

12. SUBATOMSKE ČESTICE

„Da sam hteo da pamtim imena svih čestica bio bih botaničar.”

Enriko Fermi

Pored elektrona, protona i neutrona kao (materijalnih) čestica i fotona kao osnovnog kvanta energije, u proteklih sto godina otkriveno je na stotine drugih čestica. Dugo se verovalo da su nove čestice elementarne, tj. da se ne mogu razložiti na prostije sastojke, ali se vremenom pokazalo da je najveći broj čestica složen. Uprkos tome, naziv elementarne čestice zadržao se, sada u novom, proširenom značenju. Isto tako, drugi uobičajeni naziv, subatomske čestice, izveden iz činjenice da su nove čestice manje od atoma, strogo uzevši, nije ispravan, jer mase nekih čestica višestruko prevazilaze mase lakših hemijskih elemenata. Nazivi elementarne ili subatomske čestice zadržali su se do današnjih dana kao sinonimi za čestice bez obzira na njihovu složenost i masu.

12.1 ISTORIJSKI OSVRT

Elektron je prva elementarna čestica otkrivena pre više od 100 godina. Kako je već detaljno opisano u drugom poglavlju, Dž. Dž. Tomson je 1897. godine u eksperimentima sa katodnim zracima odredio naelektrisanje i masu elektrona. Usledila su, zatim, otkrića α -čestice (Raderford, 1899), protona (Radarford, 1919), i neutrona (Čedvik, 1931). Tako su početkom tridesetih godina bili poznati osnovni sastojci materije, elektroni, protoni i neutroni. Međutim, mnoga pitanja su i dalje ostala bez odgovora: kakva je priroda jakih sila koje drže nukleone u jezgru? Kako to da je spektar elektrona prilikom β -raspada kontinualan? Postoje li antičestice koje predviđa Dirakova teorija? Svaka od ovih misterija na kraju je razrešena otkrićem još jedne nove čestice.

Da bi objasnio kontinualni spektar elektrona pri β -raspadu Pauli je pretpostavio postojanje neutralne čestice, neutrina, koja je ubrzo i eksperimentalno otkrivena. Anderson otkriva pozitron već 1932. godine, a otprilike u isto vreme Jukava predviđa postojanje nove čestice, piona, kao prenosioca sile među nukleonima u jezgru. Zaista, 1937. godine u kosmičkim zracima pronađena je čestica s osobinama koje je predvideo Jukava, ali se nakon deset godina ispostavilo da je ta nova čestica mion. Jukavin pion eksperimentalno je otkriven tek 1947. godine.

Posle pronalaska piona usledila su otkrića mezona K^+ , π^0 , K^0 , kao i hiperona Λ^0 . Razvoj akceleratora u ranim pedesetim godinama doveo je do „populacione eksplozije” čestica. U to doba pronađeni su barioni Δ , Σ^\pm , Ξ^- , Σ^0 , Ξ^0 , kao i antiproton i antineutron... U ranim šezdesetim godinama otkriveno je još mnoštvo mezona (ρ , ω , η , K^* , ϕ , f , a_2 , i η') uz još više bariona. Do danas je eksperimentalno opaženo preko 150 čestica.

Takvo mnoštvo čestica predstavljalo je pravu moru za istraživače (vest o otkriću mezona Rabi je prokomentarisao pitanjem „Ko je to poručio?”) što je podstaklo potragu za dubljom vezom među njima. Kao kruna tih napora pojavio se model kvarka (koji su nezavisno predložili Gel-Man i Cvajg, 1964. godine) na kojem se zasniva „standardni model”. Standardni model je u saglasnosti sa svim do sada izvedenim eksperimentima.

Opažene čestice mogu se svrstati u dve osnovne klase – materijalne čestice i bozone polja. Materijalne čestice, se dele na leptone, mezone i barione, Tabela 12.1.1.

Tabela 12.1.1 Familije čestica

Familija		Struktura	Interakcije	Spin	Primeri
Leptoni		Osnovna	Slaba, el. mag. (EM)	Poluceo	e, ν
Mezoni	Hadroni	Složena	Slaba, EM, jaka	Celobrojni	π, K
Barioni		Složena	Slaba, EM, jaka	Poluceo	p, n
Bozoni polja		Osnovna	Slaba, EM, jaka	Celobrojni	γ, W, Z

Leptoni su čestice slične elektronu, imaju spin $1/2$ i ne podležu delovanju jake sile. Postoje tri naelektrisana leptona, elektron, mion i tau lepton i tri odgovarajuća neutralna leptona–neutrino, elektronski, mionski i tau neutrino.

Mezoni i barioni (zajedničko ime–hadroni) učestvuju u jakim interakcijama. Međusobno se razlikuju po tome što mezoni imaju celobrojni spinski kvantni broj (0, 1, ...) dok je spinski kvantni broj bariona poluceo ($1/2$, $3/2$, ...). Najpoznatiji barioni su proton i neutron; svi ostali barioni su kratkoživeći. Najpoznatiji mezon je pion (π -mezon); njegovo srednje vreme života je $2,6 \times 10^{-8}$ s, dok se svi ostali mezoni raspadaju znatno brže.

Najveći broj detektovanih čestica (preko 150) su hadroni (mezoni i barioni). Situaciju pre formulacije standardnog modela najbolje odslikava Fermijev stav citiran u podnaslovu ovog poglavlja. Standardnim modelom je u velikoj meri razjašnjena situacija. Prema tom medelu, hadroni se sastoje od kvarkova, čestica sa spinskim kvantnim brojem $1/2$. U sastav mezona ulaze kvark i antikvark, dok su barioni sastavljeni od tri kvarka. Prema standardnom modelu postoji samo 12 elementarnih čestica koje su svrstane u tri „generacije”, Tabela 12.1.2. Prvu generaciju čine u-kvark, d-kvark, elektron i elektronski neutrino. Ove čestice sačinjavaju celokupnu materiju koja nas okružuje. Drugu generaciju čine c-kvark, s-kvark, mion i mionski neutrino, a treću, t-kvark, b-kvark, tauon i tau neutrino. Svaka od 12 elementarnih čestica ima odgovarajuću antičesticu.

Prema kvantnoj teoriji polja, čestice intereaguju razmenom bozona polja, koji su, takođe, čestice. Najpoznatiji bozon polja je foton koji je nosilac elektromagnetne interakcije. Postoji još i osam gluona pomoću kojih se ostvaruje jaka interakcija, dok

slabu interakciju prenose bozoni polja W^+ , W^- i Z^0 . Relativni odnosi među česticama prikazani su u Tabeli 12.1.2.

Tabela 12.1.2 Osnovne osobine i veza među česticama po standardnom modelu

Osnovne čestice materije				
Naelektrisanje	1. generacija	2. generacija	3. generacija	
leptoni				
-1	elektron (e)	mion (μ)	tauon (τ)	plus antičestice
0	el. neutrino (ν _e)	μ neutrino (ν _μ)	τ neutrino (ν _τ)	
kvarkovi				
2/3	u-kvark	c-kvark	t-kvark	plus antičestice
-1/3	d-kvark	s-kvark	b-kvark	
bozoni polja				sila
0	foton			elektromagnetna
0	gluoni (8)			jaka sila
+1, -1	W ⁺ , W ⁻			slaba sila
0	Z ⁰			slaba sila

12.2 OSNOVNE SILE

Da bi se razumele osobine čestica, treba znati sile koje deluju među njima. Sve poznate interakcije mogu se opisati preko delovanja četiri osnovne sile: **gravitacione, nuklearne slabe, elektromagnetne i nuklearne jake sile**. Pošto se silama mogu pridružiti odgovarajuća polja, u literaturi se zavisno od konteksta, sreću nazivi osnovne sile (gravitaciona, slaba, elektromagnetna i jaka), osnovne interakcije (gravitaciona, slaba, elektromagnetna i jaka) ili osnovna polja (gravitaciono, slabo, elektromagnetno i jako).

