

Fizyka jądrowa i cząstek elementarnych

15/15

Andrzej Kapanowski
<https://ufkapano.github.io/>

WFAIS, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

2024

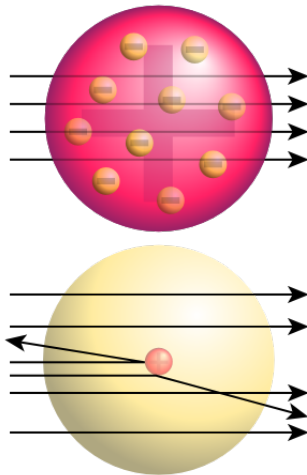
Odkrycie jądra atomu

- Na przełomie XIX i XX wieku E. Rutherford oraz P. Villard podzielili promieniowanie jonizujące na trzy rodzaje - alfa, beta i gamma, szeregując je według zdolności penetrowania materii.
- J. J. Thomson, 1897 - odkrycie elektronu (promieniowanie katodowe).
- E. Rutherford, T. Royds, 1907 - cząstki alfa to jądra helu.
- Znano pierwiastki promieniotwórcze.
- Model atomu Thomсона - "ciasto z rodzynkami".
- E. Rutherford, 1911 - odkrycie jądra atomu (współpracownicy: H. Geiger, E. Marsden).

Doświadczenie Rutherforda

- Badanie odchyłania wiązki cząstek α (ładunek $+2e$) o energii około 5.5MeV na folii ze złota.
- Źródłem cząstek α była cienkościenna rura szklana wypełniona gazowym radonem (produkt rozpadu radu).
- Rutherford: To było chyba najbardziej niewiarygodne zdarzenie w moim życiu. To tak, jakby pocisk artyleryjski wielkiego kalibru, wystrzelony w kierunku serwetki, odbił się od niej i powrócił do strzelającego.
- Wniosek z eksperymentu: Ładunek dodatni atomu jest skupiony w jego środku. Promień jądra musi być mniejszy od promienia atomu około 10^4 razy. **Atom to głównie pusta przestrzeń.**

Doświadczenie Rutherforda



Doświadczenie Rutherforda

- Przykład: Cząstka α o energii 5.3MeV porusza się na wprost atomu złota. W jakiej odległości od środka jądra cząstka zatrzyma się i zmieni kierunek ruchu?
- Jądro złota zawiera 79 protonów (ładunek jądra $+79e$). Odległość minimalnego zbliżenia cząstki α do jądra złota można obliczyć z zasady zachowania energii mechanicznej.

$$E_{k\alpha} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(+2e) \cdot (+79e)}{d}, \quad (1)$$

$$d = 4.29 \times 10^{-14} \text{m} = 42.9 \text{fm}. \quad (2)$$

- Cząstka α zawraca "nie dotykając" jądra złota.

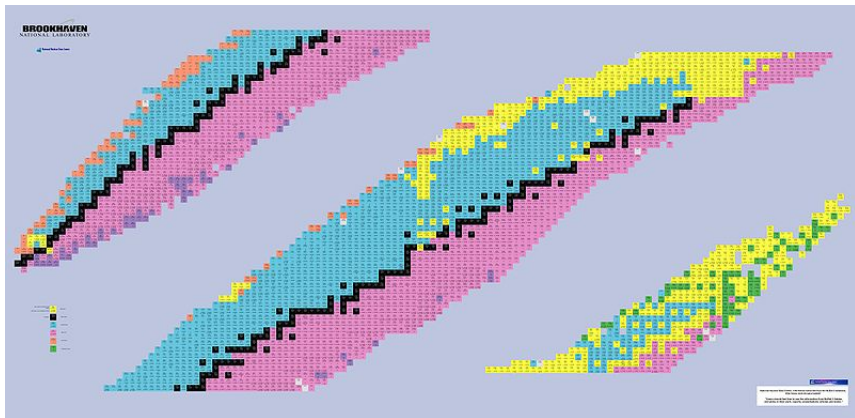
Terminologia fizyki jądrowej

- **Nuklid** to jądro atomu rozważane jako samodzielny obiekt, a nie część atomu.
- **Liczba atomowa** Z to liczba protonów w jądrze.
- **Liczbę neutronów** w jądrze oznaczamy przez N (Chadwick, 1932 - odkrycie neutronu).
- **Liczba masowa** A to łączna liczba protonów i neutronów w jądrze, $A = Z + N$.
- Neutrony i protony w jądrze nazywamy **nukleonami**.
- Przykład: Nuklid o symbolu ^{197}Au .
 Au oznacza złoto, liczba atomowa $Z = 79$.
Wskaźnik górny to liczba masowa $A = 197$.
Obliczamy liczbę neutronów w nuklidzie,
 $N = A - Z = 197 - 79 = 118$.

