



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	- 4 СЕП 2007
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	БРОЈ
0603	3/822

Naziv rada:

STANDARDNI MODEL

Mentor:

Prof. Dr Miroslav Vesović

Kandidat:

Dragica Mitrović

Broj indeksa: 849 / 05

Novi Sad, 2007

*Zahvaljujem se mentoru Prof. Dr Miroslavu Veskoviću i drugim
članovima komisije na velikoj pomoći pri izradi diplomskog rada*

1. SADRŽAJ

1. SADRŽAJ.....	2
2. UVOD.....	3
3. ISTORIJSKI PREGLED FIZIKE ELEMENTARNIH ČESTICA.....	4
4. ELEMENTARNE ČESTICE.....	7
4.1. Pojam elementarne čestice.....	7
4.2. Kratkoživeće čestice.....	10
5. STANDARDNI MODEL.....	12
5.1. Priroda našeg univerzuma.....	12
5.2. Osnovne ideje standardnog modela.....	13
5.2.1. Interakcije.....	14
5.2.2. Odnos među interakcijama.....	16
5.2.3. Kvanti polja – prenosioci interakcije.....	17
5.2.4. Vreme delovanja i domet interakcije.....	17
5.3. Unifikacija.....	19
5.4. Fundamentalne čestice.....	20
5.4.1. Kvarkovi.....	22
5.4.2. Leptoni.....	24
6. FIZIKA DALJE OD STANDARDNOG MODELA.....	28
6.1. Teorijska osnova za standardni model.....	28
6.2. Eksperimenti fizike elementarnih čestica.....	33
6.3. Nedostaci standardnog modela i efikasne teorije.....	34
7. ZAKLJUČAK.....	36
8. LITERATURA.....	37
BIOGRAFIJA.....	38



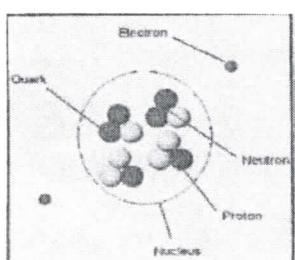
2. UVOD

Protoni, elektroni, neutroni, neutrinosi pa i kvarkovi često su prisutni u izveštajima o novim naučnim otkrićima. Sve ove i mnoge druge, su majušne subatomske čestice da bi bile vidljive i mikroskopima. Dok su molekuli i atomi osnovni elementi familije supstanci koje možemo videti i osetiti, mi moramo zaći unutar atoma da bi naučili o „elementarnim“ subatomskim česticama i da bi razumeli prirodu univerzuma. Nauka o ovoj studiji je nazvana fizika čestica, fizika elementarnih čestica ili ponekad fizika visoke energije (HEP).

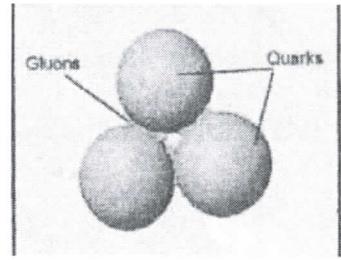
Atomi su postojali mnoge pre Grčkog filozofa Demokrita, i sve do početka dvadesetog veka, smatrano je da su atomi fundamentalni, nedeljni delovi svih oblika materije. Protoni, neutroni i elektroni počeli su se ceniti kao fundamentalne čestice prirode kako smo mi učili 1900- tih kroz Rutherford- ove eksperimente i druge, da su atomi sačinjeni od praznog prostora sa elektronima oko nukleusa sastavljenog od protona i neutrona.

Naku o elementranim česticama uzburkala je pojava akceleratora koji bi mogli ubrzati protone ili elektrone do visokih energija. Kada oni dostignu potrebnu energiju izbace se iz akceleratora u vidu snopa i usmere na metu u kojoj u sudarima sa jezgrima mete, stvaraju nove čestice. Mnoštvo novih čestica dobija se na ovaj način – što je iznenadilo naučnike.

Ranih 1960-tih kada su akceleratori proizvodili visoke energije, stotine i više tipova čestica su pronađene. Da li bi onda sve one mogle biti fundamentalne čestice? Konfuzija postaje jasna krajem prošlog veka, kroz dugu seriju eksperimenata i teorijskih studija, da je postojala vrlo jednostavna šema dve grupacije čestica: kvarkovi i leptoni (među leptonima su elektroni i neutrinosi) i grupa fundamentalnih interakcija koja dozvoljava međusobno delovanje. U svakom slučaju, ove „interakcije“ mogu biti shvaćene kao postojanje transmisije preko nanelektrisane čestice nazvane bozon. Foton je bozon, kvant svetlosti i transmiter elektromagnetskih izvora koji mi susrećemo svaki dan.



Slika 1: Šema atoma



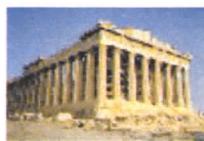
Slika 2: Šema kvarka

Zajedno ove fundamentalne čestice formiraju različite kombinacije koje se opažaju kao protoni, neutroni i druge čestice videne u akcelatorskim eksperimentima.

Danas, standardni model je teorija koja opisuje ulogu ovih fundamentalnih čestica i interakcija između njih. Uloga fizike elementarnih čestica je da testira ovaj model na sve shvatljive načine, tražeći da li nešto leži iza toga.

3. ISTORIJSKI PREGLED FIZIKE ELEMENTARNIH ČESTICA

Ljudska priroda je u pitanju. Ako pitate nekog predškolarca koja je njegova omiljena reč sigurno ćete dobiti odgovor „Zašto?“ sledeći sa „Šta“, „Kako“ i „Kada“. Eventualno ova deca će napustiti njihovu opsесiju sa jednosložnim rečima i razviti u osobe, ali ipak oni će uvek zadržati neke od znatiželja koje su tako bliske ljudskoj prirodi. Fizičari, sa druge strane, ne mogu prestati u postavljanju ovih pitanja i oni su ljudi koji nikada ne odrastu. Zagonetka o kojoj psiholozi i fizičari razmišljaju kroz vekove je „Šta je materija?“ (slika 4.) Grčki filozof Demokrit je prvi predložio da je materija sastavljena od mnoštva „individua“ koje ja nazvao „atomima“



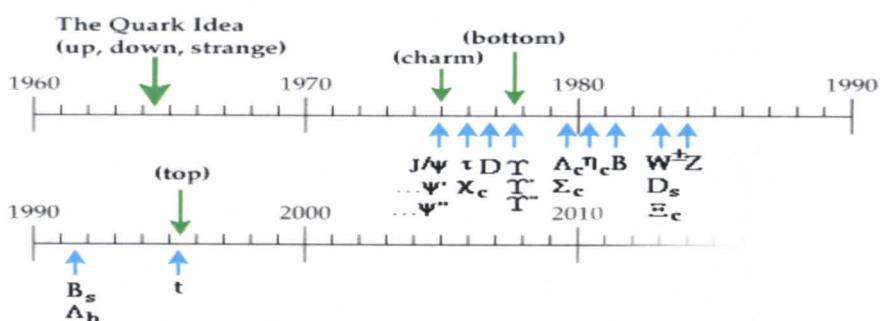
*Skup boje,
Skup slasti,
Skup gorčine,
Ali u stvarnosti su atomi i prostor"
-Demokrit (otprilike 400 godina p.n.e.)*

Demokrit je bio na pravom putu i daleko ispred svog vremena. Danas mi znamo da atomi nisu najmanje gradivne čestice materije; to jest, postoje u svetu čestica mnogo fundamentalnije čestice od atoma. Mada manje poetični od Demokrita, mi bismo mogli reći „postoje kvarkovi, leptoni, gluoni i prostor“. Fizičari, kroz eksperimente i teoriju, formirali su standardni model fizike elementarnih čestica, koji oslikava šta su oni verovali da su najelementarniji delovi materije.

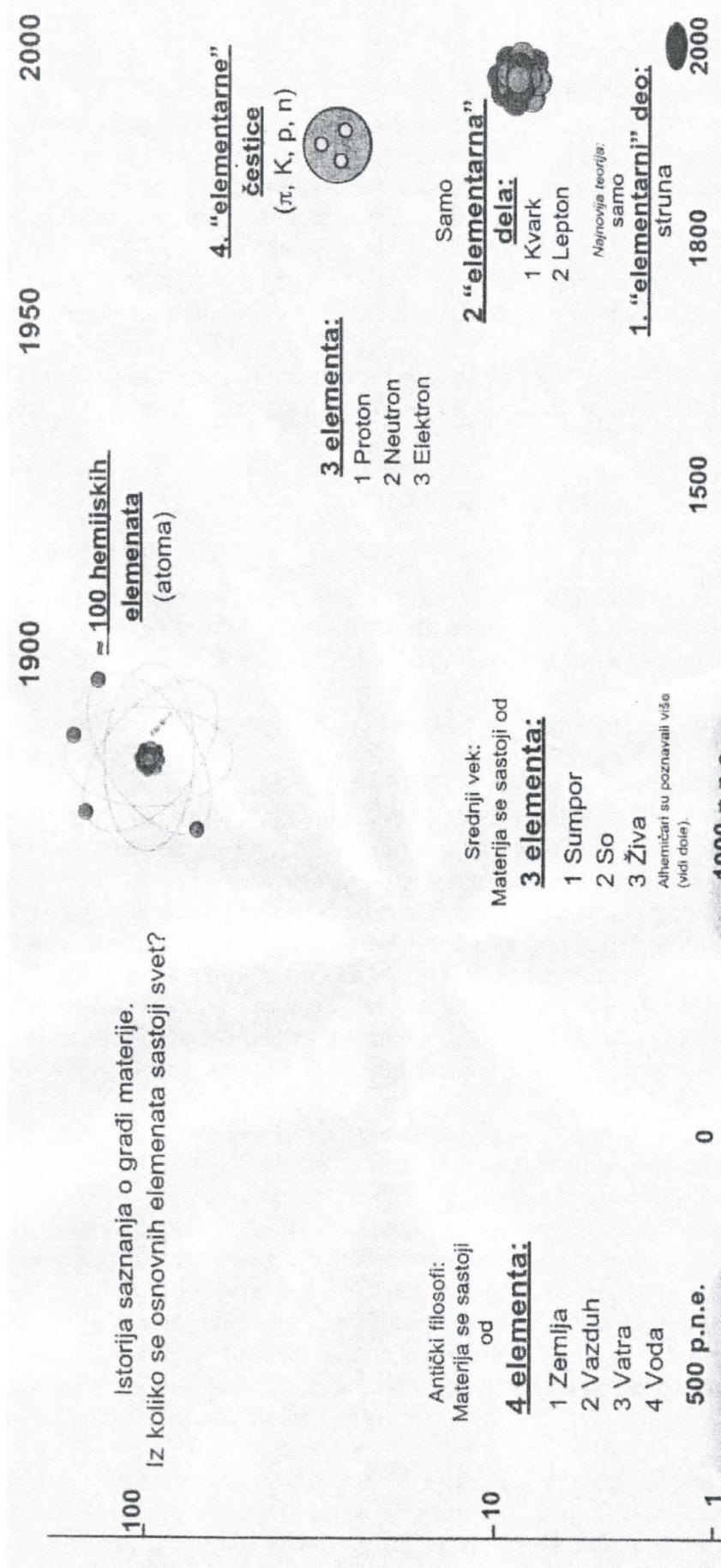
Istorija fizike čestica je duga i mogla bi se predstaviti na sledeći način:

- Pre 1800** Do 1800 nije mnogo učinjeno što bi se moglo ugraditi u teoriju čestica. Glavno istraživanje zapalo je hemiji kroz identifikaciju elemenata,
- 1802** Dalton oživljava studiju materije kroz njegovu atomsku teoriju, koja ističe da su atomi fundamentalni gradivni delovi prirode i mogu se jedino kombinovati u celobrojnim proporcijama,
- 1898** J. J. Thompson je otkrio da su katodni zraci elektroni, fundamentalne čestice
- 1905** Einstein objavljuje njegovu teoriju dualnosti talasa čestica svetlosti. Oni formiraju temelj kvantne mehanike.
- 1911** Rutherford otkriva da atom ima pozitivan nukleus
- 1913** Bohr unapređuje Rutherford-ov model atoma uključujući elektronske orbite na određenom radijusu da objasni očiglednost atomskog spektra emisije linija
- 1919** Iskrivljenje zvezdane svetlosti usled krivine prostora – vreme je opaženo, potvrđujući Einstein- ovu relativnost
- 1923** Louis de Broglie predlaže dualnosti talasa čestica materije
- 1925** Heisenberg kreirao njegov princip, koji postavlja limite na preciznost eksperimenta
- 1925-26** Schrodinger spašava talas – čestica dualne prirode od konfuzije sa talasnom jednačinom

- March 1926 Kvant mehanike je formulisan
- 1932 James Chadwick objavio otkriće neutrona
- 1956-57 Tsung-Dao Lee i Chen Ning Yang predlažu paritet nekonzervacije u subatomskim procesima, koji je potvrđen eksperimentom Chien-Shiung Wu
- 1962 Prvo eksperimentalno opažanje mion neutrina se dogodilo
- 1967 Raymond Davis kreirao prvi solarni neutrino detektor, pronalazeći samo polovinu predskazanog solarnog neutrino fluksa
- 1967 Steven Weinberg, Sheldon Glashow (kolaboracija) i Abdus Salam (nezavisno) formirali elektroslabu teoriju (osvojili Nobelovu nagradu 1979. godine)
- 1964 Kvarkove su predložili Murray Gell-Mann i George Zweig
- 1969 Jerome Friedman, Henry Kendall i Richard Taylor pronašli prvi kvark
- 1970-73 Standardni model fizike elementarnih čestica je razvijen
- 1974 Šarm kvark je otkriven
- 1975 Evidencija tau leptona je pronađena
- 1977 Eksperimentičari pronašli dokaz dno kvarka
- 1983 Carlo Rubbia otkrio W and Z bozone, posrednik slabe interakcije
- 1994 Planiranje za LHC (Large Hadron Collider) u CERN počinje
- 1995 Izveštaj za vrh kvark, konačno neotkriven kvark, je pronađen u Fermilab
- 2000 Tau – neutrino, poslednji deo standardnog modela je opažen u Fermilab.



