

LEPTONI

1. Uvod

Reč lepton dolazi od grčke reči lak; dugo vremena najlakše poznate čestice elektron i mion (i njihove antičestice) jesu leptoni. Leptoni grade familiju od 6 čestica čije su osobine date u Tabeli 1. Svaki od leptona ima anti-lepton, sa istom masom, spinom i vremenom života i suprotnim naelektrisanjem i unutrašnjom parnošću. Porodica leptona je dalje podeljena u tri generacije: elektron i elektronski neutrino (e, ν_e), mion i mionski neutrino (μ, ν_μ) i τ čestica i τ neutrino (τ, ν_τ).

Tabela 1 Osobine leptona.

Ime	Masa MeV/c^2	Naelektrisanje -e	Spin	Srednji život
e	0.511	-1	1/2	stabilna
ν_e	$<5.1 \cdot 10^{-6}$	0	1/2	stabilna
μ	105.7	-1	1/2	$2.197 \cdot 10^{-4}$
ν_μ	<0.27	0	1/2	stabilna
τ	1777.1 ± 0.5	-1	1/2	$(2.96 \pm 0.3) \cdot 10^{-13}$
ν_τ	<31	0	1/2	stabilna

Pored osobina navedenih u Tabeli 1, svaki lepton ima Leptonski broj $L=1$ (ili za antileptone -1), a članovi svake generacije se dalje karakterišu novim brojem, te tako imamo elektronski leptonski broj $L_e=1$, mionski leptonski broj $L_\mu=1$ i tau leptonski broj $L_\tau=1$. U svakoj generaciji anti leptoni imaju $L_e=-1$, $L_\mu=-1$ i $L_\tau=-1$. Ovi brojevi, leptonski brojevi, i leptonski brojevi pojedinih generacija se održavaju u svim reakcijama u kojima učestvuju leptoni.

Osim po masi, μ i τ čestice izgledaju kao replika elektrona (iako očuvanje generacijskog leptonskog broja implicira da se oni razlikuju na neki fundamentalniji način). Medjutim, dok je elektron stabilna čestica, veće mase μ i τ impliciraju njihovu nestabilnost.

Osobine elektrona su poznate iz atomske fizike i neće biti diskutovane ovde. Potrebno je pomenuti da prema svim raspoloživim eksperimentalnim podacima elektron je tačkasta Dirakova čestica sa radijusom manjim od 10^{-15} cm. Mion je otkriven u proučavanju kosmičkog zračenja gde je nadjeno da gradi "tvrdu" komponentu obimnih pljusкова čestica sposobnih da prodru nekoliko stotina metara kroz čvrste stene. Čestica τ se proizvodi u visoko energetskim (> 4 GeV) e^+e^- sudarima.

Tačna merenja mnogih osobina miona su dobijena iz studija merenja *mezo atoma*. Oni se kreiraju na sledeći način: nakon usporavanja miona kroz neke materijale oni bivaju zahvaćeni u atomu na Borovoj orbiti. Energija mezo atomskih stanja sa glavnim kvantnim brojem n je linearno proporcionalna masi miona

$$E(n) = -\frac{Z^2 e^4 m}{(4\pi\epsilon_0)^2 2n^2 \hbar^2} \quad (1)$$

i oko 200 puta je veća po apsolutnoj vrednosti od energije odgovarajućeg elektronskog stanja; prelazom između nivoa (deekscitacije) emituju se x zraci čija se energija može tačno meriti. Iz karakteristika X zračnog spektra ovakvih atoma, mogu se izvesti vrednosti naelektrisanja, mase i spina miona koje su i date u Tabeli 1. Kao i elektron, i mion je tačkasta Dirakova čestica sa radijusom manjim od 10^{-15} cm. Osobine τ čestica su poznate sa manjom tačnošću, ali osim po masi, vremenu života i generacijskom leptonskom broju oni su isti kao i elektroni i mioni.

Osobine neutrina svih generacija su dobrim delom još uvek nepoznate, i diskutabilno je da li su to različite čestice ili se mogu konvertovati jedna u drugu, da li su zaista bez mase ili ne i da li su stabilni. Prema mnogim teorijama oni igraju glavnu ulogu u evoluciji zvezda i mogu da nose znatan deo tamne materije univerzuma, a takodje pripada im veliki deo mase celokupnog univerzuma.

2. Evidencija o očuvanju leptonskog broja i generacijskih leptonskih brojeva

Leptoni se često proizvode u hadronskim interakcijama, kada se teža čestica pod dejstvom jake interakcije spontano transformiše u lakšu česticu. Kada se dogodi raspad izazvan slabom interakcijom, život čestice je mnogo veći nego u odgovarajućem raspadu izazvanom jakom interakcijom. Prvi od otkrivenih ovakvih raspada je transformacija neutrona u proton. Očuvanje naelektrisanja zahteva da se zajedno sa protonom formira i negativno naelektrisana čestica a očuvanje energije zahteva da to bude elektron. Medjutim ovo nije dovoljno za očuvanje ugaonog momenta jer su sve tri čestice fermioni sa spinom $1/2$, a sistem koji čine proton i elektron ima spin 1 ili 0. Raspad u proton i elektron se takodje ne slaže sa opažanjem da proton i elektron nemaju diskretan energetski spektar što se inače očekuje u interakciji dva tela. Pauli je postulirao da se istovremeno emituje još jedna čestica koja je vrlo teška za detekciju. Ta čestica je fermion i ima spin $1/2$ i nazvana je neutrino. Neutronske raspad se tako piše u obliku



