

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU



SVETLANA VESELINOVIĆ

ELEMENTARNE ČESTICE

Završni rad

Osijek, 2014.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU



SVETLANA VESELINOVIĆ

ELEMENTARNE ČESTICE

Završni rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja zvanja prvostupnika/ce fizike

Osijek, 2014.

"Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. B. Vukovića i komentora dr. sc. M. Poje u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josip Jurja Strossmayera u Osijeku".

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Standardni model	1
3. Ukratko o spinu	3
4. Građevni blokovi materije.....	4
4.1. Kvarkovi i leptoni.....	4
4.2. Temeljne sile prirode	8
4.2.1. Jaka nuklearna sila.....	9
4.2.2. Slaba nuklearna sila.....	10
4.3. Leptonski broj.....	11
4.3.1. Očuvanje leptonskog broja	13
4.3.2. Misteriozni neutrino	14
4.4. Antileptoni	15
4.5. Barionski broj	15
4.5.1. Antikvarkovi.....	17
4.5.2. Očuvanje barionskog broja.....	17
4.6. “Boje” kvarkova	18
5. Prijenosnici interakcije	20
5.1. Baždarni bozoni.....	20
5.1.1. Nositelji elektromagnetske interakcije – fotoni.....	22
5.1.2. Nositelji jake nuklearne interakcije - gluoni	23
5.1.3. Nositelji slabe nuklearne interakcije – W i Z bozoni	24
5.1.4. Nositelji gravitacijske interakcije – gravitoni ???	25

6. Higgsov bozon.....	26
6.1. Higgsov mehanizam, polje i bozon	26
6.2. Pojednostavljeno o Higgsovom polju i bozonu	28
7. Zaključak	28
8. Literatura.....	30
Životopis.....	32

ELEMENTARNE ČESTICE

SVETLANA VESELINOVIĆ

Sažetak

U ovom završnom radu dan je kratak pregled svih elementarnih čestica, koje su prema standardnom modelu podijeljene u dvije velike grupe: fermione i bozone. Zbog velikog obima ove teme neće se ići previše u detalje, jer u tom slučaju bi u rukama imali knjigu o elementarnim česticama, ne završni rad. Osim samog uvoda u standardni model biti će rečeno nešto najosnovnije i najbitnije o fermionima, česticama koje izgrađuju svu poznatu materiju u svemiru, i o bozonima, prijenosnicima četiri, odnosno tri temeljne interakcije u prirodi između fermiona. Razumijevanje načina na koje elementarne čestice međusobno interagiraju i formiraju atome, molekule i druge složenije strukture je samo po sebi bitno za razumijevanje svemira kakvog danas poznajemo. Da su svojstva čestica samo malo drukčija, svemir kakav danas znamo ne bi postojao. Elementarne čestice nam mogu puno toga reći, od toga kakav je svemir bio u svojim najranijim danima, pa čak do toga kako bi trebao završiti.

(31 stranica, 10 slika, 7 tablica, 24 literaturnih navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: baždarni bozoni/Higgsov bozon/kvarkovi/leptoni/standardni model/temeljne sile

Mentor: izv. prof. dr. sc. B. Vuković

Komentor: dr. sc. M. Poje

Rad prihvaćen: 10. rujna 2014.

ELEMENTARY PARTICLES

SVETLANA VESELINOVIĆ

Abstract

This final thesis provides an overview of all elementary particles, which are according to the standard model divided into two large groups: fermions and bosons. Due to the large volume of this topic will not go into too much detail, because in that case in our hands we will have a book about elementary particles, not final thesis. Besides the introduction to the standard model will be told something basic and most important about fermions, particles that build all known matter in the universe, and the bosons, carriers of four, rather three fundamental interactions in nature between fermions. Understanding the way that elementary particles interact and form atoms, molecules and other complex structures is important for the understanding of the universe as we know it. If the properties of the particles were only slightly different, the universe as we know it would not exist. Elementary particles can tell us a lot, from what the universe looked like in its earliest days, to even to how it should end.

(31 pages, 10 figures, 7 tables, 24 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: fundamental forces/gauge bosons/Higgs boson/leptons/quarks/standard model

Supervisors: Professor B. Vuković, PhD

M. Poje, PhD

Thesis accepted: 10 September 2014

1. Uvod

Ideja o osnovnim građevnim blokovima materije stara je 2600 godina. U 6. stoljeću prije Krista, grčki filozof Tales pokušao je odrediti prapočelo svijeta, to jest ono iz čega je sve postalo i u šta se sve vraća, ne uplićući u to bogove i nadnaravna bića. Odgovor je našao u vodi kao počelo svega. Razlog tomu je nesumnjivo u nužnosti i važnosti vode u svakodnevnom životu svih živih bića. Kasnije su se, pored vode, osnovnim elementima smatrali zemlja, vatra i zrak. Krajem 5. stoljeća prije Krista, javlja se ideja da su svi fizički objekti izgrađeni od malih, nevidljivih opeka, koje su vječne i nepromjenjive. Ovu ideju je zastupao grčki filozof Demokrit. U svojoj ideji posebno je naglašavao da se ono od čega je sve sagrađeno ne može podijeliti na još manje dijelove. Te nedjeljive građevne elemente Demokrit je nazvao atomima, što u prijevodu i znači nedjeljiv. Smatrao je da su atomi čvrsti i masivni, te da postoji bezbroj različitih atoma u prirodi, jer kada se atomi ne bi razlikovali, ne bismo mogli objasniti kako se spajaju u posve različite fizičke objekte.^{[16][24]}

U 20. stoljeću pokazalo se da se atomi, koji su u 19. stoljeću od strane kemičara i fizičara smatrani osnovnim građevnim blokovima materije, zapravo sastoje od još manjih elemenata: elektrona, protona i neutrona. Daljnji eksperimenti su pokazali da se protoni i neutroni sastoje od još elementarnijih čestica – kvarkova. Jedna od glavnih tema fizike 20. stoljeća je bila nastavak drevnog zadatka: otkrivanje i razumijevanje temeljnih sastavnica materije. Elektron, otkriven 1897. godine, je bio prva elementarna čestica, i, nakon sto godina dodavanja i brisanja “elementarnih” čestica, elektron je bio i ostao istinski elementaran. Postavlja se pitanje, što to neku česticu čini elementarnom? Jednostavno rečeno, elementarne čestice se ne sastoje od drugih čestica, odnosno elementarne čestice nemaju unutrašnju podstrukturu. Elektron nije izgrađen od drugih manjih čestica, stoga je on elementaran.

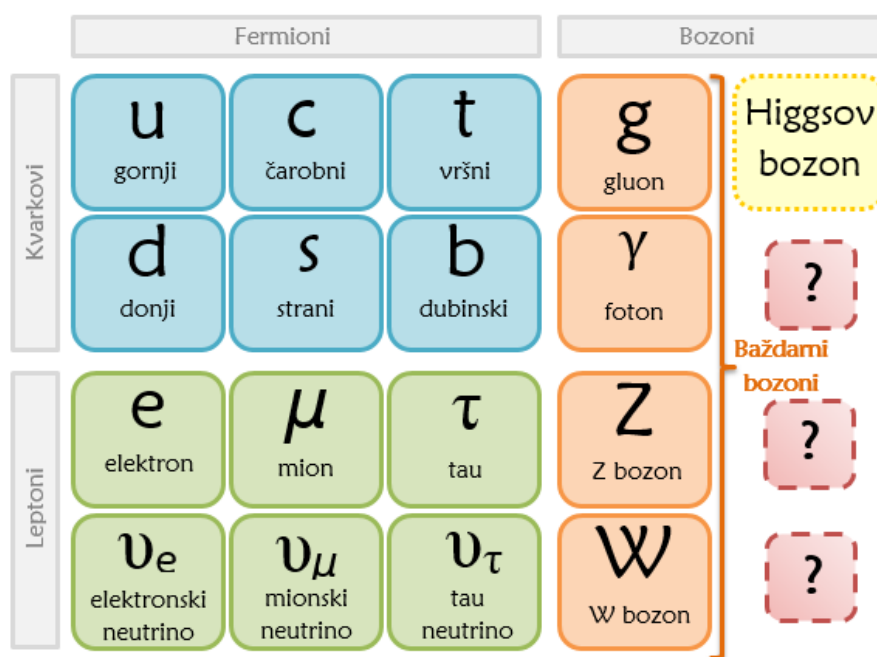
Prema standardnom modelu trenutno postoji 12 elementarnih čestica za koje se smatra da izgrađuju svu materiju u svemiru. Tih 12 čestica zajedničkim imenom nazivaju se fermioni, a dijele se u dvije grupe od po šest čestica – kvarkove i leptone. Cilj fizike elementarnih čestica je utvrditi identitet svih elementarnih čestica i načine na koje elementarne čestice međusobno interagiraju. Prema standardnom modelu postoje četiri osnovne sile: gravitacijska, elektromagnetska, slaba nuklearna i jaka nuklearna sila, putem kojih šest leptona i šest kvarkova međusobno interagira razmjenom čestica prijenosnika sila – bozona, odnosno baždarnih bozona. Pomoću dvanaest čestica koje izgrađuju materiju i četiri čestice prijenosnika interakcije između čestica materije može se opisati ponašanje sve promatrane materije u svemiru.^{[11][15]}

2. Standardni model

Teorija elementarnih čestica formulirana je početkom 70-tih godina 20. stoljeća pod nazivom standardni model. Iako se iz samog imena ne može zaključiti, standardni model zapravo nije model, već matematički precizna teorija gibanja sustava najmanjih sastavnica materije – elementarnih čestica, čija se predviđanja u potpunosti slažu sa rezultatima brojnih eksperimenata.

Prema standardnom modelu vjeruje se da je svemir sastavljen od materije (4% atoma i 20% tamne materije koju ne možemo promatrati ili objasniti) i energije (76% tamne energije). Model objašnjava načine na koje se 16 elementarnih čestica veže zajedno u atome i molekule formirajući materiju uz djelovanje četiri, odnosno tri temeljne sile: elektromagnetska, slaba nuklearna i jaka nuklearna sila. Znanstvenici još ne znaju kako povezati gravitaciju sa standardnim modelom.

