

# Fizyka jądrowa i cząstek elementarnych

## 15/15

Andrzej Kapanowski  
*<http://users.uj.edu.pl/~ufkapano/>*

WFAIS, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

2020

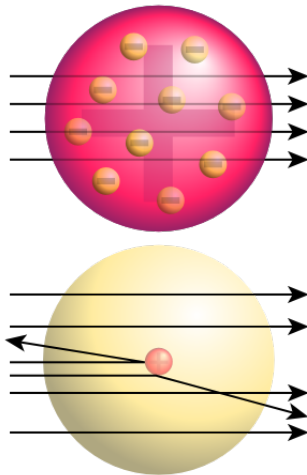
# Odkrycie jądra atomu

- 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 Thomsona - "ciasto z rodzynkami".
- E. Rutherford, 1911 - odkrycie jądra atomu (współpracownicy: H. Geiger, E. Marsden).

# Doświadczenie Rutherforda

- Badanie odchyłania wiązki cząstek  $\alpha$  (ładunek  $+2e$ ) o energii około  $5.5\text{MeV}$  na folii ze złota.
- Źródłem cząstek  $\alpha$  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  $\alpha$  o energii  $5.3\text{MeV}$  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  $\alpha$  do jądra złota można obliczyć z zasady zachowania energii mechanicznej.

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

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

- Cząstka  $\alpha$  zawraca "nie dotykając" jądra złota.

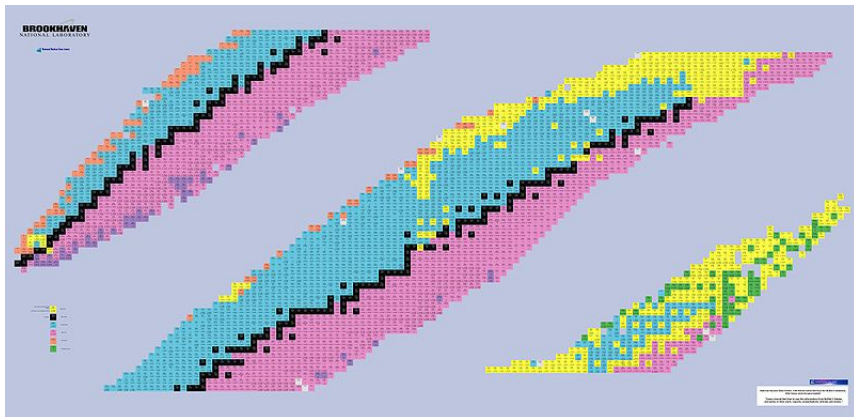
# Terminologia fizyki jądrowej

- **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  $^{197}\text{Au}$ .  
 $\text{Au}$  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  $^{173}\text{Au}$  do  $^{204}\text{Au}$ . Tylko izotop  $^{197}\text{Au}$  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





# 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  $^{12}C (Z = 6)$ ,  $1u = 1.661 \cdot 10^{-27} kg$ .  
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  $931.5\text{MeV}$  ( $c^2 = 931.5\text{MeV}/u$ ).
- Masa  $M$  jądra jest mniejsza niż suma mas  $\sum m$  tworzących je protonów i neutronów.

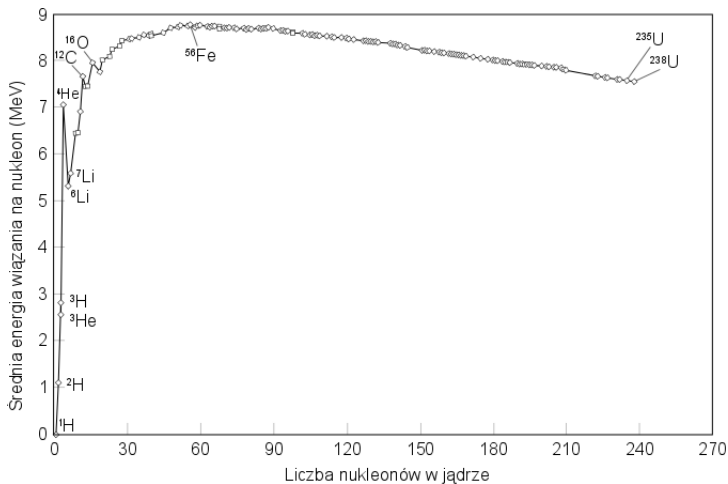
**Energia wiązania jądra**  $\Delta E_w$  to różnica

