

A ŠTA AKO VREME
NE POSTOJI?

KARLO
ROVELI

A šta ako vreme
ne postoji?

S francuskog preveo
Srđa Janković



Knjiga *A šta ako vreme ne postoji?* je izvorno objavljena u Francuskoj (*Et si le temps n'existait pas?*, Dunod, 2012), kao proširena i dopunjena verzija italijanskog izdanja *Šta je vreme? Šta je prostor?* (*Che cos'è il tempo? Che cos'è lo spazio?*, Di Renzo, 2004). Nastala je nakon razgovora i intervjuja naučne novinarke Elize Brin sa Karlom Rovelijem.

Naslov originala

Carlo Rovelli:

ET SI LE TEMPS N'EXISTAIT PAS?

Copyright © 2014 by Carlo Rovelli

Copyright © 2019. za srpsko izdanje, Heliks

Izdavač

Heliks

Za izdavača

Brankica Stojanović

Urednik

Bojan Stojanović

Lektor

Aleksandra Dragosavljević

Štampa

Artprint Media, Novi Sad

Tipografija

Monotype Bembo

Prvo izdanje

ISBN: 978-86-6024-027-1

Smederevo, 2019.

www.heliks.rs

SADRŽAJ

<i>Predgovor</i>	vii
<i>Prolog</i>	ix
1. Nesvakidašnji problem: kvantna gravitacija	1
2. Prostor, čestice i polja	7
3. Rađanje teorije petlji	23
4. Digresija: nauka ili stalno traganje za novim načinima razmišljanja o svetu	35
5. Petlje: zrnca prostora, spinske mreže, primordijalna kosmologija i toplota crnih rupa	55
6. Vreme ne postoji	75
7. Petlje, strune i ostalo	101
<i>Epilog</i>	117
<i>Zahvalnica</i>	127
<i>Indeks</i>	129

PREDGOVOR

Karlo Roveli je teorijski fizičar koji važi za jednog od začetnika teorije kvantne gravitacije na petljama, polja proučavanja poznatog po zastrašujućoj matematičkoj složenosti. Pa ipak, kad sam ga upoznala, nakon što sam čula njegovo predavanje na jednom interdisciplinarnom skupu, pokazao se vičnim da o svom radu govori tako jasno da bi ga i petnaestogodišnjak mogao ispratiti od početka do kraja, i povrh toga s takvom strašću da bi mladi slušalac smesta pozeleo da čuje kako bi i sam mogao postati fizičar.

Karlo Roveli radi na vrhunskom tehničkom nivou, ali se nikad ne prepušta uživanju u mentalnim akrobacijama radi njih samih. Pogled mu je uvek uprt u naučna pitanja koja se trudi da razreši. Ta svest o veličini uloga čini ga čarobnim popularizatorom nauke. Jednostavnim potezima, lucidno, on skicira konture zdanja fundamentalne fizike kako bi nam pokazao njegove slabe tačke – otvorena pitanja koja zaokupljaju današnje fizičare.

Potom, otisnuvši se i preko granica fizike, preispituje i samu nauku, njene odnose prema drugim saznavnim oblastima i njenu

društvenu ulogu. Fizičar nije, niti može biti, stručno lice lišeno dodira sa stvarnošću – jer upravo o stvarnosti i pretenduje da govori. Svet koji fizičar istražuje pomoću akceleratora čestica isti je svet u kom se svakog jutra budi. Uspešnije od ma kog drugog naučnika, Karlo Roveli nam dopušta da osetimo tu snažnu povezanost između rada istraživača i brujanja sveta.

Italijanski izdavač Sante di Renco pokazao se dalekovidim kada je potakao Karla Rovelija da koncipira jedan tekst namenjen mladim ljudima koji su zainteresovani da se opredele za naučnu karijeru. Tako je, iz više razgovora o naučnom putu fizičara, rođeno delo *Che cos'è il tempo? Che cos'è lo spazio?* (*Šta je vreme? Šta je prostor?*).

Pošto sam i sama nameravala da objavim taj tekst, Karlo Roveli mi je, onomad kad sam ga slušala na konferenciji, predložio da ga preuzmem i doradim, kako u smislu naučnog sadržaja, tako i u pogledu razmišljanja o nauci. Sada nam se, dakle, pruža prilika da čitamo proširen i pročišćen tekst, pravu pravcatu „kapu za razmišljanje“. Iz njega ćemo doznati kuda se zaputila fizika sutrašnjice i zašto se opet približava Aristotelu, kako izgleda „zrnce“ prostorvremena i na koji način bi istraživanje sličnih tema moglo da igra važnu ulogu u daljem napretku civilizacije.

Ova knjiga je više od naučnog dela: to je demonstracija naučnog duha, mentalnog stava koji je kod dece tako prirodan, a tako ga je teško sačuvati.

– Eliza Brin,
naučna novinarka

PROLOG

Posvetio sam veliki deo života naučnim istraživanjima, ali me je strast za naukom obuzela pozno. Dok sam bio mlad, više no nauka opčinjavao me je čitav svet.

Odrastao sam u Veroni, u tihoj i spokojnoj porodici. Moj otac, čovek retke inteligencije, diskretan i rezervisan, bio je inženjer i upravljao je vlastitom kompanijom. Od njega sam nasledio zadovoljstvo da svet posmatram s radoznalošću. Majka, prava Italijanka, prepuna ljubavi prema sinu jedincu, pomagala mi je u „opitima“ koje sam izvodio u osnovnoj školi i podsticala moju želju za otkrićima.

Pohađao sam klasičnu gimnaziju u Veroni, gde su se više izučavali istorija i grčki jezik nego matematika. Bila je to ustanova bogata kulturnim podsticajima, ali pretenciozna i provincijalna, ušančena u misiji da štiti privilegije i identitet lokalne buržoazije. Mnogi nastavnici su pre rata bili fašisti i u dubini duše su to i ostali. Behu šezdesete i sedamdesete godine prošlog veka i među generacijama je besneo sukob. Svet se ubrzano menjao. Većini odraslih

oko mene bilo je teško da te promene prihvate; ukopavali su se u jalovim defanzivnim stavovima. Ulivao sam im malo poverenja, a još manje mojim profesorima. S njima sam se neprestano sukobljavao, kao i sa svim drugim figurama autoriteta.

