

KVANTNE ČESTICE

Džejson Lajl, doktor astrofizike

Kvantna fizika se bavi time kako se svemir ponaša na vrlo malim razmjerima – na nivou atoma i manjim. I to je čudno, veoma čudno. Čestice koje su manje od atoma ne ponašaju se na potpuno isti način kao mnogo veći objekti na koje smo navikli. Ovo čini kvantnu fiziku jednom od najintragantnijih oblasti istraživanja, koja objavljuje slavu i veličanstvo Gospoda.

Atomi

U školi nas uče da se sva materija sastoji od vrlo sićušnih čestica zvanih atomi. Neke supstance se sastoje od samo jedne vrste atoma – oni se nazivaju elementi. Zlato, srebro, olovo, kiseonik, ugljenik, vodonik, helijum i aluminijum su svi primjeri elemenata. Najmanja čestica zlata, na primjer, je jedan atom. Začudo, postoji samo oko 90 prirodnih elemenata.

Ali atomi se takođe mogu povezati s drugim vrstama atoma kako bi formirali spoj. Voda je uobičajen primjer. Najmanja čestica vode nije jedan atom, već molekul napravljen od dva atoma vodonika vezanih za atom kiseonika. Sva fizička svojstva bilo koje supstance u potpunosti su određena atomima koji je čine. A svojstva atoma su u potpunosti određena njihovim sastavnim komponentama i pravilima kvantne fizike.

Na primjer, činjenica da je voda tečna na sobnoj temperaturi i pri standardnom atmosferskom pritisku u potpunosti je određena pravilima koja definišu kako se atom kiseonika kombinuje s atomima vodonika. Sve je prilično komplikovano, i to je poenta. Kada je Bog stvorio ovaj univerzum, napravio je određene vrste čestica i odredio pravila koja njima upravljaju kako bi život bio moguć. To je logično izračunavanje daleko iznad kapaciteta svih ljudskih umova zajedno!

Sami atomi su kompozitne čestice; odnosno napravljene su od manjih čestica. Jedan ili više elektrona roje se oko centralnog jezgra atoma. Oblak elektrona je ono što atomu daje njegovu veličinu. Centralno jezgro se sastoji od jednog ili više protona. Protoni su veći i 1800 puta masivniji od elektrona. Protoni imaju pozitivan električni naboj, a elektroni negativni električni naboj koji je po veličini jednak protonu, ali suprotnog predznaka. Dakle, postoji snažna privlačna sila između jezgra atoma i elektrona koji se vrte oko njega. Ova sila je ono što sprečava brze elektrone da pobjegnu. Normalno, broj elektrona koji okružuju jezgro jednak je broju protona u jezgru. Dakle, atom ima neto naboj nula.

U svim elementima osim vodonika, jezgro takođe sadrži jedan ili više neutrona. Neutron nema električni naboj, ali je masivan otprilike kao proton. Masa atoma je određena prvenstveno zbirom njegovih protona i neutrona, pri čemu elektroni imaju samo minimalan doprinos.

Svojstva različitih supstanci određuju atomi od kojih se sastoje. Zlato je, na primjer, vrlo teško i gusto. To je zato što jedan atom zlata ima 79 protona u svom jezgru i (obično) 118 neutrona. Obrnuto, atomi helijuma imaju samo dva protona i obično dva neutrona. Helijum je stoga veoma lagan: lakši od vazduha koji se sastoji prvenstveno od azota i kiseonika. Zato baloni sa helijumom lebde u vazduhu.

Ali ostala svojstva nisu tako očigledna. Zašto je, na primjer, zlato dobar provodnik struje? Zašto ima žućkastu boju? Zašto je uglučano zlato sjajno? Sva ova svojstva su određena pravilima koja regulišu način na koji se elektroni roje oko jezgra. I tu na scenu stupaju pravila kvantne fizike.

Zašto kvantum?

Način na koji elektroni kruže oko jezgra atoma sličan je u određenim aspektima načinu na koji planete kruže oko Sunca. Planete su vezane za Sunce privlačnom silom gravitacije, koja savija njihovu inače pravolinijsku putanju u približan krug oko Sunca. Isto tako,

negativno nabijeni elektroni su vezani za pozitivno nabijene protone u jezgru, uzrokujući njihovu orbitu.

Međutim, postoje i neke razlike. Planete mogu kružiti na bilo kojoj udaljenosti od Sunca ako imaju odgovarajuću brzinu. Dajte planeti samo malo više energije i ona će krenuti u malo veću orbitu. Ali elektroni koji kruže oko jezgra atoma mogu kružiti samo na određenim udaljenostima – a ne između njih. Svaka udaljenost je povezana s određenim energetske nivoom – a postoji minimalni energetski nivo koji se zove osnovno stanje. Osnovno stanje predstavlja najbliže što elektron može kružiti oko jezgra atoma. Sledeći nivo se naziva prvo pobuđeno stanje. Nivo nakon toga je drugo pobuđeno stanje i tako dalje. Dakle, energetski nivoi na kojima elektroni mogu postojati u atomu su kvantizovani (dolaze u diskretnim količinama). I to je ono što stavlja „kvant“ u kvantnu fiziku.

Talasna priroda materije

Ali zašto su nivoi elektrona kvantizovani? Odgovor se odnosi na talasnu prirodu materije. Rano u istoriji fizike vodila se znatna debata o tome da li je svjetlost talas ili se sastoji od pojedinačnih čestica. Sada znamo da je svjetlost (u izvjesnom smislu) i jedno i drugo. Ponekad se ponaša kao talas, a drugi put kao da je napravljen od čestica. Na prvi pogled, ovo može izgledati kontradiktorno, jer se talas prostire u prostoru, dok čestica ima samo jednu lokaciju u prostoru i nije proširena.

Razmislite o bacanju kamena u jezero. Prskanje će formirati talasast uzorak koncentričnih krugova koji se vremenom širi. Ako je prskanje dovoljno veliko, talasi bi na kraju mogli ispuniti cijelo jezero. Dakle, ako pitamo: „Gdje je talasanje?“ Odgovor je: „Svuda – ispunjava površinu jezera.“ Ali jedna čestica beskonačno male veličine to ne može učiniti. Postoji samo na jednoj određenoj lokaciji u prostoru u bilo kojem trenutku.

Kroz niz eksperimenata, fizičari su otkrili da svjetlost, elektroni i zapravo sve čestice imaju talasnu prirodu. Pod određenim okolnostima djeluju kao da su talas koji ispunjava određeni volumen prostora.

U drugim slučajevima, ponašaju se kao da su čestice koje postoje samo na jednoj određenoj lokaciji u prostoru. Međutim, kvantne čestice se nikada ne ponašaju i kao talas i kao čestica u isto vrijeme. Stoga nema kontradikcije.¹

Dakle, kada se kvantni objekti ponašaju kao čestice, a kada kao talasi? Odgovor je očigledno da se ponašaju kao čestice kada se posmatraju i kao talasi kada se ne posmatraju. Ovo izgleda vrlo neobično iz više razloga. (1) Kako čestica zna da je posmatrana kako bi promijenila svoje ponašanje? (2) Kako znamo da je talas kada ga ne posmatramo?

Što se tiče prvog pitanja, imajte na umu da ne možemo posmatrati kvantnu česticu a da na nju ne utičemo. Skloni smo da posmatranje posmatramo kao pasivno. Ako želimo da posmatramo nešto veliko, samo ga obasjamo svjetlom, a reflektovana svjetlost ulazi u naše oči i obavještava nas kako predmet izgleda. Sjajno svjetlo na veliki predmet ne utiče mnogo na njega jer je objekt mnogo masivniji od čestica svjetlosti koje ga udaraju. Ali u kvantnom svijetu čestice su toliko male da će sve što koristimo da ih posmatramo imati značajan uticaj na česticu.

Eksperiment sa dva proreza

Da bismo odgovorili na drugo pitanje, znamo da se kvantni objekti ponašaju poput talasa kada ih ne posmatramo zbog toga gdje čestice završavaju. To je pokazano u čuvenom eksperimentu s dva proreza. U ovom eksperimentu postoji izvor svjetlosti na određenoj udaljenosti od zida. Zid ima dva uska, okomita proreza. Svjetlost može proći kroz proreze. Ovi prorezi su mikroskopski – razdvojeni razdaljinom koja je uporediva sa talasnom dužinom svjetlosti. Još jedan zid postoji iza prvog i bilježi gdje svjetlost udara.

Znamo kako se talasi ponašaju u ovoj situaciji iz naših opažanja velikih talasa (kao što su talasi u vodi). Talas koji se emituje iz izvora

¹ Kontradikcija je „A i ne-A u isto vrijeme i u istom smislu.“ Elektron se ponekad ponaša kao talas (proširen u prostoru), a drugi put kao čestica (nije proširen u prostoru), ali nikada oboje u isto vrijeme.

udariće u zid, ali djelovi talasa će proći kroz oba uska proreza – formirajući dva nova talasa koji se udaljavaju od proreza. Dva talasa počinju da se preklapaju dok se kreću prema drugom zidu. Na nekim mjestima vrh jednog talasa se preklapa sa koritom drugog, a dvije suprotnosti se poništavaju. Na drugim mjestima se vrh jednog talasa dodaje vrhuncu drugog, formirajući zaista visok vrh. Dakle, na drugom zidu postoje određena mjesta gdje su talasi vrlo jaki (jer se dva izvora međusobno pojačavaju), a druga mjesta gdje talasa nema (jer su se dva izvora poništila). Ovo se zove interferentni obrazac.

Naravno, eksperiment sa dva proreza potvrđuje da je svjetlost talas. Pošaljite svjetlost date talasne dužine prema prorezima i talas će proći kroz oba, formirajući dva nova talasa koji stvaraju interferencijski obrazac. Ipak, takođe znamo da postoji minimalni nivo energije za svjetlost date talasne dužine. Možete imati jednu jedinicu energije, dvije, ili tri, ali ne 1,5 ili polovinu ili četvrtinu. Ovo sugerije da je svjetlost napravljena od nedjeljivih čestica – svaka jedinica energije odgovara jednoj čestici. Ove čestice se nazivaju fotoni.

Dakle, šta se dešava kada uradimo eksperiment sa dva proreza, šaljući svjetlost jedan po jedan foton? Odgovor je da će foton uvijek sletjeti na jedno od mjesta gdje se dva talasa konstruktivno kombinuju, a nikada na mjesta gdje se dva talasa poništavaju. Drugim riječima, foton je očigledno putovao kao talas (proširen u svemiru) i prošao je kroz oba proreza formirajući dva talasa koji interferiraju jedan s drugim. Tek kada ovi talasi udare u zid, foton se ponovo ponaša kao jedna čestica na jednoj lokaciji u prostoru. A lokacija koju bira uvijek je tamo gdje su talasi najjači. To je nevjerovatno i kontraintuitivno. Ali ovaj eksperiment je ponovljen mnogo puta i to je uvijek rezultat.

Jednačina koja opisuje vrhove i dna talasa naziva se talasna funkcija. Naučnici su otkrili da je kvadrat talasne funkcije tačno jednak vjerovatnoći detekcije čestice na toj lokaciji. Zato foton uvijek završi tamo gdje su talasi najjači, a nikada tamo gdje se poništavaju.

Očigledno, jedan foton – jedna čestica svjetlosti – može proći kroz oba proreza jer se ponaša kao talas. Proširen je u prostoru i stoga

može proći kroz oba proreza, formirajući dva nova talasa koji interferiraju jedan s drugim. Ipak, naša intuicija sugerirše da čestica može proći samo kroz jedan prorez. I tako je primamljivo staviti detektor na proreze kako bi se posmatralo kroz koji prorez je foton prošao. Zapravo nam je potreban samo detektor na jednom od dva proreza, jer ako ne detektuje foton, onda znamo da je sigurno prošao kroz drugi prorez. Dakle, šta se dešava kada postavimo detektor na jedan od dva proreza?

Kada se detektor postavi na bilo koji prorez (ili na oba), čestice više ne proizvode interferencijski uzorak.

Ovaj eksperiment je urađen. I nevjerovatno, foton mijenja svoje ponašanje. Umjesto da prođe kroz oba proreza kao talas i zatim sleti na jednu od lokacija konstruktivne interferencije, foton će proći kroz samo jedan ili drugi prorez i sletjeti na jednu od dvije lokacije na drugom zidu. Posmatranje fotona na prorezu uzrokuje da on ne formira interferencijski uzorak!

Očigledno, posmatranje čestice „kolapsira talasnu funkciju“. To uzrokuje da objekt bude čestica na jednoj lokaciji u prostoru, čime se uništava talas. Nakon tog posmatranja, čestica se ponovo ponaša kao talas sve dok se ponovo ne posmatra. Zvuči nevjerovatno, ali svaki naučni eksperiment koji je ikada napravljen da bi se ovo testiralo potvrđuje da se to zaista događa.

Ne samo da se fotoni ponašaju na ovaj način, već se očigledno ponašaju i sve kvantne čestice. Eksperiment sa dva proreza je takođe izveden sa elektronima. Oni takođe formiraju interferencijski obrazac, čak i kada se elektroni šalju kroz proreze jedan po jedan. Sve čestice imaju talasnu funkciju. Talasna dužina se smanjuje sa povećanjem energije, zbog čega ne možemo otkriti valne funkcije makroskopskih objekata.²

² Talasna dužina je jednaka hc/E gdje je E energija čestice, c je povratna brzina svjetlosti, a h je Plankova konstanta. Dakle, čestice niže energije imaju veće talasne dužine.

Talasi i atomska struktura

Talasna funkcija je razlog zašto elektroni mogu orbiti samo na određenim kvantiziranim nivoima energije. Pošto se elektroni u atomima obično ne posmatraju, ponašaju se kao talasi. Oni imaju specifičnu talasnu dužinu u zavisnosti od energije elektrona. Ali broj talasnih dužina u obimu orbite elektrona mora biti cio broj (tj. 1, 2, 3, 4, ali ne 1,5). Zašto? Jer da nije cijeli broj, tada bi se vrh talasa preklopio s koritom iz prethodne orbite i talas bi se sam poništio. Elektroni mogu orbiti samo u diskretnim energetskim nivoima iz istog razloga zbog kojeg fotoni u eksperimentu s dva proreza samo slijeću u jednu od svijetlih zona konstruktivne interferencije.

Dakle, talasna priroda elektrona je odgovorna za veličinu atoma, i u velikoj mjeri, za način interakcije atoma s drugim atomima. Ovo, zajedno sa drugim faktorima o kojima će se kasnije raspravljati (kao što su spin i Paulijev princip isključenja), je razlog zašto različite supstance imaju različita svojstva. Dakle, kada je Bog odlučio da zlato treba da bude teško i sjajno, a da vodonik treba da bude lagan i zapaljiv, morao je da dizajnira čestice talasne prirode i zakona fizike koje će dovesti do svih ovih svojstava. Kakav um!

Kratka istorija otkrića

Većina učenika u osnovnoj školi uči o atomima i da se atomi sastoje od protona, neutrona i elektrona. Postojanje atoma je pretpostavio još 450. godine prije Hrista grčki filozof Demokrit. Međutim, naučna potvrda da se sva materija sastoji od atoma pojavila se tek početkom 1800-ih. Elektrone je 1897. otkrio J.J. Tomson. Proton je 1917. godine otkrio Ernest Raderford koji je prethodno (1911.) otkrio da je sav pozitivni naboj u atomu koncentrisan u centralnom jezgru. Neuhvatljivi neutron je 1932. godine otkrio Ser Džejms Čardvik, za koji je 1935. dobio Nobelovu nagradu za fiziku. Mnogi će se možda iznenaditi da o strukturi atoma znamo tek manje od jednog stoljeća.

Naravno, postojanje svjetlosti je poznato još od stvaranja čovječanstva. A talasna priroda svjetlosti poznata je od oko 1800. Ali

otkriće da svjetlost dolazi u diskretnim energetskim česticama – fotonima – došlo je 1905. Albert Ajnštajn je napravio ovo otkriće – fotoelektrični efekat – za šta je dobio Nobelovu nagradu 1922. godine iz fizike. Međutim, termin „foton“ skovan je 1926.

Smatra se da su elektroni elementarni (ili „fundamentalni“) – što znači da se ne sastoje od manjih čestica. Slično tome, fotoni su elementarni. Ali protoni i neutroni su kompozitne čestice. Sastoje se od manjih čestica koje se nazivaju kvarkovi. Postoji šest vrsta kvarkova, ali protoni i neutroni su napravljeni od samo dva tipa najmanje mase. Postoje i druge, egzotičnije čestice koje su napravljene od drugih vrsta kvarkova. Većina ovih čestica je nestabilna – što znači da će se spontano promijeniti u drugu vrstu čestica dok oslobađaju energiju. Postoje određena pravila koja određuju koje vrste čestica mogu postojati i kako (i da li) se mogu transformirati u druge čestice.

Hijerarhija čestica

Kao takve, otkrićemo da sve kvantne čestice spadaju u određene prirodne porodice. Na primjer, elektron je član klase čestica koje se nazivaju leptoni. Postoji šest leptona. Čestice napravljene od kvarkova nazivaju se hadroni. I dok postoji mnogo vrsta hadrona, postoji samo šest vrsta kvarkova.

Nevjerovatno, svojstva kvantnih čestica su toliko matematička da su fizičari mogli predvidjeti postojanje i neka svojstva kvantnih čestica prije nego što su otkrivene! Na primjer, fizičari su davno predvidjeli da će postojati tačno šest vrsta kvarkova i šest vrsta leptona. Sada smo ih sve eksperimentalno otkrili. U stvari, sada su otkrivene sve elementarne čestice predviđene standardnim modelom.

