

Jak se liší neutrína od antineutrín?

Prokázání odlišnosti reakce neutrín a antineutrín:

Částice (antineutrína) vznikající v reaktoru způsobují reakci:



Ale ne reakci:



Potvrzeno Davisem (1955). Horní limita v řádu procenta

Možnost, že se jedná o stejné částice - liší jen helicitou (**Majoranova neutrína**)

Dirackova neutrína – odlišnost neutrína a antineutrína

Majoranova neutrína – neutrino je totožné s antineutrinem → nezachování leptonového čísla

Potvrzení Majoranovi povahy neutrín → bezneutrinový beta rozpad:

Částice a antičástice – v čem se liší

Částice a antičástice se liší v nábojích:

1. Opačný elektrický náboj Q
2. Magnetický moment μ
3. Izospin I
4. Baryonové číslo B (baryony +1, antibaryony -1)
5. Leptonové číslo L (leptony +1, antileptony -1)
6. Podivnost S

a další

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

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

Hmotnost – zatím nenalezen rozdíl

Setkání částice s antičásticí → **anihilace** na fotony, další bozony a mezony

Produkce částic a antičástic:

Zákony zachování počtu leptonů a baryonů → produkce fermionů ve dvojici částice-antičástice.

Například “obrácená anihilace” – **kreace párů** elektron pozitron při průletu fotonů polem jádra



Srovnání Velkého a Malého třesku

Základní rozdíly:

1. Rozdíl **časové škály** - srážka jader trvá 10^{-22} s a Velký třesk po hadronizaci 10^{-6} s . Je to způsobeno působením gravitace, která zpomalovala expanzi při Velkém třesku. Ve vesmíru se stihly rozpadnout téměř všechny nestabilní částice.
2. Rozdíl **rozměrové škály** - horká a hustá oblast při srážce jader má velmi malý objem a expanduje do vakua. Fotony a leptony ji mohou bez interakce opustit a tak můžeme mít na rozdíl od Velkého třesku přímou informaci z fáze kvark-gluonového plazmatu.
3. Rozdíl **v baryonové hustotě** - vesmír má velmi malou baryonovou hustotu, atomové jádro ji má naopak vysokou.

Shodné rysy:

Oba jevy pozorujeme pomocí nepřímých signálů "dlouho" □ po jejich proběhnutí.

Velký třesk:

1. Expanze z hustého a horkého stavu hnaná hustotou energie.
2. Primordiální nukleosyntéza (chemické vymrznutí)
3. Oddělení (tepelné vymrznutí) fotonového záření

Malý třesk:

1. Expanze z hustého a horkého stavu hnaná hustotou energie

2. Primordiální hadrosyntéza (chemické vymrznutí)
3. Oddělení (tepelné vymrznutí) hadronů



Rozpad alfa

Vysoká hodnota vazebné energie částice $\alpha \rightarrow E_{\text{KIN}}$ dostatečná k úniku z jádra



Vztah mezi energií rozpadu a kinetickou energií částic α :

Energie rozpadu: $Q = (m_i - m_f - m_\alpha)c^2$

Kinetické energie jader po rozpadu (nerelativistické přiblížení):

$$E_{\text{KIN}f} = (1/2)m_f v_f^2 \quad E_{\text{KIN}\alpha} = (1/2) m_\alpha v_\alpha^2$$

Ze zákona zachování hybnosti:

$$m_f v_f = m_\alpha v_\alpha \rightarrow v_f = \frac{m_\alpha}{m_f} v_\alpha$$

($m_f \gg m_\alpha \rightarrow v_f \ll v_\alpha$)

Ze zákona zachování energie:

$$E_{\text{KIN}f} + E_{\text{KIN}\alpha} = Q \quad (1/2) m_\alpha v_\alpha^2 + (1/2)m_f v_f^2 = Q$$

Upravíme a dosadíme:

$$\frac{1}{2} m_f \left(\frac{m_\alpha}{m_f} v_\alpha \right)^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \left(\frac{m_\alpha}{m_f} + 1 \right) = E_{\text{KIN}\alpha} \frac{m_\alpha + m_f}{m_f} = Q$$

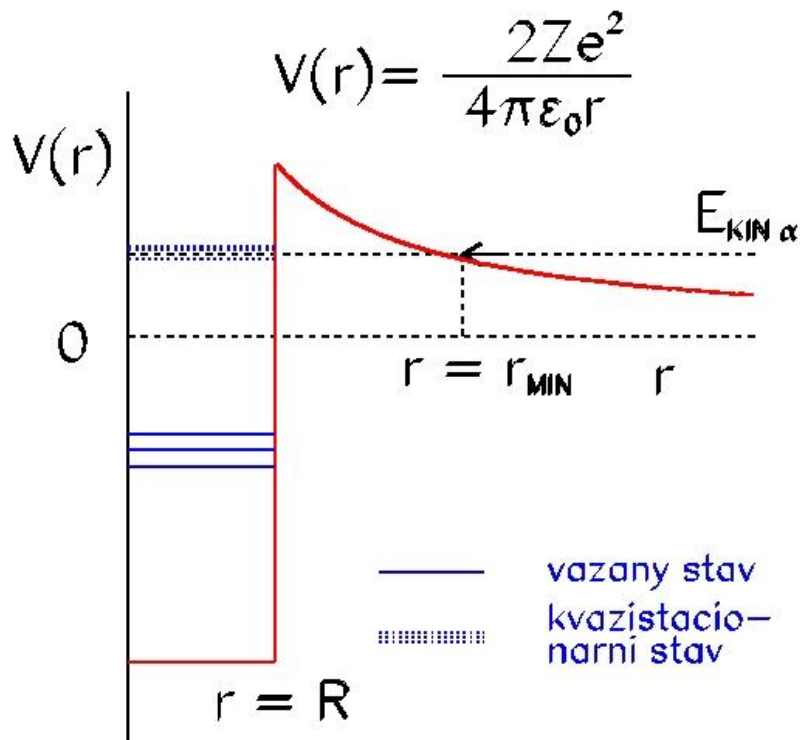
Kinetická energie částice α :

$$E_{\text{KIN}\alpha} = \frac{m_f}{m_\alpha + m_f} Q \approx \frac{A-4}{A} Q$$

Typická hodnota kinetické energie 5 MeV. Například pro ${}^{222}\text{Rn}$ je $Q = 5.587 \text{ MeV}$ a $E_{\text{KIN}\alpha} = 5.486 \text{ MeV}$.

Průnik bariérou:

Částice (Z_α, A_α) nalétávající na jádro (Z, A) - nutnost překonání **potenciálového bariéry**.



Pro coulombovskou barieru je nejvyšší bod v místě, kde začnou působit jaderné síly:

$$V_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_\alpha Z e^2}{r_0 (A_\alpha^{1/3} + A^{1/3})} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_\alpha Z e^2}{R}$$

Výška bariery je pro jádra s $A=200$ je $V_{CB} \approx 25$ MeV.

Problém úniku částice α z jádra přes potenciálovou barieru. \rightarrow možno pouze v kvantové fyzice.

Předpoklady teorie průniku částice α :

1. Částice α může existovat v jádře samostatně
2. Částice se neustále pohybuje a je držena v jádře potenciálovým valem
3. Existuje pravděpodobnost (velmi malá), že při nárazu na bariéru jí částice projde.

Pravděpodobnost rozpadu λ za jednotku času:

$$\lambda = \nu P$$

kde ν je počet nárazu na bariéru za jednotku času a P pravděpodobnost průchodu bariérou.

Předpokládáme, že částice α kmitá podél průměru jádra:

$$\nu = \frac{v}{2R} = \frac{v}{\sqrt{2m_\alpha R^2}} = \frac{v}{\sqrt{2E_{0\alpha} R^2}} \approx 10^{21}$$

Pravděpodobnost $P = f(E_{\text{KIN } \alpha} / V_{CB})$. K jejímu odvození je třeba použít kvantovou fyziku.

Odstředivá bariéra závisí na momentu hybnosti vyletující nebo nalétávající částice:

$$F = m_\alpha r \omega^2 = \frac{L^2}{m_\alpha r^3} = -\frac{\partial V_1}{\partial r}$$

