

Úvod

Interakce – pojem popisující možnost výměny energie a hybnosti nebo možnost kreace či anihilace částic

Znamé interakce:

- 1) Gravitační
- 2) Elektromagnetická
- 3) Silná
- 4) Slabá

Popis pomocí **pole** – skalární nebo vektorová proměnná, která je funkcí časoprostorových souřadnic, reprezentuje chování a vlastnosti částic a sil působících mezi nimi

Kvantový charakter interakcí – přenos energie a hybnosti v diskrétních kvantech

Výměnný charakter interakcí – způsobeny výměnou částic

Reálná částice – částice pro kterou platí:

$$E = +\sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Virtuální částice – přechodně existující částice, neplatí pro ní vztah (existují díky Heisenbergovu principu neurčitosti):

$$E = +\sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Hledání **jednotné teorie** popisu sil (interakcí)

Zahájeno Maxwellovou teorií elektromagnetického pole → sjednocení popisu elektrických a magnetických jevů

Velký význam symetrií: **kalibrační symetrie** – měřitelné důsledky existence silového pole se nemění při jistých změnách skalárního nebo vektorového potenciálu, který pole popisuje

Mikroskopický popis elektromagnetické interakce → kvantový popis = **kvantová elektrodynamika (QED)**

Jednotný popis elektromagnetické a slabé interakce – **elektroslabá interakce**

Silná interakce – **kvantová chromodynamika (QCD)**

Strunové teorie = hledaná jednotná teorie?

Symetrie

Symetrie – neměnnost některých vlastností při změně jiných → neměnnost (**invariance**) vůči jisté změně (**transformaci**)

1. Prostorčasové symetrie
2. Vnitřní symetrie
1. Přesné symetrie
2. Přibližné (narušené) symetrie
1. Spojité symetrie
2. Diskrétní symetrie

Vztah mezi symetriemi a zákony zachování (Teorém Noetherové)

A) Přesné symetrie:

1. Symetrie přírodních zákonů vůči **posunutí (translaci) v prostoru** – zákon zachování **hybnosti**.
2. Symetrie přírodních zákonů vůči **posunutí v čase** – zákon zachování **energie**.
3. Symetrie přírodních zákonů vůči **otočení (změně orientace) v prostoru** – zákon zachování **momentu hybnosti**
4. Symetrie přírodních zákonů vůči záměně znaménka náboje (symetrie v nábojovém prostoru) – zákon zachování náboje

B) Přibližné symetrie:

5. Symetrie přírodních zákonů vůči **zrcadlové inverzi** – zákon zachování **parity (P-symetrie)**

$$x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$$

6. Symetrie přírodních zákonů vůči **záměně částic za antičástice a naopak** – zákon zachování **C-symetrie**

$$Q \rightarrow -Q, B \rightarrow -B, L \rightarrow -L, S \rightarrow -S, \dots$$

7. Symetrie přírodních zákonů vůči **časové inverzi** – zákon zachování **T-symetrie** $t \rightarrow -t$.
Jejich kombinace:

8. Symetrie přírodních zákonů vůči současné zrcadlové inverzi a záměně částice za antičástici – zákon zachování **CP symetrie**

9. Symetrie přírodních zákonů vůči současné zrcadlové inverzi a záměně částice za antičástici a změně toku času – zákon zachování **CPT symetrie**

Co je důsledkem narušení symetrií:

Narušení P symetrie \rightarrow svět v zrcadle odlišitelný od světa

Narušení C symetrie \rightarrow antisvět odlišitelný od světa

Narušení T symetrie \rightarrow směr toku času není rovnocenný

Narušení CP symetrie \rightarrow antisvět v zrcadle je odlišitelný od světa

CPT teorem – CPT symetrická je každá teorie, která je invariantní vůči Lorentzově transformaci. Jeho důsledky:

1. Celočíslný spin \rightarrow Bose-Einsteinova statistika, poločíslný spin \rightarrow Fermi-Dirackova statistika
2. Totožnost hmotností a dob života částic a antičástic
3. Všechny vnitřní kvantová čísla jsou u antičástic opačná než u částic

Vnitřní symetrie v nábojových prostorech – zákony zachování izospinu, baryonového a leptonových čísel, podivnosti, půvabu, ...

Většinou jsou **přibližné** a zachovávají se jen pro **některé interakce**

Kalibrační symetrie – neměnnost vlastností při změně o jisté hodnoty v bodech prostoru.