Proton vezan u jezgru se takodje može transformisati u neutron uz emisiju pozitrona i neutrina. Ovaj proces je poznat kao β^+ raspad i predstavlja se šemom



Dugo vremena niko nije sumnjao da su ν_n i ν_p iste čestice. Na veliko iznenadjenje nadjeno je da su ν_n i ν_p različite čestice. Najprostiji način da se to objasni je pretpostavka da u (2) i (3) deluje još jedno pravilo održanja pored održanja naelektrisanja, ugaonog momenta i energije i ovo je nazvano zakon održanja leptonskog broja. Tako elektronu se pridružuje leptonski broj 1, a njegovoj antičestici

pozitronu -1 ; leptonski broj ν_n je -1 a ν_p je $+1$. ν_p je nazvan elektronski neutrino i obeležava se ν_e , a ν_n elektronski antineutrino $\bar{\nu}_e$.

Očuvanje leptonskog broja se primenjuje na sve reakcije u kojima učestvuju čestice i jezgra, i nisu nadjeni izuzeci od ovog zakona.

Prema ovom pravilu leptoni se kreiraju jedino u paru sa antileptonom. Pored toga oni su uvek iste generacije. Tako u procesu proizvodnje para γ zračenja, formira se elektron pozitronski par e^+e^- , a na višim energijama i par $\mu^+\mu^-$ ali se nikad ne formira par $e^+\mu^-$.

Raspad

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma \quad (4)$$

a koji je dozvoljen zakonima očuvanja energije momenta impulsa i leptonskog broja se ne opaža. Nepostojanje ovakvog procesa dovodi do uvođenja generacijskog leptonskog broja.

Drugi važan proces je raspad neelektrisanog piona u mion i neutrino

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (5)$$

Postojanje ovog procesa dovelo je do uvođenja mionskog neutrina.

Prema ovom zakonu raspad negativnog miona ide na elektron i dva neutrina

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (6)$$

a za pozitivni mion je

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (7)$$

3. Opažanje elektronskog neutrina i elektronskog anti-neutrina

Neutrino je vrlo teško opaziti. Prvo opažanje neutrina učinili su Reines i Cowan kasnih pedesetih godina, tačno 25 godina nakon što je Pauli 1932 predvideo njihovo postojanje. Ovo je učinjeno preko inverzne reakcije

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad (8)$$

koristeći intenzivni fluks $\bar{\nu}_e$ u nuklearnoj elektrani Savannah River. Bilo je vrlo teško opaziti ovu reakciju jer je efikasni presek usrednjen preko anti neutrinog spektra reda 10^{-43} cm^2 . Antineutrini su bombardovali dva tanka sa 200 l vode sa rastvorom soli CdCl_2 . Svaki tank je bio u sendviču između dva detektora sa tečnim scintilatorom (oko 5400 l) od kojih je svaki "posmatralo" 110 fotomultiplikatora. Očekuje se (1) dva gama kvanta od po 0.511 MeV od anihilacije pozitrona sa

elektronom; (2) cadmijum apsorbuje neutrone preko (n,γ) reakcije i energija γ iz ovog procesa je dobro poznata. Karakteristični signal reakcije je koincidencija (istovremenost) dva 0.511 MeV fotona koji potiču od anihilacije pozitrona sa elektronom u vodi sa signalom od gama zračenja koji kasni oko $10\ \mu\text{s}$ (koliko je potrebno da se neutron uspori u scintilatoru i bude zahvaćen na cadmijumu preko n,γ reakcije). Eksperiment je pokazao razliku u broju signala kada je elektrana u radu i kada je ugašena i ta razlika je odgovarala fluksu neutrina od reaktora (10^{13} neutrina $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

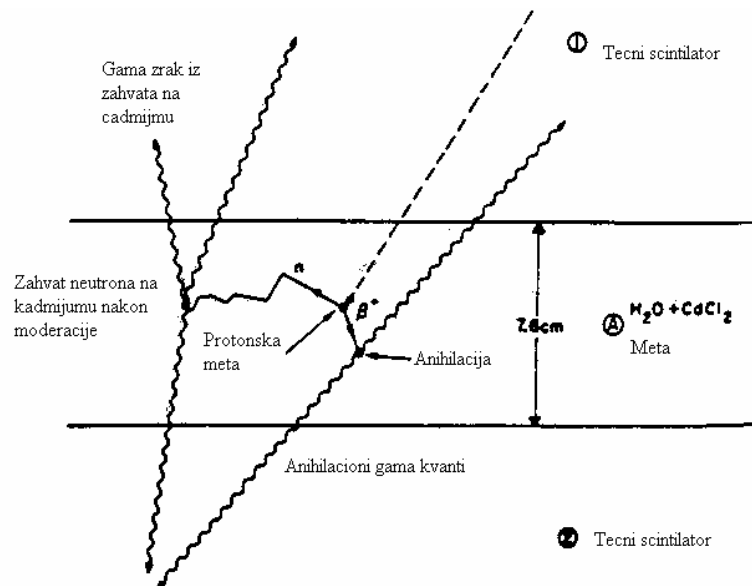
Sličan eksperiment je takodje obavljen od strane Davisa sa ciljem da se ispita da li elektronski anti neutrino proizvodi sledeću reakciju na neutronu



Ako su neutrino i antineutrino iste čestice onda se ovakva reakcija očekuje sa istim prinosom kao i (8). Eksperiment je dao negativan rezultat što je pokazalo da su neutrino i antineutrino različite čestice. Ovaj zaključak je kasnije potvrđen u beta raspadu.

