

NEVTRINI IZ VESOLJA

ANJA DOBRAVEC

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

V članku bom predstavila splošne lastnosti nevtrinov. Opisala bom, kje in kako nastajajo. Sledi opis problema Sončevih nevtrinov, ki so ga razrešili s teorijo nevtrinskih oscilacij. Na koncu bom razložila še metode detektiranja nevtrinov in se dotaknila pomena raziskovanja nevtrinov.

NEUTRINOS FROM SPACE

First I will present the basic characteristics of neutrino particles and describe where and how they are created. I will continue with the description of the Solar neutrino problem which has been solved with the theory of neutrino oscillations. Finally I will describe the methods of detecting neutrinos and show the point of exploring neutrinos.

1. Uvod

Za razliko od večine drugih delcev, ki so bili odkriti eksperimentalno, je bil nevtrino najprej napovedan teoretično. Ko so odkrili razpad beta in ugotovili, da je energijski spekter izsevanih elektronov zvezen (pri razpadu alfa in gama je spekter diskreten, saj nastane samo en delec), je leta 1930 Wolfgang Pauli napovedal obstoj hipotetičnega delca – nevtrina (v prevodu pomeni majhen nevtralen delec), kot ga je poimenoval Enrico Fermi. Opazil je, da se energija ter gibalna in vrtilna količina pri razpadih beta ne ohranjajo. Zato je sklepal, da mora poleg elektrona (pozitrona) nastati še en delec, ki odnese razliko v energiji, gibalni količini in vrtilni količini začetnih in končnih delcev. Pri vsakem razpadu si nevtrino in elektron razdelita energijo, ki se sprosti pri reakciji, zato je energijski spekter zvezen. Ker so nevtrini brez naboja in jih je težko zaznati (redko reagirajo s snovjo), so jih eksperimentalno potrdili šele leta 1956 (Cowan in Reines). V eksperimentu sta odkrila samo elektronske nevtrine. Naslednje odkritje je bil mionski nevtrino (1962) in nazadnje še tau nevtrino (2000, Fermilab). [1]

2. Splošno o nevtrinih

Nevtrini so osnovni delci z zelo majhno maso in v standardnem modelu spadajo med leptone s polovičnim spinom (fermioni). Leptoni (torej tudi nevtrini) ne občutijo močne sile. Nevtrini ne nosijo električnega naboja, in posledično ne interagirajo preko elektromagnetne interakcije. Čutijo samo šibko jedrsko silo, ki je v primerjavi z močno in elektromagnetno precej šibkejša in ima manjši doseg, zato lahko nevtrini preletijo velike razdalje, ne da bi pri tem kakorkoli interagirali s snovjo (se ne absorbirajo). To pa je razlog, zakaj smo nevtrine odkrili pozno, saj jih je težko detektirati. Zaradi svoje neničelne mase občutijo tudi gravitacijsko silo in interagirajo z drugimi masivnimi delci, vendar je ta sila najšibkejša med vsemi štirimi osnovnimi silami, zato je zanemarljiva. Poleg tega je gravitacijska sila tista, ki interagira s snovjo na velike razdalje in je težko videti, kaj se dogaja na majhnih razdaljah, saj tu prevladajo učinki ostalih sil (v primeru nevtrinov je to šibka sila).

Poznamo tri tipe (okuse) nevtrinov (vsak ima svoj antidelec - antinevtrino), vsak okus nevtrina se navezuje na pripadajoč nabit lepton, po katerem se tudi imenuje. Elektronski nevtrino je povezan z elektronom, mionski z mionom in tau nevtrino s tau leptonom (mion in tau sta težji verziji elektrona). Spodnja tabela prikazuje vse okuse nevtrinov in njihovih električno nabitih sorodnih delcev. [2]

okus nevtrina	ν_e	ν_μ	ν_τ
nabit delec	elektron	mion	tau

Tabela 1. Tabela prikazuje vse tri okuse nevtrinov in njim pripadajoče nabite leptone, po katerih so dobili nevtrini svoje ime.

Preprost dokaz, ki kaže na neničelno maso nevtrinov, sledi iz naslednjega razmisleka. Splošno sprejeta teorija fizike osnovnih delcev napoveduje tri različne vrste nevtrinov. Namerili pa so le tretjino s teorijo napovedanih delcev. Če torej obstaja način, da se nevtrini na poti skozi prostor spremenijo iz ene vrste v drugo, lahko pojasnimo zakaj izmerimo le tretjino teoretično napovedanih nevtrinov. Po nekdanjih napovedih nevtrini naj ne bi imeli mase. Za brezmasne delce je značilno, da se gibljejo s svetlobno hitrostjo. Po Einsteinovi teoriji posebne relativnosti za delec, ki se giblje s hitrostjo svetlobe, čas stoji, kar pomeni, da se ne more spreminjati. Torej, če nevtrini nimajo mase in se gibljejo s hitrostjo svetlobe, se ne morejo spreminjati iz ene vrste v drugo, saj to prepoveduje teorija relativnosti. Iz tega sledi sklep, da se nevtrini lahko spreminjajo le, če se gibljejo s hitrostjo manjšo od svetlobne, to pa pomeni, da imajo tudi maso različno od nič. [3]

Najnovejša ocena (2014) za zgornjo mejo vsote mas vseh treh okusov nevtrinov je $0,320 \text{ eV} \pm 0,081 \text{ eV}$. [4] Predvidevajo, da si mase nevtrinov različnih okusov sledijo v enakem zaporedju kot mase njim pripadajočih nabitih leptonov $m_e < m_\mu < m_\tau$. Dejstvo, da imajo nevtrini različnih okusov različne mase, potrjuje nevtrinske oscilacije opisane v nadaljevanju.