Čestice međusobno mogu delovati jedna na drugu, izazivajući raspad ili reakciju, preko bilo koje od osnovnih sila. Tabela 12.2.1 pokazuje kojim silama čestice mogu delovati jedna na drugu. Sve čestice intereaguju gravitacionim i slabim silama. Manji deo intereaguje elektromagnetnom silom (recimo, neutrina su isključena iz elektromagnetne interakcije), a još manji broj čestica intereaguje jakom silom. Da bi jedna sila delovala između čestica, svaka čestica pojedinačno mora biti podložna delovanju te sile. Na primer, proton učestvuje u jakoj interakciji, ali proton i elektron nikada ne intereaguje jakom silom. Elektron ne oseća jaku silu i sa protonom može da intereaguje samo delovanjem elektromagnetne ili slabe sile.

12.2.1 Gravitaciona sila

Mada je izuzetno važna u svakodnevnom životu, gravitaciona sila među subatomske čestice je zanemarljivo mala. Na primer, gravitaciona sila među protonima koji se u jezgri dodiruju je 10^{-38} deo jake sile koja deluje među njima. Glavna razlika između gravitacione i ostalih sila je kumulativno dejstvo i neograničeni domet gravitacije. Jaka i slaba nuklearna sila ne deluju van dimenzija nukleona, 10^{-15}

m. Elektromagnetna sila nema kumulativno dejstvo, zbog zaklanjanja pozitivnog naelektrisanja negativnim, mada je neograničenog dometa poput gravitacione. Pošto takvog zaklanjanja nema, gravitaciona sila raste sa porastom broja čestica i za masivne objekte (nebeska tela) i makroskopska rastojanja postaje preovlađujuća.

12.2.2 Slaba sila

Slaba sila izaziva β -raspad i druge slične raspade subatomske čestice. Nema značajnu ulogu u izgradnji atomskog jezgra. Slaba sila među protonima koji se dodiruju je 10^{-7} deo jake sile među njima i ima domet kraći od 10^{-18} m. Vrlo brzo opada sa rastojanjem. Kako se vidi iz Tabele 12.2.1 sa porastom rastojanja za manje od dva reda veličine (sa 1×10^{-18} m na 30×10^{-18} m) slaba sila opada za četiri reda veličine (sa $0,8$ na 10^{-4}). Mada joj je domet znatno manji od dimenzija nukleona, slaba sila je važna za razumevanje osobina osnovnih čestica i nastanka i razvoja svemira.

Tabela 12.2.1 Osobine osnovnih interakcija

Interakcija	Gravitaciona	Slaba Elektroslaba	El. magnetna naelektrisanje	Jaka Osnovna Rezidualna
Deluje na:	masu-energiju			boja
Čestice na koje deluje	sve	sve	naelektrisanje	kvarcovi, gluoni
Čestice nosioci	gravitoni (još neopaženi)	$W^+ W^- Z^0$	γ (fotoni)	gluoni
Domet	neograničen	10^{-3} fm	neograničen	1 fm
Vremena poluraspada	?	$>10^{-10}$ s	$\approx 10^{-16}$ s	$\leq 10^{-20}$ s
Jačina za dva kvarca	na 10^{-18} m na 3×10^{-17} m	10^{-41} 10^{-41}	0,8 10^{-4}	1 1
Jačina za dva protona u jezgri		10^{-36}	10^{-7}	1
				ne važi za hadrone
				20

12.2.3 Elektromagnetna sila

Elektromagnetna sila je važna za strukturu i uzajamno delovanje osnovnih čestica. Neke čestice međusobno deluju, ili se raspadaju, isključivo preko elektromagnetnih interakcija. Elektromagnetna sila ima beskonačni domet, ali na makroskopskoj skali zaklanjanje umanjuje njen uticaj. Mnoge uobičajene makroskopske sile (trenje, elastičnost, viskoznost) u krajnjoj liniji su elektromagnetne prirode. Elektromagnetna sila preovlađuje u atomu. U atomskom jezgri, elektromagnetna sila među protonima koji se dodiruju je 100 puta manja od jake sile. Međutim, unutar jezgra elektromagnetna sila deluje kumulativno, jer nema zaklanjanja naelektrisanjem suprotnog znaka. Kao posledica toga elektromagnetna interakcija može da dostigne veličinu jake sile i da u jednakoj meri utiče na stabilnost i strukturu jezgra.

12.2.4 Jaka sila

Jaka sila, koja je ključna za izgradnju atomskog jezgra, ima preovlađujuću ulogu u reakcijama i raspadu najvećeg broja osnovnih čestica. Međutim, neke čestice (na primer, elektroni), uopšte ne osećaju jaku silu. Jaka sila ima vrlo kratak doomet, reda 10^{-15} m. Danas je prihvaćeno shvatanje da je nuklearna sila koja deluje između protona i neutrona, zapravo, preostala (rezidualna) jaka sila koja deluje između kvarkova, u potpunoj analogiji sa međumolekulskim silama koje deluju među neutralnim atomima i molekulima, a koje su preostale elektrostatičke interakcije među elektronima i atomskim jezgrima. Za razliku od drugih sila koje opadaju sa rastojanjem, jaka sila raste, Tabela 12.2.1. Porastom jake sile sa rastojanjem među kvarkovima objašnjava se zašto ne može da se opazi slobodan kvark.

12.2.5 Kvanti polja – prenosioci sile

Prema klasičnom stanovištu, sila se sa jedne čestice na drugu prenosi poljem. Na primer, u prostoru oko pozitivnog naelektrisanja stvara se električno polje koje prenosi privlačnu silu na negativno naelektrisanje koje se nalazi u blizini. Štaviše, polje može da prenosi energiju i impuls sa jedne materijalne čestice na drugu. Prema savremenoj teoriji polja, energija i moment polja su kvantovani i kvant koji prenosi jedinični iznos energije ili momenta naziva se čestica polja. Tako se svaka sila može predstaviti emisijom ili apsorpcijom čestice (bozona) koja prenosi interakciju. (Sve čestice polja imaju celobrojni spin, Tabela 12.2.2, dakle, pokoravaju se Boze-Ajnshtajnovoj raspodeli, pa se zato nazivaju i bozonima polja.) Na primer, elektromagnetna interakcija među česticama može da se predstavi emisijom i apsorpcijom fotona. Dakle, svakoj sili može da se pridruži odgovarajuće polje koje se prostire preko sopstvenih čestica polja, kao što je naznačeno u Tabeli 12.2.2. Slabi bozoni W^\pm i Z^0 učestvuju u procesima β -raspada jezgra. Na primer, β -raspad neutrona (vođen slabom interakcijom) može da se predstavi kao:

$$n \rightarrow p + W^- \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e.$$

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

Tabela 12.2.2 Kvanti polja jake, elektromagnetne i slabe interakcije

Kvant polja	Simbol	Spin (\hbar)	Masa mirovanja (GeV/c ²)	Srednje vreme života (s)	Tipični raspad
Gluon	g	1	0		
Foton	γ	1	$<6 \times 10^{-25}$	Stabilan	
W-bozon	W^\pm	1	80,22	$3,2 \times 10^{-25}$	$e+\nu, \mu+\nu, \tau+\nu, q+\bar{q}$ (hadroni)
Z-bozon	Z^0	1	91,187	$2,6 \times 10^{-25}$	$e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, q+\bar{q}$

12.2.6 Vreme delovanja i domet sile

Relativna jačina sile određuje njen domet i vremensku skalu na kojoj deluje. Bozoni, preko kojih se ostvaruje interakcija, su prividni (virtuelni) jer se, mada emitovani i absorbovani od materijalnih čestica, eksperimentalno ne mogu opaziti. Kako se tokom interakcije bozon emituje i apsorbuje unutar sistema, na dugačkoj vremenskoj skali ne narušava se zakon o održanju energije. Međutim, u intervalu između emisije i apsorpcije bozona zakon o održavanju energije izgleda da biva narušen jer izgleda kao da je bozon nastao ni iz čega. Dakle, postavlja se pitanje: odakle energija za stvaranje virtuelnog bozona u izolovanom sistemu? Ovde se treba prisetiti Hajzenbergove relacije neodređenosti koja u obliku:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (12.2.1)$$

daje vezu između neodređenosti energije, ΔE , i vremena, Δt . (Ovaj oblik je tačniji od već poznate relacije $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ ali, s obzirom na to da je reč o nejednakosti, razlika nije naročito značajna). Dakle, Hajzenbergova relacija neodređenosti dopušta fluktuacije (odstupanja u okolini srednje vrednosti) energije pri čemu je veličina odstupanja, ΔE , obrnuto proporcionalna dužina intervala, Δt , u kojem je fluktuacija dopuštena. U vezi s emisijom i apsorpcijom virtuelnih bozona, izraz (12.2.1) dopušta nastanak virtuelnog bozona, s tim što mu je vreme života, Δt_B , ograničeno sopstvenom energijom, ΔE_B :

$$\Delta t_B \leq \frac{\hbar}{2\Delta E_B}. \quad (12.2.2)$$

Dakle, virtuelni bozoni nastaju iz fluktuacija energije. Pošto je energija bozona proporcionalna jačini sile, iz izraza (12.2.2) sledi da je interval u kojem sila deluje obrnuto proporcionalna njenoj jačini. Srednje vreme raspada je često signal za vrstu interakcije koja dovodi do pojave posmatranog procesa. Najbrži raspad, često na skali od 10^{-23} s, ukazuju na delovanje jake sile. Treba uočiti to da interval od 10^{-23} s odgovara vremenu potrebnom čestici sa nultom masom mirovanja da prevali rastojanje dimenzija bariona (10^{-15} m), tj. vremenu potrebnom da gluon pređe sa jedne čestice na drugu.

