

# NEVIDLJIVA ČESTICA, MISTERIOZNI NEUTRINO

*Ivo Derado, Dražan Kozak*

## 1

### Uvod

#### Introduction

Neutrino je elementarna čestica bez električnog naboja i gotovo isključivo vezana uz elementarnu slabu silu koja je odgovorna za radioaktivni raspad kemijskih elemenata. Neutrinovo međudjelovanje s materijom je tako slabo da neutrino može kod stanovite energije proći bez apsorpcije kroz olovni zid debljine oko **stotinu svjetlosnih godina** (sjetite se: svjetlo u osam minuta prijeđe udaljenost od Sunca do Zemlje, 150 milijuna km!). Stručno se kaže da neutrino ima vrlo mali **udarni presjek** s materijom. Neutrino je uz foton najbrojnija čestica u svemiru. U jednoj sekundi kroz naše tijelo prođe milijarde neutrina, a da mi to niti ne osjetimo. Čak naše tijelo koje ima oko dvadesetak miligrama radioaktivnog kalija emitira nekoliko stotina milijuna neutrina po danu! Za fundamentalno istraživanje koje pokušava odgovoriti na staro Faustovo pitanje: *Was die Welt im Innersten zusammen hält* (od čega se sastoji naš svemir i mi u njemu) neutrino je bio važan objekt studija kako u prošlosti, tako i danas. Najnoviji pokusi vezano za neutrino ukazuju na važnost ove čestice prilikom budućih istraživanja svemira. Paradoksalno je da je upravo neutrinovo svojstvo zanemarivog udarnog presjeka s materijom omogućilo početak **neutrino astronomije** i da je neutrino jedini mogući 'izvjestitelj' samog hipotetičkog početka našeg svemira, 'Big Banga' (Velikog praska).

## 2

### Povijest istraživanja neutrina

#### History of neutrino research

Povijest istraživanja neutrina je klasičan primjer metode i razvoja moderne fizike visokih energija. Koncem 19. stoljeća indirektni početak povijesti neutrina bilo je slučajno otkriće 'čudnih' zraka francuskog fizičara Henri Becquerella i kasnijeg otkrića elementa radija od strane Marie i Pierre Curiea. Daljnjim istraživanjima je pronađeno da radioaktivni elementi emitiraju tri različite vrste čestica nazvane: alfa, beta i gama. Za otkriće neutrina važan je takozvani beta (elektron) raspad radioaktivnih elemenata. Kod alfa raspada u konačnom stanju postoje dvije čestice i radi očuvanja energije alfa čestica mora imati određenu energiju. To nije slučaj kod beta raspada gdje također u konačnom stanju opserviramo samo dvije vidljive čestice, ali za razliku od alfa raspada kod beta raspada elektron ima čitav

spektar različitih energija, što je u sukobu sa zakonom o očuvanju energije. Očuvanje energije je sakrosantni zakon u makrofizici. Je li moguće da u mikrofizici nema očuvanja energije? Wolfgang Pauli (slika 1), poznati austrijski fizičar u Zürichu nije se mogao pomiriti s idejom o neočuvanju energije.



Slika 1. Dr Wolfgang Pauli, dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1945.

Zato je *ad hoc* predložio, da kod beta raspada u konačnom stanju postoji još jedna čestica. Ona je bez naboja i tako slabog međudjelovanja s materijom da ju mi ne opserviramo, ali ona odnese energiju koja je navodno izgubljena. Ta fiktivna čestica garantira očuvanje energije i momenta kod beta raspada. Pauli ju je nazvao **neutron** i naslućivao da je ona bez mase slično kao gama čestica (foton, 'atom svjetlosti'). Sam nije bio zadovoljan sa svojim prijedlogom, jer je izjavio, da je nefizikalno predložiti nešto što se ne može mjeriti. Godine 1930. Pauli šalje svoj prijedlog u obliku pisma sudionicima Fizikalne konferencije u Tübingenu (Njemačka) na kojoj se je diskutiralo o problemu beta raspada. Tako je malo cijenio važnost svog prijedloga, koji je kasnije postao osnova fundamentalnog istraživanja slabih sila, da sam nije došao na konferenciju, jer nije htio propustiti svečani ples na svom Institutu. U pismu je naveo da se njegova hipoteza ne može smatrati ozbiljnom, osim ako članovi konferencije predlože metodu kako eksperimentalno otkriti tu misterioznu česticu. Kako bi se Paulijeva čestica razlikovala od neutrona, kojeg je Sir James Chadwick otkrio tek 1932. godine, poznati talijanski fizičar Fermi nazvao je tu česticu **neutrino**, što na talijanskom znači mali neutron. Fermi je na jednoj bezazlenoj pretpostavci konstruirao novu fundamentalnu teoriju fizike **slabih sila** koja je protumačila beta raspad, gdje se neutron raspada u proton, elektron i neutrino ( $n \rightarrow p + e + \nu$ ).

