Oscilácia neutrín?

RNDr. Dušan Brunczko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

Rok 1998 z pohľadu fyziky elementárnych častíc možno nazvať rokom *neutrín.* Pripomeňme si, že neutrína sú neutrálne častice, hmotnosť ktorých je buď nulová alebo blízka k nule. Ich schopnosť interagovať s okolím je tak slabá, že bez veľkých problémov preletia cez Zem, a to bez toho, že by si 'uvedomili' jej existenciu. Dnes veríme, že existujú tri rôzne typy neutrín – elektrónové, miónové a τ- neutríno. [1]

Neutríno je častica, ktorá bola objavená na stole teoretika, a to Wolfgangom Paulim v roku 1930, ktorý si bez neho nijako nevedel dať rady so spojitým spektrom elektrónov, ktoré vznikalo rozpadom napr. neutrónov (takému rozpadu hovoríme $\beta-$ rozpad), a ktoré narúšalo zákon zachovania energie. Experimentálny objav neutrína však dal na seba dlho čakať, historicky sa najskôr, v roku 1956 Fredom Reinesom a Clydeom Cowanom použitím jadrového reaktora našlo elektrónové, a neskôr, v 1961 v brookhavenských narodných laboratóriach v USA aj miónové neutríno. Možno čitateľa udiví, ale dodnes neexistuje spoľahlivý priamy experimentálny dôkaz o existencii τ- neutrína – máme však po ruke toľko nepriamych indícií o ňom, že nikto už dnes jeho existenciu nespochybňuje. [2]

Pokračujme však ďalej. Je čoraz evidentnejšie, že neutrína hrajú jednu z kľúčovych úloh v stavbe nášho Vesmíru. Napr. znalosť ich hmotnosti poriadne 'potrasie' teóriami, ktoré zaujíma, či je Vesmír uzavretý, otvorený alebo stacionárny. Nezanedbateľnú úlohu hrajú aj v ďalšej záhade, ktorú dnes rieši astrofyzika, a tou je problém tzv. 'dark' (temnej) hmoty, ktorá, ako všetko naznačuje, predstavuje prevažnú väčšinu hmotnosti nás obklopujúcich galaxií, včítane našej vlastnej Mliečnej Dráhy. [3]

V záhadach, ktoré majú 'na svedomí' neutrína môžeme pokračovať. Keď v roku 1964 John Bahcall a Ray Davis navrhli experimentálnu registráciu neutrín pochádzajúcich z našeho Slnka, netušili, že po ich prvej úspešnej registrácii v zlatej bani v Južnej Afrike kolektívom Freda Reinesa, experiment Homestake, vedený Ray Davisom opäť v bani v Severnej Dakote, príde k ďalšej záhade – predpokladajme, že poznáme procesy, ktoré prebiehajú v Slnku. Potom nie je veľkým problémom spočítať počet neutrín, ktoré Slnko produkuje. To všetko sa stalo, a výsledok experimentu všetkých prekvapil - neutrín sa pozoruje podstatne menej, ako by sa malo! Samozrejme, že sa neverilo experimentu (nech si čitateľ všimne našu istotu, že o jadrových procesoch na Slnku vieme všetko podstatné ...), ale darmo, aj ďalšie, podstatne precíznejšie experimenty potvrdili vyššie spomenutý nesúlad (napr. v roku 1991-92 experiment SAGE v Rusku a experiment GALLEX v Taliansku). Vznikol tak problém 'slnečných neutrín'. K nateraz nepreskúmaným javom, ktorý sa bezprostredne

[1] Vďaka e^+e^- urýchľovaču LEP v CERN, kde sa študovali rozpady Z bozónu, vieme, že s hmotnosťou menšou ako 45 GeV ich nemôže byť viac ako tri. Avšak nie je vylúčená existencia neutrín, ktoré sú ťažšie ako 45 GeV.

[2] V roku 1976 bola Martinom Perlom v SLAC v Stanforde, USA, objavená $\tau-$ častica. Analýza jej rozpadu naznačila, že v ňom vystupujúce neutríno nie je ani elektrónové, a ani miónové. Šlo teda o novú časticu, ktorá dostala názov τ- neutríno.

[3] Pod pojmom 'dark' hmota máme na mysli hmotu, ktorá je detegovateľná len na základe svojich gravitačných účinkov. Dnes existujú indikácie, že prinajmenšom časť tejto hmoty má 'nebaryónovú' podstatu, teda nie je zložená z protónov, neutrónov, ba ani z elektrónov. Musia ju teda tvoriť častice, ktoré vznikli v čase Big Bangu ('Veľkého tresku'), pričom tieto sú buď stabilné, alebo doba ich života musí byť porovnateľná s vekom Vesmíru. Jeden z horúcich favoritov, z ktorého sa skladá 'dark' hmota, je aj hmotné neutríno (s hmotnosťou väčšou ako 80 eV).

týka práve neutrín, či antineutrín, patrí aj jav ich oscilácie. Ide o vlastnosť neutrín, ktorá sa vymyká z rámca vybudovanej teórie (Štandartný model), no majúca zásadný význam nielen pre fyziku elementárnych častíc, ale aj pre astrofyziku. Aby sme však pochopili, čo si vlastne pod 'osciláciou' vo fyzike elementárnych častíc predstavujeme, zastavme sa najskôr pri systéme neutrálnych K^0 a $\bar{\mathrm{K}}^0$ mezónov, kde tento efekt je už dostatočne dlhú dobu známy a navyše, my dnes dokonca vieme vysvetliť jeho podstatu.

