

OD PAULIJEVA “RJEŠENJA IZ OČAJA” DO NEUTRINSKIH TELESKOPA

Oscilacije neutrina i Nobelova nagrada za fiziku neutrina

Ivica Picek

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb

Polovicu Nobelove nagrade iz fizike za 2002. godinu podijelili su *Raymond Davis Jr.* s Pensilvanijskog sveučilišta u Philadelphiji i *Masatoshi Koshiba* s Tokijskog sveučilišta, «za pionirske doprinose astrofizici, posebice za detekciju kozmičkih neutrina». Davisovo mjerenje manjka sunčevih neutrina i Koshibino ustanovljavanje manjka neutrina proizvedenih u atmosferi Zemlje ukazuju na *neutrinske oscilacije* kao novi fenomen u prirodi. Riječ je o prijelazu neutrina jedne vrste u neutrine druge vrste, pojavi s dalekosežnim posljedicama, koja se proučava u nizu laboratorija diljem svijeta.

Neuhvatljivi neutrino

Neutrino je čestica koju od početka krasi atribut eluzivnosti, neuhvatljivosti. K tome treba pridodati i spomenute oscilacije kojima neutrino dodatno izmiče opažanju. Upravo zbog te neuhvatljivosti tek smo od nedavno svjesni koliko je svijet koji nas okružuje prožet neutrinima. U priloženoj tablici prikazani su izvori tih neutrina, podijeljeni na zemaljske i izvanzemaljske.

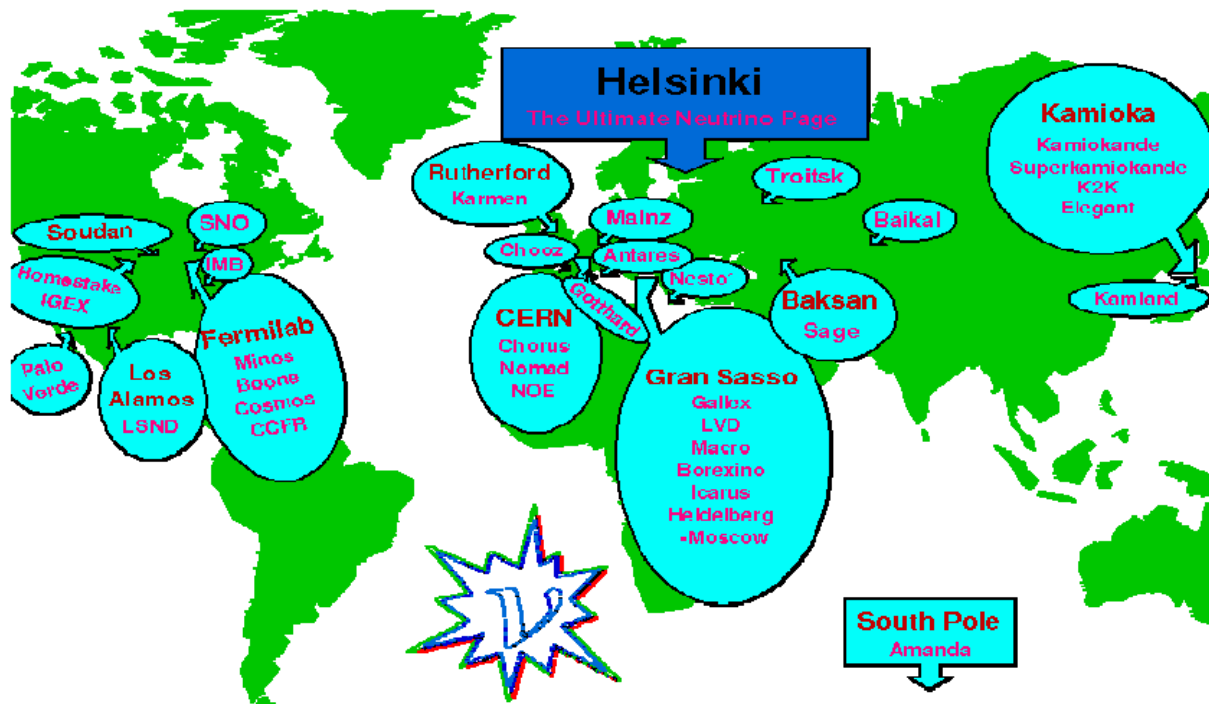
Tablica 1: Koji su sve izvori neutrina u prirodi?

