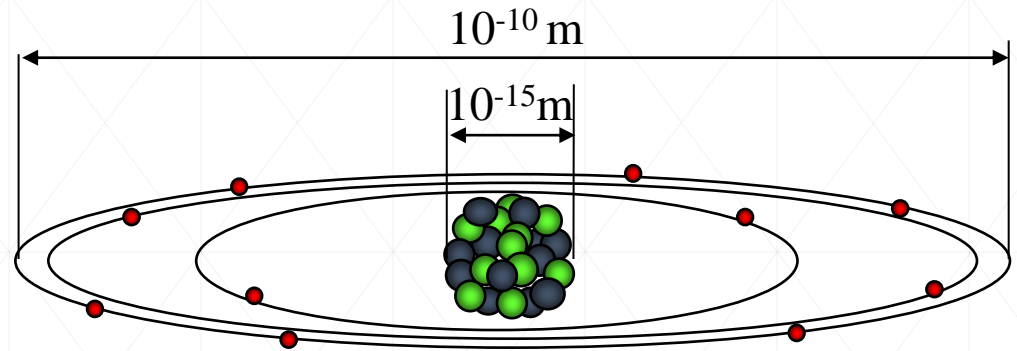
$$1 u = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (1/12 \text{ masy atomu C})$$

Liczba masowa A nuklidu równa się masie atomowej wyrażonej w jednostkach masy atomowej i zaokrąglonej do liczby całkowitej; np. masa at. $^{197}\text{Au} = 196,966 u$, po zaokrągleniu daje 197

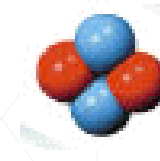
$$E = Mc^2$$

$$E = M \cdot 931,5 \text{ MeV}$$

Jednostka masy atomowej jest równoważna energii 931,5 MeV



Defekt masy



Masa M jądra jest mniejsza niż suma mas $\sum m$ tworzących je nukleonów

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

Energię wiązania jądra określamy jako energię spoczynkową defektu masy

$$E_w = \Delta mc^2 = \sum (mc^2) - Mc^2$$

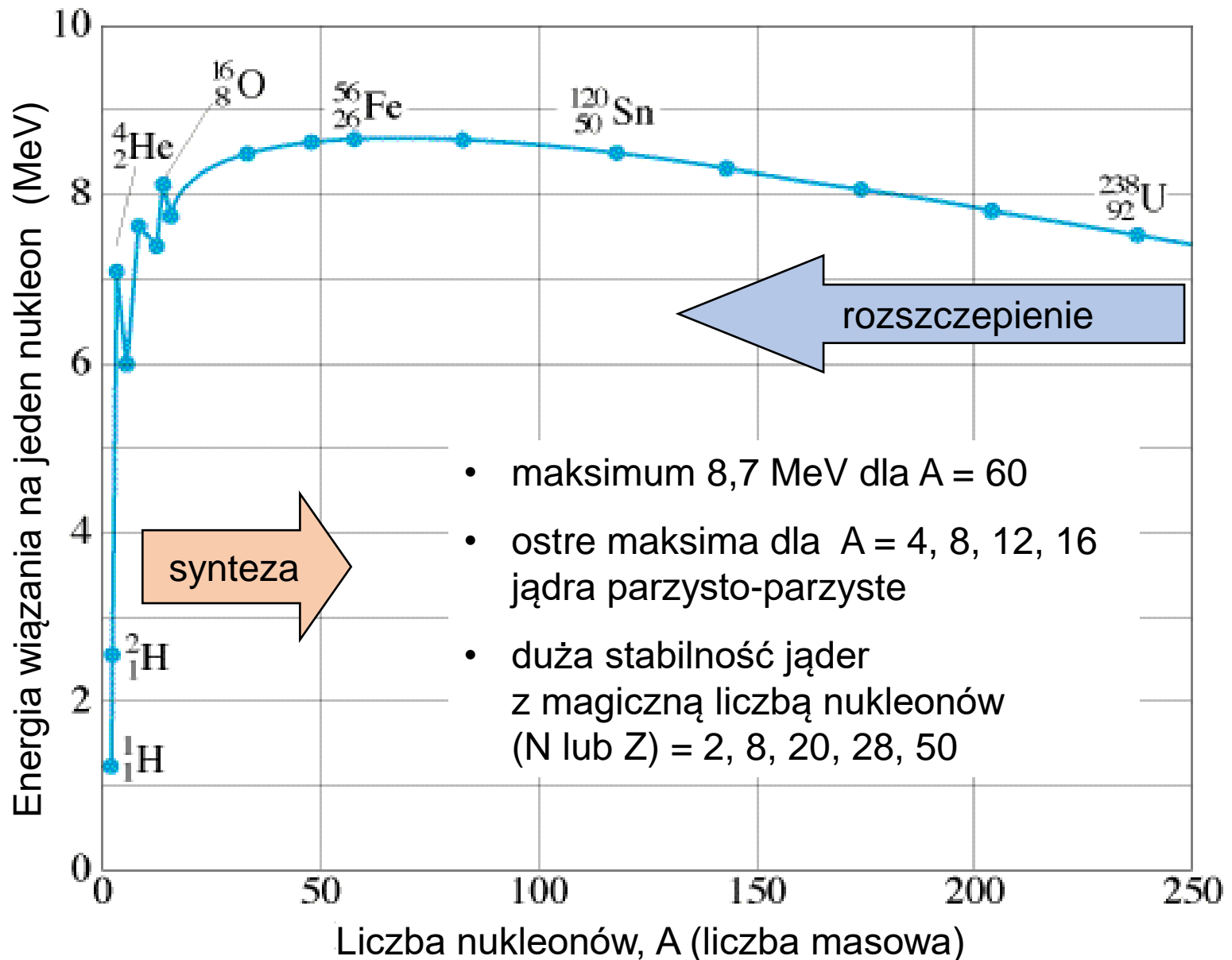
Całkowita energia wiązania jądra to praca potrzebna na rozłożenie jądra na jego składowe nukleony bez nadania im energii kinetycznej.

Energia wiązania jest wygodną miarą trwałości jądra, choć lepiej podawać energię wiązania przypadającą na jeden nukleon:

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

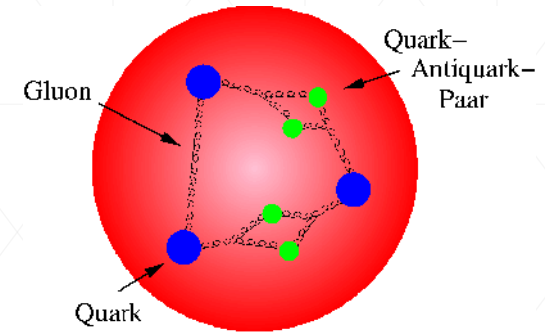
Energią wiązania nukleonu nazywamy wielkość równą pracy potrzebnej na usunięcie danego nukleonu z jądra bez nadania mu energii kinetycznej.

Energia wiązania jądra



Siły jądrowe

- krótko-zasięgowe siły przyciągające ($2 \cdot 10^{-15}$ m)
- niezależne od ładunku (protonu czy neutronu)
- występują pomiędzy najbliższymi nukleonami
- zależą od orientacji spinów oddziaływujących nukleonów
- mają charakter sił wymiennych – mezon π
- są konsekwencją oddziaływania silnego pomiędzy kwarkami – składnikami nukleonów
- znamy 6 kwarków i 6 antykwarków
- cząstką wymienną w oddziaływaniu kwarków jest gluon



$$p \leftrightarrow n + \pi^+$$

$$p \leftrightarrow p + \pi^0$$

$$n \leftrightarrow p + \pi^-$$

$$n \leftrightarrow n + \pi^0$$

neutron (udd) \rightarrow proton (uud) $\Leftrightarrow d \rightarrow u$

 up $2/3$
 górny
 down $-1/3$
 dolny

 charm $2/3$
 powabny
 strange $-1/3$
 dziwny

 top $2/3$
 wysoki
 bottom $-1/3$
 niski

Modele struktury jądra atomowego

Konieczność użycia modeli wynika z braku pełnej teorii oddziaływań silnych oraz potrzeby równoczesnego uwzględnienia oddziaływań wielu nukleonów. Kilkanaście modeli struktury jądra dzielimy na dwie podstawowe grupy:

- modele cząstek silnie skorelowanych (ruch jednego nukleonu jest ściśle skorelowany z ruchem innych)
 - model kropkowy
- modele cząstek niezależnych (nukleony poruszają się niezależnie we wspólnym potencjale)
 - model powłokowy
- model kolektywny – jest połączeniem w/w modeli

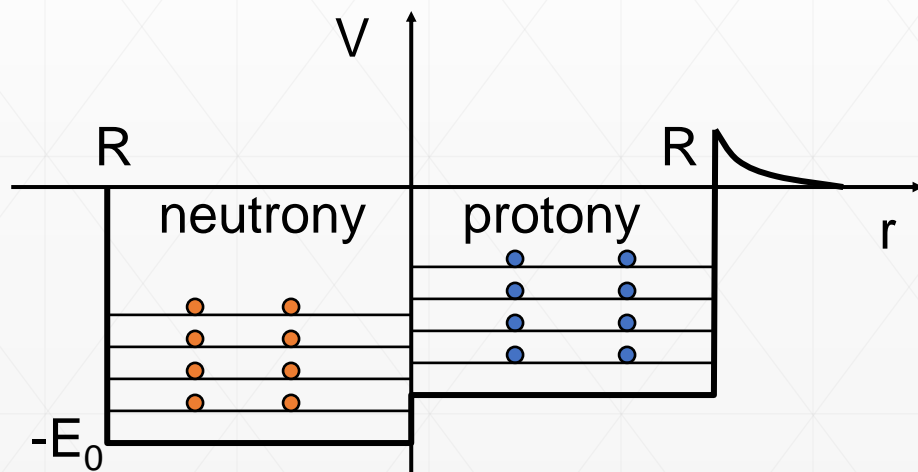
Model kroplowy (cząstki silnie skorelowane)



