

http://www.osel.cz/10771-spektrometr-katrin-provedl-prvni-vazeni-nejlehci-zname-castice-neutrina.html#poradna_kotva

Spektrometr KATRIN provedl první „vážení“ nejlehčí známé částice - neutrina

Spektrometr KATRIN provedl na jaře tohoto roku první čtyřtýdenní „vážení“ neutrina. A i za tak krátký čas se mu podařilo snížit horní limitu na hmotnost této částice. Přesné určení vlastností této stále záhadné částice, hlavně pak hmotností, je klíčové pro pochopení počátku i vývoje našeho vesmíru a je i oknem do nové fyziky a teorií sjednocujících popis interakcí.

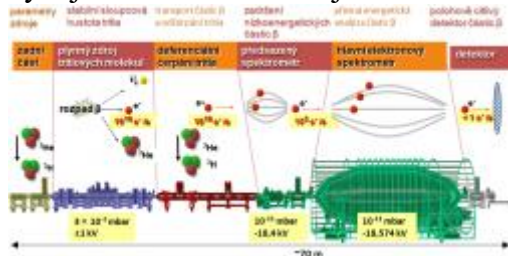


Schéma zařízení KATRIN. Různými barvami jsou vyznačeny jeho hlavní části: diagnostická sekce v zadní části, kryogenní zdroj plynného tritia s 500 senzory, sekce diferenciálního čerpání tritia, předsazený elektrostatický spektrometr elektronů, hlavní elektrostatický spektrometr elektronů, systém 148 detektorů elektronů (zdroj projektu KATRIN).

Když jsem před deseti lety psal podrobný [článek o vlastnostech neutrina](#) a historii jeho zkoumání, bylo budování experimentu KATRIN (KARlsruhe TRItium Neutrino experiment) na svém počátku. I když vakuová komora spektrometru o průměru deset metrů už absolvovala svou vodní cestu kolem celé Evropy. V minulém roce se zařízení, které velice přesně měří energie elektronů emitovaných v rozpadu tritia, podařilo konečně dokončit.

Naměřené spektrum elektronů v sobě nese informaci o hmotnosti neutrina. Při beta rozpadu tritia vzniknou celkově tři objekty, prvním je helium 3, druhým pak elektron a třetím antineutrinu. Ty si mezi sebou rozdělí energii, která se při rozpadu uvolní. Na neutrinu nemůže zůstat méně energie, než je obsaženo v jeho klidové hmotnosti. Tím je ovlivněna i koncová část spektra emitovaných elektronů. Tritium je velmi vhodné pro určování hmotnosti pomocí jeho rozpadu. Energie, která se uvolňuje při jeho beta rozpadu, je totiž jednou z nejmenších, pouze necelých 19 keV. Připomeňme, že klidová energie elektronu, což je druhá nejlehčí známá částice, je

511 keV. Právě u tohoto rozpadu je tak největší šance vidět vliv extrémně malé klidové energie související s klidovou hmotností na spektrum elektronů.

Spektrometr je postaven tak, že dokáže zkoumat rozpad plynného tritia. Tím se vyloučí vliv vazby atomů tritia v pevném terči, který byl pozorován v předchozích experimentech. Jejich energie už je srovnatelná s klidovou energií neutrina. Celá sestava spektrometru je dlouhá okolo 70m. Ze všech elektronů vyzářených při rozpadech tritia se vyseparují ty z nejvyšší energií. Ty se pak pošlou do hlavního spektrometru, kde se přesně určí jejich energie. Jejich detekci po průchodu spektrometrem zajišťuje systém 148 detektorů.

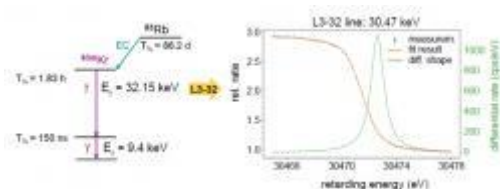


Plynný zdroj 83mKr v Tritiové laboratoři v Karlsruhe (zdroj projekt KATRIN).

Elektrostatický spektrometr funguje tak, že se postupně zvyšuje napětí, které zadržuje elektrony se stále vyšší energií. Jde tak o jednokanálové měření, kdy při jednotlivém daném měření zjišťujeme, kolik elektronů má energii vyšší, než je nutná pro překonání hradby nastaveného napětí. Samotné spektrum se pak získá tak, že se odečtou naměřené počty elektronů v sousedních kanálech. Měření je velmi citlivé k přesnosti nastavení a stability napětí na spektrometru. Ta musí dosáhnout hodnoty ppm, tedy miliontiny jmenovitého napětí 18,6 kV.

Danou přesnost měření stability nelze dosáhnout žádnými elektronickými přístroji. Proto se stabilita kontroluje pomocí zdroje vyzařujícího konverzní elektrony s přesně definovanou jedinou energií. Využívá se plynový zdroj těchto konverzí elektronů

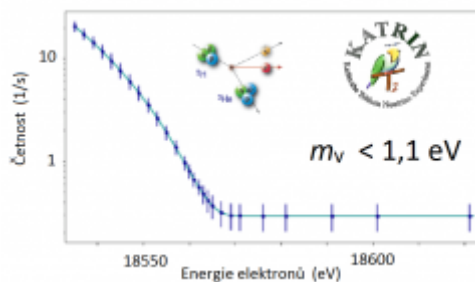
založený na vybuzeném stavu kryptonu $^{83\text{m}}\text{Kr}$ s delší dobou života (izomerním stavu). Při jeho deexcitaci se emitují potřebné konverzní elektrony. Tento radionuklid má však krátký poločas rozpadu. Proto se produkuje radionuklidový zdroj ^{83}Rb , který se na něj rozpadá a jehož poločas rozpadu je 86 dní. A právě metodika takové energetické kalibrace a monitorování spektrometru se vypracovala v Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži českou částí spolupráce KATRIN. Zde se také pomocí zdejšího cyklotronu produkuje i potřebný radionuklid rubidia.



Pro kalibraci jsou využívány konverzní elektrony vznikající při deexcitaci izomerního stavu $^{83\text{m}}\text{Kr}$ (zdroj prezentace na konferenci TAUP 2019 v japonské Toyamě).

Podrobně o dokončení spektrometru KATRIN v minulém roce povídal v [rozhovoru pro Osla](#) Otokar Dragoun, který je jednou z klíčových osobností české části spolupráce KATRIN. Ten také podrobně rozebíral rozvoj elektronové spektrometrie v Ústavu jaderné fyziky, českou cestu k experimentu KATRIN a jak se spektrometr podařilo vybudovat. Délka jeho konstrukce je dána i tím, že jde o zařízení pracující na současných technologických limitech. I díky tomu však vzniká jeho velký přínos pro pokrok vědy i technologie v oboru.

V první polovině roku se uskutečnila první měření na novém spektrometru s plynným tritiem, která trvala zhruba čtyři týdny. Analýzu získaného spektra prováděly tři nezávislé skupiny. Rozbor koncové části elektronového spektra je totiž velmi náročnou záležitostí a bylo třeba vyloučit možnost chyby v analýze. Ukázalo se, že všechna tři nezávislá zpracování dosáhla shodných výsledků. Ukázala, že na úrovni 90 % pravděpodobnosti je klidová energie neutrina nižší než 1 eV. Již za tak krátkou dobu se podařilo snížit hodnotu horní limity více než dvakrát oproti předchozím nejlepším experimentům, které proběhly v německém Heidelbergu a ruském Troicku. Zároveň je tato hodnota půlmilionkrát nižší, než je klidová energie druhé nejlehčí známé částice elektronu.