3. Nastanek nevtrinov

Poznamo tri glavne vire nevtrinov v vesolju:

- nevtrini nastajajo pri jedrskih reakcijah, ki potekajo v zvezdah
- ogromno nevtrinov se sprosti pri eksploziji supernove
- nastali so takoj po velikem poku in danes sestavljajo kozmično ozadje

3.1 Jedrske reakcije v zvezdah

Nevtrini nastajajo pri jedrskih reakcijah v zvezdah, ki so eden glavnih izvorov nevtrinov v vesolju. Bolj natančno si pogledimo, kako zvezde pridobivajo energijo in zakaj svetijo.

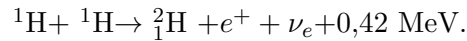
Največ (okoli 90% vseh) zvezd se nahaja na glavni veji HR diagrama. V teh zvezdah potekajo reakcije zlivanja vodikovih jeder (protonov) v helij. Proces lahko poteka na dva načina (odvisno od mase zvezde in temperature v jedru) - pp cikel (opisan v nadaljevanju, ker tako pridobiva energijo naše Sonce, prevladuje pri zvezdah mase Sonca ali manj in pri nižjih temperaturah) ali CNO cikel (prevladuje pri zvezdah z $M > 1,3 M_\odot$ in pri višjih temperaturah). Pri obeh se sprosti ogromno energije (približno 10^{26} W).

Z izjemo končnih stadijev zvezd je vodik prevladujoči element v vseh zvezdah. Ko temperatura jedra novonastale zvezde doseže 10^6 K , se v zvezdi vžgejo jedrske reakcije in zvezda začne svetiti (stanje, ko v zvezdi še ne potekajo jedrske reakcije zaradi prenizke temperature, imenujemo protozvezda). Vodik (protoni) se zliva v helij. Do zlivanja pride zaradi preprostega dejstva – 2 protona in 2 nevtrona, ki sestavljajo jedro helija (${}^4_2\text{He}$) vsak zase tehtajo več kot vezani skupaj v jedro (razlika je približno $27,8 \text{ MeV}$). Zato je energijsko ugodneje, da so vezani. Masna razlika se pretvori v energijo, ki jo zvezda izseva (razdelijo si jo fotoni, nevtrini in elektroni). [5] Pri enem zlitju dveh vodikov v helij se pretvori 0,71% mase (ki sodeluje v reakciji) v energijo, ki se sprosti, torej velja

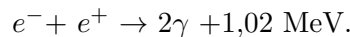
$$E = 0,0071 \cdot mc^2. \quad (1)$$

Pp (proton-proton) veriga je ena izmed več možnih fuzijskih reakcij, s katerimi zvezde pretvarjajo vodik v helij. Ta vrsta reakcij prevladuje v zvezdah, ki imajo maso $1,5M_{\odot}$ ali manj. Nastopi lahko le kadar je temperatura jedra (protonov) dovolj visoka, da delci lahko premagajo medsebojni elektrostatski (Coulombski) potencial (je odbojen).

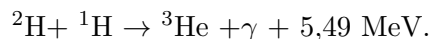
Pretvorba vodika v helij se ne zgodi v enem samem koraku, potrebnih je več stopenj zlivanja – imamo vergo reakcij zlivanja, v vsaki se skupaj zlijeta dva delca. Prvi korak zlivanja vodika v helij je zlitje dveh protonov pod vplivom močne interakcije (dvostopenjski proces). Nastali delec bi bil zelo nestabilen in bi nemudoma razpadel nazaj v dva ločena protona. Vendar se to ne zgodi. Leta 1939 je Hans Bethe odkril, kaj se pravzaprav dogaja. Pri razpadu β^+ šibka interakcija proton v jedru pretvori v nevtron (s pretvorbo kvarka u v kvark d z absorpcijo bozona W^- ali izsevanjem bozona W^+), delec β^+ (pozitron) in nevtrino. Pri tem se vrstno število zmanjša za 1, masno število se ohrani. Ker je masa nastalega nevtrona večja od mase protona, ta vrsta razpada lahko poteka le znotraj jedra. Nastalo jedro mora imeti večjo vezavno energijo in s tem nižjo celotno energijo, kot jo ima prvotni atom. Razlika energije gre v pretvorbo protona v nevtron, pozitron in nevtrino ter v kinetično energijo nastalih delcev. Pri bližnjem srečanju dveh protonov šibka interakcija pretvori en proton v nevtron in tako nastane težji in stabilnejši izotop vodika – devterij:



To je zelo počasen dvostopenjski proces, saj je razpad β^+ ${}^2_2\text{He}$ (diproton) v devterij zelo malo verjeten (diproton raje razpade v vodik z emisijo protona). Pri centralni gostoti in temperaturi Sonca je povprečen pričakovani čas za zlitje dveh protonov v devterij okrog 10^{10} let, za kar smo lahko hvaležni, saj bi v primeru hitrejših reakcij Sonce zelo hitro porabilo svoje gorivo in prenehalo svetiti. Pozitron se nemudoma anihilira z elektronom, njuno mirovno in kinetično energijo pa odneseta dva novonastala (gama) fotona:



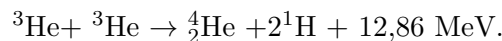
Nato se devterij zlije s protonom in pri tem nastane izotop helija:



Ta reakcija je v primerjavi s prejšnjo zelo hitra, zato je količina devterija v zvezdah zelo majhna.