- wynika z dwóch faktów doświadczalnych
 - stałej gęstości materii w jądrze
 - prawie stałej energii wiązania w przeliczeniu na jeden nukleon (około 8 MeV)
- obie powyższe własności są charakterystyczne dla cieczy – gęstość i ciepło parowania są stałe, niezależne od objętości
- siły jądrowe są analogiem napięcia powierzchniowego
- jądro przypomina kroplę cieczy – jest kulą o promieniu $A^{1/3}$
- nukleony poruszają się w jądrze w sposób chaotyczny i nie mogą pozostawać w określonych stanach energetycznych
- dobrze opisuje rozpad α oraz rozszczepienie i syntezę jąder atomowych

Model powłokowy (cząstki niezależne)

- zbudowany na wzór modelu atomu – nukleony poruszają się niezależnie od siebie w potencjale będącym wynikiem oddziaływania jednego nukleonu ze wszystkimi pozostałymi
- poszczególne nukleony mogą obsadzać kolejne poziomy energetyczne zgodnie z zakazem Pauliego
- ich stany własne określone są za pomocą 4 liczb kwantowych: radialnej n , orbitalnej l , magnetycznej m , spinowej s
- neutrony posiadają piątą liczbę kwantową – izospin, stąd oba rodzaje nukleonów tworzą własne powłoki o niewiele różniących się energiach



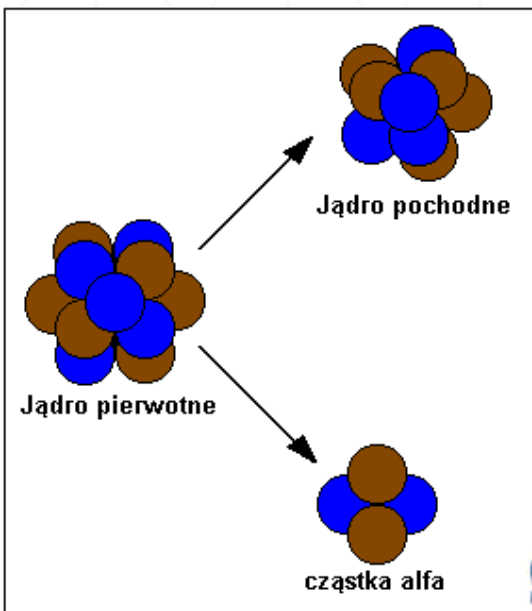
Dla jądra składającego się z wielu nukleonów głębokość studni dla neutronu wynosi około 40 MeV, dla protonów na skutek dodatkowego potencjału kulombowskiego studnia potencjału jest trochę podniesiona

Przemiany jądrowe

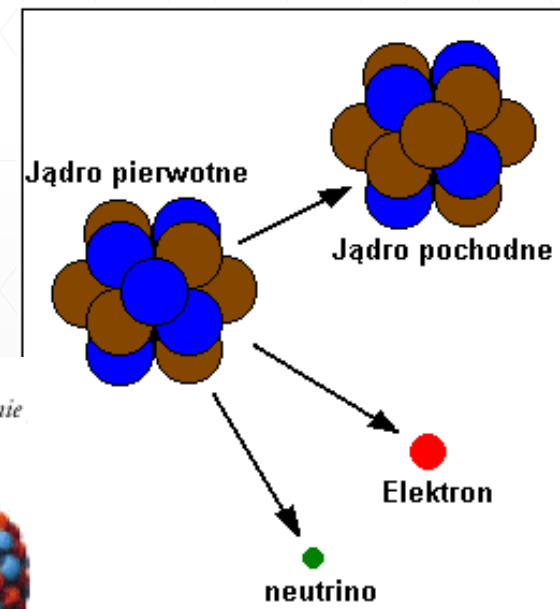
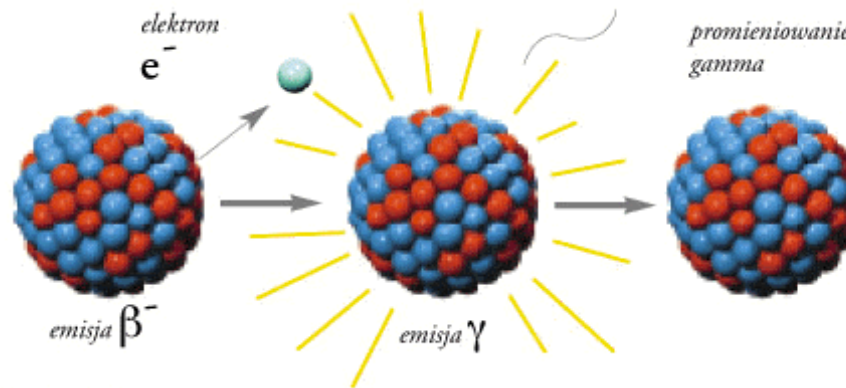
Większość nuklidów to nuklidy promieniotwórcze.

Jądra atomowe pierwiastków nietrwałych samorzutnie przekształcają się w jądra innych pierwiastków, czemu towarzyszy emisja różnego promieniowania:

- α - strumienia jąder helu
- β - strumienia elektronów
- γ - promieniowania elektromagnetycznego



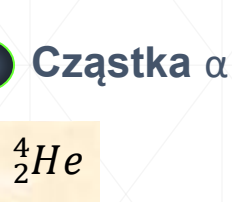
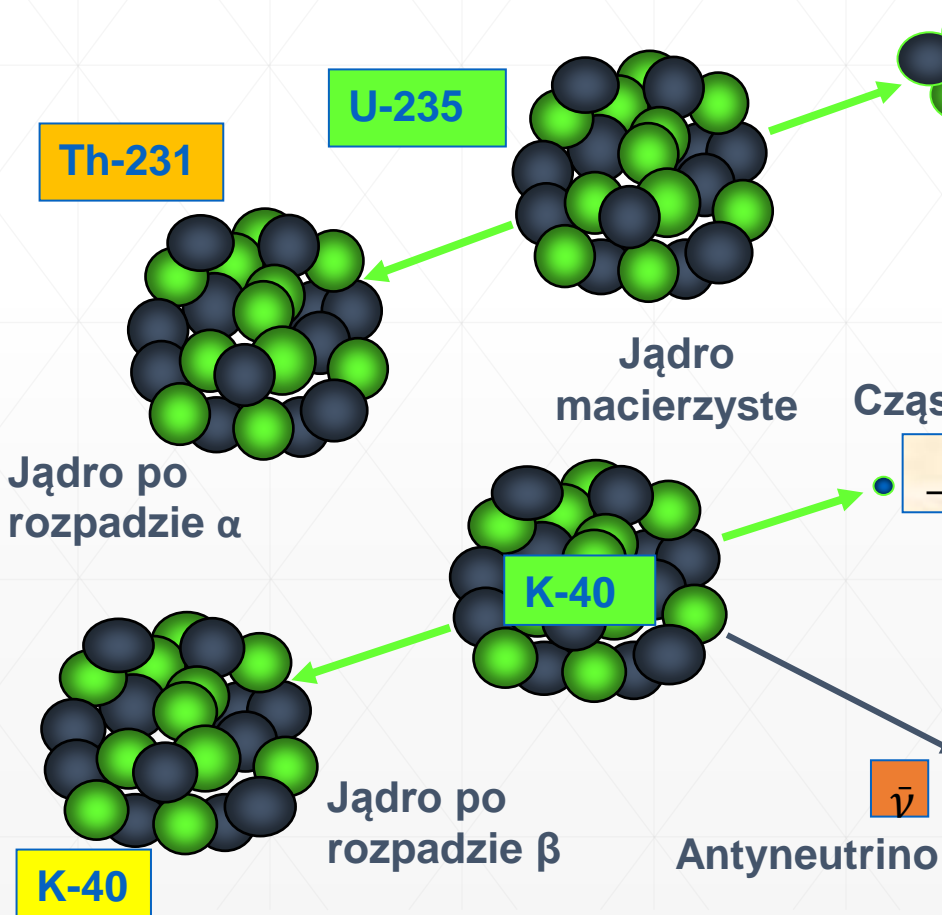
Rozpad alfa



Rozpad beta

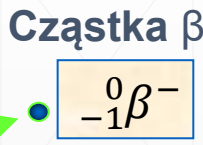
Cechy przemian jądrowych

- promieniotwórczość naturalna i sztuczna
- statystyczny charakter promieniotwórczości - prawo rozpadu promieniotwórczego
- spełnienie praw zachowania: ładunku, liczby nukleonów, energii i pędu



$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$$

w **przemianie α** jądro pochodne ma liczbę masową i atomową mniejszą o 4 i 2



$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e$$

w **przemianie β** liczba masową nie ulega zmianie, a liczba atomowa zmienia się o 1

$Q = -\Delta mc^2$ nazywamy energią reakcji lub rozpadu (ciepło reakcji) gdzie Δm to różnica mas jądra macierzystego i produktów rozpadu

Promieniotwórczość naturalna

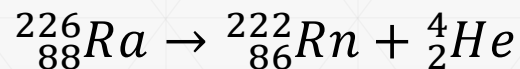
Zjawisko naturalnej promieniotwórczości zostało odkryte w związkach uranu w 1896 r. przez Henriego Becquerela. Na jego cześć jednostką aktywności próbki (szybkości rozpadu) jest **bekkerel**

1 Bq = 1 rozpad na sekundę



Istotny wkład w odkrycie promieniotwórczości wnieśli Maria Skłodowska-Curie i Piotr Curie: odkrycie uranu ^{238}U , polonu ^{210}Po i radu ^{226}Ra (nagroda Nobla w 1903 r.)