Graf zobrazující energetické spektrum elektronů z beta rozpadu tritia nashromážděného v průběhu 561 hodin měření. Chybové úsečky každého z měřených bodů jsou pro názornost zobrazeny s padesátinásobným zvětšením. Plná čára ukazuje předpovězený tvar spektra odpovídající nulové hmotnosti neutrína. První výsledek KATRIN byl získán porovnáním naměřených dat s teoretickým modelem zahrnujícím vlastnosti experimentálního zařízení a vliv pozadí. (Zdroj projekt KATRIN).

Ukazuje se tak extrémně velký potenciál, který zařízení má. Je vysoce pravděpodobné, že se předpokládané dosažení limity na úrovni 0,2 eV během prvních pár let měření podaří. Reliktní neutrína jsou po reliktních fotonech nejpočetnější částicí ve vesmíru. Znalost jejich hmotnosti je tak velmi důležitou informací pro modely vývoje našeho vesmíru.

Zároveň je třeba připomenout, že kromě elektronového neutrína (a antineutrína), které doprovázejí rozpad beta, existují ještě další dva typy. Právě jev oscilací mezi různými typy neutrin, při kterém dochází k přeměně jednoho typu neutrína na druhé, je důkazem, že alespoň dva typy těchto částic musí mít nenulovou klidovou hmotnost. Za prokázání tohoto jevu dostali [v roce 2015 Nobelovu cenu](#) za fyziku Takaaki Kadžita a Arthur B McDonald. Svými exotickými vlastnostmi by neutrína mohla být oknem do hájenství nové fyziky za Standardním modelem částic a interakcí. Podrobněji jsem vlastnosti neutrin rozebral v cyklu článků ([zde](#), [zde](#), [zde](#) a [zde](#)). Další informace o studiu oscilací jsou [zde](#), [zde](#) a [zde](#).

Právě studium oscilací a určení hmotnosti neutrin by se tak mohlo stát zdrojem informací o nové exotické fyzice. Je tak excelentní, že dlouhá výstavba a příprava spektrometru byla úspěšná a zařízení se pustilo do práce. Můžeme se tak těšit, že v následujících dvou letech se naše poznání této částice i díky experimentu KATRIN posune významně dopředu. Na stránkách AV ČR a Ústavu jaderné fyziky AV ČR lze nalézt českou verzi [tiskové zprávy](#) experimentu KATRIN a výsledky měření a analýzy pro odborníky jsou v článku na arXiv [zde](#) a [zde](#).

Autor: [Vladimír Wagner](#)

Datum: 16.09.2019

http://www.osel.cz/10771-spektrometr-katrin-provedl-prvni-vazeni-nejlehci-zname-castice-neutrina.html#poradna_kotva

Diskuze:

Platí, že

Vladimír Bzdušek, 2019-09-17 16:56:40

kvůli nenulové hmotnosti neutrina sa ono nemôže pohybovať rýchlosťou svetla?

Re: Platí, že

Pavel Brož, 2019-09-17 19:07:15

Ano, platí. $m \cdot v = m_0 \cdot c$ Nicméně nicméně si myslím z vlastního studia, že rovnovážný systém, stav bude teprve při $m \cdot v = m_0 \cdot c \cdot \Delta t/t$ protože neutrina vytvářena v běžných procesech typu beta rozpad beta rozpad anebo beta přeměna ? anebo v různých jaderných reakcích nebo srážkách částic letí a mají kinetickou energii typicky o dvanáct i více řádů větší, než je jejich klidová energie, při srážce se částice pohybuje anebo stojí ?, částice „letí“ a terč „stojí“, co když terč také letí ?, dokonce rychlostí téměř světla (?) a náš terč na Zemi letí se zemí rychlostí světla vůči Periférii vesmíru – protože pozorovatel z Periferie vesmíru nás pozoruje, viz Hubble, že my-země i s „terčem“ letíme od něj rychlostí světla... tak je jejich rychlost tak hodně blízká rychlosti světla, že ji od ní v současné době neumíme rozlišit. Obě rychlosti rozlišit neumíte, ale vidím, že umíte říci, že $E_{kinetická} = E_{klidová} \cdot 10^{12}$ v čem to tkví ? Dokonce neutrina vzniklá při explozi i milióny světelných let vzdálené supernovy tady budou naopak o maličko dříve, než fotony, protože ty se na rozdíl od neutrin maličko zdrží při prokousávání se odmršťovanými obálkami umírající hvězdy, zatímco neutrina, ač o zanedbatelnou částku pomalejší než fotony, těmito obálkami projdou jak horký nůž máslem. Výrazně pomalejší než světlo mají být pouze reliktní neutrina, tedy ta vzniklá v době, kdy se stáří vesmíru měřilo řádově ve vteřinách až minutách - tato neutrina ale dnes ještě neumíme detekovat, Tedy neutrina vzniklá v době o 13,79999 miliard let zpět do minulosti. Od té doby „my-malý bod“ už letíme = rozpínáme se vesmírem, prostorem vůči reliktnímu záření (a od

tam vzniklých neutrin) rychlostí téměř světla, „my“ téměř r.světla, neutrina také téměř rychlostí světla ; jak to tedy s tím „dopadáním“ reliktních neutrin na „terč = Země“ je ?? Kam letěla reliktní neutrina po svém vypuštění ? Letěla Zeměkoule od reliktního záření pomaleji nebo rychleji než reliktní neutrina ? Předešla reliktní neutrina Zemi anebo naopak ? Abychom mohli zachytit r. neutrina, musela by Zeměkoule letět rychleji než ony a pak počkat až ty neutrina k Zemi doletí. Je to tak ? a když ne, tak proč ?
 b) ...neumíme, anebo to nejde, a nikdy nepůjde. Proč chytáme fotony z reliktního záření, když Země letí pomaleji a fotony by nás už dááávně předběhly ? Proč r. fotony chytáme když by měly být už dááávně před námi a proč nechytáme ty r. neutrina, která jsou pomalejší než r. fotony ? ad 02) Neumíme, anebo to nejde, a nikdy nepůjde detekovat ?. Proč chytáme fotony z reliktního záření, když Země letí pomaleji a fotony by nás už dááávně předběhly ? Proč r. fotony chytáme když by měly být už dááávně před námi a proč nechytáme ty r. neutrina, která jsou pomalejší než r. fotony ? a osobně pochybuji o tom, že do konce tohoto století budeme umět.

Re: Re: Platí, že

Pavel Brož,2019-09-17 23:06:52

Oops, omlouvám se - uspěchal jsem se v těch řádech - typická produkovaná neutrina mají energie v řádu MeV a vyšší, tedy o šest i více řádů větší než jejich klidová energie. Rozdíl jejich rychlostí od rychlosti světla je o dvanáct či více řádů menší, než je rychlost světla, tady ta dvanáctka vznikla. Pokud má neutrina klidovou energii 1 eV a celkovou energii 1 MeV, tak se jeho rychlost liší od rychlosti světla o pouhých $0,5 \cdot 10^{-12} c$, tedy o pouhých 0,15 milimetrů za sekundu. Nicméně registrují se i neutrina o energiích řádově i TeV až PeV, tedy i o dvanáct až patnáct řádů vyšších, než je jejich klidová energie - toto ale nejsou typické energie neutrin vznikajících v beta rozpadech, jaderných reakcích, event. vznikajících při explozích supernov, tam jsou typické ty energie v řádech MeV a výše.

