

Původ hmoty ve Vesmíru

Radomír Šmída

Email: smida@fzu.cz

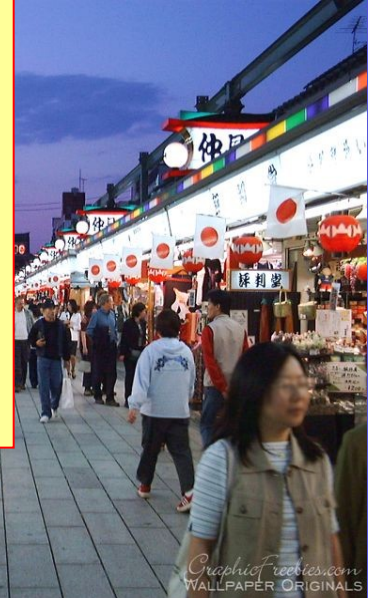
Fyzikální ústav AV ČR

Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

Hmota kolem nás

Složení Vesmíru:

- 73 % skrytá energie
(kosmologická konstanta)
- 23 % chladná temná hmota
(lehká neutrina max. 2 %)
- 4 % baryonová hmota
svítící 2 %
temná 2 % (MACHO,
chladná vodíková oblaka)



Obsah přednášky

- Standardní model částic
- Množství hmoty ve Vesmíru
- Asymetrie mezi hmotou a antihmotou
 - Vývojové etapy Vesmíru
 - Modely baryogeneze
 - Experimenty
 - Závěr

Standardní model částic

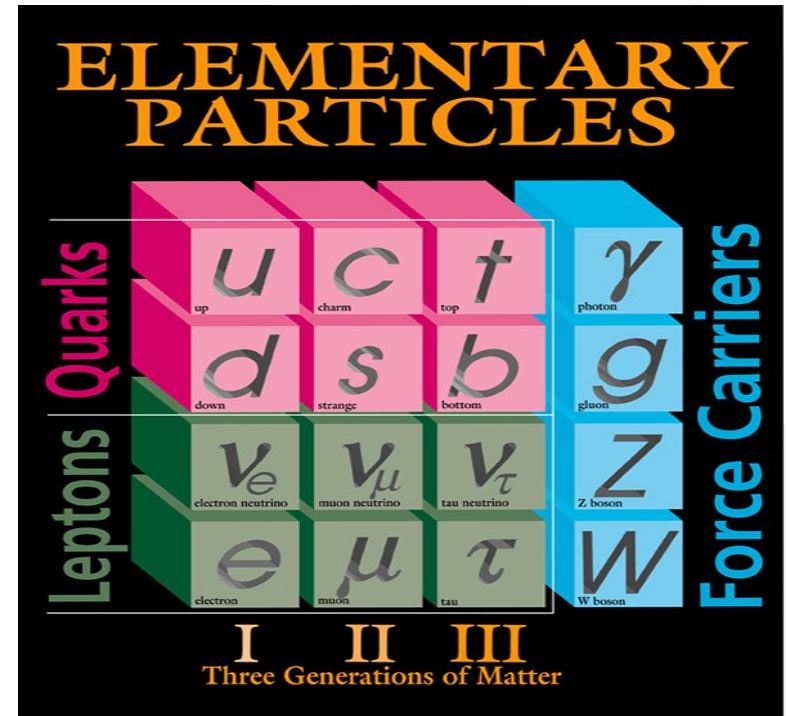
Dělení elementárních částic (bez vnitřní struktury):

1) podle statistického chování

- **fermiony** (poločíselný spin, splňují Pauliho vyluč. princip)
- **bosony** (celočíselný spin, nespĺňují Pauliho v. p.)

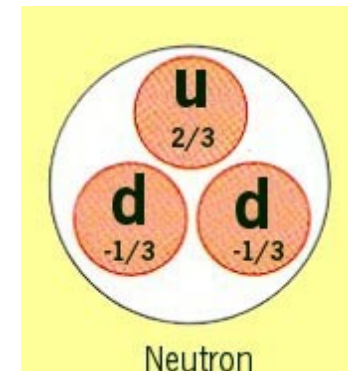
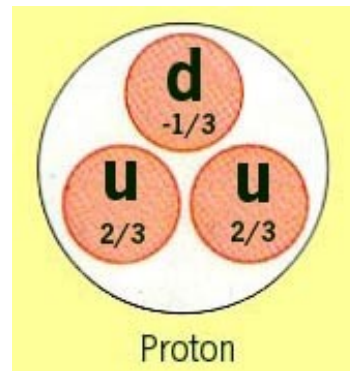
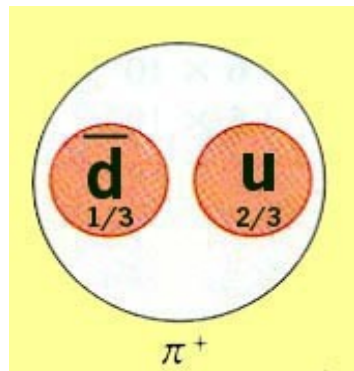
2) podle rodové příslušnosti
(známe 3 generace)

- **leptony** (lehké, neinteragují silně; elektron, neutrino, ...)
- **kvarky** (6 druhů, 1/3 náboj)
- **kvanta cejchovacích polí**
neboli **intermediální bosony**
(nositelé interakcí: silná, slabá, elektromagnetická)



Složením kvarků a antikvarků lze vytvořit **hadrony** (těžké částice, reagující silně):

- **mezony** (kvark-antikvark)
- **baryony** (složeny ze 3 kvarků)



Stabilní částice SM: elektron (511 keV), proton (938 GeV),
neutrino (elektronové, mionové, tau) + jejich antičástice
(positron, antiproton, ...), foton

Hmota ve Vesmíru

- Vesmír není prázdný.
- Vesmír je téměř prázdný.