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

$$\Delta E_B = m_B c^2 \quad (12.2.3)$$

gde je c brzina svetlosti. Zamenom izraza (12.2.3) u (12.2.1) nalazimo vreme života bozona:

$$\Delta t_B \approx \frac{\hbar}{2m_B c^2} \quad (12.2.4)$$

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

$$d_B = c \Delta t_B \approx \frac{\hbar}{2m_B c}. \quad (12.2.5)$$

Pomoću izraza (12.2.5) Jukava je procenio masu mezona (piona) koji je nosilac preostale jake sile među nukleonima u atomskom jezgru. Znajući da je domet nuklearnih sila reda 10^{-15}m , dakle, $d_\pi = 1\text{ fm}$, preuređivanjem izraza (12.2.5) nalazimo energiju mirovanja piona:

$$m_\pi c^2 \approx \frac{\hbar c}{2d_\pi} = \frac{0,197\text{ GeV} \times \text{fm}}{2 \times 1\text{ fm}} \approx 0,1\text{ GeV} \quad (12.2.6)$$

koja odgovara masi mirovanja od $100\text{ MeV}/c^2$. Ova vrednost prilično dobro se slaže s eksperimentalno određenom masom piona ($139,6\text{ MeV}/c^2$, Tabela 12.3.2).

12.3 FAMILIJE ČESTICA

Zbog brojnosti i raznovrsnosti subatomske čestice korisno je svrstati ih u različite grupe i onda ispitivati sličnosti i razlike među čitavim grupama. Na primer, čestice se mogu grupisati na osnovu sile, čijem su uticaju podložne kako je već pokazano u Tabeli 12.2.1. Drugi, još očigledniji, način za grupisanje čestica je na osnovu mase. Vrlo rano je uočeno da tri grupe čestica, lakše čestice (elektroni, mioni, neutrina, ...), teže (protoni, neutroni, ...) i srednje (pioni, kaoni, ...) imaju posebne osobine. Prvobitni nazivi tih grupa izvedeni su iz grčkih prideva lak (leptoni), srednji (mezoni) i težak (barioni), Tabela 12.1.1. Mada je podela prema masama zastarela (u međuvremenu je pronađen lepton sa masom većom od mase protona ili neutrona) nazivi su zadržani da označe familije čestica sa sličnim, više ne masama, već drugim važnim osobinama. U svetlu prethodne klasifikacije (prema osnovnim silama) leptoni se razlikuju od mezona i bariona po tome što na njih ne deluje jaka sila.

Tabela 12.1.1 pokazuje zbirno grupisanje čestica po familijama.

12.3.1 Leptoni

Leptoni intereaguju samo posredstvom slabe i elektromagnetne sile. Nijedan do sada izveden eksperiment ne ukazuje na postojanje unutrašnje strukture leptona. Dakle, leptoni su zaista elementarne čestice koje se ne mogu rastaviti na još prostije sastojke. Nepostojanje unutrašnje strukture leptona u saglasnosti je sa sadašnjim teorijama koje leptone i kvarkove smatraju bezdimenzionim tačkastim česticama. Svi poznati leptoni imaju spin $1/2$.

Tabela 12.3.1 Familija leptona

Naziv	Čestica	Antičestica	Nelektrisanje (e)	Spin (h)	Masa mirovanja (MeV/c^2)	Srednje vreme života	Tipični proizvodi raspada
Elektron	e^-	e^+	-1	1/2	0,511	∞	—
Elektronski neutrino	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	1/2	$<10\text{eV}$	∞	—
Mion	μ^-	μ^+	-1	1/2	105,7	$2,2 \times 10^{-6}$	$e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
Mionski neutrino	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	1/2	$<0,3$	∞	—
Tau	τ^-	τ^+	-1	1/2	1777	$3,0 \times 10^{-13}$	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$
Tau neutrino	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	1/2	<40	∞	—

Tabela 12.3.1 pokazuje: šest poznatih leptona grupisanih u tri para čestica. Svaki par uključuje naelektrisanu česticu i odgovarajući neutrino (neutralnu česticu). Svaki lepton ima odgovarajuću antičesticu.

12.3.2 Mezoni

Mezoni su vrlo reaktivne (nestabilne) čestice sa celobrojnim spinom, Tabela 12.3.2. Mogu da nastanu i u reakcijama pod uticajem jake sile. Raspadaju se na druge mezone ili leptone pomoću jakih, elektromagnetnih ili slabih interakcija.

Tabela 12.3.2 Neki dugoživeći predstavnici familije mezona

Naziv	Čestica	Anti-čestica	Naelektrisanje ^a (e)	Spin (\hbar)	Stranost*	Masa mirovanja (MeV/c ²)	Srednji život (s)	Tipični proizvodi raspada
Pion	π^+	π^-	+1	0	0	139,57	$2,6 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
	π^0	π^0	0	0	0	134,98	$8,4 \times 10^{-17}$	$\gamma + \gamma$
Kaon	K^+	K^-	+1	0	+1	493,7	$1,24 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
	K^0	\bar{K}^0	0	0	+1	497,7	$0,9 \times 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^-$
Eta	η	η	0	0	0	547,5	$8,0 \times 10^{-19}$	$\gamma + \gamma$
Ro	ρ^+	ρ^-	+1	1	0	769	$4,5 \times 10^{-24}$	$\pi^+ + \pi^0$
	η'	η'	0	0	0	958	$2,2 \times 10^{-21}$	$\eta + \pi^+ + \pi^-$
De	D^+	D^-	+1	0	0	1869	$1,1 \times 10^{-12}$	$K^- + \pi^+ + \pi^+$
Psi	ψ	ψ	0	1	0	3097	$1,0 \times 10^{-20}$	$e^+ + e^-$
Be	B^+	B^-	+1	0	0	5278	$1,5 \times 10^{-12}$	$D^- + \pi^+ + \pi^+$
Ipsilon	Y	Y	0	1	0	9460	$1,3 \times 10^{-20}$	$e^+ + e^-$

* Naelektrisanje i stranost odnose se na čestice. Vrednosti za antičestice imaju suprotan znak. Spin, masa mirovanja i srednje vreme života imaju iste vrednosti za česticu i njoj odgovarajuću antičesticu.

Pošto nisu opaženi u običnoj materiji, podela mezona na čestice i antičestice je prilično proizvoljna. Tako se za naelektrisane mezone uzima da je pozitivni mezon čestica, a negativni antičestica. Na primer, π^+ mezon se smatra česticom, a π^- njegovo antičesticom. Kod nekih neutralnih mezona, recimo η i π^0 , čestica i antičestica su identične, dok se kod drugih, recimo K^0 i \bar{K}^0 , čestica i antičestica međusobno razlikuju. Pošto su masa i stabilnost čestice i odgovarajuće antičestice jednaki, postojanje parova čestica-antičestica za čestice bez naelektrisanja jasno ukazuje na to da postoje i druge osobine, osim naelektrisanja, na osnovu kojih čestica i antičestica mogu da se razlikuju.

12.3.3 Barioni

Barioni su čestice sa polucelim spinskim kvantnim brojem koje učestvuju u jakim interakcijama, Tabela 12.3.3. Poput leptona, antičestice bariona različite su od odgovarajućih čestica. Slično mezonima, barioni mogu nastati u jakim interakcijama nukleona, a raspadaju se preko jake, elektromagnetne ili slabe interakcije.