Terminologia fizyki jądrowej

- **Izotopy** to nuklidy o tej samej liczbie atomowej Z , różniące się liczbą neutronów.
- Przykład: Złoto ma 32 izotopy od ^{173}Au do ^{204}Au . Tylko izotop ^{197}Au jest trwały, pozostałe są **promieniotwórcze (radionuklidy)**, które ulegają **rozpadowi**.
- Nuklidy porządkuje się na **mapie nuklidów**, gdzie położenie nuklidu wyznaczają liczby Z i N .
[Wikipedia: Tabela nuklidów; izotopy poziomo]
- Lekkie nuklidy trwałe leżą w pobliżu linii $N = Z$. W przypadku cięższych nuklidów **przeważa liczba neutronów**.
- Dla trwałych nuklidów podaje się ich względną częstość występowania na Ziemi. Dla nuklidów promieniotwórczych podaje się czas połowicznego zaniku.

Mapa nuklidów



<https://en.wikipedia.org/wiki/File:NuclideMap.PNG>

Promień jądra i masa jądrowa

- Na bazie pomiarów (m. in. rozpraszanie elektronów) przypisuje się każdemu z nuklidów efektywny promień

$$r = r_0 A^{1/3}, \quad (3)$$

gdzie A jest liczbą masową, $r_0 = 1.2 fm$.

- Wzór nie stosuje się do **nuklidów halo**, czyli nuklidów ze znaczącym nadmiarem neutronów.
- Jednostka masy atomowej jest to masa równa 1/12 części masy atomu węgla $^{12}C (Z = 6)$, $1u = 1.661 \times 10^{-27} kg$.
Liczba masowa A nuklidu ma wartość równą masie atomowej nuklidu wyrażonej w atomowych jednostkach masy i zaokrąglonej do najbliższej liczby całkowitej.

Energia wiązania jądra

- Zgodnie ze wzorem Einsteina $E = mc^2$ energia spoczynkowa równoważna jednostce masy atomowej $1u$ wynosi 931.5MeV ($c^2 = 931.5\text{MeV}/u$).
- Masa M jądra jest mniejsza niż suma mas $\sum m$ tworzących je protonów i neutronów.

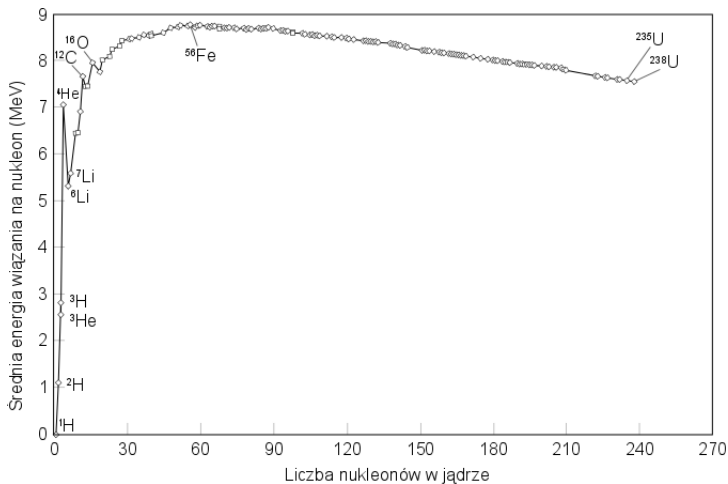
Energia wiązania jądra ΔE_w to różnica

$$\Delta E_w = \sum (mc^2) - Mc^2. \quad (4)$$

- Dobrą miarą trwałości jądra jest **energia wiązania przypadająca na jeden nukleon** ΔE_{wn} ,

$$\Delta E_{wn} = \frac{\Delta E_w}{A}. \quad (5)$$

Energia wiązania nukleonu



Energia wiązania nukleonu

- Największą energię wiązania nukleonu ma ^{62}Ni , $\Delta E_{\text{wn}} = 8.795 \text{ MeV/nukleon}$.
- Szczególnie stabilna jest cząstka α (jądro ^4He).
- W przypadku ciężkich jąder możemy zyskać energię w procesie **rozszczepienia jądra**. Przykładem jest rozszczepienie uranu i plutonu w głowicach jądrowych.
- W przypadku lekkich jąder możemy zyskać energię w procesie **syntezy**. Reakcja syntezy zachodzi w gwiazdach, np. we wnętrzu Słońca.

