

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO MATEMATIČKI FAKULTET

Природно-математички факултет
Радна збирница изложених послова

Датум: 28. V. 1982		
Ср	Бр	Број послова
03	10/26	

DIPLOMSKI RAD

- M I O N I -

Novi Sad, maj 1982. godina.

ČEJIĆ Z. MIRJANA

ZAHVALJUJEM SE na saradnji, korisnim konsultacijama i pomoći oko obezbedjenja literature profesoru Milanu dr Nikoliću, čija mi je stručna pomoć bila neophodna i veoma dragocena.

Takodje se zahvaljujem i kolegi Božidaru Kovačeviću na nesebičnoj pomoći.

SADRZAJ

1. Uvod	1
2. Otkriće miona	3
3. Izvori miona	4
4. Mionski neutrino i antineutrino	5
5. Interakcija miona	7
6. Mionski atom i mionijum	8
7. Zadržavanje miona protonom	9
8. Masa miona	10
9. Spin i parnost	12
10. Magnetni moment miona	13
11. Dipolni moment miona	15
12. Raspad miona	16
13. Vreme života miona	18
14. Nočuvanje parnosti u π - μ - e -raspadu	19
15. Hipoteza o univerzalnom fermijeveskom interagovanju	22
16. Zaključak	25
Literatura	26

1. U V O D

Jedan od glavnih zadataka fizike jeste da odredi strukturu materije i pronadje zakone njenog ponašanja.

Hemija i kinetička teorija gasova su u XIX veku dale podatke o atomskoj strukturi materije, a početkom XX veka atomska fizika opisuje atom kao sistem sagrađen od elektrona koji kruže oko jezgra.

Pored elektrona bili su poznati još proton i foton.

Otkrićem neutrona 1932. godine postalo je jasno da su atomska jezgra sastavljena iz protona i neutrona.

Direktnim korišćenjem tehnika detekcije kosmičkih zraka ustanovljeno je nekoliko tipova čestica.

Pod kosmičkim zračenjem se podrazumeva primarni fluks čestica visoke energije i gama zračenja koja dolaze na Zemljinu kuglu iz medjuzvezdanog prostora, kao i sekundarno zračenje koje nastaje usled interakcije primarnih čestica u atmosferi. Primarne čestice su protoni, teška jezgra do gvoždja i izvesni broj fotona.

Akceleratori su, ubrzo, postali osnovno sredstvo za proučavanje atomskih jezgara i niskoenergetskih osobina nuklearne sile, tj. jake interakcije između nukleona (protona i neutrona). Prvi konstruisani akcelerator čestica je COCROFT-WALTON-ova mašina.

U jednom eksperimentu sa kosmičkim zracima Anderson je 1932. godine našao među česticama i neke sa pozitivnim naelektrisanjem i masom elektrona. To je pozitron, e^+ tj. antielektron.

Ovim otkrićem je potvrđeno postojanje antimaterije, koja je predskazana na osnovu relativističke kvantne teorije.

Na ponašanje materije na atomskom i subatomskom nivou utiču slaba, elektromagnetna i jaka interakcija.

Fermi je 1933. godine prvi dao teoriju slabih interakcija, kao interakciju četiri fermiona (n, p, e, ν).

Po analogiji sa elektromagnetskom interakcijom, koja se opisuje razmenom fotona, Yukawa je 1936. godine opisao jaku interakciju.

Iste godine su Anderson i Neddermayer objavili eksperimentalne podatke, koji su ukazivali na postojanje čestice sa naelektrisanjem elektrona i masom oko 200 puta većom od mase elektrona.

Do kraja II svetskog rata načinjen je veliki broj snimaka takvih čestica i zaključeno je da se prodorna komponenta kosmičkog zračenja sastoji iz čestica koje se danas nazivaju mioni (prvobitni naziv je bio μ - mezoni).

Smatralo se da je mion čestica koju je predvideo Yukawa, objašnjavajući kratkorojstvujući karakter nuklearnih sila. Međutim, trebalo bi da takva čestica jako interaguje sa jezgrom, tako da se ne očekuje da može da preživi prolaz kroz veliku debljinu atmosfere.

Ovaj paradoks je bio razrešen 1947. godine otkrićem π - mezona, koji poseduje svojstva čestice koju je predskazao Yukawa.

Još pre otkrića neutrona, Pauli je 1930. godine postulirao postojanje čestice da objasni beta - raspad. Ovu česticu je Fermi nazvao neutrinom.

1957. godine je iskazana mogućnost da se neutrino nastao sa mionom, mionski - neutrino - ν_μ , razlikuje od neutrina nastalog sa elektronom, elektronski neutrino - ν_e (videti paragraf 4). Otkrićem τ - neutrina 1975. godine upotpunjena je grupa leptona.

Danas znamo šest leptona ($e^-, \mu^-, \tau^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$), šest kvarkova (d, s, b, u, c, t) i njihove anti čestice, kao najelementarnije sastojke materije.

Postoji prirodan način grupisanja leptona i kvarkova u porodice:

I	$e^-, \nu_e,$	d, u
II	$\mu^-, \nu_\mu,$	s, c
III	$\tau^-, \nu_\tau,$	b, t

Treba istaći da prva porodica sadrži upravo one kvarkove i leptone koji se javljaju u običnoj materiji, kojom smo okruženi i od koje smo izgradjeni. Kvarkovi \underline{u} i \underline{d} su sastojci protona i neutrona u atomskim jezgrima, a elektronska neutrina se javlja u izračena u prirodnoj radioaktivnosti (beta-raspad).

2. OTKRIĆE MIONA

Posle otkrića pozitrona, mion se javlja kao druga elementarna čestica koja je otkrivena u kosmičkim zracima.

Anderson i Neddermayer su uočili da se većina čestica kosmičkih zraka na površini mora sastoji od jako prodornih, jednostruko naelektrisanih čestica koje mogu da prodju kroz ploče olova, a da ne izazovu elektromagnetske pljuskove ili nuklearne interakcije.

Prodorna komponenta kosmičkog zračenja na površini mora se sastoji od čestica koje se danas zovu mioni, oba znaka naelektrisanja - μ^+ , μ^- .

Otkrićem piona, nekoliko godina kasnije po otkriću miona, otkriveno je da se pri zaustavljanju u emulziji raspadaju uz ispuštanje sekundarne čestice-miona:



Time je pokazano da se mioni javljaju u rezultatu raspada jako interagujućih piona.

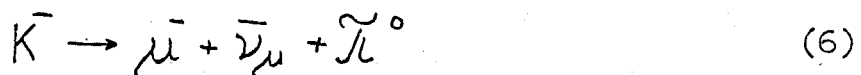
3. IZVORI MIONA

Osnovni izvori miona su kosmički zraci i akceleratori visokih energija. Pomoću njih se dobijaju pioni koji se raspadaju (relacije date jednačinama (1),(2) sa srednjim vremenom života $2,6 \times 10^{-8}$ sec i kaoni koji se raspadaju sa srednjim vremenom života $1,2 \times 10^{-8}$ sec, na razne načine.

