

Природно-математички Факултет
Радна заједница заједничка аспирација
Нови Сад

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Грађани:	10	1981.
Орг. бр.:	БФ	датум издавања
03 10/39		

D I P L O M S K I R A D

-OSOBINE NEUTRINA-

Novi Sad, 1981.

Šalić Zlatko

Zahvaljujem se profesoru Milanu dr Nikoliću na sugestijama
datim u toku izrade ovog diplomskog rada

SADRŽAJ

1. Uvod - otkriće neutrina	1
2. Izvori neutrina i detekcija neutrina	4
3. Elektronski antineutrino	9
4. Elektronski neutrino	12
5. Mionski neutrino i antineutrino	14
6. Tau-leptonski neutrino i antineutrino	16
7. Naelektrisanje, spin i magnetni moment	17
8. Leptonski brojevi	19
9. Helicitet	21
10. Masa mirovanja	24
11. Oscilacije neutrina	27
12. Zaključak	29
Literatura	30

1. UVOD-OTKRIĆE NEUTRINA

U eksperimentima koje je vršio Chadwick 1914. godine je ustanovljeno da elektroni nastali pri beta-raspadu atomskih jezgara imaju kontinualan energetski spektar. Međutim, prema kvantnoj teoriji, jezgro pre i posle raspada ima određene vrednosti energije, pa bi i elektroni koji nastaju u raspadu jezgara trebali da imaju tačno određenu energiju. Ovo neslaganje eksperimenta i teorije, u kom se prividno narušava zakon održanja energije, predstavlja predistoriju otkrića neutrina.

Godine 1930. Pauli je u svom pismu upućenom učesnicima seminara u Tjubingenu izneo hipotezu o postojanju nove elementarne čestice. Ako jezgro pri beta-raspadu ispušta tu česticu zajedno sa elektronom, onda bi ove dve čestice mogле raspodeliti diskretnu vrednost raspoložive energije na razne načine, što dovodi do kontinualnog oblika beta-spektra. U tom slučaju nema narušavanja zakona o održanju energije. Razlog zašto ta nova čestica nije registrovana verovatno leži u njenoj slaboj interakciji sa materijalom. Na osnovu eksperimentalnih podataka o beta-raspadu Pauli je izveo zaključak da ova čestica treba da ima nulto nanelektrisanje, spin $1/2$ i masu manju od mase elektrona.

Uvođenjem nove čestice se može objasniti i prividno narušavanje zakona održanja impulsa i momenta impulsa, koje je takođe ustanovljeno u eksperimentima.

Hipoteza o postojanju nove elementarne čestice koja vrlo slabo interaguje sa materijalom je bila smela, jer su u to vreme bile poznate samo tri elementarne čestice: elektron, proton i foton. Sam Pauli je rekao: "Ja sam sada učinio nešto užasno. Fizičar-teoretičar ne bi nikada trebao to da radi. Ja sam predložio nešto što se nikada neće moći proveriti eksperimentalno."

Bor je, na primer, pretpostavio da se pri pojedinačnim fizičkim događajima u mikrosvetu narušava zakon održanja energije, a da se ispoljava jedino statistički u makrosvetu.

Paulijevu hipotezu je podržao Fermi, smatrajući da je to fizički bolja ideja nego statističko održanje energije. On je i predložio naziv "neutrino" za novu česticu, nakon otkrića neutrona 1932. godine.

Posle toga je Pauli 1933. godine u svom referatu na kongresu fizičara u Solveju formulisao osnovna svojstva neutrina.

✓

Godine 1934. Fermi je stvorio teoriju beta-raspada u koju je bila uključena Paulijeva hipoteza. Ova teorija je ispravno opisivala osnovne karakteristike beta-raspada, što je bio prvi korak ka priznanju neutrina. Osim toga, Fermijeva teorija je dopuštala mogućnost da neutrino ima svoju antičesticu-antineutrino.

Prema Fermijevoj teoriji za beta-raspad je odgovorna slaba interakcija. Vremenom je utvrđeno da neutrino učestvuje samo u onim procesima koji su izazvani slabom interakcijom. Saglasno tome, neutrino spada u leptone.

Posle uspeha Fermijeve teorije beta-raspada fizičari su počeli da vrše eksperimente u kojima je trebalo dokazati postojanje neutrina.

Pokušaji da se otkrije ionizaciono dejstvo neutrina, koje su vršili Nahmias 1935. godine i Wollan 1947. godine, su ostali bez uspeha. Time je samo potvrđeno da neutrino vrlo slabo interaguje sa materijalom.

Iz Fermijeve teorije je sledilo da atomsko jezgro pri zahvatu orbitalnog elektrona ispušta neutrino. Tada, na osnovu zakona održanja impulsa, uzmaknuto jezgro i ispušteni neutrino imaju impulse iste veličine i suprotnog smera. Prva uspešna merenja impulsa, odnosno energije uzmaka je sproveo Allen 1942. godine u sledećem elektronском zahvatu:



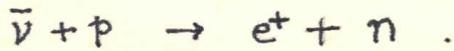
Dobijeno je odlično slaganje eksperimentalne i teorijske vrednosti, koje je potvrđivalo postojanje neutrina. Ipak, pošto je bilo dovedeno u sumnju važenje zakona održanja energije i impulsa u mikrosvetu, eksperimenti određivanja energije uzmaka su smatrani za indirektni dokaz neutrina.

Bethe i Bacher su 1936. godine ukazali na mogućnost direktnе detekcije neutrina preko inverznog beta-procesa:



/1/

ili:



/2/

Međutim, teorijski izračunat efikasni presek za te reakcije je mali-reda veličine 10^{-43} cm^2 , i u to vreme nije mogao da se meri u eksperimentima.

Eksperimentalno posmatranje reakcija sa tako malim efikasnim presekom je postalo moguće tek posle izgradnje snažnih nuklearnih reaktora, pri čijem radu nastaje veliki fluks antineutrina.

Izvor velikog broja neutrina /antineutrina/i detektor sa velikim brojem neutrona /protona/ povećavaju verovatnoću za registraciju reakcija /1/ i /2/.

Reines i Cowan su 1956.godine u Los Alamosu izveli eksperiment u kom je preko reakcije /2/ dokazano postojanje antineutrina,a time i neutrina.

Iste godine je Davis eksperimentalno pokazao da neutrino i antineutrino iz reakcija /1/ i /2/ nisu identični.

Pretpostavke o tome da se razlikuju neutrino koji se pojavljuje uz elektron i neutrino koji se pojavljuje uz mion su potvrđene u eksperimentima vršenim 1962.godine.

Perl je 1975.godine otkrio i treći naelektrisani lepton -tau lepton i pretpostavio da se uz njega pojavljuje treći tip neutrina -tau leptonski neutrino.

Ova tri tipa neutrina možda mogu da se pretvaraju jedan u drugi,kako je to predložio Pontekorvo 1958.godine za elektronski i mionski neutrino.Međutim,tau leptonski neutrino,isto kao i prelazi /oscilacije/ neutrina,nisu potvrđeni eksperimentalno,tako da se neutrino za sada smatra za stabilnu elementarnu česticu.

2. IZVORI NEUTRINA I DETEKCIJA NEUTRINA

Prirodni izvori neutrina su: Zemlja, njena atmosfera, Sunce, supernove zvezde, sav kosmički prostor i reliktno zračenje. Veštacki izvori neutrina su: nuklearni reaktori i akceleratori.

Zemlja

U Zemlji se nalazi izvesna količina radioaktivnih elemenata od kojih se neki raspadaju beta-minus raspadom. U jezgru radioaktivnog atoma, pri beta-minus raspodu, neutron prelazi u proton, a ispuštaju se elektron i elektronski antineutrino:



Na taj način, Zemlja se javlja kao izvor elektronskih antineutrina.

Mark i Menyhard su procenili da antineutrinska aktivnost Zemlje potiče uglavnom od beta-radioaktivnih elemenata koji nastaju pri postupnom raspodu urana-238 i torijuma-232, i od dugoživećih izotopa: kalijuma-40 i rubidijuma-87. Antineutrinska aktivnost ostalih beta-radioaktivnih elemenata je zanemarljiva.

Kada se uzmu u obzir rasprostranjenost beta-radioaktivnih elemenata u zemljinoj kori i njihovi periodi poluraspada, dobija se da se u kilogramu zemljine kore svake sekunde obrazuje 190 antineutrina pri raspodu urana-238, 310 antineutrina pri raspodu torijuma-232, 780 antineutrina u raspodu kalijuma-40 i 300 antineutrina u raspodu rubidijuma-87.

Prema tome, u jednom kilogramu zemljine kore se svake sekunde obrazuje, u proseku, 1580 elektronskih antineutrina. Kako zemljina kora/debljina 15 km ima masu oko 2×10^{22} kg, to ona ispušta svake sekunde oko $3,16 \times 10^{25}$ antineutrina. Kada se taj broj podeli sa površinom Zemlje: $5,1 \times 10^{18} \text{ cm}^2$, dobija se fluks elektronskih antineutrina iz zemljine kore:

$$\Phi = 6 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

Količina radioaktivnih elemenata u unutrašnjosti Zemlje je nepoznata. Uz pretpostavku da je rasprostranjenost radioaktivnih elemenata ista u svim slojevima Zemlje, dobija se da je fluks elektronskih antineutrina iz Zemlje proporcionalan sa $10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, što je gruba procena.

