

Neutrino, poslové z nitra Slunce

Prof. Jiří Chýla, CSc., Fyzikální ústav Akademie věd ČR, chyla@fzu.cz

Letos v březnu zemřel ve věku 99 let jeden z nejvýznamnějších fyziků tohoto století, laureát Nobelovy ceny za fyziku v roce 1967, americký teoretik německé původu Hans Bethe. Při jejím udělení stál výbor Nobelovy nadace před neobvyklým problémem, který z mnoha zásadních příspěvků Hanse Betheho k jaderné fyzice vybrat. Nakonec se rozhodl pro ocenění Betheho práce na objasnění mechanismu, jakým svítí hvězdy. Bylo to správné rozhodnutí, ale v roce 1967 přece jenom trochu riskantní. Nikdo si sice nedovedl představit jiný zdroj energie hvězd, než fúzi jader vodíku na jádra hélia, ale přímé důkazy pro to chyběly. Dokonce se zdálo, že standardní model Slunce má problém.

Koncem 60. let 19. století totiž začal v opuštěném dole na zlato Homestake v Jižní Dakotě provádět své experimenty americký fyzik Ray Davis. Jeho cílem bylo dokázat, že ze Slunce k nám opravdu přilétají neutrino a změřit jejich tok. A hned od počátku jeho výsledky naznačovaly, že neutrino ze Slunce k nám přilétá o více než polovinu méně, než kolik předpovídaly výpočty založené na mechanismu spalování vodíku na helium. Davis svůj experiment, o němž se dále zmíníme podrobněji, s buldočí houževnatostí vylepšoval skoro 30 let a stále dostával stejný výsledek: neutrino jeho detektor zaznamenával jen asi třetinu teoreticky předpověděné hodnoty. Většina fyziků však měla o správnosti jeho dat a spolehlivosti teoretických výpočtů vážné pochybnosti. Na rozhodující důkaz bylo proto třeba počkat až na konec 90. let 20. století, kdy byly Davisovy výsledky potvrzeny v jiném dole na opačné straně zeměkoule.

Masatoshi Koshibu nezajímal neutrino ze Slunce, ale počátkem 80. let minulého století se rozhodl prověřit odvážnou předpověď určité třídy teorií, o nichž se v dalším krátce zmíníme, že proton není absolutně stabilní. K tomu účelu postavil detektor v dolu na zinek u japonského města Kamioka a od roku 1982 trpělivě čekal až se v něm nějaký proton rozpadne. Neúspěšně čeká dodnes, ale jeho snaha nebyla marná, neboť jeho detektor zachytil a velmi přesně proměřil právě tok slunečních neutrino. Potvrdil Davisovy výsledky, ale kromě toho prokázal existenci pozoruhodného jevu, tzv. oscilace neutrino, jenž hraje pro pochopení deficitu slunečních neutrino klíčovou roli. Celá sága pak vyvrcholila v roce 2002, kdy bylo v podobném experimentu, tentokrát v stále používaném dole na měď a zinek v kanadském Sudbury, prokázáno, že celkový tok neutrino ze Slunce je v plném souladu s předpovědí standardního modelu Slunce, založeného na Betheho průkopnické práci z roku 1938. Není proto divu, že v roce 2002 byla Nobelova cena za fyziku udělena za „*průkopnické příspěvky k astrofyzice, zejména za detekci kosmických neutrino*“ právě Raymondu Davisovi a Masatoshi Koshibovi. Příběhy jejich objevů jsou krásnou ilustrací základních aspektů vědecké výzkumu: intuice, vytrvalosti a nezbytného kousku štěstí. A také skutečnosti, že význam vědecké práce nelze předvídat.

Domnívám se, že otázka produkce energie ve hvězdách je i pro širší veřejnost natolik zajímavá, že by si ve středoškolské výuce zasloužila větší pozornost. Mimo jiné i proto, že při ní hrají klíčovou roli oba hlavní pilíře moderní fyziky, jejichž zrod si letos v rámci světového roku fyziky připomínáme: teorie relativity a kvantová teorie. K tomu, abychom pochopili roli, jakou v dynamice hvězd i fyzice vůbec neutrino hrají, je ovšem třeba si nejdříve připomenout základy našeho dnešního pohledu na mikrosvět.

Krátce o tom, co dnes o mikrosvětě víme

Základní znalosti zákonů mikrosvěta získané studiem vlastností a srážek elementárních částic za uplynulých 50 let jsou shrnuty v tzv. **standardním modelu** (SM). Podle něj jsou základními stavebními kameny hmoty tři tzv. **generace fermionů**, tj. částic se spinem 1/2, jež se dále dělí na **kvarky a leptony**.

Q= 2/3	u u u	c c c	t t t
Q= -1/3	d d d	s s s	b b b
Q= 0	ν_e	ν_μ	ν_τ
Q= -1	e^-	μ^-	τ^-

Obr. 1: Tabulka základních stavebních kamenů hmoty, jimiž jsou podle našich dnešních představ leptony a kvarky.

Samotný pojem spinu (vnitřního momentu hybnosti částic) je netriviální a během přednášky se o jeho významu podrobněji zmíním. Každý z šesti kvarků, označovaných symboly u, d, s, c, b, t existuje ještě ve třech různých stavech, nazývaných „**barvy**“. Z kvarků první generace jsou složeny například protony a neutrony, jež spolu s elektrony

vytvářejí atomy. V každé generaci je nabitý lepton (elektron, mion, tauon) doprovázen neutrální partnerem, jenž se nazývá elektronové (mionové, tauonové) neutrino. Ke každému kvarku a leptonu existuje samozřejmě také příslušná antičástice, která má stejnou hmotnost a opačný elektrický náboj a některá jiná kvantová čísla.