Oko 70% naelektrisanih kaona se raspada po šemi:

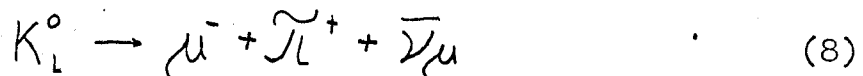
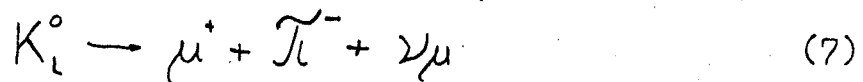


Takodje je registrovan i sledeći način raspada kaona:



Na ovaj način se raspada znatno manji broj naelektrisanih kaona, svega 3,2%.

Pored naelektrisanih kaona neutralni kaoni se raspadaju sa srednjim vremenom života $5,2 \times 10^{-8}$ sec, dajući mione:



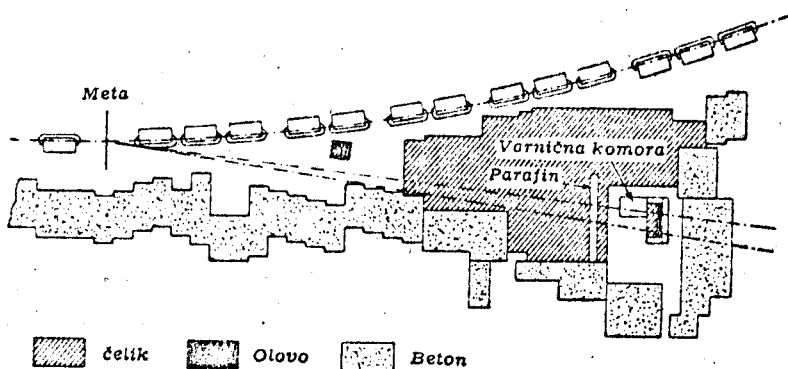
Na ovaj način se raspada 27% neutralnih kaona.

U kosmičkim zracima, na površini mora mioni čine osnovnu komponentu (približno 80% svih čestica kosmičkih zraka).

4. MIONSKI NEUTRINO I ANTINEUTRINO

U svim navedenim raspadima piona i kaona javlja se poređ miona i neutrino. Markov i, nezavisno od njega, Schwinger i Nishijima su 1957. godine prepostavili da se neutrino koji nastaje zajedno sa mionima razlikuje od neutrina nastalog zajedno sa elektronom.

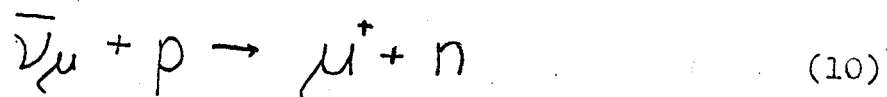
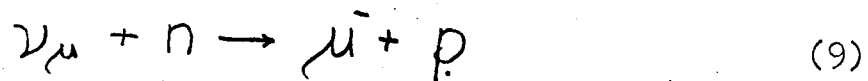
U eksperimentu na Brookhavenskom AG-sinhrotronu potvrđena je razlika između elektronskog i mionskog neutrina.



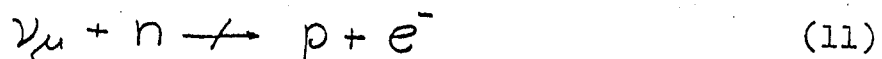
Sl. 1. Dvo - neutronski eksperiment.

Protoni, ubrzani u proton - sinhrotronu, od 15 GeV su pogadjali berilijumsku metu, pri čemu je nastajao intezivan snop pozitivnih i negativnih piona, koji se u letu raspadaju dajući mionske neutrine, antineutrine i mione.

Čelična zaštita debljine 13,5 m je zaustavljala mione i neraspadnute pione, dok su neutrini i antineutrini, koji slabo interaguju sa materijalom, nastavljali da se kreću u prvobitnom pravcu. Iza čelične zaštite je postavljena komora težine 10 t. U njoj je dolazilo do sledećih reakcija:



U komori nije bila registrovana sledeća reakcija:



To znači da neutrimi nastali raspadom piona ne stvaraju elektrone, čime je dokazano postojanje dve vrste neutrina, elektronskog i mionskog. U eksperimentu su kroz varničnu komoru neprekidno prolazili neutrimi i antineutrimi, koji su nastali zajedno sa mionom. Ako se oni razlikuju od neutrina i antineutrina koji nastaju zajedno sa elektronima, onda se u varničnoj komori moraju obrazovati samo mioni.

Mionski neutrimi i antineutrimi mogu, takodje, nastati pri raspadu naelektrisanih kaona (po šemama 3 i 4). Javljaaju se kao neutralne elementarne čestice, stabilne, sa vrlo malom masom ($< 0,5 \text{ MeV}$) i spinom $1/2$ (po čemu pripadaju fermionima).

5. INTERAKCIJA MIONA

Proces zaustavljanja miona u teškoj supstanci može da se opiše na sledeći način: kada se pozitivno naelektrisani mion zaustavlja u supstanci, ne može da se približi jezgru usled kulonskog odbijanja medju istoimenim naelektrisanjima i ostaje slobodan do momenta raspada, a raspad negativnih miona se javlja kao anomalan.

Conversi, Pancini i Piccioni su u svom ogledu zaustavljali mione u supstanci sa malim rednim brojem Z , kao što je grafit. Rezultati ogleda ukazuju na nepostojanje jake interakcije miona.

Ako se vrši zaustavljanje u ugljeniku, raspadaju se mioni oba znaka. Za negativne mione se pretpostavlja da padaju u K - orbite (poluprečnika oko 200 puta manji od orbite elektrona; videti paragraf broj 6.). Veliki srednji život u ugljeniku pokazuje da negativni mioni ne učestvuju u jakoj interakciji sa jezgrom i ne dešava se apsorpcija.

Kod težih jezgara orbite su manje tako da se javlja intezivna nuklearna apsorpcija. Kao dopunski dokazi nepostojanja jake interakcije miona poslužili su ogledi sa debelim slojevima olova. Brzi mioni su prolazili bez apsorpcije.

Zbog odsustva jake interakcije, mioni visoke energije se zaustavljaju u supstanci zbog elektromagnetne interakcije sa elektronima i jezgrima supstance.

Pri energijama miona višim od 10^{11} eV stvara se par elektron - pozitron i nastaje cepanje atomskih jezgara.

Pošto je masa miona veća od mase elektrona, to su gubici energije brzih miona u procesu kočenja zračenja i stvaranja para elektron - pozitron mnogo manji od gubitaka energije brzih elektrona.

Ovi faktori uslovljavljavaju veliku prodornu sposobnost miona.

6. MIONSKI ATOM I MIONIJUM

Pri interakciji sa jezgrom negativni mion može da bude zahvaćen u neku Borovu orbitu, kao i elektron. Kako je odnos masa miona i elektrona $m_e/m_\mu = 1/207$, radijus orbite miona je 207 puta manji u odnosu na radijus orbite elektrona pod istim uslovima. Na taj način negativno naelektrisani mioni formiraju mionske atome.

