



urednik biblioteke: **Ognjen Strpić**

izdavač: **Naklada Jesenski i Turk**

za izdavača: **Mišo Nejašmić**

preveo: **Goran Vujašinović**

redaktor prijevoda: **dr. Vjera Lopac**

grafički urednik: **Boris Kuk**

tisak: **Stega tisak d.o.o., Zagreb**

www.jesenski-turk.hr

BRIAN GREENE
ELEGANTNI
SVEMIR

SUPERSTRUNE, SKRIVENE DIMENZIJE I POTRAGA
ZA KONAČNOM TEORIJOM



Naklada Jesenski i Turk
Zagreb, travanj 2012.

Sadržaj

Predgovor 2003.	9
Predgovor	15
1. DIO / NA GRANICAMA SPOZNAJE.....	21
Zavezani strunom	23
2. DIO / DILEMA O PROSTORU, VREMENU I KVANTIMA	45
Prostor, vrijeme i oko promatrača	47
O uvojima i mreškanju	85
Mikroskopska čudnovatost	125
Potreba za novom teorijom:	165
3. DIO / KOZMIČKA SIMFONIJA	185
Čista glazba: osnove teorije superstruna	187
"Super" u superstrunama	225
Više dimenzija nego što ih oko vidi	247
Corpus delicti: eksperimentalni potpisi.	277
4. DIO / TEORIJA STRUNA I TKIVO PROSTORVREMENA	299
Kvantna geometrija	301
Kidanje tkiva prostora	341

Onkraj struna: u potrazi za M-teorijom	365
Crne rupe: perspektiva teorije struna / M-teorije ..	411
Razmišljanja o kozmologiji	443
5. DIO / UJEDINJENJE U DVADESETPRVOM	
STOLJEĆU	477
Izgledi	479
Glosar znanstvenih pojmova	499
Kazalo	515

Predgovor 2003.

Pišući *Elegantni svemir* bio sam svjestan da bi čitateljstvo te knjige moglo biti malobrojno. Napokon, knjigu o izazovima i trijumfima modernog istraživanja najdubljih zakona prirode vjerojatno ne biste ponijeli na plažu niti je čitali u toploj postelji prije spavanja. Činilo se i da bi knjiga o tako apstraktnoj temi, i to s naglaskom na znanosti a ne na ličnostima znanstvenika niti na povijesnim anegdotama, imala još malobrojniju publiku. No to me nije posebno zabrinjavalo jer sam si često (i nedvojbeno s dozom melodramatičnosti) govorio da ako budem imao barem jednog čitatelja, ako mu predstavim nov spektar ideja, nov način razmišljanja o sebi i svom mjestu u univerzumu, to će mi biti dovoljno. Bilo da je to mlad student koji pokušava odlučiti što će specijalizirati, zaposleni profesionalac koji traži nešto izvan svakodnevne rutine ili umirovljenik koji je napokon pronašao vremena za čitanje o razvoju znanosti, ako im uspijem pokazati nov put prema univerzumu kako ga vidi moderna fizika, trud uloženi u pisanje *Elegantnog svemira* neće biti uzaludan. Ta pomisao pomogla mi je u krizama koje mnogi autori proživljavaju usred važnog projekta.

Neprekidno me je ohrabivala i publika koja je pohađala razna predavanja za laike koje sam držao o teoriji relativnosti, kvantnoj mehanici i o svojoj specijalnosti – teoriji superstruna – publika koja se divila neobičnim i začudnim mislima koje nastaju u avangardnim istraživanjima. Svemir

u kojem se prostor i vrijeme mogu oblikovati, svemir s više dimenzija nego što ih vidimo, svemir u kojemu se tkivo prostora može pocijepati, svemir u kojemu se možda sve sastoji od titraja ultramikroskopskih petlji energije koje nazivamo superstrunama – taj svemir uzbuđivao je ljude i mnogi su ga željeli bolje razumjeti. *Elegantni svemir* izrastao je iz tih predavanja, jer sam htio napisati knjigu za čitatelje bez formalnog poznavanja matematike i fizike. Iako ga je književni agent kojemu sam svoj prijedlog prvome ponudio bez razmišljanja odbio – vjerojatno ocijenivši da je tema odviše specijalizirana da bi privukla nekog velikog izdavača – na svojim predavanjima osjećao sam jak entuzijazam za znanost. Bio je gotovo otopljiv.