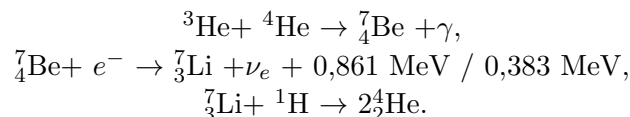
Sedaj so možne štiri različne poti do nastanka končnega produkta ${}^4_2\text{He}$.

Najverjetnejša reakcija v Soncu (poteče z 86% verjetnostjo) je pp1 veriga:



Celotna sproščena energija je 27,8 MeV. Pp 1 veriga prevladuje pri temperaturah med 10 MK in 14 MK. pri nižjih temperaturah se ne proizvede veliko helija.

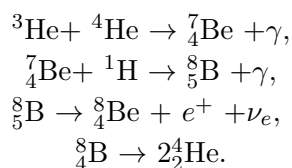
Pp2 veriga poteče v 14% primerov:



90% nastalih nevtrinov odnese 0,861 MeV energije, 10% pa 0,383 MeV, kar je odvisno od tega ali

je litij v osnovnem ali v vzbujenem stanju. Pp2 veriga prevladuje pri temperaturah med 14 MK in 23 MK.

Pp3 veriga poteče v 0,11% primerov v Soncu, prevladuje pri temperaturah nad 23 MK:



Poteče redko, vendar je vir visokoenergijskih nevtrinov (energije nad 14,06 MeV), ki so pomembni pri Sončevem nevtrinskem problemu.

Obstaja še ppIV reakcija, ki pa je zelo redka in je zato ne opazimo.

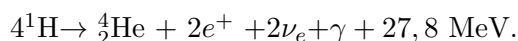
Pri vseh teh reakcijah nastajajo nevtrini, ki prosto pobegnejo iz zvezde in s sabo odnesejo del energije. Večina nevtrinov nastane v pp1 verigi, vendar imajo nizke energije (do 0,42 MeV) in jih težko zaznamo. V pp2 (${}^7\text{Be}$) in pp3 (${}^8\text{B}$) verigi nastajajo nevtrini z višjimi energijami, zato so te reakcije za nas pomembnejše. [6]

Natančno poznavanje nevtrinskih tokov z različnimi energijami je zelo pomembno, saj nam daje informacije o tem, katera od pp reakcij je najbolj zastopana v zvezdi in s tem lahko določimo tudi temperaturo središča zvezde. Poleg tega lahko določimo tudi parametre, povezane z nevtrinskimi oscilacijami.

Sedaj naredimo še preprosto oceno števila nastalih nevtrinov pri jedrskih reakcijah v Soncu:

$$L_{\odot} = \frac{E}{t} = \frac{N_{reakcij} \cdot E_1}{t}, \quad (2)$$

kjer je $N_{reakcij}$ število reakcij v času t , pri katerih se vodik zlije v helij in se pri eni reakciji zlitja sprosti E_1 energije. Vemo, da se pri pp1 procesu (najpogostejši v Soncu) sprosti približno $E_1 = 27,8$ MeV. Ocenimo koliko nevtrinov nastane vsako sekundo v Soncu. Končna enačba zlitja vodika v helij pri pp1 verigi je:



Vidimo, da v vsaki reakciji nastaneta dva nevtrina ($N_{\nu_e} = 2 \cdot N_{reakcij}$). Dobimo:

$$N_{\nu_e} = \frac{2L_{\odot}t}{E_1}, \quad (3)$$

$$N_{\nu_e} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{26} \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{27,8 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \approx 10^{38}. \quad (4)$$

Vsako sekundo v Soncu nastane 10^{38} nevtrinov. Ti vzamejo nekaj sproščene energije (do 3 MeV - odvisno od tega v kateri vrsti reakcij nastanejo) pri reakciji in ta je za vedno izgubljena. Sedaj ocenimo še koliko nevtrinov gre skozi cm^2 človeškega telesa (skozi površino prsta na roki) vsako sekundo.

$$N_{\nu_e} = \frac{2L_{\odot}t}{E_1} \frac{1 \text{ cm}^2}{4\pi r^2} = j_{\nu, \text{Sonce}} \frac{1 \text{ cm}^2}{4\pi r^2} = 10^{38} \cdot \frac{10^{-4} \text{ m}^2}{4\pi(1,5 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} \approx 10^{10}. \quad (5)$$

3.1.1 Povprečna prosta pot

Povprečna prosta pot je razdalja, ki jo delec prepotuje med dvema trkoma. Najprej izpeljimo formulo za povprečno prosto pot (l).

