

Myslím si, že za jistých okolností může být tradiční představa hmoty dost matoucí. Pokud je jí člověk příliš fascinován, dělá mu pak potíže některé věci pochopit.

Jakkoliv nejsem fyzik, myslím, že přesně rozumím tomu, co myslíte tím průřezem oscilací energetických kvant do prostoru.

Moje představa je totiž skoro stejná, i když ji vyjadřuji jiným jazykem. Jsem programátor a obvykle si vesmír představuji jako program. Částice pak jsou balíky informace (jako datové objekty v programu).

Z této představy vyplývá, že částice nejenom mohou být ve dvou stavech současně, ale že každé energetické kvantum je současně v celém vesmíru, přesněji v celém prostorocas. A že se pak jeho energie (informace) realizuje stretem s jedinou světlocitlivou částicí na fotografické desce, takže vidíme jeden světelný bod, není s touto představou vůbec v rozporu.

Je to jako když máte datový objekt s metodami `getPosition` a `getVelocity`. Objekt je v programu všude, ale k jeho datům se dostanete jenom určeným způsobem. A tyto přístupové funkce vrací výsledky vlnové funkce a berou přitom v úvahu celý prostorocas. Asi jako Feynmanovy součty přes trajektorie, až na to, že podle programátorského modelu se částice vůbec nepohybuje. A taky mění stav objektu. :-)

Zejména pro programátora může být tato představa tak intuitivní, že na vlnovečasticovém dualismu nevidí nic divného a skoro se diví, že se tomu někdo diví.

: Myslím si, že za jistých okolností může být tradiční představa hmoty dost matoucí. Pokud je jí člověk příliš fascinován, dělá mu pak potíže některé věci pochopit.

: Jakkoliv nejsem fyzik, myslím, že přesně rozumím tomu, co myslíte tím průřezem oscilací energetických kvant do prostoru.

: Moje představa je totiž skoro stejná, i když ji vyjadřuji jiným jazykem. Jsem programátor a obvykle si vesmír představuji jako program. Částice pak jsou balíky informace (jako datové objekty v programu).

: Z této představy vyplývá, že částice nejenom mohou být ve dvou stavech současně, ale že každé energetické kvantum je současně v celém vesmíru, přesněji v celém prostorocas. A že se pak jeho energie (informace) realizuje stretem s jedinou světlocitlivou částicí na fotografické desce, takže vidíme jeden světelný bod, není s touto představou vůbec v rozporu.

: Je to jako když máte datový objekt s metodami `getPosition` a `getVelocity`. Objekt je v programu všude, ale k jeho datům se dostanete jenom určeným způsobem. A tyto přístupové funkce vrací výsledky vlnové funkce a berou přitom v úvahu celý prostorocas. Asi jako Feynmanovy součty přes trajektorie, až na to, že podle programátorského modelu se částice vůbec nepohybuje. A taky mění stav objektu. :-)

: Zejména pro programátora může být tato představa tak intuitivní, že na vlnovečasticovém dualismu nevidí nic divného a skoro se diví, že se tomu někdo diví.

---

---

## 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  $\approx 1\text{fm}$

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:

$$p \rightarrow \bar{p}, \quad n \rightarrow \bar{n}, \quad \Lambda \rightarrow \bar{\Lambda}, \quad s'_e \rightarrow \bar{s}'_e$$

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

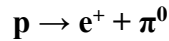
### Zákony zachování kvantových čísel

Neexistence některých reakcí energeticky (kinematicky) možných  $\rightarrow$  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**

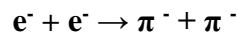
**Baryonové číslo: pokud platí zákon jeho zachování striktně je proton (nejlehčí baryon) stabilní. Nebyl zatím pozorován rozpad:**



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

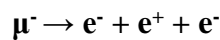
**Nutnost zavedení zákona zachování leptonového čísla vyplývá z řady experimentálních faktů:**