1. **Globální transformace** – změna o stejnou hodnotu v každém bodě
2. **Lokální transformace** – změna o různé hodnoty v různých bodech

Požadavek dosažení kalibrační symetrie ve fyzice elementárních částic \rightarrow nutnost zavedení kompenzujících polí – popisují silové působení.

Kalibrační teorie zavádí interakce mezi částicemi a určují jejich vlastnosti

Narušení symetrií

Některé symetrie nejsou úplně přesné \rightarrow narušení symetrie \rightarrow porušení příslušného zákona zachování

Narušení izospinové symetrie (u elektromagnetických a slabých):

Příklad evidence: různost neutronů a protonů

Narušení P symetrie (parity):

1. v makrosvětě asymetrie existuje (srdce na levé straně – v zrcadle na pravé ...) – výsledek náhodných procesů
2. v mikrosvětě (obecné fyzikální zákonitosti) – striktní zachování

Evidence nezachování parity:

Důležitý vztah mezi hybnostmi (vektor) a momenty hybností (pseudovektor)

Transformace vektoru při zrcadlení:

$$\vec{r} \rightarrow \vec{r}' = -\vec{r}$$

$$\vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{dt} \rightarrow \vec{p}' = m \frac{-d\vec{r}}{dt} = -\vec{p}$$

Transformace pseudovektoru (axiálního vektoru) při zrcadlení:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \rightarrow \vec{L}' = \vec{r}' \times \vec{p}' = (-\vec{r}) \times (-\vec{p}) = \vec{L}$$

1. Rozpad mezonů K^+ a K^- :

Spiny mezonů: $I=0$, orbitální momenty soustav mezonů π : $l=0$

\rightarrow parita po rozpadu je dána vnitřními paritami mezonů π (jsou to pseudoskalary s paritou $\Pi(\pi^+) =$

$\Pi(\pi^-) = \Pi(\pi^0) = -1$)

Dva možné rozpady pro K^+ :

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \rightarrow \Pi = \Pi(\pi^+) \cdot \Pi(\pi^0) = 1$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \rightarrow \Pi = \Pi(\pi^+) \cdot \Pi(\pi^+) \cdot \Pi(\pi^-) = -1$$

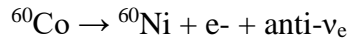
pro K^- :

$$K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 \rightarrow \Pi = \Pi(\pi^-) \cdot \Pi(\pi^0) = 1$$

$$K^- \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^- \rightarrow \Pi = \Pi(\pi^+) \cdot \Pi(\pi^-) \cdot \Pi(\pi^-) = -1$$

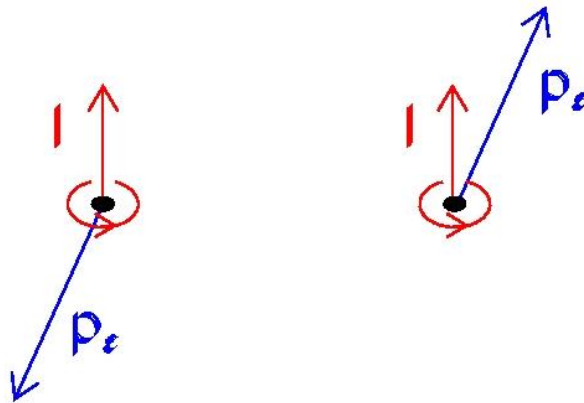
Protože $\Pi(K^+) = \Pi(K^-) = 1 \rightarrow$ rozpad na tři π nezachovává paritu

- Asymetrie směru výletu elektronů při rozpadu beta vůči směru spinu - poprvé pro ^{60}Co – C.S.Wu 1957:



rozpad ^{60}Co

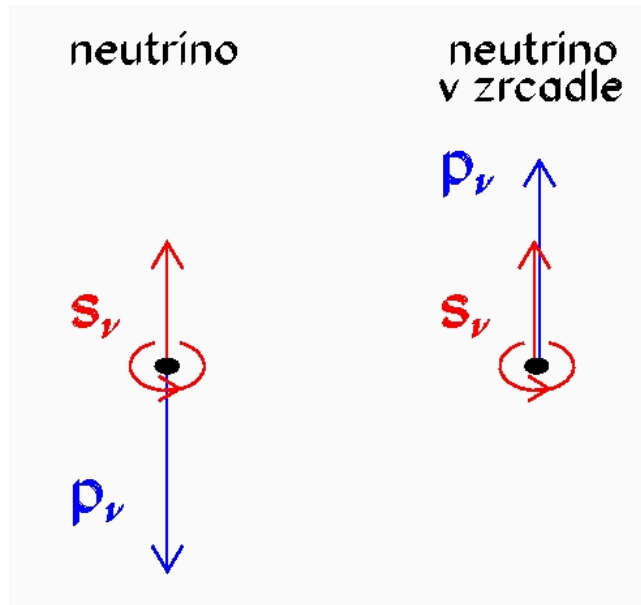
rozpad ^{60}Co
v zrcadle



Orientace spinu jádra a hybnosti elektronu v normálním světě a v zrcadlovém

Polarizace silným magnetickým polem \rightarrow zvýšená emise elektronů ve směru opačném ke směru magnetického pole (spinu)

- Existují pouze pravotočivá neutrína (helicita -1) a levotočivá antineutrína (helicita $+1$) \rightarrow pouze P transformace \rightarrow pravotočivé neutrino na levotočivé neutrino



Orientace spinu a hybnosti neutrína v normálním světě a v zrcadlovém

Projevuje se pouze u slabých interakcí \rightarrow velmi malé efekty \rightarrow svět v zrcadle se liší od světa jen velmi málo

Narušení C symetrie:

eh_103...94

Příklad: existují pouze pravotočivá neutrina a levotočivá antineutrina → pouze C transformace → pravotočivé neutrina se transformuje na pravotočivé antineutrino

Současná C i P transformace → pravotočivé neutrina se transformuje na levotočivé antineutrino → CP symetrie se zachovává

Narušení CP symetrie:

Narušení C symetrie a P symetrie se téměř úplně vzájemně ruší → narušení CP symetrie je ještě menší

Evidence narušení CP symetrie:

1. Rozpad mezonů K^0 a anti- K^0 : Liší se pouze podivností – podivnost se ve slabých interakcích nezachovává → oscilace mezi stavy K^0 a anti- K^0 .
Podle rozpadu dostaneme pro systém K^0 , anti- K^0 :
Složka $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ ($\tau = 5.17 \cdot 10^{-8} \text{s}$, CP = -1)
a složka $K_S^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ ($\tau = 0.89 \cdot 10^{-10} \text{s}$, CP = 1)
Slabá příměs rozpadu $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$, který nezachovává CP symetrii
2. Ještě větší efekt nastane pro B^0 a anti- B^0 mezony a některé jiné rozpady spojené s B mezony → první výsledky z Fermilabu potvrzují narušení CP blízke předpokladu standardního modelu

Narušení T symetrie:

V případě zachování CPT symetrie → nezachování T symetrie ruší nezachování CP symetrie → ekvivalence těchto jevů

Zachování CPT symetrie – její narušení zatím nepozorováno

Spontánní narušení kalibračních symetrií:

V základech teorie elektroslabých interakcí a QCD → kreace hmotnosti, ...

Supersymetrické teorie

Doposud omezení symetrií na transformace podobných druhů částic:

1. rotace → změna projekce spinu elektronu
2. rotace v prostoru izospinu → změna $p \rightarrow n$, $\pi^- \rightarrow \pi^0 \rightarrow \pi^+$
3. změna kvarku na lepton

Supersymetrické teorie:

Hledání symetrií, které umožňují transformaci bosonů na fermiony → supersymetrické (SUSY) symetrie.

Teorie invariantní vůči takovým transformacím → supersymetrické teorie.

Tyto teorie vedou na zdvojení počtu fundamentálních částic → každá má svého **supersymetrického partnera**:

boson → supersymetrický fermion (fotino, gravitino, gluino, ...)

fermion → supersymetrický boson (s-kvark, s-lepton)

Zatím nepozorovány – pokud existují, čeká se jejich pozorování v blízké době.