Godina 1930. je donijela teorijsku egzistenciju neutrina, a tek 1956. eksperimentalno potvrdu njezine egzistencije. Do sada su dodijeljene tri Nobelove nagrade direktno vezane uz eksperimentalna otkrića s neutrinom.

### 3

#### Gdje nastaju neutrini ( $\nu$ )?

Where do neutrinos ( $\nu$ ) begin?

Prirodni izvori neutrina su:

- Primordijalni neutrini stvoreni još u kozmološkom Velikom prasku. Ti neutrini još uvijek ispunjavaju svemir u formi kozmološkog backgrounda (CB), pozadinskog zračenja.
- Neutrini stvoreni u nuklearnoj fuziji na Suncu i u eksplozijama Supernova u raznim galaksijama.
- Neutrini stvoreni u našoj atmosferi kod sudara tzv. Kozmičkih zraka s molekulama u atmosferi.
- Neutrini emitirani kod raspada jedne radioaktivne atomske jezgre.

Umjetni izvori su:

- Kod akceleratora gdje intenzivni visokoenergetski snopovi protona u sudaru s atomskim jezgrama u materiji produciraju veliki broj slobodnih čestica od kojih se mnoge raspadaju u razne vrste neutrina. Time se stvaraju vrlo intenzivni snopovi neutrina. Ti neutrini, zajedno s ostalih devet elementarnih čestica (kvarkovi i mioni) stvaraju strukturu materije u tzv. Standardnom modelu elementarnih čestica. To su u neku ruku Demokritovi atomi iz četvrtog stoljeća prije Krista.
- Neutrini producirani kod nuklearne fizije (uranov raspad u kripton, barij i nekoliko neutrona) u komercijalnim atomskim reaktorima.

Neutrino je postao novi prozor u modernoj fizici: fizike čestica, astrofizike i kozmologije. Studija neutrina predstavlja, kako ćemo vidjeti, pravu multidisciplinarnu znanost, gdje se fundamentalna fizika, tehnologija i filozofija susreću u znanstvenom istraživanju i razmišljanju.

### 4

#### Neki teorijski problemi u neutrino fizici

Some theoretical problems in neutrino physics

Standardni model mikrosvijeta je osnovan na kvantnoj teoriji. Ona je reducirala zakone prirode na četiri fundamentalne sile: gravitacija, elektromagnetizam, slabe sile i jake sile. Neutrino djeluje samo gravitacijskim i slabim silama. Eksperimentalno je pokazano da postoje tri različita neutrina: elektronneutrino, mionneutrino i tauneutrino ( $\nu_e, \nu_\mu$  i  $\nu_\tau$ ). Imena su dana prema interakcijama u kojima su neutrini povezana s ostalim leptonima: elektronom, mionom i tauonom. Leptoni su elementarne čestice koje nemaju jako međudjelovanje s materijom, kao što imaju kvarkovi koji

su sastojni dijelovi npr. protona i neutrona (tzv. bariona). U okviru tih sila je moguće sve proizvesti što nije zabranjeno nekom simetrijom, koja je izražena u očuvanju nekih fizikalnih veličina, kao npr. energije. Iz principa simetrije u modelu velikog praska je trebala nastati jednaka količina materije kao i antimaterije. Po tom principu slijedi da bi došlo do nestanka materije u tzv. anihilaciji materije i antimaterije, i bilo bi nerazumljivo zašto postoji današnji svijet materije i mi s njom. Neutrino bi mogao pomoći u rješenju te asimetrije između materije i antimaterije u samom početku našeg svemira. Danas još uvijek nije jasno pokazano jesu li neutrino i antineutrino različiti, kao što su proton i antiproton ili su identični kao što je foton i antifoton.

Kvantna fizika preko tzv. superpozicije predviđa da se razni neutrini mogu spontano pretvarati iz jedne vrste u drugu. Tako bi se mogao elektronneutrino poslije stvaranja u jednoj točki prostora u drugoj točki spontano pretvoriti u mionneutrino i u daljnjem gibanju ponovno u elektronneutrino. Taj proces je posljedica kvantne vjerojatnosti: npr. od početnog  $\nu_e$  stanja nakon stanovitog propagiranja kroz prostor dobijemo novo stanje, mješavinu  $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ , čime dolazi do oscilacija između raznih neutrina. Eksperimentalno je oscilacija utvrđena, a rigorozno matematičko razjašnjenje tog za nas vrlo neintuitivnog fenomena je izvan opsega ovog članka. U slučaju oscilacija po kvantnoj teoriji neutrini bi morali imati masu i ne bi se mogli gibati brzinom svjetlosti u vakuumu. Zato je dosadašnja hipoteza, da je neutrino bez mase kao foton, odbačena. Apsolutna masa svakog neutrina je nepoznata, samo su razlike masa poznate, indikacije su da je masa vrlo mala. Daljnja istraživanja oscilacija su također važna za bolje razumijevanje kvantne fizike.