**Nepozorování reakce:**

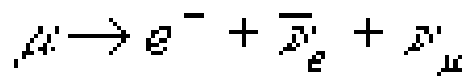


**Zákon zachování jednotlivých leptonových čísel:**

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



**Existující rozpad mionu:**



**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

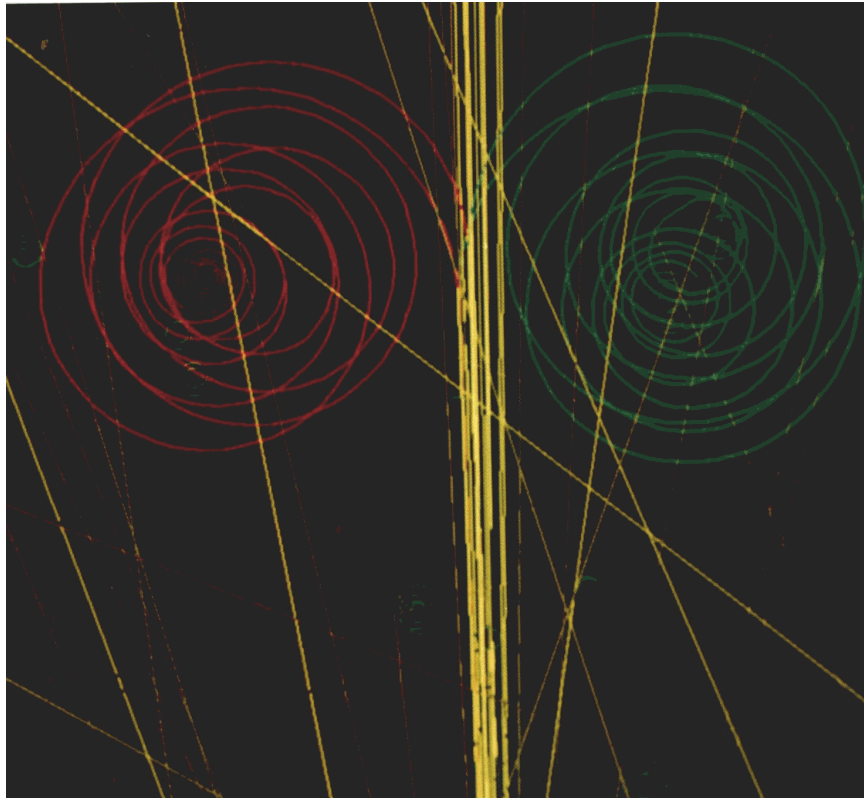
Existence elektronu a pozitronu. Podobně i pro další fermiony.

**Objev první antičástice:**

1932 - pozitron v kosmickém záření

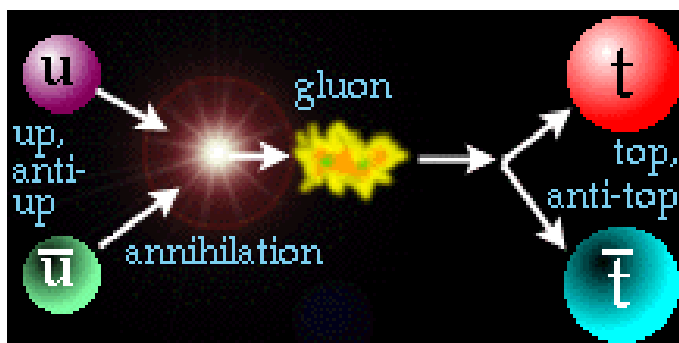
1955 – antiproton (BEVATRON)

1956 - antineutron

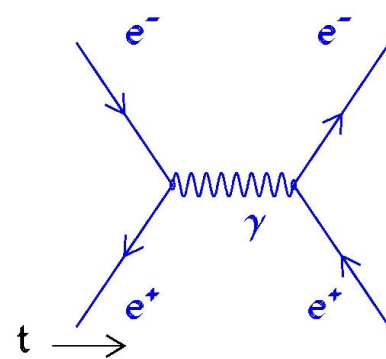


Simulace kreace elektron pozitronového páru při pohybu záření gamma v elmg poli. Pohyb vzniklých částic v magnetickém poli