Ovih 16 čestica i Higgsov bozon svrstava se u dvije velike grupe: fermione, koji čine materiju, i bozone, koji prenose interakciju među česticama materije, kako je prikazano na Slici 1.^{[3][13]}



Slika 1. Podjela elementarnih čestica prema standardnom modelu

U fermione, čestice s polucjelobrojnim spinom ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$), ubrajamo šest kvarkova i šest leptona. Svaki lepton ima svog odgovarajućeg neutrina, česticu bez mase i jako velike brzine.

Danas znanstvenici nisu još sigurni po pitanju imaju li neutrini masu ili ne. Nedavna mjerenja pokazuju da bi neutrini mogli imati ekstremno malu, ali konačnu masu, no ipak ovo i dalje ostaje neriješeno pitanje u eksperimentalnoj fizici. Što se tiče standardnog modela, neutrini su bez mase. Sve čestice također imaju i svoju odgovarajuću antičesticu, koja se ponaša isto kao i originalna čestica, ali se poništava u dodiru s materijom, odnosno s originalnom česticom, pretvarajući mase obje čestice u čistu energiju u procesu anihilacije. Svu materiju u svemiru grade dvije vrste kvarkova (gornji i donji kvark) i jedna vrsta leptona (elektron). Nije sasvim jasno zašto priroda ima potrebu za postojanjem preostala četiri kvarka i pet leptona, oni su samo masivnija verzija ove tri, tako reći glavne čestice.

Bozoni su čestice s cjelobrojnim vrijednostima spina (0, 1, 2, ...) koje djeluju kao prijenosnici tri temeljne sile u prirodi (elektromagnetska, slaba nuklearna i jaka nuklearna sila). Najpoznatiji bozon je foton, prijenosnik elektromagnetske sile koja je odgovorna za pojavu struje, magnetizma i svjetlosti. W i Z bozoni su prijenosnici slabe nuklearne sile, a gluon jake nuklearne sile koja vezuje kvarkove u veće čestice poput neutrona i protona. Postojanje Higgsova bozona, elementarne čestice kojom se objašnjava masa drugih čestica, a posebno zašto su W i Z bozoni toliko masivni za razliku od fotona koji nema masu, potvrđeno je dana 14. ožujka 2013. godine.^[14]

Budući da znanstvenici još uvijek nisu uspjeli povezati gravitaciju sa standardnim modelom, pretpostavlja se postojanje čestice graviton koja bi mogla biti prijenosnik gravitacijske sile. Ako bi se dokazalo postojanje ove čestice, standardni model bi se mogao zamijeniti nedostižnom teorijom svega (Theory of Everything), koja bi ujedinila sve četiri temeljne sile prirode.^[15]

3. Ukratko o spinu

U kvantnoj mehanici, spin predstavlja unutrašnju kutnu količinu gibanja čestice. To je isključivo kvantno svojstvo čestica, ono nema svog “para” u klasičnoj mehanici. Spin je jedan od dvije vrste kutne količine gibanja u kvantnoj mehanici, a druga je orbitalna kutna količina gibanja, koja je analogna kutnoj količini gibanja u klasičnoj mehanici, a nastaje kada se čestica giba po zakrivljenoj, kružnoj putanji.

Postojanje spina zaključeno je iz Stern–Gerlachovog eksperimenta, u kojem su promatrane čestice posjedovale kutnu količinu gibanja koja se nije mogla opisati samom orbitalnom kutnom količinom gibanja.

Vrijednosti spina su kvantizirane, što znači da spin može poprimiti samo točno određene vrijednosti. Prema spinu, sve čestice se dijele u dvije velike grupe: fermione i bozone. Kao što je već prije rečeno, fermioni su čestice polucjelobrojnog spina, a bozoni čestice cjelobrojnog spina.^[22]

4. Građevni blokovi materije

4.1. Kvarkovi i leptoni

Zanimljiva je činjenica da popis svih elementarnih čestica koje izgrađuju svu materiju u svemiru jednostavno stane na jedan list papira. Prema standardnom modelu tih elementarnih čestica ima ukupno 12 i njihov popis dan je u Tablici 1. One su podijeljene u dvije grupe čestica koje nazivamo kvarkovi i leptoni. Postoji šest kvarkova i šest leptona.

Tablica 1. Popis kvarkova i leptona

Kvarkovi	Leptoni
Gornji (u – <i>engl. up</i>)	Elektron (e^-)
Donji (d – <i>engl. down</i>)	Elektronski neutrino (ν_e)
Čarobni (c – <i>engl. charm</i>)	Mion (μ^-)
Strani (s – <i>engl. strange</i>)	Mionski neutrino (ν_μ)
Vršni (t – <i>engl. top</i>)	Tau (τ)
Dubinski (b – <i>engl. bottom</i>)	Tau neutrino (ν_τ)

Poznato nam je da je elektron jedan od konstituenata atoma i čestica koja je odgovorna za električnu struju u vodiču. Elektron je elementarna čestica što znači da nema unutrašnju podstrukturu. Svih 12 čestica u Tablici 1. smatraju se elementarnim česticama. Iznenadujuće je to da se proton i neutron ne spominju u toj tablici.

Sva materija sačinjena je od atoma, svaki atom je sačinjen od negativno nabijenih elektrona koji kruže oko male, teške, pozitivno nabijene jezgre. S druge strane, jezgra atoma se sastoji od protona, koji imaju pozitivan naboj, i neutrona, koji su bez naboja. Ako je iznos naboja protona isti kao i kod elektrona (ali suprotnog predznaka), neutralni atom će sadržavati jednak broj protona u jezgri i elektrona u orbiti. Broj neutrona je obično isti kao i broj protona, no može biti malo drugačiji dajući tako različite izotope atoma.

Kao što se prije vjerovalo da je atom osnovna građevna jedinica materije, a zatim je otkriveno da se sastoji od još elementarnijih čestica: elektrona, protona i neutrona, isto tako sada znamo da protoni i neutroni nisu elementarne čestice, ali elektron je bio i ostao elementaran. Protoni i neutroni su sačinjeni od kombinacije gornjih i donjih kvarkova. Budući da imaju unutrašnju podstrukturu, ne mogu se smatrati elementarnim česticama.

Proton se sastoji od dva gornja i jednog donjeg kvarka, a neutron od dva donja i jednog gornjeg kvarka. To možemo prikazati na sljedeći način:

$$p \equiv uud$$

$$n \equiv ddu$$

Budući da proton nosi električni naboj, neki od kvarkova također moraju biti nabijeni. Međutim, isti kvarkovi, samo u drugoj kombinaciji, postoje i unutar neutrona koji je bez naboja. Zbog toga se naboji kvarkova moraju zbrojiti u kombinaciji koja čini proton, a poništiti u kombinaciji koja čini neutron. Označimo li naboj gornjeg kvarka sa Q_u i naboj donjeg kvarka sa Q_d , dobivamo sljedeće:

$$p (uud) \text{ naboj} = Q_u + Q_u + Q_d = 1 \quad (1)$$

$$n (ddu) \text{ naboj} = Q_d + Q_u + Q_u = 0 \quad (2)$$

Ove dvije jednačbe su jednostavne za riješiti, uzimajući u obzir da su naboji gornjeg i donjeg kvarka redom:

$$Q_u = +\frac{2}{3} \quad (3)$$

$$Q_d = -\frac{1}{3} \quad (4)$$

Treba samo napomenuti da je u jednadžbama (1) i (2) korištena konvencija koja postavlja da naboj protona iznosi $+1$, dok u standardnim jedinicama približno iznosi $1,6 \cdot 10^{-19}$ C (kulon). Ovaj naboj protona naziva se još i elementarnim nabojem i označava se slovom e .

Do otkrića kvarkova, fizičari su smatrali da električni naboj može biti samo cjelobrojni višekratnik elementarnog naboja. Tako elektron ima električni naboj $-e$, proton $+e$, jezgra helija $+2e$ i tako dalje. Kvarkovi, ovisno o vrsti, imaju samo dio elementarnog naboja: $+\frac{2}{3}e$ ili $-\frac{1}{3}e$. No, budući da kvarkovi ne postoje samostalno, već dolaze uvijek u kombinaciji dva ili tri kvarka, u prirodi nikad nije zapaženo postojanje čestice s nabojem manjim od jednog elementarnog naboja. Čestice sastavljene od tri kvarka nazivamo barionima, dok mezonima nazivamo čestice koje se sastoje od parnog broja kvarkova i antikvarkova. U Tablici 2., koja pokazuje način na koji su kvarkovi grupirani u generacije, svi kvarkovi u prvom retku imaju naboj $+\frac{2}{3}$, a u drugom retku $-\frac{1}{3}$. Ovo grupiranje kvarkova u generacije strogo prati poredak kojim su kvarkovi otkriveni.

Tablica 2. Kvarkovska generacija

	Prva generacija	Druga generacija	Treća generacija
$+\frac{2}{3}$	Gornji (u)	Čarobni (c)	Vršni (t)
$-\frac{1}{3}$	Donji (d)	Strani (s)	Dubinski (b)

Sva materija u svemiru sastoji se od atoma, dakle od protona i neutrona, stoga su gornji i donji kvarkovi najviše zastupljeni kvarkovi u svemiru. Ostali kvarkovi su puno masivniji (masa kvarkova raste kako idemo od prve prema drugoj i trećoj generaciji) i puno rjeđi. Međutim, ranije u evoluciji svemira materija je bila daleko energičnija, stoga su masivniji kvarkovi bili mnogo češći i imali su značajnu ulogu u reakcijama koje su se dogodile.

Od leptona najpoznatiji je elektron, stoga su leptoni najviše i proučavani budući da se svojstva elektrona zrcale u mionu i tau. Ova tri leptona imaju isti električni naboj i malo toga, osim mase, razlikuje elektron od miona i tau. Jedina očita razlika je u tome što se mion i tau mogu raspadati na druge čestice (iz prve i druge generacije leptona i njihove antičestice), dok je elektron stabilna čestica. Tablica 3. prikazuje grupiranje leptona u tri generacije. Isto kao i kod kvarkova, masa leptona se povećava kako idemo prema višoj generaciji, barem što se tiče prvog retka u tablici.