Če vzamemo valj s ploščino osnovne ploskve S in višino l , lahko zapišemo njegov volumen kot $V_{valj} = l \cdot S = \frac{V_{cel}}{N_{sikalcev}} = \frac{1}{n}$ in dobimo:

$$l = \frac{1}{nS}, \quad (6)$$

oziroma, če namesto S pišemo sipalni presek σ :

$$l = \frac{1}{n \cdot \sigma}. \quad (7)$$

V zvezdi lahko predpostavimo idealen plin, ker je razdalja med delci dosti večja od velikosti delca (trki med delci so zelo redki). Upoštevamo enačbo hidrostatičnega ravnovesja oziroma mehansko ravnovesje in ocenimo tlak v središču zvezde.

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{\rho GM(r)}{r^2}, \quad (8)$$

kjer je ρ gostota zvezde, $M(r)$ masa zvezde znotraj radija r in G je gravitacijska konstanta. Tlak v središču Sonca znaša približno $3 \cdot 10^{14}$ Pa. Tako visok tlak pa lahko zagotovi le zelo visoka temperatura, ki jo ocenimo s pomočjo enačbe stanja za idealni plin:

$$T_c = \frac{GM_{\odot}M_{p+}}{2R_{\odot}k_B}, \quad (9)$$

kjer je M_{\odot} masa Sonca, M_{p+} masa protona ($1,8 \cdot 10^{27}$ kg), R_{\odot} radij Sonca in k_B Boltzmannova konstanta. Dobimo oceno za centralno temperaturo Sonca $11,5 \cdot 10^6$ K. Pri tako visoki temperaturi je plin ioniziran. To pa pomeni, da elektroni niso več vezani na svoja atomska jedra, ampak so prosti. Zato v zvezdah pride do sipanja elektromagnetnega valovanja na prostem elektronu. To vrsto sipanja imenujemo Thomsonovo sipanje.

Za presek velja izraz:

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e_0^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \right)^2. \quad (10)$$

Sedaj lahko izračunamo povprečno prosto pot fotona:

$$l = \frac{1}{n\sigma} = \frac{m_{p+}}{\sigma\rho} \approx 2\text{cm}, \quad (11)$$

kjer ρ označuje povprečno gostoto Sonca in znaša $\rho = 1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Vidimo, da je prosta pot zelo majhna v primerjavi z velikostjo zvezde. To je razlog, zakaj zvezde niso prozorne (ne vidimo v njihovo notranjost). Drugače pa je z nevtrini.

Sedaj si oglejmo še povprečno prosto pot nevtrinov v zvezdi. Sipalni presek nevtrinov je odvisen od njihove energije. Tipične vrednosti energij Sončnih nevtrinov poznamo, ker jih lahko merimo. Večja kot je energija nevtrina, večji je njegov sipalni presek. Izračunamo ga lahko po naslednji formuli [7]:

$$\sigma_{\nu} = 2 \cdot 10^{-44} \left(\frac{E_{\nu}}{m_e c^2} \right)^2 \text{cm}^2. \quad (12)$$

Za oceno proste poti bomo uporabili $\sigma_{\nu}(E_{\nu} = 0,4\text{MeV}) \approx 10^{-44} \text{cm}^2 = 10^{-48} \text{m}^2$.

Naredimo oceno za povprečno prosto pot nevtrinov:

a) v Soncu ($R_{\odot} = 7 \cdot 10^8$ m):

$$n = \frac{\rho_{\odot}}{m_{p^+}} \doteq 7,8 \cdot 10^{29} \text{ m}^{-3},$$

$$l = 1,3 \cdot 10^{18} \text{ m} \doteq 135 \text{ sv. let.}$$

b) v vesolju (vakuum):

$$n = 1 \text{ m}^{-3},$$

$$l = 10^{48} \text{ m} \doteq 10^{32} \text{ sv. let} \doteq 3 \cdot 10^{31} \text{ pc.}$$

c) v človeškem telesu, ki je pretežno iz vode:

$$n = \frac{\rho N_A}{M} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 3,3 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3},$$

$$l = 3 \cdot 10^{19} \text{ m} \doteq 3100 \text{ sv. let.}$$

d) v nevtronski zvezdi ($R \approx 10000 \text{ m}$):

$$n = 10^{38} \text{ cm}^{-3},$$

$$l \doteq 3300 \text{ m.}$$

Sedaj lahko vidimo, da nevtrini zaradi majhnega preseka redko interagirajo s snovjo, saj je njihova povprečna prosta pot zelo velika. V primeru Sonca vidimo, da v elektromagnetnem delu spektra ne moremo videti v notranjost Sonca zaradi kratke proste poti fotonov, ki rabijo več tisoč let (3000 let), da pridejo do površja Sonca, medtem ko je Sonce za nevtrine prozorno, ker je njihova prosta pot večja od polmera Sonca. Torej lahko vidimo v notranjost Sonca! Zanimiva je tudi primerjava proste poti nevtrinov v zvezdi in polmera zvezde. V primeru nevtronske zvezde je prosta pot nevtrinov krajša od polmera, torej lahko sklepamo, da je gostota zvezde zelo velika.