Elegantni svemir oslonio se na taj entuzijazam, a izvršne reakcije na koje je naišao svjedoče o urođenom nagonu mnogih od nas da predano i hrabro istražuju ovo što nazivamo svojim svijetom. Osim toga, potvrdio je moje vjerovanje da fizika autoru nudi čudesno maštovitu građu. Svi volimo dobru priču. Svi volimo zagonetke. Svi volimo autsajdera koji ne odustaje usprkos naizgled nepremostivim preprekama. Svi mi, u ovom ili onom obliku, pokušavamo pronaći smisao u svijetu oko sebe. A svi ti elementi skrivaju se u srži moderne fizike. Ta priča je epska – događanja u cijelom svemiru; zagonetka je jedna od najtežih – kako je nastao svemir; prepreke su gotovo nesavladive: dvonošci, novopridošlice u svemirskim razmjerima, pokušavaju otkriti vječne tajne; a potraga je jedna od najdubljih – istraživanje fundamentalnih zakona koji objašnjavaju sve što vidimo, i više od toga, od najsitnijih čestica do najudaljenijih galaksija. Teško je i zamisliti bogatiju građu.

Neznanstvenici katkad ne razlikuju jezik koji ih zastrašuje – matematiku, jezik na kojem se razvija fizika – od zavidljivućih ideja kojima se poigrava. No to bi bilo kao da ja pokušavam pročitati *Huckleberry Finna* na grčkom. Iako se neprekidno služim grčkom abecedom, ne govorim ni riječ

tog jezika i zato bi moj dojam o tom romanu bio, blago rečeno, umanjen. Slično tome, kad spustimo matematičke prepreke i pojmove moderne fizike izrazimo svima poznatim jezikom, kako bi ih upoznali i razmišljali o njima, mnogi od onih koji su mislili da ih znanost ne zanima ostanu bez daha. Kad se teme moderne fizike ekstrahira iz njihova stručnog jezika, pokazuje se da su one doslovno univerzalne.

To je sve jasnije u posljednje vrijeme, jer je fizika sve prisutnija u kulturi – sve veći broj kazališnih, glazbenih i likovnih djela nadahnjuje se modernom znanosti. Znam za barem desetak novijih drama, jedan gudački kvartet, mnogo filmova i drama, jednu operu, niz slika i kipova koji u određenoj mjeri izražavaju, tumače i proširuju ljudsku dramu koju predstavlja put znanosti. Premda je to doista čudesno, to me ne iznenađuje. Uvijek me je oduševljavala umjetnost i književnost koja dobro protrese moj dojam o tome što je uistinu zbiljsko i važno, a mnogi dijele to moje gledište. A upravo to čine i dalekosežna dostignuća u fizici u posljednjih stotinu godina. Nije pretjerano reći da su teorija relativnosti i kvantna mehanika iz korijena promijenile pravila stvarnosti, a teorija superstruna danas ih iznova korigira. Nije nikakvo čudo da slikari, pisci, skladatelji i filmski stvaraoci pronalaze sličnosti između svoga rada i tih znanstvenih izazova statusu quo.