4. Evidencija o različitosti neutrina u tri leptonske generacije

Očuvanje generacijskog leptonskog broja je zasnovano na pretpostavci o različitoj prirodi neutrina u različitim generacijama. Postoji eksperimentalna potvrda da je ovo tačno za elektronski i mionski neutrino.



Slika 1. Shematski dijagram procesa koji se očekuju posle događanja reakcije (7).

Kada visoko energetske protoni (nekoliko GeV) bombarduju metu bilo kog elementa proizvodi se veliki broj pozitivnih i negativnih piona. Oni imaju vreme života $2.6 \cdot 10^{-8}$

⁸ s i raspadaju se u mion i neutrino. Mogući raspad i prema očuvanju konzervacije generacijskog leptonskog broja su

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (10)$$

i

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (11)$$

Između izvora neutrina i mete postavlja se debela zaštita sa ciljem zaustavljanja proizvedenih miona, piona i ostalih čestica. Iza zaštitnog ekrana prodiru samo neutriini i odlaze u metu. Kada ovi neutriini interaguju sa protonima i neutronima u detektoru, proizvode se elektroni, pozitroni i mioni. Ako se leptonski generacijski broj očuvava, onda možemo da očekujemo sledeće reakcije

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \quad (12)$$

i

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n \quad (13)$$

ali su reakcije

$$\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p \quad (14)$$

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + n \quad (15)$$

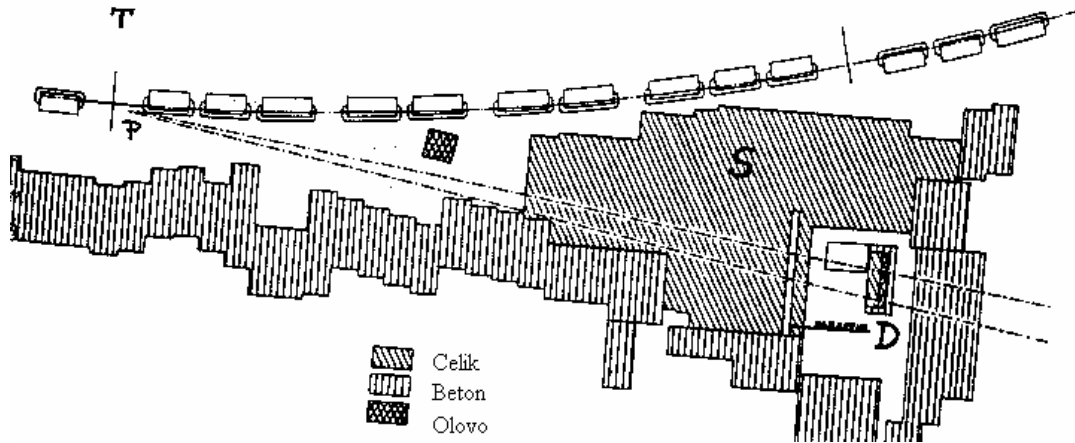
zabranjene. Eksperimenti su pokazali da se odigravaju reakcije (12) i (13), a ne i (14) i (15) što je potvrda da je mionski neutrino različit od elektronskog broja i da se očuvava generacijski leptonski broj.

Broj τ neutrina koji se proizvodi u reakcijama je tako mali da do sada nije bilo moguće dokazati da su oni različiti od elektronskog i mionskog neutrina. Međutim, pretpostavlja se da očuvanje generacijskog leptonskog broja važi i za treću leptonsku generaciju. Pretpostavlja se da se τ čestica raspada uz emisiju τ neutrina na sledeći način