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

- Dobrą miarą trwałości jądra jest **energia wiązania przypadająca na jeden nukleon**  $\Delta E_{wn}$ ,

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

# Energia wiązania nukleonu



# Energia wiązania nukleonu

- Największą energię wiązania nukleonu ma  $^{62}\text{Ni}$ ,  $\Delta E_{wn} = 8.795 \text{ MeV/nukleon}$ .
- Szczególnie stabilna jest cząstka  $\alpha$  (jądro  $^4\text{He}$ ).
- 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

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

Dla porównania gęstość wody wynosi  $10^3 \text{ kg/m}^3$ .

# 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  $\gamma$  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  $\lambda$  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 =  $1Ci = 3.7 \cdot 10^{10} Bq$ .



# 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.

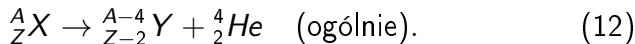
$$\frac{1}{2}R_0 = R_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (10)$$

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

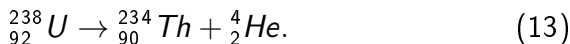
$$\frac{R_0}{e} = R_0 e^{-\lambda \tau}, \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}. \quad (11)$$

# Rozpad $\alpha$

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



- Przykład: Rozpad  $\alpha$  uranu w tor,

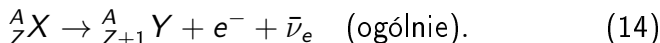


**Energia rozpadu  $Q = 4.25\text{MeV}$**  jest różnicą pomiędzy początkową a końcową energią spoczynkową w tym procesie. Proces może zachodzić samorzutnie, bez dostarczania energii z zewnątrz.

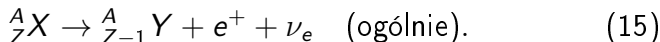
- Rozpad  $\alpha$  można wyjaśnić za pomocą modelu, w którym cząstka  $\alpha$  istniejąca w jądrze tuneluje na zewnątrz przez barierę potencjału otaczającą jądro.

# Rozpad $\beta$

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



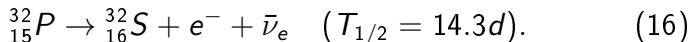
- Rozpad beta plus.



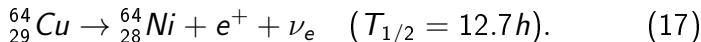
- Symbole  $\nu_e$  i  $\bar{\nu}_e$  oznaczają neutrino i antyneutrino elektronowe. W obydwu procesach zachowany jest ładunek elektryczny i liczba nukleonów.

# Rozpad $\beta$

- Przykład rozpadu  $\beta^-$  (beta minus) fosforu



- Przykład rozpadu  $\beta^+$  (beta plus) miedzi



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

# Rozpad $\beta$

- 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  $\beta$  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  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ,  $T_{1/2} = 1.25 \cdot 10^9 \text{ lat}$ . 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?
- $N_K = N_0 e^{-\lambda t}$ ,  $N_K + N_{Ar} = N_0$ ,  $1 + N_{Ar}/N_K = e^{\lambda t}$ ,  
 $\ln(1 + N_{Ar}/N_K) = \lambda t = t \ln 2 / T_{1/2}$ ,  $t = 4.37 \cdot 10^9 \text{ lat}$ .
- Wniosek: Układ Słoneczny ma około 4 miliardy lat.