Mezi kvarky a leptony působí čtyři typy sil: **gravitační, slabé, elektromagnetické a silné**. Ačkoliv „slabé“ síly jsou skutečně slabé na vzdálenostech řádu průměru protonu, mají jednu důležitou vlastnost: **nejsou invariantní vůči prostorové (P) a nábojové (C) inverzi** (tj. záměně pojmů "vpravo" a "vlevo", resp. "částice" a "antičástice"), ba **ani vůči kombinované prostorové a nábojové inverzi (CP)**. Přitom právě narušení CP invariance je klíčem k pochopení skutečnosti, **proč je ve vesmíru více hmoty než antihmoty** a proč tedy vůbec existujeme. Kromě toho, slabé síly hrají klíčovou roli i v mechanismu produkce energie ve hvězdách.

Elektromagnetické a slabé síly jsou společně popsány **teorií elektroslabých sil**, formulovanou koncem 60. let. Silné síly jsou popsány **kvantovou chromodynamikou**, jež byla formulována v roce 1973. Gravitační síly jsou v experimentálně dostupném mikrosvětě oproti ostatním třem silám zanedbatelné, ale jejich role na velmi malých vzdálenostech a při velkých hustotách energie je nesporně klíčová. Pro pochopení jevů, o než nám v tomto článku půjde, však vystačíme s klasickou Newtonovou teorií.

.... a co si domýšlíme

Standardní model je experimentálně prověřen do značných podrobností. Některé zásadní otázky však ponechává nezodpovězeny:

- Proč existují právě **tři generace** kvarků a leptonů?
- Proč mají takové elektrické **náboje a hmotnosti**, jaké mají?
- Existují i **další síly**, o nichž dosud nic nevíme?
- Jsou kvarky a leptony skutečně **fundamentální**?
- Mají všechny čtyři známé síly **společný původ**?
- Jak může být **gravitace zahrnuta** do standardního modelu?

Hnacím motorem teorie se v posledních 30 letech staly snahy vybudovat teorii, která by byla nejen matematicky konsistentní a v jistém, byť nutně subjektivním, smyslu „krásná“, ale která by také odpověděla aspoň na některé z výše uvedených otázek. Jednou z tříd takových teorií, jsou tzv. **teorie velkého sjednocení**, formulované v roce 1974. V nich jsou kvarky a leptony jen různé stavy jednoho fermionu a elektromagnetické, slabé a silné síly jsou jen různé projevy téže „prasíly“. Dramatickým důsledkem tohoto předpokladu je předpověď, že **proton a neutron nejsou stabilní!** Od počátku 80.let minulého století je této otázce věnována velká pozornost a ač žádný rozpad protonu zatím pozorován nebyl, jde o zcela zásadní věc. Z praktického hlediska můžeme být ovšem klidní: experimenty ukazují, že doba života protonu je nejméně milión miliard miliard miliard roků. Je ovšem velmi pravděpodobné, že toho, kdo

rozpad protonu najde, Nobelova cena nemine. Možná na ní v roce 1982 myslel i Masatoshi Koshiha, ale vše dopadlo jinak. Koshiha Nobelovu cenu dostal, ale za něco zcela jiného.

Jak dlouho svítí Slunce a kde k tomu bere energii?

Otázky, z čeho získávají hvězdy energii pro záření a jak dlouho Slunce svítí, si fyzikové začali klást zhruba v polovině 19. století a to v souvislosti z objevem zákona zachování energie. Ten přivedl Helmholtze a další k hypotéze, že hvězdy získávají energii přeměnou gravitační energie na teplo. Značný rozruch mezi fyziky vnesl Charles Darwin, jenž na základě úvah o rychlosti eroze jednoho údolí v Jižní Anglii odhadl stáří Slunce na zhruba 300 milionů let. To byla doba dostatečně dlouhá pro vývoj druhů přirozenou selekcí, jak ho Darwin formuloval ve své klasické práci *O původu druhů*. K podobným odhadům došli i další geologové a biologové. Jejich odhady ovšem vyvolaly ostrý nesouhlas tehdejších fyziků a astronomů. W. Thomson, pozdější lord Kelvin, došel na základě úvah o gravitační kontrakci Slunce k číslu asi desetkrát menšímu, čímž a vzbudil v Darwinovi pochybnosti o správnosti jeho hypotézy přirozené selekce druhů. Jak dnes víme, pravdu měl Darwin, ne Kelvin.

Obrat v souboji fyziků s geology a biology přinesl rok 1896, kdy H. Becquerel objevil spontánní radioaktivitu uranu. Od počátku bylo jasné, že záření je tvořeno elektricky nabitými částicemi a že má dvě složky, α a β . Brzy poté se ukázalo, že β -radioaktivita není nic jiného než tok elektronů, které krátce předtím objevil J. J. Thomson. V roce 1903 si Pierre Curie všiml, že rádium nepřetržitě vyzařuje teplo a přitom se neochlazuje. Na krátký čas se zdálo, že přirozená radioaktivita může být zdrojem energie pro Slunce, ale astronomové brzy ukázali, že Slunce je tvořeno převážně plynným vodíkem a radioaktivního materiálu je tam velmi málo.