Sedaj naredimo še oceno števila trkov nevtrinov s protoni oz. nevtroni v našem telesu. Prevodnost (t) izračunamo iz povprečne proste poti in dolžine, ki jo prepotujejo nevtrini po našem telesu (l), razlika $1 - t$ pa nam pove verjetnost za trk nevtrina z delcem v našem telesu (P) [8]:

$$P = 1 - t = 1 - \exp\left(-\frac{l}{l_{\text{voda}}}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{0,5\text{m}}{3 \cdot 10^{19}\text{m}}\right) \doteq 10^{-20}.$$

Verjetnost pomnožimo s številom nevtrinov, ki preletijo naše telo v celotnem življenju ($N \approx 3 \cdot 10^{23}$) in dobimo povprečno število trkov (s) nevtrinov z našim telesom v življenjski dobi (80 let):

$$s \approx 3000.$$

Torej v življenju povprečnega človeka približno 3000 nevtrinov trči v atome v našem telesu oziroma povedano drugače - približno en nevtrini tedensko.

3.2 Supernove

Pomemben vir nevtrinov v vesolju so supernove. Najmasivnejše zvezde (masa večja od $8M_{\odot}$) končajo kot supernove. Jedrske reakcije so en izmed mehanizmov, ki preprečuje gravitacijsko krčenje zvezd v času njihovega življenja. Ko masivni zvezdi zmanjka goriva (vodika v jedru), začne zlivati težje elemente vse do železa. Pri teh reakcijah se sprosti ogromno energije. Ko pa zvezda začne zlivati železova jedra, se energija začne porabljati in jedrske reakcije se ustavijo. Poleg energije se porabljajo še prosti elektroni (v zvezdi sta zelo visoka temperatura in tlak, zato se protoni in elektroni združujejo in tvorijo nevtrone, pri tem se sproščajo elektronski nevtrini), ki pomagajo zvezdi, da se ne sesede. Ko pa začne prostih elektronov primanjkovati, se jedro sesede iz nekaj tisoč v nekaj deset km veliko kroglo (nastane nevtronska zvezda). To se zgodi v nekaj ms. Temu sledi še skrčenje zunanjih ovojnic zvezde, ki z veliko hitrostjo (dober delež svetlobne hitrosti) trčijo v jedro. Nastanejo udarni valovi, ki se širijo stran od jedra. Pri kolapsu sproščena energija (99%) se pretvori v nevtrine. Ker je zunanja plast zvezde sedaj tako zelo gosta, se nekaj odstotkov nevtrinov v njej absorbira. S tem pa zunanje plasti pridobijo dovolj energije, da pride do eksplozije – snov z maso več Sonc ze začne s hitrostjo več tisoč km/s gibati stran od jedra zvezde. To je ena izmed teorij o nastanku supernov.

Nevtrini so bistveni pri razumevanju supernov, saj simulacije kažejo na to, da brez nastanka nevtrinov zvezda ne bi nikoli eksplodirala: udarni val, ki nastane, ko zunanje plasti zvezde trčijo ob nevtronsko zvezdo, bi se v gostem mediju ustavil, če ne bi bilo nevtrinov, ki bi mu predali zadosti energije. Nevtrini so prav tako odgovorni za velike količine elementov težjih od železa, ki nastanejo v supernovah. Nastanek nevtrinov v supernovi je nujen za razumevanje kemijskega razvoja Galaksije. Nenazadnje pa, kot smo že videli pri izračunu proste poti, nevtrini prihajajo iz večjih globlin kot svetloba in imajo zato večji potencial, da napovejo kako nastane nevtronska zvezda.

Najbolj znana (in raziskana) supernova 1987A (odkrita leta 1987), ki se nahaja v Velikem Magellanovem oblaku (oddaljena 160 000 svetlobnih let), je eden najpomembnejših astronomskih dogodkov zadnjega stoletja. To je bila najsvetlejša supernova po Keplerjevi supernovi leta 1604. Prvič so lahko opazovali supernovo v vseh valovnih dolžinah in ravno tako prvič opazovali nevtrine pri takem dogodku.

Supernova 1987A je bila eksplozija modre nadorjakinje, zvezde z maso $20M_{\odot}$. Nevtrini so bili zaznani že tri ure preden so supernovo opazili (je zasvetila v vidni svetlobi). Detektorji na Zemlji so skupaj zaznali 25 nevtrinov. Iz znanih nevtrinskih interakcij in energij zaznanih nevtrinov so ocenili energijo, ki se je sprostila v obliki nevtrinov in znaša $3 \cdot 10^{46}$ J, kar ustreza masi $3 \cdot 10^{29}$ kg ($E = mc^2$). To predstavlja šestino mase Sonca in potrjuje dejstvo, da je večina sproščene energije pri supernovi v obliki nevtrinov. Supernova 1987A je med drugim še en dokaz za neničelno maso nevtrinov, kar vidimo na dva načina:

- Čas prihoda nevtrinov, detektiranih v dveh različnih detektorjih na različnih koncih Zemlje, je bil različen.
- Ker imajo nevtrini maso, potujejo počasneje kot svetloba. Če bi potovali s hitrostjo svetlobe, bi v primeru SN 1987A morali prispeti do Zemlje kar 4 leta pred svetlobo, saj so se na svojo pot podali pred svetlobo. [9] Na žalost je bilo število zaznanih nevtrinov premajhno, da bi lahko izvedeli kaj več o nastanku supernove in o samih nevtrinih. Vendar pa bi v primeru supernove v naši Galaksiji (bila bi 5-krat bližje) zaznali na tisoče nevtrinov, kar bi nam pomagalo pri razumevanju zgoraj omenjenih procesov. Zato lahko le upamo in čakamo.

