

Malo, veliko i slo`eno¹

- Pogled na fiziku sa kraja 20. veka -

Aleksandar Bogojevi}

Zlatno doba

1900. godine budu}nost teorijske fizike je izgledala prili-no jadno. Te godine je rektor harvardskog univerziteta (Harvard University) savetovao mladim ljudima da ne upisuju studije fizike, ve} da se opredele za druga zanimanja, zato {to je u fizici sve ve} otkriveno. I veliki engleski fizi-ar Lord Kelvin je predskazivao sli-nu budu}nost. Njemu se -inilo da pred teorijskim fizi-arima stoji zadatak da objasne samo jo{ dva mala nerazja{njena fenomena: zakon zra-enja crnog tela kojeg je prona{ao Max Planck 1900. godine, i eksperiment kojim je Albert Michelson poku{ao da izmeri brzinu kretanja Zemlje kroz etar. Odgovori na ova dva preostala problema su do{li za svega nekoliko godina, ali su umesto o-ekivane dogme da u fizici vi{e nema tajni, zahtevali potpunu reviziju velikog broja osnovnih paradigmi. Tako je po-elo zlatno doba teorijske fizike.

U slede}ih trideset pet godina u temelje fizike ugradjene su kvantna mehanika i Einstein-ova specijalna i op{ta teorija relativnosti. Promenjeno je na{e shvatanje fundamentalnih pojmova kao {to su prostor, vreme, masa, istovremenost... Otkrili smo da je gravitacija zapravo geometrija jednog zakrivljenog -tvoro-dimenzionog kontinuuma koji zovemo prostor-vreme, te da je u svojoj biti svet opisan probabiliti-kim, a ne deterministi-kim zakonima. Na po-etku zlatnog doba se o atomima jo{ govorilo kao o hipotezi, dok smo tri decenije kasnije ve} imali klju- za detaljno razumevanje atomske fizike. Samo nekoliko godina kasnije su zapo-ete potpuno nove oblasti kao {to su nuklearna fizika i fizika -vrstog stanja. Na samom kraju zlatnog doba, pred drugi svetski rat, u-injeni su i prvi hrabri koraci ka ujedinjenju relativisti-ke i kvantne teorije.

U ovom periodu je i u astronomiji u-injen ogroman prodor. Premerena je na{a galaksija i otkriveno je da je ona samo jedna od ogromnog broja galaksija koje -ine na{ univerzum. Utvrđjena je i starost univerzuma. Za ovo su bila krucijalna posmatranja koje su Edwin Hubble i Milton Humason izveli 1928. godine na opservatoriji Mount Wilson. Oni su tad utvrdili da se univerzum neprestano {iri od trenutka svog nastanka pre oko 20 milijardi godina u eksploziji koju zovemo veliki prasak. Sva ova posmatranja idealno su se uklopila u predikcije nove teorije gravitacije. Prvi put je postalo mogu}e unutar nauke postaviti precizno pitanje o krajnjoj sudbini vasiona.

Za ljude van struke ovaj relativno kratki period burnog razvoja je bio uspe{an jer je ponudio odgovore na mnoga va`na pitanja o svetu koji nas okru`uje. Za fizi-are je, medjutim, ovo vreme bilo zlatno jer je svaki novi odgovor radjao deset novih, jednako uzbudljivih i va`nih pitanja. Fizika je u-inila ogromne, sasvim neo-ekivane, prodore kako u mikro, tako i u makro svet. Posle pauze izazvane drugim svetskim ratom, fizi-ari su se `eljno bacili na fundamentalna istra`ivanja. Nakon zastra{uju}e realnosti eksplozija atomske bombe, politi-ari su bili spremniji no ikada da finansiraju nauku, a pogotovo fiziku. Trka u naoru`anju tokom hladnog rata dovela je do daljeg porasta ulaganja ne samo u primenjena nego i u fundamentalna istra`ivanja. Svet je u{ao u fazu kontinualne nau-ne i tehnolo{ke revolucije. Ironija istorije je u tome da jedan od posrednih efekata `elje za vojnom dominacijom mo`e imati tako korisne i dugoro-ne posledice po -ove-anstvo.

¹ Nau-ni magazin IQ, broj 1, 1997.

