

OSCILACIJE NEVTRINOV

TOMAŽ PODOBNIK IN ALEŠ MOHORIČ

Institut Jožef Stefan

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

PACS: 01.10.Cr, 14.60.Pq

Letošnjo Nobelovo nagrado za fiziko sta prejela Takaaki Kajita z univerze v Tokiju, Japonska, in Arthur B. McDonald s Kraljeve univerze v Kingstonu, Kanada (slika 1) za pomembno vlogo v eksperimentih Super-Kamiokande in SNO, ki nedvoumno kažeta na to, da nevtrini ene vrste prehajajo v nevtrine druge vrste in nazaj [9]. Prehodi, ki jih imenujemo nevtrinske oscilacije, so možni le, če imajo nevtrini maso. To odkritje je spremenilo naše razumevanje temeljev narave in lahko pomembno vpliva na fizikalni pogled na vesolje.

NEUTRINO OSCILLATION

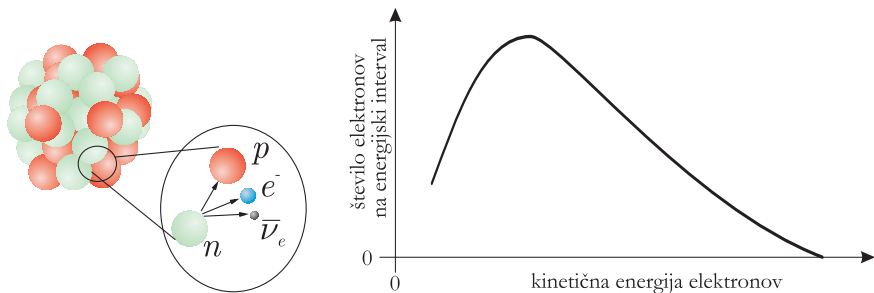
This year's Nobel Prize in physics was awarded to Takaaki Kajita, University of Tokyo, Japan, and to Arthur B. McDonald, Queen's University, Kingston, Canada (figure 1), for their key contributions to the experiments which demonstrated that neutrinos change identities [9]. This metamorphosis requires that neutrinos have mass. The discovery has changed our understanding of the innermost workings of matter and can prove crucial to our view of the universe.

Uvod

Nevtrini so vsepovsod okoli nas in tudi v nas samih. Najstarejši med njimi so nastali že ob začetku vesolja, podobno kot kozmično mikrovalovno ozadje. Njihova gostota je okoli 10^8m^{-3} . Nevtrini nastajajo v velikem številu med



Slika 1. Levo: Takaaki Kajita, foto: Bengt Nyman, desno: Arthur B. McDonald, foto: Bengt Nyman



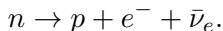
Slika 2. Levo: razpad beta in desno: energijski spekter elektronov pri razpadu beta.

jedrskimi reakcijami, ki potekajo v Soncu. Gostota številskega toka nevtrinov s Sonca je na Zemlji približno $10^{15} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Nevtrini nastajajo tudi pri trkih kozmičnih delcev (večinoma protonov) z jedri atomov v zgornjih plasteh atmosfere, v jedrskih razpadih v Zemljini notranjosti in v razpadih, ki potekajo v jedrskih reaktorjih.

Kljub množici nevtrinov, ki nas obdaja, je do njihovega odkritja prišlo sorazmerno pozno, saj nevtrini le šibko interagirajo z okolico. Zgodba o nevtrinih se začne leta 1914, ko je James Chadwick izmeril energijsko porazdelitev (spekter) elektronov, ki nastanejo pri razpadu beta. Pri razpadu se nevtron v jedru pretvori v proton in izseva elektron (slika 2 levo):

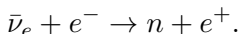


V skladu z ohranitvijo energije bi za dvodelčni razpad (1) pričakovali, da bodo imeli vsi izstopni elektroni enako energijo (črtast spekter), medtem ko je bil izmerjeni spekter zvezen (slika 2 desno). Zagato je leta 1930 razrešil Wolfgang Pauli s tem, da je v končnem stanju poleg protona in elektrona predvidel še obstoj neopaženega tretjega delca (slika 3), ki ga danes imenujemo nevtrino:

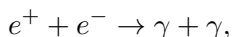


Delec je moral biti električno nevtralen, ker ga, v nasprotju z nabitim elektronom, pri razpadu beta niso zaznali, in lažji od elektrona, saj bi znatna masa nevtrinov premaknila energijski spekter elektronov k nižjim vrednostim.

