

## OSNOVNE SILE

### 1. Osnovne sile i subnuklearne čestice

Trenutno poznavanje prirode i fizičkih fenomena sugerira da postoje četiri tipa osnovnih interakcija između fizičkih tela: (1) gravitaciona, (2) elektromagnetska, (3) jaka i (4) slaba. Sve druge sile koje se čine neophodnim za objašnjenje mnogobrojnih pojava i fenomena, (kao što su na primer sile trenja između objekta koji se kreću, ili van der Waalsove sile između atoma i molekula), su jedino specifično ispoljavanje ovih osnovnih interakcija.

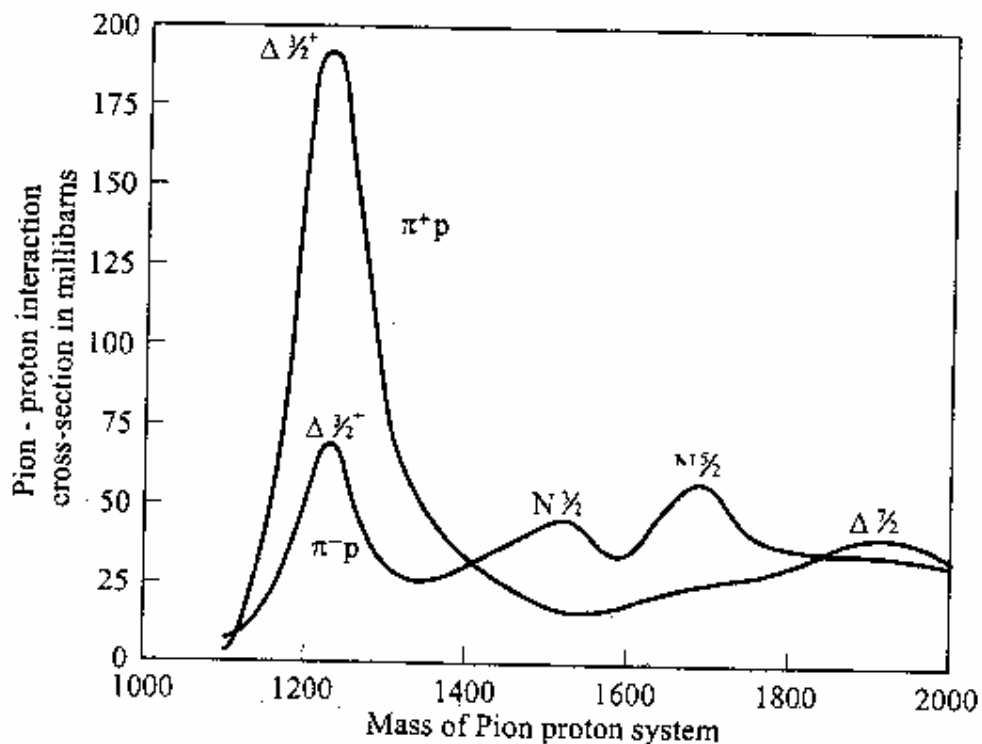
Jačina gravitacionih i elektromagnetskih sila se menja obrnuto proporcionalno sa kvadratom rastojanja, i u mogućnosti su da utiču na stanje objekta i na vrlo velikim udaljenostima, dok slaba i jaka interakcija opadaju eksponencijalno sa rastojanjem, tako da deluju na vrlo kratkim rastojanjima.

Intenzitet, odnosno jačina ovih sila, opada u sledećem redosledu; najjača je jaka interakcija, zatim slede elektromagnetska, slaba i najslabija je gravitaciona. Ovo možda izgleda čudnim, jer je kretanje nebeskih tela i struktura kosmosa uglavnom određena gravitacionom interakcijom, ali je ovo posledica kratkometnog karaktera jake i slabe interakcije, što ih čini zanemarljivim na velikim rastojanjima, i činjenice da gravitaciona sila deluje na sva tela dok elektromagnetske sile deluju samo na naelektrisane čestice, a materija je uglavnom električno neutralna. S druge strane, struktura atomskog omotača se može objasniti dejstvom samo elektromagnetske interakcije između elektrona i jezgra pošto je ovde gravitaciona interakcija zanemarljiva, dok je struktura jezgra uglavnom određena jakom interakcijom između nukleona, iako ove čestice mogu da interaguju elektromagnetskim i gravitacionim silama.