Neutrálne $\mathbf{K^0}$ a $\mathbf{\bar{K}^0}$ mezóny – skutočný div prírody

Kvantová mechanika dlho zápasila o svoje prežitie, všetkými úskaliami však nateraz prešla bez šrámov. Jedným z jej veľkých triumfov je vysvetlenie záhad, ktoré sa pozorovali pri neutrálnych časticiach, ktorým hovoríme K^0 mezóny. Je zaujímavé, že každá nateraz pozorovaná častica má v prírode svojho partnera. Výnimkou jej len fotón, ktorého partnerom je on sám. [4] Partner, alebo, ako sa bežne označuje, antičastica k danej častici, v súlade s CPT teorémou [5] má rovnakú hmotnosť, ale napr. opačný elektrický náboj. Kameňom úrazu predošlého tvrdenia sú ale neutrálne K^0 mezóny. Ku K^0 mezónu, ktorý sa skladá z d a $\bar{s}$ kvarku, 'opačnou' casticou je $\bar{\mathrm{K}}^0$ mezón, ktorý pozostáva z $\bar{d}$ a s kvarku. V čom spočíva problém s tymíto mezónmi? Faktom je, že v prírode K^0 a $\bar{\mathrm{K}}^0$ mezóny *vždy* tvoria 'nerozlučnú' dvojicu. Tá z jednej strany voči silnej a elektromagnetickej interakcii vystupuje ako nezávislá, z pohľadu slabej interakcie je však ich vzájomná väzba značne skorelovaná. V praxi to vyzerá tak, akokeby dvojica K^0 a $\bar{\mathrm{K}}^0$ vytvárala inú dvojicu častíc, ktoré označujeme K^0_s a K^0_L, ktoré sa však *líšia* v hmotnosti, a práve tento hmotnostný rozdiel je zodpovedný za ich osciláciu, tj. ak na začiatku máme dvojicu napr. K^0 a $\bar{\mathrm{K}}^0$, potom po nejakom čase budeme pozorovať dvojicu K^0_s a K^0_L s istým počtom K^0_s a K^0_L mezónov, ale, a to je podstatné, tento počet sa bude s časom meniť. Znamená to, že napr. v nejakom čase budeme pozorovať *len* K^0_s alebo *len* K^0_L mezóny! Takémuto javu hovoríme *oscilácia*. Je tým väčší, čím je väčší hmotnotný rozdiel medzi takouto dvojicou, v prípade K^0_s a K^0_L je tento rozdiel rovný $3,489 \cdot 10^{-6}$ eV. Nuž, a ako sa CPT teoréma 'díva' na takúto bizarnú dvojicu? Podľa nej, musia byť pravdepodobnosti, že K^0 bude K^0 mezónom a *súčasne* $\bar{\mathrm{K}}^0$ bude $\bar{\mathrm{K}}^0$ mezónom rovnaké. To nie je vôbec na prvý pohľad (majúc na pamäti silnú koreláciu medzi obidvomi typmi mezónov) také triviálne, pretože určujúca je tu podmienka 'súčasnosti'.

V prírode existujú ďalšie analogické dvojice, kde sa jav oscilácie pozoruje. Ide o tzv. neutrálne D^0 a $\bar{\mathrm{D}}^0$ mezóny, ktoré sa skladajú z $\bar{u}$ a c, resp. u a $\bar{c}$ kvarkov, ďalej o neutrálne B^0 a $\bar{\mathrm{B}}^0$ mezóny, ktoré sa skladajú z d a z $\bar{b}$, resp. z $\bar{d}$ a b kvarku, a o neutrálne B^0_s a $\bar{\mathrm{B}}^0_\mathrm{s}$ mezóny, ktoré sa skladajú z s a $\bar{b}$, resp. z $\bar{s}$ a b kvarku. Vo všetkých týchto prípadoch sa ale jedná o častice, ktoré nie je vôbec jednoduché experimentálne 'pripravit" (pravdepodobnosť ich vzniku je veľmi malá), napriek tomu, nedávno uskutočnené experimenty (L3, OPAL, ALEPH a DELPHI na urýchľovači LEP, Švajčiarsko, CDF na urýchľovači vo FERMILAB, USA) naozaj potvrdzujú existenciu oscilácie u týchto mezónov, a to v súlade s teoretickým očakávaním. [6] Aj keď trošku od našej hlavnej témy

[4] Výnimkou môže byť aj neutríno, a to vtedy, pokiaľ má nenulovú hmotnosť (čo je nutnou podmienkou). Takémuto neutrínu hovoríme, že je Majoranove, pokiaľ by ale CPT (o CPT viď hneď ďalšiu poznámku) partner neutrína nebol totožný s ním samým, jednalo by sa o tzv. Diracove neutríno.