Najjednostavniji mionski atom jeste mionski vodonik, koji se sastoji iz jezgra vodonika (proton, deutron ili tricijum) i negativno naelektrisanog miona.

U mionskim atomima teških elemenata mogući su bezradijacioni prelazi miona sa pobudjenih nivoa u osnovne, kada se oslobadja energija nošena ne gama-kvantom, kao obično, već se troši na pobudjivanje jezgra mionskog atoma.

Izučavanju mionskog atoma pristupilo se 1949. godine i dobijeni su vrlo važni rezultati.

Zapaženo je da pri prelazu negativnih miona iz viših u niža stanja nedolazi do zračenja. Zračenje se javlja samo pri prelazu $2p \rightarrow s$ stanja. Pri ovom prelazu atom emituje fotone, slično prelazu elektrona u atomu. Izučavanjem ovog zračenja dobijaju se informacije o veličini jezgra i o rasporedu električnog naelektrisanja u jezgri.

Drugi važan rezultat, jeste tačno odredjivanje mase miona merenjem energije prelaza $3D \rightarrow 2P$ u mionskom atomu fosfora.

Na isti način pozitivno naelektrisani mioni mogu da formiraju mionijum. To je atomski sistem koji se sastoji iz elektrona i pozitivnih miona. Sastav mionijuma je analogan sastavu atoma vodonika, u kojemu je proton zamenjen pozitivnim mionom.

Mionijum aktivno učestvuje u hemijskim reakcijama i zato nije odmah bio otkriven u kondenzovanim supstancama. Veličina i druga svojstva mionijuma u kondenzovanim supstancama, npr. kristalu, mogu mnogo da se razlikuju od njegovih svojstava u vakuumu. Po hemijskim svojstvima mionijum je analogan atomu vodonika, mada brzina reakcije mionijuma može nekoliko puta da se razlikuje od brzine reakcije atomskog vodonika.

7. ZAHVAT MIONA PROTONOM

Reakcija zahvata negativnih miona protonom, posmatra se neposredno u tečnom vodoniku mehuraste komore, gde se vrši sledeća reakcija:



Tako je za energiju neutrona od 5,2 MeV za verovatnoću apsorpcije dobijeno da iznosi:

$$\lambda_p = (434 \pm 100) \text{ sec}^{-1}$$

Verovatnoća apsorpcije je određena odnosom broja zahvaćenih miona protonom i broja zadržanih miona u kameri:

$$\lambda_p = \frac{N_{\mu^- + p}}{N_{\text{ost}}} \lambda_d \quad \lambda_d = 4,5 \cdot 10^5 \text{ sec}^{-1}$$

Blezer je merio i registrovao neutrone, ispuštene za vreme veće od $1 \mu\text{sec}$, posle zadržavanja negativnog miona.

On je za verovatnoću zahvata mionskog molekula dobio da iznosi:

$$\lambda_p = (515 \pm 85) \text{ sec}^{-1}$$

Vidimo da zahvat može da se dešava ili u mionskom atomu (μp) ili u mionskom molekulu ($p\mu p$). U mionskom molekulu mogu oba protona da vrše zahvat, pa je verovatnoća zahvata dva puta veća nego u mionskom atomu.

U oba slučaja verovatnoća zahvata jako zavisi od spinskog sastava interagujućih čestica. Uopšte, za interakciju navedenih ogleđa treba znati:

1. Koji je deo vremena mioni, koji se zadržavaju u tečnom vodoniku, provode u mionskom atomu i u mionskom molekulu.

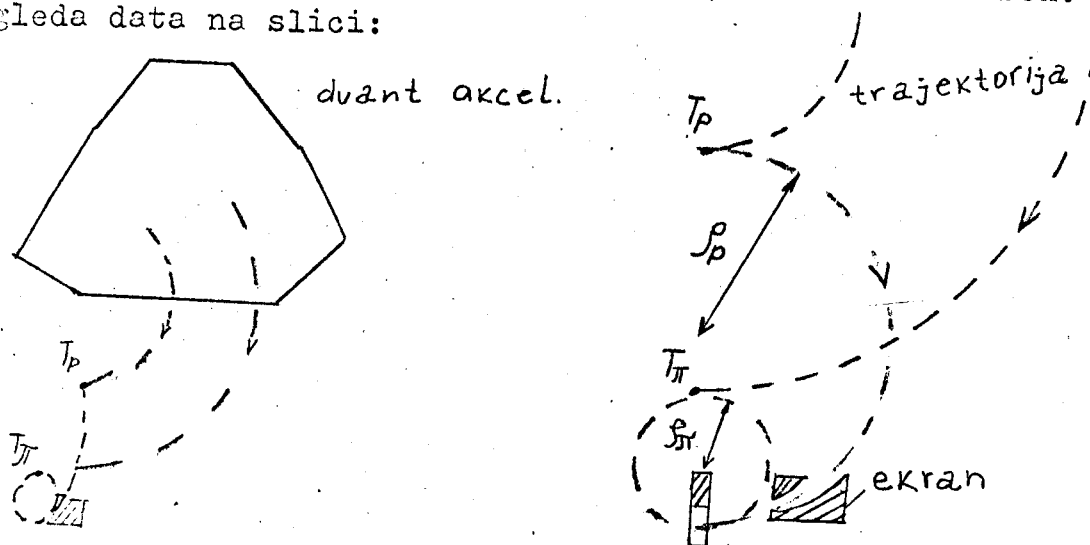
2. Koja je naseljenost različitih orijentacija spina negativnog miona i protona ($S(S=S_\mu + S_p = 0 \text{ ili } 1)$) u mionskom atomu i mionskom molekulu.

3. Koja je verovatnoća nalaženja negativnog miona u tački u kojoj se nalazi proton.

(1) Verovatnoća raspada slobodnog miona

3. MASA MIONA

Merenju mase pozitivnog miona pristupili su Smit, Birnbaum i Barkas u Berkeley, koristeći sinhrociklotron. Šema ogleda data na slici:



Sl. 2. Odredjivanje mase miona.

U ovom ogledu pioni nastaju u meti, koja se bombarduje brzim protonima i raspadom daju mione. Posle skretanja u magnetnom polju ciklotrona pioni i mioni, približnih brzina, padaju na fotografsku emulziju. To je omogućilo da se odredi domet u emulziji i nađe odnos masa iz međusobnog odnosa dometa:

$$\frac{m_{\pi^+}}{m_{\mu^+}} = \frac{R_{\pi^+}}{R_{\mu^+}}$$

Na taj način je za odnos masa piona i miona nađeno da iznosi:

$$\frac{m_{\pi^+}}{m_{\mu^+}} = 1,321 \pm 0,003$$

a, razlika iznosi:

$$m_{\pi^+} - m_{\mu^+} = (66,41 \pm 0,1) m_e$$

Iz ovih odnosa izračunata je masa pozitivnog miona:

$$m_{\mu^+} = (206,93 \pm 0,35) m_e$$

Masa miona može da se odredi i merenjem impulsa. Na osnovu zakona očuvanja energije i impulsa može da se napiše:

$$m_{\pi^+} c^2 = E_{\mu^+} + E_{\nu_{\mu}}$$

$$p_{\mu^+} = p_{\nu_{\mu}}$$

- gde je E_{μ^+} i $E_{\nu_{\mu}}$ potpuna energija miona i mionskog neutrina iz napisanih jednačina sledi:

$$m_{\pi^+} c^2 = \sqrt{p_{\mu^+}^2 c^2 + m_{\mu^+}^2 c^4} + p_{\mu} c$$

Ako se izmeri impuls p_{μ^+} , to poslednja jednačina i odnos masa omogućuju da se izračuna masa pozitivnog piona i miona.