Malo

Istraživanje materije na sve manjim skalama motivisano je iskonskom potragom za fundamentalnim entitetima od kojih je sazdan ceo naš svet. Gledano iz današnje perspektive, predjen je ogroman put od prvih filozofskih razmatranja Demokrita pre dvadesetpet vekova, pa do modernih istraživanja elementarnih čestica u kvantnoj teoriji polja. Ovaj prodor u mikro-svet počeo je krajem dvadesetih godina ovog veka. Kvantna mehanika je tada otvorila vrata razumevanju sveta atoma čije su tipične dimenzije oko 10^{-8} cm, a nešto kasnije i jezgara tih atoma koji su 100 000 puta manji, dakle 10^{-13} cm. Za dublji prodor u svet malog bilo je potrebno izumeti bolje mikroskope.

Odmah nakon drugog svetskog rata napravljeni su ovi moćni "mikroskopi". Bili su to novi akceleratori čestica kojim smo uspevali da razaberemo sve finije detalje strukture materije. Kako su rasle energije akceleratora tako je, shodno relacijama neodređenosti koje je izveo Werner Heisenberg, postajalo moguće njima razlučiti sve finije i finije detalje. Paralelno je tekao i razvoj teorije, tako da smo se već izdesetih godina, posle atomskih jezgara, spustili korak niže, u neverovatno bogat i zaudjujući svet elementarnih čestica. Bio je to svet kvantne teorije polja - discipline nastale iz braka kvantne i relativističke teorije. Tih godina je iz dana u dan otkrivano sve više novih čestica. Istovremeno je teoretičarima počelo da izgleda da u svojoj biti sve kvantne teorije polja boluju od nekoliko neizlečivih bolesti. Jedini izuzetak tom sumornom pravilu bila je kvantna elektrodinamika. Suprotno očekivanjima, rastavljajući svet na sve manje partikle činilo se da on postaje sve komplikovaniji.

Sedamdesetih godina dva velika teorijska prodora su uneli red u ovaj kaos. Prvi prodor je bila teorija kvarkova (Murray Gell-Mann i Yuval Neeman) koja je omogućila klasifikaciju elementarnih čestica. Simetrije, matematički iskazane teorijom grupa, su na velika vrata ušla u fiziku.

Drugi, još važniji, prodor je takodje bio vezan za simetrije. Otkriven je uzrok magičnom potiranju beskonačnosti u kvantnoj elektrodinamici, koji ju je vratio zdravom teorijom. Uzrok je bila invarijantnost te teorije u odnosu na jednu lokalnu simetriju - rotovanje naelektrisanja. Ova i druge lokalne simetrije (simetrije koje su nezavisno u svakoj tački prostor-vremena pojedinačno) su dobile centralnu ulogu u stvaranju novih dinamičkih modela, počto se pokazalo da su to jedini matematički konzistentni modeli fundamentalnih kvantnih teorija polja. Ovo ograničenje skupa mogućih teorija je u kratkom roku dovelo do uspešnog opisa jakih interakcija (kvantna hromodinamika) i ujedinjenja slabih i elektromagnetnih interakcija (teorija elektroslabih interakcija). Usledile su eksperimentalne potvrde ovih modela. Vrhunac je bio 1983. kad su u CERN-u krajem prošle godine (Centre Europeen de la Recherche Nucleaire) otkrivene W i Z čestice - masivni prenosioci elektro-slabih interakcija (pandani bezmasenom fotonu). Time smo ovladali fenomenima koji su se odvijali na skalama od 10^{-16} do 10^{-17} cm, dakle onoliko manjim od atoma koliko smo mi od atoma veći!

U teoriji, početkom osamdesetih godina, su uloženi ogromni naponi da se nastavi proces ujedinjenja interakcija. Na redu je bio pokušaj spajanja jake i elektro-slabih interakcije. Ovaj rad još nije gotov. Eksperimentalni signali kojim je moguće potvrditi ili opovrgnuti ove nove modele su krajnje interesantni. Sa jedne strane traga se za postojanjem magnetskih monopola, a sa druge za spontanom raspadom protona. Mada je nekoliko istraživačkih grupa objavilo da su videli prve signale ovog tipa potrebno je uraditi još puno dodatnih ispitivanja da bismo bili sigurni da su GUT-ovi (Grand Unified Theories) zaista ispravan opis sveta. Krajem osamdesetih i početkom devedesetih godina došlo je do ogromnog teorijskog prodora. Rodjena je teorija superstruna (superstrings). Mada plod rada ogromnog broja istraživača, superstrune se sa pravom najviše vezuju za tri imena: John Schwarz, Michael Green i Ed Witten. Ova teorija polazi od toga da je svet sastavljen od izuzetno malih petlji - struna. Svaki od "tonova" oscilovanja ovih struna odgovara jednoj od elementarnih