Tabela 12.3.3 Neki članovi familije bariona

Naziv	Čestica	Anti- česti- ca	Naelektri- sanje* (e)	Spin (\hbar)	Stranost*	Masa mirovanja (MeV/c ²)	Srednji život (s)	Tipični proizvodi raspada
Proton	p	\bar{p}	+1	1/2	0	938,27	∞	
Neutron	n	\bar{n}	0	1/2	0	939,57	889	$p+e^-+\bar{\nu}_e$
Lambda	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	0	1/2	-1	1115,7	$2,6 \times 10^{-10}$	$p+\pi^-$
Sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	+1	1/2	-1	1189,4	$0,8 \times 10^{-10}$	$p+\pi^0$
	Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	0	1/2	-1	1192,6	$7,4 \times 10^{-20}$	$\Lambda^0+\gamma$
	Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	-1	1/2	-1	1197,4	$1,5 \times 10^{-10}$	$n+\pi^-$
Ksi	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	0	1/2	-2	1314,9	$2,9 \times 10^{-10}$	$\Lambda^0+\pi^0$
	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	-1	1/2	-2	1321,3	$1,6 \times 10^{-10}$	$\Lambda^0+\pi^-$
Delta	Δ^*	$\bar{\Delta}^*$	+2,+1,0,-1	3/2	0	1232	6×10^{-24}	$p+\pi$
	Σ^*	$\bar{\Sigma}^*$	+1,0,-1	3/2	-1	1385	2×10^{-23}	$\Lambda^0+\pi$
	Ξ^*	$\bar{\Xi}^*$	-1,0	3/2	-2	1530	6×10^{-23}	$\Xi + \pi$
Omega	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	-1	3/2	-3	1672,5	$8,2 \times 10^{-11}$	Λ^0+K^-

* Naelektrisanje i stranost odnose se na čestice. Vrednosti za antičestice imaju suprotan znak. Spin, masa mirovanja i srednje vreme života imaju iste vrednosti za česticu i njoj odgovarajuću antičesticu.

12.4 ČESTICE I ANTIČESTICE

Svaka čestica ima odgovarajuću antičesticu. Neke osobine antičestice identične su s osobinama pripadajuće joj čestice (recimo, masa ili srednje vreme života) a neke osobine su istog intenziteta ali suprotnog znaka, recimo, naelektrisanje. Antičestica elektrona, e^- , je pozitron, e^+ , koji je otkriven u interakciji kosmičkih zraka sa materijom. Pozitron ima naelektrisanje $+e$ (suprotno naelektrisanju elektrona, $-e$) i masu mirovanja $0,511 \text{ MeV}/c^2$, identičnu sa masom elektrona. Antiproton, \bar{p} , pronadjen 1956, ima naelektrisanje $-e$ i masu mirovanja $938 \text{ MeV}/c^2$.

Antičestice stabilnih čestica (kao pozitron ili antiproton) takođe su stabilne. Međutim, kada se čestica i njena antičestica sudare dolazi do anihilacije obe: čestica i antičestica iščezavaju, stvarajući dva ili više fotona. Pri tome su energija i impuls prvobitnih čestica očuvani i preneti na fotone. Na primer, u anihilaciji elektrona i pozitrona nastaju dva fotona čija je energija (zanemarujući kinetičku energiju čestice) jednaka energiji mase mirovanja prvobitnih čestica:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2 \quad (E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} = 0,511 \text{ MeV}).$$

Slično tome, pri anihilaciji protona, p , i antiprotona, \bar{p} , nastaju dva fotona s energijom koja je jednaka energiji mase mirovanja protona:

$$p + \bar{p} \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2 \quad (E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} = 938 \text{ MeV}).$$

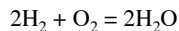
Ako podemo od toga da ono što nas okružuje smatramo materijom onda, obično nije teško napraviti razliku između čestica i antičestica. Dakle, pod česticama podrazumevamo osnovne činioce materije – elektrone, protone i neutrone. Pošto neutrina ne ulazi u sastav materije nemamo osnovu da razlikujemo neutrina od antineutrina. Ipak, zakone održanja u β -raspadu lakše je razumeti ako se uzme da je antineutrino čestica koja nastaje prilikom β^- raspada, a neutrino prilikom β^+ raspada i K-zahvata. Slično tome, za druge čestice/antičestice pripadnost se određuje na osnovu proizvoda raspada. Na primer, krajnji proizvodi raspada teškog bariona lambda, Λ , su protoni i neutroni. Dakle, Λ je čestica jer se raspada na neutron, a antilambda, $\bar{\Lambda}$, je antičestica čiji je konačan proizvod raspada antineutron, \bar{n} . Slično tome, leptoni μ^+ i μ^- stvaraju par čestica/antičestica. Kako se μ^- raspada na elektron, e^- , a ima i niz osobina sličnih elektronu, on je čestica a μ^+ je antičestica. Slučaj sa pionima je nešto teži. Pioni mogu biti neutralni ili naelektrisani: π^0 , π^+ , π^- . Neutralni pion, poput fotona, sam je sebi antičestica dok su pioni π^+ i π^- antičestice jedan drugome. Dakle, postavlja se pitanje koji je od dva naelektrisana piona čestica. Pioni ne ulaze u sastav obične materije pa se na osnovu toga ne može izvesti zaključak. Isto, zaključak se ne može izvući iz raspada jer iz svakog piona nastaje lepton i antilepton. Izgleda da nema načina, a možda ni potrebe, da se za π mezone pravi razlika između čestice i antičestice pa česticama π^+ , π^0 , π^- odgovaraju antičestice π^- , π^0 , π^+ , respektivno.

Kao što kombinacijom čestica nastaje materija tako i kombinacijom odgovarajućih antičestica nastaje antimaterija. Na primer, stabilan atom antivodonika može da nastane vezivanjem pozitrona za antiproton. Njegove osobine bi trebalo da budu identične s osobinama običnog vodonika. Zaista, 1995. godine atom antivodonika je proizveden u sudarima antiprotona sa mlazom atoma ksenona. U sudaru antiprotona sa atomskim jezgrom ksenona ponekad dođe do stvaranja para elektron-pozitron. Pri tom može da se dogodi (mada vrlo retko) da brzina i pravac kretanja novonastalog pozitrona budu bliski brzini i putanji antiprotona. Tada pod uticajem privlačne sile između pozitrona (pozitivne čestice) i antiprotona (negativne čestice) nastaje atom antivodonika. Izolovan atom antivodonika stabilan je koliko i izolovan atom vodonika. Međutim, u sudaru s običnom materijom dolazi do njegove anihilacije. Pošto se čestice kreću brzinom bliskom brzini svetlosti, vreme života antivodonika u aparaturi reda je veličine 4×10^{-8} s koliko antiatomu treba da prevali desetak metara i anihilira se u sudaru sa zidom aparature. Ulažu se veliki naponi da se proizvedeni atomi antivodonika zarobe u električnom i magnetnom polju, dakle, da se izoluju od obične materije i tako im se produži život u meri koja će dozvoliti detaljnije ispitivanje atomskih osobina. Proizvodnjom prvih atoma antivodonika odškrinuta su vrata sistematskom ispitivanju antisveta.

12.5 ZAKONI ODRŽANJA

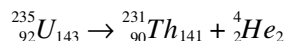
Zakoni održanja predstavljaju jedan od osnovnih principa savremene slike o strukturi materije. Do sada smo u više navrata koristili zakone o održanju energije, održanju impulsa i održanju naelektrisanja. Zakon o održanju masa jedan je od osnovnih zakona hemije. Slično tome, i zakon o održanju naelektrisanja je, jedan od osnovnih zakona fizike. Zapravo, kada se detaljnije pogleda, zbog veze između naelektrisanja i mase čestica koje izgrađuju materiju, ta dva zakona imaju isto poreklo.

Na primer, u hemijskoj reakciji nastajanja vode iz vodonika i kiseonika mase ovih elemenata sa leve i sa desne strane jednačine moraju da budu jednake:

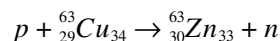


što je isto kao da smo rekli da broj elektrona sa leve strane mora biti jednak broju elektrona sa desne strane jednačine. (U hemijskim reakcijama elektroni se samo pregrupišu, te je jasno da njihov broj ostaje stalan.)