Zemaljski izvori	Izvanzemaljski izvori
Nuklearni reaktori	Sunce
Ubrzivači čestica	Supranove, npr. SN 1987A
Atmosfera Zemlje -kozmičko zračenje	Astrofizički ubrzivači
Zemljina prirodna radioaktivnost	Veliki prasak -danas $330\text{v}/\text{cm}^3$

Sunce nas oplakuje jednako svjetlošću i neutrinima. Svake sekunde ono izrači $2 \cdot 10^{38}$ elektronskih neutrina u širokom rasponu energija, tako da fluks na udaljenosti Zemljine orbite iznosi impresivnih $6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ za niskoenergijske neutrine ($E < 0.42 \text{ MeV}$), dok je on nešto manjeg iznosa ($5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) za neutrine viših energija ($0.8 < E < 15 \text{ MeV}$). Zemlja je povremeno izložena i neutrinima od eksplozija supranovih (više o tome može se naći u [1]). Primjerice, bljesak trajanja 10 s, kakav se dogodio kod supranove tipa II iz 1987, udaljene od nas $1.5 \cdot 10^{21} \text{ m}$, oslobađa golem broj od $6 \cdot 10^{68}$ neutrina i antineutrina, koji su u zemaljskim detektorima zabilježeni s energijama u rasponu 7 - 11 MeV.

Vježba 1: *Uporabom relativističkog izraza za ovisnost energije neutrina o njegovoj brzini, $E=mc^2 \gamma$, iz navedenih podataka možemo procijeniti gornju granicu na masu neutrina ($m < 13 \text{ eV}/c^2$).*

Najintenzivniji zemaljski izvori neutrina su nuklearni reaktori. Tako reaktor snage 3GW emitira $7.7 \cdot 10^{20}$ elektronskih antineutrina energije nekoliko MeV, što na udaljenosti 100 m daje fluks od $6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Na tim izvorima neutrina temelje se brojni pokusi, čiji je raspored po kontinentima prikazan na Sl. 1.



Slika 1: Vodeći neutrinski pokusi i njihov raspored na globusu (preuzeto s «The Ultimate Neutrino page» [2]).

Uvođenje i potvrda postojanja «eluzivne čestice»

U vrijeme uvođenja neutrina kao hipotetičke nove čestice, jedine su poznate elementarne čestice bile proton i elektron. To je vrijeme izučavanja prirodne radioaktivnosti iza koje se skrivala nova (*slaba*) sila koja utjelovljuje san alkemičara – pretvorbu kemijskih elemenata. Očekivalo se da elektron koji biva otpušten pri prijelazu početne atomske jezgre (roditeljice) u konačnu jezgru (kćerku) odnosi dobro definiranu (diskretnu) energiju.

Vježba 2: *Pokazati da bi raspadom atomske jezgre A koja miruje na jezgru B i elektron ($A \rightarrow B + e$) nastajali elektroni diskretne energije*

$$E_e = (m_A^2 - m_B^2 + m_e^2)/(2 m_A)$$

Međutim, Chadwick (1914.) ustanovljava kontinuirani spektar beta zračenja, što bi po Bohru moglo značiti da smo po prvi put naišli na procese u kojima energija nije očuvana. Da bi izbjegao takvo što, Pauli (1930.), u očajničkom pokušaju spašavanja veze spina i statistike te očuvanja energije, u povjerenju iznosi svoju hrabru hipotezu nove čestice učesnicima znanstvenog sastanka u Tübingenu. U čuvenom pismu koje započinje s “Dear radioactive

ladies and gentelman”, iznosi prijedlog da u atomskoj jezgri postoji nova neutralna čestica spina 1/2, “neutron”. Nakon što je Chadwick 1932. otkrio pravi neutron, Fermi (1934.) ugrađuje Paulijevu neuhvatljivu česticu u svoju teoriju slabe sile i naziva je *neutrinom* (malim neutronom).