No to nije jednosmjerna ulica. Integriranje otkrića fizike u naš kolektivni svjetonazor polagan je proces. Još i danas, nakon stotinu godina, većina ljudi još ne cijeni eksperimentima potvrđene lekcije koje nam je održao Einstein, a ni pouke kvantne mehanike. Prilazeći znanosti bez straha, i služeći se sebi svojstvenom snagom fascinacije u stvaranju zabavnih i dramatičnih djela, umjetnost je možda savršeno sredstvo za punu integraciju znanosti u razgovore o svijetu. Možda ćemo doživjeti čak i da znanosti nadahnuta djela svijeta umjetnosti ponude nove poticaje znanstvenoj imaginaciji, a na neki neopipljiv način možda će nas i pripre-

Zavezani strunom

Bilo bi odviše dramatično nazvati to prikrivanjem, ali više od pola stoljeća – usprkos nekima od najvećih znanstvenih dostignuća u povijesti – fizičari su prešutno svjesni oblaka koji zamračuju daleki obzor. Problem je ovaj: moderna fizika počiva na tri kamena temeljca. Prvi je opća teorija relativnosti Alberta Einsteina, koja nudi teorijski okvir za razumijevanje univerzuma u najvećim razmjerima: zvijezda, galaksija, grozdova galaksija i golemog svemirskog prostranstva onkraj njih. Drugi je kvantna mehanika, koja pruža teorijski okvir za razumijevanje univerzuma u najmanjim razmjerima: molekula, atoma, sve do subatomske čestice kao što su elektroni i kvarkovi. Kroz duge godine istraživanja fizičari su eksperimentalno potvrdili, do gotovo nezamislive preciznosti, gotovo sva predviđanja svih tih teorija. No isti ti teorijski alati neizbježno vode do sljedećeg uznemirujućeg zaključka: u svojim današnjim formulacijama, opća teorija relativnosti i kvantna mehanika ne mogu obje biti ispravne. Te dvije teorije, koje su u osnovi golemog napretka fizike proteklih stotinu godina – napretka koji je objasnio širenje svemira i fundamentalnu strukturu materije – međusobno su neuskladive. Ako još niste čuli za taj nepomirljiv sukob, možda se pitate zašto niste. Na to nije teško odgovoriti. U svim situacijama osim najekstremnijih, fizičari proučavaju ono što je ili maleno i lagano (kao što su atomi i njihove

sastavnice) ili ono što je golemo i teško (kao što su zvijezde i galaksije), ali ne i jedno i drugo u isto vrijeme. To znači da se služe ili samo kvantnom mehanikom ili samo općom teorijom relativnosti, pa se mogu samo bez riječi osvrnuti i slegnuti ramenima na ljutite primjedbe iz drugog tabora. Taj pristup već pedeset godina nije baš jednak blaženom neznanju, ali nije ni daleko od njega.

Ali, univerzum doista može biti ekstreman. U dubini središta crne rupe golema masa stisnuta je do minijaturne veličine. U trenutku velikog praska cijeli univerzum erumpirao je iz mikroskopskog grumenčića, tako malenog da je zrno pijeska u odnosu na njega pravi gorostas. Stoga je na tim područjima, sićušnim, ali ipak nevjerojatno masivnim, potrebno istodobno primijeniti i kvantnu mehaniku i opću teoriju relativnosti. Kao što će postajati sve jasnije u ovoj knjizi, kada kombiniramo jednadžbe opće teorije relativnosti s onima kvantne mehanike, one počinju škripati, podrhtavati i puštati paru poput automobila kojem je zakuhao hladnjak. Rečeno manje figurativno, u tom nesretnom spoju tih dviju teorija, ispravno postavljena fizikalna pitanja daju besmislene odgovore. Čak i ako smo spremni na to da duboka unutrašnjost crne rupe i pitanje početka univerzuma ostanu zaogrnuti velom tajne, ne možemo se oteti dojmu da sukob kvantne mehanike i opće teorije relativnosti poziva na dublje razumijevanje. Zar je doista moguće da je univerzum na fundamentalnoj razini podijeljen i zahtijeva jedan sklop zakona za velike stvari, a drugi, neuskladiv sklop zakona kad su stvari malene?