Kad se uzmu u obzir mase atoma koji učestvuju u beta-minus raspodu, dobija se da se maksimalne energije antineutrina iz Zemlje kreću u intervalu od 0,02 MeV do 2,5 MeV.

Antineutrini iz Zemlje nisu detektovani. Za njihovu detekciju su potrebne reakcije sa niskim energetskim pragom.

✓

Reakcija:



nije pogodna za detekciju pošto je njen energetski prag 1,8MeV, a fluks antineutrina iz zemljine kore sa energijama većim od 1,8MeV je mali i iznosi oko $10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Nuklearni reaktori

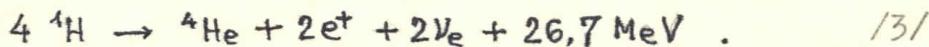
Pri radu nuklearnih reaktora, kao rezultat fisije, javlja se veliki broj slobodnih neutrona. Oni se raspadaju, sa srednjim vremenom života od 13min, beta-raspadom /1/. Osim toga, i drugi produkti fisije su uglavnom beta-minus emiteri. Prema tome, nuklearni reaktor se javlja kao izvor elektronskih antineutrina.

Fluks i energija antineutrina iz reaktora se mogu odrediti računskim putem. Nuklearni reaktori u Henfordu i Savana-Riveru, koji su korišćeni u eksperimentima, dali su antineutrine sa energijom do 10MeV, čiji je fluks u blizini reaktora iznosio oko $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Detekciju elektronskih antineutrina iz reaktora su prvi put izveli Reines i Cowan 1956. godine pomoću reakcije /2/.

Sunce

Teorija predviđa da se sunčeva energija izdvaja pri fuziji vodonika u helijum:



Odatle sledi da se Sunce javlja kao izvor elektronskih neutrina.

Fluks sunčevih neutrina na Zemlji se može proceniti na sledeći način. Kada se luminoznost Sunca, koja je približno jednaka $4 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$, podeli sa energijom oslobođenom u reakciji /3/ jednakom 26,7MeV tj. $4 \times 10^{-5} \text{ erg}$, dobija se broj transformacija /3/ u sekundi. On približno iznosi: 10^{38} s^{-1} . Prema tome, na Suncu se obrazuje oko 2×10^{38} neutrina svake sekunde. Deljenjem ovog broja sa $4 \times 3,14 \times R^2$, gde je $R = 1,5 \times 10^{13} \text{ cm}$ srednje rastojanje između Sunca i Zemlje, dobija se fluks elektronskih neutrina sa Sunca na Zemlji:

$$\Phi = 7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

Reakcija /3/ može proticati na različite načine, koji su teorijki predviđeni, a od njih zavisi energija neutrina. U ciklusima: H-D, H-Be, i C-N se javljaju neutrini sa maksimalnim energijama koje se nalaze u intervalu od 0,42MeV do 1,73MeV. Oni čine osnovni deo fluksa. U H-B ciklusu se javljaju neutrini sa maksimalnom energijom 14,1MeV, ali oni čine samo 0,005% ukupnog fluksa.

Za detekciju sunčevih neutrina su potrebni detektori sa vrlo niskim energetskim pragom. Reakcija: $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + ^{37}\text{Ar}$ nije sasvim pogodna jer je njen energetski prag 0,81MeV. Ipak, pomoću te reakcije

je Davis, počevši od 1968. godine, detektovao sunčeve neutrine čije su energije veće od energetskog praga reakcije. Međutim, registrovan je manji broj neutrina od teorijski izračunatog broja. Razlog za to mogu biti oscilacije neutrina ili neosetljivost hlorinog detektora na neutrine sa energijom od $0,42 \text{ MeV}$. Ovo pitanje će biti razrešeno pomoću galijumskog detektora, čiji je energetski prag $0,23 \text{ MeV}$.

I druge zvezde tipa Sunca pretstavljaju izvore neutrina, ali su toliko udaljene od Zemlje da je njihov fluks neutrina na Zemlji zanemarljiv.

Atmosferski neutrini

U sudarima protona iz primarnih kosmičkih zraka sa jezgrima iz atmosfere mogu nastati pioni i kaoni. Pioni se raspadaju sa srednjim vremenom života $2,6 \times 10^{-8} \text{ s}$, uglavnom, na sledeći način:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \bar{\nu}_\mu \quad /4/$$

Naelektrisani kaoni se raspadaju, sa srednjim vremenom života od $1,2 \times 10^{-8} \text{ s}$, na razne načine, pri čemu se neutrini javljaju u sledećim procesima:

$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \bar{\nu}_\mu$	$/63,5\%$
$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \bar{\nu}_\mu + \pi^0$	$/3,2\%$
$K^\pm \rightarrow e^\pm + \bar{\nu}_e + \pi^0$	$/4,8\%$

/5/

Neutralni kaoni se raspadaju, sa srednjim vremenom života od $5,2 \times 10^{-8} \text{ s}$, procesima:

$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu$	$/27\%$
$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e$	$/38,8\%$

Na taj način u atmosferi nastaju uglavnom mionski neutrini i antineutrini,amanjim delom elektronski neutrini i antineutrini. Energija atmosferskih neutrina se kreće i do 10^{20} eV , ali ovako visoku energiju dostiže samo mali broj neutrina.

Neutrini iz atmosfere su detektovani preko reakcije:

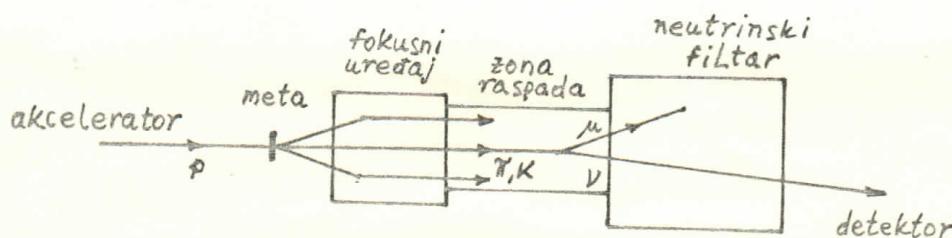
$$\bar{\nu}_\mu + n \rightarrow \bar{\mu} + p \quad /6/$$

Prvi rezultati su dobijeni 1965.godine u Indiji i Južnoj Africi pomoću takozvanih neutrinskih teleskopa. Da bi se ublažio fon relativističkih miona koji dospevaju iz atmosfere ne doživeli raspad zbog dilatacije vremena, neutrinski teleskopi se postavljaju duboko pod zemljom i to tako da registruju mione, a time i neutrine, koji dolaze iz donje polusfere.

Akceleratori

Pomoću akceleratora se mogu dobiti mionski i elektronski neutrini i antineutrini.

Način formiranja neutrinskog snopa je prikazan na sl.1.



Sl.1 Formiranje neutrinskog snopa

Snop protona se izvodi iz akceleratora i pogada metu. U suda-rima protona sa jezgrima iz mete nastaju pioni i kaoni.

Nastali pioni i kaoni prolaze kroz fokusirajući uređaj sa magnetnim sočivima. Postoje dva načina fokusiranja, tako da se na kraju može dobiti uzan ili širok snop neutrina. U fokusnom uređaju se mezoni jednog znaka nanelektrisanja i sa određenim opsegom im-pulsa fokusiraju u približno paralelan snop. Mezoni suprotnog zna-ka nanelektrisanja se defokusiraju.

Dobijeni snop ulazi u evakuisanu zonu raspada. Tu se pioni i kaoni raspadaju procesima /4/ i /5/. Dužina zone raspada je od 30m do 300m, u zavisnosti od energije protona.

Na kraju zone raspada se postavlja neutrinski filter. U tu svrhu se najčešće koriste čelik i beton. Neutrinski filter propuš-ta neutrine, a zaustavlja mione obrazovane u raspadima i mezone ko-ji nisu doživeli raspad. Njegova dužina je do 400m.

Pomoću akceleratora se dobijaju mionski neutrini i antineu-trini sa energijama do 200GeV, pri čemu se javlja mala kontamina-cija elektronskim neutrinima.

Iza neutrinskog filtra se nalaze detektori neutrina koji pre-stavljaju metu za neutrine. Oni moraju imati veliku masu zato što je efikasni presek za interakciju neutrina sa nukleonima mali i trebaju imati veliku osetljivost za detekciju i hadrona i lep-tona, koji nastaju pri reakcijama neutrina. Ovakve zahteve ispunja-vaju mehurasta komora i elektronski detektori.

U CERN-u se koriste mehuraste komore Gargamela i BEBC. Gargamela se puni freonom ili propanom i ima ukupnu zapreminu 12m^3 , pri čemu je radna zapremina 3m^3 . Samo se procesi detektovani u ranoj zapremini mogu analizirati pomoću elektronskih računara. BEBC se puni tečnim neonom ili vodonikom i ima zapreminu 30m^3 , pri čemu je radna zapremina 18m^3 . Takve karakteristike ima i mehurasta komora koja se koristi u Fermijevoj laboratoriji /FNAL/. U Argonskoj nacionalnoj laboratoriji je u upotrebi mehurasta komora zapremljene 20m^3 sa radnom zapreminom 11m^3 , koja se puni tečnim vodonikom ili deuterijumom.

Elektronski detektori imaju u svom sastavu kalorimetar, koji meri ukupnu energiju nastalih hadrona, i namagnetisano gvožđe za određivanje impulsa i nanelektrisanja miona. Detektor HPWF ima kao metu 70t tečnog scintilatora, pri čemu je radna masa 20t. Elektronski detektor CITF ima metu od gvožđa mase 120t, pri čemu je radna masa 50t. Gvozdenu metu ima takođe detektor CDHS, čija je ukupna masa 1240t a radna 800t. Detektor CHARM ima metu od mermera ukupne mase 180t i radne mase 100t.

