

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Rupert Leitner

Objev oscilačí neutrin byl oceněn Nobelovou cenou za fyziku 2015

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 61 (2016), No. 1, 2–13

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/144897>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2016

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Objev oscilací neutrin byl oceněn Nobelovou cenou za fyziku 2015

Rupert Leitner, Praha

Abstrakt. Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2015 získali stejným dílem Takaaki Kajita z Tokijské univerzity v Japonsku a Arthur Bruce McDonald z Queen's University v Kingstonu v Kanadě za objev oscilací neutrin. Oficiální citace nobelovského výboru zní: „for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass“.



Takaaki Kajita



Arthur Bruce McDonald

Nobelova cena za fyziku pro rok 2015 je v pořadí už čtvrtá cena udělená za fundamentální objevy v neutrinové fyzice. V roce 1988 ji získali L. Lederman, M. Schwartz a J. Steinberger za objev mionového neutrina. Paradoxně až sedm let poté v roce 1995 byl oceněn objev prvního druhu neutrina (elektronového antineutrina) F. Reinesem a C. Cowanem (ten se bohužel udělení ceny nedožil). Za dalších sedm let v roce 2002 získali cenu R. Davis jr. za dlouhodobý detailní výzkum slunečních neutrin a M. Koshiba za detekci neutrin z výbuchu supernovy 1987A. Články o těchto cenách publikovaly také Pokroky matematiky, fyziky a astronomie [3], [5], [2].

Prof. RNDr. RUPERT LEITNER, DrSc., Matematicko-fyzikální fakulta UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: rupert.leitner@mff.cuni.cz

Neutrina

Neutrina jsou nejlehčí elementární fermiony s polovičním spinem, nejméně milionkrát lehčí než elektron. Neinteragují silnou interakcí (jsou to tzv. leptony), a protože nemají elektrický náboj, interagují téměř výhradně slabou interakcí zprostředkovanou hmotnými kalibračními bosony W a Z.

Existence neutrina byla předpovězena W. Paulim již v roce 1930. Pauli se snažil vysvětlit spojité spektrum elektronů v beta rozpadech jader a také spin některých lehkých atomových jader. Podle tehdejších představ byla jádra složena z protonů a elektronů. Například jádro izotopu dusíku $^{14}_7\text{N}$ by bylo složeno ze 14 protonů a 7 elektronů. Protože protony i elektrony jsou fermiony se spinem $1/2$, mělo by mít jádro složené z 21 fermionů poločíselný spin, ale spin jádra $^{14}_7\text{N}$ v základním stavu je roven 1. Beta rozpady jader byly přirozeně považovány za emisi elektronu z jádra $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{Y} + e^-$, což by ale znamenalo diskrétní spektrum energií elektronů. Přidání antineutrina ke každému elektronu v jádře oba problémy řešilo, tj. například již zmíněné jádro dusíku by se skládalo ze 7 protonů a 7 elektricky neutrálních trojic (proton, elektron, antineutrino). Spin takové soustavy 28 fermionů je celočíselný a emise antineutrina přirozeně vysvětluje spojité spektrum elektronů v beta rozpadech $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{Y} + e^- + \bar{\nu}$. Již v roce 1932 ale J. Chadwick zjistil, že v interakcích alfa částic jsou z jader emitovány do té doby neznámé neutrony s hmotou blízkou protonům. Vznikl tak model jádra složeného z protonů a neutronů a E. Fermi formuloval první teorii beta rozpadu, v níž trojice částic proton, elektron a antineutrino vzniká při rozpadu neutronu: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$.

Z detailního měření rozpadů neutrálního kalibračního bosonu Z v experimentech na urychlovači LEP v CERN víme, že **existují právě tři druhy (lehkých) neutrin**, tzv. elektronová ν_e , mionová ν_μ a tauonová ν_τ a jejich antičástice $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$ a $\bar{\nu}_\tau$. Elektronová antineutrina byla objevena až 26 let po Pauliho předpovědi v reakci: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ antineutrin z jaderného reaktoru. V letošním roce si tedy připomeneme 60. výročí objevu neutrina. V roce 1962 bylo prokázáno, že svazky urychlovačových neutrin z rozpadů nabitých pionů při interakcích s protony a neutrony produkují miony, tj. že se jedná o mionová neutrina. Existence tauonového neutrina byla experimentálně prokázána až v roce 2000.

Přírodní a umělé zdroje neutrin využívané při zkoumání oscilací

Sluneční neutrina. Intenzivním zdrojem *elektronových neutrin* je Slunce. Neutrina tam vznikají při jaderné fúzi protonů a v následných beta plus rozpadech anebo elektronovém záchytu vzniklých izotopů lehkých jader. Při fúzi protonů na deuterium: $p + p \rightarrow ^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ vzniká obrovský tok elektronových neutrin s malými energiemi do 0.4 MeV. Přibližně 60 miliard těchto neutrin dopadá každou sekundu na čtvereční centimetr zemského povrchu. Neutrina s velkými energiemi až 15 MeV jsou přibližně dvacetisíckrát méně častá a vznikají především v beta plus rozpadech izotopu boru $^{10}_5\text{B}$ na dvě alfa částice: $^{10}_5\text{B} \rightarrow 2\ ^4_2\text{He} + e^+ + \nu_e$.