Da biste ilustrovali koliko je ovo nevjerojatno, zamislite biologa koji pažljivo proučava medvjede, pse, zebre, kitove i tako dalje. Budući da nikada nije vidio niti čuo za slona, biolog zaključuje da mora postojati veliki četvoronožni sivi sisar s dugačkom surlom i kljovama, na osnovu matematičkih obrazaca koje opaža kod drugih životinja. Kasnije, drugi biolog putuje u Afriku i potvrđuje postojanje takvog

stvorenja. Naravno, ništa slično se nikada nije dogodilo u biologiji. Ali u fizici, zapravo možemo predvidjeti vrste čestica koje je Bog stvorio na osnovu matematike!

U nastavku ćemo pogledati različite porodice čestica koje je Bog stvorio zajedno sa njihovim svojstvima. Takođe ćemo istražiti kako se ove čestice pretvaraju u druge i pravila koja stoje iza toga. Kada ispitamo kako su čestice klasifikovane u ugnježdenu hijerarhiju; otkrićemo da nema sekularnog objašnjenja. Međutim, prirodne grupe čestica imaju savršen smisao u svjetlu prirode Boga kako je otkrivena u Bibliji.

LEPTONI

Izraz lepton dolazi iz grčkog i znači „mali“ ili „tanak“ i odnosi se na izuzetno nisku masu leptona.³ Elektron je, na primjer, 1800 puta manji od protona.

Klasifikacija leptona

Postoji tačno šest tipova (koja se nazivaju „arome“) leptona. Tri od njih su naelektrisani leptoni; imaju električni naboj od -1 baš kao i elektron. Tri nabijena leptona su elektron (e^-), mion (μ^-) i tau (τ^-). Oni se nazivaju tri generacije naelektrisanih leptona. Mioni su otkriveni 1936. godine i prvobitno su pogrešno klasifikovani kao mezoni (o čemu će se raspravljati u narednom članku). Iz tog razloga, starija literatura bi mogla označiti mione kao mu-mezone. Ali sada znamo da su mioni leptoni i u suštini teže verzije elektrona. Mion je 207 puta teži od elektrona, ali je inače identičan. Tau, otkriven 1970-ih, je 3477 puta veći od mase elektrona. To znači da je tau skoro dvostruko veći od mase protona i da je jedini „teški“ lepton.

Ostala tri leptona su električno neutralna i nazivaju se neutriini – označena grčkim slovom nu (ν). Svaki od tri neutriina je u osnovi

³ Pet od šest tipova leptona su vrlo male mase. Najteži lepton, tau, još nije bio otkriven kada je skovan termin *lepton*.

nenabijena verzija jednog od tri nabijena leptona. Dakle, postoji elektronski neutrino (ν_e), mionski neutrino (ν_μ) i tau neutrino (ν_τ). Sve tri generacije neutrina su izuzetno male mase. U stvari, mnogo godina se smatralo da je elektronski neutrino bez mase. Ali sada imamo dokaz da ima malu količinu mase.⁴ Bez obzira na to, masa neutrina je trenutno manja od naše sposobnosti da eksperimentalno detektujemo, nešto poput milion puta manja od mase elektrona.

Očekivali bismo da naelektrisani leptoni budu daleko masivniji od neutralnih verzija. Kada su dvije čestice obje negativno nabijene (ili obje pozitivno), one se međusobno odbijaju. Dakle, potrebna je energija za guranje sličnih naboja zajedno. Zamislite oblak negativnog naboja, a zatim ga gurnite u mali volumen elektrona.⁵ Ovo bi zahtijevalo energiju. Dakle, elektroni imaju potencijalnu energiju jer sadrže samoodbojni naboj komprimiran u mali volumen. Ajnštajn je otkrio da energija ima masu. A pošto elektroni imaju unutrašnju potencijalnu energiju zbog svog samoodbijajućeg naboja, oni imaju masu. Neutrini nemaju unutrašnju energiju naboja i stoga su mnogo manje masivni od bilo kojeg od nabijenih leptona.⁶

Sablasna priroda neutrina

Sunce je snažan izvor neutrina. U solarnom jezgri vodonik prolazi nuklearnu fuziju da bi postao helijum. Jedan od nusproizvoda ovog procesa su neutrini. Jedan fascinantant aspekt neutrina je njihova sablasna sposobnost da prođu kroz običnu materiju. Teku dalje od jezgra sunca, prolazeći bez napora kroz njegovu masu u svemir. Upravo sada, oko 100 triliona neutrina bezopasno prolazi kroz vaše tijelo svake sekunde! To su upravo oni neutrini koje proizvodi sunce. Ovo

⁴ Otkriće da neutrini osciliraju između okusa pokazuje da imaju konačnu masu miorovanja. Fizičari su matematički demonstrirali da neutrini bez mase ne osciliraju.

⁵ Iako bismo o elektronu mogli razmišljati kao o sićušnoj sferi, on se često ponaša kao da uopšte nema veličinu (kao i sve elementarne čestice). Ovo je samo još jedan primjer kontraintuitivne prirode kvantne fizike.

⁶ Razlog zašto neutrini uopšte imaju bilo kakvu masu je trenutno sporan jer postoji više od jednog mogućih mehanizama.

se nastavlja čak i noću kada je sunce ispod horizonta; neutrini prvo prolaze kroz zemlju, a zatim kroz vaše tijelo i u svemir.

Razlog zašto neutrini mogu proći kroz materiju je taj što je materija uglavnom prazan prostor. Jezgro atoma je sićušno u poređenju sa veličinom atoma. Elektroni kruže na udaljenostima koje su otprilike deset hiljada puta veće od veličine jezgra. Budući da je atom uglavnom prazan prostor, neutrini se može zaustaviti samo ako je malo vjerovatno da će se direktno sudariti s jezgrom ili s jednim od elektrona. Ali vjerovatnoća da se to dogodi je beskonačno mala. U stvari, neutrini može proći kroz otprilike 6 triliona milja čvrstog olova prije nego što je vjerovatno da će udariti u elektron ili jezgro! Ovo sablasno svojstvo neutrina čini ih veoma teškim za otkrivanje. Posledično, detektori neutrina mogu posmatrati samo najmanji dio neutrina koji prođe kroz njih.

S obzirom da su atomi uglavnom prazan prostor, logično je da neutrini mogu neometano proći kroz atome. Postavlja se pitanje zašto to ne rade i druge čestice? Odgovor je da su mnoge druge čestice ili nabijene, sadrže nabijene čestice ili na drugi način stupaju u interakciju s intenzivnim električnim poljem unutar atoma. Sam atom je napravljen od pozitivno nabijenog jezgra i negativno nabijenog elektronskog oblaka. Dakle, na svaku nabijenu česticu koja se približi atomu snažno djeluje električna sila tog atoma. Zbog toga se atomi sudaraju jedan s drugim; njihovi elektronski oblaci su međusobno odbojni.

Spin

Elementarne čestice takođe imaju svojstvo zvano „spin“. To je zato što se matematički ponašaju kao da se rotiraju.⁷ Nijedan vanjski obrtni moment ne uzrokuje ovu rotaciju; čestice se jednostavno rađaju da se „okreću“. Ništa ne može uticati ni na brzinu njihovog okretanja. To je jednostavno svojstvo čestice.

Elektron, na primjer, ima mali magnetni moment – što znači da djeluje kao mali magnet. Magnetski momenti nastaju rotacijom

⁷ Jedini poznati (elementarni) izuzetak je Higsov bozon koji ima spin od nule.

nabijenog objekta. Dakle, elektron se ponaša kao mala nabijena rotirajuća sfera. S druge strane, elektron nema vidljivu veličinu. Pa kako se može rotirati? Ovo je dio čudnosti kvantne fizike.

Najbolje je razmišljati o spinu kao o ugrađenom ugaonom momentu određenih elementarnih čestica. Spin se kvantizira u cjelobrojne ili polucijeje jedinice. To jest, čestice dolaze sa spinom od 0, $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$, 3, itd. Svi leptoni imaju spin od $\frac{1}{2}$. Isto tako i protoni i neutroni.⁸ Svi fotoni imaju spin od 1.

Iako ne možemo uticati na brzinu okretanja, možemo uticati na smjer okretanja. Zamislite da gledate dolje na lopticu koja se okreće u smjeru kazaljke na satu. Sada uzmite tu loptu koja se vrti i okrenite je naopako. Sada će izgledati da se okreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Isto tako, spin elektrona se može okrenuti naopako. Dakle, kada mjerimo spinsko stanje elektrona, ono će biti ili $+\frac{1}{2}$, ili $-\frac{1}{2}$. Dakle, kažemo da su elektroni ili „spin-gore“ ($+\frac{1}{2}$) ili „spin-dolje“ ($-\frac{1}{2}$). Ali veličina njihovog okreta je uvijek tačno polovina.⁹

Možda mislite da bismo mogli da okrenemo elektron na njegovu „stranu“ tako da spin ne bude ni gore ni dolje. Međutim, izmjerena stanja spina su kvantizirana. Detektor će uvijek pronaći spin- $\frac{1}{2}$ česticu ili spin-gore ili spin-dolje. Nisu dozvoljena mjerljiva međustanja.

⁸ U nekom smislu, možete zamisliti veće brojeve okretaja kao brže rotiranje (odgovaraju većem ugaonom momentu). Ali ima više od toga; spin takođe opisuje kako se objekti ponašaju pod rotacijom. Čestice sa spinom 1 djeluju donekle onako kako bismo očekivali. Ako zarotirate spin-1 česticu za 360 stepeni, ona će se vratiti u prvobitno stanje. Međutim, ako zarotirate spin- $\frac{1}{2}$ česticu za 360 stepeni, dobićete obrnutu verziju originala. Morate rotirati spin- $\frac{1}{2}$ česticu za 720 stepeni da biste je vratili u prvobitno stanje. S druge strane, spin-2 česticu treba zarotirati samo za 180 stepeni da bi se vratila u prvobitno stanje.

⁹ Spin stanja su takođe kvantizirana. Za datu česticu, njena spinska stanja su razdvojena cijelim vrijednostima do spina čestice, ili do minusa njenog spina. Dakle, čestica spina 1 može imati spin stanje -1,0 ili +1. Čestica sa spinom $\frac{3}{2}$ može imati spin stanje od $-\frac{3}{2}$, $-\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$ ili $\frac{3}{2}$. Izuzetak od ovog pravila postoji za čestice bez mase mirovanja; imaju samo dva stanja spina – pozitivno ili negativno od njihovog ukupnog spina. Dakle, fotoni mogu imati spin stanje 1 ili -1.

Fermioni i bozoni

Čestice koje imaju polucijeli spin (kao što su $1/2$ ili $3/2$) nazivaju se fermioni. Ovo je u čast Enrika Fermija, koji je zajedno sa Polom Dirakom otkrio način na koji se ponašaju veliki skupovi fermiona. Fermioni se pokoravaju zakonu prirode koji se zove Paulijev princip isključenja. Nazvan po svom otkrivaču, Volfgangu Pauliju, ovaj princip kaže da dva fermiona ne mogu zauzeti isto kvantno stanje u isto vrijeme. U osnovi, to znači da ne možete staviti dva fermiona identičnih spin stanja na datu lokaciju sa istom energijom.

Paulijev princip isključenja, zajedno sa činjenicom da su elektroni fermioni, odgovoran je za atomsku strukturu. Na primjer, koliko elektrona može zauzeti osnovno stanje (najniži energetska nivo) u atomu? Odgovor je dva – ako je jedan spin-gore, a drugi spin-dolje. Ne možete staviti treći elektron u osnovno stanje jer bi imao isti spin, energiju i impuls jednog od druga dva elektrona – isto kvantno stanje. Dakle, treći elektron u atomu mora postojati na višem energetska nivo od osnovnog stanja. Zbog toga atomi imaju kvantizovane elektronske ljuske.

Čestice koje imaju cjelobrojne spinove (kao što su 0, 1, 2) nazivaju se bozoni. Ovo je u čast Satajendra Bozea koji je zajedno sa Albertom Ajnštajnom otkrio način na koji se ponašaju velike grupe bozona. Jedna od glavnih razlika između bozona i fermiona je da bozoni nisu ograničeni Paulijevim principom isključenja. Možete staviti onoliko bozona koliko želite u isto kvantno stanje. Fotoni, čestice svjetlosti, su bozoni. Više fotona može postojati na istom mjestu u isto vrijeme. U stvari, to je ono što je laser. Laserski snop je oblik svjetlosti u kojem postoji mnogo fotona u istom kvantnom stanju.

Stvaranje materije

Pretpostavimo da je Bog dao elektronima spin od 1 umjesto $1/2$. U tom slučaju, elektroni bi bili bozoni, a ne fermioni, i zanemarili bi Paulijev princip isključenja. Svi elektroni u svim atomima bi pali u osnovno stanje. Svi atomi bi se ponašali kao teže verzije vodonika,

hemija ne bi postojala, a biološki život ne bi bio moguć.

S druge strane, pretpostavimo da je Bog dao elektronima spin od $3/2$. Moguća stanja spina za česticu sa $3/2$ spina su $3/2$, $1/2$, $-1/2$ i $-3/2$. Dakle, mogli bismo staviti četiri elektrona umjesto dva u osnovno stanje bilo kojeg atoma. Shodno tome, cijela hemija bi se promijenila. Berilijum bi, na primjer, bio inertan kao što je helijum sada. Samo Bog zna da li bi biološki život bio moguć sa tom alternativnom hemijom.

Antimaterija

Godine 1928, fizičar Pol Dirak pokazao je da jednačina koja upravlja elektronima ima dva moguća rješenja. To jest, jednačina je pokazala da elektroni mogu imati negativan ili pozitivan naboj. U suštini, ovo je pokazalo da osim elektrona, svemir može sadržavati i anti-elektrone (koji se nazivaju i pozitroni) koji su u svakom pogledu identični elektronima osim pozitivnog naboja. Pozitron je definitivno otkriven 1932. Pozitron je bio prva predviđena i prva otkrivena čestica antimaterije: čestica koja ima suprotan naboj od poznate čestice, ali koja je inače identična.

Sada znamo da sve čestice imaju pandan antimaterije. Kao što postoje pozitivno nabijeni protoni, postoje i negativno nabijeni anti-protoni. Kao što postoje mioni i tau čestice, postoje i anti-muoni i anti-tau čestice. Teoretski, mogli bi postojati atomi antimaterije kao što je anti-vodonik u kojem pozitron kruži oko anti-protona.

Neke neutralne čestice su vlastite antičestice. Na primjer, fotoni i antifotoni su identični. Ipak, druge neutralne čestice se razlikuju od svojih parnjaka antimaterije. Neutroni se razlikuju od antineutrona jer su neutroni napravljeni od kvarkova, a antineutroni od antikvarkova.¹⁰

Srećom, čestice antimaterije su rijetke. To jest, u svemiru ima mnogo više protona i elektrona nego antiprotona i pozitrona. Zašto je ovo sreća? Kada čestice materije dodirnu svoju antimaterijsku kolekciju, one se međusobno uništavaju i oslobađaju energiju poput

¹⁰ Trenutno ne znamo da li su neutrini njihova sopstvena antičestica. Ovo je neriješen problem u modernoj fizici.

fotona.¹¹ Da je svemir jednakih djelova materije i antimaterije, ne bismo bili ovdje da o tome raspravljamo. Budući da svemirom dominira materija, većina čestica antimaterije ima samo prolazno postojanje. One nastaju u sudarima čestica visoke energije, da bi bile gotovo odmah uništene kada neizbježno stupe u interakciju s običnom materijom. Nedostatak antimaterije u izobilju je problem u priči o velikom prasku, o čemu će se raspravljati u sledećem članku.

Transformacije čestica

Kvantne čestice imaju sposobnost da se pod određenim okolnostima pretvore u druge čestice. Neki će to učiniti spontano; oni će se jednostavno promijeniti u neku drugu kombinaciju čestica. Spontana transformacija jedne čestice u drugu naziva se „raspad“. Čestice koje se raspadaju na druge čestice nazivaju se „nestabilnim“. Otkrićemo da je ogromna većina kvantnih čestica nestabilna. Imaju samo kratkotrajno postojanje, koje traje manje od mikrosekunde, prije nego što se transformišu u nešto drugo. Čestice koje se ne transformišu spontano u druge nazivaju se „stabilne“.

Elektroni su stabilni. Ovo je važno jer je struktura elektrona ono što određuje hemijska svojstva atoma. Da su elektroni nestabilni, onda hemijska svojstva materije ne bi bila konstantna i biološki život ne bi bio moguć.

Mioni i tauoni su nestabilni. U stvari, veoma su nestabilni. Mioni imaju tipičan životni vijek od 2,197 mikrosekundi. Tau je još nestabilniji; traje samo 2.903×10^{-13} sekundi. Neutrini su stabilni, iako sada znamo da osciliraju (mogu se mijenjati između tri arome).

U mnogim okolnostima zapravo možemo predvidjeti koje su čestice nestabilne i na kakve se čestice raspadaju. To je zato što postoje određeni principi očuvanja koje sve transformacije čestica moraju poštovati. Na primjer, postoji zakon održanja energije. Ovaj zakon zahtijeva da ukupna energija svih čestica prije transformacije mora biti jednaka ukupnoj energiji svih čestica nakon transformacije. Ovo

¹¹ Sami fotoni (i antifotoni) su izuzeti iz ovog obrasca jer su već fotoni.

uključuje masu svih čestica jer je masa vrsta potencijalne energije. Jedna implikacija zakona održanja energije je da masivne čestice teže raspadu na manje masivne čestice koje nose dio energije u obliku kretanja. Generalno, što je čestica masivnija, to se brže raspada.

