

# Nuklearne sile i elementarne čestice

---

**Rodin, Miro**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:761607>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**MIRO RODIN**

**NUKLEARNE SILE I ELEMENTARNE  
ČESTICE**

**ZAVRŠNI RAD**

**Split, ožujak, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET**

**STUDIJ: POMORSKE ELEKTROTEHNIČKE I INFORMATIČKE  
TEHNOLOGIJE**

**NUKLEARNE SILE I ELEMENTARNE  
ČESTICE**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**

**mr. sc. Ivica Kuzmanić**

**STUDENT:**

**Miro Rodin (MB:0171272445)**

**Split, ožujak, 2021.**

## SAŽETAK

U završnom radu opisat će se elementarne čestice i nuklearne sile. Porastom broja elementarnih čestica nametnula se potreba za njihovom podjelom koja se s godinama istraživanja i izvođenjem pokusa, mijenjala i nadopunjavala. Elementarne čestice dijele se u skupine koje su opisane u standardnom modelu čestica. Trenutno postoji 12 elementarnih čestica koje čine materiju, a zajedničkim imenom zovu se fermioni i 6 čestica bozona. Sila koje djeluju između nukleona (proton i neutron) u jezgri atoma naziva se nuklearna sila. Dijeli se na jaku i slabu nuklearnu silu. Jaka nuklearna sila predstavlja međudjelovanje između kvarkova i gluona, a slaba nuklearna sila između kvarkova i leptona.

**Ključne riječi:** *elementarne čestice, standardni model, fermioni, bozoni, nuklearne sile, kvark, gluon, lepton*

## ABSTRACT

In this BSc thesis elementary particles and nuclear forces will be described. As the number of elementary particles increased, so did the need for their division arose, which changed and supplemented with years of research and the performance of experiments. Elementary particles are divided into groups described in the Standard model of particles. Currently, there are 12 elementary particles that make up matter, and by common name they are called fermions and 6 particles of bosons. The force acting between the nucleons (proton and neutron) in the nucleus of an atom is called the nuclear force. It is divided into strong and weak nuclear force. A strong nuclear force represents the interaction between quarks and gluons, and a weak nuclear force between quarks and leptons.

**Key words:** *elementary particles, Standard model, fermions, bosons, nuclear forces, quark, gluon, lepton*

## SADRŽAJ:

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. STANDARDNI MODEL ELEMENTARNIH ČESTICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. OPĆENITO O ČESTICI .....	3
2.2. ANTIČESTICE.....	4
2.3. SPIN.....	5
2.4. ČETIRI TEMELJNE SILE .....	6
2.5. STANDARDNI MODEL .....	7
<b>3. GRADIVNI ELEMENTI MATERIJE.....</b>	<b>10</b>
3.1. FERMIONI .....	11
3.2. LEPTONI .....	12
3.3. KVARK .....	14
3.3.1. Hadroni .....	16
3.3.2. Mezoni .....	18
<b>4. PRIJENOSNICI SILA (BOZONI) .....</b>	<b>20</b>
4.1. W i Z BOZON.....	21
4.2. FOTON.....	21
4.3. GLUON.....	22
<b>5. JAKA I SLABA NUKLEARNA SILA .....</b>	<b>22</b>
5.1. SLABA NUKLEARNA SILA.....	24
5.2. JAKA NUKLEARNA SILA .....	25
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>28</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>30</b>
<b>POPIS SLIKA I TABLICA .....</b>	<b>31</b>

# 1. UVOD

U završnom radu obrađuje se tema nuklearne sile i elementarne čestice. Uradić će se analiza nuklearnih sila i temeljnih (elementarnih) čestica. Opisuje se podjela elementarnih čestica koja se kroz povijest nadopunjavala i mijenjala otkrićem novih čestica i primjenom novih modela istraživanja.

Još u dalekoj povijesti znanstvenici su se pitali koji su to gradivni elementi materije. Ako se kao materijalni predmet uzme npr. kruh i nastavi ga se prepolavljati i dijeliti iznova i iznova, hoće li se ikad doći do temeljnog gradivnog elementa koji se više neće moći podijeliti? Ovim pitanjem znanstvenici i filozofi bavili su se tisućama godina.

Prvim osnovnim elementima smatrali su se voda, zrak, zemlja i vatra. Daljnjim istraživanjima otkriveno je postojanje još manjih gradivnih blokova koji čine svaku materiju, a oni su se nazivali atomi i predstavljali su nedjeljive gradivne elemente. Izvođenjem pokusa koja su se provela u 20. stoljeću znanstvenici su pokazali da se atomi sastoje od još manjih elemenata koje su nazvali protoni, neutroni i elektroni. Teorija da ne postoje manji gradivni elementi od spomenutih pokazala se krivom jer se daljnjim eksperimentima pokazalo da se protoni i neutroni sastoje od još manjih elementarnih (temeljnih) čestica koje se nazivaju kvarkovi. Elektron je ostao elementarna čestica jer nema unutrašnju podstrukturu. Prema tome, može se reći da su elementarne čestice, one čestice koje se ne sastoje od drugih čestica, odnosno ne nemaju dodatnu podstrukturu. Postoji 12 elementarnih čestica koje čine osnovnu materiju 5 baždarnih bozona i jedan skalarni bozon. Prema tome, postoji ukupno 18 elementarnih čestica definiranih Standardnim modelom čestica, a svaka čestica ima i svoju antičesticu. U ovom radu napravit će se analiza elementarnih čestica definiranih Standardnim modelom.

Predmet istraživanja završnog rada su elementarne čestice i nuklearne sile. Analizirat će se njihova podjela i najvažnija svojstva. Opisat će se njihov utjecaj u modernoj fizici i teoriji modela atoma.

Svrha istraživanja rada na spomenutu temu je pokazati i objasniti kako elementarne čestice međusobno koegzistiraju i integriraju te tako tvore druge složene strukture, poput atoma, molekule itd. Bitno je shvatiti da promjenom svojstava odgovarajućih čestica svijet kakav danas znamo ne bi postojao.

Problematika istraživanja završnog rada može se objasniti i kroz samu svrhu istraživanja rada. Složene strukture koje se tvore od elementarnih čestica ovise o njihovih svojstvima. Manipulacijom njihovih svojstava mijenja se i struktura materije.

Završni rad podijeljen je na šest poglavlja.

U prvom uvodnom poglavlju napraviti će se kratak osvrt na temu koja će se analizirati. Iznijet će se predmet, svrha i problematika istraživanja rada i struktura izrade.

U drugom poglavlju opisat će Standardni model čestica. Definirat će se čestica i njena antičestica te osnovna svojstva čestica poput spina, mase i dr. Također opisat će se i četiri elementarne sile i prijenosnici sila.

U trećem poglavlju analizirat će osnovni gradivni elementi materije. Gradivni elementi materije su fermioni odnosno leptoni i kvarkovi. Izvest će se definicije tih čestica, kao i najvažnija svojstva. Opisat će se hadroni koji su kompoziti kvarkova i mezoni.

U četvrtom poglavlju opisat će druga vrsta elementarnih čestica, a to su bozoni koji su prijenosnici sila. Bozoni ne grade materiju i to je bitna razlika između spomenutih i fermiona.

U petom poglavlju opisat će se jaka i slaba nuklearna sila te čestice koje prenose tu silu. Analizirat će se gluoni i kvarkovi i njihova uloga kod jake i slabe nuklearne sile.

U zadnjem, šestom, poglavlju opisat će se što se zaključilo u završnom radu, a nakon toga dostupne su korištene reference te popis slika i tablica.

## 2. STANDARDNI MODEL ELEMENTARNIH ČESTICA

### 2.1. OPĆENITO O ČESTICI

Fizika čestica, također poznata kao fizika visokih energija, područje je prirodne znanosti koje se bavi strukturom materije. Struktura materije najbolje se može opisati elementarnim (temeljnim) česticama i interakcijama koje djeluju među njima kako bi se konstruirala materija kakva danas postoji [7].

Čestica (engl. *particle*) je u fizici definirana kao kvant energije povezan s poljem (engl. *field*). Polje je entitet koji je definiran u prostoru i vremenu te je sposobno stvarati valove u skladu s klasičnom ili kvantnom fizikom kada je pod određenim nabojem. U mikrosvijetu kvanti se promatraju kao čestice, ali zajedno se ponašaju poput valova. Kvant je naziv koji označava objekt koji posjeduje svojstva čestice i vala. Jedan tipičan primjer polja je elektromagnetsko polje koje je stvoreno nabojem i proteže se po cijelom prostoru. Polje je statično kad se naboj koji ga stvara ne miče, ali može se pobuditi vibriranjem izvora polja električnog naboja, a u tom slučaju polje se širi. To je naboj koji zrači elektromagnetski val. Poznato je da kvantna mehanika vuče korijene iz Planckove teorije koja kaže da je zračenje crnih tijela skup kvanta, odnosno fotona [7]. U fizici 19. stoljeća valovi su se mogli prenositi samo nekom vrstom vibracijskog medija, a smatralo se da se elektromagnetski valovi šire u mediju zvanom "eter". Postojanje etera isključeno je pojavom posebne relativnosti, a ljudi su počeli smatrati da vakuum ima svojstvo stvaranja svih vrsti polja, čija se uzbuđenja promatraju kao kvanti ili čestice.

Postoji nekoliko svojstava koja karakteriziraju česticu [7]:

- u klasičnoj fizici čestica se može lokalizirati u prostoru jer se položaj i moment mogu odrediti s velikom preciznošću, na drugu stranu, u kvantnoj mehanici, čestica se opisuje valnom funkcijom koja ovisi o cijelom prostoru i zbog toga se čestica ne može lokalizirati,
- čestica se može stvoriti ili uništiti,
- čestica nije nužno stabilna,
- čestica ima spin (unutrašnju kutnu količinu gibanja čestice) i druge stupnjeve slobode,
- čestica ima odgovarajuću antičesticu i
- čestice čine materiju i prenose silu.



Elementarne čestice mogu se definirati kao čestice koje se ne sastoje od drugih čestica. U fizici čestica, elementarna čestica ili temeljna čestica je čestica čija je podstruktura nepoznata, stoga nije poznato je li sastavljena od drugih čestica. Što se tiče broja elementarni čestica, neke procjene impliciraju da se gotovo sva tvar, osim tamne tvari, javlja u neutrinima, koji čine većinu od približno  $10^{86}$  elementarnih čestica materije koje postoje u vidljivom svemiru. Druge procjene impliciraju da u vidljivom svemiru postoji približno  $10^{97}$  elementarnih čestica (ne uključujući tamnu tvar), uglavnom fotona i drugih prijenosnika sile koji nemaju masu. Veliki broj elementarnih čestica otkriveno je u akceleratorima čestica. Svaka vibracija strune daje drugu elementarnu česticu. U uređaju koji se zove akcelerator čestica, električni nabijene čestice poput protona, elektrona i dr. stalnim ili izmjeničnim električnim poljima ubrzavaju i tako se postižu velike energije. Postignuta energija ovisi o vrsti akceleratora. Akceleratori se upotrebljavaju s ciljem istraživanja strukture tvari, odnosno stvaranju novih elementarnih čestica, otkrivanju novih svojstava čestica, za ispitivanje materijala, u industriji i dr.