Przykład rozpadu radu z powstaniem radonu i wydzieleniem cząstki α



Prawo rozpadu promieniotwórczego

Szybkość rozpadu jest proporcjonalna do liczby jąder N

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) \quad \text{gdzie } \lambda \text{ to stała rozpadu}$$

rozdzielając zmienne i całkując

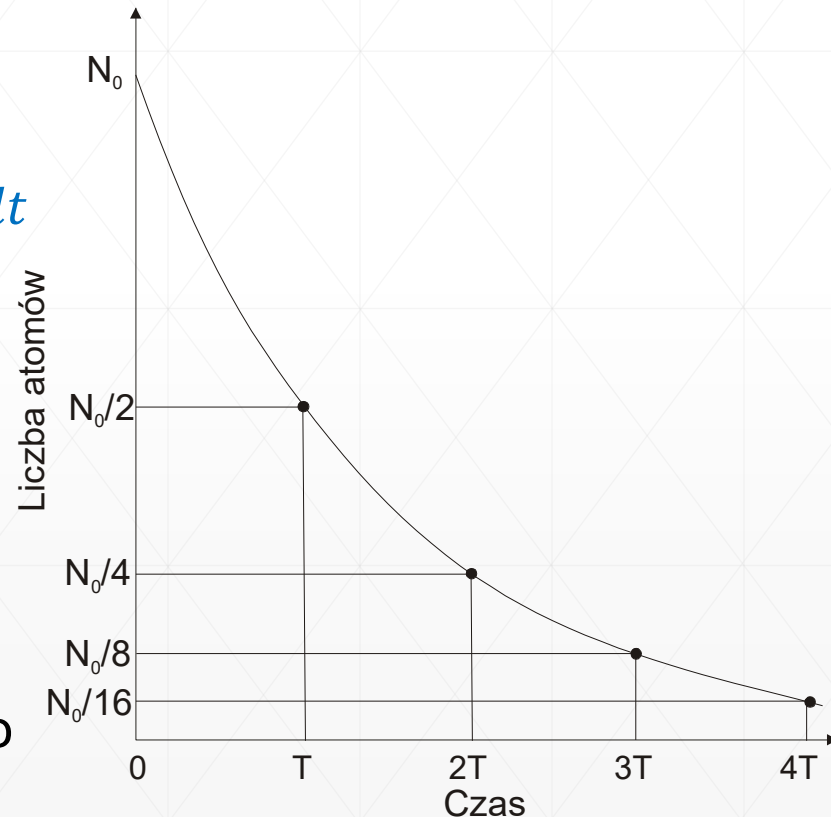
$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

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

Stała rozpadu jest odwrotnością średniego czasu życia pierwiastka promieniotwórczego

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



T – czas połowicznego zaniku

Czas połowicznego zaniku

Obliczmy po jakim czasie liczba jąder maleje do połowy

$$N(T_{1/2}) = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2})$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2})$$

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

Zamiast liczby jąder w próbce N podaje się szybkość rozpadu R zwaną aktywnością próbki



$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$R = \lambda N$$

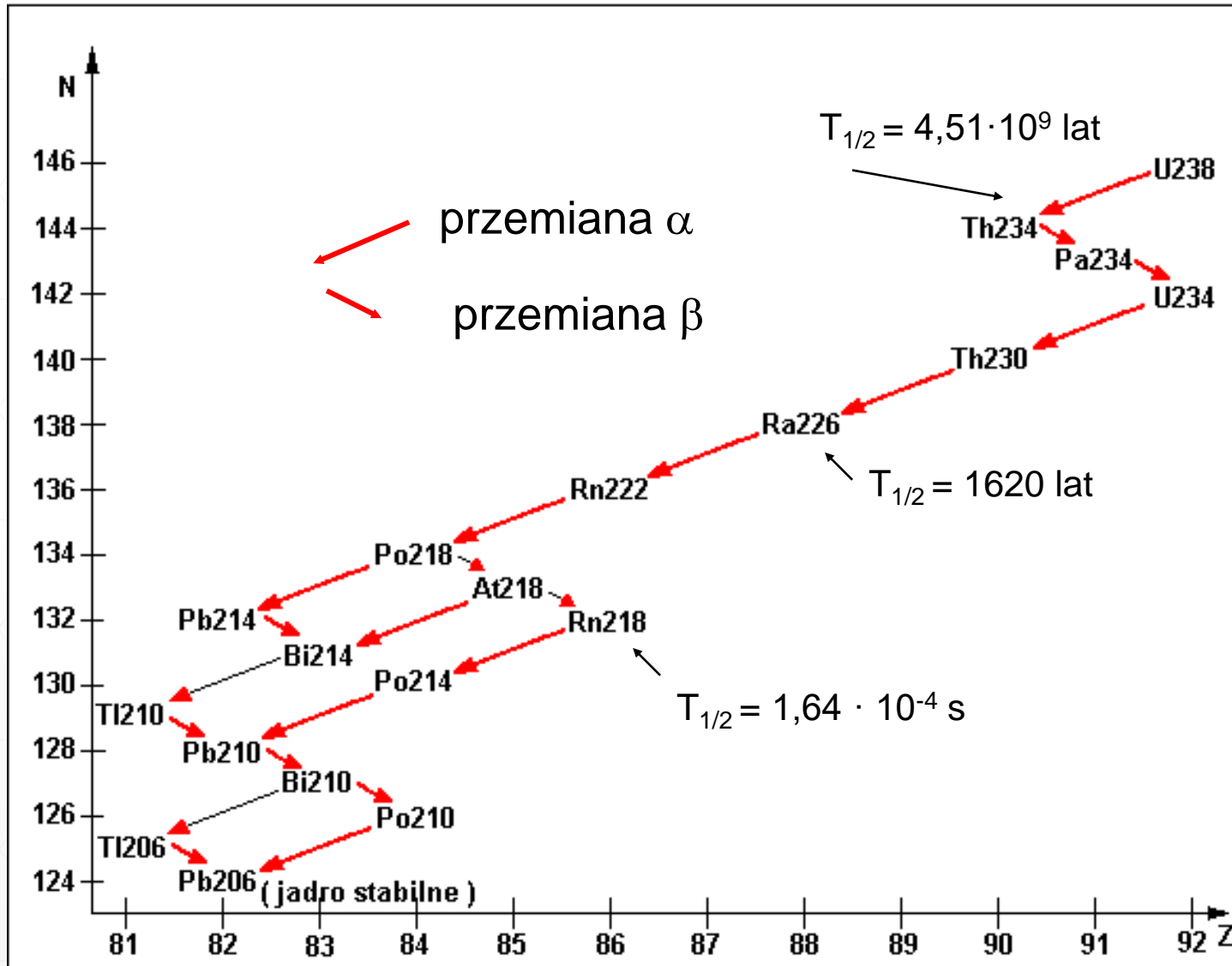
np. aktywność pręta paliwowego wynosi 10^{15} Bq tzn., że w 1 sekundzie rozpada się 10^{15} jąder promieniotwórczych

Cztery rodziny (łańcuchy) promieniotwórcze ($T_{1/2}$):

- toru ${}^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{208}_{82}\text{Pb}$ ($1,4 \cdot 10^{10}$ lat)
- uranu ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb}$ ($4,5 \cdot 10^9$ lat)
- aktynu ${}^{235}_{89}\text{Ac} \rightarrow {}^{207}_{82}\text{Pb}$ ($7,1 \cdot 10^8$ lat)
- neptunu ${}^{237}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{209}_{83}\text{Bi}$ ($2,2 \cdot 10^6$ lat)

wiek Ziemi $5 \cdot 10^9$ lat

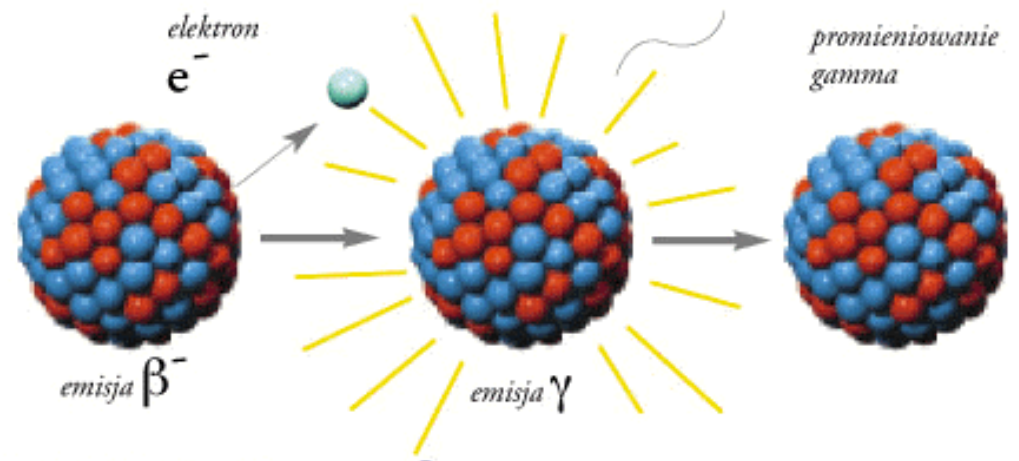
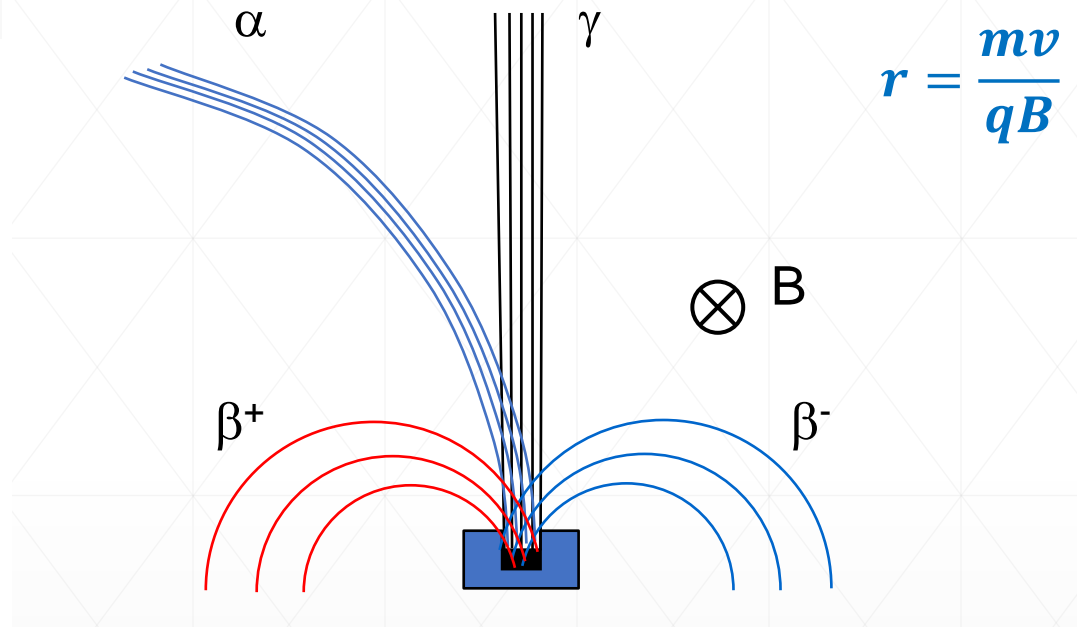
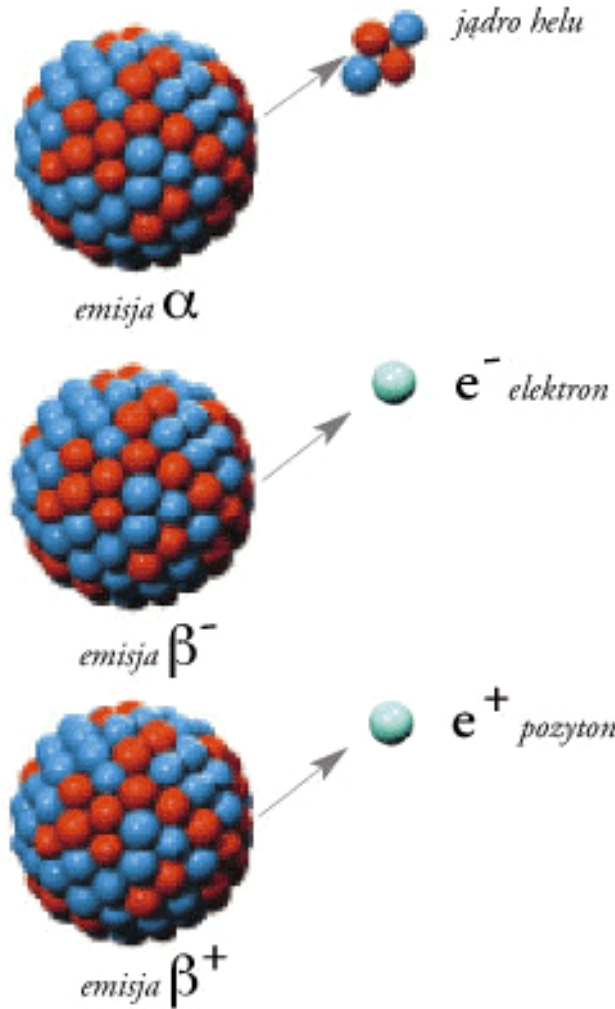
Rodzina uranu