Druga očuvana veličina je električni naboj. Ukupni naboj svih čestica prije interakcije mora biti isti kao i ukupni naboj nakon interakcije. Dakle, mion se ne može raspasti u jedan pozitron, jer naboj prije transformacije (-1) ne bi odgovarao naboju nakon (+1).

Ukupni zamah je takođe očuvan. Moment je proizvod mase i brzine. Zamah čestice prije njenog raspada mora tačno odgovarati zbiru impulsa svih čestica nakon raspada.

Spin stanje je takođe očuvano. Ukupna dodana spinska stanja svih čestica prije i poslije transformacije moraju se podudarati. Zapamtite, spin stanja mogu biti pozitivna ili negativna. Dakle, čestica spina $+\frac{1}{2}$ može se raspasti na dvije čestice: česticu sa spinom $-\frac{1}{2}$ i česticu sa spinom $+1$. Ili se može raspasti na tri čestice sa spinskim stanjima, $+\frac{1}{2}$, $+\frac{1}{2}$ i $-\frac{1}{2}$. Postoje i druge mogućnosti.

Leptonski broj je takođe očuvan. Leptonski broj se jednostavno odnosi na broj prisutnih leptona. Dakle, elektron ima leptonski broj 1. Kao i mion, tau i svaki od tri okusa neutrina. Antileptoni imaju negativne leptonske brojeve. Dakle, pozitron ima leptonski broj -1. Svi ne-leptoni imaju leptonski broj nula.

Postoje i neke kvazi-konzervirane količine; oni su sačuvani u većini transformacija, ali ne u svim. Broj elektrona, mionski broj i tau broj su kvazikonzervirani. Elektroni i elektron-neutrini imaju broj elektrona jedan. Isto tako, mioni i mion-neutrini imaju mionski broj jedan, itd. Anti-muoni i mionski anti-neutrini imaju mionski broj -1 baš kao što bismo očekivali.

Uopšteno, ako se masivna čestica može raspasti na manje masivne čestice bez kršenja bilo kojeg od gornjih pravila, to će i učiniti. Stoga možemo predvidjeti koje su čestice stabilne, a koje nestabilne. Takođe možemo predvidjeti neke od mogućih čestica kćeri koristeći pravila očuvanja.

Raspad leptona

Sa ovim pravilima možemo zaključiti koji se leptoni raspadaju i kako. Na primjer, mion se raspada na tri čestice: elektron, elektronski anti-neutrino i mionski neutrino. Ukupna masa ove tri čestice je manja od mase miona. Dakle, energija je očuvana (kinetička energija rezultirajućih čestica odnosi razliku u ukupnoj masi). Naboj se čuva jer je ukupni naboj prije i poslije -1 . Spin stanje je očuvano; ako se mion okreće prema gore ($+\frac{1}{2}$), tada tri spin- $\frac{1}{2}$ čestice mogu biti $+\frac{1}{2}$, $+\frac{1}{2}$ i $-\frac{1}{2}$ što zbir iznosi $\frac{1}{2}$. Leptonski broj je očuvan jer anti-neutrino ima leptonski broj -1 , koji kada se doda na druga dva leptona daje ukupan leptonski broj 1 . Broj elektrona i broj miona su u ovoj reakciji očuvani jer elektronski anti-neutrino ima negativan broj elektrona, poništavajući elektron. A mionski neutrino ima mionski broj 1 .

Šta je sa tauom? Pošto je veoma masivna, vrlo brzo propada. A pošto postoji mnogo čestica manje masivnih od taua, postoji mnogo različitih načina na koje se može raspasti. Jedna mogućnost je da se tau raspadne na elektron, elektronski anti-neutrino i tau neutrino. Možete vidjeti da ova reakcija čuva energiju, naboj, spin stanje, leptonski broj, itd. Druga mogućnost je da će se tau raspasti u mion, mionski anti-neutrino i tau neutrino. Ovo isto tako poštuje sve zakone očuvanja. Naravno, mion će se tada raspasti na elektron, elektronski anti-neutrino i mionski neutrino. Budući da postoji nekoliko drugih tipova čestica manje masivnih od tau (o kojima još nismo raspravljali), moguće je nekoliko drugih puteva raspadanja. Ali u svim slučajevima uvijek se poštuju zakoni o očuvanju.

Takođe možemo vidjeti zašto elektron mora biti stabilan. Elektron se ne može raspasti ni u jednu kombinaciju neutrina jer naboj ne bi bio očuvan. Svaki raspad elektrona mora rezultirati ukupnim nabojem svih čestica koji je jednak -1 . Ali ne postoje nabijene čestice manje masivne od elektrona. Dakle, ne može se raspasti.

Takođe, neutrimi se ne mogu raspasti.¹² U početku bismo mogli

¹² Neutrini osciliraju – što znači da mogu prelaziti s jedne arome na drugu. Ali ovo nije propadanje u tradicionalnom smislu. Radije se radi o tri preklapajuće talasne

pomisliti da bi se mogli raspasti u fotone, budući da su fotoni bez mase i nemaju naboj. Ali to bi narušilo očuvanje leptonskog broja. Takođe, nijedna kombinacija fotona ne može proizvesti $+\frac{1}{2}$ ili $-\frac{1}{2}$ spin stanje, pošto su fotoni bozoni.

Iako se čestice mogu prirodno raspasti samo na manje masivne čestice, moguće je natjerati reakciju da krene u drugom smjeru davanjem velike količine energije. Ovako rade akceleratori čestica – poput onih u CERN-u ili Fermilabu. Oni ubrzavaju čestice do velikog udijela brzine svjetlosti u suprotnim smjerovima i dopuštaju im da se sudare. Ako je kinetička energija u takvim sudarima veća od mase čestice, čestica se može proizvesti. Tipovi proizvedenih čestica su vođeni gornjim zakonima očuvanja.

Na primjer, mogu se proizvesti samo čestice manje ili iste mase kao energija sudara. To je razlog zašto snažniji akceleratori čestica mogu proizvesti masivnije čestice. Takođe, promjena neto naboja mora biti nula, a leptonski broj i ukupno spin stanje su takođe očuvani. Stoga, ako se u takvom sudaru stvori elektron, nastaje i antielektron (pozitron). Energija iz sudara čestica uvijek rezultira proizvodnjom potpuno jednake količine materije i antimaterije.

Postojanje neutrina je predviđeno na osnovu gore navedenih zakona očuvanja. Fizičari su otkrili da se neutroni mogu raspasti na proton i elektron. Ali ukupna energija protona i elektrona je uvijek bila nešto manja od ukupne energije neutrona. A ni ukupni zamah nije bio očuvan. Godine 1930. Wolfgang Pauli je predložio da mora biti proizvedena treća čestica koja je odnijela dodatnu energiju i zamah. Ova čestica bi morala biti neutralna da bi se naboj očuvao. I morala bi biti vrlo mala masa jer je u nekim slučajevima samo mala količina energije „nedostajala“. Kao takav, to bi bio neutrino – na italijanskom znači „mali neutralni“.

Sablasna priroda neutrina čini ga izuzetno teškim za otkrivanje. Pauli je jednom hirovito izjavio: „Učinio sam užasnu stvar,

funkcije koje se šire različitim brzinama, čineći vjerovatnoću detekcije određene arome neutrina funkcijom energije i udaljenosti.

pretpostavio sam česticu koja se ne može otkriti.“ Trebalo je dvije i po decenije, ali je neutrino definitivno otkriven 1956.

Kvantumska astronomija

Jedna zanimljiva kvantna interakcija koja je vrlo relevantna u astronomiji uključuje elektron u osnovnom stanju atoma vodonika. Proton atoma vodonika je fermion sa $\frac{1}{2}$ spina. Stoga može biti ili spin-gore ($+\frac{1}{2}$) ili spin-dolje ($-\frac{1}{2}$). Elektron koji kruži oko tog protona je takođe spin $\frac{1}{2}$, i može se okretati prema gore ili prema dolje. Ako su dva spina u istom smjeru (oba spin-gore ili oba spin-dolje), energetska stanje elektrona je nešto veće nego što bi bilo da su spinova stanja suprotna.¹³ Stoga je moguće da se atom vodonika sa usaglašenim spinskim stanjima „raspadne“ u atom vodonika sa suprotnim spin stanjima.

Energetska razlika između dva stanja je samo $5,9 \times 10^{-6}$ eV. Elektron može promijeniti svoje spin stanje - ali samo poštujući sva pravila očuvanja. Mora osloboditi tačno $5,9 \times 10^{-6}$ eV energije. Jedina otkrivena čestica s masom manjom od $5,9 \times 10^{-6}$ eV je foton.¹⁴ Štaviše, ukupni spin sistema je otišao sa 1 na nulu. Stoga mora osloboditi česticu sa spinom od 1. Fotoni imaju spin od 1. Naravno, atom vodonika može pasti iz poravnatog spin-stanja u stanje nešto niže energije (anti-poravnato) oslobađanjem fotona sa energija $5,9 \times 10^{-6}$ eV, što odgovara talasnoj dužini od 21 cm. Ovo je u radio području elektromagnetnog spektra. Astronomi koriste radio teleskope kako bi otkrili ovu liniju od 21 cm i mapirali strukturu galaksije Mliječni put. Naša galaksija „sjaji“ u radio talasima od 21 cm jer elektroni u njenim atomima vodonika konstantno prelaze iz poravnatih u anti-poravnata spinska stanja.

¹³ To je zbog magnetnih momenata protona i elektrona. Elektron koji okreće svoj spin je sličan guranju dvije šipke magneta zajedno (od sjevera prema sjeveru), a jedan od njih se okreće.

¹⁴ Još neotkriveni graviton takođe mora imati masu mirovanja nula – kao i foton. Međutim, graviton ima spin od 2 i stoga se ne može emitovati kao rezultat spinskog stanja okretanja elektrona.

Uobičajene i egzotične čestice

Od šest leptona, jedini koji ljudi direktno doživljavaju su elektroni. Električna energija nastaje zbog protoka elektrona, a električnost nam je svima poznat. Mion i tau čestica imaju tako kratkotrajno postojanje da je potrebna specijalizovana oprema za njihovo otkrivanje. I iako tri arome neutrina neprestano prolaze kroz naša tijela svake sekunde, oni su nevidljivi i rijetko stupaju u interakciju s običnom materijom.

Isto tako, znamo nešto o protonima i neutronima, jer smo napravljeni od njih. Oni su prvenstveno odgovorni za našu masu. Ali oni su samo dva primjera klase čestica koja sadrži mnoge druge.

KVARKOVI

U jezgru svakog atoma nalazi se nukleus koje se sastoji od jednog ili više protona, kao i (osim vodonika) nekih neutrona. Protoni i neutroni su odgovorni za većinu mase atoma. Elektroni „kruže“ oko ovog centralnog jezgra, uglavnom u jednakom broju kao i protoni, što cjelokupni atom čini električno neutralnim. Elektroni su elementarni – što znači da nisu napravljeni od manjih čestica. Ali protoni i neutroni su kompozitne čestice; oni su napravljeni od manjih čestica zvanih kvarkovi.

Kvarkovi nasuprot leptonima

Pošto je Bog Bog reda, različiti objekti koje je stvorio mogu se klasifikovati u prirodne porodice na osnovu sličnosti i razlika. U prethodnom članku smo ispitali familiju čestica zvanih leptoni koji su čestice vrlo male mase (osim tau). Otkrili smo da postoji tačno šest tipova (koja se nazivaju arome) leptona, od kojih tri imaju električni naboj od -1 (elektron, mion i tau), a tri su nenaelektrisane (neutrini). Postoje tri generacije leptona, sa dvije čestice (razlikuju se po električnom naboju) u svakoj generaciji.

Čestice koje se sastoje od protona i neutrona nazivaju se kvarkovi. I, kao i kod leptona, postoji tačno šest tipova (aroma) kvarkova.

Nadalje, postoje tri generacije, sa dva kvarka u svakoj generaciji (i koji se razlikuju po električnom naboju). Kao što svaki lepton ima spin od $\frac{1}{2}$, isto tako svaki kvark ima spin od $\frac{1}{2}$. Dakle, i kvarkovi i leptoni su fermioni – necjelobrojne spin čestice koje se pokoravaju Paulijevom principu isključenja. Poput leptona, kvarkovi nemaju veličinu koja se može detektovati. Na sve ove načine, sličnost između kvarkova i leptona je izuzetna.

Ali postoje i neke razlike. A ove razlike čine kvarkove malo komplikovanijim od leptona. Mogli bismo misliti o leptonima kao o introvertima svemira. Savršeno su srećni sami i mogu se naći odvojeno od bilo koje druge čestice. Naravno, nabijeni leptoni mogu komunicirati s drugim česticama; elektroni mogu kružiti oko jezgra atoma, ali imaju tendenciju da drže udaljenost. I naravno, neutrini su potpuno antisocijalni. Oni uglavnom zanemaruju sve ostale čestice i jedni druge osim ako ne dođe do direktnog sudara.

Kvarkovi su, s druge strane, ekstrovertni. Oni su uvijek okruženi i u interakciji s drugim česticama. Koliko znamo, kvarkovi se nikada ne nalaze u izolaciji. Oni postoje samo u kombinaciji s drugim česticama. Kasnije ćemo vidjeti razlog za to. Za sada je dovoljno znati da se kvarkovi uvijek javljaju u kombinacijama. Često će se pojaviti u grupama od tri da bi formirale kompozitne čestice poput protona i neutrona. Naziv „kvark“ odnosi se na ovo troje. Preuzet je iz prvog retka poeme o Kralju Marku koju je napisao Džejsms Džojns i koja je uključena u Fineganovo bdenje: „Tri kvarka za Smotrenog Marka!“

Svojstva kvarkova

Kvarkovi padaju u tri generacije sa po dvije čestice u svakoj, ukupno šest aroma, baš kao i leptoni. Ali postoje dvije značajne razlike. Prvo, kvarkovi su mnogo masivniji od leptona.¹⁵ Nadalje, postoje dvije različite mase za svaki kvark. To je zato što kvarkovi imaju snažno energetska polje koje ih okružuje; ta energija ima masu.

¹⁵ Osim naravno za tau. Svi kvarkovi (po konstitutivnoj masi) su teži od svih leptona izuzev tau. Ali čak i donji i gornji kvarkovi su teži od taua.

„Konstitutivna masa“ je ukupna masa kvarka zajedno sa njegovim poljem. „Trenutna masa“ je masa stvarnog kvarka ako bismo je nekako mogli odvojiti od njegovog energetskog polja – što zaista ne možemo učiniti. Dakle, konstitutivna masa je relevantna masa u praktičnim primjenama i jedina koju ćemo koristiti u budućnosti.

Drugo, kvarkovi imaju djelimičan električni naboj. Na primjer, donji kvark je negativno nabijen, ali ima samo $1/3$ naboja elektrona. Gornji kvark ima pozitivan naboj, ali je $2/3$ naboja protona.

Postoji i šest vrsta antikvarkova. Oni su identični kvarkovima u svakom pogledu osim što su im naboji obrnuti.¹⁶ Dakle, gornji antikvark ima naelektrisanje od $-2/3$ dok donji antikvark ima naelektrisanje od $+1/3$. Koliko znamo, kvarkovi i antikvarkovi su jedine čestice s necjelobrojnim nabojem.

Iako kvarkovi sami po sebi imaju frakcijski naboj, oni će se kombinovati samo na načine da naprave kompozitnu česticu s cjelobrojnim nabojem. Često se grupišu u grupe od tri. Na primjer, proton je napravljen od dva gornja kvarka i jednog donjeg kvarka. Dodavanje $2/3$ plus $2/3$ plus $-1/3$ daje $+1$. Dakle, proton ima naelektrisanje od $+1$. Neutron je napravljen od jednog kvarka gore i dva donja kvarka za ukupni naboj od $(2/3 - 1/3 - 1/3) = 0$. Usput, „gore“ i „dolje“ su jednostavno imena i nemaju veze sa stanjem okretanja.¹⁷

Kao i kod naelektrisanih leptona, više generacije kvarkova su progresivno masivnije, pri čemu je gornji kvark težak 189 puta veći od mase protona! Podsjetimo iz prethodnog članka da su masivnije čestice obično nestabilne. One će se spontano raspasti na manje masivne čestice sve dok se pridržavaju svih zakona očuvanja. Ovo važi i za kvarkove. Naravno, gornji i donji kvarkovi imaju najbrže raspadaanje, a slijede ih šarm i čudni kvarkovi. Gornji i donji kvarkovi su potencijalno stabilni, ali njihova stabilnost zavisi od toga kako su grupisani. Zapamtite, kvarkovi nikada nisu sami. Dakle, njihova blizina

¹⁶ Ovo poništavanje naboja uključuje „naboj u boji“ kao što je objašnjeno kasnije.

¹⁷ To jest, kvark nagore može biti ili spin-gore ($+1/2$) ili spin-dolje ($-1/2$). I isto tako je sa donjim kvarkom.

drugim česticama može uticati na to da li se raspadaju ili ne.

