

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Otokar Dragoun; Miloš Ryšavý

Nobelova cena dvěma zakladatelům neutrinové astronomie

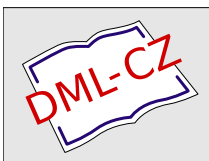
*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 48 (2003), No. 1, 1--9

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141153>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2003

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



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

# Nobelova cena dvěma zakladatelům neutrinové astronomie

Otokar Dragoun a Miloš Ryšavý, Praha

MOTTO: *Jediný způsob, jak zjistit hranice možného, je zkusit dosáhnout alespoň kousek nemožného.* (ALVAN CLARK [1804–1887], americký astronom, který vytvořil největší a nejdokonalejší teleskopické čočky své doby.)

Dne 8. října 2002 Královská švédská akademie slavnostně vyhlásila laureáty Nobelovy ceny za fyziku 2002. Stali se jimi Riccardo Giacconi (Associated Universities Inc., Washington, USA) za „průkopnický příspěvek astrofyzice, který vedl k objevení vesmírných zdrojů rentgenových paprsků“, a Raymond Davis, Jr. (University of Pennsylvania, Philadelphia, USA) a Masatoshi Koshiha (University of Tokyo, Tokyo, Japonsko) za „průkopnický příspěvek astrofyzice, zejména za detekci kosmických neutrin“. (Zvukový záznam nobelovských přednášek laureátů je k dispozici na internetu [1].) Cílem tohoto článku je přiblížit čtenářům práci dvou posledně jmenovaných laureátů a částečně i to, co jí předcházelo a co ji následovalo.

Raymond Davis, Jr. se narodil r. 1914. V roce 1942 získal doktorát z fyzikální chemie na Yale University. Dlouhá léta pracoval v Brookhaven National Laboratory. V roce 1984 odešel do důchodu, ale již od roku 1985 opět pracoval na University of Pennsylvania.

Masatoshi Koshiha se narodil r. 1926. Studia na University of Tokyo ukončil v roce 1951. Roku 1955 získal doktorát z fyziky na University of Rochester v USA. Od roku 1970 byl profesorem na University of Tokyo; po odchodu do důchodu v r. 1987 byl jmenován emeritním profesorem. V letech 1987 až 1997 byl profesorem na Tokai University.

Dříve než popíšeme experimenty, za něž byla Nobelova cena udělena, připomeňme si některé základní pojmy. Neutrino patří mezi tzv. *leptony*. To jsou elementární částice, které interagují slabou, případně i elektromagnetickou a samozřejmě gravitační interakcí, nikoli však silnou. Patří k nim elektron, mion, tauon a jim odpovídající neutrina (a ovšem i jejich antičástice). Historický název *lepton* (z řeckého slova *leptós* — lehký) souvisí s tím, že hmotnosti všech těchto částic, známých do roku 1975 (tj. do objevu tauonu), jsou menší než hmotnosti všech ostatních elementárních částic (s výjimkou fotonu). Poznamenejme, že pod pojmem hmotnost zde rozumíme *klidovou hmotnost*; ta se obvykle udává v jednotkách energie eV ( $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ).

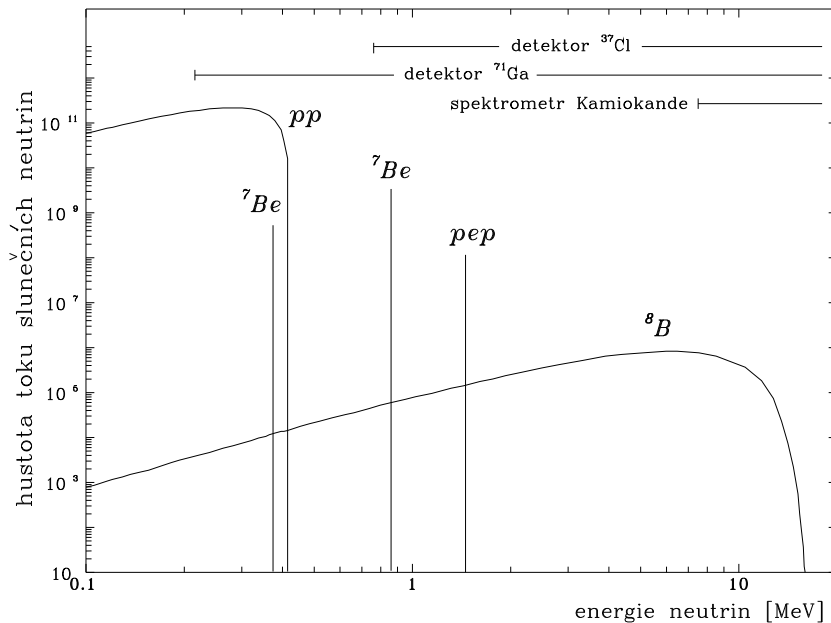
Nabitě leptony (elektron, mion a tauon) interagují též elektromagneticky, a proto je snadná jejich detekce. Neutrina elektrický náboj nemají a účinné průřezy pro jejich interakci s ostatními částicemi či atomovými jádry jsou nesmírně malé, většinou