Supergravitace, superstruny:

Na blízké vzdálenosti (vysoké energie) se gravitace stává významnou:

$$V_{\text{grav}}(r) = G_N \frac{m^2}{r} = G_N \frac{\left(\frac{E}{c^2}\right)^2}{r}$$

kde G_N je Newtonova gravitační konstanta ($G_N = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2} = 6.71 \cdot 10^{-39} \text{hc}(\text{GeV}/c^2)^{-2}$)

Z Heisenbergova principu neurčitosti:

$$r \cong \frac{\hbar}{p} = \frac{\hbar c}{pc} = \frac{\hbar c}{E}$$

Nezanedbatelný vliv gravitační interakce je v případě $V_{\text{grav}} \sim E$
a tedy:

$$V_{\text{grav}} \cong G_N \frac{\left(\frac{E}{c^2}\right)^2}{\left(\frac{\hbar c}{E}\right)} = \frac{G_N}{\hbar c} \cdot E \cdot \left(\frac{E}{c^2}\right)^2 \cong E$$

Příslušná energetická škála nezanedbatelnosti gravitační interakce:

$$\frac{G_N}{\hbar c} \cdot E \cdot \left(\frac{E}{c^2}\right)^2 \cong E \Rightarrow \left(\frac{E}{c^2}\right)^2 \cong \frac{\hbar c}{G_N} = \frac{\hbar c}{6.71 \times 10^{-39} \hbar c (\text{GeV}/c^2)^{-2}} = 1.49 \times 10^{38} (\text{GeV}/c^2)^2$$

a tedy $E \sim 10^{19}$ GeV, odpovídá rozměrové škále $\sim 10^{-35}$ m (Planckův rozměr):

$$r \cong \frac{\hbar c}{E} \cong \frac{\hbar c}{\sqrt{\frac{\hbar c}{G_N} c^2}} = \sqrt{\frac{G_N \hbar}{c^3}} = \sqrt{\frac{6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \times 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}}{(3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1})^3}} \cong 5 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

Dost blízko škály velkého sjednocení \rightarrow popis fundamentálních interakcí na této škále musí zahrnovat gravitaci.

Problémy s budováním kvantové teorie gravitace \leftrightarrow divergence při určování účinných průřezů \leftrightarrow renormalizace nefunguje pro Einsteinovu obecnou teorii gravitace.

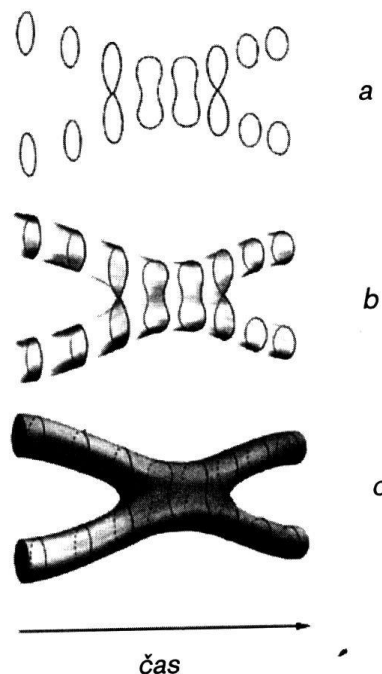
Supersymetrické teorie \rightarrow lepší chování divergencí. Supersymetrické teorie zahrnující gravitaci \rightarrow **supergravitace**.

Ani nejlepší z těchto teorií není prostá divergencí.

Původ divergencí: bodový charakter částic \rightarrow interakce v přesném bodě časoprostoru \rightarrow nulová neurčitost v poloze \rightarrow z Heisenbergova principu neurčitosti nekonečná neurčitost v přeneseném impulsu.

Odstranění divergencí: přechod ke konečným rozměrům částic ($\sim 10^{-35}$ m) \rightarrow interakční vrcholy nejsou přesně lokalizované \rightarrow konečná nepřesnost přeneseného impulsu \rightarrow divergence zmizí.

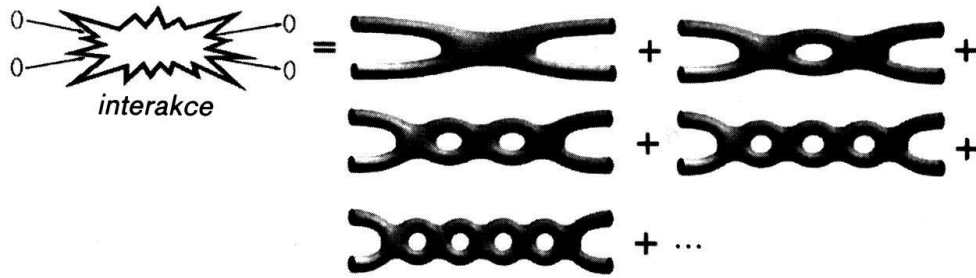
Teorie popisující částice jako velice malé lineární útvary – **strunové teorie**.



Interakce dvojice strun:

Popis interakce pomocí diagramů - **strunové diagramy**.

