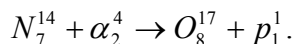


Nuklearna fizika i elementarne čestice

Otkriće protona

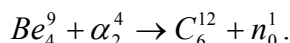
1919. godine novozelandski fizičar Ernest Raderford je otkrio postojanje protona u atomskom jezgri, tako što je bombardovao jezgra azota-14 alfa česticama. Pri zahvatu alfa čestice jezgro azota se pretvara (transmutuje) u jezgro kiseonika-17 pri čemu se iz jezgra oslobađa jedan proton. Formula koja prikazuje ovu reakciju je:



Pored toga što je ovom reakcijom otkrio postojanje protona, Raderford je u njoj izazvao prvu veštačku transmutaciju – pretvaranje jednog elementa u drugi, u ovom slučaju azota u kiseonik . Na ovaj način ostvaren je vekovni san alhemičara, ili bar polovina onog što su pokušavali. Drugi deo njihovih nastojanja, a to je otkriće »eliksira mladosti«, ostao je nažalost neostvareni san.

Otkriće neutrona

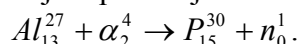
Posle otkrića protona Raderford je pretpostavio da se u jezgri atoma nalazi još jedna čestica koja mora biti neutralna i čija masa mora biti slična masi protona. Traganje za ovom česticom on je prepustio svom saradniku Džejmsu Čedviku, koji je posle 11 godina mukotrpnog eksperimentisanja konačno 1932. godine uspeo, tako što je bombardovao jezgra berilijuma-9 alfa česticama. Pri zahvatu alfa čestice jezgro berilijuma-9 se transformiše u jezgro ugljenika-12, ispuštajući pritom jedan neutron. Formula koja prikazuje ovu reakciju glasi:



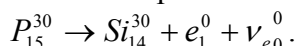
Veštačka radioaktivnost

Veštačka radioaktivnost je pretvaranje stabilnih atomskih jezgara u nestabilna – radioaktivna jezgra putem njihovog bombardovanja: alfa česticama, neutronima, protonima i drugim česticama.

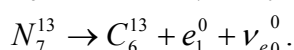
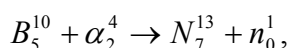
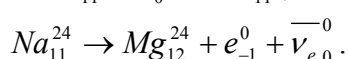
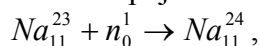
Prvi su do veštački stvorenih radioaktivnih izotopa došli 1934. godine Irena i Frederik Žolio - Kiri. Irena je inače bila kći Marije i Pjera Kirija. Oni su u tom prvom uspešnom eksperimentu bombardovali jezgra aluminijuma-27 alfa česticama. Pri zahvatu alfa čestice, jezgro aluminijuma-27 se transformiše u jezgro fosfora-30, ispuštajući pritom jedan neutron:



Dobijeni izotop fosfora je jako nestabilan, tj. ima kratko vreme poluraspada ($T = 2.6 \text{ minuta}$), pa zato ovaj izotop ne postoji u prirodi. Fosfor-30 pokazuje sklonost ka spontanom β^+ – raspadu. Pri emitovanju pozitrona i elektronskog neutrina izotop fosfora se pretvara u stabilno jezgro silicijuma-30:



Evo još nekoliko reakcija koje dovode do pojave veštačke radioaktivnosti:



Ono što svakako treba uočiti je da su svi izotopi elemenata iznad olova radioaktivni, ali da i elementi sa početka, ili iz sredine periodnog sistema imaju nestabilne, tj. radioaktivne izotope. Ovi izotopi obično ne postoje u prirodi, zbog svoje sklonosti ka radioaktivnom raspadu. Proces koji dovode do veštačke radioaktivnosti su u stvari procesi stvaranja ovakvih nestabilnih izotopa, da bi se u drugom delu pustilo da se oni sami raspadnu i da pređu u neki drugi izotop koji ima stabilno jezgro.

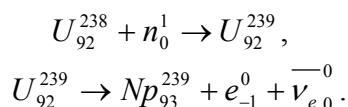
Interakcija neutrona sa jezgrom. Transuranski elementi

Ako neutron naleti na jezgro nekog teškog elementa, tada postoje tri mogućnosti:

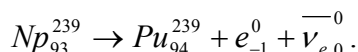
- elastičan sudar pri čemu se neutron odbija o jezgro i ne izaziva nikakvu promenu na njemu,
- zahvat neutrona pri čemu se jezgro transformiše u novo najčešće nestabilno jezgro, pa kao posledica se desi njegov radioaktivni raspad i
- zahvat neutrona pri čemu se jezgro deli na dva manja jezgra uz ispuštanje nekoliko neutrona i oslobađanje energije. Ovaj proces je poznat kao fisija (cepanje) jezgra.

Druga mogućnost je ona koja omogućava stvaranje jezgara veštačkih elemenata, tj. transuranskih elemenata. To su svi elementi čiji su redni brojevi veći od 92 : Np_{93} - neptunijum, Pu_{94} - plutonijum, Am_{95} - americijum, Cm_{96} - kirijum, Bk_{97} - berkljum, Cf_{98} - kalifornijum, Es_{99} - ajnštajnijum, Fm_{100} - fermijum, Md_{101} - mendeljevijum, No_{102} - nobelijum, Lw_{103} - lorencijum, ...

Neptunijum je otkriven tako što je jezgro uranijuma-238 bombardovano neutronom i posle njegovog zahvata nastalo je jezgro izotopa uranijuma-239 koje je sklono β^- - raspadu. Reakcija se može prikazati na sledeći način:



No i sam neptunijum-239 je sklono β^- - raspadu, pa se tako dobija plutonijum-239:



Plutonijum ima izuzetno veliki praktični značaj, zato što su njegova jezgra vrlo sklona fisiji pri bombardovanju sporim neutronima, pri čemu se oslobađa ogromna količina energije.