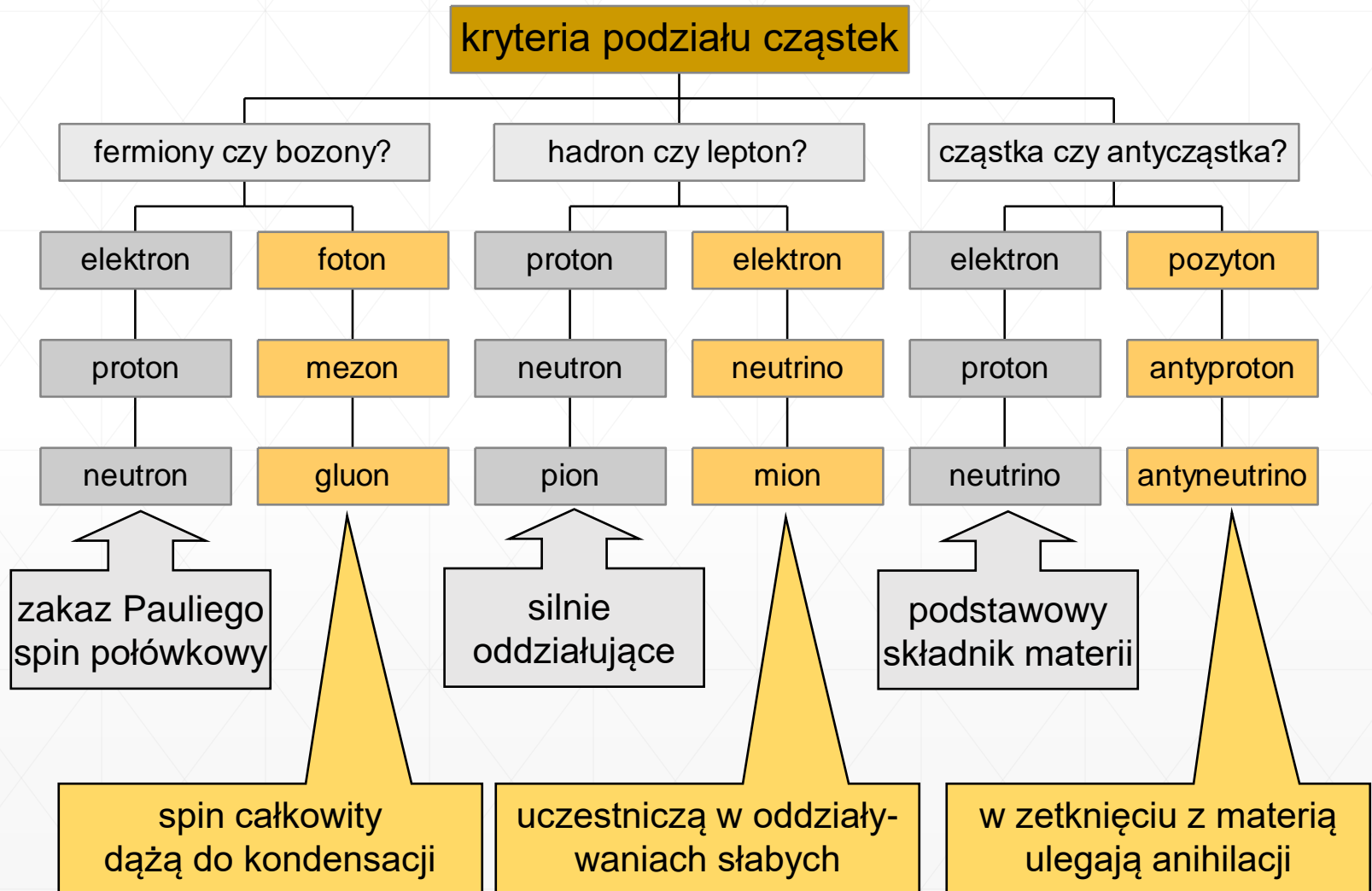
Szereg uranowo-radowy. Liczba masowa każdego z pierwiastków w szeregu równa jest $4n+2$. Gdzie n dodatnia liczba całkowita.

Odchylenie promieniowania w polu magnetycznym

W celu zidentyfikowania rodzaju powstającego promieniowania jądrowego bada się jego zachowanie w polu magnetycznym o indukcji B



Cząstki, cząstki, cząstki



Reakcje jądrowe



„Teraz stałem się Śmiercią,
niszczycielem światów”

Robert Oppenheimer

Energia wyzwalana przez 1 kg materii

Uwalnianiu energii w procesie spalania towarzyszy ubytek masy $Q = -\Delta mc^2$

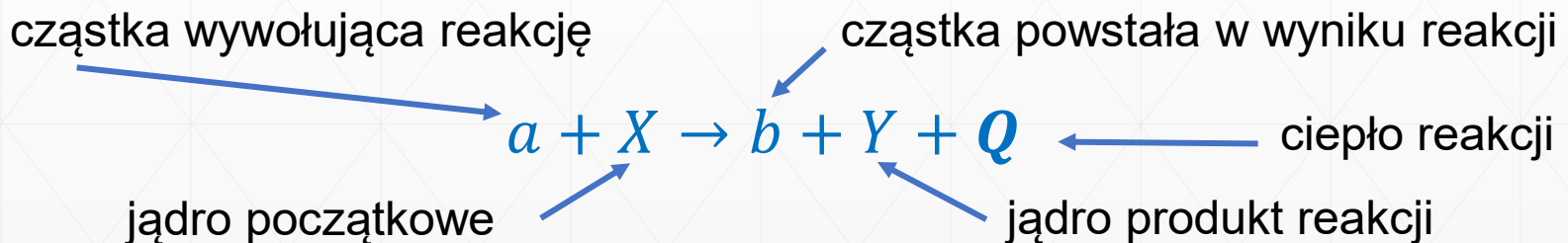
Rodzaj materii	Proces	Czas świecenia 100W żarówki
woda	spadek wody z 50 m	5 s
węgiel	spalanie	8 h
wzbogacony UO_2	rozszczerzenie w reaktorze	690 lat
^{235}U	całkowite rozszczepienie	$3 \cdot 10^4$ lat
gorący gazowy deuter	całkowita synteza	$3 \cdot 10^4$ lat
materia i antymateria	całkowita anihilacja	$3 \cdot 10^7$ lat

Reakcje jądrowe

- są to procesy oddziaływania jądra atomowego z innym jądrem lub cząstką elementarną
- pierwszą reakcją jądrową odkrył w 1919 r. Rutherford bombardując jądra azotu cząstkami α



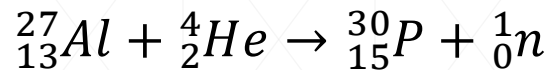
- promieniowanie jądrowe powstałe podczas tych reakcji nazywamy promieniotwórczością sztuczną
- ogólny schemat reakcji jądrowej to:



gdy $Q > 0$ (tzn... energia jest oddawana), reakcja nazywa się **egzoenergetyczną**;
gdy $Q < 0$, reakcja jest nazywana **endoenergetyczną**.