U ovom radu opisat će se elementarne čestice opisane u Standardnom modelu čestica koje se dijele na fermione kojih ima 12 i svaka čestica ima svoju pripadajuću antičesticu i na baždarne bozone koji služe kao prijenosnici sila, a prema Standardnom modelu čestica ima ih 5 i jedna čestica koja se zove Higgsov bozon.

Uz očuvani električni naboj čestice, masa i spin su kvantni brojevi. Masa i spin određuju vrstu elementarne čestice. Elektroni i kvarkovi nemaju uočljivu strukturu, odnosno ne mogu se reducirati ili razdvojiti na manje komponente. Zbog toga svojstva nazivaju se elementarnim česticama, imenom koje je u prošlosti pogrešno davano česticama poput protona, koji je zapravo složena čestica koja sadrži po tri para kvarkova. Pojam subatomska čestica odnosi se kako na istinske elementarne čestice, poput kvarkova i elektrona, tako i na veće čestice koje tvore kvarkovi [18].

## 2.2. ANTIČESTICE

Suvremena teorija uzima da svaka čestica ima svoju antičesticu, dakle česticu iste mase, spina i vremena poluraspada, ali suprotnog naboja ili magnetskog momenta. U tom se smislu ponekad popularno govori o materiji i antimateriji. Antičestica može biti identična samoj čestici, kao na primjer u slučaju neutralnoga  $\pi$ -mezona ( $\pi^0$ ), dok se u slučaju neutralnoga kaona čestica i antičestica razlikuju u kvarkovskom okusu (stranosti). Simetrija s obzirom na pozitivan

i negativan naboj opažena je pri gotovo svim elementarnim česticama i jedan je od temeljnih zakona prirode. Zaključeno je da se simetrija naboja mora kombinirati sa zrcaljenjem prostora pa bi tako pozitron bio elektron koji se 'gleda' u zrcala. Elementarne se čestice javljaju uvijek s istim svojstvima. Ali također je neosporno da one nastaju i iščezavaju. Najsitnije čestice nastaju i iščezavaju u naglim kvantnim skokovima, a u međuvremenu pokazuju se jednakima. U svijetu atoma sjedinjuju se osnovne suprotnosti koje su prožimale čitavo gledanje čovjeka na prirodu [10]. Budući da antičestice i čestice imaju isti naboj, tada njihovo uništavanje znači da su naboj i energija očuvane, jer reakcije proizvode energiju i druge čestice. Sve nabijene čestice sa spinom  $1/2$  (elektroni, kvarkovi i dr.) imaju antimaterijske suprotne dijelove suprotnog naboja i pariteta. Čestica i antičestica, kad se spoje, mogu se uništiti, nestati i osloboditi svoju ukupnu masovnu energiju u nekom drugom obliku, najčešće u obliku gama zraka. Antičestice se proizvode prirodno u beta raspadu i u interakciji kozmičkih zraka u Zemljinoj atmosferi. Budući da je naboj očuvan, nije moguće stvoriti antičesticu bez uništavanja čestice istog naboja (kao kod beta raspada) ili stvaranja čestice suprotnog naboja [18].

### 2.3. SPIN

Elementarne čestice imaju svoja unutarnja svojstva. Neka od tih svojstava ista su onima koja se povezuju s makroskopskim objektima, poput mase i naboja, a neka su čisto kvantno-mehanička i nemaju povezanosti s makroskopskim objektima. Spin prema definiciji predstavlja unutarnju kutnu količinu gibanja čestice. Nije povezan niti s jednim rotacijskim unutarnjim dijelovima elementarnih čestica već je svojstven samoj čestici. To je kvantno-mehanički fenomen koji nema povezanosti s klasičnom fizikom. Spin predstavlja bitno svojstvo koje utječe na poredak elektrona, protona i neutrona u atomima i molekulama i zbog toga ima veliki utjecaj i značenje u kemiji i fizici čvrstih tijela. Spin je također ključno svojstvo u svim interakcijama između subatomske čestice, bilo u snopovima čestica visoke energije, tekućinama s niskim temperaturama itd [6].

Mnogi, ako ne i većina fizikalnih procesa, u rasponu od najmanjih nuklearnih ljestvica do najvećih astrofizičkih udaljenosti, uvelike ovise o interakcijama subatomske čestice i njihovih spinova. „Većina čestica sa spinom posjeduje magnetski moment. Taj se magnetski moment može eksperimentalno promatrati prolaskom čestica kroz nehomogeno magnetsko polje [15].“ Vrijednosti spina čestice su kvantizirani i mogu biti cjelobrojni i polucjelobrojni kao što su 0,

$\frac{1}{2}$ , 1,  $\frac{3}{2}$  i 2. Čestice cjelobrojnog spina nazivaju se fermioni (leptoni i kvarkovi), a cijelog spina bozoni [1].

## 2.4. ČETIRI TEMELJNE SILE

U svemiru djeluju četiri temeljne sile, a to su jaka i slaba sila, elektromagnetska sila i gravitacijska sila. Djeluju u različitim rasponima i imaju različite snage. Gravitacija je najslabija, ali ima beskonačan opseg. Elektromagnetska sila također ima beskonačan domet, ali je mnogo jača od gravitacije. Slabe i jake sile dominiraju samo na razini subatomske čestice. Unatoč svom imenu, slaba sila je puno jača od gravitacije, ali je najslabija od ostale tri. Jaka sila, kao što i samo ime govori, najjača je od sve četiri temeljne interakcije [13]. Slaba i jaka sila nazivaju se silama kratkog dometa. Ideja da se sila prenosi česticama bila je revolucionarna i postavila je temelj današnjim baždarnim (engl. *gauge*) teorijama [7]. Tri temeljne sile proizlaze iz sila međudjelovanja čestica koje pripadaju široj skupini koja se naziva bozoni. Čestice materije prenose diskretne količine energije međusobnom izmjenom bozona. Svaka elementarna sila ima svoj odgovarajući bozon. Jaku silu nosi gluon, elektromagnetsku silu nosi foton, a W i Z bozoni odgovorni su za slabu silu. Iako još nije pronađen, graviton bi trebao biti odgovarajuća gravitacijska čestica koja nosi silu [13].

Standardni model sastoji se od elektromagnetske, jake i slabe sile i svih njihovih čestica te dobro objašnjava kako te sile djeluju na sve čestice materije. U tablici je prikazan opisan doseg, relativna jakost i kvant svake od četiri osnovne sile.

**Tablica 1: Četiri osnovne sile [10]**

Sila	Pojava	Doseg	Relativna jakost	Kvant
Jaka sila	Nuklearne sile	$10^{-13}$ cm	$10^{38}$	Gluon
Elektromagnetska	Coulombova sila	Beskonačan	$10^{36}$	Foton
Slaba sila	Beta-radio-aktivnost	$10^{-16}$ cm	$10^{25}$	W i Z bozon
Gravitacijska	Planetarne staze	Beskonačan	1	Graviton

Međutim, najpoznatija sila u našem svakodnevnom životu, gravitacijska, nije dio Standardnog modela. Kvantnu teoriju koja se koristi za opisivanje mikro svijeta i opću teoriju

relativnosti koja se koristi za opisivanje makro svijeta teško je uklopiti u jedan okvir. Nitko nije uspio učiniti da to bude matematički kompatibilno u kontekstu Standardnog modela. No, u fizici čestica, kada je u pitanju minimalna ljestvica čestica, učinak gravitacije toliko je slab da je zanemariv. Samo kada je materija velika, na primjer u mjerilu ljudskog tijela ili planeta, dominira učinak gravitacije. Prema tome, Standardni model i dalje dobro funkcionira usprkos isključivanju jedne od četiri temeljne sile [13].

## 2.5. STANDARDNI MODEL

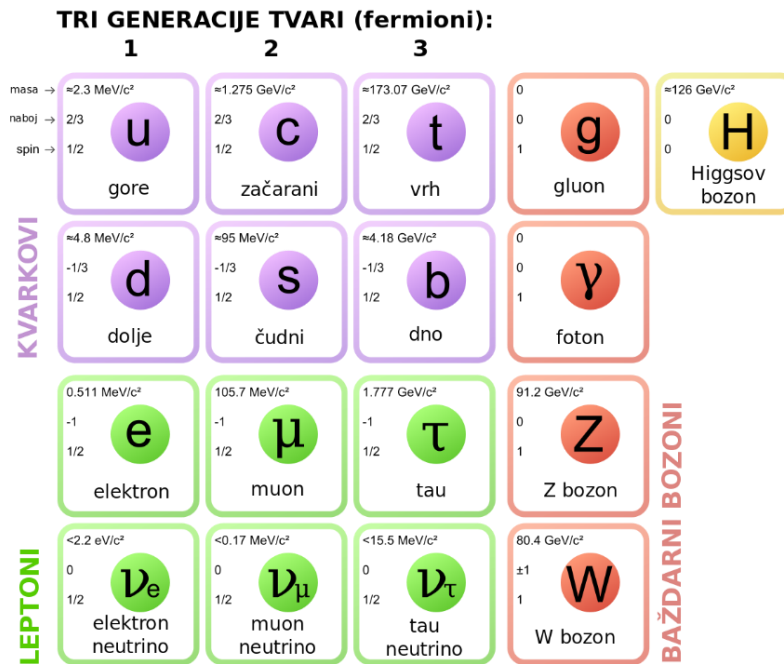
Teorije i otkrića tisuća fizičara od 1930. rezultirali su izvanrednim saznanjima o temeljnoj strukturi materije. Utvrđeno je da je sve u svemiru napravljeno od nekoliko osnovnih gradivnih elemenata nazvanih elementarne (temeljne) čestice, kojima upravljaju četiri temeljne sile. Sve čestice i njihove do danas uočene interakcije mogu se gotovo u potpunosti opisati kvantnom teorijom polja koja se naziva Standardni model [18]. Početkom 1970-ih došlo je do razvoja Standardnog modela koji je uspješno objasnio gotovo sve eksperimentalne rezultate i precizno predvidio širok spektar pojava. „Standardni Model nije model, već matematički precizna teorija gibanja sustava najmanjih djelića materije – elementarnih čestica, čija se predviđanja u potpunosti slažu s rezultatima brojnih eksperimenata s točnošću boljom od jednog promila [1]. „ Tijekom vremena i kroz mnogo izvedenih pokusa, Standardni model se etablirao kao dobro provjerena teorija fizike [13].