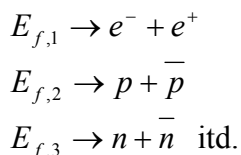
Čestice i antičestice

1929. godine engleski matematičar Pol Dirak objavljuje svoju kvantnu teoriju u radu pod imenom Kvantna teorija vakuuma.

U jednom delu svoje teorije Dirak matematičkim putem predviđa postojanje antičestica. Prevod matematičkog na govorni jezik je najlakše razumeti kroz sledeću analogiju.

Vakuum u analogiji možemo zameniti leđinom na čijoj površini su iskopane rupe različitih dimenzija, ali tako da u njih mogu da se smeste lopte različitih veličina: za košarku, rukomet, odbojku, fudbal, tenis, golf, itd. A onda su ove lopte i stavljene u sebi odgovarajuće rupe, tako da sve rupe budu popunjene. Ako sada dovedete nekoga ko o svemu ovome nema pojma, pa ga pitate da li na ovoj leđini ima nečega, on će vam verovatno odgovoriti da je leđina prazna. Ali mi znamo da to nije istina, iako je to ono što on vidi. Ako želimo mi možemo otkopati i izvaditi bilo koju od tih lopti, pri čemu ćemo imati i loptu i odgovarajuću rupu na površini leđine. Ali mi možemo uraditi i suprotno tu loptu možemo i vratiti nazad u njoj odgovarajuću rupu čime ćemo opet doći u situaciju da i lopta i rupa budu nevidljive.

Ovako možemo zamisliti i vakuum. Prividno on je prazan ali u njemu postoje skrivene »rupe« u kojima se nalaze odgovarajuće čestice. Ako foton odgovarajuće energije pogodi česticu skrivenu u »rupi« ona može iskočiti iz nje ostavljajući za sobom praznu »rupu«. Pritom je jako važno da se u blizini nalazi neko teško atomsko jezgro, da bi na sebe preuzelo deo impulsa, što omogućava važenje zakona održanja impulsa u vektorskom obliku. Čestica koja iskoči iz svoje »rupe« može biti: elektron, proton, neutron ili ma koja druga čestica. Prazna »rupa« koja ostaje iza nje je njena antičestica: antielektron (pozitron), antiproton, antineutron ili neka druga odgovarajuća antičestica. Upravo je opisan proces koji dovodi do stvaranja antičestica, a koji se naziva kreacija (stvaranje) parova. Ovi procesi se mogu prikazati relacijama:



Zanimljivo je da antičestica ima istu masu kao i njoj odgovarajuća čestica. One imaju uvek suprotno naelektrisanje, što omogućuje njihovo lako razlikovanje, osim kada su obe neutralne.

Energija fotona, koja je potrebna da bi došlo do kreacije para čestica – antičestica, mora biti jednaka zbiru njihovih masa pomnoženom kvadratom brzine svetlosti:

$$E_{f,1} = 2m_e \cdot c^2$$

$$E_{f,2} = 2m_p \cdot c^2$$

$$E_{f,3} = 2m_n \cdot c^2 \quad \text{itd.}$$

Proces kreacije parova je strogo selektivan, što znači da stvaranje konkretne čestice (recimo protona) uvek prati stvaranje njoj odgovarajuće antičestice (u ovom slučaju antiprotona). Ovo postoji i u analognom primeru sa leđinom. Naime, nemoguće je iz rupe za lopticu za tenis izvući fudbal ili košarkašku loptu. Obrnuto je moguće, ali tada ne bi bili ispoštovani svi uslovi, naime, loptica za golf bi mogla biti u rupi za košarkašku loptu, ali bi se tada teško moglo reći da su loptica i rupa nevidljive za nekog posmatrača.

Mnogo jednostavniji (ali ne i tačniji) opis ova dva procesa je:

Anihilacija čestice i njoj odgovarajuće antičestice je, da kada dođu u kontakt, pretvaranje njihove celokupne mase u energiju.

Stvaranje para: čestica i njoj odgovarajuća antičestica je pretvaranje energije fotona u njihovu masu.

1932/33. godine (baš u novogodišnjoj noći) američki fizičar Anderson je prvi otkrio kreaciju para elektron – antielektron. Ovo je i jedina antičestica koja ima svoje posebno ime – pozitron. Kasnije je došlo do otkrića jako velikog broja čestica (oko 150), tako da se njihove antičestice nazivaju istim imenom koji ima i sama čestica sa prefiksom – anti.

Ako dalje sledimo analogiju, moguće je da se čestica vrati u sebi odgovarajuću »rupu«, tj antičesticu, pri čemu bi prešla u stanje sa manjom energijom pa bi došlo do emitovanja energije:

$$e^- + e^+ \rightarrow E_1$$

$$p + \bar{p} \rightarrow E_2$$

$$n + \bar{n} \rightarrow E_3 \quad \text{itd.}$$

Ova energija bi bila emitovana uvek u vidu dva, po energiji jednaka, fotona – zbog zakona održanja impulsa u vektorskom obliku.

Prikazani proces, suprotan procesu kreacije parova, naziva se anihilacija (poništavanje).

Kao i proces kreacije parova i proces anihilacije je strogo selektivan. Na primer: elektron će anihilirati samo sa pozitronom i ni sa jednom drugom antičesticom.

