

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 ≈ 1 fm

Hadrony se dělí na:

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

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

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 \rightarrow indikace existence zákonů zachování

Neexistují reakce, ve kterých by se celkový náboj nezachovával \rightarrow zákon zachování náboje

Počet fermionů se zachovává \rightarrow 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_μ a L_τ

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

Nepozorování reakce:

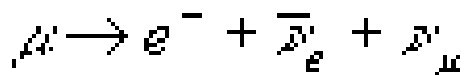
$$e^- + e^- \rightarrow \pi^- + \pi^-$$

Zákon zachování jednotlivých leptonových čísel:

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

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

Existující rozpad mionu:



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.

Velký třesk – nejteplejší a nejhustější hmota

Dominující síla ve vesmírných měřítcích – gravitace:

Popis vesmíru rovnicemi vycházejícími z obecné teorie relativity → dynamické modely vesmíru (A. Friedman) → rozpínání → v minulosti velmi vysoká hustota a teplota

Důkazy existence období horkého a hustého vesmíru:

1. **Rozpínání vesmíru** - pozorování vzdalování galaxií odpovídající Hubblovu zákonu $v = H \cdot r$. Hubblova konstanta H se mění v čase (dnes $H_0 = 65 \pm 5 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$). Rozpínání → rudý posuv fotonů v průběhu času.

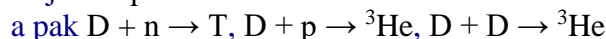
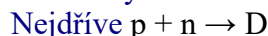
Vesmír:	Koeficient křivosti:
otevřený	$k = -1$
plochý	$k = 0$
uzavřený	$k = +1$

2.

3. **Reliktní záření** – mikrovlnné záření s teplotou 2.7 K, izotropní – malé odchylky teploty odpovídají prvotním nehomogenitám Vznik při $T \approx 4000 \text{ K}$ (0.3 eV – energie ionizace atomu H) → $t \approx 400\,000$ let. Pokles teploty $T \sim R^{-1}$ (Energie fotonů klesá s rozpínáním $h\nu \sim R^{-1}$)

$$I_\lambda = \frac{2 \pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)}$$

1. **Premordiální nukleosyntéza** - vysvětlí pozorované množství hélia, deuteria a lithia – 23 % baryonové hmoty tvoří ^4He – může vznikat v reakcích přes mezistupeň D, T a ^3He :



$T < E_d/k \approx 10^{10} \text{ K}$ ($E_d = 2.2 \text{ MeV}$ energie disociace deuteronu)

$T < 1 \text{ MeV}$ – tvorba páru elektronu a pozitronu

Většina nukleosyntézy $T \approx 10^9 \text{ K} \rightarrow t \approx 200 \text{ s}$

Vývoj vesmíru předurčuje jeho hustota:

1. $\rho > \rho_0$ – rozpínání vesmíru vystřídá v budoucnu smršťování

2. $\rho = \rho_0$ – rozpínání se zastaví v $t \rightarrow$ nekonečno

3. $\rho < \rho_0$ – vesmír se bude stále rozpínat

ρ_0 – kritická hustota

Složení hmoty ve vesmíru:

1. Baryonová hmota 0.045(1)

2. Nebaryonová 0.30(10)

3. Energie vakua 0.8(2)

Důkazy pro existenci inflačního stádia:

1. Plochost vesmíru (blížkost jeho hustoty kritické)

2. Homogenita a izotropie reliktního záření

3. Nepozorování monopolů a jiných exotických struktur

4. Existence nehomogenit v rozložení hmoty – velkoškálová struktura vesmíru

Inflace – zvětšení rozměru v poměru 10^{30} – během fázového přechodu spojeného s oddělováním interakcí

Několik možných fázových přechodů:

1. Oddělení gravitace od ostatních interakcí

2. Oddělení silné interakce od elektroslabé

3. Oddělení elektromagnetické a slabé interakce

Problémy počátku vesmíru:

1. Problém singularity v hustotě, teplotě a rozměru

2. Proč jsou fyzikální parametry interakcí a částic nastaveny tak, že umožňují vznik života?

3. Co bylo před Velkým třeskem – vzniká čas se vznikem vesmíru?

Řešení:

1. Singularity v hustotě a rozměru v počátku by mohly odstranit strunové teorie

2. Antropický princip – nekonečný počet vesmírů s různými parametry

Cesta za standardní model – Velké sjednocení

Extrémní úspěšnost standardního modelu. Přesto existují důvody, proč jít za něj:

I. Velký počet parametrů ve standardním modelu (hmotnosti leptonů, kvarků intermediálních bozonů, Higgsů, různé parametry míchání)

II. Existence řady symetrií mezi částicemi a interakcemi standardního modelu (např. symetrie mezi rodinami kvarků a leptonů).

