

Nobelova nagrada za fiziku za 2015. godinu

|| N. Bolf*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa
Savska cesta 16/5a
10 000 Zagreb



Svemirski kameleoni

Ovogodišnji lauerati riješili su zagonetku neutrina i otvorili novi put u fizici čestica. Takaaki Kajita i Arthur B. McDonald dva su ključna znanstvenika dviju velikih istraživačkih skupina, Super-Kamiokande (SK) i Sudbury Neutrino Observatory (SNO), koji su otkrili "metamorfozu neutrina tijekom putovanja". Lov se odvijao duboko unutar Zemlje u gigant-skim instalacijama u kojima tisuće umjetnih očiju vrebaju na pravi trenutak da razotkriju tajne neutrina.

Godine 1998. Takaaki Kajita predstavio je otkriće da neutri-ni prolaze metamorfozu – mijenjaju svoj identitet na putu do SK detektora u Japanu. Tamo uhvaćeni neutri-ni stvoreni su reakcijama između kozmičkih zraka i Zemljine atmosfere. U međuvremenu, na drugoj strani svijeta, znanstvenici na SNO u Kanadi proučavali su neutrine koji dolaze sa Sunca. Istraživačka skupina na čelu s Arthur B. McDonal-dom dokazala je 2001. da ti neutri-ni također mijenjaju identitet.

Ta dva eksperimenta otkrili su novi fenomen – oscilacije ne-utrina. Dalekosežan zaključak je da neutri-no, za kojeg se dugo smatralo da nema mase, mora imati masu. Radi se o revolucionarnom otkriću za fiziku čestica i za naše razumi-jevanje svemira.

Tajnovite čestice

Živimo u svijetu neutrina. Tisuće milijardi neutrina prolazi kroz naša tijela svaku sekundu. Ne možemo ih niti vidjeti niti osjetiti. Neutri-ni hrle kroz svemir gotovo brzinom svjetlosti i rijetko su u interakciji s materijom. Odakle su došli?

Neki su stvoreni već u velikom prasku, drugi kontinuirano nastaju procesima u svemiru i na Zemlji – od eksplozija supernova, smrti masivnih zvijezda do reakcija u nuklearnim elektranama i prirod-nim radioaktivnim raspadom. Čak i unutar našeg tijela u prosjeku se oslobađa 5000 neutrina u sekundi pri raspadu izotopa kalija. Većina onih koji dolaze do Zemlje potječu iz nuklearnih reakcija unutar Sunca. Neutri-ni su zapravo, nakon fotona, najbrojnije čes-tice u cijelom svemiru.

Dugo vremena njihovo postojanje nije se moglo dokazati. Kad je austrijanac Wolfgang Pauli (nobelovac iz 1945.) pretpostavio postojanje čestica, radilo se o očajničkom pokušaju da se objasni očuvanje energije pri beta-raspadu u atomskoj jezgri. U prosincu 1930. Pauli je napisao pismo svojim kolegama fizičarima u kojem sugerira da se određena energija odnosi pomoću električki ne-utrnale, slabo interaktivne i veoma lagane čestica. Pauli je i sam teško uvjerio sebe u postojanje ove čestice. Navodno je izjavio:

* Izv. prof. dr. sc. Nenad Bolf
e-pošta: bolf@fkit.hr



TAKAAKI KAJITA

Rođen: 1959., Higashimatsuyama, Ja-pan

Doktorirao: 1986., University of Tokyo, Kashiwa, Japan

Trenutačno zaposlenje: Profesor na University of Tokyo, Kashiwa, Japan, di- rektor Instituta za istraživanje svemirskog zračenja.

Kajita je sa svojom grupom otkrio da ne-utri-ni iz atmosfere mijenjaju identitet na putu do detektora izgrađenog pod zemljom u Japanu.



ARTHUR B. McDONALD

Rođen: 1943., Sydney, Kanada

Doktorirao: 1969., California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA

Trenutačno zaposlenje: Profesor emeritus na Queen's University, Kingston, Kanada. McDonald je sa svojom istraživačkom skupinom u Kanadi pokazao da neutri-ni na putu od Sunca ne nestaju, već na naš planet stižu s promijenjenim identitetom.