Promieniotwórczość sztuczna

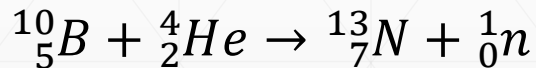
W 1934 r. Fryderyk i Irena Joliot-Curie przeprowadzili reakcje jądrowe, w których odkryli pierwiastki sztucznie promieniujące. Bombardowane tarcze aluminium i boru wysyłały promieniowanie nawet po usunięciu cząstek α



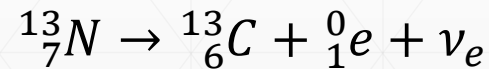
podczas reakcji jądrowej
powstaje nowy izotop fosforu



$$T_{1/2} = 2,5 \text{ min}$$

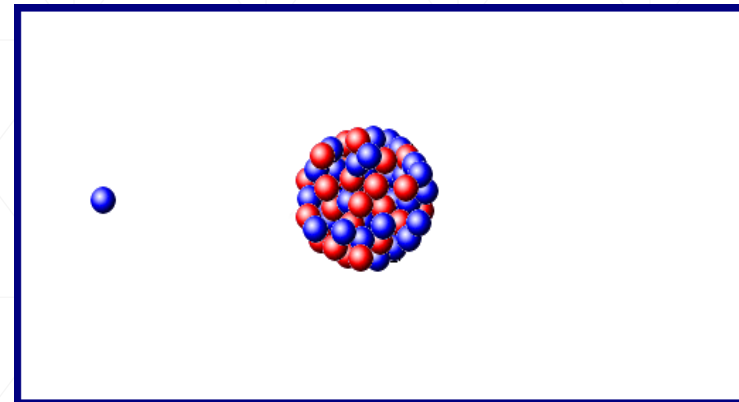


podczas reakcji jądrowej
powstaje nowy izotop azotu

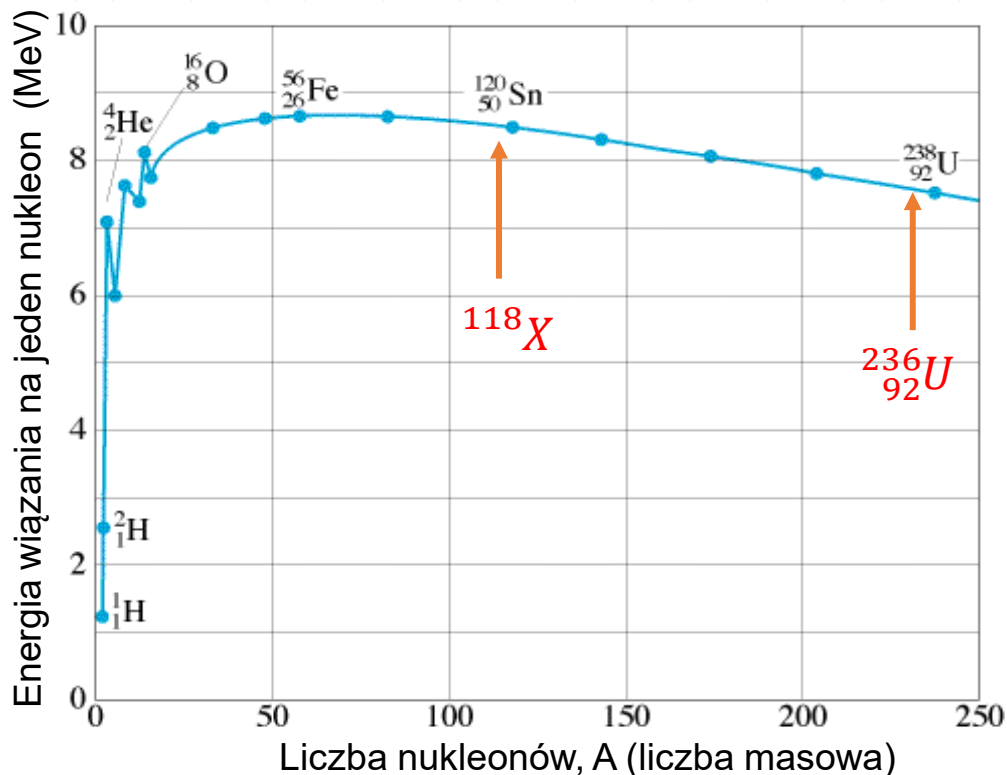


$$T_{1/2} = 10,1 \text{ min}$$

Reakcje rozszczepienia



Rozpad ciężkich jąder na dwie części jest korzystny energetycznie jednak nie może zająć samorzutnie – należy dostarczyć energię progową (aktywacji) aby nukleony mogły pokonać kulombowską barierę potencjału. Dokonuje się to metodą bombardowania izotopu uranu neutronami.



Założmy że jądro ciężkie rozpada się na dwa jednakowe jądra

Energia wiązania na 1 nukleon przed i po reakcji

$${}^{236}_{92}\text{U} \quad 7,6 \text{ MeV} \Rightarrow {}^{118}\text{X} \quad 8,4 \text{ MeV}$$

wydzielona energia na 1 nukleon

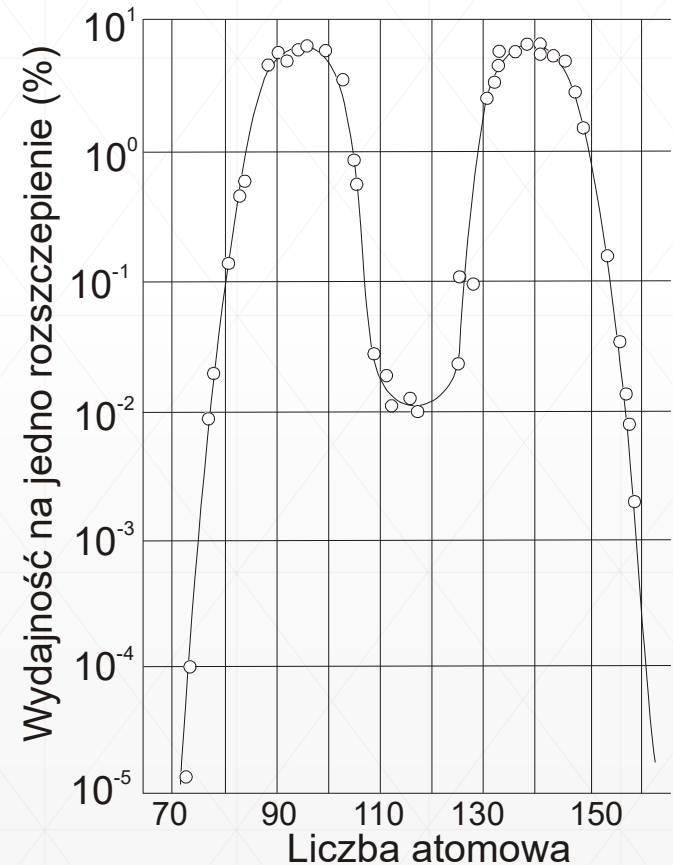
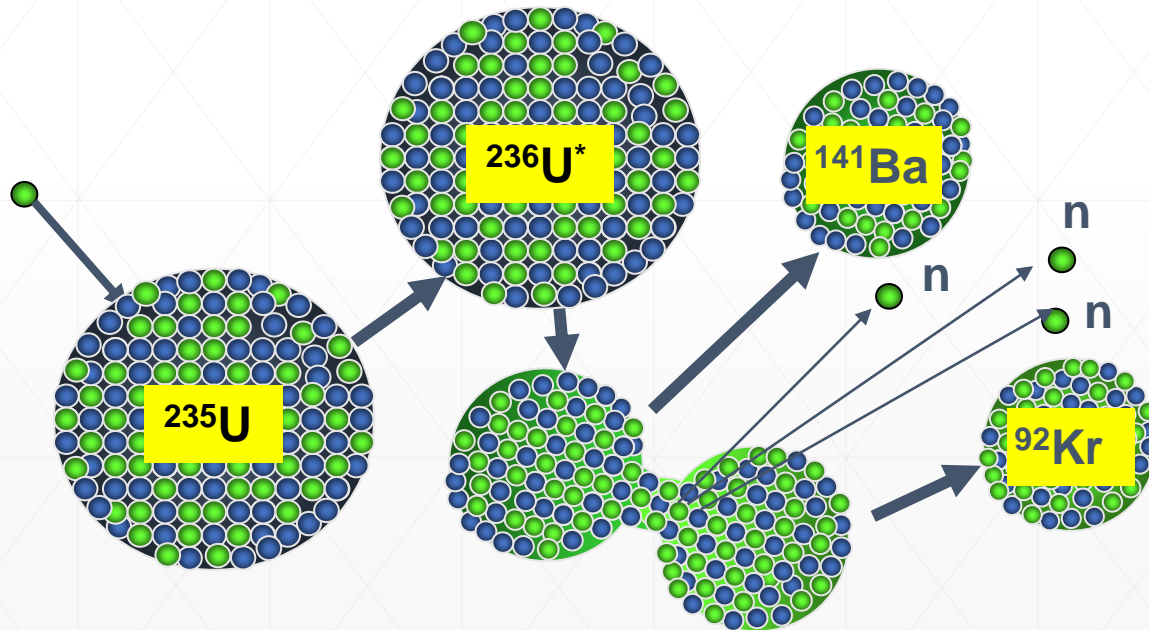
$$8,4 - 7,6 = 0,8 \text{ MeV}$$