Leta 1956 sta Clyde Cowan in Frederick Reines s sodelavci prvič izmerila reakcije (do takrat hipotetičnih) nevtrinov z okolico [3], za kar je Reines leta 1995 prejel Nobelovo nagrado za fiziko (Cowan nagrade ni dočakal). Pri poskusu sta opazovala antinevtrine iz jedrskega reaktorja, ki so trkali s protoni v tarči iz kadmijevega klorida. Ob trkih so nastali pozitroni in nevtroni:



Ob anihilaciji pozitrona z elektronom iz okolice je nastal fonski par,



original - Photocopy of PLC 0393
Abschrift/15.12.56 PW

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

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweigten Ausweg
verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrische neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie

Slika 3. Začetek Paulijevega pisma kolegom, v katerem je predvidel obstoj dodatnega nevtralnega delca v končnem stanju pri razpadu beta [10].

ki so ga detektirali koincidenčno. Nevtron se je ujel v jedru kadmijevega atoma; kadmijev izotop, ki je pri tem nastal, je bil v vzbujenem stanju in je prešel v osnovno stanje z izsevanjem fotona z značilno (točno določeno) energijo in z značilnim časovnim zamikom glede na detekcijo fotonkega para iz anihilacije pozitrona:

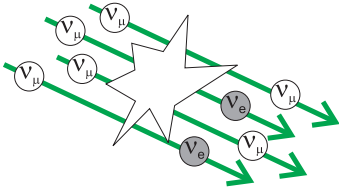


Pri razpadu beta in poskusu, ki sta ga izvedla Cowan in Reines, nastopajo elektronski (anti-)nevtrini. Leta 1962 so Leon Lederman, Melvin Schwartz in Jack Steinberger pokazali, da obstajajo še nevtrini druge vrste – mionski nevtrini, ν_μ [4]. Za odkritje so leta 1988 prejeli Nobelovo nagrado za fiziko. Danes vemo, da poleg omenjenih dveh vrst obstajajo še nevtrini tretje vrste – nevtrini tau ν_τ .

Podobno, kot je Pauli ocenil (zgornjo mejo za) maso elektronskega nevtrina iz oblike spektra elektrona, ki pri razpadu beta nastane skupaj z nevtrinom, lahko tudi maso nevtrinov ν_μ in ν_τ ocenimo iz energijskega spektra delcev, ki poleg obeh nevtrinov nastopajo v posameznih procesih. V okviru natančnosti eksperimentov so vsi izmerjeni spektri skladni s hipotezo o brezmasnih nevtrinih, ki je vključena v osnovno teorijo – Standardni model – osnovnih gradnikov snovi in sil med njimi (interakcij).

Primanjkljaj nevtrinov s Sonca in nevtrinske oscilacije

Sonce je daleč najmočnejši vir (elektronskih) nevtrinov na Zemlji. Nevtrini nastanejo kot produkt zlivanja jeder. Slika 4 kaže model za opis takega zlivanja (levo) in energijski spekter nevtrinov (desno), skladen z modelom [2].



Slika 5. Nevtrinske oscilacije: del mionskih nevtrinov se spremeni v nevtrine druge vrste – elektronske nevtrine. Pojav je mogoč le, če imajo nevtrini od nič različno maso.



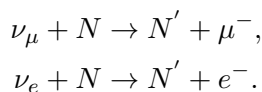
Slika 6. Maketa detektorja Kamio-kande (foto: Jnn, Copyleft). Na naslovnici so fotopomnoževalke, ki so v steni detektorja.

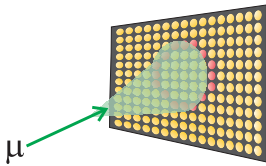
oscilacije. Ob tem je pomembno, da do oscilacij lahko pride le, če imajo nevtrini (od nič različno) maso, kar je v neposrednem nasprotju s prej omejenim standardnim modelom osnovnih gradnikov snovi in interakcij.

Atmosferski nevtrini in eksperiment Super-Kamiokande

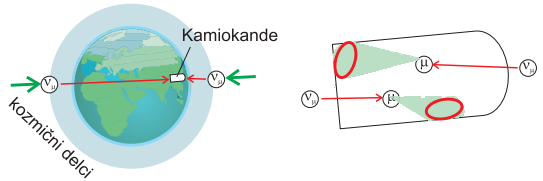
Prvič so nevtrinske oscilacije izmerili leta 1998 [6] z detektorjem Super-Kamiokande (SK), ki so ga postavili 1000 m pod zemljo v rudniku Mozumi v mestu Hida na Japonskem. Detektor SK (slika 6) je zbiralnik vode v obliki valja višine 41 m in premera osnovne ploskve 39 m. Zbiralnik vsebuje 50 000 ton vode, v njegovih stenah pa je 13 000 fotopomnoževalk (detektorjev svetlobe).

