

## Úvod

Čtyři druhy interakcí – gravitační, elektromagnetická, slabá a silná.

**Rozdělení částic podle interakcí, které na ně působí:**

Na všechny působí gravitace

**Leptony** – interagují slabě a nabitě elektromagneticky, neinteragují silně ( $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) – v současných experimentech bodové

**Hadrony** – interagují navíc i silně – mají strukturu a rozměr  $\approx 1$  fm

Hadrony se dělí na:

**Mezony** - ( $\pi^+, \pi^-, \pi^0, K^+, K^-, K^0, \rho^+, \rho^-, \rho^0 \dots$ )

**Bariony** – ( $p, n, \Lambda, \Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0, \Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-, N, \Omega^- \dots$ )

**Rozdělení podle statistiky, které se podřizují:**

**Bosony:** Bose-Einsteinova statistika  $\rightarrow$  v daném stavu libovolný počet částic – spin celočíselný

Vlnová funkce – symetrická:

$$\Psi_B(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \Psi_B(x_2, x_1, x_3, \dots, x_n)$$

Mezony a částice pole (fotony, gravitony, gluony, ...)

**Fermiony:** Fermi-Dirakova statistika  $\rightarrow$  Pauliho vylučovací princip  $\rightarrow$  v daném stavu pouze jedna identická částice – spin poločíselný

Vlnová funkce antisymetrická:

$$\Psi_F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = -\Psi_F(x_2, x_1, x_3, \dots, x_n)$$

Leptony a baryony

**Antičástice** – stejná hmotnost, jako částice, opačná znaménka kvantových čísel (náboj, baryonové číslo, leptonové číslo, podivnost ...). Ve většině případů je označujeme proužkem nad příslušným symbolem:

$$p \rightarrow \bar{p}, \quad n \rightarrow \bar{n}, \quad \Lambda \rightarrow \bar{\Lambda}, \quad \nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$$

ale:  $e^- \rightarrow e^+, \mu^- \rightarrow \mu^+, \tau^- \rightarrow \tau^+$

## Zákony zachování kvantových čísel

Neexistence některých reakcí energeticky (kinematicky) možných → indikace existence zákonů zachování

Neexistují reakce, ve kterých by se celkový náboj nezachovával → **zákon zachování náboje**

Počet fermionů se zachovává → **zákony zachování baryonového a leptonových čísel**

Baryonové číslo: pokud platí zákon jeho zachování striktně je proton (nejlehčí baryon) stabilní. Nebyl zatím pozorován rozpad:

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

Jednotlivá leptonová čísla –  $L_e, L_\mu$  a  $L_\tau$

Nutnost zavedení zákona zachování leptonového čísla vyplývá z řady experimentálních faktů:

Nepozorování reakce:

$$e^- + e^- \rightarrow \pi^- + \pi^-$$

**Zákon zachování jednotlivých leptonových čísel:**

Nepozorování reakcí:  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$

$$\mu^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-$$

Existující rozpad mionu:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

**Oscilace neutrin** – narušení zákona zachování jednotlivých leptonových čísel, celkové leptonové číslo se zachovává.

**Pozorování v detekci slunečních neutrin detektorem Super-kamiokande**

**Narušení zákona celkového leptonového čísla – zatím nepozorováno**

**Narušení zákona zachování baryonového čísla – zatím nepozorováno (náznak jeho existence je baryonová asymetrie vesmíru)**

**Taková narušení předpokládají teorie sjednocení interakcí.**

## Antičástice

**Částice s nulovým spinem jsou relativisticky popsány Klein-Gordonovou rovnicí (lineární parciální diferenciální rovnice druhého řádu):**

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \psi = 0$$

**Pro směr pohybu částice v ose x:**

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \psi = 0$$

**Její řešení pro volnou částici :**

$$\psi(x, t) = e^{-i(Et - px)/\hbar}$$

**Dosadíme:**

$$-\frac{1}{c^2} \frac{E^2}{\hbar^2} e^{-i(Et - px)} + \frac{p^2}{\hbar^2} e^{-i(Et - px)} + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} e^{-i(Et - px)} = 0$$

**Dostaneme podmínku:**

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Existuje jak kladné tak záporné řešení:

$$E_1 = E^{(+)} = +\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

$$E_2 = E^{(-)} = -\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Možná interpretace řešení  $E_2$ : kladná energie, opačný náboj  $\rightarrow$  antičástice.

Opuštění interpretace, že vlastní hodnoty Hamiltonianu udávají energii částice.

Podobnou situaci dostaneme pro **Dirackovu rovnici**, jejíž řešení popisují částice se **spinem 1/2**.

V tomto případě máme 4 řešení pro vlnové funkce:

Částice s průmětem spinu  $+1/2$  a  $-1/2$

Antičástice s průmětem spinu  $+1/2$  a  $-1/2$

Existence elektronu a pozitronu. Podobně i pro další fermiony.