Obr. 2 : Princip spalování jader vodíku na jádra hélia.

Rozhodující okamžik ve vývoji představ jak Slunce svítí přinesla Einsteinova teorie relativity a konkrétně poznání, že hmotnost je energie a naopak. Je vhodné si uvědomit, že proslulá formule $E=mc^2$ vlastně jen zobecňuje zákon zachování energie zahrnutím možnosti přeměny klidové hmotnosti na kinetickou energii a naopak. Přeměna i jen malé části klidové hmotnosti jader na kinetickou energii tak otevřela možnost získat obrovské množství energie. Konkrétní proces, při němž by k takové přeměně mohlo docházet, pomohl najít F. Aston, jenž se zabýval měřením hmotnosti různých atomů. V roce 1920 při tom zjistil, že čtyři jádra vodíku jsou dohromady asi o 0,7% těžší než jádro hélia. Klíč k pochopení mechanismu produkce energie ve Slunci byl na světě. Okamžitě se ho chopil známý anglický

astronom Arthur Eddington, který ještě téhož roku ukázal, že přeměna vodíku na hélium může poskytnout dostatek energie na to, aby Slunce svítilo zhruba 100 miliard let. Dříve, než budeme sledovat další vývoj této myšlenky, vrátíme se na chvíli zpět k radioaktivitě.

Neutrína za scénou

Skutečnost, že v β -rozpadech jader vzniká kromě elektronu ještě další částice netušil tehdy nikdo a trvalo 17 let než to začalo být fyzikům podezřelé. V roce 1914 však **J. Chadwick** ukázal, že spektrum energií vyletujících elektronů v β -rozpadu je spojité, což vedlo Bohra k hypotéze, že v mikrosvětě se energie v jednotlivých případech nezachovává.

Tuto herezi ovšem odmítal Pauli a pro vysvětlení spojitého spektra beta rozpadu přišel v roce 1930 s jinou, na první pohled stejně troufalou, myšlenkou: postuloval **existenci nové, do té doby neznámé částice, kterou nazval „neutron“**. Samotná historie zrodu této hypotézy je velmi zajímavá a proto ji krátce připomenu. Pauli svou hypotézu poprvé vyslovil v dopise účastníkům setkání fyziků a chemiků zabývajících se radioaktivitou v Tübingen 4. 12. 1930, jehož úplný text zní:

Vážené radioaktivní dámy, vážení radioaktivní pánové,

věnujte prosím laskavou pozornost doručiteli tohoto dopisu. Pová vám, jak jsem s ohledem na „špatnou“ statistiku jader dusíku a lithia a na existenci spojitého spektra beta rozpadů přišel na zoufalou myšlenku, jak zachránit teorém o statistice i zákon zachování energie. Její podstatou je předpoklad, že v jádrech existuje elektricky neutrální částice se spinem $\frac{1}{2}$, která splňuje vylučovací princip a která se liší od fotonu také tím, že se nepohybuje rychlostí světla. Tato částice, kterou budu nazývat „neutron“, by měla mít hmotnost stejného řádu jako elektron a v žádném případě ne více než 0.01 hmotnosti protonu. Spojité spektrum beta rozpadů by pak bylo vysvětleno tím, že v těchto rozpadech je s elektronem vyzařen vždy i neutron a to tak, že součet energií neutronu a elektronu je konstantní.

Připouštím, že moje vysvětlení se může zdát absurdní, neboť pokud neutrony existují, měly být už dávno pozorovány. Ale jen ten, kdo si troufá, může vyhrát. Obtížnou situaci se spojitým

Original: Photocopy of 1946 0373
Abschrift/15.12.56

Öffener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Ulriehstrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst
ansuhören bitte, Ihnen das näherem auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der β - und β -6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifalten Ausweg
verfallen um den "Wechselzats" (1) der Statistik und den Energienatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen
sowie von Lichtquanten auseinander noch dadurch unterscheiden, dass sie
sich mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
wäre von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedemfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, dazum, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

spektrum beta rozpadů ilustruje
poznámka mého váženého před-
chůdce, pana Debye, jenž mi ne-
dávno v Bruselu řekl: „Je to jako
s novými daněmi, je nejlepší na to
nemyslet.“ Proto by měla být kaž-
dé možné řešení posouzeno. A tak,
moji milí radioaktivní přátelé, po-
suzujte a sud'te. Já bohužel do Tü-
bingen neprijedu, neboť moje pří-
tomnost je nepostradatelná zde
v Curychu na plese v noci z 6. na
7. prosince.

Váš oddaný služebník
W. Pauli.

Tato citace je zajímavá nejen proto, že obsahuje první zmínku o částici, pro níž se později ujal Fermiho název (elektronové) „neutrino“, ale i proto, že ukazuje, že se Pauli vlastně z větší části mýlil. Částice, která vyřešila problém spojitého spektra v β -rozpadu totiž nehraje při vysvětlení statistiky jader dusíku a lithia žádnou roli. Problém statistiky jader, jako jsou dusík a lithium, se týkal skutečnosti, že podle tehdejších představ se jádra skládala z protonů a elektronů. Skutečnost, že například atomová váha jader dusíku je 14 a atomové číslo jen 7 byla interpretována tak, že jádro dusíku se skládá ze 14 protonů a 7 elektronů, tedy celkem 21 částic se spinem $\frac{1}{2}$. To znamenalo, že by se mělo chovat jako částice s poločíselným spinem. Přidáním jedné částice se spinem $\frac{1}{2}$ problém vyřešilo, ale jak ukázal další vývoj, bylo to nesprávné řešení. Objev neutrálního partnera protonu, který se dnes nazývá neutron, Chadwickem v roce 1932 zásadně změnil představy fyziků o struktuře jader: například jádro dusíku je tvořeno 7 protony a 7 neutrony a má tedy v souladu s experimentem vlastnosti bosonu.