Standardni model vrlo je stabilan i može objasniti sve pojave u mikrosvijetu čestica na jednostavan i jedinstven način. Prošlo je više od pedeset godina od uspostavljanja Standardnog modela, a do tad se pojavio samo jedan fenomen koji nadilazi Standardni model. Neutrinsko osciliranje u kojem se neutrino jedne vrsti transformira u neutrino druge vrsti dok se širi, ne događa se ako masa neutrina nestane, kao što se pretpostavlja u Standardnom modelu. Standardni model je pouzdan do te mjere da nije lako osmisliti eksperiment s trenutno dostupnim akceleratorima koji bi mogli ozbiljno osporiti teoriju Standardnog modela [7].

Na slici 1. prikazan je Standardni model 12 elementarnih čestica i 6 bozona. Leptoni i kvarkovi predstavljaju 12 elementarnih čestica i zajedničkim imenom zovu se fermioni koji se dalje dijele na leptone i kvarkove, a karakterizira ih njihov spin. Bozoni najčešće predstavljaju prijenosnike međudjelovanja i često se nazivaju baždarne (engl. *gauge*) čestice kojih prema

Standardnom modelu ima 5. Model se sastoji i od jednog skalarnog bozona koji se naziva Higgsov bozon. Ukupno ima 18 elementarnih čestica i svaka čestica ima svoju antičesticu.

Broj elementarnih čestica je jako velik, a s obzirom da su sve čestice nastale različitim vibracijama strune, većina ih je nestabilna pa ih se iz toga razloga ne spominje u Standardnom modelu čestica kao temeljne čestice.



**Slika 1: Standardni model elementarnih čestica [14]**

Velika postignuća koja su ostvarena Standardnim modelom dovela su do boljeg razumijevanja interakcija elementarnih čestica. Prema tome, može se postaviti nekoliko temeljnih značajki o česticama [1]:

- razumijevanje svojstava slabih i jakih interakcija koje je dovelo to veće točnosti u proračunima svojstava jezgre atoma,
- teorijsko predviđanje postojanja i proračun svojstava W i Z baždarnih (*gauge*) bozona i t-kvarka,
- koncept spontanog narušavanja simetrije i Higgsov mehanizam generiranja mase čestica,
- spajanje elektromagnetskih i slabih interakcija u jednu interakciju koja je opisana elektroslabom teorijom i

- proračun stanja cjelokupne materije u ranom svemiru koja daje bolje razumijevanje evolucije svemira zajedno uz teoriju relativnosti.

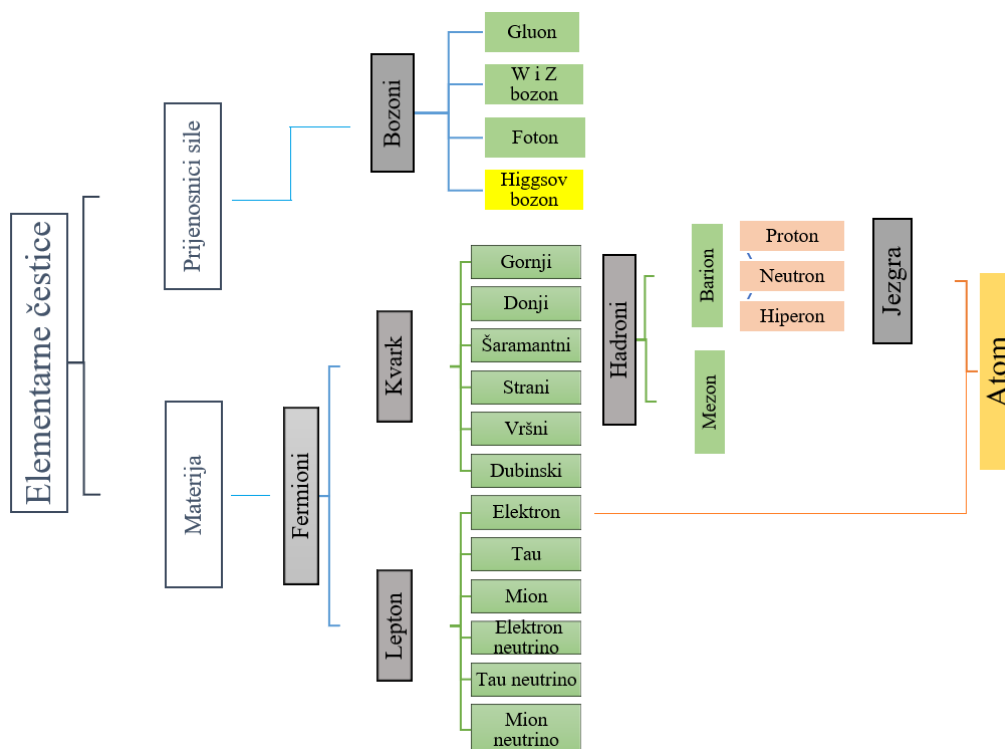
Danas se smatra da su sve četiri osnovne interakcije među elementarnim česticama: jaka, elektromagnetska, slaba i gravitacijska (poredane po jakosti), upravo baždarne interakcije čiji su medijatori odgovarajući baždarni bozoni [1].

Elementarne čestice te njihova međudjelovanja (elektroslaba i jaka) opisane su standardnom teorijom čestica i sila. Opis se teorijski temelji na renormalizabilnosti odnosno svojstvu uklonjivosti beskonačnosti pri izračunu kvantnih petlji. Jedina poznata baždarna teorija renormalizabilnosti 1960-ih bila je kvantna elektrodinamika. Dokazom da su Yang-Millsove teorije, odnosno baždarne teorije sa samointerakcijom renormalizabilne te da isto vrijedi i ako je baždarna simetrija spontano slomljena omogućen je daljnji razvoj i buduća postignuća teorije. Elektromagnetski i jaki procesi objedinjeni su elektroslabom teorijom. Uz elektroslabu teoriju, standardna teorija čestica i sila uključuje i opis jake sile s pomoću baždarne simetrije. Jaki dio sile i elektroslabi dvije su odvojene sastavnice standardne teorije. Zajedničko tim sastavnicama je da se oslanjaju na relativističku teoriju polja i na dodatni princip Yang-Millsove lokalne simetrije. Deset godina poslije oko 1970-ih spoznalo se da su slaba i elektromagnetska međudjelovanja opisana  $SU(2) \times U(1)$  Yang-Millsovom teorijom. Nedugo nakon, spoznalo se i da se temeljno jako međudjelovanje kvarkova i gluona može svesti na  $SU(3)$  Yang-Millsovu teoriju boje. Utvrđena renormalizabilnost omogućuje precizne proračune koji su izloženi eksperimentalnim provjerama [15].

### 3. GRADIVNI ELEMENTI MATERIJE

Sva je materija oko nas sačinjena od elementarnih čestica, osnovnih gradivnih elemenata materije. „Elementarne čestice su realni kvantni objekti koji se u svim eksperimentima ponašaju kao materijalne točke, bez ikakve unutarnje strukture i bez dimenzija. Ako i imaju dimenzije različite od nule, one su manje od  $10^{-18}$  m [1].“

Na slici 2. radi boljeg razumijevanja prikazana je detaljna podjela svih čestica od osnovnih elementarnih čestica opisanih Standardnim modelom pa sve do složenih struktura sačinjenih od tih čestica. Atom se sastoji od jezgre (protona i neutrona) i elektrona. Elektron nema dodatnu podstrukturu i zato je elementarna čestica. Nadalje, pokušima se otkrilo da svaki neutron također ima određenu podstrukturu, odnosno u sebi sadrže kvarkove. Daljnim razbijanjem čestica shvatilo se da je kvark elementarna čestica. Hadron je kompozit kvarka i zato nije elementarna čestica, a isti se dijeli na mezon i barion koji se dalje dijeli na već poznati proton, neutron, hiperon i dr. Elementarne čestice se mogu podijeliti na one koje grade materiju i na prijenosnike sila (engl. *force carriers*). Čestice koje grade materiju zajedničkim imenom zovu se fermioni, a one će biti predmet istraživanja u ovom poglavlju.



Slika 2: Klasifikacija elementarnih čestica [izrada autora]

### 3.1. FERMIONI

Čestice standardnog modela mogu se podijeliti u dvije skupine, a to su fermioni i prijenosnici sila, odnosno bozoni. Fermioni su čestice koje grade materiju, a sastoje se od 12 elementarnih čestica koje se dijele u dvije grupe, a to su:

- kvarkovi i
- leptoni.

Dakle, fermioni uključuju sve kvarkove i leptone, kao i bilo koje kompozitne čestice izrađene od neparnog broja kvarkova ili leptona, kao što su svi barioni i mnogi atomi i jezgre. Fermioni se razlikuju od bozona koji su prema Bose-Einsteinovoj statistici. Fermion može biti elementarna čestica, poput elektrona ili kompozitna čestica, poput protona [18].

Čestice sa spinom  $1/2$  spadaju u grupu fermiona zbog toga što se ponašaju prema Fermie-Dirac statistici, a čestice sa spinom 0 ili 1 zovu se bozoni jer se na njih mora primijeniti Boseova statistika [10]. Jedna skupina vrši jaku silu, a druga ne. Prvi se nazivaju hadronima, a drugi leptonima (engl. *leptons*). Hadroni s polucjelobrojnim spinom nazivaju se barioni i uključuju protone, neutrone i druge teže čestice poput njih. Oni s cjelobrojnim spinom nazivaju se mezoni i uključuju  $\pi$ ,  $\rho$ , K i dr. Svi hadroni su kompoziti kvarkova (engl. *quarks*) koji imaju spin  $1/2$ , ali se ne mogu izolirati [7]. Hadron obzirom da je kompozit kvarka ne ubraja se u elementarnu česticu.

Svaka skupina sastoji se od šest čestica koje su povezane u parovima ili generacijama što je vidljivo u tablici 2. Najlakše i najstabilnije čestice čine prvu generaciju, dok teže i manje stabilne čestice pripadaju drugoj i trećoj generaciji. Sva stabilna materija u svemiru napravljena je od čestica koje pripadaju prvoj generaciji, a sve teže čestice brzo se raspadaju do stabilnijih [13].