Moja adolescencija je bila obeležena buntom. Nisam se prepoznavao u vrednostima koje su oličavali ljudi oko mene, razvijao sam se u potpunoj zbunjenosti i ništa mi nije izgledalo izvesno. Jasno mi je bilo samo jedno: svet koji sam video razlikovao se od sveta koji bih ja nazvao lepim i pravičnim. Sanjao sam da postanem skitnica i da okrenem leđa toj stvarnosti koja mi se nije sviđala. Željno sam čitao knjige koje su mi pripovedale o drugim načinima življenja i drugačijim idejama. Verovao sam da se u svakoj knjizi koju još uvek nisam pročitao kriju divne dragocenosti.

Tokom univerzitetskih studija u Bolonji, moj sukob sa svetom odraslih slio se s putem kojim je pošao veliki deo moje generacije. Hteli smo da promenimo svet, da ga učinimo boljim, ili bar manje nepravednim; da otkrijemo nove načine da živimo i volimo; da se okušamo u građenju novih vrsta zajednica; jednom rečju, da probamo sve. Vodili smo beskrajne rasprave i svako malo se zaljublivali. Hteli smo da naučimo kako da posmatramo stvari bez ikakvog *a priori* stava. Bilo je trenutaka rasula, ali i onih drugih, kada nam se činilo da naziremo praskozorje novog sveta.

U to doba se živelo od snova. Mnogo se putovalo: kako u vlastitoj glavi, tako i drumom, uvek u potrazi za prijateljima i idejama. Kao dvadesetogodišnjak, i ja sam se otisnuo na dugi samotni obilazak sveta. Hteo sam da se prepustim pustolovini „traganja za istinom“. Danas mi je pedesetak godina i smejem

se toj naivnosti, ali svejedno imam utisak da je to bio dobar izbor; u izvesnom smislu, nikada nisam prestao da proživljavam pustolovinu koju sam tada započeo. Put nije uvek bio lagan, ali me luda nadanja i bezgranični snovi nisu napuštali; trebalo je samo biti odvažan i slediti ih.

S grupom prijatelja vodio sam program jedne od prvih tadašnjih slobodnih radio-stanica, Radio Aliče (*Radio Alice*) u Bolonji. Mikrofon je bio otvoren svakom ko bi poželeo da se izražava posredstvom radio-talasa. Radio Aliče je međusobno sučeljavao iskustva i utopije. S dvojicom od pomenutih prijatelja, napisao sam i knjigu o studentskoj pobuni u Italiji poznih sedamdesetih godina. Ali nadanja u revoluciju su ubrzo ugušena i sistem se opet učvrstio. Nije tako lako promeniti svet.

Negde na polovini univerzitetskih studija, još jače sam se osetio izgubljenim nego ranije, uz gorak osećaj da su snovi koje je delila polovina planete već bili na putu da se rasprše. Nisam imao nikakvu ideju šta da radim sa svojim životom. Da nastavim putanju ka društvenom usponu, da gradim karijeru, zarađujem novac i sakupljam mrvice s trpeze moći – sve je to zvučalo odveć žalosno. Tako nešto ne bi ličilo na mene. A preda mnom je još bio čitav svet koji me je zvao da ga istražujem, te su mi se iza oblaka i dalje priviđala beskonačna obzorja.

Tada sam se susreo s naučnim istraživanjima – otkrio sam prostor neograničene slobode, pustolovinu u isti mah iskonsku i nesvakidašnju. Dotad sam učio da bih položio ispite, a pre svega da bih odložio vojnu obavezu; ali gradivo koje sam izučavao ubrzo je počelo da mi privlači pažnju, a zatim i da u meni budi žar.

Na trećoj godini studija, studenti se susreću sa „novom“ fizikom, fizikom dvadesetog veka: kvantnom mehanikom i Ajnštajnovom teorijom relativnosti. Reč je o opčinjavajućim idejama, o nesvakidašnjim konceptualnim prevratima koji su preobrazili naše viđenije sveta, oborivši nekadašnje zamisli, uključujući i one što su se smatrale najčvršće utemeljenim. Uz njihovu pomoć, otkrivamo da svet nije kao što izgleda. Učimo da sve vidimo drugim očima. To je veličanstveno misaono putovanje. Tako sam iz osujećene kulturne revolucije neosetno prešao u misaonu revoluciju koja traje.

U nauci sam pronašao način mišljenja koji polazi od uspostavljanja pravila za razumevanje sveta, a potom dopušta mogućnost da se ta pravila menjaju. Očarala me je takva sloboda u traganju za saznanjima. Gonjen radoznalošću, a možda i onim što je Federiko Čezi, Galilejev prijatelj i vizionar moderne nauke, nazivao „prirodnim žarom za znanjem“, odjednom sam se, i ne opazivši, našao duboko uronjen u probleme teorijske fizike.

Moje interesovanje za tu disciplinu je, dakle, više bilo plod slučaja i radoznalosti negoli svesnog izbora. U gimnaziji sam bio dobar u matematici, ali sam osećao da me ponajpre privlači filozofija. Da studiram fiziku, a ne filozofiju, odabrao sam samo zato što sam, u svom preziru prema ukorenjenim ustanovama, filozofske probleme smatrao previše važnim da bi se o njima raspravljalo u školi...

I tako sam se, baš kad se moj san o izgradnji novog sveta surovo sudario sa stvarnošću, zaljubio u nauku, koja u sebi nosi beskonačan broj novih svetova što ih tek treba otkriti, i koja mi je ponudila mogućnost da sledim slobodnu i blistavu stazu ispitivanja svega oko nas. Nauka je za mene predstavljala kompromis koji mi je omogućio da ne odustanem od želje za promenom i

pustolovinom, da sačuvam slobodu mišljenja i slobodu da budem to što jesam, a da u isti mah svedem na minimum sukob s okolinom koji tako nešto povlači. Omogućila mi je i više od toga – da doprinosim jednom poduhvatu koji je svet uvažavao.