[5] Predstavme si, že máme elementárnu časticu o nejakej hmotnosti a hodnote elektrického náboja. V kvantovej mechanike túto časticu popisujeme komplexnou vlnovou funkciou $\Psi(x,y,z,t)$ (tu x, y, z sú priestorove súradnice a t označuje čas), kvadrát ktorej udáva pravdepodobnosť, s akou táto častica v danom čase bude na danom mieste. Nezávisle na poradí, ak častici zmeníme znamienko elektrického náboja na opačné a vlnovú funkciu $\Psi(x,y,z,t)$ nahradíme funkciou $\Psi(-x,-y,-z,-t)$, hovoríme, že sme po sebe vykonali tzv. C, P a T operáciu, a ak tieto operácie prevedieme všetky, hovoríme, že sme vykonali CPT operáciu. CPT teoréma tvrdí, že pokiaľ by sme vykonali horeuvedené operácie (v ľubovoľnom poradí) na ľubovoľnú časticu (presnejšie na funkciu, ktorá časticu popisuje vo vyššie uvedenom význame), tak v princípe nespoznáme, že sa tak naozaj aj stalo. Vlnová funkcia je teda voči CPT operácii invariantná, resp. platí, že $|\Psi(x,y,z,t)|^2 = |\Psi(-x,-y,-z,-t)|^2$.

[6] Hmotnostný rozdiel medzi dvomi neutrálnymi B mezónmi je $3,1387 \cdot 10^{-4}$ eV, teda efekt oscilácie je v prípade

odbieham, neutrálny systém K^0 a $\bar{K}^0$ mezónov je jediným systémom, kde sa nateraz podarilo experimentálne priamo dokázať, že 'otočenie' časovej šípky vedie k rôznemu výsledku (teda, že dochádza k narušeniu T symetrie, tj. *neplatí* rovnosť $|\Psi(x,y,z,t)|^2 = |\Psi(x,y,z,-t)|^2$) - stalo sa tak len celkom nedávno, koncom 1998 roku experimentom CPLEAR vo Švajčiarsku. [7] Tento systém sa detailne analyzuje aj pre pozorovanie priameho narušenia CP symetrie (teda odchýľky od rovnosti $|\Psi(x,y,z,t)|^2 = |\Psi(-x,-y,-z,t)|^2$), podobne je výborným prostriedkom, ako experimentálne preveriť CPT teorému.
Takže teraz, keď už vieme, že existuje oscilácia u dvojice K^0 a $\bar{K}^0$, a že jej existencia je spôsobená vzájomným sa prelínaním týchto mezónov, môžeme sa vrátiť k problému oscilácie neutrín. Najskôr si ale povieme, ako vlastne neutrína môžeme detekovať, keď tak slabo interagujú s okolitou hmotou.