# Datowanie na podstawie rozpadu promieniotwórczego

- Pomiaru krótszych czasów najczęściej dokonuje się wykorzystując promieniotwórczy węgiel  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5730\text{lat}$ ), który wytwarzany jest ze stałą szybkością w górnych warstwach atmosfery w wyniku bombardowania azotu przez promieniowanie kosmiczne.
- Węgiel  $^{12}\text{C}$  zwykle jest obecny w atmosferze w postaci  $\text{CO}_2$ . Węgiel  $^{14}\text{C}$  miesza się z węglem  $^{12}\text{C}$  w stosunku 1 do  $10^{13}$ . W wyniku procesów biologicznych ustala się stan równowagi w organizmach żywych, niewielki procent atomów węgla to izotop  $^{14}\text{C}$ .
- Po śmierci organizmu równowaga ustaje i zawartość  $^{14}\text{C}$  w organizmie maleje. Pozwala to wyznaczyć czas, który upłynął od śmierci organizmu.



# Pomiary dawki promieniowania

- Skutki działania promieniowania ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) 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  $2\text{mGy}$ .

# 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  $\alpha$   $WSB=10$ , 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 <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson
				Gauge Bosons

# Leptony

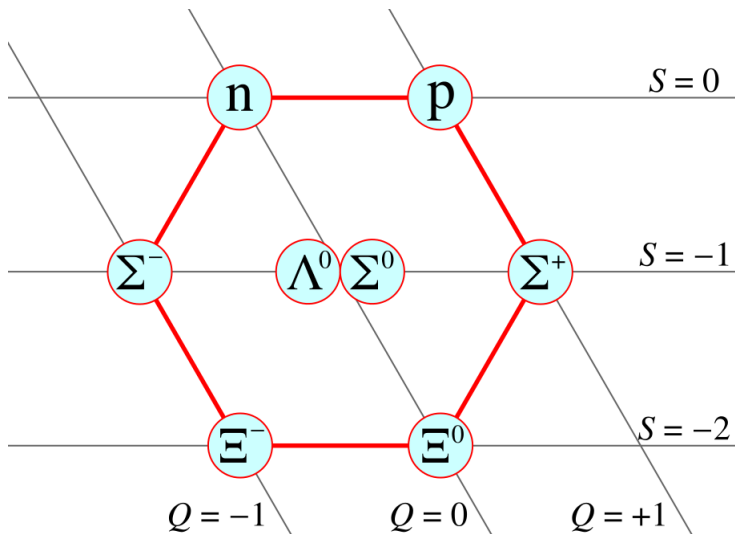
- Leptony nie oddziałują silnie, lecz uczestniczą w oddziaływaniach słabych.
- Trzy rodziny leptonów: elektronowa, mionowa i taonowa.
- **Liczby leptonowe**  $L_e$ ,  $L_\mu$ ,  $L_\tau$ ; cząstki  $L = +1$ , antycząstki  $L = -1$ , inne cząstki, które nie są leptonami  $L = 0$ .
- We wszystkich oddziaływaniach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

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

# Hadrony

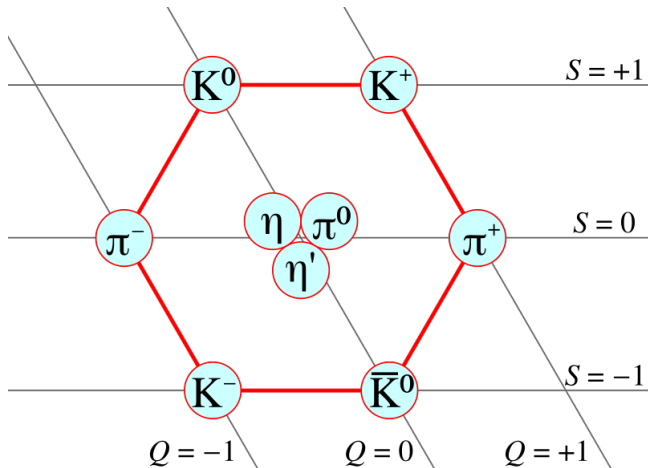
- Hadrony to cząstki silnie oddziałujące złożone z kwarków.
- **Liczba barionowa**  $B$ ; bariony  $B = +1$ , antybariony  $B = -1$ , inne cząstki  $B = 0$  ( $B = +1/3$  dla kwarków,  $B = -1/3$  dla antykwarków). Istnieje prawo zachowania liczby barionowej.
- **Dziwność**  $S$  ( $S = -1$  dla  $s$ ,  $S = +1$  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  $\pi^+$  ( $u\bar{d}$ ), kaon  $K^+$  ( $u\bar{s}$ ).