Danas znamo da se naš svemir sastoji od oko 5 % vidljive materije, a ostalo je takozvana tamna materija i tamna energija – tamne, jer ne daju svjetlosni signal kao npr. barioni. Tek se naslućuje da se barem jedan dio tamne materije sastoji od neutrina, što pokazuje koliko malo poznajemo naš svemir. Iz navedenog se vidi koliko je fundamentalnih problema vezano uz neutrino i kolika je važnost eksperimentalnog istraživanja neutrina za fundamentalnu fiziku.

### 5

#### Kako se mogu neutrini mjeriti? Neutrino detektori

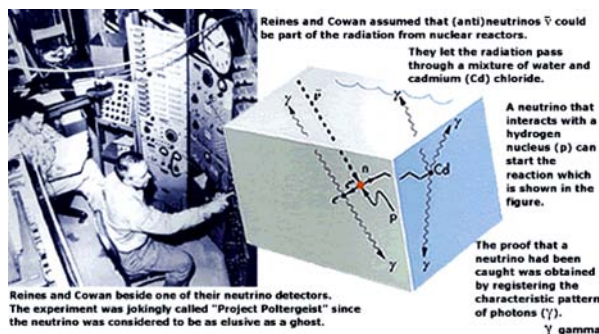
How can neutrinos be measured? Neutrino detectors

Problem malog udarnog presjeka neutrina zahtjeva danas detektore s velikom masom ili/i veliki intenzitet neutrina. To je bio razlog što je neutrino bio tako kasno eksperimentalno otkriven. Pomoću suvremene skupe tehnologije, danas je moguće eksperimentirati s neutrinima.

#### *Eksperimentalna potvrda egzistencije neutrina*

Fizičari F. Reines i C. L. Cowan su 1956. godine ispitivali reakciju:  $\nu_e + p \rightarrow n + e^-$ , pretpostavljajući da

(anti)neutrini mogu biti dio radijacije nuklearnih reaktora. Tako su svoj pokus proveli u Savanaah River reaktoru (SAD), koji prilikom fizije emitira  $10^{13}$  (deset tisuća milijardi) elektronantineutrina ( $\nu_e$ ) iz raspada neutrona ( $n \rightarrow p + e + \nu_e$ ) u jednoj sekundi po  $\text{cm}^2$ . U sudaru neutrina s protonom, neutrino proizvodi neutron i elektron koji u mješavini od 200 litara vode i 40 kg kadmij klorida daje signal fotona registriran s 110 fotomultiplajera (detektor jednog jedinog fotona, gama zrake). Topologija pokazana na slici 2. jednoznačno identificira neutrino.



Slika 2. Reines i Cowan pored jednog od svojih neutrino detektora

Godine 1956. je, dakle, rođeno bogato i kontinuirano uzbudljivo eksperimentalno polje fizike neutrina. Važnost Reinesova eksperimenta je priznata tako što mu je dodijeljena Nobelova nagrada za fiziku 1995.

### Problem solarnih neutrina

Znanstvenike je oduvijek intrigiralo odakle silna Sunčeva energija. Helmholtz je prvi pred oko 140 godina pokušao znanstveno protumačiti izvor sunčane energije pomoću gravitacije i došao je do spoznaje da bi time energija Sunca trajala najviše oko 30 milijuna godina. Za fizičare XIX. stoljeća bilo je to dovoljno, ali ne i za biologe, koji su pokušavali vremenski definirati nastanak života na Zemlji. Danas je poznato da Sunce zrači energiju već 5 milijardi godina. Tek šezdesetih godina prošlog stoljeća je Hans Bethe uspio zahvaljujući sugestiji fizičara von Weizsäckera protumačiti proces energije na Suncu. Neutrino je bitan za taj proces dobivanja energije koja kompenzira gravitacijsku energiju i time sprječava gravitacijsko kolabiranje Sunca. U središtu Sunca, preko kompliciranih lančanih reakcija u tzv. Solarnom Standardnom Modelu (SSM), dolazi do fuzije protona u helij, berilij i boron jezgri. Tim nuklearnim vezanjima bariona pretvara se masa ( $m$ ) u energiju prema poznatoj formuli  $E=mc^2$ , gdje je  $c$  brzina svjetlosti. Svake sekunde Sunce kroz taj komplicirani proces fuzije 'izgori' u sekundi gotovo 600 milijuna tona vodika u teže jezgre. Pri tome nastaje sunčevo svjetlo (fotoni) i sunčevi neutrina. Neutrino neposredno napusti gusti centar Sunca dok foton treba 100 tisuća godina dok dođe na površinu koju mi opažamo. Kroz stalna raspršenja foton izgubi svaku informaciju o središtu Sunca za razliku od neutrina. Na površini

Zemlje dobivamo danju i noću preko 60 milijardi sunčanih neutrina po  $\text{cm}^2$  u sekundi prema Betheovoj osnovnoj reakciji:  $p+p \rightarrow d+e+\nu_e$ , gdje je masa deuterija ( $d$ ) manja od mase dvaju protona što odgovara energiji vezanja protona i neutrona u deuterij.