Vesmír je složen z hmoty, **ne z antihmoty !**

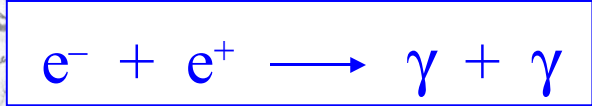
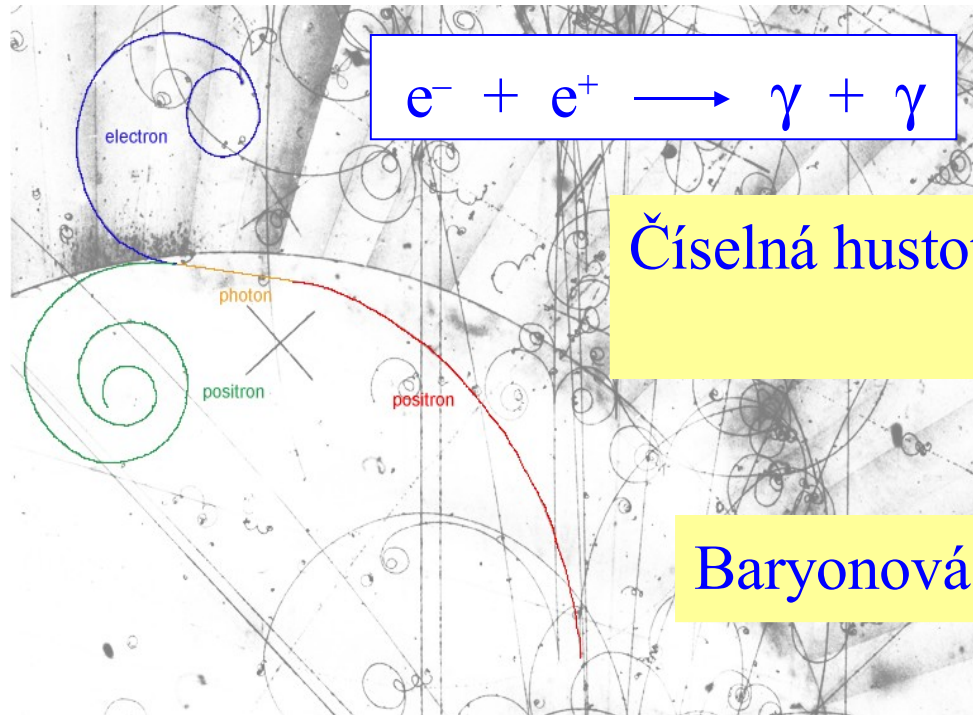
- Neil Armstrong přežil svůj “malý krok” na Měsíci.
 - Sluneční kosmické záření.
 - Planetární sondy na planetách a jejich měsících.
 - Galaktické a extragalaktické kosmické záření.
($p/\text{anti-}p \sim 10^4$, antiprotony pocházejí z interakce s mezihvězdnou hmotou).
- Pozorování gama záření z kup a nadkup galaxií a deformace v reliktním mikrovlném záření.

Ve Vesmíru není symetrie mezi hmotou a antihmotou !

Hustota baryonů

V raném Vesmíru se očekává symetrie mezi hmotou a antihmotou, tj. stejný počet částic a antičástic.

Anihilace: baryon + antibaryon \rightarrow intermediální bosony
(anihilace baryonových čísel)



Číselná hustota baryonů po anihilaci

$$n_B > 0$$

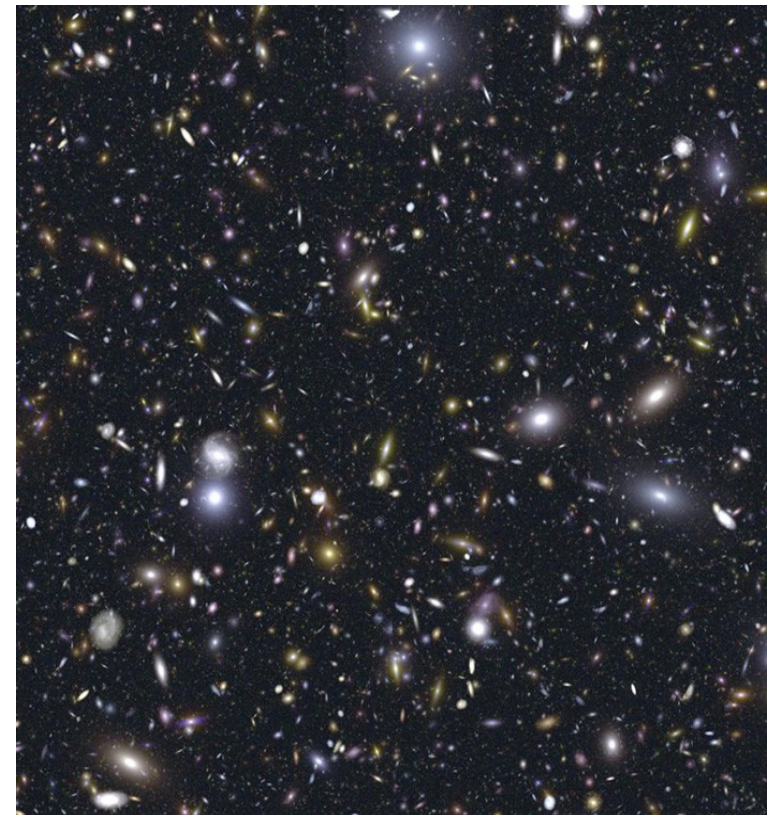
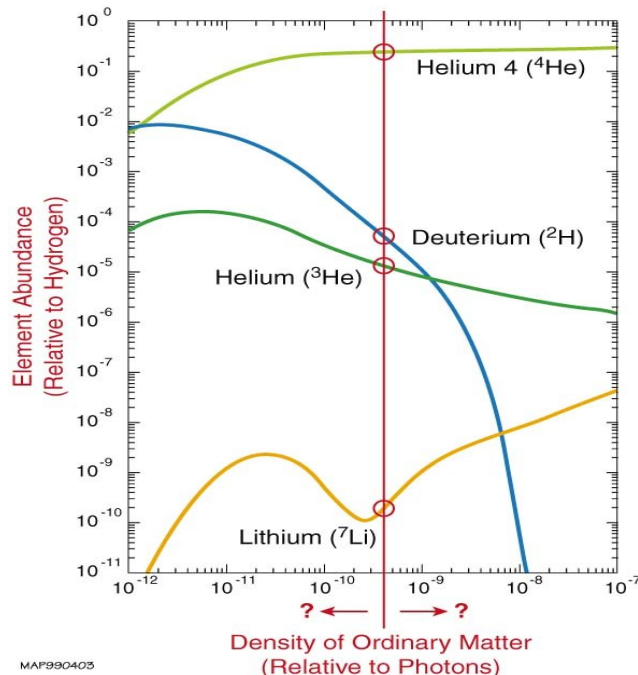