Ostala tri leptona se nazivaju neutrini jer su električki neutralni. Treba napomenuti da nije isto reći, na primjer, da je neutron bez naboja i da je neutron neutralan. Neutron se sastoji od tri kvarka i svaki od njih nosi električni naboj koji se u konačnom zbroju poništi. Neutrini, za razliku od neutrona, su elementarne čestice. Kao takve nisu građene od drugih elementarnijih komponenti – oni su istinski neutralni. Stoga, da bi razlikovali takve čestice od onih kojima se naboji komponenti poništavaju, reći ćemo za neutrine (i slične čestice) da su neutralni, a za neutrone (i čestice slične njima) da su bez naboja. Prema standardnom modelu smatra se da su neutrini čestice bez mase, iako rezultati eksperimenta Super-Kamiokande u Japanu daju naznaku da bi neutrini ipak mogli imati ekstremno malu, ali konačnu masu. Budući da su neutrini bez mase i neutralni, to im uskraćuje bilo kakvu fizičku egzistenciju. Međutim, neutrini imaju energiju i ta ih energija čini stvarnima.

Tablica 3. Leptonska generacija

	Prva generacija	Druga generacija	Treća generacija
-1	Elektron (e^-)	Mion (μ^-)	Tau (τ)
0	Elektronski neutrino (ν_e)	Mionski neutrino (ν_μ)	Tau neutrino (ν_τ)

Leptoni, za razliku od kvarkova, postoje u prirodi kao zasebne čestice. Tablica 4. pokazuje gdje je sve moguće naći leptone u prirodi. Elektron je vrlo poznata čestica i njegova svojstva su uspostavljena u osnovama fizike. Njegov partner, elektronski neutrino, je manje poznat ali jednako čest u prirodi. U velikom broju ga proizvode neki radioaktivni procesi i središnje jezgre atomskih reaktora, dok je Sunce najveći proizvođač. Približno 10^{12} elektronskih neutrina prođe kroz naše tijelo svake sekunde, većina nastala u nuklearnim reakcijama koje se odvijaju u jezgri Sunca. Budući da jako rijetko interagiraju s materijom veliki broj neutrina koji prođe kroz naše tijelo ne čini nikakvu štetu.

Leptoni druge generacije su rjeđi, ali ih se može naći u prirodi. Mione je lako proizvesti u laboratorijskim eksperimentima. Osim po masi, vrlo su slični elektronima. Zbog velike mase su nestabilni pa se raspadaju na elektrone i neutrina. Jednostavno se mogu promatrati u eksperimentima sa kozmičkim zrakama.

Tablica 4. Prisutnost leptona u prirodi

Prva generacija	Druga generacija	Četvrta generacija
<i>Elektron</i>	<i>Mion</i>	<i>Tau</i>
<ul style="list-style-type: none"> → nalazi se u atomima → važan u električnoj struji → nastaje β raspadom 	<ul style="list-style-type: none"> → nastaje u velikom broju udarom kozmičkih zraka o gornje slojeve atmosfere 	<ul style="list-style-type: none"> → do sada viđen samo u laboratorijima
<i>Elektronski neutrino</i>	<i>Mionski neutrino</i>	<i>Tau neutrino</i>
<ul style="list-style-type: none"> → nastaje β raspadom → nastaje u velikom broju u atomskim reaktorima i u nuklearnim reakcijama na Suncu 	<ul style="list-style-type: none"> → nastaje u atomskim reaktorima → nastaje udarom kozmičkih zraka o gornje slojeve atmosfere 	<ul style="list-style-type: none"> → do sada viđen samo u laboratorijima

Članovi treće generacije nisu viđeni u nikakvim prirodnim procesima, barem ne u ovom stadiju evolucije svemira. Mnogo ranije, kada je svemir bio topliji i kada su čestice imale daleko više energije, leptoni treće generacije su često nastajali u prirodnim reakcijama. To je međutim bilo prije nekoliko milijardi godina. Danas se tau može promatrati samo u laboratorijskim eksperimentima, dok tau neutrino nije izravno viđen u eksperimentima već se njegovo prisustvo daje zaključiti iz određenih reakcija.^{[2][21]}

4.2. Temeljne sile prirode

Prema standardnom modelu postoje tri temeljne sile prirode. To su elektromagnetska, slaba nuklearna i jaka nuklearna sila. Gravitacija iako je jedna od temeljnih sila prirode, ipak nije dio standardnog modela. Znanstvenici još uvijek ne znaju kako povezati gravitaciju sa standardnim modelom. Taj zadatak pokazao se vrlo teškim i nedostižnim. Međutim, postoje neki teorijski dokazi da su se u ranijoj povijesti svemira reakcije čestica događale pri vrlo visokim energijama, tako da su ove četiri sile počele djelovati na vrlo slične načine. Fizičari ovo vide kao znak da postoji jedna temeljna sila prirode, bitnija od četiri prethodno navedene sile.

Za razliku od gravitacijske i elektromagnetske sile, slaba i jaka nuklearna sila su praktički tek nedavno otkrivene. Razlog tomu je što te sile imaju točno određen domet. Na udaljenostima većim od određenog dometa, ove sile postaju nemjerljivo male. Domet jake sile je 10^{-15} m, a slabe sile 10^{-17} m. Dakle, ove dvije sile imaju domet manji od atomskih veličina budući da su dimenzije atoma 10^{-10} m u promjeru.^[2]

4.2.1. Jaka nuklearna sila

Dva protona međusobno udaljena za 1m međusobno bi se elektromagnetski odbijala silom 10^{24} puta većom od privlačne gravitacijske sile. Pri sličnim udaljenostima jaka nuklearna sila bi bila jednaka nuli. Međutim, ako bi udaljenost protona bila jednaka promjeru jezgre atoma, što je 10^{-15} m, jaka nuklearna sila bi bila barem jednako jaka kao i elektromagnetska. Upravo ta privlačna jaka nuklearna sila sprečava jezgru atoma da bude raznesena djelovanjem odbojne elektrostatske sile.

Jaka nuklearna sila djeluje samo između kvarkova. Leptoni uopće ne doživljavaju djelovanje jake nuklearne sile, slično kao što objekti bez naboja ne doživljavaju djelovanje elektromagnetske sile. To je razlog podjele čestica u kvarkove i leptone. Dakle, kvarkovi osjećaju djelovanje jake nuklearne sile, leptoni ne. Međutim, i kvarkovi i leptoni osjećaju djelovanje ostale dvije sile.

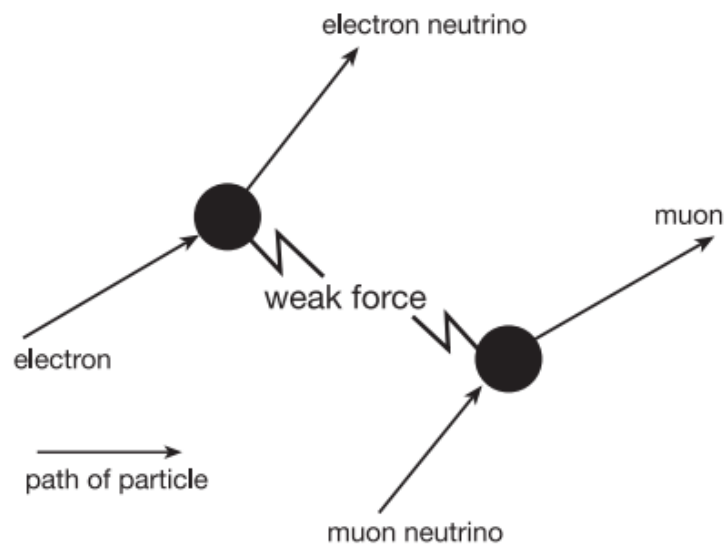
Jaka nuklearna sila omogućava kvarkovima da formiraju čestice poput protona i neutrona. Kada bi leptoni mogli osjećati djelovanje jake nuklearne sile, tada bi se oni također mogli vezati u složenije čestice baš poput kvarkova. Upravo je to glavna razlika između kvarkova i leptona. Kvarkovi se udružuju zajedno u formiranju drugih čestica, leptoni ne.

Trenutne teorije jakih nuklearnih sila ukazuju na to da je nemoguće imati jedan kvark izoliran od drugih kvarkova. Svi kvarkovi u svemiru su povezani s drugim kvarkovima u složenije čestice. Stvarajući nove kvarkove u eksperimentima, oni se brzo pri nastanku spajaju s drugim kvarkovima. To se dešava toliko brzo da je nemoguće vidjeti jedan kvark prije nego se spoji s drugim kvarkom. Stoga su kvarkovi teži za proučavati.^[2]

4.2.2. Slaba nuklearna sila

Slabu nuklearnu silu je najteže objasniti od svih temeljnih sila zbog toga što se ona najmanje uklapa u definiciju sile. Jaku nuklearnu silu moguće je zamisliti kao privlačnu silu između kvarkova, ali pojmovi “privlačna” i “odbojna” zapravo ne odgovaraju pri opisu slabe nuklearne sile. Razlog tomu je što slaba nuklearna sila zapravo mijenja čestice iz jedne vrste u drugu, unutar iste generacije ili između generacija. Stoga je slaba nuklearna sila razlog grupiranja kvarkova i leptona u generacije. Dakle, nju osjećaju i kvarkovi i leptoni, a ne samo jedna vrsta čestica. Jaka nuklearna sila je jedina od temeljnih sila čije djelovanje osjeća samo jedna vrsta čestica.

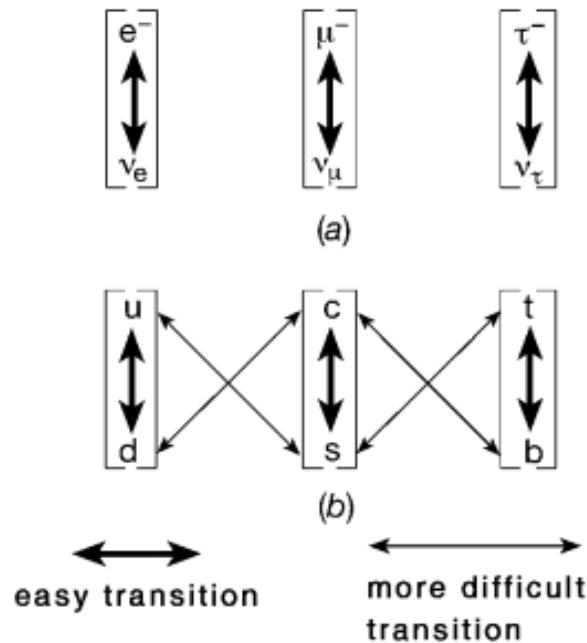
Ako se dva leptona nađu u dometu slabe sile, tada je za njih moguće da prijeđu iz jedne vrste u drugu vrstu leptona, ali samo unutar iste generacije. Na primjer, elektron se može promijeniti u elektronski neutrino i obrnuto, ali elektron ne može prijeći u mionski neutrino ili u mion (Slika 2.). Dakle, slaba sila može djelovati na leptone samo unutar iste generacije, ali ne i između generacija.