"Učinio sam strašnu stvar – pretpostavio sam postojanje čestice koja se ne može otkriti."

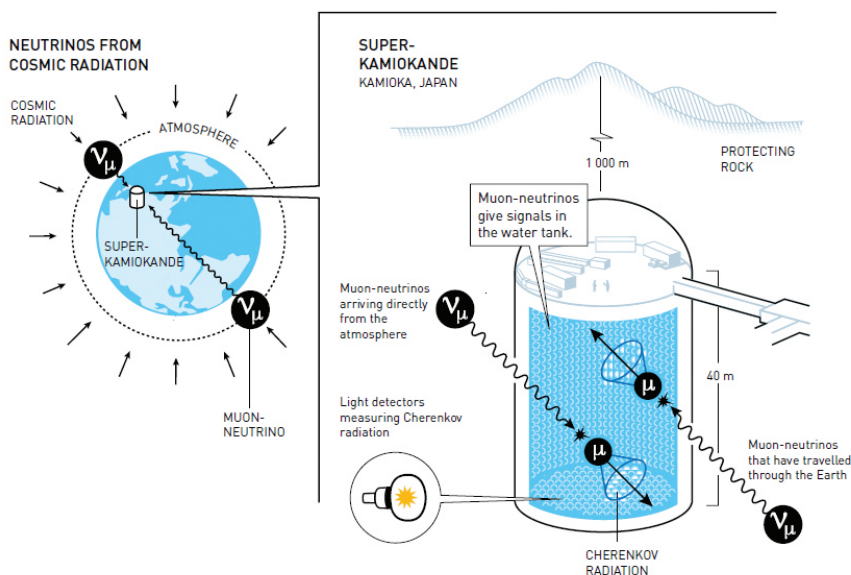
Vrlo brzo će Enrico Fermi (nobelovac 1938.) izvesti teoriju koja pretpostavlja Paulijevu laganu neutralnu česticu. Nazvana je ne-utri-no.

Proći će četvrt stoljeća prije nego što se neutri-no "službeno" ot- krije. Prilika se ukazala 1950.-ih kada su neutri-ni počeli o strujati u velikom broju iz tada izgrađenih nuklearnih elektrana. U lipnju 1956. godine dva američka fizičara – Frederick Reines (nobelovac 1995.) i Clyde Cowan – poslali su Pauliu telegram: "Neutri-ni su ostavili tragove na našem detektoru." Otkriće je pokazalo da je sablasni neutri-no, odnosno Poltergeist kako su ga zvali, stvarna čestica.

Čudnovati trio

Ovogodišnja Nobelova nagrada za fiziku nagrada je za otkriće koje rješava dugogodišnju zagonetku neutrina. Znanstvenici su 1960.-ih teorijski izračunali broj neutrina koji se stvara nuklear- nom reakcijom na Suncu. Međutim, mjerenja na Zemlji pokaza- la su da nedostaje oko dvije trećine izračunatog broja neutrina. Gdje su nestali?

Mišljenja i pretpostavki nije nedostajalo: Možda nešto nije u redu s teorijskim izračunima stvaranja neutrina na Suncu? Jedna od ideja za rješavanje te zagonetke bila je da neutri-ni na putu do Ze-



Slika 1 – Detekcija neutrina iz atmosfere u Super-Kamiokandeu ispod površine zemlje

mlje mijenjaju identitet!? Prema standardnom modelu fizike čestica postoje tri vrste neutrina – elektron-neutrini, muon-neutrini i tau-neutrini. Svaki od njih ima svojeg nabijenog partnera – elektron i njegova dva puno teža i kraćezivuća rođaka – muon i tau. Sunce proizvodi samo elektron-neutrine. Za objašnjenje nedostatnog broja registriranih elektron-neutrina pretpostavljeno je da se na putu do Zemlje pretvaraju u muon-neutrine i tau-neutrine.