III. Nezahrnutí gravitace – čtvrté fundamentální interakce.

IV. Experimentální náznaky:

1) Existence baryonové asymetrie ve vesmíru

2) Náznaky existence oscilací neutrin

3) Existence nebaryonové temné hmoty ve vesmíru

Teorie velkého sjednocení

Zákonitosti nevysvětlené standardním modelem:

1) Původ kvantování elektrického náboje:

Kvantování momentu hybnosti v jednotkách $\hbar/2$ – plyne z vlastností grupy symetrií, které vedou na zákon zachování momentu hybnosti (jsou nekomutativní – neabelovské).

Kvantování náboje v jednotkách $e/3$ z vlastností grupy symetrií, které vedou na zachování náboje, neplyne (je komutativní).

V rámci standardního modelu zůstává původ kvantování elektrického náboje velkou záhadou.

2) Existence symetrie mezi rodinami kvarků a leptonů:

Ke každé leptonové rodině existuje rodina kvarků ve třech barvách.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} u^a \\ d^a \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} s^a \\ c^a \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} b^a \\ t^a \end{pmatrix}$$

Návrh jejich řešení v rámci velkého sjednocení:

Předpoklad A: grupy symetrií standardního modelu jsou částí vyšší nekomutativní grupy symetrií → zdroj kvantování elektrického náboje

Předpoklad B: jednotlivé kvarky různých barev a leptony v odpovídajících rodinách jsou jen různými stavy jedné částice (např. $u^{\text{červený}}$, $u^{\text{modrý}}$, $u^{\text{zelený}}$, ν_e nebo $d^{\text{červený}}$, $d^{\text{modrý}}$, $d^{\text{zelený}}$, e^-)

Uvedené předpoklady → slabá interakce mezi leptony zprostředkovaná W^\pm , Z_0 bozony a silná interakce mezi kvarky zprostředkovaná barevnými gluony jsou různé projevy jedné fundamentální interakce.

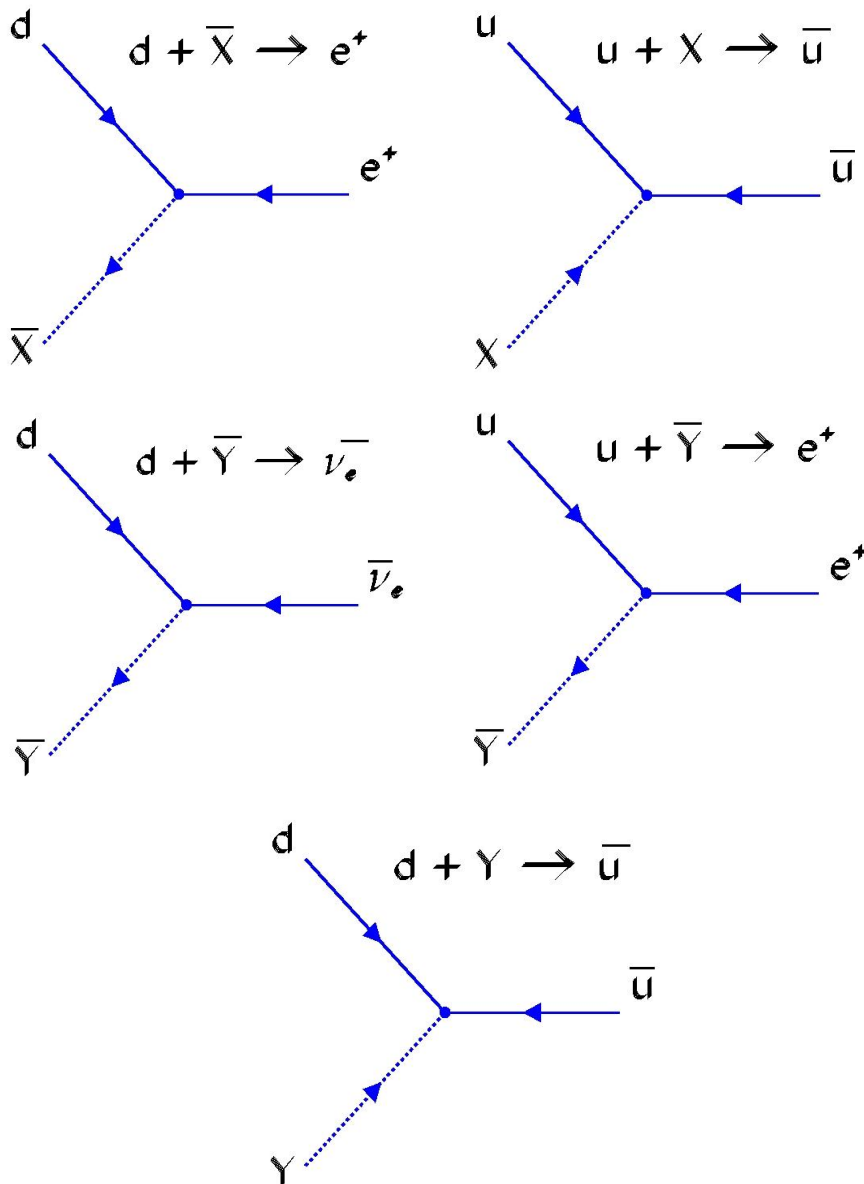
Síla interakce spojená s elektrickým nábojem roste s přeneseným impulsem (energií)