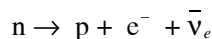
Slično hemijskim reakcijama, u nuklearnim reakcijama broj neutrona i broj protona moraju da budu očuvani. Na primer, u reakciji α -raspada:



ili izbijanja neutrona protonom:



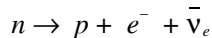
izjednačavamo posebno broj protona i posebno broj neutrona s leve i s desne strane izraza, što može da navede na pomisao da broj protona i broj neutrona u nuklearnim reakcijama mora biti očuvan. Međutim, već najjednostavniji primer β -raspada neutrona:



ukazuje na suprotno: ni broj protona ni broj neutrona nisu očuvani. Ipak, očuvan je njihov zbir. Dakle, u nuklearnim reakcijama održava se broj nukleona, a održanje broja protona i broja neutrona predstavlja samo specijalan slučaj.

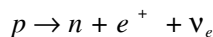
12.5.1 Održanje leptonskog broja

Kao što je zakon o održanju mase uveo red u hemiju, tako su i zakoni održanja doprineli razumevanju raspada i reakcija subatomske čestice. Na primer, u β -raspadu oslobađa se antineutrino, ali nikada i neutrino. Slično tome, u β^+ -raspadu kao proizvod uvek se javlja neutrino, ali nikada antineutrino. Tu pravilnost najlakše je uzeti u obzir ako se svakoj čestici pripiše odgovarajući **leptonski broj**, L . Leptonima česticama (elektronu i neutronu) pripisujemo vrednost +1, a leptonima antičesticama (pozitronu i antineutrinu) vrednost -1. Svi mezoni i barioni, dakle čestice koje nisu leptoni, imaju leptonski broj jednak nuli. Tada se zakon o održanju leptonskog broja za β^- i β^+ raspad može izraziti na sledeći način:



$$L: 0 = 0 + 1 + (-1)$$

i:



$$L: 0 = 0 + (-1) + 1.$$

Vidimo to da ukupni leptonski broj ostaje nula na obe strane izraza, čime je uzeta u obzir činjenica da se antineutrino isključivo javlja pri β^- , a neutrino isključivo pri β^+ -raspadu.

Saglasno zakonu o održavanju leptonskog broja, sledeći procesi nisu dozvoljeni:

$$e^- + p \not\rightarrow n + \bar{\nu}_e$$

$$L: 1 + 0 \neq 0 + (-1)$$

i:

$$p \not\rightarrow e^+ + \gamma$$

$$L: 0 \neq (-1) + 0$$

Kao kod hemijskih reakcija gde se održanje mase za svaki element traži posebno, tako se i u uravnotežavanju leptonskih brojeva za svaku vrstu leptona (e , μ , τ) posebno, uravnotežava leptonski broj. Dokazi za to dobijeni su iz brojnih eksperimenata. Na primer, nikada nije opažen raspad:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$

dok je reakcija:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

uobičajena. Prva reakcija je zabranjena, mada je „ukupni” leptonski broj očuvan, zato što leptonski brojevi elektrona i miona svaki za sebe nisu uravnoteženi. Druga reakcija je dozvoljena, jer je ostvarena detaljna ravnoteža leptonskih brojeva, posebno za elektrone i posebno za mione. Ako se za svaku vrstu leptona uvedu posebni leptonski brojevi, L_e , L_μ , L_τ , zakon o održanju leptonskog broja može se formulisati na sledeći način: **U svakom procesu, leptonski broj svake vrste leptona, posebno elektronskih, posebno mionskih i posebno tau leptona, ostaje stalan.** Na osnovu zakona o održanju leptonskog broja postaje jasno zašto se u reakcijama nekada javlja neutrino, a nekada antineutrino.

12.5.2 Održanje barionskog broja

Sličan zakon održanja može se izvesti i za **barionski broj**. Svim barionima pripisuje se barionski broj $B = +1$, a antibarionima $B = -1$. Za „nebarione” (mezone i leptone) $B = 0$. Tada se formuliše zakon o održavanju barionskog broja. **U svakom procesu, ukupni barionski broj ostaje stalan.** Održanje broja nukleona specijalni je slučaj zakona o održanju barionskog broja. Eksperimentalno nije opažen nijedan proces koji nije u saglasnosti sa održanjem barionskog broja. Primer za proces koji je u saglasnosti sa zakonom o održanju barionskog broja je reakcija u kojoj je prvi put opažen antiproton:

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}.$$

Međutim, slična reakcija u kojoj bi mogao da nastane antineutron:

$$p + p \not\rightarrow (p + p + \bar{n})$$

nije eksperimentalno opažena, jer je zabranjena po zakonu o održanju barionskog broja.

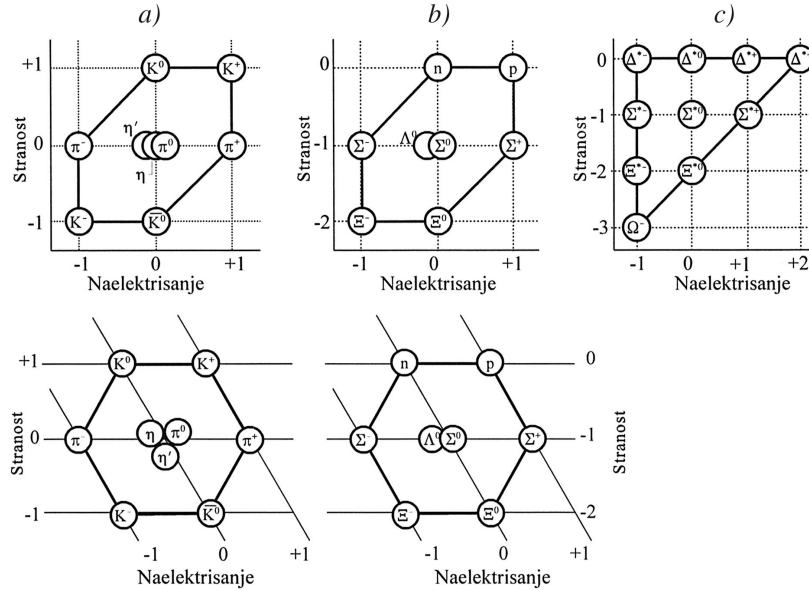
12.5.3 Održanje stranosti

U analizi reakcija koje uključuju mezone, nije zapažena nikakava pravilnost u vezi s održanjem njihovog broja, dakle, ukupni broj mezona ne mora biti očuvan. Međutim, analizom vremena života mezona i proizvoda njihovog raspada, uočeno je da za različite mezone postoje različita pravila, dakle, da postoji nova osobina (kvantni broj) po kojoj bi se mezoni mogli razlikovati. Zbog neobičnosti, nova osobina je nazvana **stranost** i odlikuje se odgovarajućim kvantnim brojem, S . Ova osobina, kao i mnoge druge osobine subatomske čestice, nema ekvivalenta u makrosvetu. Na primer, K^0 i K^+ mezonima pripisuje se jedinična stranost, $S = 1$, a „nestranim” česticama, poput π mezona i leptonu, $S = 0$. Mnogi barioni imaju stranost različitu od nule, kako je pokazano u Tabeli 12.3.3. Stranost antičestice je suprotnog znaka od stranosti odgovarajuće čestice. Zakon održanja može se formulisati i za stranost: **U procesima vođenim jakim ili elektromagnetnom interakcijom, ukupna stranost ostaje očuvana. U procesima vođenim slabom interakcijom, stranost ostaje nepromenjena ili se menja za jedinicu.**

Leptonski broj, barionski broj i stranost korisni su koncepti pomoću kojih mogu da se objasne reakcije (ili njihovo odsustvo) kod subatomske čestice. Međutim, još uvek je nejasno zašto se leptonski ili barionski brojevi održavaju i šta predstavlja stranost.