Nevtrini so zelo pomembni pri proučevanju supernov, saj prispejo do nas pred svetlobo in nas tako opozorijo na supernovo ter nam povejo smer, v kateri se ta pojav zgodi.

3.3 Kozmično nevtrinsko ozadje

Kozmično nevtrinsko ozadje je ozadje sevanja delcev - nevtrinov. To je ostanek velikega poka, ki se je ločil od snovi, ko je bilo vesolje staro dve sekundi. Ocenjeno je, da je današnja temperatura nevtrinskega ozadja okoli 1,95 K. Ker je nevtrine težko zaznati, verjetno ozadje ne bo nikoli direktno videno. Imamo pa posredne dokaze o njegovem obstoju (gostota energijskega sevanja, širjenje vesolja med prvinsko nukleosintezo in vplivi kozmičnega nevtrinskega ozadja na razvoj kozmičnega ozadja (CMB)). [10]

4. Problem Sončevih nevtrinov in nevtrinske oscilacije

Sonce je naravni jedrski fuzijski reaktor, kjer poteka p-p cikel, kot je opisano zgoraj. Pri reakciji se poleg nastalih delcev sprosti tudi energija, del je gre v kinetično energijo nevtrinov, ki brez absorpcije potujejo proti Zemlji iz Sončevih zunanjih plasti. Ko so detektorji nevtrinov na Zemlji postali dovolj občutljivi, da so zaznali nevtrine iz Sonca, je postalo jasno, da je izmerjeno število nevtrinov manjše od teoretične napovedi števila nevtrinov (napove jo standardni sončni model). V več različnih eksperimentih je bilo število nevtrinov za dve tretjini manjše od pričakovane vrednosti. To je postalo znano kot problem Sončevih nevtrinov (Solar neutrino problem).

Začelo se je leta 1960, ko sta Davis in N. Bahcall prvič izmerila tok nevtrinov iz Sonca (pri razpadu ${}^8\text{B}$) in njihov primanjklaj (glede na modelsko napoved). Ravno tako so primanjklaj izmerili neodvisno še drugi detektorji po svetu.

Možni so bili trije razlogi za neujemanje teoretičnih in eksperimentalnih vrednosti:

- napačna teorija
- napačni eksperimentalni podatki
- niso pravilno razumeli kaj se dogaja z nevtrini, ko prepotujejo astronomske razdalje (nevtrinske oscilacije)

Izkazalo se je, da s teorijo in ekperimenti ni nič narobe. Ko so merili nevtrine z nižjimi energijami, so ravno tako zaznali primanjklaj, le da je bil v drugačnem razmerju kot pri nevtrinih z višjimi energijami.

Problem so rešili s poglobljenim razumevanjem lastnosti nevtrinov. Vemo že, da obstajajo tri vrste nevtrinov: elektronski, mionski in tau nevtrino. V Soncu se proizvedejo le elektronski nevtrini, ker je za drugi vrsti energija prenizka, zato so bili detektorji občutljivi le na to vrsto nevtrinov. Dolgo so verjeli, da so nevtrini brezmasni delci, vendar je leta 1968 Pontecorvo predlagal, da je masa nevtrinov različna od nič, posledično pa se lahko spreminjajo iz ene vrste v drugo. Ker je masa nevtrina različna od nič, lastni stanji za šibko interakcijo in masno stanje nista enaki. Ko nastane elektronski nevtrino, je to nevtrino v lastnem stanju šibke interakcije, ki vsebuje v splošnem masna stanja elektronskega, mionskega in tauonskega nevtrina. Ker so mase različnih okusov nevtrinov različne, se vsako od teh stanj različno razvija s časom. Zato po dovolj dolgi prepotovani razdalji dobimo opazljivo interferenco med posameznimi členi. V valovni funkciji se pojavijo deli, ki so lastna stanja šibke interakcije za mionski in tauonski nevtrino. Po določeni razdalji torej lahko nevtrino, ki je nastal prek šibke interakcije elektronskega tipa proži znatno število reakcij mionskega in tauonskega tipa. Takšni spremembi leptonskega števila pravimo nevtrinske oscilacije. Ker proži tudi druge interakcije, zato zaznamo manj procesov elektronskega tipa. [11]

Torej se v Soncu nastali elektronski nevtrini na svoji poti do Zemlje spremenijo v drug tip nevtrinov, ki jih detektorji niso zaznali in zato je prišlo do odstopanj med teoretično napovedjo in eksperimentalnim dejstvom. Verjetno je razlog, zakaj se dve tretjini nevtrinov pretvori v drug okus nevtrina,

povezan z razdaljo med Soncem in Zemljo, ki jo nevtrini prepotujejo in s časom letenja.