---

Ing. OTOKAR DRAGOUN, DrSc. (1937), a RNDr. MILOŠ RYŠAVÝ, CSc. (1947), Ústav jaderné fyziky AV ČR, 250 68 Řež, e-mail: dragoun@ujf.cas.cz, rysavy@ujf.cas.cz

o 18 řádů menší než účinné průřezy běžné v jaderné fyzice. Neutrino bylo nejdříve předpovězeno teoreticky. Při rozpadu  $\beta$ , kdy se jeden neutron v jádře mění na proton a z jádra vyletuje elektron, bylo nepochopitelné, že tyto elektrony mají spojité energetické spektrum. Zdálo se, že je porušen zákon zachování energie — jeden ze základních zákonů fyziky. Aby situaci zachránil, vyslovil Pauli [2] v roce 1930 hypotézu, že přitom vyletuje další neutrální lehká částice — neutrino. Na důkaz existence si však neutrino muselo počkat až do roku 1956, kdy byl jednoznačně prokázán [3] inverzní rozpad  $\beta$  vyvolaný neutrinou z jaderného reaktoru.

Původně se myslelo, že se neutrina účastní pouze rozpadu  $\beta$ . Dnes víme, že se tyto částice podílejí na mnoha důležitých procesech způsobených slabou interakcí: v obrovském množství vznikají při jaderné fúzi v nitru hvězd a při průchodu kosmického záření zemskou atmosférou. Přebírají většinu energie při výbuchu supernovy. Hojně se vyskytují i tzv. reliktní neutrina, vzniklá krátce po Velkém třesku. (Jejich celkovou hmotnost zatím neznáme, ale není vyloučeno, že tvoří až 25 % temné hmoty vesmíru.) A právě detekce a výzkum mimozemských neutrin je to, co vedlo k letošní Nobelově ceně pro naše dva laureáty.



Obr. 1. Energetická závislost hustoty neutrinového toku na povrchu Země vypočtená podle standardního slunečního modelu [5]. Jednotky jsou  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MeV}^{-1}$  pro spojité spektra a  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  pro diskrétní spektra. Úsečky v horní části obrázku ukazují, jakou část spektra registrují různé detektory. Pro jednoduchost jsou zobrazeny jen ty složky neutrinového spektra, které mají rozhodující význam pro popisované experimenty.

Zde je namísto ještě několik slov o vývoji *neutrinové astronomie*. V roce 1939 navrhl Bethe [4] teorii termojaderné syntézy ve hvězdách. Nejdříve dochází ke sloučení dvou protonů podle rovnic  $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$  (tzv. neutrina  $pp$ ) nebo

$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$  (neutrino *pep*). Druhý proces probíhá se 400krát menší pravděpodobností. Následují reakce bez účasti leptonů, které dají vzniknout beryliu  ${}^7\text{Be}$ . To se poté v 99,89% případů přemění elektronovým záchytem na lithium,  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ , ve zbylých případech se sloučí s protonem za vzniku bóru  ${}^8\text{B}$ . Ten se dále rozpadá  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$ . Energetická spektra neutrin z jednotlivých reakcí jsou znázorněna na obr. 1.

V roce 1946 přišel Pontecorvo s podrobně rozpracovanou ideou [6], že by neutrino mělo být možné detekovat v reakci obráceného rozpadu  $\beta$ , konkrétně  ${}^{37}\text{Cl} + \nu \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ . Vzniklý  ${}^{37}\text{Ar}$  se rozpadá s poločasem 35 dní elektronovým záchytem zpět na  ${}^{37}\text{Cl}$ . Přitom jsou z atomového obalu dceřiného chlóru emitovány Augerovy elektrony, které lze snadno detekovat.