Slika 3: Istorijski pregled događaja u fizici elementarnih čestica



4. ELEMENTARNE ČESTICE

Fizika elementarnih čestica je najmlađa disciplina savremene fizike. Nastala je kasnih pedesetih godina ovog veka i značajno je proširila naše znanje o prostoru, vremenu i mikrokosmosu. Povezala je specijalnu teoriju relativnosti i kvantu mehaniku i razvila je najtačnije fizičke teorije. Pokazala je da su osnovne interakcije u prirodi povezane sa lokalnim simetrijama, kao što su zakoni održanja posledica globalnih simetrija.

Fizika čestica se bavi izučavanjem mikrosveta u najmanjim prostornim i vremenskim dimenzijama. Nije ni završena ni zaokružena, kao mnoge druge oblasti savremene fizike.

Uprkos svom imenu elementarne čestice su najsloženiji objekti u prirodi kako zbog njihovog ogromnog broja tako i zbog različitih interakcija u kojima učestvuju.

4.1. POJAM ELEMENTARNE ČESTICE

Materija se u prirodi pojavljuje u mnogo različitih oblika, koji neprestano prelaze jedan u drugi. Bez obzira na ovu činjenicu, u našem znanju je duboko ukorenjena pozitivistička dogma da se materija, ipak, bar na skali malih dužina i velikih energija, sastoji od prostih, identičnih, nepromenljivih sastavnih delova – elementarnih čestica. Jedni fizičari ovu dogmu označavaju kao princip jednostavnosti, drugi kao princip elegancije.

Pojam elementarne čestice, u najopštijem smislu označava objekt bez unutrašnje strukture, bez oblika i dimenzija, dalje nedeljni komadić materije. Ništa u prirodi nije jednostavnije od elematarne čestice. Ova definicija je toliko savršena da se kao i sve idealne stvari uopšte ne koristi. Razlog je pre svega osnovana i mnogo puta dokazana sumnja da sićušni objekti poput protona, koji se istražuju, ne zadovoljavaju ni jedan od opštih kriterijuma elementarnosti. Mnogo češće se kaže da je elementarna čestica entitet koji je definisan i opisan skupom kvantnih brojeva u Tablici elementarnih čestica. Ova tablica se ispravlja, dopunjuje i objavljuje svake druge godine kao dodatak časopisu Physics Letters, a njeno skraćeno izdanje distribuira u luksuznim knjižicama polovine džepnog formata, koje mnogi fizičari sa neskrivenim zadovoljstvom nose u velikim torbama, zajedno sa drugim drangulijama.

U tablici elementarnih čestica navedeno je više stotina objekata. Svakom je pridružena masa, spin, parnost i drugi kvantni brojevi ako su značajni, poluživot, najčešći način poluraspada itd. Usvoji li se princip da su svi fizički sistemi, sve čestice koje zovemo elementarnim, podjednako fundamentalne i podjednako važne u svakom pogledu, dolazi se u ozbiljne poteškoće u opisivanju imponzantne građevine koja se zove materija. U prirodi postoji samo 105 različitih atoma. Zašto bi elementarnih čestica bilo dest, ili dvadeset puta više? Razumno je stoga, a pre svega praktično, biti sumnjičav prema ovom principu demokritičnosti koji je bio vrlo popularan među fizičarima šezdesetih godina, da bi ubrzo bio napušten, i pomiriti se sa pomalo nelagodnim saznajem da su neke čestice stvarno elementarne, a da neke to zaista nisu, ili da su komplikovane u najmanju ruku kao model vode.

Protoni, neutroni su, za razliku od elektrona, neutrina ili fotona složeni objekti izgrađeni od elementarnijih entiteta kvarkova. Kvarkovi su skoro slobodne čestice u protonu, a nose u proseku samo jednu polovicu njegovog impulsa. Druga polovina impulsa je raspoređena na gluone, kvante jake interakcije, koji drže kvarkove čvrsto zarobljene u protonu dimenzije 10^{-15} m. Šta je

još sitnije, još elementranije od kvarkova? Na definitivan odgovor moraćemo da sačekamo još neko vreme.

Ideal o malom broju sastavnih delova materije, privlačan još u antičko doba, je ponovo sačuvan, posle eksplozije broja atoma koja se desila sredinom 19. veka, zahvaljujući razvoju hemije, ili posle neslučenog uvećanja broja elementarnih čestica šezdesetih godina ovog veka u periodu kada su počeli da se grade gigantski akceleratori. Koliko dugo? Ako je klasifikacija čestica savršena u smislu da se sve sa svime slaže, da nema paradoksa i neprotivurečenih činjenica ovakva slika je granica daljem saznanju i daljim prodorima u mikrosvet.

Jedan od glavnih zadataka svih prirodnih nauka je klasifikacija velikog broja različitih objekata prema nekom univerzalnom principu. Glavna poteškoća u klasifikaciji elementarnih čestica je u tome što se ne zna sasvim pouzdano, naročito za kratkoživeće čestice, koje su složene, a koje istinski elementarne. Izvesno je, ipak, da je proton mnogo manje elementaran od elektrona, jer od njega ima veći radius i složenu unutrašnju strukturu pažljivo ispitano u duboko elastičnim sudarima elektrona i drugih leptona sa protonom. U modelu kvarkova, proton se prikazuje kao vezano stanje tri valentna kvarka, baš kao što se jezgro tricijuma opisuje kao vezano stanje jednog protona i dva neutrona, a molekul vode kao sistem dva atoma vodonika i jednog atoma kiseonika.

Postoji i druga poteškoća ništa manje ozbiljna. Odgovor na pitanje „Od čega se nešto sastoji?“ u svetu malih dimenzija i velikih energija gubi smisao koji ima u našem iskustvu. Sudarom dva protona dovoljno visoke energije u sistemu centra masa moguće je kreirati unapred zadati broj protona, piona i mnogih drugih čestica. Povećanjem energije povećava se broj i raznovrsnost kreiranih čestica. Jasno je da ove, novostvorene, čestice nisu sastavni delovi primarnih protona razumnom smislu te reči. Tvrđenje da se nešto sastoji od nečega zasnovano je na pretpostavci da svaki sastavni entitet izvan sistema očuvava jasno uočljive osobine koje ima i u sistemu. Atom se sastoji od elektrona zato što se elektroni atomskog omotača ne razlikuju od slobodnih elektrona. Međutim, strukturni objekti u elementarnoj čestici su tako čvrsto vezani u kolektiv da gube osobine koje imaju u slobodnom stanju. Tako, na primer, slobodni ili strujni kvarkovi imaju mase 10 ili 100 puta manje od masa valentnih kvarkova. Slobodni neutron je nestabilan za razliku od neutrona u jezgru. Prema tome, tvrđenje da se u svetu elementarnih čestica nešto sastoji od nečega treba uzeti oprezno.

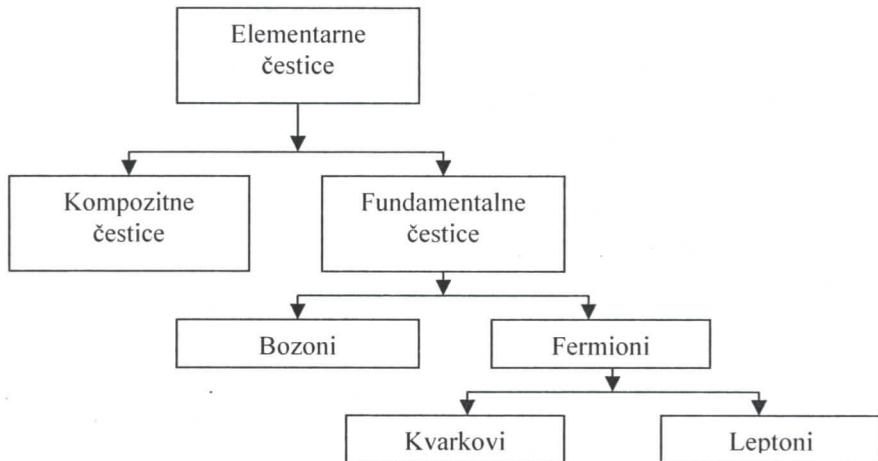
Postoje još najmanje dve poteškoće u klasifikaciji čestica. Mnoge čestice proizvode se uz pomoć akceleratora veoma retko, ali najveći broj čestica živi veoma kratko, čak manje od 10^{-24} s. Ove dve poteškoće su naravno pre svega tehničke prirode. Zbog njih su akceleratori i detektori čestica najglomazniji i najskuplji uređaji koje je naša civilizacija stvorila. Zbog svega ovog kriterijumi za klasifikaciju elementarnih čestica nisu tako očigledni kao što je slučaj sa živim bićima u botanici, ili zoologiji, ali zato nisu ništa manje strogi.

Elementarne čestice uređuju se u Tablici elementarnih čestica po rastućoj masi mirovanja, po spinovima, po vrstama interakcija u kojima učestvuju, prema stabilnosti na moguće raspade itd.

Mase mirovanja elementarnih čestica kreću se od nule, za foton i vrlo verovatno za sve tipove neutrina, do oko 10 GeV, ako se izuzmu tri prenosioča slabe interakcije, tri vektorska bozona, otkrivena 1984. godine sa impozantnim masama 80 – 90 puta većim od mase mirovanja protona, ili t-kvarka čija je masa 1995. godine procenjena na 180 GeV, a što je čak 40 puta više od mase b-kvarka, eksperimentalno potvrđenog 1977. godine, a jednako masi jezgra žive.

Stabilnih čestica ima vrlo malo. To su foton (γ), elektron (e), svi tipovi neutrina (ν) i proton (p). Ove čestice se ne raspadaju, ili imaju vrlo duge poluživote teško merljive današnjim eksperimentalnim tehnikama ($10^{30} - 10^{32}$ godina). Slobodni neutron, nastabilan za razliku od onog koji se nalazi u jezgru, ima, takođe, vrlo dug poluživot od čitavih 1000 sekundi. Sve ostale čestice se spontano raspadaju zahvaljujući nekoj od tri interakcije, a mnoge imaju vrlo kratke poluživote, kraće i od 10^{-24} s, što je vreme jedva dovoljno da svetlost pređe rastojanje od jednog jedinog prečnika protona.

Uobičajeno je da se elementarne čestice svrstavaju u četiri klase. To su foton, leptoni, mezoni i barioni.



Slika 5: Blok – dijagram fizike elementarnih čestica

Foton čini celu jednu klasu. On je i čestica i kalibracioni bozon.

Sledi klasa leptona sa ukupno šest čestica. To su elektron i njegov neutrino (ν_e), zatim mion (μ) i mionski neutrino (ν_μ) i naizad tau lepton (τ) i novi neutrino (τ_ν). Leptoni su najčešće čestice u prirodi (otuda im i ime potiče) i ako se u njih iz nepoznatih razloga smestio i τ lepton, sa impozantnom masom 3500 puta većom od mase elektrona, približno jednakoj masi jezgra deuterijuma.

Pion (π), ili pi – mezon, je prvi član velike familije čestica sa celobrojnim spinovima koji svi učestvuju u jakim interakcijama. To su mezoni. Mezoni su π , K , η , ρ , ϕ , J/ψ , itd. Ranije su se označavali malim grčkim slovima, ali kako je njihov broj enormno rastao ova slova su ponestala, a staro pravilo važi samo za najlakše i najstabilnije mezone. Svi mezoni su barioni.

Sa nukleinima, protonom i neutrinom, počinje mnogobrojna familija bariona, koja broji više od stotinu članova. Barioni su proton i neutron ali i Ω , Δ , Σ . Mase bariona su veće od 1 GeV – a. Svi barioni su fermioni.

Mezoni i barionu učestvuju u jakim interakcijama i zovu se jednim imenom hadroni. Sve čestice učestvuju u slabim interakcijama.

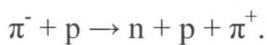
Naelektrisane učestvuju, naravno, i u elekromagnetrnim.

Izuzev nekoliko stvarno neutralnih čestica, kakav je foton, sve čestice imaju antičestice, koje se od njih razlikuju po znaku naelektrisanja i po znakovima drugih kvantnih brojeva.

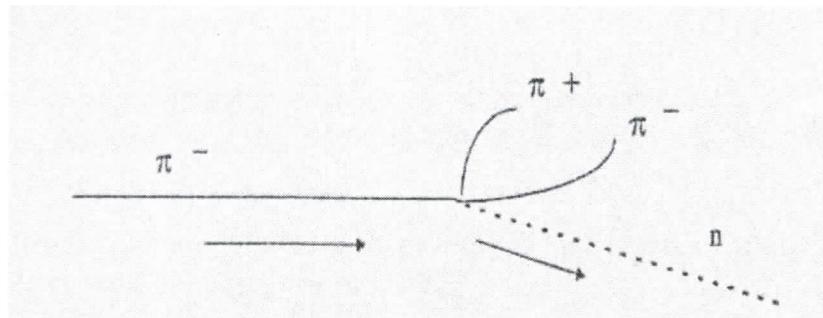
4.2. KRATKOŽIVEĆE ČESTICE

Najveći broj čestica živi veoma kratko. Takve čestice, bez obzira na brznu, prelaze mikroskopska rastojanja i nije ih moguće registrovati ni jednim poznatim detektorom. Međutim, pomoću maksimuma u raspodeli sekundarnih čestica one, ipak, ostavljaju signale o svojoj kratkotrajnoj egzistenciji, koji omogućuju da se uspešno detektuju, istina posredno, i svrstaju u Tablicu elementarnih čestica.

Posmatrajmo, na primer, sudar piona i protona koje se odvijaju mehanizmom jakih reakcija:



Visokoenergetski projektil, negativni pion, sudara se, na primer, u detektoru tragova, u vodoničnoj mehurastoj komori sa protonom u miru. Tipična skica ovog događaja data je na sledećoj slici.



Slika 6: Skica interakcija piona sa protonom u mehurastoj komori

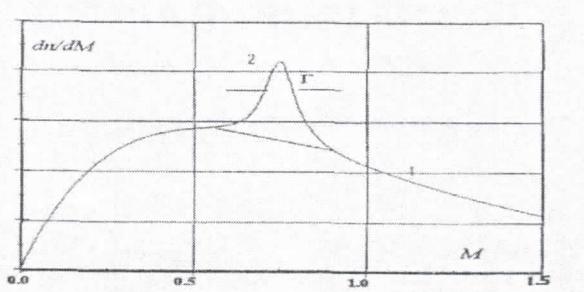
Proton u miru, a i neutralni neutron ne ostavljaju u komori nikakav vidljiv trag, jer nisu u stanju da jonizuju sredinu. Od sekundarnih čestica moguće je detektovati samo nanelektrisanje (π^- i π^+). Poznavanjem intenziteta magnetnog polja u kome se komora nalazi i merenjem zakrivljenja tragova piona određuju se vrlo precizno njihovi impulsi. Invarijantna masa, M:

$$M^2 = E^2 / c^4 - p^2 / c^2$$

za sistem od dva piona definiše se izrazom:

$$M^2 = (E_{\pi^+} + E_{\pi^-})^2 - (p_{\pi^+} + p_{\pi^-})^2.$$

Ovde smo uzeli da je $c=1$. Proučavanjem velikog broja reakcija navedenog tipa dobijena je raspodela sekundarnih piona po invarijantnoj masi šematski prikazanoj na sledećoj slici.