Baryonová asymetrie $\eta = n_B / n_\gamma$

Měření baryonové asymetrie

1) Nukleosyntéza lehkých prvků (BBN):
Zachycení volných neutronů (mezi 1 s - 3 min), citlivé na rychlost expanze a hustotu reaktantů

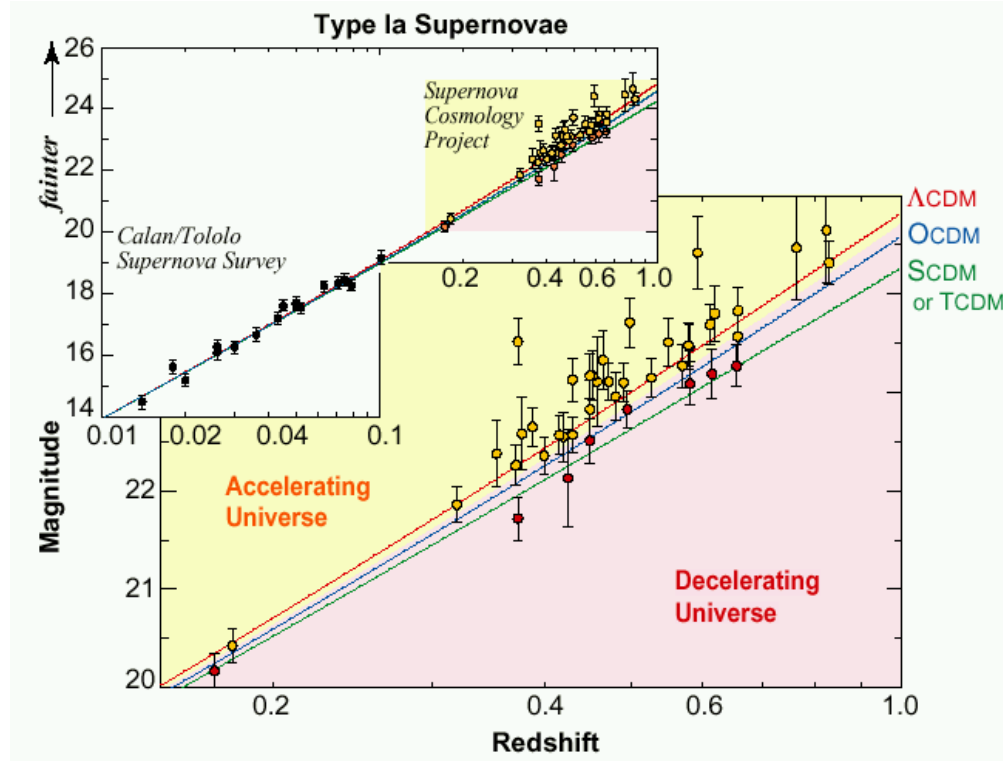
2) Přímá pozorování:
Svítící a zářící objekty, problém s temnou hmotou



3) Supernovy typu Ia + rentgenové galaxie

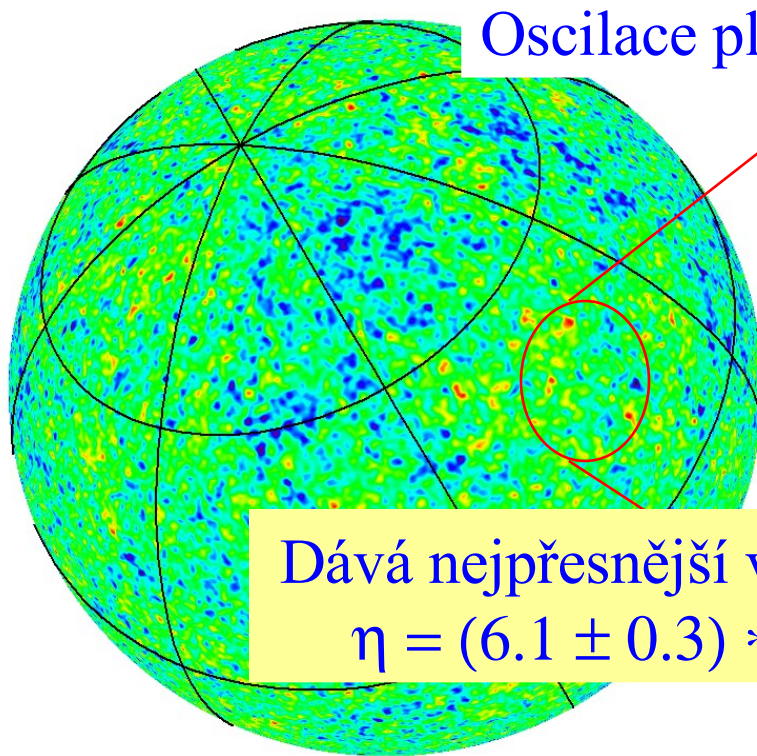
hustota hmoty Ω_M

baryonová část $f_B = \Omega_B / \Omega_M$



4) Pozice píků v reliktním mikrovlném záření (CMB)