Sastavne čestice materije, kao što je spomenuto, čini šest vrsti kvarkova i leptona koji se razlikuju po "okusu". Djeluju u paru u slaboj interakciji i dalje su podijeljeni u tri generacije [7]. Šest kvarkova upareno je u tri generacije. Prvu generaciju čini gornji kvark i donji kvark, drugu generaciju čine šarmantni kvark i čudni kvark, a posljednju, treću, generaciju čine zatim vršni i dubinski kvark. Šest leptona slično su raspoređeni u tri generacije. Elektron i elektronski neutrino su prva generacija, mion i mionski neutrino druga generacija i tau i tau neutrino treća



generacija. Elektron, mion i tau imaju električni naboj i veliku masu, dok su neutrini električki neutralni i imaju vrlo malu masu [13].

**Tablica 2: Tri generacije čestica [13]**

Tip	Generacija čestica		
	Prva	Druga	Treća
<b>Kvarkovi</b>			
<b>gornji tip</b>	gornji	šarmantni	vršni
<b>donji tip</b>	donji	strani	dubinski
<b>Leptoni</b>			
<b>pod nabojem</b>	elektron	mion	tau
<b>neutralni</b>	elektronski neutrino	mionski neutrino	tau neutrino

Poznata materija u svemiru nastaje uglavnom od čestica prve generacije. Drugi se generiraju u visokoenergetskim fenomenima ili postoje u ekstremnim uvjetima, poput unutrašnjosti neutronske zvijezde [7].

Na tablici 3. prikazana je masa kvarkova i leptona. Redak „a“ predstavlja trenutnu masu koja se određuje dinamičkim procesima poput raspršenja. Promatrane  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  su smjese masenih svojstvenih stanja  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ . U retku „c“ za neutrine, jedino promjena mase je poznata  $\Delta m_{ij}^2 = |m_i^2 - m_j^2|$ . Pretpostavlja se  $m_3 \gg m_2 \gg m_1$ . Napomena da je  $\text{MeV} = 10^6 \text{eV}$  i  $\text{GeV} = 10^9 \text{eV}$ .

**Tablica 3: Masa kvarkova i leptona [7]**

Kvark	u	d	s	c	b	t
<b>a</b>	$\approx 3 \text{ MeV}$	$\approx 5 \text{ MeV}$	$\approx 104 \text{ MeV}$	$\approx 1.27 \text{ GeV}$	$\approx 4.2 \text{ GeV}$	$171 \text{ GeV}$
<b>Lepton</b>	$\nu_1^b$	$\nu_2^b$	$\nu_3^b$	e	$\mu$	$\tau$
<b>c</b>	?	$\approx 0.009 \text{ eV}$	$\approx 0.05 \text{ eV}$	$0.511 \text{ MeV}$	$105.7 \text{ MeV}$	$1777 \text{ MeV}$

### 3.2. LEPTONI

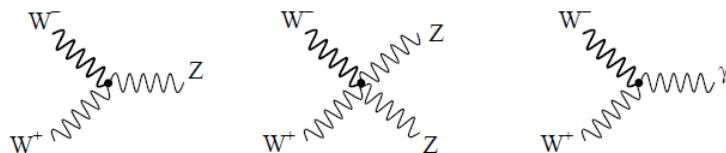
Leptoni su dobili ime od grčke riječi leptós što znači sitan, tanak. Prvi identificirani lepton bio je elektron, otkriven 1897. godine. Elektron (e) je najjednostavniji od šest leptona. Postoje dva teža leptona koja se nazivaju mion (m) i tau ( $\tau$ ). Obje čestice su nestabilne i raspadaju se do jednostavnijih, stabilnijih čestica i imaju svoje antičestice [18]. Precizno, leptoni su fermioni

koji nemaju jakih interakcija jer nemaju kromodinamički (engl. *Quantum chromodynamics* - QCD) naboj. Na leptone utječu samo elektromagnetska sila, slaba sila i gravitacijska sila [17]. Postoji šest leptona (ili leptonskih okusa) koji se u Standardnom modelu čestica grupiraju u tri grupe (generacije). Elektron ( $e$ ), mion ( $\mu$ ), i tau ( $\tau$ ) imaju naboje  $-e$ , i svaki ima svoj neutrino  $\nu_i$  koji nema električnog naboja. Tablica 4. prikazuje svojstva samo nekih od šest osnovnih leptona. Prikazani su naboji i mase čestica.

**Tablica 4: Svojstva nekoliko najvažnijih leptona (fermiona) [10]**

Vrst	Naboj	Masa ( $\text{GeV}/c^2$ )
Neutrino ( $\nu$ )	0	0 (ili blizu 0)
Elektron ( $e$ )	$+, -1$	$5,1 \times 10^{-4}$
Mion	$+, -1$	0,106

Zbog toga što nemaju električni naboj, neutrini ne integriraju s fotonima. U ovoj aproksimaciji nema procesa koji bi pretvarali jedan lepton u drugi. Zbog toga bi svih šest leptona bilo stabilno – nijedan se ne bi raspadao [1]. U Standardnom modelu i u prirodi leptoni imaju i dodatnu slabu interakciju, koja na niskim energijama izgleda puno slabija od elektromagnetske i koja povezuje leptone iz iste generacije. Medijatori slabih interakcija su tri baždarena bozona  $W^\pm$  i  $Z$  koji kao i foton imaju spin 1, ali za razliku od fotona imaju masu i slabe samointerakcije. Postojanje samointerakcija medijatora slabih interakcija znači da u Standardnom modelu postoji putanja (verteksi) interakcija samih  $W^\pm$  i  $Z$  bozona. Neki od njih prikazani su na slici 3. Slabi  $W^\pm$  baždarni bozoni imaju električni naboj, pa imaju i elektromagnetske interakcije, odnosno, vežu se s fotonom, kao što je prikazano zadnjom putanjom na slici 3. Može se zaključiti postojanje elektroslabih interakcija između medijatora slabih i elektromagnetskih interakcija u Standardnom modelu [1].



**Slika 3: Verteksi interakcija baždarnih bozona [1]**

Prema zakonu očuvanja naboja najlakši nabijeni lepton zahtjeva da elektron bude stabilna čestica, dok su mion i tau nestabilne čestice.

### 3.3. KVARK

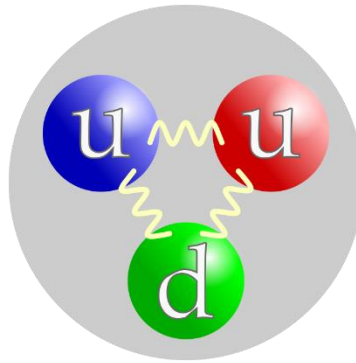
Nukleoni i pioni dugo su se smatrali elementarnim česticama. Trebalo je preko 30 godina pokušaja i pogrešaka da bi se shvatilo da su to kompoziti građeni od kvarkova. Kvarkovi su elementarne čestice koje se kombiniraju kako bi stvorile kompozitne čestice koje se zovu hadroni. Kvarkovi su fermioni koji uz električni imaju i kromodinamički naboj koji se zove boja (engl. *color*) [1]. Zbog postojanja električnog naboja, kvarkovi imaju elektromagnetske interakcije, a zbog kromodinamičkog boja imaju jake interakcije. Kvantna elektrodinamika (engl. *Quantum Electrodynamics* – QED) objašnjava teoriju elektromagnetskih interakcija. QED je najjednostavnija dinamička teorija i ostali modeli modelirani su prema njoj [12]. Srodno tome, kvantna kromodinamika (QCD) objašnjava teoriju jakih interakcija. U tablici 5. dana su najvažnija svojstva kvarkova.

**Tablica 5: Svojstva nekoliko najvažnijih kvarkova (fermiona) [10]**

Vrsta	Naboj	Masa ( $\text{GeV}/c^2$ )
Gornji (u)	$2/3$	$4 \times 10^{-3}$
Donji (d)	$-1/3$	$7 \times 10^{-3}$
Šarmantni (c)	$2/3$	1,5
Strani (s)	$-1/3$	0,15
Vršni (t)	$2/3$	veća od 41
Dubinski (b)	$-1/3$	4,7

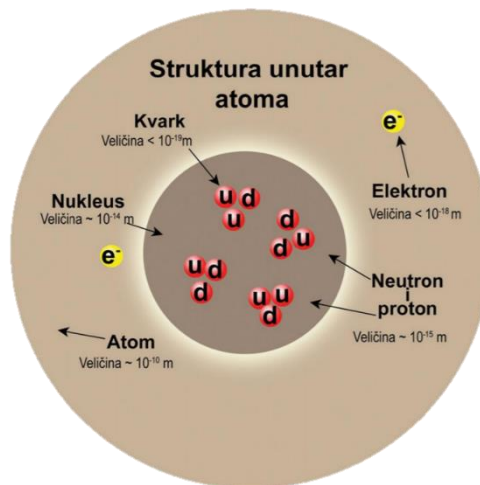
Prema prvim ustanovljenim hipotezama i danas utvrđenoj teoriji Standardnog modela prema kojoj leptoni i kvarkovi grade materiju ustanovljeno je da svaki barion (proton ili neutron) sastavljen od tri kvarka koji se mogu predočiti istostranim trokutom, slika 4. Budući da daju ukupan električki naboj +1, 0 ili -1, kvarkovi moraju imati električni naboj  $2/3$  i  $1/3$ , pozitivan i negativan. Tako da prema Standardnom modelu svaki kvark ima spin  $1/2$ . Pokusima koji su provedeni u CERN-u u Ženevi učvršćena je hipoteza o kvarkovima. Prema tome, proton je sastavljen od tri kvarka s nabojima  $+2/3$ ,  $+2/3$  i  $-1/3$  (u elektronskim jedinicima), tako da mu je ukupan naboj  $+e$ . Neutron je sastavljen od tri kvarka s nabojima  $+2/3$ ,  $-1/3$  i  $-1/3$ , tako da se ukupan naboj poništava. Ti kvarkovi čine strukturu protona ili neutrona, dok se oko njih prostire oblak mezona [10]. Kao što je rečeno, postoji šest vrsti kvarkova, a od njih se sastavljaju gluoni i kvanti jake sile (nuklearne). Slika 4. prikazuje kvarkovu strukturu protona. U protonu se nalaze

dva gornja kvarka i jedan donji kvark. Jaku nuklearnu silu posreduju gluoni (valovitost na slici). Jaka sila ima tri vrste naboja: crveni, zeleni i plavi.



**Slika 4: Struktura protona sastavljena od tri kvarka [16]**

Na slici 5. prikazana je šira slika, odnosno struktura atoma. U sredini je prikazana jezgra (nukleus) atoma, a u jezgri neutroni i protoni koji su označeni crvenom bojom, unutar protona i neutrona nalaze se tri kvarka. Oko jezgre atoma kruže elektroni.