Verujem da u sličnom manevru umnogome leži izvorište svakog intelektualnog ili umetničkog stvaralaštva. On nudi neku vrstu pribežišta za potencijalne disidente. U isti mah, takve osobe su potrebne društvu, jer je ono uvek u stanju dinamičke ravnoteže: s jedne strane su sile koje osiguravaju stabilnost i ustaljenost, ne dopuštajući neredu da razori već izgrađeno; s druge strane je žudnja za promenom i pravdom koja nastoji da primora društvo na napredovanje i evoluciju. Bez takve žudnje za promenom, civilizacija nikad ne bi dosegla tačku u kojoj se danas nalazi; i dalje bismo se klanjali faraonima.

Smatram da su mladalačka radoznalost i žeđ za promenom, koje su prisutne u svakoj generaciji, prvi pokretači razvoja društva. Uporedo s figurama sistema, koje održavaju stabilnost ali sputavaju istoriju, potrebni su nam i ljudi što žive od snova, upuštajući se u otkrivanje novih predela, originalnih ideja, neočekivanih načina sagledavanja i poimanja stvarnosti. Današnji svet su osmislili i izgradili ljudi jučerašnjice koji su bili u stanju da sanjaju. Samo će novi sanjari iznedriti našu budućnost.

Ova knjiga opisuje pregršt deonica puta koji sam prešao vodeći se vlastitom radoznalošću i sopstvenim snovima. To je pripovest o opčinjenosti idejama i o prijateljima koje sam na tom putu pronašao.

A ŠTA AKO VREME
NE POSTOJI?

POGLAVLJE I

Nesvakidašnji problem: kvantna gravitacija

Na četvrtoj godini studija, naleteo sam na članak jednog engleskog fizičara, Krisa Išama, na temu *kvantne gravitacije*. U članku je bilo objašnjeno da u samom temelju savremene fizike postoji fundamentalni nerazrešeni problem definicija vremena i prostora, što će reći osnovne strukture sveta. Željno sam pročitao članak. Nisam razumeo bogzna šta, ali me je opčinilo pitanje koje je članak ilustrovaio. Evo grubih obrisa tog problema.

Grozomorno stanje bazične fizike

Velika naučna revolucija dvadesetog veka sastojala se od dve glavne epizode. To su *kvantna mehanika*, s jedne strane, i Ajnštajnova *opšta teorija relativnosti*, s druge. Kvantna mehanika,

koja veoma dobro opisuje mikroskopski svet, duboko je preinačila sve što smo znali o materiji. Opšta relativnost, koja potanko objašnjava gravitacionu silu, korenito je preobrazila naša saznanja o vremenu i prostoru. Obe teorije su obilno potvrđene iskustvom i umnogome su omogućile razvoj savremene tehnologije.

No ove dve teorije vode ka dva veoma različita i na prvi pogled nespojiva načina da se opiše svet. Stiče se utisak da je svaka od njih sročena kao da ona druga ne postoji. Gradivo što ga na svojim predavanjima objašnjava profesor opšte relativnosti zvuči besmisleno njegovom kolegi koji u susednom amfiteatru istim studentima predaje kvantnu mehaniku, i obratno. U kvantnoj mehanici se koriste stari pojmovi prostora i vremena, kojima opšta teorija relativnosti protivreči. U opštoj teoriji relativnosti se, pak, koriste stari pojmovi materije i energije, kojima protivreči kvantna mehanika. Trenutno ne postoji nijedna fizička situacija u kojoj se istovremeno primenjuju obe teorije. Na snazi je ili jedna ili druga, u zavisnosti od razmera posmatranih pojava. Fizičke situacije u kojima su obe teorije primenljive, poput ekstremno sićušnih razdaljina, središta crnih rupa ili početnih trenutaka života vasiona, podrazumevaju nivoe energije koji teško da bi bili dostupni našim instrumentima.

Ne znamo kako da međusobno ukrstimo ova dva velika otkrića; ne posedujemo nikakav celovit okvir za razmišljanje o svetu. U shizofrenoj smo situaciji; naša su objašnjenja raspolučena i međusobno nespojiva, do te mere da više i ne znamo šta su prostor, vreme i materija. Današnja bazična fizika je u grozomornom stanju.

Sličnih situacija je u istoriji već bilo; na primer, u doba koje je neposredno prethodilo Njutnovom objedinjujućem opusu. Za Keplera, koji je posmatrao planete i zvezde, ti objekti su svojim kretanjem opisivali elipse. Za Galileja, koji je proučavao predmete koji padaju na zemlju, ovi su iscrtavali putanje u vidu parabole. No Kopernik još ranije beše shvatio da je Zemlja mesto kao i svako drugo, da ni po čemu nije jedinstvena u vasioni. Da li je onda moguće da na Zemlji funkcioniše jedna teorija, a na nebu neka druga? Njutnu je pošlo za rukom da dva viđenja izmiri jedinstvenom teorijom – istovetnom jednačinom koja važi i za planete i za jabuke u padu.

To prekrasno jedinstvo je vladalo tri stoleća. Sve do početka dvadesetog veka, fizika je predstavljala zbir relativno usaglašanih zakona zasnovanih na malobrojnim ključnim pojmovima, kao što su vreme, prostor, uzročnost i materija. Uprkos pojedinačnim značajnim promenama, ti pojmovi su većinom ostali postojani. Krajem devetnaestog veka, počele su se gomilati unutrašnje napetosti, dok su u prvoj četvrtini dvadesetog kvantna mehanika i opšta relativnost razorile same temelje fizike. Nestalo je prekrasno njutnovsko jedinstvo.