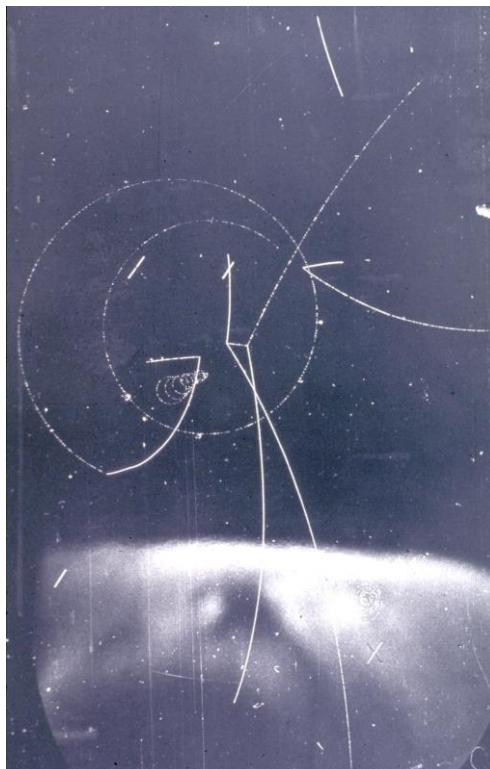
Setkání částice a antičástice → **anihilace**



Anihilace a kreace kvarků



Anihilace a kreace leptonů



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:  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$**

$$\Sigma^0 = \Lambda^0 + \gamma + \gamma^-$$

<b>S = -1 -1 0</b>				
$x^4 \cdot t^1$	=	$x^4 \cdot t^1$	$x^2 \cdot t^3$	$x^2 \cdot t^2$
$x^1 \cdot t^3$		$x^1 \cdot t^3$	$x^2 \cdot t^2$	$x^2 \cdot t^3$
				9 9
				9 9

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

$$\Sigma^+ = p^+ + \gamma + \nu_{\tau}^-$$

<b>S = -1 0 0</b>				
$x^4 \cdot t^0$	=	$x^3 \cdot t^0$	$x^2 \cdot t^3$	$x^0 \cdot t^1$
$x^1 \cdot t^2$		$x^0 \cdot t^2$	$x^2 \cdot t^2$	$x^0 \cdot t^2$
				6 6
				6 6



**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 :**

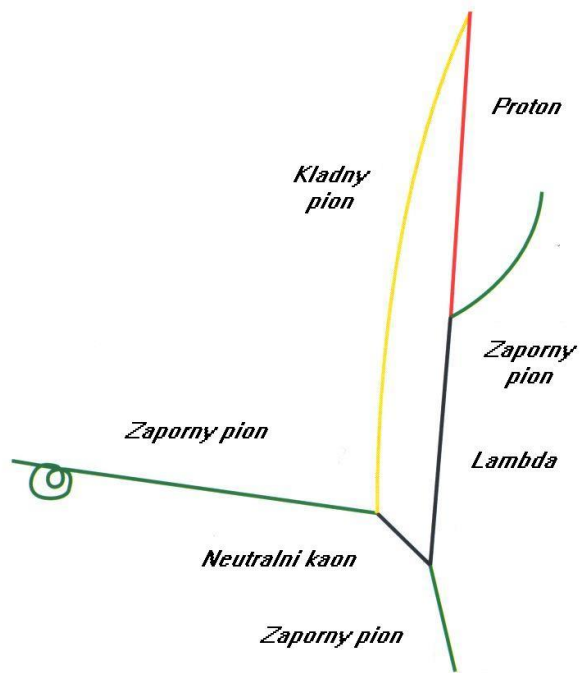
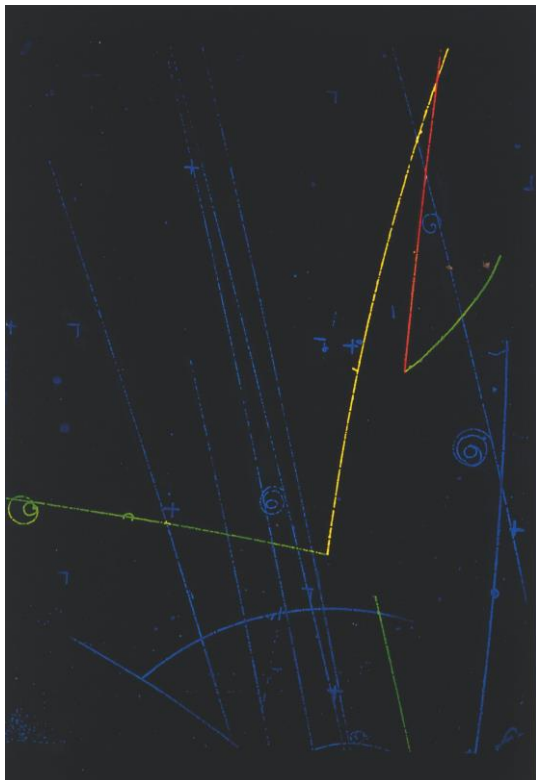
$$Q = e(I_z + Y/2) = e(I_z + (B+S)/2)$$