Bohužel neutrino *pp* mají energii nižší, než je práh této reakce, jenž činí 814 keV (viz obr. 1). Účinný průřez reakce pro vznik  ${}^7\text{Be}$  nebyl dostatečně znám a očekávalo se, že bude příliš nízký. Až v roce 1958 byl tento účinný průřez změřen a ukázalo se, že je tisíckrát vyšší, než se předpokládalo. To vedlo k naději, že ve Slunci může vznikat  ${}^8\text{B}$  v množství postačujícím k pozorovatelnému toku neutrin s nadprahovou energií. V roce 1963 vypočetl Bahcall, že účinný průřez výše uvedené reakce na chlóru je (díky supradovolenému přechodu do vzbuzeného stavu argonu) dvacetkrát vyšší, než se předpokládalo. Pak již nic kromě technické obtížnosti nestálo v cestě uskutečnění navrhovaného experimentu. Touto cestou se vydal jako první profesor Davis.

## Radiochemický detektor slunečních neutrin Homestake

Na základě Pontecorvovy myšlenky a po předběžných experimentech [7] a výpočtech [8] dospěli radiochemik Raymond Davis, Jr. a astrofyzik John N. Bahcall k realistickému návrhu, jak ověřit, zda na Zemi dopadají neutrino vytvořená termojadernou fúzí na Slunci.

Ve zlatém dole Homestake v Jižní Dakotě (USA) byla v hloubce 1,5 km pod zemí vybudována laboratoř, jejíž hlavní součástí byla nádrž se 615 tunami tetrachlorethylenu  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ , což je nehořlavá tekutina používaná v chemických čistírnách. Nádrž o průměru 6,1 m a délce 14,5 m (viz obr. 2) musela vyhovět dvěma náročným požadavkům. Z povrchu oceli nesmějí být emitovány částice  $\alpha$  stopových příměsí přirozených radionuklidů, neboť by mohly vytvořit falešné atomy  ${}^{37}\text{Ar}$ , a tím zkreslit počet těchto atomů vytvořených slunečními neutrinami. Kromě toho musí být nádrž dokonale těsná, aby z ní žádné atomy  ${}^{37}\text{Ar}$  neunikly. Proto byla každá část nádoby pečlivě zkontrolována na případnou emisi částic  $\alpha$  a kvalita každého sváru byla ověřena. Stejná pozornost byla věnována případné radioaktivitě  $\alpha$  tetrachlorethylenu. Nakonec bylo třeba odstranit z  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  všechny rozpuštěný vzduch, aby se v něm minimalizovalo množství atmosférického argonu. Detektor obsahoval  $2,2 \times 10^{30}$  atomů  ${}^{37}\text{Cl}$  a byl ozařován tokem  $7,2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  elektronových neutrin s energií vyšší než 0,81 MeV emitovaných Sluncem a schopných vytvořit atom  ${}^{37}\text{Ar}$ . Účinný průřez pro interakci takovýchto neutrin s atomovým jádrem  ${}^{37}\text{Cl}$  je  $1,1 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$ . Jsou-li uvedené čísla správná, můžeme očekávat, že každý den vznikne v detektoru průměrně 1,5 atomů  ${}^{37}\text{Ar}$ . Uvedme



Obr. 2. První detektor slunečních neutrin, který vybudoval Raymond Davis, Jr. v hloubce 1500 m ve zlatém dole Homestake v USA. Na obrázku stojí Davis na lávce nad nádrží obsahující 380 000 litrů tetrachlorethylenu. (Foto BNL.)

již nyní, že experiment toto očekávání nepotvrdil, protože stále dával zhruba třikrát menší hodnotu. To vedlo k třicetileté záhadě *nedostatku slunečních neutrin*, kterou se podařilo definitivně vyřešit až v roce 2002.