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau \quad (16)$$

ili

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau \quad (17)$$

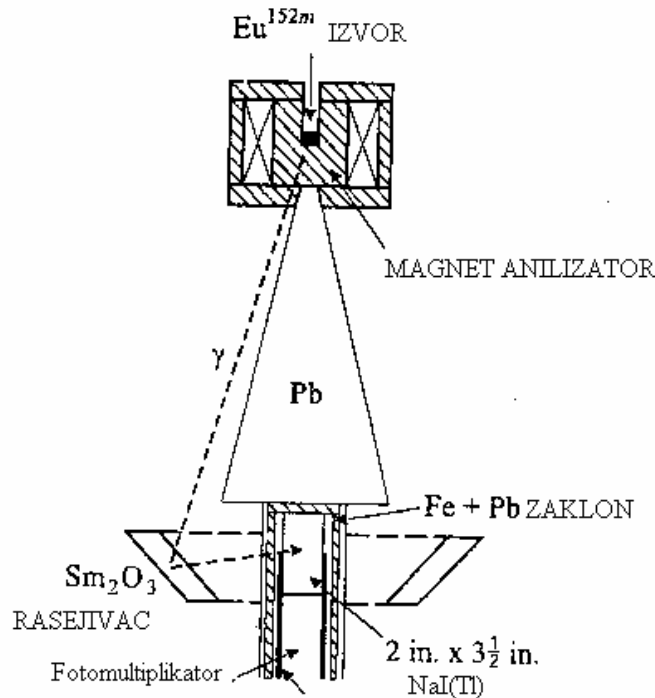


Slika 2. Shematksi dijagram Danby-jevog eksperimenta (1962). Dve isprekidane linije predstavljaju dva neutrina koji potiču od raspada π^\pm mezona proizvedenih na meti T snopom protona energije 15 GeV u sinhrotronu u Brookhaven. Posle 21 m leta neutrina udaraju 13.5 m čelični zaklon S pre ulaska u varničnu komoru D.

5. Neutrinski helicitet

Postavlja se pitanje ako su neutrino i anti neutrino različite čestice, u čemu je onda razlika između njih. Kako nemaju elektromagnetske osobine, možemo razmatrati helicitet definisan kao $h = \vec{s} \cdot \vec{p} / |\vec{s} \cdot \vec{p}|$ gde je \mathbf{s} spin i \mathbf{p} impuls neutrina, kao moguću karakteristiku koja pravi razliku između njih. Ako je spin paralelan impulsu onda je helicitet $h=1$, a ako je anti paralelan, onda je $h=-1$. Prema teoriji relativnosti, da bi helicitet bio karakteristika čestice, onda ta čestica mora da se kreće brzinom svetlosti, a to znači da bi morala da bude bez mase. U suprotnom, ako se kreće brzinom manjom od c , onda bi dva posmatrača od kojih se jedan kreće brže, a drugi sporije od neutrina izmerili suprotan helicitet, (jer bi videli različite impulse neutrina) te onda to ne bi bila karakteristika čestice.

Eksperiment koji su izveli Goldhaber i dr. je pokazao da elektronski neutrino ima negativan helicitet. Drugi eksperimenti su takodje pokazali da i mionski neutrino ima negativan helicitet. Važna teorema relativističke kvantne teorije polja, tzv CPT teorema (biće više reči kasnije) tvrdi da anti neutrina imaju pozitivan helicitet. Prema opšte prihvaćenoj teoriji slabe interakcije, ako su neutrina bez mase, oni uvek imaju negativan helicitet a antineutrina pozitivan. Ako pak, neutrina imaju nenultu masu ovo prethodno ne mora biti tačno, iako se u eksperimentima dobijaju neutrina sa



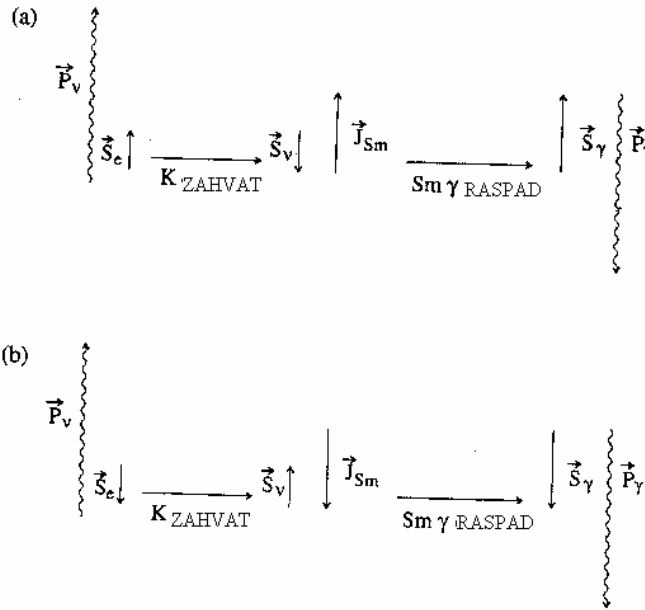
Slika 3. Aparatura koju je koristio Goldhaber (1958) za merenje neutronske heliciteta. Gama zračenje iz ^{152}Sm izvora ne može direktno da stigne u NaI scintilator usled postojanja Pb zaštitnog ekrana. Detektor može da registruje jedino gama zračenje Sm atoma rasejivača Sm_2O_3 gde se događa reapsorpcija zračenja. Elektromagnet se koristi da meri helicitet gama zračenja emitovanog u pravcu suprotnom od neutrina od strane jezgra Sm proizvedenih u elektronskom zahvatu metastabilnog stanja ^{152m}Eu

6. Masa neutrina

Prethodna sekcija je pokazala da je pitanje određivanja da li neutrino ima masu ili ne vrlo važno. Problem je takodje povezan sa takozvanim neutrinским oscilacijama, koje su moguće ako neutrimi imaju masu različitu od nule; pri tome neutrimi jedne generacije se mogu transformisati u drugu generaciju narušavajući očuvanje generacijskog leptonskog broja.

Zadnjih nekoliko godina provedeno je dosta eksperimenata određivanja mase neutrina. Svi rezultati su konzistentni sa pretpostavkom o nultoj masi neutrina i daju gornju granicu mase, date u Tabeli 1, neutrina u sve tri generacije.