12.6 MODEL KVARKA

Mada klase i osobine subatomske čestice izgledaju prilično komplikovano, uočene brojne pravilnosti ukazuju na to da se ceo sistem može, ipak, opisati relativno jednostavnom šemom koja još uvek nije očigledna. Na primer, ako se čestice sortiraju prema stranosti i naelektrisanju, kako je pokazano na Slici 12.6.1, mogu se uočiti jasni geometrijski odnosi. Analizirajući odnose među osobinama poznatih subatomske čestice, Gel-Man (Murray Gell-Mann) i Cvjag (George Zweig) su, nezavisno i istovremeno, 1964. godine uočili jednostavan sistem iz kojeg neposredno proističe uredenost. Oni su pokazali da poznate pravilnosti među hadronima (mezonima i barionima) mogu da se objasne samo na osnovu pretpostavke da su ovi izgrađeni od tri elementarne čestice, koje su ubrzo postale poznate pod nazivom **kvar-kovi**. Da bi slika bila ispravna, ta tri kvarka, u-kvark (u od engl. up - gore), d-kvark (d od engl. down - dole) i s-kvark (s od engl. strange – stran) treba da imaju osobine prikazane u Tabeli 12.6.1. (Kasnije se pokazalo da je za opis svih poznatih hadrona potrebno ukupno šest kvarkova.)



Slika 12.6.1 Uređenje mezona i bariona prema poznatim osobinama: a) mezoni; b) barioni sa spinom $1/2$; c) barioni sa spinom $3/2$. Da bi veze među različitim česticama bile uočljivije, dijagrami se najčešće predstavljaju u iskošenom koordinatnom sistemu, slike a) i b) dole.

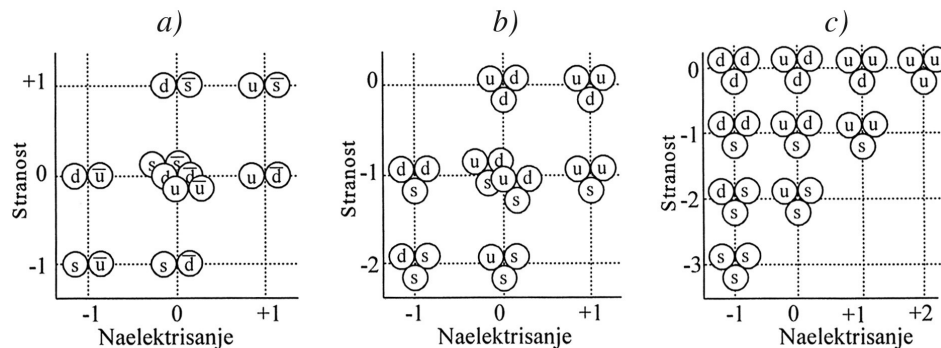
Tabela 12.6.1 Osobine prva tri kvarka

Naziv	Simbol	Naelektrisanje (e)	Spin (\hbar)	Barionski broj	Stranost	Antikvark
u-kvark	u	$+2/3$	$1/2$	$+1/3$	0	\bar{u}
d-kvark	d	$-1/3$	$1/2$	$+1/3$	0	\bar{d}
s-kvark	s	$-1/3$	$1/2$	$+1/3$	-1	\bar{s}

12.6.1 Mezoni

Pošto mezoni imaju spin 0, a kvarkovi $1/2$, najjednostavnije je zamisliti da je mezon sastavljen od dva kvarka sa antiparalelnim spinovima. Problem je što je barionski broj mezona jednak nuli, $B = 0$, dok je za dva kvarka barionski broj $2/3$, $B = 1/3 + 1/3 = 2/3$. Međutim, barionski broj može da se učini nulom ako se kombinuje kvark, $B = 1/3$, sa antikvarkom, $B = -1/3$. Na primer, kombinovanjem u-kvarka sa \bar{d} -kvarkom (\bar{d} -kvark je anti d-kvark) dobija se kombinacija $u\bar{d}$, sa nultim barionskim brojem, nultim spinom i naelektrisanjem $+2/3e + 1/3e = +e$. (Naelektrisanje d-kvarka je $-1/3e$, pa je otuda i \bar{d} -kvarka isto samo sa promenjenim znakom, dakle, $+1/3e$). Osobine ove kombinacije kvarkova identične su sa osobinama π^+ mezona, dakle π^+ mezon je kombinacija $u\bar{d}$. Na sličan način može se naći devet kombinacija kvark-antikvark, od kojih svaka odgovara po jednom poznatom mezonu. Na-

nošenjem, na isti način kao na Slici 12.6.1, stranosti u funkciji naelektrisanja za sve kombinacije, Slika 12.6.2a, dobijamo dijagram iz kojeg se uočava jednoznačna veza između mezona i kombinacija kvark-antikvark.



Slika 12.6.2 Uređenja kombinacija kvarkova prema poznatim osobinama: a) parovi kvark-antikvark (mezoni); b) trojke kvarkova sa spinom 1/2; c) trojke kvarkova sa spinom 3/2. Iz jednoznačne veze između ovih rasporeda i rasporeda za mezone i barione sa Slike 12.6.1 uočljiva je kvarkovska struktura hadrona.

Dakle, mezoni predstavljaju kombinacije kvarkova i antikvarkova.

Tabela 12.6.2 Moguće kombinacije kvark-antikvark za u, d i s-kvarkove

Kombinacija	Naelektrisanje (e)	Spin (\hbar)	Barionski broj	Stranost
$u\bar{u}$	0	0,1	0	0
$u\bar{d}$	+1	0,1	0	0
$u\bar{s}$	+1	0,1	0	+1
$d\bar{u}$	-1	0,1	0	0
$d\bar{d}$	0	0,1	0	0
$d\bar{s}$	0	0,1	0	+1
$s\bar{u}$	-1	0,1	0	-1
$s\bar{d}$	0	0,1	0	-1
$s\bar{s}$	00	0,1	0	0

12.6.2 Barioni

Barioni imaju jedinični barionski broj, $B=+1$, i spin 1/2 ili 3/2, što neposredno ukazuje na to da tri kvarka čine jedan barion. Deset mogućih kombinacija tri osnovna kvarka prikazano je u Tabeli 12.6.2. Njihov raspored prema stranosti i naelektrisanju, prikazan na Slici 12.6.1 b), c), identičan je onome za kvarkovske trojke sa spinom 1/2 i 3/2, prikazanim na Slici 12.6.2 b), c).

Tabela 12.6.3 Moguće trokvarkovske kombinacije u-, d- i s-kvarkova

Kombinacija	Naelektrisanje (e)	Spin (\hbar)	Barionski broj	Stranost
uuu	+2	3/2	+1	0
uud	+1	1/2, 3/2	+1	0
udd	0	1/2, 3/2	+1	0
uus	+1	1/2, 3/2	+1	-1
uss	0	1/2, 3/2	+1	-2
uds	0	1/2, 3/2	+1	-1
ddd	-1	3/2	+1	0
dds	-1	1/2, 3/2	+1	-1
dss	-1	1/2, 3/2	+1	-2
sss	-1	3/2	+1	-3

Dakle, barioni su čestice sastavljene od tri kvarka.

12.6.3 Osnovna pravila za reakcije kvarkova

Za analizu raspada i reakcija subatomske čestice pomoću modela kvarka, dovoljno je znati dva pravila:

1. Par kvark-antikvark može da nastane iz kvanta energije i isto tako da se u njega pretvori. Na primer:

$$d + \bar{d} \rightarrow \text{energija ili energija} \rightarrow u + \bar{u}.$$

Ta energija može biti u obliku gama zraka ili može da se razmeni sa drugim česticama u procesu raspada ili u reakciji;

2. Slaba interakcija može da preobrazi kvark iz jedne vrste u drugu kroz emisiju ili apsorpciju bozona W^+ ili W^- . Na primer:

$$s \rightarrow u + W^-.$$

Bozon polja W dalje se raspada pomoću slabe interakcije, na primer:

$$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

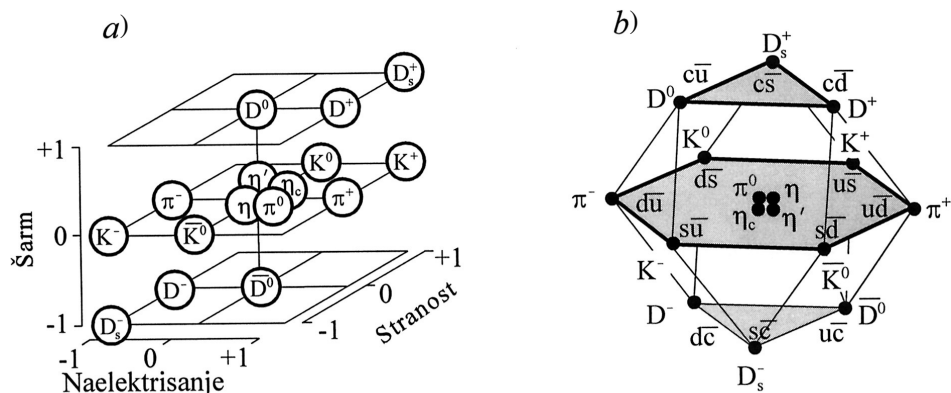
Jaka i elektromagnetna interakcija ne mogu da preobrazu jedan kvark u drugi.