Slika 2. Prikaz djelovanja slabe nuklearne sile na leptone

Kada su u pitanju kvarkovi, stvari se malo kompliciraju. Slaba nuklearna sila može promijeniti jedan kvark u drugi, unutar iste generacije, ali i između generacija kvarkova. Na primjer, djelovanjem slabe nuklearne sile gornji kvark (u) se može promijeniti u donji kvark (d),

isto tako ali rjeđe može se promijeniti u strani (s) ili u dubinski kvark (b). Slika 3. prikazuje moguće prijelaze leptona (a) i kvarkova (b) djelovanjem slabe nuklearne sile.^[2]



Slika 3. (a) Djelovanje slabe nuklearne sile na leptone (b) Djelovanje slabe nuklearne sile na kvarkove (Napomena: prijelaz poput $u \rightarrow b$ je također moguć)

4.3. Leptonski broj

Sada je već poznato da slaba nuklearna sila može promijeniti neki lepton u njegovog odgovarajućeg partnera, ali samo unutar iste leptonske generacije. U slučaju kvarkova prijelazi su mogući unutar iste kvarkovske generacije, ali i između generacija. No čini se da ovo leptonsko pravilo nailazi na problem kada se primjeni na raspadanje čestica poput miona:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \nu_\tau \quad (5)$$

Jedan od nastalih neutrina mora biti u istoj generaciji kao i originalna čestica da bi se očuvao broj čestica u toj generaciji. No, drugi neutrino je potpuna misterija. Da bi se riješila ova

zagonetka treba se postaviti pitanje što to međusobno razlikuje jednu leptonsku generaciju od druge.

Elektron, mion i tau su vrlo slične čestice, jedino po čemu se razlikuju je masa. Ta razlika bi mogla biti dovoljna za svrstavanje leptona u tri različite generacije. Međutim, situacija je daleko manje jasna za neutrine, jer prema standardnom modelu neutrini su bez mase. Ipak, mora postojati neko svojstvo koje međusobno razlikuje leptonsku generaciju, čak iako se ono ne može mjeriti.

U tu svrhu pretpostavlja se da leptoni posjeduju neko unutarnje svojstvo koje se ne može mjeriti na standardni način (u smislu kao što se mogu mjeriti naboj ili masa), ali po kojem se generacija kvarkova međusobno razlikuje. To svojstvo nazivamo leptonskim brojem. Tablica 5. pokazuje kako je ovo novo svojstvo pridruženo različitim leptonima.

Tablica 5. Leptoni s pridruženim leptonskim brojevima

	Elektronski broj L_e	Mionski broj L_μ	Tau broj L_τ
Elektron	1	0	0
Elektronski neutrino	1	0	0
Mion	0	1	0
Mionski neutrino	0	1	0
Tau	0	0	1
Tau neutrino	0	0	1

Zamislimo da postoji “prekidač” unutar svakog leptona koji se može postaviti na jedan od tri načina koja određuju leptonsku generaciju kojoj čestica pripada. Da bi se mogao zabilježiti položaj prekidača potrebna su nam tri broja: L_e – elektronski broj, L_μ – mionski broj i L_τ – tau broj. Vrijednosti tih brojeva mogu biti ili 1 ili 0. Treba primijetiti da se prekidač ne razlikuje između leptona i njegovog neutrina, kako je i prikazano u Tablici 5.

Vrijednosti prekidača se ne mogu odrediti eksperimentalno, no ono što se može je reći kako je on postavljen promatrajući reakcije čestica. Naravno, prekidač zapravo ne postoji, to je samo način shvaćanja ovog novog svojstva. Jedan od razloga zašto nije moguće mjeriti ovo svojstvo je taj što ono nema stvarnu veličinu, u smislu u kojem naboj i masa imaju. Na primjer, elektronski broj ne može biti 1,2 ili 3,5 ili $1,6 \cdot 10^{-19}$ ili bilo koji drugi broj. Čestica ili ima ili nema

elektronski broj, postoje samo te dvije mogućnosti. Fizičari takva svojstva čestica nazivaju unutrašnjim svojstvima.^[2]

4.3.1. Očuvanje leptonskog broja

Ukupan leptonski broj je očuvan u mnogim reakcijama. Uzmimo za primjer sljedeću reakciju:



Prema definiciji svi kvarkovi imaju leptonski broj jednak 0, jer kvarkovi nisu leptoni. Elektronski neutrino, ν_e , i elektron, e^- , imaju leptonski broj $L_e = 1$. Prema tome ukupan leptonski broj čestica prije i poslije reakcije je očuvan:

$$\begin{array}{ccccccc} \nu_e & + & d & \rightarrow & u & + & e^- \\ L_e & 1 & + & 0 & = & 0 & + & 1 \end{array}$$

Nema potrebe razmatrati L_μ i L_τ budući da u reakciji (6) učestvuju samo leptoni iz prve generacije.

Uzmimo neki drugi primjer:



U ovom slučaju ukupan elektronski broj, L_e , i ukupan mionski broj, L_μ , odvojeno moraju biti jednaki prije i poslije reakcije:

$$\begin{array}{ccccccc} \nu_\mu & + & e^- & \rightarrow & \mu^- & + & \nu_e \\ L_e & 0 & + & 1 & = & 0 & + & 1 \\ L_\mu & 1 & + & 0 & = & 1 & + & 0 \end{array}$$

Za primjer možemo uzeti mnoge druge reakcije koje bi također potvrdile očuvanje različitih leptonskih brojeva. Dakle, ukupan elektronski, mionski i tau broj odvojeno moraju biti jednaki prije i poslije reakcije. Ovo je postalo dobro uspostavljeno pravilo u fizici čestica, potvrđeno eksperimentima i čvrstom teorijskom pozadinom.^[2]

4.3.2. Misteriozni neutrino

Postoje neke reakcije koje narušavaju pravilo o očuvanju leptonskog broja. Jedna od tih reakcija je i reakcija (5) koju smo ranije spomenuli:



Ako sad raspišemo odgovarajuće leptonske brojeve za reakciju (5) uočiti ćemo da je leptonski broj misterioznog neutrina nepoznat, budući da nismo odredili o kojoj je čestici točno riječ.

	μ^-	\rightarrow	e^-	$+$	ν_μ	$+$	ν_τ
L_μ	1	=	0	+	1	+	?
L_e	0	=	1	+	0	+	?

Jedna stvar je sigurna. Misteriozna čestica mora imati mionski broj jednak nuli, jer da to nije slučaj ukupan mionski broj ne bi bio očuvan. No, što je s elektronskim brojem misteriozne čestice? Uočavamo da ukupan elektronski broj mora biti nula, ali onda raspadaњem dobijemo česticu s elektronskim brojem 1. Ukupan iznos na desnoj strani jednakosti će biti nula samo ako misteriozni neutrino ima elektronski broj -1 . Dakle, kada bi to bio slučaj, ukupan elektronski broj bio bi očuvan. Međutim, ovakvo zaključivanje ne čini se fizikalno ispravnim. No, da ne bi išli previše u detalje, morat ćemo se zadovoljiti s matematičkim načinom zaključivanja. U tom slučaju, kako je elektronski broj misterioznog neutrina -1 , riječ mora biti o antičestici i to o elektronskom antineutrinu. Sada smo u mogućnosti napisati cijelu jednadžbu raspadaњa miona, pri čemu crta iznad oznake elektronskog neutrina naglašava da se radi o antičestici, u ovom slučaju o elektronskom antineutrinu.^[2]



4.4. Antileptoni

Do sada smo već nekoliko puta spomenuli antimateriju i antičestice, a nismo baš puno rekli o njima. Znanstveno fantastični filmovi i serije jako vole baratati s antimaterijom, ali to ne znači da je antimaterija samo plod znanstvene fantastike. Ona zaista postoji, samo ne na način na koji je često predstavljena u filmovima. Moguće ju je stvoriti u laboratorijima i čestični fizičari je često koriste u svojim eksperimentima.^[2]

Suvremena teorija govori da svaka čestica ima svoju antičesticu, česticu iste mase i spina, ali suprotnog naboja. Osim po naboju, čestice i antičestice se razlikuju po nizu drugih svojstava. Na primjer, po leptonskom broju, barionskom broju, itd. Svojstva koja su identična kod čestica i antičestica jesu masa, spin, vrijeme raspada, itd. Dakle, antimaterija se sastoji od antičestica, isto kao što se materija sastoji od čestica. Antimaterija je osobito rijetka u svemiru i ne zna se zašto svemir ne sadrži istu količinu materije i antimaterije. Ako postoji velika količina antimaterije, onda je negdje dobro sakrivena.^[9]

Ukratko, imamo šest leptona svrstanih u tri generacije i šest antileptona također svrstanih u tri generacije. Antileptoni su iste mase i spina kao i leptoni, no suprotnog naboja i leptonskog broja. U Tablica 6., koja predstavlja proširenu leptonsku “porodicu”, u drugom redu su smješteni antileptoni kojima je pridružen leptonski broj suprotnog predznaka.^[2]

Tablica 6. Proširena leptonska “porodica”

Leptonski broj	Prva generacija	Druga generacija	Treća generacija
+1	$\begin{bmatrix} e^- \\ \nu_e \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{bmatrix}$
-1	$\begin{bmatrix} \bar{e}^+ \\ \bar{\nu}_e \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \bar{\mu}^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \bar{\tau} \\ \bar{\nu}_\tau \end{bmatrix}$

4.5. Barionski broj

Ako se prisjetimo, slaba nuklearna sila ne razlikuje u potpunosti kvarkovsku generaciju kao u slučaju leptonske generacije. Kada su pitanju kvarkovi, slaba nuklearna sila ne samo da omogućava promjenu kvarkova unutar iste generacije, već su moguće promijene između samih generacija. Stoga, uvođenje tri kvarkovska broja, kao u slučaju leptona, ne bi načinilo nikakvu

razliku između kvarkovske generacije. Ti brojevi ne bi bili očuvani u slaboj interakciji, kao što je to slučaj s leptonskim brojevima.