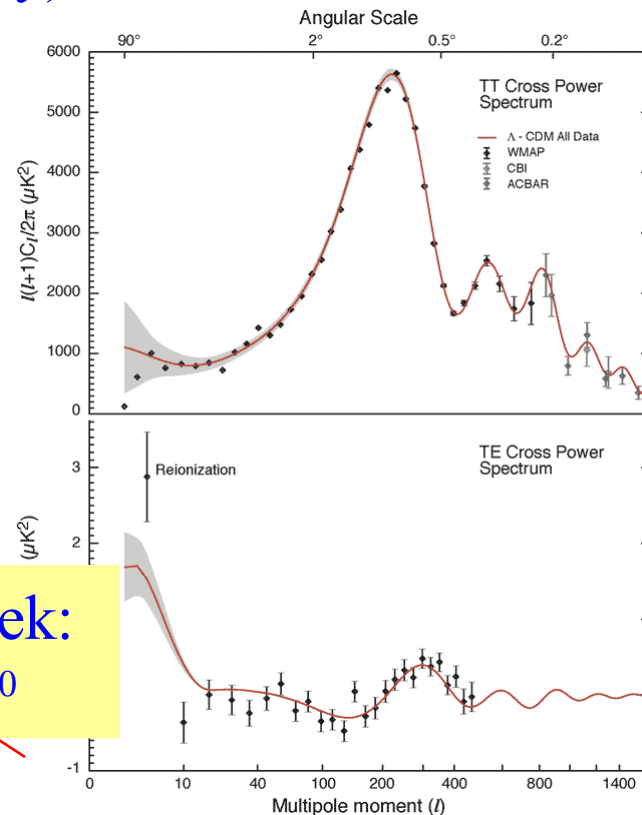
Rekombinace 380 tisíc let po Velkém Třesku: zachycení elektronů atomovými jádry vedoucí ke vzniku neutrálních atomů (odpoutání záření od hmoty)



Oscilace plazmy:

Dává nejpřesnější výsledek:

$$\eta = (6.1 \pm 0.3) * 10^{-10}$$



Neměnnost baryonové asymetrie

Měření	Teplota	Doba po VT	Hodnota $\eta / 10^{-10}$
BBN	1 MeV	1 min	5.6 ± 0.5
(odvozeno pouze z hodnot pro deuterium)			
CMB	0.1 eV	380 tisíc let	6.1 ± 0.3
SN1a	1 meV	10 mld let	5.1 ± 1.6

Ve shodě s teoretickou předpovědí je hodnota baryonová asymetrie **konstantní během rozpínání Vesmíru.**

Původ baryonové asymetrie

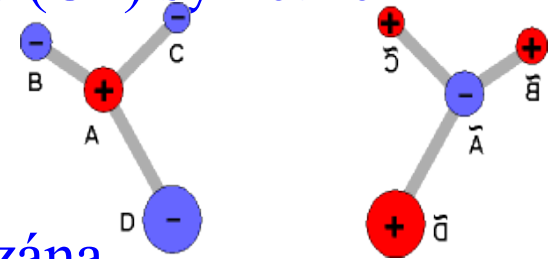
Baryogeneze

dynamická

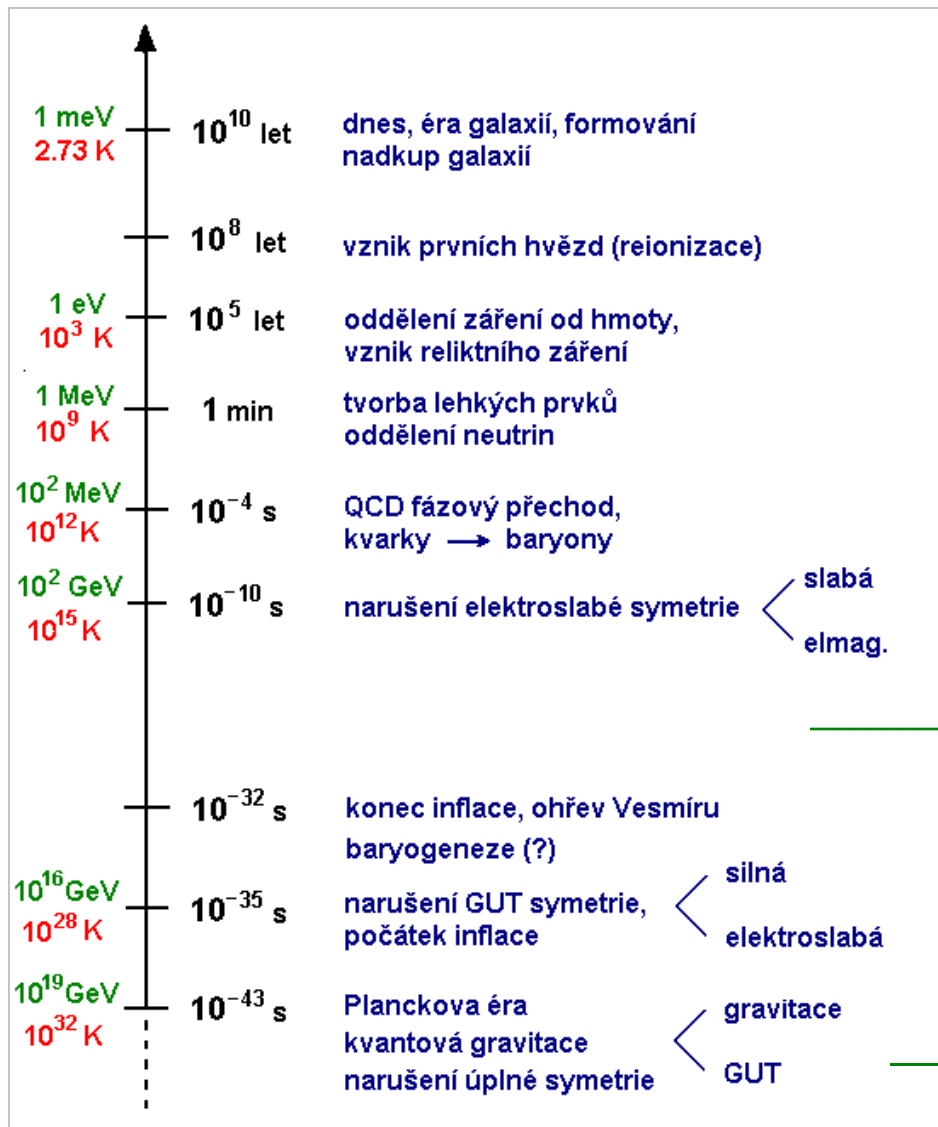
žádná neproběhla
(přítomná již při Velkém
Třesku)