Na osnovi novoutemeljene slabe sile (više o tome može se naći u [3]) bilo je moguće shvatiti porijeklo energije Sunca, ali i predvidjeti da je Sunce snažni izvor neutrina. Desetljeće nakon što je Gamow izveo formulu kvantno-mehaničkog tuneliranja, koja predviđa mogućnost prevladavanja kulonskog odbijanja protona, Hans Bethe je ustanovio tzv. *pp lanac* fuzije četiriju vodikovih atoma u atom helija (za to mu je dodijeljena Nobelova nagrada za 1976. godinu), kao dominantni izvor sunčeve unergije. Takvom fuzijom 1 kg vodika u nešto manje od kilograma helija oslobađa se $6 \cdot 10^{14}$ J energije. Dva posto te goleme energije odnose neutrimi, dok se ostatak izrači putem svjetlosti.

Vježba 3: Pokazati da se spomenuta oslobođena energija dobije na račun razlike mase četiriju vodikovih atoma i jednog helijevog atoma u «*ppI grani*» fuzijske reakcije $4p \rightarrow He^4 + 2e^+ + 2\nu + (26 \text{ MeV otpuštene energije})$, koja je dominantni izvor energije za zvijezde tipa Sunca.

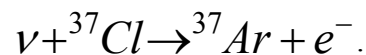
No dok se od svjetlosti možemo štititi, neutrine je praktički nemoguće zaustaviti. Proračun koji su proveli Bethe i Peierls (1934.) pokazao je da su za neutrine potrebne sunčane naočale debljine 1000 svjetlosnih godina!

Vježba 4: Bethe i Peierls procijenili su udarni presjek inverznog beta procesa $\sigma(\text{antineutrino} + \text{proton} \rightarrow \text{neutron} + \text{pozitron}) = 10^{-44} \text{ m}^2$. Navedenu debljinu “sunčevih naočala» dobit ćemo kao rezultat za srednji slobodni put neutrino računat po izrazu $\lambda = 1/(\rho\sigma)$, za vodu čija je gustoća $\rho = 10^{23} \text{ atoma/cm}^3$.