Vraťme se však k popisu chlórového neutrinového experimentu. Jeho úspěch závisel na tom, zda se Raymondu Davisovi podaří spolehlivě extrahovat několik málo desítek atomů  $^{37}\text{Ar}$  (vzniklých při dlouhodobé expozici nádrže slunečními neutryny) z kapaliny obsahující  $10^{30}$  jiných atomů a zda dokáže vytvořené atomy  $^{37}\text{Ar}$  spočítat. Chemický vzdělání čtenáři si jistě s potěšením přečtou podrobný popis celé procedury [9], my se omezíme na princip. Po zpravidla dvouměsíční expozici byl do nádrže s 380 000 litry tetrachlorethylenu přidán stabilní izotop  $^{36}\text{Ar}$  v objemu desetin  $\text{cm}^3$  za normálních podmínek, který sloužil jako nosič radioaktivního  $^{37}\text{Ar}$ . Poté byla nádrž probublávána proudem helia, který s sebou unášel atomy argonu. K dokonalé extrakci argonu byly třeba statisíce litrů helia. Po chemickém čištění argon, který má bod tuhnutí  $-189^\circ\text{C}$ ,

přimrzl v pasti s dřevěným uhlím ochlazeným tekutým dusíkem na  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po ohřátí pasti se argon uvolnil, byl změřen jeho objem a hmotnostní spektrum. Takto byla pokaždé kontrolována účinnost extrakce argonového nosiče, která dosahovala 95 %. Extrahovaná směs  $10^{18}$  stabilních a zhruba deseti (!) radioaktivních atomů argonu byla zavedena do plynového porpocionálního spektrometru. Ten registroval Augerovy elektrony s energií okolo 2,6 keV, které v 90 % případů emitují atomy dceřiného  $^{37}\text{Cl}$  po radioaktivní přeměně  $^{37}\text{Ar}$  ( $T_{1/2} = 35\text{ d}$ ). Ke zjištění celkového počtu vzniklých atomů  $^{37}\text{Ar}$  byl každý vzorek měřen asi 8 měsíců.

Vzhledem k nepatrnému množství atomů  $^{37}\text{Ar}$  vytvořených slunečními neutriny bylo třeba se přesvědčit, kolik dalších atomů tohoto izotopu vzniklo v nádrži jinými způsoby. Šlo především o spršky kosmického záření způsobené miony, které mohly vyvolat parazitní reakci  $^{37}\text{Cl}(p, n)^{37}\text{Ar}$ . Podle závěrečné zprávy o experimentu [10] tak vznikalo  $0,047 \pm 0,013$  atomů za den. Pozadí vyvolané neutrony z okolní skály bylo odhadnuto na  $0,03 \pm 0,03$  atomů za den. Částice  $\alpha$  emitované ze stěn nádrže zvýšily pozadí nejvýše o 0,017 atomů  $^{37}\text{Ar}$  za den. Podle výpočtu zvýšila atmosférická neutrina pozadí o 0,0004 za den.

Zásadní význam měla i minimalizace pozadí v porpocionálním spektrometru. Citujme ze vzpomínek protagonistů [11]: „Jeden z rozhodujících okamžiků raného výzkumu slunečních neutrin nastal v roce 1968, když jsme odpočívali na slunci po plavání v bazénu Kalifornského technologického institutu. Gordon Garmire (dnes hlavní řešitel projektu Chandra X-ray satellite) přistoupil k Raymondovi, představil se a řekl, že slyšel o chlórovém experimentu. Řekl, že by mělo být možné významně snížit pozadí diskriminací podle náběhové hrany impulsu způsobem užívaným u porpocionálních počítačů v experimentech se satelity. Užitečné impulsy způsobené Augerovými elektrony z rozpadu  $^{37}\text{Ar}$  mají strmou náběhovou hranu, čímž se liší od pomaleji narůstajících impulsů pozadí, vyvolaného kosmickým nebo  $\gamma$  zářením. Raymond se po návratu do Brookhavenu zeptal místních elektronických expertů, zda by se tento způsob dal použít v jeho velmi malých porpocionálních počítačích. První odpověď byla negativní: tehdy existující zesilovače nebyly dostatečně rychlé, aby se daly v těchto malých počítačích solárních neutrin použít. Nicméně po asi roční práci tří prvotřídních elektronických inženýrů Národní laboratoře v Brookhavenu, a to V. Radecy, B. Chasheho a L. Rogerse, byla vyvinuta dostatečně rychlá elektronika, která dokázala měřit náběhovou dobu impulsů v Raymondových porpocionálních počítačích. Toto »plavárenské« zdokonalení mělo zásadní význam jak pro úspěch chlórového experimentu, tak i pro následné radiochemické galiové experimenty se slunečními neutriny SAGE, GALLEX a GNO. Měření náběhové doby a energie odpovídající impulsu podstatně snižuje pozadí v radiochemických experimentech. Lze dosáhnout pozadí až jeden impuls za tři měsíce.“