**Slika 5: Struktura atoma [18]**

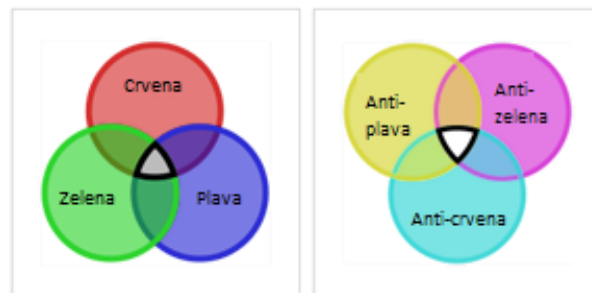
Između kvarkova djeluju sile kojima su medijatori (nosioci) nazvani gluoni. Gluon nema naboja, masa mu iščezava, a spin je jednak 1, što se vidi dobro iz slike 4. gdje je jaka nuklearna sila sklopčana s gluonom.

Jake interakcije, tj. razmjena obojanih gluona, vezuju kvarkove u tri para koji se nazivaju barioni, a najvažniji su proton i neutron [1]. Obzirom da svaka čestica ima svoju antičesticu, prema tome i kvark ima antikvark, česticu iste mase i spina, ali drugačijeg električnog naboja.

Antikvark se označava tako što se stavi crtica iznad oznake npr.  $\bar{u}_c$  i to je čestica spina  $\frac{1}{2}$ , električnog naboja  $-\frac{2}{3}e$ , barionskog broja  $-\frac{1}{3}$  i boje suprotne od crvene (anticrvene). Čestice koje su vezana stanja kvark i antikvark nazivaju se mezoni [1].

Kvarkovi prve generacije su najlakši i najstabilniji, težina kvarkova raste, a stabilnost opada u drugoj i trećoj generaciji. Svaki kvark ima svoju boju i kombiniraju se na takav način da tvore bezbojne predmete [17]. Zbog kromodinamičkog naboja kvarkovi dolaze u tri različite boje prema modelu „boja“. Pojam boja nema nikakve veze s bojama svakodnevnog svijeta, već predstavlja posebno kvantno svojstvo kvarkova. Kvarkovima se pripisuju crvena, zelena i plava boja, a antikarkovima njihove suprotnosti, anticrvena, antizelena i antiplava [18].

U barionu su svakome od tri kvarkova pridružene tri različite boje, a to su crvena, zelena i plava, a kvarku i antikvarku u mezonu su pridružene boja i antiboja, slika 6. Kvarkovima se pripisuju crvena, zelena i plava boja, a antikvarkovima njihove suprotnosti, anticrvena, antizelena i antiplava [18]. U modelu boja koristila se činjenica da zdravo ljudsko oko može razlikovati tri osnovne boje: crvenu, plavu i zelenu. Prema tome, svakom kvarku dodijeljen je 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 [5].



**Slika 6: Boje kvarka i antikvarka [5]**

### 3.3.1. Hadroni

Hadroni su subatomske kompozitne čestice koje se sastoje od 2 ili više kvarkova. Te kvarkove drže zajedno bozoni. Eksperimenti su otkrili velik broj hadrona od kojih je samo proton stabilna čestica. Zapravo, čak i ako proton nije apsolutno stabilan, eksperimenti pokazuju da je njegov životni vijek duži od  $10^{32}$  godina. Suprotno tome, jedan neutron, bez sila koje djeluju unutar jezgre, živi u prosjeku gotovo 15 minuta prije raspada. Stabilni hadroni

obično se raspadaju pomoću slabe sile. U nekim slučajevima elektromagnetskom silom, što rezultira nešto kraćim životnim vijekom, jer je elektromagnetska sila jača od slabe.

Međutim, vrlo kratkotrajni hadroni, kojih postoji 200 ili više, raspadaju se jakom silom. Ta je sila toliko jaka da omogućava česticama da žive vrlo malo, odnosno čestice se raspadaju gotovo čim se stvore. Te vrlo kratkotrajne čestice nazivaju se "rezonantnim", jer se promatraju kao rezonantni fenomen, suviše su kratkog vijeka da bi ih se moglo promatrati na bilo koji drugi način [18].

Hadroni, bilo da su stabilni ili rezonantni, mogu se podijeliti u dvije grupe: barione i mezone. Izvorno su se nazivi odnosili na relativne mase dviju skupina čestica. Barioni (od grčke riječi težak) uključivali su proton, neutron i teže čestice, a mezoni (od grčke riječi između) bile su čestice s masama između elektrona i protona. Danas se naziv barion odnosi na bilo koju česticu izgrađenu iz tri kvarka kao što je proton i neutron. Mezoni su, pak, čestice građene od kvarka u kombinaciji s antikvarkom.

U tablici 6. prikazana su najvažnija svojstva čestica hadrona. Dvije skupine hadrona također se međusobno razlikuju po barionskom broju. Barioni su okarakterizirani brojem bariona,  $B = 1$ , a antibarioni imaju barionski broj  $-1$ , a barionski broj mezona je  $0$ . Barionski brojevi su aditivni, pa sukladno tome, atom koji sadrži jedan proton i jedan neutron (svaki s barionskim brojem  $1$ ) ima barionski broj  $2$  [18].

**Tablica 6: Svojstva najvažnijih hadrona (fermioni) [10]**

Vrst	Naboj	Masa ( $\text{GeV}/c^2$ )	Sastav kvarkova
Proton (P)	+1	0,938	u u d
Antiproton ( $\bar{P}$ )	-1	0,938	$\bar{u} \bar{u} \bar{d}$
Neutron (N)	0	0,939	u d d
Lambda	0	1,116	u d s

### 3.3.2. Mezoni

Postavlja se pitanje što drži jezgru na okupu? Očito je da to ne mogu biti električne sile. Mora postojati neka druga, snažnija, sila koja veže protone (i neutrone) zajedno. Fizičari su to jednostavno nazvali jaka sila. Ako u prirodi postoji tako jaka sila, zašto se ne primijeti u svakodnevnom životu? Činjenica je da je gotovo svaka sila koja se izravno doživljava, od kontrakcije mišića do eksplozije dinamita, elektromagnetskog porijekla. Jedina je iznimka gravitacijska sila. Odgovor je, iako je snažna, jaka sila je vrlo kratkog dometa. Prva značajna teorija jake sile predložena je 1934. Pretpostavljeno je da proton i neutron privlače jedno drugo nekakvim poljem, baš kao što je elektron privučen u jezgru električnim poljem, a Mjesec za Zemlju gravitacijskim poljem. Polje bi zatim trebalo pravilno kvantizirati. Postavlja se pitanje koja su to svojstva kvanta, odnosno čestice koja bi mogla opisati značajke jake sile? Obzirom da je masa čestice mase između mase elektrona i protona, čestica je postala poznata kao mezon (srednja težina). Prema tome, elektron se naziva lepton (lagana težina), dok su proton i neutron barioni (teški) [5].

Daljnja su mjerenja pokazala da su ti mezoni oko 200 puta teži od elektrona. U magnetskom polju savijaju se u oba smjera, pa im električni naboj može biti pozitivan ili negativan. S obzirom na električni naboj, postoji dakle i kod tih srednjih čestica potpuna ravnopravnost. Otkriće novih elementarnih čestica bio je najljepši uspjeh ispitivanja kozmičkih zraka. Prema Standardnom modelu mezoni se sastoje od parnog broja kvarkova i antikvarkova, a svi do sada poznati samo od jednog para kvark-antikvark tako da se dobiva naboj 0 ili 1 ili -1.

Mezoni su teški pa ih atomske jezgre ne mogu tako lako zakočiti kao lagane elektrone i pozitrone. Zbog toga, mezoni vrlo rijetko emitiraju kvantne svjetlosti. Oni gube tek malo energije kad prolazi kroz materiju, a i izvanredno su prodorni. Mezoni mogu prodrijeti kroz olovo debelo više od metra, a isto tako mogu sići i u morske dubine. Oni su tvrda komponenta kozmičkih zraka [10].

Budući da se mezoni nisu opažali kao sastavne čestice zemaljske materije, bila bi prva misao da dolaze iz svemira. Međutim, mezoni nastaju naletom kozmičkog zračenja na atmosferu. Iako mezoni prodiru kroz debele ploče olova, ipak se gube na dugom putu kroz atmosferu, koja je vrlo rijetka i ne predstavlja toliko mnogo debele materije kao ploče olova.

Kočeci se na atomskim jezgrama i emitirajući kvante svjetlosti, mezoni vrlo brzo potroše svoju energiju i apsorbiraju se već u visokim slojevima atmosfere [10].

Došlo je do zaključka da mezoni nisu stabilne čestice, nego se raspadaju na elektrone i pozitrone, a raspadanje se događa samo od sebe, u vakuumu, bez utjecaja drugih čestica. Na dugim putovima u atmosferi mezoni se gube, a nastaju nove lake čestice [10]. Zbog svoje nestabilnosti mezoni ne mogu biti prvobitne čestice kozmičkog zračenja. Oni nastaju kad kozmičke zrake, pretežno izvanredno brzi protoni, nalete na najviše, već prilično guste slojeve atmosfere. Kasnije je otkriveno da u kozmičkim zrakama postoje zapravo dvije čestice srednje težine, koje se nazivaju  $\pi$  (pion) i  $\mu$  (muon), odnosno pi-mezon i mi-mezon [5]. Nuklearnu silu između protona i neutrona prenosi baš mezon – kvant nuklearne sile [8].

Na slici 7. prikazano je nekoliko poznatih mezona. Vidi se jedan kaon pozitivni mezon ( $K^+$  mezon) i tri pion (pi) mezona, pozitivni, negativni i bez električnog naboja.