$$V_1(r) = \frac{L^2}{2m_\alpha r^2}$$

klasicky: \rightarrow

$$V_1 = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2m_\alpha r^2}$$

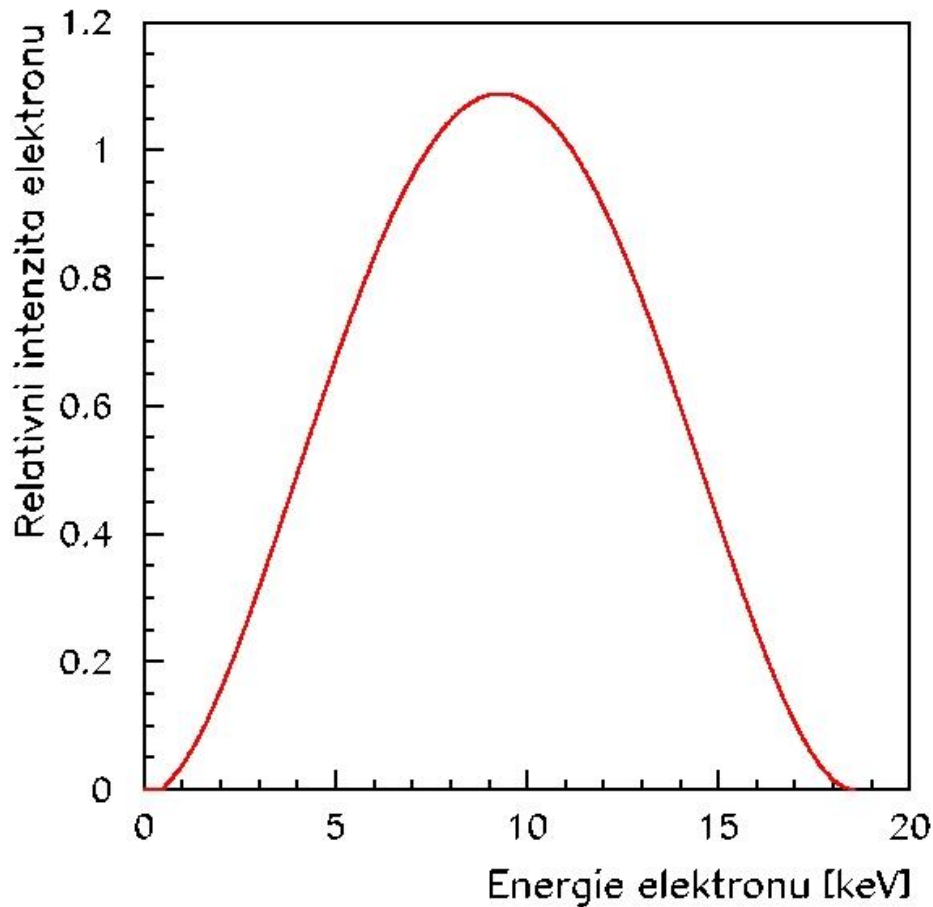
kvantově: $L^2 \rightarrow l(l+1)\hbar^2 \rightarrow$



Rozpad beta

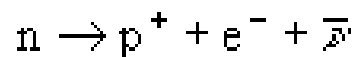
Jádra emitují elektrony:

1. Spojité rozdělení energie elektronů (očekávalo se diskrétní – diskrétní hodnoty rozdílu energie – hmotnosti - mateřského a dceřiného jádra). Maximální $E_{\text{KIN}} = (M_i - M_f - m_e)c^2$.



Schematický průběh závislosti $N_e = f(E_e)$ v rozpadu beta

2. Moment hybnosti – spiny mateřského a dceřiného jádra se většinou liší o 0 nebo o 1. Spin elektronu je však $1/2 \rightarrow$ poločíselná změna
 \rightarrow postulování existence další částice – **neutrino**.



$m_n > m_p + m_e \rightarrow$ samovolný proces

rozpad neutronu $\tau \approx 900$ s. (silná $\approx 10^{-23}$ s, elmg $\approx 10^{-16}$ s) \rightarrow rozpad způsoben slabou interakcí
opačný proces proběhne samovolně pouze v jádře

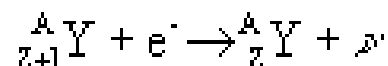
Proces beta – vznik elektronu (pozitronu) nebo záchyt elektronu z atomového obalu doprovázený vznikem antineutrina (neutrino) v jádře. Z se mění o jedničku. A se nemění.

Podle hmotnosti atomu s nábojem Z dostaneme tři případy:

1. Hmotnost je větší než hmotnost atomu s nábojem Z+1 \rightarrow **elektronový rozpad** – energie rozpadu se rozdělí na elektron a antineutrino, v jádře se neutron přemění na proton:



2. Hmotnost je menší než hmotnost atomu s nábojem Z+1, je ale větší než $m_{Z+1} - 2m_e \rightarrow$ **záchyt elektronu** – energie se rozdělí na energii neutrino a vazbovou energii elektronu. Proton se přemění na neutron:



3. Hmotnost je menší než $m_{Z+1} - 2m_e \rightarrow$ **pozitronový rozpad** – část energie rozpadu překračující $2m_{ec}^2$ se rozdělí na kinetickou energii neutrina a pozitronu. Proton se přemění na neutron:



Na spojité spektrum se nakládají :

1. **Augerovy elektrony** – elektrony, kterým se předá energie získaná záchytem elektronu, tyto pak vyletí místo rentgenov-ského fotonu. Jeho energie je pouze několik keV \rightarrow velmi snadno je absorbován \rightarrow složitá detekce
2. **Konverzní elektrony** – přímé předání energie vzbuzeého jádra elektronu v atomovém obalu

Rozpad beta může jít na různé hladiny dceřiného jádra, kromě základní na vzbuzeé. Vzbuzeé dceřiné jádro se pak zbavuje energie rozpadem gama.

Některá mateřská jádra se mohou rozpadat dvěma způsoby buď elektronovým rozpadem nebo záchytem elektronu na dvě různá jádra.

Při zkoumání beta rozpadu učiněn objev **nezachování parity** v procesech spojených s slabými interakcem.

Neutrino – částice interagující pouze slabě, velmi malý účinný průřez. Detekce pomocí inverzního rozpad beta:



Určování hmotnosti neutrina z tvaru konce elektronového spektra

Můžeme vyjádřit funkci, související s závislostí počtu elektronů na jejich energii:

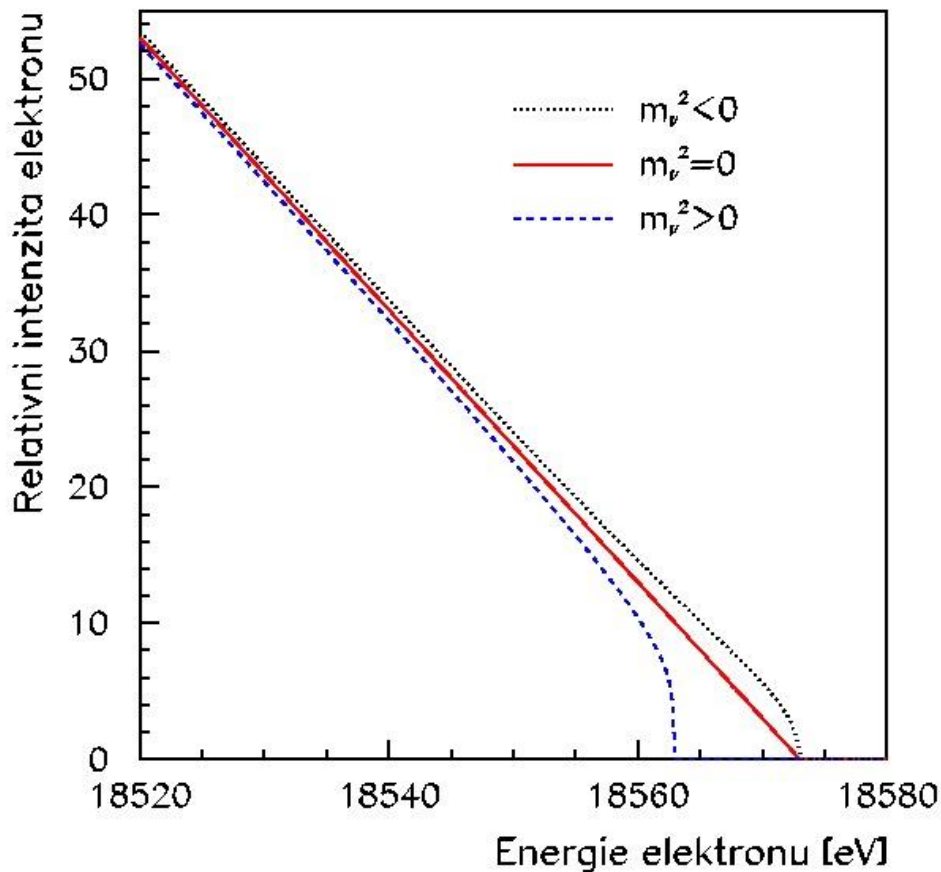
$$\sqrt{\frac{N(E_e)}{F^*(Z, E_e)}} = \text{konst} \cdot (E_{\text{MAX}} - E_e)$$

kde $N(E_e)$ – počet elektronů, $F^*(Z, E_e)$ – Fermiho funkce, obsahující korekci na coulombovské pole jádra i atomového obalu. V případě nenulové hmotnosti neutrina :

$$E_{\text{MAX}} = Q - m_{\nu}c^2.$$

(Q – energie rozpadu). Vynesení této závislosti do grafu se nazývá:

Fermiho graf – možnost přesného určení maximální energie (energie rozpadu) – případně hmotnosti neutrina. V dnešní době je takto určovaná horní hranice pro hmotnost neutrina pod 10 eV.



Fermiho graf pro rozpad tritia ${}^3\text{H}$, které se nejčastěji využívá k určování hmotnosti neutrina



Rozpad gama

Po rozpadu alfa nebo beta \rightarrow dceřina jádra ve vzbuzeném stavu \rightarrow vyzáření kvanta gama \rightarrow rozpad gama:

$$E_\gamma = h\nu = E_i - E_f$$

Přesněji (započtení odrazu jádra):

Zákon zachování hybnosti $\rightarrow h\nu/c = M_j v$

$$E_i - E_f = h\nu + \frac{1}{2}M_j v^2 = h\nu + \frac{1}{2M_j} \left(\frac{h\nu}{c} \right)^2$$

Zákon zachování energie \rightarrow

$$E_f = h\nu = E_i - E_f - \frac{h^2 \nu^2}{2M_j c^2} = E_i - E_f - \Delta E_R$$

Kde ΔE_R je energie odrazu.

