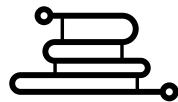


Biblioteka
INCUS



TIM press

Biblioteka

INCUS

Carlo Rovelli

Stvarnost nije kakvom se čini

S onu stranu prostora i vremena

Naslov izvornika

LA REALTÀ NON È COME CI APPARE

La struttura elementare delle cose

© 2014, Raffaello Cortina Editore

© za hrvatsko izdanje:

TIM press, Zagreb

Tel.: 01 611 97 13; Faks: 01 611 97 14;

E-mail: tim.press@tim-press.hr

www.tim-press.hr

Sva prava pridržana

ISBN 978-953-8075-92-6

CARLO ROVELLI

Stvarnost nije kakvom se čini

S onu stranu prostora i vremena

S talijanskoga prevela
Jelena Butković

Zagreb, 2021.

BILJEŠKA PREVODITELJICE:

U prijevodu su korišteni *Leksikon fizike*, autor Vjera Lopac, Zagreb, Školska knjiga, 2009. i *Hrvatsko nazivlje u fizici*, <https://www.researchgate.net/publication/316527723>. Za pomoć u prijevodu zahvaljujem Vojanu Lukateli.

Sadržaj

PREDGOVOR: ŠEĆUĆI UZ MORE	7
PRVI DIO: KORIJENI	11
1. Zrna	15
Postoji li granica djeljivosti?	21
Priroda stvari	27
2. Klasici	35
Isaac i mali mjesec	35
Michael: polja i svjetlost	43
DRUGI DIO: POČETAK REVOLUCIJE	51
3. Albert	55
Proširena sadašnjost	56
Najljepša teorija	62
Matematika ili fizika?	73
Kozmos	75
4. Kvanti	87
Ponovno Albert	87
Niels, Werner i Paul	90
Polja i čestice su ista stvar	99
Kvanti 1: Informacija je konačna	102
Kvanti 2: Neodređenost	103
Kvanti 3: Stvarnost je relacijska	105
Razumijemo li doista?	106
TREĆI DIO: KVANTNI PROSTOR I RELACIJSKO VRIJEME	111
5. Prostovrijeme je kvantno	115
Matvej	117
John	120
Prvi koraci petlje	123
6. Kvanti prostora	125
Spektri obujma i površine	126
Atomi prostora	131
Mreže spinova	132

7. Vrijeme ne postoji	135
Vrijeme nije ono što mislimo da jest	136
Puls i svijećnjak	137
<i>Sushi</i> prostorvremena	140
Spinska pjena	142
Od čega je sačinjen svijet?	146
ČETVRTI DIO: S ONU STRANU PROSTORA I VREMENA	151
8. Onkraj Velikog praska	155
Učitelj	155
Kvantna kozmologija	158
9. Empirijske potvrde?	161
Znakovi iz prirode	163
Prozor prema kvantnoj gravitaciji	166
10. Toplina crnih rupa	171
11. Kraj beskonačnog	177
12. Informacija	183
Termičko vrijeme	191
Stvarnost i informacija	194
13. Misterij	197
BIBLIOGRAFIJA S KOMENTARIMA	203
IMENSKO I POJMOVNO KAZALO	209
O AUTORU	213

PREDGOVOR

ŠEĆUĆI UZ MORE

Opsjednuti smo sobom. Proučavamo *svoju* povijest, *svoju* psihologiju, *svoju* filozofiju, *svoju* književnost, *svoje* bogove. Velik dio našeg znanja vrti se oko čovjeka samog, kao da smo mi najvažnija stvar u svemiru. Vjerujem da mi se fizika sviđa zato što otvara daleke vidike. Poput svježeg zraka je koji kroz otvoren prozor ulazi u kuću.