Sacharovovy podmínky:

- 1) Narušení baryonového čísla (B)
 - probíhají reakce, které jej narušují (slabá interakce)
- 2) Narušení nábojové (C) a kombinované (CP) symetrie
 - převládnutí hmoty nad antimotou
- 3) Odchýlení se z tepelné rovnováhy
 - vzniklá asymetrie není následně smazána



Vývojové etapy Vesmíru



Fázové přechody při porušení symetrie

Standardní kosmologický a částicový model

Období inflačního rozpínání

Velký Třesk

Modely baryogeneze

1) Elektroslabá

2) Leptogeneze

3) Velkého sjednocení

a další (Affleck-Dineho)

Baryogeneze musela nastat až po inflačním rozpínání, jinak se vzniklá baryonová asymetrie smaže.

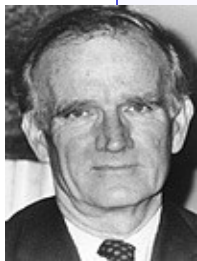
Elektroslabá baryogeneze

Splnění Sacharovových podmínek:

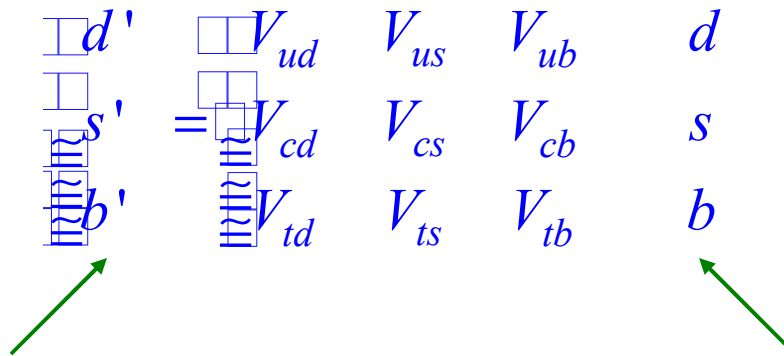
1) V klasickém přiblížení se ve Standardním modelu při interakcích zachovává baryonové (B) a leptonové (L) číslo. Kvantové narušení $B + L$ přechodem struktury vakuového potenciálu, ale zachovává se $B - L$. Při dnešních podmínkách je tento efekt zanedbatelný, jeho vliv roste s energií.

2) Narušení CP symetrie v roce 1964 (J. W. Cronin, V. Fitch, NC 1980) pozorováním rozpadů neutrálního K_L^0 mezonu na piony π^+ a π^- (0.2 % rozpadů).

3) Fázový přechod pomocí Higgsova pole: intermediální částice Z^0 , W^\pm se stávají hmotnými (**spontánní narušení symetrie**).



Cabibbova Kobayashiho Maskawova (CKM) matice

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline d' \\ \hline \\ \hline s' \\ \hline \\ \hline b' \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline V_{ud} \\ \hline \\ \hline V_{cd} \\ \hline \\ \hline V_{td} \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{c}
 V_{us} \\
 V_{cs} \\
 V_{ts}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 V_{ub} \\
 V_{cb} \\
 V_{tb}
 \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline d \\ \hline \\ \hline s \\ \hline \\ \hline b \\ \hline \end{array}$$


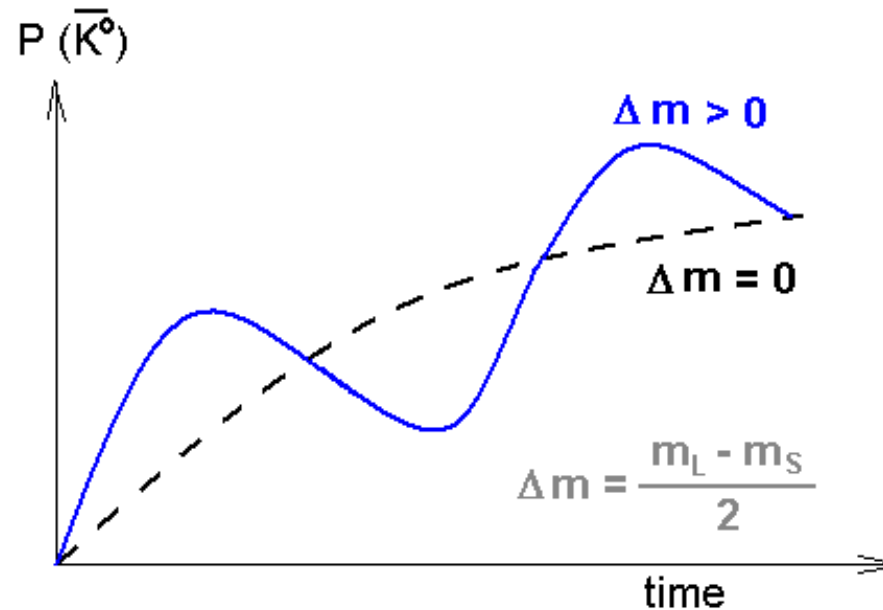
vlastní stavy elektroslabé interakce

vlastní stavy hmotnosti

Přechody kvarků mezi generacemi při slabých interakcích (u leptonů oscilace neutrin pokud $m_\nu \neq 0$).