Síla interakce spojené s barevnými náboji klesá s přeneseným impulsem (energií)

→ při vysoké energii ($\sim 10^{15}$ GeV) vyrovnání velikosti těchto sil.

Teorie velkého sjednocení → hledání neabelovské grupy symetrií obsahující grupy standardního modelu, která sjednotí kvarky a leptony do jedné rodiny (multipletu).

Intermediální bozony zprostředkují přechod mezi částicemi → existují intermediální bosony, které převádí kvarky na leptony a naopak → X, Y bosony (leptokvarky) - $M_{X,Y} \approx 10^{15}$ GeV,



Feynmanovi vrcholy pro interakci leptokvarků, další dostaneme změnou částic za antičástice (obrácení šipek)

Náboje leptokvarků: $Q_X = -4/3e$ a $Q_Y = -1/3e$

Jejich přeměna jak na antilepton – antikvark, tak i na dvojici kvarků, diagramy výše nebo např:

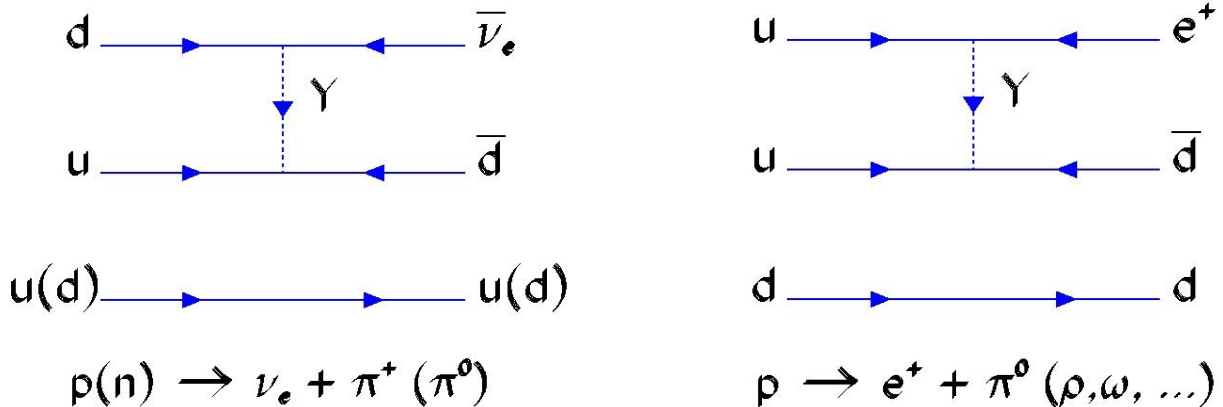
$$\bar{\nu}_e \bar{d} \leftrightarrow Y \leftrightarrow ud$$

$$e^+ \bar{d} \leftrightarrow X \leftrightarrow uu$$

→ nezachování baryonového a leptonových čísel → přeměna nukleonů na leptony → rozpad protonu: přes virtuální X, Y boson:

$$p = uud \rightarrow e^+$$

zákony zachování energie a hybnosti → vzniká více než jedna částice → rozpady typu $p \rightarrow e^+ \pi^0$, $p \rightarrow e^+ \pi^+ \pi^-$