Pomoću akceleratora i skladišnih prstenova se dobijaju tau leptonski neutrini, no njihovo postojanje još nije dokazano eksperimentalno.

Supernove

Prema teoriji evolucije zvezda, supernove mogu biti izvor elektronskih i mionskih neutrina i antineutrina. Pretpostavlja se da oni odnose veliki deo gravitacione energije, koja se oslobađa pri sažimanju centralnog jezgra supernove. Srednja energija ovih neutrina je oko $10\text{-}15\text{MeV}$. Očekuje se kratak neutrinski blesak, u toku kog na Zemlju može dospeti $10^{11}\text{-}10^{13}$ neutrina / cm^2 .

Baksanski i Artemovski neutrinski detektor /SSSR/ su sposobni da registruju neutrinske bleskove supernovih.

Kosmički prostor

U sudarima protona iz kosmičkih zraka sa protonima iz međuzvezdanog gasa mogu nastati pioni, koji se raspadaju procesom /4/. Na taj način nastaju neutrini sa energijama do 10^{20}eV , koji se kreću kroz kosmički prostor. Pošto verovatnoća za detekciju neutrina raste linearno sa njegovom energijom, pretpostavlja se da će Baksanski i Artemovski detektor uspeti da registruju ove neutrine.

Reliktno zračenje

Teorija velikog praska predviđa postojanje reliktnih neutrina sa vrlo malom energijom od 10^{-4}eV . Zato se ne očekuje njihova skora detekcija.

3. ELEKTRONSKI ANTINEUTRINO

Fermijeva teorija predviđa proticanje sledećeg inverznog beta-procesa:



u kom učestvuje elektronski antineutrino. Bethe i Bacher su predložili da se izvrši eksperimentalna detekcija procesa /1/ što bi bio direktni dokaz za postojanje elektronskog antineutrina.

Proračunati efikasni presek za reakciju /1/ je:

$$S_t = 1,2 \times 10^{-43} \text{ cm}^2,$$

a njen energetski prag je 1,8 MeV.

Eksperiment u kom je dokazano postojanje elektronskog antineutrina su izveli Reines i Cowan 1953. godine. Rezultat je bio pozitivan, ali nedovoljno siguran zbog velikog fona. Zato su oni 1956. godine, pri poboljšanim uslovima, ponovili eksperiment. Ta varijanta će biti opisana.

Kao izvor elektronskih antineutrina je iskorišćen nuklearni reaktor u Savana Riveru. Proračunati fluks antineutrina, sa energijama do 10 MeV, u okolini reaktora iznosi:

$$F = 1,2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

Efikasni presek za inverzni beta proces /1/ je izmeren pomoću uređaja koji se sastoji od tri scintilaciona detektora/SD na sl. 2/, između kojih su postavljene dve mete/M/. Oko uređaja se nalazi olovna i parafinska zaštita. Ceo uređaj je smešten ispod nuklearnog reaktora.

Za protonsku metu je upotrebljena voda. Poznato je da svaki molekul vode sadrži 2 atoma vodonika, čija su jezgra ustvari protoni/i jedan atom kiseonika/. U metama je raspodeljeno 400 l vode, tako da je ukupan broj protona:

$$N = 2 \times 6,023 \times 10^{26} \times 400 / 22,4 = 2,15 \times 10^{28}.$$

U vodu je, u obliku CdCl_2 , unet kadmijum čija jezgra imaju velik efikasni presek za zahvat spornih neutrona. Ovaj rastvor na taj način istovremeno predstavlja i protonsku metu i neutronski apsorber. Kadmijum lako zahvata neutrone i pri tom emituje tri ili četiri gama-kvanta ukupne energije 9,1 MeV. Detekcijom tih gama-kvanta se posredno detektuje i neutron.

Pozitron anihilira sa elektronom iz mete i pri tom se emituju dva gama-kvanta ukupne energije 1,022 MeV. Detekcijom ovih gama-kvanta je posredno detektovan i pozitron.

Za detekciju gama-kvanta su upotrebljena tri scintilaciona detektora. Oni se sastoje od scintilatora i fotomultiplikatora.

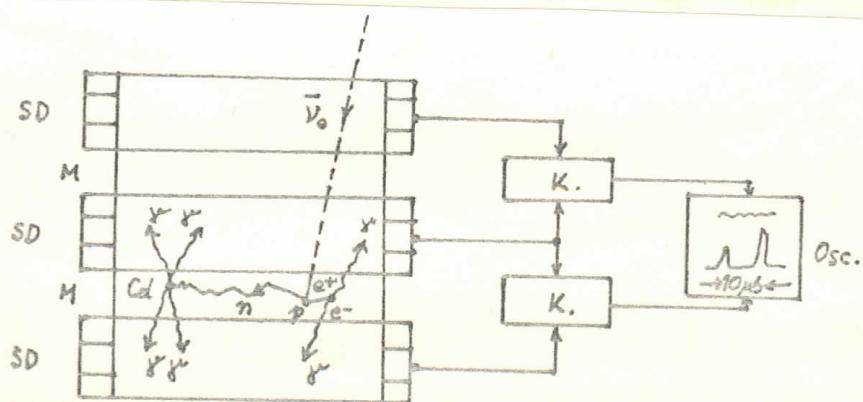
U ovom eksperimentu je korišćeno 3×1400 l tečnog scintilato-

ra.Ukoliko je veća energija gama-kvanta, utoliko je veći svetlosni prinos scintilatora.

Fotomultiplikatori koji se nalaze sa suprotnih strana mete su uključeni u jedno koincidentno elektronsko kolo,kao na sl.2.

Koincidentna elektronska kola su priključena na osciloskop sa dva ulaza.Na taj način će biti detektovani samo oni svetlosni bljeskovi koji se javе istovremeno u dva scintilaciona detektor-a postavljena sa suprotnih strana mete.

Proces detekcije inverznog beta-raspada,odnosno elektronskog antineutrina,prikazan je na sl.2.



Sl.2 Proces detekcije inverznog beta-raspada/tj. $\bar{\nu}_e$ /

Kada proton iz mete apsorbuje elektronski neutrino iz nuklearnog reaktora,istovremeno nastanu pozitron i neutron.

Nastali pozitron anihilira sa elektronom iz mete u roku od jedne mikrosekunde.Pri tom nastanu dva gama-kvanta od kojih svaki ima energiju 0,511MeV.Oni se razleću u suprotnim smerovima.Ako jedan gama-kvant iz mete dospe u gornji scintilacioni detektor,onda će drugi gama-kvant dospeti u donji scintilacioni detektor.U oba ta detektora se istovremeno javi bljesak svetlosti.Tada se u koincidentnom elektronskom kolu javi signal,koji se zapaža pomoću osciloskopa.

Nastali neutron se usporava elastičnim rasejanjem na jezgrima mete.Vreme usporavanja je zavisno od koncentracije kadmijuma u vodi, i ovde je reda veličine 10 μ s.Nakon tog vremena kadmijum apsorbuje neutron.Pri tom nastanu tri gama-kvanta od kojih svaki ima energiju 3MeV,ili četiri gama-kvanta od kojih svaki ima energiju 2,25MeV.Oni iz mete dospevaju u scintilacione detektore postavljene sa suprotnih strana mete gde izazivaju istovremene bljeskove svetlosti.Tada se u koincidentnom elektronskom kolu javi signal koji se zapaža pomoću osciloskopa.Ovaj signal u odnosu na prethodni ima veću amplitudu koja

odgovara većoj energiji gama kvanta i kasni za $10\mu s$, što odgovara vremenu usporavanja neutrona.

Na taj način je registrovan redosled događaja koji odgovara inverznom beta-procesu.

Da bi eliminisali uticaj šuma, Reines i Cowan su vršili eksperiment i kada je nuklearni reaktor bio isključen. Sa isključenim reaktorom je registrovano 70 događaja na dan manje nego sa uključenim. Znači, detektovano je 70 elektronskih antineutrina na dan. Tada broj detektovanih antineutrina na čas iznosi: $Y = 2,9 \text{ h}^{-1}$.

U eksperimentu Reinesa i Cowana efikasnost za detekciju pozitrona je bila: $E_e = 0,15$,

a efikasnost za detekciju neutrona:

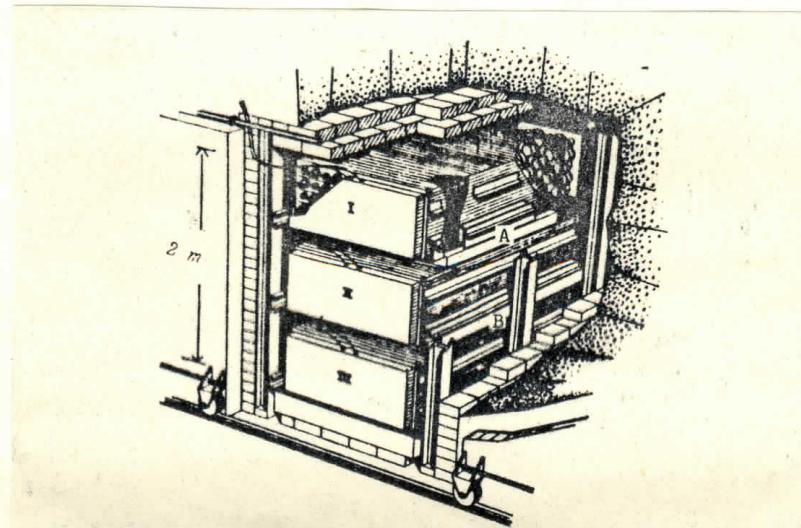
$$E_n = 0,17 .$$

Na osnovu eksperimentalnih podataka se dobija efikasni presek za inverzni beta-proces:

$$S = Y / (3600 \times F_x N_x E_{ex} E_n) = 1,2 \times 10^{-43} \text{ cm}^2 .$$

Dobijena vrednost je u saglasnosti sa teorijskom vrednošću. Na taj način je detektovan inverzni beta-proces, a time i elektronski antineutrino. Reines i Cowan su izveli i nekoliko kontrolnih ogleda. U njima su ispitivani svi faktori koji utiču na interpretaciju glavnog eksperimenta. Nije bilo sumnji u eksperimentalno dobijene rezultate.