Šířka hladiny Γ je s její dobou života spojena Heisenbergovým principem neurčitosti: $\Gamma\tau \approx \hbar$

A tedy $\Gamma \approx \hbar/\tau \sim$ neurčitost v $(E_i - E_f)$.

Jádro může být vybudeno stejnou E_γ jakou vyzáruje. Při uplatnění odrazu jádra musí platit (k odrazu dojde i při absorpci):

$$\Gamma \geq 2 \cdot \Delta E_R$$

aby mohlo nastat rezonanční pohlcení. To platí pro volný atom.

Přechod $E_\gamma = 14$ keV u izotopu ${}^{57}\text{Fe}$. Pro hladinu $\tau \sim 10^{-7}$ s $\rightarrow \Gamma \sim 10^{-8}$ eV a $\Delta E_R \sim 10^{-3}$ eV. $\rightarrow \Gamma \ll \Delta E_R$

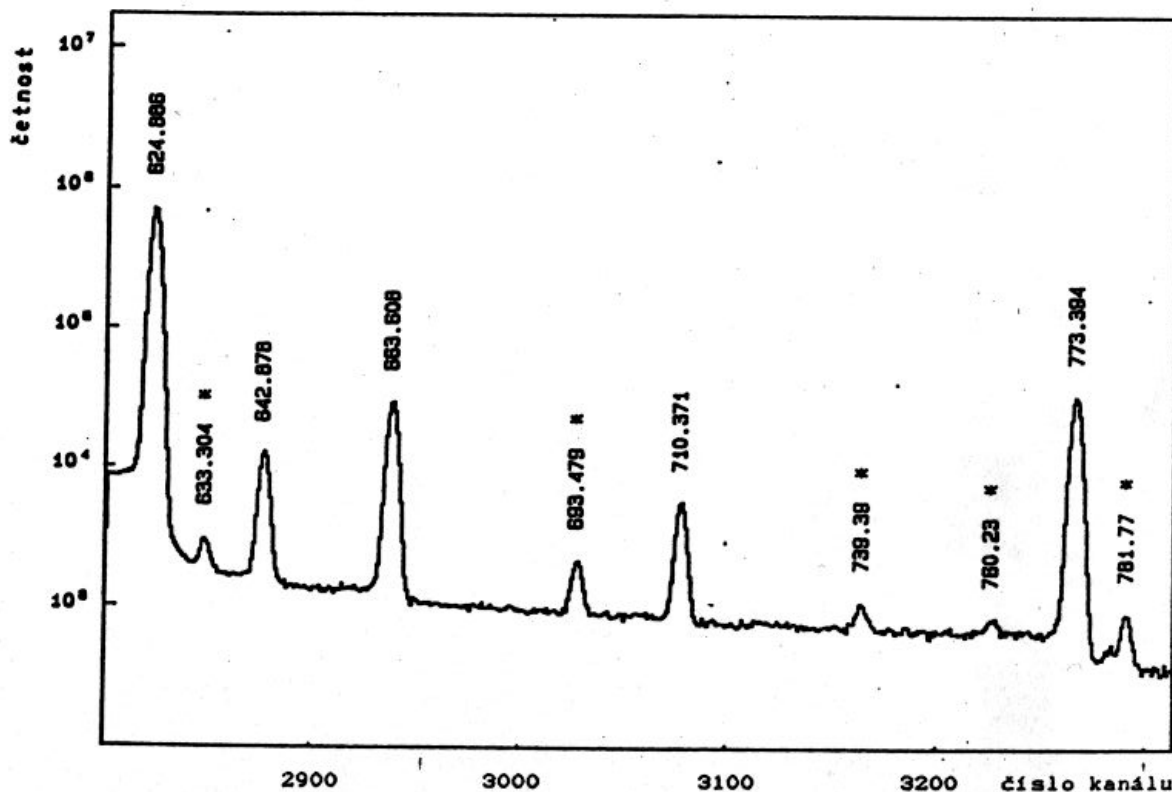
Atom v krystalové mříži \rightarrow hybnost se předává celé mříži \rightarrow malý přenos energie \rightarrow možnost rezonanční absorpce – **Mössbauerův jev**.

Díky **Mössbauerovu jevu** velmi přesné měření energií a šířek hladin. Mame:

- 1) Zdroj kvant gama
- 2) Absorber, který se může pohybovat
- 3) Detektor záření gama

Díky **Dopplerovu jevu** se s rychlostí absorberu mění i energie kvant gama o $\Delta E = E \cdot v/c$, které je schopen absorbovat → lze proskanovat Mössbauerovi linie.

Doba života hladin většinou velmi krátká ($< 10^{-7}$ s – elektromagnetická interakce je mnohem silnější než slabá) → doba života předchozího rozpadu beta a alfa je delší → časový průběh rozpadu gama kopíruje průběh předchozího rozpadu.



Příklad části spektra záření gama ze zdroje $^{169}\text{Yb} \rightarrow ^{169}\text{Tm}$

Existují i delší až **velmi dlouhé doby života** vzbuzených hladin - **izomerní stavy**.

Pravděpodobnost (intenzita) přechodu mezi energetickými hladinami závisí na spinech a paritách počátečního a koncového stavu. Zjednodušeně intenzivnější jsou přechody, při kterých je změna spinu menší.

Systémy vzbuzených hladin, přechodů mezi nimi a jejich charakteristiky se zakreslují do **schématu rozpadu**.

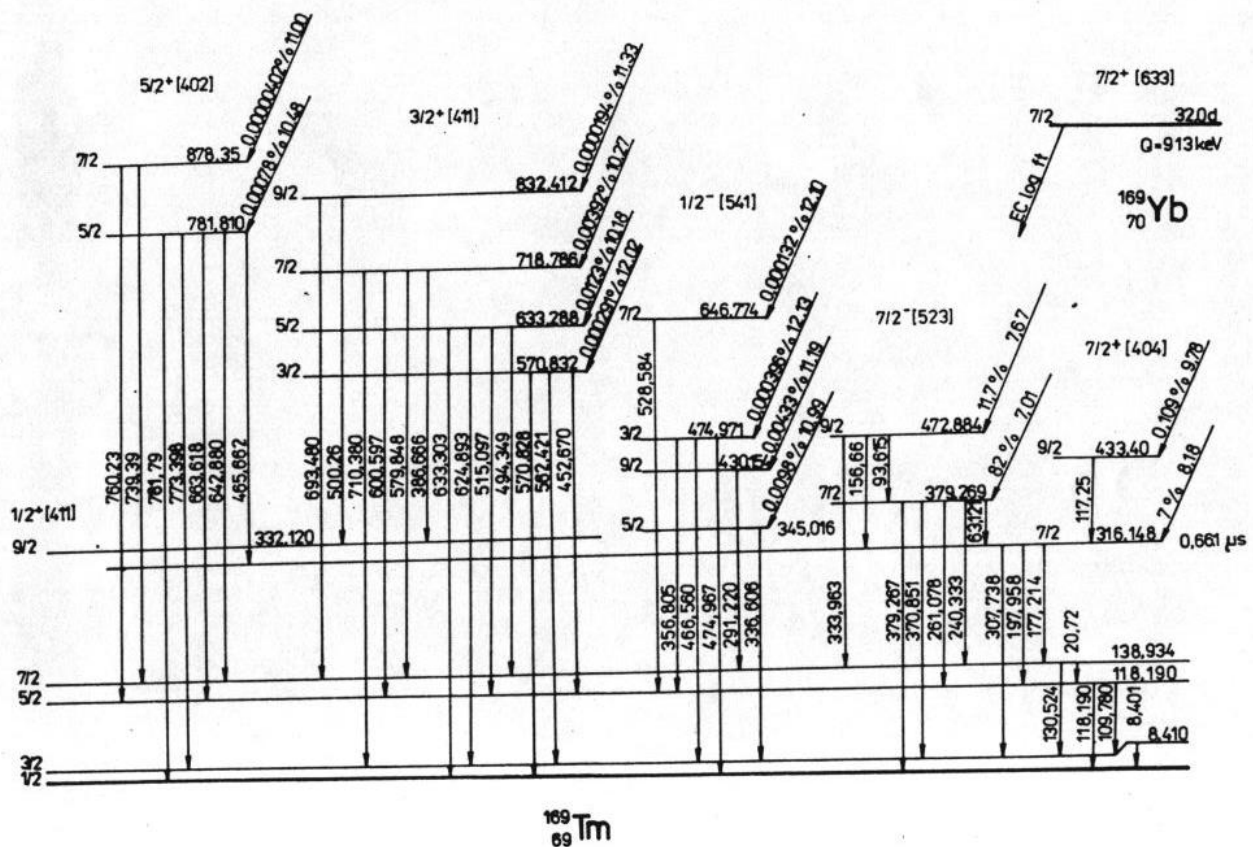


Schéma rozpadu $^{169}\text{Yb} \rightarrow ^{169}\text{Tm}$

Vnitřní konverze

Přímé předání energie vzbuzeného jádra elektronu v atomovém obalu (coulombovská interakce mezi jádrem a elektrony):

Energie emitovaného elektronu:

$$E_e = E_\gamma - B_e$$

kde E_γ je excitační energie jádra, B_e vazebná energie elektronu

Alternativní proces k emisi gama. Celková pravděpodobnost přechodu λ je:

$$\lambda = \lambda_\gamma + \lambda_e$$

Zavádí se konverzní koeficienty α :

Platí:

$$dN_e/dt = \lambda_e N \text{ a } dN_\gamma/dt = \lambda_\gamma N$$

a tedy:

$$N_e/N_\gamma = \lambda_e/\lambda_\gamma$$

a

$$\lambda = \lambda_\gamma (1 + \alpha) \text{ kde } \alpha = N_e/N_\gamma$$

Označme $\alpha_K, \alpha_L, \alpha_M, \alpha_N, \dots$ konverzní koeficienty příslušné slupky elektronového obalu K, L, M, N, \dots :

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \alpha_N + \dots$$

Konverzní koeficienty klesají s E_γ a rostou se Z jádra.