Ďakujem za odpoveď,

Vladimír Bzdušek,2019-09-18 07:55:54

a len zo zvedavosti ešte otázka. Ak teda neutrino má kludovú hmotnosť, dokázalo by sa "zastaviť" na nulovú rýchlosť?

Re: Ďakujem za odpoveď,

Pavel Brož,2019-09-18 10:37:18

Ano, každé těleso pohybující se podsvětelnou rychlostí se může zastavit např. srážkou s jiným tělesem. Protože ale neutrina interagují velice zanedbatelně jak mezi sebou navzájem, tak s ostatní hmotou, je takováto srážka extrémně málo pravděpodobná. Nic ale nebrání přejít do soustavy pohybující se stejnou rychlostí jako to neutrina, a v této soustavě bude neutrina v klidu. Totéž nelze provést s částicemi pohybujícími se rychlostí světla, protože v principu nelze zkonstruovat žádnou soustavu pohybující se rychlostí světla (dokonce i když ji konstruujeme jako čistě matematický konstrukt, měla by pak spousta singulárních vlastností, např. energie všech částic s nenulovou klidovou hmotností by v ní byly nekonečné).

Nejpomalejší neutrina jsou proto podle teorie ta reliktní, která se nezpomalovala srážkami, ale v důsledku rozpinání vesmíru (píšu podle teorie, protože zatím je nikdo nepozoroval). Stejně

tak, jako v důsledku rozpínání vesmíru chladnou reliktní fotony, tak stejně tak chladnou reliktní neutrina. Rozdíl je v tom, jak se to chladnutí projevuje. V obou případech se zvětšuje de Broglieova vlnová délka spolu s tím, jak kinetická energie klesá k nule. Částice s nulovou klidovou hmotností si ale stále ponechávají rychlost světla (zmenšování energie se neprojevuje jejich zpomalením), zatímco částice s nenulovou klidovou hmotností se čím dál více zpomalují.

Znova děkuji za odpověď,

Vladimír Bzdušek, 2019-09-18 15:42:15

a teraz už šliapem po pre mňa neznámej pôde: Spomalenie reliktných neutrín je teda úmerné, resp. rovné hodnote Hubble konštanty? A ak fotóny nemôžu spomaliť, ako zmena ich energie súvisí s onou konštantou?

Re: Znova děkuji za odpověď,

Pavel Brož, 2019-09-18 23:01:50

Jak u neutrin, tak u fotonů, ale i u jakýchkoliv jiných částic, ať už jde o elektrony, protony, neutrony, ba dokonce i u jader, atomů a molekul, můžeme definovat tzv. de Broglieho vlnovou délku - tato veličina je nepřímě úměrná jejich hybnosti. Speciálně u fotonů potom de Broglieho vlnová délka je totéž, jako vlnová délka odpovídající elektromagnetické vlny. de Broglieho vlnová délka určuje interferenční jevy, které lze u příslušných částic pro tu kterou hybnost pozorovat. Tyto interferenční jevy jsou intenzivně využívány v různých oborech, jako je např. neutronová defektoskopie, krystalografie, strukturní analýza, a mnoha jiných.

Tak, jak se vesmír roztahuje, tak se úměrně roztahují i de Broglieho vlnové délky, bez ohledu na to, čeho jsou to de Broglieho vlnové délky, přičemž všechny tyto de Broglieho vlnové délky se rozpínají stejným faktorem, tedy bez ohledu na to, zda patří neutrinům, fotonům či jiným částicím. Ovšem pozor, předpokládáme, že jde o volné částice, protože částice mění své hybnosti, tedy i své de Broglieho vlnové délky, nejen v důsledku rozpínání vesmíru, ale i v důsledku svých srážek. Velikost roztažení de Broglieho vlnových délek je úměrná roztažení prostoru za danou dobu - takže se jedná o kumulativní efekt. Vesmír se ale během své existence nerozpíná stále stejně rychle, rychlost jeho rozpínání se mění - po skončení inflační fáze, kdy se vesmír po krátkou dobu rozpínal exponenciálně rychle, přešel do fáze zpomalovaného rozpínání, která trvala do té doby, dokud měla na rozpínání vesmíru převažující vliv hmota. Zhruba před pěti až sedmi miliardami let ale získala navrch temná energie, jejíž účinek na rozpínání vesmíru je opačný než u hmoty - zatímco hmota rozpínání vesmíru zpomaluje, temná energie ho urychluje. Od té doby se tedy vesmír rozpíná zrychleně.

Kumulativní velikost tohoto rozpínání od nějakého zadaného okamžiku po začátku Velkého třesku až po dnešek je komplikovanou funkcí závislou na parametrech tzv. Standardního kosmologického modelu - tyto parametry se snažíme určovat na základě mnoha různých pozorování, mezi nimiž hrají nejvýznamnější roli tato dvě: měření rudého posuvu vzdálených galaxií a měření anizotropií reliktního (fotonového) záření. Každopádně Hubbleova konstanta neměří kumulativní velikost, nýbrž okamžitou rychlost rozpínání vesmíru - tzn. že Hubbleova "konstanta" se v průběhu rozpínání vesmíru mění (zkrátka řečeno, je to konstanta prostorová, nikoliv časová). Proto není prodloužení de Broglieho vlnových délek částic ani úměrné ani nepřímě úměrné současné hodnotě Hubbleovy konstanty, ale je její velice komplikovanou

funkcí.

Fotony sice nemůžou zpomalit, ale jejich energie se snižuje, protože je úměrná jejich hybnosti (a ta je nepřímo úměrná jejich vlnové délce) - tato úměrnost mezi energií a hybností je společnou vlastností platící pro všechny částice s nulovou klidovou hmotností - konstantou úměrnosti je rychlost světla ve vakuu: $E=p*c$, kde E je energie a p hybnost. Snížení energie se u fotonů projeví snížením frekvence odpovídající světelné vlny, která je opět úměrná energii. Prakticky tento efekt měříme jako kosmologický rudý posuv - čím vzdálenější galaxii pozorujeme, tím jsou jejich spektra posunutá směrem do větších vlnových délek, tedy směrem do menších frekvencí.

U (volných) částic, jader, atd., majících nenulovou klidovou hmotnost, se jejich hybnost sice snižuje naprosto stejným faktorem, jako u těch fotonů, ale energie už se mění jinak - je to dáno tím, že pro tyto částice neplatí jednoduchý vztah $E=p*c$, ale $E=\sqrt{p^2*c^2+m^2*c^4}$, kde m je klidová hmotnost. V nerelativistické oblasti tento vztah přejde ve známý Newtonovský vztah $E=p^2/(2m)$. Jinými slovy, zatímco pro fotony, ale také i pro ultrarelativistické částice pohybující se rychlostí velice blízkou c, platí, že když se jejich hybnost zmenší tisíckrát, tak se i tisíckrát zmenší jejich energie, tak pro nerelativistické částice platí, že když se jejich hybnost zmenší tisíckrát, tak se jejich energie zmenší miliónkrát.