Ono što vidimo kroz prozor neprestano nas zadivljuje. Naučili smo mnogo o svemiru. Tijekom stoljeća postali smo svjesni mnogih naših pogrešaka. Vjerovali smo da je Zemlja ravna ploča, nepomično središte svijeta, a da je svemir malen i nepromjenjiv. Vjerovali smo da su ljudi zasebna vrsta, nepovezana s ostalim životinjama. Naučili smo da postoje kvarkovi, crne rupe, čestice svjetlosti, gravitacijski valovi i nevjerojatne molekularne strukture u svakoj stanici našeg tijela. Čovječanstvo je poput djeteta koje raste i s čuđenjem otkriva da svijet nije samo njegova soba i igralište, on je prostran, pun stvari koje treba otkriti i pojmove koje treba spoznati, kao i ideja veoma različitih od onih s kojima je počeo. Svemir je raznolik i beskrajan, a mi nastavljamo otkrivati njegove nove aspekte. Što više saznajemo o svijetu, to se više divimo njegovoj raznolikosti, ljepoti i jednostavnosti.

No što više otkrivamo, sve smo svjesniji da onoga što još ne znamo ima više od onoga što smo dosad naučili. Što su naši teleskopi moćniji, to možemo promatrati sve neobičnije i neočekivanije nebeske pojave. Što detaljnije promatramo sitne dijelove materije, to više saznajemo o njezinoj temeljnoj strukturi. Danas vidimo gotovo do Velikog praska, velike eksplozije prije 14 milijardi godina iz koje su nastale sve galaksije, ali već naslućujemo da postoji i nešto prije Velikog praska. Naučili smo da je prostor zakrivljen, no već

počinjemo naslućivati da je taj isti prostor protkan kvantnim zrncima koja vibriraju.

Naše znanje o osnovnoj gramatici svijeta nastavlja rasti. Pokušamo li sabrati sve što smo tijekom XX. stoljeća naučili o materijalnom svijetu, jasno je da je riječ o nečemu posve različitom od onoga što smo učili u školi. Pojavljuje se osnovni ustroj svijeta u kojem ne postoji ni vrijeme ni prostor, a nastaje množenjem kvantnih događaja. Kvantna polja oblikuju prostor, vrijeme, materiju i svjetlost razmjenjujući informacije između pojedinih događaja. Stvarnost je mreža granularnih događaja; dinamika koja ih povezuje je probabilistička; između pojedinih događaja, prostor, vrijeme, materija i energija raspršeni su u oblaku vjerojatnosti.

Taj čudan novi svijet danas se polagano pojavljuje iz izučavanja glavnog problema fundamentalne fizike: *kvantne gravitacije*. To je problem dosljednog uskladišavanja onog što smo naučili o svijetu zahvaljujući dvama velikim otkrićima fizike XX. stoljeća: općoj relativnosti i kvantnoj teoriji. Ova je knjiga posvećena *kvantnoj gravitaciji* i čudnom svijetu koji ona otkriva.

Knjiga govori o aktualnom istraživanju: o onome što učimo o osnovnoj prirodi stvari, onome što o njoj već znamo i onome što nam se čini da počinjemo razumijevati. Počinje od dalekih ishodišta ključnih pojmoveva i ideja koji nam omogućuju da danas sistematiziramo naše promišljanje svijeta. Opisuje dva velika otkrića XX. stoljeća, Einsteinovu opću teoriju relativnosti i kvantu mehaniku, nastojeći se usredotočiti na njihov fizikalni aspekt. Donosi sliku svijeta koja se danas pojavljuje istraživanjem kvantne gravitacije, uzimajući u obzir najnovije uvide koje nam pruža priroda, kao što je potvrda standardnog kozmološkog modela dobivena satelitom Planck i izostanak očekivanog opažanja supersimetričnih čestica u CERN-u. Raspravlja i o posljedicama tih ideja: o zrnatom ustroju prostora, iščezavanju vremena na subatomskoj razini, fizici Velikog praska, izvoru topline crnih rupa pa sve do uloge informacije u samim temeljima fizike.

U poznatom mitu koji Platon donosi u VII. knjizi *Države*, ljudi su lancima vezani na dnu mračne špilje i na zidovima vide samo sjene koje stvara vatrica iza njih. Oni misle da je to stvarnost. Jedan od njih se osloboodi, napusti špilju te otkrije Sunčevu svjetlost i širi svijet. Isprva

Fizika XX. stoljeća bitno je izmijenila njutnovsku sliku svijeta. Zbog svoje učinkovitosti te se promjene danas naširoko primjenjuju i u osnovi su mnogih tehnoloških dostignuća. To suštinsko produbljivanje našeg razumijevanja svijeta zasnovano je na dvjema velikim teorijama: općoj teoriji relativnosti i kvantnoj teoriji.