Slika 7: Eksperimentalno određena raspodela broja događaja po invarijantnoj masi.

(Na apscisi je invarijantva masa u GeV-ima, a na ordinati broj reakcija po jedinici te mase u proizvoljnim jedinicama)

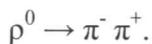
Uočava se jasno izražen maksimum u okolini invarijantne mase 0,75 GeV, koji je „izrastao“ iz masivne glatke krive. Otkud ovaj maksimum, koji se u žargonu fizičara označava kao rezonanca? Radi se o tome da se navedena reakcija odvija na dva različita načina, a konkurentna načina.

Prvi način odgovara istovremenoj produkciji tri sekundarne čestice: n , p , π^+ . Kod ovog tipa produkcije čestica pionima stoji na raspolaganju fazni proces opisan glatkom krivom na prethodnoj slici.

Drugi način produkcije piona odvija se u dva koraka. U prvom se u konačnom stanju najpre formiraju dve čestice: neutron i ρ^0 mezon po šemi:



Zatim se ρ^0 mezon raspada na dva piona:



Za ovakvu, dvočestičnu produkciju ρ mezona u invarijantnoj masi piona, koji nastaju njegovim raspadom, postoji oštro ograničenje, dato zakonom održanja energije i impulsa, na koje ukazuje maksimum na prethodnoj slici.

Preciznim određivanjem položaja maksimuma procenjuje se masa ρ mezona, a širinom maksimuma na polovini visine (I), uz pomoć Heisenbergove relacije neodređenosti, poluživot ove čestice inače nestabilne u odnosu na jake interakcije sa srednjim životom od $6 \cdot 10^{-24}$ s. Na identičan način određene su mase, poluživoti i druge osobine mnogih nestabilnih čestica. Zbog načina na koji se određuju osobine ovih čestica nazivaju jednim imenom rezonance. Postoje mezonske i barionske rezonance.

5. STANDARDNI MODEL

5.1. PRIRODA NAŠEG UNIVERZUMA

Verovanja smo da je univerzum nastao velikim praskom, sa enormno visokom energijom i temperaturom. Univerzum je odmah počeo sa širenjem velikom brzinom i jedan vid energija je konvertovan u parove čestica i antičestica sa masom – poznatom Ajnšajnovom $E=mc^2$. U početku, sićušna frakcija u sekundi, samo miks radijacije (fotoni čiste energije) i kvarkovi, leptoni i bozoni su postojali. Kroz nekoliko faza, čestice i antičestice su se sudsile i uništavale jedna drugu, ostavljajući za sobom male frakcije materija da nastave u univerzumu. Kako se univerzum širio brzo, oko stotog dela sekunde, temperatura je opadala na oko 100 biliona stepeni, i kvarkovi su počeli teško kretanje zajedno sa protonima i neutronima koji su kovitlali okolo sa elektronima, neutrinosima i fotonom u unutrašnjosti čestica. Sa ove tačke gledišta, nije bilo slobodnih kvarkova. U naredna tri minuta ili tako nešto, univerzum se ohladio na oko bilion stepeni, dopuštajući protonima i neutronima da formiraju nuklane elemenata kao što su deuterijum, helijum i litijum. Nakon trista hiljada godina univerzum se ohladio dovoljno (nekoliko hiljada stepeni) što je omogućilo slobodnim elektronima da postanu sastavni deo nukleona i tako se formiraju prvi atomi. Slobodni fotoni i neutrinosi nastavljaju da struje kroz univerzum, sastajući se i uzajamno delujući sa atomima u galaksijama, zvezdama i u nama.

Sada vidimo, da shvatanjem širenja univerzuma, treba da razumemo ponašanje elementarnih čestica: kvarkva, leptona i bozona.

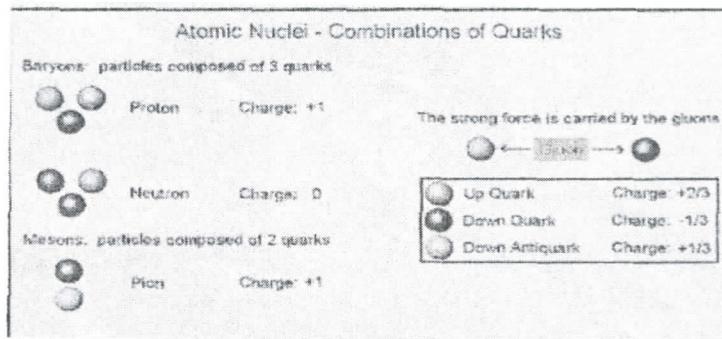
Iza toga, univerzum je sadržao najmanje dva skrivena dela: skrivenu materiju i skrivenu energiju. Ukupna vrednost svetlosne materije (npr. zvezde itd.) nije dovoljna da objasni celokupno opaženo gravitaciono ponašanje galaksija i grupe galaksija. Neki oblik misterije skrivene materije je pronađen.

Postavlja se pitanje: „Kako možemo da izučavamo kvarkove ako oni ne postoje slobodni?“ Upravo kao u velikom prasku, ako možemo upravljati dovoljno visokom temperaturom, možemo formirati neke parove kvarkova i antikvarkova, putem konverzije energije u materiji. (Čestice i antičestice moraju biti formirane u paru zbog izjednačenja nanelektrisanja itd.)

U direktnom sudaru između visokoenergetskih čestica i njihovih antičestica, čista energija se formira u „malim praskovima“ kada čestice i njihove antičestice uništavaju jedna drugu i nestaju. Ova energija je onda slobodna da se pojavi kroz parove fundamentalnih čestica npr. kvark-antikvark par, ili elektron-pozitron par, itd. Sada elektroni i njihovi pozitroni antičestica mogu biti opaženi kao dve različite čestice. Ali se kvarkovi i antikvarkovi ponašaju kao dva kraja strune – možeš seći strunu i imati dva odvojena struna ali ne možeš razdvojiti strune na dva jedinstvena „kraja“. Slobodni kvarkovi ne mogu biti primećeni.

Tako kada je kvark-antikvark par proizveden u direktnom sudaru sa prevelikom energijom ($E=2m_qc^2$) kvark i antikvark odlete u suprotan smer dok „se struna deli na dva dela“ i svaki deo para pronalazi sebe na putu sa drugim kvarkom. Ono što mi ustvari primećujemo je par mezon, gde se svaki mezon sastoji od kvarka i antikvarka. Sa dovoljno visokom energijom, više grupa kvarkova i antikvarkova može biti proizvedene: protoni, neutroni i teške čestice klasirane kao barioni.

Ono što smo mi pronašli o studiji kvarkova, je da se oni moraju kreirati u visokoenergetskim sudarima, ali oni mogu biti samo primećeni grupno u mezonima i barionima. Osobine kvarkova se mogu utvrditi kroz studiju raspada i interakcija među mezonima i barionima.

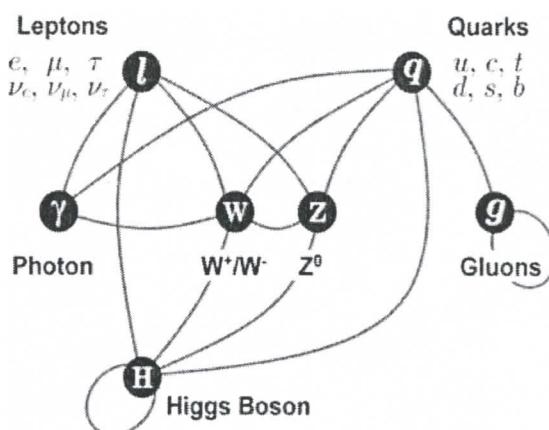


Slika 8: Kombinacija kvarkova

5.2. OSNOVNE IDEJE STANDARDNOG MODELAA

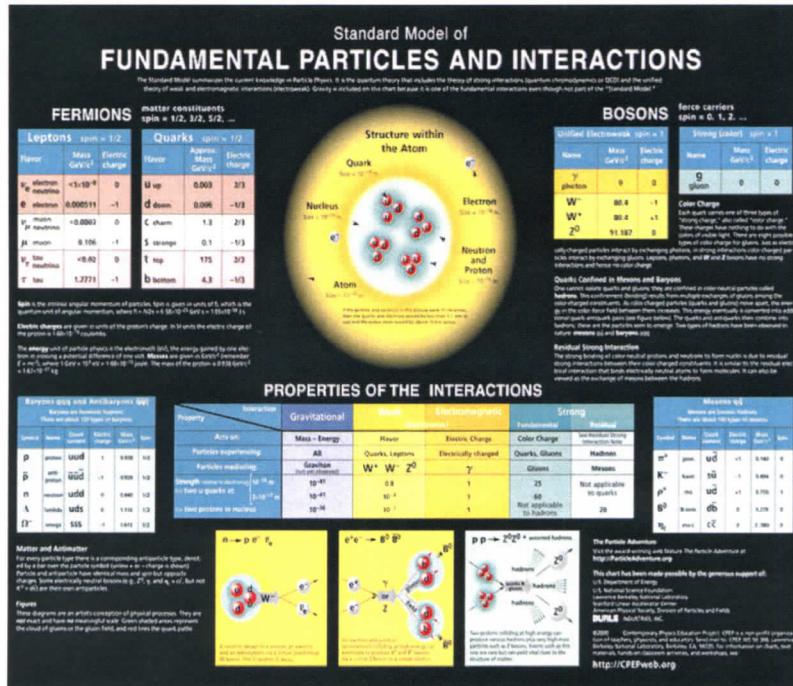
Fizičari veruju da mogu opisati ponašanje svih subatomskih čestica unutar jednostavnog teorijskog okvira nazvanog standardni model, ugrađujući kvarkove, leptone i njihove delovanje kroz jake, slabe i elektromagnetne interakcije.

Standardni model je plod mnogogodišnjeg međunarodnog napora kroz eksperimente, teorijske ideje i diskusije i može se sumirati na sledeći način: *Sve poznate materije u univerzumu danas su sačinjene od kvarkova i leptona, održanih zajedno putem fundamentalnih interakcija koje predstavljaju nanelektrisanje kroz čestice nazvane bozoni.*



Slika 9: Šema standardnog modela

Jedan princip koji je vodio ideju o prirodi elementarnih čestica je bio koncept simetrije. Priroda ukazuje put brojnim principima kroz postojanje raznovrsnih simetrija.



Slika 10: Fudamantalne čestice i interakcije

5.2.1. Interakcije

Danas se moramo latiti fundamentalnih interakcija ili interakcija između kvarkova i leptona: gravitacije, slabe interakcije, elektromagnetizama i jake interakcije. Naš svakodnevni svet je kontrolisan putem gravitacije i elektromagnetizma. Jaka interakcija vezuje kvarkove zajedno i zadržava nukleone (protone i neutronе) u nukleusu. Slaba interakcija je odgovorna za radioaktivni raspad nestabilnih nukleusa i za interakcije neutrinosa i drugih leptona sa materijom.

Ako se uzme da je relativna jačina za jaku interakciju jedan, u odnosu na nju, elektromagnetna interakcija ima relativnu jačinu od 1/137. Slaba interakcija je bilion puta slabija od jake interakcije. Najslabija od njih je gravitaciona interakcija. Ovo može izgledati čudno, ali ona dovoljno jaka da održi Zemlju i planete u orbiti oko Sunca.

Gravitaciona interakcija

Mada je izuzetno važna u svakodnevnom životu, gravitaciona interakcija među elementarnim česticama je zanemarljivo mala. Na primer, gravitaciona interakcija među protonima koji je u jezgru dodiruju je 10^{-38} deo jake interakcije koja deluje među njima. Glavna razlika između gravitacione i ostalih interakcija je kumulativno dejstvo i neograničeni domet gravitacije. Jaka i slaba nuklearna interakcija ne deluje van dimenzija nukleona, 10^{-15} m. Elektromagnetna interakcija nema kumulativni uticaj, zbog zaklanjanja pozitivnog nanelektrisanja negativnim,

mada je neograničenog dometa poput gravitacije. Pošto takvo zaklanjanja nema, gravitaciona interakcija raste sa porastom broja čestica i za masivne objekte i makroskopska rastojanja postaje preovladujuća.

Gravitaciona interakcija nije uključena u standardnom modelu pošto ona postaje značajna tek kada mase objekta dostignu red veličine „Planck – ove mase“ $m_p \sim 10^{19} \text{ GeV}/c^2$.

Slaba interakcija

Slaba interakcija izaziva β – raspad i druge slične raspade elementarnih čestica. Ne igra značajnu ulogu u izgradnji jezgra. Njena vrednost među protonima koji se dodiruju je 10^{-7} deo jake interakcije među njima i ima domet kraći od 10^{-18} m . Vrlo brzo opada sa rastojanjem (sa porastom rastojanja za manje od dva reda veličine slaba interakcija opada za četiri reda veličine). Mada joj je domet znatno manji od dimenzija nukleona, slaba interakcija je važna za razumevanje osobina osnovnih čestica i nastanka i razvoja svemira.

Jačina interakcije je proporcionalna tzv. Fermi – jevoj konstanti $G_F = 1,02 \cdot 10^{-5} / m_p^2$. Slabu interakciju prenose tri čestice: W^\pm i Z^0 .

Elektromagnetna interakcija

Elektromagnetna interakcija je važna za strukturu i uzajamno delovanje osnovnih čestica. Neke čestice međusobno deluju, ili se raspadaju, isključivo preko elektromagnetskih interakcija. Elektromagnetna interakcija ima beskonačni domet, ali na makroskopskoj skali zaklanjanje umanjuje njen efekat. Mnoge uobičajene makroskopske interakcije u krajnjoj liniji su elektromagnetne prirode. Preovlađuje u atomu, u atomskom jezgru i elektromagnetna interakcija među protonima koji se dodiruju je 100 puta manja od jake interakcije. Međutim, unutar jezgra elektromagnetna interakcija deluje kumulativno, jer nema zaklanjanja nanelektrisanjem suprotnog znaka. Kao posledica toga elektromagnetna interakcija može da dostigne veličinu jake interakcije i da u jednakoj meri utiče na stabilnost i strukturu jezgra.