Materia jądrowa

- Możemy wyobrażać sobie, że nuklidy są zbudowane z mieszaniny neutronów i protonów, które można nazwać **materią jądrową**. Obliczmy gęstość materii jądrowej.
- Masa jądra wynosi Am , gdzie $m = 1u$ to masa nukleonu.
- Objętość jądra (zakładamy, że jądro jest kulą) wynosi $(4/3)\pi r^3 = (4/3)\pi r_0^3 A$.
- Gęstość materii jądrowej

$$\rho = \frac{Am}{(4/3)\pi r^3} = \frac{m}{(4/3)\pi r_0^3} \approx 2 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3. \quad (6)$$

Dla porównania gęstość wody wynosi 10^3 kg/m^3 .

Materia jądrowa

- **Energie jąder są skwantowane.** Różnice między poziomami energetycznymi jąder są rzędu MeV , a więc kiedy jądro przechodzi do niższego stanu energetycznego, emituje foton z zakresu γ widma elektromagnetycznego.
- Wiele nuklidów charakteryzuje się własnym **spinem** i związanym z nim **momentem magnetycznym jądra**.
- Naładowane dodatnio protony odpychają się. Protony i neutrony utrzymują w jądrze krótkozasięgowe **siły jądrowe**. Siły jądrowe nie są oddziaływaniem o charakterze fundamentalnym, ale konsekwencją **oddziaływania silnego**, które wiąże kwarki w protony i neutrony.

Rozpad promieniotwórczy

- Rozpad promieniotwórczy ma charakter statystyczny. Rozważmy próbkę zawierającą N jąder promieniotwórczych. Szybkość rozpadu jest proporcjonalna do liczby jąder,

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (7)$$

gdzie λ to **stała rozpadu**, wielkość charakterystyczna dla każdego nuklidu promieniotwórczego.

- Jednostką stałej rozpadu w układzie SI jest odwrotność sekundy ($1/s$).
- Zależność liczby jąder od czasu dana jest wzorem

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

gdzie N_0 oznacza liczbę jąder w chwili $t = 0$.

Rozpad promieniotwórczy - parametry

- Szybkość rozpadu jąder

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t} = \lambda N. \quad (9)$$

- Całkowita szybkość rozpadu R w próbce zawierającej jeden lub kilka nuklidów promieniotwórczych jest nazywana **aktywnością** próbki.
- Jednostką aktywności w układzie SI jest **bekerel**,
1 bekerel = $1Bq = 1$ rozpad na sekundę.
Starszą jednostką jest **kiur**,
1 kiur = $1Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$.

Rozpad promieniotwórczy

- **Czas połowicznego zaniku** $T_{1/2}$ nuklidu promieniotwórczego mówi o tym, po jakim czasie liczba jąder N i szybkość rozpadu R maleją do połowy swoich wartości początkowych.

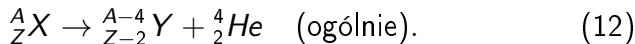
$$\frac{1}{2}R_0 = R_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (10)$$

- **Średni czas życia** τ mówi o tym, w jakim czasie N i R osiągają wartości e razy mniejsze od początkowych.

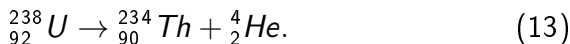
$$\frac{R_0}{e} = R_0 e^{-\lambda \tau}, \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}. \quad (11)$$

Rozpad α

- Podczas **rozpadu α** jądro przekształca się w inny nuklid, emitując przy tym cząstkę α (jądro ${}^4_2\text{He}$).



- Przykład: Rozpad α uranu w tor,

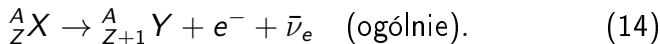


Energia rozpadu $Q = 4.25\text{MeV}$ jest różnicą pomiędzy początkową a końcową energią spoczynkową w tym procesie. Proces może zachodzić samorzutnie, bez dostarczania energii z zewnątrz.