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

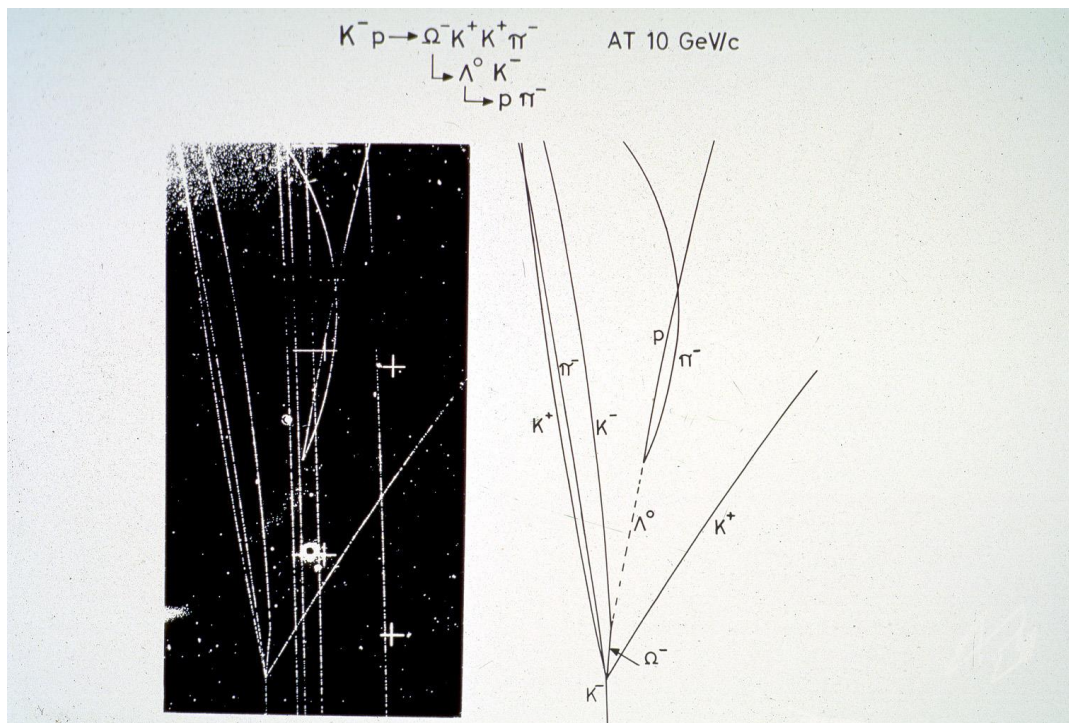
**Nepozorování reakcí:  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$**