Postoji svojstvo koje razlikuje kvarkove od leptona – to je da oni nisu leptoni. Slaba nuklearna sila u potpunosti razlikuje kvarkove od leptona. Ona ne može promijeniti kvark u lepton i obrnuto. Stoga, svi kvarkovi imaju leptonski broj 0. Iako kvarkovi ne nose leptonski broj, oni pak nose drugačiji oblik “unutarnjeg prekidača” koji ih čini više kvarkovima nego leptonima. To unutarnje svojstvo kvarkova zove se barionski broj (B). Svi kvarkovi imaju barionski broj $B = \frac{1}{3}$, a svi leptoni $B = 0$.

Sad se nameće pitanje zašto svi kvarkovi imaju barionski broj $B = \frac{1}{3}$, a ne $B = 1$. Razlog tomu je što je barionski broj uveden još prije otkrića kvarkova, te je izvorno definiran pomoću protona koji spada u barione i kojem je pridružen barionski broj $B = +1$. Barioni i mezoni su složene čestice sastavljene od kvarkova koje se zajedničkim imenom nazivaju hadroni. Prije otkrića kvarkova, leptoni i hadroni su smatrani osnovnim konstituentima svemira. Čestice sastavljene od tri kvarka nazivaju se barionima, a od tri antikvarka antibarionima. Parovi kvark-antikvark nazivaju se mezonima. Barioni su čestice polucjelobrojnog spina i stoga spadaju u fermione dok su mezoni čestice cjelobrojnog spina te stoga spadaju u bozone. Na Slici 4. prikazano je “obiteljsko stablo” hadrona. Dakle, kako je proton barion i kako mu je pridružen barionski broj $B = +1$, stoga svaki kvark mora imati barionski broj $B = \frac{1}{3}$. Ukupan barionski broj protona jednak je zbroju svih barionskih brojeva čestica koje ga čine.^[2]



Slika 4. “Obiteljsko stablo” hadrona

4.5.1. Antikvarkovi

Baš kao i kod leptona, tako i kod kvarkova imamo šest antikvarkova svrstanih u tri generacije. Svaki antikvark je iste mase i spina kao i odgovarajući kvark, no suprotnog naboja i barionskog broja. Tablica 7. predstavlja proširenu kvarkovsku “porodicu” s antikvarkovima smještenim u drugom redu tablice s pridruženim barionskim brojem suprotnog predznaka.

Između antikvarkova djeluje jaka nuklearna sila, baš kao i između kvarkova, što ukazuje na to da se antikvarkovi udružuju u formiranju antičestica poput antiprotona i antineutrona. Sad se možete zapitati koja je razlika između antineutrona i neutrona budući da neutron nije električki nabijen. Unatoč tome što su neutron i antineutron iste mase i naboja, oni se ipak razlikuju zbog toga što se neutron sastoji od kvarkova, a antineutron od antikvarkova. Kvarkovi i antikvarkovi imaju suprotne naboje bez obzira što je njihov konačan zbroj u oba slučaja jednak nuli.^[2]

Tablica 7. Proširena kvarkovska “porodica”

Barionski broj	Prva generacija	Druga generacija	Treća generacija
$+\frac{1}{3}$	$\begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix}$
$-\frac{1}{3}$	$\begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{d} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \bar{c} \\ \bar{s} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \bar{t} \\ \bar{b} \end{bmatrix}$

4.5.2. Očuvanje barionskog broja

U prethodnom poglavlju svim kvarkovima pridružili smo barionski broj $B = +\frac{1}{3}$, a svim antikvarkovima barionski broj $B = -\frac{1}{3}$. Ovo upućuje na to da barioni moraju imati barionski broj $B = +1$, antibarioni $B = -1$, a mezoni $B = 0$.

Isto kao i za leptonski broj, tako i za barionski broj vrijedi pravilo da je u svim reakcijama barionski broj očuvan. Uzmimo za primjer reakciju dva protona:

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0 + \pi^0 \quad (9)$$

Budući da se protoni sastoji od tri kvarka njima je pridružen barionski broj $B = 1$, a π^0 ili pionu barionski broj $B = 0$, budući da je π^0 mezon. Stoga, ako raspišemo barionske brojeve za cijelu reakciju primijetit ćemo da je ukupan barionski broj očuvan.

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 p & + & p & \rightarrow & p & + & p & + & \pi^0 & + & \pi^0 \\
 B & 1 & + & 1 & = & 1 & + & 1 & + & 0 & + & 0
 \end{array}$$

Dakle, u svim reakcijama i ukupan barionski broj čestica prije i poslije reakcije mora biti očuvan.^[2]

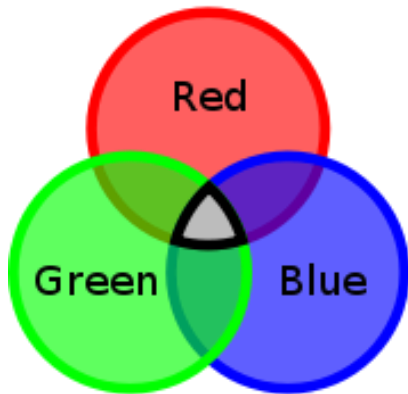
4.6. “Boje” kvarkova

U ovom poglavlju objasniti ćemo činjenicu da se još niti u jednom eksperimentu, ma koliko se velika energija koristila kako bi se razbili protoni ili neutroni, nije primijetio izolirani kvark. Što to sprječava kvarkove da izađu iz bariona?

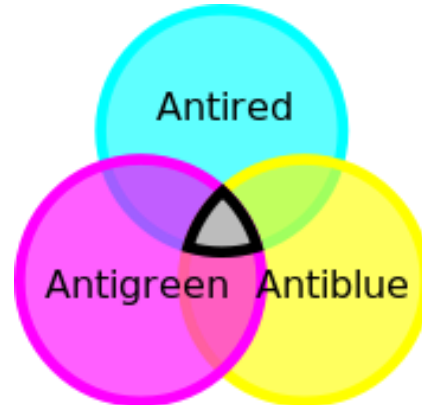
Odgovor na ovo pitanje pronađen je u teoriji “boja”. Kada su prije par stotina godina otkrivene dvije vrste električnog naboja fizičari su dobili zadatak da novootkriveno svojstvo materije izraze pomoću matematike koju su poznavali. Idealno rješenje je pronađeno u pozitivnim i negativnim brojevima. Jednoj vrsti naboja pridružen je pozitivan predznak, a drugoj vrsti negativan. U slučaju kada se iste količine pozitivnog i negativnog naboja spoje one se ponište i rezultat je neutralna materija, odnosno matematički gledano nula. Budući da se pozitivni i negativni naboji privlače, da bi ih se razdvojilo potrebno je uložiti energiju. Na sličan način pokušalo se objasniti i međusobno privlačenje kvarkova. Prva prepreka na koju su znanstvenici naišli bila je činjenica da se u barionima ne nalaze dva kvarka, kojima bi bilo lako dodijeliti plus i minus, već tri kvarka. Tako je uveden model boja.

Za uvođenje ovog modela iskorištena je činjenica da zdravo ljudsko oko jasno razlikuje tri osnovne boje: crvenu, plavu i zelenu. Tako je svakom kvarku dodijeljen jedan “naboj boje” i utvrđeno je da se različite boje “drže zajedno”, odnosno utvrđeno je pravilo da u prirodi ne može postojati obojena kombinacija kvarkova. Dakle, nemoguće je izvući jedan kvark iz protona jer jedan kvark ima boju. On može postojati samo združen u česticu u kojoj se nalazi još kvarkova koji tu njegovu boju poništavaju. To znači da će tri kvarka u protonu imati plavu, crvenu i zelenu boju, dok će njihova kombinacija dati neutralnu, odnosno bijelu boju. Na Slici 5. prikazane su tri

osnovne boje kvarkova i na Slici 6. boje koje se dobiju njihovim miješanjem, odnosno boje antikvarkova.



Slika 5. Boje kvarkova



Slika 6. Boje antikvarkova

Svakako treba napomenuti da ovo nisu stvarne boje. Isto kao što ponekad protonu dodijelimo oznaku “+” kako bismo naznačili da se radi o pozitivno nabijenoj čestici iako znamo da na pravom protonu ne piše nikakav plus, isto tako i kvarkovi u prirodi nemaju pravu boju. Radi se o tome da svojstvo kvarkova, nazvano boja, ima slična svojstva sa stvarnim bojama i da se kvarkovi u hadronima na taj način mogu zgodno opisati.

No, što je s mezonima, s česticama koje se sastoje od jednog kvarka i jednog antikvarka? Ako kvark ima zelenu boju, tada antikvark mora biti antizelen, dakle mora imati sve boje osim zelene, a to su u ovom slučaju crvena i plava koje miješanjem daju ljubičastu boju. Svaki kvark će imati jednu od tri boje, dok će svaki antikvark imati jednu od tri antiboje. Za razliku od električnih naboja gdje uvijek znamo da je proton pozitivan, a elektron negativan, bilo koja pojedina vrsta kvarka može imati bilo koju od tri boje. U svakoj čestici koju čine kvarkovi njihove boje se stalno mijenjaju tako da jedan kvark u jednom trenutku može biti plav, a već u drugom zelen. Jedino ograničenje u ovome je da u svakom trenutku cjelokupna čestica mora biti neutralna, odnosno bijela. Ako je jedan kvark crven, ostala dva moraju biti plavi i zeleni. Ako crveni promjeni boju u plavo, kvark koji je do tada bio plav mora promijeniti boju u crveno.