Jačina interakcije je proporcionalna konstanti elektromagnetne interakcije $\alpha = 1/137$. Prenosilac elektromagnetne interakcije je foton (γ). Standardni model podrazumeava da je foton stabilna čestica i da nema masu ni električni naboј. Eksperimentalno određena gornja granica vrednosti nanelektrisanja je $Q_\gamma < 5 \cdot 10^{-30} \text{ e}^-$ i mase fotona $m_\gamma < 2 \cdot 10^{-16} \text{ eV}/c^2$.

Jaka interakcija

Jaka interakcija, koja je ključna za izgradnju atomskog jezgra, ima preovlađujuću ulogu u reakcijama i raspadu najvećeg broja osnovnih čestica. Međutim neke čestice (na primer elektroni) uopšte ne osećaju jaku interakciju. Jaka interakcija ima vrlo kratak domet, reda 10^{-15} m . Danas je prihvaćeno shvatanje da je nuklearna interakcija koja deluje između protona i neutrona, zapravo, preostala jaka interakcija koja deluje između kvarkova, u potpunoj analogiji sa međumolekulskim interakcijama koje deluju među neutralnim atomima i molekulima, a koje su preostale elektrostaticke interakcije među elektronima i atomskim jezgrima. Za razliku od



drugih interakcija koje opadaju sa rastojanjem, jaka interakcija raste. Porastom jake interakcije sa rastojanjem među kvarkovima objašnjava se zašto ne može da se opazi slobodan kvark.

Konstanta jake interakcije α_s je reda veličine jedinice. Imajući u vidu da je domet jake interakcije reda vekičine $R \sim 1$ fm, karakteristični efikasni preseci u procesima za koje je odgovorna jaka interakcija su reda veličine: $\sigma \sim \pi R^2 \sim 30$ mb, dok su karakteristična vremena: $\tau \sim c/R \sim 10^{-23}$ s. Prenosioci jake interakcije su gluoni (ima ih 8).

5.2.2. Odnos među interakcijama

Znamo da je gravitaciona interakcija između dva tela na rastojanju r proporcionalna proizvodu dve mase ($M \& m$) i obrnuto proporcionalna rastojanju r na kvadrat:

$$F_G = \frac{GMm}{r^2}$$

Suštinska jačina gravitacione interakcije je data pomoću univerzalne konstante sile G , nezavisno od mase i rastojanja. I elektromagnetna interakcija između dve čestice je proporcionalna proizvodu dva nanelektrisanja i obrnuto proporcionalna rastojanju r na kvadrat:

$$F_{em} = \frac{\alpha Qq}{r^2}$$

Ovde univerzalna konstanta α , daje suštinsku jačinu. Mi možemo porebiti relativne jačine elektromagnetskog odbijanja i gravitacionog privlačenja između dva protona jediničnog nanelektrisanja koristeći navedene jednačine. Nezavisno od rastojanja, proporcija koja se pojavljuje je 10^{36} . Prema tome dva protona će odbaciti jedan drugog i leteti odvojeno, lako odolevajući slabom gravitacionom privlačenju.

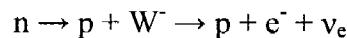
Tabela 1: Interakcije i njihovi kvanti, bozoni. Nanelektrisanje je u jedinicama elektron nanelektrisanje.

Interakcije	Relativna jačina	Bozon	Masa	Nanelektrisanje	Spin
Jaka	1	Gluon (g)	0	0	1
Elektromagnetna	1/137	Proton (γ)	0	0	1
Slaba	10^{-9}	W^\pm, Z	86,97	$\pm 1,0$	1
Gravitaciona	10^{-38}	Graviton (G)	0	0	2

Nosioci jake interakcije su nazvani gluoni, glu koji zadržava kvarkove zajedno u protonima i neutronima i takođe pomaže formiranju nikleus. Nosioci slabe interakcije javljaju se u tri oblika i nazvani su slabi bozoni: W^\pm i Z^0 . Nosioci gravitacionog polja su nazvani graviton i imaju spin 2.

5.2.3. Kvanti polja – prenosioци interakcije

Klasično gledano, interakcija se sa jedne čestice na drugu prenosi poljem. Na primer, u prostoru oko pozitivnog nanelekrisanja obrazuje se električno polje koje prenosi privlačnu interakciju na negativno nanelekrisanje koje se nalazi u blizini. Šta više, polje može da prenosi i energiju i impuls sa jedne materijalne čestice na drugu. Prema savremenoj teoriji polja, enegrija i moment polja su kvantirani i kvant koji prenosi jedinični iznos energije ili momenta naziva se čestica polja. Tako se svaka interakcija može predstaviti emisijom ili apsorpcijom čestice (bozona) koja prenosi interakciju. (Sve čestice polja imaju celobrojni spin, dakle, pokoravaju se Boze – Ajnštajnovoj raspodeli, pa se zato nazivaju i bozonima polja). Na primer, elektromagnetna interakcija među česticama može se predstaviti emisijom i apsorpcijom fotonu. Dakle, svakoj interakciji može da se pridruži odgovarajuće polje koje se prostire preko sopstvenih čestica polja. Slabi bozoni W^\pm i Z^0 učestvuju u procesima β -raspada jezgra. Na primer, β -raspad neutrona (vodjen slabom interakcijom) može da se predstavi kao:



Zbog vrlo kratkog vremena života slabi bozon polja W^- sa brzo raspada na elektron i antineutrino. Jaku interakciju među česticama prenose gluoni, elementarne čestice koje se mogu detektovati samo posredno. Graviton, koji je predviđen na osnovu teorije gravitacije, još nije eksperimentalno opažen.

5.2.4. Vreme delovanja i domet interakcije

Relativna jačina interakcije određuje njen domet i vremensku skalu na kojoj deluje. Bozoni, preko kojih se ostvaruje interakcija, su prividni jer se, mada emitovani i apsorbovani od materijalnih čestica, eksperimentalno ne mogu opaziti. Pošto se tokom interakcije bozon emituje i apsorbuje unutar sistema, na dugačkoj vremenskoj skali ne narušava se zakon o održanju energije. Međutim, u intervalu između emisije i apsorbacije bozona zakon o održanju energije kao da je narušen jer izgleda kao da je bozon nastao ni iz čega. Dakle, postavlja se pitanje odakle energija za stvaranje virtualnog bozona u izolovanom sistemu. Ovde se treba prisjetiti Hejzenbergove relacije neodređenosti koja u obliku

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

daje vezu između neodređenosti energije, ΔE , i vremena, Δt . Dakle, Hajzenbergova relacija neodređenosti dopušta fluktuacije (odstupanja u okolini srednje vrednosti) energije pri čemu je veličina odstupanja, ΔE , obrnuto proporcionalna dužini intervala, Δt , u kojim je fluktacija dopuštena. U vezi sa emisijom i apsorbacijom virtualnih bozona, gornji izraz dopušta nastanak virtualnog bozona, s tim što mu je vreme života, Δt_B , ograničeno sopstveno energijom, ΔE_B :

$$\Delta t_B \leq \frac{\hbar}{2\Delta E_B}$$

Dakle, virtualni bozoni nastaju iz fluktacije energije. Pošto je energija bozona proporcionalna jačini interakcije iz izraza sledi da je interval u kome interakcija deluje obrnuto proporcionalan njenoj jačini. Srednje vreme raspada je često signal za vrstu interakcije koja dovodi do pojave posmatranog procesa. Najbrži raspadi, često na skali do 10^{-23} s, ukazuju na delovanje jake interakcije. Treba uočiti da interval od 10^{-23} s odgovara vremenu potrebnom čestici sa nultom masom mirovanja da prevali rastojanje dimenzija bariona (10^{-15} m) tj. vremenu potrebnom da gluon pređe sa jedne čestice na drugu.

Ako je reč o bozonima sa konačnom masom mirovanja, može se uzeti da je energija, ΔE_B potrebna za stvaranje bozona mase m_B data Ajnštajnovom relacijom:

$$\Delta E_B = m_B c^2$$

gde je c brzina svetlosti. Zamenom poslednjeg u gornjem izrazu nalazimo vreme života bozona:

$$\Delta t_B \approx \frac{\hbar}{2m_B c^2}$$

a uvezši da se kreće brzinom bliskom brzini svetlosti, možemo proceniti put koji pređe u toku života, dakle, domet bozona, d_B :

$$d_B = c \Delta t_B \approx \frac{\hbar}{2m_B c}$$

Pomoću ovog izraza Jukava je procenio masu mezona (piona, π) koji je prenosilac preostale jake interakcije među nukleonima u atomskom jezgru. Znajući da je domet nuklearnih interakcija reda 10^{-15} m, $d_\pi = 1$ fm, preuređivanjem poslednjeg izraza nalazimo energiju mirovanja piona:

$$m_B c^2 \approx \frac{\hbar c}{2d_B} = \frac{0,197 GeV \cdot fm}{2 \cdot 1 fm} \approx 0,1 GeV$$

koja odgovara masi mirovanja od 100 MeV/c 2 . Ova vrednost prilično dobro se slaže sa eksperimentalno određenom masom piona $139,6$ MeV/c 2 .

5.3. UNIFIKACIJA

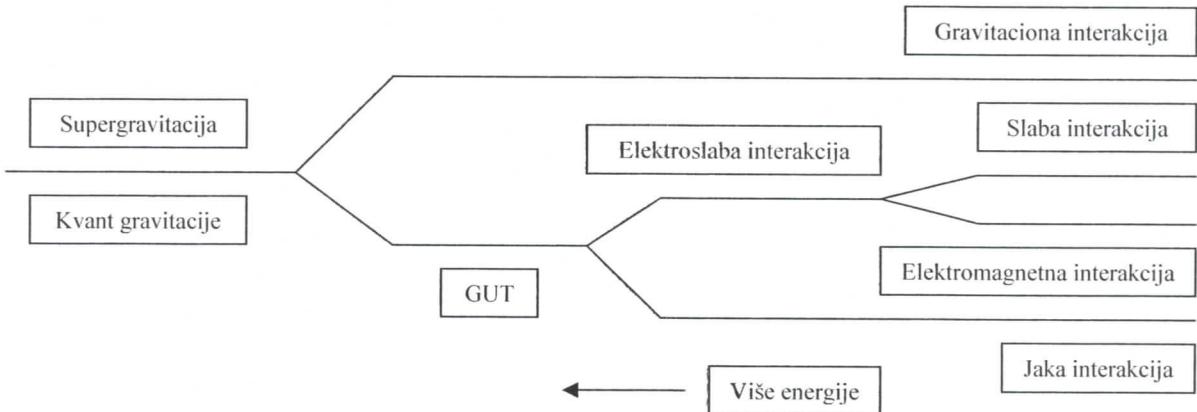
Za univerzalnu teoriju, četiri interakcije su mnogo. Zašto nemamo jednu univerzalnu interakciju? Decenijama su fizičari težili unifikaciji četiri interakcije u jednu univerzalnu interakciju koja je postojala u prvoj stepenu univerzuma. U takvoj slici, četiri interakcije, mi primećujemo danas, su upravo manifestacija originalne male interakcije. Bilo kako bilo, mi moramo razumeti da naša egzistencija zavisi od postojanja ovih različitih interakcija. Ako gravitacija nije toliko slaba, onda bi imali samo jednu ogromnu crnu rupu umesto galaksija, zvezda i planeta. Ako elektromagnetna interakcija nije u ravnoteži sa jakom interakcijom, nukleusi bi se raspali – bez atoma ili molekula, hemije ili biologije. Slaba interakcija dopušta mnogo suptilniji fenomen – lagano sijanje zvezda kao Sunca ne bi bilo moguće bez slabe interakcije, eksplozije koje kreiraju sve nove elemente teže od gvožđa takođe zavisi od snage neutrino interakcija; radioaktivnost u njegovom središtu dopušta Zemlji da ostane toplo gostoljubivo telo.

Nije sasvim zadovoljavajuće da imamo četiri različite teorije za ove četiri interakcije. Elektromagnetna interakcija čestica je objašnjena dobro postavljenom modernom teorijom kvantne eletrodinamike (QED). Slaba interakcija ima sopstvenu teoriju pri čemu se ove dve kombinuju kao elektroslaba teorija u standardnom modelu. Jaka interakcija između kvarkova i gluona je druga teorija nazvana kvantna hromodinamika (QCD), gde je jednakost električnog najelektrisanja nazvana „boja“. Ajnštajnova opšta teorija relativiteta objašnjava kako je gravitacija manifestacija osnovne geometrije prostora – vremena.

Upravo kako je Maxwell pokazao, elektricitet i magnetizam se manifestuju od istog fenomena elektromagnetizma, elektroslaba teorija, koja je 1979. godine dobila Nobelovu nagradu, uspeva u ujedinjenju slabe i elektromagnetne interakcije u elektroslabu interakciju. Kada smo istakli snage četiri različite interakcije, propustili smo da kažemo da ove snage mogu zavisiti od „temperature“ ili energetskog nivoa interakcije. Mada su ove snage različite na sadašnjoj temperaturi (npr. 300K ili ekvivalentna energija od 1/40 eV), slaba interakcija koja je stoga zavisna od energije, u sudarima blizu 1000GeV, bila je jaka kao elektromagnetna interakcija. Elektroslaba teorija standardnog modela objašnjava sve ovo. Osnovne jednačine su simetrične u slučaju odvijanja dve interakcije i kada su mase svakog kvanta jednake nuli. Kako god, kada temperatura padne, simetrija je prekinuta i kvant se deli na četiri različita bozona razlišite mase: W^\pm (80 GeV), Z^0 (91GeV) i foton γ sa masom jednakom nuli. Na „sobnoj temperaturi“ masa W i Z ne igra važnu ulogu. Ali pri visokim energijama od 300 GeV i više, razlika između mase jednakih nula i mase W i Z bozona se briše i oni svi deluju jednakom jekom. Godine 1983. W bozona i 1984. godine Z bozona su primećeni u CERN laboratoriji u Ženevi, u visokoenergetskim sudarima protona sa antiprotonima. Oni su predskazali mase. Standardni model je bio na putu.