Stąd dla 236 nukleonów

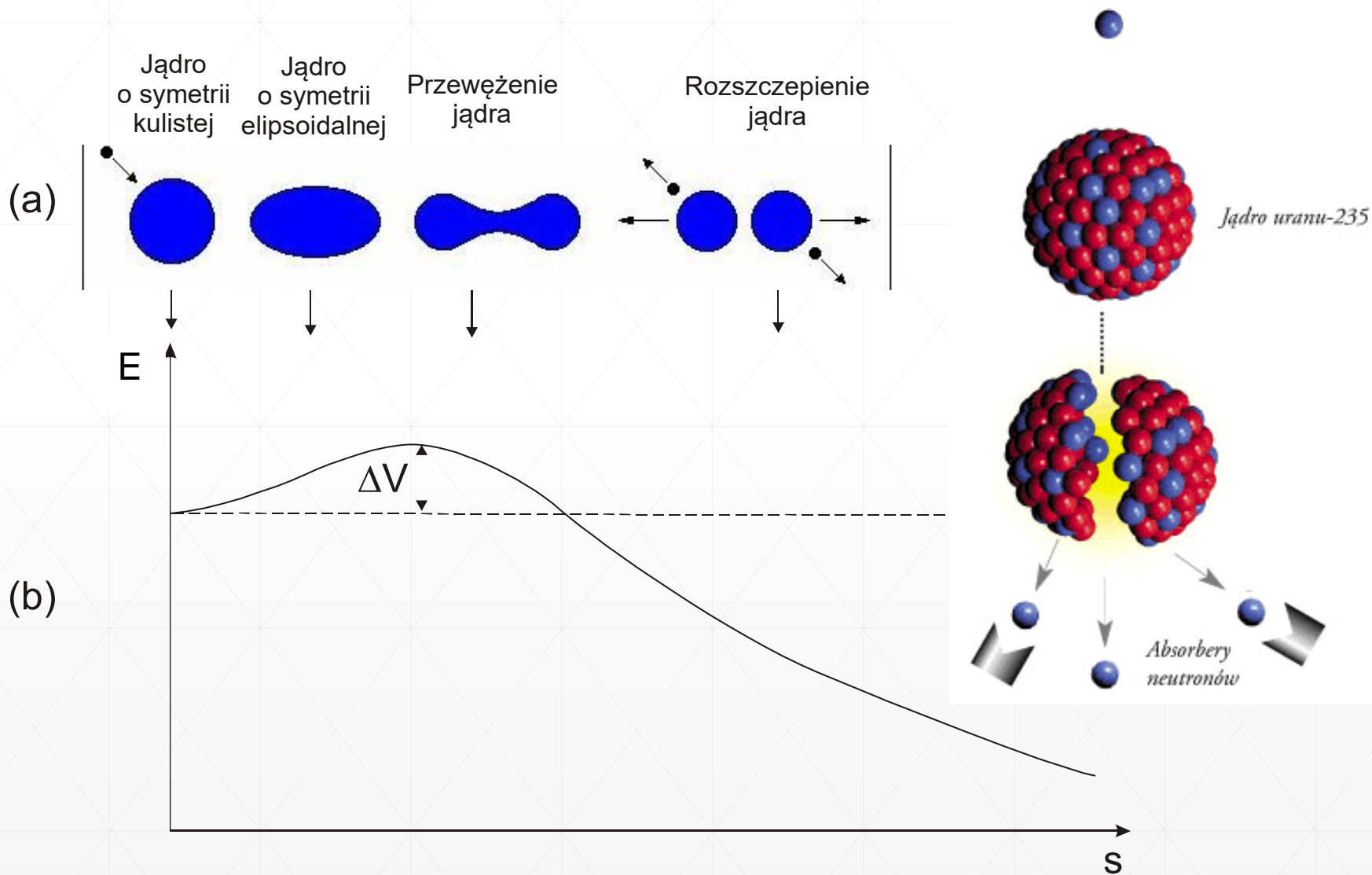
$$Q = 236 \times 0,8 \approx 200 \text{ MeV}$$

Przykłady reakcji rozszczepienia

Jądro ^{235}U absorbuje neutron termiczny i przekształca się w silnie wzbudzone jądro ^{236}U , które ulega rozszczepieniu na dwa fragmenty zazwyczaj o różnych masach.

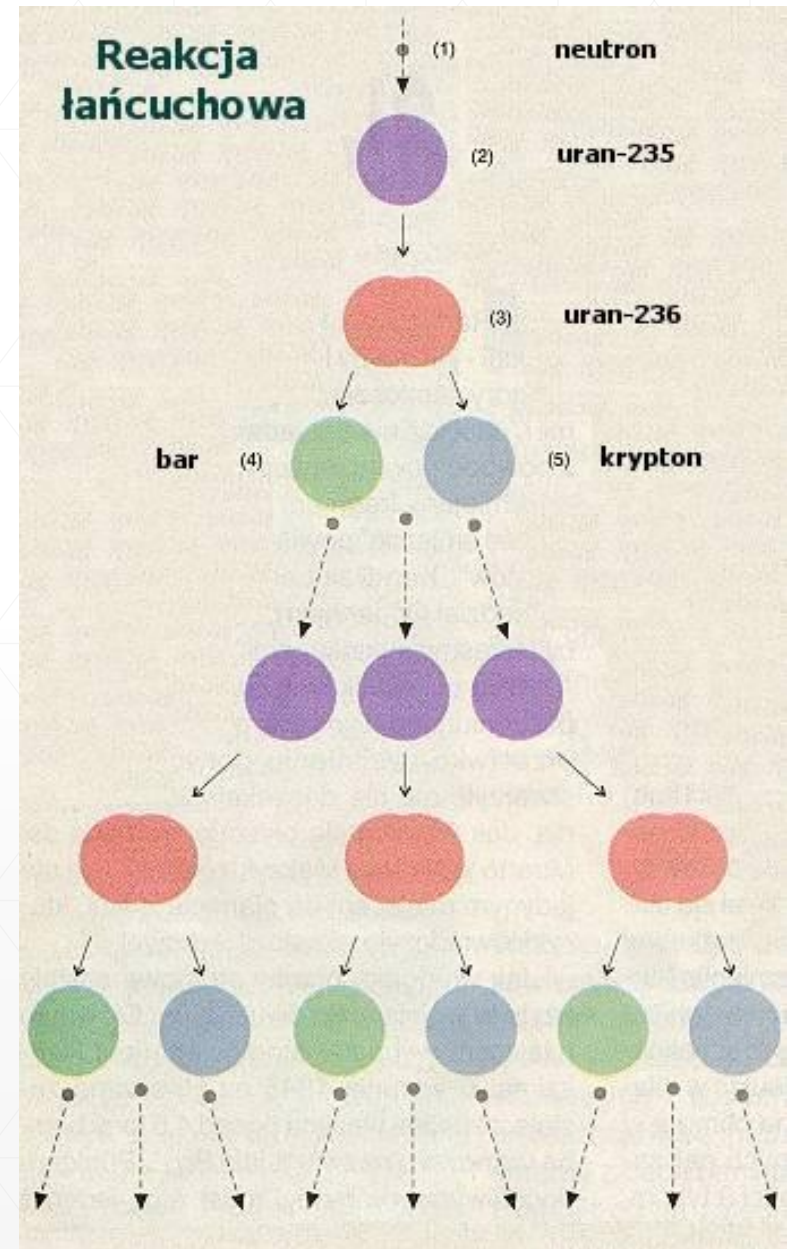


Rozszczepienie wg modelu kroplowego

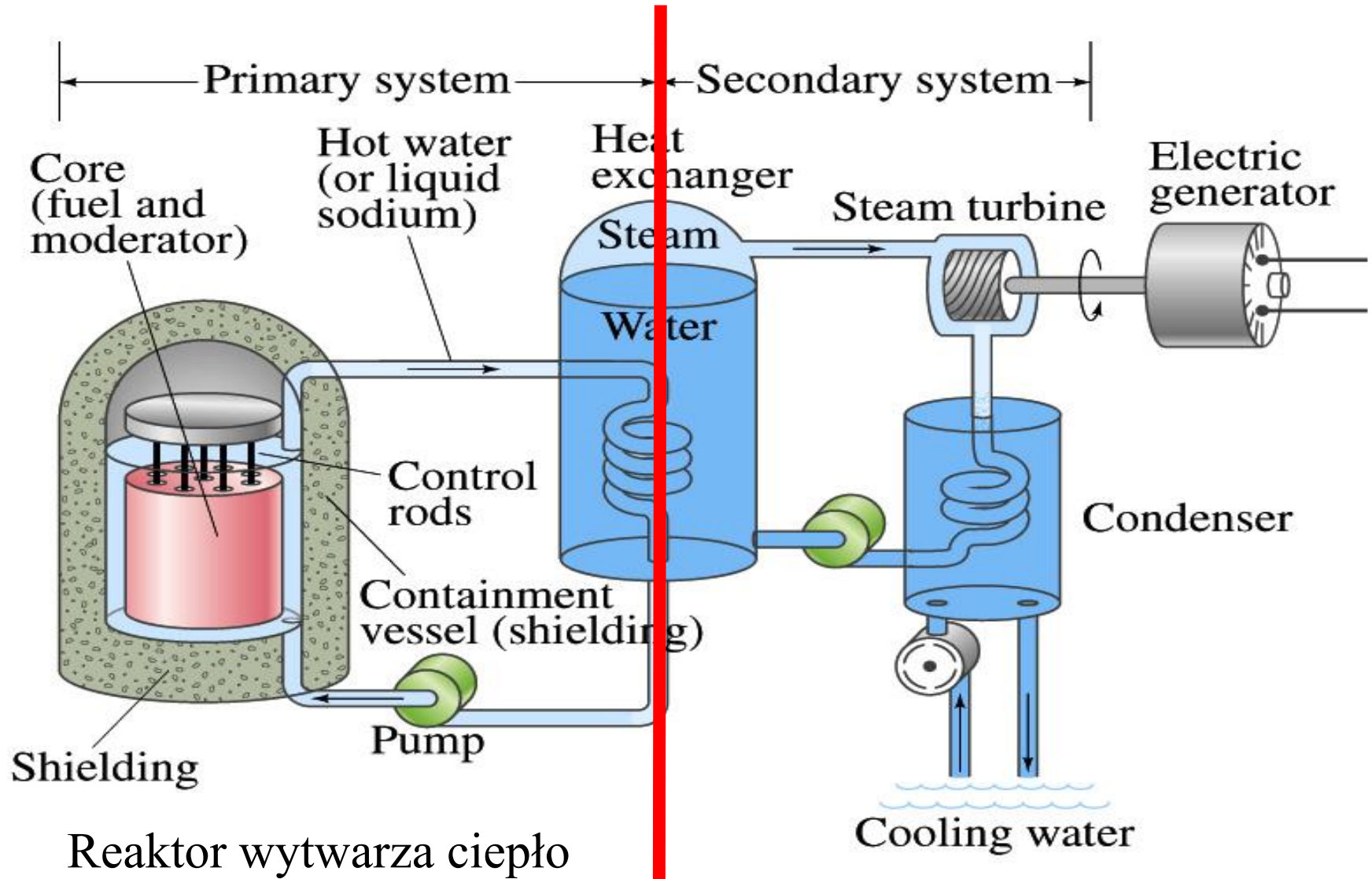


Reakcje łańcuchowe

- wytwarzany neutron potencjalnie wywołuje kolejne rozszczepienie
- w procesie rozszczepienia uranu powstaje średnio 2,5 neutronu
- zapewnienie masy krytycznej w celu ograniczenia ucieczki neutronów poza reaktor
- zastosowanie moderatorów – spowalniaczy neutronów H_2O , grafit
- ograniczenie wychwytu neutronów przez ^{238}U – budowa w formie przekładańca
- pręty sterujące – efektywnie pochłaniające neutrony