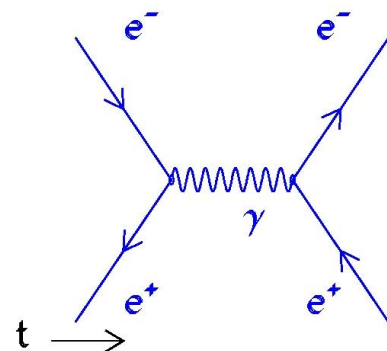
**Objev první antičástice:**

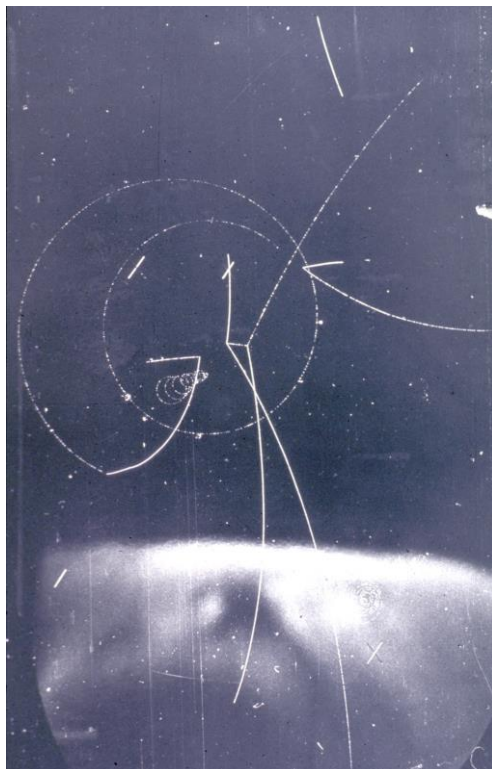
1932 - pozitron v kosmickém záření

1955 – antiproton (BEVATRON)

1956 - antineutron

Setkání částice a antičástice  $\rightarrow$  **anihilace**



Anihilace antiprotonu – vzniká  $K^-$ ,  $K^0$  a  $\pi^+$ :

## Přehled fyzikálních veličin s pohledu vztahu částice a antičástice:

Veličina	částice	antičástice
Hmotnost $m$	stejná	stejná
Spin (velikost)	stejná	stejná
Doba života $\tau$	stejná	stejná
Izospin (velikost)	stejná	stejná
Elektrický náboj	$Q$	$-Q$
Magnetický moment	$\mu$	$-\mu$
Baryonové číslo	$B$	$-B$

Leptonová čísla	L	-L
Podivnost	S	-S
z složka izospinu $I_z$	$I_z$	$-I_z$
Vnitřní parita P	Stejná pro bozony	Opačná - fermiony

**Neutrální částice:**

**Fermiony:** antičástice se liší v baryonovém a leptonových číslech

**Bozony:** je-li  $I=B=L=S=0$  a  $\mu=0$  → částice totožná s antičásticí

$$\pi^0 \equiv \bar{\pi}^0$$

Setkání částice s antičásticí → **anihilace** na fotony a mezony

**Zákony zachování** → produkce fermionů ve dvojici částice-antičástice.

Například “obrácená anihilace” – **kreace párů** elektron pozitron při průletu fotonů polem jádra

Nalezeny antičástice k většině známých částic.

**Produkce antiatomu** (zatím pouze antivodíku), produkce **antijader**. → existence antihmoty

**Nábojová symetrie C-invariance** – totožnost procesů při záměně částic za antičástice a naopak.

Narušení C-invariance a združené **CP-invariance**

Existence antihmoty ve vesmíru – v kosmickém záření pouze antiprotony a další antičástice produkované ve srážkách vysokoenergetických protonů.

**Baryonová asymetrie vesmíru** – převaha hmoty nad antihmotou

### Podivné částice

1) Nové částice s mnohem delší dobou života  $\sim 10^{-10}$ s – rozpadají se pomalu, i když se uvolňuje značná energie.

2) Produkce těchto částic v párech.

**3) Neexistence některých typů rozpadů:****Existuje rozpad:**  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ 

$$S = -1 \ -1 \ 0$$

**Neexistuje rozpad:**  $\Sigma^+ \rightarrow p + \gamma$ 

$$S = -1 \ 0 \ 0$$

↓↓↓

**Znak existence nového zákona zachování – zákon zachování podivnosti (platí pro silnou a elektromagnetickou interakci, neplatí pro slabou) → zavedení veličiny podivnost (S)**

