

Úvod

Pozorována přeměna jader spojená s vyzařováním záření - **radioaktivita**. Objev radioaktivity učinil H. Becquerel (1896).

Tři základní druhy radioaktivity a rozpadů jader:

1. Rozpad alfa
2. Rozpad beta
3. Rozpad gama

k nim přistupuje štěpení jader (samovolné a indukované) a další, exotičtější druhy rozpadu

Při rozpadu dochází k přeměně jednoho jádra na druhé (u rozpadu gama se nemění – zmenší se pouze energie vzbuzeného (excitovaného) jádra.

Mateřské jádro – rozpadající se jádro

Dceřino jádro – jádro vzniklé rozpadem

Sekvence následných rozpadů – **rozpadová řada**.

Rozpad jádra nezávisí na chemických a fyzikálních vlastnostech okolí jádra (výjimkou je například ovlivnění rozpadu gama prostřednictvím konverzních elektronů chemickou vazbou).



Úvod

Zkoumání srážek a rozpadů jader a elementárních částic - hlavní metoda zkoumání vlastností mikrosvěta.

Pružný rozptyl - během něho se nemění vnitřní pohybový stav zúčastněných částic – při rozptylu nedochází k excitaci či deexcitaci částic a jejich klidové hmotnosti se nemění.

Nepružný rozptyl - během něho se vnitřní pohybový stav částic mění (jsou excitovány), ale nedochází k přeměně částic.

Hluboce nepružný rozptyl - dochází k velmi silné excitaci částic - velká přeměna kinetické energie na excitační energii.

Jaderná reakce (reakce elementárních částic) - jaderná přeměna vyvolaná vnějším zásahem.

Dochází jak ke změně struktury zúčastněných jader (částic) tak ke změně pohybového stavu.

Řadíme mezi ně i zmíněné rozptyly. Jaderné reakce můžeme dělit podle různých kritérií:

Podle průběhu (štěpná jaderná reakce, jaderná syntéza, reakce přenosu nukleonu ...)

Podle účastníků srážky (fotojaderné reakce, reakce těžkých iontů, reakce indukované protony, reakce produkce neutronů ...)

Podle energie reakce (exoenergetické, endoenergetické reakce)

Podle energie nalétávajících částic (nízkoenergetické, vysokoenergetické, relativistické srážky, ultrarelativistické ...)

Jaderný rozpad (radioaktivita) - samovolná (ne vždy - indukovaný rozpad) jaderná přeměna spojená s produkcí částic.

Rozpad elementárních částic - totéž pro elementární částice

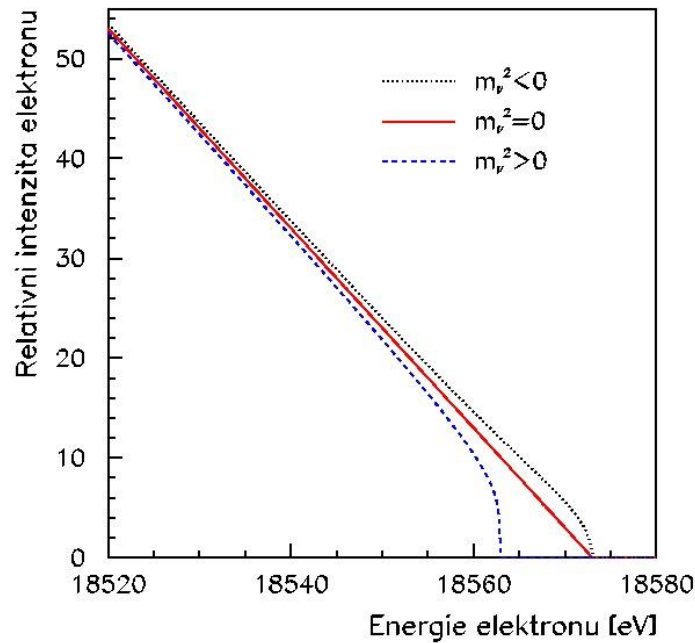
Kinematikou procesu nazýváme množinu hmotností, energií a hybností objektů účastnících se srážky či rozpadu. Ne všechny kinematické veličiny jsou nezávislé. Závislosti jsou určovány **zákony zachování**, z nichž jsou pro kinematiku nejdůležitější **zákon zachování energie a zákon zachování hybnosti**

Při určování kinematických veličin jsou důležité **transformace mezi různými souřadnými soustavami** a veličiny, které se při těchto transformacích zachovávají (**invariantní proměnné**).



Vážení neutrin

1) Přímé určování hmotnosti neutrina z rozpadu beta:



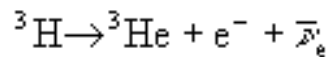
Curieho graf pro rozpad beta tritia

Měření spektra elektronů z rozpadu beta.