Reaktorová neutrína. Elektronová antineutrína vznikají ve velkém množství v jaderných reaktorech v beta rozpadech štěpných produktů bohatých na neutrony. Energetické spektrum antineutrín dosahuje přibližně do 10 MeV a jaderný reaktor s elektrickým výkonem 1000 MW produkuje každou sekundu téměř 10^{21} elektronových antineutrín.

Atmosférická neutrína. Při interakcích částic primárního kosmického záření (protony a těžká jádra) s jádry dusíku a kyslíku v atmosféře vznikají π a K mezonony a tzv. *atmosférická elektronová a mionová neutrína a antineutrína* jsou pak produkována v rozpadech nabitých π a K mezonů a vzniklých mionů: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$; $\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$ a $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$; $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$.

Urychlovačová neutrína. Svazky urychlovačových mionových neutrín nebo antineutrín jsou produkty rozpadů π mezonů vzniklých v interakcích urychlených protonů. Energie atmosférických i urychlovačových neutrín dosahují několika GeV.

Kromě uvedených známe i další zdroje neutrín. Tzv. **geoneutrína** pocházejí z beta rozpadů radionuklidů v Zemi, zejména z thoriové a uranové rozpadové řady. Obrovské toky neutrín a antineutrín vznikají při výbuchu **supernov** a mohou být měřitelné i na Zemi, neutrína mají energii několik desítek MeV. Podobně jako existuje mikrovlnné reliktní záření fotonů, měla by existovat také reliktní neutrína s energiemi odpovídajícími teplotě 1.95 K a průměrnou hustotou asi 340 neutrín a antineutrín v každém krychlovém centimetru vesmíru.

Směšování a oscilace neutrín

Teorie směšování neutrín je analogická jako pro kvarky. Základním předpokladem je, že ve slabých interakcích jsou produkována neutrína tří druhů (elektronové, mionové a taunové) podle druhu přidruženého nabitého leptonu. Tyto neutrínové stavy však nejsou totožné s vlastními stavy hmoty neutrín, ale jsou jejich superpozicí.

Oscilace neutrín jsou pak přeměny mezi různými druhy neutrín. Například vytvoříme-li elektronová neutrína a zkoumáme-li je po určité době (v určité vzdálenosti od místa vzniku), zjistíme, že se jich část přeměnila na neutrína ostatních druhů. Můžeme pozorovat dva projevy těchto oscilací

- měříme deficit elektronových neutrín, tj. jen část neutrín vytvoří v terči elektrony (tzv. disappearance experiment);
- pokud by neutrína měla dostatečnou energii, můžeme navíc pozorovat, že při jejich interakci v detektoru vznikají miony, resp. tauony (tzv. appearance experiment).

Oscilace neutrín jsou kvantově mechanickým jevem a byly předpovězeny B. Pontecorvem v roce 1958 nejprve jako oscilace neutrín a antineutrín. Oscilace mezi jednotlivými druhy neutrín popsala v roce 1962 trojice japonských fyziků Z. Maki, M. Na-

kagawa a S. Sakata. Unitární směšovací 3×3 matice pro neutrina nese název U_{PMNS} podle počátečních písmen jejich jmen. Je definována

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \equiv U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{i\delta} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

a parametrizována třemi úhly θ_{12} , θ_{13} , θ_{23} a jednou fází δ . Pokud je hodnota fáze nenulová, jsou některé členy matice komplexní čísla a neutrina a antineutrina oscilují různě, protože směšování neutrin je popsáno maticí s komplexně sdruženými členy.

Abychom pochopili podstatu neutrinových oscilací, uvažujme zjednodušený případ pro dva druhy antineutrin a dva vlastní stavy hmoty. Vztah mezi druhy antineutrin a vlastními stavy hmoty je popsán jedním směšovacím úhlem θ_{12}

$$\bar{\nu}_e = \cos \theta_{12} \bar{\nu}_1 + \sin \theta_{12} \bar{\nu}_2, \quad \bar{\nu}_\mu = -\sin \theta_{12} \bar{\nu}_1 + \cos \theta_{12} \bar{\nu}_2.$$

Prozkoumejme například, co se děje s elektronovým antineutrinem. Nechť elektronové antineutrino vzniká v místě $L = 0$ jako superpozice hmotových stavů

$$\bar{\nu}_e(L = 0) = \bar{\nu}_e = \cos \theta_{12} \bar{\nu}_1 + \sin \theta_{12} \bar{\nu}_2$$

V důsledku časového vývoje získají ve vzdálenosti L vlastní hmotové stavy $\bar{\nu}_1$, $\bar{\nu}_2$ fázové faktory. Protože je energie E neutrin mnohem větší než jejich hmota, mají tyto faktory hodnoty $\exp\left(-i\frac{m_1^2}{2\hbar c} \frac{L}{E}\right)$ a $\exp\left(-i\frac{m_2^2}{2\hbar c} \frac{L}{E}\right)$, kde E je energie neutrin, součin redukované Planckovy konstanty a rychlosti světla má hodnotu $\hbar c = 0,2 \text{ GeV fm}$. Hmoty neutrinových stavů udáváme v jednotkách jejich klidových energií, tj. m_1 fakticky znamená $m_1 c^2$. Ve vzdálenosti L bude tedy platit