Davisovo měření slunečních neutrin začalo v roce 1967 a pokračovalo téměř nepřetržitě až do roku 1994. Podle závěrečné publikace [10] byla denní produkce slunečních neutrin  $0,48 \pm 0,03$  (stat.)  $\pm 0,03$  (syst.) za den, což odpovídá  $2,56 \pm 0,16$  (stat.)  $\pm 0,16$  (syst.) SNU. (1 SNU =  $10^{-36}$  neutrinových záchytů na jednom terčíkovém jádře za sekundu.) Nejnovější předpověď standardního slunečního modelu, dobře ověřeného srovnáním s helioseismickými měřeními, je  $8,6_{-1,2}^{+1,1}$  SNU [12].

## Neutrinový spektrometr Kamiokande

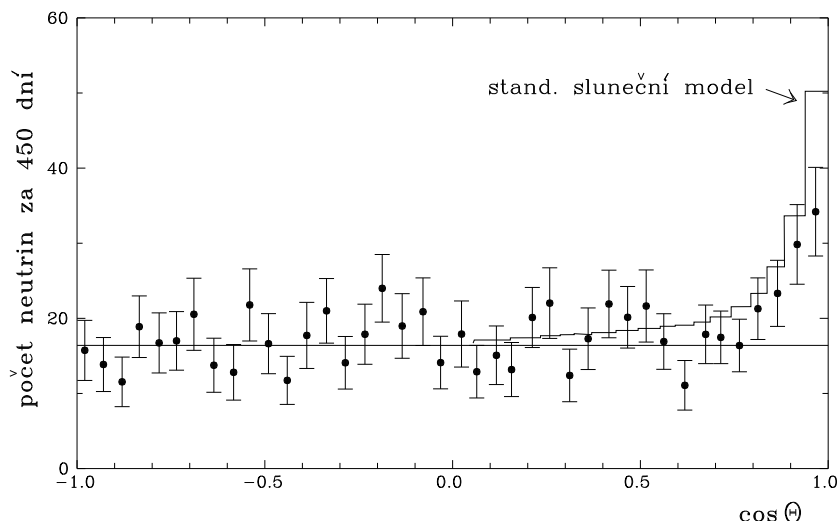
Existují však i jiné způsoby detekce neutrin. Například dojde-li k pružnému rozptylu neutrina na elektronu, odražený elektron obvykle pokračuje ve směru incidentního neutrina. Jestliže se pohybuje v nějakém médiu (např. ve vodě) rychlostí vyšší, než je rychlost světla v tomto médiu, vysílá Čerenkovovo záření, které lze detekovat fotonásobiči. Při vhodně uspořádané geometrii lze navíc určit i směr příletu neutrina a jeho energii (viz např. [13]). Druhý z laureátů, profesor Koshiba, inicioval stavbu velkého spektrometru založeného na tomto principu. Původně ho zaměřil na hledání možného rozpadu protonu. Od roku 1986 — po snížení prahové energie i pozadí ve spektrometru — začal měřit sluneční neutrina reakcí  $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ . Energetický práh pružně rozptýlených elektronů byl nejprve 9,3 MeV, od června 1988 pak 7,5 MeV.

Spektrometr byl umístěn ve skalním masivu Japonských Alp v hloubce 825 m pod povrchem. Jeho základ tvořila válcová nádrž o průměru 14,4 m a výšce 13,1 m, která obsahovala 2140 tun čisté vody. Fotony Čerenkovova záření, vzniklé ve vnitřní části spektrometru, byly registrovány 948 fotonásobiči s mimořádně velkým průměrem 50 cm. Dokonalý čistící systém zajistil, že atenuační délka určující zeslabení čerenkovovských fotonů ve vodě byla vždy větší než 50 m. Vlivem iontových výměníků byla koncentrace uranu a radonu (možných zdrojů parazitních efektů) ve vodě menší než  $10^{-4}$  Bq/litr, což příznivě ovlivnilo pozadí. Vnitřní část spektrometru obklopoval antikoincidenční systém dalších 123 stejně velkých fotonásobičů uspořádaných v geometrii  $4\pi$ . Vodní vrstva tohoto systému o střední tloušťce 1,5 m tvořila navíc stínění proti neutronům a záření  $\gamma$ . Elektronický systém zpracovával údaje jednotlivých fotonásobičů, ze kterých bylo nakonec vypočteno místo interakce neutrina ve spektrometru a určena jeho energie a směr příletu.