Teorija superstruna, pravi skorojević u usporedbi s čašnim starinama kvantne mehanike i opće teorije relativnosti, odlučno odgovara da to nije moguće. Intenzivna istraživanja fizičara i matematičara proteklih deset godina otkrila su da taj novi pristup opisivanju prirode na najdubljoj razini razrješava napetost između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike. U tom okviru, opća teorija relativnosti

i kvantna mehanika zahtijevaju jedna drugu da bi teorija imala smisla. Prema teoriji superstruna, brak između zakona velikoga i malenoga nije samo sretan nego i neizbježan.

To je dobra vijest. No teorija superstruna – skraćeno, teorija struna – postavlja to jedinstvo na još višu razinu. Einstein je tri desetljeća tražio ujedinjenu teoriju fizike koja bi ispreplela sve prirodne sile i materijalne sastavnice u jednoj teorijskoj tapiseriji. Nije uspio. Danas, u osvit novog tisućljeća, zastupnici teorije struna tvrde da su niti te tapiserije napokon otkrivene. Teorija struna ima potencijal da pokaže kako su svi čudesni događaji u univerzumu – od grozničavog plesa subatomske kvarkova to dostojanstvenog valcera binarnih zvijezda, od primordijalnog ognja do veličanstvenih spirala nebeskih galaksija – odraz jednog velikog fizikalnog načela, jedne važne jednadžbe.

Budući da ta svojstva teorije struna zahtijevaju da drastično promijenimo svoje razumijevanje prostora, vremena i materije, trebat ćemo neko vrijeme da se naviknemo na njih, da ih usvojimo tako da nam barem ne smetaju. Ali, kao što će postati jasno, kad se teoriju struna sagleda u pravom kontekstu, ona postaje dramatičan, ali prirodan razvoj revolucionarnih otkrića u fizici iz proteklih stotinu godina. Štoviše, vidjet ćemo da sukob između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike zapravo nije prvi, nego treći u nizu temeljnih sukoba u proteklom stoljeću, a sva njihova rješenja dovela su do zapanjujuće promjene našeg razumijevanja univerzuma.

Tri sukoba

Prvi sukob, prepoznat još krajem devetnaestog stoljeća, odnosio se na zagonetna svojstva gibanja svjetlosti. Ukratko, prema zakonima gibanja Isaaca Newtona, ako trčite dovoljno brzo, moći ćete dostići odlazeću zraku svjetlosti, dok pre-

ma zakonima elektromagnetizma Jamesa Clerka Maxwella, nećete to moći. Kao što ćemo raspraviti u poglavlju 2, Einstein je razriješio taj sukob svojom specijalnom teorijom relativnosti, i tako postavio naglavce naše razumijevanje prostora i vremena. Prema specijalnoj relativnosti, prostor i vrijeme više ne možemo shvaćati kao univerzalne pojmove, u kamen uklesane, koje svi mi jednako doživljavamo. Umjesto toga, prostor i vrijeme pojavili su se u Einsteinovoj obradi kao podatni konstrukti čiji oblik i pojava ovise o stanju promatračeva gibanja.

Razvoj specijalne relativnosti odmah je postavio pozornicu za drugi sukob. Jedan od zaključaka Einsteinova djela glasi da nijedan predmet – štoviše, nikakav utjecaj ni poremećaj – ne može putovati brže od svjetlosti. No, kao što ćemo raspraviti u poglavlju 3, Newtonova empirijski uspješna i intuitivno zadovoljavajuća opća teorija gravitacije uključuje utjecaje koji se trenutno prenose preko velikih prostranstava. Tad je nastupio Einstein (opet on) i riješio spor ponudivši novo poimanje gravitacije svojom općom teorijom relativnosti iz 1915. Kao što je specijalna relativnost oborila prethodne pojmove prostora i vremena, to je ponovila i opća relativnost. Ne samo da gibanje promatrača utječe na prostor i vrijeme, nego se oni mogu i iskriviti i uviti u prisutnosti materije ili energije. Vidjet ćemo da ta iskrivljenja tkiva prostora i vremena prenose gravitacijsku silu s jednog mjesta na drugo. Dakle, prostor i vrijeme više ne možemo shvaćati kao inertnu pozadinu na kojoj se odvijaju događaji univerzuma; umjesto toga, u specijalnoj, a potom i općoj relativnosti, oni imaju povezane uloge u samim tim događajima.