Zato proučavanje sunčanih neutrina nije samo test SSM modela, nego dopušta direktno promatranje nutrine Sunca kod temperature od oko petnaest milijuna stupnjeva Celzija. Dnevno svjetlo dolazi s površine Sunca, gdje je temperatura svega 5000 °C.

Pontecorvo, učenik Fermija, je predložio da neutrino može kod apsorpcije u atomskoj jezgri pretvoriti element s atomskim brojem  $x$  u element atomskog broja  $x+1$ . Na primjer, izotop klor ( $^{37}\text{Cl}$ ) preko reakcije:  $\nu_e+n \rightarrow p+e$  u izotop argon ( $^{37}\text{Ar}$ ). U tom slučaju broj atoma argona mjeri količinu sunčanih neutrina. Otkriću sunčanog neutrina pridonio je i mladi radiokemičar Ray Davis u novoosnovanoj grupi za kemiju u Brookhaven National laboratoriju. Kako nije dobio neki određeni radni zadatak, u biblioteci je pokušao naći neki interesantni problem za sebe. Tako je našao prijedlog talijanskog fizičara Pontecorva i odmah je razvio radiokemijski pilot projekt kako pronaći mali broj elemenata argona u tekućini klora. Nakon tog pilot projekta sagradio je ogromni rezervoar od 380 tisuća litara, ispunio ga tekućinom za kemijsko čišćenje perkloroetilenom, koji je bogat s klorom i jakom apsorpcijom neutrina (slika 3).

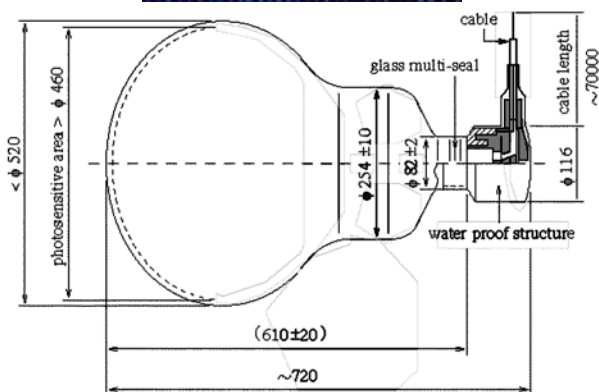
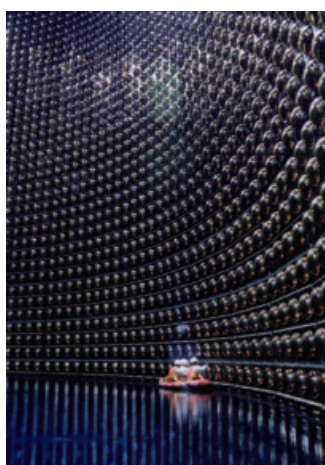


Slika 3. Radiokemijski pilot projekt Raya Davisa

Detektor je postavio u rudnik zlata 1500 metara pod zemljom da bi smanjio efekt kozmičke pozadine (background). Davis je razvio rafiniranu tehniku kako kvantitativno izvući nekoliko atoma radioaktivnog argona proizvedenog apsorpcijom neutrina u kloru. Posao je bio vrlo težak, lakše bi bilo naći iglu u plastu sijena. Argon u tekućini klora je bio prva evidencija sunčanih neutrina. Svakih mjesec dana je Davis 'ulovio' 17 radioaktivnih argon atoma. Nakon šest mjeseci izmjereni broj atoma nije se podudarao s očekivanim

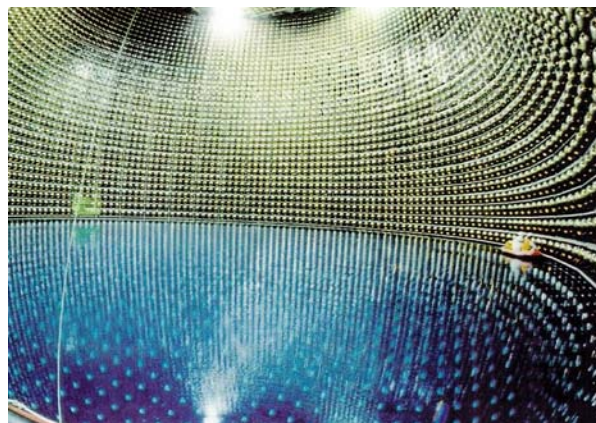
brojem neutrina prema Solarnom Standardnom Modelu. Ili je bila kriva SSM teorija ili je Davisov eksperiment bio pogrešan. Kako su mnogi daljnji eksperimenti, izvođeni na istom principu, pokazali sličan rezultat, došlo se na ideju da su se elektronneutrini na putu do Zemlje pretvorili u druge vrste neutrina koji ne mogu biti apsorbirani u tim kemijskim eksperimentima, koji reagiraju samo na  $\nu_e$ , a ne na  $\nu_\mu$  ili  $\nu_\tau$ .