Krivac za ova dešavanja je novo polje nazvano Higs polje. Moguće je zamisliti kako radi. Podsetimo da je masa manifestacija inercije ili otpora ubrzanja. Ako je Higs polje odjednom zauzelo ceo prostor, onda može raditi kao kočnica na svako kretanje čestice u prostoru, kočnica zasnovana na interakcijama sa Higs poljem. Ova kočnica se pojavljuje kao inercija. Ali sada mi moramo pronaći bozon koji nosi ovo polje – Higs bozon. Ovo prevaziđa granice standardnog modela, a što je potrebno da bi imali konačnu sliku. Očekuje se masa od oko 100 GeV, unutar najvećih akceleratora koji se planiraju u bliskoj budućnosti.

Sve interakcije u prirodi bi trebale da budu u mogućnosti da se opišu jedinstvenom teorijom. Samo pri visokim energijama bi se moglo ponašanje interakcija kombinovati, što je nazvano unifikacija.



Pre unifikacione tačke interakcije se nisu razlikovale i imale su simetriju. Posle unifikacione tačke, interakcije deluju drugačije i simetrije nema.

Slika 11: Šema unifikacije

5.4. FUNDAMENTALNE ČESTICE

Kada su fizičari počeli da govore o elementarnim česticama i kada su izgradili dovoljno moćne akceleratore u kojima su tragali za tim česticama broj novih čestica počeo je brzo da raste. Činilo se da je svet postajao sve komplikovaniji. Pronađeno je više od 200 elementarnih čestica. Fizika je bila suočena sa velikim problemom klasifikacije ovogliko velikog broja čestica. Jednom prilikom Enriko Fermi (dobitnik Nobelove nagrade) na pitanje o nekoj čestici svom tadašnjem studentu, budućem Nobelovcu, Leonu Ledermanu odgovorio je: „Mladi čoveče, kada bih mogao da zapamtim imena svih tih čestica bio bih botaničar.“

Pamćenje nikad nije bila osobina koja se mogla vezati za fizičare, oni su uvek pokušavaju da nešto razumeju i objasne. Zašto pamtiti toliko različitih stvari kada možda postoji jednostavniji način. Taj način je pronađen negde između 1970. i 1973. godine.. Tada je nastao tzv. standardni model elementarnih čestica. Bila je to teorija koja je opisala sve do tada poznate elementarne čestice, a predviđala je i čestice koje su otkrivene tek kasnije, ali verovatno je najbitnije to što je ovaj model pokazao da priroda nije toliko komplikovana koliko je u izgledalo – broj fundamentalnih, osnovnih, čestica bio je mnogo manji od elementarnih. Treba uočiti razliku između elementarnih i fundamentalnih čestica. Pod fundamentalnim česticama podrazumevaju se čestice koje nemaju unutrašnju strukturu, to su čestice koje opisuje standardni model. Elementarne čestice su čestice koje su svuda oko nas, one su izgrađene od fundamentalnih čestica.

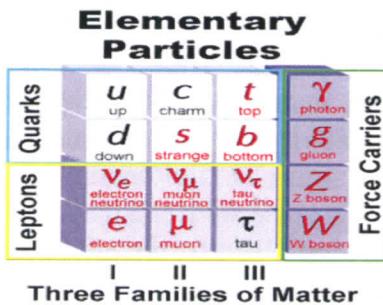
Prema današnjim saznanjima, formulisanim u okviru standardnog modela, materija je izgrađena od relativno malog broja fundamentalnih čestica. To su kvarkovi i leptoni.

Kvarkovi su subnuklearne čestice koje učestvuju u jakim interakcijama. Leptoni u ovim interakcijama ne učestvuju uopšte, ali su zato glavni objekti u slabim interakcijama, a ako su nanelektrisani ponašaju se kao idealne Dirakove čestice.

Leptoni su po mnogo čemu slični kvarkovima. I jedni i drugi su fermioni (spin $\frac{1}{2}$), poluprečnici im teže nuli i sve govori da nemaju unutrašnju strukturu. Takođe, postoji šest tipova kvarkova i leptona koji su podeljeni u tri familije, imaju i jedni i drugi antičestice.

Postoje između njih i značajne razlike:

- kvarkovi se pojavljuju u tri stanja (boje), leptoni u jednom jedinstvenom;
- kvarkovi imaju neobično, necelobrojno nanelektrisanje u jedinicama elementarnog nanelektrisanja (+2/3 ili -1/3), leptoni normalno, celobrojno;
- kvarkovi se raspadaju u leptone mehanizmom slabih interakcija;
- kvarkovi nisu nikada viđeni sami za razliku od leptona.



Slika 12: Vrste elementarnih čestica

Postoji i jedna zanimljiva i ne sigurno slučajna simetrija. Kvarkova i leptona ima tačno po šest podeljenih u tri generacije. Prva generacija, sastoji se od elektrona i elektronskog neutrina, i najlakših kvarkova u i d. Prva generacija je sasvim dovoljna za kreaciju celokupne konvencionalne materije koja postoji na planeti Zemlji i dobrom delom kosmosa. Iz druge generacije, na površini Zemlje srećemo i to veoma retko mione (μ) i mionska neutrina i to jedino u sastavu neke komponente kosmičkog zračenja.

Druga i treća generacija istinski elementarnih čestica sadrži znatno teže i leptone i kvarkove od prve. Istina, vrlo verovatno, neutrina iz sve tri generacije, koje smo uslovno nazvali gornjim leptonima, imaju, identičnu, nultu masu mirovanja. Zanimljivo je da je razlika nanelektrisanja između gornjih i donjih letona i gornjih i donjih kvarkova uvek tačno jednaka +1.

Tabela 2: Osnovne osobine i veza među česticama po standardnom modelu

Osnovne čestice materije				
Nanelektrisanje	Prva generacija	Druga generacija	Treća generacija	
Leptoni				
-1	elektron (e)	mion (μ)	tauon (τ)	plus antičestice
0	el.neutrino (ν_e)	μ neutrino (ν_μ)	tau neutrino (ν_τ)	plus antičestice
Kvarkovi				
2/3	u- kvark	c- kvark	t- kvark	plus antičestice
-1/3	d- kvark	s- kvark	b- kvark	plus antičestice
Bozoni polja				
0		foton		elektromagnetna
0		gluoni (8)		jaka sila

5.4.1. Kvarkovi

Po svemu sudeći, kvarkovi su zaista fundamentalne čestice. Oni nemaju unutrašnju strukturu i ne mogu se razdvojiti u nešto manje. Posebno je zanimljiva njihova "zarobljenost" zbog koje ne postoje slobodni kvarkovi, a nijedan od brojnih eksperimentalnih pokušaja da se neki kvark istisne iz hadrona nije bio uspešan. Većito zarobljeni unutar masivnijih čestica, kvarkovi pokazuju još jednu čudnu osobinu – ponašaju se kao slobodne čestice na međusobno bliskim, malim rastojanjima, što je u većini drugih fizičkih situacija nezamislivo. Ovu karakteristiku „asimptotske slobode“ kvarkova razotkrili su laureati Nobelove nagrade Dejvid Gros (David Gross, r. 1941.) sa Kalifornijskog univerziteta u Santa Barbari, Frenk Vilček (Franck Wilczek, r. 1951.) sa Tehnološkog instituta u Masačusetsu (MIT) i Dejvid Policer (David H. Politzer r. 1949.) sa Tehnološkog instituta u Kaliforniji. Po odluci Nobelovog komiteta, ovi zasluzni fizičari su ravnopravno podelili Nobelovu nagradu na tri jednakaka dela.

Dobitnici Nobelove nagrade za fiziku postali su poznati još 1973. godine, kada su u časopisu „Physical Review Letters“ objavljena dva njihova rada o ponašanju kvarkova na visokim energijama. U to vreme Vilček i Policer bili su samo diplomirani studenti. Njihov rad sa profesorom Grossom objašnjavao je neobično ponašanje kvarkova na visokim energijama. Ovo objašnjenje predstavljalo je jedan od ključnih koraka u proučavanju kvarkova i stvaranju kvantne hromodinamike, teorije koja opisuje kvarkove, najelementarnije od svih čestica. Kvantna hromodinamika omogućila je stvaranje potpune slike standardnog modela fizike elementarnih čestica. Prema standardnom modelu, u prirodi postoje četiri interakcije i 12 elementarnih čestica, kao i 12 njihovih antičestica. Četiri interakcije koje standarni model opisuje su elektromagnetna, slaba, jaka i gravitaciona, a elementarne čestice dele se na dve grupe: 6 leptona i 6 kvarkova.

- Vrste kvarkova

Kvarkovi su čestice od kojih su izgrađeni protoni, neutroni i mnoge druge čestice. Ima ih šest, razvrstanih u tri generacije. Prvoj generaciji pripadaju kvark gore (up) i dole (down), drugoj šarm (charm) i čudo (strange), a dok poslednjoj trećoj generaciji pripadaju – vrh (top) i dno (bottom). Ime „kvark“ pozajmljeno je iz knjige Fineganovo bdenje (Džejmsa Džojsa). Ova čudna imena kvarkova nemaju nikakav fizički smisao već su izabrana proizvoljno, zbog lakšeg pamćenja.

Kvarkovi, sa ovim zanimljivim imenima, su vrlo čudne čestice. Nikad nisu sami već se uvek javljaju sa drugim kvarkovima i tako grade svet oko nas. Materija koja nas okružuje izgrađena je od kvarkova (i leptona) prve generacije. U prirodi sve teži minimumu potencijalne energije pa se masivni kvarkovi brzo raspadaju na lakše. Zbog toga čestice izgrađene od kvarkova II i III generacije žive vrlo kratko. Za razliku od leptona, koji su interagovali svim interakcijama osim jakom, kvarkovi interaguju preko sve četiri fundamentalne interakcije.

Naelektrisanje kvarkova je razloženo.

Tabela 3: Kvarkovi

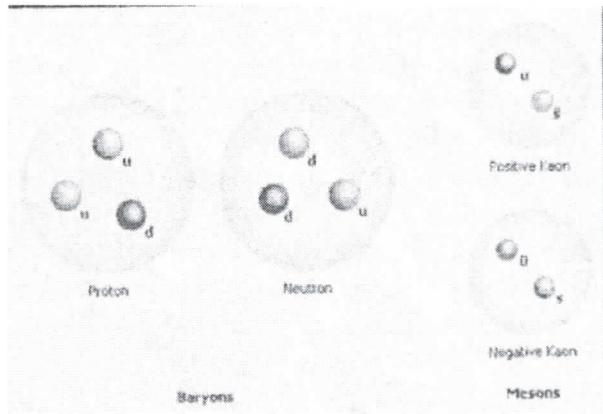
Kvarkovi (spin $\frac{1}{2}$)			
Ime	Aromat	Masa (GeV/c ²)	Q(e)
up	u	~ 0,35	+2/3
down	d	~ 0,35	-1/3
charm	c	1,5	+2/3
strange	s	0,5	-1/3
top	t	174,3 (51)	+2/3
bottom	b	4,5	-1/3

Detektovanje kvarkova prilično je težak posao jer oni ne postoje sami, uvek su u sastavu neke druge masivnije čestice, sa drugim kvarkovima. Jedini način za detekciju je primenom nekih posrednih metoda i proverom da li se ti rezultati slažu sa predviđanjima teorije. Kada je, 1964. godine, Gell-Man objavio postojanje kvarkova, bila su poznata tri kvarka: gore, dole i stranost. Deset godina kasnije, 1974. godine, prilikom otkrića J/Ψ mezona, utvrđeno je postojanje četvrtog kvarka, nazvanog šarm. Peti, dno kvark otkriven je 1977. godine, da bi 1995. godine bio otkriven najmasivniji među kvarkovima vrh, čime je standardni model dobio svoju simetriju jer je broj kvarkova izjednačen sa brojem leptona. Bez doprinosa koji su tome svojevremeno dali laureati Nobelove nagrade, toliki napredak u shvatanju strukture materije ne bi bio moguć.

Kao i druge čestice i kvarkovi imaju svoje antičestice, koje se razlikuju po spinu i nanelektrisanju.

Kvarkovi su gradivne jedinice koje grade veliki broj čestica, koje se nazivaju hadroni. Hadroni koji se sastoje od tri kvarka nazivaju se barioni. U barione spadaju i dobro pozati proton (uud - kvarkovi) i neutron (udd). Mezoni su hadroni koji su izgrađeni od jednog kvarka i jednog antikvarka. Antičestice hadrona, npr. antiproton i antineutron sastoje se od antikvarkova. Mezoni su nestabilne čestice koje kratko žive, red veličine 10^{-20} sekundi.

Jedan od bariona koji je zbulio fizičare i bacio malu sumnju na standadni model bio je barion Δ^{++} koja se sastoji od tri up kvarka (uuu). Problem koji se javio bio je posledica Paulijevog principa isključenja. Prema poznatim zakonima fizike dva kvarka morala su da imaju isti spin, a to Paulijev princip nije dozvoljavao. Ono što su fizičari do tada znali govorilo je da ova čestica ne može da postoji, ali ona je ipak postojala. Rešenje ove misterije brzo je nadeno, utvrđeno je da kvarkovi poseduju, pored električnog, još jednu vrstu naboja – boju. Ovde boja nema pravo značenje, kvarkovi se ne razlikuju po boji (previše su mali da bi uopšte i imali neku boju) već je taj termin izabran slično kao i njihova imena, da bi se lakše pamtio. Kvarkovi se javljaju u tri boje. Kao što je nanelektrisanje povezano sa elektromagnetskom interakcijom, nabolje boje nalazi se u vezi sa jakom interakcijom. Uvođenje boje rešilo je problem Δ^{++} čestice vrlo jednostavno – kvarkovi od kojih je ova čestica napravljena imaju različitu boju, važenje Paulijevog principa nije narušeno.



Slika 13: Materije je sastavljena od mnoštva čestica nazvanih kvarkovi. Kvarkovi se pojavljuju u šest varijanti: gornji, donji, šarm, nepoznati, vrh i dno. Kvarkovi imaju takođe antimateriju nazvanu antikvark. Kvarkovi formiraju čestice nazvane barioni i kvarkovi i antikvarkovi formiraju mezone. Protoni i neutroni, čestice koje čine nukleon atoma, su primer bariona. Pozitivni i negativni keoni su primer mezona.