Konec spektra elektronů lze linearizovat → Curieho graf

Konec grafu závisí na m_ν^2

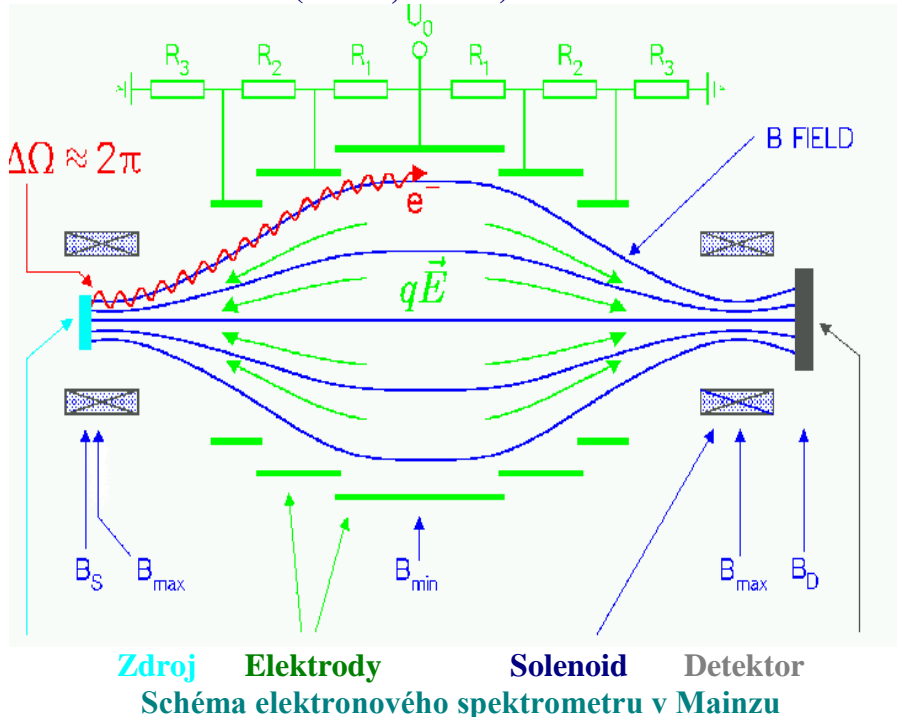
Velmi vhodný rozpad tritia:



Energie $Q_{\text{beta}} = 18.6 \text{ keV}$

První experiment -1949

Nyní je nejlepší hodnota: $m_\nu < 3 \text{ eV}$ (Mainz, Troick)



Problémy:

1. Samoabsorpce ve zdroji
2. Určení účinnosti a odezvy spektrometru
3. Velmi nízká intenzita elektronů z konce spektra

Dnešní spektrometry: $\sim 2 \text{ eV}$ → Budoucí: $\sim 1 \text{ eV}$

Pro mionové neutrino:

Využijeme např. rozpad: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

Změříme hraniční energii mionu

Známe energie reakce (hmotnost pionu)

Ze zákonů zachování energie a hybnosti

Kinetická energie μ měřena z jeho pohybu v magnetickém poli

Zatím $m(\nu_\mu) < 170 \text{ keV}$,

Experiment BNL E952 (Brookhaven) \rightarrow hranice 8 keV

Pro taunové neutrino: $m(\nu_\mu) < 18.5 \text{ MeV}$

Z doby letu od supernovy:

1. Srovnání času příletu neutrin a fotonů
2. Srovnání příletu neutrin s různou energií (rychlostí) ($< 10 \text{ eV}$)

Nepřímé určení z oscilací neutrin:

Průběh oscilací je i funkcí Δm_ν^2 : sluneční $\Delta m_\nu^2(\nu_e-\nu_\mu) \leq 10^{-5} \text{ eV}^2$

Sekund. kosmické záření (atmosférické) $\Delta m_\nu^2(\nu_\mu-\nu_\tau) \approx 10^{-5}-10^{-1} \text{ eV}^2$

Za předpokladu Majoránova typu z dvojného rozpadu beta:

Poločas rozpadu závisí na hmotnosti neutrina $m(\nu_e) < 0.27 \text{ eV}$



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 – neábelovské).