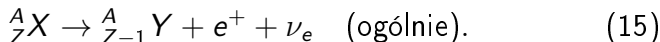
- Rozpad α można wyjaśnić za pomocą modelu, w którym cząstka α istniejąca w jądrze tuneluje na zewnątrz przez barierę potencjału otaczającą jądro.

Rozpad β

- Podczas **rozpadu β** jądro rozpada się samorzutnie, emitując przy tym elektron lub pozyton (dodatnio naładowana cząstka o masie elektronu).
- Rozpad beta minus.



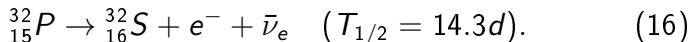
- Rozpad beta plus.



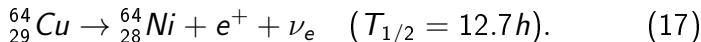
- Symbole ν_e i $\bar{\nu}_e$ oznaczają neutrino i antyneutrino elektronowe. W obydwu procesach zachowany jest ładunek elektryczny i liczba nukleonów.

Rozpad β

- Przykład rozpadu β^- (beta minus) fosforu



- Przykład rozpadu β^+ (beta plus) miedzi



- Rozpad β jest procesem statystycznym, do którego stosuje się wzór $R = R_0 e^{-\lambda t}$ na szybkość rozpadu.

Rozpad β

- Elektrony, pozytony i neutrina są emitowane z jądra w procesie emisji (jak fotony w atomie), co oznacza, że neutrony i protony nie są cząstkami prawdziwie elementarnymi.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (\text{beta minus}). \quad (18)$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (\text{beta plus}). \quad (19)$$

- W rozpadzie β energia rozpadu Q dzieli się w różnych proporcjach pomiędzy elektron i antyneutrino (pozyton i neutrino). Stąd istnieje pewien rozkład energii kinetycznej emitowanych elektronów (pozytonów).
- Rozpad beta zachodzi pod wpływem oddziaływania słabego.

Neutrino

- Istnienie neutrin pierwszy zasugerował W. Pauli w 1930 roku. Wyjaśniało to rozkład energii elektronów i pozytonów, a także zagadkę "brakującego" momentu pędu.
- Neutrino mają zerowy ładunek elektryczny i bardzo małą masę spoczynkową (poniżej $0.3\text{eV}/c^2$).
- Neutrino bardzo słabo oddziałują z materią, z łatwością przenikają np. całą Ziemię. Oddziałują jedynie za pośrednictwem oddziaływań słabych i grawitacyjnych.
- Pierwsza detekcja neutrin: Reines, Covan, 1956 (neutrino z reaktora jądrowego, Nobel 1995).
- 1987 - detekcja neutrin z wybuchu supernowej SN 1987A w Wielkim Obłoku Magellana (około 10 zliczeń).

Datowanie na podstawie rozpadu promieniotwórczego

- Rozpad nuklidów o bardzo długim czasie życia można wykorzystać do określenia wieku skał.
- Przykład: Izotop ${}^{40}_{19}\text{K}$ rozpada się, dając trwały izotop gazu szlachetnego argonu ${}^{40}_{18}\text{Ar}$, $T_{1/2} = 1.25 \times 10^9 \text{ lat}$. Pomiary dla próbki księżycowej wykazały, że stosunek liczby trwałych atomów ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ do liczby promieniotwórczych atomów ${}^{40}_{19}\text{K}$ wynosi 10.3. Załóżmy, że wszystkie atomy argony powstały na drodze rozpadu promieniotwórczego atomów potasu. Jaki jest wiek skały?
- $N_K = N_0 e^{-\lambda t}$, $N_K + N_{Ar} = N_0$, $1 + N_{Ar}/N_K = e^{\lambda t}$,
 $\ln(1 + N_{Ar}/N_K) = \lambda t = t \ln 2 / T_{1/2}$, $t = 4.37 \times 10^9 \text{ lat}$.
- Wniosek: Układ Słoneczny ma około 4 miliardy lat.