Přechody $I_i = 0 \rightarrow I_f = 0$: pouze vnitřní konverze ne gama

Místo uvolněné po elektronu vyletujícím při vnitřní konverzi se zaplní jiným elektronem s vyzářením rentgenova záření s energií:

$$E_\gamma = B_{ef} - B_{ei}$$

charakteristické rentgenovské záření příslušné slupky.

Energie uvolněná při zaplnění volného místa elektronem se může zase předat přímo jinému elektronu a vyzáří se místo rentgenova záření Augerův elektron.

Párová vnitřní konverze – $E_\gamma > 2m_e c^2$ → může se vytvořit pár elektron pozitron → nesouvisí s elektronovým obalem → pravděpodobnost roste s E_γ .

.-.-.-

Spiny jader

Protony a neutrony mají spin 1/2. Složením spinů a orbitálních momentů hybnosti dostaneme **celkový moment hybnosti jádra I**, který se označuje jako **spin jádra**

Orbitální momenty nukleonu mají celočíselné hodnoty →

1. jádra se **sudým A** – celočíselný spin
2. jádra s **lichým A** – poločíselný spin

$$\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p}$$

Klasicky je moment hybnosti definován . V kvantové fyzice příslušným operátorem, který splňuje komutační relace:

$$\hat{l} \times \hat{l} = i\hbar \hat{l}$$

Platí tato pravidla:

1. Vlastní hodnoty \hat{l}^2 jsou $\hat{l}^2 = I(I-1)\hbar^2$, kde číslo $I = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2 \dots$ velikost momentu hybnosti je $|I| = \hbar [I(I-1)]^{1/2}$
2. Z komutačních relací plyne, že složky vektoru \hat{l} nemůžeme jednotlivě pozorovat. Současně je možno pozorovat \hat{l}^2 a jednu složku – např. I_z .
3. Složky (průměty spinu) mohou nabývat celkem $2I+1$ hodnot $I_z = \hbar, (I-1)\hbar, (I-2)\hbar, \dots, -(I-1)\hbar, I\hbar$.
4. Jako moment hybnosti se udává číslo $I = \max(I_z)$. Spin odpovídající orbitálnímu momentu nukleonů je pouze celočíselný: $I \equiv l = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ (s, p, d, f, g, h, ...), spin nukleonu je $I \equiv s = 1/2$.
5. Skládání pro jednotlivý nukleon $\hat{j} = \hat{l} + \hat{s}$ vede na $j = l \pm 1/2$.

Skládání pro soustavu více částic probíhá různě.

Extrémní případy:

$$\hat{I} = \hat{L} + \hat{S}, \hat{L} = \sum_i \hat{l}_i, \hat{S} = \sum_i \hat{s}_i$$

LS-vazba, kde

$$\hat{I} = \sum_i \hat{j}_i$$

jj-vazba, kde



Srážkový diagram hybností

Zase předpokládáme, že terčové jádro je v klidu a nerelativistické přiblížení. Zapišme vztahy mezi hybnostmi částic před a po srážce:

$$\vec{p}'_1 = \vec{p}'_1 + \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{p}_1 \rightarrow \vec{v}'_1 = \vec{v}'_1 + \vec{v}_{CM}$$

$$\vec{p}'_2 = -\vec{p}'_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \vec{p}_1 \quad \rightarrow \quad \vec{v}'_2 = \vec{v}'_2 + \vec{v}_{CM}$$

(Sečteme-li tyto rovnice, dostaneme zákon zachování hybnosti pro zkoumaný případ:

$$\vec{p}_1 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2)$$

Tyto vztahy jsou výchozími rovnicemi pro konstrukci vektorového diagramu hybnosti:

1. Hybnost \vec{p}_1 dopadající částice zobrazíme orientovanou úsečkou \overline{AC} .
2. \overline{AC} Rozdělíme úsečku na dvě části v poměru $\overline{AO} : \overline{OC} = m_1 : m_2$
3. Kolem bodu O opíšeme kružnici procházející bodem C. Její poloměr je roven

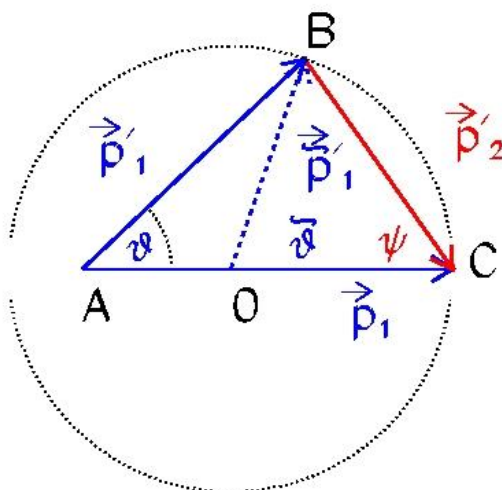
$$\vec{p} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \vec{p}_1$$

velikosti \vec{p} v těžišťové soustavě

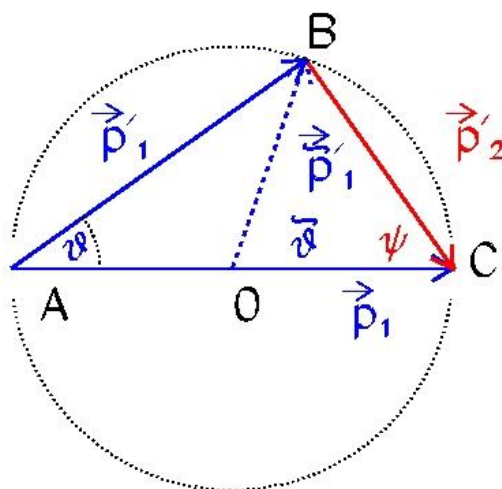
Kružnice je geometrickým místem vrcholů B vektorového trojúhelníku hybností ABC (znázorňuje

zákon zachování hybnosti), jehož strany \overline{AB} a \overline{BC} představují možné hybnosti částic po srážce v laboratorní soustavě.

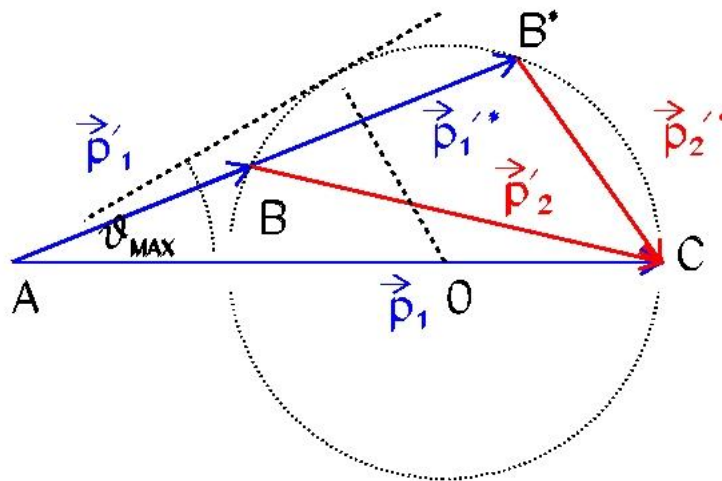
$m_1 < m_2$:



$m_1 = m_2$:



$m_1 > m_2$:

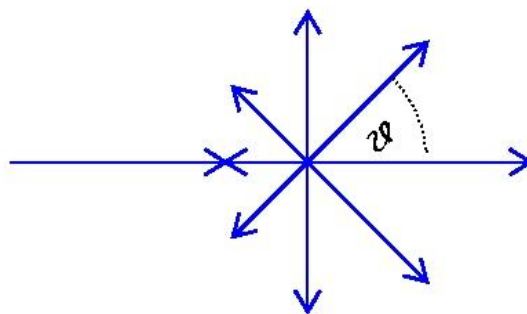


V závislosti na poměru hmotností částic se může bod A nacházet uvnitř dané kružnice, na ní nebo vně.