U ovom tekstu uglavnom se bavimo interakcijom subnuklearnih čestica preko jake, elektromagnetske i slabe interakcije. Svega su tri elementarne čestice stabilne, elektron, proton i foton. Druge čestice, kao na primer neutroni, su stabilne kada su vezane u jezgru, a nestabilne su kada su slobodne. Ostale čestice se stvaraju u interakciji između stabilnih čestica ili pri anihilaciji stabilne čestice sa anti česticom, suprotnog znaka, ili pak u interakciji između stabilnih čestica sa jezgrima. Ove čestice žive veoma kratko vreme koje je reda od  $10^{-23}$  do vrlo dugog vremena na subnuklearnoj skali  $10^{-6}$  s.

Ove nestabilne čestice su prvo opažene u kosmičkom zračenju koje neprekidno bombarduje zemlju i stvaraju se u interakciji primarnog kosmičkog zračenja (protoni i jezgra) sa atomima atmosfere i zemlje. Energije koje imaju čestice kosmičkog zračenja su veće nego što će verovatno ikada biti moguće dobiti na akceleratorima. Medjutim od ranih 1960 tih elementarne čestice se proizvode ubrzavajući protone ili elektrone u sve moćnijim i sofisticiranijim akceleratorima. Sudarom čestica i anti čestica u *colliderima* stvara se veliki broj nestabilnih čestica.

Mnoge od subnuklearnih čestica su opažene kao rezonance u efikasnim presecima reakcija kao na slici 1; druge čestice imaju dugo vreme života na subnuklearnoj vremenskoj skali i moguće je proizvesti intenzivne snopove takvih čestica- to su pionski ili kaonski snopovi stvoreni u tzv. "mezonskim fabrikama".



Slika 1. Rezonantna struktura efikasnog preseka interakcije pozitivnog i negativnog piona sa protonom. Rezonance niže mase odgovaraju dvostruko naelektrisanom i neutralnim članovima kvarteta čestica nazvanih  $\Delta$  sa masama  $1232 \text{ MeV}/c^2$  i spinom i parnošću  $3/2^+$ . Izospin je takodje  $3/2$ . Rezonance više mase su takodje prikazane.

Elementarne čestice se mogu klasifikovati u tri grupe, **leptone, hadrone i kvante**. *Leptoni su čestice koje ne osećaju jaku interakciju*. Hadroni su čestice koje osećaju dejstvo jake interakcije, ali oni takodje mogu interagovati i preko slabe interakcije. Obe grupe, leptoni i hadroni mogu da osele elektromagnetsku interakciju (ako su naelektrisane ili imaju magnetski momenat), i gravitacionu interakciju.

Gruppu leptona čini porodica od šest članova; *elektron i elektronski neutrino, mion i mionski neutrino,  $\tau$  (tau) čestica i  $\tau$  neutrino*. Svakom leptonu odgovara jedan antilepton (tako, ima ih ukupno 12) i nema eksperimentalne potvrde da ove čestice imaju bilo kakvu unutrašnju strukturu. Mogu se tretirati kao tačkasta Dirakova čestica i svi su fermioni.

Hadroni su tako brojni da se ne mogu tretirati kao elementarne čestice. Pored toga, imaju unutrašnju strukturu, koja se može objasniti preko šest čestica čudnih osobina

kao što je necelobrojno naelektrisanje; ove čestice su kvarkovi i mogu da postoje jedino vezani u hadronima. Kvarkovi su takodje tačkasti fermioni i svakom kvarku odgovara anti-kvark. Hadroni interaguju preko izmene para kvark - antikvark, mezona, koji su kvanti jake interakcije. Tako se jaka interakcija može objasniti preko superjake interakcije između kvarkova, kao što se molekulske veze objašnjavaju preko elektromagnetske interakcije.

Kvanti interakcije gravitacionog polja su *gravitoni*, elektromagnetskog polja su *fotoni*,  $W^\pm$  i  $Z$  čestice prenose slabe sile, i konačno *gluoni* za superjaku interakciju između kvarkova.