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





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

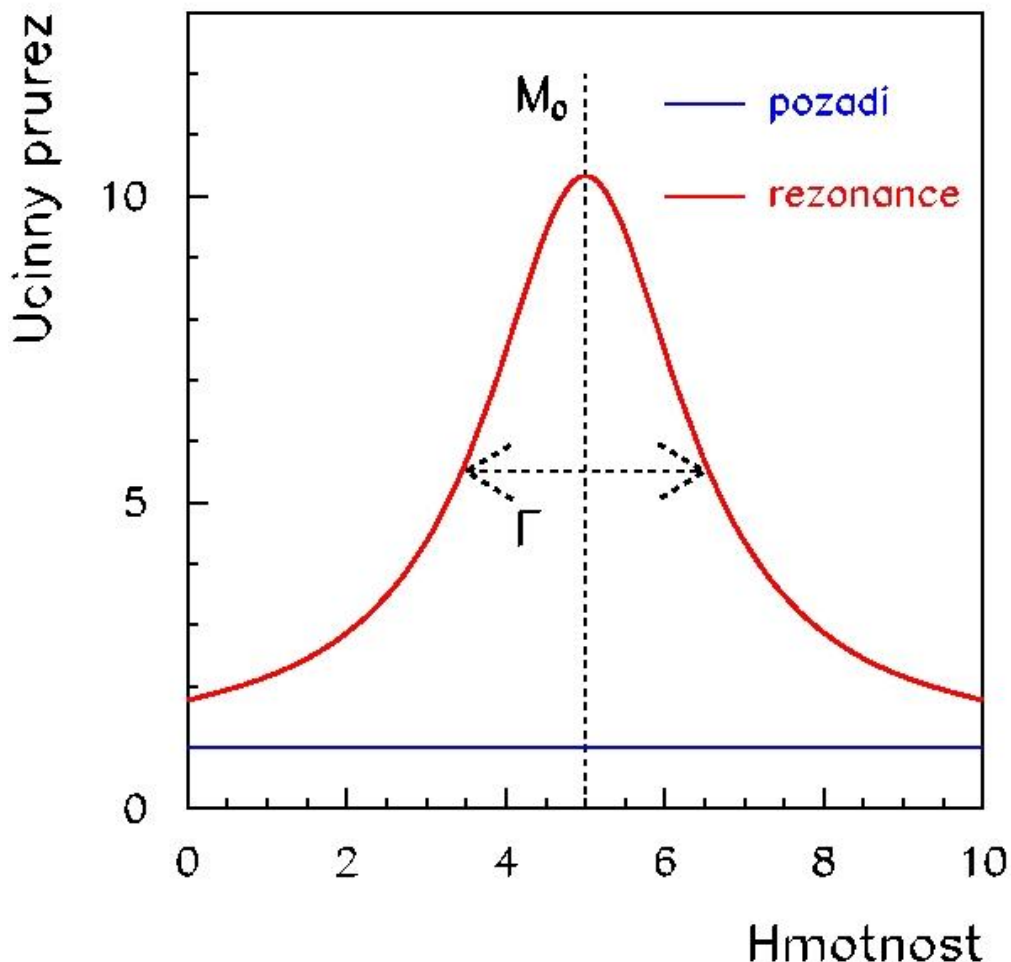
(studují se rezonanční struktury v závislosti účinného průřezu na invariantní hmotnosti rozptylující se soustavy nebo systému produkovaných částic –

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

Výskyt rezonančních maxim ve tvaru Breit-Wignerovi funkce.

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

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  $\rightarrow$  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  $S = 0$