Obje zahtijevaju da se uhvatimo u koštač s našim uobičajenim predodžbama o svijetu. Prostorom i vremenom, kad je riječ o relativnosti, a materijom i energijom kad govorimo o kvantima.

U ovom ću poglavlju iznijeti pojedinosti o obje teorije nastojeći objasniti središnje fizikalno značenje jedne i druge i rasvijetliti revolucionarni spoznajni doprinos. Ovdje počinje čarolija fizike XX. stoljeća. Proučiti je i nastojati do kraja razumjeti uzbudljiva je pustolovina.

Te dvije teorije osnova su na kojoj se danas gradi kvantna teorija gravitacije. Na tim dvama osloncima gradi se buduće znanje.

ALBERT

Otat Alberta Einsteina gradio je elektrane u Italiji. Za vrijeme Albertova djetinjstva Maxwellove su jednadžbe postojale tek nekoliko desetljeća – no u Italiji je već počela industrijska revolucija, a turbine i transformatori koje je postavljao njegov otac bili su napravljeni prema tim jednadžbama. Snaga nove fizike bila je očigledna.

Albert je bio buntovnik. Roditelji su ga ostavili u Njemačkoj da pohađa gimnaziju, no on je njemačku školu smatrao odveć strogom, zaglupljujućom i vojničkom; nije priznavao autoritet škole i prestao je pohađati nastavu. Otišao je k roditeljima u Italiju, u Paviju, i provodio vrijeme lutajući. Roditelji su, kao rijetko koji, imali razumijevanja smatrajući da je tumaranje najbolji način da mladić bude nečim zauzet. Zatim je otisao studirati u Švicarsku, isprava ne uspjevši upisati Politehnički fakultet u Zürichu, što mu je bila želja. Nakon nekoliko godina studiranja nije uspio pronaći posao za koji se obrazovao pa se, da bi mogao živjeti s djevojkom koju je volio, zaposlio u uredu za zaštitu patenata u Bernu.

Za diplomiranog fizičara to nije bio posao iz snova, ali Albert je tako imao vremena za razmišljanje i rad. I razmišljao je i radio. Ustvari, tako je činio još od djetinjstva: umjesto da se bavi onime što su ga podučavali u školi, čitao je Euklidove *Elemente* i Kantovu *Kritiku čistoguma*.

S dvadeset pet godina, Einstein je napisao tri članka i poslao ih u *Annalen der Physik*. Svaki od njih zaslužio bi Nobela, i više od toga. Svaki od tih članaka je stup današnjeg razumijevanja svijeta. O prvom članku sam već govorio. To je onaj u kojem mladi Albert izračunava veličinu atoma i dokazuje, poslije dvadeset tri stoljeća, da su Demokritove ideje bile točne: materija je sačinjena od atoma.

Drugi članak je onaj koji mu je donio svjetsku slavu: članak kojim uvodi teoriju relativnosti, kojom se bavi ovo poglavlje.

Zapravo, postoje dvije teorije relativnosti. Omotnica koju je poslao dvadesetpetogodišnji Einstein sadržavala je članak u kojem je predstavio prvu od njih: teoriju koju danas nazivamo „specijalnom teorijom relativnosti“. Specijalna teorija relativnosti važno je objašnjenje ustroja prostora i vremena, što će prikazati prije nego što priđem na važniju Einsteinovu teoriju: onu opće relativnosti.

Specijalna teorija relativnosti osjetljiva je i spoznajno teška teorija. Mislim da ju je teže probaviti od opće relativnosti. Neka se čitatelji ne obeshrabre ako će sljedeći ulomci biti nejasni. Pojmovi koje ta teorija uvodi pokazuju, prvi put, ne samo da u Newtonovom viđenju svijeta nešto nedostaje: postoji i nešto što, želimo li razumjeti svijet, treba korenito promijeniti tako da se suprotstavi zdravom razumu. To je prvi pravi korak u promjeni dubljih intuitivnih poimanja svijeta.