**Slika 7: Par kvark-antikvark (pi-mezon i K mezon) [2]**

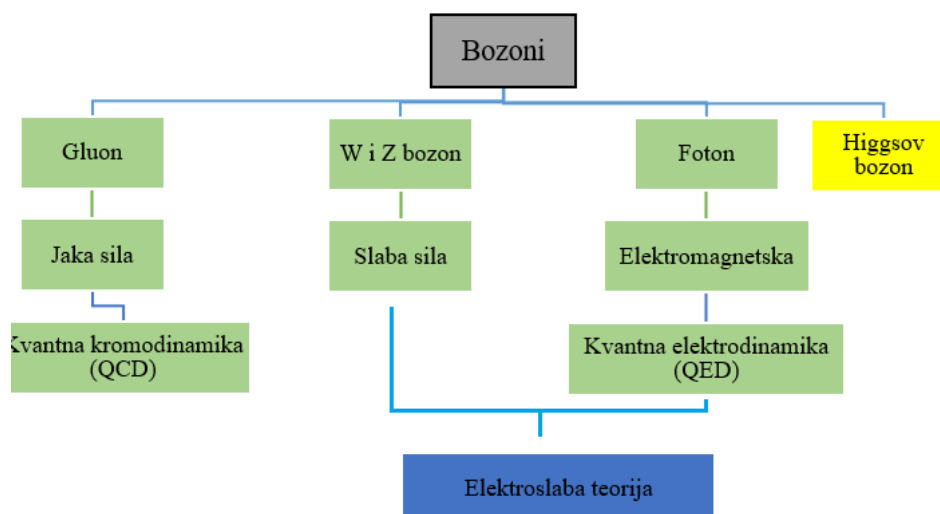


## 4. PRIJENOSNICI SILA (BOZONI)

Bozoni su čestice koje su ključne u kvantnoj fizici jer prenose energiju i stoga se nazivaju prijenosnicima sile. Izmjena ovih čestica rezultira trima osnovnim prirodnim silama. Svaki put kad se silom prenosi bozon, prenosi se i diskretna količina energije, odnosno sile se javljaju kad dvije čestice razmijene bozon ili izmjene česticu. Ime bozon osmislio je Paul Dirac kao spomen na doprinos rada indijskog fizičara Satyendre Nath Bosea u razvoju s Einsteinom na Bose-Einsteinovoj statistici koja teoretizira karakteristike elementarnih čestica. Važna karakteristika bozona je da njihova statistika ne ograničava broj koji može zauzeti isto kvantno stanje. Ovo svojstvo je prikazano u heliju-4 kada se ohladi i postane supertekućina. Suprotno tome, dva fermiona ne mogu zauzeti isti kvantni prostor. Dok su elementarne čestice koje čine materiju (leptoni i kvarkovi) fermioni, elementarni bozoni su nositelji sile koji funkcioniraju kao ‘ljepilo’ koje drži tvar zajedno [18].

Postoji ukupno 6 elementarnih bozona. Mogu se podijeliti na baždarne bozone i skalarne bozone. U grupu baždarnih bozona spadaju gluon, foton,  $W^\pm$  bozon i Z bozon. Skalarni bozon ima samo jednog predstavnika, a to je Higgsov bozon. Svaki je bozon povezan s određenom temeljnom silom (slika 8.), pa je tako [17]:

- gluon odgovoran za jaku silu,
- foton utječe na elektromagnetsku silu,
- W i Z bozoni posreduju u slaboj sili i
- Higgsovi bozoni daju masu ostalim česticama pomoću Higgsovog mehanizma.



Slika 8: Struktura bozona i odgovarajućih sila [Izrada autora]

Bozoni slijede Bose-Einsteinovu statistiku i zbog toga, za razliku od fermiona, ne grade materiju. Jednostavno značenje poštivanja Bose-Einsteinove statistike jest da dva bozona mogu istovremeno zauzimati isto mjesto. Bozoni imaju cjelobrojni spin. Na primjer, dobro poznati bozon foton ima spin 1. Ovisno o spinu i statistici, hadroni, jezgre i atomi mogu postati složeni bozoni. Čestica koja sadrži paran broj fermiona postaje bozon. Na primjer, mezon je bozon jer sadrži jedan kvark i jedan antikvark. U tablici 7. prikazane su najznačajnije razlike između fermiona i bozona.

**Tablica 7: Razlike između fermiona i bozona [17]**

<b>Fermioni</b>	<b>Bozoni</b>
Fermi-Diracova statistika	Bose-Einstein statistika
Temeljne čestice materije	Prijenosnici sile
Polucjelobrojni spin	Cijelobrojni spin (0 ili 1)
Kompozitni fermioni imaju neparan broj nukleona (najmanje 3)	Kompozitni bozoni imaju paran broj nukleona (najmanje 2)

#### **4.1. W i Z BOZON**

W i Z bozoni (zajedno poznati kao slabi bozoni ili međuvektorski bozoni) su čestice koje posreduju u slaboj interakciji. W bozoni imaju pozitivno i negativno električki nabijeno stanje, u negativnom su čestice, a u pozitivnom antičestice. Z bozon je električki neutralan i on je svoja vlastita antičestica. Sve tri čestice vrlo su kratkog trajanja. W i Z bozon gotovo su 100 puta masivniji od protona pa čak i od cijelih atoma željeza. Mase ovih bozona značajne su jer djeluju kao prijenosnici sile vrlo kratkog dometa. Njihove velike mase zbog toga ograničavaju domet slabe sile. Suprotno tome, elektromagnetska sila ima beskonačno područje jer njezin prijenosnik sile, foton nema masu. Sva tri bozona imaju spin čestica 1. W i Z bozoni su prijenosnici sile koji posreduju slabu silu, jednako kao što je foton čestica nositelj elektromagnetske sile [18]. Činjenica da W i Z bozoni imaju masu dok su fotoni bez mase bila je glavna prepreka u razvoju elektroslabe teorije.

#### **4.2. FOTON**

Foton je elementarna čestica, kvant svjetlosti i svi drugi oblici elektromagnetskog zračenja i prijenosnik elektromagnetske sile, čak i kad je statičan putem virtualnih fotona. Fotoni su električki neutralni i mogu prodrijeti u materiju na udaljenosti prije same interakcije s atomima.

Učinci ove sile lako su uočljivi i na mikroskopskoj i na makroskopskoj razini, jer foton nema masu mirovanja, a to omogućuje interakcije na velike udaljenosti. Kao i sve elementarne čestice, fotoni se trenutno najbolje objašnjavaju kvantnom mehanikom pokazujući svojstva valova i čestica. Na primjer, jedan foton može se prelomiti lećom ili pokazivati interferenciju valova sa sobom, ali također djelovati kao čestica koja daje određeni rezultat kada se mjeri njegov položaj. Fotoni se emitiraju u mnogim prirodnim procesima. Na primjer, kada se naboj ubrzava emitira se sinkrotronsko zračenje. Tijekom molekularnog, atomskog ili nuklearnog prijelaza na nižu razinu energije emitirat će se fotoni različite energije, od radio valova do gama zraka [18].

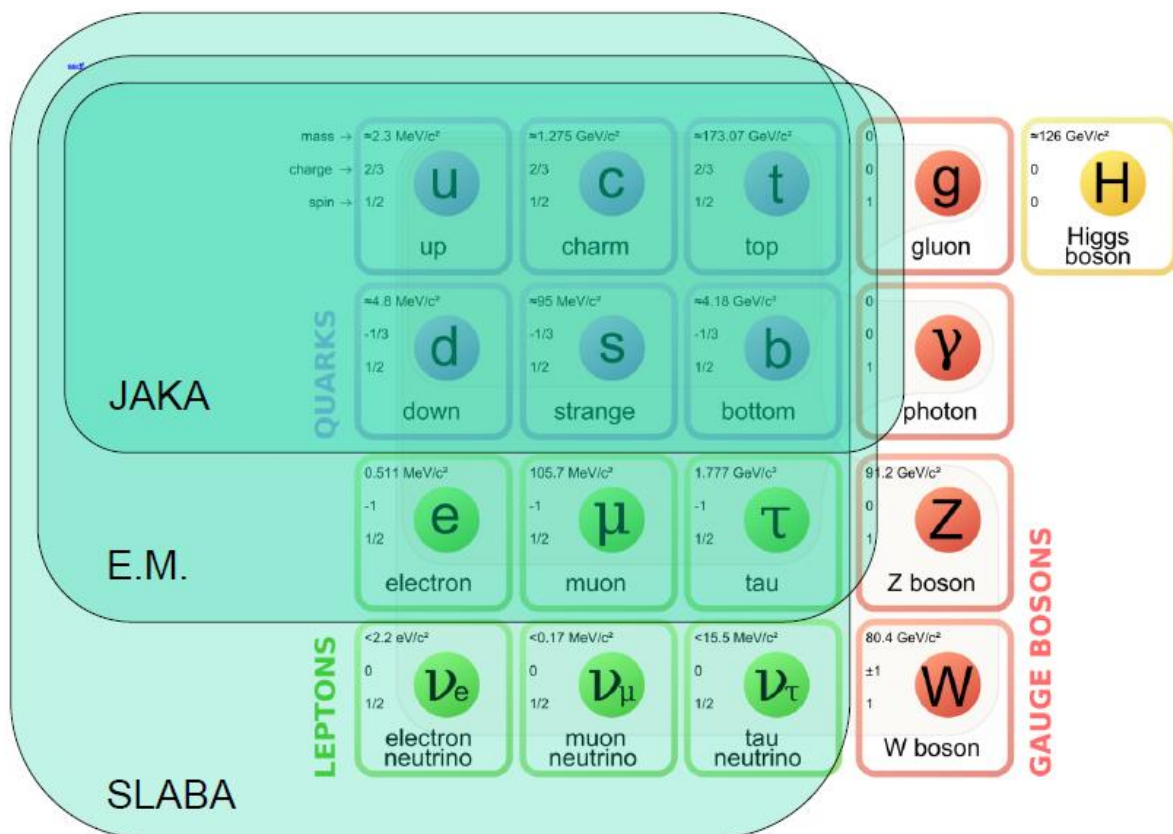
### **4.3. GLUON**

Gluoni su elementarne čestice koje djeluju kao čestice izmjene (ili baždarni bozoni) jake sile između kvarkova, analogno izmjeni fotona u elektromagnetskoj sili između dvije nabijene čestice. U tehničkom smislu, gluoni su vektori s baždarnim bozonima koji posreduju u jakim interakcijama kvarkova u kvantnoj kromodinamici (QCD). Gluoni sami nose naboj boje jake interakcije. Po tome se razlikuju od fotona koji posreduje u elektromagnetskoj interakciji, ali mu nedostaje električnog naboja. Gluoni stoga sudjeluju u jakoj interakciji, osim što je posreduju, što čini QCD znatno težim za analizu od QED (kvantna elektrodinamika). Za razliku od pojedinačnog fotona ili tri W i Z bozona slabe interakcije, u QCD postoji osam neovisnih vrsta gluona [18].

## **5. JAKA I SLABA NUKLEARNA SILA**

Definirano je da postoje četiri temeljne sile, a to su gravitacijska, elektromagnetska, jaka i slaba (nuklearna) sila. Jaka i slaba nuklearna sila djeluju samo na subatomske razini, odnosno subnuklearnoj. Jaka sila povezuje kvarkove unutar protona, neutrona i drugih subatomskih čestica. Umjesto da je elektromagnetska sila u konačnici odgovorna za zadržavanje raspadnute tvari na okupu, ipak jaka sila drži protone i neutrone zajedno u atomskim jezgrama. Za razliku od jake sile koja djeluje samo između kvarkova, slaba djeluje i na kvarkove i na leptone. Ta je sila odgovorna za beta raspad neutrona u proton i za nuklearne reakcije koje pokreću Sunce i druge zvijezde [18]. Slaba i jaka sila nazivaju se silama kratkog dometa [4].