Masu negativnog miona odredio je Lederman posmatrajući raspad negativnog piona u ekspanzionoj komori, koja se nalazila u magnetnom polju. Najpre je našao razliku masa negativnog piona i miona:

$$m_{\pi^-} - m_{\mu^-} = (66 \pm 3) m_e$$

Na taj način je za masu negativnog miona dobijena:

$$m_{\mu^-} = (206,8 \pm 3) m_e$$

Jedan od metoda merenja mase miona bazira na zračenju iz mionskih atoma. Mionski prelaz $3D \rightarrow 2P$ u fosforu ima energiju koja približno odgovara K - apsorpcionoj granici u olovu. U blizini te granice se koeficijent apsorpcije intezivno menja sa energijom, koja je sa velikom preciznošću određena iz merenja X - zračenja sa kristalnim spektrometom.

9. SPIN I PARNOST

Danas raspoložemo sa dosta podataka da je spin miona $1/2$. Medjutim, posmatranjem raspada miona po šemi (13) i (14.) moguće je da spin miona iznosi $1/2$ i $3/2$. Posmatranjem elektromagnetne interakcije prodorne komponente kosmičkih zraka, namećao se zaključak da je spin manji od 1.

Savremeni rezultati o spektru i sastavu prodorne komponente pokazuju da je spin miona $1/2$. Eksperiment Garvina sa saradnicima (videti paragraf 10), je takodje, doprineo određivanju spina. Naime, u tom eksperimentu je izmeren g-faktor miona. Dobijeni rezultat $g = 2$ je očekivan za česticu sa spinom $1/2$, na osnovu Dirakove jednačine.

Velika sličnost miona sa elektronom i njegov spin ukazuju da je fermion. To znači, da slično elektronu za njega važe zakoni očuvanja.

Par miona, tj. sistem čestica - antičestica, nastaje elektromagnetnom interakcijom, tako da samo neparna svojstvena parnost ima smisla.

LEPTONSKI BROJ

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

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.

Kasnije je usvojena podela leptonskog broja na mionski, elektronski, i tau-leptonski broj. Tako, negativni mion i mionski neutrino imaju mionski leptonski broj:

$$L_{\mu} = +1$$

a pozitivni mion i mionski antineutrino imaju mionski leptonski broj:

$$L_{\mu} = -1$$

Pomoću zakona održanja mionskog leptonskog broja se može objasniti postojanje i nepostojanje nekih reakcija, koje su dozvoljene drugim zakonima održanja. Na ovaj način se može objasniti odsustvo raspada miona na elektron i foton ($\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \gamma$)

10. MAGNETNI MOMENT MIONA

Magnetni moment je fizička veličina koja karakteriše magnetna svojstva molekula, atoma, atomskih jezgara i elementarnih čestica i određuje njihovo kretanje u spoljašnjem elektromagnetnom polju. Pojam magnetnog momenta je nastao u klasičnoj teoriji elektromagnetizma. Sa otkrićem spina čestica postalo je jasno da kretanje naelektrisanih čestica u sastavu sistema (jezgro, atom, molekul) i odgovarajućih tom kretanju mehanički (orbitalni) moment količine kretanja sistema uslovljavaju samo deo magnetnog momenta - orbitalni magnetni moment. Drugi deo magnetnog momenta nije vezan sa kretanjem naelektrisanja i javlja se kao unutrašnje svojstvo sastava sistema elementarnih čestica, a vezano je za spin.

Eksperimentalna merenja magnetskog momenta miona, potvrdila su da je elektromagnetska interakcija miona i elektrona podjednaka.

Garvin, Lederman i Vejnrih su eksperimentalno merili magnetski moment miona. Oni su pristupili merenju učestanosti precesije spina miona u magnetnom polju, koja iznosi:

$$\omega = g \frac{eH}{2m_{\mu}c} \text{ rad}\cdot\text{sec}^{-1}$$

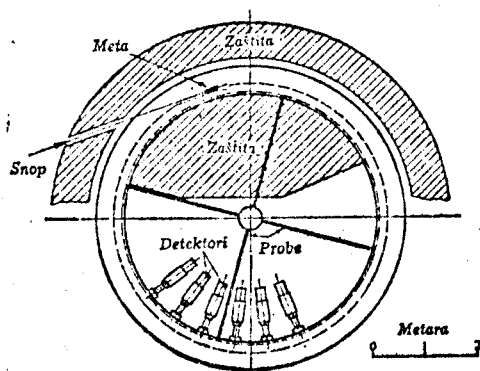
znajući masu miona i jačinu magnetnog polja, moguće je odrediti veličinu mionskog g-faktora: $g = 2 \cdot (1,00 \pm 0,01)$.

Ovo se slaže sa Dirakovom teorijom elektrona, po kojoj magnetni moment miona treba da iznosi jedan mionski magneton $e\hbar/2m_{\mu}$, koji se naziva normalnim. Za spin od 1/2 to odgovara g-faktoru.

Uporedo sa magnetskim momentom, merenje anomalni deo momenta, koji se može okarakterisati veličinom $(g-2)/2$.

Merenju ove veličine pristupili su u CERN-u Bailey i Farley sa grupom saradnika (a poslednja najtačnija eksperimentalna merenja vodio je Picasso). U eksperimentu se upoređuje frekvencija spina miona u poznatom magnetnom polju, sa frekvencijom kruženja čestice u istom polju. One su jednake ako je $g = 2$. Medjutim, ako je $(g - 2)$ malo ili konačne vrednosti, snop longitudinalno polarizovanih miona će u kružnoj orbiti postepeno da pokazuje sve veću nepodešenost izmedju smera spina i smera kretanja.

To je postignuto korišćenjem specijalnog prstena za čuvanje čestice u letu, koji je napunjen brzim mionima, nastalih raspadom piona iz iste orbite.



sl.3. prsten za čuvanje snopa miona

Ovaj eksperiment je dao sledeću vrednost za anomalni deo magnetnog momenta:

$$a = 1/2 (g_M - 2) = 116616 \pm 31 \cdot 10^{-8}$$

Ista vrednost u granici te greške je nadjena za pozitivan i negativan mion, što se savršeno slagalo sa teorijom.