Obe teorije, kvantna mehanika i opšta teorija relativnosti, stekle su kolosalan uspeh i nepresušne eksperimentalne potvrde; danas su i jedna i druga deo našeg dokazanog znanja. Svaka od dve teorije menja konceptualnu osnovu klasične fizike na način koji je koherentan unutar njenih granica, ali mi ne raspoložemo nikakvim konceptualnim okvirom kojim bismo mogli da obuhvatimo *obe* teorije. Stoga ne posedujemo nikakvo oruđe da predviđamo zbivanja na skalama manjim od

10^{-33} centimetara, gde gravitacija počinje da ispoljava kvantne efekte. Reč je o ekstremno sićušnim dimenzijama, ali bismo svakako morali biti u stanju da i to opisujemo. Svet se ne može pokoravati dvema međusobno nespojivim teorijama. Pojave tako sićušnih razmera se u prirodi odista susreću, recimo neposredno po Velikom prasku ili nedaleko od crne rupe. Ako takve pojave želimo da shvatimo, moramo biti sposobni da proračunavamo događaje na odgovarajućoj skali. Ovako ili onako, dve teorije valja pomiriti. Ta misija čini središnji problem *kvantne gravitacije*.

Po svemu sudeći, radi se o teškom problemu. Ali negde pred poslednju godinu studija, sa bespogovornom odvažnošću dvadesetogodišnjaka, odlučio sam da upravo tom izazovu posvetim život. Očaravala me je pomisao da ću proučavati fundamentalne koncepte kao što su vreme i prostor, a pomalo me je privlačila i sama činjenica da je situacija delovala bezizgledno.

U Italiji na tom problemu tada nije radio gotovo niko. Moji profesori su me veoma živo odvrćali od otiskivanja u tom pravcu: „Taj put ne vodi nikuda“, „Nikada nećeš naći posao“, ili pak: „Morao bi da pristupiš kakvom jakom i već formiranom timu“. Ali razboriti saveti koje dele odrasli često samo jačaju razdraganu mladalačku tvrdoglavost.

Kao dečak, rado sam čitao pripovetke italijanskog pisca Đanija Rodarija. Jedna od njih govori o Đovaninu i putu u nigdinu. Junak je živio u selu u kom beše jedan put što nikuda nije vodio. No budući radoznao i tvrdoglav, nije se obazirao na ono što su mu svi govorili, već je morao da ode da se sam uveri. Pošao je pomenutim putem, i naravno, naposljetku pronašao

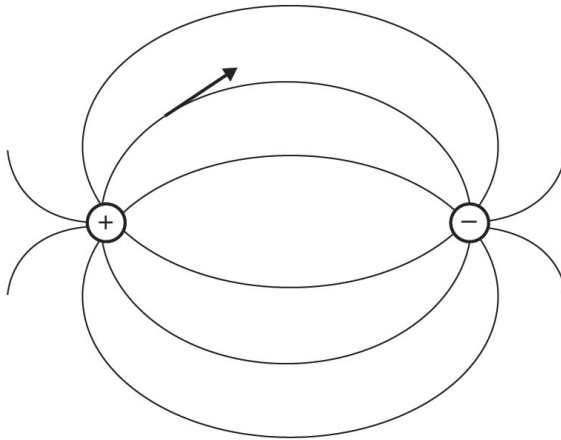
dvorac i princezu koja ga je obasula draguljima. Kada se, sad već bogat, vratio u selo, istim putem su smesta pohrlili svi, ali niko više nije pronašao ni trunku blaga. Ta mi se priča urezala u sećanje. U kvantnoj gravitaciji sam otkrio put koji, po opštem mišljenju, ne vodi nikuda. Na tom sam putu i te kako pronašao i svoju princezu i bezbroj dragulja.

POGLAVLJE 2

Prostor, čestice i polja

Hajde da sada nešto detaljnije opišemo poreklo i svu složenost problema kvantne gravitacije, na čelu s ključnim pojmom, prostorom, koji je, istorijski posmatrano, prvi bio okrenut naglavce. Potom ću objasniti zbog čega pojmu vremena predstoji još spektakularniji preobražaj.

Pojam prostora kakav leži u osnovi najrasprostranjenijeg viđenja sveta podrazumeva da je prostor veliki „sadržalac“. To je neka vrsta velike kutije, pravilne i jednoobrazne, bez ikakvog povlašćenog pravca, za koju važi euklidovska geometrija i unutar koje se odvijaju svetska zbivanja. Svi predmeti za koje znamo sastoje se od čestica, a ove se kreću u tom prostoru-kutiji. Upravo je u takvom prostoru Njuton konstruisao svoju moćnu teoriju univerzalne gravitacije, koja je i dan-danas osnov za mnogobrojne primene u svim oblastima tehnologije i inženjerstva.

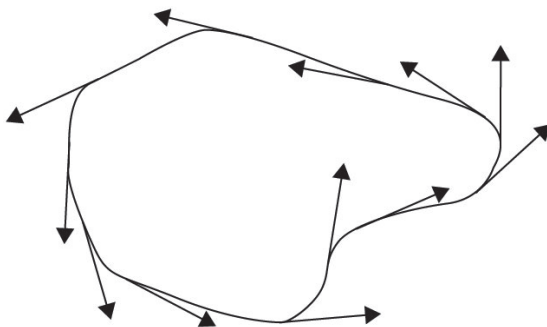


Slika 1 Električno polje između dva naelektrisanja; polje se sastoji od linija – Faradejevih linija. Strelica pokazuje pravac električne sile u nekoj tački.

Dvesta godina posle Njutna, krajem devetnaestog veka, Džejms Klark Maksvel i Majkl Faradej proučavali su električnu silu između naelektrisanih tela i to ih je navelo da dorade malopredašnji opis. Oni su prostoru i česticama pridodali i treći sastojak: elektromagnetno „polje“, novi „objekat“ koji će imati veliki značaj u svojoj potonjoj fizici.