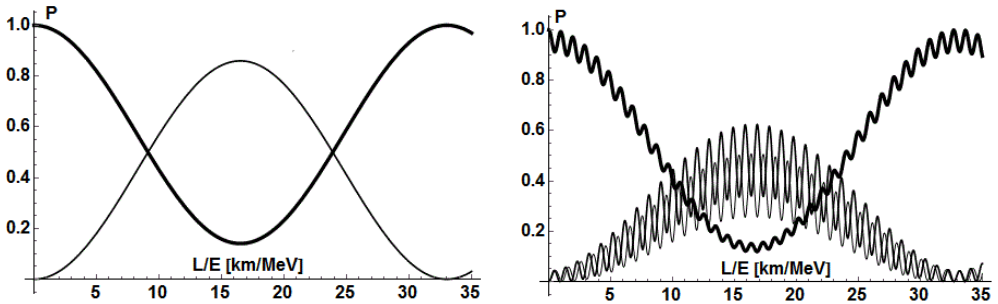
$$\bar{\nu}_e(L) = \cos \theta_{12} \exp\left(-i\frac{m_1^2}{2\hbar c} \frac{L}{E}\right) \bar{\nu}_1 + \sin \theta_{12} \exp\left(-i\frac{m_2^2}{2\hbar c} \frac{L}{E}\right) \bar{\nu}_2.$$

Dosadíme-li do tohoto výrazu $\bar{\nu}_1 = \cos \theta \bar{\nu}_e - \sin \theta \bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_2 = \sin \theta \bar{\nu}_\mu + \cos \theta \bar{\nu}_e$, dostaneme

$$\bar{\nu}_e(L) = \left(\cos^2 \theta_{12} \exp\left(-i\frac{m_1^2}{2\hbar c} \frac{L}{E}\right) + \sin^2 \theta_{12} \exp\left(-i\frac{m_2^2}{2\hbar c} \frac{L}{E}\right) \right) \bar{\nu}_e + \\ + \cos \theta_{12} \sin \theta_{12} \left(\exp\left(-i\frac{m_2^2}{2\hbar c} \frac{L}{E}\right) - \exp\left(-i\frac{m_1^2}{2\hbar c} \frac{L}{E}\right) \right) \bar{\nu}_\mu.$$

Vidíme, že pokud jsou hmoty neutrinových stavů různé (to ale znamená, že aspoň jeden z nich má nenulovou hmotu) a současně nejsou druhy neutrin totožné s vlastními stavy hmoty ($\cos \theta_{12} \neq 0$ a $\sin \theta_{12} \neq 0$), objeví se v původním svazku elektronových antineutrin také antineutrino $\bar{\nu}_\mu$ s pravděpodobností rovnou kvadrátu komplexního koeficientu stojícího u $\bar{\nu}_\mu$

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu}(L) = \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{12}^2}{4\hbar c} \frac{L}{E}\right),$$



Obr. 1. Vlevo jsou oscilační křivky pro elektronová antineutrína pro případ dvou druhů neutrin. Vpravo jsou oscilační křivky pro případ tří druhů neutrin.

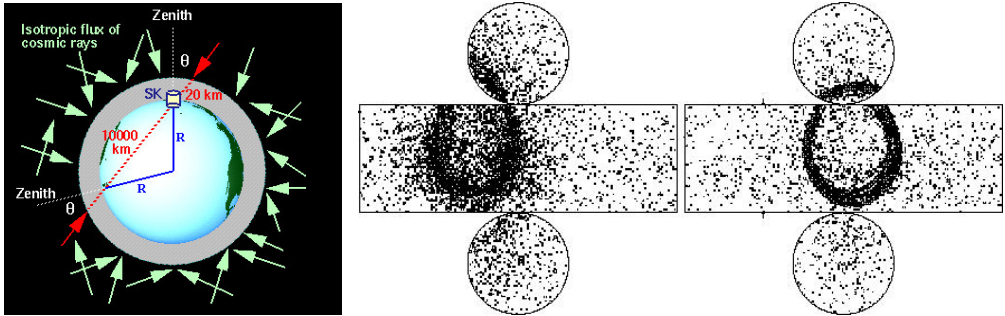
kde jsme označili $\Delta m_{12}^2 \equiv m_1^2 - m_2^2$. Analogicky určíme pravděpodobnost toho, že antineutrino zůstane elektronovým. Samozřejmě platí

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(L) + P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu}(L) = 1.$$

Příslušné pravděpodobnosti jako funkce proměnné L/E jsou zobrazeny na obr. 1 vlevo. Vidíme na něm podstatu oscilací — periodicky se měnící pravděpodobnosti přeměny druhů neutrin. Měření oscilační křivky umožňuje zjistit parametry oscilací. Oscilační křivka má amplitudu oscilací rovnou $\sin^2(2\theta_{12})$ a oscilační délku nepřímo úměrnou rozdílu kvadrátů hmot Δm_{12}^2 . Na obr. 1 vpravo je oscilační křivka pro případ tří neutrin. Vidíme na ní charakteristické zvlnění kvůli malé nenulové hodnotě úhlu θ_{13} a také rozdělení pravděpodobnosti přeměny elektronového neutrina na mionová (tenčí křivka) a tau neutrina (nejtenčí křivka), jež je určeno úhlem θ_{23} . Protože je hodnota tohoto úhlu blízká 45° , elektronová neutrina se téměř stejným dílem mění na tauonová a mionová.