**I pro slabý rozpad pouze  $\Delta S = \pm 1$ .**

**Neexistuje rozpad:**  $\Xi^- \rightarrow n + \pi^-$ 

$$S = -2 \ 0 \ 0$$

**Hyperon (podivný barion)  $\Xi^-$  se tak rozpadá ve dvou etapách:**

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$$

$$S = -2 \ -1 \ 0$$

$$\Lambda \rightarrow n + \pi^0$$

$$S = -1 \ 0 \ 0$$

**Zavedení hypernáboje:  $Y = B + S$**

**Izospin:**

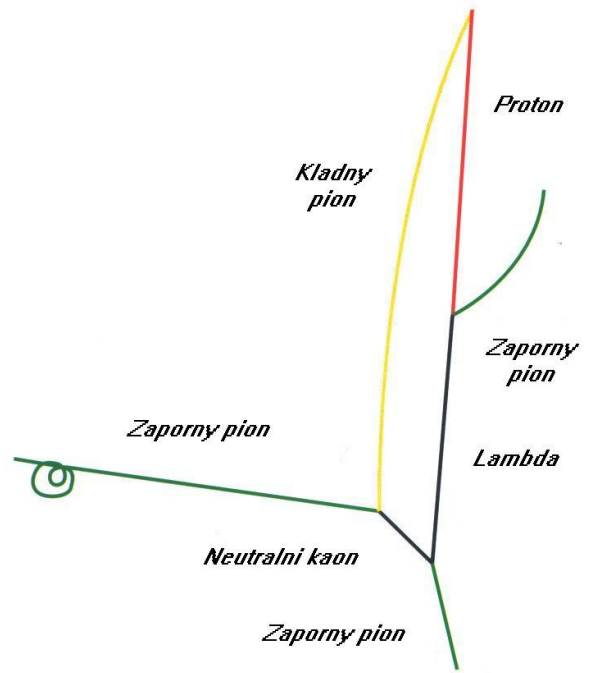
**Nezávislost silné interakce na náboji. → proton a neutron jsou dva nábojové stavy jedné částice – nukleonu.**

**Hodnota izospinu I je taková, že počet jeho průmětů do třetí osy  $2I+1$  udává počet nábojových stavů.**

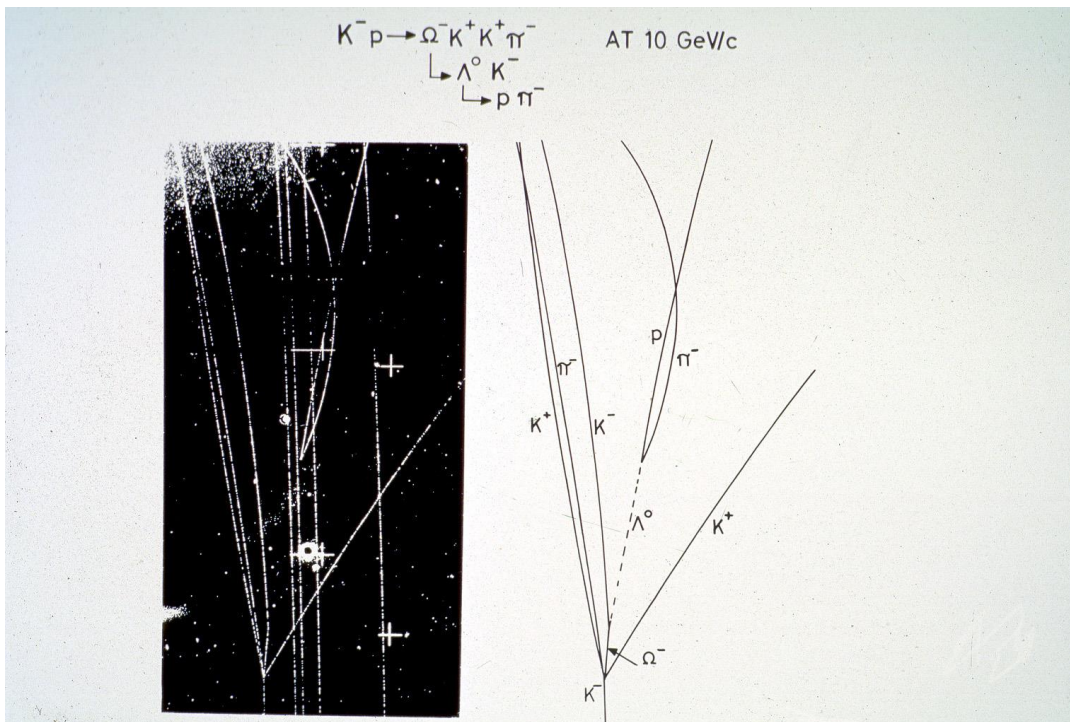
**Náboj hadronů :**

$$Q = e(I_z + Y/2) = e(I_z + (B+S)/2)$$

**První podivné částice: K mezony, lambda - přelom 40 a 50 let**



Reakce  $\pi^-$  s jádrem v bublinové komoře produkuje  $K^0$  a  $\Lambda$



Produkce  $\Omega^-$  ( $S=2$ ) částice – snímek bublinové komory v CERNu



## Rezonance

Existence velmi krátce žijících částic (typická doba života  $\sim 10^{-23}$ s)  $\rightarrow$  pozorovány jako rezonanční struktury v energetických spektrech:

a) při rozptylu částic (např.  $\pi$ -N rozptyl)

b) při multiprodukcii částic

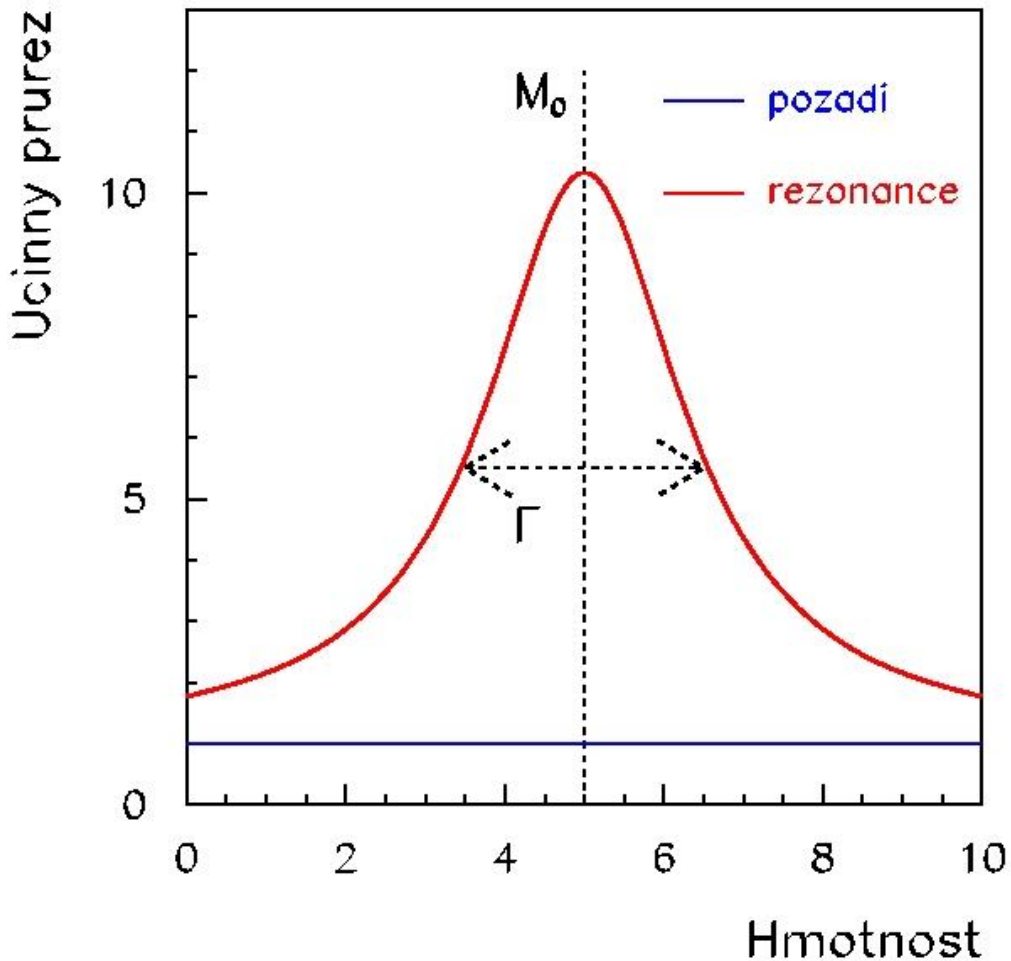
(studují se rezonanční struktury v závislosti účinného průřezu na invariantní hmotnosti rozptylující se soustavy nebo systému produkovaných částic –

$$\sqrt{s_{12}} = M_S c^2 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 c^2}$$

Výskyt rezonančních maxim ve tvaru Breit-Wignerovi funkce.

$$\sigma(M) \sim |\rho(M)|^2 \sim \frac{1}{(M - M_0)^2 + \Gamma^2 / 4}$$

Šířka maxima  $\Gamma$  je spojena s dobou života  $\tau$  částice přes Heisenbergův princip neurčitosti:  $\tau \sim \hbar/\Gamma$ . Definuje také neurčitost v určení klidové hmotnosti částice. Výskyt rezonancí pro přesně dané hodnoty náboje, izospinu a dalších kvantových čísel  $\rightarrow$  částice.



**Průběh rezonance s  $M_0 = 10$  a  $\Gamma = 3$  na konstantním pozadí účinného průřezu 1.0**

Podle kvantových čísel → rezonance baryonové (nukleonové, hyperonové) a mezonové (nepodivné a podivné)

Podstata rezonancí – velmi často excitované stavy hadronů.

Krátká doba života → rozpad silnou interakcí.

Celkově je známo několik stovek rezonancí.