Elektromagnetno polje je stožer električnoj i magnetnoj sili. To je neka vrsta difuznog entiteta koji ispunjava čitav prostor. Faradej ga je zamislio kao skup *linija* koje polaze od pozitivnih naelektrisanja i završavaju se na negativnim. Neke od tih linija prikazane su na slici 1. Zapravo ih ima beskonačno mnogo i kontinuirano ispunjavaju čitav prostor, poput niti nevidljive paukove mreže koja se proteže u sve tri dimenzije.

Kroz svaku tačku prostora prolazi po jedna Faradejeva linija. Pravac linije je u datoj tački definisan vektorom (u vidu strelice)



Slika 2 *Zatvorena Faradejeva linija, odnosno petlja. Strelice pokazuju pravac delovanja električne sile, koji je u svakoj tački tangencijalan na Faradejevu liniju. Ove linije ispunjavaju čitav prostor i čine elektromagnetno polje.*

koji je upravljen tangencijalno na liniju. Na naelektrisanje koje se zatekne u toj tački polje će delovati električnom silom u pravcu pomenutog vektora.

Veličina Faradejevog i Maksvelovog otkrića bila je u tome što su shvatili da je pomenuto polje samostalan entitet koji postoji nezavisno od električnih naboja. „Faradejeve linije“ postoje i kad naelektrisanja nema. Ukoliko nema električnih naboja na kojima bi se linije završavale, one se savijaju unazad ka sebi i tako u prostoru obrazuju zatvorene krive koje se nazivaju *petlje*. Jedna od takvih Faradejevih linija prikazana je na slici 2. Pravac električne sile koja deluje u nekoj tački prostora odgovara vektoru upravljenom tangencijalno na liniju koja prolazi kroz tu tačku.

Elektromagnetno polje ne stvaraju naelektrisanja. Reč je o samostalnom entitetu koji uvek postoji; ponekad ga prisustvo naelektrisanja menja, ali ono od tih naelektrisanja ne potiče. Uopšte mu nisu neophodna da bi postojalo.

Maksvel je Faradejeve intuitivne predstave pretočio u matematičke formule i iz njih izvukao zaključke. Maksvelove jednačine opisuju elektromagnetno polje koje je Faradej zamislio, a time i Faradejeve linije. Sam Faradej, genijalni eksperimentator i kolosalni vizionar, bio je sasvim lišen matematičkih veština.

Oblikom Faradejevih linija upravljaju Maksvelove jednačine. Svaka linija ponaosob nije ni nepromenljiva niti proizvoljna, već menja oblik pod uticajem susednih linija i obližnjih naelektrisanja u pokretu. Ukoliko naelektrisanja postoje, ona otvaraju petlje, čineći time da elektromagnetno polje izgleda kao na slici 1. Polje je sačinjeno od zbira Faradejevih linija i ponaša se kao more linija u pokretu. One se neprekidno kreću poput morskih talasa, i to kretanje se malo-pomalo prenosi dalje.

Kada se promena oblika polja koherentno prenosi iz tačke u tačku, kažemo da se između te dve tačke kreće elektromagnetni talas. Tada veličina i pravac vektora koji oličava električnu silu pravilno osciluju. Brzina i amplituda tog oscilovanja definišu svojstva talasa: njegovu talasnu dužinu i intenzitet. Herc je prvi upotrebio radio-talase za odašiljanje informacija na daljinu, utirući put stotinama drugih primena koje su postepeno obogatile našu modernu tehnologiju, zauvek izmenivši svet.

Zahvaljujući svojoj genijalnosti, Maksvel je shvatio da svetlost nije ništa drugo do brzo talasno kretanje linija polja, jedna vrsta elektromagnetnog zračenja. U slučaju radio-talasa, oscilovanje je sporije, dok je kod vidljive svetlosti brže, ali je u osnovi reč o jednoj te istoj pojavi – periodičnoj promeni odlika elektromagnetnog polja.

Ponekad se kaže kako je elektromagnetno polje nevidljivo. Ali to nije istina, jer ono što „vidimo“ nikad i nije ništa drugo do elektromagnetno polje. Kad nešto gledamo, mi ne opažamo neposredno taj predmet, već oscilacije elektromagnetnog polja između njega i nas: svetlost odbijenu od predmeta. Pomislite šta vidite u ogledalu, ili na bioskopskom platnu, ili na hologramu. Ni u jednom od ta tri slučaja nema nikakvog predmeta tamo gde vam se čini da ga vidite, već samo svetlosti koja se odbija *kao da* je predmet tu. Učinak je, međutim, isti.

Faradejevi i Maksvelovi radovi su prilično izmenili nju-novsko viđenje sveta, ali ne iz osnova. I dalje se verovalo da postoji prostor-kutija i da se stvari kreću u tom prostoru. Sada je naprosto, pored prostora-kutije i čestica, postojao i treći entitet: elektromagnetno polje.

Opšta teorija relativnosti

Duboka revolucija u našem poimanju prostora odigrala se 1915. godine blagodareći Ajnštajnu. On je bio opčinjen Maksvelovim radovima, a sam je pokušavao da objasni gravitacionu silu (onu što nas privlači tlu, što zadržava Zemlju u blizini Sunca a Mesec u blizini Zemlje). Shvatio je da je, analogno elektromagnetnom polju, u fiziku neophodno uvesti i *gravitaciono polje*. Ono bi moralo da prenosi gravitacionu silu između dveju masa, baš kao što električnu silu između dvaju naelektrisanja prenosi elektromagnetno polje koje ispunjava prostor među njima. Otud bi morale postojati i gravitacione „Faradejeve linije“, koje međusobno povezuju mase, obrazujući gravitaciono polje koje

ispunjava čitav prostor i koje može da se kreće, vibrira i stvara talase. I tako je Ajnštajn uveo gravitaciono polje, ispisavši njegove jednačine – koje se danas nazivaju Ajnštajnovim – po ugledu na Maksvelove.