A tada se ponovilo: otkriće opće relativnosti riješilo je jedan spor, a izazvalo drugi. Prva tri desetljeća dvadesetog stoljeća fizičari su razvijali kvantnu mehaniku (o kojoj raspravljamo u poglavlju 4) kao reakciju na određen broj teških problema koji su nastali kad se pojmove fizike devetnae-

stog stoljeća primijenilo na mikroskopski svijet. Kao što smo spomenuli, treći i najdublji sukob nastao je iz nesukladnosti kvantne mehanike s općom relativnošću. Kako ćemo vidjeti u poglavlju 5, blago zakrivljen geometrijski oblik prostora koji je nastao u općoj relativnosti ne uklapa se u grozničavo, uzavrelo mikroskopsko gibanje univerzuma koje implicira kvantna mehanika. Budući da je teorija struna tek sredinom 1980-ih ponudila rješenje, taj sukob se s pravom naziva glavnim problemom moderne fizike. Štoviše, većina nas uzima zdravo za gotovo da naš univerzum ima tri prostorne dimenzije. No, prema teoriji struna, to nije tako, jer ona tvrdi da naš univerzum ima mnogo više dimenzija nego što ih oko vidi – dimenzija koje su čvrsto uvijene u nabrano tkivo svemira. Ti zadivljujući uvidi u prirodu prostora i vremena tako su važni da će biti vodeća tema u izlaganjima. Teorija struna, u stvarnom smislu, priča je o prostoru i vremenu nakon Einsteina.

Da bismo shvatili što teorija struna doista jest, moramo se osvrnuti i ukratko opisati što smo u posljednjem stoljeću naučili o mikroskopskoj strukturi univerzuma.

*Univerzum u najmanjim razmjerima:
što znamo o materiji*

Drevni Grci naslućivali su da se tkivo univerzuma sastoji od sićušnih “nedjeljivih” sastojaka koje su nazvali atomima. Kao što se od obilja kombinacija malog broja slova abecede tvori golem broj riječi, Grci su pretpostavili da bi i širok raspon materijalnih predmeta mogao biti rezultat kombinacija malenog broja posebnih, elementarnih blokova. Pretpostavka je bila točna. Više od 2000 godina potom još vjerujemo da je to istina, iako je identitet fundamentalnih jedinica pretrpio brojne izmjene. U devetnaestom stoljeću znanstvenici su dokazali da mnoge poznate tvari, poput ugljika i kisi-

ka, imaju najmanji prepoznatljiv sastojak; slijedeći tradiciju drevnih Grka, nazvali su ih atomima. Taj naziv se zadržao, ali povijest je pokazala da je pogrešan, jer su atomi itekako "djeljivi". Početkom 1930-ih kolektivan rad J. J. Thomsona, Ernesta Rutherforda, Nielsa Bohra i Jamesa Chadwicka uspostavio je model atoma nalik na Sunčev sustav, koji većinom dobro poznajemo. Daleko od toga da su elementarne sastavnice materije, atomi se sastoje od jezgre, koja sadrži protone i neutrone, a okružuje ju roj elektrona u orbitama.

Neko vrijeme su mnogi fizičari mislili da su protoni, neutroni i elektroni grčki "atomi". No, 1968. su eksperimentatori u stanfordskom Centru za linearne akceleratorne, služeći se povećanim tehnološkim mogućnostima za prodor u mikroskopske dubine tvari, otkrili da ni protoni ni neutroni nisu fundamentalni. Umjesto toga, dokazali su da se oni sastoje od tri manje čestice, nazvane *kvarkovi* – nadahnut odlomkom iz *Finneganova bdijenja* Jamesa Joycea, to duhovito ime nadjenulo im je teorijski fizičar Murray Gell-Mann, koji je još prije naslućivao da postoje. Eksperimentatori su potvrdili da se kvarkovi dijele na dvije vrste, koje su dobile nešto manje kreativna imena: *gornji* i *donji*. Proton se sastoji od dva gornja kvarka i jednog donjeg, a neutron od dva donja i jednog gornjeg.