Příklady rezonancí (jen pár s podivností  $S = 0$ ):

**Baryonové rezonance:**

$N^+$ ,  $N^0$  – excitované stavy nukleonů (struktura uud a udd) – izospin  $I = 1/2$ , podivnost  $S = 0$

$\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$  -  $\Delta$  baryony a jejich excitované stavy (struktura uuu, uud, udd a ddd),  $I = 3/2$ ,  $S = 0$

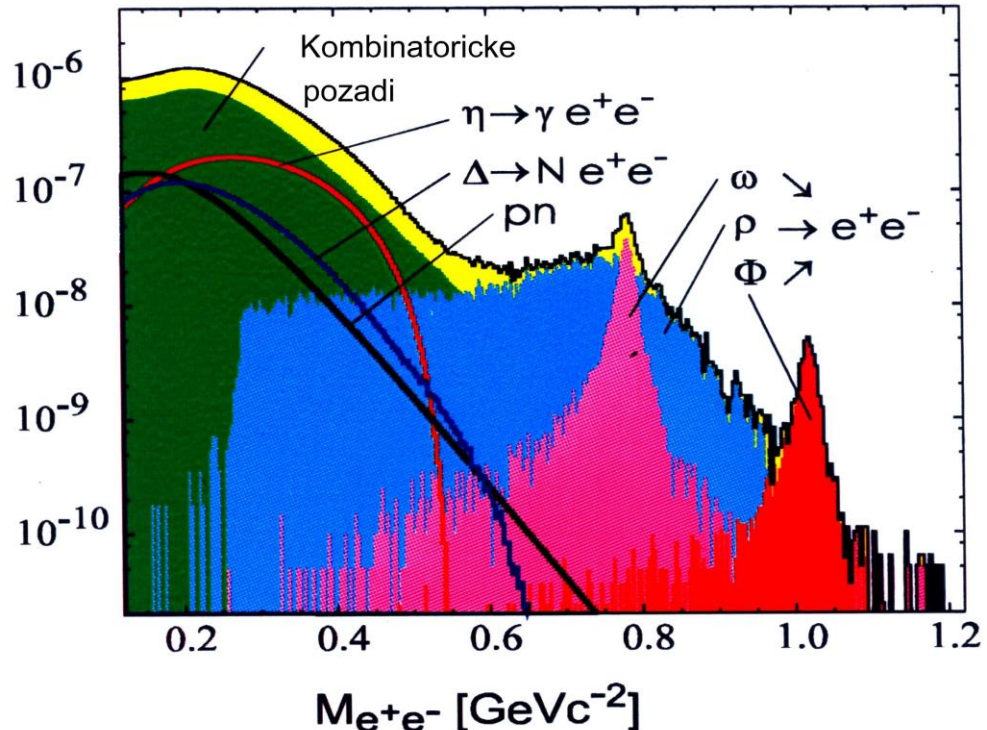
**Mezonové rezonance:**

$\rho$  mezon a jeho vzbuzené stavy

$\eta$  – vzbuzené stavy  $\eta$  mezonu

**Experimentální problémy** – pozadí, překrývání rezonancí, dlouhé poločasy rozpadu (rozšíření rezonance odezvou měřícího přístroje), velmi krátké poločasy rozpadu → velmi široké rezonance.

## Au + Au E = 1 AGeV



Simulace pozorování mezonových rezonancí spektrometrem HADES

## Struktura hadronů

Na strukturu hadronů ukazují:

- 1) **Rozptylové experimenty** – rozložení náboje pomocí vysokoenergetických elektronů (neinteragují silně) → partonová struktura
- 2) **Anomální magnetické momenty nukleonů** –  $\mu_p = 2.792 \mu_N$ ,  $\mu_n = -1.913 \mu_N$
- 3) **Excitované stavy hadronů** (nukleonů) – protonu ( $N^+$ ), neutronu ( $N^0$ ) – patří k rezonancím – různý orbitální moment konstituentů
- 4) **Systematika elementárních částic** – rozdělení do izospinových multipletů (hmotnosti částic v izospinovém multipletu velmi blízké)

Částice multipletu se rozmisťují v rovině charakterizované izospinem a hypernábojem

**Mezonový oktet:**

<b>Dublet ká (Izospin = 1/2)</b>	$K^0$	$K^+$	$S = 1$
<b>Triplet pí (Izospin = 1)</b>	$\pi^-$	$\pi^0$	$\pi^+$ $S = 0$
<b>Dublet antiká (Izospin = 1/2)</b>	$K^-$	$\bar{K}^0$	$S = -1$
<b>Singlet éta (Izospin = 0)</b>	$\eta$		$S = 0$
<b>&amp;nbsp; I<sub>z</sub> = - 1 -1/2 0 +1/2 1</b>			

**Baryonový oktet:**

<b>Dublet nukleonů (Izospin = 1/2)</b>	$n$	$p^+$	$S = 0$
<b>Triplet sigma (Izospin = 1)</b>	$\Sigma^-$	$\Sigma^0$	$\Sigma^+$ $S = -1$
<b>Dublet ksí (Izospin = 1/2)</b>	$\Xi^-$	$\Xi^0$	$S = -2$
<b>Singlet lambda (Izospin = 0)</b>	$\Lambda$		$S = -1$

Vysvětlení pomocí existence tří částic – **kvarků** (vlastně šesti – tři kvarků a tři antikvarků), ze kterých se elementární částice skládají.