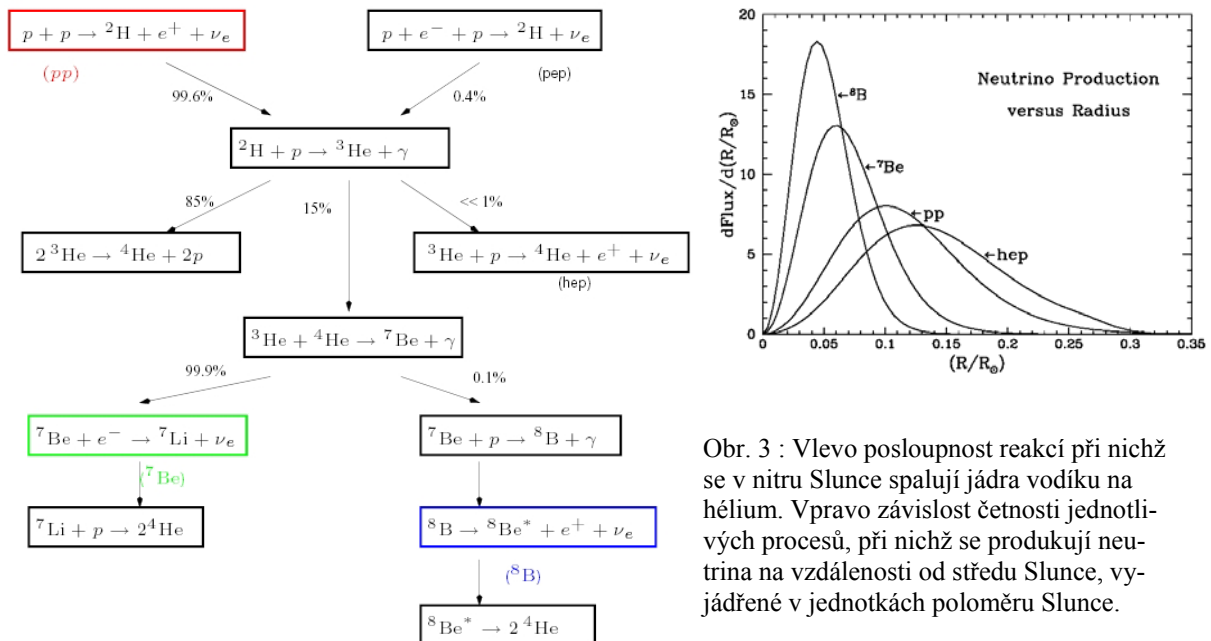
Pauli se mýlil ovšem i v tom, že si nelze představovat, že elektronové antineutrino bylo před β -rozpadem uvnitř jádra. Bylo velkou zásluhou Enrica Fermiho, že tato naivní klasická představa byla opuštěna. V roce 1934 Fermi formuloval teorii slabých sil, jež zahrnovala i elektronové neutrino, v níž bylo poprvé a explicitě vyřčeno tvrzení, že neutrino vznikající v beta rozpadu **není součástí jádra** a že při jeho rozpadu teprve vzniká. Požehnání vědecké obce dostala Pauliho hypotéze během Solvayské konference v říjnu 1933, kde navíc francouzský fyzik Perrin vyslovil domněnku, že **klidová hmotnost neutrina je nulová**. Na této konferenci byla definitivně odmítnuta Bohrova a Heisenbergova hypotéza, že v elementárních procesech mikrosvěta se energie nezachovává.

Na scénu přichází Hans Bethe

Vraťme se nyní o pár let zpět a sledujme dále vývoj Eddingtonovy myšlenky. Další důležitý krok k pochopení mechanismu produkce energie ve hvězdách učinil v roce 1928 americký jaderný fyzik ruského původu George Gamow. V rámci kvantové mechaniky, která byla tehdy teprve 3 roky stará, odvodil formuli, které se říká „Gamowův faktor“. Ten určuje pravděpodobnost, že navzdory velmi silnému elektrostatickému odpuzování, se budou dva protony nacházet velmi blízko sebe. Tak blízko, aby mohlo dojít k slučování protonů na jádra deutéria. Tento jev má ryze kvantovou povahu a představuje vedle Einsteinova vztahu mezi hmotností a energií druhý klíč k pochopení mechanismu, jak Slunce svítí.

Jedním z těch, kdo se snažil Eddingtonovu myšlenku přetavit do konkrétního modelu, byl teoretický jaderný fyzik Hans Bethe. V roce 1938, kdy se tímto tématem začal zabývat, mu sice bylo teprve 32 let, ale přesto byl na tento úkol ze všech tehdejších jaderných fyziků nejlépe připraven. Na modelu spalování vodíku na hélium začal pracovat v dubnu a již na podzim 1938 během svého pobytu v USA dokončil svoji základní práci *Produkce energie ve hvězdách*. Ta obsahuje podrobný popis procesů, které probíhají na Slunci i masivnějších hvězdách a při nichž se uvolňuje energie, která je posléze vyzařena ve formě elektromagnetického záření. Kromě skutečnosti, že v práci popsanych procesech chybí neutrino, jehož existence byla v té době jen odvážnou hypotézou, vystihl Bethe podstatu procesů probíhajících ve hvězdách s přesností, před níž musíme dodnes smeknout. Právě neutrino jsou ovšem jediným svědkem těchto procesů, kterého můžeme na Zemi vyslechnout.