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

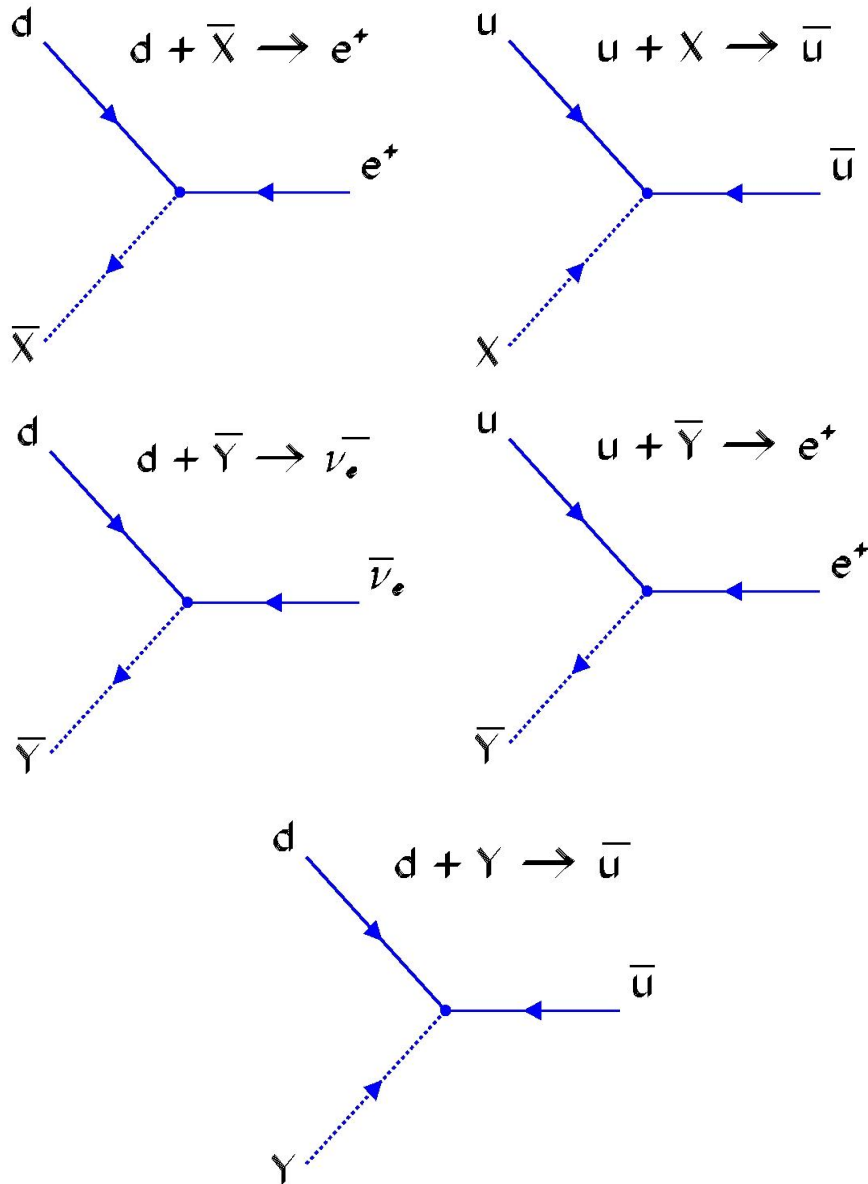
Síla interakce spojená s elektrickým nábojem roste s přeneseným impulsem (energií)

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 bosony 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:

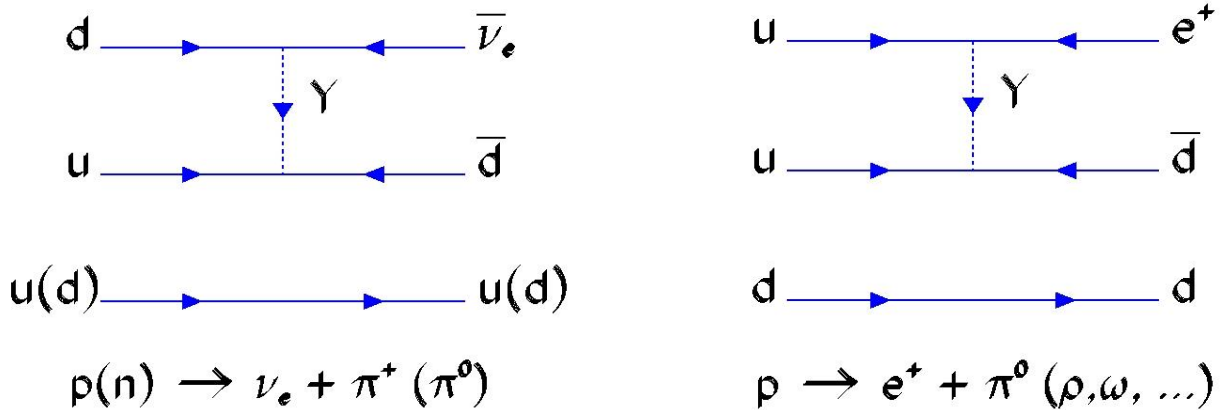
$$\bar{\nu}_e \bar{d} \leftrightarrow Y \leftrightarrow ud$$