Z detektorjem SK so izmerili oscilacije atmosferskih nevtrinov, ki nastanejo pri trkih kozmičnih žarkov (visokoenergijskih protonov) z jedri atomov v vrhnjih plasteh atmosfere, pri čemer je delež mionskih nevtrinov okoli $2/3$, delež elektronskih nevtrinov pa okoli $1/3$ (delež nastalih nevtrinov tau je zanemarljivo majhen). Energija atmosferskih nevtrinov je v povprečju precej višja od energije nevtrinov s Sonca. Kadar visokoenergijski atmosferski nevtrino interagira z nukleonom N v jedru atoma v detektorju *SK*, se lahko spremeni v nabit delec, ν_μ v μ^- in ν_e v e^- ,





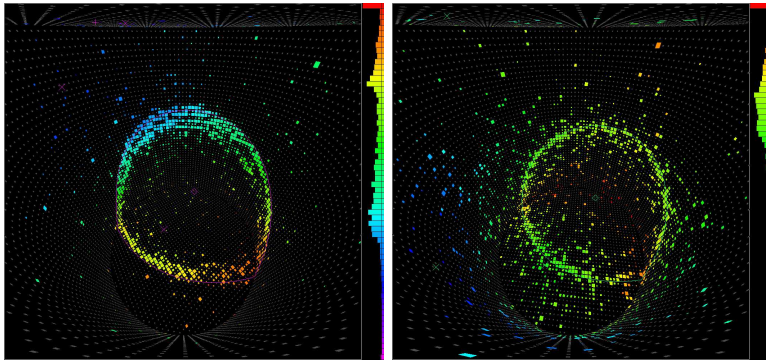
Slika 7. Nabit delec s hitrostjo, ki je večja od hitrosti svetlobe v snovi, seva svetlobo Čerenkova. Izsevana svetloba tvori plašč stožca z osjo, ki se ujema s smerjo gibanja nabitega delca. Ob projekciji fotonov na ravnino z detektorja svetlobe dobimo značilne kolobarje – obroče svetlobe Čerenkova.



Slika 8. Detektor Kamiokande meri število atmosferskih nevtrinov, ki vstopajo v detektor od spodaj in od zgoraj; obroči Čerenkova na dnu detektorja so posledica atmosferskih nevtrinov, ki so vstopili v detektor od zgoraj, obroči na stropu detektorja pa posledica atmosferskih nevtrinov, ki so vstopili v detektor od spodaj.

Če je hitrost nastalega nabitega delca (μ^- ali e^-) večja od hitrosti svetlobe v vodi, delec seva svetlobo Čerenkova (slika 7), ki jo v obliki obročev zaznajo fotopomnoževalke v stenah detektorja. Ker je smer nastalih μ^- in e^- močno korelirana s smerjo ν_μ in ν_e , so obroči Čerenkova na dnu detektorja večinoma posledica atmosferskih nevtronov, ki so vstopili v detektor od zgoraj, obroči na stropu detektorja pa posledica atmosferskih nevtrinov, ki so vstopili v detektor od spodaj (slika 8). Poleg tega so obroči svetlobe Čerenkova, ki jo izsevajo mioni, ostrejši od obročev, ki jih dobimo s sevanjem elektronov (slika 9): elektronske obroče Čerenkova razmažejo dodatni fotoni, ki jih dobimo z zavornim sevanjem elektronov, medtem ko je zavorno sevanje mionov zanemarljivo (40 000-krat šibkejše od zavornega sevanja elektronov).

Opisane značilnosti so omogočile, da so z detektorjem SK izmerili razmerje tokov mionskih in elektronskih atmosferskih nevtrinov, ki vstopajo v detektor iz različnih smeri: posebej od zgoraj in posebej od spodaj. Pri tem so izmerili, da je razmerje mionskih in elektronskih nevtrinov, ki vstopajo v detektor od zgoraj (razmerje števila obročev svetlobe Čerenkova z ostrimi in z razmazanimi robovi na dnu detektorja), enako razmerju ob njihovem nastanku (okoli 2 v korist mionskih nevtrinov), za nevtrine, ki vstopajo v detektor od spodaj, pa je to razmerje znatno manjše od 2. Zmanjšanje razmerja razložijo nevtrinske oscilacije: nevtrini, ki vstopijo v detektor od zgoraj, od svojega nastanka v atmosferi do detekcije prepotujejo le okoli 10–15 km (slika 8, levo), kar je zanemarljivo malo v primerjavi z razdaljo, značilno za oscilacije, medtem ko nevtrini, ki vstopijo v detektor od spodaj, prepotujejo celotno zemeljsko kroglo (13 000 km), kar je dovolj, da se lahko znaten del nevtrinov ene vrste spremeni v nevtrine druge vrste. Rezultati SK so skladni s prehodi mionskih nevtrinov v nevtrine tau.

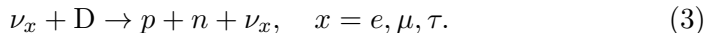


Slika 9. Obroč svetlobe Čerenkova, ki jo izseva mion (levo) in elektron (desno) (vir: Tomasz Barszczak [8]).