Naboj u boji i jaka sila

Jezgro atoma helija sadrži dva protona i dva neutrona povezana zajedno. Ali šta ih vezuje? Razumijemo da elektroni teže da ostanu sa svojim atomom jer su negativno nabijeni i stoga ih privlače pozitivno nabijeno jezgro. Ali oba protona su svaki pozitivno nabijena. Dakle, zar ne bi trebalo da se odbijaju? Fizičari su vrlo rano prepoznali ovaj problem i zaključili da između protona mora postojati neka druga sila – privlačna sila – koja je još snažnija i stoga nadvladava njihovo električno odbijanje. Ova sila je takođe odgovorna za držanje kvarkova u protonu zajedno. Zove se jaka nuklearna sila ili jednostavno jaka sila.

Jaka sila je u mnogim aspektima slična električnoj. Obje sile mogu uzrokovati da se dvije čestice privlače ili odbijaju. Ali postoje neke razlike. Prvo, jaka sila je mnogo, mnogo jača od električne sile (otuda i naziv). Drugo, jaka sila ima izuzetno ograničen domet.¹⁸ U stvari, on se zaista ne proteže mnogo dalje od jezgra atoma. Zbog toga ne uočavamo jaku silu u našim posmatranjima makroskopskih objekata.

Treće, električna sila sadrži samo dvije vrste naboja, koje nazivamo „pozitivnim“ i „negativnim“. Ali jaka sila ima šest vrsta punjenja. Fizičari koriste boju za predstavljanje ovih naboja. Tri od ovih boja su crvena, zelena i plava. Ostala tri se zovu anti-crvena, anti-zelena i anti-plava. (Često ih prikazujemo kao cijan, ljubičastu i žutu – suprotne ili komplementarne boje crvena, zelena i plava). Ovi naboji u boji nemaju apsolutno nikakve veze s onim što mi inače smatramo „bojom“ u smislu našeg vizuelnog iskustva. Termini crvena, zelena i plava su jednostavno oznake koje koristimo da opišemo tri od šest vrsta naboja povezanih s jakim silom. Ali kasnije ćemo vidjeti da postoji veza s vizuelnom bojom kada je u pitanju način na koji se ti

¹⁸ Nasuprot tome, raspon električne sile je (u principu) beskonačan, iako se smanjuje u snazi kao kvadrat udaljenosti.

naboji boje dodaju. Dakle, boja je korisna analogija.

Kasnije ćemo istražiti kako ovih šest naboja funkcionišu u smislu privlačenja ili odbijanja ostalih. Ovdje ćemo se fokusirati samo na prve tri: crveni, zeleni i plavi. Kao i kod električne sile, slični naboji se odbijaju. Dakle, čestica sa nabojem crvene boje bi odbila drugu česticu sa nabojem crvene boje. Ali različite boje privlače. Dakle, čestica s crvenim nabojem će privući česticu s plavim ili zelenim nabojem. Isto tako, plava će privući crvenu ili zelenu; zelena će privući crvenu ili plavu.

Svaki od šest tipova kvarkova dolazi sa jednim od ova tri naboja u boji. Dakle, na neki način, zapravo postoji 18 kvarkova jer svaka od šest aroma dolazi s crvenom, zelenom ili plavom bojom. Nasuprot tome, svaki antikvark dolazi u jednoj od tri anti-boje: anti-crvena, anti-zelena ili anti-plava. Ali čestice o kojima ćemo govoriti napravljene su samo od kvarkova, a ne od antikvarkova. Dakle, trebamo adresirati samo tri od šest naboja u boji – crveni, zeleni i plavi.

Šta se dešava kada uzmete crveni reflektor, zeleni reflektor i plavi reflektor i usmjerite ih sve na isto mjesto? Dobićete bijelo. Slično tome, čestica koja je napravljena od jednake količine crvenih, zelenih i plavih čestica nabijenih boja imaće ukupnu boju „bijela“ – biće neutralna u boji. Upravo je to slučaj sa protonom i neutronom. Proton ima jedan crveni kvark, jedan zeleni kvark i jedan plavi kvark. Pošto su ova tri naboja međusobno privlačna, tri kvarka se drže zajedno stvarajući proton neutralne boje. Isto tako, svaki neutron je napravljen od jednog crvenog kvarka, jednog zelenog kvarka i jednog plavog kvarka.

U stvari, kvarkovi unutar protona stalno zamjenjuju naboje boja jedan s drugim. Vidjećemo kako to funkcioniše kasnije. Ali u svakom trenutku, jedan od kvarkova ima crvenu boju, drugi zelenu, a preostali kvark plavu. Kompozitne čestice su uvijek neutralne boje. Čini se da je ovo zakon prirode.

Ako je svaki od dva protona u jezgri atoma helijuma neutralan u boji, zašto se onda privlače? Pa, na neki način ne privlače se – barem ne direktno na isti način na koji se privlače kvarkovi unutar protona.

Iako se tri kvarka sabiraju kako bi formirali proton neutralan u boji, poništavanje nije savršeno jer ova tri kvarka imaju malo različite položaje. Ovo rezultira rezidualnim poljem naboja u boji koje se proteže malo dalje od protona. To se ponekad naziva rezidualna jaka sila. Udaljenost između dva protona u helijumu je upravo unutar granice dometa preostale jake sile.

Razlog zašto leptoni nemaju nijednu od ovih komplikacija je taj što su svi neutralni u boji. Oni nemaju naboj boje, pa stoga leptoni ne doživljavaju jaku silu. Ni fotoni. Ali kvarkovi posjeduju naboj u boji, a pošto je jaka sila daleko moćnija od bilo koje druge sile, to objašnjava zašto kvarkovi dolaze u grupama od po tri.¹⁹ U stvari, količina energije potrebna za odvajanje kvarka od druga dva je više nego dovoljna za stvaranje novih kvarkova/antikvarkova. Dakle, novi kvark će odmah popuniti upražnjeno mjesto. Stoga se kvarkovi ne mogu izolovati. Uvijek dolaze u grupama.

Iz tog razloga, zaista moramo ispitati kompozitne čestice koje kvarkovi (i/ili antikvarkovi) imaju tendenciju da formiraju. Ove kompozitne čestice se nazivaju hadroni. Okus kvarkova ili antikvarkova u hadronu, zajedno sa načinom na koji se kvarkovi kombinuju u smislu njihovih spinskih stanja, određuje svojstva hadrona. Budući da kompozitne čestice moraju biti neutralne u boji, postoje dva načina na koja će se kvarkovi ili antikvarkovi kombinovati, a samim tim i dvije vrste adrona. Prvo, kvarkovi se mogu kombinovati u grupe od tri (jedan crveni kvark, jedan zeleni kvark i jedan plavi kvark) u česticu koju nazivamo barion. Drugi način da se generiše bezbojni hadron je kombinovanje jednog kvarka sa jednim antikvarkom suprotnog naboja (kao što je crveni kvark i anti-crveni antikvark) u česticu koju nazivamo mezon. Barioni su supstanca kosmosa.

¹⁹ Alternativno, kvarkovi mogu doći u parovima kvark/antikvark. To su mezoni. Mezoni su takođe neutralne boje.

BARIONI

Gospod je stvorio određene vrste fundamentalnih čestica i odredio pravila kojima se te čestice povinuju. To je ono što omogućava bogatu raznolikost supstanci u današnjem svemiru. Sada ćemo razmotriti barione – supstancu kosmosa. Otkrićemo da barioni potvrđuju biblijsko stvaranje i osporavaju sekularna objašnjenja.

Barion je svaka čestica napravljena od tačno tri vezana kvarka.²⁰ Svaki kvark dolazi u jednom od dva moguća spin stanja, $+\frac{1}{2}$ (spin gore) ili $-\frac{1}{2}$ (spin dolje). A pošto postoje tri kvarka, ukupno spinsko stanje bariona će biti zbir spinskih stanja njegovih kvarkova: $-\frac{3}{2}$, $-\frac{1}{2}$, $+\frac{1}{2}$ ili $+\frac{3}{2}$. Dakle, veličina spina bariona je ili $\frac{1}{2}$, ili $\frac{3}{2}$.²¹ Pošto imaju necjelobrojni spin, svi barioni su fermioni i poštuju Paulijev princip isključenja – ne mogu biti u istom kvantnom stanju u isto vrijeme. Svi barioni su neutralni u boji jer imaju jedan crveni kvark, jedan zeleni kvark i jedan plavi kvark. Ipak, mogu se vezati za druge barione zaostalom jakom silom zbog svojih sastavnih kvarkova.

Defekt mase

Dva bariona koja su nam najpoznatija su proton i neutron sa sastavom uud (gornji, gornji i donji kvarkovi) i udd (gornji, donji i donji kvarkovi), respektivno. Dakle, za proton, ako saberemo (konstitutivne) mase dva gornja kvarka sa jednim donjim kvarkom dobijamo $1012 \text{ MeV}/c^2$. Ipak, mnogi eksperimenti su otkrili da je masa protona $938 \text{ MeV}/c^2$. Cjelina je manja od zbira njenih dijelova! Gdje je otišlo ostalih $74 \text{ MeV}/c^2$? Ranije smo otkrili da elektron ima određenu masu zbog svog samoodbijajućeg naboja. Odnosno, bila bi potrebna energija da se oblak negativnog naboja ubaci u tako mali volumen jer je međusobno odbojan. Ta energija ima masu i stoga čini elektron težim od elektronskog neutrina. U slučaju tri kvarka u protonu, oni se

²⁰ Ovo je pojednostavljeno objašnjenje. Naravno, mislim na valentne kvarkove, a ne na „morske kvarkove“.

²¹ Ovo ne uključuje pobuđena stanja u kojima kretanje kvarka doprinosi spinu – o čemu će se govoriti kasnije.

međusobno privlače zbog jake sile. Situacija je suprotna jer bi bila potrebna energija da ih se povuče. Dakle, oni imaju manje energije u vezanom stanju nego što bi imali kada bismo ih nekako razdvojili. Ta energija vezivanja je negativna; dakle, smanjuje masu sistema. Ovo se zove defekt mase.

Svaki sistem u kojem su čestice vezane privlačnom silom imaće manju masu nego kada bi se iste čestice mogle razdvojiti.²² Jaka sila je toliko moćna da je energija povezana s njom često uporediva s masom uključenih čestica. Stoga ne možemo pretpostaviti da će masa kompozitne čestice biti samo zbir masa njenih komponenti. Moramo uključiti negativne doprinose energije vezivanja, kao i pozitivne doprinose energije kretanja, usklađenih spinskih stanja, itd.

Zamislite jezgro helijuma. Sadrži dva protona i dva neutrona. Ako dodamo masu dva protona i dva neutrona, dobićemo $3755,7 \text{ MeV}/c^2$. Ipak, masa jezgra helijuma je $3726,7 \text{ MeV}/c^2$. Dakle, defekt mase je $29 \text{ MeV}/c^2$. To znači da bi bilo potrebno 29 MeV energije da se odvoje četiri čestice u jezgru helijuma. To takođe znači da ako bismo mogli spojiti dva protona i dva neutrona u jezgro helijuma, ovaj proces bi oslobodio 29 MeV energije po atomu helijuma. Ovako funkcioniraju nuklearna fuzija. U jezgru Sunca, vodonik se neprestano spaja u helijum, oslobađajući ogromnu količinu energije.

Isto tako, masa bariona je određena prvenstveno konstitutivnom masom njihovih kvarkova, ali na nju utiče i unutrašnja energija sistema. Zamislite neutralni delta barion. Sastoji se od jednog gornjeg kvarka i dva donja kvarka. To je potpuno isti sastav kvarka kao i neutron. Ipak, neutralna delta ima masu od $1232 \text{ MeV}/c^2$, dok neutron ima masu od samo $940 \text{ MeV}/c^2$. Neutralna delta ima veću unutrašnju energiju jer sva tri njena kvarka imaju isto (usklađeno) spin stanje, dok neutron ima jedan kvark anti-poravnan sa druga dva. Spin bariona je

²² Iako ovo važi i za hemiju, razlika je obično premala da bi se izmjerila. Ipak, atom vodonika je nešto manje masivan od mase njegovog elektrona i protona (ako su bili široko razdvojeni).

zbir spinskih stanja njegovih sastavnih čestica.²³ Dakle, neutron ima spin od $\frac{1}{2}$, ali delta ima spin od $\frac{3}{2}$. Delta je fundamentalno drugačija čestica s različitim svojstvima od neutrona iako imaju identičan sastav kvarkova!

Porodice bariona

Barioni se dijele u šest prirodnih porodica na osnovu sastava kvarkova i spinskih stanja njihovih kvarkova. Ova spinska stanja utiču na ukupnu masu i ukupan spin rezultujućeg bariona. Protoni i neutroni su jedina dva člana porodice nukleona.²⁴ Nukleoni su barioni koji se sastoje samo od gornjih i donjih kvarkova, pri čemu je spin jednog kvarka anti-poravnat sa druga dva. Nukleoni imaju spin od $\frac{1}{2}$ i najmanje su masivni barioni.

Ostalih pet porodica bariona su nazvane po grčkom slovu. Delta (Δ) barioni su takođe napravljeni samo od gornjih i donjih kvarkova, ali imaju spin od $\frac{3}{2}$ jer su svi njihovi sastavni kvarkovi centrirani po spinu. Postoje četiri delta čestice. Sva četiri imaju masu od $1232 \text{ MeV}/c^2$. Δ^{++} se sastoji od tri gornja kvarka i ima naboj od $+2$. Δ^+ se sastoji od dva gornja kvarka i jednog donjeg kvarka (kao proton) i stoga ima naboj od $+1$. Neutralna delta (Δ^0) ima jedan gornji kvark i dva donja kvarka (kao neutron) i ima naboj od 0 . Δ^- sastoji se od tri donja kvarka i ima naelektrisanje od negativnog.

Lambda barioni sadrže jedan gornji kvark, jedan donji kvark i jedan od težih kvarkova (čudni, šarm ili donji). Oni takođe imaju polovinu okretanja jer je jedan kvark uvijek u suprotnosti sa druga dva. Ali oni su teži od nukleona jer je jedan od njihovih sastavnih kvarkova

²³ Sada znamo da gluoni takođe doprinose stanju spina. Ali ovaj detalj je izvan okvira ovog članka.

²⁴ Možda se pitate zašto nema nukleona sa tri gornja ili tri donja kvarka. Međutim, oni ne mogu postojati zbog generaliziranog Paulijeveog principa. Ovaj princip daje dodatna pravila o tome koja su spin stanja dozvoljena. Na primjer, ako su sva tri kvarka iste arome, onda i oni moraju biti centrirani (kao kod Delta bariona). Ali nukleoni po definiciji imaju jedan kvark anti-poravnat s druga dva. Tri kvarka iste arome postoje u delta barionima, jer su centrirani spinom.

teži. Postoje tri lambda bariona.

Tri preostale porodice su Sigma, Xi i Omega. Ove porodice uključuju neke od težih kvarkova. Svaka od ovih porodica sadrži mnogo članova. Postoji 18 članova porodice sigma. Svaki ima dva laka kvarka (gornji ili donji) i jedan teži kvark. Xi (koji se nazivaju i kaskadni) barioni sadrže samo jedan laki kvark (bilo gornji ili donji) i dva teža kvarka. Omega barioni sadrže samo teže kvarkove i ne sadrže gornje i donje kvarkove. Imajte na umu da nijedan barion ne sadrži top kvarkove. Iako se top kvarkovi mogu formirati u visokoenergetskim sudarima u neposrednoj blizini drugih kvarkova, top kvark se raspada tako brzo da se ne može smjestiti u poseban barion.

Osim spinskih stanja kvarkova, kvarkovi se također mogu okretati jedan oko drugog, što proizvodi dodatni spin za barion u cjelobrojnim jedinicama. Ovo je isto kao što elektroni postoje u pobuđenom stanju u atomu. Ova pobuđena nuklearna stanja rezultiraju dodatnom masom zbog dodatne energije. Također, ovo orbitalno kretanje može ili povećati (ako je poravnato) ili smanjiti (ako je neusklađeno) spin bariona za cjelobrojne vrijednosti. Na primjer, pobuđeni delta barioni mogu imati spinove od $5/2$, $7/2$, $9/2$, $11/2$ itd. Oni također mogu imati spin od $1/2$ ako je ugaoni moment kretanja kvarka suprotan smjeru njihovog okretanja. Pobuđena stanja imaju tendenciju da budu vrlo kratkotrajna i brzo propadaju.

Barionska stabilnost

Neki ljudi se mogu zapitati zašto su čuli samo za protone i neutrone, a ne i za mnoštvo drugih bariona. Razlog je taj što svi ostali barioni postoje samo djelić milisekunde prije nego što se raspadnu – oni se spontano transformišu u druge čestice. Baš kao što se teži leptoni (mion i tau) raspadaju na druge čestice, tako se raspada i većina bariona.

Međutim, svi zakoni o očuvanju moraju se poštovati. Ovi zakoni ograničavaju koje vrste propadanja su moguće. Na primjer, ukupni naboj svih proizvoda kćeri mora odgovarati naboju roditeljskog bariona

jer je naboj očuvan. Leptonski broj se mora podudarati. (Barioni imaju leptonski broj nula. Dakle, ako proizvedu lepton u raspadu, moraju proizvesti i antilepton.) Ukupna energija je očuvana – što znači da se barioni mogu raspasti samo na manje masivne čestice (sa kinetičkim energija čestica kćeri koje nose razliku u masi).

Pored zakona održanja koje smo obradili u dijelu o leptonima, postoji i očuvanje barionskog broja. Barionski broj je upravo ono što mislite da jeste: broj bariona. Svaki barion ima barionski broj 1. Antibarion (sastavljen od tri antikvarka) bi imao barionski broj -1. Kvar-kovi imaju barionski broj $1/3$, a antikvarkovi imaju barionski broj $-1/3$. Sve ostale čestice imaju barionski broj nula.