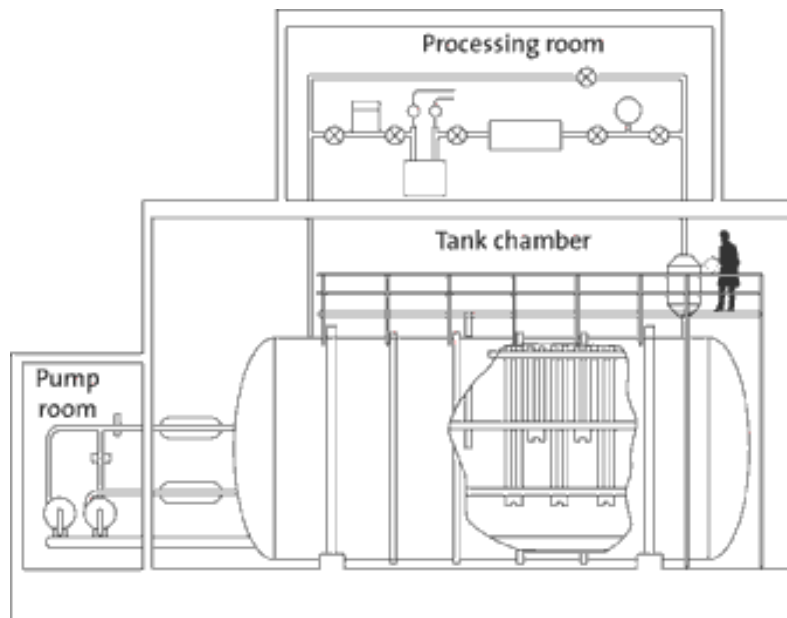
Lov na tako neuhvatljive čestice činio se beznadnim sve do spoznaje da bi se mali udarni presjek neutrina mogao kompenzirati velikim brojem neutrina koji bi ulazili u igru. Nadu je probudilo puštanje u rad fisionih nuklearnih reaktora u čijoj blizini tok neutrina stotruko premašuje tok onih odaslanih sa Sunca. Primjerice, na 100 m udaljenosti od reaktora snage 3 GW protiče svake sekunde 600 milijardi antineutrina kroz cm^2 površine. Reinesu i Cowanu je u mjerenjima između 1954. i 1956. uspjelo opaziti neutrine putem inverznog beta procesa (Nobelova nagrada Fredericku Reinesu za 1995., za otkriće *prvog* neutrina, opisana u MFL 3/183, 1995-96). No u 50-tim nije bilo jasno jesu li neutrimi i antineutrimi različite čestice i kako to ustanoviti. U Reinesovom pokusu riječ je o antineutrinima, čijim se uhvatom na jezgrama vodika stvaraju neutroni i pozitroni, u skladu s Fermijevom teorijom. Drugo pitanje, koje su otvorili akceleratori pokusi, odnosilo se na neutrine stvorene u paru s mionima. Da je riječ o neutrinima *druge generacije* (*mionskim* neutrinima, različitim od *elektronskih*) pokazali su pokusi nagrađeni Nobelovom nagradom za 1988. (podijelili su je Leon Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger). Od tada, u razmacima od po sedam godina, bilježimo Nobelove nagrade za neutrine, Reinesu 1995. i ovogodišnje Davisu i Koshihi. U pravilu, istraživanja koja su dovela do tako nagrađenih otkrića, utiru put novonadolazećim otkrićima. U ovom slučaju, nakon otkrića zasebnih neutrinjskih vrsta (*okusa* ν_e, ν_μ, ν_τ), uslijedilo je otkriće «*podvojene osobnosti*» (*oscilacije okusa*) neutrina, kao jednog od neobičnijih fenomena u prirodi: neutrimi koji su u nekoj reakciji stvoreni kao elektronski neutrimi ν_e , dolaze do detektora u svojoj točki oscilacije u kojoj nisu 100% ν_e . Detektor koji je podešen na hvatanje ν_e bilježit će njihov manjak.

Davisov radiokemijski pokus

Reines-Cowanov pokus nije bio jedini koji se oslanjao na (anti)neutrine iz fizijskih procesa u nuklearnim reaktorima. Luis Alvarez je 1949. planirao provesti pomoću reaktora uhvat neutrina klorom, koji je 1946. predložio Bruno Pontecorvo. Na kraju, takav je pokus stvarno postavio Raymond Davis Jr kod jednog od reaktora u području Savannah Rivera u SAD. Pokus je od samog početka davao negativne rezultate. Danas razumijemo zašto je izostajao očekivani signal konverzije klora u argon: Pokus se temeljio na pretpostavci da su neutrini i antineutrini identične čestice. Nakon spoznaje da to nije nužno ispunjeno, Davis se okreće mjerenju neutrina iz fuzijskih procesa na Suncu, na kakve je osjetljiv Pontecorvov proces:

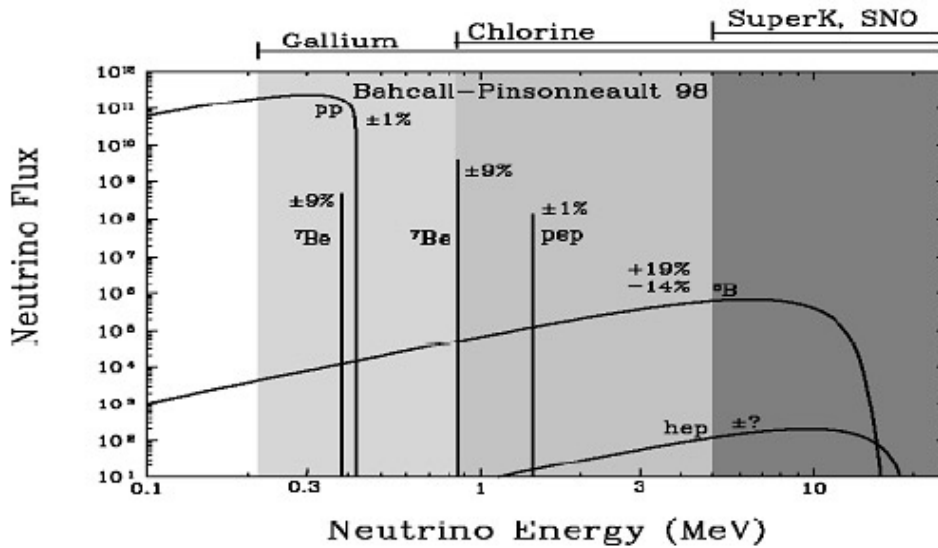


Tom se reakcijom proizvodi radioaktivni izotop argona koji prelazi natrag na klor, s poluzivotom od 35 dana. Trebalo je razviti tehnike separacije radioaktivnih atoma argona i njihova brojanja Geigerovim brojačem. Sam Pontecorvov uhvat ima ekstremno malu vjerojatnost pa se to nadoknađuje s velikim volumenom klora koji hvata neutrine. U Homestake pokusu (Sl. 2), spremnik sa 600 tona tetraklorida smješten je u rudniku zlata na dubini 1560 m.



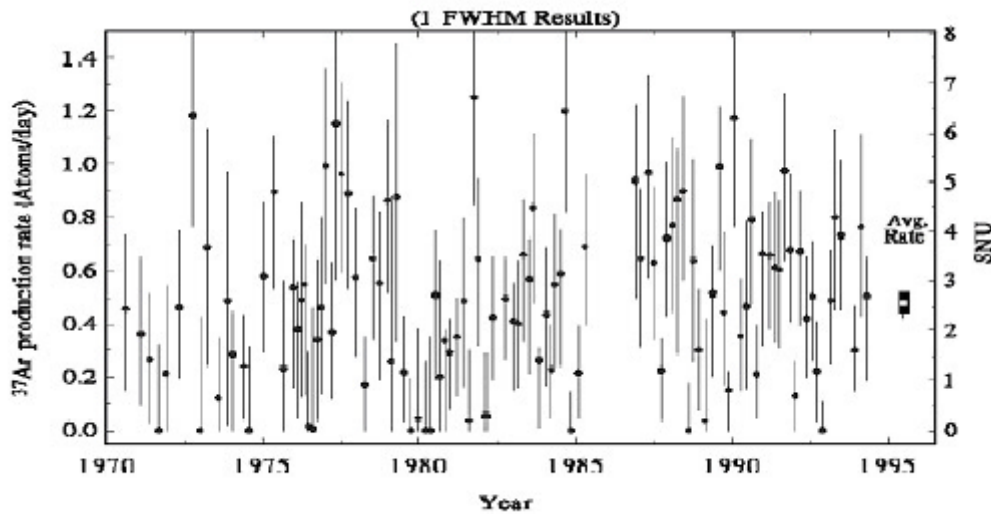
Slika 2: Shematski prikaz Davisovog radiokemijskog pokusa (ref.[4], www.nobel.se)

Budući da reakcija klora u argon ima prag od 0.81 MeV, ona ne može biti ostvarena niskoenergijskim primarnim neutrinima *pp lanca*, u kojima je Sunce najizdašnije. Napredak postignut u izučavanju procesa na Suncu pokazao je da se radiokemijska metoda može osloniti na neutrine emitirane borom-8, koji dosežu 14 MeV (Sl. 3).