Datowanie na podstawie rozpadu promieniotwórczego

- Pomiaru krótszych czasów najczęściej dokonuje się wykorzystując promieniotwórczy węgiel ^{14}C ($T_{1/2} = 5730\text{lat}$), który wytwarzany jest ze stałą szybkością w górnych warstwach atmosfery w wyniku bombardowania azotu przez promieniowanie kosmiczne.
- Węgiel ^{12}C zwykle jest obecny w atmosferze w postaci CO_2 . Węgiel ^{14}C miesza się z węglem ^{12}C w stosunku 1 do 10^{13} . W wyniku procesów biologicznych ustala się stan równowagi w organizmach żywych, niewielki procent atomów węgla to izotop ^{14}C .
- Po śmierci organizmu równowaga ustaje i zawartość ^{14}C w organizmie maleje. Pozwala to wyznaczyć czas, który upłynął od śmierci organizmu.

Pomiary dawki promieniowania

- Skutki działania promieniowania (α, β, γ) na organizmy żywe są przedmiotem powszechnego zainteresowania. Źródła promieniowania: promieniowanie kosmiczne, pierwiastki promieniotwórcze w skorupie ziemskiej, działania człowieka (zastosowanie promieniowania w medycynie, przemyśle).
- **Dawka pochłonięta (absorbowana)** to miara dawki promieniowania jonizującego faktycznie zaabsorbowana przez pewien obiekt (energia na jednostkę masy napromieniowanej substancji). W układzie SI jej jednostką jest **grey**,
 $1\text{Gy} = 1\text{J/kg} = 100\text{rad}$.
- Przeciętna dawka, którą absorbujemy w ciągu roku ze źródeł naturalnych i stworzonych przez człowieka, wynosi około 2mGy .

Pomiary dawki promieniowania

- **Równoważnik dawki pochłoniętej** pozwala określić skutki biologiczne pochłoniętej dawki promieniowania. Dawka pochłonięta jest mnożona przez współczynnik liczbowy WSB (względna skuteczność biologiczna). Dla promieniowania rentgenowskiego i elektronów $WSB=1$, dla powolnych neutronów $WSB=5$, dla cząstek α $WSB=10$, itp.
- Środki ochrony osobistej (dawkomierze) rejestrują równoważnik dawki pochłoniętej. Jego jednostką w układzie SI jest **siwert**, $1Sv = 100rem$.
- Zaleca się, aby osoby narażone na działanie promieniowania, nie otrzymywały w ciągu roku równoważnika dawki pochłoniętej większego niż $5mSv$.

Modele jądrowe

- Jądro zawiera wiele protonów i neutronów, a oddziaływania między nimi są złożone. Wobec braku szczegółowej teorii jądra próbujemy konstruować jego modele, które mają opisać jak najszerszą grupę własności.
- W **modelu kropowym** Bohra nukleony poruszają się chaotycznie wewnątrz jądra (jak cząsteczki w kropli cieczy) i silnie oddziałują między sobą. Model wyjaśnia m. in. rozszczepienia jąder przez tworzenie **jądra złożonego**.
- W **modelu powłokowym** każdy nukleon znajduje się we wnętrzu jądra w dobrze określonym stanie kwantowym i prawie nie uczestniczy w zderzeniach. Model wyjaśnia m. in. **magiczne liczby nukleonów** (zamknięte powłoki; 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, ...).

Fizyka cząstek elementarnych

- Cząstki w fizyce porządkuje się wg pewnych prostych kryteriów fizycznych.
- **Fermiony** (spin połówkowy, zakaz Pauliego) i **bozony** (spin całkowity, kondensaty Bosego-Einsteina).
- **Hadrony** (oddziałują silnie) i **leptony** (nie oddziałują silnie).
Hadrony możemy podzielić na **mezony** (dwa kwarki) i **bariony** (trzy kwarki).
- **Cząstki** (materia) i **antycząstki** (antymateria). Każda cząstka ma odpowiadającą jej antycząstkę, o takiej samej masie, spinie i przeciwnym ładunku elektrycznym.
- Odkrycie pozytonu (antyelektronu): Anderson, 1932
(w promieniowaniu kosmicznym).
- CERN, 1996, wytworzenie antywodoru: antyproton i pozyton.