Od 1930. fizičari su prepoznali da mogu koristiti teoriju polja za opisivanje interakcija sve četiri temeljne sile s materijom. U matematičkom smislu polje se opisuje kao nešto što je varijabilno kroz prostor i vrijeme. Poznati primjer je polje koje okružuje komad magnetiziranog željeza. Magnetsko polje prikazuje način na koji sila varira u snazi i smjeru oko magneta. Prema tome, odgovarajuća polja za četiri osnovne sile imaju važno zajedničko svojstvo, a to je da sva pokazuju mjernu simetriju. Pojednostavljeno, to znači da se mogu napraviti određene promjene koje ne utječu na osnovnu strukturu polja. To također implicira da su relevantni fizikalni zakoni jednaki u različitim regijama prostora i vremena. Na subatomske, kvantnoj, razini ove teorije polja pokazuju značajna svojstva. Opisuju svaku temeljnu silu kao da je u određenom smislu nose vlastite subatomske čestice, a to su prijenosnici sila odnosno baždarni bozoni, koji su izvor sila između fermiona [2]. Na slici 9. prikazane su elementarne čestice Standardnog modela i interakcije (sile) koje djeluju među tim česticama.



Slika 9: Čestice Standardnog modela i njihove interakcije [2]

## 5.1. SLABA NUKLEARNA SILA

Od četiri temeljne sile, slaba sila je najzagonetnija. Dok ostale tri sile djeluju kroz mehanizme privlačenja (engl. *pull*) i odbijanja (engl. *push*), slaba sila odgovorna je za transmutacije mijenjajući jedan element u drugi i postepene pomake između mase i energije na nuklearnoj razini. Jednostavno rečeno, slaba sila je način na koji priroda traži stabilnost. Stabilnost na nuklearnoj razini omogućuje stvaranje elemenata koji čine sve poznate stvari na svijetu. Bez stabilizacijskog djelovanja slabe sile, materijalni svijet, uključujući fizička tijela, ne bi postojao. Slaba sila odgovorna je za radioaktivno raspadanje teških (radioaktivnih) elemenata u njihove lakše, stabilnije oblike. Ali slaba sila djeluje i pri stvaranju najlakših elemenata poput vodika i helija i svih elemenata između njih. Slaba sila odgovorna je i za radioaktivni raspad i za nuklearnu fuziju subatomske čestice [18]. Slabe interakcije se odvijaju putem izmjene teškog bozona [2].

Od 1930. fizičari su postali svjesni da postoji sila unutar atomske jezgre koja je odgovorna za određene vrste radioaktivnosti koje su zajedno klasificirane kao beta raspad. Tipičan primjer beta raspada događa se kada se neutron transformira u proton. Sila koja je u osnovi ovog procesa poznata je slaba sila koja je razlikuje od jake sile koja povezuje kvarkove [5].

Teorija baždarnog polja za slabu silu uključuje kvantnu teoriju polja elektromagnetizma (kvantna elektrodinamika) i naziva se elektroslaba teorija. Slabu silu i elektromagnetsku silu tretira na jednakoj osnovi promatrajući ih kao različite manifestacije temeljnije elektroslabe sile. Za elektroslabu teoriju potrebna su četiri baždarna bozona. Jedan od njih je foton, a ostala tri su uključena u reakcije koje se javljaju pomoću slabe sile. Ti slabi baždarni bozoni uključuju dvije izvedbe s električnim nabojem  $W^+$  i  $W^-$  gdje + i - znak označavaju naboj. Postoji i neutralni  $W^0$  bozon.

Slaba sila između dva protona u jezgri iznosi samo  $10^{-7}$  snage elektromagnetske sile. Slaba nuklearna sila postaje značajno jača kako se povećavaju energije čestice. Kad energije dosegnu 100 GeV ili više, otprilike energija ekvivalentna masi  $W$  i  $Z$  čestice, snaga slabe sile postaje usporediva s jačinom elektromagnetske sile. To znači da reakcije koje uključuju izmjenu  $Z^0$  bozona postaju uobičajene kao i one u kojima se izmjenjuje foton [18].

## 5.2. JAKA NUKLEARNA SILA

Jaka sila poznata i kao jaka nuklearna sila opravdano nosi takvo ime. Jaka sila je najjača od četiri temeljne sile. Jaka sila drži kvarkove zajedno kako bi stvorili protone i neutrone, a povezivanjem kvarkova dobivaju se hadroni, kompoziti kvarkova. U povijesti je jaka sila prvi put otkrivena kao nuklearna sila koja veže protone i neutrone [7]. No, kako je utvrđeno da su sastavni dijelovi kvarkova, nuklearna sila prepoznata je kao vrsta molekularne sile koja se može izvesti iz elementarne sile. U 1935. otkriveno je postojanje  $\pi$  mezona kao nosioca nuklearne sile.

Jaka sila posreduje s gluonom, a spomenuto je već, da nosi takvo ime jer se u određenom smislu ponaša kao ljepilo jer druge čestice drži na okupu. Jaka sila postoji samo unutar atoma ili čestice i gotovo istog trenutka opada izvan jezgre. Jaka sila posredovana gluonima dolazi iz teorije kvantne kromodinamike koja ne uključuje samo različite okuse kvarkova već i svaki kvark određene boje. Boje su uvedene kako bi se objasnila privlačna sila unutar jezgre gdje se samo s kombinacijom 3 različita obojena kvarka mogu stvoriti barioni (protoni, neutroni, itd.), a također su povezane s antikvarkovima antiboje. To je privlačna sila između boja i antiboja u kojoj se može odvijati jaka sila. Iako je najjača od svih temeljnih sila, jaka sila isto poput slabe sile kratkog je dometa i neučinkovita je izvan nuklearne udaljenosti od oko  $10^{-15}$  metara ili više. Međutim, unutar jezgre, odnosno unutar protona i drugih čestica koje su izgrađene od kvarkova, jaka sila je najjača. Između kvarkova u protonu, može biti gotovo 100 puta jača od elektromagnetske sile, ovisno o udaljenosti između kvarkova [18].

Krajem 20. stoljeća fizičari su razvili teoriju jake sile koja je po strukturi slična kvantnoj elektrodinamici. U toj teoriji kvarkovi su međusobno povezani unutar protona i neutrona izmjenom baždarnih bozona koji se nazivaju gluoni. Kvarkovi imaju svojstvo zvano "boja" koje je analogno električnom naboju. Baš kao što električno nabijene čestice doživljavaju elektromagnetsku silu i izmjenjuju fotone, tako i čestice nabijene bojom osjećaju jaku silu i izmjenjuju gluone. Iz ovog svojstva boje dijelom proizlazi i naziv teorije jake sile, odnosno kvantna kromodinamika. Gluoni su bez mase i imaju spin 1. U tom su pogledu slični fotonima, ali se od fotona razlikuju na jedan bitan način. Dok fotoni međusobno ne djeluju jer nisu električno nabijeni, gluoni nose naboj u boji. To znači da gluoni mogu međusobno komunicirati, što ima važan učinak u ograničavanju raspona gluona i u ograničavanju kvarkova unutar protona i drugih čestica [18].

Jaka sila djeluje na takav način da se kvarkovi različite boje međusobno privlače, pa prema tome crvena privlači zelenu, plava crvenu, itd. Kvarkovi iste boje odbijaju jedni druge. Kvarkovi se mogu kombinirati samo na načine koji daju naboj jednak nuli. U česticama koje sadrže tri kvarka, poput protona, to se postiže dodavanjem crvene, plave i zelene boje. Razlika je uočena u česticama koje se nazivaju mezoni, odnosno spajanje kvarka s antikvarkom iste osnovne boje. U ovom slučaju boja kvarka i antiboja antikvarka međusobno se poništavaju.

Ove kombinacije tri kvarka (ili tri antikvarka) ili parova kvark i antikvark jedine su kombinacije koje jaka sila dopušta. Ograničenje da se u prirodi mogu pojaviti samo bezbojni predmeti ograničava pokušaje promatranja pojedinačnih kvarkova i slobodnih gluona. Iako kvark može zračiti pravim gluonom baš kao što elektron može zračiti pravim fotonom, gluon nikada sam ne izlazi u okolno okruženje. Umjesto toga, stvara dodatne gluone, kvarkove i antikvarkove iz vlastite energije i materijalizira se kao normalne čestice izgrađene od kvarkova. Slično tome, čini se da jaka sila zadržava kvarkove trajno zatvorene unutar većih čestica. Pokušaji izbacivanja kvarkova iz protona pri visokim energijama uspijevaju samo u stvaranju više čestica, odnosno u oslobađanju novih kvarkova i antikvarkova koji su povezani i koji su sami ograničeni jakom silom.

Dakle, poznato je da jaka sila povezuje kvarkove jer kvarkovi imaju naboj u boji. Ali to još uvijek ne objašnjava što jezgru drži na okupu, jer se pozitivni protoni odbijaju jedni s drugima elektromagnetskom silom, a protoni i neutroni su neutralni u boji. Jaka sila između kvarkova u jednom protonu i kvarkova u drugom protonu dovoljno je jaka da prevlada odbojnu elektromagnetsku silu. To se naziva rezidualna jaka interakcija i to je ono što "lijepi" jezgru. Rezidualni učinak jake sile naziva se nuklearna sila. Rezultirajuće nuklearne sile koje su odgovorne za nuklearno vezanje su rezidualne sile boje, slično kao i van der Waalove sile između neutralnih molekula [3]. Nuklearna sila djeluje između hadrona, poput mezona ili nukleona u atomskim jezgrama. „Rezidualna jaka sila između stabilnih neobojanih hadrona – nukleona, je nuklearna sila koja vezuje protone i neutrone u atomsku jezgru [1].“ Ova "rezidualna jaka sila", djelujući neizravno, prenosi gluone koji čine dio virtualnih pi i rho mezona, koji zauzvrat prenose nuklearnu silu između nukleona. Rezidualna jaka sila je tako manji ostatak jake sile koja kvarkove povezuje u protone i neutrone. Vezanje neutrona i protona u atomskoj jezgri rezidualnom jakom silom daje nuklearnu energiju vezanja koja se obično oslobađa u nuklearnoj fisiji.

Neovisnost o naboju nuklearnih sila zahtijeva postojanje  $\pi^0$  mezona, kao što je slučaj kod iste vrste nukleona (p-p) ili (N-N). Nuklearna sila zahtijeva isti spin i isti kutni moment gibanja. Pozitivni pioni nisu u stanju savladati nuklearnu kolumbovu barijeru i zato podliježu spontanom propadanju dok su negativni pioni uhvaćeni jezgrom. Razmjena piona jednaka je razmjeni naboja. Nukleoni razmjenjuju svoj prostor i spin koordinate [6].