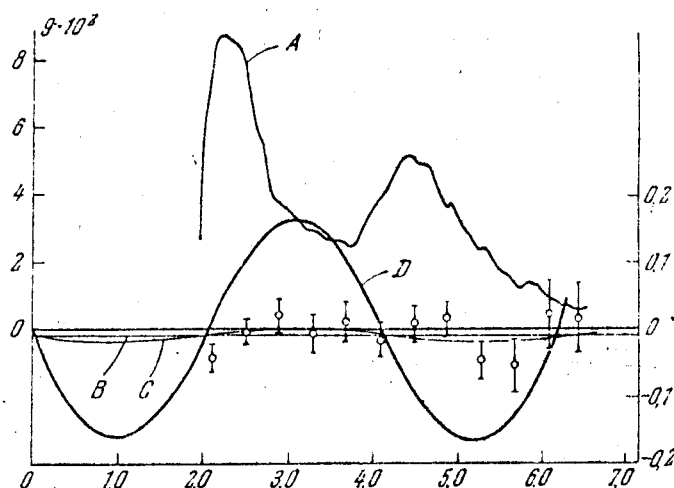
11. DIPOLNI MOMENT MIONA

Merenje dipolnog momenta elektrona, pozitrona i protona je pokazalo da je manji od $e \cdot 10^{-15} \text{ m}$, a kod neutrona je manji od $e \cdot 10^{-19} \text{ m}$.

Landau je pokazao da očuvanje kombinovane parnosti označava odsustvo dipolnog momenta kod elementarnih čestica.

Čarapak je sa saradnicima 1960. godine pokušao eksperimentalno da odredi dipolni moment miona, zajedno sa merenjem veličine $g-2$. U ovom ogledu dipolni moment pozitivnog miona vrši precesiju oko trenutne ose, normalne vektoru magnetne indukcije \vec{B} i brzine \vec{v} sa frekvencijom $\omega_e = 2f\beta\omega_c$ gde je $\omega_c = eB/m_0c$

Rezultati ovog eksperimenta mogu da se prikažu grafički, gde je po apcisonoj osi naneseo vreme nalaženja miona u magnetnom polju, proporcionalno broju obrtaja, a po ordinatnoj osi je asimetrija raspodele elektronskog raspada.



sl. 4. Rezultati dobijeni pri merenju dipolnog momenta μ^+ -miona

Eksperimentalne tačke na grafiku daju asimetriju, povezanu sa traženim vertikalnim sastavom asimetrije. Karakteristično je da su te tačke grupisane oko nulte asimetrije, što ukazuje na odsustvo dipolnog momenta miona.

Kriva C predstavlja dipolni moment miona jednak $0,6 \cdot 10 \text{ e.m}$



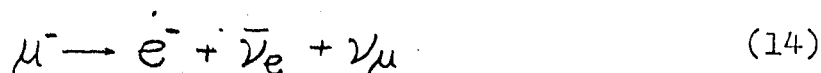
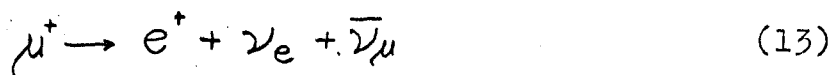
12. RASPAD MIONA

Viljamson i Robertson su 1940. godine posmatranjem raspada miona, za impuls sekundarnih čestica dobili da iznosi 70 ± 30 MeV/c. Na osnovu ovog podatka, zaključili su da se energija mirovanja miona (~ 106 MeV) raspodeljuje na dve čestice, elektron i neutrino.

Medjutim, Ljejtton je pomoću Vilsonove komore i metode fotografskih ploča pokazao da ova tvrdnja nije istinita.

U kasnijim eksperimentima je zapaženo da se pri raspadu miona u miru, energija sekundarnih naelektrisanih čestica rasprostire u širokom predelu. Na osnovu zakona očuvanja energije, zaključeno je da raspadom miona nastaju dve nenaelektrisane čestice. Pošto je masa mirovanja nenaelektrisanih čestica vrlo mala, to je ukazivalo da se kao naelektrisane čestice javljaju elektroni. Ovo je potvrđeno merenjima Hinksa i Pontekorva, koji su merili energetske gubitke sekundarnih čestica pri prolazu kroz supstancu.

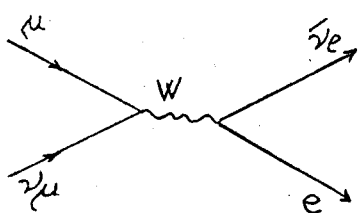
Danas je poznato da slaba interakcija miona izaziva raspad pozitivnih i negativnih miona po sledećoj šemi:



To se slaže sa pretpostavkama, jer je danas poznato da je masa elektronskog neutrina ($< 0,0004$ MeV) i mionskog neutrina ($< 0,5$ MeV) približno jednaka nuli, ili jednako nuli.

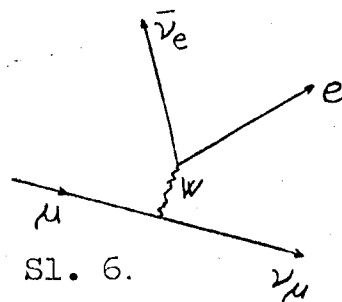
Moglo bi se reći da je raspad miona jedan od najbolje proučenih raspada eksperimentalno i da je to čisto leptonski proces, bez učešća hadrona (čestice koje podležu jakoj interakciji i predstavljaju složene objekte koji se sastoje iz kvarkova).

Raspad pri visokim energijama može da se prikaže grafički na sledeći način:



Sl. 5.

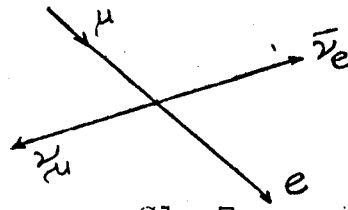
odnosno



Sl. 6.

W - kvanti slabog polja koji se nazivaju intermedijarni vektorski bozoni.

Pri niskim energijama postoji interakcija četir fermiona u jednoj tački.



Sl. 7.

Matrični element za raspad je oblika:

$$M = \frac{G}{\sqrt{2}} \bar{\nu}_\mu \gamma^\alpha (1 - \gamma_5) \mu \cdot \bar{e} \gamma_\alpha (1 - \gamma_5) \nu_e$$

a, diferencijalna verovatnoća raspada u jedinici fazne zapremine d iznosi:

$$d\Gamma = \frac{MM^*}{2 \cdot 2m_\mu} d\phi$$

Zanemarivanjem mase elektrona u odnosu na njegovu energiju E se dobija:

$$d\Gamma = \frac{G^2 m^5}{96\pi^3} (3 - 2\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon$$

- gde je $\varepsilon = \frac{E}{E_{\max}}$

Integracija po spektru elektrona daje potpunu širinu:

$$\Gamma = \frac{G^2 m^5}{192\pi^3} = \frac{1}{\tau_\mu}$$

Poredjenjem sa eksperimentalnim vrednostima za srednji život miona, dobija se fermijeva konstanta G.