Od hledání rozpadů protonu k Nobelově ceně za oscilace neutrin

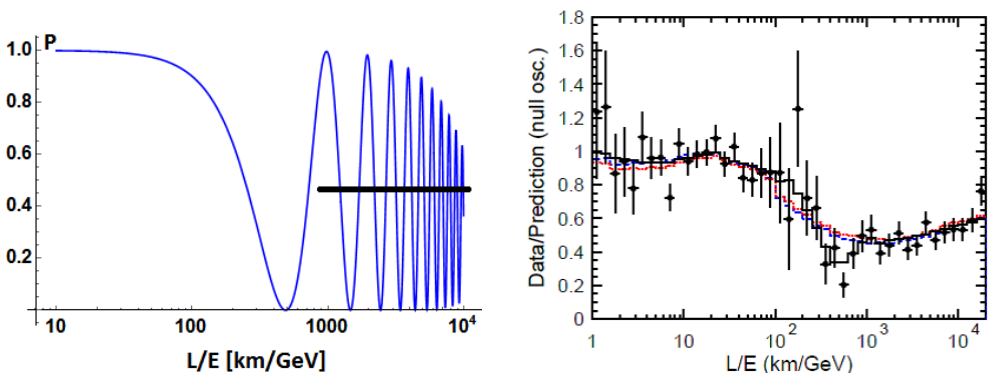
Experiment Kamiokande v Japonsku byl původně určen pro hledání rozpadů protonu. Existují teorie předpovídající nezachování baryonového náboje, a tudíž existenci rozpadů nejjednoduššího baryonu — protonu. Nejčastěji se uvažují rozpady $p \rightarrow \pi^0 + e^+$. Proton má hmotu přibližně 1 GeV a jeho rozpady by měly produkovat pozitrony s energií přibližně 0.5 GeV. Detektor Kamiokande obsahoval 3 miliony litrů čisté vody a dokázal měřit energii a směr nabitých částic, které se pohybují rychleji než světlo ve vodě a vytvářejí tzv. Čerenkovovo záření. Bylo zřejmé, že hlavním konkurenčním procesem, který bude vypadat podobně jako rozpad protonu, budou interakce elektronových a mionových atmosférických neutrin či antineutrin, při nichž vznikají elektrony a miony podobných energií. V roce 1986 tehdy 27 letý čerstvý absolvent Ph.D. studia na Tokijské univerzitě Takaaki Kajita vymyslel důmyslný a efektivní způsob, jak odlišit případy mionů a elektronů, a přitom zjistil velice překvapivou skutečnost. Zatímco 93 registrovaných elektronových případů dobře souhlasilo s předpovědí 89 případů, mionových případů bylo změřeno pouze 85 místo očekávaných 144. Tým Kamiokande publikoval tyto výsledky v roce 1988 [4] a jako možnost vysvětlení uvedl oscilace neutrin.



Obr. 2. Vlevo je ukázán princip měření atmosférických neutrin pomocí detektoru SuperKamio-kande (SK). Čerenkovovo záření elektronů a mionů vytváří kruhy detekované fotonásobiči na povrchu válcového detektoru SK (40 m výška i průměr válce). Ty jsou ukázány v pravé části. Podle tvaru kruhů je možné rozlišit miony (úplně vpravo) od elektronů, tj. interakce mionových neutrin od elektronových. Obrázky jsou převzaty, poděkování patří SuperKamio-kande a IOP.

Důkladnější prozkoumání tohoto efektu umožnil až mnohem větší detektor Super-Kamiokande (SK). Princip měření ilustruje obr. 2. Detektor tvoří obrovská válcová nádrž, která obsahuje 50 milionů litrů čisté vody a je vybavena více než 11 tisíci fotonásobiči. Měření SuperKamio-kande [7] publikovaná v roce 1998 potvrdila pozorovaný efekt a navíc prokázala, že deficit mionových neutrin je způsoben neutrinou s velkou hodnotou proměnné L/E , tj. převážně neutrinou, která proletí zeměkoulí a vstupují do detektoru zespedu. Výsledek byl interpretován jako projev oscilací neutrin a rok 1998 je tak považován za rok objevu neutrinových oscilací.

Nezvratný důkaz o tom, že se jedná skutečně o neutrinové oscilace, pak podaly výsledky SuperKamio-kande publikované o 6 let později. Ty jasně prokázaly existenci oscilačního minima okolo hodnoty $L/E = 500 \text{ km/GeV}$ (viz obr. 3).



Obr. 3. Vlevo je oscilační křivka mionových neutrin vypočtená s použitím současných hodnot parametrů oscilací, tlustá čára je střední hodnota měřená pro velké hodnoty proměnné L/E . Výsledky experimentu SuperKamio-kande jsou ukázány vpravo. Obrázek vpravo je z publikace Phys. Rev. Lett. 93 (2004), 101801, poděkování patří SuperKamio-kande.

Jedině mechanismus oscilací totiž dokáže předpovědět naměřené chování v široké oblasti hodnot L/E , tj. **souhlas** naměřených hodnot s předpokládanými pro malé hodnoty L/E , **pokles** na přibližně 20 % předpokládaného počtu případů okolo minima $L/E = 500$ km/GeV a pak **opětne navýšení** na hodnotu přibližně 50 %. Ostatní možná vysvětlení pozorovaného deficitu, například rozpad neutrin či dekoherence, nemohou takovou závislost popsat.