V případě 3 generací kvarků obsahuje ve Wolfensteinově parametrizaci komplexní fázi, která způsobuje CP narušení (ale toto CP narušení je pro baryogenezi příliš malé).

Odbočka - Oscilace neutrálních kaonů



Vlastní stavy hmotnosti: K^0 (3 cm), \bar{K}^0 (15 m)

Díky oscilacím ztrácí smysl mluvit o jejich době života.

Díváme se na ně jako na superpozici dvou jiných kvantových stavů:

Vlastní stavy elsl. interakce: K^0_S , K^0_L

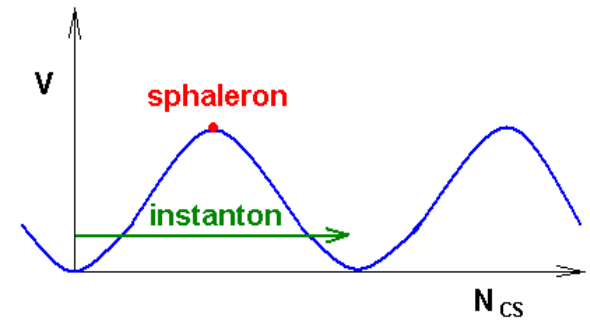
Proces **spontánního narušení symetrie** se šíří prostorem jako “bubliny” a při průchodu nebo odrazu kvarků nebo leptonů na jejich okrajích se narušuje CP symetrie.

Spolu s tím se při tzv. **sphaleronových procesech** narušuje baryonové číslo ($E_{\text{sph}} \sim 10^{12} \text{ GeV}$):

$$\Delta B = \Delta L = n_f * \Delta N_{\text{CS}}, \quad n_f = 3$$

SP je přechod z jednoho základního stavu vakuového pole do jiného

(dnes při nízkých energiích je pravděpodobnost $\sim 10^{-164}$).

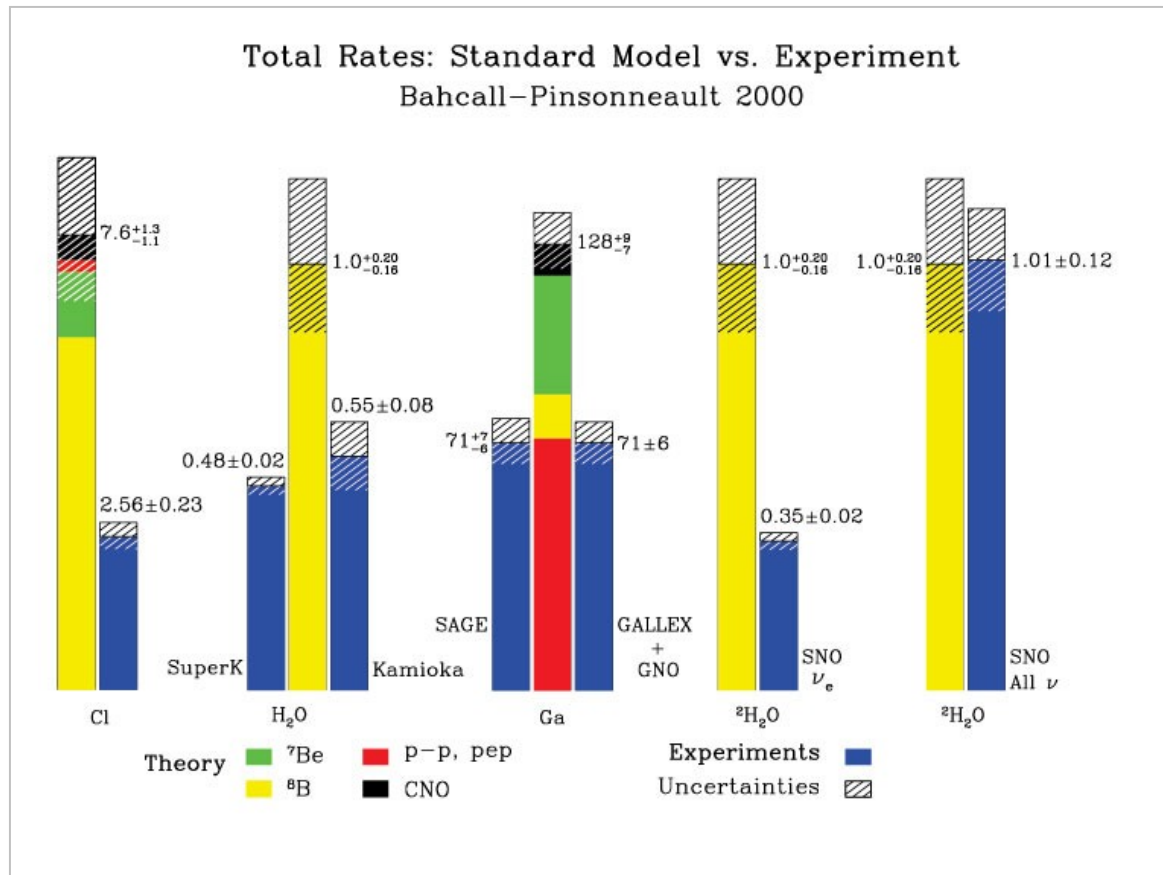


Pro dostatečné velké CP narušení je potřeba malá hmotnost Higgsova bosonu ($m_H < 70 \text{ GeV}$), což je vyloučené (LEP $m_H > 114 \text{ GeV}$).