Jedna implikacija očuvanja barionskog broja je da kada se barion raspadne, barem jedna od čestica na koje se raspadne takođe će biti barion. A pošto teži barioni mogu da se raspadnu samo u lakši, logično slijedi da se najlakši barion ne može raspasti. Najlakši barion je proton sa masom od $938,272 \text{ MeV}/c^2$. I zaista, protoni su stabilni. Neće se spontano raspasti ni u šta drugo.

U stvari, svi barioni osim protona su nestabilni. Oni će se raspasti u lakše barione, proizvodeći druge čestice u procesu da sačuvaju energiju, spin stanje i naboj. Teži barioni imaju tendenciju najbržeg raspadanja. To je uglavnom zbog kratkog vijeka trajanja donjih i šarm kvarkova, te donekle i čudnog kvarka. Može biti iznenađujuće saznati da su čak i neutroni (malo) nestabilni. Neutroni imaju masu od $939,565 \text{ MeV}/c^2$ – samo nešto masivniju od protona. Stoga se mogu raspasti. Izolovani neutron će se raspasti na proton, elektron i elektronski antineutrino. (Možete provjeriti da li ovo zaista čuva električni naboj, leptonski broj, broj elektrona i barionski broj. A kombinovana masa ćerki proizvoda je manja od mase neutrona.) Neutron ima prosječan životni vijek od oko 15 minuta.²⁵

²⁵ Prosječni životni vijek je povezan sa (ali nije isto što i) poluživotom. Poluživot je dat prirodnim logaritmom od 2, pomnoženim prosječnim vijekom trajanja. Neutron ima poluživot od 10,4 minuta.

Nuklearna stabilnost

Ali ako neutroni traju samo 15 minuta, kako onda atomi mogu postojati? Na kraju krajeva, svaki atom osim vodonika ima nešto neutrona u sebi. Ovi neutroni su neophodni da drže protone zajedno. Dakle, kako atomi mogu trajati duže od 15 minuta? Kada su neutroni vezani zaostalom jakom silom za drugi barion, to može imati stabilizirajući učinak zbog negativne energije vezivanja. To jest, energija/masa sistema je zapravo niža ako neutron ostane neutron nego ako bi se raspao u proton. Očuvanje energije stoga sprečava propadanje. Pogledajmo jedan primjer.

Deuterijum je izotop vodonika u kojem se jezgro sastoji od jednog protona i jednog neutrona. Ovo jezgro ima masu od $1875,6 \text{ MeV}/c^2$. Taj neutron bi možda želio da se raspadne u proton, ali to bi rezultiralo diprotonom – dva protona vezana zaostalom jakom silom. Međutim, diproton ima masu od $1877,8 \text{ MeV}/c^2$. Diproton je nešto teži od jezgra deuterijuma jer se energija veze razlikuje, što rezultira višim stanjem energije/mase. Dakle, neutron u jezgru deuterija ne može se raspasti jer bi to rezultiralo težim česticama – a to bi narušilo očuvanje energije. Dakle, u ovom slučaju, kombinacija protona i neutrona je stabilna, dok je diproton nestabilan.

Postoje mnoge konfiguracije u kojima nuklearna energija vezivanja može imati stabilizirajući učinak na neutron. Određene kombinacije protona i neutrona u jezgru su stabilne jer bi svaka promjena rezultirala višom energijom (masivnijim) jezgrom. A to bi narušilo očuvanje energije. Zbog toga lakši atomi obično imaju približno jednak broj protona i neutrona. Za teže atome, neutroni imaju tendenciju da budu brojniji od protona kako bi se dobilo stabilno jezgro. U stvari, ako je odnos neutrona i protona u atomu premali, jedan od protona će se raspasti u neutron.²⁶ Dakle, čak i čestice koje su normalno stabilne

²⁶ Ovo se može dogoditi hvatanjem elektrona u kojem jedan od elektrona apsorbira proton i postaje neutron. Elektronski neutrino se takođe mora osloboditi da bi se sačuvao leptonski broj. Kao jedan primjer, aluminijum-26 je radioaktivan i može se raspasti u magnezijum-26 hvatanjem elektrona.

mogu postati nestabilne zavisno o njihovoj energiji vezivanja s drugim česticama.

Ali jedno pravilo se uvijek poštuje: jezgro se može samo spontano raspasti u manje masivno jezgro. To će odrediti da li neutron može da se raspadne, da li se proton može raspasti ili nijedno. A masa jezgra ne zavisi samo od njegovih protona i neutrona, već i od energije vezivanja između njih. Mogli bismo se zapitati: „Može li se X raspasti u Y?“ Ako je Y teži od X, onda je odgovor „ne“. Ako je Y lakši od X, onda je odgovor „moguće – ako se ne prekrše nikakvi zakoni očuvanja.“

Dizajnirani kosmos

Jedna implikacija svega ovoga je da masa bariona i stoga njihovih sastavnih kvarkova nije proizvoljna. Postoji razlog zašto je Bog učinio donji kvark nešto težim od gornjeg kvarka. Da je obrnuto, da je Bog učinio donji kvark nešto lakšim od gornjeg kvarka, tada bi neutron bio nešto lakši od protona. U tom slučaju, izolovani neutroni bi bili stabilni, ali nevezani protoni ne bi. Protoni bi se spontano raspadali u neutrone, bilo hvatanjem elektrona ili emisijom pozitrona.

Ali vodonik ima jezgro od jednog protona.²⁷ Dakle, običan vodonik ne bi mogao postojati da je donji kvark nešto lakši od gornjeg kvarka. A 90% materije u svemiru je vodonik. To je ono od čega su zvijezde napravljene i njihov je izvor moći.²⁸ Nadalje, molekuli vode se sastoje od dva dijela vodonika i jednog dijela kiseonika – a voda je neophodna za život. Zbog toga je dizajn donjeg kvarka nešto teži od gornjeg kvarka.

Suprotno tome, da je Bog učinio donji kvark znatno težim nego

²⁷ Najčešći izotop vodonika ima tačno jedan proton. Manje od 0,02% vodonika je deuterijum, koji ima jedan proton i jedan neutron.

²⁸ Možda bi deuterijum mogao postojati u takvom scenariju. Ali deuterijum se podvrgava fuziji na mnogo nižoj temperaturi od vodonika-1. Stoga bi zvijezde morale biti mnogo manje i manje masivne da bi to kompenzovale, što bi promijenilo orbitalni period planeta i tako dalje. Da li bi život bio moguć u takvoj situaciji, zna samo Gospod.

što jeste, tada nuklearna energija vezivanja ne bi bila dovoljna da spriječi raspad svih neutrona u svim atomima jer bi rezultat uvijek bio manje masivan. Ipak, neutroni su ono što sprečava jezgro u težim atomima da se podijeli. Dakle, jedini atom koji bi mogao postojati bio bi vodonik, a život ne bi bio moguć. Opet, vidimo nevjerovatnu inteligenciju koja je ušla u dizajniranje kvantnih čestica i pravila koja upravljaju njihovim ponašanjem.

Problem za „Veliki prasak“

Budući da je barionski broj sačuvan u bilo kakvom sudaru ili raspadu čestica, barionski broj prije događaja mora odgovarati barionskom broju nakon događaja. Dakle, ako se stvaraju novi barioni, mora se stvoriti i tačno jednak broj antibariona. Ovo je problem za pristalice Velikog praska jer je po njihovom mišljenju svemir započeo u visokoenergetskom stanju bez bariona. Ipak, danas procjenjujemo da ima otprilike 10^{80} bariona u vidljivom univerzumu. Broj antibariona je u suštini nula u poređenju s tim, jer se antibarioni proizvode samo u visokoenergetskim situacijama i gotovo trenutno se uništavaju u kontaktu sa materijom. Ali ako naš svemir nekada nije imao barione (kao što Veliki prasak zahtijeva), onda bi danas trebao postojati jednak broj bariona i anti-bariona, budući da se prirodno proizvode u jednakom broju. Trebalo bi da postoji jednaka količina materije i antimaterije. Ali ne postoji. Naš univerzum je u suštini samo materija. Priča o Velikom prasku krši očuvanje barionskog broja. I to ga krši u ogromnoj količini. Ovo je poznato kao problem barionske asimetrije.

Naravno, ovo je karakteristika za stvaranje. Stvaranje svemira nije bio prirodan događaj. Bog nije vezan zakonima koje nameće priroda danas. Bio je slobodan da stvara barione bez stvaranja antibariona. Naravno, Gospod je imao dobru svrhu za ovo. Kada barioni kontaktiraju antibarione, oni se međusobno uništavaju i oslobađaju ogromnu energiju. Ne bismo mogli postojati u takvom univerzumu.

Ravnoteža u kosmosu

Takođe, uzmite u obzir da se broj naelektrisanih leptona u svemiru tačno poklapa sa brojem naelektrisanih bariona, barem u okviru naše mogućnosti da ih izmjerimo. To jest, koliko možemo reći, postoji tačno onoliko elektrona u svemiru koliko i protona. Stoga, broj negativnih naboja uravnotežuje broj pozitivnih naboja, što rezultira svemirom koji je na velikim skalama potpuno električno neutralan.

Ovo je važna karakteristika dizajna. Šta ako svemir ima samo 1% više negativnog naboja nego pozitivnog? Odnosno, šta ako na svakih 100 protona dođe 101 elektron? U tom slučaju, svemir bi imao neto električni naboj od -1 na 100 atoma. Sve u svemiru bi električno odbijalo sve ostalo u svemiru. A pošto je električna sila mnogo jača od sile gravitacije, planete i zvijezde ne bi mogle postojati. Njihova unutrašnja sila gravitacije ne bi bila u stanju da savlada vanjsku silu elektrostatičkog odbijanja.

Prilično je nevjerovatno šta je Gospod napravio prvenstveno od samo dvije vrste kvarkova zajedno sa elektronima. Situacija postaje još fascinantnija kada uzmemo u obzir da se kvarkovi mogu vezati za antikvarkove u čestice koje se zovu mezon. Mezoni su važni jer su uključeni u zaostalu jaku silu. Bez mezona, materija ne bi mogla postojati.

MEZONI

Gospod je odredio zakone prirode i vrste čestica koje mogu postojati tako da naš univerzum ima prava svojstva za život. Biologija je moguća zbog hemije, što je moguće zbog fizike: elementarnih čestica koje je Bog stvorio i pravila koja njima upravljaju. Mala promjena u svojstvima čestica ili zakona kojima se povinuju, i atomi ne bi mogli postojati i biološki život bi bio nemoguć. Inteligencija potrebna za konstruisanje pravih čestica i zakona tako da biološki život može postojati je daleko iznad kombinovanog mentalnog kapaciteta svih ljudi koji su ikada živjeli. Kvantne čestice nam daju malo uvida u beskonačni um Gospoda.

Kratak pregled

Istraživali smo elementarne čestice: one čestice koje nisu napravljene od manjih čestica. I mi smo ispitali dvije porodice elementarnih čestica: leptone i kvarkove. Postoji šest varijanti (koje se nazivaju arome) u svakoj od ove dvije porodice, i postoji šest odgovarajućih antičestica (šest antileptona i šest antikvarkova). Naše ispitivanje leptona bilo je jednostavno jer se leptoni mogu proučavati izolovano. Štaviše, većina ljudi je već svjesna elektrona – najmanje masivnog nabijenog leptona. Mion i tau su teže verzije elektrona, a tu su i neutralne verzije zvane neutriini koji imaju sablasnu sposobnost prolaska kroz običnu materiju.

Kvarkovi su složeniji jer imaju „naboj boja“ i reaguju na jaku silu. To znači da se kvarkovi nikada ne nalaze u izolaciji. Oni se uvijek kombinuju u kompozitne čestice neutralne boje koje se nazivaju hadroni. Kvarkovi imaju djelimični električni naboj ($+2/3$ za gornji, šarm i gornji kvark i $-1/3$ za donji, čudni i donji kvark) i grupisaće se samo na takav način da prave hadron sa cijelim brojem.

Svaki kvark dolazi u jednom od tri naboja u boji: crvenoj, zelenoj ili plavoj. One nemaju nikakve veze s našim vizualnim iskustvom boje, već se samo odnose na tri vrste naboja. Antikvarkovi dolaze u jednoj od tri boje: anti-crvena, anti-zelena i anti-plava. Antikvarkovi imaju suprotan električni naboj od kvarkova, koji dolaze u $-2/3$ ili $+1/3$ varijanti. Postoje dva načina na koja se kvarkovi i/ili antikvarkovi mogu kombinovati da bi formirali hadron neutralne boje; i stoga postoje dva tipa hadrona: barioni i mezoni. Barion je uvijek napravljen od tačno tri kvarka (crveni, zeleni i plavi). Postoje i antibarioni napravljeni od tri antikvarka (anti-crveni, anti-zeleni i anti-plavi). Mezoni su napravljeni od jednog kvarka i jednog antikvarka suprotne boje (kao što su crvena i anti-crvena). Prije nego što ispitamo svojstva mezona, potrebno nam je nešto više informacija o jakoj sili.

Još o jakoj sili

Jaka nuklearna sila je ono što je odgovorno za držanje zajedno tri kvarka u bilo kojem barionu kao što je proton. To je vrlo nalik

električnoj sili, ali je jača i uključuje šest naboja, a ne samo dva. Dakle, moramo razumjeti kako ovih šest naboja u boji međusobno djeluju. Kao i kod električne sile, slični naboji se odbijaju, a suprotni privlače. Ali šta je sa bojama koje nisu suprotne? Kako su one povezane?

Prvo, snaga sile je dvostruko jača za istu boju ili anti-boju nego za „druge“ boje. Drugim riječima, sila između crvene čestice i druge crvene ili anti-crvene čestice biće dvostruko jača od sile između crvene i zelene ili anti-plave čestice. Dakle, onda samo trebamo znati da li je sila privlačna ili odbojna. Uzorak je sljedeći: (1) svaka boja se snažno odbija od iste boje (2) slaba privlači druge dvije boje, (3) snažna privlači vlastitu anti-boju, (4) slaba odbija druge dvije boje anti-boje.

Na primjer, crvena čestica će privući plavu ili zelenu česticu i dvostruko će privući anti-crvenu česticu. Crvena čestica će odbiti anti-zelenu ili anti-plavu česticu i dvostruko će odbiti drugu crvenu česticu. Dakle, sila između crvenog, zelenog i plavog kvarka u bilo kojem barionu je privlačna, ali ima samo polovinu jačine sile između crvene čestice i anti-crvene čestice.

Drugi način na koji se kvark može kombinovati kako bi formirao kompozitnu česticu je spajanje s jednim antikvarkom. Kada se kvark i antikvark spoje, kompozitna čestica se naziva mezon. Podsjetimo da će se kvarkovi i antikvarkovi kombinovati samo na takav način da naprave česticu neutralne boje. Stoga će kvark i antikvark u bilo kojem mezonu uvijek imati naboje suprotne boje: crveno i anti-crveno, zeleno i anti-zeleno, ili plavo i anti-plavo. Zapravo, jedan mezon može oscilirati između ovih kombinacija boja. Rezultirajući mezon je stoga neutralan u boji. U stvari, sada možemo vidjeti da ako antikvark nema naboj suprotne boje od kvarka, dvije čestice bi se odbijale i ne bi formirale mezon. To jest, crveni kvark će odbiti anti-plavi ili anti-zeleni antikvark.

Svi mezoni imaju cjelobrojni električni naboj. Dodavanje naboja bilo kojeg kvarka bilo kojem antikvarku uvijek će rezultirati ukupnim nabojem od -1, 0 ili +1. I zaista, svi mezoni imaju jedan od ova tri električna naboja.

Pioni

Prvi mezon otkriven je 1947. godine i naziva se pi-mezon ili pion.²⁹ Zapravo postoje tri čestice u porodici piona: pozitivni pion, neutralni pion i negativni pion. Hajde da prvo razmotrimo pozitivni pion. Sastoji se od jednog gornjeg kvarka i jednog donjeg antikvarka sa suprotnim spinskim poravnanjem (i suprotnim nabojem boje). Zbrajanjem naboja sastavnog para kvark/antikvark, nalazimo da je ukupan naboj +1: isti kao i proton.

U početku bismo mogli posumnjati da bi pion imao oko $2/3$ mase protona jer je napravljen od dvije čestice (jedan kvark i jedan antikvark), dok proton ima tri kvarka. Ali podsjetimo, jaka sila je dvostruko jača između suprotnih boja nego između „isključenih“ boja. Dakle, energija veze između crvenog kvarka i anti-crvenog antikvarka u pionu je mnogo jača od energije veze između tri obojena kvarka u protonu. Ova energija vezivanja je negativna, što dodatno smanjuje masu sistema. Ovo je „defekt mase“ o kojem smo ranije govorili. Posledično, mezoni imaju tendenciju da budu lakši od bariona sa sličnom aromom kvarka jer jača energija vezivanja proizvodi veći defekt mase.

Negativni pion se sastoji od jednog donjeg kvarka i jednog goreg antikvarka. Oni se kombinuju i formiraju pion sa nabojem od -1: isto kao i elektron. Pozitivni i negativni pioni imaju potpuno istu masu međusobno su antičestice. Budući da su pozitivni i negativni pioni podjednako obilni u svemiru, besmisleno je pitati se koji je od njih „materija“, a koji „antimaterija“. Svaki je antičestica drugog. Ne postoje anti-mezoni, jer je svaki mezon jedan kvark i jedan antikvark. Dakle, antičestica bilo kog mezona je samo još jedan mezon (a ponekad isti mezon).³⁰

²⁹ Podsjetimo da su svi barioni (osim nukleona) takođe nazvani po grčkom slovu, a kada se piše ovo slovo je uvijek veliko slovo. Svaka porodica mezona je označena malim grčkim ili velikim engleskim slovom. J/psi mezon koristi oba.