# Osiem barionów o spinie 1/2

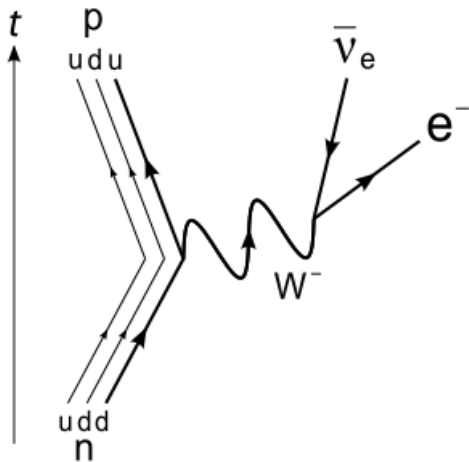




# Dziewięć mezonów o spinie 0



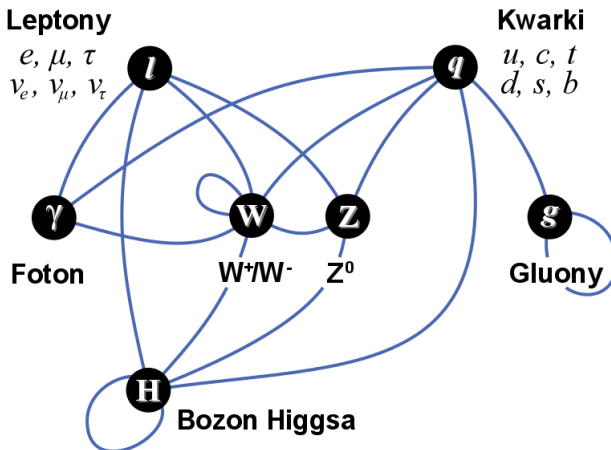
# Rozpad beta



# 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  $12 - 15 \cdot 10^9 \text{ lat}$  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  $1 \text{ pc} = 9.5 \cdot 10^{15} \text{ m}$ ,  
 $T = r/v = 1/H = 15 \cdot 10^9 \text{ lat}$ .

# Promieniowanie reliktowe

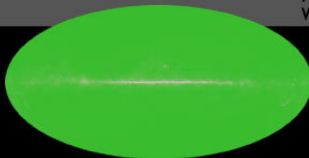
- Penzias, Wilson, 1965 - odkrycie **promieniowania relikтового** (kosmiczne, mikrofalowe promieniowanie tła, odpowiadające temperaturze  $2.7\text{ K}$ , maksimum gęstości energii dla długości  $\lambda = 1.1\text{ mm}$ ; Nobel 1978).
- Promieniowanie reliktowe powstało około 300000 lat po Wielkim Wybuchu, 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



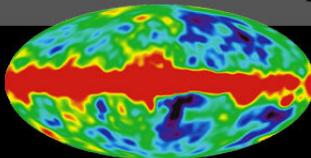
Penzias and Wilson



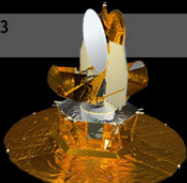
1992



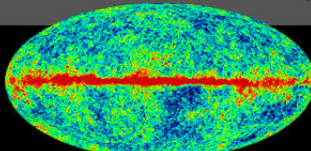
COBE



2003



WMAP



# Ciemna materia i ciemna energia