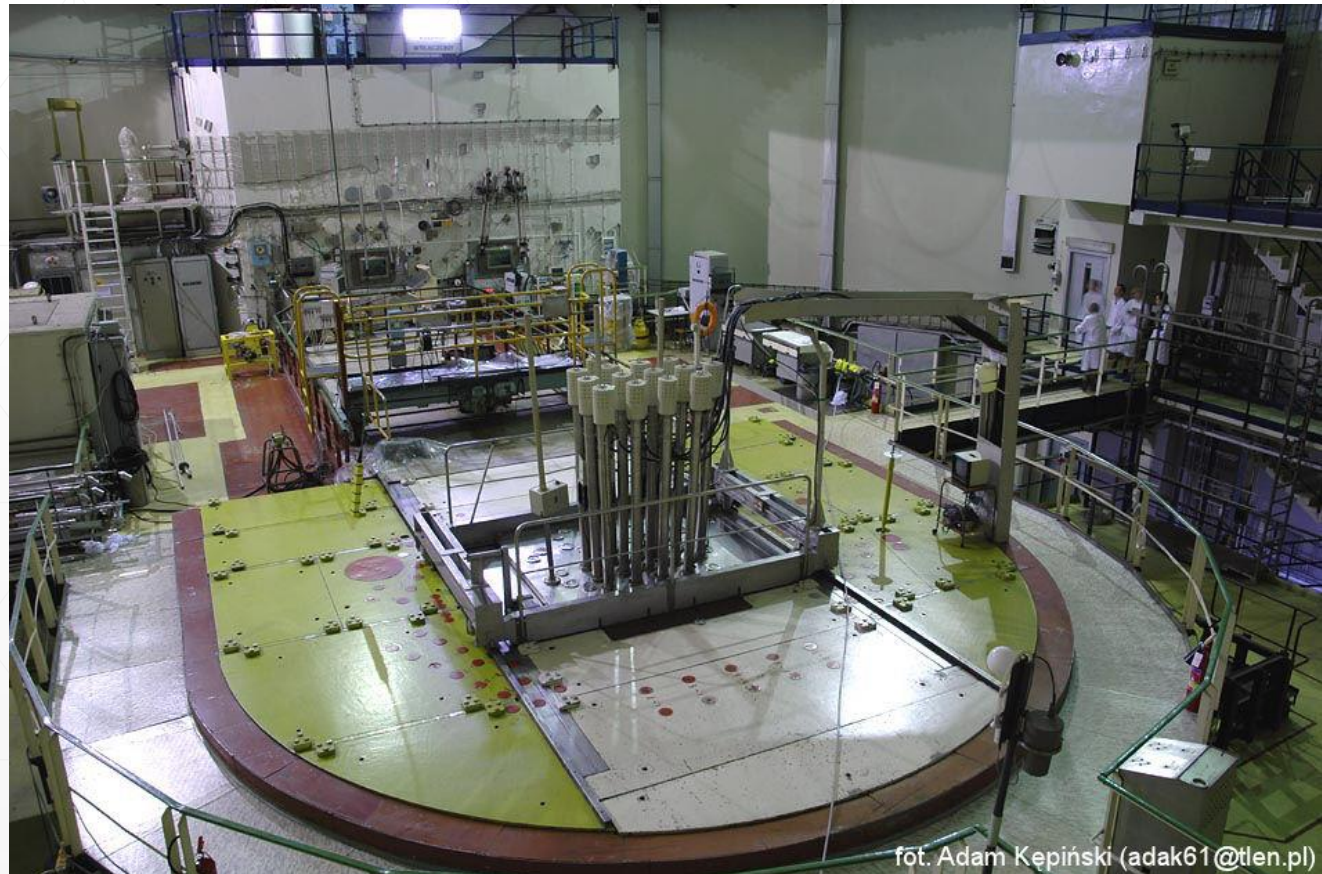
Kontrolowane reakcje rozszczepienia jader ciężkich



Reaktory jądrowe- w Polsce

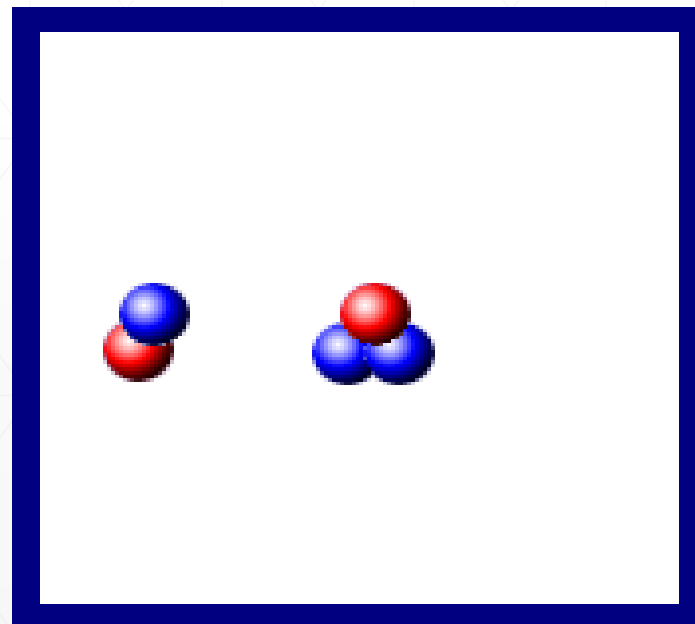
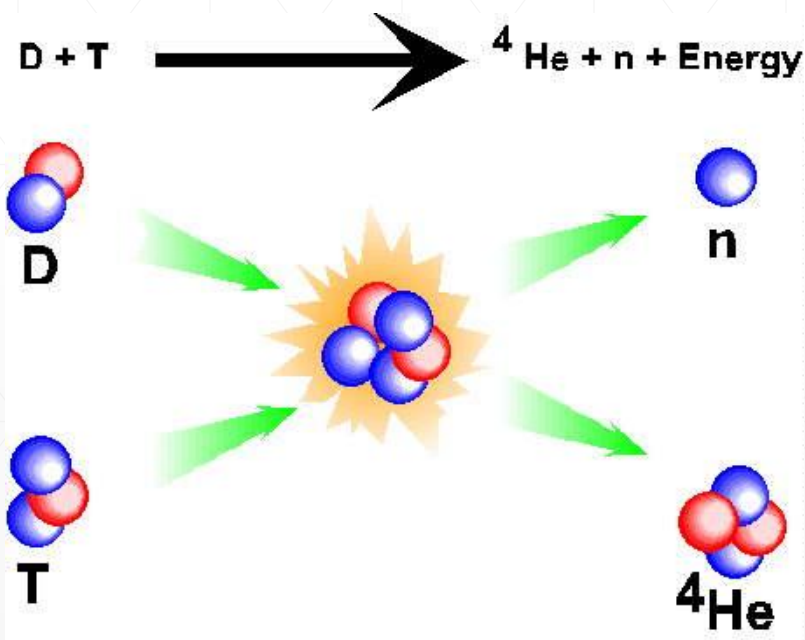
Reaktor Maria został pierwszy raz uruchomiony w grudniu roku 1974 i jako jedyny w Polsce działa do dzisiaj. Jest on zbudowany od podstaw w Polsce a oparty na radzieckim pomysle (reaktor MR w Instytucie Kurczatowa w Moskwie). Jest on reaktorem naukowo-badawczym, nie energetycznym.