³⁰ Uporedite ovo sa barionima. Barioni se razlikuju od antibariona po sastavu. Barioni su napravljeni od tri kvarka, dok su antibarioni napravljeni od tri antikvarka. Pošto je mezon par kvark/antikvark, obrnutim nabojima nastaje mezon.

Tu je i neutralni pion. Gornji kvark i gornji antikvark bi se kombinirali da bi napravili pion sa nulnim naelektrisanjem. Ali isto tako bi i donji kvark i donji antikvark. Dakle, koja je kombinacija za neutralni pion? Odgovor je oboje. Dok se ne uoči, talasna funkcija neutralnog piona djeluje kao kombinacija oba stanja. Kada se posmatra, postoji 50% šanse da će neutralni pion biti gornji kvark i gornji antikvark, a 50% šansa da će biti donji kvark i donji antikvark. Mala razlika u masi između gornjih i donjih kvarkova/antikvarkova lako se apsorbira u energiju vezivanja. Dakle, neutralni pion ima neodređeni sastav osim ako se ne posmatra. Nekoliko drugih neutralnih mezona takođe ima neodređeni sastav: oni uključuju rho (ρ), eta (η), K (S i L verzije) i omega (ω) mezone. Svaki od ovih mezona je sopstvena antičestica.

Mezoni su bozoni

Sve porodice čestica koje smo prethodno proučavali (leptoni, kvarkovi i barioni) su fermioni: čestice sa polucijelim spinom. Fermioni se pokoravaju Paulijevom principu isključenja: ne mogu postojati u istom kvantnom stanju (isto mjesto, isto vrijeme, isti spin, itd.). Barioni su fermioni jer zbir tri $\frac{1}{2}$ -spin čestice uvijek rezultira česticom sa $\frac{1}{2}$ ili $\frac{3}{2}$ spina.

Međutim, mezon ima samo dvije čestice. A budući da će svaki biti okretan prema gore (+1/2) ili spin prema dolje (-1/2), mezon će uvijek imati ukupan spin od 0 ili 1 (u osnovnom stanju). Mezon je spin-0 ako kvark i antikvark imaju suprotna stanja spina; mezon je spin-1 ako kvark i antikvark imaju isto spin stanje.

Ako kvark i/ili antikvark imaju orbitalno kretanje, to će stvoriti viša stanja spina u cjelobrojnim koracima (2, 3, 4, ...). Ali rezultat je uvijek cijeli broj. Dakle, svi mezoni uvijek imaju cjelobrojni spin i stoga su bozoni. Podsjetimo da bozoni nisu ograničeni Paulijevim principom isključenja; više bozona može postojati u istom kvantnom stanju. Ovo je prilično fascinantno jer se svaki mezon sastoji od dva fermiona. I fermioni moraju poštovati Paulijev princip isključenja.

Čini se čudnim da mezoni mogu (i krše) Paulijev princip isključenja iako su napravljeni od čestica koje to ne mogu.

Kao i kod bariona, na ukupan spin i masu mezona ne utiče samo njihov sastav kvarka/antikvarka, već i da li ti kvarkovi imaju poravnata ili anti-poravnana spinska stanja. Rho mezon ima potpuno isti sastav kvarka/antikvarka kao i pion. Ali sa rho, spinska stanja su poravnata, što rezultira mezonom spina jedan, dok pioni imaju spin od nule. Usklađena spinska stanja imaju veću (pozitivnu) energiju, pa su rho mezoni znatno teži od piona uprkos njihovom identičnom sastavu kvarkova.

Pion i rho mezon spadaju među najlakše mezone jer sadrže samo dvije najlakše arome kvarkova/antikvarkova: gornju i donju. Sledeća najmanje masivna aroma je čudni kvark/antikvark. K-mezoni (kaoni) se sastoje od jednog gore ili dolje kvarka ili antikvarka i jednog čudnog kvarka ili antikvarka. Kaoni mogu imati spin nula (ako njihov sastavni kvark i antikvark imaju suprotan spin) ili spin jedan (ako kvark i antikvark imaju usklađena stanja spina). Verzije neutralnog kaona sa spin-0 mogu postojati u neodređenom sastavu (slično kao neutralni pion), ali postoje dvije moguće talasne funkcije i one utiču na životni vijek čestice. Ove dvije verzije se zovu K-kratki i K-dugi.

Postoji deset porodica mezona. Svaka porodica mezona je nazvana po malom grčkom slovu ili velikom engleskom slovu (ili oboje, što je jedinstven slučaj za J/psi mezon). To su: pion (π), rho (ρ), kaon (K), eta (η), D, B, omega (ω), fi (ϕ), J/psi (J/ψ) i ipsilon (ψ). Neke porodice imaju samo jednog člana. Na primjer, J/psi mezon se sastoji od šarm kvarka i šarm antikvarka sa usklađenim spinom. Isto tako, fi mezonu je spin-1 mezon koji se sastoji od čudnog kvarka i čudnog antikvarka.

Raspadanje mezona

Mezoni se mogu raspasti – mogu se spontano promijeniti u druge kombinacije čestica. Vrste čestica na koje mezoni mogu da se raspadnu određuju zakoni održanja. Podsjetimo da se čestica može

raspasti samo u manje masivnu česticu, a kombinovana stanja naboja i spina kćerinih proizvoda moraju odgovarati stanju naboja i spina originala. Nadalje, leptonski i barionski broj su očuvani. Mezoni imaju leptonski broj nula, a barionski broj nula. Dakle, ako proizvode lepton u raspadu, moraju proizvesti i antilepton tako da ukupan broj leptona ostane nula.

Razlog zašto se najlakši nabijeni lepton (elektron) ne može raspasti je taj što bi narušio leptonski broj. Isto tako, najlakši barion (proton) se ne može (izolovano) raspasti jer jedine stvari koje su lakše su ne-barioni, a to bi narušilo barionski broj. U početku bismo mogli posumnjati da postoji slično pravilo za mezone. Međutim, ne postoji „mezonski broj“, ili barem nije očuvana veličina. Dakle, mezoni se mogu raspasti u ne-mezone. Čak i najlakši mezon, neutralni pion, može se raspasti.

Dakle, ne postoje stabilni mezoni. Svi mezoni imaju prolazno postojanje. U stvari, najdugovječniji mezon, K-dugački, ima srednji životni vijek od samo 51 nanosekunde – to je 51-milijarditi dio sekunde. Drugi najdugovječniji mezon su nabijeni pioni (bilo pozitivni ili negativni), od kojih svaki ima srednji životni vijek od samo 26 nanosekundi.

Pozitivni pion se često raspada u antimion i mionski neutrino sa suprotnim spinskim stanjem od antimiona. Možemo potvrditi da ovo poštuje sva pravila očuvanja: anti-mion i mionski neutrino su manji od mase piona (s kinetičkom energijom koja nosi razliku), ukupan naboj prije i poslije je +1, ukupno spinsko stanje prije i poslije je nula, a ukupan leptonski broj prije i poslije je nula. Vidimo da je ovo dozvoljeno propadanje, i stoga se može dogoditi.

Kako se neutralni pion može raspasti? To je najlakši mezon, tako da se ne može raspasti u drugi mezon. Podsjetimo, ova čestica može biti ili gornji kvark i gornji antikvark, ili donji kvark i donji antikvark. Ukupni naboj i ukupni okret su nula. Leptonski i barionski brojevi su nula. Dakle, ovo mora da važi i za zbir proizvoda kćeri. Jedna opcija bi bila raspad na dva fotona sa suprotnim spinskim stanjima. To je u

skladu sa svim zakonima očuvanja, i zapravo je najčešći raspad neutralnog piona. Druga mogućnost je raspad na jedan foton (spinsko stanje +1), elektron i pozitron (svako spinsko stanje -1/2). Ukupna masa je manja od piona, a ukupno naelektrisanje i spin stanje su svaki nula. To propadanje je drugo po učestalosti.

Raspad u drugim česticama

Sada kada razumijemo mezone i njihova svojstva, možemo čitati i razumjeti grafikone koji opisuju raspad u suštini svih drugih čestica. U poglavlju o leptonima spomenuli smo jedan mogući raspad taua (najmasivnijeg leptona) na druge leptone. Ali najčešći putevi raspada tau uključuju mezone. Tau se najčešće (25,5% vremena) raspada u nabijeni pion, neutralni pion i tau neutrino. Ovi pioni se zatim raspadaju kao što je gore objašnjeno.

Isto tako, raspad bariona (iako uvijek rezultira barem još jednim barionom) često uključuje mezone. Uzmite u obzir delta barione. Neutralna delta ima isti sastav kvarka kao i neutron, ali ima veću masu i spin od 3/2 zbog činjenice da su sva tri njena kvarka centrirana po spinu. Neutralna delta se obično raspada na jedan od dva načina. Prvo, može se raspasti na neutralni pion i neutron. Alternativno, može se raspasti u negativni pion i proton. Kćeri proizvodi imaju manju masu od originala, a možete potvrditi da je ukupni naboj očuvan, kao i barionski broj. Rezultirajući pion će imati orbitalni ugaoni moment u odnosu na rezultujući nukleon, što će rezultirati spinom od 1, iako sam pion ima unutrašnji spin jednak nuli. Dakle, ukupni spin je takođe očuvan.

Egzotični hadroni

Pored čistih bariona i mezona, postoje i druge moguće kombinacije kvarkova koje rezultiraju kompozitnom česticom neutralne boje. Pentakvark je skup od četiri kvarka i jednog antikvarka. Kao takav, u suštini je kombinacija jednog bariona i jednog mezona. Trenutno se raspravlja o tome da li ovo postoji kao „molekul“ bariona i mezona ili

da li svih pet čestica podjednako djeluju. Nekoliko varijanti pentakvarkova sada je stvoreno u eksperimentima sudara čestica. Pentakvarkovi koji se javljaju u prirodi nisu otkriveni, ali se mogu formirati u kosmičkim događajima visoke energije kao što je supernova.

Tetrakvark je kombinacija dva kvarka i dva antikvarka. Možemo ga smatrati u suštini kombinacijom dva mezona. Nekoliko vrsta tetrakvarkova otkriveno je u eksperimentima sudara čestica u posljednjih nekoliko godina. Kao i pentakvark, nije primijećeno da se tetrakvark formira u prirodnim uslovima. I pentakvark i tetrakvark su nestabilni, raspadaju se na druge čestice skoro odmah nakon što su formirane.

Fizičari su takođe predložili moguće postojanje kvarkovog grumena. Ova hipotetička čestica se sastoji od velikog broja tri najlakše arome kvarkova (ili antikvarkova): gore, dolje i čudno, u otprilike jednakim proporcijama. Rezultirajuća čestica bi bila izuzetno masivna i vrlo vjerovatno stabilna. Neki naučnici sugerišu da su kvarkovi grumenovi odgovorni za tamnu materiju – nevidljivu supstancu poznatu samo po svojim gravitacionim efektima na vidljivu materiju. Trenutno, kvarkovi grumenovi nisu definitivno otkriveni.

Mezoni i preostala jaka sila

Iako mezoni imaju samo prolazno postojanje, oni su neophodni da bi imali atome teže od vodonika. Podsjetimo da se kvarkovi unutar protona ili neutrona drže zajedno snažnom silom. Ali ova sila ima izuzetno ograničen domet. Izvan radijusa protona ili neutrona, postoji samo ostatak naboja u boji zbog nesavršenog poništavanja tri boje zbog različitih pozicija tri kvarka. Ovo zaostalo polje boje ima energiju. I iz te energije mogu se stvoriti mezoni. Pošto su pioni najmanje masivni mezoni, najvjerovatnije će se formirati u ovom polju. Međutim, rho mezoni takođe mogu doprinijeti.

Ovi mezoni mogu preći sa jednog protona ili neutrona na susjedni proton ili neutron gdje se apsorbuju. Ovaj proces rezultira privlačnom silom između nukleona. U suštini, oblak mezona koji se stalno formiraju i neformiraju okružuje proton ili neutron, a to ima efekat

proširenja jake sile dovoljno da se protoni i neutroni mogu držati zajedno u jezgri atoma.

Ako se neutralni pion formira iz energetskog polja i pređe s protona na neutron, on proizvodi privlačnu silu između obje čestice, ali ih ostavlja nepromijenjene. S druge strane, nabijeni pion može zamijeniti proton i neutron. Pretpostavimo da se pozitivni pion emituje iz protona; da bi očuvao naelektrisanje, morao bi da konvertuje gornji kvark u donji kvark u protonu, da bi dobio +1 naelektrisanje piona. Ovo pretvara proton u neutron. Ovaj pion tada gotovo odmah apsorbuje susjedni neutron, mijenjajući jedan od njegovih donjih kvarkova u gornji kvark u procesu. Pion prestaje da postoji kada se apsorbuje, ali neutron je postao proton. Primijetite da ovaj proces ne može promijeniti broj protona i neutrona u jezgri; može samo zamijeniti njihove pozicije.

Dakle, mezoni se neprestano emituju i odmah ih apsorbuju protoni i neutroni u jezgri. Ovo ima efekat samo malog proširenja jake sile – dovoljnog da zadrži jezgro na okupu. Bez mezona, jedini atomi koji bi mogli postojati bili bi vodonik.

Dakle, mezoni su samo još jedna karika u lancu kvantnih čestica koje je Gospod stvorio da bi fizika bila ono što jeste. I Gospod čini da fizika bude ono što jeste, tako da će hemija biti ono što On odredi. A hemija je trebala biti tačna da bi postojali biološki oblici života. Naši umovi nisu sposobni da razmotre beskonačan broj mogućnosti za čestice, pravila koja njima upravljaju i potencijalnu hemiju koja rezultira. Ali Božji um može. Na kraju izlaganja o kvantnim česticama, osvrnućemo se na elementarne bozone i njihovu bitnu ulogu kao ljepljiva kojim Bog drži svemir zajedno.

BOZONI

Budući da je Bog inteligentno i logičko Biće koje svojom silom drži svemir zajedno, i budući da smo stvoreni na Njegovu sliku i imamo otkrivenje od Njega, moguće je da otkrijemo neke od logičkih obrazaca po kojima se objedinjuje svemir zajedno. Postoje četiri

fundamentalne sile u prirodi, od kojih je svaka izraz matematičkog načina na koji Božji um podržava stvaranje. Svaka od ove četiri sile povezana je s kvantnim česticama koje se nazivaju mjerni bozoni. Ovi mjerni bozoni su ljepilo koje drži materiju na okupu. Kada proučavamo ove sile, učimo nešto o Božjem umu.

Četiri sile

Šta je sila? Sila je nešto što uzrokuje ubrzanje mase – da promijeni brzinu i/ili smjer kretanja objekta. Postoje četiri fundamentalne sile u ovom svemiru: jaka nuklearna sila, slaba nuklearna sila, elektromagnetizam i gravitacija. Svi imamo iskustva sa gravitacijom. To je sila koja uzrokuje da objekti padaju – da ubrzaju prema centru Zemlje. Sunčeva gravitacija drži planete u orbiti.

Većina ljudi također ima iskustva s elektromagnetizmom. Razlog zašto se magneti lijepe za hladnjak je ova sila. Elektromagnetna sila se manifestuje na dva načina: magnetizam i električna sila. Zamislite ovo kao dva različita izraza istog osnovnog mehanizma. Električna sila je ono što drži elektrone vezane u atomima. To je ono što uzrokuje da se atomi zalijepe za druge atome u molekulu.

Druge dvije sile nisu tako lako iskustvene (barem ne direktno) jer imaju izuzetno ograničen domet. U stvari, one se ne protežu mnogo dalje od jezgra atoma. To su dvije nuklearne sile: jaka sila i slaba sila. Već smo raspravljali o jakoj sili u dijelu o kvarkovima, barionima i mezonima. Jaka sila je ono što drži kvarkove vezane zajedno u protonu i neutronu, a indirektno drži proton i neutron povezani zajedno u jezgru atoma.

Slaba sila je ono što je odgovorno za određene vrste raspada čestica. To jest, dozvoljava česticama da se pretvore u druge čestice. Snaga ove sile je zapravo prilično velika, ali je mnogo manja od snage jake nuklearne sile. Slaba sila je „slaba“ samo u poređenju.

Polja

Svaka od četiri sile ima tip „naboja“ koji se može smatrati izvorom te sile. Zamislite elektron. Ova čestica ima električni naboj od -1.

Kao takav, elektron je okružen električnim poljem. Zamislite električno polje kao nevidljivi oblak koji okružuje svaki elektron. Ovaj „oblak“ postaje sve tanji i tanji kako se udaljavamo od elektrona. Nikada ne ide sasvim na nulu, ali je na nekoj udaljenosti toliko tanak da za sve praktične svrhe u suštini nestaje.

Kada se drugi elektron stavi u električno polje bilo kojeg elektrona, on osjeti ovo polje i udaljava se od svog izvora. Zbog toga elektroni ne moraju biti u direktnom kontaktu da bi se međusobno odbijali. Svaki elektron je unutar električnog polja bilo kojeg obližnjeg elektrona, i to je polje koje govori elektronu kako da se kreće (naime, dalje od drugog elektrona). Kada se pozitivno nabijena čestica stavi unutar električnog polja elektrona, pozitivna čestica će se kretati prema elektronu. Kod elektromagnetizma, slični naboji se odbijaju, a suprotni se privlače.