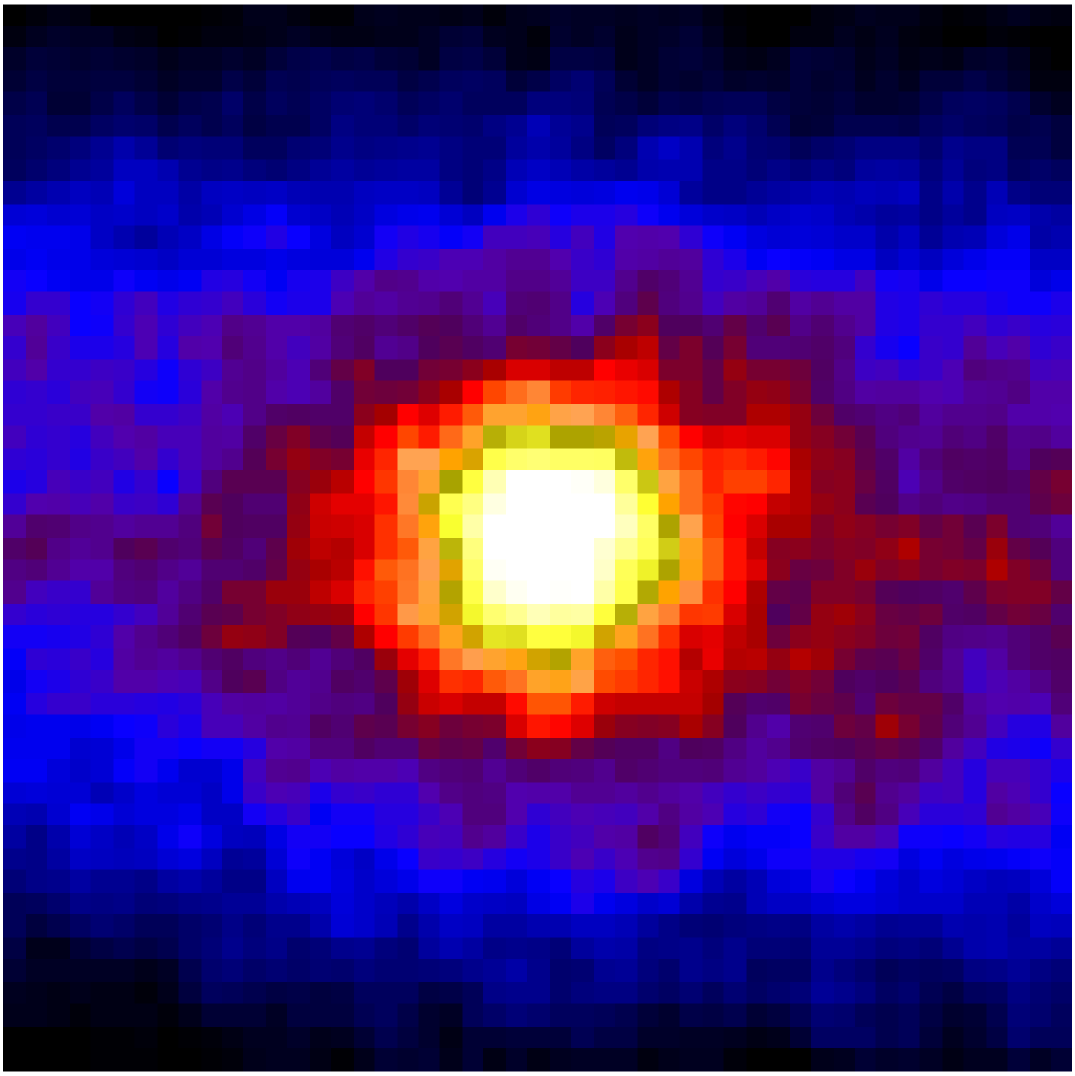
Registrácia neutrín

Začneme tým, že neutrína, resp. antineutrína nemôžeme pozorovať priamo. Pre ich pozorovanie sa najčastejšie používajú nasledovné dve za sebou idúce interakcie. V prvej neutríno, ktoré vletí do detektora, v ktorom je napr. voda, interaguje s prótonom, $\nu_e + p \to e^+ + n$, pričom vznikne neutrón, ktorý sa vzápätí zviaže s protónom, pričom vzniká deuterón, a čo je pre detekciu takejto interakcie hlavné, fotón o energii 2,2 MeV (väzbová energia deuterónu), $n + p \to d + \gamma(2,2\,\mathrm{MeV})$. Pre detekciu neutrína treba teda 'vediet", že pozorovaný fotón (registrovaný pomocou fotonásobičov) má správnu hodnotu energie a súčasne, že existuje korelácia (priestorová a časová) medzi pozitrónom z prvej reakcie (ktorý vzápätí interaguje s elektrónom z okolia a prechádza vo fotón) a fotónom z reakcie druhej. Voda ako detektor pre neutrína poskytuje ešte jednu možnosť ich registrácie. Predstavme si, že neutríno interaguje s nejakým kvarkom z kyslíka, ktorý tvorí molekulu vody. Výsledkom takejto interakcie bude produkcia buď $\mu^\pm$ mezónu alebo elektrónu, či pozitrónu. Takto vzniknuté častice sa budú ďalej pohybovať vo vode. Dĺžka ich letu však bude závisieť na ich energii, napr. častica o energii 1 GeV prejde asi 5 metrov. Pokiaľ sa táto častica pohybuje rýchlosťou, ktorá je väčšia než je rýchlosť svetla vo vode, dôjde k produkcii fotónov na základe Čerenkovovho žiarenia. Tieto sa opäť registrujú pomocou fotonásobičov. Rozdiel medzi $\mu^\pm$ mezónmi a elektrónmi je predovšetkým v tvare ich dráhy (dráhy $\mu^\pm$ mezónov sú obvykle priamky) a v čistote signálu z fotónov pochádzajúcich z Čerenkoveho žiarenia. To umožňuje ich rozlíšenie a v konečnom dôsledku aj rozlíšenie, či do interakcie s kvarkom v kyslíku vstúpilo miónové alebo elektrónové neutríno, či antineutríno.
Detekcia neutrín je skutočne extrémne slabá, a preto jej cenou je požiadavka na skutočne enormné rozmery detektorov. Napr. detektor SuperKamiokande, ktorý je umiestnený v starej zinkovej bani v pohorí Ikena blízko mesta Kamioka v Japonsku, obsahuje cca 50 000 ton veľmi čistej vody, ktorá slúži na detekciu neutrín, a to na základe vyššie spomenutého Čerenkovovho žiarenia.
Neutrína je možné detekovať aj napr. pomocou reakcie $\nu_e + T \to ^3 He + e^-$, kde T označuje trícium, výsledkom ktorej je monochromatický elektrón, ktorý je vidieť v spektre β rozpadu trícia ako maximum. Z praktického hľadiska sa však nejedná o jednoduchý experiment - nech si čitateľ skúsi predstaviť, aká je drahá výroba trícia.
Rovnako finančne náročná je detekcia neutrín pomocou chlóru (detekujeme reakciu $^{37}Cl + \nu_e \to ^{37} Ar + e^-$) alebo gália (detekujeme reakciu $^{71}Ga + \nu_e \to ^{71}Ge + e^-$). Chlór sa použil napr. v Homestake experimente v USA, gálium v experimentoch GALLEX, Gran Sasso, Taliansko a v SAGE, Baksane, Rusko.

Na obr. ?? je ukázaný skutočný unikát - ide o neutrínový obraz Slnka, ktorý bol získaný v SuperKamiokande detektore s dobou expozície 537 dní! Jedná sa teda o časovo neprerušenú

B mezónov dokonca väčší ako v prípade K mezónov. V prípade D mezónov je tento efekt oproti B mezónom ešte faktorom 20 väčší.