Jaka sila djeluje na udaljenostima manjim od 1 fm ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ) i između ostalog, veže kvarkove u hadrone. Kvantna kromodinamika je teorija jake sile koja se izmjenjuje putem gluona. Ti gluoni nose očuvani naboj u boji (crveni, zeleni, plavi) i nemaju električnog naboja. Gluoni međusobno djeluju spajanjem naboja kvarkova ili drugih gluona, a dvije interakcije najnižeg reda su kvark, rasipanje kvarkova i interakcija nultog raspona. Te interakcije nemaju nikakve povezanosti s teorijom kvantne elektrodinamike ili QED-a, pa se tako svojstva jake interakcije znatno razlikuju od elektromagnetskih svojstava.

**Tablica 8: Podjela elementarnih čestica [izrada autora]**

Podjela elementarnih čestica							
<b>BOZONI</b>		Z bozon	$W^\pm$ bozon	Foton	Gluon	Higgsov bozon	
<b>FERMIONI</b>	<b>Leptoni</b>	Elektron	Mion	Tau	Elektron neutrino	Mion neutrino	Tau neutrino
	<b>Kvarkovi</b>	Gornji	Donji	Vršni	Dubinski	Šarmantni	Strani



## 6. ZAKLJUČAK

U završnom radu analizirala se tema nuklearne sile i elementarne čestice. Na temelju prezentiranih saznanja i provedenog istraživanja doneseni su zaključci koji su prezentirani u nastavku.

Konačna struktura materije najbolje se može opisati elementarnim (temeljnim) česticama i interakcijama koje djeluju među njima kako bi se konstruirala materija kakva danas postoji. Elementarne čestice mogu se definirati kao čestice koje se ne sastoje od drugih čestica, odnosno nemaju uočljivu strukturu, odnosno ne mogu se reducirati ili razdvojiti na manje komponente. Svaka čestica ima svoju antičesticu, česticu iste mase, spina i vremena poluraspada, ali suprotnog naboja ili magnetskog momenta. Standardnim modelom opisana je podjela elementarnih čestica. Model je vrlo je stabilan i može objasniti sve pojave u mikrosvijetu čestica na jednostavan i jedinstven način. Sastoji se od 12 elementarnih čestica, zajedničkim imenom fermioni koji se dijele u dvije grupe: leptoni i kvarkovi i od 5 prijenosnika sila koji se nazivaju baždarni bozoni i Higgsov bozon. Zajedno tako prema Standardnom modelu čestica postoji 18 elementarnih čestica i svaka čestica ima svoju antičesticu pa ih je ukupno 36.

Postoje četiri temeljne sile koje se prenose česticama. Jaka, slaba, elektromagnetska i gravitacijska sila. Rade u različitim rasponima i imaju različite snage. Slabe i jake sile dominiraju samo na razini subatomskih čestica. Slaba sila je puno jača od gravitacije, ali je najslabija od ostale tri. Jaka sila, kao što i samo ime govori, najjača je od sve četiri temeljne interakcije. Slabe i jake sile dominiraju samo na razini subatomskih čestica. Standardni model ne obuhvaća gravitacijsku silu.

Fermioni su čestice koje grade materiju. Čestice sa spinom  $1/2$  spadaju u grupu fermiona zbog toga što se ponašaju prema Fermie-Diracovoj statistici. Svaka skupina sastoji se od šest čestica koje su povezane u parovima ili generacijama. Prvi identificirani lepton bio je elektron. Elektron je najjednostavniji od šest leptona. Leptoni su fermioni koji nemaju jakih interakcija. Na leptone utječu samo elektromagnetska sila, slaba sila i gravitacijska sila. Elektron, mion i tau ( $\tau$ ) imaju naboje  $-e$ , i svaki ima svoj neutrino  $\nu_i$  koji nema električnog naboja. Kvarkovi su fermioni koji uz električni imaju i kromodinamički naboj. Zbog postojanja električnog naboja, kvarkovi imaju elektromagnetske interakcije, a zbog kromodinamičkog imaju jake interakcije. Svaki kvark ima spin  $1/2$ . Između kvarkova djeluju sile kojima su medijatori

(nosioci) nazvani gluoni. Svaki kvark ima svoju boju i kombiniraju se na takav način da tvore bezbojne predmete. Hadroni su subatomske kompozitne čestice koje se sastoje od 2 ili više kvarkova. Te kvarkove drže zajedno bozoni. Hadroni, bilo da su stabilni ili rezonantni, mogu se podijeliti u dvije grupe na barione i mezone. Barioni uključuju proton, neutron i teže čestice, a mezoni su čestice s masama između elektrona i protona. Mezoni su čestice građene u paru kvarka – antikvark.

Bozoni su čestice koje prenose energiju i stoga se nazivaju prijenosnicima sile. Svaki put kad se silom prenosi bozon, prenosi se i diskretna količina energije. Postoji ukupno 5 elementarnih bozona. Mogu se podijeliti na baždarne bozone i skalarne bozone. U grupu baždarnih bozona spadaju gluon, foton, W i Z bozon. Skalarni bozon ima samo jednog predstavnika, Higgsov bozon koji daje masu drugim česticama. Gluon je odgovoran za jaku silu, foton utječe na elektromagnetsku silu, a W i Z bozoni posreduju u slaboj sili. Bozoni slijede Bose-Einsteinovu statistiku i zbog toga, za razliku od fermiona, ne grade materiju. Bozoni su izvor sila između fermiona.

Slaba i jaka sila nazivaju se silama kratkog dometa. Slaba sila odgovorna je za transmutacije mijenjajući jedan element u drugi i postepene pomake između mase i energije na nuklearnoj razini. Stabilnost na nuklearnoj razini omogućuje stvaranje elemenata koji čine sve poznate stvari na svijetu. Bez stabilizacijskog djelovanja slabe sile, materijalni svijet, uključujući fizička tijela, ne bi postojao. Slaba sila odgovorna je i za radioaktivni raspad i za nuklearnu fuziju subatomske čestice. Slabe interakcije se odvijaju putem izmjene teškog bozona. Jaka sila postoji samo unutar atoma ili čestice i opada izvan jezgre. Jaka sila posredovana gluonima dolazi iz teorije kvantne kromodinamike. Boje su uvedene kako bi se objasnila privlačna sila unutar jezgre gdje se samo s kombinacijom 3 različita obojena kvarka mogu stvoriti barioni. Gluoni nose naboj u boji i mogu međusobno komunicirati, što ima važan učinak u ograničavanju raspona gluona i u ograničavanju kvarkova unutar protona i drugih čestica. Jaka sila djeluje na takav način da se kvarkovi različite boje međusobno privlače, pa prema tome crvena privlači zelenu, plava crvenu itd. Rezidualni učinak jake sile je nuklearna sila. Rezultirajuće nuklearne sile koje su odgovorne za nuklearno vezanje su rezidualne sile boje. Nuklearna sila djeluje između hadrona, poput mezona ili nukleona u atomskim jezgrama. Nuklearna sila djeluje između hadrona, poput mezona ili nukleona u atomskim jezgrama.

## LITERATURA

- [1] Antunović, Ž.: *Standardni model: Fizika elementarnih čestica*, Split
- [2] Brigljević, V.: *Uvod u fiziku elementarnih čestica*, Croatian Teachers Programme, CERN, 2018.
- [3] Epelbaum, E., Hamer, H., & Meissner, U.: *Modern Theory of Nuclear Forces*, Review of Modern Physics , 81(4), 51., 2008.
- [4] Gasiorowicz, S. : *Elementary Particles in Physics*, New York, Wiley, 1967.
- [5] Griffiths, D.: *Introduction to Elementary Particles*, Portland, Wiley, 1986.
- [6] Uddin, K.: *Nuclear force*, India, 2015.
- [7] Nagashima, Y.: *Elementary Particle Physics: Volume 1: Quantum Field Theory and Particles*, Osaka, Wiley, 2009.
- [8] Petković, T.: *Boškovićevo djelo u filozofiji prirode u razvoju moderne fizike čestica*, *Filozofska istraživanja*, Vol. 32 No. 2, 343-360, 2012.
- [9] Reucroft, S., & Hughes Williams, E.: *The Structure and Properties of Elementary Particles*, Rawmarsh: CERN, 2019.
- [10] Supek, I.: *Povijest fizike*, Školska knjiga, Zagreb, 1980.
- [11] Veselinović, S.: *Elementarne čestice*, Sveučilište u Osijeku, Osijek, 2014.
- [12] Tarek, F.: *Introduction to History of Elementary Particles and their Dynamics*, Helwan University, 2019.
- [13] Elementarne čestice i temeljna međudjelovanja:  
<https://mapmf.pmfst.unist.hr/~agicz/Pred2017ModPhys13.pdf>, (6.2.2020.)
- [14] The Standard Model:  
<https://home.cern/science/physics/standard-model>, (8.2.2020.)
- [15] Elementarne čestice:  
[https://hr.wikipedia.org/wiki/Elementarna\\_%C4%8Destica](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elementarna_%C4%8Destica) (9.2.2020)
- [16] Spin:  
<http://electron6.phys.utk.edu/phys250/modules/module%203/spin.html> (11.2.2020)
- [17] Team SY: *Standard Model of Particle Physics – Explained*,  
<https://studiouslyours.com/standard-model-of-particle-physics>, (13.2.2020)
- [18] The Atom (2014),  
<https://drrajivdesaimd.com/2014/07/26/the-atom/>, (14.2.2020)

## POPIS SLIKA I TABLICA

### Popis slika:

Slika 1: Standardni model elementarnih čestica [14].....	8
Slika 2: Klasifikacija elementarnih čestica [izrada autora] .....	10
Slika 3: Verteksi interakcija baždarnih bozona [1] .....	13
Slika 4: Struktura protona sastavljena od tri kvarka [16].....	15
Slika 5: Struktura atoma [18] .....	15
Slika 6: Boje kvarka i antikvarka [5].....	16
Slika 7: Par kvark-antikvark (pi-mezon i K mezon) [2].....	19
Slika 8: Struktura bozona i odgovarajućih sila [Izrada autora] .....	20
Slika 9: Čestice Standardnog modela i njihove interakcije [2] .....	23

### Popis tablica:

Tablica 1: Četiri osnovne sile [10] .....	6
Tablica 2: Tri generacije čestica [13] .....	12
Tablica 3: Masa kvarkova i leptona [7].....	12
Tablica 4: Svojstva nekoliko najvažnijih leptona (fermiona) [10].....	13
Tablica 5: Svojstva nekoliko najvažnijih kvarkova (fermiona) [10].....	14
Tablica 6: Svojstva najvažnijih hadrona (fermioni) [10] .....	17
Tablica 7: Razlike između fermiona i bozona [17] .....	21
Tablica 8: Podjela elementarnih čestica [izrada autora].....	27