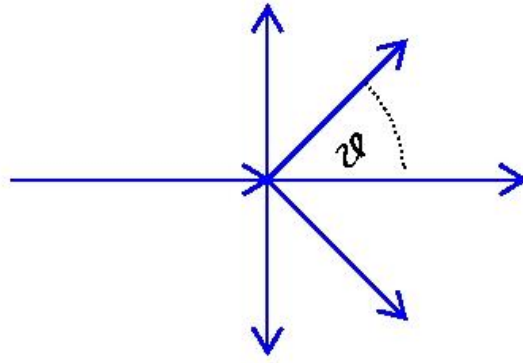
Úhel rozptylu θ v těžišťové soustavě může nabývat všechny možné hodnoty od 0 do π . Dovolené hodnoty úhlu rozptylu θ v laboratorní soustavě a úhlu odrazu ψ v laboratorní soustavě jsou v tabulce:

$m_1 < m_2$	$m_1 = m_2$	$m_1 > m_2$
$v_1 > v_{CM/2}$	$v_1 = v_{CM/2}$	$v_1 < v_{CM/2}$
$\theta + \psi > \pi/2$	$\theta + \psi = \pi/2$	$\theta + \psi < \pi/2$
$\theta = \langle 0, \pi \rangle$	$\theta = \langle 0, \pi/2 \rangle$	$\theta = \langle 0, \theta_{MAX} \rangle$
$\psi = \langle 0, \pi/2 \rangle$	$\psi = \langle 0, \pi/2 \rangle$	$\psi = \langle 0, \pi/2 \rangle$

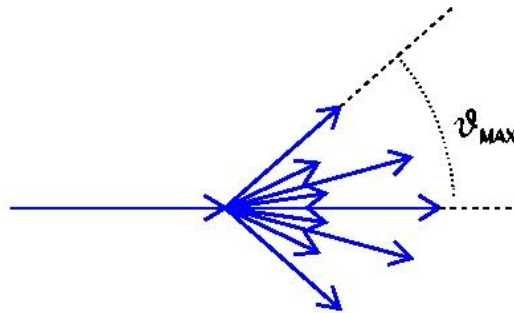
$m_1 < m_2$:



$m_1 = m_2$:



$m_1 > m_2$:



V laboratorní soustavě:

$m_1 < m_2 \rightarrow$ dopadající částice rozptýleny do obou polokoulí

$m_1 = m_2 \rightarrow$ dopadající částice rozptýleny do přední polokoule

$m_1 > m_2 \rightarrow$ dopadající částice rozptýleny do přední polokoule do kužele s vrcholovým úhlem $2\theta_{MAX}$ (osou kužele je směr dopadajících částic) a platí: $\sin(\theta_{MAX}) = m_2/m_1$

Vztah mezi úhly dopadu a odrazu v laboratorní a těžišťové soustavě (připomínka předpokladu pružného rozptylu):

$$\mu' = \frac{\pi - \tilde{\vartheta}}{2} \quad \text{tg } \vartheta = \frac{\sin \tilde{\vartheta}}{\cos \tilde{\vartheta} + (m_1/m_2)}$$

Vektorový diagram hybností poskytuje veškerou informaci, kterou lze získat z pouhých zákonů zachování hybností a energií.

Ukazuje možné varianty rozletu částic, nic neříká o pravděpodobnostech realizace jednotlivých možných variant.

$$\cos \vartheta = \frac{\cos \tilde{\vartheta} + \mu}{(1 + 2\mu \cos \tilde{\vartheta} + \mu^2)^{1/2}}$$



Standardní model hmoty a interakcí

Částice a interakce standardního modelu:

I. Částice hmoty – fermiony a antifermiony ($s=1/2$):

1. tři generace leptonů (e, ν_e), (μ, ν_μ), (τ, ν_τ)
2. tři generace kvarků (d, u), (s, c), (b, t)

a jejich antičástice

II. Částice interakcí – kalibrační bozony ($s=1$):

1. elektroslabý boson s $m_0 = 0$ (foton γ)
2. tři elektroslabé bosony s $m \neq 0$ (W^+ , W^- , Z^0)
3. osm barevných gluonů

III. Higgsovi bosony (s=0)

Interakce:

1. Elektromagnetická interakce fotonů
2. Interakce bosonů W^+ , W^- , Z^0
3. Silná interakce gluonů s gluony a kvarky

Náboje jednotlivých interakcí:

Silná – barva (červená, zelená, modrá)

Elektromagnetická – elektrický náboj

Slabá – chuť v 6 typech (u, d, s, c, b, t, pro kvarky e, ν_e , μ , ν_μ , τ , ν_τ pro leptony)

Higgsův boson – Higgsův mechanismus – dává hmotnost původně nehmotným kalibračním bosonům W^+ , W^- , Z^0

Kalibrační symetrie \rightarrow vazbové konstanty interakcí se mění s předávaným impulsem:

Elektroslabá interakce: vazbová konstanta stoupá

Silná interakce: vazbová konstanta klesá

Vyrovnaní při energii 10^{19} GeV

Popisuje velmi přesně téměř všech hny experimentální měření v mikrosvětě



Struktura hadronů

Na strukturu hadronů ukazují:

1) **Rozptylové experimenty** – rozložení náboje pomocí vysokoenergetických elektronů (neinteragují silně) \rightarrow 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 rozmísťují v rovině charakterizované izospinem a hypernábojem

Mezonový oktet:

Dublet ká (Izospin = 1/2)

$$K^0 \quad K^+ \quad S = 1$$

Triplet pí (Izospin = 1)

$$\pi^- \quad \pi^0 \quad \pi^+ \quad S = 0$$

Dublet antiká (Izospin = 1/2)

$$K^- \quad \bar{K}^0 \quad S = -1$$

Singlet éta (Izospin = 0)

$$\eta \quad S = 0$$

$$\& \text{nbsp}; \quad I_z = -1 \quad -1/2 \quad 0 \quad +1/2 \quad 1$$

Baryonový oktet:

Dublet nukleonů (Izospin = 1/2)

$$n \quad p^+ \quad S = 0$$

Triplet sigma (Izospin = 1)

$$\Sigma^- \quad \Sigma^0 \quad \Sigma^+ \quad S = -1$$

Dublet ksí (Izospin = 1/2)

$$\Xi^- \quad \Xi^0 \quad S = -2$$

Singlet lambda (Izospin = 0)

$$\Lambda \quad S = -1$$

Vysvětlení pomocí existence tří částic – **kvarků** (vlastně šesti – tří kvarků a tří antikvarků), ze kterých se elementární částice skládají.

Zvláštní vlastnosti: zlomkové náboje, nevyskytují se volně.



Nejmohutnější exploze ve Vesmíru?

aneb

záhada vzniku záblesků gama

Objev záblesků záření gama mají na svém kontě špionážní družice. Byly objeveny družicemi Vela, které hledaly testy jaderných bomb. Ukázalo se, že jde o jedny z nejzáhadnějších jevů ve vesmíru a jejich původ není úplně objasněn ani v současnosti. V posledních letech se podařilo identifikovat několik optických protějšků těchto záblesků gama a potvrdit, že alespoň část z nich je v obrovských vzdálenostech. Jedná se tak o jedny z energetičtějších dějů ve vesmíru a původce záblesku gama v jeho průběhu vyzářuje energii, která je srovnatelná s energií vyzářovanou všemi ostatními objekty v naší pozorované části vesmíru. Předpokládá se, že původ záblesků gama je spojen s objekty, které

obsahují hmotu s velmi vysokou hustotou. Mohly by to být vybuchující supernovy, neutronové hvězdy nebo černé díry. Přednáška je věnována přehledu našich současných experimentálních znalostí o záblescích gama a rozboru hypotéz věnovaných jejich původu.



Je kosmologie mytologií? aneb

teorie a hypotézy o vzniku vesmíru z pohledu experimentálního fyzika

Jak vypadá svět, ve kterém žijeme? Jak a kdy vznikl? Jak se vyvíjí? Nebo existuje věčně? To jsou otázky, které zajímají lidstvo už od rozbřesku jeho existence a mají velmi hluboký filosofický dopad. V posledních desetiletích pak začíná na tyto otázky nacházet relevantní odpovědi, tak jak se daří postupovat v poznávání hlubin vesmíru. Objevila se velká řada i velmi exotických představ popisovaných i velmi exotickými názvy: inflační vesmír, srážka brán, ekpyrotický vesmír či temná hmota a temná energie. V několika posledních letech došlo k dalšímu velkému skoku v kvalitě znalostí o původu a vývoji námi pozorovaného vesmíru. Je to spojeno hlavně s obrovským pokrokem v měření vlastností reliktního záření a těch nejvzdálenějších objektů ve vesmíru. Podařilo se tak získat řadu velmi přesných údajů o parametrech, které popisují vývoj a stavbu našeho vesmíru. Jaké jsou současné hypotézy a teorie, které popisují stavbu a vývoj vesmíru, na jakých experimentálních údajích jsou založeny, jaká měření potřebují ke svému prokázání i jaké jsou jejich filosofické dopady, se snaží odpovědět tato přednáška.



Je svět složen ze strun? aneb cesta k jednotnému popisu hmoty a interakcí

V posledních desetiletích se zdá, že by fyzikové mohli být velmi blízko svého odvěkého snu - vypracování jednotné teorie popisu hmoty a sil, které vytvářejí náš svět. Horkým kandidátem na takovou teorii jsou tzv. strunové teorie. Přednáška je věnována dosavadním úspěchům experimentální i teoretické fyziky při hledání jednotného popisu hmoty a sil. Podává přehled o současném popisu čtyř známých sil: silné (pomocí kvantové chromodynamiky), elektromagnetické a slabé (sjednocená teorie elektroslabých interakcí) a gravitační (obecná teorie relativity) a věnuje se různým možnostem jejich zahrnutí do jednotného popisu sil. Značný prostor je věnován přehledu hypotéz využívajících popisu pomocí "strun" a hlavně možnostem jejich budoucího experimentálního potvrzení (či vyvrácení). Navrhované experimenty jsou velmi náročné, protože hledané jevy nastávají buď při velmi vysokých energiích nebo jen velmi vzácně, a jejich provedení bude velmi obtížné.

.....

Reliktní neutrina.