Při výzkumu slunečních neutrin spektrometrem Kamiokande dosáhl Masatoshi Koshiba se svými spolupracovníky tří významných výsledků:

- prokázal, že neutrina objevená Davisem skutečně přicházejí ve směru od Slunce (viz obr. 3),
- změřil vysokoenergetickou část spektra těchto neutrin a zjistil, že jeho tvar souhlasí s předpovědí standardního modelu Slunce,
- potvrdil nezávislým způsobem Davisův poznatek, že na Zemi přichází mnohem méně slunečních neutrin, než předpovídají stále zdokonalované výpočty podle téhož standardního slunečního modelu. Pro část toku slunečních neutrin odpovídajících  ${}^8\text{B}$  vychází v jednotkách  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  z experimentu Kamiokande  $2,80 \pm 0,19 \text{ (stat.)} \pm 0,33 \text{ (syst.)}$  [16], kdežto teorie předpovídá  $5,05_{-0,8}^{+1,0}$  [5]. (Poznamenejme, že předpověď toku neutrin  ${}^8\text{B}$  je nejobtížnější; současná neurčitost předpovědi toku neutrin  $pp$  je  $\pm 1\%$  a toku neutrin  ${}^7\text{Be}$  je  $\pm 10\%$  [5].)

Spektrometr Kamiokande, pracující na rozdíl od radiochemických detektorů v reálném čase, získal ještě jedno cenné prvenství [17]: dne 23. února 1987 v 7 hodin 35 minut univerzálního času zaznamenal záblesk 12 neutrin, která vznikla před 170 000 lety při výbuchu *supernovy SN 1987A* ve Velkém Magellanově mračnu. Podle teoretických představ se při tomto gravitačním kolapsu, který vedl ke vzniku neutronové hvězdy,



Obr. 3. Úhlové rozložení elektronových neutrin s energií  $E_\nu \geq 10,1$  MeV, registrovaných Koshirovým spektrometrem Kamiokande [14]. Jak je patrné, neutrina přicházejí ve směru od Slunce ( $\cos \Theta = 1$ ) a je jich v souladu s Davisovým měřením méně, než předovídá standardní sluneční model (histogram). O dvanáct let později byl tento výsledek potvrzen s výrazně lepší statistikou spektrometrem Super-Kamiokande [15].

uvolnila energie asi  $3 \times 10^{46}$  J. Během několika sekund bylo emitováno  $10^{58}$  neutrin se střední energií okolo 15 MeV. Z nich  $10^{16}$  prolétlo spektrometrem a u 12 z nich byla určena energie a doba přiletu. Poprvé se tak podařilo zaregistrovat neutrina vzniklá mimo naši galaxii. Jde o první experimentální důkaz správnosti teorie supernov a další pionýrský čin Masatoshi Koshirovy.

## Rozvoj neutrinové astronomie

Další radiochemické detektory byly založeny na reakci  $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$  s následným rozpadem germania elektronovým záchytem. Ten byl detekován pomocí Augerových elektronů jako při rozpadu  ${}^{37}\text{Ar}$ . Prahová energie reakce je pouhých 233 keV, takže galiové detektory jsou citlivé i na neutrina  $pp$ . Jejich využití navrhl V. A. Kuzmin z Lebeděvova ústavu v Moskvě již v roce 1965 (tj. v době, kdy s chlórovým detektorem — necitlivým k neutrinům  $pp$  — začínal Davis). Tehdy však bylo galium vzácné. Později se jeho produkce zvýšila a experiment se spolehlivěji předpovězenými neutrinami  $pp$  mohl začít. I když je tok těchto neutrin o čtyři řády vyšší než tok neutrin z rozpadu  ${}^8\text{B}$  (viz obr. 1), je ke vzniku jednoho atomu  ${}^{71}\text{Ge}$  za den třeba galiový terč o hmotnosti 30 tun.