Sve ovo još ne objašnjava kako to priroda sprečava da se kvark otkine iz protona, ili neke druge čestice. Kolika god sila bila između kvarkova u protonu, uvijek postoji neka količina energije koju možemo dovesti kako bi se razbio proton. Što se događa s protonom kada se ta granica postigne? Ako se protonu dovede dovoljna količina energije u nastojanju da se proton

razbije na svoje konstituente, kvarkovi će se zaista početi razdvajati, ali u trenutku “pucanja” protona ta će se energija iskoristiti za stvaranje još kvarkova. Na primjer, ako iz protona izleti crveni kvark, iz energije koja je iskorištena za razbijanje protona nastat će novi crveni kvark koji će protonu nadomjestiti onog kojeg je upravo izgubio, dok će se uz taj crveni kvark materijalizirati jedan anticrveni kvark i tako će se stvoriti mezon. Dakle, da bi se proton razbio potrebno je uložiti određenu energiju, a kad uložimo tu energiju ona će se iskoristiti da se iz “ničega” stvori još kvarkova koji će se prilijepiti na one koji su izletjeli iz protona, i opet ćemo umjesto slobodnih kvarkova imati nakupine od dva ili tri kvarka.

U posljednjih pola stoljeća pronađeno je na stotine čestica koje se sastoje od dva ili tri kvarka, međutim, sve su one vrlo nestabilne i raspadaju se vrlo brzo nakon nastanka u akceleratorima. Stoga nije ni čudno da je gotovo sva poznata materija u svemiru sastavljena od protona i neutrona koji su puno stabilniji.^{[10][17]}

5. Prijenosnici interakcije

5.1. Baždarni bozoni

Prema standardnom modelu, s obzirom na vrijednost spina, sve elementarne čestice dijele se u dvije velike grupe: fermione i bozone. U fermione spadaju elementarne čestice koje izgrađuju svu poznatu materiju u svemiru, dok u bozone spadaju elementarne čestice koje se nazivaju baždarni bozoni. To su bozoni koji nemaju unutarnju strukturu, u potpunosti su elementarni i definiraju se kao čestice prijenosnici tri temeljne sile prirode, ne računajući gravitaciju.

Trenutno u standardnom modelu postoje četiri vrste baždarnih bozona: gluon, foton, Z i W bozon. Ove čestice vrše sve interakcije između čestica materije i poneke između samih sebe, pri čemu je svaka od njih odgovorna za jedno međudjelovanje. Najpoznatiji bozon je foton, prijenosnik elektromagnetske sile koja je odgovorna za pojavu struje, magnetizma i svjetlosti. W i Z bozon su prijenosnici slabe nuklearne sile, a gluon jake nuklearne sile koja vezuje kvarkove u hadrone (protone, neutrone, ...).

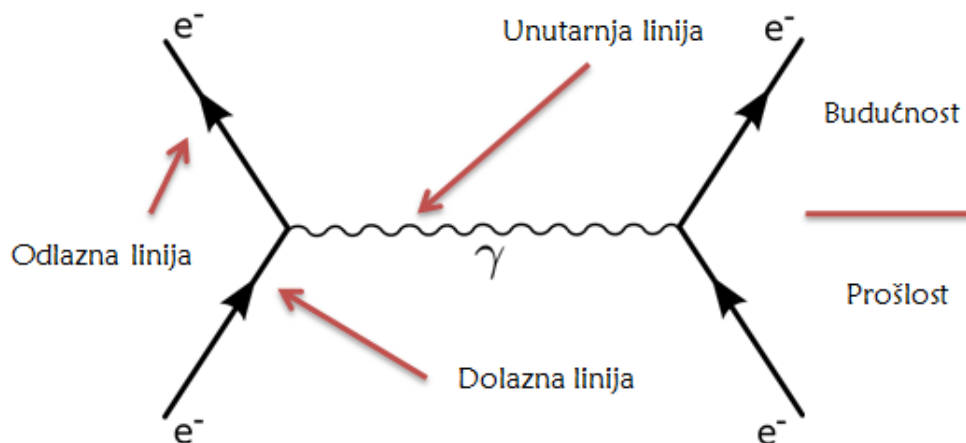
Iako jedna od temeljnih sila prirode, gravitacija nije dio standardnog modela. Znanstvenici još nisu sigurni kako je moguće ovu silu usuglasiti s kvantnom teorijom standardnog modela.

Postoje pretpostavke da bi se ovaj problem gravitacije možda mogao riješiti postojanjem, zasad još uvijek, hipotetskim baždarnim bozonom nazvanim gravitonom.

Dakle, elementarne čestice interagiraju jedna s drugom razmjenjujući baždarne bozone. Interakcije elementarnih čestica vizualno možemo prikazati Feynmanovim dijagramima, grafičkim prikazom matematičkih izraza koji određuju ponašanje elementarnih čestica. Slika 7. daje primjer Feynmanova dijagrama za interakciju dva elektrona. Interakcije čestica mogu biti vrlo složene i teške za razumjeti, stoga Feynmanovi dijagrami omogućavaju jednostavnu vizualizaciju onog što bi inače bila komplicirana i apstraktna formula.^{[13][15]}

U Feynmanovom dijagramu putanje čestica predstavljene su linijama koje mogu biti zakrivljene ili pravocrtne, sa strjelicom ili bez, ovisno i vrsti čestica. Točka u kojoj se linije povezuju s drugim linijama dijagrama naziva se tjemenom interakcije, i to je točka u kojoj se čestice susreću i međusobno interagiraju razmjenjujući baždarne bozone.

Postoje tri različite vrste linija: unutarnje linije koje povezuju dva tjemena, dolazne linije koje se protežu iz “prošlosti” do tjemena i predstavljaju početno stanje, te odlazne linije koje se protežu od tjemena do budućnosti i predstavljaju konačno stanje. Ponekad donji dio dijagram predstavlja prošlost, a gornji budućnost, a ponekad je prošlost s lijeve strane, a budućnost s desne strane dijagrama.^[18]



Slika 7. Primjer Feynmanova dijagrama za interakciju dva elektrona

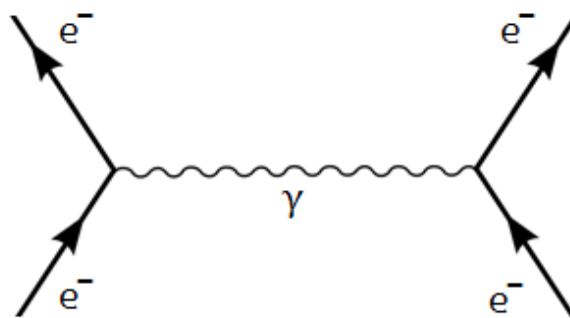
5.1.1. Nositelji elektromagnetske interakcije – fotoni

Elektromagnetska sila djeluje između čestica koje posjeduju električni naboj, tako da se čestice istoimenog naboja međusobno odbijaju, a raznoimenog međusobno privlače. Ona je odgovorna gotovo za sve pojave s kojima se susrećemo u svakodnevnom životu, osim za gravitaciju.

Znamo da atomi obično imaju jednak broj protona i elektrona, tako da su atomi električki neutralni. Odnosno, njihov ukupan električni naboj jednak je nula. Budući da su atomi neutralni, postavlja se pitanje kako se atomi mogu držati na okupu i formirati stabilne molekule? Otkriveno je da se električno nabijeni dio jednog atoma može privlačiti sa električno nabijenim dijelom drugog atoma. Odnosno, protoni jednog atoma mogu privlačiti elektrone drugog atoma. To omogućava da se različiti atomi mogu držati na okupu. Dakle, elektromagnetska sila je ono što omogućava atomima da se drže na okupu i tako stvaraju stabilne molekule. Bilo koja struktura na svijetu može postojati samo zato što proton i elektron imaju suprotne naboje.^[13]

Čestice prijenosnici elektromagnetske sile su fotoni. Oni se razmjenjuju svaki put kada električki nabijene čestice stupaju u interakciju. Foton je čestica bez naboja, tako da ona sama ne doživljava djelovanje elektromagnetske sile. Drugim riječima, fotoni ne mogu izravno komunicirati jedni s drugima. Foton ne samo da je čestica bez naboja, već i bez mase te stoga uvijek putuje brzinom svjetlosti. Međutim, fotoni nose energiju i impuls, te u prenošenju tih svojstava među česticama uzrokuju pojavu elektromagnetske sile.

U tim procesima, energija i impuls moraju biti očuvani, u skladu s osnovnim zakonima fizike. No, energija nije očuvana, jer jedna čestica emitira foton, dok ga druga apsorbira. Na primjer, u reakciji dva elektrona, jedan elektron emitira foton, a drugi ga apsorbira. Ovu reakciju možemo prikazati Feynmanovim dijagramom prikazanom na Slici 8.



Slika 8. Dva elektrona uzajamno djeluju jedan na drugog uz razmjenu fotona

Kvantna mehanika dopušta ovu neravnotežu, pod uvjetom da fotoni zadovoljavaju Heisenbergove relacije neodređenosti (9) i (10):

$$\Delta x \cdot \Delta p \leq \frac{h}{2\pi} \quad (9)$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \leq \frac{h}{2\pi} \quad (10)$$

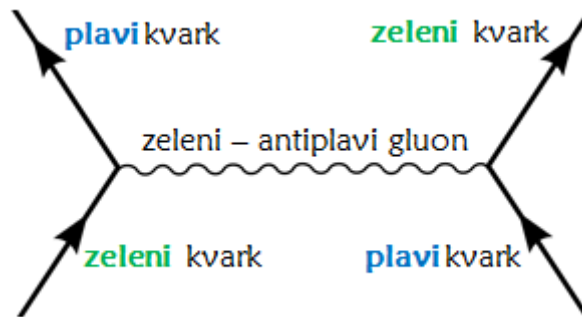
Prema relaciji (9) nemoguće je znati sve detalje određenog kvantnog sustava. Na primjer, ako se zna točan položaj elektrona, nemoguće je znati impuls elektrona. Ova neodređenost omogućava da neproporcionalnost u energiji postoji neko vrijeme, pod uvjetom da vrijedi relacija (10), odnosno da umnožak neodređenosti energije i vremena bude manji ili jednak reduciranoj Planckovoj konstanti. Stoga se energija razmijenjenog fotona može shvatiti kao “posuđena” u granicama principa neodređenosti. Što je više energije posuđeno, kraće je vrijeme posudbe.^{[1][7][8]}

5.1.2. Nositelji jake nuklearne interakcije - gluoni

Znamo da se jezgra atoma sastoji od protona i neutrona, čestica za koje znamo da su izgrađene od kvarkova. Budući da su neutroni čestice bez naboja, protoni se, zbog pozitivnog naboja i male udaljenosti između njih, odbijaju velikom električnom silom, no ipak se jezgra atoma ne razleti. Postavlja se pitanje zašto je to tako. Razlog tomu je što je jaka nuklearna sila između kvarkova u jednom protonu i kvarkova u drugom protonu dovoljno velika da nadjača odbojnu elektromagnetsku silu između njih. Zato se jezgra atoma drži na okupu. Elementarne čestice odgovorne za jaku nuklearnu silu, to jest silu koja djeluje između kvarkova nazivaju se gluonima.