Z naměřené hodnoty polohy prvního oscilačního minima $L/E = 500$ km/GeV je snadné určit velikost rozdílu čtverců hmot neutrinových stavů

$$\begin{aligned} \frac{|\Delta m_{23}^2|}{4\hbar c} \frac{L}{E} = \frac{\pi}{2} &\Rightarrow |\Delta m_{23}^2| = \frac{2\pi\hbar c}{L/E} = \frac{6.28 \times 0.2 \text{ GeV fm}}{500 \text{ km/GeV}} = \\ &= \frac{6.28 \times 0.2 \times 10^9 \text{ eV } 10^{-18} \text{ km}}{500 \times 10^{-9} \text{ km/eV}} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2. \end{aligned}$$

Pro velké hodnoty L/E bylo naměřeno 50 % vypočtené hodnoty počtu neutrin. Z toho plyne, že se oscilační křivka mění mezi 1 a 0, což odpovídá hodnotě směřovacího úhlu $\theta_{23} \cong 45^\circ$.

Vyřešení deficitu slunečních neutrin a Nobelova cena pro A. McDonalda

Deficit slunečních neutrin

Pro měření toku slunečních neutrin navrhl B. Pontecorvo tzv. Cl-Ar metodu, tj. využití přeměny neutronu na proton a elektron v interakci elektronového neutrina s jádrem chloru $\nu_e + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}_{18}\text{Ar}$. Interakce má práh 0.8 MeV a umožňuje proto měřit pouze neutrina z rozpadů ${}^8_5\text{B}$. Vzniklý izotop ${}^{37}_{18}\text{Ar}$ se s poločasem rozpadu 35 dnů rozpadá záchytem elektronu zpátky na chlor $e^- + {}^{37}_{18}\text{Ar} \rightarrow \nu_e + {}^{37}_{17}\text{Cl}$.

Tato náročná měření dlouhá léta prováděl R. Davis jr. ve slavném experimentu ve zlatém dole Homestake v Jižní Dakotě v USA. Obtížnost experimentu spočívala především v tom, že v obrovském detektoru vznikalo průměrně pouze 6 atomů argonu za 14 dnů. Davis zjistil, že na Zemi dopadá jenom třetina toku neutrin vypočtená J. Bahcallem — dalším hrdinou neutrinové ságy. Později bylo v experimentech SAGE a GALLEX využito obdobné Ga-Ge reakce s nižší hodnotou prahové energie 0.23 MeV. To umožnilo měřit hlavní část spektra slunečních neutrin. Výsledkem těchto experimentů byl menší, přibližně 45% deficit oproti výpočtům.

Oba výsledky je možné objasnit pomocí modifikací oscilací neutrin v hmotném prostředí Slunce. Při průchodu hmotným prostředím je totiž nutné započítat příspěvek způsobený rozptylem neutrin dopředu (na nulový úhel). Kvůli přítomnosti elektronů v hmotném prostředí je tento dodatečný faktor jiný pro elektronová neutrina než pro neutrina mionová a tauonová. Příslušná modifikace oscilací byla poprvé vypočtena S. Mikheyevem, V. Smirnovem a L. Wolfensteinem a nazývá se MSW efekt. Oscilace slunečních neutrin jsou modifikovány následovně.

- Pro malé energie slunečních neutrin je možné dodatečný fázový posun zanedbat, oscilace jsou stejné jako ve vakuu a naměřená hodnota přibližně 55 % oproti výpočtům odpovídá střední hodnotě mezi maximem (1) a minimem ($1 - \sin^2(2\theta)$) oscilační křivky, tj. platí

$$0.55 = \frac{1}{2} (1 + 1 - \sin^2(2\theta_{12})) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta_{12}) \Rightarrow \theta_{12} \doteq 36^\circ.$$

- Pro největší energie slunečních neutrin je výsledkem průchodu neutrin z místa jejich vzniku v jádře Slunce na povrch Slunce skutečnost, že neutrina opustí Slunce ve stavu, který je totožný s těžším z hmotových stavů m_1 a m_2 . Naměřená hodnota $1/3$ v experimentech na Zemi pak není nic jiného, než obsah elektronových neutrin v tomto hmotovém stavu. Zvolíme-li ho jako m_2 , měříme hodnotu $\sin^2(\theta_{12})$ a platí

$$0.33 = \sin^2(\theta_{12}) \Rightarrow \theta_{12} \doteq 35^\circ.$$

Vidíme, že naměřené hodnoty deficitu slunečních neutrin pro malé i velké energie neutrin odpovídají stejné hodnotě směšovacího úhlu; současná experimentálně určená hodnota θ_{12} je přibližně 34° .