Připomeňme, že produkce energie ve hvězdách jako je Slunce začíná fúzí dvou protonů na deuteron, při níž dále vzniká pozitron a elektronové neutrino: $p + p \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ (viz. obr. 3). Tento proces je přitom kombinovaným „dílem“ slabých i silných sil. Vazba protonu a neutronu v deuteronu je důsledkem silných sil, ale protože vázaný stav dvou protonů neexistuje, musí se současně jeden proton změnit na neutron v procesu $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$, jenž by sám o sobě nemohl probíhat, neboť neutron je těžší než proton. Bez slabých sil by tedy Slunce nesvítilo.



Obr. 3 : Vlevo posloupnost reakcí při nichž se v nitru Slunce spalují jádra vodíku na hélium. Vpravo závislost četnosti jednotlivých procesů, při nichž se produkují neutrino na vzdálenosti od středu Slunce, vyjádřená v jednotkách poloměru Slunce.

Při popsané reakci se asi 0,02% klidové energie protonů přemění na kinetickou energii vzniklých částic. Z hlediska výtěžnosti je daleko efektivnější již zmíněný proces, při němž se čtyři protony sloučí přímo na jádro hélia a přitom vzniknou dva pozitrony a dvě neutrino. Čtyřná-

sobek klidové hmotnosti protonu je totiž o asi o 0,7% těžší než součet klidových hmotností jádra hélia a dvou pozitronů. Nevýhodou tohoto procesu je ovšem skutečnost, že k němu je potřeba, aby se najednou srazily čtyři protony, což je velmi málo pravděpodobné.

Celková posloupnost procesů probíhajících v nitru Slunce, zachycená na obr. 3, je poměrně složitá, ale všechny jednotlivé větve končí stavy, v nichž je helium a případně proton. Nebudu je zde podrobně rozebírat, jen bych chtěl čtenáře upozornit na předposlední etapu třetí větve, v níž se jádro bóru rozpadá na jádro berylia, pozitron a elektronové neutrino, které může mít energii až asi 14 MeV. Do tohoto místa dospěje řetěz reakcí ve Slunci sice jen velmi zřídka, jednou za deset tisíc případů, ale právě tato neutrina nám o něm přináší většinu svědectví. Díky tomu, že s ostatními částicemi interagují velmi slabě, neutrino vzniklá v nitru Slunce jím projdou nerušeně až na povrch. Ostatní částice se během cesty na povrch mnohokrát srazí s jinými. Energie uvolněná spalováním vodíku se šíří z nitra Slunce na povrch tzv. konvekci (proto jsou při popisu nitra Slunce užiteční i geofyzikové). Sluneční paprsky, které dopadají na Zemi, vznikají v povrchové vrstvě Slunce a o procesech v jeho nitru nic neříkají. Jejich jedinými svědky jsou právě neutrino. Na obr. 3 vpravo je vynesena závislost četnosti procesů, v nichž neutrino vznikají, na vzdálenosti od středu Slunce. Vidíme, že obzvláště zmíněný rozpad bóru, při němž vznikají neutrino s největší energií, probíhá v hlubokém nitru Slunce.

Na tomto místě je třeba zdůraznit, že kvantitativní popis řetězce reakcí na obr. 3 je výsledkem složitých výpočtů, jež byly od 50. let minulého století stále zpřesňovány a jež jsou společným dílem chemiků, geofyziků, astrofyziků, jaderných fyziků a fyziků elementárních částic.

Pauli měl pravdu

Trvalo čtvrt století, než byla Pauliho hypotéza neutrino v roce 1955 potvrzena experimenty **Frederica Reinesa a Williama Cowana**. Ti prokázali existenci elektronových antineutrín vznikajících v jaderných reaktorech tím způsobem, že pozorovali důsledky jejich srážek s protony v procesu $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Přesvědčivá identifikace současné přítomnosti pozitronu a neutronu nebyla snadná a proto trvalo několik let, než se to Reinesovi a Cowanovi podařilo. První za to dostal po nepochopitelně dlouhých 40 letech Nobelovu cenu, druhý se jí, bohužel, nedočkal. Z prostorových důvodů se tomuto mimořádně důležitému objevu nemohu podrobněji věnovat, stejně jako objevům dvou dalších neutrín, o nichž jsme se zmínili na začátku. Proto jen krátce připomenou, že v roce 1962 **Leon Lederman, Melvin Schwartz a Jack Steinberger** ukázali, že neutrino, které doprovází mion v rozpadu $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, není stejné jako neutrino, které doprovází v podobném rozpadu pozitron, tj. $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ a že tedy každý nabitý lepton má „své“ neutrino. V roce 1988 za to dostali Nobelovu cenu. Podobným způsobem byla v roce 2000 prokázána existence a identita i třetího neutrína ν_τ . Za to ovšem Nobelova cena už udělena nebyla.