Tragove antičestica možemo otkriti u višim slojevima atmosfere, gde uleću visokoenergetski fotoni γ - zraka i kosmičkih zraka, a onda u prisustvu jezgara atoma gasova koji čine atmosferu, izvode kreaciju parova. To moraju biti visokoenergetski fotoni zato što energija koja odgovara masi najmanjeg od tri prikazana para, a to su elektron i pozitron, iznosi:

$$E_{f,1} = 2m_e \cdot c^2 = 2 \cdot 9.108 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 1.64 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 1.025 \cdot 10^6 \text{ eV} = 1.025 \text{ MeV}.$$

Pri transformaciji jedinica korišćena je veza: $1\text{J} = 6.25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$.

Kako je:

$$E_f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda_{f,1} = h \cdot \frac{c}{E_{f,1}} = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.64 \cdot 10^{-13} \text{ J}} = 1.212 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 1.212 \cdot 10^{-3} \text{ nm},$$

a to je talasna dužina koja se nalazi u području γ - zraka (γ - zraci se prostiru od 10^{-2} nm do 10^{-6} nm).

Obrnuto, pri anihilaciji elektrona i pozitrona emituju se dva jednaka fotona, od kojih svaki ima energiju:

$$E_f = \frac{E_{f,1}}{2} = \frac{1025 \text{ KeV}}{2} = 512.5 \text{ KeV}.$$

Ovoj energiji fotona odgovara dvostruko veća talasna dužina od talasne dužine fotona koji izaziva kreaciju para elektron-pozitron:

$$\lambda = 2 \cdot \lambda_{f,1} = 2 \cdot 1.212 \cdot 10^{-3} \text{ nm} = 2.424 \cdot 10^{-3} \text{ nm},$$

što je još uvek γ - zračenje.

Procese kreacije parova i anihilacije možemo formalno smatrati za pretvaranje energije u masu i obrnuto mase u energiju.

Objašnjenje koje malo dublje prikazuje ove događaje je da se čestica, koja se nalazi skrivena u svojoj antičestici, nalazi u vezanom energetsom stanju, dakle sa negativnom energijom koja je jednaka njenoj dvostrukoj masi pomnoženom brzinom svetlosti na kvadrat. Ako takvu česticu pogodi foton baš tolike energije, ona ga apsorbuje i skače u slobodno stanje, tj. pojavljuje se u normalnom prostoru, ostavljajući za sobom vidljivu antičesticu. Obrnuto, pri anihilaciji čestica sreće svoju antičesticu i kako antičestica za nju predstavlja stanje sa manjom energijom, čestica, u skladu sa principom minimuma energije, skače u nju pri čemu se oslobađa iste onolike energije koliko je inače apsorbovala u procesu kreacije para.

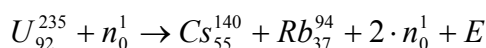
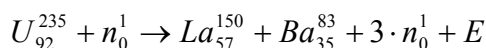
Naučnici su već napravili i prve pojedinačne atome antimaterije i to antivodonika i antihelijuma. Ovi antiatomi imaju negativno jezgro i pozitivan pozitronski omotač.

Fisija

Fisija je proces cepanja (deobe) teškog atomskog jezgra pri čemu se deo mase tog jezgra pretvara u energiju. Cepanje je posledica bombardovanja ovog jezgra neutronom, pri čemu dolazi do zahvata neutrona. Posledica je da jezgro prelazi u jako nestabilno stanje koje izaziva njegovu deobu na najčešće dva ili retko na tri manja i nejednaka jezgra, pri čemu biva emitovano 2 do 3 neutrona i velika količina energije u vidu svih elektromagnetnih talasa, ali najviše u vidu γ - zraka. Ova dva novonastala jezgra imaju redne brojeve koji stoje u približnom odnosu 3 : 2. Verovatnoća da odnos rednih brojeva bude zanačajno drugačiji je izuzetno mala.

Fisiji nisu sklona sva teška jezgra. Od onih koja se najčešće upotrebljavaju su: uranijum-235, plutonijum-239 i torijum-232. Zašto se energija dobija baš pri cepanju jezgara sa kraja periodnog sistema objašnjeno je u oblasti: Nuklearna fizika, a u lekciji: Defekt mase i stabilnost atomskog jezgra.

Evo dva primera fisije uranijuma-235 onako kako se ona realno dešava:



Ono što je ovu reakciju učinilo upotrebljivom za proizvodnju energije je emisija nekoliko neutrona koji mogu izazvati nova cepanja i tako otpočeti lančanu reakciju, koja omogućava da ovaj proces kada se jednom započne traje sve dok ima jezgara za nova cepanja. Uslov da dođe do lančane reakcije je da postoji dovoljna količina fisionog goriva – kritična masa. U slučaju da je količina goriva manja od kritične mase preveliki broj neutrona potpuno promaši jezgra fisionog goriva i zbog toga se reakcija usporava sve dok se potpuno ne ugasi.

Postoje i drugi procesi pri kojima se oslobađa ogromna energija, ali se ne mogu upotrebiti u komercijalne svrhe. Jedan takav proces je:



Međutim reakcija ne produkuje nove protone koji bi uspostavili lančanu reakciju, pa se litijum mora neprekidno bombardovati iz spoljašnjeg izvora protona, a pri tome tek svaki milioniti proton pogodi jezgro litijuma, tako da se u energetsom smislu proces ne isplati. Kao podatak – transformacijom samo 7 grama litijuma u helijum, ovim procesom, oslobađa se toplota jednaka toploti koja bi se oslobodila pri sagorevanju 50 tona kamenog uglja.