Pro částice s nenulovou klidovou hmotností také na rozdíl od částic s nulovou platí vztah $p = m*v/\sqrt{1-(v/c)^2}$, kde v je rychlost. Odtud můžeme vyjádřit rychlost jako funkci hybnosti jako $v = p*c/\sqrt{p^2+m^2*c^2}$, který v nerelativistické oblasti přejde ve známý Newtonovský vztah $v = p/m$. Z tohoto vztahu pak můžeme určit velikost toho zpomalení různých částic v důsledku rozpínání vesmíru. Tak např. pokud za sledované období vezmeme období od vzniku (fotonového) reliktního záření (cca 380 tisíc let po Velkém třesku) po dnešek, tak za tuto dobu se vlnová délka reliktních fotonů zvětšila zhruba tisíckrát. Tzn. že i tisíckrát se za tuto dobu prodloužily de Broglieho vlnové délky všech volných částic - pokud by tedy v té době existovaly např. volné protony nebo elektrony, jejich hybnost by se zmenšila taky tisíckrát, a protože v době vzniku reliktního záření s ním byly v termodynamické rovnováze, tedy měly kinetickou energii odpovídající několika elektronvoltů, což je o mnoho řádů pod jejich klidovou energií, tak se tyto částice už tehdy pohybovaly nerelativistickými rychlostmi - proto pro ně už tehdy šel s dostatečnou přesností použít nerelativistický vztah $v=p/m$. Protože od té doby se jejich hybnost zmenšila tisíckrát, tak i jejich rychlost se zmenšila tisíckrát. Bohužel právě provedená úvaha má pouze pedagogický význam, ve skutečnosti pro ni nemáme splněné předpoklady - v době vzniku reliktního záření byla průměrná hustota částic ve vesmíru 1000^3 = miliardkrát větší než dnes - zatímco v dnešním vesmíru připadá řádově jeden proton a jeden elektron na kubický metr, v té době to bylo na jeden kubický milimetr. Takže za tu dobu nějaké ty srážky u elektronů a protonů zcela určitě proběhly - na rozdíl od osvobozených reliktních fotonů, pro něž náhle celý vesmír zprůhledněl a které se od té doby volně pohybují, tedy elektrony a protony, a ani jádra deuteria a další lehká jádra, nebylo možno považovat za volné.

Podíváme-li se podobným způsobem na reliktní neutrina, jejich dnešní předpokládaná teplota vychází cca 1,95 K (viz např. https://cs.wikipedia.org/wiki/Reliktn%C3%AD_neutrina), což odpovídá dle Boltzmanova vztahu $E=(3/2)k*T$, kde k je Boltzmanova konstanta, kinetické energii 2,5*10⁻⁴ eV. Nyní hodně záleží na tom, jak velká je jejich klidová hmotnost. Pokud bude řádově v desetinách eV, tak by to znamenalo, že dnes se pohybují rychlostmi řádově stokrát menšími, než je rychlost světla - konkrétně např. pokud by jejich klidová hmotnost

byla 0,67 eV, pohybovala by se dnes rychlostí 0,027 c, tedy cca 8100 km/s, čili cca dvěstěkrát rychleji, než je rychlost přilétajících komet a meteoritů. Tato rychlost se zdá být velká, ve skutečnosti ale i obyčejné elektrony ve starých katodových (tj. těch „hlubokých“) monitorech docilovaly rychlosti až 35 procent rychlosti světla, tedy cca třináctkrát větší. Pokud by ale neutrino měla výrazně menší klidovou hmotnost, řekněme 0,001 eV, potom by se pohybovala rychlostí 0,71 c, tedy stále relativistickými rychlostmi.

Vďaka, prežil som to

Vladimír Bzdušek,2019-09-19 22:44:03

a napodiv, celkom som to pochopil! Máte talent na vysvetlenie zložitého.

Re: Re: Ďakujem za odpoveď,

Lada 1,2019-09-19 14:35:53

"...např. energie všech částic s nenulovou klidovou hmotností by v ní byly nekonečné" Je to myšleno takto? "...např. energie každé z částic s nenulovou klidovou hmotností by v ní byla nekonečná" , nebo je to myšleno skutečně jako suma energií všech daných částic?

Re: Re: Re: Ďakujem za odpoveď,

Pavel Brož,2019-09-19 15:06:25

Je to myšleno tak, že energie každé z částic, která má nenulovou klidovou hmotnost, by v takové soustavě byla nekonečná. Kromě této singulární vlastnosti má ale soustava pohybující se rychlostí světla spoustu dalších singularit, tak např. veškerý okolní prostor by v ní byl o jednu dimenzi chudší, protože dimenze ve směru pohybu soustavy by se Lorentzovskou kontrakcí zkrátila na nulu, a dále všechny procesy v okolním vesmíru by "zamrzly v čase", opět v důsledku Lorentzovské dilatace, tentokrát času. Popis v takové soustavě prostě vede k mnoha matematickým a logickým sporům, podobně, jako když bychom v rovnicích krátili nulu (např. rovnice $0x1=0x2$ platí, ale po vykrácení nulou bychom získali nesmyslný výsledek $1=2$). To, že je soustava pohybující se rychlostí světla nepřipustná, tedy není jen nějaké technické omezení ani důsledek konzervativnosti fyziků, má to své vlastní mnohem hlubší důvody.

Re: Re: Re: Re: Ďakujem za odpoveď,

Pavel Nedbal,2019-09-19 19:48:57

Vážený pane Broži,

mě ty oscilace neutrin nějak nejdou do hlavy. Jak se může tauonové neutrino zbavit hmotnosti, aby se chovalo jako elektronové, a obráceně, jak může elektronové neutrino být někdy tauonovým, které je cca 3000x těžší, nebo mionovým cca 200x těžším? Přece jediná možnost je výměna rychlosti za hmotnost, ale podmínkou je nějaká další interakce, která to umožní. I kdybych přijal vysvětlení, že neutrino je namícháno z 1/3 tauonové, z 1/3 mionové a 1/3 elektronové, tak vlastně by šlo říci, že je jen jediný typ neutrina, mix. Kdyby reakcí $p+p=D$ vznikala jak elektronová, mionová a tauonová, pak by ta reakce musela mít jiný

energetický obsah, než udávaný. Totéž při beta +/- rozpadech jader, koneckonců i z toho T. Tak jak to tedy je, nemáme v tom nějakou chybu?

Re: Re: Re: Re: Re: Ďakujem za odpoveď,

Pavel Brož, 2019-09-19 23:40:49

Dobrý den, nikoliv, jedna dílčí chyba je už ve Vašem předpokladu, že tauonové neutrino 3000x těžší než elektronové, a mionové že je 200x těžší než elektronové. Tyto hmotnostní poměry totiž platí pro nabitě leptony tau, mí a elektron, nikoliv pro jejich neutrina. Hmotnostní poměry neutrin dodnes neznáme, naopak pokud bychom předpokládali platnost odhadů získaných jak z pozemských neutrinových experimentů, tak nepřímo plynoucích z kosmologických pozorování, tak to vypadá, že hmotnosti všech tří neutrin budou velice blízké.