Podzemni lov na neutrine

Nagađanja o promjeni identiteta neutrina ostala su samo nagađanja dok nisu pokrenuti veći i sofisticiraniji uređaji. Neutrini su se počeli “loviti” u kolosalnim detektorima smještenim duboko pod zemljom (da bi se zaštitili od šuma/smetnji kozmičkog zračenja iz svemira i spontanog radioaktivnog raspada u okolici).

Super-Kamiokande (SK) je počela s radom 1996. godine u rudniku cinka 250 kilometara sjeverozapadno od Tokija. Sudbury Neutrino Observatory (SNO) izgrađen je u rudniku nikla u Ontariju, a s opažanjima je započeo 1999. godine. Oni će otkriti kameleonu nalik prirodu neutrina.

Super-Kamiokande ogroman je detektor izgrađen 1000 m ispod Zemljine površine. Sastoji se od spremnika visokog i širokog 40 m ispunjenog vodom. Voda je toliko čista da zrake svjetlosti mogu putovati 70 m prije nego se njihov intenzitet prepolovi (u plivačkom bazenu to bi bilo samo nekoliko metara). Na vrhu spremnika, sa strane i na dnu smješteno je više od 11 000 svjetlosnih detektora čiji zadatak je otkriti, pojačati i mjeriti neznatno treptenje svjetla u ultra-čistoj vodi.

Velika većina neutrina prolazi kroz spremnik, ali svako malo neutrino se sudara s atomskom jezgrom ili elektronom iz vode. U tim sudarima stvaraju se nabijene čestice – muoni od muon-neutrina i elektroni iz elektron-neutrina. Oko nabijenih čestica javljaju

se blagi bljeskovi plave svjetlosti. To je Cherenkova svjetlost koja nastaje kada čestice putuju brže od brzine svjetla. Ovo nije u suprotnosti s Einsteinovom Teorijom relativnosti koja kaže da se ništa ne može kretati brže od svjetlosti u vakuumu. U vodi se svjetlo uspori na 75 posto svoje maksimalne brzine pa ga mogu “preteći” nabijene čestice. Oblik i intenzitet Cherenkove svjetlosti otkriva koja ga vrsta neutrina uzrokuje i odakle dolazi.

Rješenje zagonetke

Tijekom prve dvije godine rada Super-Kamiokande “prosijano” je oko 5000 signala neutrina. To je bilo znatno više nego u svim prethodnim pokusima, ali još uvijek manje od onoga što se očekivalo.

Super-Kamiokande je uhvatila muon-neutrini koji su dolazi izravno iz atmosfere, ali i one koji su dolazili “iz Zemlje” prošavši cijelu unutrašnjost zemaljske kugle. Broj neutrina koji dolaze iz oba smjera trebao je biti jednak jer Zemlja ne predstavlja značajnu prepreku. Ali muon-neutrini koji su pali ravno na detektor bilo je više nego onih s druge strane. To ukazuje na to da su muon-neutrini koji su više putovali imali vremena promijeniti identitet, za razliku od onih koji su došli iz atmosfere i putovali nekoliko desetaka kilometara. Kako je broj elektron-neutrini koji dolaze iz različitih smjerova bio u skladu s očekivanjima, muon-neutrini morali su se pretvoriti u treću vrstu – tau-neutrine. No, njihov prolaz detektor ne može registrirati.

Odlučujući dio slagalice razriješio se kada je SNO proveo mjerenja neutrina koji dolaze sa Sunca, u kojemu nuklearni procesi proizvode samo elektron-neutrine. Dva kilometara ispod Zemljine površine jureće elektron-neutrine pratilo je 9500 svjetlosnih detektora u spremniku ispunjenom s 1000 tona teške vode.

Jezgra deuterija daje dodatne mogućnosti za sudar neutrina u detektor. Za neke reakcije moguće je utvrditi samo količinu elektron-neutrini, dok druge omogućuju znanstvenicima mjerenje količine svih triju vrsta neutrina zajedno, bez mogućnosti razlikovanja.