Neutroni koji održavaju lančanu reakciju u reakciji fisije su prirodno vrlo brzi, pa ih je potrebno usporiti, ali takođe i smanjiti njihov broj da ne bi došlo do nekontrolisanog ubrzavanja reakcije, koje bi na kraju dovelo do eksplozije nuklearnog reaktora. Za usporavanje neutrona služe teška voda, grafit i neka

jedinjenja berilijuma, a za apsorpciju viška neutrona služe bor i kadmijum. Međutim lančana reakcija može početi i da se gasi, pa zbog toga u reaktorima postoje ogledala za vraćanje neutrona u fisiono gorivo. Ova reflektori neutrona su obično od berilijuma.

Očigledno je da se atomskoj bombi usporavanje i apsorpcija neutrona ne vrše, ali se zato koriste reflektori neutrona.

Ako bi se sva jezgra u samo jednom gramu uranijuma-235 pocepala, došlo bi do oslobađanja energije jednake količini toplote koja se oslobodi pri sagorevanju 5 tona uglja, ili 3000 litara nafte. Iz ovih podataka je jasno zašto naša civilizacija koristi nuklearne reaktore za proizvodnju energije, bez obzira što su oni vrlo opasni.

Najveća opasnost pretil: od nesreća u nuklearnim elektranama (Otok od tri milje, Černobil, ...), od nuklearnog otpada i na kraju od neposrednog zračenja kojem je izloženo područje neposredno oko elektrane.

Radioaktivni otpad su jezgra onih izotopa koji nastaju cepanjem početnih jezgara nuklearnog goriva. To su elementi iz sredine periodnog sistema, međutim dobijeni izotopi su visoko radioaktivni. Radi se o tome da svako od tih jezgara ima znatan višak neutrona, čega se jezgro rešava β^- – raspadom. Dobijeni produkti fisije nemaju nikakvu upotrebnu vrednost, a visoko su radioaktivni. Ovaj otpad se smešta u olovnu burad i skladišti se daleko od naseljenih mesta i negde gde ga je moguće hladiti, zato što se pri radioaktivnim raspadima ovaj materijal zagreva, pa postoji opasnost da se ova burad istopi. Najčešće se radioaktivni otpad stavlja u duboka okna napuštenih rudnika sa jakom ventilacijom, ali Amerikanci ovu burad potapaju u Tihi okean na dubini od oko 300 m. Jedini pravi način da se oslobodimo ovog izuzetno opasnog materijala je napuniti raketu njime, a onda je lansirati u Sunce, međutim ovaj način je izuzetno skup.

Velika polemika u svetu se vodi oko opasnosti od zračenja za neposrednu okolinu nuklearne elektrane. Ovaj problem je nemoguće savršeno dobro rešiti, zato što svi materijali koje izložimo radioaktivnom zračenju postanu posle nekog vremena i sami radioaktivni, pa tako i zaštitni zidovi reaktora. Zato svaka nuklearka ima svoj upotrebni vek koji iznosi oko 20 godina, a onda napušta i zaliva se debelim slojem betona da bi se koliko toliko zaštitila neposredna okolina.

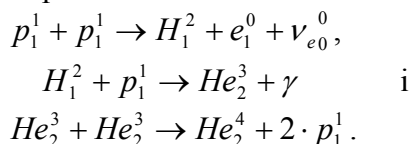
Fuzija

Fuzija je proces spajanja lakih atomskih jezgara, pri čemu se deo mase tih jezgara pretvara u energiju.

Razlozi da se energija dobija baš pri spajanju lakih jezgara su objašnjeni u oblasti: Nuklearna fizika, a u lekciji: Defekt mase i stabilnost atomskog jezgra.

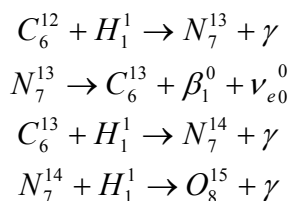
Fuzija se u prirodi dešava u zvezdama, koje na taj način proizvode energiju. Kada nastanu, zvezde se sastoje poglavito od vodonika, a njegovom fuzijom u helijum zvezda proizvodi energiju dok se nalazi u svojoj stabilnoj fazi. Naše Sunce se u stabilnoj fazi nalazi oko 4.5 milijardi godina i u toj fazi će ostati bar još toliko vremena.

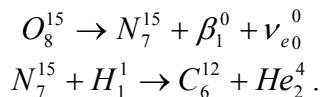
Postoji više načina kako se vodonik fuzioniše u helijum, a sledećim relacijama je prikazan jedan od tih načina koji se naziva protonsko – protonski ciklus:



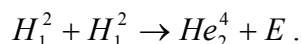
Ne treba zaboraviti da su protoni koji učestvuju u reakciji u stvari jezgra atoma vodonika.

Još jedan značajan načina za fuziju vodonika u helijum u zvezdama je ugljenično – azotni ciklus koji je prikazan sledećim relacijama:





Sledeća relacija bi bila najjednostavniji primer fuzione reakcije:



Sa E je obeležena energija koja se oslobađa pri ovom procesu.

Da bi došlo do reakcije fuzije potrebno je da se početno gorivo nalazi u uslovima izuzetno visoke temperature i ogromnog pritiska.

U fuzionim (vodoničnim, hidrogenskim ili termonuklearnim) bombama potrebna početna temperatura i početni pritisak se stvaraju eksplozijom fisione (atomske, uranijumske, plutonijumske ili nuklearne) bombe, kao upaljača.