U slučaju elektronskog neutrina najtačnije određivanje njihove mase je pri



Slika 4. Shematski dijagram koji pokazuje da u Goldhaber-ovom eksperimentu neutrini i gama zranci emitovani u suprotnim pravcima imaju isti helicitet

proučavanju maksimuma tj. krajnje energetske tačke elektrona emitovanih u β raspadu tricijuma po šemi



Ako neutrino ima nultu masu, pored vrlo male korekcije za uzmak helijuma ${}^3\text{He}$ krajnja tačka elektronskog spektra bi trebala da je jednaka Q vrednosti 18.6 keV; ako pak, neutrino ima masu, krajnja tačka bi trebala da bude niže, oblik spektra blizu krajnje tačke bi treba da se promeni i razlika između Q vrednosti i krajnje tačke bi trebala da da masu neutrina. Problem koji se ovde nameće je vrlo tačno merenje spektra β čestica. Najtačnija skorašnja merenja daju gornju granicu mase neutrina manju od 5.1 eV sa granicom poverenja od 95 %.

U slučaju mase miona najtačnija gornja granica mase se dobija u proučavanju π^+ raspada



i dobijena je gornja granica od 270 keV.

Najtačnija gornja granica mase τ neutrina se dobija u proučavanju τ^- raspada

$$\tau^- \rightarrow 3\pi^- + 2\pi^+ + \nu_\tau \quad (20)$$

i dobijena je gornja granica od 31 MeV.

7. Problem solarnih neutrina

Najveći izvor elektronskih neutrina je sunce i interakcije solarnih neutrina sa materijom su privukle puno pažnje sa ciljem što tačnijeg merenja fluksa neutrina radi provere sadašnjih teorija sunca (takozvani standardni sunčev model) i mehanizama proizvodnje energije u zvezdama sunčevog tipa, a i radi proučavanja osobina neutrina. Dobijeni rezultati u suštini predstavljaju izazov astrofizičkim teorijama i našem znanju o neutrinima, i ovo je izazvalo nove eksperimente u vezi sa masom neutrina, neutrinским oscilacijama i čak se razmatra mogućnost da oni imaju magnetski momenat.

Energija sunca je nuklearnog porekla. Gravitaciona kontrakcija je podigla temperaturu sunčevog jezgra do oko 10^7 K i ovo je izazvalo fuziju četiri protona u α česticu

$$4p \rightarrow \alpha + 2e^+ + 2\nu_e + 24.64 \text{ MeV} \quad (21)$$

Dva niza reakcija, nazvanih ciklusi se odigravaju sa ishodom u prethodnoj jednačini. Prvi ciklus, p-p se odigrava u oko 98 % slučajeva a u preostala 2 % slučajeva odigrava se CNO ciklus.

Verovatnoća da neutrino interaguje sa materijom je tako mala da neutriini proizvedeni u sunčevom jezgru izlaze iz sunca bez daljih interakcija. Iz fuzionih reakcija moguće je izračunati spektar solarnih neutrina koji dolaze do zemlje i to je superpozicija više kontinualnih spektara i diskretnih linija (Vidi sliku 5). Računanje zahteva skup ulaznih parametara, od kojih je najvažniji temperatura solarnog jezgra i njeno određivanje zahteva ekstrapolaciju efikasnih preseka interakcije lakih čestica sa materijom do energija koje su mnogo manje od onih na raspolaganju u laboratoriji.

Prvi pokušaj merenja fluksa solarnih neutrina datira u 1973 god i korišćena je reakcija

$${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^- \quad (22)$$

Ova reakcija ima prag od 0.814 MeV i može se koristiti za detekciju samo malog dela ukupnog neutrinškog fluksa, uglavnom od neutrina emitovanih u raspadu radioaktivnog izotopa bora ${}^8\text{B}$ koji se proizvodi u samo 0.02% slučajeva u p-p ciklusu. Neutrinški detektor punjen sa 615 t C_2Cl_4 smešten u Homestake rudniku zlata u Južnoj Dakoti, na 4100 m (vodeni ekvivalent stena) radi zaštite od kosmičkog zračenja. Očekivano je $(6 - 8) \cdot 10^{-36}$ interakcija solarnih neutrina po jednom atomu mete u sekundi (ovo se naziva SNU-solar neutrino units). Srednja vrednost izmerena u toku 20 godina je (2.25 ± 0.24) SNU što je tek oko 30 % od očekivane vrednosti.

Drugi eksperiment Kamiokande II je smešten u dubini 2700 m vodenog ekvivalenta. Detektor je osetljiv samo na neutrine sa energijom većom od 5.6 MeV i zahvata samo

deo neutrina emitovanih u ${}^8\text{B}$ raspadu. Ovo merenje je omogućilo određivanje neutrinskog spektra i oblik je konzistentan sa očekivanim, ali je i u ovom slučaju fluks neutrina manji nego što je predviđena vrednost (oko 55 % očekivane vrednosti).