PROŠIRENA SADAŠNJOST

Čini se da Newtonove i Maxwellove teorije pokazuju istančane međusobne razlike. Maxwellove jednadžbe određuju brzinu: brzinu svjetlosti. No Newtonova mehanika nije bila spojiva s postojanjem fiksne brzine zato što je ono što ulazi u Newtonove jednadžbe uvijek ubrzanje, a ne brzina. U Newtonovoj fizici, brzina je uvijek brzina nečega u *odnosu na nešto drugo*. Galilei je naglasio činjenicu da se Zemlja kreće a da mi to uopće ne primjećujemo zato što je ono što mi zovemo „brzinom“ uvijek brzina „u odnosu na Zemlju“. Brzina je, kaže se, *relativan* pojam, to jest ne postoji brzina predmeta samog po sebi: postoji samo brzina predmeta u odnosu na drugi predmet. Tako se podučavalo studente fizike u devetnaestom stoljeću, a to uče i danas. Ako je tako, onda je brzina svjetlosti određena Maxwellovim jednadžbama brzina u odnosu na što?

Jedna mogućnost je ta da postoji neka vrsta univerzalnog sredstva prema kojem se svjetlost giba tom brzinom. No nije jasno kakve učinke to sredstvo zatim ima, zato što predviđanja Maxwellove teorije izgledaju kao da o njemu ne ovise. Nijedan eksperimentalni pokušaj korištenja

svjetlosti za mjerjenje brzine Zemlje u odnosu na to hipotetsko sredstvo proveden krajem XIX. stoljeća nije uspio.

Einstein je tvrdio da ga nijedan eksperiment nije odveo na pravi put, već je za to zaslužno promišljanje o kontradiktornom odnosu između Maxwellovih jednadžbi i Newtonove mehanike. Pitao se, najzad, ne bi li Maxwellova teorija mogla biti u skladu sa suštinom Newtonovih i Galileijevih otkrića, to jest s činjenicom da je brzina tek relativan pojam.

Polazeći od takvih razmatranja, Einstein dolazi do nevjerljivog otkrića. Kako biste razumjeli o čemu se radi, dragi čitatelji, sjetite se svih proteklih, sadašnjih i budućih događaja u odnosu na trenutak u kojem ovo čitate i zamislite ih složene kao na prikazu 3.1.

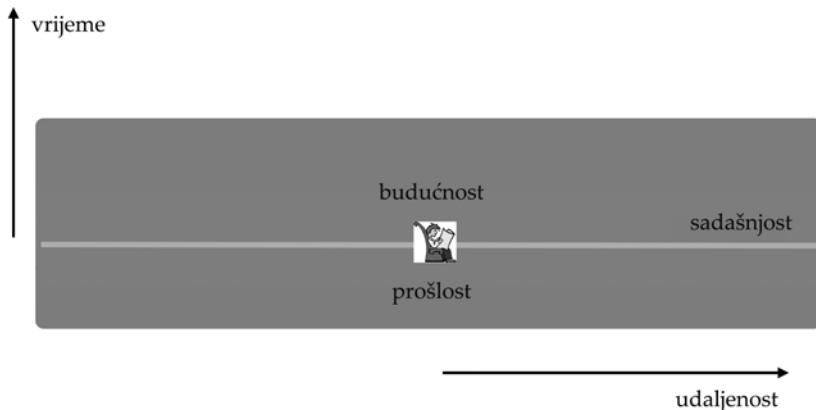
Dobro, Einstein otkriva da je taj prikaz pogrešan. Točno je zapravo ono što vidite na prikazu 3.2.

Između prošlosti i budućnosti svakog događaja (na primjer između prošlosti i budućnosti za vas, tamo gdje se nalazite, i u točnom trenutku u kojem sada čitate) postoji „međuzona“, „proširena sadašnjost“ tog događaja, zona koja nije ni prošla ni buduća. To je teorija specijalne relativnosti.