-estica. Jednom od ovih "tonova" odgovara i graviton - estica koja prenosi gravitacionu interakciju. Sve su indicacije da su superstrune upravo "teorija svega", odnosno teorija koja unificira sve postojeće interakcije, pa dakle i gravitaciju. Za dublje razumevanje onoga što nam strune govore bi je potrebno još više decenija rada, kao i stvaranje novih oblasti matematike. Prvi rezultati su fantastični, a slika sveta koju nam strune nude je zaista lepša i u svojoj biti jednostavnija nego što smo se mogli nadati.

U ovom našem pohodu ka sve manjim i manjim fundamentalnim delovima prirode pošli smo da kucamo na vrata domena kvantne gravitacije. Razumevanje ovih fenomena je verovatno najveći izazov ikad stavljen pred teorijsku fiziku. Uspeh je sigurno imati jednako dalekosežne posledice po razvoj nove fizike kao što su imala i velika otkrića sa početka veka. Fenomeni kvantne gravitacije žive na neverovatno malim skalama od 10^{-33} cm, i tu je biti kraj našeg pohoda u svet malog. Od opšte teorije relativnosti na ovamo mi znamo da je gravitacija zapravo geometrija, tj. ono što nam određuje šta mislimo pod pojmom dužine. Kvantna gravitacija je kvantna geometrija; tu i sam pojam dužine dobija probabilističku prirodu, tako da nije moguće govoriti o dužinama manjim od 10^{-33} cm.

Veliko

Odmorimo se malo od ovog našeg sunovrata u fantastični svet malog i pogledajmo u nebo. Astronomija je oduvek bila bogati izvor fenomena koji su stajali pred fizikom i tražili objašnjenje. Prvu teoriju gravitacije još u 17. veku formulisao Isaac Newton, opisujući njome kretanja meseca oko zemlje i planeta oko sunca. Od tada astronomija sve vreme služi kao gravitaciona laboratorija. Albert Einstein je sva tri klasična dokaza svoje teorije gravitacije iz 1916. također izveo iz astronomskih posmatranja.

Moderna astrofizika i dalje ispituje gravitacione fenomene. Najbizarniji od ovih su svakako crne rupe - zvezde toliko masivne da ni svetlost sa njih ne može da pobegne. No astronomskim fenomenima ne gospodari više samo gravitacija. Za razumevanje astrofizike sunca neophodna su bila znanja iz nuklearne fizike i fizike plazme. Objašnjenje supernova - kataklizmičkih eksplozija na kraju života masivnih zvezda - zahtevalo je detaljno razumevanje kompleksnih elektromagnetnih procesa, kao i fizike neutrina. Produkti ovih eksplozija su tzv. neutronske zvezde - jezgra zvezda koje su, potrošivši svoje nuklearno gorivo, kolapsirale u lopte pre-nika tek nekoliko desetina kilometara. Ohladjena, ova gigantska atomska jezgra ipak isijavaju svetlost, ali ne u svim pravcima već u uskim snopovima. Pri svojim rotacijama ovi nas snopovi u jednakim intervalima kupaju svojom svetlošću, a ono što vidimo se u astronomiji zovu pulsari.

Ma koliko neke od njih bile bizarne, zvezde su samo prvi naš korak ka svetu velikog. Pogled dalje su omogućili početkom veka moćni teleskopi. Videli smo tada da su zvezde grupisane u ogromne galaksije, koje u sebi sadrže i do nekoliko stotina milijardi zvezda, a svetlosti treba stotine hiljada godina da ih predje s kraja na kraj. Sad smo već na skalama od 10^{23} cm, no naš put još nije gotov. Otišmo li se još dalje videćemo da galaksije nisu ravnomerno rasporedjene po svemiru, već da su grupisane u jata. Tek kad odemo na skale na kojima i sama jata galaksija izgledaju kao tačke, uvidjamo da svemir ima ravnomernu raspodelu. Na svakom od ovih stepenika u našem usponu ka svemiru i većem otkriveno je neverovatno bogatstvo fenomena. Pred nama je da objasnimo objekte kao što su kvazari koji su dimenzija zvezda, a zrače više energije od novih galaksija. Takođe, moramo da objasnimo zašto je materija u univerzumu ravnomerno rasporedjena na najvećim skalama, te zašto se u toj "supi" pojavljuju "grudvice" kao što su jata galaksija, a u njima nove grudvice - galaksije itd. Otvoreno je i pitanje o tome koliki deo ukupne materije od kojih je sazdan svemir nama vidljiv (pošto zrači), a koliki je taman. Već znamo da tamne materije