Příklady Feynmanových diagramů rozpadu protonu a vázaného neutronu

Vysoká $M_{XY} \rightarrow$ dlouhá doba života protonu $\tau_p > 10^{31}$ let. Závisí na konkrétní podobě teorie (použité grupě symetrií). Experiment $\tau_p > 5 \cdot 10^{32}$ let.

Důsledky pro počátek vesmíru:

Inflace při rozdělení interakcí, baryonová asymetrie vesmíru

Rezonance

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

a) při rozptylu částic (např. π -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.

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

Šířka maxima Γ je spojena s dobou života τ 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 → částice.

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 $S = 0$

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

Mezonové rezonance:

ρ mezon a jeho vzbuzené stavy

η – vzbuzené stavy η mezonu

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

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)	π^-	π^0	π^+
		\bar{K}^0	$S = 0$
Dublet antiká (Izospin = 1/2)	K^-		$S = -1$
Singlet éta (Izospin = 0)	η		$S = 0$
 	$I_z = -1$	$-1/2$	0
	0	$+1/2$	1

Baryonový oktet:

Dublet nukleonů (Izospin = 1/2)	n	p^+	$S = 0$
Triplet sigma (Izospin = 1)	Σ^-	Σ^0	Σ^+
Dublet ksi (Izospin = 1/2)	Ξ^-	Ξ^0	$S = -2$
Singlet lambda (Izospin = 0)	Λ		$S = -1$

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.

Interakce a jejich charakter

Čtyři známé interakce:

Interakce	zprostředkující bozon	interakční konstanta	dosah
Gravitační	graviton	$2 \cdot 10^{-39}$	nekonečný
Slabá	W^+ W^- Z^0	$7 \cdot 10^{-14}$	10^{-18} m
Elektromagnetická	γ	$5 \cdot 10^{-3}$	nekonečný
Silná	8 gluonů	1	10^{-15} m

Síla interakce dána **interakční konstantou** – její velikost se mění s růstem hustoty energie

Různě pro různé interakce → vyrovnání interakčních konstant pro vysoké energie

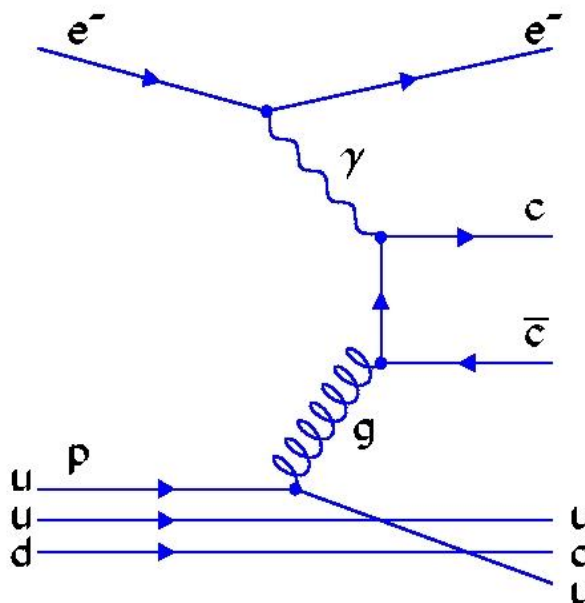
Vyrovnání interakčních konstant pro vysoké hustoty energie

Výměnný charakter interakcí:

Zprostředkující částice – intermediální bozony

Dosah interakce závisí na hmotnosti zprostředkující částice

Velikost interakční konstanty na jejich vlastnostech (i hmotnosti)



Příklad grafického znázornění výměnného charakteru interakce při nepružném rozptylu elektronu na protonu s kreací pávu pomocí Feynmanova diagramu