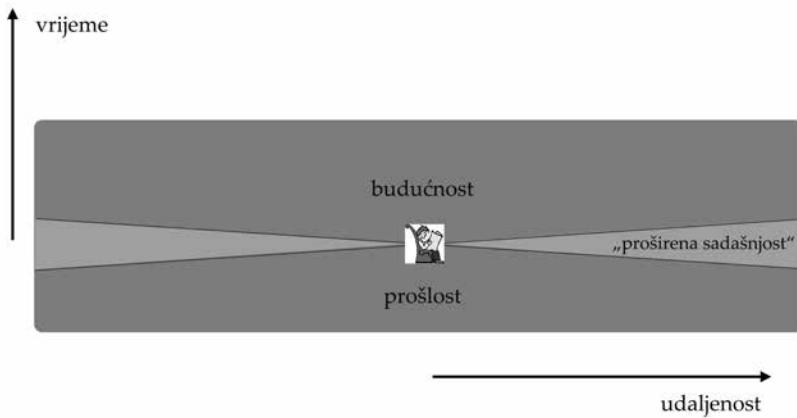
Trajanje te „međuzone“,¹ koja nije ni prošla ni buduća u odnosu na vas sada, veoma je kratko i ovisi o tome koliko je udaljena od vas, kao što pokazuje prikaz 3.2: što je udaljenija od vas, dulje traje.

Na udaljenosti od nekoliko metara od vašeg nosa, čitatelji, trajanje onoga što je za vas „međuzona“, ni prošla ni buduća, nekoliko je nanosekundi, to jest milijarditi dio sekunde: ništa. Mnogo manje nego što možemo primjetiti (broj nanosekundi u sekundi jednak je broju sekundi u 30 godina). Na drugoj strani oceana, trajanje te „međuzone“ je tisućinka sekunde, još uvjek daleko ispod našeg praga opažanja vremena, to jest minimalnog vremena koje uspijevamo opaziti našim osjetima, koje je na razini od nekoliko desetinki sekunde. No na Mjesecu je trajanje proširene sadašnjosti nekoliko sekundi, a na Marsu čak četvrtinu sata. To znači da možemo reći da na Marsu postoji ono što se upravo dogodilo, ono što se tek treba dogoditi, ali i četvrtina sata događaja koji za nas nisu ni prošli ni budući.

¹ Skup događaja s prostornim odmakom u odnosu na promatrača.



Prikaz 3.1. Prostor i vrijeme prije Einsteina.



Prikaz 3.2. Ustroj „prostovremena“. Za svakog promatrača, „proširena sadašnjost“ i međuzona između prošlosti i budućnosti.

Oni su nešto drugo. To nešto drugo nismo nikad primijetili, zato što „to nešto drugo“ nama traje odveć kratko i nismo dovoljno brzi da bismo ga zapazili. No ono postoji i posve je stvarno.

Zbog toga nije moguće voditi nesmetan razgovor s nekim tko je na Marsu. Ako sam ja na Marsu a vi ste ovdje, ja vam postavim pitanje a vi

Maxwella, ovisnog o zrnatosti i kvantnim vjerojatnostima. Dirac sastavlja jednadžbu elektronskog polja i polja ostalih elementarnih čestica.⁷ Oštra razlika između polja i čestica koje je uveo Faraday potpuno nestaje.

Opći oblik kvantne teorije sukladan sa specijalnom teorijom relativnosti zove se „kvantna teorija polja“ i temelj je današnje fizike čestica. Čestice su kvanti polja, kao što su fotonii kvanti svjetla. Sva polja pokazuju tu zrnatu strukturu u svojim međudjelovanjima.⁸