Nevtrinski observatorij Sudbury (SNO)

Detektor SNO (slika 10) je zbiralnik, ki vsebuje 1000 ton težke vode, D_2O , z dodatkom soli $NaCl$, v stenah zbiralnika pa je vgrajenih 9500 fotopomnoževalk. Stoji 2000 m globoko pod zemljo v rudniku Creighton v kraju Sudbury, Kanada.

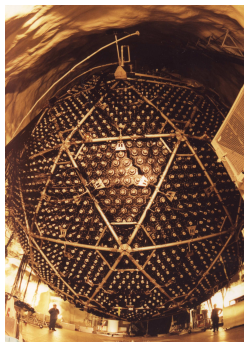
Ena izmed možnih reakcij nevtrinov s Sonca s težko vodo v detektorju je t. i. reakcija z nevtralnim tokom, pri kateri jedro devterija (devteron D) razpade na proton in nevtron,



Prosti nevtron ujame jedro klora, Cl , ki nato v kratkem časovnem intervalu izseva štiri fotone. Ti fotoni se nato sipljejo na elektroni molekul težke vode, pri čemer elektroni presežejo hitrost svetlobe v vodi in zato sevajo svetlobo Čerenkova, ki jo zaznajo fotopomnoževalke. Večkratni skoraj sočasni obroči svetlobe Čerenkova so torej znak za reakcijo (3) nevtrina s Sonca z devteronom v detektorju SNO. Da so lahko izključili druge možne vire takih dogodkov (ozadje), so morali zmanjšati običajni delež radioaktivnih elementov v vodi za faktor 1 000 000.

Reakcija (3) je, drugače od reakcije (2), enako verjetna za vse vrste nevtrinov. To pomeni, da bo izmerjeno število reakcij (3) enako, če elektronski nevtrini ves čas ostanejo elektronski nevtrini ali če se na poti med svojim nastankom v Soncu do mesta detekcije spremenijo v nevtrine druge vrste – število reakcij (3) je odvisno le od toka nevtrinov s Sonca, ne pa tudi od nevtrinskih oscilacij.

Izmerjeno število reakcij (3) z detektorjem SNO [1] je skladno s številom, ki ga napove model Sonca [2]. Model Sonca je torej pravilen in primanjkljaj izmerjenih reakcij (2) iz poglavja *Primanjkljaj nevtrinov s Sonca in nevtrinske oscilacije* lahko pojasnijo le nevtrinske oscilacije.



Slika 10. Detektor SNO (objavljeno z dovoljenjem SNO).

Sklep

Opisani eksperimenti nedvoumno kažejo na to, da nevtrini oscilirajo. To pomeni, da imajo nevtrini maso, kar je v nasprotju s Standardnim modelom osnovnih gradnikov snovi in interakcij. Obstaja več različnih predlogov kako dopolniti Standardni model, da bo vključeval masivne nevtrine, in poskusi bodo pokazali, kateri izmed teh predlogov, če sploh kateri, je pravičen. Končna masa nevtrinov pomeni tudi, da njihov delež v temni snovi ni zanemarljiv.

LITERATURA

- [1] S. N. Ahmed; et al., *Measurement of the Total Active ^8B Solar Neutrino Flux at the Sudbury Neutrino Observatory with Enhanced Neutral Current Sensitivity*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 181301.
- [2] J. N. Bahcall, A. M. Serenelli in S. Basu, *New solar opacities, abundances, helioseismology, and neutrino fluxes*, Astrophys. J. **621**, L85 (2005).
- [3] C. L. Cowan Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, et al., *Detection of the Free Neutrino: a Confirmation*, Science **124** (1956), 103–104.
- [4] G. Danby, J.-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. B. Mistry, M. Schwartz in J. Steinberger, *Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos*, Phys. Rev. Lett. **9** (1962) 36.
- [5] R. Davis, *Solar Neutrinos. II. Experimental*, Phys. Rev. Lett. **12** (11) (1964) 303, B. T. Cleveland ; et al., *Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake chlorine detector*, Astrophys. J. **496** (1998) 505–526.
- [6] Y. Fukuda; et al., *Super-Kamiokande Collaboration*, Phys. Rev. Lett. **81** (1989) 1562–1567, Y. Ashie; et al., *Measurement of atmospheric neutrino oscillation parameters by Super-Kamiokande I*, Phys. Rev. D **71**, 112005 (2005).
- [7] B. Pontecorvo, *Mesonium and anti-mesonium*, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **33** (1957), 549–551.
- [8] http://www.ps.uci.edu/~tomba/sk/tscan/compare_mu_e/, ogled 17. 12. 2015.
- [9] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/press.pdf, ogled 17. 12. 2015.
- [10] microboone-docdb.fnal.gov, ogled 17. 12. 2015.