Použití poruchové teorie (závisí na velikosti **strunné vazebné konstanty**):



Proces popsán diagramy s různými počty smyček – čím více smyček tím menší vliv (dominuje diagram bez smyček – virtuálních párů strun)

Zavedení více než čtyřrozměrného popisu časoprostoru (10 - 11), část rozměrů svinuta → projeví se až na ultramikroúrovni

Geometrie svinutých rozměrů určuje základní vlastnosti částic (hmotnost, náboje)

Odstranění divergencí - vztah černých děr a elementárních částic

Řada (šest) různých strunových teorií → všechny jsou částí obecné **M-teorie**.

Baryonová asymetrie – světýlko za standardním modelem

Existence přebytku hmoty nad antihmotou (baryonové asymetrie)

V našem vesmíru se vyskytuje pouze hmota:

1. antičástice v kosmickém záření lze vysvětlit jako sekundární produkty srážek či interakcí částic

$$\frac{N_{\bar{p}}}{N_p} \approx 10^{-4}$$

hmoty např.

2. neexistence zdrojů gama záření vznikajících při anihilaci na styku hmoty a antihmoty

Baryonová asymetrie = poměr mezi počtem baryonů a fotonů reliktového záření (předpoklad: reliktní fotony vznikly při anihilaci) $n_b/n_\gamma = 10^{-9}$.

Zákony zachování baryonového čísla → neměnnost počtu baryonů

Baryonovou asymetrii nelze vysvětlit v rámci standardního modelu

Tři podmínky vzniku baryonové asymetrie (A. Sacharov):

1. Existence procesů narušujících zákon zachování baryonového čísla
2. V těchto procesech musí docházet k narušení C a kombinované CP symetrie (jinak by celkový počet vytvořených baryonů a antibaryonů byl stejný)
3. Částice nebo objekty v jejichž rozpadu baryonová asymetrie vzniká nesmí být v tepelné rovnováze s okolím → existují etapy prudkého rozpínání (jinak vznikají částice a antičástice se stejnou hustotou).

Různé možné typy baryogeneze 6c (vzniku baryonové asymetrie) – spojeno s různými fázovými přechody na počátku velkého třesku (vesmír nebyl v tepelné rovnováze):

1. **Elektroslabá baryogeneze** - fázový přechod spojený s oddělením elektromagnetické a slabé interakce ($t = 10^{-10}$ s, $T = 100$ GeV) – nezachování baryonového čísla na kvantové úrovni v rozpadech X, Y bozonů, narušení C a CP symetrie v elektroslabých interakcích. Je dostatečné?
2. **GUT baryogeneze** – spojená s fázovým přechodem při oddělení silné a elektroslabé interakce a teoriemi velkého sjednocení ($t = 10^{-35}$ s a $T = 10^{15}$ GeV)
3. **Affleck-Dineho (AD) baryogeneze** – spojená se supersymetri-ckými teoriemi a supergravitací a fázovými přechody s nimi spojenými

Možnost smazání baryonové asymetrie v následných nerovnováž-ných stavech. Přenesení v podobě částic (objektů) s dostatečně dlouhou dobou života – těžké Higgsovi bosony, primordiální černé díry (dostatečná $\tau \rightarrow M \sim 10^5$ g, jejich rozpad → produkce X, anti-X bosonů) ...

Možné experimentální evidence:

1. Astrofyzikální :

1. počet a rozpad primordiálních černých děr či dalších déle žijících částic → následný ohřev → změna vlastností primordiální nukleosyntézy (zastoupení jednotlivých prvků), reliktového záření
2. velikost poměru n_b/n_γ .
3. vlastnosti nebaryonové složky temné hmoty

2. Z fyziky částic:

1. studium nezachování CP a P symetrie v různých elektroslabých procesech
2. testy jednotlivých sjednocovacích teorií (elektrický dipólový moment neutronu, rozpad protonu, supersymetriční partneři, oscilace neutrin ...)