**Zvláštní vlastnosti: zlomkové náboje, nevyskytují se volně.**

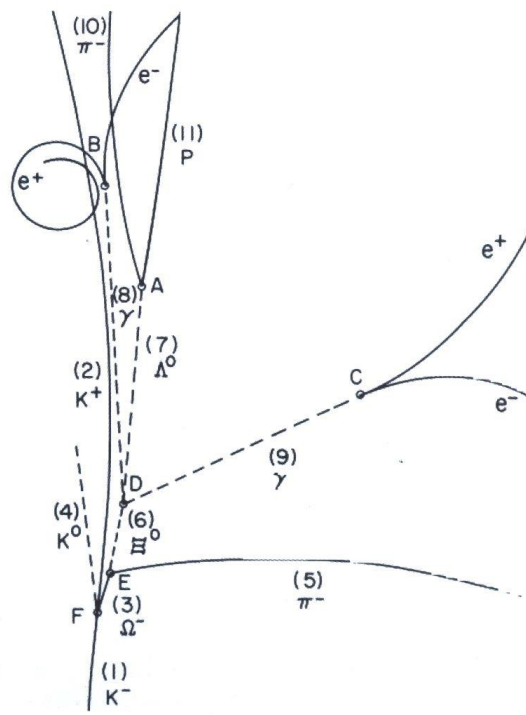
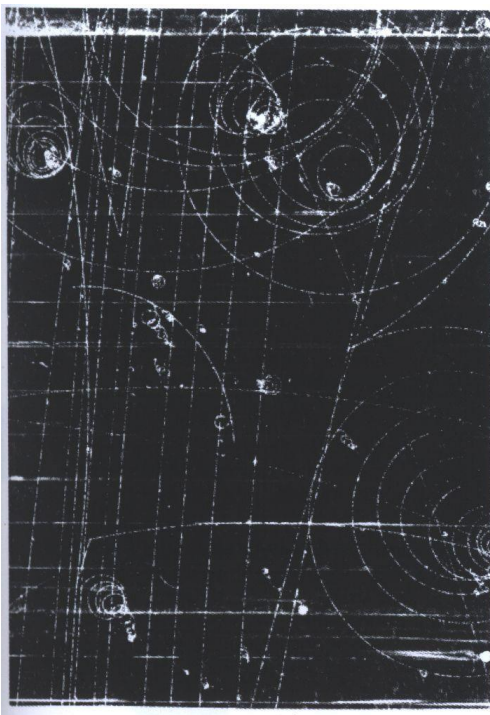
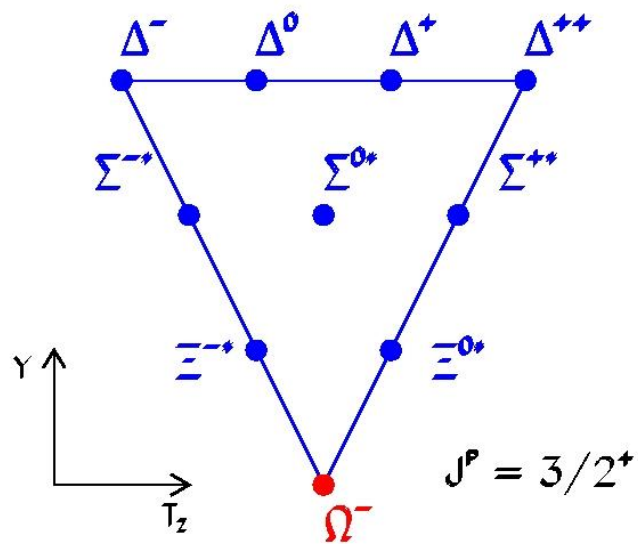
**Kvarková struktura hadronů**

**Baryony** → tři kvarky:  $n = udd$ ,  $p = uud$ ,  $\Sigma^+ = uus$ ,  $\Sigma^0 = uds$ ,  $\Lambda = uds$ ,  $\Omega^- = sss$  ( $\Sigma^0$ ,  $\Lambda$  se liší izospinem)