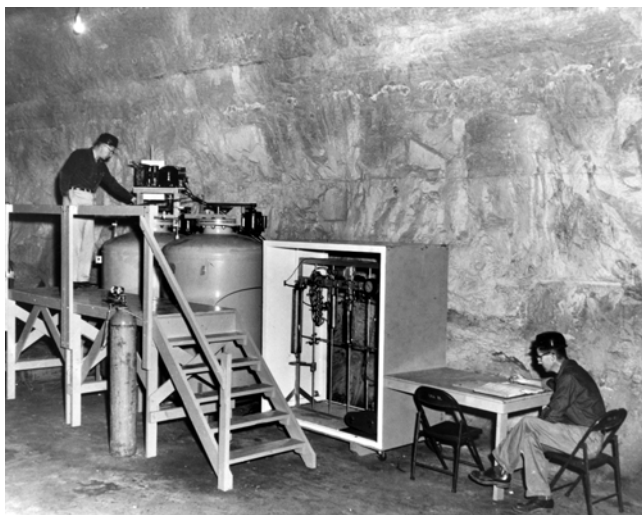
Trpělivost růže přináší

V polovině 50. let minulého století přišel mladý americký chemik **Raymond Davis** s myšlenkou změřit tok slunečních neutrín metodou navrženou Brunem Pontecorvo. Ta byla založena na reakci, při níž je neutrino pohlceno jádrem chlóru a vznikne jádro argonu a elektron:



Vzniklý argon je detegován pomocí zpětného β -rozpadu na chlór a pozitron. Technické realizaci této metody Ray Davis, zasvětil celý život a dosáhl v ní opravdového mistrovství.

První Davisova aparatura, zachycená na obr. 4 vlevo, byla umístěna v opuštěném dole na vápenec a jejím srdcem byla nádrž na zhruba 4000 litrů perchloretylenu, běžně používaného čisticího prostředku. Počátkem 60. let Davis získal prostředky na stavbu stokrát většího detek-



Obr. 4: Vlevo původní Davisova aparatura v podzemí dolu na vápenec, v níž bylo 4000 litrů čistícího prostředku perchloretylenu. Vpravo stokrát větší Davisův detektor v dole na zlato Homestake, v němž zaznamenal asi 2000 případů srážek slunečních neutrin



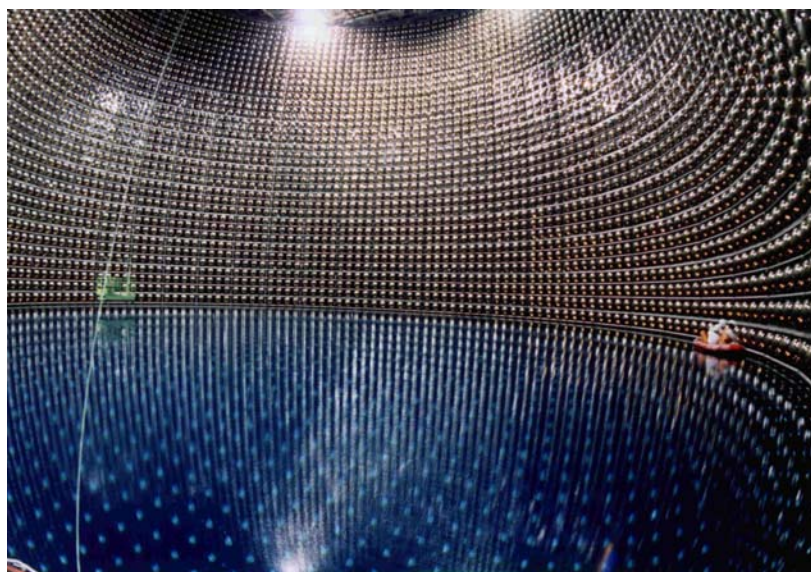
toru, jenž byl uveden do provozu v roce 1964 asi 1800 metrů pod zemí v opuštěném dole na zlato Homestake (obr. 4 vpravo). Ve spolupráci s Johnem Bahcallem, expertem přes výpočet toku slunečních neutrin, pak v roce 1968 pozorovali první náznak, že na Zemi dopadá méně neutrin, než kolik předpovídala standardní teorie procesů ve Slunci. Davisův úkol byl ovšem daleko složitější než příslovečné hledání jehly v kupce sena. Počet zaznamenaných případů čítal typicky dva za týden a protože poločas rozpadu argonu je 35 dní, bylo z celého objemu detektoru každé zhruba 2 měsíce speciální chemickou procedurou odváděno 10-20 atomů argonu. Přitom v jedné tuně perchloretylenu je asi sto miliard miliard miliard molekul.

Davis ve svém experimentu pokračoval dalších 25 let a za tu dobu zaznamenal celkem asi 2200 případů produkce argonu. Tento počet odpovídal toku slunečních neutrin rovnému 2.56 ± 0.3 tzv. solárních jednotek (SNU). Předpověď standardního modelu Slunce byla přitom zhruba třikrát větší: 7.6 ± 1.3 SNU. Věrohodnost Davisových výsledků stále rostla, ale jeho metoda měla jedno principiální omezení: neumožňovala získat informaci o směru přilétajícího neutrina, což byl z hlediska jejich přesvědčivosti velký nedostatek.