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

→ 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 \rightarrow vzniká více než jedna částice \rightarrow 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



Velkorozměrová struktura vesmíru

Temná hmota ovlivňuje vznik nehomogenit v hustotě hmoty při Velkém třesku průběh jejich vývoje a vznik i stabilitu velkorozměrové struktury vesmíru

Rozsáhlé přehledky oblohy - velký počet rudých posuvů galaxií, jednotná metodika (potlačení výběrových efektů)

Určení rozložení galaxií \rightarrow trojrozměrná mapa pozorovaného vesmíru

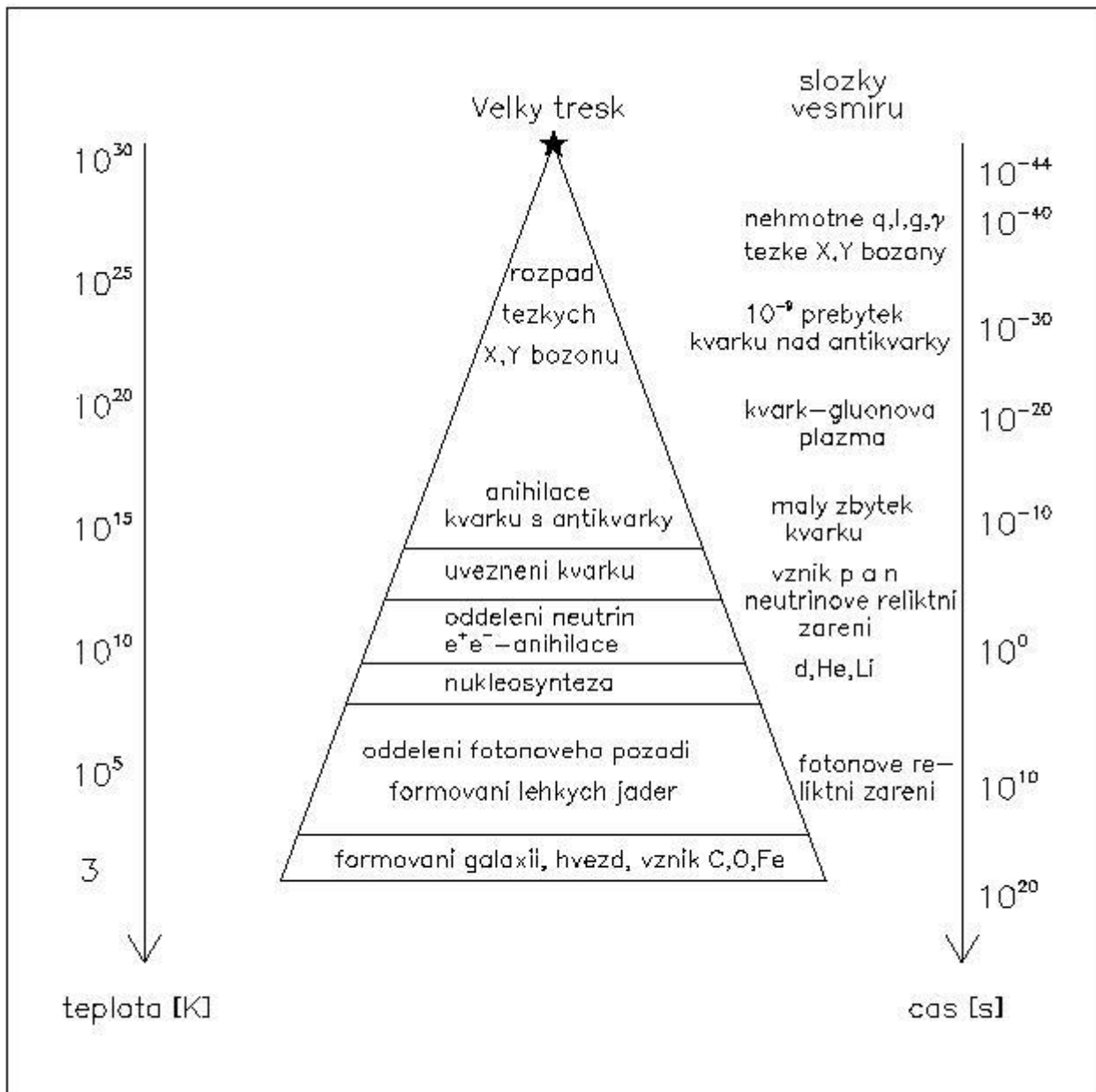
Porovnání s modelovými simulacemi pro různé kosmologické parametry - různý vliv temné hmoty v závislosti na složení



Velký třesk

Proč si myslíme, že v raném vesmíru byly velmi vysoké hustoty energie?