Začátkem devadesátých let se rozběhly dva galiové experimenty: SAGE (Soviet American Gallium Experiment) v podzemní laboratoři v Baksanu na Kavkaze a evropský GALLEX (Gallium Experiment) v pohoří Gran Sasso severovýchodně od Říma. Prvního projektu se zúčastnil i Davis. Věrohodnost výsledků těchto radiochemických



detektorů značně stoupla po jejich absolutní kalibraci monoenergetickými neutriny z rozpadu radioaktivního  $^{51}\text{Cr}$ , vyrobeného s obrovskou aktivitou  $(2-6) \times 10^{16}$  Bq. Oba experimenty potvrdily Davisovo pozorování, že slunečních neutrín je méně, než se očekávalo. Naměřená hodnota byla menší než 80 SNU [18, 19], kdežto podle standardního modelu Slunce má být 124–132 SNU. To vše již směřovalo k objevu neutrinových oscilací — samovolné přeměně elektronových neutrín na jiná neutrína v důsledku kvantově mechanické interference.

I spektrometrie mimozemských neutrín se dále rozvíjela. Pokračováním Kamiokande se stalo Super Kamiokande; jde o stejný typ spektrometru, ale podstatně větší (50 000 tun ultračisté vody, 13 000 fotonásobičů). V tomto experimentu byly v roce 1998 poprvé jednoznačně prokázány oscilace atmosférických neutrín [20].

Dalším výrazným krokem vpřed je neutrinový spektrometr Sudbury Neutrino Observatory (SNO). Je umístěn v dole Creighton nedaleko Sudbury v Ontariu (Kanada). Tvoří jej nádoba s 1000 tun těžké vody ( $\text{D}_2\text{O}$ ) a 9600 fotonásobiči, ponořená do 7000 tun lehké vody ( $\text{H}_2\text{O}$ ) v jeskyni výšky desetipatrové budovy. Díky těžké vodě lze měřit nezávisle jak tok *elektronových* neutrín, tak i tok *všech* neutrín (tj. elektronových, mionových a tauonových) dohromady. Rozdíl pak udává tok *neelektronových* neutrín, které předchází detektory buď neregistrovaly vůbec, nebo jen se sníženou účinností. Výsledky měření v SNO poprvé jasně prokázaly [21], že nedostatek slunečních neutrín ve všech předchozích experimentech byl způsoben neutrinovými oscilacemi. Třicetiletá *záhada slunečních neutrín* tak byla v roce 2002 vyřešena. Naměřený *celkový* tok slunečních neutrín je v dokonalém souladu s předpovědí standardního modelu Slunce. Oscilace elektronových *antineutrín* byla prokázána doslova před několika dny v nejnovějším experimentu KamLAND [22], jehož 1000tunový kapalný scintilátor analyzuje antineutrína z několika desítek japonských reaktorů vzdálených průměrně 180 km od spektrometru.

Fyzikální jev považujeme za prokázaný, lze-li jej pozorovat opakovaně, na různých místech a pokud možno různými metodami. Neutrinové oscilace, jejichž možnost zvažoval Bruno Pontecorvo [23] již v roce 1957, tyto požadavky splňují. Mohou však nastat jen v tom případě, nemají-li všechna neutrína nulovou hmotnost. Předpoklad nulové hmotnosti neutrín byl vložen do jinak mimořádně úspěšného standardního modelu elektroslabých interakcí, který vybudovali a v nesčetných případech ověřili částicoví fyzikové. (Důvodem tohoto předpokladu byl zřejmě rozumný požadavek jednoduchosti, neboť není znám žádný fyzikální princip, který by nehmotná neutrína vyžadoval.) Objev neutrinových oscilací, na jehož počátku byly Davisovy a Koshibovy odvážné experimenty, má proto pro částicovou fyziku zásadní význam a povede k hlubšímu poznání mikrosvěta. Úsilí obou laureátů Nobelovy ceny nachází odezvu i ve světě největších rozměrů: hmotná neutrína mohou být součástí temné hmoty vesmíru.