Iako je predviđeni fluks ${}^8\text{B}$ solarnih neutrina veoma zavisian od temperature jezgra sunca, razlika između teorijskog očekivanja i eksperimenta sugerira postojanje mehanizama koji smanjuju originalni fluks neutrina. Jedna mogućnost je oscilacija neutrina koja izaziva konverziju elektronskog neutrina u letu iz centra sunca do zemlje u druge generacije neutrina koje ne izazivaju reakciju (22). Takođe je shvaćeno da je nužno probati merenje većeg dela neutrinskog spektra. Među predloženim različitim metodama najperspektivnijom se smatra sledeća zasnovana na reakciji

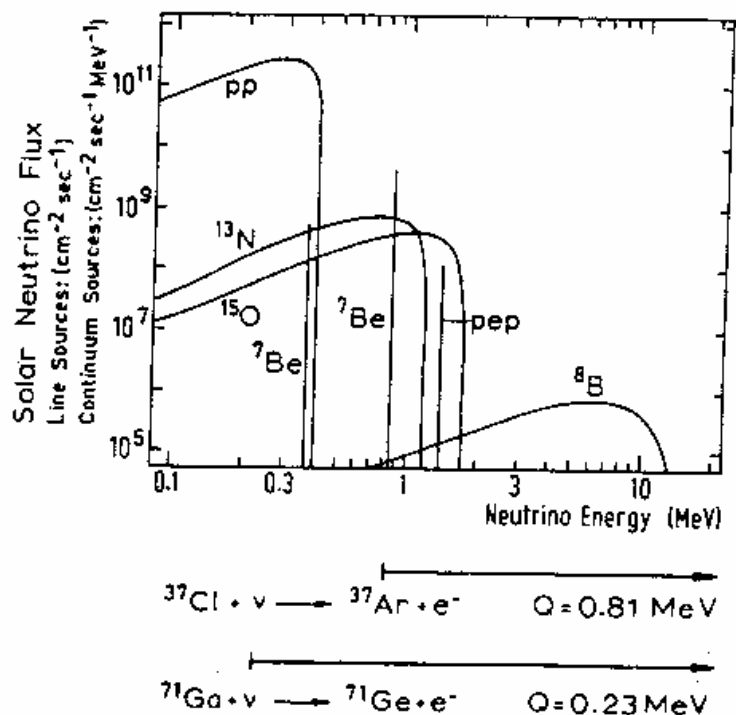


sa pragom od svega 233 keV. Eksperiment zasnovan na ovoj reakciji, nazvan Gallex, sprovodi se u Italiji u Gran Sasso laboratoriji, gde niskoradioaktivne stene ekvivalentne 3500 m vode, smanjuju kosmičko zračenje za 10^6 puta u odnosu na fluks na površini tla. Detektor se sastoji od 30 t rastvora GaCl_3 . Jezgra Ge proizvedena usled interakcije sa neutrinom se ekstrahuju kao GeCl_4 i konvertuju se u GeH_4 specijalnom hemijskom procedurom. Intenzitet neutrinskih interakcija je 79 ± 10 SNU dok je očekivani fluks 128 ± 10 SNU te je i u ovom eksperimentu dobijeno znatno manje od teorijskog očekivanja. Drugi eksperiment koji koristi jednačinu 23, tzv SAGE eksperiment sa 60 t etalnog Ge daje sličan rezultat.

Rezultati Gallex i SAGE eksperimenta daju prvi direktni dokaz o postojanju p-p ciklusa kao izvor energije sunca. Oni su takođe kompatibilni sa očekivanim prinosom neutrina proizvedenih u reakciji



koja daje glavni doprinos fluksu solarnih neutrina. Rezultati ovih eksperimenata se moraju uzeti znatno ozbiljnije nego eksperimenti sa visoko energetske neutrinima jer je zavisnost fluksa niskoenergetskih neutrina od ulaznih parametara, kao što je temperatura sunca, znatno manja.

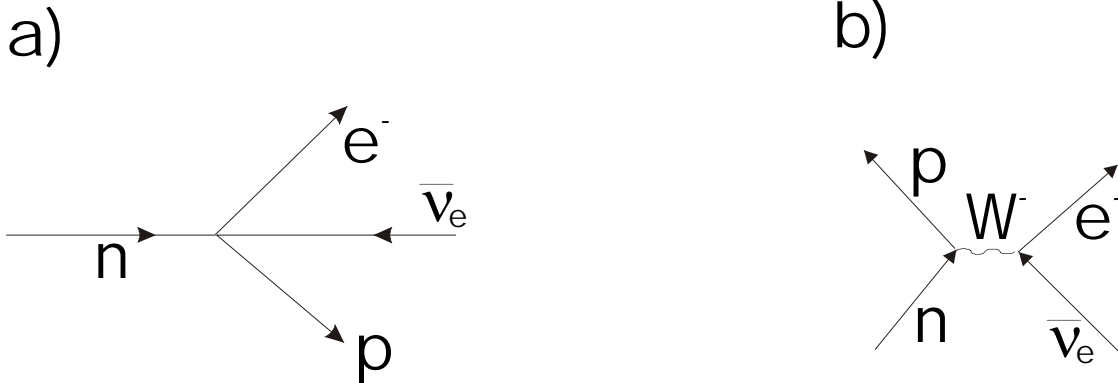


Slika 5. Raspodela fluksa solarnih neutrina predvidjenih SSM na rastojanju 1 astronomska jedinica od sunca. Na dnu figure linije prikazuju energetske pragove korišćenih detektora, respektivno, Homestake, Gallex i Sage eksperimenta.