Nicméně tato chyba není nijak zásadní, i kdyby totiž opravdu mezi jejich hmotnostmi byly až tak velké rozdíly, jaké uvádíte, tak by to stejně na možnosti je experimentálně odlišit na základě jejich rychlosti nic nezměnilo. Všechna tři neutrina totiž mají v reakcích, ve kterých je detekujeme, aspoň o šest řádů větší energii, než je jejich klidová energie, z čehož plyne, že se pohybují rychlostmi odlišnými od světelné pouze o méně než 10^{-12} c. Např. elektronové neutrino vzniklé v jádru Slunce dorazí k Zemi za cca 500 sekund, tj. 8 minut a 20 sekund. Z kosmologie víme, že součet hmotností všech tří neutrin by měl být menší než 2 eV, předpokládejme, že nejhmotnější z nich má klidovou hmotnost zrovna ty 2 eV, a další dvě jsou 200x a 3000x lehčí. Necht' má toto nejtěžší neutrino energii 2 MeV, potom se pohybuje rychlostí pouze o $0,5 \cdot 10^{-12}$ c menší než je rychlost světla c. Takže toto neutrino bude na Zemi o $500 \cdot 0,5 \cdot 10^{-12} = 2,5 \cdot 10^{-10}$ sekund (tedy o čtvrtinu nanosekundy) později, než by tu bylo světlo, pokud by mu v cestě z nitra Slunce nic nepřekáželo (ve skutečnosti to světlu trvá řádově tisíce let, než se v procesech opakované absorpce a emise prokouše z jádra k povrchu, ale o to teď nejde). Zdůrazňuji, že to zpoždění čtvrt nanosekundy platí pro to nejtěžší neutrino, ta lehčí neutrina budou mít zpoždění menší, protože se budou pohybovat větší rychlostí, než to nejtěžší (samozřejmě ale stále rychlostí podsvětelnou). I kdyby mělo nejlehčí neutrino nulovou klidovou hmotnost (pro oscilace neutrin postačí, aby dvě neutrina měla nenulové klidové hmoty, nemusí je mít nenulové všechna tři), tak se oproti němu to nejtěžší proto zpozdí pouze o čtvrt nanosekundy, čemuž odpovídá „délkové“ zpoždění pouze o 7,5 cm (protože za jednu nanosekundu urazí světlo pouhých 30 cm – teď zcela odbočím, ale skutečnost, že za jednu nanosekundu urazí světlo pouhých 30 cm se mimochodem promítá i do konstrukce těch nejvýkonnějších superpočítačů, které prostě musí počítat s tím, že přenést data mezi procesory ve dvou sousedících počítačových skříních nejde tak rychle, jak rychle umíme taktovat procesory).

To zpoždění čtvrt nanosekundy anebo ekvivalentně 7,5 cm je mnoho řádů pod našimi současnými detekčními schopnostmi v experimentech týkajících se slunečních neutrin, už jenom z toho důvodu, že nemáme jak kontrolovat, kde ve Slunečním jádře a přesně kdy se to které neutrino zrodilo. Umíme to sice s mnohem větší přesností kontrolovat v experimentech v urychlovačích, kdy vygenerujeme svazek např. mionů, ten pak odchýlíme na nějaký vzorek, kde se z jejich srážek vyprodukují příslušná neutrina, a ta potom detekujeme – možná si vzpomínáte na kauzu s údajně nadsvětelnou rychlostí neutrin v experimentu v Gran Sasso, Vladimír Wagner o ní psal i zde na oslu v těchto člancích:

<http://www.osel.cz/5896-prekracuji-neutrina-mezni-rychlost-svetla.html>

<http://www.osel.cz/5993-nadsvetelne-rychlosti-neutrin-prezily-prvni-zkousku.html>

<http://www.osel.cz/6216-opet-neutrina-jedno-potvrzeni-a-jedno-popreni.html>

a redakce potom zde:

<http://www.osel.cz/6143-nadsvetelnou-rychlost-neutrin-ma-na-svedomi-spatne-zapojeny-kabel.html>

(blíže viz https://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light_neutrino_anomaly , na vině byl nakonec špatně zapojený kabel, který způsobil problémy v časové synchronizaci měření)

V případě těchto experimentů sice umíme mnohem přesněji určit dobu vzniku neutrin, nicméně vzdálenost, na které je detekujeme, je příliš malá (i když na pozemské experimenty stále úctyhodných 731 km), takže opět neumíme spolehlivě rozlišit doby letu rozdílných druhů neutrin.

Co se týče toho, v jakých stavech se neutrina rodí a zanikají, tak tyto stavy jsou přesně elektronové, mionové nebo tauonové neutrina podle příslušné reakce. Např. rozpadem mionu vznikne vždy pouze čisté mionové neutrina, žádný mix elektronového, mionového a tauonového. Podobně rozpadem tauonu vznikne pouze čisté tauonové neutrina, a v jaderných reakcích typu beta plus rozpad a jaderná fúze vzniká čisté elektronové neutrina (v normálním beta minus rozpadu a v jaderném štěpení probíhajícím v jaderných reaktorech zase vzniká čisté elektronové antineutrina). Tyto stavy jsou „čisté“ z hlediska „vůně“ (flavor), což je charakteristika jednotlivých částicových generací, nicméně nejsou to čisté stavy z hlediska energie, tedy stavu mající ostrou hodnotu energie. Bylo to docela překvapení, když se zjistilo (poprvé nikoliv u neutrin, ale u kvarků), že příroda může vytvářet částice ve stavech s „rozmazanou“ hodnotou energie. To, že existují kvantově mechanické stavy, které nemají ostrou hodnotu energie, bylo známo už dlouho, ale nepředpokládalo se to u kreace ani anihilace částic. Nicméně protože se tato hypotéza osvědčila u kvarků, kde uměla velice dobře vysvětlit např. rozpady baryonů a mezonů, tak pro použití neutrin už nebyla pro fyziky tak exotická – jedinou podmínkou pro ni byla nenulovost klidových hmot aspoň dvou neutrin. Plus navíc z této hypotézy automaticky plyne oscilace těch neutrin. Mimochodem, podobnou oscilaci umíme měřit i u neutrálních Kaonů (dříve nazývaných K-mezony), i když zde je způsobena něčím jiným, konkrétně drobným narušením CP symetrie, které se projevuje malilinkým hmotnostním rozdílem v hmotnosti vlastních energetických stavů těchto Kaonů (tak jako jsou elektronové, mionové i tauonové neutrina mixem ostrých energetických stavů ν_1 , ν_2 , ν_3 , jsou i neutrální Kaon a jeho antičástice mixem dvou odpovídajících ostrých energetických stavů označených K_1 a K_2 , a tyto stavy mají malilinko odlišné klidové hmotnosti).

Vrátím-li se k neutrinům, tak konkrétně třeba elektronové neutrina je mixem ostrých energetických stavů ν_1 , ν_2 , ν_3 . Protože tyto stavy mají rozdílnou klidovou hmotnost, po čase se od sebe prostorově separují. Než se ale rozseparují, můžeme na různost jejich klidových hmotností usuzovat z těch oscilací, které jsou citlivé na rozdíl klidových hmotností. Jedná se totiž o to, že fáze každého z energeticky ostrých neutrinových stavů ν_1 , ν_2 , ν_3 se mění rychlostí úměrnou jeho klidové hmotnosti, a čistě algebraicky se pak dá ukázat, že kvadrát vlnové funkce je pak modulován faktorem $\cos(\Delta m^2 t)$, kde Δm^2 je rozdíl těch hmotností a t je čas.