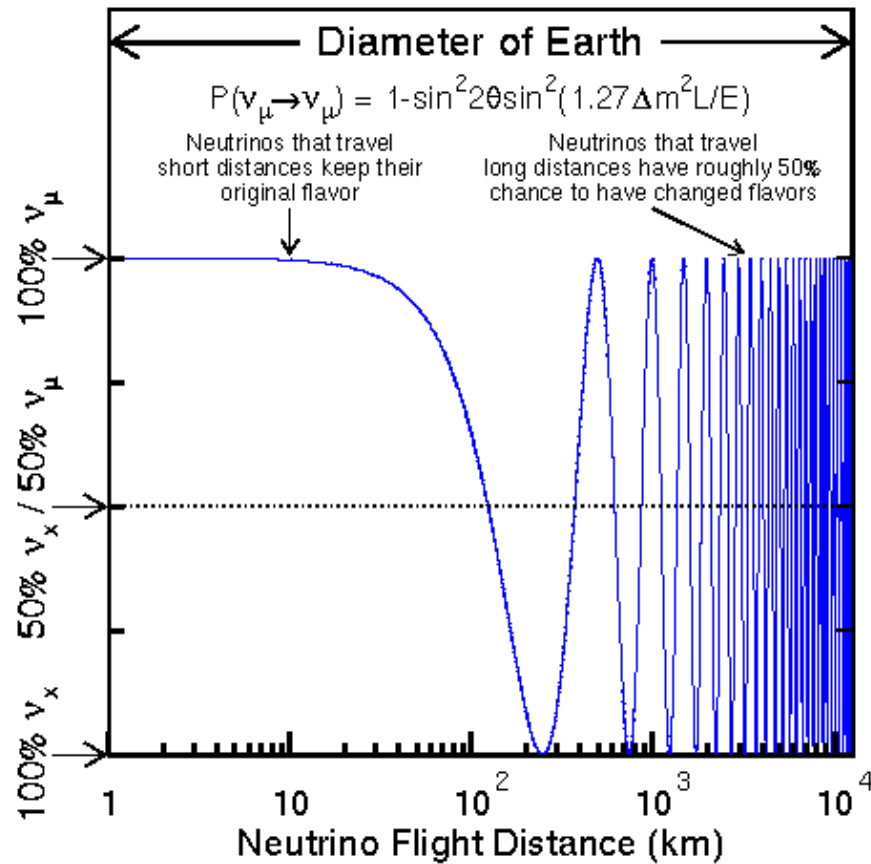
Leptogeneze

- 3 druhy neutrin: elektronové, mionové, tau
- Všechny neutrina interagují jen slabou interakcí a mají velice malé účinné průřezy.
- Z oscilací neutrin (sluneční, atmosférická, přímá detekce) plyne jejich malá ale nenulová hmotnost.
- Dva možné typy neutrin (pro $m_\nu \neq 0$):
 - 1) Dirac $\bar{\nu} \neq \underline{\nu}$, zachovává se leptonové číslo
 - 2) Majorana $\bar{\nu} = \underline{\nu}$, leptonové číslo se nezachovává
- See-saw mechanismus: předpovědí těžkého pravotočivého Majorana neutrina vysvětluje hmotnost lehkých neutrin.

Vyřešený problém slunečních neutrin



$$L[m] = 2.47 * \frac{\Delta m^2 [eV^2]}{E[MeV]}$$



- Rozpad **pravotočivého Majorana neutrina N** ($m_N \geq 10^{10}$ GeV) na lepton a Higgsovo pole:

$$N \rightarrow l\phi, \quad N, \quad \bar{l}\bar{\phi}$$

- Rozpadová šířka:

$$\Gamma(N \rightarrow l\phi) = \frac{1}{2}(1+\varepsilon)\Gamma$$

$$\Gamma(N \rightarrow \bar{l}\bar{\phi}) = \frac{1}{2}(1-\varepsilon)\Gamma$$

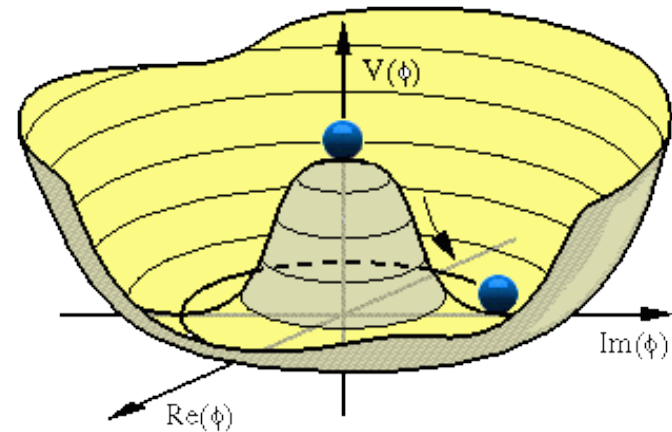
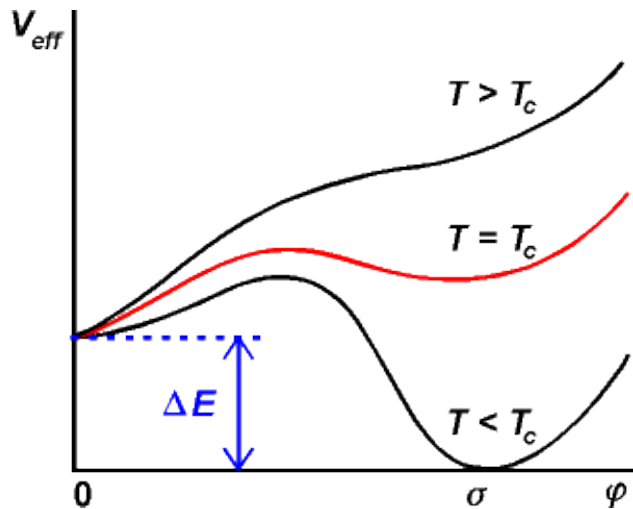
- Parametr $\varepsilon \ll 1$ určuje CP asymetrii, která vede k leptonové asymetrii.
- Sphaleronovými procesy (interakce s Higgsovým polem) se transformuje do bar. asymetrie $n_B \sim \varepsilon$.