## 2. Karakter izmena osnovnih sila

Izmenjivost je jedna zajednička karakteristika svih osnovnih sila; interakcija se prenosi preko kvanta, *virtuelnih čestica* koje postoje vrlo kratko vreme i koje se ne mogu detektovati eksperimentalno.

Tako, elektromagnetske sile između dve naelektrisane čestice potiču od virtuelnih fotona koji se neprekidno emituju i apsorbuju od ovih čestica. Očigledno je da je emisija fotona energije  $E$  od strane izolovane čestice u suprotnosti sa principom održanja energije, tako da se prema principu neodređenosti takva čestica može pojaviti samo u toku vremena

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \quad (1)$$

gde  $\Delta E = E$  predstavlja promenu energije čestice koja emituje foton i ona je jednaka energiji virtuelnog fotona. U toku tog vremena foton može da predje rastojanje

$$R = c\Delta t \approx \frac{\hbar c}{E} \quad (2)$$

pri čemu ne dolazi do narušavanja zakona održanja energije. Kako foton ima masu jednaku nuli, rastojanje  $R$  može biti veoma veliko ako je  $E$  vrlo malo. Ovo objašnjava dugodometni karakter elektromagnetske interakcije i činjenicu da se njena jačina smanjuje sa rastojanjem, jer na velikim rastojanjima izmenjeni fotoni imaju vrlo malu energiju. Može se, jednostavnim razmatranjem pokazati, da je elektromagnetska interakcija između čestica proporcionalna sa kvadratom energije fotona. Kada čestica sa elementarnim naelektrisanjem  $e$  emituje ili apsorbuje foton ona mora da uzmakne sa impulsom

$$\Delta p = \frac{E}{c} \quad (3)$$

Ova promena impulsa se odigrava u vremenu  $\Delta t$  tako da je moduo sile

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{E}{c} \frac{E}{\hbar} = \hbar c \left( \frac{E}{\hbar c} \right)^2 = \frac{\hbar c}{R^2} \quad (4)$$

koji deluje na česticu.

Sila koja deluje izmedju naelektrisanih tela je Kulonova sila  $e^2/(4\pi\epsilon_0 R^2)$  i dobija se množenjem F konstantom koja predstavlja verovatnoću emisije i apsorpcije fotona. Ova konstanta je upravo konstanta fine strukture  $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$   $\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0\hbar c = 1/137$ .

Ovo jednostavno razmatranje pokazuje da je dugodometni karakter elektromagnetske interakcije posledica činjenice da je kvant elektromagnetskog polja, foton, bez mase, tako da je njegova ukupna energija jednaka nuli. Pored toga, gravitaciona interakcija je takodje dugodometna, i to znači da je njen kvant, graviton, takodje bez mase.

Kratkodometni karakter slabe i jake interakcije potiče od konačnosti masa kvantata ovih polja. Ovo su različite vrste mezona u slučaju jake interakcije i  $W^\pm$  i Z čestice u slučaju slabe interakcije.

Ako virtuelna čestica ima masu m, njena minimalna energija je jednaka energiji mase mirovanja  $mc^2$ . Tako je

$$\Delta t \leq \frac{\hbar}{mc^2}, \quad (5)$$

i domet interakcije je uvek manji od

$$R' = \frac{\hbar c}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc} \quad (6)$$

U slučaju jake interakcije  $R' \leq 1.4$  fm, tako da kvant polja ima masu  $m \geq 140$  MeV/c<sup>2</sup>. U slučaju slabe interakcije velike mase  $W^\pm$  i Z čestica ( $\approx 90$  GeV/c<sup>2</sup>) daju  $R' \approx 10^{-3}$  fm.

Priroda kvanta koji se izmenjuje određuje osobine polja interakcije. U slučaju jake interakcije, izmena piona dominira na rastojanjima reda 1.5 fm. Pioni imaju nulti spin i negativnu unutrašnju parnost i tako su pseudo skalarne čestice; njihova talasna funkcija menja znak pri refleksiji koordinata oko koordinatnog početka. Tako je interakciono polje pseudo skalarno i karakteriše se Hamiltonijanom sa spin zavisnim tenzorom koji tačno reprodukuje osobine deuteronu (vezivna energija, magnetski kvadripolni momenat radijus) i nisko energetsko neutron neutron rasejanje. Na malim rastojanjima  $\approx 1$  fm, izmena para piona sa nultim momentima proizvodi skalarno interakciono polje sa značajnom spin – orbit interakcijom, i na još manjim rastojanjima izmena vektorskog mezona kreira vektorsko interakciono polje sa potencijalom koji ima čvrsto jezgro.