A jak je to tedy s tou finální separací těch neutrin? Předpokládejme, že uděláme obdobu experimentu v Gran Sasso, akorát že neutrino sice budeme nadále generovat v CERNu, ale místo jejich detekce, tedy laboratoř v Gran Sasso, přemístíme na Pluto zrovna, když bude v aféliu (necelých 50 astronomických jednotek, tedy padesátkrát dále, než je vzdálenost Země-Slunce). Předpokládejme, že budeme umět určit dobu zrodu neutrin s přesností na jednu nanosekundu, tzn. podélná nepřesnost v určení polohy neutrin bude cca 30 cm. Dejme tomu, že nejtěžší bude neutrino₃ a že bude mít už zmíněnou klidovou hmotnost 2 eV, další dvě necht' budou o několik řádů lehčí. Potom to neutrino₃ dorazí na Pluto se zpožděním 7,5 cm x 50 = 375 cm za těmi dvěma lehčími. Protože podle našeho předpokladu je podélná neurčitost polohy pouze 30 cm, tak na Plutu už by bylo to nejtěžší neutrino odseparováno od těch zbývajících o cca 375-30=345 cm – už by nám tedy neoscillovala všechna tři neutrino, ale jenom ty první dvě lehčí, pokud by se jejich vlnové funkce stále ještě překrývaly, zatímco to nejtěžší už by k jejich oscilacím nepřispívalo, protože ta první dvě by ho nechala cca tři a půl metru za sebou.

Z právě uvedeného příkladu vyplývá, proč dnes neumíme rozseparovat elektronové neutrino na jeho vlastní energetické stavy neutrino₁, neutrino₂ a neutrino₃ (stejně tak samozřejmě neumíme rozseparovat ani mionové a ani tauonové neutrino). Teoreticky bychom tuto separaci mohli udělat u kosmických neutrin, která k nám přilétají z obrovských mezihvězdných vzdáleností – zde je pro změnu problém v intenzitě svazku, zatím se nám taková neutrino podařilo identifikovat s konkrétním astronomickým zdrojem jenom jednou, a to při sledování exploze supernovy SN1987A, a i tehdy se podařilo zachytit pouze 25 antineutrin, což je na jakémkoliv oscilační měření žalostně málo (blíže viz

https://en.wikipedia.org/wiki/SN_1987A#Neutrino_emissions). Takže do té doby, než postavíme laboratoř na tom Plutu, tak jsme odkázáni jenom na oscilační experimenty, ve kterých nejsou jednotlivé ostré energetické stavy rozseparovány.

Na závěr bych ještě velice rád udělal jednu podstatnou zmínku – dobrou třetinu svých vědomostí o neutrinech, možná i více, jsem získal už před mnoha lety z popularizačních článků Vladimíra Wagnera, viz zde: <https://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan> , Vladimírovi tímto velice děkuji. Vystudoval jsem teoretickou fyziku, a během mého studia byla terčem mého zájmu tehdy populární teorie superstrun, ze které jsem obhájil i diplomku. Studium reálných částicových interakcí mě tehdy nepřišlo důležité, protože jsem měl jako mnoho tehdejších mladých studentů naivní představu, že až bude někdy teorie superstrun dokončena, tak že hravě vysvětlí všechny pozorované částicové děje, a event. i ty kosmologické. Jak bláhový jsem byl. Teprve až několik let po absolutoriu jsem začal objevovat velice krásnou a ze strany strunových fyziků neprávem opomíjenou fyziku, která se zakládá na reálných částicových pozorováních, nikoliv pouze na spekulacích o takovém či onakém počtu nadbytečných dimenzí našeho prostoročasu, spolu se spekulováním, jak to udělat, aby ty nadbytečné dimenze nezbytné pro logickou integritu strunových teorií nebyly reálně pozorovatelné. A byly to právě popularizační články Vladimíra, které mě tuto oblast otevřely. Je mi velickou ctí, že tento úžasný zdroj mnoha podrobných informací o světě částic mohu doporučit i všem dalším zájemcům o tuto oblast.

Re: Re: Re: Re: Re: Re: Ďakujem za odpoveď,
Pavel Nedbal,2019-09-20 20:53:25

Vážený pane Broži,

děkuji za obširný výklad a uvedení mého omylu, kdy jsem zaměnil hmotnosti neutrin za hmotnosti mateřských leptonů, na správnou míru. Pokud bych ještě měl dotaz na upřesnění - když se rozpadají ty dva těžší leptony, vzniká v konečné fázi elektron a příslušná neutrina - předpokládám, že se o tu hmotu/energii nějak podělí, to by bylo asi jasné.

Ale, když se podíváme na standardní model, jsou tam tři rodiny částic, a z toho je jen jedna rodina stabilní - nejsou ty vyšší rodiny vlastně jen nějak "virtuální", mám na mysli, zda to vlastně nejsou částice té stabilní rodiny energeticky "podšprajcované" do nějakého metastabilního stavu, ve kterém se udrží jen chvíli, ve které je občas registrujeme, a pak se energie zbavují a konečná fáze jsou ty základní, stabilní "rodina"? Můžeme připustit, kdybychom měli dostatečnou energii, že by se mohly vytvořit ještě další, ještě vyšší energii nabitě částice ekvivalentní těm stabilním? Hledám v tom důvod, proč takové nestabilní částice (jako třeba i zmíněný mion a tauon) mají vůbec nějakou funkci, když ve Vesmíru, pomineme-li zase extrém, vůbec nejsou obsaženy?

Děkuji a přeji příjemný víkend.

Pavel Nedbal

Re: Re: Re: Re: Re: Re: Re: Re: Děkujem za odpověď,

Vladimír Wagner,2019-09-21 14:33:25

Pokusím se odpovědět místo Pavla Brože. Jak jste uváděl, poměry mezi hmotnostmi tauonu, mionu a elektronu jsou hodně velké, dominantně se rozpadají právě na leptony z nižší hmotností a neutrina. To znamená, že dominantní část klidové energie těžšího nabitého leptonu se přemění na kinetickou energii produktů. To rozdělení energií mezi produkty je dáno kinematikou.

Pokud jde o počet nabitých leptonů (tedy otázka, jestli existuje kromě tří známých, tedy elektronu, mionu a tauonu ještě nějaký těžší), tak tam je asi docela jasno. Standardní model známé částice grupuje do tří rodin. V každé jsou dva kvarky a jeden nabitý a jeden neutrální lepton (neutrino). Pokud by existovala další generace, musela by zase obsahovat dva kvarky, nabitý lepton a neutrino. Pokud bychom předpokládali, že budou mít i další neutrina stejné vlastnosti, jako první tři, tedy hrozně malou hmotnost, tak další existovat nemohou. Boson Z0 se totiž rozpadá i kanálem neutrino a odpovídající antineutrino. A jeho doba života (která je dána i počtem možných rozpadů na neutrino a antineutrino) ukazuje, že existují jen tři neutrina s odpovídající malou hmotností.