1. Pozorujeme rozpínání vesmíru popisované Hubblovým zákonem.
2. Pozorujeme reliktní záření se spektrem absolutně černého tělesa s teplotou 2.7 K.
3. Zastoupení lehkých prvků odpovídá předpovědím primordiální nukleosyntézy.



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

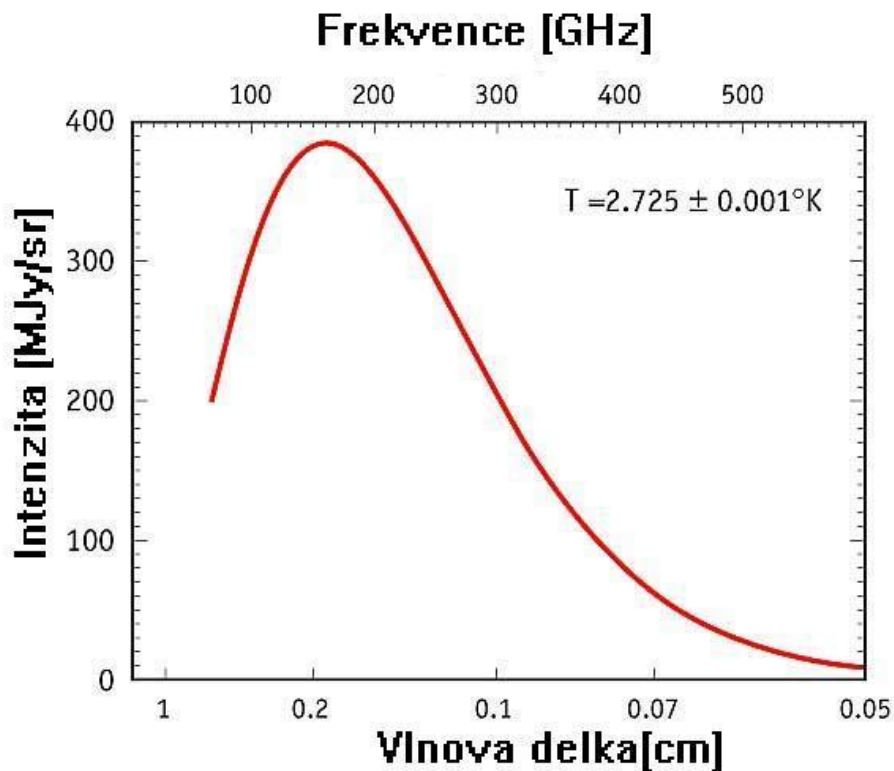
Důkazy existence období horkého a hustého vesmíru:

- Rozpínání vesmíru** - pozorování vzdalování galaxií odpovídající Hubbleovu zákonu $v = H \cdot r$. Hubbleova 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	$k = -1$
ploché	$k = 0$

2.

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



Spektrum reliktního záření získané pomocí sondy COBE. Převzato ze zdrojů NASA. Odpovídá Planckově vyzařovacímu zákonu černého tělesa s teplotou T .