Prvi prepričljiv dokaz o nevtrinskih oscilacijah so dobili leta 1998 v detektorju Super-Kamiokande na Japonskem. Zaznali so, da se mionski nevtrini, ki nastanejo v zgornjih plasteh atmosfere (interakcija atmosfere s kozmičnimi žarki), spreminjajo v tau nevtrine. Videli so, da so namerili manj nevtrinov, ko so ti leteli skozi Zemljo, kot bi jih namerili, če bi prihajali direktno v detektor.

Prepričljiv dokaz za oscilacije Sončnih nevtrinov je prišel leta 2001 iz detektorja Sudbury Neutrino Observatory (SNO) v Kanadi. Ta je bil občutljiv na vse tri tipe nevtrinov in tudi razlikoval med elektronskim in ostalima dvema (mionski in tau) nevtrinoma (ni mogel razločiti med mionskim in tau nevtrinom). Odkrili so, da je približno 35% prispelih Sončevih nevtrinov elektronskih, ki so spremenili v mionske ali tau nevtrine. Celotna številka detektiranih nevtrinov se je zelo dobro ujemala s predhodnimi napovedmi, ki so temeljile na fuzijskih reakcijah v Soncu.

5. Detektorji nevtrinov

Ker so nevtrini električno nevtralni delci in grejo neovirano skozi snov, jih je zelo težko detektirati. Zaznamo jih lahko le, če pri eksperimentu interagirajo s snovjo. Nevtrini interagirajo na dva načina: Nabite tokovne interakcije (Charged – Current interactions) (C-C): posredujejo jih nabiti bozoni (W^+ ali W^-). Nevtrino se pretvori v njegov nabit lepton; eksperiment zazna nabit lepton. Nevtralne tokovne interakcije (Neutral – Current interactions) (N-C): posredujejo jih nevtralni bozoni (Z^0). Nevtrino ostane nevtrino, energijo in gibalno količino pa preda snovi s katero interagira. Mi detektiramo energijski prenos.

V osnovi je C-C interakcije lažje zaznati, ker imajo elektroni in mioni karakteristične značilnosti v detektorju in jih je lahko identificirati. Prednost je tudi ta, da iz elektronskega nevtrina nastane elektron in iz mionskega nevtrina nastane mion. Pri tem mora biti na voljo zadosti energije, da lahko nastane masiven lepton z energijo $E = mc^2$. To pomeni, da je za nizkoenergijske nevtrine (Sončni) C-C interakcija mogoča le za elektronske nevtrine. Z različnimi tehnologijami se da optimizirati eksperiment glede na raziskovalne potrebe.

Najnižji energijski prag imajo radiokemijski eksperimenti. Pri tem se nevtrino ujame v atom, ki se nato pretvori (preko inverznega beta razpada, C-C interakcije) v drug atom. Kot medij uporabljajo galij, ki se pretvori v germanij, ali pa klor, ki se pretvori v argon. Ti eksperimenti so neobčutljivi na smer, ne merijo energije in imajo slabo časovno resolucijo (tedni). Zato se uporabljajo le kadar imamo nevtrine z nizkimi energijami (Sončni). Primeri eksperimentov: SAGE, GALLEX/GNO.

Zelo znan detektor nevtrinov je na Japonskem in se imenuje Super-Kamiokande. To je 50000 tonski rezervoar ultra čiste vode (zelo čista voda brez primesi, ki bi lahko ovirale natančnost meritev), ki se nahaja približno 1000 m pod površjem Zemlje (da meritev ne motijo kozmični žarki). Voda v rezervoarju deluje kot tarča za nevtrine, ki občasno interagirajo s snovjo in pri tem nastanejo nabiti delci, katere lahko zaznamo in posredno preko njih tudi nevtrine, ki so povzročili reakcijo in nastanek nabitih delcev. Ogromne količine vode so dovolj velika tarča, da pride do interakcije med nevtrinom in nukleonom ali elektronom. Za zaznavanje nastalih visoko energijskih delcev, ki potujejo skozi vodo, uporabimo Čerenkovo svetlobo, ki jo ti delci sevajo. Do tega pojava pride zaradi dejstva, da delci potujejo skozi vodo hitreje kot potuje svetloba v vodi (pri tem nič ne nasprotujemo posebni teoriji relativnosti, saj je hitrost delca še vedno manjša kot hitrost svetlobe v vakuumu), pri tem pa sevajo modrikasto svetlobo pod značilnim kotom, ki je odvisen od hitrosti delca

$$\cos\phi = \frac{c}{nv}, \quad (13)$$

n je lomni količnik svovi, po kateri potujejo delci, v je njihova hitrost, c pa hitrost svetlobe v vakuumu. Izsevana svetloba potuje skozi ultra čisto vodo detektorja in vpade na fotopomnoževalke. Te

pa morajo biti občutljive na vsak foton, ki jih zadane, saj izsevana svetloba sestoji le iz nekaj fotonov. Intenziteta svetlobe, ki ustreza prehodu nabitega delca skozi vodo je ekvivalentna intenziteti svetlobe, ki jo prejme naše oko od sveče postavljene na razdalji Zemlja – Luna. Fotocelice dobijo informacijo o intenziteti svetlobe in trajanju detekcije. Na podlagi tega lahko določijo energijo, smer prihoda, točko interakcije, okus nevtrina in tip nastalega nabitega delca. [11]

5.1 Metode detekcije nevtrinov

Poznamo več metod detekcije nevtrinov. Super Kamiokande so ogromna količina ultra čiste vode. Fotocelice detektirajo Čerenkovo svetlobo, ki nastane, ko nevtrino interagira z elektronom ali nukleonom in pri tem nastane elektron ali mion. Sudbury Neutrino Observatory (SNO) je zelo podoben, le namesto navadne vode kot medij uporablja težko vodo (D_2O). Nekateri drugi detektorji pa uporabljajo za medij klor ali galij, pri reakciji z nevtrinom pa nastaneta argon ali germanij. Nekateri detektorji pa uporabljajo različne vrste scintilatorjev za detekcijo nevtrinov.