Dva dodatečné rozměry k časoprostoru svinuté do tvaru sféry (převzato z knihy B. Greene: Elegantní vesmír)

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:

$$E_1 = E^{(+)} = +\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

$$E_2 = E^{(-)} = -\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

Možná interpretace řešení E_2 : kladná energie, opačný náboj → antičástice.

eh_103...94

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

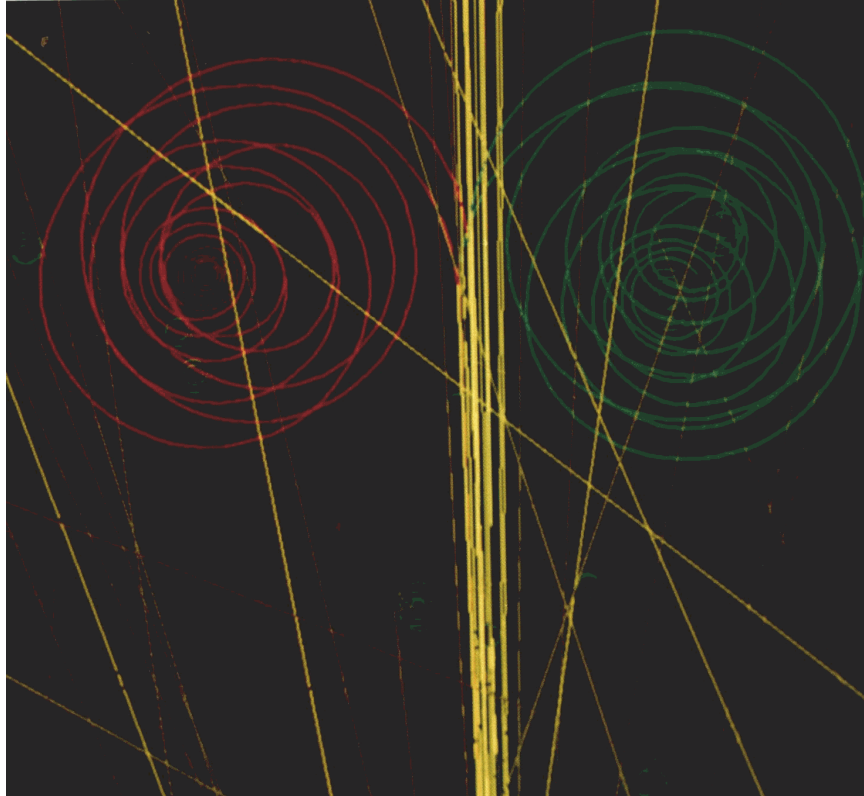
Existence elektronu a pozitronu. Podobně i pro další fermiony.

Objev první antičástice:

1932 - pozitron v kosmickém záření

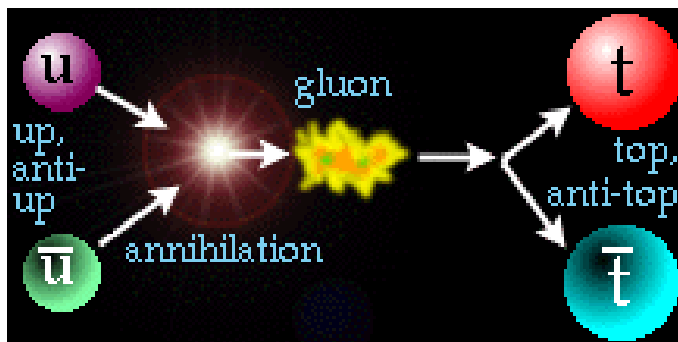
1955 – antiproton (BEVATRON)

1956 - antineutron

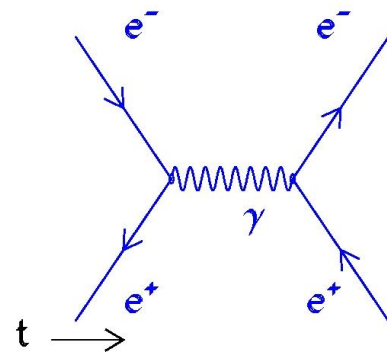


Simulace kreace elektron pozitronového páru při pohybu záření gamma v elmg poli. Pohyb vzniklých částic v magnetickém poli