S obzirom da se pretpostavljalo da su sa Sunca trebali stići samo elektron-neutrini, oba načina mjerenja broja neutrina trebala bi dati isti rezultat. Prema tome, ako je broj detektiranih elektron-neutrini manji od broja svih triju vrsta neutrina zajedno, to bi značilo da se nešto dogodilo s elektron-neutrinima na 150 milijuna kilometara dugom putu od Sunca.

Do Zemlje stigne više od 60 milijardi neutrina po kvadratnom centimetru svake sekunde, a SNO je tijekom prve dvije godine rada registrirao samo tri na dan. To je odgovaralo jednoj trećini očekivanog broja elektron-neutrina koji su trebali biti detektirani. Dvije trećine je nestalo. Međutim, ako računamo sve tri vrste zajedno, njihova suma odgovara očekivanom broju neutrina. Zaključeno je da elektron-neutrini moraju na svom putu mijenjati identitet.

Metamorfoza u kvantnom svijetu

Ta dva pokusa potvrdili su sumnju da neutriini mogu mijenjati svoj identitet. Otkriće je potaknulo nove eksperimente, a fizičare čestica prisililo na novi način promišljanja. Ključni zaključak iz ovih pokusa je sljedeći: Metamorfoza neutrina zahtijeva da neutriini imaju masu. U protivnom se ne bi mogli mijenjati. Kako dolazi do te metamorfoze?

Ovu čaroliju mora objasniti kvantna fizika. U kvantnom svijetu, čestica i val su različiti aspekti istog stanja. Čestica s određenom energijom opisana je odgovarajućim valom određene frekvencije. U kvantnoj fizici elektron-, muon- i tau-neutrini predstavljeni su superponiranim valovima koji odgovaraju stanju neutrina različitih masa.

Kada su valovi u fazi, nije moguće razlikovati različite stanja. No, kada neutriini putuju kroz prostor, valovi nisu u fazi. Duž puta valovi se superponiraju na različite načine. Superpozicija na određenoj lokaciji daje vjerojatnost koja će se vrsta neutrina tamo naći. Vjerojatnosti variraju od jednog do drugog mjesta, osciliraju, a neutriini se pojavljuju s različitim identitetima.

To neobično ponašanje javlja se zbog razlike u masi neutrina. Eksperimenti pokazuju da su razlike u masi vrlo male. Procijenjena masa neutrina je vrlo mala iako nikad nije izravno izmjerena. Budući da neutriini egzistiraju u svemiru u enormno velikim količinama, zbroj njihovih vrlo sićušnih masa postaje značajan. Procjenjuje se da je masa svih neutrina otprilike jednaka ukupnoj masi svih vidljivih zvijezda u svemiru.

Vrata u novu fiziku

Otkriće mase neutrina preokret je u fizici čestica. Standardni model bio je iznimno pouzdan, a više od dvadeset godina dobro se odupirao svim eksperimentalnim izazovima. Standardni model pretpostavlja da neutriini nemaju masu. Prema tome, ti su eksperimenti pronašli prve pukotine u Standardnom modelu, pa je postalo očito da Standardni model nije potpuna i konačna teorija svemira.

Neka od ključnih pitanja o prirodi neutrina na koja treba još odgovoriti su: Kolika je masa neutrina? Zašto su tako lagani? Postoji li više od tri trenutačno poznatih vrsta? Jesu li neutriini vlastite antičestice? Zašto su toliko različite od drugih elementarnih čestica?

Nobelove nagrade za fiziku prethodnih godina

- 2014. – Isamu Akasaki, Hiroshi Amano i Shuji Nakamura – Razvoj LED dioda koje daju plavu svjetlost
- 2013. – Francois Englert i Peter Higgs – Teorije Higgsovog bozona, čije je postojanje kasnije potvrđeno u LHC-u
- 2012. – Serge Haroche i David Wineland – Dostignuća u radu sa svjetlom i materijom
- 2011. – Saul Perlmutter, Brian Schmidt i Adam Riess – Otkriće da se svemir ubrzano širi
- 2010. – Andre Geim i Konstantin Novoselov – Otkriće "čudesnog materijala" grafena

Što su neutriini?