Spoljni izgled upotrebljenog eksperimentalnog uređaja je prikazan na sl.3.



Sl.3 Eksperimentalni uredaj Reinesa i Cowana
Tu su I,II i III scintilacioni detektori,a A i B su mete.

4. ELEKTRONSKI NEUTRINO

Ako se pretpostavi da za neutrino važi Dirakova jednačina istog tipa kao i za elektron i pozitron, onda neutrino ima svoju antičesticu. To dopušta i Fermijeva teorija beta-raspada. Međutim, pošto je neutrino električno neutralan, postoji mogućnost da su neutrino i anti-neutrino identični. Ovaj slučaj je teorijski opisao Majorana 1937. godine. Dakle, predstava o neutrinu i antineutrinu se javila u teoriji, ali se razlika ili identičnost ovih čestica može dokazati samo eksperimentalno.

Za detekciju elektronskih neutrina preko sledećeg inverznog beta-procesa:



Potrebna je meta koja je bogata neutronima. U tu svrhu Pontekorvo je predložio korišćenje hlor-37. Jezgro atoma hlor-37 sadrži 20 neutrona i 17 protona. Kada neutron zahvati elektronski neutrino, pretvorice se u proton i ispustiće elektron. Tada će jezgro imati 19 neutrona i 18 protona, a to je jezgro argona-37. Dakle, ako atom hlor-37 zahvati elektronski neutrino, javiće se reakcija:

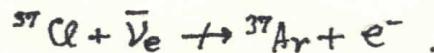


/1/

Njen energetski prag je $0,8\text{MeV}$, a teorijski izračunat efikasni presek:

$$St = 2 \times 10^{-45} \text{cm}^2$$

Ukoliko se elektronski neutrino i antineutrino razlikuju, onda se pri bombardovanju hlor-37 elektronskim antineutrinima neće javiti odgovarajuća reakcija:



/1'/

Ukoliko su elektronski neutrino i antineutrino identični, onda su efikasni preseci za reakcije /1/ i /1'/ jednaki.

Kao izvor elektronskih neutrina se javlja Sunce. Međutim, njihov fluks na površini Zemlje je mali/oko $10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Mnogo je veći fluks elektronskih antineutrina /oko $10^{13} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ / u okolini uključenog nuklearnog reaktora.

Eksperiment u kom je trebalo dokazati identičnost ili razliku elektronskog neutrina i antineutrina je izveo Davis 1955. godine, ali je fon bio previšok. Zato je on 1956. godine, kada je bila sprovedena potrebna zaštita od fona, ponovio eksperiment.

U ovom eksperimentu je kao izvor elektronskih antineutrina iskorишćen nuklearni reaktor u Savana-Riveru. Kao meta je upotrebljen tetrahloretilen, jer je čist hlor toksičan. Tetrahloretilen, koji je tečan, smešten je u velike rezervoare ispod reaktora.

Ako su elektronski antineutrino i neutrino jedna te ista čestica, onda će atom hlor kada zahvati tu česticu preći u atom argona.

S obzirom na to da atom argona ne reaguje hemijski sa drugim atomima, on će napustiti molekul tetrahloretilena. Tako će se u rezervoarima mete pojaviti mali broj slobodnih atoma argona u vidu gasa.

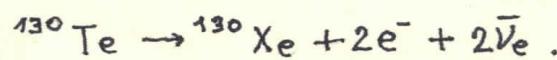
Metu se bombarduje duže vreme da bi nastalo što više argona. Potom se rezervoari mete produvavaju gasovitim helijumom koji za sobom povlači argon. Količina argona se može odrediti merenjem njegove radioaktivnosti pomoću Gajgerovog brojača.

Eksperimentalno dobijena vrednost efikasnog preseka za reakciju /1/ od $S=0,9 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ je manja od teorijske vrednosti, pa sledi zaključak da elektronski antineutrino i neutrino nisu identični. /Zaključak da antineutrini ne postoje se ne može izvesti jer je njihovo postojanje već bilo dokazano baš sa nuklearnim reaktorom kao izvorom/.

Davis je isti eksperiment izvodio i sa neutrinima koji potiču iz Sunca. Međutim, eksperiment je bio bezuspešan zbog malog fluksa sunčevih neutrina.

Eksperimentalni podaci o dvostrukom beta-raspadu takođe potvrđuju da se elektronski neutrino i antineutrino razlikuju.

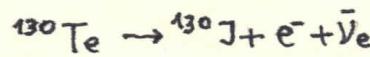
Dvostruki beta-raspad je raspad jednog parno-parnog jezgra u drugo parno-parno jezgro istog masenog broja, pri čemu se emituju istovremeno dva elektrona i dva antineutrina. Ovakav raspad je dozvoljen zakonom održanja energije kod izvesnog broja parova parno-parnih izobara. Primer je:



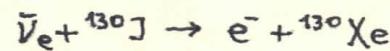
/2/

Izračunati period poluraspada za taj proces je reda veličine 10^{22} god. Tako dugo vreme poluraspada označava malu verovatnoću raspada. Zato dvostruki beta-raspad nije zapažen eksperimentalno.

Ako su neutrino i antineutrino ista čestica, onda se raspad /2/ može pretstaviti šemom:



/a/



/b/

prema kojoj je čestica koja je emitovana u prvoj reakciji apsorbovana u drugoj reakciji. Za ovu šemu raspada izračunati period poluraspada je znatno kraći, reda veličine 10^{17} god.

Kirsten je 1970. godine za telur-130 eksperimentalno dobio period poluraspada $10^{21,34}$ god. Iz tog se može zaključiti da reakcija/b/ nije moguća, i da zahteva apsorpciju elektronskog neutrina a ne anti-neutrina. Sledi da su elektronski neutrino i antineutrino različiti.

5. MIONSKI NEUTRINO I ANTINEUTRINO

U eksperimentima je ustanovljeno postojanje raspada:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu} + \gamma , \quad /1/$$

koji protiče pod dejstvom slabe interakcije. Pri tom se može očekivati da neutrino i antineutrino anihiliraju ispuštajući foton: $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$. Ovaj proces bi, osim toga, trebao da protiče pod dejstvom elektromagnetske interakcije, a to znači sa većom verovatnoćom od procesa /1/. Međutim, njegovo postojanje nije ustanovljeno u eksperimentima. Trebalo je naći uzrok koji to sprečava.

Markov i, nezavisno od njega, Schwinger a takođe i Nishijima su 1957. godine pretpostavili da se neutrino koji nastaje zajedno sa mionom razlikuje od neutrina nastalog zajedno sa elektronom.

Eksperiment u kom je ustanovljena razlika između elektronskog i mionskog neutrina su izveli Danby, Gaillard, Goulian, Lederman, Mistry, Schwartz i Steinberger 1962. godine u Brukhevenu.

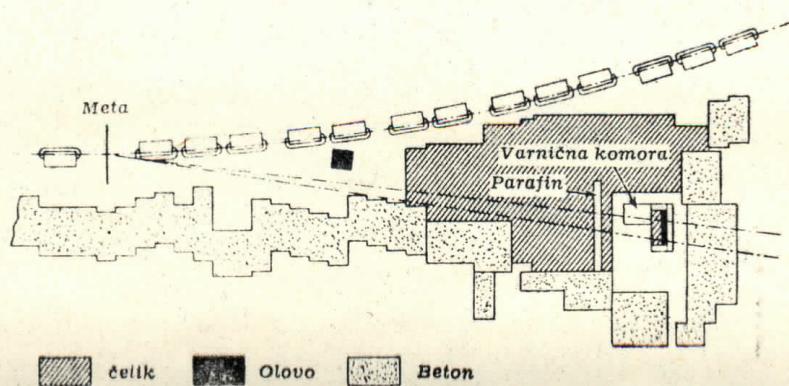
Protoni ubrzani u proton-sinhrotonu do 15GeV su pogadali berilijsku metu, pri čemu je nastajao intenzivan snop pozitivnih i negativnih piona.

Nastali pioni se u letu raspadaju/sa srednjim vremenom života od $2,6 \times 10^{-8}$ s/ na mione procesima:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

Na taj način su dobijeni predpostavljeni mionski neutrini i antineutrini. Osim toga, u proseku se jedan od 1000 piona raspada na elektron jednim od procesa: $\pi^\pm \rightarrow e^\pm + \bar{\nu}_e$. Na taj način nastaju elektronski neutrini i antineutrini, ali u zanemarljivim količinama.

Eksperimentalni uređaj, prikazan na sl. 4, tako je postavljen da nastali neutrini i antineutrini prolaze kroz čeličnu zaštitu do detektora.