Re: Re: Re: Re: Re: Re: Re: Re: Děkujem za odpověď,

Pavel Brož,2019-09-21 22:03:34

Dobrý den, na otázku proč experiment podporuje existenci pouze tří rodin standardního modelu, odpověděl už Vladimír Wagner, já se nyní zaměřím na Vaši otázku, jestli ta druhá a třetí rodina nejsou jenom nějak energeticky podšprajcované neboli excitované stavy té první rodiny. Taková představa je v rozporu jak se stávající teorií, tak s experimentálními daty. S teorií, tj. standardním modelem, je v rozporu proto, že podle něj jsou částice mion, tauon a kvarky s, c, b a t částicemi sice nestabilními, ale přesto elementárními, tedy bezstrukturními – standardní model neumožňuje vysvětlit větší klidové hmotnosti částic druhé a třetí rodiny coby excitované stavy částic rodiny první (tedy elektronu a jeho neutrina a kvarků u a d), právě protože podle něj tyto částice nemají žádnou vnitřní strukturu, není tedy co a jak excitovat. Nicméně standardní model je jenom teorie, lze si představit, že by byl nahrazen

teorií jinou, podle níž by leptony i kvarky byly částicemi nikoliv elementárními, ale složenými – taková teorie dokonce byla už v roce 1974 navržena a později známá pod názvem preonová teorie (viz <https://en.wikipedia.org/wiki/Preon>), a jedním z jejích dvou spoluautorů nebyl nikdo menší, než pozdější nositel Nobelovy ceny Abdus Salam (kteroužto cenu ale nedostal za preonovou teorii, nýbrž za své význačné příspěvky k standardnímu částicovému modelu).

Preonová teorie ale záhy po svém zrodu nepřežila střet s experimentem, který potvrdil bodovost leptonů a kvarků s přesností pod 10^{-18} m. Pokud by kvarky a leptony nebyly elementární, ale šlo by o vázané stavy preonů, a přitom by tyto vázané stavy měly být menší, než těch 10^{-18} m, pak by podle Heisenbergova principu neurčitosti musely mít tyto stavy klidovou hmotnost aspoň 400 tisíckrát větší, než je klidová hmotnost elektronu (a tedy cca dvěstěkrát větší, než je klidová hmotnost protonu), což je spor. Úvaha, ze které to plyne, je podobná té, ze které plyne odhad velikosti atomu – velikost elektronového obalu např. základního stavu atomu vodíku koresponduje s neurčitostí hybnosti elektronu v tomto obalu, přičemž obě tyto neurčitosti se dají spočítat z řešení Schrodingerovy rovnice popisující vázaný stav elektronu v atomu, a obě vyhovují – tak jak to kvantová teorie nekompromisně vyžaduje – Heisenbergovu principu neurčitosti. Pokud bychom totéž provedli pro hypotetický vázaný stav preonů v dejme tomu elektronu, dostali bychom výše zmíněný spor – buď by tento vázaný stav musel mít hmotnost rovnou hmotnosti elektronu, ale cca 400 tisíckrát větší velikost než experimentálně ověřených 10^{-18} m, anebo by by měl tu velikost cca 10^{-18} m, ale pak by zase musel mít 400 tisíckrát větší hmotnost, než je hmotnost elektronu.

Dalším argumentem proti představě, že částice vyšších rodin jsou excitovanými stavy částic rodiny první, je to, že takovéto excitované stavy by se v principu mohly deexcitovat vyzářením gama fotonu – nic by tomu nebránilo, protože až na neutrina jsou všechny leptony nabitými částicemi, tzn. že interagují i prostřednictvím ať už virtuálních, nebo i reálných fotonů. Neexistoval by žádný způsob, který by zabránil deexcitaci dejme tomu mionu na elektron prostřednictvím vyzáření gama fotonu, a ze známé hmotnosti mionu a elektronu by se dal udělat i odhad četnosti takové deexcitace, která by byla řádově ne moc vzdálená četnosti standardního rozpadu mionu na elektron za současného vzniku mionového neutrina a elektronového antineutrina. Problém je v tom, že zatímco ten druhý zmíněný rozpad se pozoruje naprosto běžně, tak rozpad mionu za vzniku odpovídajícího gama fotonu se nepozoroval nikdy.

Ještě se vrátím k otázce stabilitnosti první rodiny kontra nestabilitnosti druhé a třetí rodiny. Není to úplně pravda, že by částice první rodiny byly stabilní, zatímco částice druhé a třetí nestabilní. V první rodině máme elektronové neutrina, elektron, kvark u a kvark d. A kvark d je nestabilní, rozpadá se na kvark u, elektron a elektronové antineutrino – důsledkem tohoto rozpadu je známý beta (minus) rozpad, kdy se neutron složený z kvarků udd, rozpadá na proton složený z kvarků uud, elektron a elektronové antineutrino. Naopak ve druhé a třetí rodině máme stabilní mionové neutrina a stabilní tauonové neutrina, ty se na nic nerozpadají. Mohlo by se zdát, že tato dvě neutrina stabilní nejsou, protože jak víme, neutrina oscilují. Jenže tato oscilace je způsobena pouze jako důsledek toho, že se u jednotlivých složek neutrin, tj. stavů s ostrou hodnotou energie ν_1 , ν_2 a ν_3 , různou rychlostí mění fáze vlnové funkce. Tato oscilace je periodická, tzn. že např. mionové neutrina se po konečném čase opět zregeneruje jako mionové, elektronové pak znovu jako elektronové, tauonové jako tauonové – blíže viz grafy zde

https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillation#Three_neutrino_probabilities .

Ve skutečnosti je stabilita či nestabilita částic podmíněna jednak povolenými typy Feynmanových diagramů v té které teorii, a jednak relativními hmotnostmi částic. Nejlépe se to dá uvést na příkladu. Standardní model např. obsahuje interakční vrchol (což je nejjednodušší typ Feynmanova diagramu), který sestává z linie elektronu, elektronového neutrina a intermediálního bozonu W^- , které jsou jedním svým koncem spojené v jednom bodě. Na tomto obrázku

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Standard_Model_Feynman_Diagram_Vertices.png je to prostřední typ vrcholů, kde W je v našem příkladu bozon W^- , L je elektron a ν je elektronové neutrina. Předpokládejme pro jednoduchost, že elektronové neutrina má klidovou hmotnost 1 eV, dále víme, že elektron má klidovou hmotnost cca 511 keV, a intermediální bozon W^- má klidovou hmotnost 80 GeV. Proto se ve standardním modelu rozpadá bozon W^- na elektron a jeho antineutrino, zatímco další dva typy rozpadů popisované stejným diagramem – rozpad antineutrina na W^- a pozitron (event. neutrina na W^+ a elektron) a rozpad elektronu na W^- a elektronové neutrina – jsou energeticky nepřípustné a proto neprobíhají. Pokud by ale intermediální bozon W^- měl klidovou hmotnost, která by se od hmotnosti elektronu lišila o méně než hmotnost elektronového neutrina, pak by tento bozon byl další stabilní částicí standardního modelu, protože by neexistoval způsob, jak by se mohl rozpadnout, aby byl přítom splněn zákon zachování energie. To ale není všechno – pokud by klidová hmotnost bozonu W^- byla menší než hmotnost elektronu, a to o více, než je hmotnost jeho neutrina, tak by se navíc elektron stal nestabilní částicí. Rozpad elektronu na bozon W^- a elektronové neutrina by totiž jednak byl umožněn existencí příslušného Feynmanova diagramu (který jak již víme ve standardním modelu existuje), a navíc by byl energeticky přípustný, tudíž by podle teorie musel nevyhnutelně probíhat.