Gluoni, baš kao i kvarkovi, su čestice koje imaju boju. Kvarkovi razmjenjuju gluone u jakoj interakciji i stvaraju vrlo jako polje sile boje koje drži kvarkove zajedno. Kada se kvarkovi udalje jedan od drugog, polje sile boje postane jače. Prilikom međusobne razmjene gluona kvarkovi stalno mijenjaju boju. Budući da razmjena gluona mijenja boju kvarkova i budući da je boja očuvana “veličina”, možemo zamisliti da gluoni, za razliku od kvarkova, nose boju i antiboju. Postoji osam različitih kombinacija boje i antiboje koje gluoni mogu nositi. Tako na primjer, ako zeleni kvark emitira zeleni – antiplavi gluon, kvark mora promijeniti boju u plavu jer ukupna boja mora ostati zelena. Nakon emisije gluona, plava boja kvarka se poništi sa antiplavom bojom gluona

i preostala boja je zelena boja kvarka. Slika 9. prikazuje Feynmanov dijagram za interakciju između kvarkova.



Slika 9. Feynmanov dijagram za inerakciju kvarkova

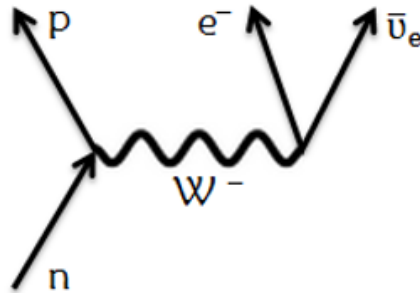
Kvarkovi unutar hadrona emitiraju ili apsorbiraju veliki broj gluona u jedinici vremena, tako da ne postoji mogućnost da opazimo boju pojedinačnog kvarka. Boja kvarkova u hadronima se mijenja tako da je ukupna boja u svakom trenutku neutralna.^{[4][7][13]}

5.1.3. Nositelji slabe nuklearne interakcije – W i Z bozoni

Slaba interakcija odgovorna je za raspade masivnih kvarkova i leptona u lakše kvarkove i leptone. Kada se elementarne čestice raspadaju, opažamo nestanak jedne čestice i nastanak dvije ili više različitih čestica. Nastale čestice pri tome imaju manju masu od originalne čestice. Budući da masa i energija moraju biti očuvane, višak energije originalne čestice pretvorio se u kinetičku energiju nastalih čestica.

Čestice nosioci slabe interakcije su W i Z bozoni, vrlo masivne čestice. W bozoni imaju električni naboj, dok je Z bozon čestica bez naboja. Nabijene W čestice su odgovorne za procese, kao što su β raspad, u kojima čestica koja sudjeluje mijenja predznak. Na primjer, kada se neutron raspada na proton, on emitira W^- česticu, tako da ukupan naboj ostane nula prije i poslije raspada. Pri tome se W^- čestica odmah pretvara u elektron i antineutrino, čestice koje su opažene u laboratorijima kao produkti β raspada neutrona. Ovu jednostavnu reakciju, beta raspada neutrona,

možemo prikazati Feynmanovim dijagramom kao na Slici 10. U sličnim reakcijama koje ne uključuju promjene u naboju neće se izmjenjivati W bozoni, već Z bozoni.



Slika 10. Feynmanov dijagram za β raspad neutrona

Bilo bi korisno napomenuti da su prema standardnom modelu slaba i elektromagnetska interakcija ujedinjene u elektroslabu interakciju. Fizičari su dugo vremena vjerovali da je slaba nuklearna sila tijesno povezana s elektromagnetskom. Otkrili su da je na vrlo malim udaljenostima slaba nuklearna sila po jakosti usporediva s elektromagnetskom, dok je na većim udaljenostima deset tisuća puta manja od elektromagnetske. Došli su do zaključka da su slaba nuklearna i elektromagnetska sila zapravo različite manifestacije jedne sile, elektroslabe.^{[4][8]}

5.1.4. Nositelji gravitacijske interakcije – gravitoni ???

Najslabija, ali ipak najizrazitija, od četiri temeljne sile prirode je gravitacija. No, ipak standardni model je još uvijek ne može objasniti na zadovoljavajući način. Gravitacija predstavlja jedan od najvećih neriješenih problema u fizici.

Iako gravitacijsku silu možemo lako izračunati, ne zna se kako ju usuglasiti s kvantnom teorijom standardnog modela. U svijetu atoma, učinci gravitacije su zanemarivi u usporedbi s drugim silama koje djeluju. Iako je gravitacijska sila slaba, ona može utjecati na jako velikim udaljenostima. Newtonov zakon gravitacije pokazuje da na određenoj udaljenosti gravitacijska sila između dva tijela može postati zanemariva. Naravno, ta udaljenost ovisi o masama tih tijela. Dakle,

gravitacijski učinci velikih, masivnih objekata mogu biti značajni na udaljenostima koje su izvan domašaja drugih sila.

Čestice koje bi bile odgovorne za gravitacijsku silu nazivaju se gravitonima. One još uvijek nisu otkrivene. Kad bi ove čestice bile pronađene, standardni model bi se možda mogao zamijeniti nedostižnom teorijom svega, koja bi ujedinila sve četiri temeljne sile prirode u jednu jedinu temeljnu silu. Kažem možda, jer u tom slučaju još uvijek bi bilo teško (ili bolje rečeno nemoguće) uklopiti gravitaciju s kvantnom teorijom standardnog modela.^[13]

6. Higgsov bozon

Higgsov bozon je masivna elementarna čestica, koju su 1964. godine predložili Peter Higgs, Robert Brout, Francois Englert, Gerald Guralnik, Carl Hagen i Thomas Kibble, kojom se prema standardnom modelu objašnjava masa drugih čestica, a posebno zašto su W i Z bozoni toliko masivni za razliku od fotona koji nema masu.^{[12][19]}

6.1. Higgsov mehanizam, polje i bozon

Prema standardnom modelu, temeljne sile prirode proizlaze iz zakona prirode poznatom pod nazivom simetrija, a prenose ih čestice poznate kao baždarni bozoni. U fizici se kaže da sustav poštuje zakon simetrije ako on ostaje nepromijenjen u slučaju kada se nad sustavom obavlja neka operacija, na primjer rotacija ili pomak. U fizici čestica, simetrija se može koristiti kao bi se izveli zakoni očuvanja određenih fizikalnih sustava, te kako bi se utvrdilo koje su interakcije čestica moguće, a koje ne. Dakle, simetrija nam daje pravilo kako bi se neki sustav trebao ponašati sve dok na njega ne djeluje neka vanjska sila. Dobar primjer je Rubikova kocka. Uzmemo li Rubikovu kocku i počnemo li je okretati po volji, ti pomaci neće narušiti simetriju kocke. Međutim, svaki od tih pomaka će promijeniti rješenje zagonetke, ali ostavljajući Rubikovu kocku i dalje rješivom. Međutim, moguće je razbiti tu simetriju ako djelujemo nekom vanjskom silom, na primjer ako rastavimo kocku i ponovo je sastavimo na skroz pogrešan način. Koliko god se sad trudili složiti kocku, to neće biti moguće, jer smo prethodno narušili simetriju kocke, odnosno sustava.^[23]

Pod određenim uvjetima elektroslaba interakcija se manifestira kao slaba sila koju prenose masivni baždarni bozoni. Simetrija slabe sile trebala bi uzrokovati da prijenosnici slabe interakcije, W i Z bozoni, nemaju masu. Međutim, eksperimenti pokazuju da su bozoni slabe interakcije vrlo masivne čestice kratkog dometa. Stoga kažemo da elektroslaba interakcija narušava zakon simetrije. Narušavanje simetrije postoji tamo gdje je simetrija očekivana, ali nije zapažena. Nije jasno kako i zašto dolazi do narušavanja simetrije u elektroslaboj interakciji, no jasno je da bez nje, svemir kakav danas znamo ne bi postojao jer se atomi i druge strukture ne bi mogle oformiti, niti bi se reakcije u zvijezdama mogle događati.

Međutim, ranih 1960-ih godina, fizičari su shvatili da pod određenim uvjetima zakon simetrije ne mora biti ispoštovan. Matematički model koji objašnjava kako baždarni bozoni mogu biti masivni unatoč njihovoj vladajućoj simetriji naziva se Higgsov mehanizam. Ovaj mehanizam pokazuje da je uvjet narušavanju simetrije postojanje neobičnog polja koje se prostire kroz cijeli svemir i omogućava česticama da imaju masu. Godine 1964. šest fizičara: Peter Higgs, Robert Brout, Francois Englert, Gerald Guralnik, Carl Hagen i Thomas Kibble, predložilo je postojanje novog polja koje, prostirući se svemirom, razbija određene zakone simetrije elektroslabe interakcije.

To novo polje, nazvano Higgsovo polje, aktivira Higgsov mehanizam uzrokujući da W i Z bozoni budu masivni. Nije dugo trebalo znanstvenicima da shvate da bi se istim ovim poljem moglo objasniti zašto ostale elementarne čestice također imaju masu. Mnogo godina nije se moglo reći postoji li zaista Higgsovo polje u prirodi ili ne. Ako bi ono postojalo, bilo bi drugačije od bilo kojeg drugog temeljnog polja poznatog u znanosti.

Postojanje Higgsova polja moglo bi se dokazati pronalaskom odgovarajuće čestice, koja bi također trebala postojati ako postoji i Higgsovo polje. Otkriće te čestice, Higgsovog bozona, direktno bi ukazalo na postojanje Higgsova polja. Desetljećima znanstvenici nisu imali načina kako potvrditi postojanje Higgsovog bozona, jer takva bi se čestica pri nastanku raspala za 10^{-22} sekundi. Bilo je potrebno oko 30 godina, od 1980. -2010., da bi se razvili sudarači čestica, detektori i kompjutori sposobni proizvesti i snimiti Higgsov bozon, ako on doista postoji.