Slika 3: Pragovi neutrinskih pokusa (ref. [5], www.nobel.se)

Ipak, signal neutrinskog uhvata je izostajao sve do napretka u metodi razlikovanja raspada argona od pozadinskih događaja. Od uvođenja te metode 1970, mjesečno se na $2 \cdot 10^{30}$ klorovih atoma u spremniku registrirala proizvodnja od dvadesetak atoma argona (Sl. 4). U četvrt stoljeća koliko je trajao pokus, ukupno je ekstrahirano oko 2000 atoma argona.

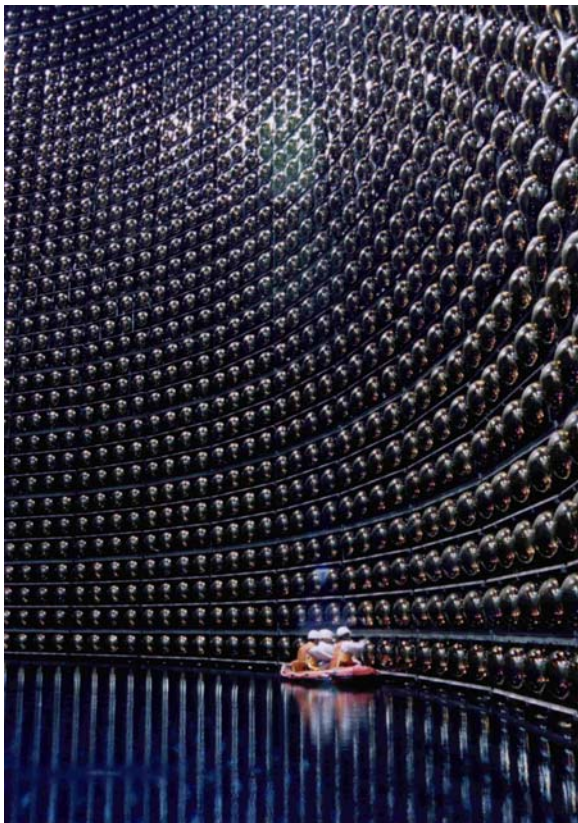


Slika 4: Prikaz rezultata Davisovog pokusa po godinama (ref. [5], www.nobel.se)

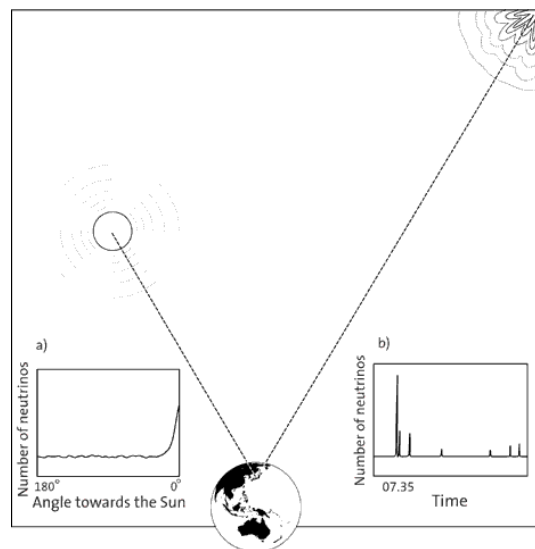
Izraženo solarnim neutrinskim jedinicama (1 SNU odgovara jednom uhvatu u sekundi na 1036 atoma mete), mjereno je $2.56 \pm 0.16(\text{stat.}) \pm 0.16(\text{syst})$ SNU. U usporedbi s teorijskim očekivanjem od 8.6 SNU koje se temelji na poznavanju procesa u Suncu, ustanovljena je tek trećina solarnog fluksa neutrina od borona-8. Ta zagonetka deficita solarnih neutrina bila je poticajem pokretanja novih pokusa. Isti manjak neutrina opažen je u kasnijim sličnim pokusima konverzije galija u germanij, gdje prag od 0.23 MeV dopušta osjetljivost na neutrine nižih energija na Sl. 2. Konačna potvrda Davisovog rezultata za visokoenergijske neutrine borona-8 stigla je s potpuno različitog eksperimenta u Japanu.