Experiment SNO naplněný těžkou vodou

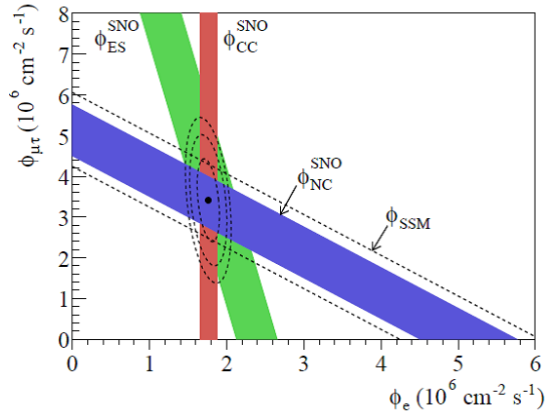
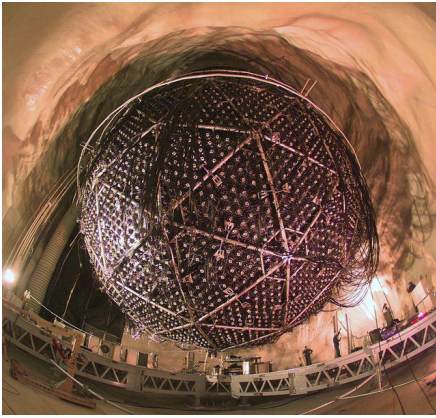
Sluneční neutrina nemají dostatečnou energii k tomu, aby bylo možno přímo prověřit, že se mění na mionová či tauonová neutrina. V roce 1985 ale přišel americký fyzik čínského původu H. Chen s geniálně jednoduchým nápadem experimentální prověrky příčin deficitu slunečních neutrin [1]. Navrhl udělat detektor naplněný těžkou vodou. Jak uvidíme dále, interakce neutrin s deuteriem umožní změřit zvlášť tok elektronových neutrin a celkový tok všech druhů neutrin.

Navržený experiment realizoval tým pod vedením A. McDonalda. Detektor SNO je umístěn více než 2 km pod zemí v niklovém dole v Sudbury v provincii Ontario v Kanadě. Má kulový tvar (viz obr. 4 vlevo) a je naplněn 1 000 tunami těžké vody, kterou poskytla společnost Atomic Energy of Canada Limited. Světelné signály jsou měřeny téměř 10 tisíci fotonásobiči.

Všechny druhy neutrin, tj. elektronová, mionová i tauonová s energií větší než vazbová energie deuteronu (2.2 MeV) mohou rozbít deuteron na proton a neutron: $\nu_{e,\mu,\tau} + {}^2_1\text{H} \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + p + n$. Vzniklý neutron pak může být zachycen deuteriem a vytvořit tritium. Příznakem záchytu neutronu je emise gama kvanta s energií 6.25 MeV při přechodu tritia do základního stavu: $n + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_1\text{H} + E_\gamma$ (6.25 MeV). Později se fyzikové odhodlali těžkou vodu osolit kuchyňskou solí a umožnit tak záchyt neutronů na jádrech Cl. Tento záchyt se projeví emisí gama kvant s celkovou energií přibližně 8.6 MeV při přechodu Cl do základního stavu: $n + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{38}_{17}\text{Cl} + E_\gamma$ (8.6 MeV).

Elektronová neutrina mají kromě shora uvedené interakce navíc možnost další interakce — přeměny deuteronu na dvojici protonů a elektron: $\nu_e + {}^2_1\text{H} \rightarrow e^- + p + p$. Vzniklý elektron pak vytvoří Čerenkovovo záření při průchodu (těžkou) vodou.

Obě shora uvedené interakce je možné snadno odlišit. Počet naměřených případů se záchytem neutronu je úměrný toku všech druhů neutrin, zatímco případy s elektronem měří pouze tok elektronových neutrin. Výsledky experimentu SNO jasně prokázaly, že celkový tok neutrin odpovídá přesně výpočtům, že pouze třetina z nich jsou elektronová neutrina (viz obr. 4 vpravo) a že naměřená hodnota celkového toku neutrin je v souladu s výpočty podle tzv. SSM (Solar Standard Model). Výsledky experimentu SNO lze nalézt například v publikaci [6].



Obr. 4. Vlevo je SNO detektor v pohledu zdola, vpravo je výsledek experimentu SNO (bod a elipsy ukazující neurčitosti). Obrázky jsou převzaty, poděkování patří SNO. Experiment měří tok elektronových neutrin (vodorovná osa) přibližně dvakrát menší než tok ostatních druhů neutrin (svislá osa).

Po zásluze byl vedoucí experimentu Arthur McDonald oceněn Nobelovou cenou za fyziku 2015. Pokud by byli naživu, je pravděpodobné, že kandidáty na tuto cenu by se stali také autor nápadu s těžkou vodou H. Chen a J. Bahcall za vytvoření přesného modelu fúzních reakcí v nitru Slunce.

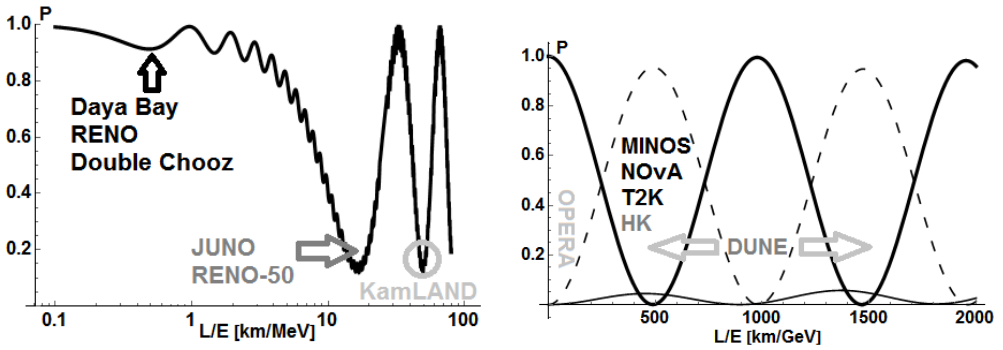
Současný stav oscilací neutrin a co bychom se ještě rádi dozvěděli

Přestože od objevu jevu oscilací neutrin uplynulo necelých 20 let, došlo k významným pokrokům v této oblasti.