Isto tako, jaka sila ima neku vrstu naboja koja je povezana s njom: „naboj u boji“. Leptoni nemaju naboj boje (ili ako želite, imaju neutralan naboj boja), pa ne osjećaju jaku silu. Ali kvarkovi i anti-kvarkovi imaju naboj u boji i stoga imaju polje boja koje ih okružuje. Kao i kod elektromagnetizma, slični naboji se odbijaju, a suprotni privlače. Ali, to je komplikovanije jer postoji šest vrsta naboja povezanih s jakom silom (crvena, zelena, plava, anti-crvena, anti-zelena i anti-plava), a ne dvije povezane s električnom silom (pozitivna i negativna). U prethodnom dijelu istražili smo kako se ovih šest naboja međusobno odnose. Slaba nuklearna sila takođe ima neku vrstu naboja, i ona je odbojna za iste nabojne i privlačna za suprotne nabojne – baš kao električne i jake sile.

„Naboj“ povezan sa gravitacijom je jednostavno masa. Sva masa ima gravitaciono polje koje ga okružuje. Ali za razliku od ostale tri sile, poput „naboja“ se privlače, a suprotni naboji odbijaju. Čestica pozitivne mase gravitaciono će privući drugu česticu pozitivne mase. Teoretski, gravitaciona sila između čestice pozitivne mase i čestice negativne mase bila bi odbojna.³¹ Ali koliko znamo, ne postoje čestice

³¹ Međutim, način na koji negativna masa reaguje na silu je suprotan načinu na koji pozitivna masa reaguje na silu u smislu smjera ubrzanja. To je zato što je $F = ma$

sa negativnom masom. Dakle, gravitacija je uvijek privlačna sila.

Gravitacija pobjeđuje

Gravitacija je mnogo slabija (za mnogo redova veličine) od ostale tri sile. Zato se magnet zalijepi za frižider bez pada. Pa ipak, najveće strukture u svemiru (galaksije i jata galaksija) gravitacija drži zajedno kao da druge sile i ne postoje. Zašto? Naravno, dvije nuklearne sile imaju vrlo ograničen domet. Dakle, one ne mogu doprinijeti strukturama velikih razmjera. Ali električna sila ima neograničen domet. Pa zašto onda ne doprinosi značajno strukturama velikih razmjera poput galaksija?

Razlog je taj što u svemiru postoji jednak broj pozitivnih i negativnih naboja. A budući da se suprotni električni naboji privlače, pozitivni i negativni naboji se obično nalaze vrlo blizu jedan drugom – kao što su elektroni koji okružuju jezgro atoma. Neto električni naboj većine objekata je stoga vrlo blizu nuli. Na najvećim skalama, svemir je električno neutralan. Ali gravitacija, iako je mnogo slabija od električne sile, privlačna je za slična naelektrisanja. A pošto postoji samo pozitivna masa, efekti gravitacije su kumulativni.³²

(neto sila jednaka masi puta ubrzanju). Dakle, kada je masa negativna, smjer ubrzanja je suprotan smjeru sile! (Ako odgurnete negativnu masu od sebe, ona će se pomaknuti prema vama). Dakle, zamislite da imamo dvije planete jednu pored druge – jedna je napravljena od obične mase, a druga je u potpunosti napravljena od jednake veličine negativne mase. Gravitaciona sila između njih bi bila negativna, pa bi planeta pozitivne mase počela da se ubrzava dalje od planete negativne mase. Planeta negativne mase takođe doživljava odbojnu silu (udaljena od pozitivne planete), ali ona odgovara na tu silu unatrag – ubrzavanjem prema planeti pozitivne mase. Dvije planete bi spontano ubrzavale s planetom negativne mase koja bi uvijek održavala istu udaljenost od planete pozitivne mase. Začudo, ovo ne krši zakone fizike jer ukupna kinetička energija sistema ostaje nula (planeta negativne mase bi imala negativnu kinetičku energiju).

³² Samo pozitivna masa postoji u izolaciji. Defekt mase povezan sa vezanim česticama je negativan, ali je uvijek manji od pozitivne mase sistema. Koliko znamo, negativna masa se nikada ne nalazi u izolaciji.

Sile i čestice

Svaka sila ima jednu ili više kvantnih čestica povezanih s njom. Ove čestice postoje kao talasanje ili talas u polju povezanom sa tom silom. Razmotrimo elektron i električno polje koje ga okružuje. Ako brzo pomičemo taj elektron gore-dolje, to će uzrokovati pomicanje električnog polja koje okružuje elektron, što proizvodi talase u polju koji se udaljavaju od elektrona. Ovo su elektromagnetski talasi. Kada otkrijemo ove talase, nalazimo da su njihovi energetske nivoi kvantizovani, kao da su napravljeni od diskretnih čestica. (Prisjetite se iz prvog dijela u ovom radu da se čestice ponekad ponašaju kao talasi). Ove čestice su fotoni – iste one čestice koje čine svjetlost.

Ovako radi radio. Elektroni brzo osciliraju, što stvara elektromagnetne talase – radio talase. Ovi talasi putuju dalje od izvora. Neke od njih presreće antena koja uzrokuje osciliranje elektrona u anteni kao odgovor na oscilirajuće elektromagnetno polje. To rezultira naizmjeničnom električnom strujom. Kada ova struja prođe kroz zvučnik, proizvodi zvučne talase. Radio talasi su fotoni niske frekvencije.

Jedina razlika između fotona povezanih s radiom i fotona vidljive svjetlosti je njihov energetske nivo koji je u korelaciji sa frekvencijom i obrnuto s talasnom dužinom. Fotoni najniže energije povezani sa radiom imaju najduže talasne dužine. Dok ispitujemo fotone sa sve većom energijom i kraćim talasnim dužinama, prelazimo na mikrotalesne, infracrvene, vidljive, ultraljubičaste, rendgenske i gama zrake. To su sve elektromagnetski talasi napravljeni od fotona.

Fotoni i virtuelne čestice

Fotoni su spin-1 mjerni bozoni. „Mjerni“ se odnosi na činjenicu da su povezani sa silom – u ovom slučaju elektromagnetnom silom. A budući da su bozoni, fotoni nisu ograničeni Paulijevim principom isključenja; dakle, više fotona može postojati u istom kvantnom stanju. To je ono što je laser: više fotona identične energije i talasne dužine postoji na istom mjestu u isto vrijeme u laseru.

Fotoni nemaju električni naboj i vlastita su antičestica. Oni

postoje kao talasi ili talasi u elektromagnetnom polju. Fotoni nemaju masu mirovanja. Svaka čestica bez mase mirovanja mora putovati brzinom svjetlosti u vakuumu.³³ Stoga fotoni moraju putovati brzinom svjetlosti u vakuumu. Pošto fotoni nemaju masu, ne mogu se raspasti u manje masivnu česticu. Dakle, fotoni su stabilni. Zauvijek će se širiti svemirom sve dok ne udare u česticu. Postoji samo jedna vrsta fotona. Fotoni mogu imati različite nivoe kinetičke energije jedan od drugog (što rezultira različitim talasnim dužinama), i mogu biti ili spin-gornji (+1) ili spin-donji (-1), ali u svim ostalim aspektima su identični.

Jedan od najčudnijih aspekata kvantne fizike uključuje virtuelne čestice. Virtuelne čestice su neprimijećene, privremene čestice koje nastaju iz polja zbog Hajsenbergovog principa neizvjesnosti (HUP). Čestica se može formirati u polju tako što će posuditi malo energije iz tog polja sve dok „vraćaju“ energiju unutar određenog vremenskog ograničenja.³⁴ Čestica tada nestaje. HUP daje kvantitativne detalje. U osnovi, što više energije posuđuje čestica, to brže mora da je vrati, a samim tim je kraći njen životni vijek. Pošto su fotoni bez mase i stoga nemaju donju granicu energije, ne postoji gornja granica životnog vijeka virtuelnog fotona.³⁵ Virtuelne čestice se mogu neprestano pojavljivati i nestajati u polju. U nekom smislu, polje koje okružuje naelektrisanu česticu je kumulativni efekat svih ovih virtuelnih čestica.

U električnom polju virtuelni fotoni se mogu formirati i deformirati. Ovi virtuelni fotoni mogu putovati od jedne naelektrisane čestice do druge; ovo stvara ili privlačnu silu ili silu odbijanja u zavisnosti od relativnog naboja čestica. Zamislite virtuelne fotone kao glasnike između naelektrisanih čestica. Oni nose jednostavnu poruku, ili „priđi malo bliže“ ili „odmakni se malo“.

Virtuelne čestice objašnjavaju zašto se električna sila smanjuje s kvadratom udaljenosti. Dvije nabijene čestice koje su razdvojene

³³ Razlozi za to su dati u mojoj knjizi *Ajnštajnova fizika*.

³⁴ Važno je napomenuti da virtuelne čestice ne nastaju ni iz čega. Oni dolaze iz polja koja prožimaju prostor i ponovo se apsorbuju u ta polja.

³⁵ Zbog toga električna sila ima beskonačan domet.

rastojanjem D će doživjeti određenu silu F . Ako se ove dvije čestice pomjere na dvostruko veću udaljenost ($2D$), tada će primiti samo $\frac{1}{4}$ broja virtuelnih fotona od druge nabijene čestice. Dakle, sila je smanjena za kvadrat udaljenosti.

Važno je napomenuti da se virtuelni fotoni ne mogu direktno posmatrati. (Ako se posmatra, foton ne bi bio virtuelan). Postoji određena debata o tome koliko su virtuelne čestice „stvarne“. Dovoljno je reći da matematika radi. To jest, nabijene čestice se zaista ponašaju kao da stalno razmjenjuju fotone koji se ne mogu detektovati, a to stvara silu između njih. Fotoni stoga posreduju u elektromagnetnoj sili.

Prema tome, da fotoni ne postoje, ne bi mogla postojati električna sila. Naravno, ni mi nismo mogli ništa da vidimo. Ali to bi bio najmanji naš problem. Bez električne sile, atomi ne bi mogli postojati, a biološki život bi bio nemoguć.

W i Z bozoni

Iako postoji samo jedna čestica koja posreduje elektromagnetnu silu (foton), postoje tri čestice koje posreduju u slaboj nuklearnoj sili. To su W^+ , W^- i Z^0 . Kao i foton, ovo su elementarni mjerni bozoni spina-1. Za razliku od fotona, oni imaju masu – i to dosta mase. Svaki od dva W bozona ima masu od $80,433 \text{ MeV}/c^2$. Z je nešto teži sa masom od $91,188 \text{ MeV}/c^2$. Jedine teže elementarne čestice su gornji kvark i Higsov bozon.

Kao što implicira notacija, Z^0 bozon nema električni naboj. W^+ i W^- imaju električni naboj od $+1$ i -1 respektivno i međusobno su antičestice. Z^0 bozon je sopstvena antičestica. Nijedan od ova tri bozona nema naboj boje i stoga na njega ne utiče jaka sila.

W i Z bozoni su nestabilni; raspadaju se u parove fermiona. A pošto su svi elementarni fermioni manje masivni (osim gornjeg kvarka), postoji mnogo mogućih raspada. W bozoni se mogu raspasti u leptonski i anti-leptonski par, pri čemu jedan od dva ima isti električni naboj kao W , a drugi je neutrino. Alternativno, oni se mogu

raspasti u par kvark-antikvark sa ukupnim nabojem koji odgovara onom W . Na primjer, W^+ može se raspasti u gornji kvark i donji antikvark.

Z^0 bozoni se raspadaju na dva fermiona koji su jedan drugom antičestica. Oni se najčešće raspadaju u parove kvark-antikvark. Ali oni se takođe mogu raspasti na parove lepton-antilepton, kao što su elektron i pozitron, ili neutrino i antineutrino.

Slaba nuklearna sila je posredovana virtuelnim W i Z bozonima. A pošto ovi bozoni imaju prilično veliku masu, prema HUP-u moraju vratiti svoju pozajmljenu energiju u vrlo kratkom roku. Kao takvi, ne mogu putovati daleko prije nego što se ponovo apsorbiraju. Zbog toga slaba sila ima izuzetno kratak domet.

Gluoni

Jaka nuklearna sila je posredovana gluonima. Gluoni su spin-1 mjerni bozoni, slično fotonima. Gluoni nemaju električni naboj. I smatra se da su bez mase – opet kao fotoni. Međutim, gluoni imaju naboj u boji. Podsjetimo da svi kvarkovi imaju jedan od tri naboja u boji: crveni, zeleni ili plavi. A antikvarkovi imaju jedan od tri naboja u boji: anti-crveni, anti-zeleni ili anti-plavi. Gluoni imaju oboje. Svaki gluon istovremeno ima jedan od naboja u boji pozitivnog tipa (crvena, zelena ili plava) i jedan od naboja u boji negativnog tipa (anti-crvena, anti-zelena i anti-plava).

Kao takvi, postoji osam vrsta gluona. Šest ovih tipova se sastoji od boje i nesuprotne anti-boje. To su (1) crvena i anti-plava, (2) crvena i anti-zelena, (3) zelena i anti-plava, (4) zelena i anti-crvena, (5) plava i anti-crvena i (6) plava i anti-zelena. Što je s kombinacijama poput crvene i anti-crvene? Ovi gluoni neutralni u boji ne mogu postojati izolovani, ali mogu postojati u neodređenom, mješovitom stanju.³⁶ Postoje dva matematička načina na koja se to može dogoditi, i zaista ne postoji jednostavan način da se to ilustruje. Dovoljno je reći da su

³⁶ Ovo je slično neutralnom pionu koji ima neodređeni sastav. O tome se govori u prethodnom izlaganju.

to sedmi i osmi tip gluona.

Razmjenjena virtuelnih gluona je ono što drži kvarkove zajedno u adronu. Zamislite barion kao što je proton ili neutron. Svaki nukleon je napravljen od jednog crvenog kvarka, jednog zelenog kvarka i jednog plavog kvarka. Pretpostavimo da crveni kvark emituje gluon koji ima kombinaciju crvene i anti-plave. Da bi se sačuvao naboj boje, crveni kvark se mora pretvoriti u plavi kvark. Kada se „doda“ u gluon, plava u kvarku poništava anti-plava od gluona, ostavljajući samo crvenu. Dakle, nema promjene u neto boji nukleona – i dalje je neutralna boja. Ovaj gluon zatim apsorbuje drugi plavi kvark, pretvarajući ga u crveni kvark. Dva kvarka zamjenjuju naboj boje, a to rezultira privlačnom silom između njih.

Pošto su gluoni spin-1 bozoni, razmena gluona takođe mijenja spinska stanja kvarkova. Pretpostavimo da kvark koji emituje gluon ima početno spin stanje od $+1/2$. Emitovani gluon će imati spin stanje od $+1$, što kvark okreće na $-1/2$ (tako da kombinovana spin stanja i dalje iznose $+1/2$). Gluon tada apsorbuje kvark koji ima početno spin stanje od $-1/2$. Gluon vrti kvark da okreće $+1/2$ pošto „dodaje“ $+1$ spinu kvarka. Ukupni spin bariona je nepromijenjen.

Slično je i sa mezonima. Podsjetimo da su mezoni napravljeni od jednog kvarka i jednog antikvarka suprotne boje. Pretpostavimo da imamo crveni kvark i anti-crveni antikvark. Crveni kvark bi mogao emitovati gluon koji je crven i anti-plavi. Ovo će preokrenuti kvark u plavo kako bi se sačuvao naboj boje. Kada antikvark apsorbuje gluon, crvena poništava anti-crvenu, a preostalu anti-plavu apsorbuje kvark, pretvarajući je u anti-plavu. Mezon je i dalje neutralan u boji jer je jedan kvark sada plav, a drugi anti-plavi. Mezoni su uvijek neutralne boje; ali njihovi kvarkovi i antikvarkovi stalno mijenjaju naboj boje razmjenom gluona.

Za razliku od fotona, gluoni posjeduju samu vrstu naboja koju posreduju. Drugim riječima, fotoni posreduju električnu silu, ali su sami po sebi električno neutralni. Dakle, fotoni se međusobno ne privlače niti odbijaju. Ali gluoni i posreduju naboj boje i posjeduju naboj

boje. Stoga gluoni mogu privući ili odbiti druge gluone! Imaju tendenciju grupisanja u dugačke cijevi. To čini jaku silu daleko složenijom od električne sile. Budući da gluoni međusobno djeluju, jaka sila se ne smanjuje s rastojanjem na isti matematički način kao električno polje ili gravitacija. Smanjuje se mnogo brže, a može čak postati i odbojna na ekstremno kratkim udaljenostima (za čestice koje su inače privlačne). Ovo sprečava da tri kvarka u nukleonu budu na potpuno istoj lokaciji, što rezultira nesavršenim poništavanjem tri boje na vanjskoj površini nukleona, što omogućava pionima da formiraju i posreduju zaostalu jaku silu. A bez preostale jake sile, nijedan atom osim vodonika ne bi mogao postojati.