ima daleko više od vidljive, no važno je tačno odrediti koliko je ima. Od toga koliko ukupno ima i vidljive i tamne materije zavisi krajnja sudbina univerzuma. Ako je ima premalo svemir će se večno širiti. U suprotnom će se sadašnje širenje svemira vremenom zaustaviti, posle čega će uslediti veliko sažimanje, zagrevanje, te kraj svega - prvo materije, pa energije, pa zatim i samog prostora i vremena. Da bismo saznali krajnju sudbinu univerzuma moramo dakle čitav svemir "staviti na kantar". Ovo, naravno, nije ni malo lako. Za sada postoje samo preliminarni rezultati koji govore u prilog modela večno šireg svemira.

Na kraju, primenimo li fiziku na najveće skale dolazimo do kosmologije, oblasti koja ispituje celokupnu strukturu i evoluciju univerzuma. Teorijska razmatranja u kosmologiji polaze od ujednačenosti rasporeda materije na najvećim skalama. Dramatična potvrda teorijskih modela datira od posmatranja Hubble-a krajem dvadesetih godina, koja su pokazala da se svemir širi. Drugo veliko otkriće se desilo 1965. kada su radio inženjeri Penzias i Wilson slučajno otkrila mikrotalasno pozadinsko zračenje. Prvi put njihov radio teleskop je "uo" eho samog velikog praska koji je označio rođenje našeg univerzuma. I ako se pozadinsko zračenje idealno uklapalo u kosmološke modele nastale iz Einstein-ove teorije gravitacije, niko do tada nije verovao da se mogu otkriti direktni signali iz tako rane faze nastanka svemira.

Ova merenja su delovala kao katalizator za burni razvoj dotad udaljenih oblasti fizike. Kako (u mislima) idemo nazad u vremenu i približavamo se velikom prasku, tako univerzum biva sve manji i manji, a temperatura mu neograničeno raste. Nekoliko momenata nakon eksplozije univerzum je bio idealna laboratorija za visoko energetske procese, dakle za procese na najmanjim skalama dužine. Kvantni efekti gravitacije, koji su u današnjem velikom i hladnom univerzumu sasvim zanemarljivi (sem kod crnih rupa), tada su bili dominantni. Novo-nastala disciplina, kvantna kosmologija, čak daje indicije da su ovi efekti i doveli do same eksplozije, dakle do postanka vasione.

Došlo je tako do stapanja delova fizike koji izučavaju najmanje i najveće fenomene. Kosmolozima sada akceleratori služe kao simulatori uslova u ranom svemiru, dok ljudi koji se bave kvantnom teorijom polja nestrpljivo iščekuju rezultate novih astronomskih posmatranja da bi saznali koji od njihovih modela ispravno opisuju fenomene na energijama koje nisu dostupne u laboratorijskim uslovima.

Priroda je zaista bogatija od ljudske mašte. Ko bi očekivao da ćemo o pojavama kao što su strune koje žive na skalama od 10^{-33} cm učiniti upirući pogled ka samim granicama vasione udaljenim od nas oko 10^{28} cm! Takođe, ko bi očekivao da će se čovek baš naći negde pri sredini ove (logaritamske) skale - na pola puta između najvećeg i najmanjeg mogućeg.

Sloveno

Fizika je nauka koja se bavi otkrivanjem osnovnih zakona našeg univerzuma. Do nedavno se činilo da važi i jedna duga definicija fizike - da je to ona naučna disciplina koja se bavi opisom najjednostavnijih fenomena u prirodi, te da je zato od svih nauka teorijski aparat fizike najrazvijeniji. Laiku, međutim, ovo može na prvi pogled izgledati paradoksalno. Sa fizikom se, sa pravom, povezuje kompleksni matematički aparat. No činjenica da je ovim jezikom dosta teško ovladati više je ogledalo čovekovih relativno skučenih mogućnosti nego složenosti samih pojava koje se tim jezikom precizno opisuju.