12.6.4 Novi kvarkovi: c, b, t

c-kvark. Godine 1974. otkriven je novi mezon ψ sa masom mirovanja od 3,1 GeV/ c^2 i vremenom života reda 10^{-20} s. Proizvodi njegovog raspada su e^+ i e^- . Po analogiji sa drugim poznatim mezonima očekivan je njegov raspad preko lakših mezona, u jakoj interakciji, sa vremenom života reda 10^{-23} s. Međutim, tri reda veličine, duže vreme života, kao i pojava elektrona i pozitrona tokom raspada, ukazivali su jasno na to da se raspad ne odvija preko jake interakcije. Pošto su svim kombinaci-

jama poznatih kvarkova već bili pridruženi poznati mezoni, jedino objašnjenje za neobične osobine Ψ mezona jeste da je on kombinacija koja uključuje još neki nepoznati kvark. Zaista, pokazalo se da se osobine Ψ mezona mogu najlakše objasniti ako se uzme da je on sastavljen od novog c-kvarka i njegovog antikvarka, \bar{c} . Postojanje c-kvarka predviđeno je četiri godine ranije, da bi se objasnilo zašto u raspadu K^0 mezona nema reakcije $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, koja ne protivreči ni jednom poznatom pravilu.

Novi kvark c (c od engl. charm – šarm) ima naelektrisanje $+2/3e$ i novu osobinu, **šarm**, koja je nova i posebna, poput stranosti. Novoj osobini pripisuje se novi kvantni broj, C . Za c-kvark $C=+1$, a za \bar{c} -kvark (antikvark) $C=-1$; svi ostali kvarkovi imaju $C=0$. Sada možemo napraviti novu šemu mezona od 16 qq parova (kombinacija četiri kvarka sa četiri antikvarka), s tim da sa dodatkom nove osobine, šarma, dijagram postaje trodimenzioni, kao što je ilustrovano na Slici 12.6.3. Svi novi mezoni na slici, D-mezoni, eksperimentalno su opaženi u sudarima čestica visoke energije.

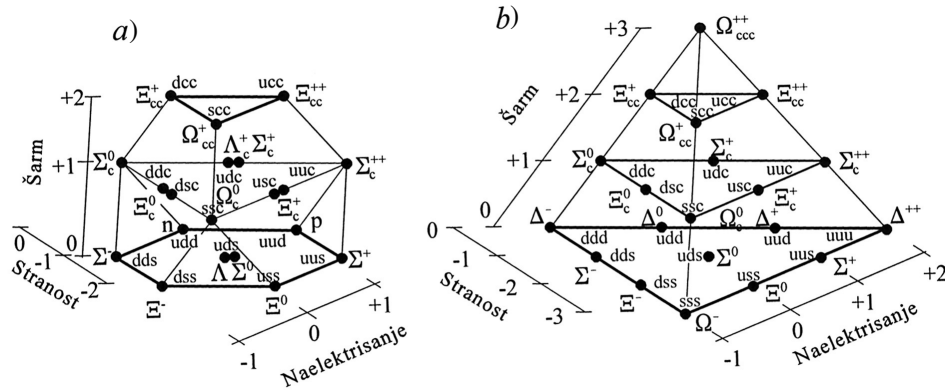


Slika 12.6.3 Veza među mezonomima u čiji sastav ulaze i c-kvark i njegov antikvark (\bar{c}). Dodatkom nove osobine (šarma) šema postaje trodimenziona: a) šema mezona u ortogonalnim koordinatama; b) ista šema u iskošenim koordinatama. Mezoni u centru srednje ravni ($S=0$) predstavljaju mešana stanja parova $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$ i $c\bar{c}$. U šemi b) trouglovima su povezani mezoni koji imaju jedan zajednički kvark.

b-kvark. Sličan tok događaja ponovio se 1977. godine sa Υ (ipsilon) mezonom.

Utvrđeno je da je njegova energija mirovanja $9,5 \text{ GeV}/c^2$ i da se relativno sporo raspada (vreme života reda 10^{-20} s), preko elektrona i pozitrona, umesto preko lakših mezona. Opet je predložen novi kvark, b-kvark (b od engl. bottom – dno; ili od engl. beauty – lep) sa novim kvantnim brojem $B=-1$ i naelektrisanjem $-1/3 e$. Nova osobina koja se opisuje kvantnim brojem B nekad se naziva lepota (engl. beauty).

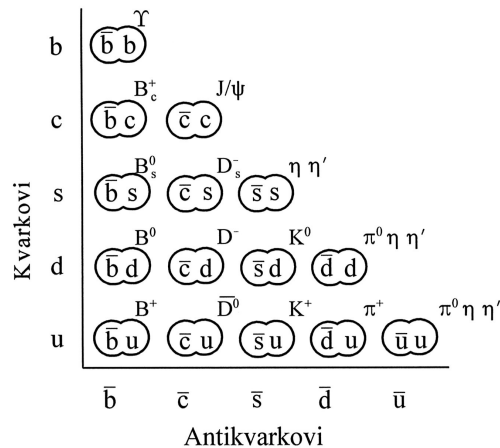
t-kvark. Šesti, po današnjem shvatanju, poslednji kvark otkriven je 1994. u sudarima protona sa antiprotonima u Fermijevoj nacionalnoj laboratoriji (Fermilab) u SAD. U sudarima nastaju kvark i njegov antikvark, koji se brzo raspadaju u pljusak sekundarnih čestica. Meranjem energije i momenta sekundarnih čestica, masa mirovanja kvarka procenjena je na $180 \text{ GeV}/c^2$, što približno odgovara masi atoma zlata.



Slika 12.6.4 Šeme bariona: a) sa spinom 1/2; b) sa spinom 3/2. Iste kombinacije kvarkova sa različitim spinom mogu se smatrati jednom te istom česticom u dva pobudena stanja. Na primer, proton (stabilni barion) sastoji se od iste kombinacije kvarkova (uud) kao Δ^+ čestica koja je vrlo nestabilna.

Novi kvark dobio je ime t-kvark (od engl. top – vrh) i njemu se pridružuje jedinstvena nova osobina, vrhnost (engl. topness) sa kvantnim brojem $T = +1$.

I novi kvarkovi ulaze u sastav mezona i bariona, Slika 12.6.4. Slika 12.6.5 pokazuje 16 mogućih parova kvark-antikvark za u, d, s, c, i b-kvarkove. Postojanje svih ovih kombinacija je eksperimentalno potvrđeno. Poslednji mezon, B_c (kombinacija bc), otkriven je 1998. godine. Mezoni sa t-kvarkom nisu opaženi zbog njezove ogromne mase i nestabilnosti; t-kvark se raspada pre nego što uspe da se spari sa drugim kvarkom i formira mezon.

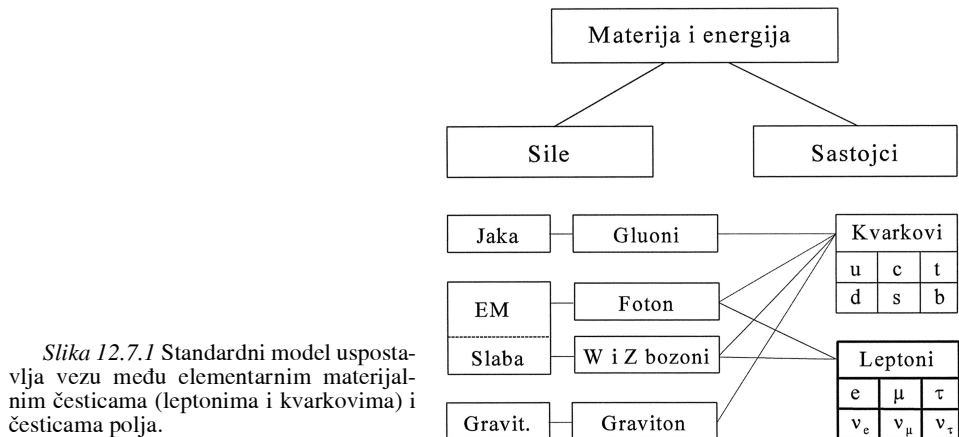


Slika 12.6.5. Do danas otkriveni mezoni su kombinacije u, d, s, c i b-kvarkova; t-kvarkovi su previše masivni i nestabilni da bi obrazovali mezone. Prikazan je samo po jedan predstavnik para mezon-antimezon.