Ekstremna snaga jake sile je takva da energija potrebna za razdvajanje kvarkova u barionu premašuje energiju samih kvarkova. Stoga bi svaki pokušaj odvajanja kvarkova rezultirao formiranjem novih kvarkova iz energije, što bi opet rezultiralo adronom neutralne boje. To se zove „ograničenje boja“ i zbog toga su kompozitne čestice uvijek neutralne u boji. Ovo, zajedno sa činjenicom da gluoni međusobno djeluju, je razlog zašto jaka sila ima tako kratak domet.³⁷

Polje boja jake sile ima toliko energije da se unutar njega ne formiraju samo virtuelni gluoni, već i virtuelni kvarkovi i antikvarkovi. Da bi se sačuvao barionski broj, kvarkovi i antikvarkovi se uvijek formiraju u parovima – privremeni mezon. A mogu postojati samo vrlo kratko jer moraju da „vrate“ energiju koju su pozajmili na terenu. Oni se ponekad nazivaju „morski kvarkovi“ za razliku od tri stalna „valentna“ ili „konstitutivna“ kvarka. Budući da se morski kvarkovi uvijek formiraju u parovima kvark-antikvark sa suprotnim nabojem i spinom, oni ne mijenjaju cjelokupni naboj ili spin stanje bariona. Oni utiču na masu. I to je razlog zašto je konstitutivna masa kvarkova veća od njihove trenutne mase. Virtuelni mezoni koji se formiraju upravo izvan protona ili neutrona atoma (zbog nesavršenog poništavanja naboja

³⁷ Pošto su gluoni bez mase, teoretski raspon virtuelnih gluona je beskonačan. Ali ograničenje boja efektivno ograničava raspon na nuklearne skale. Dakle, jaka i slaba sila imaju ograničen domet iz potpuno različitih razloga.

boje) odgovorni su za zaostalu jaku silu koja drži zajedno jezgro svih atoma (osim vodonika).

Gravitoni

Mnogi fizičari vjeruju da je preostala fundamentalna sila, gravitacija, posredovana mjernim bozonima zvanim gravitoni. Za razliku od ostalih mjernih bozona, gravitoni nisu uočeni niti otkriveni ni u jednom eksperimentu. Oni ostaju teoretski. Štaviše, gravitacija se takođe može objasniti na potpuno drugačiji način – bez pozivanja na kvantne čestice. Nauka opšte relativnosti koju je razvio Ajnštajn tačno predviđa gravitacione interakcije računajući kako masa utiče na zakrivljenost prostora-vremena. Većina fizičara vjeruje da gravitacija na kvantnim skalama zahtijeva kvantno objašnjenje, možda ono koje će biti u potpunosti kompatibilno s uspješnim predviđanjima opšte relativnosti velikih razmjera.

U svakom slučaju, iako gravitoni nisu eksperimentalno otkriveni, možemo izračunati mnoga njihova svojstva koristeći matematiku na osnovu onoga što gravitacija radi. Ovo je moguće samo zato što univerzum podržava um – Božji um – koji razmišlja racionalno i matematički. Znamo, na primjer, da gravitoni nemaju masu mirovanja – baš kao i fotoni. Ako su imali bilo kakvu masu, onda raspon gravitacije ne bi mogao biti beskonačan. Ipak, kretanja galaksija u jatima pokazuju da gravitacija djeluje na univerzalnoj skali. Budući da su bez mase, gravitoni moraju putovati brzinom svjetlosti.

Nadalje, gravitoni moraju biti spin-2 bozoni. Kao i kod svih bozona, oni zanemaruju Paulijev princip isključenja. Bozon spin-2 rezultira silom koja je privlačna između sličnih naboja. Ovo je u suprotnosti s ostale tri fundamentalne sile, posredovane bozonima spin-1, i u kojima se slična naelektrisanja odbijaju. Kao takav, graviton je jedina spin-2 elementarna čestica.

Gravitoni ne smiju imati električni naboj, inače bi stupili u interakciju s električnim poljima. Gravitoni nemaju naboj u boji i stoga zanemaruju nuklearnu jaku silu. Gravitoni su stabilni jer ne postoji

lakša čestica na koju bi se mogli raspasti. Pošto ne stupaju u interakciju sa jakom silom, slabom silom ili elektromagnetskom silom, gravitone je izuzetno teško otkriti. Oni zaista reaguju samo na gravitaciju, a gravitacija je za redove veličine slabija od ostalih sila. Ovo objašnjava zašto ove čestice još nisu otkrivene.

Higsov bozon

Jedan elementarni bozon izdvaja se kao jedini elementarni bozon koji nije mjerni bozon; to jest, ne posreduje nikakvu silu. Ovo je Higsov bozon. Higsov bozon je spin-0 bozon i jedina poznata elementarna čestica koja nema spin. Nema električnog ili kolornog naboja. Ali je masivan, težak $125.350 \text{ MeV}/c^2$. Ovo je druga najmasivnija elementarna čestica; samo je gornji kvark teži.

Kao što su foton, 8 gluona i W i Z bozon svaki povezani sa poljem, tako je i Higsov bozon povezan sa Higsovim poljem. Podsjetimo da polja povezana s jakim i slabim nuklearnim silama imaju izuzetno ograničen domet, dok sila gravitacije i elektromagnetizma imaju beskonačan domet – ali njihova sila opada s udaljenosti. O njima razmišljamo kao o oblaku koji postaje sve tanji kako se udaljavamo od izvora. Higsovo polje, međutim, jednako prožima cijeli univerzum i nigdje se ne smanjuje. Higsov bozon je tada talas u ovom polju.

Ali za razliku od ostalih polja, Higsovo polje ne proizvodi nikakvu silu. Umjesto toga, proizvodi masu. Masa čestice je određena time koliko snažno ta čestica „osjeća“ Higsovo polje. Čestice poput fotona, gravitona i gluona uopšte ne stupaju u interakciju s Higsovim poljem. One ga ne mogu otkriti i tako ostaju bez mase. Čestice poput gornjeg kvarka vrlo snažno stupaju u interakciju sa Higsovim poljem i stoga su vrlo masivne. Čak i sam Higsov bozon snažno interaguje sa ovim poljem, uzrokujući njegovu veliku masu. Higsovo polje je predloženo 1964. da bi se objasnilo zašto W i Z bozoni imaju masu. Higsov bozon je eksperimentalno otkriven 2012.

Higsov bozon se ponekad naziva i „Božja čestica“ zbog popularne istoimene knjige iz 1990. koju je napisao fizičar Leon Lederman.

Čestica „vlada“ nad svim ostalima tako što njeno polje određuje njihovu masu. Međutim, većina fizičara ne koristi taj nadimak. Higsovo polje je očigledno mehanizam koji Bog koristi da odredi masu svih čestica u svemiru. Bez Higsovog polja, sve čestice bi bile bez mase i stoga bi putovale brzinom svjetlosti. Očigledno, hemija i biologija ne bi bile moguće u takvom univerzumu.

Lekcije iz kvantnog svijeta

ELEMENTARNE ČESTICE			
	Bozoni		Fermioni
Jaka sila gluoni		Leptoni	
Slaba sila W i Z			Anti-leptoni
Elektromagnetska sila fotoni		Kvarkovi	
Gravitacija gravitoni			Anti-kvarkovi
Higsovi			

Vidjeli smo da postoji tačno 12 elementarnih fermiona (šest kvarkova i šest leptona), zajedno sa njihovih 12 antičestica.³⁸ I postoji

³⁸ Alternativno, može postojati samo 9 jedinstvenih elementarnih antifermiona u zavisnosti od razloga zašto neutrimi imaju masu. U nekim modelima kvantne fizike,

tačno 14 elementarnih bozona.³⁹ Dakle, sve u svemiru je napravljeno od neke kombinacije ovih 38 čestica. Ali većina kvantnih čestica ima prolazno postojanje; stvaraju se i propadaju u djeliću sekunde. Samo tri od ovih čestica formiraju fizičke, masivne supstance sa dugotrajnom stabilnošću (same ili u kombinaciji). Naime, gornji i donji kvarkovi formiraju sve protone i neutrone, a elektroni „kruže“ oko jezgra u približno jednakom broju kao i protoni. Ovo rezultira univerzumom koji je u cjelini električno neutralan i određuje svojstva svih hemikalija.

Međutim, vidjeli smo da su mnoge prolazne, kratkovječne čestice bitne za držanje materije na okupu. Interakcija gluona u protonu ili neutronu drži tri kvarka zajedno. A mezoni koji se formiraju oko nukleona posreduju zaostalu jaku silu, držeći protone i neutrone zajedno u jezgru atoma. Virtuelni fotoni drže elektrone u orbiti oko jezgra atoma posredovanjem elektromagnetne sile. A gravitoni očigledno posreduju silu gravitacije, koja sprečava da Zemljina atmosfera pobegne u svemir, i drži zemlju da kruži oko Sunca.

Mala promjena bilo koje od ovih bitnih čestica i svojstava ili pravila koja se pridržavaju, i fizički svemir kakav poznajemo ne bi mogao postojati. Zamislite samo inteligenciju potrebnu za razmišljanje kroz logiku o tome kako se sve čestice moraju ponašati da bi univerzum bio pravi za biološki život. Sekularizam nema odgovor za ovo. I tako, prva lekcija koju učimo od kvantnih čestica je da samo beskonačni Božji um može razmišljati kroz sve beskonačne kombinacije čestica i pravila kako bi došao do rješenja koje dozvoljava svojstva ovog univerzuma.

Ipak, Bog je takođe kreativan. Neke od Njegovih kreacija možda nisu neophodne za život, a ipak pokazuju Njegovo veličanstvo. Koliko ja znam, najgornji kvark nije neophodan za život, ili za hemiju, fiziku

neutrini su vlastita antičestica. Takav scenario bi značio da leptonski broj nije sačuvana veličina.

³⁹ Ovo uključuje hipotetički graviton. To uključuje i antičestice. Graviton, foton, Higs i Z^0 su svaki svoja antičestica. Antičestica bilo kog gluona je samo još jedan gluon, a antičestica W^+ je W^- .

ili astronomiju da budu onakve kakve jesu ove discipline.⁴⁰ Ipak, čestice poput neutralnog kaona (koje možda nisu neophodne za život), otvorile su nove arene u fizici ponašajući se na neočekivane načine.⁴¹ One nam daju uvid u kreativnost Božju.

Budući da je čovječanstvo stvoreno na Božju sliku, kao odraz Njegove prirode, mi imamo barem ograničenu sposobnost da otkrijemo i razumijemo način na koji Bog podržava svoj univerzum. Bog nam se otkrio. Dakle, znamo nešto o Njemu. Pošto Božji um podržava sve stvoreno, i pošto je Bog logičan i matematički, zakoni prirode su logički i matematički. Matematika je mentalna vježba u logici brojeva, koji su pojmovi količine. Pa ipak, svemir se pokorava logici i matematici jer ga podržava Božji um. Sekularizam nema odgovor za ovo. To ne može objasniti uspjeh nauke, niti efikasnost matematike u formulisanju fizičkih zakona. Ali biblijski pogled na svijet može. Zaista, za mnoge od kvantnih čestica koje su eksperimentalno otkrivene bilo je predviđeno da postoje na osnovu matematike! A ovo je druga lekcija.

Ugniježdjena hijerarhija

Treća lekcija se tiče načina na koji su čestice klasifikovane. Vidjeli smo da kvantne čestice uredno spadaju u određene porodice. Postoje kompozitne čestice koje su napravljene od manjih čestica, a postoje i elementarne čestice koje su nedjeljive. Od elementarnih čestica, 12 su fermioni (i 12 antičestica), zajedno sa 14 bozona. 12 fermiona spada u dvije porodice: kvarkovi i leptoni. Svaka od ove dvije porodice ima tačno šest članova koji se nazivaju arome. Nadalje, postoje dvije arome u svakoj od tri generacije. Kvarkovi se uvijek

⁴⁰ Naravno, samo Bog zna sa sigurnošću. Ne možemo razmišljati o svim implikacijama postojanja određenih čestica ili kako bi to uticalo na zakone prirode, dijelom zato što ne poznajemo sve zakone prirode.

⁴¹ Raspad neutralnih kaona bio je prvo poznato kršenje principa zvanog CP (paritet naboja). Detalji idu dalje od ovog rada. Međutim, naučnici su ranije smatrali da CP ne može biti prekršen. Otkriće da neutralni kaoni krše CP dovelo je do potpuno novih načina razmišljanja u fizici.

grupišu u druge kvarkove ili antikvarkove formirajući hadron. A postoje dvije vrste hadrona: barioni (koji su fermioni) i mezoni (koji su bozoni).

Elementarni bozoni dolaze u dvije široke varijante: mjerni bozoni i Higsov. Higsov je jedini član svoje klase (koliko znamo). Ali postoje četiri porodice mjernih bozona: po jedan za svaku od četiri fundamentalne sile. Postoji samo jedna vrsta fotona i jedna vrsta gravitona. Ali postoje tri čestice koje posreduju slabu silu (W^+ , W^- i Z^0), a postoji 8 varijanti gluona. Kako objašnjavamo ovaj logički obrazac?

Nadalje, čestice se mogu klasifikovati i po različitim kriterijima. Na primjer, čestice koje imaju pozitivnu masu mirovanja i putuju sporije od brzine svjetlosti nazivaju se bradioni. Čestice koje imaju nultu masu mirovanja i putuju brzinom svjetlosti nazivaju se luksoni. Čestice koje putuju brže od brzine svjetlosti nazivaju se tahioni. Svi kvarkovi, leptoni i hadroni su bradioni. Tako i W , Z i Higsovi bozoni. Fotoni, gluoni i gravitoni su luksoni. A koliko znamo, tahiona nema.

Dakle, sve čestice na kvantnom nivou mogu se klasifikovati u hijerarhiju unutar hijerarhije. Ovo se zove ugniježđena hijerarhija. U prirodi postoji mnogo ugniježđenih hijerarhija. Ali postoji jedna posebna koja se često pominje u raspravama o porijeklu. Naime, biološki organizmi spadaju u ugniježđenu hijerarhiju. Biolozi klasifikuju organizme prema Lineovoj taksonomiji: kraljevstvo, tip, klasa, red, porodica, rod i vrsta.

I šta je odgovorno za ovu hijerarhiju? Kako to objašnjavamo? Evolucionisti su tvrdili da je ova hijerarhija organizama rezultat evolucije. Kaže se da organizmi imaju sličnosti jer dijele zajedničkog pretka. Kaže se da su se postupne, beskonačno male promjene akumulirale tokom miliona godina mutacija, što je na kraju rezultiralo velikom raznolikošću života. Neki evolucionisti su čak tvrdili da je evolucija jedino objašnjenje za ovu ugniježđenu hijerarhiju.

Međutim, kvantne čestice pobijaju ovu ideju. Vidjeli smo da kvantne čestice takođe uredno spadaju u ugniježđenu hijerarhiju. Ipak, bilo bi apsurdno reći da je to zato što su postepeno evoluirale od

zajedničkog pretka. Nije kao da je elektron reprodukovao malo masivniji elektron, što je dovelo do malo masivnije verzije sve dok elektron nije evoluirao u mion.

Za razliku od životinja, kvantne čestice se mogu promijeniti u druge čestice – one se raspadaju. Ali ovaj proces je trenutani i nikada ne rezultira novom vrstom čestica. Umjesto toga, svaki raspad čestice uvijek će rezultirati nekom kombinacijom od 38 elementarnih čestica koje je Bog stvorio. Nadalje, način na koji se čestice raspadaju strogo je regulisan zakonima očuvanja. Čestice se ne mogu promijeniti u ništa drugo osim u razne kombinacije od 38 čestica kojima Bog dozvoljava da postoje u Njegovom univerzumu.

Pojam neke vrste evolucije kroz nesavršenu replikaciju od zajedničkog pretka nije starter za čestice. One jednostavno ne rade na taj način. Dakle, šta će objasniti ugniježđenu hijerarhiju čestica? Kvantne čestice se mogu svrstati u logičku hijerarhiju jer je njihovo postojanje određeno racionalnim Umom. Bog Svetog pisma je osnova za logički obrazac sličnosti i razlika koje postoje u svemiru. Bog vlada prirodom na način koji izražava i jedinstvo i različitost. I to je ono što čini taksonomsku klasifikaciju mogućom.

Dakle, elektroni, mioni i tau čestice svi su klasifikovani kao leptoni jer su svi spin $\frac{1}{2}$ i imaju električni naboj negativno 1. Ali razlikuju se po masi i stoga su različiti članovi ove porodice. Na isti način, i psi i mačke imaju kosti, krzno i četiri noge; oboje rađaju živo, i doje svoje mlade. Oboje su u klasi sisara. Ali razlikuju se u anatomske detaljima i stoga su u različitim porodicama. Hrišćanski pogled na svijet može objasniti zašto se ne samo životinje, već i mnogi drugi aspekti prirode mogu klasifikovati u ugniježđenu hijerarhiju. To nije zbog darviniističke evolucije. To je zbog suvereniteta Boga Svetog pisma.

Zaključak

Kvantna fizika je složena tema. U ovom kraćem radu smo samo zagrebali po površini, pokrivajući tipove elementarnih čestica za koje se zna ili pretpostavlja da postoje i neka od njihovih osnovnih

svojstva. Potrebne su godine učenja da bi se savladala matematika neophodna za izračunavanje kvantnih fenomena. Čak su i mnogi koncepti teški. Vidjeli smo čestice koje se ponašaju poput talasa ili postoje s neodređenim sastavom. Kontraintuitivna priroda ove teme rasteže naš um. Ipak, sva ova čudna svojstva su ono što omogućava hemiji da radi na način da je biologija moguća. Zadivljujuće je uzeti u obzir kako je Gospod mislio na sve ovo. Štaviše, Božji um je taj koji podržava sve stvoreno. Njegove misli kontrolišu svaku česticu u svemiru. Naš odgovor treba da bude da Ga slavimo.

Prevod sa engleskog: Pavle Simović