To otkriće vodilo je daljnjim pokusima. Tako je jedna japanska grupa pod vodstvom fizičara Masatoshi Koshiba blizu grada Kamioka u rudniku cinka, oko 600 metara ispod zemlje, sagradila rezervoar od 50 tisuća tona ultra čiste vode sa 11146 staklenih fotomultiplajer cijevi promjera 50 cm (slika 4).



Slika 4. Kamiokande detektor neutrina sa shematskim prikazom ugrađenih fotomultiplajer cijevi [1]

Princip detekcije u ovom eksperimentu je različit od kemijskih detektora. Detektor s vodom može detektirati sve vrste neutrina. Neutrino u sudaru s molekulama vode producira razne elementarne čestice s električnim nabojem koji u vodi imaju brzinu veću od brzine svjetlosti u vodi i produciraju tzv. Čerenkovo svjetlo čime otkriju svoj identitet (kod posjeta reaktoru može se u skladištu uranovih šipki u vodi vidjeti plavo Čerenkovo svjetlo kojeg produciraju elektroni). Svjetlo je registrirano s panoramski raspodijeljenim fotomultiplajerima (slika 5) i izračunat je tip reakcije pomoću kompjutera, čime se moglo identificirati neutrino.



Slika 5. Super-Kamiokande detektor tijekom punjenja s panoramski raspodijeljenim fotomultiplajerima

S tim nešto poboljšanim detektorom je jedna japansko-američka grupa objavila 1998. godine da neutrino mijenja svoj identitet prolazom kroz svemir. Time je otkrivena oscilacija neutrina i pokazano da neutrino ima masu. To je također potvrdila i jedna kanadska grupa. Time je riješen problem manjka solarnih neutrina i potvrđen Solarni Standardni Model.

Davis i Koshiba su za svoja istraživanja sunčanih neutrina bili nagrađeni Nobelovom nagradom 2002.

Dana 23. veljače 1987. dogodilo se duboko u svemiru nešto što je prostim okom zadnji vidio Johannes Keppler: zvjezdana, tzv. supernova eksplozija. Pred 180 tisuća godina u susjednoj galaksiji jedna je zvijezda iscrpila fuzioni materijal i time je nestala energija koja je davala otpor vlastitoj gravitaciji. U jednom trenu je nastala urušenjem gravitacijska eksplozija i emitirala energiju preko neutrina i svjetla veću od 1000 milijardi višu negoli naše Sunce izrači u godinu dana. Signal od dvanaest neutrina registrirao je Kamiokande detektor. Istodobno su i druga dva slična detektora u SAD-u registrirala neutrine. Tek nakon **dva sata** je stigao i svjetlosni signal (neutrino je kroz svemirsku 'prašinu' brži od svjetla). Time se potvrdilo eksperimentalno predviđanja teorijskih modela o razvoju zvijezda i gravitacijskom kolapsu. Tako se može reći da je 1987. započela neutrinska astronomija izvan naše galaksije!

## 6 Druga generacija neutrino eksperimenata

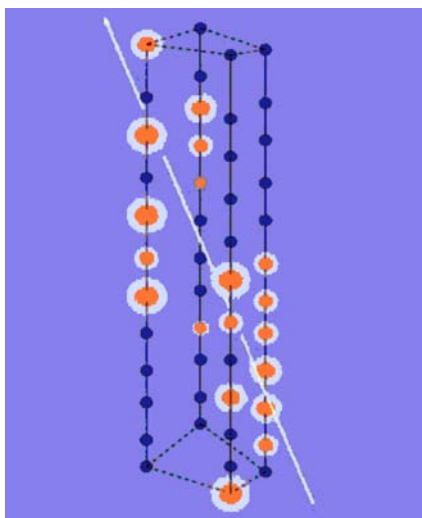
### The second generation of neutrino experiments

#### Neutrino astronomija

Klasična astronomija uglavnom dobiva informacije pomoću elektromagnetskih teleskopa (vidljivo svjetlo, gamazrake i radiovalovi). Nedostatak je tih zraka da mogu biti lako apsorbirane od materije. Upravo kod tog problema nadopunjuje neutrino klasičnu astronomiju. Neutrini su dakle idealni kozmički vjesnici iz područja svemira koja su nepristupačna za elektromagnetsku detekciju.

Kako bismo mogli proširiti s povećanom statistikom dosadašnju neutrino astronomiju i nadalje proširiti studiju svemira izvan naše galaksije potrebne su dimenzije rezervoara reda veličine kubičnih kilometara. To je puno više od ranije navedenih rezervoara. Zato su potrebne prirodne količine materije koje se mogu ostvariti samo u dubokim morima ili jezerima. Mjerenje neutrina se vrši indirektno preko miona ('teški elektroni'). Mion se stvara kod slučajnog sudara neutrina s atomskim jezgrama vode ili leda i pravac miona dovoljno točno pokazuje pravac i energiju neutrina. Kako mion ima električni naboj i brzinu u vodi ili ledu veću od brzine svjetlosti producira plavkasto Čerenkovo svjetlo. Ti slabi svjetlosni bljeskovi budu pojačani i registrirani preko fotomultiplajera, čime se može izračunati pravac i energija neutrina.