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 podivnosti (S)

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

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

$S = -2 \ 0 \ 0$

Hyperon (podivný barion) Ξ^- 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:

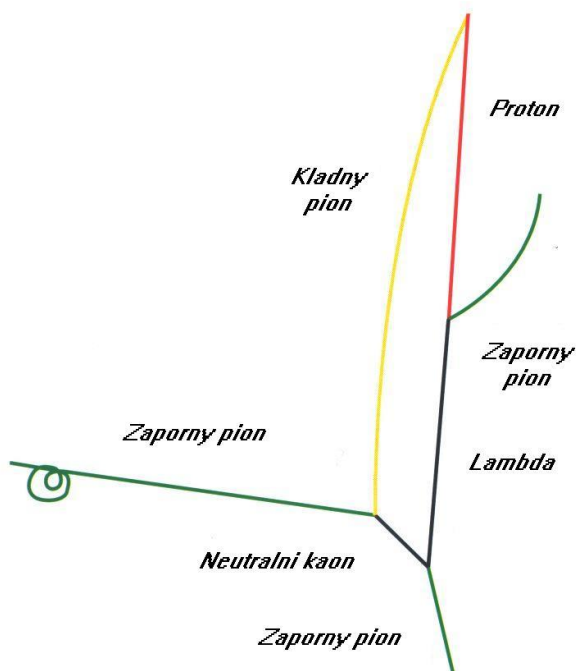
Nezávislost silné interakce na náboji. → proton a neutron jsou dva nábojové stavy jedné částice – nukleonu.

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 π^- s jádrem v bublinové komoře produkuje K^0 a Λ

Produkce Ω^- ($S=2$) částice – snímek bublinové komory v CERNU

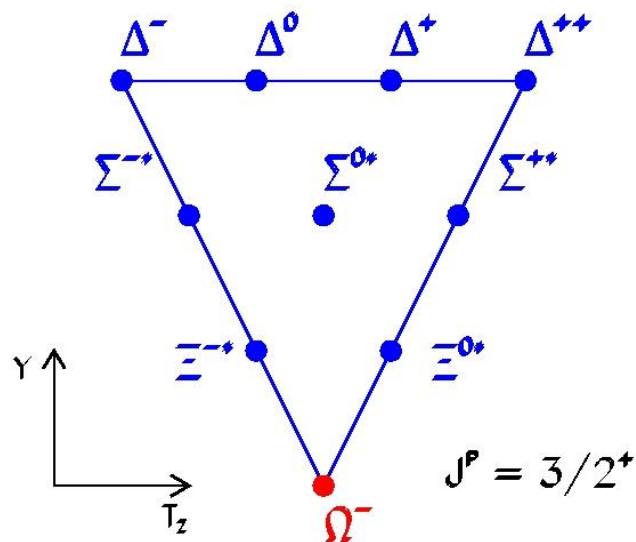
Kvarková struktura hadronů

Baryony → tři kvarky: $n = udd$, $p = uud$, $\Sigma^+ = uus$, $\Sigma^0 = uds$, $\Lambda = uds$, $\Omega^- = sss$ (Σ^0 , Λ 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 Ω^- 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 ^P)	I _z	S	C	B	T
u	+2/3	1/2(1/2 ⁺)	+1/2	0	0	0	0
d	-1/3	1/2(1/2 ⁺)	-1/2	0	0	0	0
s	-1/3	0(1/2 ⁺)	0	-1	0	0	0
c	+2/3	0(1/2 ⁺)	0	0	+1	0	0
b	-1/3	0(1/2 ⁺)	0	0	0	-1	0
t	+2/3	0(1/2 ⁺)	0	0	0	0	+1