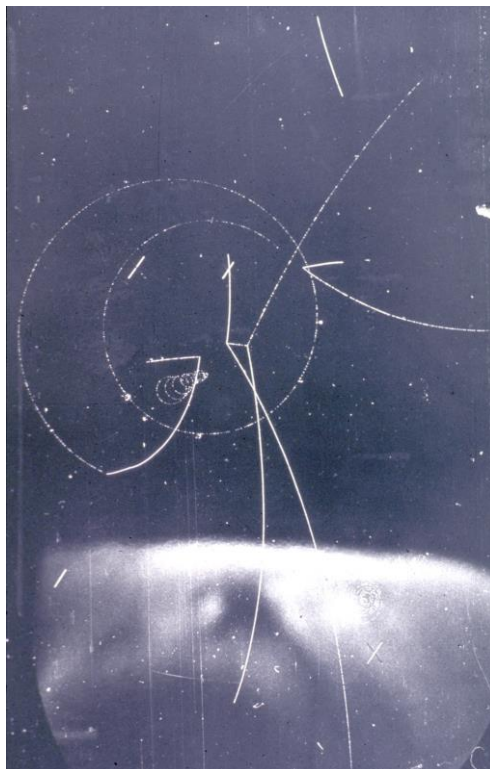
Setkání částice a antičástice → **anihilace**



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 → 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

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 $m_t = (176 \pm 7)$ GeV/c²
2. Pozorování neutrína ν_τ – 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 GeV/c² zatím ne úplně nesporné prokázání – otázka pozadí a statistické průkaznosti efektu nad pozadím

Temná hmota – neviditelná část vesmíru

Nesrovnalost mezi odhadem množství hmoty ve vesmíru na základě studia svítící hmoty a studia gravitačního vlivu hmoty (veškeré) → temná hmota – nevyzařuje ani neabsorbuje světlo, interaguje pouze gravitačně

Možnost zkoumání:

1. Studium **oběžných pohybů** hvězd → haló v galaxiích
galaxií → haló v galaktických kupách

kup galaxií → velkorozměrová hustota hmoty

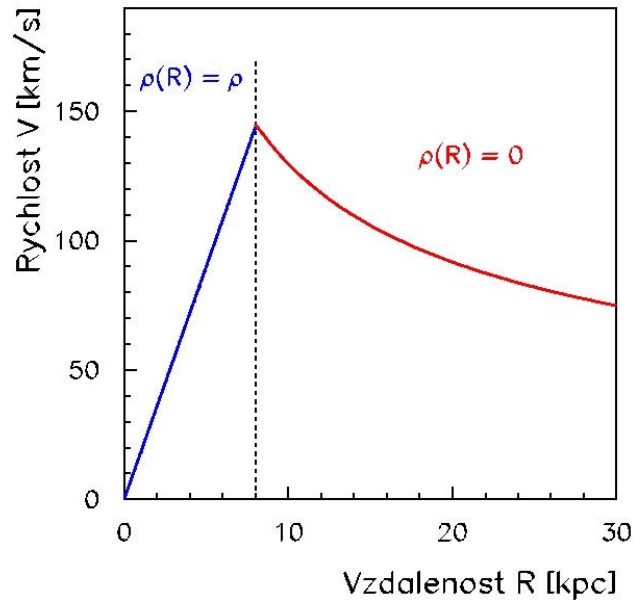
(vnější se pohybují rychleji než odpovídá pozorované hmotě)

Zjednodušený příklad - koule z konstantní hustotou:

$v^2 = G_N M(R)/R$ kde $M(R)$ je hmotnost uzavřená v kouli o poloměru R

Pro konstantní hustotu $\rho(R) = \rho$ pak máme $v^2 = (4/3)\pi \rho G_N R^2$

Vně pak máme $v^2 = G_N M/R$ kde M je celková hmotnost



2. **Rentgenovské záření horkého plynu v galaktickém halo** – teplota dána rychlostí atomů – menší než úniková rychlost – rychlost je větší než by odpovídalo pozorované hmotě
3. **Gravitační čočky** – určení hmotnosti a jejího rozložení pro kupu tvořící gravitační čočku

Čím větší škála – tím větší podíl temné (skryté) hmoty

V kupách galaxií nejméně 90% skrytá hmota

Z inflačních modelů vychází plochý vesmír - hustota hmoty

$\rho = \rho_{\text{krit}}$ a tedy poměr: $\Omega = \rho/\rho_{\text{krit}} = 1$

Hmota je pak tvořena:

1. “Hmotou” – vše s klidovou hmotností $m_0 > 0$ ($35 \pm 10\%$)
2. Energií – částice apriori relativistické $m_0 = 0$ (fotony, gravitony, ta neutrina s $m_0 = 0$, energie vakua) ($80 \pm 20\%$)

Možný původ temné nsvítivé “hmoty”:

1. **Baryonová hmota** – planety, hnědí trpaslíci, černé díry, oblaka plynu

1.