Sl. 4 Dvo-neutrinski eksperiment

Čelična zaštita debljine 13,5m je zaustavljala mione i neraspadnute pione, dok su neutrini i antineutrini, koji slabo interaguju sa materijalom, nastavljeni da se kreću u prvobitnom pravcu.

Iza čelične zaštite je postavljena varnična komora težine 10 t. Ona je bila osetljiva na sledeće ispitivane procese:

$$\begin{aligned} \nu_\mu + n &\rightarrow \mu^- + p \quad \text{ili} \quad \bar{\nu}_\mu + n \rightarrow e^- + p \\ \bar{\nu}_\mu + p &\rightarrow \mu^+ + n \quad \text{ili} \quad \nu_\mu + p \rightarrow e^+ + n \end{aligned}$$

Za te procese su teorijski izračunati efikasni preseci. Ako se zanemari razlika u masi između miona i elektrona, za sve te procese se dobija jednak efikasni presek oko 10^{-38} cm^2 .

Zato, ako nema razlike između mionskog i elektronskog neutrina, odnosno ako postoji samo jedan tip neutrina, verovatnoće za nastajanje miona i za nastajanje elektrona su jednake. Tada u varničnoj komori treba da bude registrovan približno jednak broj miona i elektrona.

U eksperimentu su kroz varničnu komoru neprekidno prolazili neutrini i antineutrini koji su nastali zajedno sa mionima. Ako se oni razlikuju od neutrina i antineutrina koji nastaju zajedno sa elektronima, onda se u varničnoj komori moraju obrazovati samo mioni.

Autori su u toku vršenja svog eksperimenta registrovali 51 proces izazvan posmatranim neutrinima i antineutrinima. Prosesi izazvani neutrinima iz kosmičkog zračenja su identifikovani i nisu uzeti u obzir. U pedeset i jednom registrovanom procesu su se obrazovali samo mioni. Na taj način je eksperimentalno dokazano da postoje dva tipa neutrina: mionski i elektronski neutrino.

U analognim eksperimentima vršenim od 1964. do 1967. godine je utvrđeno da u sudaru mionskih neutrina sa neutronima nastaju samo negativni mioni, a ne i pozitivni. Time je potvrđena razlika između mionskog neutrina i mionskog antineutrina.

Mioni i mionski neutrini i antineutrini mogu takođe nastati pri raspadu nanelektrisanih kaona:

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ K^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \end{aligned}$$

Sa tako dobijenim mionskim neutrinima i antineutrinima je ponovljen dvo-neutrinski eksperiment u CERN-u 1964. godine. Rezultati tog eksperimenta su potvrdili postojanje dva tipa neutrina.



6. TAU-LEPTONSKI NEUTRINO I ANTINEUTRINO

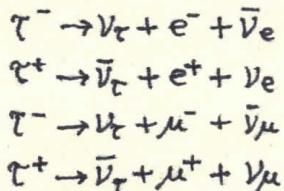
Perl je 1975. godine otkrio tau-lepton u eksperimentima sa sudarajućim elektron-pozitronskim snopovima skladišnog prstena Standfordskog linearног akceleratora /SLAC/.

Negativni tau-lepton i njegova antičestica - pozitivni tau-lepton nastaju u sledećoj reakciji:



Eksperimentalno je utvrđeno da se svaki tau-lepton raspara, sa srednjim vremenom života od $2,3 \times 10^{-12}$ s, na samo jednu laku, nanelektrisanu česticu, tj. na elektron ili mion. Prividno наруšavanje zakona održanja energije i leptonskog broja je objašnjeno pretpostavkom da u raspodu nastaju dva neutrina, koja u eksperimentu nisu registrovana zbog svoje slabe interakcije sa materijalom.

Ispitivanje energetskih spektara nastalih elektrona i miona, koje je vršeno 1976. godine, potvrdilo je da je svaki takav raspod tau-leptona tročestični, i da se može predstaviti na sledeći način:



Posle su eksperimentalno ustanovljeni još neki načini raspada tau-leptona, i utvrđene relativne verovatnoće za te različite načine raspada. Ovim vrednostima odgovaraju teorijske vrednosti dobijene uz pretpostavku da se par leptona $\langle \tau, \nu \rangle$ ponaša isto kao i parovi $\langle \mu, \nu \rangle$ i $\langle e, \nu \rangle$.

Tako je pretpostavljen postojanje tau-leptonskog neutrina i tau-leptonskog antineutrina. Međutim, oni nisu direktno dokazani u eksperimentima.

7. NAELEKTRISANJE, SPIN I MAGNETNI MOMENT

Naelektrisanje

Neutrino, čije je postojanje predviđao Pauli 1930. godine, trebao je da odnosi, energiju, impuls i spin koji su nedostajali u beta-raspadu, kako je to eksperimentalno utvrđeno. S obzirom na to da u beta-raspadu nije bio narušen zakon održanja naelektrisanja, sledilo je da novouvedeni neutrino ima nulto naelektrisanje.

Spin

Eksperimentalno je utvrđeno sledeće pravilo: ako jezgro ima paran maseni broj, onda ima celobrojni spin, a ako jezgro ima neparan maseni broj, onda ima poluceo spin. Maseni broj se ne menja u beta-raspadu. Zato se u beta raspadu ne može spin jezgra promeniti sa celobrojne vrednosti na polucelu. Međutim, ispuštena beta-čestica ima spin $1/2$, što dovodi u sumnju važnost zakona održanja momenta impulsa. Ako se novouvedenom neutrinu pripše vrednost spina $1/2$, onda se moment impulsa održava.

Razmotrimo beta-minus raspad ugljenika-14:



Merenjima je utvrđeno da ugljenik-14 ima spin 0, a azot-14 - spin 1. Elektron ima spin $1/2$.

Ako neutrino ima spin $1/2$, onda za proces /1/ važi zakon održanja momenta impulsa, kao što se vidi iz šeme:

$$J: 0 \rightarrow 1 \quad +1/2 \quad +1/2$$

$$J_z: 0 \rightarrow 0, \pm 1 \quad \pm 1/2 \quad \pm 1/2$$

Neutrino bi mogao da ima i spin $3/2$ pa da bude zadovoljen zakon održanja momenta impulsa za reakciju /1/, kao što se vidi iz sledeće šeme:

$$J: 0 \rightarrow 1 \quad +1/2 \quad +3/2$$

$$J_z: 0 \rightarrow 0, \pm 1 \quad \pm 1/2 \quad \pm 3/2$$

Međutim, proračuni su pokazali da bi u tom slučaju oblik beta-spektra bio različit od eksperimentalno ustanovljenog oblika. Tako je spin $3/2$ za neutrino isključen.

Dakle, neutrino ima spin $1/2$, i prema tome je fermion po statističkim svojstvima.

Magnetni moment

Neutrino je neutralan, ali ima spin, pa bi mogao imati i magnetni moment, kao i neutron. Ako neutrino ima magnetni moment, onda će on pri prolasku kroz materiju biti rasejan na atomskim elektronima. Ako je kinetička energija neutrina veća od energije veze elektrona, onda će se obrazovati jonski parovi koje je moguće

registrovati.

Cowan i Reines su 1954. godine eksperimentalno određivali magnetni moment antineutrina, iskoristivši aparaturu kojom su direktno dokazali njegovo postojanje. Oni su kao izvor antineutrina upotrebili nuklearni reaktor u Henfordu. U blizini reaktora je bio postavljen detektor sa tečnim scintilatorom. Ovaj detektor je bio zaštićen od drugih vidova zračenja iz reaktora na koje je bio osetljiv.

Kada je reaktor radio, registrovano je 30 jonskih parova u sekundi više nego kad je reaktor isključen. Predpostavljeno je da je ta ionizacija izazvana antineutrinima iz reaktora. U tom slučaju, odbroju od 30 impulsa u sekundi odgovara efikasni presek od:

$$S = 6 \times 10^{-40} \text{ cm}^2.$$

/2/

Bethe je za efikasni presek za obrazovanje para jona od strane neutrina izveo sledeću formulu :

$$S = \pi \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \mu^2 \ln \left(\frac{mc^2}{V} \right) \quad [\text{cm}^2]$$

Tu je e^2/mc^2 klasični radijus elektrona, V srednji jonizacioni potencijal a μ magnetni moment neutrina izražen u Borovim magnetonima. Kako su u scintilacionom detektoru registrovani elektroni sa najnižom energijom od 0,44 MeV, to predhodna formula dobija oblik:

$$S = 7,5 \times 10^{-26} \mu^2.$$

/3/

Iz /2/ i /3/ se dobija sledeća vrednost za magnetni moment neutrina:

$$\mu = 10^{-7} \mu_B.$$

Posle izvedenih precizniji eksperimenti su pokazali da neutrino ima vrlo približno nulti magnetni moment.

8. LEPTONSKI BROJEVI

Leptonski broj je kvantni broj koji se pripisuje leptonima. Usvojeno je da leptonski broj ima vrednost +1 za leptone, vrednost -1 za antileptone, i vrednost 0 za sve ostale elementarne čestice.

Leptonski broj se ponekad naziva i leptonski naboј. Međutim, koliko je danas poznato, leptonski naboј nije izvor nekog fizičkog polja, kao što je to naprimjer električni naboј.

Leptonski broj nekog sistema čestica je po definiciji jednak algebarskoj sumi leptonskih brojeva čestica koje čine taj sistem.