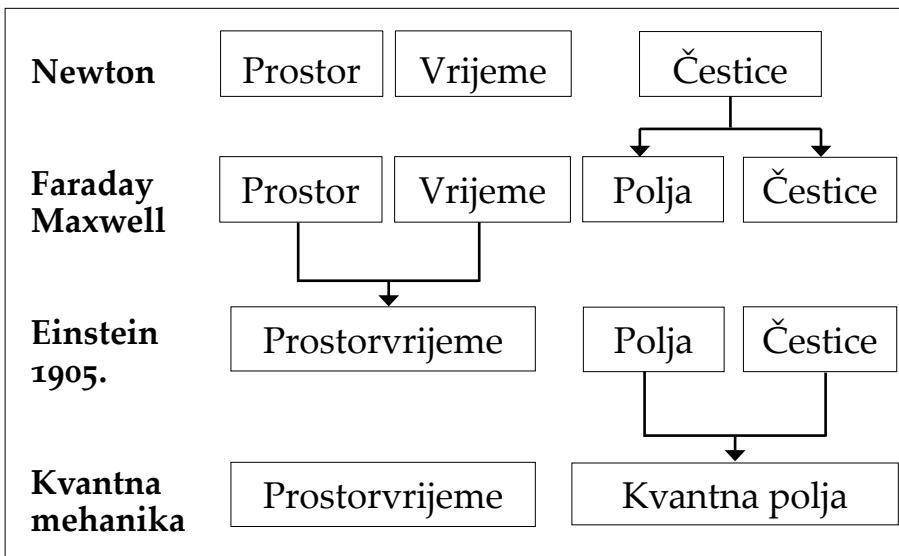
Tijekom XX. stoljeća redovno je ažuriran popis temeljnih polja te danas imamo teoriju zvanu „standardni model elementarnih čestica“, koja dobro opisuje gotovo sve što vidimo, osim gravitacije,⁹ na području kvantne teorije polja. Fizičari su se bavili razvojem tog modela dobar dio prošlog stoljeća – taj razvoj predstavlja jedno pustolovno istraživanje u kojem su sudjelovali i veliki talijanski znanstvenici kao što su Nicola Cabibbo, Luciano Maiani, Gianni Iona-Lasinio, Guido Altarelli, Giorgio Parisi i mnogi drugi, nažalost ne mogu ih sve nabrojiti. No sada ne namjeravam opisivati taj dio povijesti, želim doći do kvantne gravitacije. „Standardni model“ dovršen je sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Postoji petnaestak polja čiji su kvanti elementarne čestice (elektroni, kvarkovi, muoni, neutrina, Higgsova čestica i još poneke), zatim neka polja slična elektromagnetskom, koja opisuju elektromagnetsku silu i ostale sile koje djeluju na razini jezgre, a čiji su kvanti slični fotonima.

Standardni model u početku nije bio ozbiljno shvaćen zbog svoga pomalo nezgrapnog izgleda, daleko od jednostavnosti područja opće relativnosti i Maxwellovih ili Diracovih jednadžbi. No protivno očekivanjima, sva njegova predviđanja bila su potvrđena. Više od trideset godina svaki je fizikalni eksperiment samo iznova potvrđivao standardni model. Među prvim i važnijim eksperimentima bilo je otkriće kvanta – što je proveo tim predvođen Talijanom Carлом Rubbiom – jednog od

⁷ Diracova jednadžba.

⁸ To je općenito prihvaćeno kao zaključak teorije kvantne mehanike, i one specijalne relativnosti.

⁹ Postoji jedna pojava koja kao da se ne može svesti na standardni model: takozvana tamna tvar. Astrofizičari i kozmolozi zapažaju u svemiru učinke materije koja kao da ne potječe od one vrste materije opisane standardnim modelom. Imo još mnogo stvari koje ne znamo.



Prikaz 4.5. Od čega je sačinjen svijet?

polja (čestice Z i W), koje je Rubbiji 1984. donijelo Nobelovu nagradu. Posljednji primjer u vremenskom slijedu bilo je otkriće Higgsovog bozona, što je 2013. izazvalo senzaciju. Higgsov bozon jedno je od polja standardnog modela koje je uvedeno kako bi teorija bila što učinkovitija i izgledalo je pomalo umjetno; Higgsova čestica, to jest „kvant“ tog polja uočena je opažanjem i ima upravo ona svojstva predviđena standardnim modelom.¹⁰ (Činjenica da je nazivana „Božjom česticom“ toliko je suluda da ne zaslužuje ni komentar.) Ukratko, „standardni model“ stvoren u dragocjenom okružju kvantne mehanike pokazao se, bez obzira na to što zaslužuje zvučniji naziv, trijumfom.

Kvantna mehanika, sa svojim poljima/česticama danas nudi nevjerojatno dobar opis prirode. Svijet nije sačinjen od polja i čestica, nego

¹⁰ Ne treba shvaćati ozbiljnim novinarskim napisima prema kojima je Higgsov bozon „objašnjenje mase čestica“. Čestice imaju masu zato što je imaju, a Higgsov bozon baš ništa ne govori o podrijetlu mase. Stvar je tehničke prirode: da bi se održao, standardni model se zasniva na više simetrija i čini se da te simetrije dopuštaju samo čestice bez mase, ali Higgs je primijetio da mogu postojati i simetrije i mase ako su uvedene posredno, putem međudjelovanja s poljem danas nazvanim upravo Higgsovim poljem. Budući da svako polje ima svoje čestice, to znači da mora postojati odgovarajuća „Higgsova čestica“ i ona je pronađena 2013.

od iste vrste tvari, kvantnog polja. Nisu više čestice te koje se gibaju u prostoru tijekom vremena, nego kvantna polja u kojima se elementarna zbivanja odvijaju u prostorvremenu. Svijet je neobičan, ali jednostavan (prikaz 4.5).