2. **Nebaryonová hmota** - slabě interagující elementární částice, dělí se podle rychlostí, které měly asi rok po velkém třesku:

a) horká – relativistické částice (např. neutrino)

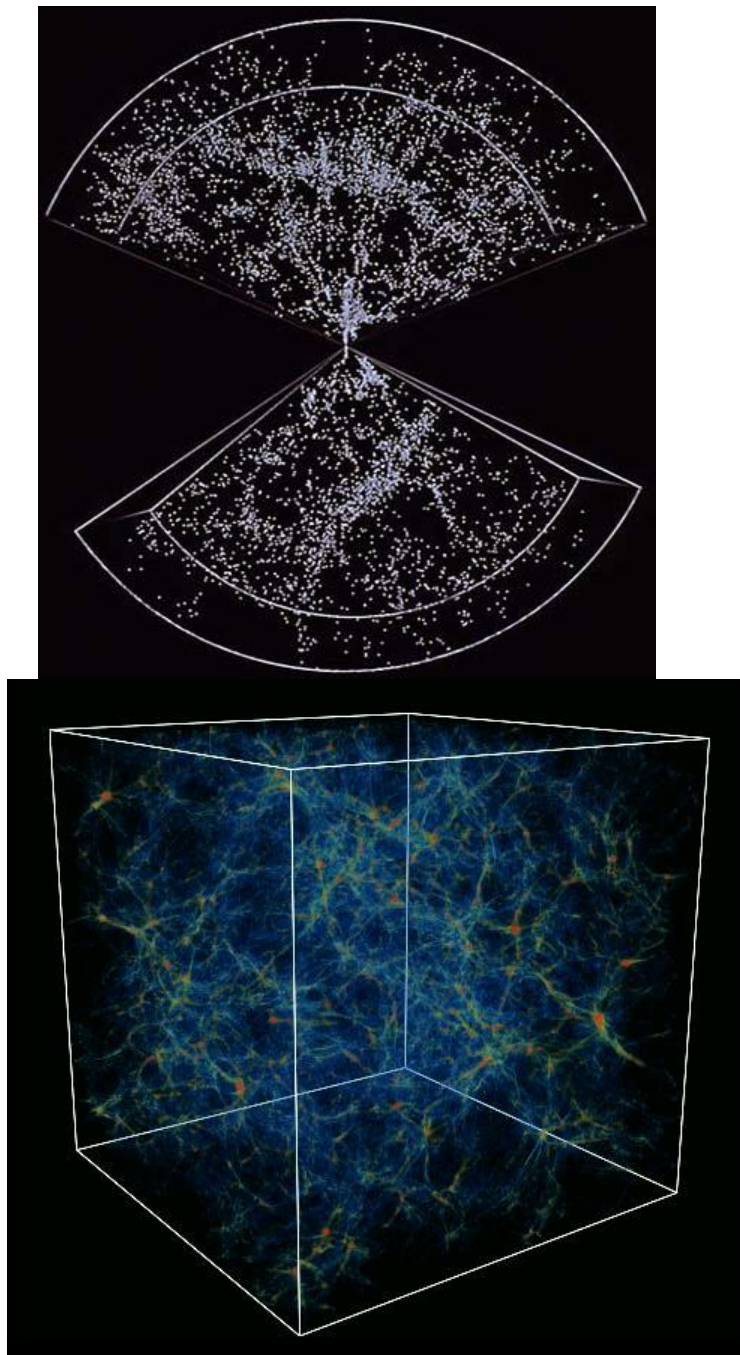
b) chladná – těžké (pomalé) částice – nejlehčí supersymetrické částice (neutralino?, ...)

hledání správné supersymetrické teorie a příslušné supersymetrické částice

Poměrem mezi jednotlivými komponentami a jejich konkrétními vlastnostmi jsou ovlivněny:

1. Fluktuace reliktního záření
2. Velkoškálová struktura vesmíru
3. Premordiální nukleosyntéza – omezení na hustotu baryonové komponenty
4. Průběh formování galaxií a jejich struktura

Simulace pro různé varianty částic a jejich kombinace se srovnávají s pozorovanou velkorozměrovou strukturou



Vlevo – pozorované velkorozměrové rozložení hmoty ve vesmíru, jejíž studium zahájili M. Gellerová a J. Huchra

Vpravo – simulace rozložení hmoty v kombinovaném modelu vesmíru složeného z horké a chladné temné hmoty provedená G.J. Bryanem a M.L. Normanem z University ve statě Illinois