Pocházejí z počátku velkého třesku $t \sim 1s$ ($t \sim 300\,000$ let pro reliktní fotony), nynější teplota neutrin je $T \approx 1.9$ K (fotony $T \approx 3.1$ K)

Pro energie $E > 1$ MeV se nachází různé typy neutrin v rovnováze:



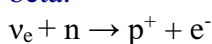
kde $i = e, \mu, \tau$

pro nižší energie neutrina neinteragují s ostatní hmotou - vymrzají

Velmi nízká energie \rightarrow velké problémy s detekcí

Možnosti detekce (zatím jen v úvahách):

1. **Procesy, které nepotřebují energii** – neutrina iniciuje rozpad jádra rozpadající se rozpadem beta:



Energie elektronu > energie rozpadu jádra → pík ve spektru elektronů za koncem Fermiho grafu (velmi slabý).

Měření jako při určování hmotnosti neutrin – nutnost najít vhodná jádra a přechody, aby počet rozpadů díky reliktním neutrinům nebyl zanedbatelný. Potřeba zlepšit parametry elektronových spektrometrů. Problémy s pozadím.

2. **Interakce urychlených částic** – energii dodají urychlené částice. Výběr vhodných parametrů pro dostatečnou pravděpodobnost interakce – problém s pozadím, potřeba vysoká intenzita a stabilita svazku urychlovače.
3. **Interakce velmi energetických neutrin kosmického záření:** E_ν taková, aby při srážce s reliktním neutrinem byla v těžišti energie rovna klidové hmotnosti Z bosonu $M_Z = 100 \text{ GeV}$ ($10^{12} - 10^{16} \text{ GeV}$ – skutečná hodnota závisí na hmotnosti neutrina) → dojde k rezonančnímu zvýšení interakce s reliktními neutrinami → minimum v energetickém spektru vysokoenergetických kosmických neutrin

Budoucí informace z neutrin:

Informace o stavu vesmíru 1s po velkém třesku v době jejich vymrznutí



Výbuch supernovy

Konečné stádium hmotné hvězdy – kolaps a výbuch supernovy

Velká část energie se uvolní ve formě neutrin ve dvou fázích:

1. Počátek – při vzniku neutronů elektronovým záchytem pouze elektronová neutrina: $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
2. Všechny druhy neutrin a antineutrin se statistickým zastoupením (1/6 na jeden typ) se střední energií 10 – 15 MeV. Energetické spektrum → Fermiho rozložení $kT \approx 3 - 6 \text{ MeV}$

Pozorování:

Supernova SN1987A

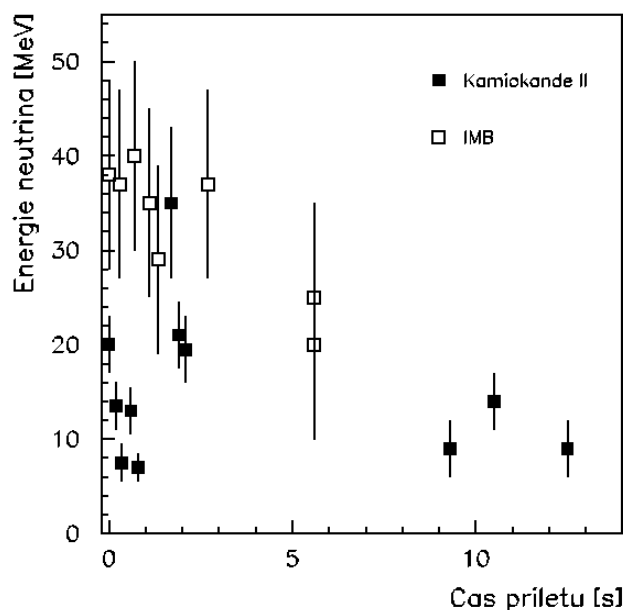
Vzdálenost 150 000 svět. let

Detekce neutrin experimentem IMB, Kamiokande, Baksan a Mt. Blank

Souhlas mezi experimenty

Energie neutrin $(3-6) \cdot 10^{45} \text{ J}$

Trvání neutrinového pulsu 13 s



Vztah mezi energií neutrina a dobou jeho příletu

Dosavadní informace (supernova SN1987A):

1. Potvrzení vzniku neutrin
2. Řádový souhlas s předpoklady

3. Blížkost rychlosti neutrin rychlosti světla, omezení na klidovou hmotnost neutrina
4. Určena limita pro dobu života neutrina

Možná budoucí informace (čekáme na blízkou supernovu):

1. Potvrzení modelů výbuchu supernovy
2. Chování horké a velmi stlačené hmoty
3. Pozorování supernov zastíněných galaktickou hmotou



Slabě interagující částice

Supersymetrické teorie → řada částic. Nejlehčí → stabilní → kandidát na původce temné hmoty
Fotina (supersymetrický partner fotonu) nebo **neutralina** (lineární kombinace supersymetrických partnerů Higgsova bosonu a neutrálních kalibračních bosonů - **higgsina, fotina a Zina**) - částice předpovídané nejjednoduššími **supersymetrickými rozšířeními Standardního modelu**

Hmotnosti $\sim 10 - \sim 100$ GeV, snaha o produkci na největších urychlovačích

Pokusy o detekci vesmírných pomocí rozptylu na jádrech → pozorujeme nabitě odražené jádro a jeho elmg interakci s prostředím:

1. Polovodičové detektory
2. Scintilační detektory
3. Detekce vznikajících vibrací (fononů)

Odstranění pozadí → podzemní experimenty

rozšíření standardního modelu:

Axiony - velmi lehké částice (až 10^{-6} eV) předpovídané rozšířeními Standardního modelu zahrnující vznik narušení CP symetrie

Primordiální axiony 10^8 cm³ interagují 10^{12} slaběji než normální slabou interakcí (jinak by ovlivnily dobu života hvězd)

Rozpad v silném magnetickém poli na dva fotony v mikrovlném oboru. Experimenty v podzemí - využití supravodivých magnetů

Těžší axion → kratší doba života - neexistence mikrovlného pozadí s galaktického axionového halo → $m < 2$ eV

Další hypotetické částice:

Těžká neutrina - vlastnosti neutrin, hmotnost eV - MeV

Vlastnost všech slabě interagujících částic: anihilace do normálních částic. Koncentrují se v centrech hvězd a planet → zvýšená anihilace → produkce vysokoenergetických neutrin

Jiné exotické objekty:

Primordiální černé díry: hmotnost $> 10^{9-12}$ kg jinak by se stačily vypařit. Počet omezen nepozorováním záblesků jejich vypařování.

Primordiální podivnůstky ("strangelets") - objekty složené z kvark-gluonového plazmatu s podivností. Počet omezen nepozorováním přeměny neutronových hvězd na podivné

Topologické poruchy - vznikají během narušení supersymetrie během rozpínání vesmíru (nenastává všude ve stejný okamžik)

Monopoly - v průběhu Velkého třesku vznik velkého počtu - v následné inflaci obrovské zředění

Dyony - monopoly s elektrickým nábojem

Vesmírné struny či stěny - vícerozměrné struktury. Silná gravitační přitažlivost. Pomáhali by při vytváření velkorozměrové struktury. Vyzařují energii ve formě gravitačních vln.



Supersymetrické teorie

Doposud omezení symetrií na transformace podobných druhů částic:

1. rotace → změna projekci 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 $E \sim 10^{19} \text{ GeV}$, odpovídá rozměrové škále $\sim 10^{-35} \text{ m}$ (Planckův rozměr):

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

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

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

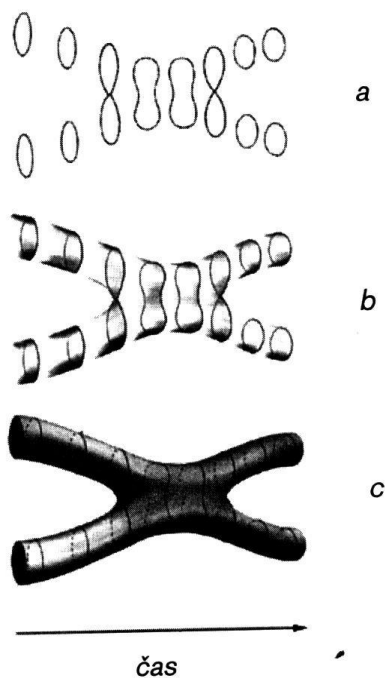
Supersymetrické teorie → lepší chování divergencí. Supersymetrické teorie zahrnující gravitaci → **supergravitace**.

Ani nejlepší z těchto teorií není prostá divergencí.

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

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

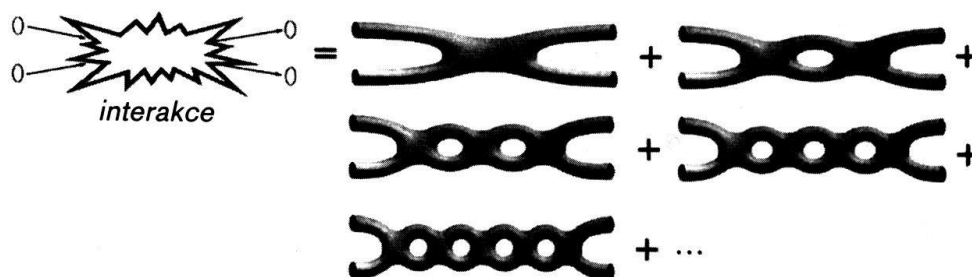
Teorie popisující částice jako velice malé lineární útvary – **strunové teorie**.



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**.