Sve što vidite na zemlji i na nebu načinjeno je od kombinacija elektrona, gornjih kvarkova i donjih kvarkova. Ni jedan eksperimentalni podatak ne naznačuje da bi se neka od te tri čestice sastojala od nečega manjega. No, mnoštvo dokaza upućuje na to da univerzum ima i dodatne čestične sastojke. Sredinom 1950-ih Frederick Reines i Clyde Cowan eksperimentima se pronašli nesporne dokaze o četvrtoj fundamentalnoj čestici, nazvanoj *neutrino* – čestici koju je početkom 1930-ih predvidio Wolfgang Pauli. Pokazalo se da je neutrine teško pronaći jer su to čestice-duhovi koje rijetko stupaju u interakcije s drugom materijom: neutrino prosječne energije lako može proći kroz mnogo bilijuna kilometara

olova a da to uopće ne utječe na njegovo gibanje. Sad biste trebali odahnuti, jer upravo sada, dok ovo čitate, kroz vaše tijelo i kroz Zemlju prolaze milijarde neutrina koje je na početku njihova usamljenog puta kroz svemir izbacilo Sunce. Krajem 1930-ih, fizičari koji su proučavali kozmičke zrake (snopove čestica koji bombardiraju Zemlju iz svemira), otkrili su drugu česticu, nazvanu *mion* – istovjetnu elektronu, osim što je mion oko 200 puta teži. Budući da u kozmičkom poretku nije bilo ničega što bi zahtijevalo postojanje miona – nikakve neriješene zagonetke, nikakve prikladne niše – fizičar čestica i nobelovac Isidor Isaac Rabi nije baš dobrodošlicom pozdravio otkriće miona: “Ma tko je to naredio?” – rekao je. No ipak, mion je bio tu. A to je bio tek početak.

Služeći se sve moćnijom tehnologijom, fizičari su i dalje sudarali komadiće tvari, sve većom energijom, na trenutak stvarajući uvjete nevidene nakon velikog praska. U krhotinama nastalim nakon sudara tražili su nove fundamentalne sastojke i dodavali ih sve duljem popisu čestica. Evo što su pronašli: još četiri kvarka: *začarani*, *čudni*, *dubinski* i *vršni*, te još jednog, još težeg rođaka elektrona, nazvanog *tau*, kao i dvije druge čestice sa svojstvima sličnima neutrinu (nazvane su *mionski neutrino* i *tauonski neutrino* kako bi ih se razlikovalo od originalnog neutrina, koji sada nosi ime *elektronski neutrino*). Te čestice nastaju visokoenergijskim sudarima i postoje tek na trenutak; one nisu sastojci ničega na što obično nailazimo. No čak ni to nije kraj cijele priče. Sve te čestice imaju partnersku *antičesticu* – česticu identične mase ali suprotnu u nekim drugim aspektima, kao što je električni naboj (a i naboji drugih sila, koje ćemo razmotriti u daljnjem tekstu). Na primjer, elektronova antičestica zove se *pozitron* – ima posve jednaku masu kao i elektron, ali njegov električni naboj je +1, dok je električni naboj elektrona -1. Kad se dotaknu, materija i antimaterija mogu se poništiti i tako stvoriti čistu energiju – zato u svijetu oko nas ima iznimno malo antimaterije koja se prirodno pojavljuje.

Fizičari su uočili pravilnost u tim česticama, prikazanu u tablici 1.1. Materijalne čestice uredno su razvrstane na tri skupine, koje se često naziva porodicama. Svaka porodica sadrži dva kvarka, jedan elektron ili nekog njegova rođaka, i jednu vrstu neutrina. Komplementarne vrste čestica u trima porodicama imaju ista svojstva, osim mase, koja je u svakoj porodici sve veća. To znači da su fizičari dosad istražili strukturu materije do razmjera od milijardinke milijardinke metra i dokazali da se sve na što smo dosad naišli – bilo da se pojavljuje prirodno ili je nastalo umjetno u velikim razbijačima atoma – sastoji od neke kombinacije čestica iz tih triju porodica i od njihovih antimaterijalnih partnera.