Za leptone važi zakon održanja leptonskog broja, koji glasi: leptonski broj zatvorenog sistema čestica se ne menja pri proticanju bilo kakvih procesa u tom sistemu.

Zakon održanja leptonskog broja je ustanovljen na osnovu eksperimentalnih činjenica. Eksperimentalno nije utvrđen ni jedan slučaj narušavanja tog zakona. Međutim, on još nije dovoljno proveren, i postoji mogućnost da se narušava pri izvesnim uslovima.

Vremenom je u eksperimentima utvrđeno da se pri svim reakcijama u kojima učestvuju elektroni, mioni i tau-leptoni očuvavaju uz njih vezani elektronski, mionski i tau-leptonski broj. Zato se pojam leptonskog broja, koji predstavlja ustvari zbir tih užih leptonskih brojeva, prestao koristiti.

Elektronski leptonski broj

Davis je 1956. godine dokazao eksperimentalno da su elektronski neutrino i elektronski antineutrino različiti međusobno. To je poslužilo kao osnova za uvođenje elektronskog leptonskog broja.

Usvojeno je da elektronski neutrino /kao i elektron, uz kog se on pojavljuje/ ima elektronski leptonski broj:

$$L_e = +1$$

Elektronski antineutrino /kao i pozitron, uz kog se on pojavljuje/ ima elektronski leptonski broj:

$$L_e = -1 .$$

Uvođenjem elektronskog leptonskog broja i korišćenjem zakona održanja tog broja se može objasniti proticanje nekih reakcija, kao i to zašto se ne javljaju neke reakcije koje su dozvoljene drugim zakonima održanja.

Na primer, pri beta-minus raspadu neutrona: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

treba zajedno sa elektronom, koji ima $L_e=+1$, da se javlja elektronski antineutrino koji ima $L_e=-1$, jer je za proton i neutron $L_e=0$. To je i bilo ustanovljeno u eksperimentima.

Mionski leptonski broj

Razlika između mionskog i elektronskog neutrina je dokazana eksperimentalno 1962. godine, a u eksperimentima vršenim 1964-67. godine je dokazana razlika između mionskog neutrina i mionskog antineutrina. To je poslužilo kao osnova za uvođenje mionskog leptonskog broja.

Usvojeno je da mionski neutrino /kao i negativni mion, uz kog se on pojavljuje/ ima mionski leptonski broj:

$$L_\mu = +1.$$

Mionski antineutrino /kao i pozitivni mion, uz kog se on pojavljuje/ ima mionski leptonski broj:

$$L_\mu = -1.$$

Pomoću zakona održanja mionskog leptonskog broja se može objasniti proticanje nekih reakcija, kao i nejavljanje nekih reakcija koje su dozvoljene drugim zakonima održanja.

Na primer, reakcija: $\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p$ ne može da protiče jer je sa leve strane $L_\mu = +1$, dok je sa desne strane $L_\mu = 0$; takođe se narušava zakon održanja elektronskog leptonskog broja, jer je sa leve strane $L_e = 0$ dok je sa desne $L_e = +1$. Navedena reakcija nije ustanovljena u eksperimentima.

Tau-leptonski broj

Kada je posle elektrona i miona otkriven i treći nanelektrisani lepton – tau lepton, predpostavilo se da je uz njega vezan tau-leptonski neutrino. Prema tome, verovatno je da postoji i tau leptonski broj.

Usvojeno je da tau-leptonski neutrino i negativni tau-lepton imaju tau leptonski broj:

$$L_\tau = +1.$$

Tau-leptonski antineutrino i pozitivni tau-lepton tada imaju tau leptonski broj:

$$L_\tau = -1.$$

Zakon održanja tau leptonskog broja još nije dovoljno eksperimentalno ispitano. Njegovo narušavanje nije ustanovljeno u onim reakcijama koje su eksperimentalno proučene.

Na primer, negativni tau-lepton može da se raspada na sledeće načine: $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + e^- + \bar{\nu}_e$, $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ koji su i ustanovljeni eksperimentalno.

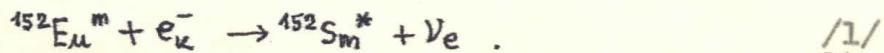
9. HELICITET

Helicitet je jedna od veličina koje karakterišu stanja elementarnih čestica, a definiše se kao projekcija spina čestice na njen impuls. Ako je spin čestice paralelan sa njenim impulsom, odnosno smerom kretanja, onda helicitet ima vrednost 1, a ako je antiparalelan, onda helicitet ima vrednost -1. Čestice sa helicitetom +1 se često nazivaju desne, a sa helicitetom -1 - leve.

Landau i nezavisno od njega Salam, a takođe i Lee i Yang, su 1957. godine stvorili dvokomponentnu teoriju neutrina. Prema toj teoriji, neutrino i antineutrino se razlikuju po helicitetu: ili je neutrino leva čestica a antineutrino desna, ili je obrnuto.

Eksperiment u kom je određen helicitet elektronskog neutriona su izveli Goldhaber, Grodzins i Sunyar 1958. godine.

Oni su merili helicitet neutriona emitovanog pri radioaktivnom raspadu europijuma-152, koji se nalazi u metastabilnom stanju, i ima period poluraspada od 9,3h. Europijum-152 se raspada elektronskim zahvatom na pobuđeno stanje samarijuma-152:



Srednje vreme života pobuđenog stanja je mereno, i iznosi 7×10^{-14} s. Samarijum-152 prelazi iz pobuđenog u osnovno stanje emisijom gama-kvanta od 960 KeV:



Spinovi i projekcije spinova na proizvoljnu osu z za čestice koje učestvuju u reakciji /1/ se mogu prikazati sledećom šemom:

$$J: \quad 0 \quad +1/2 \rightarrow 1 \quad +1/2$$

$$J_z: \quad 0 \quad \pm 1/2 \rightarrow 0, \pm 1 \quad \pm 1/2 .$$

Neka pravac i smer kretanja neutrina definišu pravac i smer z ose. Ako neutrino ima helicitet $H=+1$, onda je $J_z(\nu_e)=+1/2$, pa prema gornjoj šemi mora biti: $J_z(Sm^*)=0,-1$. Ako neutrino ima helicitet $H=-1$, onda je $J_z(\nu_e)=-1/2$, pa prema gornjoj šemi mora biti $J_z(Sm^*)=0,+1$.

Dokažimo da je i u jednom i u drugom slučaju helicitet neutrina jednak helicitetu, odnosno znaku kružne polarizacije, gama-kvanta koji su emitovani u negativnom smeru z ose.

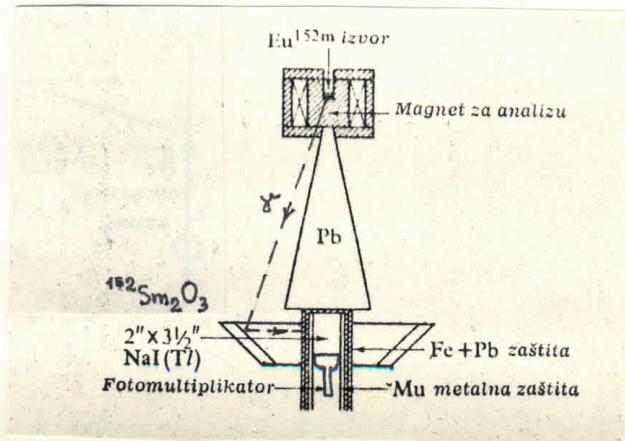
Spinovi i projekcije spinova na osu z /definisanu pravcem i smerom kretanja neutrina/ za čestice koje učestvuju u reakciji /2/ se mogu prikazati sledećom šemom:

$$J: \quad 1 \rightarrow 0 \quad +1$$

$$J_z: \quad 0, \pm 1 \rightarrow 0 \quad \pm 1 .$$

Ako je $J_z(Sm^*) = -1$, onda prema prethodnoj šemi i zakonu održanja angуларног момента mora biti i $J_z(\gamma) = -1$, pa je gama-foton desno kružno polarizovan, tj. ima $H=+1$, s obzirom na to da se kreće u negativnom smeru z ose./Kao što je pokazano,i za neutrino je $H=+1$ kada je $J_z(Sm^*)=0,-1/$.Ako je $J_z(Sm^*)=+1$, onda prema prethodnoj šemi mora biti i $J_z(\gamma)=+1$, pa je gama-foton,s obzirom na to da se kreće u negativnom smeru z ose,levo kružno polarizovan,tj.ima $H=-1$./Kao što je pokazano,i za neutrino je $H= -1$ kada je $J_z(Sm^*)=0,+1/$.

Dakle ,neutrino i gama-kvant imaju jednak helicitet kada su emitovani u suprotnim smerovima pri raspadu europijuma-152. Autori su u svom eksperimentu propuštali gama-kvante kroz namagnetisano gvožđe /sl.5/ da bi odredili njihov helicitet,odnosno znak kružne polarizacije.



Sl. 5 Eksperimentalni uređaj Goldhabera,
Grodzinsa i Sunyara

Registrovanje gama-kvanta koji su emitovani u smeru suprotnom od smera neutrina se postiže obezbeđenjem uslova za rezonantno rasejanje.