Da je učinio samo to, Ajnštajn bi i dalje bio veliki naučnik, ali ne i genije. No njegovo stremljenje ka razumevanju bilo je znatno dublje. Pokušavajući da rastumači oblik jednačina koje opisuju pomenuto polje, Ajnštajn je ostvario zaprepašujućí proboj: shvatio je da su gravitaciono polje i Njutnov prostor-kutija *jedno te isto*. Verovatno je to bila Ajnštajnova najdalekosežnija spoznaja.

Zamislimo da ste upravo doznali kako su gospodin A i gospodin B ista osoba. Postoje dva načina da to shvatite: možete reći da ne postoji gospodin B, jer se u stvari radi o gospodinu A; ili, možete reći da ne postoji gospodin A, jer se radi o gospodinu B. Baš tako bi se i Ajnštajnov otkriće moglo sročiti na dva načina. Prvi glasi: ne postoji gravitaciono polje, jer je to sam prostor, koji se kreće, vibrira i menja oblik poput morskih talasa. Drugi je: ne postoji prostor, već samo gravitaciono polje u pokretu. Prvi iskaz je čest način predstavljanja stvari – u naučno-popularnim tekstovima se to ilustruje slikom „elastičnog“ prostora koji se savija u blizini kakvog masivnog tela – ali ta slika je problematična, jer vodi očuvanju ideje da prostor ima vlastitu suštinu, različitu od suštine polja. Ideja prostora nagoveštava nekakav bezobličan i pasivan entitet, nezavisan od stvari koje ga ispunjavaju. Prostor opšte relativnosti je, nasuprot tome, po prirodi blizak elektromagnetnom polju: reč je o dinamičkom entitetu u interakciji s objektima koji se nalaze u njemu. Stoga je najbolji način da opišemo Ajnštajnovu

otkriće reći kako prostor ne postoji: radi se samo o gravitacionom polju. Njutn je gravitaciono polje pogrešno držao za poseban entitet, apsolutni prostor, umesto da u njemu prepoznaje polje među drugim poljima.

Ovo otkriće je bilo neočekivano i spektakularno. Prostor, koji je Njutn opisivao kao nepromenljivu i krutu kutiju, ne postoji: umesto njega, tu je gravitaciono polje, dinamičan i fleksibilan fizički objekat, istovetne prirode kao i elektromagnetno polje.

Iznenada, svet više nije sačinjen od čestica i polja koji bivstvuju u prostoru, već samo od čestica i polja – polja koja su, takoreći, smeštena jedno u drugom. Gravitaciono i elektromagnetno polje jedno drugo prekrivaju, ili se međusobno nadovezuju, ili se preklapaju... ukratko, postoje i deluju zajednički. Živimo u gravitacionom polju, ili na njemu, a nipošto u krutom prostoru-kutiji.

Zamislite ostrvo u okeanu nastanjeno mnoštvom životinja. Tad bismo rekli kako vidimo životinje na ostrvu. Ali mladi marinski biolog po imenu Ajnštajnijum sprovede detaljnije istraživanje i otkrije da ostrvo nije ostrvo: to je zapravo ogroman kit. Životinje, dakle, ne žive na ostrvu. Ostrvo je i samo životinja, te ne postoje *dva entiteta* različite prirode (životinje i ostrva) već samo entiteti istovetne prirode, životinje, koje žive „naslagane jedne na druge“, bez potrebe za bilo kakvim kopnom. Analogno tome, Ajnštajn je shvatio da poljima nije neophodno da bivstvuju u krutom prostoru-kutiji, jer mogu da bivstvuju „naslagana jedna na druga“. Njutnov prostor je bio nalik na ostrvo koje je dom životinjama, na nepromenljiv,

statičan, neprolazan temelj. Ajnštajn je pokazao da prostor nije entitet različit od polja i čestica što se u njemu kreću, već je i sam polje kao i druga. On može da se kreće, talasa i savija, a njegovim ponašanjem upravljaju (Ajnštajnovi) jednačine posve uporedive s jednačinama elektromagnetnog polja.

Razume se, promene gravitacionog polja su, na našoj skali, toliko majušne da nam prostor izgleda savršeno jednoobrazan i nepromenljiv, baš kao i kitova grbina u primeru ostrva sa životinjama. Njegova struktura izmiče našem opažanju isto kao što neravnine lista hartije izmiču našim prstima. Ali instrumentima dovoljne preciznosti mogli bismo opaziti „talasanje“ prostorvremena – pa zato i kažemo kako je, prema Ajnštajnovoj teoriji, prostorvreme zakrivljeno.

Ajnštajn je, prema tome, napredovao u dva koraka: najpre je opis kretanja iz klasične mehanike učinio relativističkim, ali bez gravitacije (specijalna teorija relativnosti), a zatim je taj relativistički opis proširio na kretanje tela u uslovima gravitacije (opšta teorija relativnosti).

Eto šta je *opšta teorija relativnosti*. U pitanju je „relativnost“ jer više nije moguće odrediti položaj objekata u prostoru, već samo relativan položaj jednog objekta u odnosu na neki drugi. A „opšta“ je zbog toga što, mada je svetlost dana ugledala kao puka teorija gravitacione sile, poseduje „opšti“ značaj utoliko što preobražava pojam prostora i okreće naglavce naše poimanje svekolikog fizičkog sveta.

Reč je o prelepom, ali slabo pristupačnom teoriji. Za njenu strogu formulaciju neophodna je složena matematika (ona što opisuje polja koja egzistiraju u drugim poljima, a ne u prostoru-

kutiji). No ako teoriju dobro shvatimo, ostajemo zadivljeni njenom konceptualnom jasnoćom. Koncepti koji su nam se ranije činili nepovezanim – prostor, gravitaciona sila, polja – sada postaju aspekti jednog jedinog entiteta: gravitacionog polja.