12.7 Standardni model

Standardni model predstavlja savremenu teoriju strukture elementarnih čestica prema kojoj se svi poznati eksperimenti i pojave mogu objasniti na osnovu interakcije 6 leptona, 6 kvarkova (i njihovih antičestica: antileptona i antikvarkova) i

čestica polja (fotona, 3 bozona slabog polja i 8 gluona) koje prenose silu, Slika 12.7.1.



Materija koja nas okružuje sastoji se od protona i neutrona, koji se dalje sastoje od u-kvarkova i d-kvarkova; u sastav materije takođe ulaze elektroni. U radioaktivnom raspadu emituje se elektronski neutrino. Dakle, možemo smatrati da se naš celokupni svet sastoji od četiri čestice sa spinom $1/2$ (i njihovih antičestice) koje se mogu grupisati u par leptona i par kvarkova, Slika 12.7.1:

$$(e, \nu_e) \text{ i } (u, d)$$

koja se nekad nazivaju prva generacija čestica. Naelektrisanje čestica unutar svakog para razlikuje se za jedinicu: -1 i 0 za leptone i $+2/3$ i $-1/3$ za kvarkove.

U eksperimentima sa akceleratorima čestica pronađene su nove čestice mion i mionski neutrino, kao i mezoni i barioni sa novim osobinama—stranošću i šarmom. Struktura tih čestica može se opisati novim parom leptona i kvarkova, Slika 12.7.1:

$$(\mu, \nu_\mu) \text{ i } (c, s)$$

koji čine drugu generaciju čestica. Unutar parova, opet, postoji jedinična razlika u naelektrisanju.

Pri još većim energijama, javljaju se čestice koje se sastoje od novog para leptona (tau i tau neutrino) i novog para kvarkova, t-kvarka i b-kvarka, što predstavlja novu generaciju parova leptona i kvarkova, Slika 12.7.1:

$$(\tau, \nu_\tau) \text{ i } (t, b)$$

poznatu kao treća generacija. Osobine šest kvarkova i njihovih antikvarkova pokazane su u Tabeli 12.7.1. Mase kvarkova ne mogu da se odrede neposredno, jer slobodni kvarkovi nisu opaženi. Pokazane mase mirovanja procenjene su na osnovu prividnih masa kvarkova kada su vezani u različitim česticama. Na primer, izmerena masa protona predstavlja zbir masa kvarkova (od kojih je proton izgrađen)

umanjenu za energiju vezivanja kvarkova. Pošto vezivna energija nije poznata, ne može se znati ni energija mirovanja kvarka.

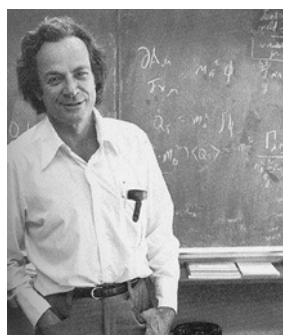
Tabela 12.7.1 Osobine kvarkova

Vrsta	Simbol	Antičestica	Naelektrisanje (e)	Spin (\hbar)	Barionski broj	Masa mirovanja* (GeV/c ²)	C	S	T	B
u-kvark	u	\bar{u}	+2/3	1/2	+1/3	0,3	0	0	0	0
d-kvark	d	\bar{d}	-1/3	1/2	+1/3	0,3	0	0	0	0
c-kvark	c	\bar{c}	+2/3	1/2	+1/3	+1,5	+1	0	0	0
s-kvark	s	\bar{s}	-1/3	1/2	+1/3	0,5	0	-1	0	0
t-kvark	t	\bar{t}	+2/3	1/2	+1/3	180	0	0	+1	0
b-kvark	b	\bar{b}	-1/3	1/2	+1/3	4,7	0	0	0	-1
\bar{u} -kvark	\bar{u}	u	-2/3	1/2	-1/3	0,3	0	0	0	0
\bar{d} -kvark	\bar{d}	d	+1/3	1/2	-1/3	0,3	0	0	0	0
\bar{c} -kvark	\bar{c}	c	-2/3	1/2	-1/3	1,5	-1	0	0	0
\bar{s} -kvark	\bar{s}	s	+1/3	1/2	-1/3	0,5	0	+1	0	0
\bar{t} -kvark	\bar{t}	t	-2/3	1/2	-1/3	180	0	0	-1	0
\bar{b} -kvark	\bar{b}	b	+1/3	1/2	-1/3	4,7	0	0	0	+1

* Mase mirovanja odnose se na kvarkove vezane u česticama (izgrađivačke kvarkove). Energije mirovanja slobodnih kvarkova nisu poznate.

Standardni model unapredio je fiziku subatomske čestice (na energijskoj skali koja je danas dostupna istraživačima) u meri koja je uporediva sa napretkom u hemiji ostvarenim otkrićem periodnog sistema elemenata. Skoro svi eksperimenti mogu da se objasne preko standardnog modela. Skoro, jer ima nagoveštaja, kako eksperimentalnih tako i teorijskih, da postoje pojave koje se ne uklapaju u okvire standardnog modela. Na primer, japanski istraživači saopštili su da su opazili oscilacije mionskih neutrina (prelaz mionskog neutrina u elektronski i obrnuto) čija je direktna posledica, vrlo mala, ali konačna masa mirovanja neutrina. To je u direktnoj suprotnosti sa jednom od osnovnih pretpostavki standardnog modela prema kojoj je masa mirovanja svih neutrina jednaka nuli. Dakle, uprkos ogromnom uspehu modela, intenzivno se radi na pronalaženju njegovih slabosti i njegovom prevazilaženju novom „teorijom svačega”.

Murai Gel-Man (Murray Gel-Mann), rođen je u Njujorku 1929. godine. Diplomirao je na čuvenom Jelu (Yale) a doktorirao na Masačusetskom tehnološkom institutu (MIT, Massachusetts Institute of Technology). Godine 1952. počinje da radi u Institutu za nuklearne studije u Čikagu. Izučava elementarne čestice, razvija teoriju elementarnih čestica i predlaže model za njihovu klasifikaciju. Od njega potiče duhoviti naziv za osnovnu „bit“ česticu iz koje nastaju sve ostale, „kvark“ (inače reč kvark ne znači ništa i Gel-Man ju je uzeo iz romana *Fineganovo buđenje* Džemsa Džojso). M. Gel-Man je 1969. godine nagrađen Nobelovom nagradom za fiziku za rad na klasifikaciji subatomske čestice i njihovih interakcija. Hipoteza kvarkova je potvrđena kasnije, prvo otkrićem tzv. Omega (Ω) čestice.



Richard Fejnman (Richard Feynman, 1918–1988). Diplomirao je na čuvenom MIT-u a doktorirao na Univerzitetu Princeton (Princeton). Kasnije postaje profesor fizike na Kalifornijskom institutu za tehnologiju u Pasadeni. Već 1945, kao mlad fizičar bio je uključen u nuklearni program „Menhetn“. Potom se bavio elektrodinamikom i nuklearnom fizikom. Izumeo je način da predstavi kvantne interakcije, tzv. „Fejnmanove dijagrame“ i u izvesnom smislu preformulisao kvantnu elektrodinamiku. Godine 1965. dobio je Nobelovu nagradu za fiziku za fundamentalni doprinos kvantnoj elektrodinamici sa velikim posledicama po fiziku elementarnih čestica. Bio je pasionirani profesor, voleo je da podučava studente. I danas su „Fejnmanova predavanja iz fizike“, inspiracija i za studente i za profesore.