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

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

Nejdříve $p + n \rightarrow D$

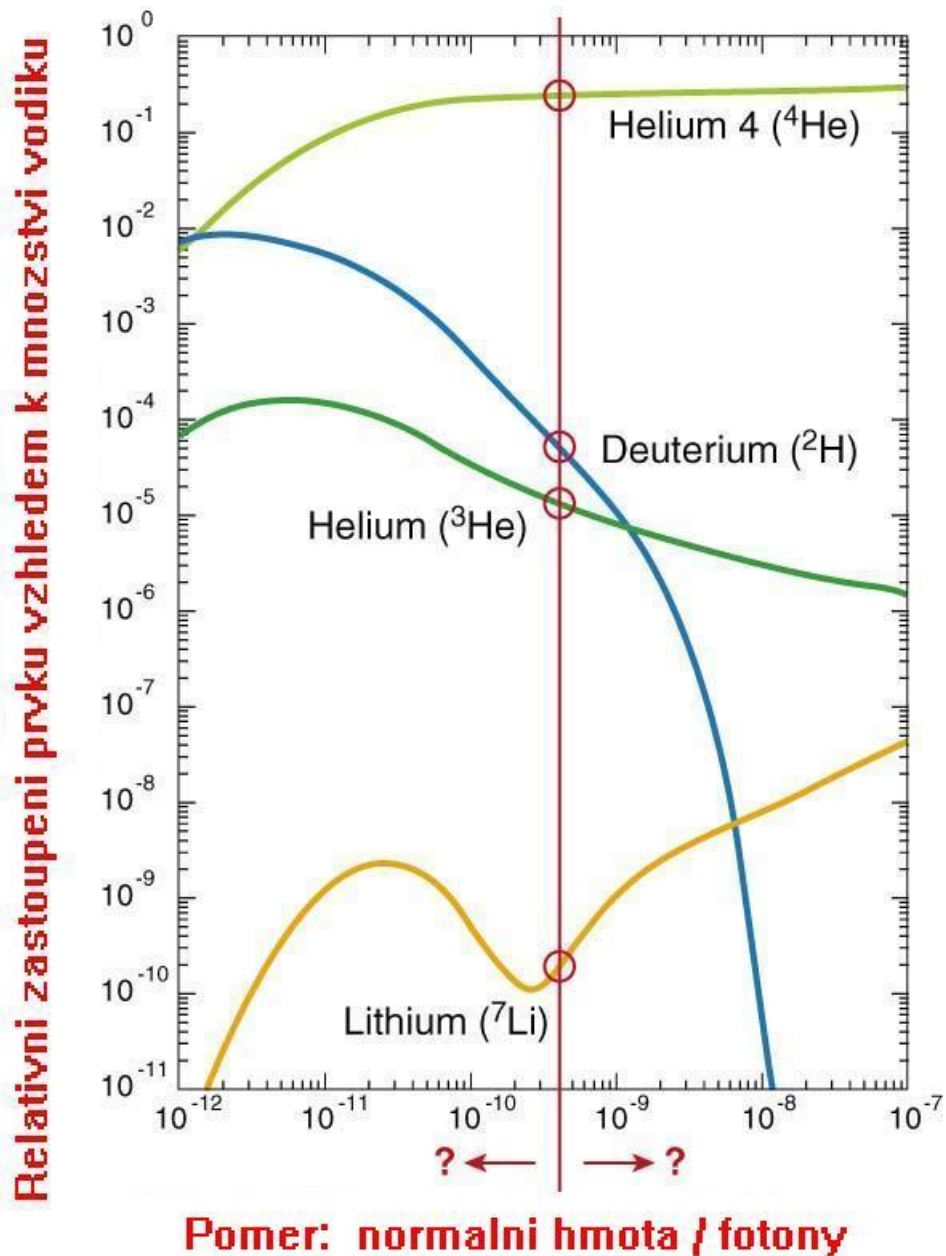
a pak $D + n \rightarrow T$, $D + p \rightarrow {}^3\text{He}$, $D + D \rightarrow {}^3\text{He}$

a $T + p \rightarrow {}^4\text{He}$ nebo ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^4\text{He}$

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

$T < 1$ MeV – tvorba páru elektronu a pozitronu

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



Zastoupení lehkých prvků (převzato ze stránek NASA)

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



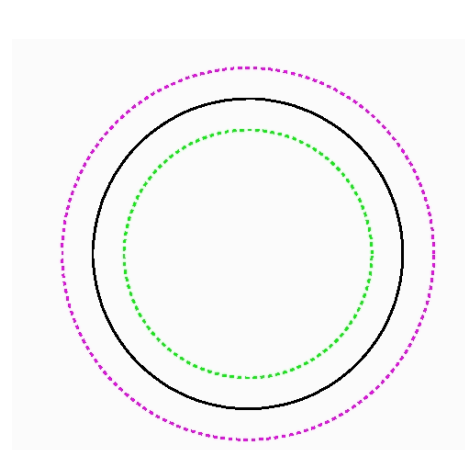
Jaderná hmota v základním stavu

Normální jaderná hmota (směs protonů a neutronů):

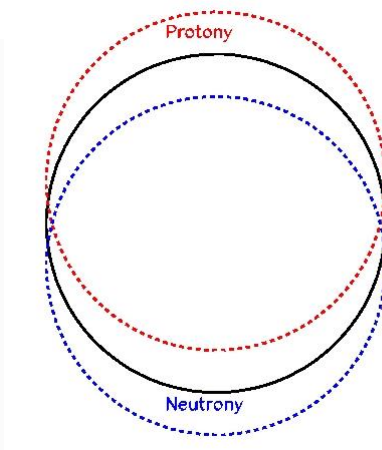
Informace o vazbové energii jaderné hmoty pro $T=0$ a $\rho=\rho_0 \rightarrow$ objemový člen ve Weizsäckerově formuli (kapkový model) určuje vazebnou energii $B/A = 16 \text{ MeV}$

Zkoumání stavové rovnice jaderné hmoty v základním stavu \rightarrow průběh vibrací jádra dán stlačitelností jaderné hmoty:

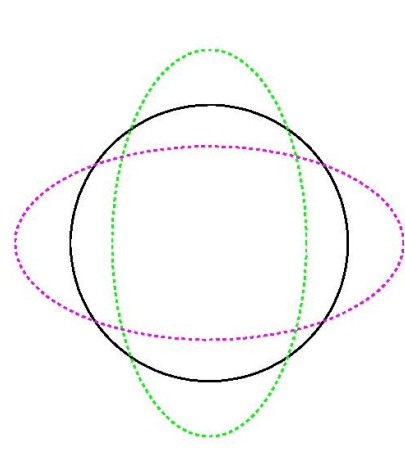
1. oscilace (zvětšení a zmenšení objemu) jádra
2. gigantické dipólové rezonance - vzájemný pohyb protonové a neutronové kapaliny
3. vibrace jádra



Oscilace



Gigantické dipólové rezonance



Vibrace

Popis jaderné hmoty - QCD výpočty na mříži vycházející z kvantové chromodynamiky

Závislost vlastností jaderné hmoty na poměru počtu protonů a neutronů (izotopickém složení)

Neutronová kapalina v základním stavu:

Výskyt v neutronových hvězdách.

Jaderná hmota s podivností v základním stavu:

Vliv podivnosti na vlastnosti jaderné hmoty - interakce mezi lambda částicemi - Brookhaven (systém složený z protonu, neutronu a dvou lambda)

Výskyt - možná uvnitř neutronových hvězd.



Zákony zachování energie a hybnosti

V kinematice jsou důležité právě tyto zákony zachování, které určují vztah mezi kinematickými veličinami. Pro izolovanou soustavu platí:

Zákon zachování celkové energie:

$$\sum_{k=1}^{n_r} E_k = \sum_{j=1}^{n_l} E_j$$

$$\sum_{k=1}^{n_r} (m_0 c^2 + E_{\text{KIN}})_k = \sum_{j=1}^{n_l} (m_0 c^2 + E_{\text{KIN}})_j$$

$$\sum_{k=1}^{n_r} (m_0 c^2)_k + \sum_{k=1}^{n_r} (E_{\text{KIN}})_k = \sum_{j=1}^{n_i} (m_0 c^2)_j + \sum_{j=1}^{n_i} (E_{\text{KIN}})_j$$

$$M_0^f c^2 + E_{\text{KIN}}^f = M_0^i c^2 + E_{\text{KIN}}^i$$

Nerelativistické přiblížení ($m_0 c^2 \gg E_{\text{KIN}}$): $E_{\text{KIN}} = p^2 / (2m_0)$

$$M_0^f c^2 = M_0^i c^2 \rightarrow M_0^f = M_0^i$$

Pro pružný rozptyl platí zároveň:

$$E_{\text{KIN}}^f = E_{\text{KIN}}^i \rightarrow \sum_{k=1}^{n_r} \left(\frac{p^2}{2m_0} \right)_k = \sum_{j=1}^{n_i} \left(\frac{p^2}{2m_0} \right)_j$$

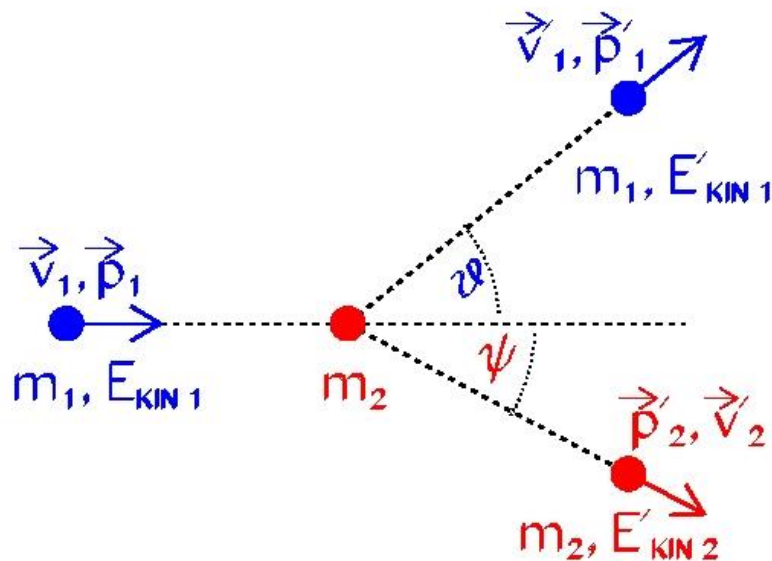
Ultrarelativistické přiblížení ($m_0 c^2 \ll E_{\text{KIN}}$): $E \approx E_{\text{KIN}} \approx pc$

$$E^f = E^i \rightarrow E_{\text{KIN}}^f = E_{\text{KIN}}^i \rightarrow \sum_{k=1}^{n_r} p_k c = \sum_{j=1}^{n_i} p_j c \rightarrow \sum_{k=1}^{n_r} p_k = \sum_{j=1}^{n_i} p_j$$