Kod fuzionih reaktora stvari su mnogo komplikovanije, tako da još uvek nismo uspeli u nastojanjima da ovim procesom proizvodimo energiju. Laici obično misle da je problem stvoriti tako veliku temperaturu (oko 20 miliona stepeni), ali problem je mnogo banalniji, ali ništa lakši zbog toga. Kada vodonik zagrejemo do potrebne temperature i pritiska (obično upotrebom lasera) on prelazi u visoko jonizovano stanje – poznato kao četvrto agregatno stanje koje se naziva plazma. Ovakvu vrelu plazmu treba držati što duže zatvorenu u ograničenom prostoru, da bi se dalo vreme pojedinačnim jezgrima vodonika da se što više sudaraju – pri ovakvim sudarima dešava se njihovo spajanje, tj. fuzija. Naime, fuzija se ne dešava pri sobnoj temperaturi i atmosferskom pritisku zato što se jezgra međusobno jako odbijaju Kulonovom silom. Da bi se jezgra dovoljno približila da ih spoji jaka, ali kratkodometna nuklearna sila potrebno je izazvati nekim spoljašnjim faktorom njihova sudaranja. To se upravo i postiže visokim temperaturama i pritiscima.

A sada u čemu je problem ? Problem je: u čemu držati vrelu plazmu više minuta, sati, dana ... Dakle, od čega napraviti zidove koji treba da spreče razilaženje jezgara vodonika, a ona bi se bez prepreke razila u nanosekundi zato što na ovako ogromnoj temperaturi jezgra imaju ogromne brzine. Glavni i na prvi pogled nerešiv problem je u tome što bi se svaki materijal istopio već na 3 do 4 hiljade stepeni, a u pitanju je 20 do 100 miliona stepeni.

Naučnici danas rade na projektu TOKAMAK što je skraćenica od toroidalnog magnetnog polja. Ovo je jedini naučni projekat u svetu u koji su uključeni bez prepreka svi zainteresovani, tj. dogovor je da nema vojnih i državnih tajni u vezi sa pokušajima da se ostvari kontrolisana fuzija. Ovo govori o važnosti kontrolisanja fuzije, zato što su fosilna goriva pri kraju i opstanak naše tehnološke civilizacije je ugrožen. Zamislite samo da nestane struje, i da više nikada ne dođe ...

Ideja u projektu TOKAMAK je da se naprave svojevrsni »energetski štitovi« (kao oko svemirskih brodova u SF – filmovima) oko vrele plazme koji bi sprečili razilaženje brzih jezgara. Ovaj energetski štit bi bio pomenuto toroidalno magnetno polje. Ono ima oblik cevi (torus) i u unutrašnjost ovakve »cevi« bi bila stavljena plazma, a zidovi od magnetnog polja bi sprečavali prolazak jezgara Lorencovom silom koja bi, ona jezgra koja bi pokušala da prođu kroz magnetni zid, zavrtila u krug i vratila nazad. Magnetni zidovi se ne bi mogli istopiti jer magnetno polje nije supstanca, ali sada je glavni problem da se proizvedu magnetna polja dovoljne jačine. Za sada ostvarene jačine magnetnog polja su još uvek nedovoljne da bi zadržale plazmu dovoljno dugo da bi se proces fuzije ostvaren u njemu u energetskom smislu isplatio.

Energija koja se oslobađa u procesu fuzije po jednom nukleonu je oko 5 MeV-a, dok je energija koja se oslobađa u procesu fisije po jednom nukleonu prosečno nešto manja od 1 MeV-a. Zato se u odnosu na fisiju energiju, koja se naziva nuklearnom, fuziona energija naziva termo-nuklearnom.

Elementarne čestice

Do sada smo imali samo jednu podelu elementarnih čestica i to na fermione i bozone.

Fermioni su čestice materije sa polubrojnim spinom za koje važi Paulijev princip isključenja.

Bozoni su čestice koje prenose silu sa celobrojnim spinom za koje ne važi Paulijev princip isključenja.

Pre svega čestice koje nazivamo elementarnim (protoni, neutroni, itd.) realno to nisu. Ideja u nazivu “elementarne” je da su to najsitnije čestice u prirodi, tj. čestice koje nemaju unutrašnju strukturu. Ovo do sada rečeno znači da protoni, neutroni i druge mikročestice (elektroni su namerno izostavljeni) imaju unutrašnju strukturu. To dalje znači da su sastavljene od još sitnijih čestica. Te čestice su otkrivene i nazvane kvarkovi. Naziv “kvark” je uzet iz jedne zagonetne rečenice Džemsa Džojisa u romanu Fineganovo bdenje, koja glasi: “Three quarks for Master Marks”. Moderna teorija mikrosveta smatra da su kvarkovi najsitnije i dalje nedeljive čestice. Pored kvarkova postoji još jedna klasa čestica koje su stvarno elementarne, a njihov njihov naziv je – leptoni (lake čestice).

Fizičari, i dalje nazivaju protone, neutrone i ostale čestice (kojih ima oko 150) elementarnim, a leptone i kvarkove fundamentalnim česticama.

Leptoni

Leptona ima ukupno 6, ili ih je bar toliko otkriveno, i svaki od njih ima svoju antičesticu:

e^- - elektron, ν_e - elektronski neutrino, μ^- - mi mezon (mion), ν_μ - mimezonski (mionski) neutrino, τ^- - tau lepton (taon) i ν_τ - tauleptonski (taonski) neutrino.