Pri emisiji i apsorpciji gama-kvanta,jezgro gubi energiju na uzmak.Ova energija se mora na neki način nadoknaditi da bi došlo do rezonantnog rasejanja.U ovom eksperimentu gubici energije na uzmak su nadoknađeni Doplerovim efektom pri pomeranju jezgra $^{152}Sm^*$. Ovo jezgro,nastalo u reakciji /1/,kreće se u smeru suprotnom od smera neutrina.Na taj način,uslovi za rezonantno rasejanje su ispunjeni za gama-kvante koji su emitovani u smeru kretanja jezgra, tj.u smeru suprotnom od smera neutrina.Zahvaljujući kratkom vremenu života pobuđenog stanja,većina gama-kvanta se emituje pre nego što se jezgro samarijuma-152 uspori usled sudara sa drugim jezgrima,to jest atomima.

Gama-kvanti emitovani u suprotnom smeru od smera neutrina se rezonantno rasejavaju na jezgrima samarijuma-152,koja se u

eksperimentu nalaze u vidu prstena od samarijum-oksida Sm_2O_3 .

Rasejani gama-kvanti se detektuju scintilacionim detektorom, koji se sastoji od scintilatora i fotomultiplikatora. Kao scintilator je upotrebljen natrijum-jodid /aktiviran talijumom/ Fotomultiplikator, s obzirom na to da je osetljiv na dejstvo magnetnog polja, zaštićen je oblogom od gvožđa. Između namagnetisanog gvožđa i scintilacionog detektora se nalazi olovna zaštita /sl.5/, tako postavljena da u detektor mogu dospeti samo oni gama-kvanti koji su rezonantno rasejani.

Scintilacionim detektorom je određen broj gama-kvanta N_+ rezonantno rasejanih kada je smer magnetnog polja isti kao i smer kretanja neutrina, i broj rezonantno rasejanih gama-kvanta N_- kada je smer magnetnog polja suprotan smeru kretanja neutrina.

Na taj način je za polarizaciju dobijena sledeća eksperimentalna vrednost:

$$P = (N_- - N_+)/2(N_- + N_+) = +0,017 .$$

Teorijske vrednosti za polarizaciju su: $P = +0,025$ ako neutrino ima helicitet -1 , a $P = -0,025$ ako neutrino ima helicitet $+1$.

Iz eksperimenta Goldhabera, Grodzinsa i Sunyara sledi zaključak da elektronski neutrino ima negativan helicitet:

$$H = -1 ,$$

odnosno da je leva čestica. Razlika između teorijske vrednosti polarizacije /0,025/ i eksperimentalne /0,017/ se može objasniti depolarizacijom gama-kvanta usled raznih efekata.

Tada na osnovu dvokomponentne teorije neutrina sledi da antineutrino ima pozitivan helicitet:

$$H = +1 ,$$

odnosno da je desna čestica.

Određivanje heliciteta mionskog neutrina nastalog u raspadu pozitivnog piona je pokazalo da je mionski neutrino takođe leva čestica, odnosno da ima helicitet -1 .

10. MASA MIROVANJA

Teorija nema posebne zahteve na masu mirovanja neutrina, tj. dopušta mogućnost da je masa mirovanja neutrina jednaka nuli ili različita od nule.

Masa elektronskog neutrina

Masa mirovanja elektronskog neutrina se može eksperimentalno odrediti merenjem energije uzmaka jezgra u elektronском zahvatu ili analizom forme beta-spektra.

Energija uzmaka jezgra u elektronском zahvatu je mala - do 100eV, tako da već i sudari atoma utiču na njenu vrednost. Zato se ona eksperimentalno teško meri. Argon-37 je najpogodniji za merenje energije uzmaka pošto je to monoatomski gas pa ne postoji uticaj molekulskih veza, a kod njega je elektronski zahvat preovladujući način raspada.

Raspad argona-37 putem elektronskog zahvata se predstavlja sledećom reakcijom:



Eksperimentalno je utvrđeno da energija uzmaka jezgra hlera, čija je masa $m_b = 36,978\text{ajm}$, iznosi:

$$T_b = 9,67\text{eV} .$$

Ova merenja su izvršili Rodeback i Allen 1952. godine da bi dokazali pojavu neutrina. Dobijeni rezultat se može iskoristiti za izračunavanje mase mirovanja neutrina.

Zakoni održanja energije i impulsa za reakciju /1/ se mogu napisati u obliku:

$$p_b = p_\nu = p ,$$

$$m_a c^2 = m_b c^2 + T_b + [(m_\nu c^2)^2 + (pc)^2]^{1/2} + B_k . \quad /2/$$

Impuls se može izraziti preko energije uzmaka:

$$p = (2m_b T_b)^{1/2} ,$$

a Q-vrednost reakcije je:

$$Q = m_a c^2 - m_b c^2 - B_k = 0,818\text{MeV} .$$

Kad se to uvrsti u izraz /2/, dobija se:

$$Q = T_b + [(m_\nu c^2)^2 + (2m_b T_b)^2]^{1/2} .$$

Odatle se masa mirovanja elektronskog neutrina može izraziti kao:

$$m_\nu c^2 = [(Q - T_b)^2 - 2m_b c^2 T_b]^{1/2}$$

i dobija se:

$$m_\nu c^2 = 0,05\text{MeV} .$$

Ovaj rezultat, s obzirom na nemogućnost preciznog određivanja energije uzmaka, ima malu tačnost. Ipak, on je potvrdio pretpostavke da je masa mirovanja elektronskog neutrina bliska nuli.

Tačnije se masa mirovanja elektronskog neutrina može odrediti pomoću energetskog spektra elektrona emitovanih u beta-raspadu.

Oblik beta-spektra u blizini njegove gornje granice, prema Fermijevoj teoriji beta-raspada, zavisi od mase mirovanja neutrina.

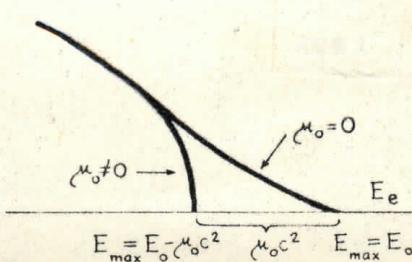
Ako je masa neutrina jednaka nuli, onda se oblik beta-spektra može predstaviti funkcijom:

$$y(E) = C(E^2 - m_e^2 c^4)^{1/2} \frac{E}{(E_0 - E)^2},$$

gde je C veličina nezavisna od energije, a E_0 ukupna raspoloživa energija. Kraj spektra je u tački $E = E_0$. U toj tački prvi izvod funkcije $y(E)$ je:

$$y'(E_0) = 0.$$

To znači da se u ovom slučaju kraj spektra asimptotski približava energetskoj osi, kao na sl. 6.



Sl. 6 Zavisnost oblika kraja beta-spektra od mase neutrina

Ako je masa neutrina različita od nule, onda se oblik beta-spektra može predstaviti funkcijom:

$$y(E) = C(E^2 - m_e^2 c^4)^{1/2} [(E_0 - E)^2 - m_\nu^2 c^4]^{1/2} \frac{E}{(E_0 - E)}.$$

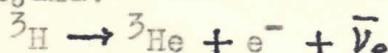
Kraj spektra je tada u tački $E = E_0 - m_\nu c^2$. U toj tački prvi izvod funkcije $y(E)$ je:

$$y'(E_0 - m_\nu c^2) = -\infty$$

To znači da u ovom slučaju kraj spektra ima tangentu normalnu na energetsku osu, kao na sl. 6.

Kako je masa mirovanja neutrina mala, to se može očekivati da je njen uticaj najizraženiji kod beta-spektara sa niskom gornjom granicom. Takav je beta-spektar tricijuma, koji ima gornju energetsku granicu oko 18KeV.

Beta raspad tricijuma:



se može proučavati pomoću proporcionalnog broja ili magnetnog spektrometra sa visokim razlaganjem. Na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka se crta Kiri-Fermijev grafik, sa kog se određuje masa antineutrina.

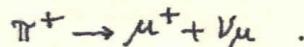
Ljubimov je 1980. godine dobio sledeću gornju granicu za masu

mirovanja elektronskog neutrina i antineutrina:

$$\underline{m_{\nu e} = 0,000046 \text{ MeV}}$$

Masa mionskog neutrina

Masa mirovanja mionskog neutrina se može eksperimentalno odrediti iz raspada pozitivnog piona u miru:



/3/

Kada pozitivni pion uđe u emulziju osetljivu na relativističke čestice, on se usporava i raspada pri kraju putanje, jer mu odbojna električna sila ne dozvoljava da se približi jezgrima. Ispitivanjem većeg broja takvih događaja ustanovljeno je da obrazovani pozitivni mion u emulziji uvek ima isti domet od 600μ . Tom dometu odgovara energija miona od: $T = 4,17 \text{ MeV}$.

kako su mase piona i miona poznate:

$$\underline{m_\pi c^2 = 139,6 \text{ MeV}}$$

$$\underline{m_\mu c^2 = 105,7 \text{ MeV}},$$

to se može odrediti masa mirovanja mionskog neutrina.

Zakoni održanja impulsa i energije za reakciju /3/ se mogu napisati u obliku:

$$\underline{m_\pi c^2 = [(m_\mu c^2)^2 + (pc)^2]^{1/2} + [(m_\nu c^2)^2 + (pc)^2]^{1/2}} .$$

Impuls se može izraziti preko energije: $p = (2m_\mu T)^{1/2}$,

pa je:

$$\underline{m_\pi c^2 = [(m_\mu c^2)^2 + 2m_\mu c^2 T]^{1/2} + [(m_\nu c^2)^2 + 2m_\mu c^2 T]^{1/2}} .$$

Odatle masu mirovanja mionskog neutrina možemo izraziti kao:

$$\underline{m_\nu c^2 = \{(m_\pi c^2)^2 + (m_\mu c^2)^2 - 2m_\pi c^2 [(m_\mu c^2)^2 + 2m_\mu c^2 T]^{1/2}\}^{1/2}}$$

i dobija se: $\underline{m_\nu c^2 = 2 \text{ MeV}}$.