U teoriji Weinberg - Salama izmena W bozona se javlja u μ -raspadu. Za lagražijansku gustinu interakcije se dobija:

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{\nu} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) e W_\mu^* - \frac{g}{2\sqrt{2}} \bar{\nu} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \mu W_\mu^* - \frac{g}{4\cos\theta} [\bar{\nu} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \nu - \bar{e} \gamma^\mu (1 - 4\sin^2\theta - \gamma_5) e] Z_\mu - e \bar{e} \gamma^\mu e A_\mu + (e, \nu \rightarrow \mu, \nu_\mu)$$

a, amplituda za niske energije iznosi:

$$A = \frac{g^2}{8M_W^2} \bar{\mu} \gamma_\alpha (1 - \gamma_5) \nu_\mu \cdot \bar{\nu} \gamma^\alpha (1 - \gamma_5) e$$

Ovo se poklapa sa klasičnom V - A amplitudom oblika:

struja x struja, odnosno

$$\mathcal{L} = \frac{G}{\sqrt{2}} j_\mu j_\mu^+$$

tako da se iz odnosa:

$$\frac{G}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2}$$

može odrediti masa M_W bozona u "funkciji" Weinberg-ovog ugla θ :

Ugao θ izražava mešanje nefizičkih polja za dobijanje fizičkih polja Z_μ i A_μ , čime se postiže ujedinjavanje slabih i elektromagnetskih interakcija.

13. VREME ŽIVOTA MIONA

Merenju vremena života miona pristupio je Rosi 1940. godine mereći "anomalnu" apsorpciju prodorne komponente kosmičkih zraka. Ova pojava ukazuje da vazduh više apsorbuje mione nego čvrsta sredina.

Kulenkampf je pretpostavio da se prodorna komponenta sastoji od nestabilnih čestica.

Bela i Hinks su 1951. godine merili srednje vreme života miona u kosmičkim zracima i dobili sledeći rezultat:

$$\tau_{\mu} = (2,22 \pm 0,02) \cdot 10^{-6} \text{ sec}$$

U kasnijim eksperimentima Rajter je koristio signal iz procesa proizvodnje miona, raspadom piona, u scintilatoru kao početni vremenski impuls, a signal od elektrona, koji nastaje raspadom miona, kao završni signal. Pozitivan pion sa početnom energijom 70 MeV je zaustavljan u ugljeničnu metu, debljine 2,5⁻² m. Merenje intervala vremena od trenutka pada piona na metu do trenutka pojave elektrona vršeno je registrom impulsa. Srednje vreme života pozitivnog miona dobijeno tim merenjima ($\tau_{\mu} = (2,211 \pm 0,003) \cdot 10^{-6}$ sec) je vrlo blisko vrednosti koja se danas smatra tačnom.

Sa negativnim mionima nije moguće izvršiti sličan eksperiment, jer pri zadržavanju u supstanci sve vreme interaguju sa jezgrom do raspada.

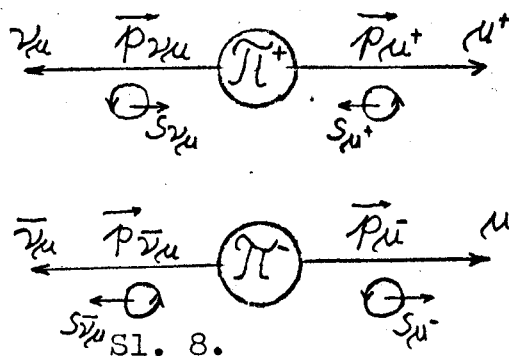
Ipak, postoje uverljivi dokazi da su u vakuumu vremena života pozitivnog miona i negativnog miona jednaka.

14. NEOČUVANJE PARNOSTI U π - μ -e-RASPADU

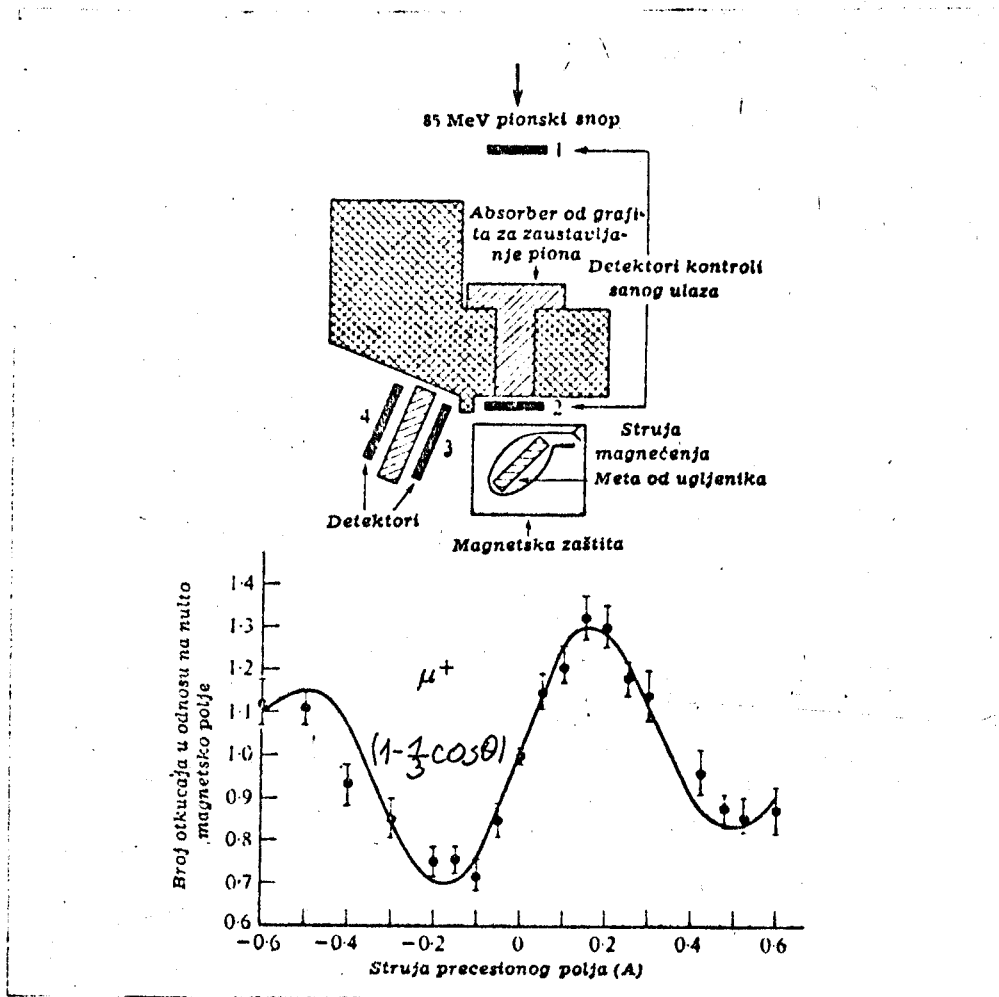
Lee i Yang su prvi zapazili da zakon održanja parnosti ne važi kod slabih interakcija.