Koshibin Kamiokandeov eksperiment

Uz eksperiment Kamiokande vezana su dva medijski eksponirana događaja: opažanje supranove SN87A od 23. veljače 1987. i havarije detektora od 12. studenog 2001. kojom je na neko vrijeme nesretno zaustavljen taj sjajni pokus. Izvorno, Kamiokande je zamišljen kao detektor Čerenkovljeva svjetla putem kojega bi se mogao opaziti raspad protona. Naime, nabijene čestice koje se pojavljuju kao produkti raspada protona (primjerice pozitron iz procesa $p \rightarrow \pi^0 + e^+$) nose golemu energiju i dosežu u vodi brzinu koja premašuje vrijednost brzine svjetlosti u vodi. Da bi detektirao karakterističnu (Čerenkovljevu) svjetlost koju izrače takve čestice, Masatoshi Koshiba je u rudnik na dubinu 1 km smjestio spremnik s 2140 tona vode okružen fotomultiplikatorima za detektiranje pojedinačnih fotona. Da bi snizio prag osjetljivosti na procese nižih energija od one iz raspada protona, Koshiba je morao konstruirati osjetljivije fotomultiplikatore s cijevima velikog promjera. S 1100 cijevi promjera 50 cm u prvoj fazi je dosegnut prag od 30 MeV, što je dovoljno za događaje izazvane naletom kozmičkih neutrina, ali nedovoljno za opažanje sunčevih neutrina. Uz značajna poboljšanja krajem 1986. je dosegnut Kamiokande II s pragom 8 MeV (Sl. 5).



← **Slika 5:** SuperKamiokande fotomultiplikatori (<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/photo/high.html>)



Slika 6: Sunce viđeno neutrinima(ref. [4], www.nobel.se)

Time je uređaj bio spreman za lov na Sunčeve neutrine koji dolaze iz raspada bora-8, no za razliku od Davisovog, ovaj se pokus odvijao u realnom vremenu i mogao je odrediti smjer dolazećih neutrina. Takva su opažanja stvarno provedena (Sl. 6 pokazuje Sunce viđeno u «neutrinском svjetlu») i potvrdila manjak solarnih neutrina, sukladno Davisovim rezultatima.

Oscilacije neutrina i novi neutrinski pokusi

Već spomenute oscilacije neutrina najjednostavnije su objašnjenje mjenog manjka sunčevih neutrina. Velika potpora takvom objašnjenju došla je ovogodišnjim objavljivanjem rezultata sa Sudbury Neutrino Observatory (SNO) u Kanadi. Taj pokus ima u odnosu na prethodne «dodatnu dimenziju», mogućnost da uz procese prenošene tzv. nabijenim strujama ustanovljava i procese koje prenose tzv. neutralne slabe struje. Kao rezultat, SNO je ustanovio da je nestajanje jedne vrste neutrina praćeno pojavljivanjem neutrina druge vrste. Time je ustanovljena oscilacija neutrina kao nova pojava koja usput ukazuje da neutriini posjeduju masu, a time vodi na dalekosežne posljedice u fizici čestica i kozmologiji.