Eksperimentalno dobijena vrednost mase mionskog neutrina je znatno veća od eksperimentalno dobijene vrednosti mase elektronskog neutrina.

Uz današnju eksperimentalnu tačnost, dobijena je sledeća gornja granica za masu mirovanja mionskog neutrina i antineutrina:

$$\underline{m_{\nu e} = 0,57 \text{ MeV}} .$$

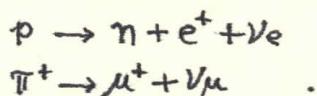
Masa tau-leptonskog neutrina

Za gornju granicu mase mirovanja tau-leptonskog neutrina i antineutrina je dobijena sledeća vrednost:

$$\underline{m_{\nu \tau} = 250 \text{ MeV}} .$$

11. OSCILACIJE NEUTRINA

Eksperimentalno nije utvrđen ni jedan slučaj narušavanja zakona održanja elektronskog i mionskog leptonskog broja. Saglasno tom zakonu nastaju elektronski i mionski neutrino, na primer, u sledećim reakcijama:



Međutim, ako zakon održanja leptonskog broja nije sasvim strog i ako neutrino ima masu, onda bi ovako stvoreni elektronski neutrini mogli da prelaze u mionske neutrine, i obrnuto:

$$\begin{aligned} \nu_e &\rightleftharpoons \nu_\mu \\ \bar{\nu}_e &\rightleftharpoons \bar{\nu}_\mu \end{aligned}$$

Hipotezu o oscilacijama neutrina je izneo Pontekorvo 1958. godine. U principu je moguće mešanje i sa tau-leptonskim neutrinom.

Stanja elektronskog i mionskog neutrina su opisana na sledeći način:

$$\begin{aligned} \nu_e &= \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta \\ \nu_\mu &= -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta \end{aligned} \quad /1/$$

Tu je θ ugao mešanja, a ν_1 i ν_2 su stanja neutrina određenih masa.

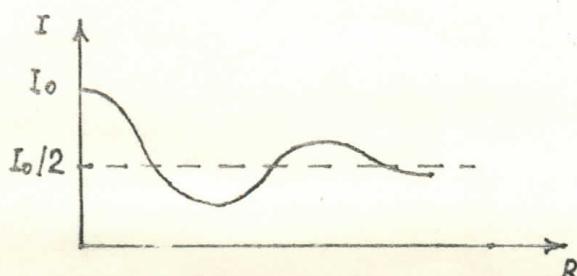
Za prelaze između neutrina nije odgovorna slaba interakcija u kojoj se narušava leptonski broj. Da bi neutrini ν_1 i ν_2 međusobno interferisali, potrebno je da se kreću neznatno različitim brzinama, što je moguće ako bar jedan od njih ima masu mirovanja različitu od nule. Zato i elektronski i mionski neutrino, koji se dobijaju iz osnovnih stanja, moraju imati masu mirovanja različitu od nule.

Posebna interesantan slučaj je kada je $\theta = \pi/4$. Tada jednačine /1/ dobijaju oblik:

$$\nu_e = \frac{1}{\sqrt{2}} (\nu_1 + \nu_2)$$

$$\nu_\mu = \frac{1}{\sqrt{2}} (\nu_1 - \nu_2) ,$$

i oscilacije neutrina su analogne poznatim oscilacijama K^0 i \bar{K}^0 mezonima. U tom slučaju se intenzitet posmatranih neutrina menja sa rastojanjem kako je to prikazano grafički na sl. 7.



Sl. 7 Usrednjavanje oscilacija neutrina

Na taj način oscilacije neutrina se usrednjavaju sa povećanjem rastojanja R .

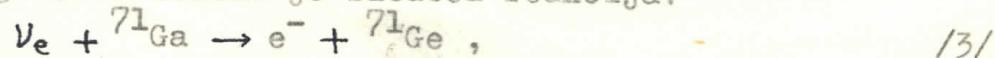
Zbog toga se na Zemlji može očekivati upola manji fluks elektronskih neutrina nastalih na Suncu od proračunatog, odnosno za treći manji, ako se neutrino nastao kao elektronski sa jednakom verovatnoćom pojavljuje kao elektronski, mionski i tau-leptonski.

Na taj način pitanje o oscilacijama neutrina i može biti rešeno eksperimentalno.

Za sada je sunčeve neutrine detektovao Davis pomoću sledeće reakcije:



On je merio brzinu obrazovanja argona-37 i kao srednji rezultat mereњa vršenih od 1970. do 1978. godine dobio 0,3-0,4 atoma na dan. Pri tom je teorijska vrednost 0,9 atoma na dan. Međutim, to još nije dokaz oscilacija jer je energetski prag reakcije /2/ jednak 0,81 MeV, a veliki deo sunčevih neutrina ima energiju 0,42 MeV. Ovi neutrini ne mogu biti detektovani pomoću reakcije /2/, i potrebna je reakcija sa nižim energetskim pragom. Predložena je sledeća reakcija:



čiji je energetski prag 0,23 MeV. Za teorijsku brzinu obrazovanja germanijuma-71 jednaku 0,9 atoma na dan je potrebno 50 t galijuma-71. Ova količina predstavlja višegodišnju svetsku proizvodnju galijuma, tako da ovaj eksperiment za sada nije ostvaren.

Ako brzina obrazovanja radioaktivnog germanijuma-71 bude 0,3 atoma na dan, to će biti dokaz oscilacija neutrina.

Ukoliko oscilacije neutrina postoje, to je dokaz da se zakon održanja leptonskog broja narušava pod izvesnim uslovima. Oscilacije neutrina bi, takođe, bile dokaz da neutrino ima konačnu masu mirovanja.

12. ZAKLJUČAK

Za sada postoje tri tipa neutrina od kojih svaki ima svoju antičesticu. Njihove osobine su navedene u sledećoj tablici:

Tip neutrina	e	m/MeV/	s/č/	H	L_e	L_μ	L_τ
ν_e	0	<0,000046		-1	+1	0	0
$\bar{\nu}_e$	0	<0,000046	1/2	+1	-1	0	0
ν_μ	0	<0,57		-1	+1	0	0
$\bar{\nu}_\mu$	0	<0,57	1/2	+1	-1	0	0
ν_τ	0	<250		-1	0	0	+1
$\bar{\nu}_\tau$	0	<250	1/2	+1	0	0	-1

Kvantna hromodinamika dopušta postojanje 16 tipova neutrina, a astrofizika ograničava taj broj na 4.

Po statističkim svojstvima neutrino je fermion. Neutrino učestvuje samo u slabim interakcijama, i prema tome je lepton.

Za sada se smatra da je neutrino stabilna elementarna čestica, i da ima nultu masu mirovanja. Eksperimenti, koji će biti vršeni u bližoj budućnosti, će ovo potvrditi ili opovrgnuti.

Neutrino je, zbog svojih osobina, pogodna sonda za ispitivanje kvarkovske strukture nukleona i za proučavanje elektroslabe interakcije.

Dalji razvitak metoda za detekciju neutrina će omogućiti eksperimentalno ispitivanje modela nuklearne fuzije na Suncu i ispitivanje neutronizacije supernovih zvezda, kao i traženje novih kosmičkih izvora neutrina. Poseban značaj bi imala registracija reliktnih neutrina, jer je s tim povezano pitanje otvorenosti svemira.

Na taj način, neutrino ima poseban značaj za fiziku elementarnih čestica, astrofiziku i kosmologiju.

LITERATURA

- Allen Dž. "Njejtrino" I.I.L. - Moskva,1960. /prev.sa engl./
- Azimov A. "Njejtrino" Atomizdat - Moskva,1969./prev.sa engl./
- Burcham W. "Nuklearna fizika-uvod /sa fizikom čestica/"
Naučna knjiga - Beograd,1974.
- Čellen G. /Källen/ "Fizika eljementarnih častic"
Nauka - Moskva,1966./prev.sa engl./
- Dorgovski S."Novi horizonti neutrinske astrofizike"
časopis za astronomiju"Vasiona" br.1-2 Beograd,1980.
- Ermolov P.F. Muhin A.I."Njejtrinie eksperimenti pri visokih energijah" Uspehi fiz.nauk -tom 124.vip.3.str.385
- "Fizika mikromira -maljenkaja enciklopedija"
Sovjetskaja enciklopedija-Moskva,1980.
- Krpić D. Aničin I. Savić I. "Zbirka rešenih zadataka iz opšte nuklearne fizike" Naučna knjiga -Beograd,1977.
- Kuvšinov V.I. Stražev V.I. "Ot naučnoj gipotezi k fizičeskomu faktu" Nauka i tehnika - Minsk,1977.
- Marinkov L. "Osnovi nuklearne fizike" skripta-Novi Sad,1976.
- Markov M.A. "Njejtrino" preprint - Dubna,1963.
- Perl M. "Otkritie novoj eljementarnoj častici - tjažolava tau leptona" Uspehi fiz.nauk - tom 129 vip.4 str.671
- Pontekorvo B. "Nekatorie novie pastanovki opitov v oblasti njejtrinaj fiziki" Uspehi fiz.nauk tom 104 vip.1 str.3
- Valjter A.K. "Vedenie v fiziku eljementarnih častic"
Izdateljstvo harkovskova univerziteta-Harkov,1960.