“Antizrcadlo” našeho světa – chvála symetrií

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 teorém – 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**



Symetrie

Symetrie – neměnnost některých vlastností při změně jiných \rightarrow 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 teorém – 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



Temná energie

Reliktní fotony - z jejich počtu a energie dostáváme $\Omega_\gamma = 5.8 \cdot 10^{-5}$

Reliktní neutrina (pokud $m_\nu=0$) - $\Omega_\nu = 2.6 \cdot 10^{-5}$

Reliktní gravitony - také zanedbatelný příspěvek

Energie vakua (kosmologická konstanta) - vakuum je vyplněno virtuálními páry částice a antičástice \rightarrow hustota vakua \rightarrow projevuje se jako kosmologická konstanta - urychluje rozpínání vesmíru

Experimentální náznaky existence: pozorování vzdálených supernov (známé absolutní jasnosti) \rightarrow pozorování zrychlování expanze určení závislosti rychlosti vzdalování na vzdálenosti (času) $\rightarrow \Omega_\Lambda = 0.8 \pm 0.2$

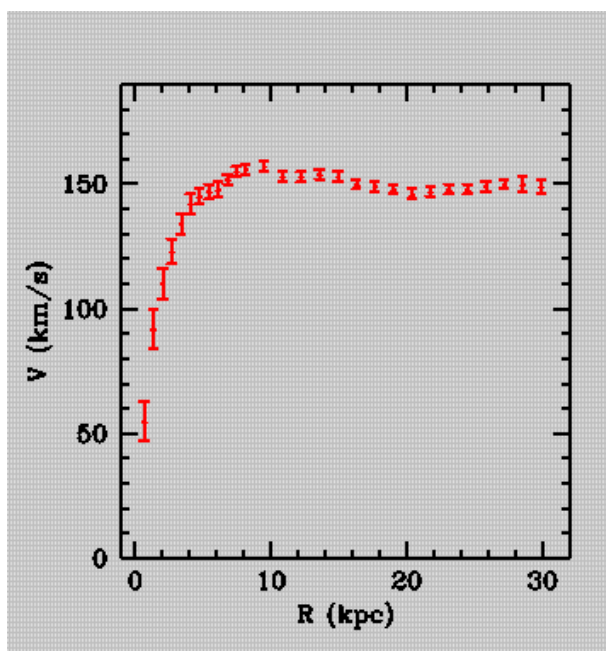
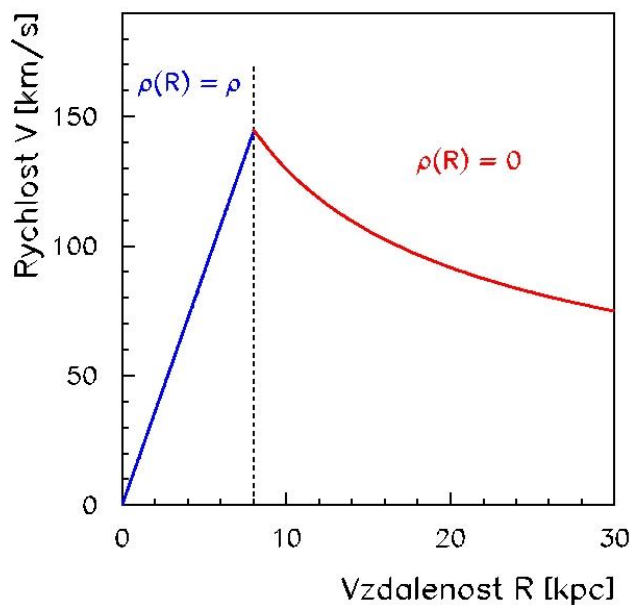


Temná hmota – neviditelná část vesmíru

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

Možnost zkoumání:

1. Studium oběžných pohybů hvězd \rightarrow haló v galaxiích
galaxií \rightarrow haló v galaktických kupách
kup galaxií \rightarrow 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



Zjednodušený případ (vlevo) Pozorování galaxie NGC3198 podle práce Begemana z roku 1989 (vpravo)

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 nesvítlivé “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. neutrina)

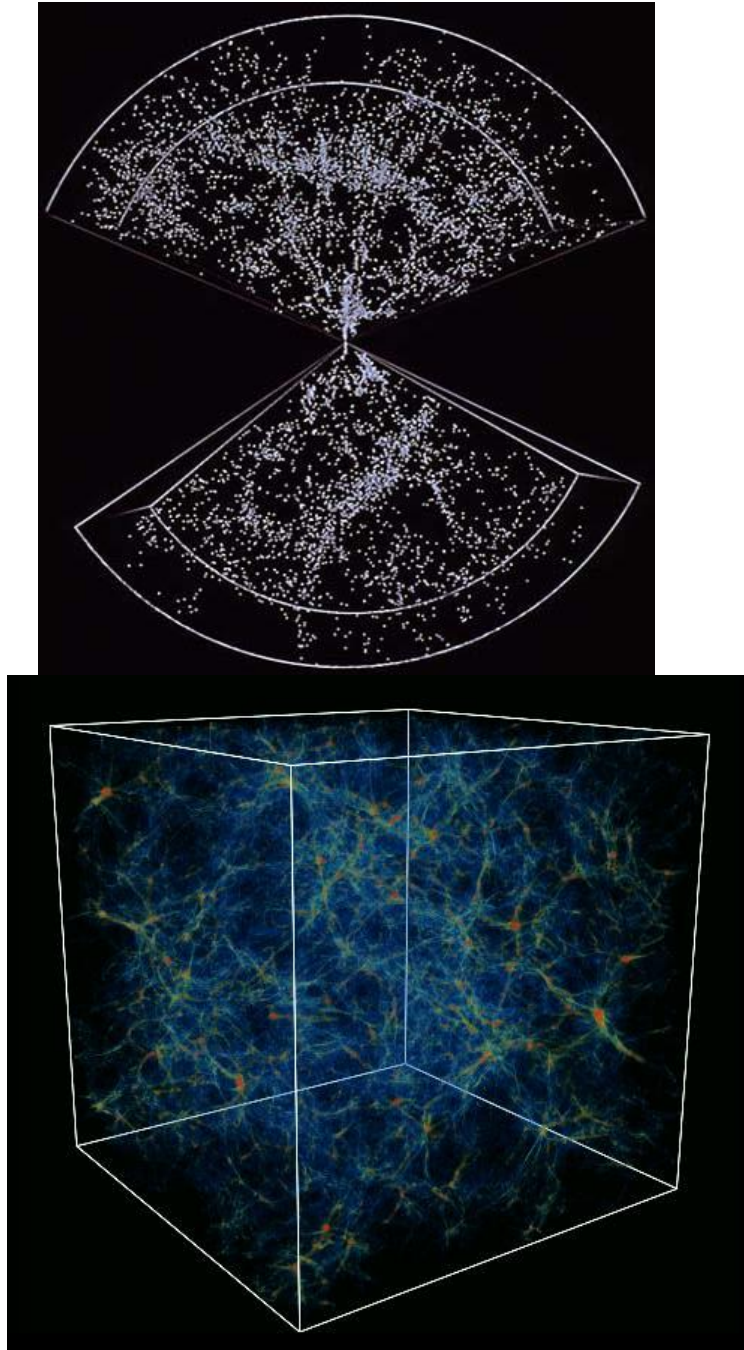
b) chladná – těžké (pomalé) částice – nejlehčí supersymetrické částice (neutralino?, ...)

hledání správné supersymetrické teorie a příslušné supersymetrické částice

Poměrem mezi jednotlivými komponentami a jejich konkrétními vlastnostmi jsou ovlivněny:

1. Fluktuační 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 státě Illinois

2.



Tři rozměrové úrovně poznávání mikrosvěta

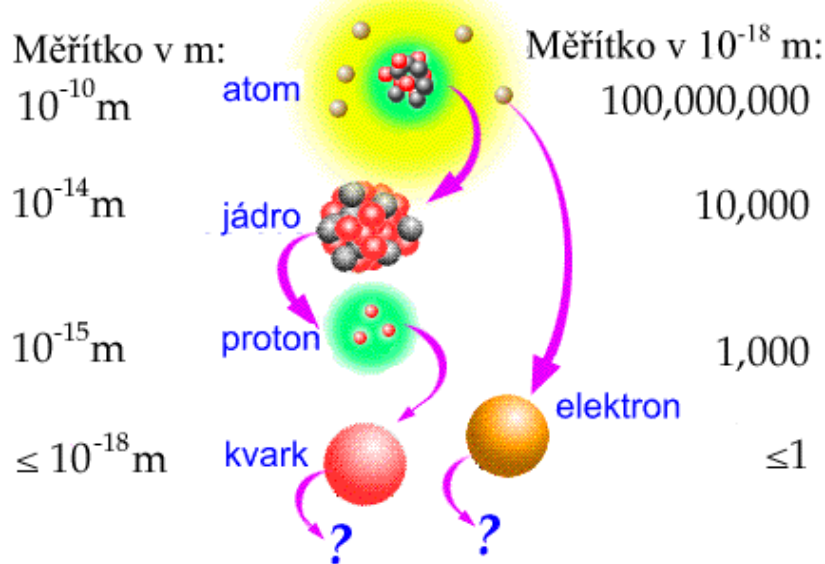
Rozmanitost našeho běžného okolí (makrosvěta) je složena z atomů a molekul vznikajících jejich spojením chemickou vazbou

Popis mikrosvěta:

Atomová fyzika - fyzika elektronového obalu atomu, chemických vazeb atomů do molekul, pouze elektromagnetická interakce