- Zarobljenost kvarkova

Kada se snop visokoenergetskih elektrona rasejava na protonu, uočava se da je do sudara elektrona došlo na tačkama unutar protona, što je jedan od dokaza da unutar protona postoje od njega elementarnije čestice - kvarkovi. Tokom sedamdesetih godina, kvarkovi su svojim osobinama u mnogo čemu zbumjivali fizičare. Jaka interakcija, koja deluje među kvarkovima, ima pregršt neobičnih osobina. Na rastojanjima reda dimenzija hadrona u kojima su kvarkovi zarobljeni, jaka interakcija ima tako veliki intenzitet da je nemoguće razdvojiti i oslobođiti kvarkove. Međutim, što su kvarkovi bliži jedni drugima, jaka interakcija među njima sve je slabija. Kada se sasvim približe, kvarkovi se ponašaju kao slobodne čestice. To nalikuje zamišljenoj situaciji sa tri zatvorenika koja su uzajamno vezana elastičnim užetom – što se više udaljavaju jedni od drugih, sila koja ih povezuje sve je jača, a kada se približe jedni drugima mogu da se kreću slobodno. Upravo ovaj fenomen su 1973. godine Gros, Vilček i Policer objasnili „asimptotskom slobodom“ kvarkova, za šta im je ove godine dodeljena Nobelova nagrada.

5.4.2. Leptoni

Leptoni obuhvataju tri nanelektrisane čestice i tri čestice bez nanelektrisanja. Nanelektrisani leptoni su elektron, mion i tauon. Njihovo nanelektrisanje je jedinično negativno, a spin im iznosi $\frac{1}{2}$. Međusobno se razlikuju po masi. Elektron je najlakši (0.511MeV), muon nešto masivniji, a tau najmasivniji (1777MeV).

Svakom od ova tri leptona odgovara jedan lepton vrlo male mase, bez nanelektrisanja. Ti leptoni nazivaju se neutrini. Neutrini su vrlo čudne čestice. Oni gotovo da ne interaguju i skoro da ne osećaju delovanje interakcija. Postoje tri vrste neutrina: elektronski, mionski i tau-neutrino. Kao i kod nanelektrisanih leptona razlika između ovih neutrina je u masi, najlakši je elektronski a najmasivniji tau neutrino.

Leptoni II i III generacije nisu stabilni i raspadaju se na lakše leptone. U raspodu nanelektrisanih leptona jedan proizvod je uvek neutrino iste generacije kao i raspadnuti lepton. Kod neutrina uočena je pojava „oscilovanja“ tj. prelaska neutrina jedne u neutrino druge generacije.

Svaki od ovih leptona ima i svoju antičesticu. Antičestica nanelektrisanih čestica je u svemu ista čestici osim u znaku nanelektrisanja. Tako su tri leptona nanelektrisana negativno a njihove antičestice pozitivno, istom količinom nanelektrisanja. Kod nenanelektrisanih leptona (neutrina) situacija je malo drugačija. Kaže se da su neutrini sami sebi antičestice. Neutrino (bilo koji od tri pomenuta) i odgovarajući antineutrini razlikuju se u znaku spina.

Tabela 4: Leptoni

Leptoni (spin $\frac{1}{2}$)					
Leptoni	Q (e)	Masa (GeV/c^2)	Srednji život τ (s)	Tip raspada	BR (%)
ν_e	0	$<5 \text{ vE}/c^2$	stabilan		
ν_μ	0	$<0,19 (\text{CL}=90\%)$	stabilan		
ν_τ	0	$<18,2 (\text{CL}=90\%)$	stabilan		
e	-1	$0,510998902(21)$	$>1,5 * 10^{34}$		
μ	-1	$105,658357(5)$	$2,19703(4)*10^{-6}$	$e^- \nu_e \nu_\mu$	~ 100
τ	-1	$1776,99(29)$	$290,6(11)*10^{-15}$	$\mu \nu_m \nu_\tau$	$17,37 (6)$
				$e^- \nu_e \nu_\tau$	$17,84 (6)$
				hadroni + ν_τ	~ 65

Neutrino je elementarna čestica. Spada u leptone, nema nanelektrisanje, spin je polubrojni $(\frac{1}{2}\hbar)$ pa spada u fermione. Sva do sada opažena neutrina su leve heličnosti (tj. realizovano je samo jedno od dva moguća spinska stanja; helicitetom se izražava projekcija spinskog momenta na pravac kretanja). Dugo se verovalo da nema masu, međutim, postoje indikacije da neutrino ipak ima masu, mada vrlo malu. Postojanje neutrina je postulirao Wolfgang Pauli, ime im dao Enrico Fermi a eksperimentalno ih registrovao Frederik Rejns 1956. za što je dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1995. godine.

Postoje tri vrste neutrina: elektronski neutrino ν_e , mionski neutrino ν_μ i tau neutrino ν_τ koji su dobili imena prema leptonima koji su im parovi u standardnom modelu (pogledati tablicu). Trenutno najbolji način za određivanje broja vrsta neutrina je posmatranje raspada Z bozona. Ova čestica se raspada u bilo koji neutrino i odgovarajući antineutrino, i što ima više vrsta neutrina to je kraći život Z bozona. Poslednja merenja pokazuju da je broj luhkih neutrina („luhkih“ znači mase manje od pola mase Z bozona) jeste 2.984 ± 0.008 .

Tabela 5: Neutrini

Neutrini u standardnom modelu		
Fermion	Simbol	masa
Generacija 1 (elektron)		
Elektronski neutrino	ν_e	< 2.5 eV
<u>Elektronski antineutrino</u>	$\bar{\nu}_e$	< 2.5 eV
Generacija 2 (muon)		
Mionski neutrino	ν_μ	< 170 keV
<u>Mionski antineutrino</u>	$\bar{\nu}_\mu$	< 170 keV
Generacija 3 (tau)		
Tau neutrino	ν_τ	< 18 MeV
<u>Tau antineutrino</u>	$\bar{\nu}_\tau$	< 18 MeV

Postoje eksperimenti koji ukazuju na mogućnost postojanja neutrina koji ne učestvuju u slaboj nuklearnoj interakciji, znači koji nisu u vezi sa raspadom Z bozona. Saglasnost između postojanja šest kvarkova i šest leptona po standardnom modelu, među njima i tri neutrina, daje dodatne dokaze da postoji tačno tri vrste. Ipak, konačan i ubedljiv dokaz da postoje samo tri vrste neutrina ostaje neuhvatljiv cilj fizike nuklearnih čestica.

Dugo se verovalo da neutrini različitih vrsta ne mogu da se pretvore jedan u drugi. Zapravo mogli bi, ali pod uslovom da imaju vrlo malu masu. Zaista ti prelazi, neutrinske oscilacije, su opaženi 1998. za šta su godine 2002. Raymond Davis mlađi i Masatoši Košiba dobili deo Nobelove nagrade za fiziku.

- Istoriski pregled

Prepostavka da postoji neutrino je prvi put data 1931. godine od strane Wolfganga Paulija da bi se objasnio energetski spektrum beta raspada, tj. prelazak neutrona u proton i zatim u elektron. Pauli je prepostavio da postoji neka čestica koja odnosi razliku između energije i ugaonog momenta početnih i krajnjih čestica. Zbog njihovih fantomskih svojstava, prva detekcija neutrina je morala da sačeka još 25 godina od kad je njihovo postojanje predloženo. Godine 1956., Klajd Kovan, Frederik Rejns, F. B. Harison, H. V. Kruz i A. D. Megvajer su objavili članak pod nazivom Detekcija Slobodnog Neutrina: Potvrda. Ovaj članak je nagrađen Nobelovom nagradom za naučna dostignuća 1995. godine. Naziv neutrino je dao Enrico Fermi, koji je razvio prvu teoriju o interakcijama neutrina. Naziv neutrino je igra riječi od engleskog neutrone, preko italijanskog neutrino. Neutron znači veliki i neutralan, a neutrino mali i neutralan. Dokaz da postoji više od jedne vrste neutrina je dat 1962. godine od strane Leona Ledermana, Melvina Švarca i Džeka Štajnbergera. Naime, primjećene su prve interakcije muonskog (negde i mionskog) neutrino. Kada je treća vrsta leptona, takozvani tau, pronađena 1975. godine u Stanfordskom linearном akceleratoru, takođe se prepostavljaljalo da i ona ima odgovarajući neutrino. Naime, ova treća čestica je nađena na sličan način kao i prva, tj. praćenjem nedostajuće energije i momenta u tau raspodu. Podsetimo se, prva posmatranja su vršena nad beta raspadom. Prva detekcija tau neutrino interakcije je izvršena 2000. godine. Ovaj neutrino je zapravo čestica koja je najkasnije otkrivena direktnim posmatranjem.

- Masa

Standardni model fizike čestica govori o neutrinima kao o česticama bez mase. Međutim, svaki dokaz o oscilaciji neutrina pobića ovu prepostavku. Oscilacije neutrina, očigledne i toliko puta dokazane, zahtevaju tzv. non-zero masses, odnosno prisustvo mase kod ovih čestica.

Kako se ovo dokazuje? Najjači argument da neutrini imaju masu dolazi iz kosmologije, tj. još od velikog praska. Ovaj model kaže da postoji fiksirani odnos između broja neutrina i fotona na kosmičkoj mikrotalasnoj pozadini. Ukoliko bi totalna energija sva tri tipa neutrina prevazila standardnih 50 eV po neutrinu, bilo bi mnogo više mase u svemiru, te bi se on urušio. Ovaj limit se može donekle prevazići pretpostavkom da je neutrino nestabilan; međutim, sam standardni model dovodi to u pitanje skoro eliminujući nestabilnost kao mogućnost. Standardni model govori da suma masa neutrina mora biti manja od 0.3 eV. Svemu ovome je 1998. godine stao na kraj Super-Kamiokande detektor neutrina koji je otkrio da oni zaista osciluju, te iz toga nužno sledi da imaju mase. Ova dokazivanja i detekcije Super-Kamiokandea pokazuju da najteži neutrino mora imati težinu od oko 0.05 eV, u krajnjem slučaju ne više od 0.3 eV. Naravno, postoje izvesna odstupanja između takozvanih stanja masa 1 i 2 (kada se računaju kvadратi) koja se dobijaju jednačinom:

$$\Delta m_{212} = 0.000079 \text{ eV}^2$$

Godine 2006. sproveden je MINOS eksperiment kojim su mereni kvadrati masa između stanja mionskog neutrina 2 i 3. Analiziran je intenzivni mionski zrak, i dobijeni rezultati su se poklopili sa onima od Super-Kamiokandea. Dobijaju se po jednačini:

$$\Delta m_{232} = 0.0031 \text{ eV}^2$$

- Detekcija neutrina

Neutrini mogu da interaguju preko neutralnog toka uključujući razmenu Z bozona, ili preko promjenjenog toka uključujući razmenu W bozona. U prvom slučaju, neutrino napušta detektor nakon što je preneo nešto svoje energije i momenta čestici meti. Sva tri spina neutrina ovde mogu učestvovati bez obzira na energiju neutrina. U drugom slučaju, neutrino se transformiše u njegovu partner-česticu (mion, elektron ili tau). Međutim, ako neutrino nema dovoljno energije da je pretvori u masu svoje teže partner-čestice, energija promjenjenog toka mu je nedostupna. Solarni i neutrini raznih reaktora imaju dovoljno energije da izvrše ovaj prelaz u elektron.

6. FIZIKA DALJE OD STANDARDNOG MODELAA

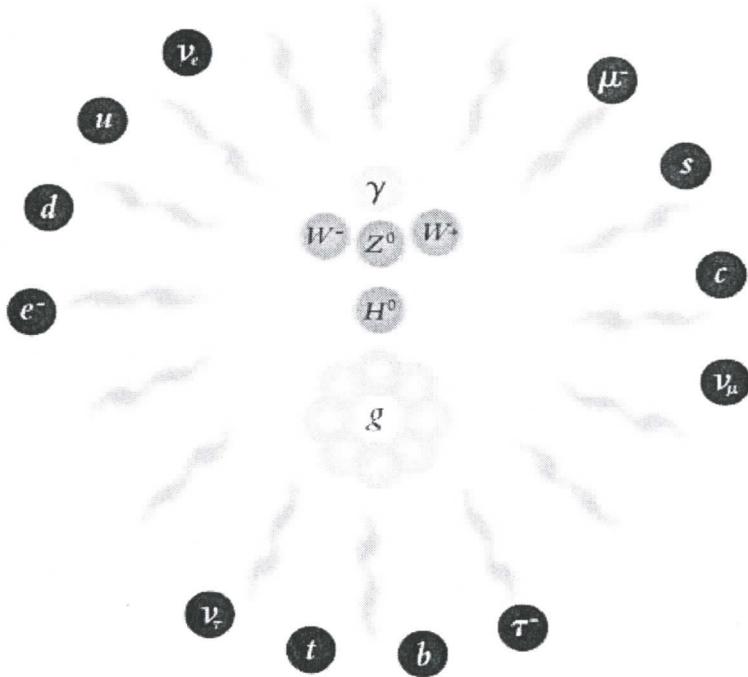
6.1. TEORIJSKA OSNOVA ZA STANDARDNI MODEL

Teorijska osnova za standardni model je u početku bila matematički nekonzistentna. Dugo je bilo nejasno da li se teorija može koristiti za detaljno računanje fizičkih veličina. G. 't Hooft (Gerardus 't Hooft) i M. Veltman (Martinus Veltman) su podelili Nobelovu nagradu iz fizike za 1999. godinu koja im je uručena kao priznanje za njihov rad u toku sedamdesetih godina kojim su teoriju elementarnih čestica postavili na zdrave matematičke osnove. Kao plod tog rada, istraživači su dobili moćno teorijsko oruđe za otkrivanje svojstava novih čestica. Eksperimenti na akceleratorima u Evropi i SAD izvedeni u poslednjih par decenija su potvrdili mnoga od tih teorijskih predviđanja. Zvanično saopštenje Nobelove akademije je da se nagrada Toftu i Veltmanu uručuje zbog „profinjenja razumevanja kvantne strukture elektroslabih interakcija u fizici”.