**Mezony** → kvark – antikvark:

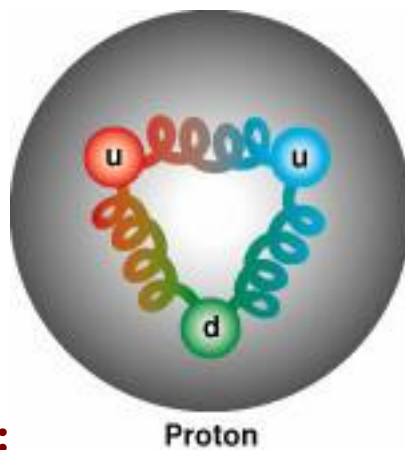
$$\pi^- = d\bar{u}, \quad \pi^+ = u\bar{d}, \quad K^- = s\bar{u}$$

**Baryonový deкупlet (rezonance):**



Objev částice  $\Omega^-$  pomocí bublinové komory v laboratoři v Brookhavenu

Totožné kvarky (fermiony) v základním stavu – Pauliho vylučovací princip → nutnost dalšího kvantového čísla – **barva** – kvantová chromodynamika (QCD)



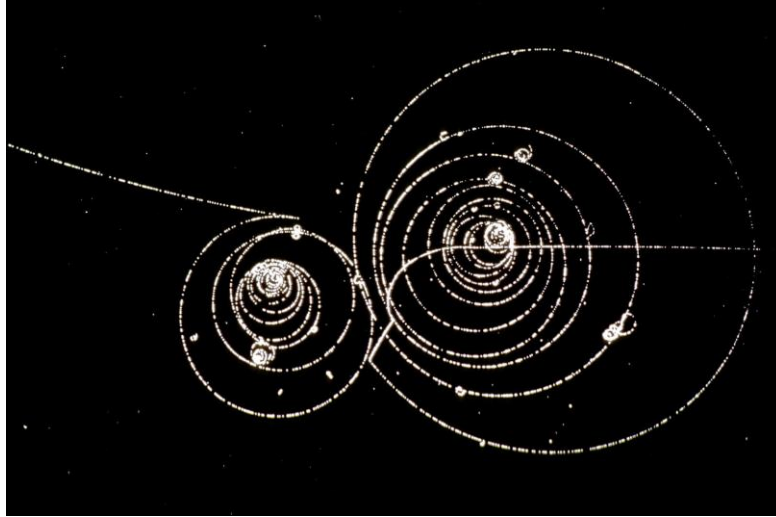
### Kvarková struktura protonu:

Barevné kvarky držené pohromadě silnou interakcí (výměnou bezbarvých gluonů)

Další částice → tři nové kvarky – nová kvantová čísla

### Přehled kvarků

Kvark	Q [e]	I(J <sup>P</sup> )	I <sub>z</sub>	S	C	B	T
u	+2/3	1/2(1/2 <sup>+</sup> )	+1/2	0	0	0	0
d	-1/3	1/2(1/2 <sup>+</sup> )	-1/2	0	0	0	0
s	-1/3	0(1/2 <sup>+</sup> )	0	-1	0	0	0
c	+2/3	0(1/2 <sup>+</sup> )	0	0	+1	0	0
b	-1/3	0(1/2 <sup>+</sup> )	0	0	0	-1	0
t	+2/3	0(1/2 <sup>+</sup> )	0	0	0	0	+1



Snímek vzniku a rozpadu  $K^+$  mezonu za letu pořízený pomocí bublinové komory v CERNu

## Částice standardního modelu

Naše poznání struktury hmoty a interakcí zatím vyvrcholilo ve standardním modelu. Standardní model zahrnuje všechny známé fundamentální částice:

1. Částice hmoty – kvarky a leptony
2. Částice interakcí – intermediální bozony (gluony,  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , foton a Higgsův bozon)

Při dostupných energiích se projevují jako bodové částice.

**Tři rodiny leptonů:**

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

**Tři rodiny kvarků v různých barvách:**

$$\begin{pmatrix} u^a \\ d^a \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} s^a \\ c^a \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} b^a \\ t^a \end{pmatrix}$$

Kde  $a$  = červená, zelená, modrá

**Kvarky pouze vázané v bezbarvých hadronech. Lze je přímo pozorovat:**

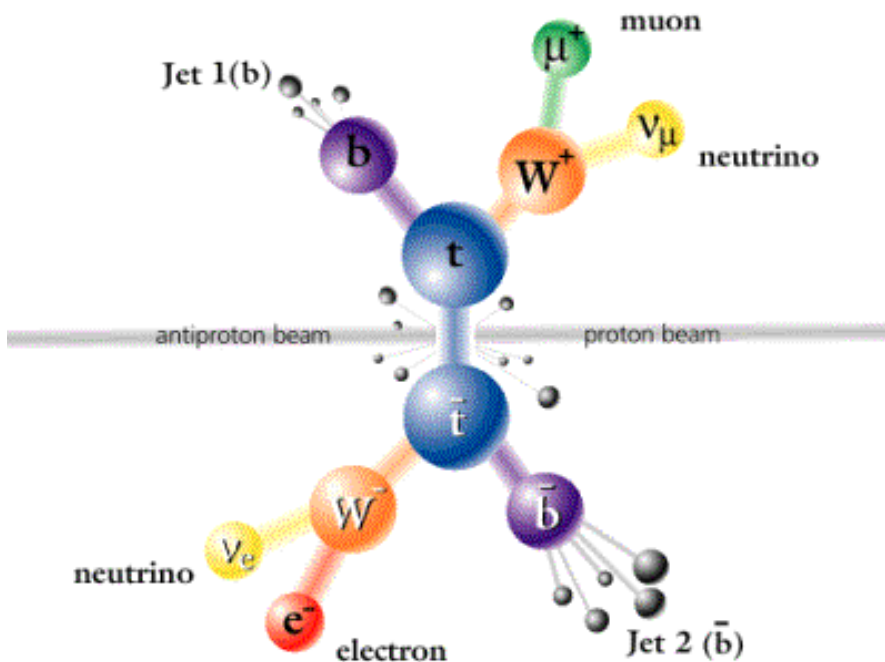
1. V rozptylu elektronů s vysokou energií na hadronech (u,d)