Model Standardowy

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson
				Gauge Bosons

Leptony

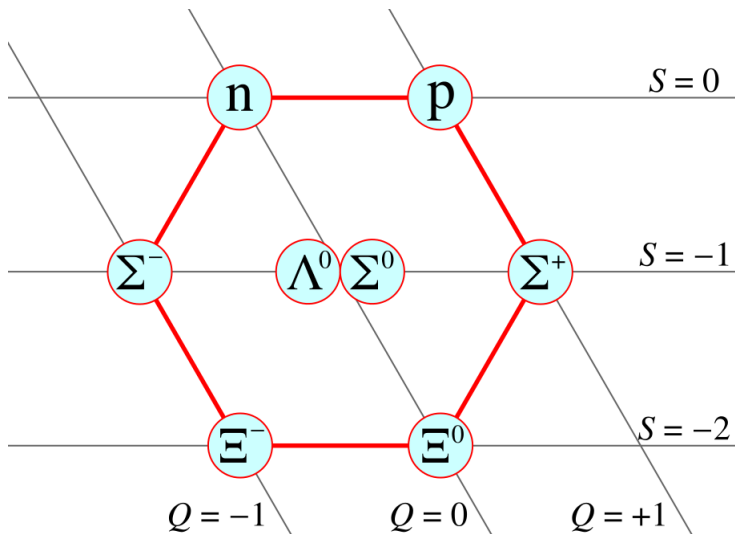
- Leptony nie oddziałują silnie, lecz uczestniczą w oddziaływaniach słabych.
- Trzy rodziny leptonów: elektronowa, mionowa i taonowa.
- **Liczby leptonowe** L_e , L_μ , L_τ ; cząstki $L = +1$, antycząstki $L = -1$, inne cząstki, które nie są leptonami $L = 0$.
- We wszystkich oddziaływaniach liczba leptonowa jest zachowywana osobno dla każdej rodziny leptonów.
- Przykład: Rozpad antymionu

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu. \quad (20)$$

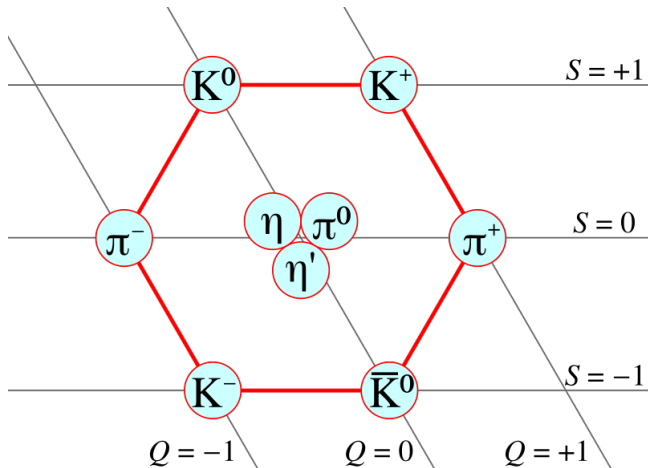
Hadrony

- Hadrony to cząstki silnie oddziałujące złożone z kwarków.
- **Liczba barionowa** B ; bariony $B = +1$, antybariony $B = -1$, inne cząstki $B = 0$ ($B = +1/3$ dla kwarków, $B = -1/3$ dla antykwarków). Istnieje prawo zachowania liczby barionowej.
- **Dziwność** S ($S = -1$ dla s , $S = +1$ dla \bar{s}). Dziwność jest zachowywana w oddziaływaniach silnych.
- Bariony są zbudowane z trzech kwarków, są fermionami, np. proton (uud), neutron (udd).
- Antybariony są zbudowane z trzech antykwarków.
- Mezony są zbudowane z par kwark-antykwark, są bozonami, np. pion π^+ ($u\bar{d}$), kaon K^+ ($u\bar{s}$).