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

m_0	klidová hmotnost - udána relativně vůči klidové hmotnosti elektronu $m_e = 9,109\ 534\ (47) \cdot 10^{-31}$ kg.
Q	elektrický náboj - udán relativně vůči elementárnímu náboji e .
J	spin - určuje počet možných orientací rotace částice v prostoru podle vztahu $N_{\text{rotace}} = 2J + 1$. Částice s J celistvým se nazývají bosony a mohou vznikat i zanikat jednotlivě. Částice s polocelstvým J jsou fermiony a vznikají nebo zanikají pouze v párech částice-antičástice.
B	baryonové číslo - pro baryony $B = +1$, pro antibaryony $B = -1$, pro ostatní částice $B = 0$.
N_L	leptonové číslo - pro leptony $N_L = +1$, pro antileptony $N_L = -1$, pro ostatní částice $N_L = 0$.
par	parita - vyjadřuje změnu vlnové funkce částice při zrcadlové změně souřadnic; + vlnová délka se nemění, - vlnová délka se mění; (např. v našem světě mají pravá i levá pneumatika automobilu paritu +, zatímco pravá a levá rukavice paritu -).
S	podivnost - pro běžné částice je $S = 0$; pro "podivné" hadrony chovající se při svém vzniku a rozpadu "nečekaně" je $S \neq 0$.
Y	hypernáboj - kvantové číslo definované vztahem: $Y = B + S$.
T	izospin - udává počet možných nábojových stavů hadronů podle vztahu: $N_{\text{náboj. stavů}} = 2T + 1$.
T_z	složka izospinu - kvantové číslo definované vztahem: $T_z = Q - Y / 2$.

Charakteristiky antičástic dostaneme, když ve sloupcích označených dole písmeny A změním znaménka na opačná; ostatní hodnoty jsou pro danou antičástici stejné jako pro částici. Antičástice k elektronu se nazývá [pozitron](#), v ostatních případech se užívá názvů částice s předponou anti-.

Charakteristiky kvarků

Názvy kvarků zároveň udávají jejich kvantovou charakteristiku nazývanou *vůně*. Pro každou z šesti uvedených vůní existují tři druhy kvarků lišící se kvantovou charakteristikou nazývanou *barva* (může být modrá, zelená nebo červená), která v tabulce není uváděna (pro každý kvark by byly další dvě řádky). *Půvab* C (od charm), *krása* B (od beauty) a *pravda* T (od truth) jsou další kvantové charakteristiky kvarků.

třída částic	kategorie	skupina	název částice	symbol	klidová hmotnost	spin	parita	elektrický náboj	baryonové číslo
				částice antičástice					
HADRONY	MEZONY	PIONY	mezon π^+	π^+ π^-	273,14	0	-	+1	
			mezon π^0	π^0 -	264,14	0	-	0	
		KAONY	mezon K^+	K^+ K^-	966,4	0	-	+1	
			mezon K^0	K^0 \bar{K}^0	974,1	0	-	0	
	BARYONY	NUKLEONY	proton	p p	1 836,15	1/2	+	+1	
			neutron	n n	1 838,68	1/2	+	0	
	HYPERONY	hyperon Λ	Λ^0 $\bar{\Lambda}^0$	2 183,15	1/2	+	0		

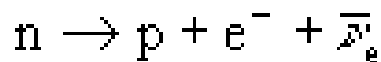
			hyperon E^+	E^+	E^+	2 327,6	1/2	+	+1	
			hyperon E^0	E^0	E^0	2 333,6	1/2	+	0	
			hyperon E^-	E^-	E^-	2 343,1	1/2	+	-1	
			hyperon Ξ^0	Ξ^0	Ξ^0	2 572,8	1/2	+	0	
			hyperon Ξ^-	Ξ^-	Ξ^-	2 585,6	1/2	+	-1	
			hyperon Ω	Ω^-	Ω^-	3 272,8	3/2	+	-1	
pro antičástice změnit:									A	

třída částic	název částice	symbol		klidová hmotnost m_0	spin J	elektrický náboj Q	baryonové číslo B	leptonové číslo N_L	podivnost S	hyperm Y
		částice	antičástice							
KVANTA POLÍ	foton	γ	-	0	1	0	0	0	0	0
	graviton ?	g	-	? 0	2	0	0	0	0	0
	gluon ?			? 0		0	0	0	0	0
LEPTONY	elektronové neutrino	ν_e	ν_e	$3 \cdot 10^{-5}$ až 10^{-4}	1/2	0	0	+1	0	0
	mionové neutrino	ν_μ	ν_μ	?	1/2	0	0	+1	0	0
	tau-neutrino ?	ν_τ	ν_τ	?	1/2	0	0	+1	0	0
	elektron	e^-	e^+	1	1/2	-1	0	+1	0	0
	mion	μ^-	μ^+	206,77	1/2	-1	0	+1	0	0
	tau	τ^-	τ^+	$\approx 3 490$	1/2	-1	0	+1	0	0
KVARKY	down (dolů)	d	d	607	1/2	-1/3	+1/3	0	0	+1/3
	up (nahoru)	u	u	607	1/2	+2/3	+1/3	0	0	+1/3
	side (stranou)	s	s	988	1/2	-1/3	+1/3	0	-1	-2/3
	charm (půvab)	c	c	2 935	1/2	+2/3	+1/3	0	0	+1/3