## 2. Jako hadronové spršky při vysokoenergetických srážkách –přeměna (“rozpad”) a hadronizace kvarků c, b a t

V minulých letech dovršeno hledání částic standardního modelu:

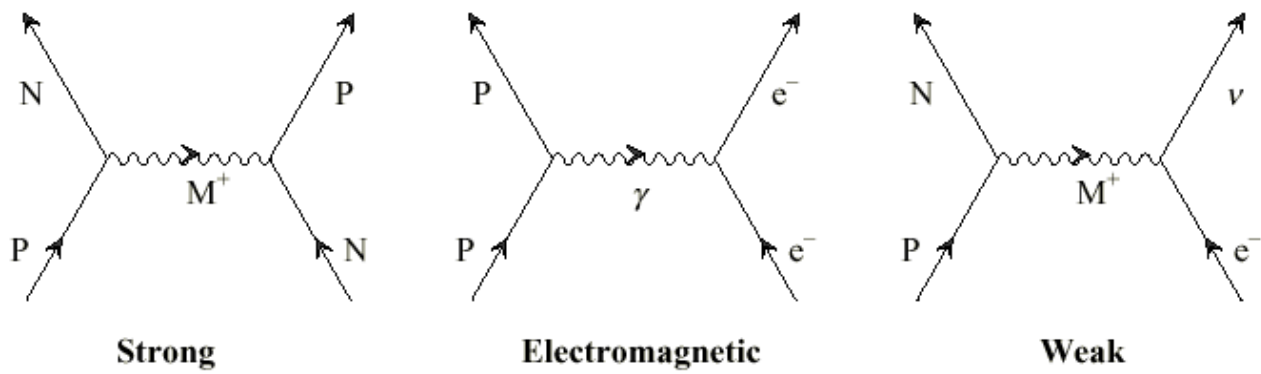
1. Produkce a pozorování kvarku t (podobě t, anti-t páru) – v r. 1995 Fermilab USA (experimenty CDF a D0 na urychlovači Tevatron se vstřícnými svazky p, anti-p -  $\sqrt{s} = 1.7 \text{ TeV}$ ), poslední hodnoty  $m_t = (176 \pm 7) \text{ GeV}/c^2$
2. Pozorování neutrína  $\nu_\tau$  – v r. 2000 Fermilab USA (experiment E872 - DONUT)
3. Evidence existence Higgsova bosonu – v r. 2000 LEP CERN Švýcarsko (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL), hmotnost  $115 \text{ GeV}/c^2$  zatím ne úplně nesporné prokázání – otázka pozadí a statistické průkaznosti efektu nad pozadím



**Schematický náčrt produkce páru top-kvarku a antikvarku při srážce protonu a antiprotonu. V ukázaném případě se W bozony rozpadají na leptony. Vzniklé kvarky produkují spršky (jety). První produkce a pozorování top kvarku se uskutečnilo ve Fermilabu (USA).**

asi od Wagnera

...-



Mesons

	$K^0(d\bar{s})$	$K^+(u\bar{s})$	Kaons		
	$\pi^-(d\bar{u})$	$\pi^0 / \eta^0(u\bar{u}/d\bar{d})$	$\eta'^0(ss)$	$\pi^+(u\bar{d})$	Pions & Etas
0 spin	$K^-(s\bar{u})$	$\bar{K}^0(s\bar{d})$	Kaon/Anti-Kaon		
	$K^{*0}(d\bar{s})$	$K^{*+}(u\bar{s})$	Star Kaons		
	$\rho^-(d\bar{u})$	$\rho^0 / \omega^0(u\bar{u}/d\bar{d})$	$\phi^0(ss)$	$\rho^+(u\bar{d})$	Rhos, Omega Meson, Phi
1 spin	$K^{*-}(s\bar{u})$	$\bar{K}^{*0}(s\bar{d})$	Star Kaon/Anti-Kaon		