### 3. Jačina osnovnih sila

Kao što je već rečeno, osnovne interakcije imaju različite jačine. Ovo znači da kada dve od ovih interakcija deluju zajedno, onda jača dominira. Jednostavan kriterijum za ocenu relativne jačine je vrednost karakteristične konstante, koja karakteriše odgovarajuće polje, i koja je jednaka jedinici za jaku interakciju,  $10^{-2}$  za

elektromagnetsku,  $10^{-5}$  za slabu i  $10^{-39}$  za gravitacionu. Medjutim, ovo ne znači da je jaka interakcija efektivnija u stvaranju vezanih stanja između dve interagujuće čestice od elektromagnetske interakcije. Na primer, vodonikov atom koji se sastoji od protona i elektrona vezanih elektromagnetskom silom ima beskonačno mnogo vezanih stanja, dok deutron koji je sistem protona i neutrona vezanih jakom interakcijom ima samo jedno vezano stanje. Ovo uglavnom potiče od karakterističnog internog relativnog kretanja dva nukleona u kratkodometnoj jakoj interakciji. Neodređenost relativnih impulsa dve čestice vezane na rastojanju reda  $\Delta x \approx 1$  fm je  $\Delta p \approx \hbar \text{ fm}^{-1}$ , tako da ove dve čestice imaju kinetičku energiju reda

$$E \approx \frac{(\Delta p)^2}{2\mu} = \frac{(\Delta p)^2}{M} \approx 40 \text{ MeV}. \quad (7)$$

gde je  $\mu$  redukovana masa dva nukleona i jednaka je polovini mase nukleona  $M$ . Potencijal jake interakcije je tek (jedva) dovoljan da prevaziđe ovu veliku relativnu energiju.

S druge strane, dugodometna elektromagnetska interakcija čini da Kulonov potencijal prevazilazi relativnu kinetičku energiju elektrona i protona na velikim rastojanjima koja je prema kvantnoj teoriji data sa

$$E \approx \frac{\hbar^2}{2m\bar{r}^2} \quad (8)$$

gde je  $\bar{r}$  srednje rastojanje (vremensko usrednjavanje) između elektrona i protona u razmatranom stanju.

Tako, bolja indikacija relativne jačine raznih sila se dobija razmatranjem vremena dovoljnog da sila izazove promenu stanja dve interagujuće čestice. Ovo vreme je  $< 10^{-23}$  s za jaku interakciju i može se opaziti na primer, merenjem ukupnog elastičnog efikasnog preseka u jakoj interakciji između dve čestice. *Slika 1* pokazuje efikasni presek interakcije negativnog i pozitivnog piona sa protonom u funkciji mase  $\pi$ -p sistema. Ovi preseki pokazuju rezonancu sa punom širinom  $\Delta E$  na polovini maksimuma koji je reda stotine MeV. Ovo pokazuje da na rezonantnoj energiji dve čestice grade nestabilno stanje, koje prema principu neodređenosti traje  $\tau \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \approx 10^{-23}$  s. Opažen je

veliki broj takvih rezonanci kada dve čestice interaguju preko jake interakcije. Ove rezonance predstavljaju privremene čestice koje nazivamo hadroni.

Život nestabilnih čestica koje se raspadaju preko elektromagnetske interakcije je mnogo veći, što ilustruje vreme života neutralnog piona  $\tau \approx 0.84 \cdot 10^{-16}$  s (dominantni oblik raspada ove čestice je u dva  $\gamma$  kvanta). Život čestica ili jezgara koja se raspadaju preko slabe interakcije varira od  $10^{-10}$  s do  $10^{10}$  god. Vreme potrebno da gravitaciona interakcija promeni stanje dve interagujuće čestice je vrlo dugo (više od  $10^{10}$  godina) i reda je starosti univerzuma.