- V reaktorovém experimentu KamLAND v Japonsku byla naměřena oscilační křivka a upřesněny hodnoty parametrů θ_{12} a Δm_{12}^2 .
- Reaktorové experimenty Daya Bay v Číně a RENO v Jižní Koreji poprvé změřily hodnotu nejmenšího směšovacího úhlu θ_{13} .
- V experimentech s urychlovačovými mionovými neutrinami T2K v Japonsku, MINOS a NOvA v USA byly nejen upřesněny hodnoty parametrů θ_{23} a $|\Delta m_{23}^2|$, ale také změřeny oscilace mionových antineutrin na elektronová.
- Experiment OPERA v Itálii prokázal oscilace svazků mionových antineutrin z CERN na tauonová antineutrína.

Kromě shora uvedených byly tyto poznatky získány v řadě dalších experimentů. V současnosti tak máme detailní znalosti o oscilacích neutrin.

- Změřená hodnota úhlu $\theta_{23} \doteq 45^\circ$ znamená, že téměř polovina mionového a tauonového neutrina je obsažena ve stavu ν_3 a zbylá polovina je rozdělena mezi stavy ν_1 a ν_2 .



Obr. 5. Vlevo je oscilační křivka pro elektronová neutrína. Jsou na ní ukázány oblasti měření hlavními reaktorovými experimenty. Vpravo je obdobná křivka pro mionová neutrína (tlustá křivka), tenká křivka ukazuje přeměnu mionových neutrín na elektronová a čárkovaná na tauonová neutrína. I zde jsou uvedeny oblasti měření hlavních urychlovačových experimentů.

- Hodnota úhlu $\theta_{12} \doteq 34^\circ$ a malá hodnota $\theta_{13} \doteq 8.5^\circ$ odpovídají tomu, že přibližně 2/3 elektronového neutrína je ve stavu ν_1 , přibližně 1/3 ve stavu ν_2 a jen malá část (2,5%) jich je ve stavu ν_3 . Nenulová hodnota θ_{13} a velikost fáze δ ovlivňují také rozdělení mionových a tauonových neutrín mezi stavy ν_1 a ν_2 .
- Z výsledků experimentů se slunečními neutriny víme, že stav ν_2 obsahující 1/3 elektronových neutrín je těžší než stav ν_1 . Nevíme ale, zda je stav ν_3 nejtěžší anebo nejlehčí z neutrinových hmotových stavů. První možnost nazýváme normální a druhou inverzní hierarchií neutrinových hmot. Pro normální hierarchii hmot je elektronové neutrino nejlehčí, pro inverzní je nejtěžší ze tří typů neutrín.
- Z experimentů také víme, že rozdíl kvadrátů hmot $\Delta m_{21}^2 \doteq (8.5 \text{ meV})^2$ je přibližně 30krát menší než rozdíl kvadrátů hmot $|\Delta m_{31}^2| \doteq (50 \text{ meV})^2$. Velký rozdíl kvadrátů hmot odpovídá poloze prvního oscilačního minima v bodě $L/E = 0,5 \text{ km/MeV} = 500 \text{ km/GeV}$ od zdroje (tj. například ve vzdálenosti 2 km pro neutrína s energií 4 MeV), menší rozdíl kvadrátů hmot odpovídá hodnotě $L/E = 15 \text{ km/MeV} = 15\,000 \text{ km/GeV}$.

Naměřené hodnoty oscilačních parametrů a praktické možnosti přípravy neutrinových zdrojů určují parametry současných a plánovaných neutrinových experimentů.

Všechny prakticky využitelné zdroje **elektronových neutrín a antineutrín** mají energie malé na to, abychom mohli přímo zkoumat přeměny na mionová či tauonová neutrína. K vytvoření mionu je třeba energií aspoň 115 MeV, pro tau lepton přibližně 3.5 GeV. Znamená to, že experimenty s elektronovými neutriny jsou tzv. disappearance experimenty, tj. mohou měřit pouze mizení a znovuoživení neutrín.

Na obr. 5 vlevo je nakreslena příslušná oscilační křivka a jsou na ní ukázány oblasti zkoumané hlavními reaktorovými experimenty. Vidíme, že reaktorové experimenty dokáží zkoumat oscilace neutrín s oběma odlišnými oscilačními délkami.

Experimenty s **urychlovačovými mionovými neutriny a antineutriny** měří pouze oscilace s krátkou délkou oscilací. Vedle mizení mionových neutrín měří také

přeměnu mionových neutrin na elektronová. Kvůli malému obsahu elektronových neutrin ve stavu ν_3 je však tato pravděpodobnost jen několik procent (viz tenká křivka na obr. 5 vpravo), téměř všechna mionová neutrina se totiž změni na tauonová (čárkovaná křivka). Přímé měření vzniku tauonových neutrin ale vyžaduje energie neutrin aspoň 10 GeV a tudíž vzdálenosti několik tisíc km. Při vzdálenostech do 1 000 km nejsou tato měření příliš efektivní. Například v experimentu OPERA v Gran Sasso byly během několika let měření zaznamenány pouze čtyři přeměny mionových neutrin na tauonová.