- Novo ime za staru teoriju

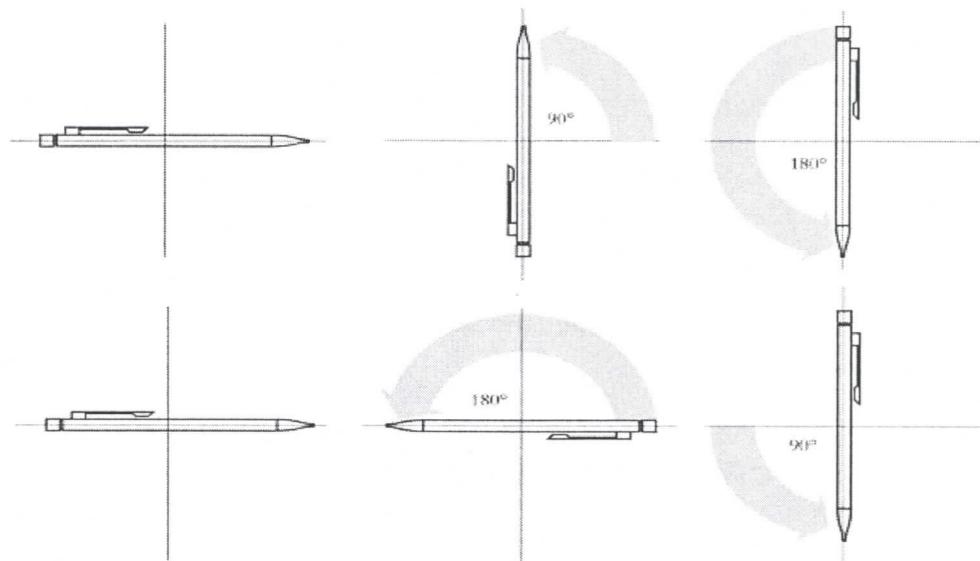
Kvantne teorije polja koje se koriste u okviru standardnog modela elementarnih čestica su sve primeri gejdž teorija. Termin gejdž dolazi od centralne osobine ovih teorija, njihove gejdž invarijantnosti, odnosno nepromenljivosti odgovarajućih zakona dinamike na lokalne transformacije polja (transformacije koje se nezavisno odvijaju u svakoj tački prostora i vremena ponaosob). Gejdž simetrija je centralna osobina modernog opisa fundamentalnih interakcija. Osnovna uloga joj je da brani kvantne teorije polja od obilja beskonačnosti koje bi ih inače činile matematički nekonzistentnim.

Mada izrazito matematički elegantan, formalizam gejdž teorija je u isto vreme i prilično apstraktan i tehnički zahtevan. Srećom, prva i najjednostavnija gejdž teorija je svima dobro poznata Maksvelova teorija elektromagnetizma nastala davne 1860. godine. Maksvelova teorija je u okviru jedinstvenog formalizma objedinila do tada raznorodne fenomene kao što su elektricitet i magnetizam a predvidela, između ostalog, postojanje radio talasa.



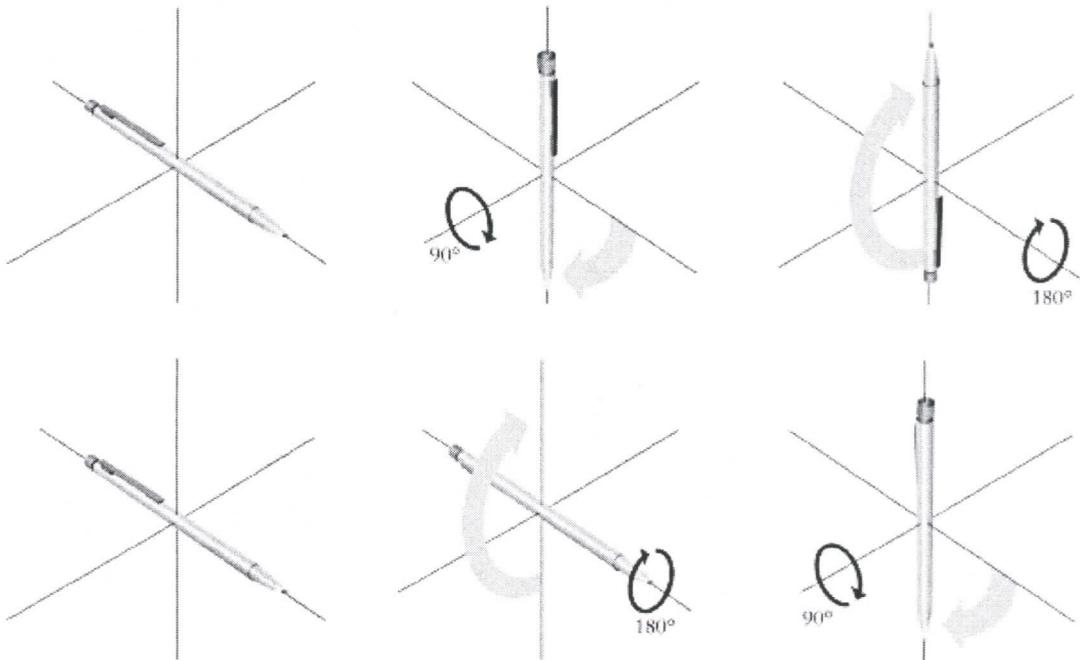
Slika 14: Svu materiju čine fermioni, i to šest leptona i šest kvarkova. Ove čestice i njihove međusobne interakcije se u standardnom modelu opisuju kvantnim teorijama polja, i to neabelovim gejdž teorijama. Interakcije se uspostavljaju razmenom čestica medijatora (gejdž bozona). Elektroslabu interakciju prenose četiri takva bozona - bezmaseni foton γ i maseni medijatori W^+ , W^- i Z^0 . Jaku interakciju prenose osam bezmasenih gluona g . Pored navedenih čestica, centralno mesto u standardnom modelu igra i masivna Higs čestica H^0 . Spontano narušenje simetrije Higs polja generiše mase gejdž bozona.

Elektrodinamiku je pogodno formulisati preko potencijala, a ne preko fizički direktno merljivih električnih i magnetnih polja. Gejdž transformacije su sada sve moguće transformacije potencijala koje dovode do istih električnih odnosno magnetnih polja. Gejdž simetrija je najšira moguća generalizacija dobro poznate činjenice da je fizički merljiva samo razlika potencijala, a ne i sam potencijal. U modernom jeziku za elektromagnetizam kažemo da je abelova gejdž teorija, pošto promena potencijala posle dve gejdž transformacije ne zavisi od redosleda izvođenja tih transformacija. Jednostavni primer abelovih transformacija su rotacije u ravni (slika 15).



Slika 15: Rotacije u dve dimenzijske ravni su primer abelovih transformacija. Krajnji položaj olovke je isti nezavisno od toga dali smo je prvo okrenuli za 90° , pa zatim za 180° (gornja slika) ili smo iste rotacije uradili obrnutim redosledom (donja slika).

Sa druge strane, rotacije u tri dimenzijske ravni mogu da posluže kao ilustracija neabelovih transformacija (slika 16). Struktura neabelovih transformacija je znatno bogatija od abelovih, ali je i tim rad sa njima teži. Ovo je posebno izraženo kod procesa kvantizacije gejdž teorija (krajnji položaj olovke sada zavisi od redosleda rotacija).



Slika 16: Rotacije u tri dimenzijske ravni daju ilustraciju neabelovih transformacija.

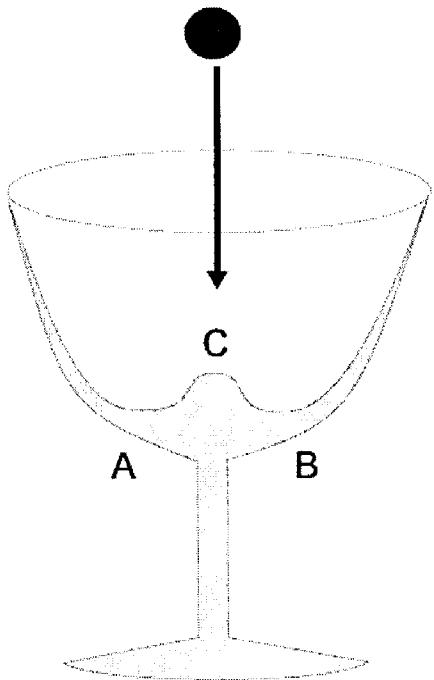
- Spontano narušenje simetrije

Veliki prodor koji je omogućio izgradnju standardnog modela je vezan za pojам spontanog narušenja simetrije. Simetrija je na treći način ušla u oblast elementarnih čestica. U prvoj svojoj inkarnaciji, simetrija nam je omogućila klasifikaciju elementarnih čestica. U drugoj inkarnaciji, kod gejdž simetrije, nam je omogućila skoro jednoznačno fiksiranje dinamike koja je saglasna sa renormalizabilnošću. Treća inkarnacija je došla kroz mehanizam spontanog narušenja simetrije - kroz činjenicu da vakuum jedne teorije ne mora imati istu simetriju kao i njena dinamika. Mada deluje izuzetno složeno, ovo se može ilustrovati na veoma jednostavnom primeru pada kuglice u vinsku čašu (slika 17).

Nećemo ulaziti u to kako spontano narušenje simetrije Higsovog polja dovodi do pojave mase W i Z bozona. Ono sto je bitno je da se ta masa generiše usled nesimetričnosti Higsovog vakuma, a ne i dinamičkih jednačina. Direktnim ubacivanjem mase za ove prenosionce u jednačine kretanja gubimo gejdž invarijantnost koja nam je neophodna da bi obezbedili matematičku konzistentnost. Sa druge strane, generisanjem ove mase kroz proces spontanog narušenja simetrije ne narušavamo gejdž simetriju.

Ostalo je još samo da se direktno pokaže da spontano narušenje simetrije ne kvari renormalizabilnost teorije, činjenica da je konstruisana gejdž invarijantna teorija sa masenim bozonima je bila samo indikacija da smo na pravom putu. U grubom, istraživanja su krenula u dva pravca. Jedna grupa istraživača je tokom šezdesetih godina krenula u izgradnju modela, nadajući se da će se na kraju ispostaviti da su oni renormalizabilni. Krajnji efekat ovoga je bila unifikacija elektromagnetne i slabe interakcije.

Osnovni prodori u ovoj unifikaciji su došli u radovima Glešoua, Salama i Vajnberga, za što su ova tri istraživača nagrađeni Nobelovom nagradom za 1979. godinu. Model koji su stvorili je davao precizne predikcije o nizu osobina novih masivnih W i Z bozona. Ove čestice su i detektovane u CERN-u 1983. godine. Godinu dana kasnije su za to otkriće Nobelovu nagradu podelili Rubia i Vandermir.



Slika 17: Simetrični pad kuglice u vinsku čašu kao ilustracija spontanog narušenja simetrije. Zakon kretanja je simetričan na rotaciju čaše oko svoje ose, međutim, stanje najniže energije (vakuum) nema ovu simetriju. Kao što vidimo, postoji više vakuma, a rotacija čaše prevodi jedan vakuum u drugi. Na primer, rotacija za 180° prevodi A u B . U klasičnoj teoriji kao rezultat (idealizovanog) pada duž ose simetrije kuglica ne dospeva u jedan od vakuma, već u tačku C . U ovoj tački se kuglica nalazi u stanju labilne ravnoteže, tako da je i najmanje pomeranje prevodi u jedan od vakuma. U kvantnoj teoriji i same kvantne fluktuacije čine da kuglica nužno dospe u jedan od vakuma. Krajnje stanje nije rotaciono invarijantno mada je nastalo iz rotaciono invarijantne dinamike i početnih uslova.

Druga grupa istraživača je sebi stavila za cilj da dokaz renormalizabilnosti opšte neabelove gejdž teorije. Većina fizičara je u to vreme bila veoma pesimistična u vezi mogućeg uspeha ovih istraživanja. Jedan od ljudi koji nije izgubio nadu je bio Martinus Veltman. Krajem šezdesetih godina on je bio mladi novopostavljeni profesor na univerzitetu u Utrehtu. Veltman je krenuo tako što je prvo stvorio kompjuterski program za algebarsko pojednostavljinjanje mnoštva relevantnih Fajnmanovih dijagrama koje je trebalo razmatrati u dokazu renormalizabilnosti. Novi program je koristio kao heurističku alatku za proveru svojih ideja vezanih za renormalizabilnost.

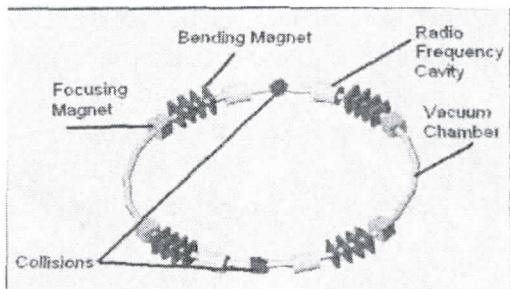
U proleće 1969. godine kod Veltmana je došao dvadesetvogodišnji student Gerardus 't Hooft i izrazio želju da se bavi izučavanjem teorije polja. 't Hooft je zvanično primljen za postdiplomca u jesen iste godine. Zadatak mu je bio da pomogne Veltmanu u njegovom traganju za metodom renormalizovanja neabelovih gejdž teorija. 't Hooftov neverovatni uspeh je usledio već 1971. godine kada je publikovao dva rada koji predstavljaju kapitalne istraživačke prodore.

Uz pomoć Veltmanovog kompjuterskog programa 't Hooftovi parcijalni rezultati su provereni, a zatim je usledio i njihov zajednički definitivni rad u kome su prezentovali detaljni dokaz renormalizabilnosti. Pored toga, i sami tehnički detalji korišćeni u njihovom dokazu su učinili opšti račun u kvantnoj teoriji polja daleko jednostavnijim. Kao i kvantna elektrodinamika dve decenije ranije, ovim je i teorija elektroslabe interakcije postala ispravno funkcionišuća teorijska mašina.

Posle svega je usledila duga serija kompleksnih eksperimenata koji su svi do jednog potvrdili predikcije standardnog modela. Poslednji veliki uspeh u tom pravcu je detektovanje mase top kvarka. Ovaj, poslednji od šest kvarkova je prvi put detektovan 1995. godine u Fermilabu. Uspesi standardnog modela su zaista impresivni, čak i malo zastrašujući kad se ima u vidu da je stvoren teorijski okvir za uspešan opis fenomena milijardu puta manjih od atoma. Prirodno je da se čovek upita dali je još nešto ostalo da se otkrije u okviru standardnog modela. Jedino bitno parče velike slagalice koje još nije viđeno je sam Higs, u mnogo čemu centralna čestica modela; čestica čija vakuumска očekivana vrednost daje W i Z bozonima njihovu masu, odnosno slaboj interakciji njen kratki domet. U CERN-u 2005. godine počinje sa radom veliki hadronski sudarač (LHC). Njegov osnovni cilj će svakako biti da detektuje Higsa.