Dosad postoje tri neutrino eksperimenta u dubokoj vodi do 5000 metara (dva u Mediteranu i jedan u Baikal jezeru u Sibiru) i jedan u ledu na Antarktiku. Oni su svi dovoljno blizu obali da bi se moglo lako preko elektro-optičkih kabela prenijeti signale u laboratorij na kopnu. Kako su to skupi i komplicirani detektori na njima rade nekoliko tisuća fizičara, informatičara i tehničara iz mnogih zemalja Europe, Japana, Rusije i Amerike. Do sada se s tim detektorima uspješno registrirali neutrine, ali još nema nekih spektakularnih astronomskih rezultata. Detektori se stalno dotjeruju i proširuju.

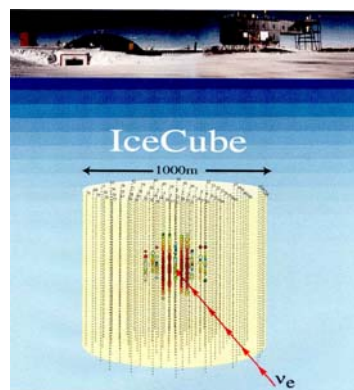


Slika 6. Fotomultiplajeri nanizani u točno definiranom redu trodimenzijskog koordinatnog sustava

Cilj tih eksperimenata je studij nastanka i nestanka galaksija, što se neprestano događa u svemiru. Isto tako je cilj studija Supernove i njihov konac u neutronske i sličnim zvijezdama i crnim rupama, kao i studij crne materije i produkcija egzotičnih čestica, do sada neopaženih kod akceleratora npr. monopola (čestice samo s jednim magnetnim polom ili tzv. supersimetrične čestice koje predviđaju i neke teorije struna. One bi morali potvrditi ispravnost prilično

spekulativnih modela, npr. razne verzije Standardnog Kozmološkog Modela, Big Banga (Velikog praska). U principu svi ti detektori imaju kao središnji element seriju visećih fotomultiplajera nanizanih na fiber vrpčama u točno definiranom redu trodimenzijskog koordinatnog sustava (slika 6).

Najveći detektor u planu je jedan kubični kilometar leda na Južnom polu. To je jedini detektor na južnoj polukugli tzv. AMANDA detektor (Antarctic Mion And Neutrino Detector Array). Taj detektor se trenutno sastoji od 19 vrpki dugih 500 metara s 675 fotomultiplajera koji su zauvijek zamrznuti u kanalima leda probušenim toplom vodom, 500 metara ispod površine leda (slika 7).



Slika 7. AMANDA detektor neutrina [2]

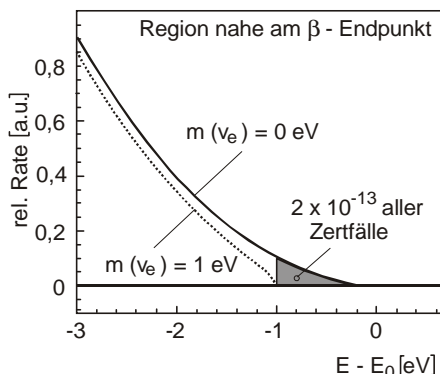
Detektori analiziraju neutrine koji prolaze kroz cijelu Zemlju da bi se smanjio background kozmičkih zraka. Tako AMANDA promatra sjevernu polukuglu, a ostali detektori južnu polukuglu. AMANDA je trenutno 30 puta osjetljivija za neutrine nego što je Super-Kamiokande u Japanu. Na slici 8. prikazan je neutrino laboratorij na Južnom polu.



Slika 8. Neutrino laboratorij na Južnom polu

#### **Eksperimenti s terestričkim neutrinima**

- a) Apsolutna masa neutrina još uvijek nije točno poznata. Mjerenja se provode preko energetskog spektra elektrona kod beta raspada. Naime maksimum spektra ovisi o masi neutrina (slika 9).

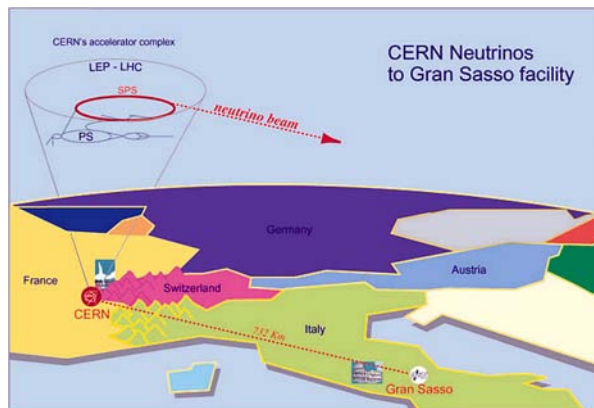


Slika 9. Ovisnost maksimuma spektra ovisi o masi neutrina

Na slici je pokazan energetski spektar u slučaju da je masa neutrina jednaka nuli ili da je  $m(\nu_e)=1$  eV ( $eV=1,78 \cdot 10^{-36}$  kg).