Štěstí přeje připraveným

Ten neměla aparatura, kterou počátkem 80. let minulého století navrhla skupina japonských fyziků vedená Masatoshi Koshibou, aby prověřila základní předpověď teorií velkého sjednocení - nestabilitu protonu. Ve starém dole na zinek Kamioka, asi 1000 metrů pod zemí, vybudovali velký čerenkovský vodní detektor, zvaný Kamiokande, jenž obsahoval 3000 tun velmi čisté vody. Objem detektoru byl sledován 1000 fotonásobiči o průměru 50 cm, které byly umístěny na jeho obvodu a registrovaly tzv. **čerenkovské záření**. Toto elektromagnetické záření vzniká v prostředí, v našem případě vodě, pokud se jím šíří elektricky nabitá částice rychleji než světlo. Ve vakuu to možné není, ale v prostředí ano. Koshibovi šlo přitom především o detekci pozitronů z hledaného rozpadu protonu $p \rightarrow \pi^0 + e^+$. Od spuštění v roce 1983 do roku 1995 Kamiokande nezaznamenal žádný rozpad protonu, ale za to zachytil a proměřil tok slunečních neutrin pocházejících z rozpadu bóru v předposlední fázi řetězce procesů na obr. 3. Tato neutrina vyráží z atomů vodíku a kyslíku elektrony, jejichž energie je dostatečná na to, aby zmíněné čerenkovské záření produkovaly.

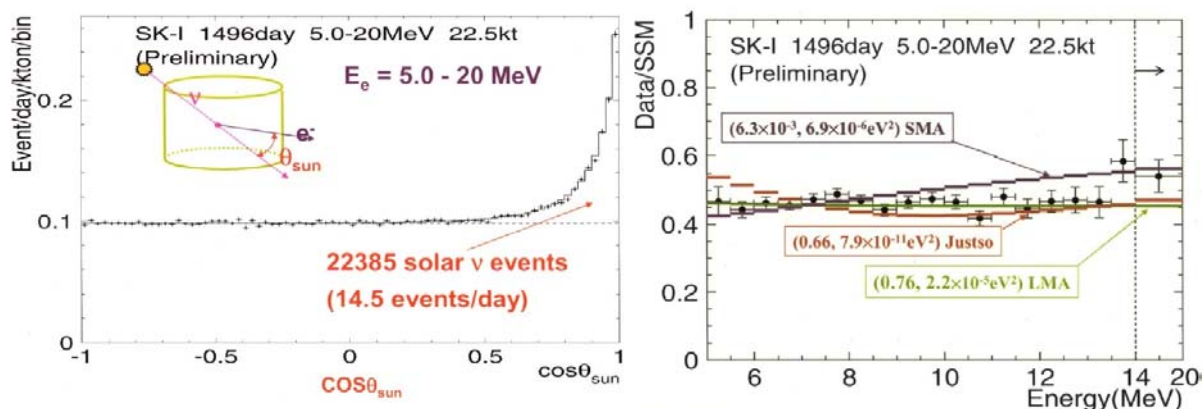
Úspěšný provoz detektoru Kamiokande a snaha dále zvýšit počet zaznamenaných neutrin přivedly Koshibu k rozhodnutí vybudovat na stejném místě jeho mnohonásobně většího bratříčka **Superkamiokande**. Ten obsahuje 55 000 tun superčisté vody, jejíž objem sledovalo 11 000 fotonásobičů umístěných na obvodu válcovité nádrže, zachycené na obr. 5.



Obr. 5: Vnitřek válcové nádrže detektoru Superkamiokande, částečně naplněného vodou. Na hladině je loďka, z níž je přístup k jednotlivým fotonásobičům, které jsou vidět jako bílé polokoule na obvodu. Při provozu je celý objem válce zaplněn 55 000 tun superčisté vody. Počítačová rekonstrukce signálů z fotonásobičů umožňuje rekonstruovat směr pohybu nabitě částice a také rozlišit elektron od mionu.

V letech 1998-2001 detektor Superkamiokande změnil tok slunečních neutrin s do té doby nevídanou přesností. Klíčová závislost počtu zaznamenaných případů na směru, vynesena na obr. 6 vlevo, jasně dokazuje, že neutrina přilétají skutečně ze Slunce. Jak dokumentuje graf na obr. 6 vpravo, jejich celkový počet byl ovšem podobně jako u Davise podstatně menší, než kolik předpovídala teorie. Ta přitom používala výpočty toku slunečních neutrin, který prováděl John Bahcall. Současný stav našich znalostí tohoto toku je zachycen na obr. 7 vlevo.