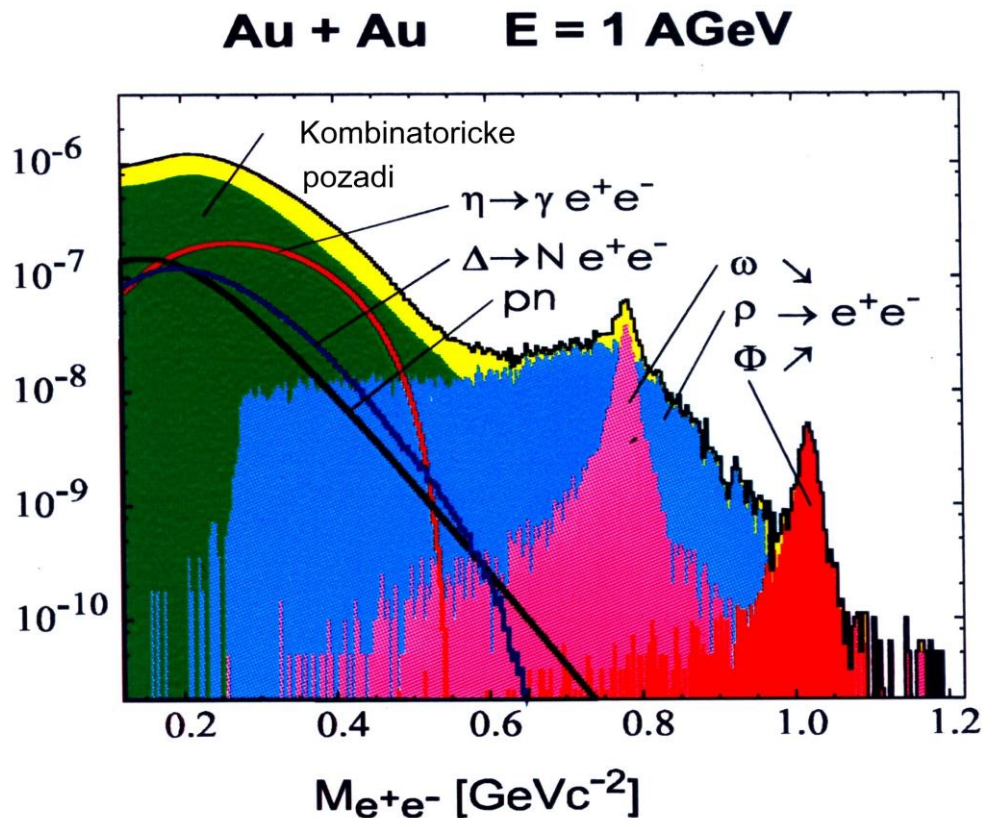
$\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$  -  $\Delta$  baryony a jejich excitované stavy (struktura uuu, uud, udd a ddd),  $I = 3/2$ ,  $S = 0$

### Mezonové rezonance:

$\rho$  mezon a jeho vzbuzené stavy

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

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



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:**

Dublet ká (Izospin = 1/2)	$K^0$	$K^+$	$S = 1$
Triplet pí (Izospin = 1)	$\pi^-$	$\pi^0$	$\pi^+$ $S = 0$
Dublet antiká (Izospin = 1/2)	$K^-$	$\bar{K}^0$	$S = -1$
Singlet éta (Izospin = 0)	$\eta$		$S = 0$
&nbsp; &nbsp; &nbsp; $I_z = -1 \ -1/2 \ 0 \ +1/2 \ 1$			

**Baryonový oktet:**

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

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.

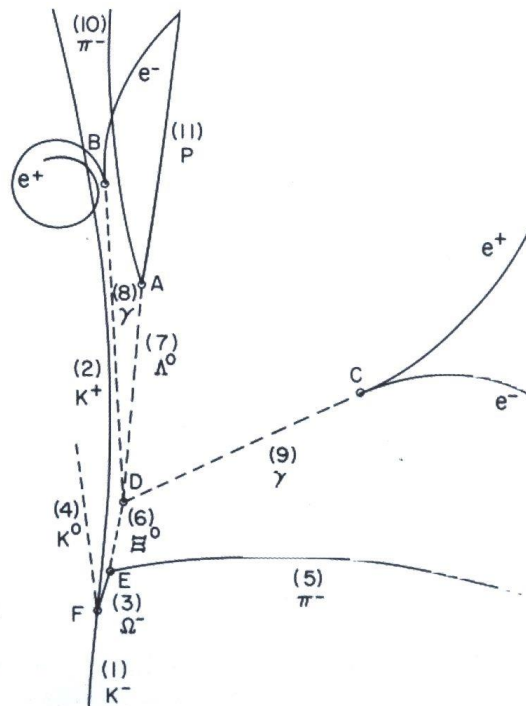
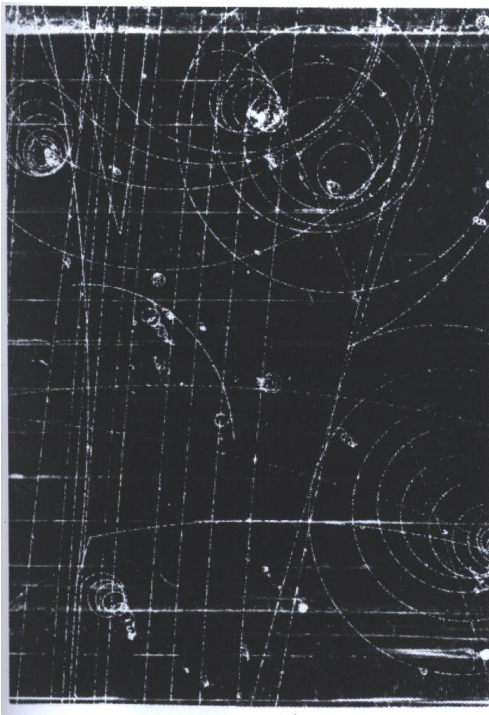
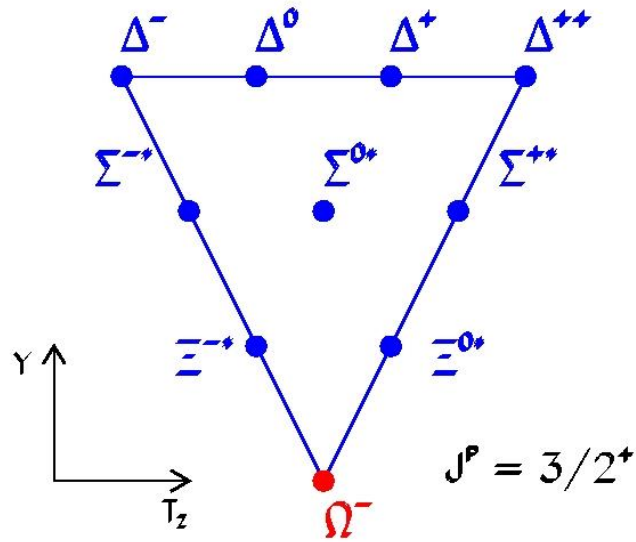
## Kvarková struktura hadronů