[7] V praxi to znamená, že pravdepodobnosť, že $\bar{K}^0$ prejde do K^0 je podstatne väčšia, ako pravdepodobnosť, že K^0 prejde do $\bar{K}^0$. Ide teda o nesymetrický proces.

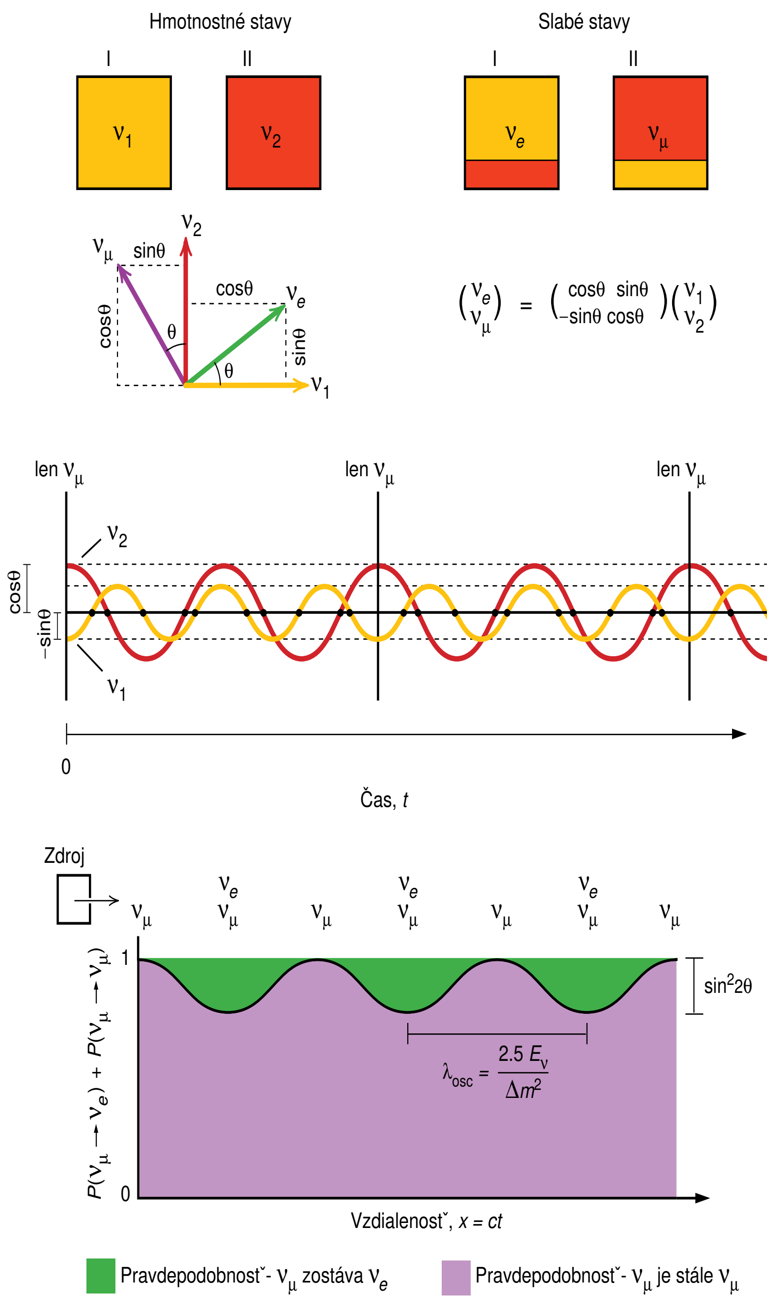


Obr. 1: *Neutrínový 'obraz' Slnka.*

registráciu neutrín prilietavajúcich zo Slnka a jeho bezprostredného okolia po dobu skoro dvoch rokov. Aby sme sa dopracovali k obrázku 1, museli sme skutočne prejsť značný kus cesty nielen v teórii fyziky elementárnych častíc, ale aj v zdokonaľovaní jej experimentálnych metód.

Oscilácie neutrín

Prvý raz možnosť existencie oscilácie neutrín navrhol už v roku 1957 B. Pontecorvo, a to s analógiou s osciláciou u K mezónov. V 1969 Gribov a Pontecorvo navrhli prvú fenomenologickú teóriu zmiešavania neutrín a ich oscilácie, v roku 1976 existovali už dve rôzne schémy prípadnej oscilácie neutrín, a to založenej jednak na predpoklade, že neutrína sú Majoranovho typu a jednak na predpoklade, že sa jedná o Diracove neutrína.
Dnes sa v skutočnosti uskutočňuje niekoľko typov experimentov, cieľom ktorých je vyriešenie otázky oscilácie neutrín. Obvykle sa uvažuje len oscilácia medzi elektrónovým a μ neutrínom, resp. antineutrínom, viď obr. **??**, kde je graficky znázornené ich zmiešanie (ktoré je analogické zmiešaniu v prípade K^0 a $\bar{K}^0$ mezónov). V strede obrázku je zas naznačený priebeh oscilácie v závislosti na čase, a v jeho dolnej časti je rozdelenie pravdepodobnosti, že ν_μ prejde v ν_e, resp. že ν_μ zostane bezo zmeny.