Porodica 1	Porodica 2	Porodica 3
Čestica Masa	Čestica Masa	Čestica Masa
elektron 0,00054	mion 0,11	tau 1,9
elektronski neutrino <10-8	mionski neutrino <0,0003	tauonski neutrino <0,033
gornji kvark 0,0047	začarani kvark 1,6	vršni kvark 189
donji kvark 0,0074	čudni kvark 0,16	dubinski kvark 5,2

Tablica 1.1 Tri porodice fundamentalnih čestica i njihove mase (kao višekratnici mase protona). Vrijednosti mase neutrina zasad se odupiru eksperimentalnom određenju.

Pogled na Tablicu 1.1 zasigurno će vam ostaviti još jači dojam zadivljenosti nego što ga je osjetio Rabi kad je otkrio mion. Raspored po porodicama daje barem neki dojam reda, ali odmah se nameću nebrojena pitanja. Zašto postoji toliko mnogo fundamentalnih čestica, posebno s obzirom na to da se čini kako su za veliku većinu stvari u svijetu potrebni samo elektroni, gornji kvarkovi i donji kvarkovi? Zašto postoje tri porodice? Zašto ne jedna porodica, ili četiri, ili bilo koji drugi broj? Zašto čestice imaju naizgled nasumične vrijednosti mase – zašto, na primjer, tau teži oko 3520 puta više od elektrona? Zašto vršni kvark teži oko 40 200 puta više nego gornji kvark? To su tako neobični, naizgled na-

sumični brojevi. Jesu li nastali slučajno, nekom božanskom odlukom, ili ipak postoji razumljivo znanstveno objašnjenje tih temeljnih svojstava našega univerzuma?

Sile: ili, gdje je taj foton?

Stvari postaju zamršenije kad razmotrimo prirodne sile. Svijet oko nas prožet je time da netko ili nešto utječe na nešto drugo: loptu možete udariti palicom, zanesenjaci za *bungee-jumping* bacaju se s visokih platformi, magneti drže superbrze vlakove tik iznad metalnih tračnica, Geigerov brojač pucketajući reagira na radioaktivne tvari, nuklearne bombe katkad eksplodiraju. Na predmete možemo utjecati tako da ih snažno gurnemo, povučemo ili protresemo; ili tako da ih zamrznemo, zagrijemo ili spalimo. Proteklih stotinu godina fizičari prikupljaju sve više dokaza da se sve te interakcije između raznih predmeta i materijala, kao i svih milijuna i milijuna drugih koje svakodnevno susrećemo mogu svesti na kombinacije četiriju fundamentalnih sila. Jedna od njih je *gravitacijska sila*. Ostale tri su *elektromagnetska sila*, *slaba sila* i *jaka sila*.

Gravitacija je najpoznatija od tih sila i odgovorna je za to da nas drži u orbiti oko Sunca, a zbog nje i hodamo s nogama po Zemlji. Masa predmeta je mjera toga koliko jakom gravitacijskom silom taj predmet može djelovati, ali je istodobno i trpjeti. Sljedeća poznata sila je elektromagnetska. Ona pokreće sve ugodnosti modernoga života – svjetiljke, računala, televizore, telefone – a u osnovi je i goleme moći munje i nježnoga dodira ljudske ruke. Mikroskopski gledano, električni naboj čestice igra istu ulogu u elektromagnetskoj sili koju masa igra u gravitaciji: određuje koliko jaku elektromagnetsku silu ta čestica može proizvesti i, a u isti mah je i trpjeti.

Jaka i slaba sila manje su poznate jer se njihova jakost brzo smanjuje na svim udaljenostima osim onih u subatom-