Eksperimenti kojima bi se potvrdila i ustanovila priroda Higgsovog bozona, pomoću velikog hadronskog sudarača (engl. *Large Hadron Collider*) u CERN-u, počeli su početkom 2010. godine. Dana 4. srpnja 2012. godine, dva glavna eksperimenta u LHC-u, na ATLAS-u i CMS-u, su nezavisno jedan od drugog prijavila pronalazak nove čestice s masom oko $125 \text{ GeV}/c^2$, koja je po nekim glavnim svojstvima bila dosta slična s Higgsovim bozonom. Ipak, bila su potreban daljnja istraživanja koja bi u konačnici mogla potvrditi da li je zaista riječ o Higgsovom bozону. Dana 14. ožujka 2013. godine potvrđeno je da se doista radi o Higgsovom bozону.^{[19][20]}

6.2. Pojednostavljeno o Higgsovom polju i bozonu

Zamislimo skijašku stazu prekrivenu snježnim pokrivačem i skijaša koji se želi spustiti na skijama niz tu stazu. Skijaš, zbog jako velike brzine kojom se spušta, jedva dotiče snježni pokrivač i kao da lebdi iznad staze. Na sličan način čestice bez mase interagiraju s Higgsovim poljem, koje je u ovoj analogiji predstavljeno snježnim pokrivačem. Gibajući se brzinom svjetlosti, čestice ne propadaju kroz snijeg, odnosno ne dolaze u doticaj s Higgsovim poljem, te stoga nemaju masu.

Sada umjesto skijaša zamislimo čovjeka koji se želi spustiti niz tu stazu bez skija. U tom slučaju, čovjek će upadati duboko u snijeg, teže i sporije će se kretati. Drugim riječima, čestice koje imaju masu na sličan način dolazit će u interakciju s Higgsovim poljem. Dakle, čestice koje dolaze u interakciju s Higgsovim poljem imat će brzinu manju od brzine svjetlosti, sporije će se kretati i stoga će posjedovati masu.

Radi lakšeg poimanja, o Higgsovom polju možemo misliti kao o snježnom pokrivaču koje se prostire kroz cijeli svemir, ali ga ne vidimo, dok o čovjeku i skijašu mislimo kao o česticama koje interagiraju ili ne interagiraju s Higgsovim poljem. Čestice koje interagiraju s poljem imaju masu, a one koje ne interagiraju nemaju masu. Pri tome, na Higgsov bozon možemo gledati kao na česticu koja je prijenosnik interakcije elementarnih čestica s Higgsovim poljem.^[6]

7. Zaključak

Teorije i otkrića fizičara od 1930-ih godina dala su izvanredan uvid o temeljnim strukturama materije – sve u svemiru izgrađeno je od nekoliko osnovnih građevnih blokova, odnosno elementarnih čestica, kojima upravljaju četiri temeljne sile. Naše najbolje razumijevanje kako su te čestice i sile međusobno povezane objedinjeno je u standardnom modelu čestica. Osnovan ranijih 1970-ih godina, standardni model je uspješno objasnio skoro sve eksperimentalne rezultate i precizno predvidio razne pojave u svojoj domeni. Vremenom i kroz mnoge eksperimente, standardni model je uspostavljen kao dobro testirana teorija fizike čestica.

Na samom početku rekli smo kako je sva materija oko nas izgrađena od nekoliko elementarnih čestica koje se pojavljuju u dvije osnovne grupe – kvarkovi i leptoni. Svaka grupa sastoji se od šest čestica koje dolaze u parovima, odnosno generacijama. Postoje tri generacije. Prvu generaciju čine najlakše i najstabilnije čestice, dok teže i manje stabilne čestice čine drugu i

treću generaciju. Stoga je sva stabilna materija u svemiru izgrađena od čestica koje pripadaju prvoj generaciji. Zajedno, kvarkovi i leptoni pripadaju velikoj grupi čestica koja se naziva fermioni.

Nadalje, bilo je riječi o četiri temeljne sile na djelu u svemiru, različitih jakosti i dometa. To su gravitacija, elektromagnetska, slaba nuklearna i jaka nuklearna sila. Od sve četiri sile najslabija je gravitacijska sila, iako je neograničenog dometa. Elektromagnetska sila je također neograničenog dometa, ali je puno jača od gravitacije. Slaba i jaka nuklearna sila efektivne su jedino pri vrlo malim dometima i dominiraju jedino na nivou subatomske čestice. Unatoč imenu, slaba nuklearna sila je puno jača od gravitacije, ali je zapravo najslabija od druge tri sile. Jaka nuklearna sila, kako i samo ime kaže, najjača je od sve četiri temeljne sile. Dakle, postoje četiri temeljne sile prirode, međutim, standardni model ne uključuje gravitacijsku silu jer ju je nemoguće usuglasiti s kvantom teorijom standardnog modela. Prema standardnom modelu, može se reći da postoje ne tri, već dvije temeljne sile – jaka nuklearna i elektroslaba sila. Fizičari su došli do zaključka da su slaba nuklearna i elektromagnetska sila zapravo različite manifestacije jedne sile, koju su nazvali elektroslaba sila. Svaka od ovih temeljnih sila ima svog odgovarajućeg bozona, odnosno česticu prijenosnika sile. Prijenosnik elektromagnetske sile je foton, jake nuklearne gluon, a prijenosnici slabe nuklearne sile su W i Z bozoni. Iako još nije otkriven, graviton bi trebao biti prijenosnik gravitacijske sile.

Standardni model dobro objašnjava kako ove temeljne sile djeluju na čestice materije, odnosno na kvarkove i leptone. Iako, nama najbolje poznata sila iz svakodnevnog života, gravitacija, nije dio standardnog modela, pokazalo se da standardni model i dalje dobro funkcionira, unatoč isključenju jedne od temeljnih sila. Srećom za fiziku čestica, kada se radi o minijaturnim skalama čestica, efekt gravitacijske sile je toliko slab da utjecaj gravitacije postaje zanemariv. Iako standardni model dobro opisuje pojave u području fizike čestica, to je još uvijek nedovršen, odnosno nepotpun model. Postoje još mnoga pitanja na koja standardni model ne može dati odgovor. Možda je standardni model samo dio jedne veće slike koja uključuje neku novu fiziku, skrivenu duboko u subatomske svijet ili u mračnim zabačenim dijelovima svemira. U toj potrazi za nedostajućim dijelovima veće slike svakako će nam pomoći nove informacije eksperimenata u LHC-u. Ova misterija ne završava s otkrićem Higgsova bozona. Ima još mnogo toga za otkriti i objasniti, i pitanja na koja valja dati odgovore.^[5]

8. Literatura

- [1] A-level Physics Tutor, 2011. Exchange Particles
URL: <http://www.a-levelphysicstutor.com/nucphys-exch-partcls.php> (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [2] Allday, J. Quarks, Leptons and the Big Bang: Second edition. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2002.
- [3] Ben Best, 2014. The Standard Model of Particle Physics
URL: <http://www.benbest.com/science/standard.html> (pristupljeno 12.07.2014.)
- [4] Bernardelli, A. Feynman diagrams. 2011.
URL: <http://www.slideshare.net/asober/feynman-diagrams> (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [5] CERN, 2014. The Standard Model
URL: <http://home.web.cern.ch/about/physics/standard-model> (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [6] Čuda prirode, 2012. Što je Higgsov bozon? Jednostavno i razumljivo objašnjenje
URL: <http://cudaprirode.com/portal/tz/3805-to-je-higgsov-bozon-jednostavno-i-razumljivo-objanjenje> (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [7] Etacude, 2010. Particle Physics - Forces
URL: <http://sciencepark.etacude.com/particle/forces2.php> (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [8] Guide to the Nobel Prize, 2014. Subatomic particle
URL: <https://www.britannica.com/nobelprize/article-60735> (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [9] Maljković, H. Razlika između čestica i antičestica. 2003.
URL: http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/antimaterija/razlika.html (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [10] Perković, D. Kvarкови. 2014.
URL: <http://www.sfera.hr/perkovic/fizika/4-4-3-kvarkovi.html> (pristupljeno 12.07.2014)
- [11] Rigden, J.S. Building Blocks of Matter: A Supplement to the Macmillan Encyclopedia of Physics. Thomson Gale, 2003.
- [12] The Particle Adventure, 2014. Higgs Boson Discovered: Fireworks on the 4th of July
URL: <http://particleadventure.org/the-higgs-boson.html> (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [13] The Particle Adventure, 2014. The Standard Model
URL: <http://particleadventure.org/standard-model.html> (pristupljeno 10.07.2014.)
- [14] The Physics Hypertextbook, 2014. The Standard Model

- URL: <http://physics.info/standard/> (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [15] Wikipedia 2014. The Standard Model
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [16] Wikipedia, 2014. Atomizam
URL: http://hr.wikipedia.org/wiki/Atomizam#Leukip_i_Demokrit (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [17] Wikipedia, 2014. Color charge
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Color_charge (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [18] Wikipedia, 2014. Feynman diagram
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Feynman_diagram (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [19] Wikipedia, 2014. Higgs boson
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Higgs_boson (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [20] Wikipedia, 2014. Higgs field
URL: http://simple.wikipedia.org/wiki/Higgs_field (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [21] Wikipedia, 2014. Neutrino
URL: <http://hr.wikipedia.org/wiki/Neutrino> (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [22] Wikipedia, 2014. Spin
URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_\(physics\)#Fermions_and_bosons](http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_(physics)#Fermions_and_bosons) (pristupljeno: 12.07.2014.)
- [23] Wikipedia, 2014. Symmetry
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Symmetry#In_science_and_nature (pristupljeno: 08.08.2014.)
- [24] Wikipedia, 2014. Thales
URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thales> (pristupljeno: 12.07.2014.)

Životopis

Svetlana Veselinović rođena je 03. rujna 1992. u Vukovaru. Osnovnu školu je završila u Borovu, gdje je i odrasla. Po završetku osnovne škole upisala je Opću gimnaziju u Vukovaru. Nakon srednje škole upisala se na Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku u Osijeku.