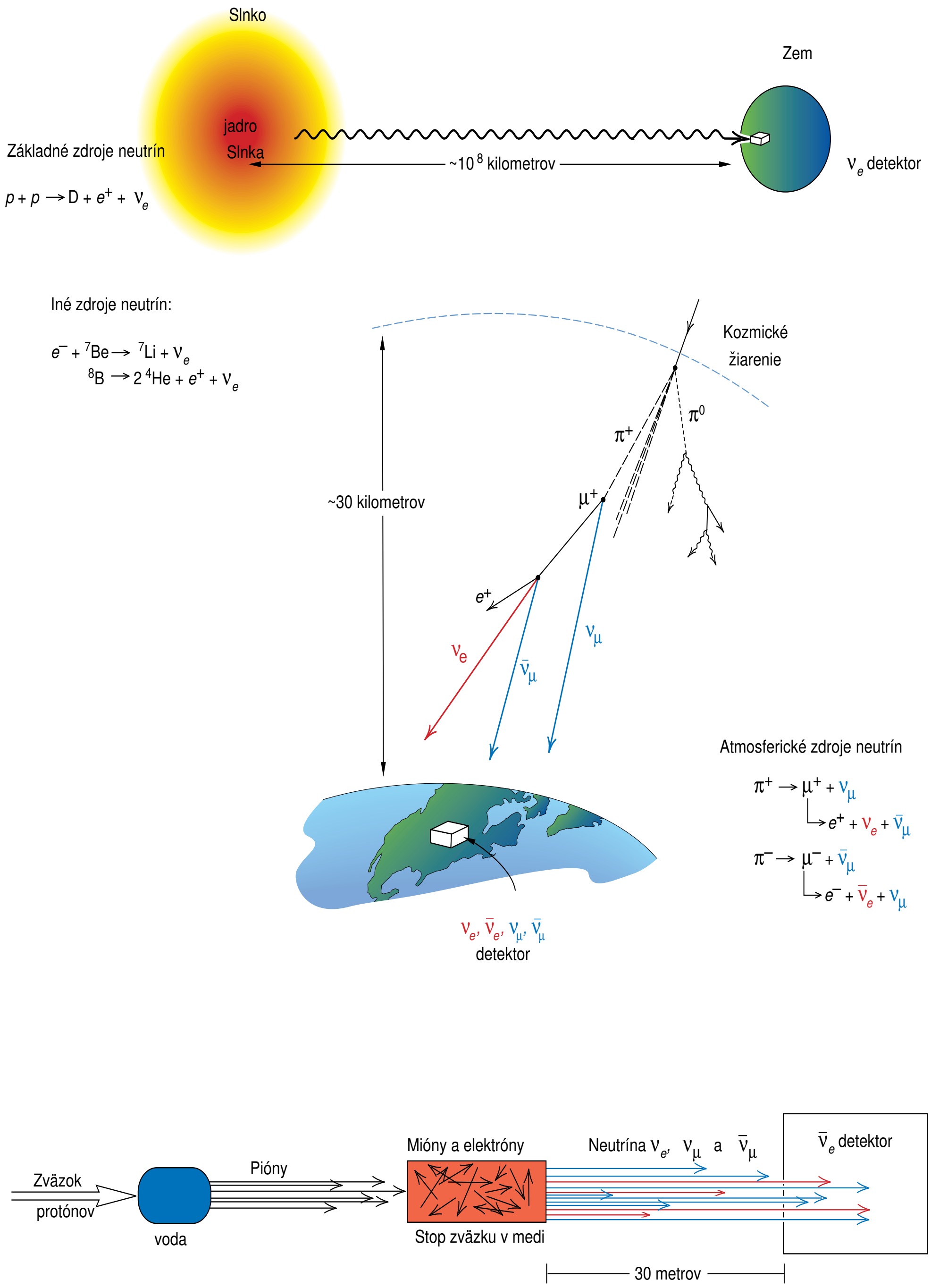


Obr. 2: *Oscilácia neutrín.*

Pokiaľ by ale efekt oscilácie bol skutočne experimentálne nevyvrátiteľne pozorovaný, šlo by v princípe o oscilácie medzi všetkými tromi ľahkými typmi neutrín, resp. antineutrín (neexistuje totiž dôvod, prečo by sa z tohto pohľadu malo špeciálne vydelovať len elektrónové a μ neutríno, resp. antineutríno). Ide však o efekt, ktorý je veľmi slabý, preto neudivuje, že na dnes dosiahnuté výsledky sa svet pozerá veľmi opatrne.
Predpokladajme však na okamih, že v praxi skutočne pozorujeme osciláciu neutrín, resp. antineutrín. Čo by to znamenalo? Podľa analógie s neutrálnym systémom K^0 a $\bar{K}^0$ mezónov, nami pozorované neutrína by boli výsledkom istého zmiešania iných stavov neutrín, pričom miera tohto zmiešania by zodpovedala miere narušenia tzv. leptónového čísla. [8] Štandartný model nepredpokladá existenciu oscilácie neutrín, či antineutrín. Dnes v oblasti energie do 1 TeV sa zdá, že Štandartný model popisuje prakticky všetko, čo v tejto oblasti pozorujeme. O to väčší význam má prípadna existencia javu, ktorá je mimo jeho dosah, a tou oscilácia neutrín rozhodne je.
Nezanedbateľné, z pohľadu na možnú osciláciu neutrín, sú aj experimenty, ktoré sa snažia vyriešiť otázku hmotnosti neutrín. Nenulová hmotnosť neutrína je totiž *nutnou* podmienkou pre efekt oscilácie. Treba si však uvedomiť, že aj tu sme z experimentálneho hľadiska v extrémnej oblasti, kde efekty neželateľného pozadia sú zhruba rovnako veľké ako efekt, ktorý hľadáme.
Zastavme sa najskôr pri, z experimentálneho hľadiska podobných, experimentoch, LSND (z anglického 'Liquid Scintillator Neutrino Detector'), ktorý sa uskutočňuje v Los Alamos, USA a KARMEN, ktorý sa realizuje v Rutherfod Appleton Laboratory, Chilton, Veľká Británia. V obidvoch prípadoch protónový zväzok je vyvedený do terča (v prípade LSND, viď dolnú časť obr. **??**, ide o vodu, v prípade KARMEN o zmes tantalu s ťažkou vodou), následkom čoho vzniknú pióny. Zatiaľ, čo záporne nabité pióny sú prakticky okamžite absorbované prostredím terčíka, kladne nabité pióny sa rozpadajú podľa reakcie $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ s polčasom rozpadu $\tau = 26$ ns. μ^+ mezón sa ďalej rozpadá na pozitrón, elektrónové neutríno a $\bar{\nu}_\mu$ antineutríno, $\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ s polčasom rozpadu $\tau = 2,197$ μs. V prípade LSND sa v ďalšom kroku analyzuje reakcia $\bar{\nu}_e + p \to e^+ + n$. Pretože ale z rozpadu μ^+ mezónu vzniká $\bar{\nu}_\mu$ antineutríno a nie $\bar{\nu}_e$, ak by k reakcii $\bar{\nu}_e + p \to e^+ + n$ došlo, znamenalo by to, že $\bar{\nu}_\mu$ antineutríno prešlo do $\bar{\nu}_e$ antineutrína, teda nastala by jeho oscilácia. Reakcia $\bar{\nu}_e + p \to e^+ + n$ prebieha vo vodnom prostredí, preto vzápätí po jej prebehnutí nastáva záchyt neutrónu protónom, pričom vzniká deuterón a fotón s presne určenou energiou (2,2 MeV), ktorej hodnota zodpovedá väzbovej energii deuterónu, $n + p \to d + \gamma$. Pozorovanie fotónu o tejto energii je preto jedným z určujúcich kritérii, že k reakcii $\bar{\nu}_e + p \to e^+ + n$ došlo.
Aké sú výsledky týchto experimentov? Prakticky obidva experimenty zbierajú štatistiku od roku 1993. V roku 1996 na základe štatistiky z rokov 1993 až 1995 LSND oznámil, že pozoruje 22 prípadov, kedy došlo k oscilácii $\bar{\nu}_\mu$ do $\bar{\nu}_e$, čo zodpovedá pravdepodobnosti cca 31 %. Experiment KARMEN však tieto výsledky nepotvrdil... Je tu však, zdá sa, ešte priestor pre dôkladnu komparatívnu analýzu, takže vyčkajme. Navyše sa pripravuje ďalší, podobný experiment MiniBooNE vo FERMILAB, USA, ktorý by mal tento problém snáď definitívne vyriešiť.

Experimenty LSND a KARMEN pracovali s neutrínami, resp. antineutrínami, ktoré boli pripravené laboratórnym spôsobom. Obráťme teraz pozornosť k nami už v úvode spomenutému problému nedostatku slnečných neutrín. Z obr. 3 plynie, že hlavným zdrojom slnečných neutrín sú reakcie $p + p \to D + e^+ + \nu_e$ spolu s $e^- +^7 Be \to^7 Li + \nu_e$ a $e^- +^8 Be \to 2\ ^4He + e^+ + \nu_e$. Doposiaľ štyri experimenty publikovali svoje výsledky týkajúce sa pozorovania slnečných neutrín - ide o experimenty SuperKamiokande, Homestake, GALLEX a SAGE.

[8] V prírode nateraz pozorujeme niekoľko striktných zákonov zachovania. Patrí k nim aj zákon zachovania elektrického náboja, ale aj tzv. baryónového a leptónového čísla. Častice sú totiž buď leptónmi (potom im kladieme hodnotu leptónového čísla 1, napr. elektrón, neutríno), resp. baryónmi (napr. protón, neutrón - tým kladieme hodnotu baryónoveho čísla 1, hodnota leptónového čísla je pre ne 0). Antičastice budú mať opačné hodnoty leptónového a baryónového čísla ako častice.