Leptoni su organizovani u tri dubleta, tako da svaki negativni lepton ima svoj neutrino. Kada se bilo koji negativni lepton stvori u nekoj reakciji, on obavezno biva praćen (anti)neutrinom koji je njegov dublet. Primer za ovo je β^- - raspad: $n_0^1 \rightarrow p_1^1 + e_{-1}^0 + \bar{\nu}_{e0}^0$, ali i β^+ - raspad: $p_1^1 \rightarrow n_0^1 + e_1^0 + \nu_{e0}^0$. To što je u ove dve reakcije: lepton praćen antileptonom iz svog dubleta i obrnuto: antilepton praćen leptonom iz svog dubleta, nije slučajno. U svakoj reakciji važi zakon održanja leptonskog broja. Svi leptoni čestice imaju leptonski broj +1, svi antileptoni imaju leptonski broj -1, dok sve ostale čestice imaju leptonski broj 0.

$$\begin{array}{l} \text{U } \beta^- \text{ - raspadu: } n_0^1 \rightarrow p_1^1 + e_{-1}^0 + \bar{\nu}_{e0}^0, \quad \text{u } \beta^+ \text{ - raspadu: } p_1^1 \rightarrow n_0^1 + e_1^0 + \nu_{e0}^0 \\ 0 = 0 + 1 - 1 \qquad \qquad \qquad 0 = 0 - 1 + 1 \end{array}$$

Zakon održanja leptonskog broja važi i u β - zahvatu:

$$\begin{array}{l} p_1^1 + e_{-1}^0 \rightarrow n_0^1 + \nu_{e0}^0 \\ 0 + 1 = 0 + 1 \end{array}$$

Svi leptoni podležu samo gravitacionoj i elektromagnetnoj interakciji.

Kvarkovi

Teorija predviđa postojanje 6 kvarkova, a toliko ih je eksperimentalno i utvrđeno. To su:

u – up, gore; d – down, dole; s – strange, čudni; c – charm, šarmantni (ili začarani); b – bottom, dno i t – top, vrh.

Svaki od ovih šest kvarkova ima svoj odgovarajući antikvark: $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}$ i \bar{t} .

Svaki od 6 kvarkova postoji u 3 varijeteta. Naučnici su ova tri varijeteta nazvali bojama i to: crvena, zelena i plava. Ono što treba znati je da kvarkovi nemaju boje, jer je boja fenomen koji je povezan sa svetlošću, a njene talasne dužine su od 750 nm do 390 nm. Kvarkovi su manji od 10^{-6} nm, pa samim tim ne mogu imati boju u svakodnevnom smislu te reči. Ovaj naziv za tri varijeteta kvarka je izabran zbog zgodnih analogija sa realnim bojama, što ćemo malo kasnije i videti.

Šest antikvarka imaju takođe svoje tri boje, a to su: anticrvena, antizelena i antiplava.

Dakle, kvarkovi se javljaju u ukupno 18 varijeteta, od kojih svaki ima sebi odgovarajući varijetet antikvarka.

Dosta dugo se u fizici smatralo da je najmanja količina (elementarni kvant) elektriciteta u prirodi ona količina elektriciteta koju nosi jedan elektron ili proton: $e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$. Eksperimenti su pokazali da postoje i manje količine elektriciteta i to baš u kvarkovima. Kvark može imati dve vrednosti električnog naboja i to:

$$-\frac{1}{3} \cdot e \quad \text{i} \quad +\frac{2}{3} \cdot e.$$

Kvarkovi ne postoje u slobodnom stanju, oni su otkriveni kao sastavni delovi elementarnih čestica i to rasejanjem elektrona pri prolasku kroz, recimo, protone.

Sve elementarne čestice koje se sastoje od kvarkova se nazivaju hadroni.

Hadroni podležu svim vrstama interakcija, a to su: gravitaciona, elektromagnetna, slaba nuklearna i jaka nuklearna interakcija.

Zajedničko za sve hadrone je da ne mogu imati boju u onom smislu u kojem je kvarkovi imaju. Drugim rečima hadroni moraju biti »beli«. Po analogiji sa realnim bojama svetlosti:

belo = crveno + zeleno + plavo,

da hadroni budu beli postoje sledeći načini:

belo = crveno + zeleno + plavo,

belo = anticrveno + antizeleno + antiplavo,

belo = crveno + anticrveno,

belo = zeleno + antizeleno i

belo = plavo + antiplavo.

Evo delimične tablice elementarnih čestica:

Grupe čestica	Naziv čestice	Simbol čestice	Spin čestice	Masa čestice (MeV)	Vreme života (s)	
Leptoni	<i>Elektron</i>	e^-	$\frac{1}{2}$	0.512	∞	
	<i>Elektronski neutrino</i>	ν_e	$\frac{1}{2}$	< 0.000046	∞	
	<i>Mi – mezon (mion)</i>	μ^-	$\frac{1}{2}$	105.659	$2.1971 \cdot 10^{-6}$	
	<i>Mi mezonski (mionski) neutrino</i>	ν_μ	$\frac{1}{2}$	< 0.52	∞	
	<i>Tau lepton (taon)</i>	τ^-	$\frac{1}{2}$	1784	$4.6 \cdot 10^{-13}$	
	<i>Tau leptonski (taonski) neutrino</i>	ν_τ	$\frac{1}{2}$	< 250	?	
Hadroni	Mezoni	<i>π mezoni (pioni)</i>	π^\pm	0	139.576	$2.603 \cdot 10^{-8}$
			π^0	0	134.963	$0.83 \cdot 10^{-16}$
		<i>Eta nula mezon</i>	η^0	0	548.8	$0.7 \cdot 10^{-18}$
		<i>K mezoni (kaoni)</i>	K^+	0	494	$1.237 \cdot 10^{-8}$
			K^0	0	497.7	zavisi od vrste raspada
		<i>D plus teški mezon</i>	D^+	0	1869	$\approx 9 \cdot 10^{-13}$
		<i>Neutralni D mezon</i>	D^0	0	1865	$\approx 5 \cdot 10^{-13}$
	<i>F mezon</i>	F^+	0	2021	$\approx 2 \cdot 10^{-13}$	
	Barioni	<i>Proton</i>	p	$\frac{1}{2}$	938.279	∞
		<i>Neutron</i>	n	$\frac{1}{2}$	939.537	925 ± 11
		<i>Lambda hiperon</i>	λ^0	$\frac{1}{2}$	1115.6	$2.63 \cdot 10^{-10}$
		<i>Sigma hiperoni</i>	Σ^-	$\frac{1}{2}$	1189.4	$0.8 \cdot 10^{-10}$
			Σ^0	$\frac{1}{2}$	1192.5	$5 \cdot 10^{-20}$
			Σ^+	$\frac{1}{2}$	1197.3	$1.48 \cdot 10^{-10}$
<i>Ksi hiperoni</i>		Ξ^0	$\frac{1}{2}$	1315	$2.9 \cdot 10^{-10}$	
		Ξ^-	$\frac{1}{2}$	1321.3	$1.64 \cdot 10^{-10}$	
<i>Omega hiperon</i>		Ω^-	$\frac{1}{2}$	1672.5	$0.8 \cdot 10^{-10}$	
<i>Lambda hiperoni</i>	λ^+	$\frac{1}{2}$	2282	$1 - 2 \cdot 10^{-13}$		
	λ_b^0	$\frac{1}{2}$	5400	?		

Po tome od koliko se kvarkova sastoje, hadroni se dele na mezone i barione.

Mezoni se sastoje od dva kvarka, preciznije od jednog kvarka i jednog antikvarka.

Barioni se sastoje od tri kvarka, dok se odgovarajući antibarioni sastoje od tri antikvarka.

Mezoni

Kao što je već rečeno svaki mezon se sastoji od jednog kvarka i jednog antikvarka. Primeri:

$$\pi^0 = u\bar{u}, \text{ ili } \pi^0 = d\bar{d}, \quad \pi^+ = u\bar{d}, \quad \pi^- = d\bar{u}, \quad K^+ = u\bar{s}, \quad K^- = s\bar{u}, \quad K^0 = d\bar{s}, \quad \bar{K}^0 = s\bar{d}, \text{ itd.}$$

Očigledno je da su parovi: π^+ i π^- ; K^+ i K^- ; K^0 i \bar{K}^0 ; mezon i njemu odgovarajući antimezon. Upoređivanjem postaje jasno da je π^0 - mezon u obe varijante bez antičestice, ili se može reći da je sam sebi antičestica.

Što se tiče bele boje mezona ili antimezona ona se ostvaruje na jedan od sledeća tri načina:

belo = crveno + anticrveno,

belo = zeleno + antizeleno i

belo = plavo + antiplavo.

Svi mezoni su jako nestabilne čestice, tj. oni imaju izuzetno kratko vreme života.

Barioni

Kao što je već rečeno svaki barion se sastoji od tri kvarka, dok se njemu odgovarajući antibarion sastoji od tri odgovarajuća antikvarka.

Barion je bele boje tako što kvarkovi koji ga čine imaju sledeća tri varijeteta:

belo = crveno + zeleno + plavo,

dok je antibarion beo na sledeći način:

belo = anticrveno + antizeleno + antiplavo.

Barioni se dele na dve vrste: nukleone (proton i neutron) i na hiperone.

Proton i neutron su kombinacija u i d - kvarkova, dok hiperoni obavezno sadrže i ostala 4 kvarka – što ih čini jako nestabilnim.

Nukleoni i njihove antičestice imaju sledeću kvarkovsku strukturu:

$$p = uud, \quad \bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}; \quad n = ddu, \quad \bar{n} = \bar{d}\bar{d}\bar{u}.$$

Evo primera kvarkovske strukture i za nekoliko hiperona i njima odgovarajućih antihiperona:

$$\lambda^0 = uds, \quad \bar{\lambda}^0 = \bar{u}\bar{d}\bar{s}; \quad \Omega^- = sss, \quad \bar{\Omega}^- = \bar{s}\bar{s}\bar{s}, \text{ itd.}$$

Ovu poslednju – omega minus česticu je otkrio naš nuklearni fizičar Bogdan Maglič.

Kao i leptoni, barioni imaju svoj barionski broj, pri čemu je pravilo jednostavno: barion čestica ima barionski broj +1, barion antičestica ima barionski broj -1, dok ma koji lepton ili mezon ima barionski broj 0. U svim reakcijama, pa i u nama poznatim reakcijama β - raspada, važi zakon održanja barionskog broja:

$$\beta^- \text{ - raspad: } n_0^1 \rightarrow p_1^1 + e_{-1}^0 + \bar{\nu}_{e0}^0, \quad \beta^+ \text{ - raspad: } p_1^1 \rightarrow n_0^1 + e_1^0 + \nu_{e0}^0 \quad \beta \text{ - zahvatu: } p_1^1 + e_{-1}^0 \rightarrow n_0^1 + \nu_{e0}^0$$
$$1 = 1 + 0 + 0 \qquad 1 = 1 + 0 + 0 \qquad 1 + 0 = 1 + 0$$

Osnovne interakcije u prirodi

Osnovne interakcije u prirodi su:

- gravitaciona
- elektromagnetna
- slaba nuklearna i
- jaka nuklearna interakcija (sila).

U modernoj teoriji elementarnih čestica smatra se da postoje čestice koje prenose silu. Ove čestice imaju celobrojni spin: 1 ili 2 pa zato spadaju u bozone.