Zákon zachování celkové hybnosti:

$$\sum_{k=1}^{n_r} \vec{p}_k = \sum_{j=1}^{n_i} \vec{p}_j$$

Pro pružný rozptyl dostaneme:



Ze zákona zachování hybnosti:

$$0 = p_1' \sin \theta - p_2' \sin \psi \quad \text{a} \quad p_1 = p_1' \cos \theta + p_2' \cos \psi$$

použitím kosinové věty dospějeme k:

$$p_2'^2 = p_1'^2 + p_1^2 - 2p_1 p_1' \cos \theta$$

Nerelativistickém přiblížení:

Ze zákona zachování energie:

$$\frac{p_1^2}{2m_1} = \frac{p_1'^2}{2m_1} + \frac{p_2'^2}{2m_2}$$

Díky těmto rovnicím můžeme vždy eliminovat dvě proměnné. Většinou se neměří energie odražené částice $E'_{\text{KIN}2}$ a úhel odrazu ψ . S uvedených rovnic pak dostaneme vztah pro zbývající kinematické proměnné:

$$p_1'^2 \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) - p_1^2 \left(1 - \frac{m_1}{m_2}\right) - 2 \frac{m_1}{m_2} p_1 p_1' \cos \vartheta = 0$$

$$E'_{\text{KIN}1} \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) - E_{\text{KIN}1} \left(1 - \frac{m_1}{m_2}\right) - 2 \frac{m_1}{m_2} \sqrt{E_{\text{KIN}1} E'_{\text{KIN}1}} \cos \vartheta = 0$$

Ultrarelativistické přiblížení:

Ze zákona zachování energie:

$$p_1 = p_1' + p_2'$$

Z tohoto vztahu a vztahu pro zachování hybnosti dostaneme:

$$\cos(\text{theta}) \rightarrow 1 \text{ a tedy theta} \rightarrow 0$$



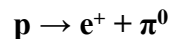
Zákony zachování kvantových čísel

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 **zákon zachování baryonového a leptonových čísel**

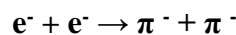
Baryonové číslo: pokud platí zákon jeho zachování striktně je proton (nejlehčí baryon) stabilní. Nebyl zatím pozorován rozpad:



Jednotlivá leptonová čísla – L_e , L_μ a L_τ

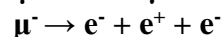
Nutnost zavedení zákona zachování leptonového čísla vyplývá z řady experimentálních faktů:

Nepozorování reakce:

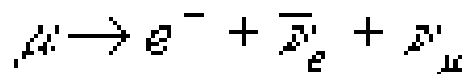


Zákon zachování jednotlivých leptonových čísel:

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.



Závěr

1. Řada experimentálních pozorování naznačuje existenci nesvítivé hmoty
2. Velká část této temné hmoty je nebaryonové povahy
3. Většinu temné baryonové hmoty lze pravděpodobně vysvětlit pomocí bílých, černých a hnědých trpaslíků

4. Velkorozměrová struktura vesmíru preferuje jako hlavní část nebaryonové temné hmoty chladnou temnou hmotu
5. Vysvětlení formování galaxií nejspíš potřebuje i menší množství horké temné hmoty
6. Výzkumy časového průběhu rozpínání vesmíru pomocí supernov typ Ia naznačují existenci temné energie
7. Současné hodnoty kosmologických parametrů jsou:

$$\Omega_{TOT} = 1.0 \pm 0.1$$

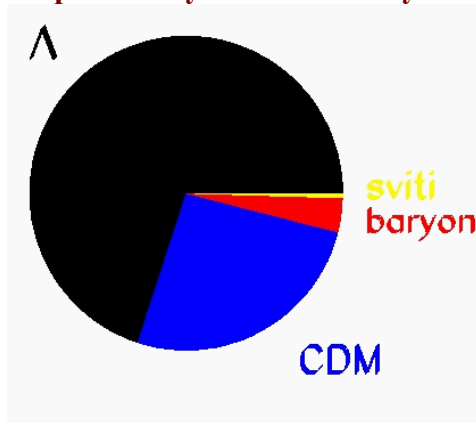
$$\Omega_{\Lambda} = 0.8 \pm 0.2 \quad \text{a} \quad \Omega_M = 0.35 \pm 0.10$$

$$\Omega_{CDM} = 0.30 \pm 0.10 \quad \Omega_{HDM} = 0.003 - 0.10 \quad \Omega_b = 0.045 \pm 0.010$$

(převzato z Particle Physics Booklet 2000)

$$\Omega_{\text{vid}} = 0.005 - 0.015$$

Přibližné zastoupení různých forem hmoty a energie ve vesmíru:



všechna



svítící