8. W i Z gauge bozoni

Diskusija osobina leptona je nekompletna bez nekoliko reči o česticama koje prenose slabu interakciju.

U vrlo uspešnoj teoriji β raspada Fermi je pretpostavio da se neutron može transformisati u proton, elektron i anti neutrino, direktno bez nekog medjuprocasa, što je šematski predstavljeno na slici 6. Njegova teorija je bila vrlo uspešna, ali se može pokazata da na visokim energijama rešenja divergiraju, ako se uključe i korekcije višeg reda.

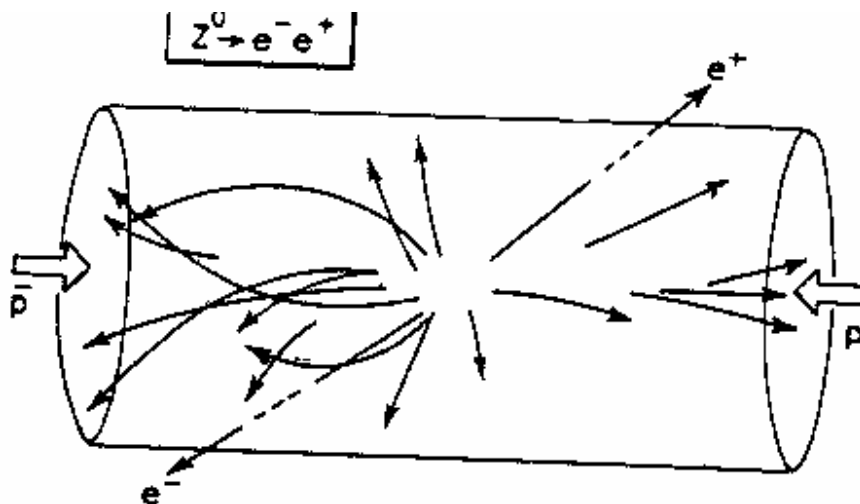


Slika 6. Model β -raspada neutrona prema: (a) Fermiju i (b) prema teoriji elektroslike interakcije Glashow-Salam- Weinberg.

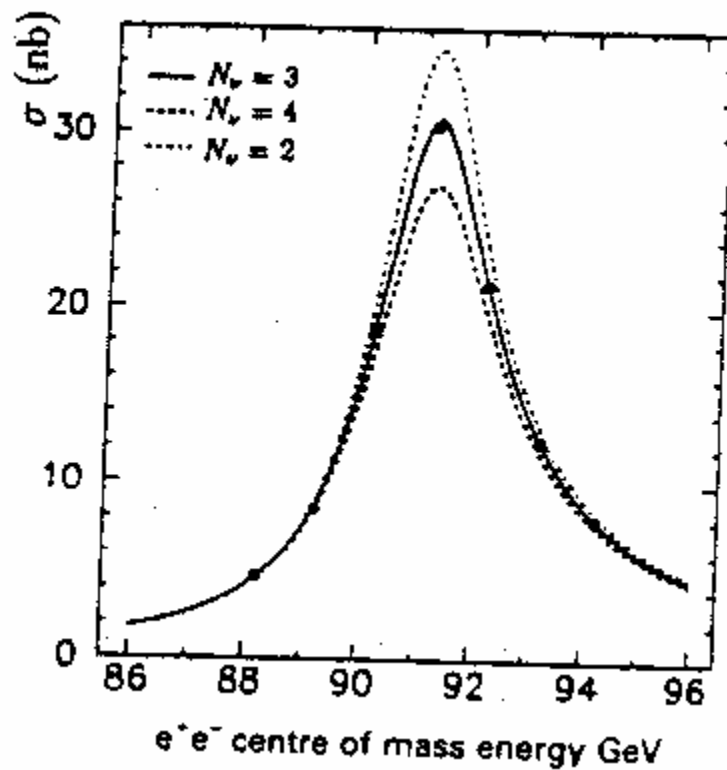
Rešenje se može naći ako se pretpostavi da se raspad odvija po Feynmanovom dijagramu datom na slici 6b. Virtuelna medju-čestica je W^- gauge bozon. Term *gauge* indicira da je ona pridružena polju koje je invarijantno na neke transformacije kao što je pretpostavljeno u teoriji elektroslike interakcije razvijene od Glashowa, Salama i Weinberga. U transformaciji protona u neutron takodje učestvuje intermedijarni gauge bozon, W^+ . Grupa ovih bozona se kompletira neutralnim Z^0 bozonom čije su osobine slične protonu i naziva se i teški proton. Ovi bozoni su otkriveni 1983 godine proučavanjem čeonih sudara protona i anti protona, koji se kreću u suprotnim pravcima u prvom hadronskom kolajderu u CERN u. Relativna energija u eksperimentu je iznosila 540 GeV. Ove interakcije obično proizvode mlazeve hadrona, ali je u izvesnom broju slučajeva bilo moguće detektovati elektron pozitronski par u opoziciji kao što je prikazano na slici 7. Njihova energija, i ugaona korelacija je bila ista kao što se i očekuje ako oni potiču od raspada čestice Z^0 sa masom od oko 90 GeV. Drugi događaji su implicirali formiranje i raspad W^\pm bozona. Osobine ovih bozona su predviđene elektroslabom teorijom i bile su potvrđene mnogo obilnijim podacima dobijenim na Large-Electron-Positron kolajderu (LEP) u CERN u. Eksperimenti na LEP u su omogućili pažljivije proučavanje osobina gauge bozona, naročito njihovih masa mirovanja, energije i vremena života. Slika 8 pokazuje efikasni presek proizvodnje hadron-antihadron u sudaru elektron-pozitron, u funkciji energije u sistemu CM mereno na LEP sa tzv OPAL detektorom. Efikasni presek interakcije elektron-pozitron pokazuje rezonancu na 91.19 GeV sa širinom FWHM=2497 MeV. Ova rezonanca odgovara Z^0 . Vreme života Z^0 je $\tau = \hbar / \Gamma_Z \approx 3 \cdot 10^{-25} s$. Jedan od najznačajnijih rezultata dobijenih sa LEP je da je Γ_Z konzistentno sa postojanjem tri generacije neutrina (a ne više). Γ_Z je suma parcijalnih širina koje odgovaraju različitim raspadima Z^0 . Neke od ovih širina se mogu tačno meriti pošto odgovaraju proizvodnji naelektrisanih parova lepton-antilepton (e^+e^- , Γ_{ee} ; $\mu^+\mu^-$, $\Gamma_{\mu\mu}$; $\tau^+\tau^-$, $\Gamma_{\tau\tau}$) ili para hadron-antihadron, koji se mogu lako detektovati. Njihova suma je oko 500 MeV manja od Γ_Z i ova je vrednost parcijalna širina za raspad Z^0 u neutrino-antineutrino parove iste generacije. Elektroslabela teorija predviđa da su vrednosti neutrino-antineutrino parcijalne širine