Ipak, nedavno smo otkrili da fizika može sa uspehom da opisuje i mnoge inherentno kompleksne sisteme. Ovo proširenje delokruga teorijske fizike je u velikoj meri uzrokovano pojavom brzih

ra-unara koji su omogućili istraživačima da modeliraju ponašanje sistema za koje ne postoji jednostavni analitički opis. Pored toga, složeni sistemi često dovode do kolektivne organizacije velikog broja stepeni slobode, što bitno olakšava njihov opis. Najspektakularniji primeri ovakve spontane uredjenosti makroskopskih sistema su fenomeni superfluidnosti i superprovodnosti. Ovo su esencijalno kvantni fenomeni, u kojima dolazi do koherentnog ponašanja ogromnih brojeva čestica. Ovo dovodi do potpuno neočekivanih efekata kao što su bezviskozni tok tečnosti, odnosno kretanje električne struje kroz provodnik bez ikakvog otpora. U kvantnoj optici poznat primer samoorganizacije je laser. Kod obične lampe svaki atom nezavisno emituje svetlost. No sistem je moguće izvesti daleko iz ravnotežnog stanja, kada on može preći u novu fazu u kojoj atomi sinhrono emituju svoju svetlost - tad imamo posla sa laserom. Prelasci u superfluidni, superprovodni ili laserski režim su primeri faznih prelaza. I u svakodnevnom životu srećemo puno primera faznih prelaza, na primer, prelazak leda u vodu, odnosno vode u vodenu paru.

Ponašanje sistema je najkomplikovanije u takozvanim kritičnim tačkama kad postaje nemoguće razlikovati dve ili više faza. Ovo se dešava kada, na primer, na visokom pritisku nije moguće razlikovati tečnost od gasa. Kako prilazimo kritičnoj tački dešavaju se, na prvi pogled, nepredvidive stvari - prepliću se domeni raznih faza i dolazi do njihovih fluktuacija na sve većim i većim skalama. Ipak, sedamdesetih godina radovi Kenneth Wilson-a, kao i mnogih drugih istraživača, su pokazali da se i ovi fenomeni mogu u potpunosti razumeti. Do ovog prodora se došlo iz dva naizgled potpuno različita pravca - iz kvantne teorije polja, koja se bavi opisom elementarnih čestica, i iz fizike vrstog stanja, koja ispituje ponašanje kristala. Ubrzo je tzv. renormalizaciona grupa postala važan deo matematičkog aparata velikog broja oblasti teorijske fizike.

Složnost obično vezujemo za sisteme sa velikim brojem stepeni slobode. Lako je razumeti kako 10^{23} atoma može da se ponaša složeno, a počinjemo i da razumemo kako ovakvi sistemi, pod određenim uslovima, mogu da se samo-organizuju.

Neintuitivno je to da čak i veoma jednostavni sistemi mogu imati složeno ponašanje. Opisom ovakvih fenomena se bavi jedna nova grana teorijske fizike - oblast nelinearnih sistema - sistema o kojima naš standardni asortiman matematičkih orudja nema mnogo toga da kaže.

Ono što su za ispitivanje najmanjih fenomena akceleratori, a za ispitivanje najvećih fenomena teleskopi, to su u oblasti složenih fenomena raunari. Pomoću njih smo prvi put zavirili u vrlo novi svet "determinističkog haosa" - u kome smo otkrili da determinističnost ne znači nužno i predvidljivost. Kod većine sistema mala greška u početnim uslovima dovodi do male greške u krajnjem ishodu, međutim, postoje i veoma jednostavni sistemi u kojima efekat male početne greške raste eksponencijalno sa vremenom. U tom slučaju i najmanja početna greška uskoro dovodi do totalnog gubitka predvidljivosti. Treba istaći da ovde nije reč o kvantnom već o isto klasičnom efektu. Haotično ponašanje je svojstveno širokoj lepezi fenomena u prirodi, od turbulencije fluida, dugoročne vremenske prognoze, fibrilacije srca, do kapljanje esence. Mada je ova oblast u samom začetku, već su otkrivene neverovatne pravilnosti koje povezuju matematičke opise potpuno različitih fenomena.

Budućnost fizike

Danas se nova otkrića u fizici smenjuju tolikom brzinom da ih više ni stručnjaci ne mogu lako pratiti. Dinamika promena je takva da, sa jedne strane, dobar deo populacije postaje sve ravnodušniji prema fantastičnim vizijama koje slika moderna fizika. Sa druge strane sami istraživači, naterani na u i u specijalizaciju, sve teže prate nova dostignuća čak i iz do nedavno bliskih

oblasti. Name}e se potreba da istra`iva-i raznih profila sve vi{e medjusobno komuniciraju, te da direktnije u-estvuju u obrazovanju op{te populacije.