Změna hmotnosti bozonu W^- (a bozonu W^+ , který musí mít klidovou hmotnost stejnou, jako W^-) by si samozřejmě vyžádala změnu i jiných parametrů – je tomu tak proto, že zatímco hmotnosti všech fermionů jsou ve standardním modelu volnými parametry, které se musí nafitovat měřením, tak pro hmotnosti bozonů a pro velikosti různých dalších konstant to už obecně neplatí, protože existuje množství algebraických vztahů, jejichž platnost plyne z požadavku konzistence tohoto modelu. Nicméně po takové změně bychom stále měly formálně též standardní model, se stejnou logickou konzistencí, se stejnými formulami předpovídajícími výsledky všech experimentů, a jediné, co bychom v těchto formulích museli změnit, by byla hmotnost bozonu W^- , dále volitelně hmotnost bozonu Z a Higgsova bozonu, povinně ale hodnoty některých dalších konstant.

My samozřejmě z experimentů víme, že bozon W^- není lehčí než elektron, ale že je cca 156 tisíckrát těžší. Nicméně odpověď na otázku, proč tomu tak je, standardní model nenabízí. Lze se sice setkat s různými pseudoodpověďmi, jako že hmotnost intermediálních bozonů je určena velikostí narušení elektroslabé symetrie, ale to není skutečná odpověď, protože tato teorie nepředpovídá velikost narušení té symetrie – pokud by byla narušená výrazně menší měrou, bozon W^- by mohl být klidně lehčí než elektron. Existuje i jiná pseudoodpověď, a to, že velikost hmotnosti bozonu W^- je spoluurčena velikostí hmotnosti Higgsova bozonu (viz první vztah v tomto odstavci

https://en.wikipedia.org/wiki/W_and_Z_bosons#Predicting_the_W_and_Z). I toto je ale jenom kopnutí míče do autu, protože standardní model nepředpovídá velikost hmotnosti Higgse (jiná otázka je, že z konkrétních experimentů a z konkrétních hodnot ostatních parametrů následně nějaká hodnota pro hmotnost Higgse vychází, nicméně stále platí, že hmotnost Higgse je v principu volným parametrem standardního modelu, který sice spoluurčuje hodnoty jiných parametrů, ale sám musí být nafitován měřením).

Pavel Brož,2019-09-23 18:37:12

Omlouvám se, než jsem to dopsal, tak už stihnul odpovědět Vladimír.

~~~~~  
~~~~~  
~~~~~ velice pěkný článek

**Pavel Brož**,2019-09-16 21:07:57

Děkuji!

~~~~~  
~~~~~  
~~~~~  
odhad

Roman Rodak,2019-09-16 15:02:11

Je aj nejaký predpoklad kde by sa postupné znižovanie horného limitu mohlo zastaviť, alebo je to informácia ktorú treba získať výlučne experimentom a nevieme či skončíme na 1 eV, 1 meV, alebo 1 neV? Narážam napr. na roky pred nájdením hmotnosti higgsovho bozónu, kedy bolo jasné, že buď bude mať rádovo stovky GeV, alebo bude nutné zásadne zmeniť štandardný model.

~~~~~  
~~~~~  
~~~~~  
Re: odhad

**Pavel Brož**,2019-09-16 21:48:24

Pokud hledáme spodní limity na hmotnost nejlehčího neutrina jen s použitím omezení plynoucím ze stávajícího Standardního částicového modelu, tak jedinou spodní limitou je nula. To ale platí pouze pro hmotnost nejlehčího neutrina, na součet hmotností všech tří neutrin už máme netriviální odhady. Viz např. pátý odstavec v sekci Mass zde:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino#Mass> - pro absolutní hodnotu rozdílu čtverců hmotností neutrin 1 a 2 (což nejsou ani elektronová, ani mionová, ani tauonová neutrina, ale vlastní energetické stavy neutrin, odpovídající jejich kombinacím) dostáváme limit  $|\Delta m_{12}^2| = 0,000079 \text{ eV}^2$ , a pro odpovídající rozdíl čtverců hmotností neutrin 2 a 3 potom  $|\Delta m_{23}^2| = 0,0027 \text{ eV}^2$ . Takže pokud by např. neutrimo 1 mělo nulovou klidovou hmotnost, tak potom neutrimo 2 musí mít hmotnost odmocnina(0,000079)=0,0089 eV. Známeli klidové hmotnosti vlastních stavů 1, 2 a 3, tak potom lze spočítat klidové hmotnosti elektronového, mionového a tauonového neutrina za použití tzv. Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata matice (viz

[https://en.wikipedia.org/wiki/Pontecorvo%E2%80%93Maki%E2%80%93Nakagawa%E2%80%93Sakata\\_matrix](https://en.wikipedia.org/wiki/Pontecorvo%E2%80%93Maki%E2%80%93Nakagawa%E2%80%93Sakata_matrix) ), jejíž elementy se ale bohužel určují neméně lehkou, než ty hmotnosti neutrin.

Pokud ale nelpíme na hledání limitů určovaných čistě jen Standardním částicovým modelem, ale přibereme také modely pro jiné fyzikální oblasti (konkrétně Standardní kosmologický model), tak dostáváme i další spodní odhady - opět již ve zmíněné sekci <https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino#Mass> je uvedeno, že z dat získaných při studiu gravitačního čočkování galaktických clusterů vychází hodnota pro součet hmotností všech tří neutrin jako 1,85 eV. Pokud k tomu přidáme výše zmíněné odhady na rozdíly hmotností, znamenalo by to, že hmotnosti všech tří neutrin musí být k sobě velice blízké, pohybující se okolo hodnoty  $1,85/3 = 0,617 \text{ eV}$ .

Zde je ale nutné říct, že výsledky získané studiem gravitačního čočkování zároveň vyžadují

splnění svých vlastních modelových předpokladů - jinými slovy, zatímco odhady zmíněné v prvním odstavci tohoto příspěvku bychom mohli uvést slovy: "Pokud platí Standardní částicový model ...", tak odhady z druhého odstavce by bylo zapotřebí uvést slovy: "Pokud platí Standardní částicový model PLUS pokud také platí Standardní kosmologický model ...".

Re: odhad

**Vladimír Wagner**, 2019-09-16 22:30:47

Díky Pavlovi za odpověď, jen bych doplnil, že z druhého kvadrátu rozdílu hmotnosti neutrin vychází rozdíl mezi dvěma stavy neutrin 0,05 eV. Připomínám, že předpokládaná dosažitelná limita u KATRIN je 0,2 eV. Pokud je tedy správná interpretace gravitačního čočkování vzdálených galaxií, o které píše Pavel a hmotnost i elektronového neutrina bude okolo 0,6 eV, tak to KATRIN uvidí. Pokud ovšem je v této interpretaci nějaký zádrhel a degenerace hmotností není tak velká, pak by hmotnost byla v řádu 0,05 eV a méně, tak už bohužel pro KATRIN nebude dosažitelná. Bude pak potřeba najít úplně nový typ experimentu, případně spektrometru. Muselo by jít o spektrometry nové generace. Ty by pak v principu mohly rozlišit různé hmotnostní stavy neutrina.