	bottom (spodek)	b	b	9 800 ?	1/2	-1/3	+1/3	0	0	+1/3
	top (svršek)	t	t	80 000 ?	1/2	+2/3	+1/3	0	0	+1/3
pro antičástice změnit:						A	A	A	A	A

Sjednocení elektromagnetické a slabé interakce (popis elektroslabé interakce)

Netvoří vázané stavy částic – projevuje se pouze rozpadem
Nejznámější projev slabé interakce – rozpad beta:



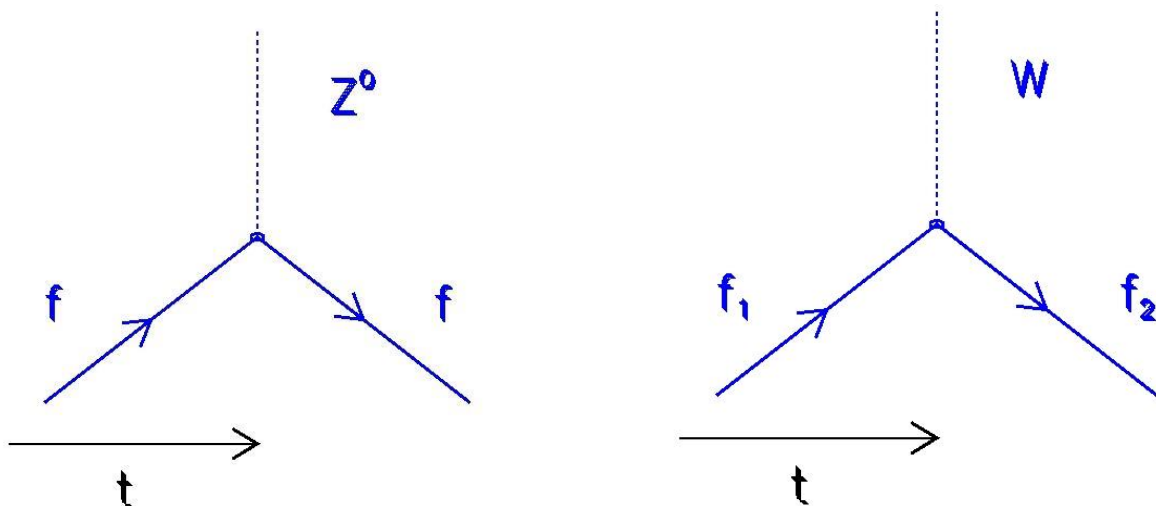
Velmi malá hodnota vazbové konstanty

Velmi krátký dosah 10^{-18} m

Představa zprostředkujících kalibračních bozonů → nalezení re-normalizovatelné teorie popisu slabé interakce podobná QED a QCD.

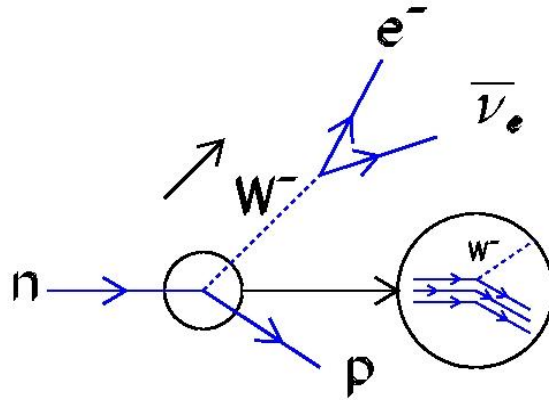
Slabá intenzita interakce a její krátký dosah dány velkou hmotností kalibračních bozonů

Popis pomocí Feynmanových diagramů:



Základní vrcholy slabé interakce

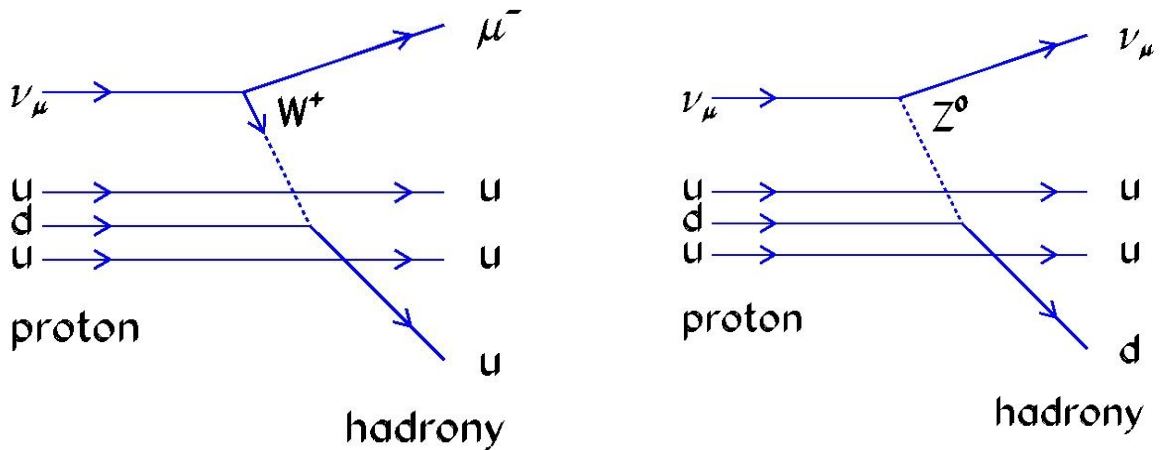
Feynmanův diagram rozpadu beta:



$$W^- = e^- + \bar{\nu}_e \quad \frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^2} = \frac{x^2 \cdot t^1}{x^2 \cdot t^2} \cdot \frac{x^0 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^0} \quad \begin{matrix} 4 & 4 \\ 4 & 4 \end{matrix}$$

$$n = p + W^- \quad \frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3} = \frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2} + \frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^2} \quad \begin{matrix} 5 & 5 \\ 5 & 5 \end{matrix}$$

Příklad Feynmanova diagramu pro neutrální a nabité proudy:



Potvrzení předpovědí této teorie elektroslabé interakce:

1. Existence kalibračních bozonů W^+ , W^- , Z^0 s hmotnostmi ~ 80 a 90 GeV
2. Existence neutrálních proudů způsobených Z^0 bozonem

Potvrzeno v CERNu

Nárůst hmotnosti způsobuje Higgsov mechanismu – existence Higgsova bozonu

Interakce neutrin – čistá slabá interakce

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 → 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:

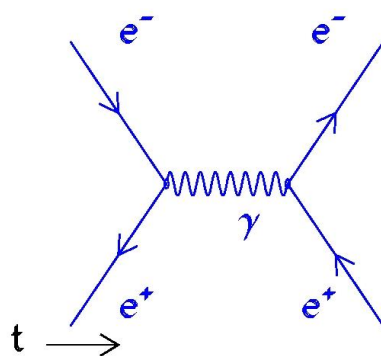
1932 - pozitron v kosmickém záření

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 π^+ :

Přehled fyzikálních veličin s pohledu vztahu částice a antičástice:

Veličina	částice	antičástice
Hmotnost m	stejná	stejná
Spin (velikost)	stejná	stejná
Doba života τ	stejná	stejná
Izospin (velikost)	stejná	stejná
Elektrický náboj	Q	$-Q$
Magnetický moment	μ	$-\mu$
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 $\mu=0 \rightarrow$ částice totožná s antičásticí

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

Setkání částice s antičásticí \rightarrow **anihilace** na fotony a mezony

Zákony zachování \rightarrow 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**. \rightarrow 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

.....-

Každému elektronu přísluší **vlastní moment hybnosti částice, který se nazývá spin**. Nejjednodušší znázornění spinu je založeno na představě, že částice je podobná kuličce a její spin je způsoben rotací kuličky kolem vlastní osy.