A co bude dále? Víme, že hmotnost neutrín je nenulová, ale její skutečnou hodnotu neznáme. Z nejnovějších měření tvaru spektra  $\beta$  tritia [24] zatím vyplývá jen horní hranice  $m_\nu < 2,2$  eV. O směšovací matici, kterou se řídí neutrinové oscilace, víme ještě méně. Nemůžeme zde zacházet do podrobností, ale i letošní vrcholná konference částicových fyziků a astrofyziků potvrdila [25], že k určení hmotnostních stavů neutrín i jejich směšování bude třeba využít všechny tři druhy neutrinových experimentů:

oscilační, kinematické i dvojného rozpadu  $\beta$ . Náročnost budovaných zařízení je na hranici současných technických možností, stejně jako tomu bylo před časem u letošních laureátů. V mezinárodní spolupráci se např. připravuje kinematický experiment KATRIN, který má být na hmotnost neutrina řádově citlivější než předchozí experimenty. Je potěšující, že zakládajícími členy projektu jsou i čeští vědci [26].

#### L i t e r a t u r a

- [1] <http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/davis-lecture.html>  
<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/koshiba-lecture.html>  
<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/giacconi-lecture.html>
- [2] PAULI, W.: *Dopis účastníkům fyzikální konference v Tübingen, prosinec 1930*. Text dopisu uvedl např. L. BROWN, Phys. Today 1978, svazek 31, č. 9, str. 23.
- [3] REINES, F., COWAN, C. L. Jr.: Phys. Rev. 92 (1953), 830; COWAN, C. L. Jr., RAINES, F. et al.: Science 124 (1956), 103.
- [4] BETHE, H.: Phys. Rev. 55 (1939), 434.
- [5] BAHCALL, J. N., PINSONNEAULT, M. H., BASU, S.: Astrophys. J. 555 (2001), 990.
- [6] PONTECORVO, B.: *Report PD-205*. Nat. Res. Council of Canada, Div. of Atomic Energy, Chalk River 1946.
- [7] DAVIS, R. Jr.: Phys. Rev. 97 (1955), 766; Phys. Rev. Lett. 12 (1964), 303.
- [8] BAHCALL, J. N.: Phys. Rev. Lett. 12 (1964), 300.
- [9] DAVIS, R. Jr. et al: Phys. Rev. Lett. 20 (1968), 1205.
- [10] CLEVELAND, B. et al.: Astrophys. J. 496 (1998), 505.
- [11] BAHCALL, J. N., DAVIS, R. Jr.: <http://lanl.arxiv.org/astro-ph/9911486>
- [12] BAHCALL, J. N., GANZALEZ-GARCIA, M. C., PENA-GARAY, C: J. High Energy Phys. 0204 (2002), 007.
- [13] BOEHM, F., VOGEL, P.: *Physics of Massive Neutrino*. Second edition, Cambridge University Press 1992.
- [14] HIRATA, K. et al.: Phys. Rev. Lett. 63 (1989), 16.
- [15] FUKUDA, S. et al.: <http://lanl.arxiv.org/hep-ex/0103032>
- [16] FUKUDA, Y. et al.: Phys. Rev. Lett. 77 (1996), 1683.
- [17] HIRATA, K. S. et al.: Phys. Rev. D38 (1988), 448.
- [18] HAMPEL, W. et al.: Phys. Lett. B447 (1999), 127.
- [19] ABDURASHITOV, J. N. et al.: Phys. Rev. Lett. 83 (1999), 4686.
- [20] FUKUDA, Y. et al.: Phys. Rev. Lett. 81 (1998), 1562.
- [21] AHMAD, Q. R. et al.: Phys. Rev. Lett. 89 (2002), 011301.
- [22] EGUCHI, K. et al.: Phys. Rev. Lett. 90 (2003), 021802–1.
- [23] PONTECORVO, B. M.: Zhur. Eksp. Teor. Fiz. 33 (1957), 549; JINR Preprint P-95, Dubna 1957; Zhur. Eksp. Teor. Fiz. 34 (1958), 247.
- [24] BONN, J. et al.: Prog. Part. Nucl. Phys. 48 (2002), 133.
- [25] <http://neutrino2002.ph.tum.de/pages/transparencies2.html>
- [26] <http://hp.ujf.cas.cz/~rysavj/katr1.htm>