Jaderná fyzika - fyzika atomového jádra a sil v něm působících, interakce jádra a elektronového obalu, interakce jádra a elementárních částic, fyzika jaderné hmoty, silná, slabá a elmg. interakce

Subjaderná fyzika (fyzika elementárních částic nebo také fyzika vysokých energií) - fyzika elementárních částic a sil, které mezi nimi působí, silná, slabá a elektromagnetická interakce



Škála	Rozměr	Energie ¹⁾	Interakce	Hybnost ²⁾
	[m]	[MeV]		[MeV/c]
Atomová	$\sim 10^{-10}$	~ 0.00001	elmg (molekul.)	> 0.002
Jaderná	$\sim 10^{-14}$	~ 8	silná (jaderná)	> 20
Subjaderná	$\sim 10^{-15}$	~ 200	silná	> 200

- Energie vazby elektronu v atomu nebo energie vazby molekuly, vazebná energie nukleonu, energie potřebná ke kreaci (hmotnost) elementárních částic
- Z charakteristického rozměru a Heisenbergova principu neurčitosti $dp \cdot dx \sim h$

Charakteristické klidové hmotnosti:

$m_{\text{atomu}} \sim m_{\text{jádra}} = 938 - \sim 260\,000 \text{ MeV}/c^2$

($m_p = 1836 m_e$; $m_p = 938.27 \text{ MeV} = 1.67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

$m_{\text{částic}} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ (elektron) - $91\,187 \text{ MeV}/c^2$ (Z^0 boson)

Charakteristické časy: $1/c = 3.3 \cdot 10^{-9} \text{ s/m}$ - průlet jádrem $\sim 4 \cdot 10^{-23} \text{ s}$; procesy - silné $\sim 10^{-23} \text{ s}$; slabé $\sim 10^{-10} - 10^{-6} \text{ s}$ a elmg. $\sim 10^{-16} - 10^{-6} \text{ s}$.



Ultrarelativistické přiblížení - rapidita

Ve fyzice vysokých energií (ultrarelativistických srážkách \rightarrow rychlost částic svazku $v \approx c$) je výhodné zavést novou kinematickou proměnnou – **rapiditu** (při zápisu dále uváděných vzorců se většinou klade $c = 1$, m je celková hmotnost):

Vybereme směr svazku jako osu z , pak můžeme celkovou energii a hybnost částice zapsat jako:

$$E = m_T c^2 \cosh y, \quad p_x, \quad p_y \quad \text{a} \quad p_z = m_T c \sinh y$$

Pro připomenutí:

$$\sinh(y) = \frac{e^y - e^{-y}}{2} \quad \cosh(y) = \frac{e^y + e^{-y}}{2} \quad \tanh(y) = \frac{e^y - e^{-y}}{e^y + e^{-y}} = \frac{e^{2y} - 1}{e^{2y} + 1}$$

Zavedli jsme příčnou hmotnost m_T :

$$m_T^2 c^2 = m^2 c^2 + p_x^2 + p_y^2$$

a rapiditu y :

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\frac{E}{c} + p_x}{\frac{E}{c} - p_x} \right)$$

a tedy:

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{mc + mv \cos \varphi}{mc - mv \cos \varphi} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \beta \cos \varphi}{1 - \beta \cos \varphi} \right)$$

Pro nerelativistickou limitu ($\beta \rightarrow 0$): $y = \beta$

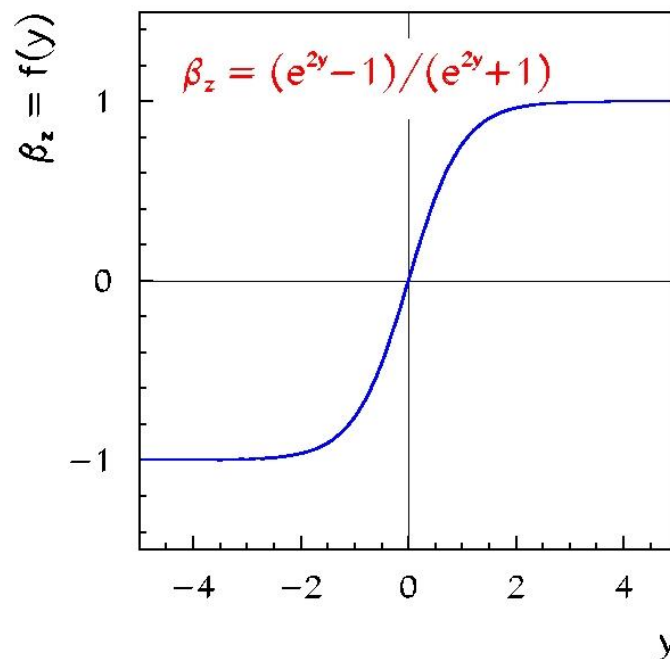
Pro ultrarelativistickou limitu ($\beta \rightarrow 1$): $y \rightarrow \infty$

Užití rapidity umožňuje velmi jednoduchý převod z jedné souřadné soustavy do druhé:

$$y_2 = y_1 - y_{21}$$

Kde jsme označili y_{21} rapiditu souřadné soustavy 2 v soustavě 1. Pro přechod s laboratorní soustavy do těžišťové pak platí:

$$\tilde{y} = y - y_{CM}$$



Závislost mezi transversální složkou rychlosti a rapiditou

Příklady:

GSI Darmstadt ($E_{\text{LAB}} = 1\text{GeV}/A$, $\gamma = 0.458$, $\beta = 0.875$)
SPS CERN ($E_{\text{LAB}} = 200\text{GeV}/A$, $\gamma = 6.0$, $\beta = 1.000$)
LHC CERN ($E_{\text{LAB}} = 3500+3500\text{GeV}/A$, $\gamma = 17.8$, $\beta = 1.000$)



Úvod

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

Známé 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?



Úvod

Experimentální evidence → většina (>90%) hmoty v nezářivé formě → **temná hmota**

Předpovědi a objevy objektů s velmi malou svítivostí v 18. a 19. století (černé díry, objev bílých trpaslíků u Procyona a Síria a dvou nových planet Urana a Neptuna)

Počátek a hlavně třicátá léta minulého století - měření pohybu hvězd v Galaxii (J. Kapetyn, Sir J. Jeans, J. Oort) a galaxií v kupách (F. Zwicky) → **gravitace větší než způsobená viditelnou hmotou.**

Měření rotace řady galaxií → **potvrzování vlivu temné hmoty**

Počítačové simulace (druhá půle 20. století) → **nestabilita galaxií bez započtení sférického halo z temné hmoty**

Pozorované důsledky Velkého třesku → omezení podílu normální (baryonové) hmoty v temné hmotě → **existence temné hmoty ve formě exotických částic**

Teorie popisující hmotu a interakce nabízejí kandidáty:

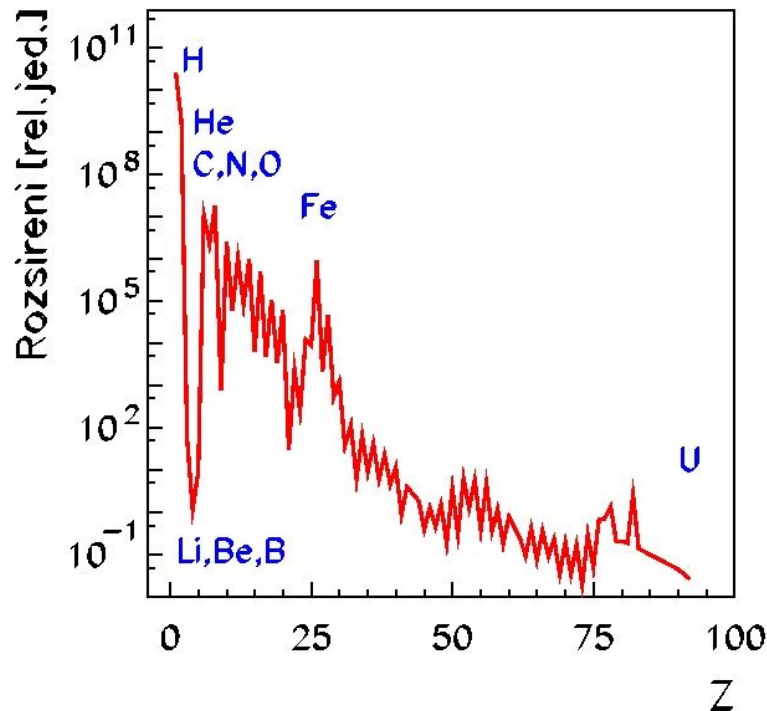
Popis světa založený na popisu hmoty (částic) a interakcí mezi nimi (zprostředkované výměnou částic)

Cesta ke sjednocení interakcí → nové částice - některé jsou kandidáty na původ temné hmoty



Úvod

"Teorie o vzniku chemických prvků musí vysvětlit rozšíření jednotlivých prvků ve vesmíru"



Pozorované rozšíření prvků ve vesmíru (C.A. Barnes et al: Jaderná astrofyzika, Camb. University Press 1983)

Počáteční podmínky - chemické prvky vzniklé ve Velkém třesku

Chemické prvky vzniklé v průběhu života hvězd

Silně závisí na pravděpodobnostech různých jaderných reakcí

Pár těch, kteří spojili jadernou fyziku a astrofyziku:

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

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:

$$p \rightarrow \bar{p}, \quad n \rightarrow \bar{n}, \quad \Lambda \rightarrow \bar{\Lambda}, \quad \nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$$

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