6.2. EKSPERIMENTI FIZIKE ELEMENTARNIH ČESTICA

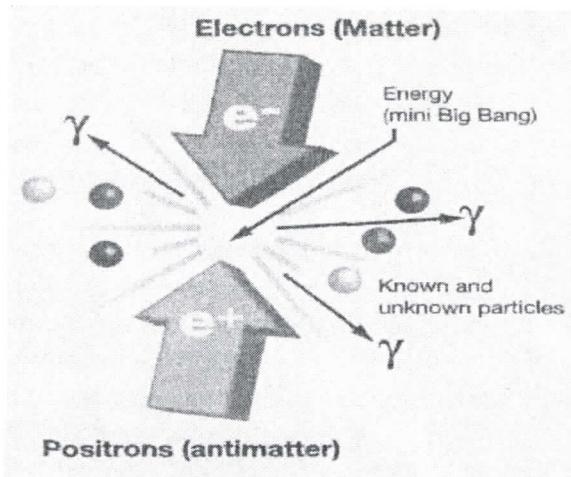
Kroz istoriju fizike, eksperimentalna otkrića i teorijske ideje i objašnjenja kretala su se unapred zajedno, nekad vršeći preskakanja, ali uvek uzimajući inspiraciju jedana od druge. Moderna verzija Rutherford-ovg eksperimenta na rasipanju α čestica zauzima brojne kvadrate zemlje sa masivnom aparaturom u podzemnim tunelima desetinama kilometara dugim. Ovo su akceleratori elementarnih čestica koji ubrzavaju protone, antiprotone, elektrone ili pozitrone do brzine bliske brzini svjetlosti i onda čine direktnе sudare jedan sa drugim ili sa stacionarnim metama.



Slika 18: U akceleratorskom prstenu fokusni i krivinski magneti vode snop čestica. Visokofrekventne mikrotalasne šupljine ubrzavaju snopove kako oni prolaze.

Tragalo se za sve većom i većom energijom sudara. Da bi se napravio par masivnih novih čestica i posmatrao njihov let odvojeno, bilo je potrebno generisati ekspresnu energiju preko i više ekvivalentne mase ($2m_X^*$) para: $E_{\text{sudara}} > 2m_X c^2$. Visoka energija je takođe bila potrebna da ispita dublje i dublje do najmanjih dužina skale u izučavanju nepoznatog – ovo je ekvivalentno korišćenju X zraka najkraćih talasnih dužina za ispitivanje najmanjih kristalnih struktura. Sa druge strane potraga za retkim fenomenom je neophodna kako bi se smanjio intenzitet snopa čestica i tempo sudara. Tako su akceleratori nastavili paralelnim stazama uvek veće energije i uvek većeg intenziteta.

Da bi se osmotrili i preveli rezultati sudara, detektori čestica moraju se razviti da mogu pratiti i analizirati čestice koje lete i nestaju u nanosekundi. Detektori se sastoje od brojne aparature i elektronike, zahtevajući eksperte u svakoj tehnologiji. Sudarni eksperimenti koriste brojne detektore okompletno okružujući „tačku interakcije“ gde se visokoenergetske čestice i antičestice direktno sudaraju. Tipični sudarni eksperimenti su $e^+ e^-$ i proton – antiproton.



Slika 19: Kada se čestice materije i antimaterija sudare one uništavaju jedna drugu kreirajući takve uslove koji se mogu javiti sa prvim frakcijama sekund nakon velikog bljeska.

Drugi eksperimenti izučavaju sudare intenzivnih snopova sa fiksnim metama. Tipični su pojedini eksperimenti sa visokoenergetskim neutrino snopom i masivnim detektorima u kojima neutrinosi mogu delovati jedan na drugog. Mnogi izučavaju konverziju jednog tipa neutrina (mion – neutrino) u drugi (npr. tau – neutrino). Dokaz za ovo je jasna definicija posle decenijskog rada, i precizne mere mogu obavezati nenultu masu svakog neutrina. Osatak neutrinosa od velikog bljeska naseljava univerzum, i čak majušne mase mogu objasniti neku tamnu materiju.

Umetnost i nauka akceleratora i detektora je zasnovana na tehnologiji. Tehnologija pouzdanih uređaja, superprovodljivih magneta, elektronike, kompjutera i egzotičnih materijala kretala se skokovito sa razvojem u eksperimentalnoj fizici čestica, nekada vodeći a nekada biti vođena od strane izuma fizičara.

Svi ovi vrlo kompleksni detektori su izgrađeni i funkcionišu putem brojnih fizičara, u saradnji od 100 do oko 1000 kadrova. Saradnja se širi preko granica država i kontinenata, u tipičnoj ilustraciji naučnog prostiranja korporacija i prijateljstva preko nacionalnih i političkih barijera.

6.3. NEDOSTACI STANDARDNOG MODELA I EFIKASNE TEORIJE

Standardni model se smatra najuspešnijom teorijom prirode do sada. Ipak nije kompletna teorija, ustvari je daleko od toga. Ova teorija mora se proširiti jer nastupa nova era otkrića, kao što su: Tevatron kolajder u Fermi Međunarodnoj Akcelerator Laboratoriji u Bataviji, „B uređaji“, kolajderi otkriveni u Kaliforniji i Japanu, Veliki Elektron – Pozitron (LEP) kolajden u CERN (Evropska laboratorijska grupa za fiziku elementarnih čestica blizu Ženeve), Veliki Hadron kolajder (LHC) u CERN.

Detektori u Fermilab i eventualno LHC u CERN tragaju za Higsovom česticom, koja, ako se pronađe, ili će objasniti standardni model ili će nas primorati da redukujemo koncepciju materije. Evidencija supersimetričnog partnera je cilj svih modela, kao deo potrage za konačnom teorijom elementarnih čestica preko granica standardnog modela. Potreba za ovim se javila da bi se pronašlo bilo šta što bi moglo ukazati na veliku unifikaciju sa gravitacionom silom.

Druga vrsta $e^+ e^-$ kolajdera se planira na međunarodnom nivou – linearni kolajder visoke energije sa dva suprotna linearna akceleratora desetinama kilometara dugim. Tehnički izazovi su brojni i ovo bi trebala da bude prva svetska akcelerator saradnja.

Deset je pitanja na koja standardni model ne daje odgovor:

- Gravitacioni efekti tzv. energije vakuma bi ili vrlo brzo iskrivili vasionu ili učinili da se ona raširi do mnogo većih dimenzija,
- Proces širenja vasiona se ne usporave nego ubrzava (tamna energija?)
- Koja polja su odgovorna za inflaciju?
- Ako je vasiona nastala u velikom prasku velikom eksplozijom energije trebalo bi da se razvije u jednakе delove materije i antimaterije
- Otprilike jedna četvrtina vasiona je nevidljiva tamna materija koju ne mogu činiti čestice opisane standardnim modelom
- Kako objasniti vrlo specifičan oblik koji bi morao odgovarati Higsovim interakcijama?
- Masa Higsovog bozona mora biti ogromna → mase svih čestica moraju biti ogromne
- Gravitacija?
- Kako objasniti vrednosti masa kvarkova i leptona?
- Postoje tri generacije čestica. Zašto postoji više od jedne generacije?

Da bi se stvorila kompletna slika razvile su se sledeće teorije:

- Teorija minimalne supersimetrije standardnog modela (MSSM) rešava mnoštvo problema na koje nam standardni model ne daje odgovor. To je efikasna teorija koja ima isto tako impute, koji mogu biti izračunate u teoriji struna.
- Teorija, nazvana „velika unifikaciona teorija“ ili GUT predložila je ujedinjenje tri fundamentalne interakcije, elektroslabu silu sa jakom silom. Ali ne tako daleko konkretni zaključci su za to pronađeni. Konstante interakcije konvergiraju jedinstvenoj vrednosti pri energijama $10^{14} - 10^{15}$ GeV u tački u kojoj dolazi do velikog ujedinjenja. Nakon toga, svetska težnja je bila unifikacija gravitacije sa drugim silama. Ajnštajnov rad na tome je bio uzaludan jer nije uspeo da gravitaciju poveže sa kvantnom teorijom.
- Teorija supersimerije zahteva novi set čestica izvan granica standardnog modela dopunjena: teškim partnerom za svaki kvark, lepton i bozon starog seta, zajedno sa njima čineći jednu veliku super – familiju čestica. Tri sile jaka, elektromagnetna i slaba imaju jednaku snagu u ovoj teoriji pri vrlo visokoj energiji. I naravno, to pruža novu zabavu traganja za novim česticama.
- U međuvremenu teorijske studije prostiru se dalje i šire u potrazi za sveobuhvatnom teorijom (TOE). Tako se pojavila string teorija, koja predstavlja čestice kao beskrajno male vibrirajuće petlje stringova u deset dimenzija. Zatim sledi, teorija membrane, sa celim univerzumom, koja smatra postojanje multidimenzionalnih pregrada ili membrane, sa česticama kao petljama učvršćenih na pregradu i gravitonima postavljenih između pregrada.

7. ZAKLJUČAK

Na fiziku elementarnih čestica svake godine se troše desetine i stotine miliona rubalja, dolara, franaka, desetine i stotine milijardi lira i jena. Da li su ti troškovi opravdani? U izvesnom smislu troškovi za fiziku elementarnih čestica podsećaju na troškove za decu. Bez dece je nezamisliva budućnost čovečanstva, bez fizike elementarnih čestica je nezamisliva budućnost nauke.

Fizika elementarnih čestica donosi brojne „plodove” zemljama koje su u razvoju. Tako, na primer:

- snopovi čestica na akceleratorima nalaze različite i sve brojnije primene,
- mioni se široko primenjuju za izučavanje veoma finih fizičko – hemijskih svojstava različitih materija,
- mioni proizvedeni kosmičkom zracima iskorišćeni su kao prodorni zraci za „prosvetljavanje” unutrašnje strukture egipatskih piramida,
- široku primenu u nauci, medicini, industriji i poljoprivredi ima tzv. sinhrotronsko zračenje, koje emituju elektroni visokih energija pri kretanju orbitom kružnog akceleratora,
- neutrinska astronomija pruža jedinstvenu mogućnost za detektovanje kolapsa zvezda i za ispitivanje unutrašnjosti Sunca,
- ...

Ali, naravno, osnovna vrednost fizike elementarnih čestica nije u tim mnogobrojnim primerima. Izuzetna uloga ove nauke je u tome što je ona temelj svih prirodnih nauka. Nivo dostignut tom naukom određuje nivo razumevanja celog sveta koji nas okružuje, određuje nove intelektualne zrelosti čovečanstva. Bez fizike elementarnih čestica nije moguće rekonstruisati prošlost Svetmira, ni razumeti osnovne procese koji se u njemu odigravaju, niti je moguće predvideti njegovu budućnost.

Standardni model fizike čestica je najuspešnija teorija prirode do sada i nastao je iz interakcije teorije i eksperimenata koji su se međusobno preplitali i dopunjavali. Ponekad je zbog eksperimentalnih otkrića bilo potrebno razviti teoriju a nekada obratno, zbog teorije eksperiment. S obzirom da standardni model do današnjih dana ne daje potpunu sliku univerzuma neophodno je nastaviti započeti proces. Budućim teorijama i eksperimentima proširiće se i precizirati naše znanje.

Jednom je Njutn uporedio sebe sa dečakom koji je našao nekoliko kamičaka na obali okeana Nepoznatog: „Veliki okean istine prostire se neotkriven predannom”. Naravno, oblast Poznatog se ogromno povećala od tog vremena, ali bila bi naivna uobraženost da se misli kako mi u osnovi skoro sve već znamo i kako su ostali neproučeni samo neki mali detalji.

Okean Nepoznatog prostire se pred ljudima i danas. Fizičare očekuju otkrića novih čestica, novih sila, novih fundamentalnih principa.

8. LITERATURA

1. S. Jokić, **Subatomska fizika**, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, 2000.
2. S. Macure, J. Radić – Perić, **Atomistika**, Službeni list, Beograd, 2004.
3. L. B. Okunj, α , β , γ , ... Z , Fond „ING. Petar i Sonja Subotić“, Beograd, 1992.
4. www.adc9001.com
5. www.bookrags.com/Standard_Model
6. www.donut.fnal.gov/web_pages/standardmodelpg/TheStandardModel.html
7. www.sldnt.slac.stanford.edu/alr/standard_model.htm
8. en.wikipedia.org/wiki/standard_model

BIOGRAFIJA



Mitrović M. Dragica rođena je 10. 01. 1954. godine u Donjim Nedeljicama. Završila je Viši pedagošku školu u Beogradu – grupa fizika-hemija. Radi u osnovnoj školi kao nastavnik fizike od 1979. godine.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Diplomski rad

VR

Autor:

Dragica Mitrović

AU

Mentor:

Prof. Dr Miroslav Vesković, redovni profesor

MN

Naslov rada:

Standardni model

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2007

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada:

8/42/5/5/19/0/3

FO

Naučna oblast:

Fizika

NO

Naučna disciplina:

Fizika elementarnih čestica

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

standardni model, kvarkovi, leptoni, bozoni, interakcije

PO

UDK

Čuva se:

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena:

nema

VN

Izvod:

U ovom radu prikazana je teorija standardnog modela. Ona opisuje ulogu fundamentalnih čestica i interakcija između njih. Uloga fizike elementarnih čestica je da testira ovaj model na sve shvatljive načine, tražeći da otkrije da li nešto leži iza toga.

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća:

18.05.2007.

DP

Datum odbrane:

14.09.2007.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Doc. Dr Nataša Todorović

član:

Prof. Dr Miroslav Vesković

član:

Prof. Dr Darko Kapor

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Monograph publication

TR

Textual printed material

CC

Final paper

AU

Dragica Mitrovic

MN

Mentor/comentor:

PhD Miroslav Veskovic, full professor

TI

Standard model

LT

Language of text:

Serbian (Latin)

LA

English

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2007

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

8/42/5/5/19/0/3

PD

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Physics of elementary particles

SD

Subject/ Key words:

standard model, quarks, leptons, bosons, forces

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

none

N

Abstract:

Here is shown theme "The standard model". This model describe the role of the fundamental particles and the forces between them. The final cause of the physics of elementary particles is to test this model on comprehensible way and to find what have behind the standard model.

AB

Accepted by the Scientific Board:

18.05.2007.

ASB

Defended on:

14.09.2007.

DE

Thesis defend board:

DB

President:

PhD Natasa Todorovic, assistant professor

Member:

PhD Miroslav Veskovic, full professor

Member:

PhD Darko Kapor, full professor