Ipak, ovako ustanovljena oscilacija neutrina ograničena je na neutrine koji su došli sa Sunca. No, ukoliko su oscilacije neutrina univerzalna pojava, moramo to mjeriti i za neutrine iz drugih izvora. To je postalo moguće nakon što je Koshiba sa suradnicima unaprijedio eksperiment do razine Super-Kamiokande, s 50 000 tona vode i 11 146 fotomultiplikatora. Uz iscrpniju informaciju o sunčevim neutrinima, taj je pokus 1998. po prvi puta dao naznake za oscilacije atmosferskih neutrina (nestajanje mionskih neutrina koji do detektora dolaze odozdo, kroz Zemlju). Bio je to velik poticaj za pokretanje tzv. «Long-baseline» pokusa, s dugim snopovima mionskih neutrina, koji od akceleratora koji ih proizvodi do detektora putuju kroz zemljinu unutrašnjost. Prvi takav pokus, KEK-Kamiokande projekt sa snopom od 730 km, je zaustavljen već spomenutom havarijom. Čeka se na njegovu rekonstrukciju, a istodobno su u pripremi europski i američki pokusi sa snopovima iste duljine, OPERA (CERN-Gran Sasso) te MINOS (Fermilab-Soudan). Ti bi pokusi prvenstveno dali više informacija o oscilacijama mionskih neutrina, koje su indicirane na Super-Kamiokande za atmosferske neutrine.

U međuvremenu (prije same dodjele ovogodišnje nagrade) došla je i potvrda neutrinskih oscilacija mjerenih za elektronske antineutrine iz nuklearnih reaktora. Riječ je o rezultatima s KamLAND (Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) japanskog podzemnog laboratorija, koji je neka vrsta teleskopa koji umjesto neutrina sa zvijezda hvata neutrine s «konstelacije» od 69 reaktora u Japanu i Koreji. Kroz 145 dana mjerenja zabilježeno je 54 događaja koje su proizveli reaktorski neutriini, u usporedbi s 86 očekivanih na temelju proračuna, koji se za reaktore mogu učiniti preciznije nego za unutrašnjost Sunca.

U ovogodišnjoj Nobelovoj nagradi istaknuto je da su nagrađeni pokusi odigrali ulogu prvih neutrinskih teleskopa, opažanjem neutrina sa Sunca i sa supranove SN87A. Sljedbenici tih pionirskih poduhvata su «pravi» neutrinski teleskopi kod kojih se fotomultiplikatori smještaju u dubine antarktičkog leda (AMANDA) ili u morske dubine (ANTARES, kod Toulona). Jedino u «neutrinskom svjetlu», koje ne mijenja smjer na putu do nas, možemo utvrditi lokaciju izvora primarnog kozmičkog zračenja (primjerice aktivnih galaktičkih jezgri, AGN). Već smo u posjedu prvih nebeskih karti izvora kozmičkih neutrina. Istodobno, sami neutriini, u svjetlu izmjerenih oscilacija koje sugeriraju njihovu masu, dobivaju bitno novu kozmičku dimenziju.

Dodatak: Jedinice i konstante u fizici čestica i astrofizici

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$m_e = 0.51 \text{ MeV}/c^2, \quad m_\mu = 105.66 \text{ MeV}/c^2, \quad m_\tau = 1777 \text{ MeV}/c^2,$$

$$m_p = 938.272 \text{ MeV}/c^2, \quad m_n = 939.565 \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{Astronomska jedinica, } 1 \text{ AU} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

$$\text{Svjetlosna godina, } 1 \text{ lj} = 9.5 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

$$\text{Parsek, } 1 \text{ pc} = 3.09 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ lj}$$

Literatura:

- [1] I. Picek, Elementarne čestice – iskrenje u svemiru tamne tvari, ŠK, Zagreb, 1997
- [2] The Ultimate Neutrino page, <http://cupp oulu.fi/neutrino/>
- [3] I. Picek, Fizika elementarnih čestica, HINUS, Zagreb, 1997
- [4] Nobel web-site, <http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/public.html>
- [5] Nobel web-site, <http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/phyadv02.pdf>
- [6] SuperKamiokande web-site, http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/photo/sk_04.jpg