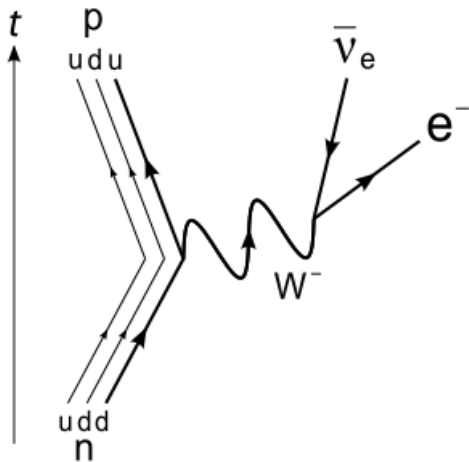
Osiem barionów o spinie $1/2$



Dziewięć mezonów o spinie 0



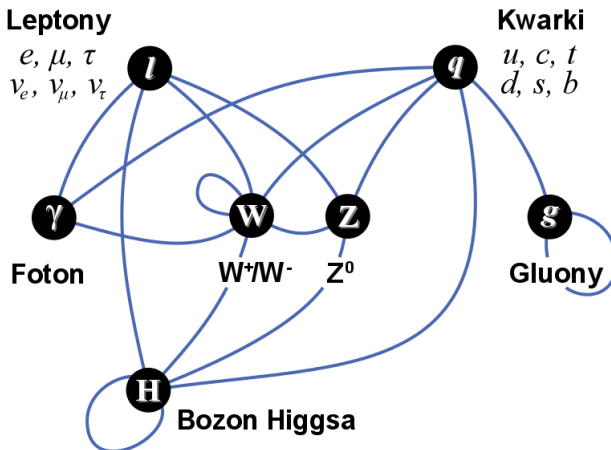
Rozpad beta



Oddziaływania podstawowe i cząstki pośredniczące

- Teoria oddziaływań elektromagnetycznych to **elektrodynamika kwantowa** (QED). Cząstki pośredniczące to bezmasowe **fotony wirtualne**.
- Teoria oddziaływania słabego jest podobna do teorii oddziaływań elektromagnetycznych, ale cząstkami pośredniczącymi są masywne bozony W^\pm i Z^0 . Glashow, Weinberg i Salam stworzyli teorię oddziaływań elektroślabych (Nobel 1979).
- Teoria oddziaływań silnych to **chromodynamika kwantowa** (QCD). Cząstki pośredniczące to bezmasowe **gluony**. Oddziaływanie między kwarkami nazywamy **oddziaływaniem kolorowym**.

Oddziaływania fundamentalne



Rozszerzanie się Wszechświata

- Wszechświat, czas i przestrzeń powstały podczas **Wielkiego Wybuchu**, około $12 - 15 \times 10^9 \text{ lat}$ temu. Z czasem Wszechświat rozszerzał się i stygł.
- E. P. Hubble, 1929 - odkrycie zależności pomiędzy obserwowaną prędkością v oddalania się galaktyki, a jej odległością r od Ziemi,

$$v = Hr \quad (\text{prawo Hubble'a}), \quad (21)$$

gdzie H to stała Hubble'a, która zmienia się z wiekiem Wszechświata.

- Szacowanie wieku Wszechświata dla $H = 63.0 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$,
parsek $1 \text{ pc} = 9.5 \times 10^{15} \text{ m}$,
 $T = r/v = 1/H = 15 \times 10^9 \text{ lat}$.

Promieniowanie reliktowe

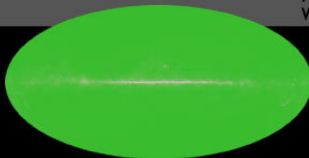
- Penzias, Wilson, 1965 - odkrycie **promieniowania relikowego** (kosmiczne, mikrofalowe promieniowanie tła, odpowiadające temperaturze 2.7 K , maksimum gęstości energii dla długości $\lambda = 1.1\text{ mm}$; Nobel 1978).
- Promieniowanie reliktowe powstało około 300000 lat po Wielkim Wybuchu, kiedy powstały obojętne elektrycznie atomy, a Wszechświat stał się przezroczysty dla fal elektromagnetycznych.
- Pomiary z roku 1992 (satelita COBE) wykazały, że promieniowanie reliktowe jest anizotropowe (zgodność z faktem, że Wszechświat też nie jest jednorodny).

Promieniowanie reliktowe

1965



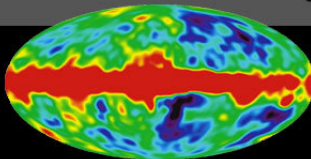
Penzias and Wilson



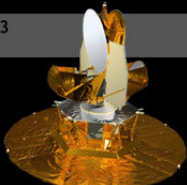
1992



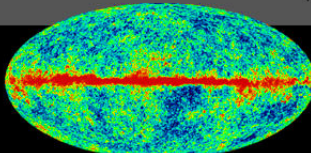
COBE



2003



WMAP



Ciemna materia i ciemna energia