Prvi ogled za proveru parnosti kod π - μ -e-raspada, izvršili su Garwin, Lederman i Weinrich 1957. godine. Mlaz monohromatičnih pozitivnih piona sa energijom 85 MeV, raspada se dajući pozitivne mione. Razdvajanje piona i miona je vršeno pomoću grafitnih blokova, koji su apsorbirali pione. Mioni su konačno zaustavljani u grafitnu metu. Pogadjanje miona je registrovano impulsom od scintilacionih brojača 1 i 2. Brojači 3 i 4 su registrovali elektrone μ -e raspada. Zapaženo je da su oni iz grafitne mete izletali u intervalu od $0,75 - 2 \mu$ sec posle zaustavljanja miona. Ako postoji neodržanje parnosti kod raspada piona, mion je logitudinalno polarizovan. Ako, takodje, postoji neočuvanje parnosti u raspadu miona, javiće se asimetrija u smeru emisije elektrona iz miona u odnosu na osu polarizacije. Garwin je sa saradnicima detektovao tu asimetriju i konstatovao neočuvanje parnosti kod π - μ -e-raspada.

Nastanak polarizacije se može slikovito objasniti na sledeći način: spin mionskog neutrina, koji je nastao zajedno sa pozitivnim mionom pri raspadu pozitivnog piona, orijentisan je suprotno smeru impulsa mionskog neutrina, a spin mionskog antineutrina, nastao raspadom negativnog piona je u pravcu impulsa mionskog antineutrina, (sl. 8.).



Otuda, na osnovu zakona očuvanja impulsa i momenta količine kretanja sledi da je spin pozitivnog miona suprotan njegovom impulsu, a spin negativnog miona u smeru impulsa. Zato, mioni u zavisnosti od kinematičkih uslova nastanka i spektra piona pokazuju delimičnu ili potpunu polarizaciju u smeru svog impulsa (μ^-) ili nasuprot impulsa (μ^+).



sl. 9 Aparatura Garwina i promena broja otkucaja elektrona u nepokretnom detektoru

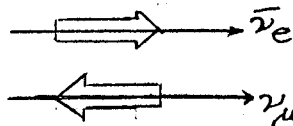
UGAONA ASIMETRIJA: operacija parnosti P i operacija konjugcije \mathcal{C} (asimetrija) je PiC neinvarijantno, tj. različiti znaci za e^+ i e^- u raspadima μ^+ i μ^- i različiti znaci u levom i desnom sistemu koordinatnih ortova: Posmatraćemo 2 slučaja:

1. Elektron sa energijom $\mathcal{E} = \frac{E}{E_{max}} \sim 1$

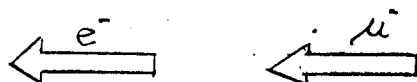
ν_μ i $\bar{\nu}_e$ moraju da lete suprotno od e^-



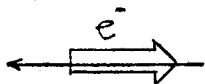
spiralnosti su suprotne, pa unose ugaoni moment nula



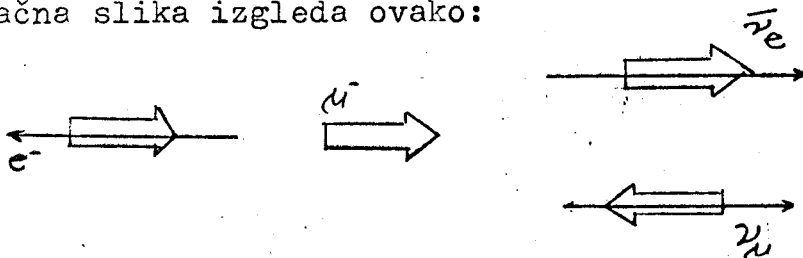
zato, elektron izleće sa paralelnim spinom spinu miona



Elektron ima negativnu spirálnost, pa je odnos spina i impulsa



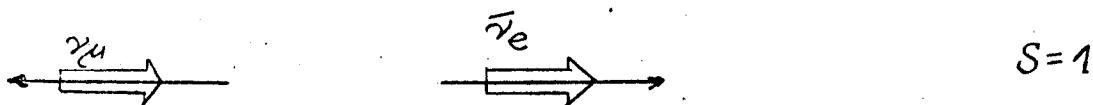
i, konačna slika izgleda ovako:



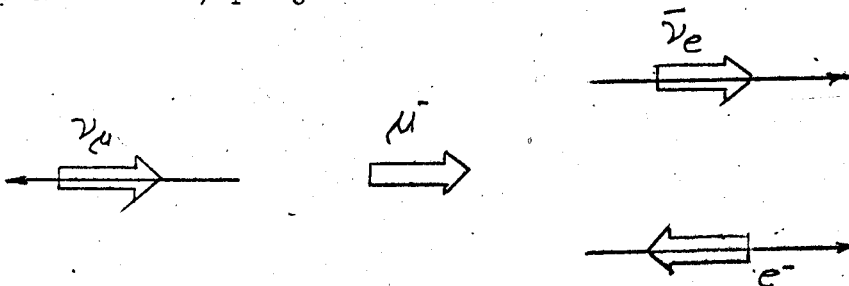
Impuls elektrona mora biti suprotno od spina, čemu odgovara $\epsilon \sim 1$.

2. Elektron sa energijom: $\epsilon \ll 1$

ν_μ i $\bar{\nu}_e$ lete u suprotnu stranu, a suma spinova je jednaka jedinici



Zbog očuvanja ugaonog momenta elektrona mora da leti u pravcu spina miona, pa je konačna šema:



Kada je poznata potpuna širina (videti paragraf 12.) ugaona asimetrija je određena sa:

$$\frac{d\Gamma(\cos\theta)}{\Gamma} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{3} \cos\theta\right) d\cos\theta$$

15. HIPOTEZA O UNIVERZALNOM FERMIJEVSKOM
INTERAGOVANJU

Fermi je u svojoj knjizi "Elementarne čestice" razmatrao dokaze u korist hipoteze o univerzalnom fermijevskom interagovanju, koja je bila iskazana 1948. godine. Najpre je posmatrao beta - raspad, naprimer, neutrona:



Zatim, zahvat orbitalnog elektrona jezgrom:



Na prvi pogled, navedene reakcije imaju sličnosti: u svakoj učestvuju četiri čestice (dve naelektrisane i dve nenaelektrisane), koje su fermioni.

Beta - raspad, koji je predložio Fermi 1933. godine se opisuje kao interakcija četiri fermiona. Hamiltonijan interakcije fermiona, Fermi je napisao po analogiji sa hamiltonijanom interakcije fermiona sa elektromagnetskim poljem.