Kromě dalšího upřesnění hodnot parametrů oscilací je program současných i plánovaných oscilačních experimentů zaměřen zejména na následující dvě otázky.

Jsou oscilace neutrin a antineutrin stejné? Jedním z hlavních cílů výzkumu neutrinových oscilací je měření fáze δ ve směšovací matici. Ta souvisí s narušením kombinace nábojového sdružení a parity (CP) a pokud bude nenulová, budou oscilace neutrin jiné než oscilace antineutrin. Jedinou dnes dostupnou přímou metodou je měření rozdílu oscilací mionových neutrin na elektronová a mionových antineutrin na elektronová. Tento rozdíl je dán formulí

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}(L) - P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e}(L) = -2 \sin(\delta) \cos(\theta_{13}) \prod_{1=i < j=3} \sin(2\theta_{ij}) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4\hbar c E}\right).$$

Protože známe hodnoty všech úhlů a rozdílů kvadrátů hmot, můžeme odhadnout, že v prvním oscilačním minimu bude rozdíl oscilací neutrin a antineutrin: $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}(L) - P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e}(L) \cong 2\% \sin(\delta)$. Měření oscilací mionových neutrin a antineutrin v současnosti provádí urychlovačový experiment T2K v Japonsku, MINOS a NOvA v USA. Alternativní možností změřit hodnotu fáze δ je kombinace měření přeměny mionových neutrin na elektronová s přesnými měřeními z reaktorových experimentů Daya Bay a RENO.

Platí normální anebo inverzní hierarchie hmot neutrin? Tato otázka bude řešena v řadě experimentů, pravděpodobně nejdříve v současnosti budovaném reaktorovém experimentu JUNO v Číně či obdobném připravovaném projektu RENO-50 v Koreji. Je pozoruhodné, že ani 60 let po objevu neutrina neznáme jeho hmotu. Z měření spektra elektronů v beta rozpadu tritia víme, že hmota elektronového antineutrina je menší než 2 eV. Experiment KATRIN v Německu plánuje tuto hranici přibližně desetkrát upřesnit. Oscilační experimenty sice nemohou určit absolutní hodnoty hmot neutrin, z výsledků měření ale můžeme odvodit dolní hranice pro hmoty neutrin. Pokud je nejlehčím neutrinovým stavem ν_1 (normální hierarchie neutrinových hmot) pak neutrino ν_2 má hmotu nejméně 8.5 meV a ν_3 aspoň 50 meV, pokud platí inverzní hierarchie, pak oba neutrinové stavy ν_1 a ν_2 mají hmoty nejméně 50 meV.

Existuje celá řada dalších témat v experimentální neutrinové fyzice, například výzkum kosmických neutrin s obrovskými energiemi. Současné neutrinové experimenty jsou připraveny přesně naměřit neutrina a antineutrina z případného výbuchu supernovy. Protože jsou neutrina jedinými elektricky neutrálními elementárními fermiony, je možné, že neutrina a antineutrina jsou totožné částice. Autorem této myšlenky je italský fyzik E. Majorana. Pokud by neutrina byla majoranovskými částicemi, mohly by existovat reakce nezachovávající leptonové číslo. Řada experimentů hledá tzv. bezneutrinový dvojný beta rozpad $\frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z+2}Y + e^- + e^-$, v němž se leptonové číslo mění o dvě.

Na mezinárodním neutrinovém programu se podílejí také týmy odborníků z České republiky. Výzkumem oscilací neutrin v reaktorovém experimentu Daya Bay se zabývá tým z MFF UK. Skupiny z FZÚ AV ČR, MFF UK a FJFI ČVUT pracují v urychlovačovém experimentu NOvA. Kolektiv z ÚJF AV ČR se podílí na experimentu KATRIN a kolegové z ÚTEF ČVUT a MFF UK se podílejí na hledání bezneutrinového dvojného beta rozpadu.

L i t e r a t u r a

- [1] CHEN, H.: *Direct approach to resolve the solar-neutrino problem*. Phys. Rev. Lett. 55 (1985), 1534–1536.
- [2] DRAGON, O., RYŠAVÝ, M.: *Nobelova cena dvěma zakladatelům neutrinové astronomie*. PMFA 48 (2003), 1–9.
- [3] FORMÁNEK, J.: *Nobelova cena za fyziku za rok 1988*. PMFA 34 (1989), 262–266.
- [4] HIRATA, K. S., KAJITA, T. a další: *Experimental study of the atmospheric neutrino flux*. Phys. Lett. B 2015 416 (1988).
- [5] LEITNER, R., SUK, M.: *Nobelova cena za fyziku v roce 1995*. PMFA 41 (1996), 157–160.
- [6] SNO Collaboration: *Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory*. Phys. Rev. Lett. 87 (2001), 071301.
- [7] Super-Kamiokande Collaboration: *Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos*. Phys. Rev. Lett. 81 (1998), 1562. (Podle databáze inspire-hep má tato publikace více než 4 500 citací).

Pěkný přehled o cestě k objevu oscilací neutrin dávají nobelovské přednášky laureátů na stránkách nobelovského výboru www.nobel.se. V článku je citována (neúplná) řada oscilačních experimentů, další informace o nich lze najít na jejich oficiálních web stránkách.