Grupa od stotine fizičara i tehničara uspostavlja u Karlsruhe (Njemačka) spektrometar 'Katrin' za mjerenje spektra energije elektrona iz beta raspada elementa tricija (Karlsruher-Tritium-Neutrino eksperiment). Tricij je vrlo radioaktivan element s vremenom poluraspada od 12,3 godina. To će biti najpreciznija 'vaga' na svijetu. Da bi se 'izvagala' tako mala čestica ( $\nu$ ) treba monstrum aparat dug 24 m, promjera 10 m i mase oko 250 tona. On je sagrađen u Deggendorfu na Dunavu i da bi ga se dovelo u Karlsruhe na Rajni, udaljenom samo 400 km od Deggendorfa, treba ga preko Dunava dovesti u Crno more i preko Mediterana u Sjeverno more do ušća Rajne i preko Rajne do Karlsruhea, 8500 km, jer ga se ne može transportirati po normalnim cestama. Čitav uređaj će biti duljine 75 m. Do danas je u zadnjih 25 godina proveden veliki broj eksperimenata s tricijom, uz najbolji rezultat da je masa elektronneutrina manja od 2,3 eV (i naš Institut Ruđer Bošković je sudjelovao u jednom takvom eksperimentu). 'Katrin' će dostići točnost od 0,2 eV. Na taj način će konačno biti moguće točno izmjeriti masu neutrina, ako je ona veća od 0,2 eV. Predviđa se da će 2009. Katrin biti dovršena, nakon čega će se nekoliko sljedećih godina mjeriti masa neutrina!

- b) Već nekoliko godina razne grupe traže dvostruki beta raspad bez neutrina koji bi, ako egzistira, pokazao da su neutrino i antineutrino identične čestice. To bi bilo vrlo važno za različite fizikalne teorije.
- c) Detaljno ispitivanje oscilacija neutrina u raznim Institutima. Upravo je dovršen i testiran jedan takav eksperiment u CERNu (najveći Institut na svijetu za fiziku visokih energija u Ženevi) i u Gran Sasso podzemnom Institutu u Apeninima blizu Rima. Sve vrste neutrina su producirane pomoću akceleratora u CERNu (slika 10) i poslone kroz zemlju do Gran Sasso, udaljenom 732 km od Ženeve.



Slika 10. Put transporta neutrina [3]

Dođe li do transformacije neutrina, usporedba mjerenih vrsta neutrina istodobno s identičnim detektorom u Ženevi i u Gran Sasso pokazat će oscilaciju neutrina. Prvi rezultati tog eksperimenata su publicirani u: International Journal of High-Energy Physics: CERN COURIER, u listopadu 2006. [4]. Svatko se može besplatno pretplatiti na taj mjesečnik: Editor Christine Sutton, CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland ili preko e-maila: cern.courier@cern.ch, ili putem narudžbe na fax: +41 22 7850247. Ovaj časopis će biti osobito interesantan sljedećih godina kad proradi najveći akcelerator na svijetu - LHC (Large Hadron Collider), gdje se očekuju novi fundamentalni rezultati [5]. Treba napomenuti da neke naše istraživačke grupe iz Splita i Zagreba sudjeluju na tim eksperimentima.