GUT baryogeneze

Předpovědi teorie velkého sjednocení:

- GUT - sjednocení elektroslabé a silné interakce
- Supersymetrie (**SUSY**): symetrie mezi fermiony a bosony.
- Předpověď superpartnerů k leptonům a fermionům (sleptons, squarks, gauginos, ...) - vhodní kandidáti na temnou hmotu.
- Nestabilita protonu ($p \rightarrow \pi^0 e^+$, $\tau_{\text{exp}} \geq 7 \cdot 10^{32}$ let).
- Existence stabilních superhmotných magnetických monopolů.

- Vlivem narušení GUT symetrie dochází k **inflačnímu rozpínání** Vesmíru. (Energie skalárního **inflatonového** pole se přemění v reálné částice - ohřev Vesmíru.)



Řeší problém horizontu a plochosti Vesmíru,
neexistenci magnetických monopolů, ...

Společná reprezentace kvarků a leptonů vyžaduje další **intermediální bosony X a Y**, které při svém rozpadu nezachovávají baryonové číslo:

$$X \rightarrow \text{antikvark} + \text{antikvark} \quad (1 - \varepsilon)$$

$$X \rightarrow \text{kvark} + \text{lepton} \quad (\varepsilon)$$

$$\bar{X} \rightarrow \text{kvark} + \text{kvark} \quad (1 - \varepsilon')$$

$$\bar{X} \rightarrow \text{antikvark} + \text{antilepton} \quad (\varepsilon')$$

U rozpadů mírně převažují větve vedoucí ke kvarkům a leptonům $\varepsilon - \varepsilon' > 0$.

Výsledné baryonové číslo $\Delta B = (\varepsilon - \varepsilon') / 2$.

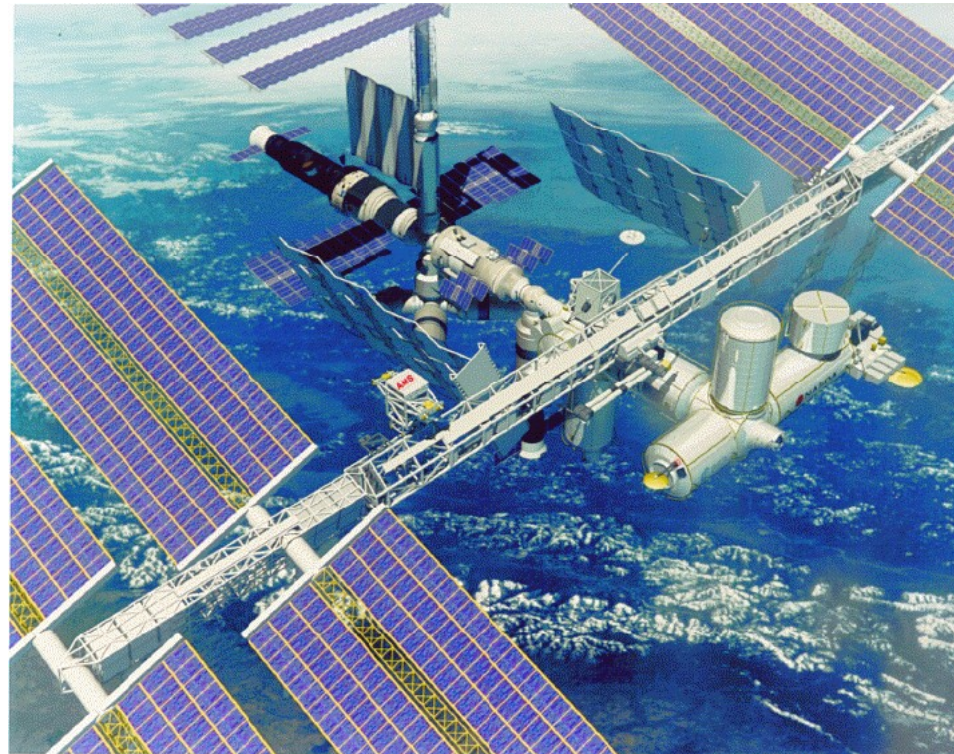
Affleck-Dine

- vychází z SUSY
- řádově nižší energie než GUT
- oscilující skalární pole nesoucí baryonové a leptonové číslo
- nestability vedou ke vzniku kondenzátů **Q-balls** (makroskopické objekty $M_Q \sim 10^{24}$ GeV)
- nesou-li baryonové číslo **B-balls** ($B_Q \sim 10^{26}$)
- baryonová asymetrie vzniklá rozpady kondenzátů
- kandidáti na temnou hmotu

Experimenty

Přímá detekce antihmoty

Alpha Magnetic Spectrometer (říjen 2005)



- Kosmického záření v oblasti od 1 GeV do 1 TeV.
- Detekce antihmoty (především atomy antihelia).
- Hledání neutralin (při vzájemných interakcích vznikají spršky vysoce energetických positronů).
 - Stáří kosmického záření z poměru ${}^9\text{Be} / {}^{10}\text{Be}$.
 - Prvotní černé díry (Hawkingovo vypařování)

-
-
-

SUSY, Neutrino, CMB, CP narušení, gama záření

Pierre Auger Observatory

Large Hadron Collider

Integral

Planck

-
-
-

Závěr

Každá hypotéza má své plusy a mínusy

Rozhodnou experimenty

Slibná budoucnost