Kako je Ajnštajn mogao da osmisli tako začuđujuću teoriju? Neposredno iskustvo nije igralo gotovo nikakvu ulogu u njegovom radu. Teorija je plod čistog razmišljanja, primenjenog na dotadašnja saznanja o svetu. Opšta teorija relativnosti čisto-krvna je tvorevina Ajnštajnovog genija: razmišljajući o prirodi prostora i uzevši u obzir teorije koje su prethodno dokazane, Ajnštajn je shvatio da je prostorvreme dinamično, a zatim je pronašao odgovarajuću jednačinu i izračunao prividno odstupanje položaja zvezda na nebu za vreme pomračenja Sunca.

Izvorište saznanja ovde počiva u produbljenom poimanju postojećih teorija. Ajnštajn ni u kom slučaju nije sačinio svoje teorije pošavši od nule. Da bi 1905. godine osmislio specijalnu teoriju relativnosti, on je veoma ozbiljno shvatio dokazane teorije svog doba, Maksvelovu teoriju i Galilej–Njutnovu mehaniku, usredsredivši se na prividne nepodudarnosti između njih (na koje ću se vratiti u šestom poglavlju). Radi opšte teorije relativnosti je pak, 1915. godine, istraživao nepodudarnosti između Njutnove teorije gravitacije i specijalne teorije relativnosti. Dokazane teorije je upotrebio kao empirijsku osnovu za novu konceptualizaciju koja je i njih obuhvatila. Za Ajnštajna su ove postojeće teorije imale ulogu „eksperimentalnih podataka“ (jer su već bile obilno potvrđene), te se potrudio da ih podigne na viši nivo, baš kao što su Keplerova i Galilejeva teorija predstavljale polaznu građu za Njutnovu. Ajnštajnova otkrića su, dakle, baš kao i Njutnova,

sasvim daleko od pukih spekulacija; čvrsto su ukorenjena u empirizmu, bez obzira na to što su upotrebljeni empirijski podaci već bili ugrađeni u postojeće teorije.

Čak i pre svega tridesetak godina, opšta teorija relativnosti smatrana je izvrsnom, ali egzotičnom i prevashodno spekulativnom teorijom. Od tada smo svedočili eksploziji njenih iskustvenih potvrda i primena. Poslednje se mogu susresti u najrazličitijim oblastima: od astrofizike pa sve do kosmologije i eksperimenata kojima je dokazano postojanje gravitacionih talasa (vibracija gravitacionih Faradejevih linija) što ih je teorija i predvidela.

Od predviđanja koja su se spektakularno obistinila, pomenuo bih samo postojanje crnih rupa, koje su prilično nedvosmisleno identifikovane u kosmosu. A od primena bih pomenuo sistem globalnog određivanja pozicije (*Global Positioning System*, GPS), za koji nema nikog ko nije čuo. Taj omanji uređaj, koji vidamo u prodavnicama sportske ili automobilske opreme i koji nam precizno saopštava naš trenutni položaj na planeti, ne bi mogao da radi da u njegovoj konstrukciji nije uzeta u obzir opšta teorija relativnosti.

No ovo nije jedina revolucija koja je okrenula naglavce fiziku dvadesetog veka. Naš način razmišljanja o objektima i materiji podjednako je korenito izmenila i kvantna mehanika.

Kvantna mehanika

Pojam objekta, osnovni pojam u Njutnovoj teoriji, već je evoluirao s Faradejem i Maksvelom. Svet više nije bio sačinjen samo od čestica, što će reći od sićušnih čvrstih „kugli“, već i od difuznih entiteta – polja. No revolucija pojma objekta koja

je usledila s kvantnom mehanikom znatno je radikalnija. Zahvaljujući dugom eksperimentalnom istraživačkom radu na atomima, zračenju i svetlosti, kao i epskoj borbi na polju teorije (čiji su heroji brojni: Maks Plank, Albert Ajnštajn – opet on! – Nils Bor, Verner Hajzenberg, Pol Dirak...), otkriveno je da uobičajeno viđenje materije, to jest njutnovska mehanika, uopšte nije primenljivo na mikroskopske objekte. Bilo ga je, dakle, neophodno zameniti „kvantnom mehanikom“.

Ta nova mehanika donela je dve osnovne promene. Prva novina je u tome da, posmatramo li mikroskopski svet, uvek nailazimo na „granularnost“ ili diskontinuitet. Na primer, objekat mikroskopskog sveta koji se kreće u ograničenom prostoru ne može da ima proizvoljnu brzinu; njegova brzina može da ima isključivo određene vrednosti – te stoga kažemo da mu je brzina „kvantovana“. Mnoge fizičke veličine odlikuje slična diskontinuirana, kvantna struktura. Energija atoma, na primer, ne može da poprimi proizvoljnu vrednost, već isključivo precizno određene vrednosti („energetske nivoe“ atoma), koje se na osnovu teorije mogu proračunati. Sve se odvija kao da je ta energija granularna: obrazovana od paketića energije, ili energetske „kvanata“. Isto važi i za polja. Elektromagnetno polje, taj skup pokretnih Faradejevih linija o kom smo govorili, ako ga posmatramo na veoma sićušnoj skali, nije kontinuiran, već se ispoljava u vidu „paketića“ energije, neke vrste *zrnaca* ili „kvanata“, koji se nazivaju fotoni.

Druga novina u kvantnoj mehanici je da svako kretanje sadrži i primesu slučajnosti, sebi svojstvenu neodređenost. Suprotno Njutnovim pretpostavkama, sadašnje stanje neke čestice ne

određuje šta će tačno nastupiti trenutak kasnije. Razvojem događaja na mikroskopskoj skali upravljaju probabilistički zakoni: moguće je veoma precizno izračunati *verovatnoću* da će se nešto desiti (koliko će se puta desiti ako mnogo puta ponovimo eksperiment), ali ne i s izvesnošću predviđati budućnost. Dinamika, prema tome, više nije deterministička, već probabilistička. Otud se čestica više ne može opisati svojom pozicijom, već se opisuje u vidu „oblaka“ verovatnoće koji čini zbir verovatnoća svih pozicija u kojima bi se čestica mogla naći: tamo gde je oblak gušći, verovatnoća nalaženja čestice je veća. Tako je svakoj čestici, pa i fotonu, moguće pridružiti odgovarajući oblak verovatnoće. Kretanje čestice tada postaje „evolucija verovatnoće prisustva čestice“.

Kontinuitet i determinizam, dva noseća stuba klasičnog razmišljanja o materiji, odbačeni su. Osmotrimo li svet поближе, on je zapravo diskontinuiran i probabilistički.

Eto čemu su nas naučile dve velike konceptualne revolucije ranog dvadesetog veka.

Kvantna gravitacija

Konačno dolazimo do same srži problema kvantne gravitacije. Šta će se desiti ako sad pokušamo da ukrstimo saznanja kvantne mehanike i opšte teorije relativnosti?

S jedne strane, Ajnštajn je otkrio da je prostor polje, slično elektromagnetnom polju. S druge strane, kvantna mehanika nas uči da svako polje obrazuju kvanti i da se može opisati jedino u vidu „oblaka verovatnoće“ tih kvanata. Ako sad sastavimo

te dve ideje, neposredno proizlazi da bi prostor, a to znači gravitaciono polje, i sam morao da pokazuje granularnu strukturu, baš kao što je pokazuje i elektromagnetno polje. Morala bi, dakle, da postoje „zrnca prostora“. Nadalje, dinamika tih zrnaca bi morala da bude probablistička. Prostor bi se, shodno tome, morao opisivati u vidu „oblaka verovatnoće zrnaca prostora“... Takva koncepcija nam pomalo izaziva vrtoglavicu, jer je tako daleko od našeg uobičajenog poimanja, ali ta vizija ipak proističe iz naših najboljih teorija. Njutnov nepromenljivi prostor-kutija više ne postoji. Prostor je ustalasano polje, a struktura mu se sastoji od zrnaca koja se pokoravaju probablističkim zakonima.

Ali šta bi ta „zrnca prostora“ mogla da označavaju? Kako ih opisati? Kojom matematikom? Kakve jednačine njima upravljaju? Šta znači izraz „oblak verovatnoće zrnaca prostora“? Kako će se sve ovo odraziti na naša opažanja i merenja? Eto u čemu je čitav problem kvantne gravitacije: kako konstruisati matematičku teoriju koja opisuje oblake verovatnoće zrnaca prostora, a zatim shvatiti šta označavaju.

No problem se tu ne okončava. Ajnštajn je 1905. godine opštom teorijom relativnosti dokazao da se prostor i vreme ne mogu opisivati zasebno: oni su međusobno blisko povezani i tvore neraskidivu celinu, *prostorvreme*, što dalje znači sledeće: ukoliko je prostor osetljiv na prisustvo masa i ukoliko ga ove menjaju, isto mora važiti i za vreme. Način na koji ono protiče zavisi od tela u prostoru i njihovog kretanja. Dosad sam govorio kako bi se pojam prostora morao zameniti pojmom gravitacionog polja, ali to nije bilo baš sasvim precizno: u stvari bi se

pojmom gravitacionog polja morao zameniti pojam prostorvremena. Granularno i probabilističko, dakle, mora postati prostorvreme, a ne samo prostor. Ali šta je probabilističko vreme?

Da bismo došli do nove teorije, moraćemo da konstruišemo misaonu shemu koja više nema ništa zajedničko s našom uobičajenom koncepcijom prostora i vremena. Potrebno je da razmišljamo o svetu u kojem vreme više nije kontinuirana, tekuća promenljiva, već postaje nešto drugo, nešto što se temelji na pomenutom oblaku verovatnoće zrnaca prostorvremena.

Eto kako je glasio izvanredni nerazrešeni problem čije sam postojanje otkrio na četvrtoj godini studija.

Istovremeno dok sam s prijateljima pisao knjigu o studentskoj revoluciji (koja se policiji nije baš svidela, te sam zbog nje zaradio batine u policijskoj stanici u Veroni: „Deder nam kaži imena tih tvojih prijatelja komunista!“), sve sam više uranjao u proučavanje prostora i vremena, nastojeći da razumem scenarije koji su dotad bili predloženi.

Uspeo sam da se upišem na doktorske studije u Padovi i za mentora odabrao jednog profesora koji nije naročito pomno pratio moj rad, ali mi je dopuštao da nastavim putem koji sam sebi zacrtao. Posvetio sam godine izrade doktorata sistematskom proučavanju svega što je bilo poznato o problemu kvantne gravitacije. Drugi doktorandi već su uveliko objavljivali prve naučne radove, a ja sam svoje tri doktorandske godine proveo ne iznedrivši nijednu jedinu publikaciju. Karijera me nije zanimala: zanimalo me je isključivo učenje i razumevanje.

U to vreme je bilo malo ideja kako razrešiti problem i one su se još uvek nalazile u zametku. Put koji je najviše obećavao

bio je vezan za takozvanu *Viler–Devitovu jednačinu*, koja je u načelu predstavljala „kompletnu kvantnu jednačinu gravitacionog polja“. Do nje se došlo kombinovanjem jednačina opšte teorije relativnosti s jednačinama kvantne mehanike. No Viler–Devitova jednačina je izazivala sve moguće poteškoće: s matematičke tačke gledišta bila je loše definisana, fizički značaj joj je i dalje bio krajnje nejasan, a nije omogućavala ni da se bogzna šta proračuna. Situacija koju sam otkrio tokom trogodišnjeg doktorata bila je, dakle, veoma zbrkana.

Trideset godina docnije, stvari su se znatno izmenile. Danas znamo za moguća rešenja problema kvantne gravitacije, premda nijedno od tih rešenja nije savršeno, niti u vezi s ma kojim od njih postoji opšta saglasnost.

Imao sam sreću i veliko zadovoljstvo da učestvujem u nastanku jednog od tih potencijalnih rešenja: *loop quantum gravity*, teorije „kvantne gravitacije na petljama“.