Neka su ψ_i i ψ_f talasne funkcije početnog i krajnjeg stanja fermiona, a polje je zadano u vidu vektorskog i skalarnog potencijala (\vec{A}, ϕ) . U kvantnoj elektrodinamici amplituda prelaza $\psi_i \rightarrow \psi_f$ ima oblik:

$$M = \int d\tau \{ (\psi_f^* \psi_i) \phi - (\psi_f^* \vec{\alpha} \psi_i) \vec{A} \}$$

Da bi napisao amplitudu prelaza za beta - raspad reakcije (15), Fermi je uveo sledeće zamene:

$$\psi_f^* \vec{\alpha} \psi_i \rightarrow \psi_p^* \vec{\alpha} \psi_n$$

$$\vec{A} \rightarrow (\psi_e^* \vec{\alpha} \psi_\nu)$$

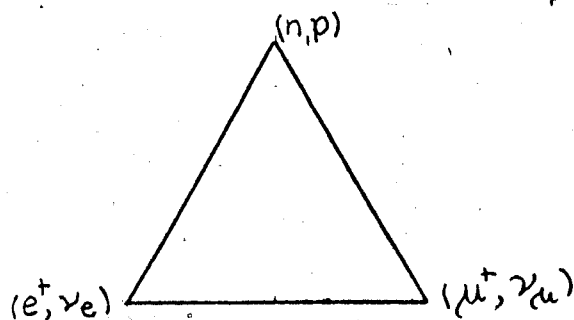
$$\psi_f^* \psi_i \rightarrow (\psi_p^* \psi_n)$$

$$\phi \rightarrow (\psi_e^* \psi_\nu)$$

Tada amplituda ima sledeći oblik:

$$M = \int d\tau \{ (\psi_p^* \psi_n) (\psi_e^* \psi_\nu) - (\psi_p^* \vec{\alpha} \psi_n) (\psi_e \vec{\alpha} \psi_\nu) \}$$

Hipoteza univerzalne fermijejske interakcije četiri fermiona može da se simbolično predstavi trouglom:



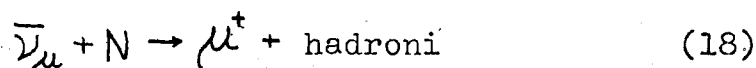
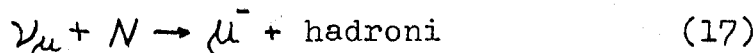
Sl. 10. Pupijev trougao slabih interakcija.

Na vrhu trougla se nalazi par jako interagujućih fermiona (neutron \leftrightarrow proton) i dva para slabo interagujućih čestica (elektron - neutrino; mion \leftrightarrow neutrino).

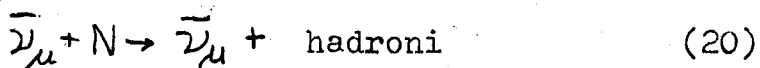
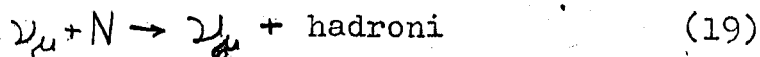
Interakcija između svakog para fermiona karakteriše konstantu, koja treba da objasni osnovne pojave slabe interakcije:

1. Raspad neutrona, ili zahvat K - elektrona - strana trougla $(np; e^+ \nu_e)$
2. Raspad miona - strana trougla $(e^+ \nu_e; \mu^+ \nu_\mu)$
3. Zahvat miona protonom - strana trougla $(np; \mu^+ \nu_\mu)$

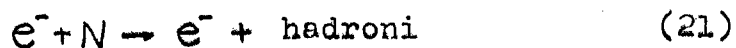
Otkriće neočuvanja parnosti je dovelo do formulisanja teorije slabih interakcija. Nova vrsta slabe interakcije je tzv. slaba interakcija neutralnih struja, koja se razlikuje od slabe interakcije naelektrisanih struja po tome što se naelektrisanje ne menja. Ovo je otkriveno 1973. godine u jednom eksperimentu u CERN-u, u velikoj mehurastoj komori "Gargamelle" izloženoj snopu visokoenergetskih neutrina, uporedo sa običnim procesima obrazovanja miona pri interakciji mionskih neutrina i anti-neutrina sa nukleonima (N):



Ovde postoji prelaz neutralnih neutrina u naelektrisane mione, pa je posmatran bezmionski proces - neutralna struja:

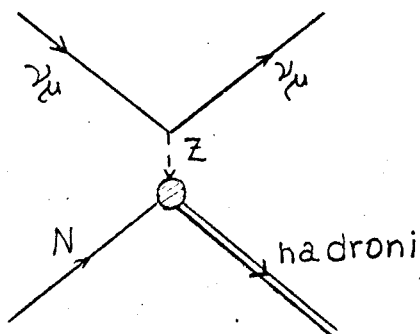


Neutralne struje potvrđuju teoriju slabe i elektromagnetne interakcije. U saglasnosti sa tim teorijama procesi (19) i (20) uslovljavaju razmenu neutralnim središnim vektorskim bozonom - Z bozonom medju neutralnim neutrinskim i hadronskim strujama (sl. 11.), Analogno procesu rasejanja elektrona na nukleonima:

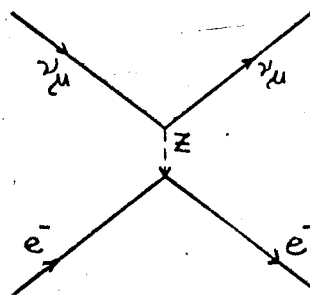


Ovaj proces je uslovljen razmenom fotona medju elektromagnetnim elektronskim i hadronskim strujama.

Razmena Z - bozonom medju neutrinskim i elektronskim slabim neutralnim strujama uslovljava proces rasejanja ν_μ i $\bar{\nu}_\mu$ na elektrone (sl. 12.).



sl. 11.



sl. 12.

Razmena Z - bozonom medju elektronskim i hadronskim strujama uslovljava slabu interakciju medju elektronima i nukleonima.

U kasnijim eksperimentima su izmerene glavne osobine interakcije neutralnih struja. Potvrđjena je teoretska pretpostavka da njen intezitet raste sa porastom energije. Slaba interakcija neutralnih struja ima dodatnu osobinu da može da interferiše sa elektromagnetnom interakcijom, pa se očekuje njihovo stanje u elektroslabu interakciju.

Izučavanje neutralne struje je jedan od najaktuelnijih zadataka fizike elementarnih čestica.

16. ZAKLJUČAK

Eksperimentalni rezultati pokazuju da je mion po svim osobinama sličan elektronu, učestvuje u svim interakcijama na isti način kao i on, poseduje istu jačinu veze sa elektromagnetnom interakcijom i slabom interakcijom, razlikuju se jedino po masi i ne pokazuje dodatne načine interakcije koje bi mogle nastati usled te razlike u masi. Zato nije ni čudo što mion nazivaju još i "teški elektron".

Ova pojava očigledne sličnosti naziva se μ - e -universalnost. Sa njom je povezano i pitanje postojanja drugih leptona težih od miona. Tako je otkriven "teški lepton", τ -lepton.

LITERATURA

- Burcham W. "Nuklearna fizika-uvod (sa fizikom čestica)"
Naučna knjiga - Beograd, 1974.
- "Fizika mikromira - Maljenkaja enciklopedija"
Sovjetska enciklopedija - Moskva, 1980.
- A. O. Vajsenberg - Mju-mezon,
Izdateljstvo "Nauka" Moskva 1964.
- S. Pael, P. Fauler, D. Perkins -"Isljedovanje eljementarnih
čestica fotografičeskim metodom," Izdateljstvo Moskva 1962.
- "Review of recent advances in high energy physics", (prevod)
L. Van Hove