Največ eksperimentov zazna elektronske nevtrine, ki so nizkoenergijski, a nekaj jih zazna tudi mionske in tau nevtrine. Ko mionski nevtrino interagira z nukleonom, proizvede mion, ki potuje le kratko pot, izseva pa Čerenkovo svetlobo. Elektronski nevtrino pri interakciji proizvede elektron. Elektron v detektorju sproži plaz elektronov in pozitronov, pri katerem vsak izseva svoj Čerenkov stožec. Zato krog svetlobe, ki dože detektor ni jasen, pač pa je nepravilne oblike in to je znak za elektronski nevtrino. Ker energije tau nevtrinov niso zadosti velike, da bi nastal delec tau, jih ne moremo zaznati.

Mioni so najprodornejši in zato pustijo najdaljše sledi v detektorju. Elektron se tipično večkrat sipa preden izgubi dovolj energije in pade pod Čerenkov prag, kar pomeni, da elektronski nevtrino ni dober za določanje točke interakcije, so pa uporabni za proučevanje energij. Leptoni tau so kratkoživi in ne prepotujejo daleč preden razpadejo, zato jih težko ločimo od elektronskih plazov. Ločimo jih lahko le, če imajo tau dovolj veliko energijo in prepotujejo dovolj veliko razdaljo.

Kozmični žarki (večinoma so to protoni) ves čas prihajajo do Zemlje, v njeni atmosferi interagirajo z atomi in molekulami, pri tem pa nastanejo mioni, elektroni in nevtrini. Večina mionov izgubi svojo energijo med letom in se ustavijo. Zato se detektorji nevtrinov nahajajo globoko pod površjem (približno 1000 m), da se mioni zagotovo zaustavijo in ne motijo meritev. [12]

6. Zaključek

Raziskovanje nevtrinov je zelo pomembno področje, saj lahko na ta način zelo dobro razumemo fiziko zvezd in nastanka vesolja. Ker zelo redko reagirajo s snovjo, lahko neovirano prepotujejo ogromne razdalje in prinesejo informacije, ki jih fotoni ne morejo. Eden glavnih virov nevtrinov v Soncu so jedrske reakcije v zvezdah. V primeru Sonca smo namerili le tretjino teoretične napovedi števila nevtrinov, ki pridejo na Zemljo in se iz tako imenovanega problema Sončevih nevtrinov naučili marsikaj o njih. Med drugim smo dokazali, da nevtrini imajo maso in posledično lahko na poti od Sonca do Zemlje oscilirajo. Oscilacije nevtrinov še vedno niso natančno poznane. Drugi pomemben vir nevtrinov so eksplozije supernove, kjer nevtrini odigrajo ključno vlogo. Brez nevtrinov se ne bi sprostito dovolj energije in ne bi prišlo do eksplozije. Tudi ti nevtrini kažejo na njihovo neničelno maso, saj potujejo s hitrostjo manjšo od svetlobne. Seveda pa so za vse raziskave zelo pomembni eksperimenti, ki nam omogočajo detekcijo nevtrinov. Z vedno boljšo tehnologijo se tudi ekperimenti izboljšujejo in imamo zato vedno boljše možnosti za detekcijo teh delcev. Zaznavamo vedno nižje energije, zato jih lahko zaznamo večje število, detektorji so občutljivi na vse tri okuse nevtrinov, zato so se oscilacije nevtrinov zares lahko potrdile.

LITERATURA

- [1] en.wikipedia.org/wiki/Neutrino (12. 3. 2014)
- [2] K. Zuber, "Neutrino Physics" IOP Publishing Ltd (2004)
- [3] <http://www.kvarkadabra.net/article.php/nevtrino> (12. 3. 2014)
- [4] R. A. Battye, A. Moss: journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.112.051303 (15. 3. 2014)
- [5] D. Prialnik, "An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution 2nd Ed." Cambridge University Press (2010)
- [6] en.wikipedia.org/wiki/Proton-proton_chain_reaction (15.3. 2014)
- [7] predmeti.fmf.uni-lj.si/astronomija?action=AttachFile&do=get&target=vaje_2012.pdf (15. 3. 2014)
- [8] timeblimp.com/?page_id=1038 (14. 3. 2014)
- [9] www.portalvvesolje.si/index.php?Itemid=11&catid=1:novice&id=405:supernova-1987a-in-ftl-nevtrini&option=com_content&view=article (20. 3. 2014)
- [10] en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_neutrino_background (23. 3. 2014)
- [11] www.kvarkadabra.net/snov/teksti/nevtrino.htm (17. 3. 2014)
- [12] B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, "Particles and nuclei" Springer (1995)