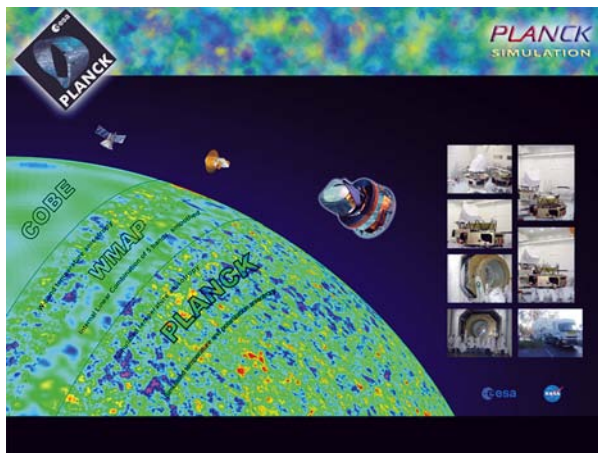
## 7

### Treća moguća generacija neutrina eksperimenata

The third possible generation of neutrino experiments

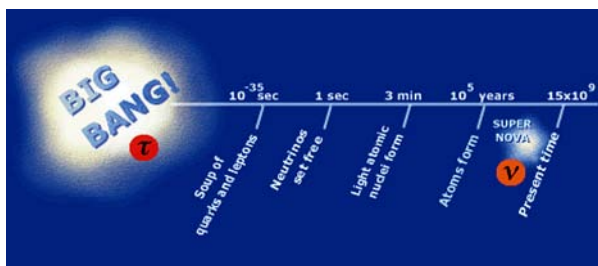
Jedno od najvećih otkrića 20. stoljeća jest slučajno otkriće tzv. kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja 1965. od strane A. Penzias i R. Wilsona u Bell Telephone laboratoriju. Oni su otkrili da smo utopljeni u nevidljivo elektromagnetsko zračenje koje se sastoji od 400 fotona/cm<sup>3</sup>. To zračenje je ustvari neka vrsta jake Velikog praska, koja je predviđena u okviru Big-Bang Modela. To je do sada najstarija eksperimentalna informacija o našem svemiru, točno kod temperature 3000 °C kad su se fotoni mogli slobodno kretati zajedno u ekspanzirajućem svemiru. Kroz ekspanziju, ta tzv. primordijalna elektromagnetska jeka Velikog praska se do danas ohladila na 2,728 K (-270,422 °C).

Studija varijacije raspodjele te temperature po današnjem svemiru omogućila je razumijevanje postanka galaksija i njenih razdioba u svemiru. Prošle godine (2006.) su J. Mather i G. Smoot dobili Nobelovu nagradu za analizu i interpretaciju satelitskih mjerenja anizotropije temperature tog kozmičkog mikrovalnog backgrounda (CMB). Nakon početnih mjerenja COBE i WMAP satelitima u pripremi je i treći PLANCK satelit za još točnije mjerenje razdiobe zračenja (slika 11).



Slika 11. Mjerenje razdiobe zračenja satelitima COBE, WMAP i PLANCK [6]

Start je predviđen 2008. Neki tvrde da je tim mjerenjima kozmologija od teološke i filozofske discipline postala prirodoslovna znanost. Na slici 12. je predložen model razvoja svemira.



Slika 12. Model razvoja svemira

Fotoni su mogli donijeti informaciju o Velikom prasku tek nakon tri minute. U okviru tog modela moramo imati 336 neutrina u kubičnom centimetru sličnog kozmičkog backgrounda kao u slučaju fotona. Ti primordijalni neutriini mogu donijeti informaciju o stanju kozmosa od oko same jedne sekunde poslije Velikog praska, kako se vidi na slici 12. Ako se može prognozirati, onda će za 50-100 godina tehnologija detekcije neutrina toliko napredovati da će se ostvariti mjerenje anizotropije **kozmičkog neutrinog backgrounda**.

#### Author's Address (Adresa autora):

Academic Prof. Dr. Ivo Derado  
Max-Planck-Institut für Physik  
Heisenberg Institut  
München, Germany

Prof. Dr. Dražan Kozak  
Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu  
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
Slavonski Brod, Croatia

To će biti najvažniji rezultat u fizici 21. stoljeća i ujedno test nužne nove teorije ujedinjenja Opće teorije relativiteta i Kvantne fizike. Te teorije danas izgledaju nekompatibilne jedna s drugom što eventualno indicira da je bar jedna od njih nepotpuna.

## 8

### Zaključak

#### Conclusion

Od jedne vrlo bezazlene Paulijeve hipoteze neutrina i eksperimenta mladog 'besposlenog' radiokemičara Davisa došlo je do Big Science neutrina. Bez neutrina ne bi dobivali energiju od Sunca i time ni biološku evoluciju. Neutrino je postao 'burevjesnik' jedne nove epohe moderne fizike. Sigurno je jedno: u fizici se događa revolucija, a mnogi nefizičari to ne opažaju. Nadamo se da će ovaj naš članak probuditi interes za modernu neutrinu fiziku!

Kao 'high-tech science fiction' može se uskoro očekivati iskorištenje neutrinovog svojstva da bez problema prolazi kroz Zemljsku kuglu. Moglo bi se tako studirati strukturu Zemljine unutrašnjosti i pronalaziti slojeve nafte ili druge rudače, pronalaziti nove arheološke i druge strukture ispod Zemljine površine. Moglo bi se isto tako lako provoditi razne interakcije u raznim dijelovima Zemlje i npr. inicirati eksploziju neprijateljske atomske bombe i slične vojne tajne pothvate.

## 9

### Literatura

#### Literature

- [1] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/ykphd/chap3-6.html>. (23.08.2007.).
- [2] <http://icecube.wisc.edu/>. (23.08.2007.).
- [3] <http://press.web.cern.ch/Press/PressReleases/Releases1999/PR14.99EGranSasso.html>. (23.08.2007.).
- [4] <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29705>. (23.08.2007.).
- [5] <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>. (23.08.2007.).
- [6] <http://crd.lbl.gov/~borrill/cmb/planck/AAS2006PlanckPoster.html>. (23.08.2007.).