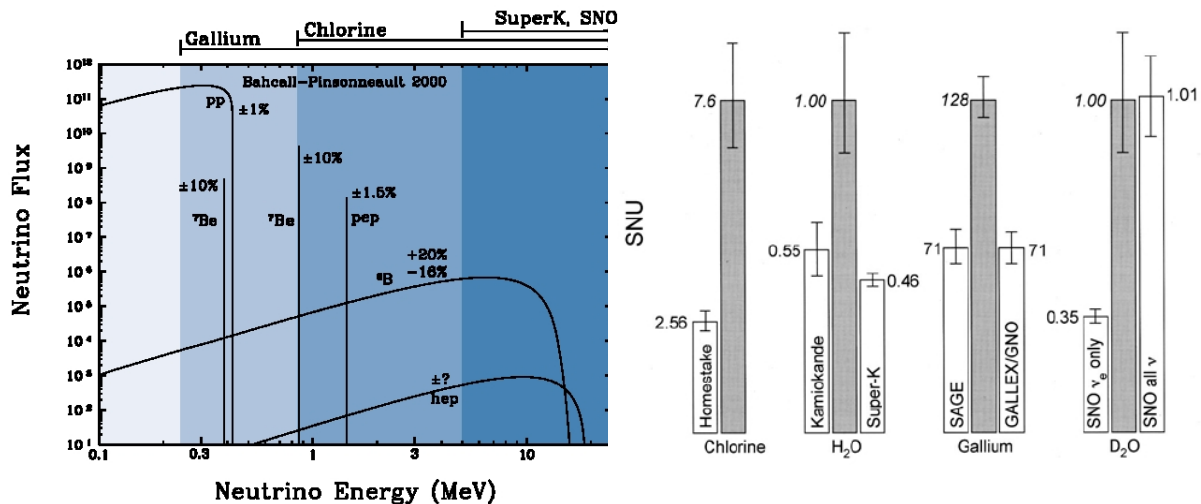
Detektor Superkamiokande tedy nejen potvrdil Davisovy výsledky, ale přidal k nim i klíčovou informaci o směru příletu neutrin. O tom, že ze Slunce k nám přilétá asi o polovinu méně elektronových neutrin, než kolik předpovídá standardní model Slunce, již nikdo nepochybuje.



Obr. 6: Vlevo: závislost počtu zaznamenaných neutrin na úhlu vůči směru od Slunce. Vpravo: závislost podílu počtu zaznamenaných slunečních neutrin a teoretické předpovědi na energii neutrin.

Znamená to tedy, že po všem tom úsilí stále nerozumíme, jak Slunce svítí, nebo spíše nerozumíme neutrinům a jejich interakci s elektrony a jádry? Ani jedno, ani druhé. Zatím poslední kapitola našeho příběhu se odehrála v letech 2001-2002 v kanadské **Sudburské neutrinové observatoři** (SNO). Ta vybudovala v postraní kaverně dosud používaného dolu detektor, jenž je v základních rysech podobný detektoru Superkamiokande. Jediný, ale klíčový rozdíl je v tom, že v srdci detektoru je asi 1000 tun těžké – a také velmi drahé - vody, kterou fyzikům

zapůjčila kanadská vláda. Tato okolnost umožňuje detektoru SNO zaznamenat průchod nejen elektronových neutrin, ale i jejich bratříčků, mionových a tauonových neutrin. Výsledky experimentu v SNO přinášejí jednoznačné svědectví o tom, že celkový tok všech tří typů neutrin, který na Zemi ze Slunce dopadá, je v plném souladu s předpovědí standardního modelu Slunce. Na obr.7 vpravo je tato skutečnost graficky znázorněna tím, že pravý prázdný sloupec s nápisem „SNO all ν “, odpovídající počtu zaznamenaných neutrin všech tří typů, je téměř přesně stejně vysoký jako plný sloupec, zobrazující teoretickou předpověď.



Obr. 7: Vlevo teoreticky spočtená závislost toku slunečních neutrin na jejich energii pro různé části Betheho procesu, vpravo srovnání počtu experimentálně zaznamenaných (prázdné sloupce) a teoreticky předpověděných (plné sloupce) počtů záchytů neutrin pro čtyři typy detektorů, mezi nimi i Davisův a Koshibův (první dva zleva). Tři sloupce zcela vpravo odpovídají experimentu v SNO.

Na tomto místě může čtenář oprávněně namítnout, že by nás neměl zajímat celkový tok všech tří typů neutrin, ale jen tok elektronových neutrin, neboť jenom ta přece vznikají při procesech na Slunci. Ano, jen ta v nitru Slunce vznikají, ale díky pozoruhodnému jevu, jemuž se říká **oscilace neutrin**, si svou identitu nedokáží udržet natrvalo. Tento jev, jenž je typickým projevem kvantové povahy zákonů mikrosvětla, velmi zhruba řečeno znamená, že jednotlivá neutrina mohou během svého pohybu přecházet jedno v druhé. Neutrino, které vznikne uvnitř Slunce při rozpadu bóru a kterému říkáme „elektronové“, se tak během letu k Zemi může přeměnit na „mionové“ či „tauonové“ neutrino a po čase zase zpět na elektronové atd. Detektory, které jsou citlivé jen na elektronová neutrina, pak hlásí jejich nedostatek.

Aby k tomuto pozoruhodnému jevu mohlo docházet, je ovšem třeba opustit předpoklad, že neutrina jsou, podobně jako foton, nehmotná. To nás ovšem příliš nebolí, neboť tento předpoklad, či spíše předsudek, nemá žádné hlubší teoretické opodstatnění. Měření Superkamiokande, SNO a několika dalších nových experimentů umožnila zatím jen velmi hrubé odhady klidových hmotností, ale o tom, že aspoň dvě ze tří neutrin mají nenulovou klidovou hmotnost, není dnes již pochyb.

Kvantitativní popis oscilací neutrin je dosud předmětem intenzivního experimentálního i teoretického zkoumání, ale vše nasvědčuje tomu, že jsme na správné stopě a že záhada slunečních neutrin je vyřešena. Bethe měl tedy pravdu. Díky němu, Davisovi, Koshibovi, Bahcallovi a samozřejmě mnoha jejich spolupracovníkům se zdá, že **dobře rozumíme, jak svítí sluníčko a také víme, že aspoň dvě neutrina mají nenulovou klidovou hmotnost.**