Obr. 3: *Zdroje neutrín.*

Všetky bez výnimky publikovali výsledky, ktoré zodpovedali počtu slnečných neutrín podstatne nižšiemu než predpovedá teória. Tento rozpor, zdá sa, vie vyriešiť predpokladaná oscilácia neutrín. Ak by totiž slnečné elektrónové neutríno počas letu zo Slnka k Zemi sa zmenilo a prešlo do μ neutrína, potom by pozorovaný deficit elektrónových neutrín šiel na vrub oscilácie. Predpokladajme na okamih, že dochádza len k oscilácii medzi elektrónovým a μ neutrínom. Analýza výsledkov vyššie uvedených štyroch experimentov vedie k záveru, že hodnota štvorca sínusu ich uhla zmiešania (viď hornú časť obr. 2) by bola buď $sin^2 2\theta \sim 0,6-1$ alebo $sin^2 2\theta \sim 0,008$, čo odpovedá štvorcu rozdielu hmotností elektrónového a μ neutrína $\Delta m_\nu^2 = 5.10^{-6}$ eV^2 alebo $\Delta m_\nu^2 = (5-8).10^{-11}$ eV^2. [9] V prípade LSND je $\Delta m_\nu^2 = 0,2-10$ eV^2, teda vidíme značný rozdiel. To samozrejme vyvoláva množstvo najrôznejších špekulácií...
Zastavme sa nakoniec pri výsledkoch detektora SuperKamiokande. Ten na základe analýzy 4700 neutrínových interakcií počas 537 dní prišiel k záveru, že pravdepodobnosť, že v pozorovaných prípadoch nedochádza k oscilácii μ neutrína do elektrónového je menšia ako 1:1000 000. Pokiaľ sa pripustí možnosť oscilácie, potom $\Delta m_\nu^2 = 0,0049$ eV^2, čo ako čitateľ vidí, nesúhlasí ani z jedným výsledkov z predchádzajúcich experimentov, aj keď samotní autori tvrdia niečo iné, a síce, že ich výsledok nie je v priamom konflikte napr. s výsledkom LSND. To tiež hovorí o dnes ešte nejasnej situácii nielen v komparatívnej analýze neutrínových dát, ale aj v neujasnení si jednotného teoretického náhľadu na celý problém.

Ako ďalej?

Problém oscilácie neutrín výsledky z Japonska teda definitívne nerieši. Je treba, ako ukazuje prax, počkať na ich potvrdenie, či vyvrátenie na základe iných experimentov. Dnes sa napr. pripravuje experiment SNO (z anglického 'Sudbury Neutrino Observatory') s použitím cca 1000 ton ťažkej vody, K2K (z anglického 'KEK to Kamiokande'), Borexino s použitím 300 ton ultračistého scintilátora v Gran Sasso a experiment MINOS. Ide totiž skutočne o veľmi ťažko detekovateľný efekt, v analýze ktorého ľahko môžeme chybovať. To, že je to tak, dokazuje napr. dodnes nevyjasnená situácia medzi výsledkami experimentu KARMEN a LSND.
Zdrojom neutrín, resp. antineutrín, ako je vidieť aj zo strednej časti obr. 3, je aj kozmické žiarenie. To v atmosfére Zeme vytvára spŕšky, pozostávajúce hlavne z piónov (ale aj z K mezónov). Tie slabým rozpadom produkujú elektrónové, resp. μ neutrína a antineutrína. Ukazuje sa, že sa produkuje asi 100 takýchto 'atmosférických' neutrín, resp. antineutrín, za sekundu (o slabosti interakcie neutrín a antineutrín s prostredím svedčí aj fakt, že existuje len asi 10 % pravdepodobnosť, že jedno takto vzniklé neutríno, či antineutríno bude za dobu nášho života interagovať s nukleónom z nášho tela). Je tiež bezosporu zaujímavé, že 'atmosférických' μ neutrín a antineutrín by malo byť dvakrát viac ako elektrónových neutrín a antineutrín. Vidieť to nakoniec už z reakcií uvedených v strednej časti obr. 3. Avšak už prvé merania, asi z pred desiatych rokov, ukázali, že v skutočnosti to tak nie je. Experimenty uskutočnené IMB (experiment uskutočnený v soľnej bani blízko Clevelandu, USA) a Kamioka detektormi ukázali, že ich je zhruba rovnaký počet. Začalo sa hovoriť o *anomálii atmosférických neutrín*. Dnes existuje mnoho hypotéz, snažiacich sa tento fakt vysvetliť (spochybňovali sa napr. výpočty očakávaného toku neutrín daného typu alebo sa spochybňovala samotná detekcia neutrín,...). Faktom je, že prípadna oscilácia nám nateraz známych troch neutrín by mohla napomôcť vysvetleniu tejto anomálie, ale zrejme sama o sebe stačiť na to nebude. Preto sa v teórii zaviedlo ešte jedno, tzv. 'sterilné' neutríno (ktoré by mohlo byť aj súčasťou už spomenutej 'dark' hmotnosti). Ide však o špekulácie, tu si budeme tiež musieť ešte počkať na ďalšie experimenty a na ďalšie teoretické analýzy.
Čitateľ teda vidí, že problematika fyziky neutrína je stále otvorenou knihou. Popri LHC fyzike,

[9]Porovnanie výsledkov experimentov vôbec nie je jednoduché. Musíte napr. vziať do úvahy rôzny spôsob registrácie neutrín, rôznu geometriu jednotlivých detektorov, efektivitu registrácie a pod..

ktorá bude tak povediac fyzikou Higgsu (viď Quark 4/98), popri v poslednom čase čoraz viac priťahujúcej pozornosti existencie 'prirýchlych' kozmických častíc (viď Quark 5/99), sa jedná dnes o jeden zo základných pilierov, pomocou ktorých sa zrejme fyzika elementárnych častíc 'prenesie' do ďalšieho storočia.