**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:

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

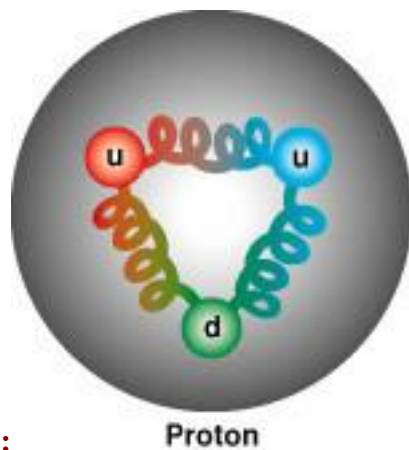
Baryonový dekuplet (rezonance):



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

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





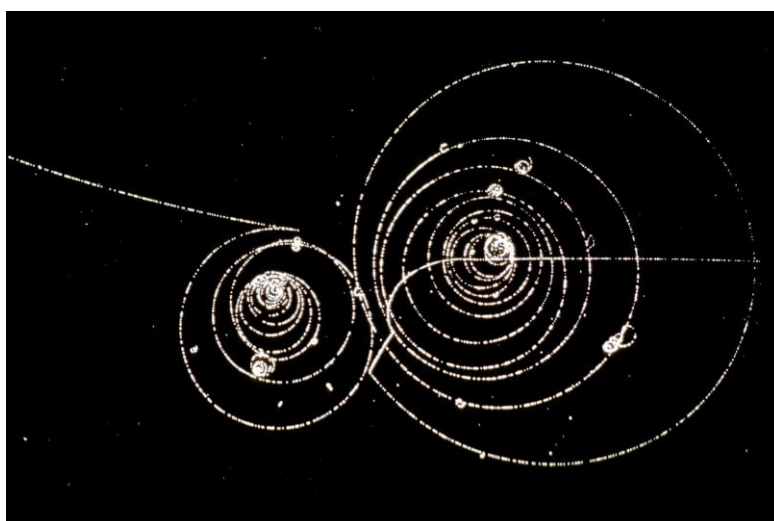
### Kvarková struktura protonu:

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<sup>+</sup> 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 Higgsov 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:**