Bilo koja od prethodno navedenih sila ostvaruje se tako što čestica materije (telo) emituje česticu koja nosi silu, zbog čega dolazi do promene njene brzine. Emitovanu česticu sile zahvata i apsorbuje neka druga čestica materije (telo), zbog čega se menja i njena brzina. Upravo ova promena brzina te dve čestice ukazuje na njihovo uzajamno delovanje tj. na silu kojom one međusobno deluju. Neobično je da ne postoji način detekcije čestice koja prenosi silu dok preskače od jedne do druge čestice materije. Zbog toga se one nazivaju »virtuelnim« česticama. Međutim, postoje okolnosti u kojima se čestice koje prenose silu pojavljuju kao stvarne čestice. One se tada pojavljuju u obliku koji mi nazivamo talasom, a to mogu biti elektromagnetni ili gravitacioni talasi.

S obzirom da imaju celobrojni spin, čestice koje nose silu se ne pokoravaju Pulijevom principu isključenja. Ovo je značajno jer se zbog toga može produkovati jako veliki broj ovakvih čestica koje pri

razmeni tada čine jaku silu. Jaka sila može biti i posledica velike mase virtuelnih čestica, ali tada su ovakve sile kratkodometne. Ako su čestice koje nose silu male mase, tj. ako je njihova masa mirovanja jednaka nuli, sila je dugodometna, a njena jačina zavisi tada isključivo od broja razmenjenih virtuelnih čestica.

Kako postoje četiri vrste sila postoji i više vrsta virtuelnih čestica.

Gravitaciona sila

Ovu silu prenose virtuelni gravitoni. Graviton je čestica sa spinom 2. On nema masu mirovanja što omogućava da gravitaciona sila bude dugodometna. Stvarni gravitoni bi trebalo da predstavljaju gravitacione talase, ali ovakvi talasi još uvek nisu detektovani. Gravitaciona sila je ubedljivo najslabija od sve četiri vrste interakcija u prirodi. Na primer gravitaciona sila između dva elektrona je 10^{42} (jedinica iza koje se pruža niz od 42 nule) puta slabija od njihovog elektromagnetnog odbijanja. Međutim to je sila koja praktično upravlja megasvetom, tj. kretanjima galaksija, zvezda, planeta, njihovih satelita itd. Razlog za to je što su ostale tri sile ili kratkog dometa, ili mogu biti i privlačne i odbojne zbog čega se njihova dejstva na većim rastojanjima međusobno potiru. Naime, gravitaciona sila je uvek privlačna, pa se sva njena dejstva sabiraju u jednu vrlo jaku ukupnu gravitacionu silu. Činjenica da je gravitaciona sila praktično beskonačno dugog dometa samo dodatno objašnjava njen presudni uticaj na događaje u megasvetu.

Elektromagnetna sila

Ova sila je posledica razmene virtuelnih fotona. Foton je čestica sa spinom 1. On nema masu mirovanja pa je i elektromagnetna sila dugodometna. Stvarni fotoni čine elektromagnetne talase. Ovom silom mogu međusobno delovati samo naelektrisane čestice materije. Elektromagnetna sila je slabija samo od jake nuklearne sile. Ovo je onemogućava da upravlja događajima u atomskom jezgri, ali zato ona suvereno vlada događajima na nivou atoma i molekula. Na većim rastojanjima elektromagnetna dejstva se uglavnom poništavaju zato što ona može biti i privlačna i odbojna.

Slaba nuklearna sila

Je posledica razmene virtuelnih čestica koje su nazvane »masivni vektorski bozoni«. Postoje tri vrste masivnih vektorskih bozona: W^- (čita se ve minus), W^+ (ve plus) i Z^0 (ze nula). To su čestice sa spinom 1. Njihova masa mirovanja je jako velika, što uzrokuje da je slaba nuklearna sila izrazito kratkog dometa – ovaj domet je jednak veličini atomskog jezgra. Zato se uticaj ove sile i oseća samo unutar jezgra gde ona izaziva radioaktivne raspade npr. β^- raspad. Ova sila deluje samo između nukleona. Nije ni privlačna ni odbojna, već spada u necentralne sile. Jača je samo od gravitacione interakcije, dakle treća je u rangu po jačini.

Jaka nuklearna sila

Nastaje razmenom virtuelnih piona ili gluona. I pion i gluon su čestice sa spinom 1. Njihova masa mirovanja je jako velika, što uzrokuje da je i ova sila izuzetno kratkog dometa, koji je kao i kod slabe nuklearne sile jednak veličini atomskog jezgra. Ovo ograničava njeno delovanje na jezgro, ali je ona tu neprikosnoveni gospodar, zato što je ovo najjača sila u prirodi. Kako je uvek privlačna ona drži jezgro atoma na okupu nasuprot elektromagnetnoj sili koja pokušava da rasturi jezgro (zato što se protoni međusobno odbijaju).

Jaka nuklearna sila koja deluje između nukleona, npr. protona i neutrona u jezgri, se zasniva na razmeni virtuelnih piona između nukleona.

Jaka nuklearna sila koja deluje i između kvarkova – koji čine neki hadron – se pak zasniva na razmeni virtuelnih gluona između kvarkova. Ona je ta koja drži kvarkove na okupu unutar jednog mezona ili bariona.

Najnoviji eksperimentalni rezultati pokazuju da i gluoni (kao i kvarkovi) imaju »boju«. To dalje znači da kvarkovi menjaju boju pri razmeni virtuelnih gluona, ali uvek tako da njihove boje ukupno čine »belu« boju hadrona koji je od njih načinjen.