Zavirimo li u osnovne postavke Standardnog modela, teorije koja s uspjehom i brojnim eksperimentalnim potvrdama opisuje svijet elementarnih čestica i objašnjava strukturu sveukupne materije u svemiru, primijetit ćemo da elementarne čestice kao osnovne gradivne elemente fizičari dijele na dvije ključne skupine – u jednoj grupi su leptoni, a u drugoj kvarkovi.

Život kvarkova je veoma neobičan, ali presudno je da oni grade hadrone, teške čestice među kojima su protoni i neutroni. Grupu leptona čini njih šest i uz njih još šest njihovih antičestica. Među njima su dobro znani elektron i njegova antičestica, pozitron, kao i Mi i Tau leptoni i njihove antičestice. No, uz njih, u leptone spada i jedna prateća, pomalo egzotična grupa čestica koja nije nabijena i za koju se do otkrića ovogodišnjih Nobelovih laureata vjerovalo da nemaju masu. To su tri vrste neutrina – elektronski, mionski i tauonski, kao i njihove antičestice. Složimo li potpunu sliku, vidjet ćemo svijet leptona klasificiran na elektron, mion, taon i tri njihova neutrina. I uz to njihove antičestice. Karakteristike neutrina iznimno su zanimljive, budući da su to čestice koje praktično ne međudjeluju s drugom materijom, ništa ih ne zaustavlja i nalaze se u cijelom svemiru na ogromnim razdaljinama putujući kroz duge epohe.

Bez naboja, neutriini nezaustavljivo prolaze kroz sva elektromagnetna polja. Neutrini su čestice koje ne samo da doslovno prolaze kroz zid nego nesmetano putuju i kroz čitave planete i galaksije. Smatra se da bi mogli putovati kroz tvrdi materijal cijelu svjetlosnu godinu, a da se ne sudare ni s jednom česticom materije. Kao i drugi leptoni, neutriini ne sudjeluju ni u reakcijama gdje djeluje takozvana jaka interakcija jer je ona rezervirana za kvarkove, ali su zato prisutni tamo gdje djeluje takozvana slaba interakcija, npr. na Suncu u procesu fuzije, odnosno "spajanju" jezgara vodika u helij, zbog koje zvijezde oslobađaju tako silnu energiju. Tipična fuzijska reakcija koja se odvija na Suncu i njemu sličnim zvijezdama podrazumijeva lančane sudare protona iz jezgara vodika tijekom kojih se oslobađa energija, ali i "nusproizvodi", od kojih je jedan i – neutriino. Zahvaljujući tome sa Sunca, ali i s drugih sličnih zvijezda, neprekidno stižu velike količine ovog nusprodukta procesa fuzije.¹²

Literatura i poveznice za više informacija:

1. URL: <http://kva.se> (10. 11. 2015.).
2. URL: <http://nobelprize.org> (10. 11. 2015.).
3. URL: <http://kvatv.se> (10. 11. 2015.).
4. R. Jayawardhana, Neutrino hunters: The Thrilling Chase for a Ghostly Particle to Unlock the Secrets of the Universe, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2013.
5. F. Close, Neutrino, Popular science articles, Oxford University Press, 2010.
6. P. O. Hulth, High Energy Neutrinos from the Cosmos, 2005, URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/hulth/.
7. J. N. Bahcall, Solving the Mystery of the Missing Neutrinos, 2004, URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/bahcall/.
8. A. B. McDonald, J. R. Klein, D. L. och Wark, Solving the Solar Neutrino Problem, Scientific American **288** (4) (2003).
9. E. Kearns, T. Kajita, Y. och Totsuka, Detecting Massive Neutrinos, Scientific American **281** (2) (1999).
10. Super-Kamiokande Official Homepage, URL: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html> (10. 11. 2015.).
11. Sudbury Neutrino Observatory Homepage, URL: <http://sno.phy.queensu.ca> (10. 11. 2015.).
12. URL: <http://elementarium.cpn.rs/elementi/nagrada-za-resenje-misterije/?lang=lat> (10. 11. 2015.).