Bli`i se po-etak 21. veka, a pred nama stoji sasvim druga vizija budu}nosti fizike od one koju su ljudi imali pred sobom 1900. godine. Pre sto godina je izgledalo da je teorijska fizika, re{iv{i sve postavljene probleme, postala `rtva svojih uspeha. Dana{nji strah je da uskoro ne}e biti mogu}e pratiti preterani tempo uspeha. Pretnju smrti dosadom zamenili smo pretnjom smrti izazvane stresom. Kao i pre sto godina ovakvi pesimisti-ki pogledi su gotovo sigurno neosnovani. Ve} smo otkrili veliki broj magi-nih niti koje spajaju naizgled nepovezane oblasti fizike. Ove niti su vesnici predstoje}e velike sinteze u teorijskoj fizici i matematici. Pred nama stoji novo, jednako uzbudljivo, Zlatno doba.

Boks 1

Obilje beskona-nosti

U svakom ra-unu u kvantnoj teoriji polja susre}emo se sa izrazima koji nisu dobro definisani - sa beskona-nostima. Neke od ovih beskona-nosti su benigne jer su vezane za veli-ine koje nisu opservabilne. Ipak, ve}ina beskona-nosti ima katastrofalne posledice. Sre}om, prva teorija polja na koju je primenjen op{ti formalizam bila je kvantna elektrodinamika. I kod nje sre}emo beskona-nosti, ali detaljna istra`ivanja su pokazala da se beskona-nosti iz razli-itih sektora teorije gotovo magi-no potiru. Mada su, na prvi pogled, delovi formalizma delovali patolo{ki, celina je bila potpuno zdrava. Umesto da nam smetaju, u kvantnoj elektrodinamici su beskona-nosti radile za nas i jedna drugu obuzdale.

Boks 2

[ta je zapravo simetrija?

Svi mi, gotovo intuitivno, razumemo {ta se pod simetrijom podrazumeva u svakodnevnom svetu koji nas okru`uje, kao i u slikarstvu, arhitekturi... Manji broj ljudi direktno opa`a ulogu simetrije u oblastima kao {to je muzika, no i tu ona mo`e biti centralna. Johann Sebastian Bach je sigurno najbolji primer muzi-ara koji je simetriji dao centralno mesto u svojim delima[ta je zajedni-ko za pojam simetrije u svim ovim oblastima?Neki objekt je simetri-an ako ga mo`emo transformisati na odredjeni na-in, a da on ostane nepromenjen. Tako je kvadrat simetri-an jer ga mo`emo zarotirati za 90 stepeni i dobiti opet isti takav kvadrat. Neka fuga je simetri-na ako, na primer, nekom transformacijom tonova mo`emo jedan njen glas preslikati u drugi. Kao jednostavan primer simetrije u matematici posmatrajmo izraz $x^2 + y^2$. Rotacijom oko koordinatnog po-etka menjaju se vrednosti x i y koordinata, ali ne i gornjeg izraza; on je dakle simetri-an u odnosu na rotacije.

Boks 2

Interakcije u prirodi

Svet koji nas okružuje je na prvi pogled izuzetno složen. Veliki uspeh fizike je u tome što je omogućila da sve raznorodne fenomene koje posmatramo u prirodi svedemo na samo četiri bazične interakcije. Najpoznatije su gravitacija i elektromagnetna interakcija. Obe su dugog dometa i zato ih lako opažamo. Preostale dve interakcije - jaka i slaba sila - su izuzetno kratkog dometa i zato se sreću tek u nuklearnoj fizici. Nema ništa magično u tom broju četiri. James Maxwell je u prošlom veku svojom elektrodinamikom pokazao da su električni, magnetni i optički fenomeni samo različiti aspekti jedne jedinstvene interakcije. U istom duhu, Weinberg i Salam su pokazali da, mada na prvi pogled potpuno različite, elektromagnetna i slaba sila se opisuju jedinstvenom elektroslabom interakcijom. Od sedamdesetih godina je dakle pravilnije reći da svetom vladaju tri fundamentalne interakcije. I tu nije kraj - proces unifikacije interakcija se uspešno nastavlja. Kroz teoriju superstruna se može da već naslućuje krajnji cilj - svodjenje opisa celokupnog (sveta) na jednu jedinu interakciju.