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

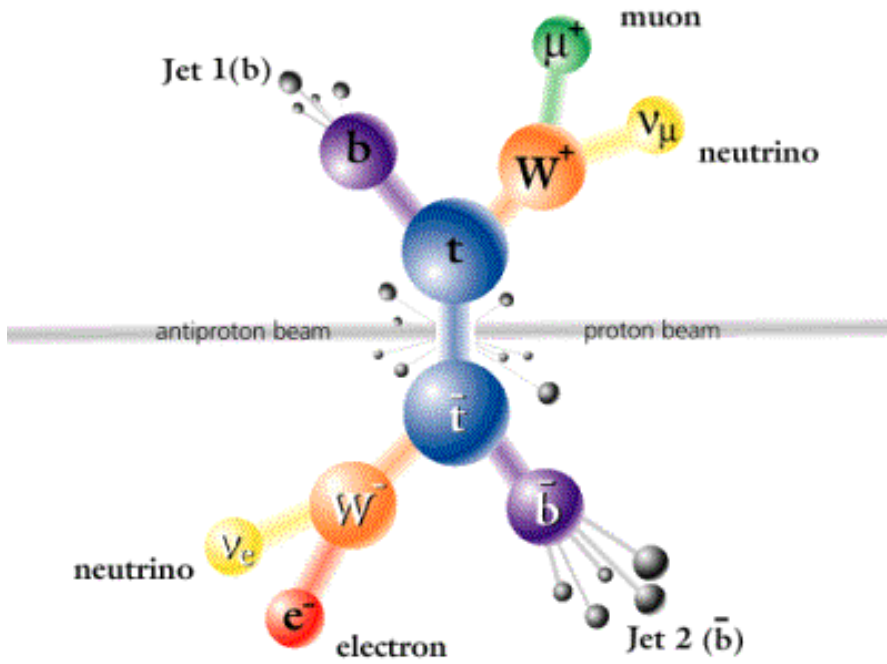
Kde  $a$  = červená, zelená, modrá

**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

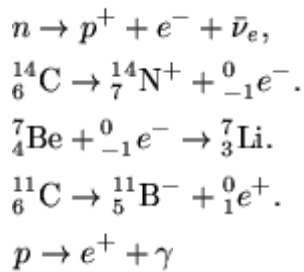
**V minulých letech dovršeno hledání částic standardního modelu:**

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 -  $\sqrt{s} = 1.7$  TeV), poslední hodnoty  $m_t = (176 \pm 7) \text{ GeV}/c^2$
2. Pozorování neutrina  $\nu_\tau$  – 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



\*\*\*\*\*

(13.11.2004 )



Figure 1: Kinematics lay for  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  and  $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$



Zweig:

## Quark model according to Zweig

**Both mesons and baryons are constructed from a set of three fundamental particles, called *aces*. Each ace carries baryon number 1/3 and is *fractionally charged*.**

***SU(3) is adopted as a higher symmetry for the strong interactions. Extensive space-time and group theoretic structure is then predicted for both mesons and baryons ...***

***An experimental search for the aces is suggested.***

Ace	Quark
● $\bar{p}_0$	u
▲ $m_0$	d
■ $\lambda_0$	s
◆	c

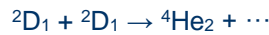


The forces binding constituents into hadrons were represented by strings.

For example, the eight baryons looked like:

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\text{▲} - \text{●}) \\
 n &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\text{▲} - \text{■}) \\
 \Lambda &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\text{▲} - \text{■} + \text{●} - \text{■}) \\
 \Sigma^0 &= \frac{1}{2} (\text{▲} + \text{●} - \text{■} - \text{■}) \\
 \Sigma^+ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\text{▲} - \text{■}) \\
 \Sigma^- &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\text{▲} - \text{■}) \\
 \Xi^0 &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\text{■} - \text{■}) \\
 \Xi^- &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\text{■} - \text{■})
 \end{aligned}$$

Proton a neutron jsou částice složené ze tří kvarků ( $p = uud$ ,  $n = ddu$ ). Při termojaderné reakci



se za normálních okolností uvolní energie v podobě fotonů, případně při vysoceenergetické srážce dvou deuteronů v urychlovači se objeví dvojice nabitých pionů  $\pi^+$  a  $\pi^-$ . Pokud dochází k narušení C symetrie, předpovídá kvantová teorie existenci velmi vzácného kanálu reakce, při kterém se objeví neutrální pion, který se následně rozpadá na dva charakteristické fotony:

