

## Problém slunečních neutrin

zpracoval: Jiří Svršek <sup>1</sup>

*Podle článků Bruce Scotta, Todda Hansona a článků Physics News Update*

### Abstract

Jaderné reakce ve slunečním jádru vytvářejí mohutný proud neutrin. Tato neutrina lze na Zemi detekovat prostřednictvím obrovských podzemních detektorů. Měření toku neutrin by mělo souhlasit s teoretickými výpočty, které jsou založeny na základě teoretických představ o Slunci a na základě standardního modelu fyziky částic. Tok slunečních neutrin však dosahuje zhruba poloviny očekávaného toku podle teorie. Tento rozpor je jádrem problému slunečních neutrin.

---

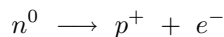
<sup>1</sup>e-mail: [natura@dkozak.cz](mailto:natura@dkozak.cz), WWW: <http://natura.baf.cz>

## References

- [1] **Item 11.: The Solar Neutrino Problem.** updated 05-Jun 1994 by SIC, original by Bruce Scott From: columbus@osf.org Subject: sci.physics Frequently Asked Questions (Part 2 of 4) Date: 25 Sep 1995 14:55:01 GMT
- [2] **Todd Hanson: Solved – The case of the missing neutrinos.** Los Alamos National Laboratory.  
<http://www.lanl.gov/orgs/pa/News/062201.html>
- [3] From: physnews@aip.org (AIP listserver) **PHYSICS NEWS UPDATE.** The American Institute of Physics Bulletin of Physics News. Number 586. April 24, 2002 by Phillip F. Schewe, Ben Stein and James Riordon.
- [4] From: physnews@aip.org (AIP listserver) **PHYSICS NEWS UPDATE.** The American Institute of Physics Bulletin of Physics News. Number 608. October 8, 2002 by Phillip F. Schewe, Ben Stein and James Riordon.

# 1 Objev neutrin

Některá atomová jádra se po určité typické době (od zlomků sekundy až po několik let) přeměňují v jiná jádra a vyzařují elektrony. Tento rozpad jader se označuje jako radioaktivní rozpad beta. Základem tohoto procesu je rozpad neutronu  $n^0$ , který v roce 1930 ještě nebyl znám. Původně se rozpad neutronu jevil následovně:



kde  $n^0$  je neutron,  $p^+$  je kladně elektricky nabitý proton a  $e^-$  je záporně nabitý elektron.

Významnou otázkou však byla energetická bilance rozpadu. Po zániku neutronu se od sebe elektron a proton rozletí každý jiným směrem. Rychlost jejich rozletu představuje kinetickou energii. Neutron je přitom asi o dvě promile hmotnější než proton. Tento přebytek se při rozpadu uvolní a stačí vytvořit ještě elektron a dodat kinetickou energii oběma částicím.

Podstatné je, že při tomto principu rozpadu by se měly obě částice rozletět stejnou rychlostí. Neutron má hmotnost 1838,7 hmotností elektronu, proton 1836,2 hmotností elektronu, elektron má hmotnost 1. Rozdíl dává 1,5 a je úměrný kinetické energii, která se rozpadem neutronu uvolní a spotřebuje při rozletu částic.

Rozlet elektronu a protonu byl však pozorován pokaždé s jinou rychlostí. Přebytek hmotnosti 1,5 byl pokaždé stejný, avšak přesto se rychlost rozletu případ od případu měnila. To znamená, že nikoliv celý přebytek se přeměnil v kinetickou energii. Proto musela existovat částice, která jeho část unášela. Přístroje však žádnou částici nezaznamenaly. Závěr, který se odvážil učinit **Wolfgang Pauli** v prosinci roku 1930, vysvětlil všechny podstatné nejasnosti, ale připravil fyziky o další jistoty: musí existovat dosud neznámá částice bez elektrického náboje, kterou naše přístroje svojí citlivostí nepostihují.

Autor teoretické předpovědi neutrina **Wolfgang Pauli** (1900 - 1958) zaujal ve druhé polovině 20. let 20.století přední místo mezi zakladateli kvantové mechaniky. Svou bohatou vědeckou invencí zasáhl do řady oborů rodící se kvantové teorie. Nejvíce se proslavil předpovědí neutrina a tzv. vylučovacím principem, který dnes nese jeho jméno. Podle *Pauliho vylučovacího principu* žádné dva elektrony v atomu se nemohou nacházet ve stejném kvantovém stavu, tedy nemohou mít stejná všechna kvantová čísla (hlavní kvantové číslo  $n = 1, 2, 3, \dots$  určuje energii a velikost elektronového orbitalu, vedlejší kvantové číslo  $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$  určuje tvar elektronového orbitalu, magnetické kvantové číslo  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l$  určuje orientaci elektronového orbitalu v prostoru a spin  $s$  souvisí s vnitřním rotačním momentem elektronu).

**Wolfgang Pauli** dále vytvořil základní práce v teorii spinu, teorii relativity a fyzice kovů. Byl znám svou nesmlouvavou kritičností k cizím i vlastním nápadům. Svou pohotovou kritikou nutil diskusní partnery k jasným a přesným formulacím a tak se nepřímo podílel i na dalších objevech. Někdy naopak zabránila jeho kritičnost uveřejnění významného objevu.

Existence neutrina, předpovězeného Wolfgangem Paulim v roce 1930, byla experimentálně prokázána až po 25 letech. V roce 1956 provedli **Frederic Reines a Clyde Cowan, Jr.**, dva fyzikové z Los Alamos, rozhodující experiment, který se týkal antineutrin, což není podstatné, protože jak neutrino tak jeho antičástice se chovají stejně. Cílem experimentu bylo vyvolat reakci



která bez počátečního antineutrina  $\bar{\nu}_e$  nemůže nastat a je tedy současně jeho důkazem. Reakce je velmi nepravděpodobná, protože neutrina jsou mimořádně necitlivá k jakýmkoliv částicím. Proto,

aby nastala, je nutné velké množství antineutrin. Součin nepatrné pravděpodobnosti pohlcení antineutrína protonem s ohromným počtem antineutrin dává přijatelnou dobu, během níž bude pozorována alespoň jedna srážka. Reines a Cowan použili jako zdroj antineutrin výkonný uranový reaktor, ve kterém se jádra uranu  ${}^{235}_{92}\text{U}$  štěpí na lehčí jádra, z nichž mnohá jsou beta radioaktivní, tedy vysílají elektrony a antineutrína.

Takto vytvořenému intenzivnímu zdroji antineutrin byl postaven do cesty blok hmoty, složený z  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  velkých čtvercových desek kapalných scintilátorů prokládaných vrstvami vody, která byla zvolena proto, že obsahuje velké množství protonů v atomech vodíku. Pokud nastala reakce, projevilo se to několika jevy. Vzniklý positron rychle anihiloval s nějakým elektronem a vytvořil dva fotony:

$$e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma$$

Tyto fotony vyvolají záblesky ve scintilátorech. Neutron se pohybuje podstatně pomaleji a může být zaznamenán, pokud je pohlcen některým atomovým jádrem. Zvláště vnímavé pro pohlcování neutronů jsou atomová jádra kadmia Cd, proto byl do vody přidán chlorid kademnatý CdCl. Pohlcením neutronu kadmium přejde ve svůj isotop, který se zbaví přebytečné energie vysláním jednoho nebo několika fotonů. Tyto fotony se rovněž projeví záblesky na scintilátoru. Pokus tedy probíhal tak, že při vyvolání reakce nárazem antineutrína na proton se ve scintilátoru objevil současný záblesk dvou fotonů z anihilace elektronu s positronem a po uplynutí několika mikrosekund nastal ve scintilátoru další záblesk, když neutron byl pohlcen jádrem atomu kadmia.

Experiment proběhl úspěšně. Dokázal existenci elektronového antineutrína. V tomto procesu fyzikové poprvé záměrně vyvolali a zaznamenali proces způsobený pouze slabou interakcí.

Vzhledem k symetrii mezi elektronovými a mionovými leptony se nabízí otázka, zda by podobnou reakci nemohlo vyvolat mionové antineutrino  $\bar{\nu}_\mu$  při záměně positronu kladným mionem  $\mu^+$ :

$$\bar{\nu}_\mu + p^+ \longrightarrow n^0 + \mu^+$$

Po technické stránce je situace složitější. Kladný mion je asi 200 krát těžší než positron, proto je k vyvolání příslušné reakce zapotřebí mnohem více energie primárního antineutrína, nejméně 100 MeV. K produkci takových antineutrin se použil protonový urychlovač, který srážkami protonů s protony vytvořil piony, z nichž záporně nabitě piony  $\pi^-$  svým rozpadem

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

vytvořily dostatečně energetická mionová antineutrína. Experiment byl proveden v roce 1962 pracovníky Kolumbijské univerzity na urychlovači v Brookhavenu.

Experimentálním důkazem existence neutrína antineutrin bylo prokázáno, že slabá interakce způsobuje nejen rozpad částic, ale také rozptyl a vznik nových částic. Až do 60. let 20. století převládal názor, že rozpad, rozptyl a produkce částic se působením slabé interakce uskutečňuje přímo, za účasti pouze pozorovaných částic, zatímco procesy způsobené elektromagnetickou interakcí a silnou interakcí se uskutečňuje zprostředkovaně výměnou intermediální částice (fotonu resp. mesonu). Dnes jsme přesvědčeni a je experimentálně prokázáno, že slabá interakce se uskutečňuje zprostředkovaně výměnou tzv. intermediálních bosonů  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$ .

## 2 Problém slunečních neutrin

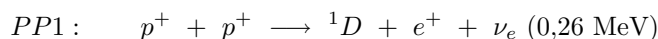
Jaderné reakce ve slunečním jádru vytvářejí mohutný proud neutrin. Tato neutrína lze na Zemi detekovat prostřednictvím obrovských podzemních detektorů. Měření toku neutrin by mělo souhlasit s teoretickými výpočty, které jsou založeny na základě teoretických představ o Slunci a na

základě standardního modelu fyziky částic. Tok slunečních neutrin však dosahuje zhruba poloviny očekávaného toku podle teorie. Tento rozpor vyvolal závažné otázky. Je částicová fyzika nesprávná? Je nesprávný model slunečního nitra? Je metoda měření chybná? Tyto otázky byly jádrem **problému slunečních neutrin**.

Proběhla řada přesných experimentů, které si mimo jiné kladly za cíl vysvětlit nesoulad pozorování se standardním modelem. Někteří fyzikové očekávali, že by tyto experimenty mohly posunout fyziku vysokých energií za standardní model.

Středně stará hvězda hlavní posloupnosti jako je Slunce se jen zvolna vyvíjí. Tlak způsobený horkým plynem a tlakem záření vyrovnává gravitační přitažlivost hmoty hvězdy. Zářivá energie hvězdy vzniká nukleárními reakcemi v jádru hvězdy. Tyto reakce postupně vedou k pomalým změnám struktury hvězdného nitra.

Přímo pozorovat sluneční jádro nelze. Průměrná volná dráha fotonů v jádře je velmi krátká. Fotony jsou pohlcovány atomy látky v jádře a znovu jsou emitovány. Průměrná doba, za kterou foton opustí povrch Slunce, je kolem 10 miliónů let. Proton-protonová reakce v jádře Slunce však vytváří neutrino



kteří lze bezprostředně pozorovat, protože jeho vazebná energie je velmi malá. Teoreticky bychom taková neutrina měly pozorovat na Zemi. Vlastnost neutrin působí v jejich detekci závažné praktické problémy. První měření neutrin provedl **Davis** a jeho kolektiv, když nechal naplnit velké cisterny roztokem perchlóretylenu. Podařilo se jim detekovat pouze neutrina s vysokou energií ze slabě probíhajících reakcí



V první polovině 90. let 20. století proběhl experiment GALLEX, který použil galliový detekční systém. Tento systém mohl sledovat neutrina z reakce PP1 a poskytl tak poprvé jednoznačné potvrzení proton-protonové reakce v jádře Slunce.

Problém slunečních neutrin však přetrvával. Každý experiment naměřil méně neutrin, než předpovídá teorie. Bylo pozorováno kolem 1/3 až 2/3 očekávaného počtu slunečních neutrin v závislosti na chybě měření. V případě systému GALLEX bylo pozorováno 80 jednotek, ale bylo očekáváno 120 jednotek. Tento rozdíl neodpovídá standardní statistické odchylce pozorování. Pro vysvětlení těchto rozdílů byly uvažovány dvě hypotézy:

1. Teplota slunečního jádra je poněkud nižší, než se původně předpokládalo.
2. Nějaký jev působí na změnu toku neutrin během jejich letu od Slunce k Zemi.

Třetí možnost, že v jádru Slunce probíhají zcela jiné procesy, než předpokládáme, jako je např. existence černé díry, se seriózně neuvažovaly.

1. Průběh jaderné reakce velmi těsně závisí na teplotě, protože je nutné, aby tepelný pohyb částic překonal silné jaderné síly. Pokud by teplota standardního modelu Slunce byla nižší o 6by výsledky systému GALLEX plně souhlasily s teorií. Tento závěr publikoval ve svém článku **John Bahcall**. Skupina slunečních seismologů, která pozoruje malé oscilace ve spektrálních čárách způsobené tlakovými rázovými vlnami uvnitř Slunce však namítala, že taková změna teploty odporuje jejich

pozorovaným výsledkům.

2. Byl navržen mechanismus, podle něhož neutrina vzájemně interagují a periodicky se mění z elektronového neutrina na mionové a tauonové. V tomto případě bychom museli pozorovat zlomek celkového počtu neutrin, protože detektory sledují pouze elektronová neutrina. Podle teorie tento zlomek není přesně  $1/3$ . Uvedený mechanismus, nazývaný jako "*oscilace neutrin*" však vyžaduje, aby všechna neutrina měla nenulovou a vzájemně různou hmotnost, což se stalo předmětem dokazování prostřednictvím řady různých experimentů.

Aby bylo přijatelné první uvedené vysvětlení s tím, že Slunce je v termodynamické rovnováze, bylo nutné provést některá další nezávislá pozorování s cílem omezit velikost chyb. Dále bylo nutné jako nevěrohodná zamítnout některá dřívější měření chlórovým detektorem. Další naměřená data za delší období měla poskytnout podstatně lepší výsledky při jejich statistickém vyhodnocení. Druhé vysvětlení vyžadovalo nutnost ověřit zmíněný předpoklad nenulové klidové hmotnosti neutrin.

### 3 Vyřešení problému slunečních neutrin

**Andrew Hime** z Laboratoře vědy a technologie neutronů (P-23) a vědecký ředitel programu neutrinové observatoře SNO (*the Sudbury Neutrino Observatory*) v Los Alamos koncem srpna 2001 oznámili ve Středisku neutronové vědy v Národní laboratoři Los Alamos (*the Los Alamos Neutron Science*) své výsledky. Data ze SNO prokázala, že část elektronových neutrin vyzařovaných Sluncem se během svého letu k Zemi oscilací přemění na mionová a tauonová neutrina. Výsledky SNO vyřešily více než 30 let starou záhadu chybějících neutrin a poskytují důkaz, že neutrina mají nenulovou hmotnost. Práce **Andrewa Himea** navázala na dlouhou tradici výzkumu neutrin v Národní laboratoři v Los Alamos *LANL, the Los Alamos National Laboratory*.

Výsledky experimentů z 90. let 20. století prokázaly, že problém slunečních neutrin není způsoben závažnou chybou standardního modelu Slunce, ale oscilacemi neutrin.

Mezinárodní tým vědců zkombinoval první výsledky observatoře SNO s výsledky řady experimentů japonského detektoru *the Super Kamiokande* a získal tak solidní důkaz oscilace neutrin. Důkaz transformace slunečních neutrin a oscilace neutrin v detektoru je současně základem důkazu, že *neutrina nemají nulovou hmotnost*, jak se původně předpokládalo. Oscilace neutrin může existovat pouze tehdy, pokud neutrina mají nenulovou hmotnost.

Před více než 60 lety **Wolfgang Pauli** teoreticky předpověděl existenci částic bez elektrického náboje, které existují ve třech formách: elektronové neutrimo, mionové neutrimo a tauonové neutrimo. Existenci neutrin prokázali v roce 1955 **Frederick Reines** a **Clyde Cowan Jr.** v Národní laboratoři v Los Alamos pomocí detektoru "*Herr Auge*". **Frederick Reines** obdržel za tento objev v roce 1995 Nobelovu cenu za fyziku.

V roce 1996 tým fyziků z Národní laboratoře v Los Alamos použil komoru naplněnou 60 000 galony čistého minerálního oleje s 1220 detektory, kapalným scintilačním detektorem neutrin (*the Liquid Scintillator Neutrino Detector*) k důkazu, že neutrina vytvářená v lineárním urychlovači mají nenulovou hmotnost.

Řešení záhady chybějících neutrin bylo možné až konstrukcí a provozem detektoru neutrinové observatoře SNO (*the Sudbury Neutrino Observatory*), nádoby z akrylového plastu o průměru 12 metrů, naplněné těžkou vodou a umístěné v hloubce více než 6800 stop pod zemí v niklovém dolu nedaleko Sudbury ve státě Ontario. Detektor SNO používá pole 9456 fotonásobičů, které zachycují

slabé záblesky Čerenkovova záření vznikající zachycením zhruba 10 slunečních neutrin denně v asi 1000 litrech těžké vody. Výstavba detektoru SNO začala v roce 1990 a byla dokončena v roce 1998. První měření začala v roce 1999.

Po více než desetiletí vědci Národní laboratoře v Los Alamos sehrávali klíčovou roli při konstrukci, uvádění do provozu a kalibraci detektoru SNO a prováděli první práce při redukci a analýze shromážděných měření. Skupina se také podílela na návrhu a konstrukci detektoru neutrálních proudů, který bude dokončen v roce 2002 a ještě zvýší citlivost detektoru SNO. Tým výzkumníků z Los Alamos a detektoru SNO v době publikování této zprávy tvořili **Andrew Hime, Mel Anaya, Tom Bowles, Steve Brice, Mike Dragowsky, Malcolm Fowler, Andre Hamer, Klaus Kirch, Azriel Goldschmidt, Geoff Miller, Bill Teasdale, Jerry Wilhelmy and Jan Wouters**.

Objev oscilací elektronových neutrin v záření Slunce bude mít zásadní význam pro porozumění vesmíru na jeho mikroskopické úrovni, protože oscilace neutrin nebyla součástí standardního modelu elementárních částic. Nepochybně dojde k dalšímu posunu v teorii neutrin nebo ke vzniku nových teorií.

## 4 Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2002

Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2002 byly uděleny za práce, které vedly k rozvoji dvou nových oblastí astrofyziky: roentgenové astrofyziky a fyziky neutrin.

Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2002 obdrželi **Raymond Davis** (*University of Pennsylvania and Brookhaven Natl. Lab*), **Masatoshi Koshiha** (*University of Tokyo*) a **Riccardo Giacconi** (*Associated Universities Inc.*).

V 60. letech 20. století **Raymond Davis** jako první detekoval neutrina pocházející ze Slunce. Množství slunečních neutrin však bylo menší než předpovědi, které učinil **John Bahcall** (*Institute for Advanced Study, Princeton*), a tak se zrodil "problém slunečních neutrin". Všechna pozdější měření dalšími detektory, jako byl SAGE a Gallex, také nezaznamenala očekávaný počet neutrin, která vznikají při termonukleárních reakcích v jádru Slunce. Nejlepším vysvětlením pro nižší počet slunečních neutrin byla představa, že elektronová neutrina se během letu od Slunce k Zemi mění na jiné typy, jako jsou mionová neutrina, která nelze zaznamenat pozemními detektory.

Tuto hypotézu poprvé ověřoval detektor Kamiokande, jehož tým jako první prokázal rozpad protonu. **Masatoshi Koshiha** a jeho kolegové, kteří pracovali na novém detektoru Super-Kamiokande, konečně tuto hypotézu potvrdili pozorováním asymetrií mezi množstvím neutrin z kosmického záření, která prošla hmotou Země, a množstvím neutrin, která prošla pouze atmosférou Země. Vědci prokázali, že neutrina skutečně oscilují mezi třemi svými typy: elektronovým, mionovým a tauonovým. Další důkaz o oscilaci neutrin provedla neutrinová observatoř SNO (*the Sudbury Neutrino Observatory*) v Los Alamos, která je schopna detekovat všechny tři typy neutrin. Observatoř oznámila, že pozorovala všechny typy neutrin, jejichž celkové množství odpovídá očekávanému množství slunečních neutrin.

Detekce neutrin má pro astrofyziku velký význam. Neutrina zřejmě sehrála důležitou roli při vzniku prvních galaxií. Jsou také formou energie, která pochází přímo ze slunečního jádra. Fotonům vznikajícím ve slunečním jádru trvá milióny let, než se dostanou k povrchu. Měření množství neutrin z vesmíru přináší také důležité informace o erupcích supernov. Například při erupci supernovy 1987A byl také zaznamenáno několik neutrin.