- Moc reaktora wynosi 30 MW
- Pracuje 3300 godzin rocznie



Kontrolowana synteza pierwiastków lekkich

Inna droga uzyskanie energii w wyniku reakcji jądrowych

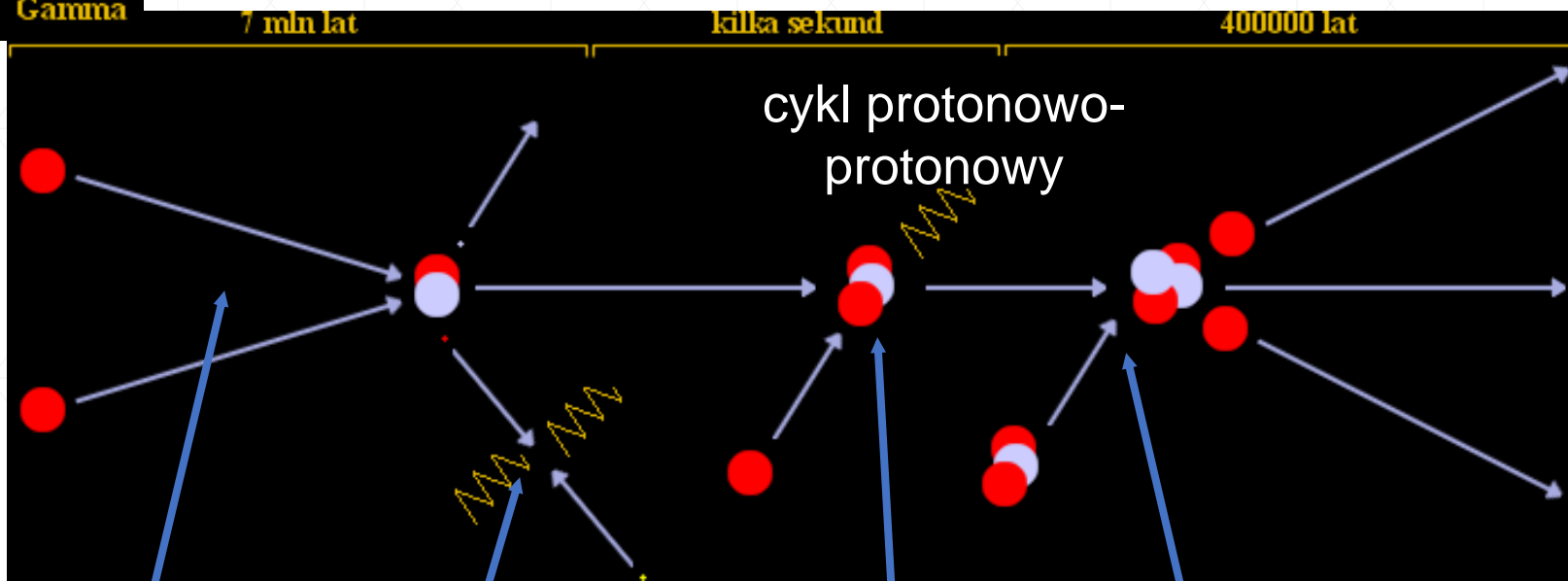


Reakcje syntezy

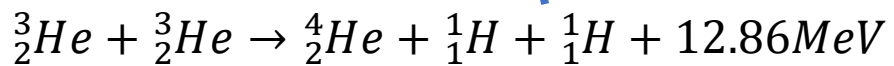
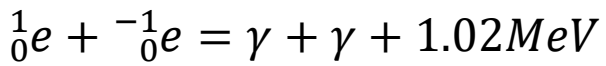
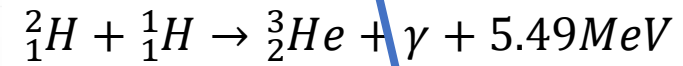
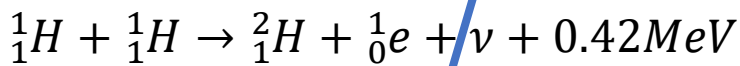
- Procesowi połączenia dwóch lekkich jąder w jedno większe towarzyszy wyzwolenie energii.
- połączeniu jąder przeciwdziała odpychanie kulombowskie, np. dla dwóch protonów $U = 400 \text{ keV}$
- aby pokonać tę barierę zderzające się jądra atomowe muszą uzyskać odpowiednią energię kinetyczną:
 - w akceleratorze
 - podczas wybuchu bomby jądrowej
 - w wyniku wysokiej temperatury (rzędu 10^7 K) – Słońce lub fuzja laserowa
- energia kinetyczna odpowiadająca najbardziej prawdopodobnej prędkości oddziałujących cząstek $E_k = kT$
- we wnętrzu Słońca $kT = 1,3 \text{ eV}$, mimo to zachodzi synteza termojądrowa: ($T = 1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$)
 - występują cząstki o prędkościach większych od średnich
 - cząstki o energii mniejszej od U mogą połączyć się dzięki tunelowaniu

- Proton
- Neutron
- Elektron
- Pozytron
- Neutrino
- ⚡ Gamma

Synteza termojądrowa



Reakcja syntezy we wnętrzu Słońca jest procesem wielostopniowym, w którym wodór jest spalany do postaci helu



$$Q = \sum Q_i = 26.7\text{MeV}$$

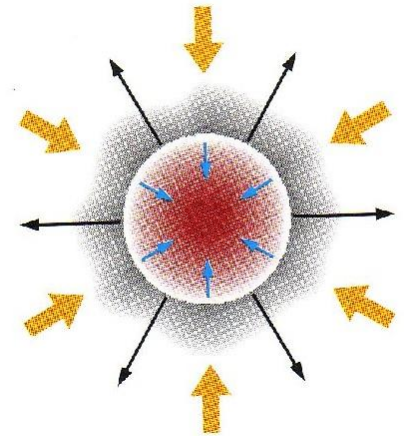
część wypromieniowana w postaci fal elektromagnetycznych

Powyższy cykl jest bardzo powolny ze względu na małe prawdopodobieństwo zderzeń proton-proton, ale ze względu na olbrzymią liczbę protonów w jądrze słońca deuter jest wytwarzany z szybkością 10^{12} kg/s

Laserowy reaktor termojądrowy

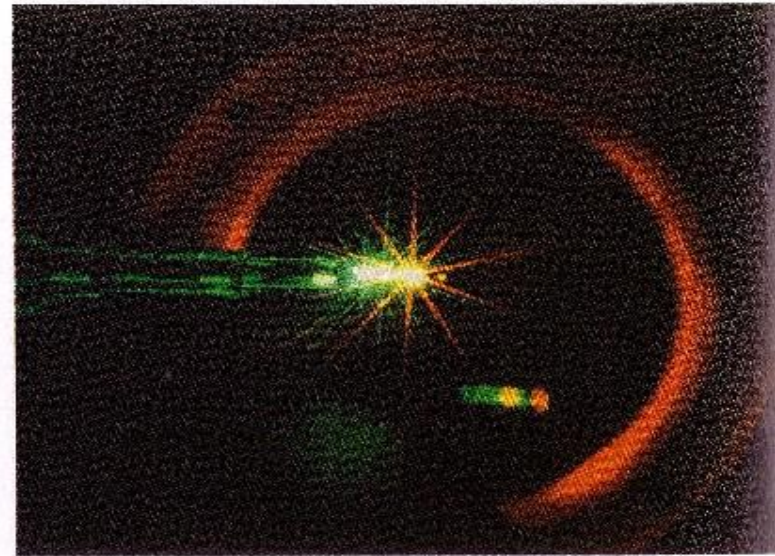
Fuzja laserowa – skupienie energii ponad 200 wiązek laserowych na kulce paliwa jądrowego o wymiarach ziarnka pieprzu. Zapoczątkowana reakcja termojądrowa będzie podtrzymywana ciepłem samej reakcji.

W sierpniu 2021 r. udało się odzyskać aż 70% energii użytej do wywołania reakcji (przez szereg lat odzyskiwano mniej niż 1% włożonej energii).



“NOVA” laser fusion project at Lawrence Livermore Labs, USA:

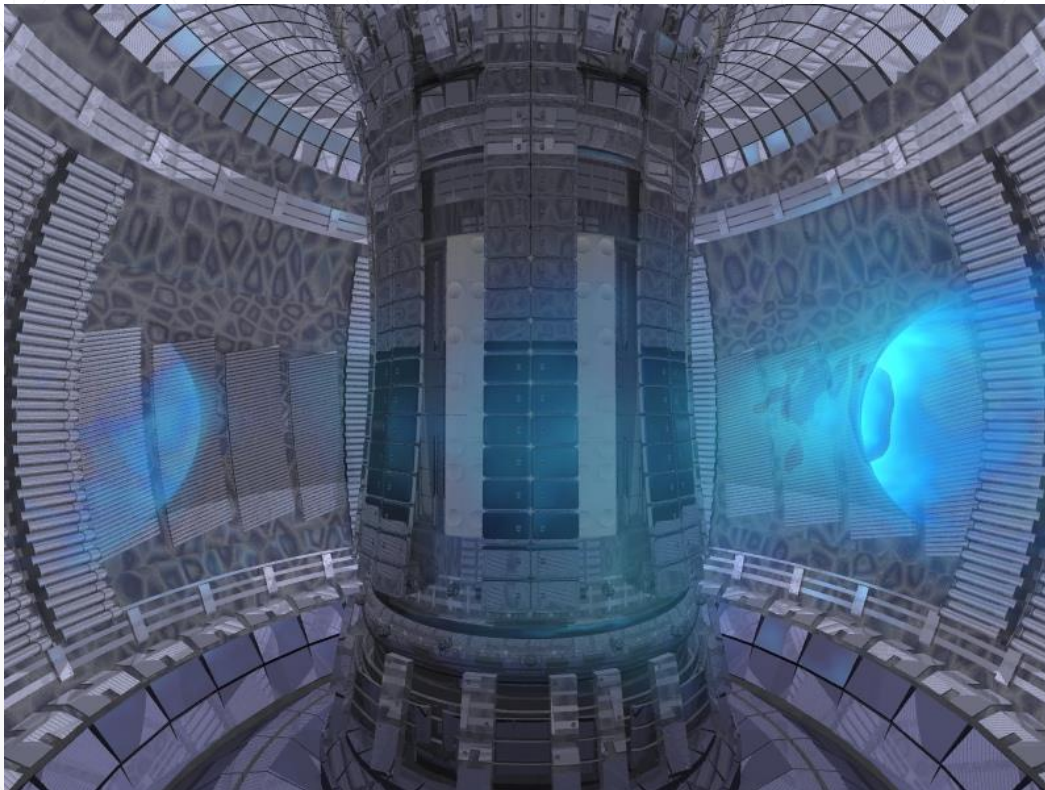
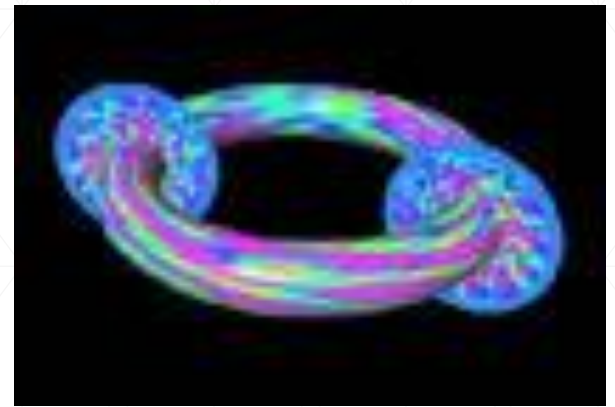
Impuls laserowy trwa 20 ns i ma energię 1,9 mln dżuli.



Reaktory - Tokamak

Toroidalna komora z magnitnoją katuszką

Toroidalna komora z cewką magnetyczną



- Pierścień plazmy utrzymywany jest przez pole magnetyczne (deuter lub deuter i tryton)
- Zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne, które jonizuje gaz → plazma, a następnie powoli ją rozgrzewa.

Eksperymentalny reaktor termojądrowy typu tokamak

Podsumowanie

- Budowa jądra (nuklidu): protony i neutrony
- Modele jądra atomowego: kropłowy i powłokowy
- Przemiany promieniotwórcze: α , β , γ
- Reakcje jądrowe syntezy i rozpadu



Dziękuję za uwagę