$\Gamma_{\nu\bar{\nu}}$ iste za sve generacije i takodje predvidja da je širina proizvodnje svakog para neutrina oko 166 MeV što je oko jedne trećine nedostajuće vrednosti.

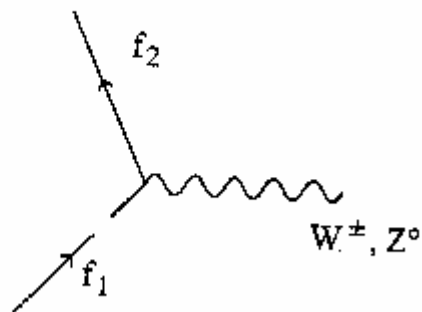
W^\pm i Z^0 gauge bozoni medijiraju u svim slabim interakcijama kao na primer u *semileptonskim* u kojima se hadroni i leptoni proizvode, *leptonskim* kao $\pi^+ \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$, i *neleptonskim* kao što je raspad K mezona u dva piona. Oni su nužni za objašnjenje svih slabih interakcija od kojih su neke predstavljene šematski na slici 9. Ovi Feynmanovi dijagrami uvek uključuju «vertex» (čvor, ugao, vrtlog) gde su f_1 i f_2 fermioni, (bilo leptoni bilo kvarkovi). Ovi dijagrami se lako mogu konstruisati ako se znaju interagujuće čestice, primenom sledećih prostih pravila: (a) električno naelektrisanje se mora održavati, (b) leptonski broj, i leptonski generacijski brojevi se moraju održavati (c) broj kvarkova i boja kvarkova se održava (d) flavour kvarka se ne održava.

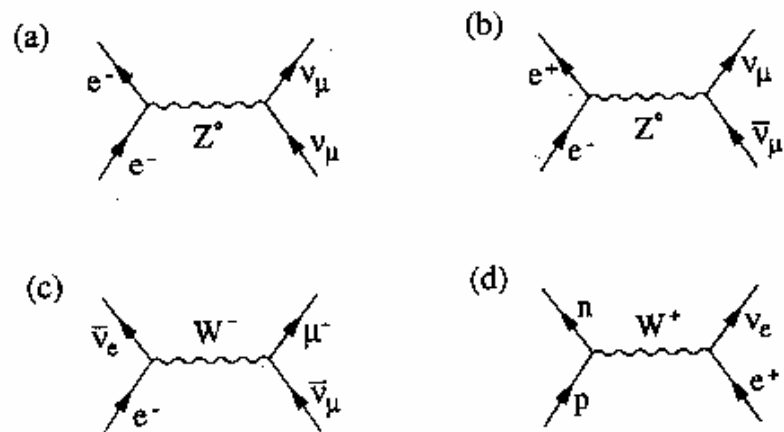


Slika 7. Raspad Z^0 bozona proizvedenog u sudaru $p-\bar{p}$ je otkriven detekcijom energetskog para elektron pozitron emitovanih u opoziciji sa velikim transverzalnim momentom.



Slika 8. Efikasni presek proizvodnje hadrona u e^-e^+ sudarima kao funkcija energije u sistemu CM mereno na LEP sa OPAL detektorom. Kriva pokazuje teorijska predvidjanja pretpostavljajući da postoje 2, 3 ili 4 generacije bezmasenih neutrina.





Slika 9. Feynmanovi dijagrami nekoliko slabih interakcija medijiranih Z^0 i W^\pm bozonima. (a) rasejanje ν_μ - e^- , (b) $e^+e^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ (c) $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^-$, (d) $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$.