KVANTI 1: INFORMACIJA JE KONAČNA

Sada je vrijeme da zaključimo što nam točno o svijetu govori kvantna mehanika. To nije jednostavan zadatak zato što koncept kvantne mehanike nije odveć jasan i njezino pravo značenje ostaje kontroverzno; ali je neophodna vježba želimo li malo bolje shvatiti kako bismo mogli napredovati. Mislim da nam je kvantna mehanika omogućila da shvatimo tri vida prirode stvari: zrnatost, neodređenost i relativnost. Promotrimo ih izbliza.

Na prvom je mjestu spoznaja da postoji temeljna *zrnatost* u prirodi. Zrnatost materije i svjetla u središtu je kvantne teorije. To nije ona ista zrnatost materije o kojoj je promišljaо Demokrit. Za Demokrita, atomi su bili poput kamenčića, dok u kvantnoj mehanici čestice nestaju i ponovno se pojavljuju. No ideja o zrnatoj tvorbi svijeta potječe iz antičkog atomizma, a kvantna mehanika je – zahvaljujući stoljećima eksperimenata, razvijenoj matematici i nevjerojatnoj sposobnosti točnog predviđanja – istinsko priznanje dubini promišljanja o prirodi stvari velikog filozofa iz Abdere.

Pretpostavimo da obavljamo mjerjenja u nekom fizikalnom sustavu i otkrijemo da je sustav u određenom stanju. Na primjer mjerimo amplitudu oscilacije njihala i spoznajemo da amplituda ima određenu vrijednost, između 5 i 6 centimetara (nijedno mjerjenje u fizici nije točno). Prije kvantne mehanike rekli bismo da, s obzirom na to da je između 5 i 6 centimetara beskonačan niz mogućih vrijednosti za amplitudu (na primjer 5,1 ili 5,101 ili 5,101001...), dakle *beskonačno* su moguća stanja gibanja u kojima se njihalo može naći: naše neznanje o njihalu još je uvijek beskonačno.

Kvantna mehanika međutim kaže nam da je od 5 do 6 centimetara *konačan* broj mogućih vrijednosti za amplitudu pa je time *konačna* i dotad nepoznata informacija o njihalu.

Ta rasprava je posve općenita.¹¹ Dakle prvo veliko obilježje kvantne mehanike je da utvrđuje granicu *informacije* koja postoji u nekom sustavu: broja različitih stanja u kojima se sustav može nalaziti. To ograničenje beskonačnog, ta duboka zrnatost prirode, koju je naslutio Demokrit, prvi je središnji vid teorije. Planckova konstanta h određuje mjeru te zrnatosti.

KVANTI 2: NEODREĐENOST

Svijet je slijed kvantnih zrnatih zbivanja. Ta su zbivanja diskretna, zrnata, pojedinačna; to su pojedinačna međudjelovanja jednog fizičkog sustava s drugim. Elektron, kvantno polje ili foton ne slijede putanju u prostoru, nego se pojavljuju na određenom mjestu u određeno vrijeme kada se sudare s nečim drugim. Kada i gdje se pojavljuju? Ne postoji način da se to točno predviđi. Kvantna mehanika uvodi elementarnu *neodređenost* u samu bit svijeta. Budućnost je uistinu nepredvidiva. To je drugo temeljno učenje kvantne mehanike.

Zbog te neodređenosti, u svijetu kako ga opisuje kvantna mehanika, stvari su neprestano podložne promjenama. Sve varijable neprestano „fluktuiraju“, tako da u najmanjim razmjerima sve vibrira. Mi ne vidimo te sveprisutne fluktuacije samo zato što su malene i neprimjetne kada ih promatramo u većem mjerilu, kao kada makroskopski promatramo tijela. Pogledamo li kamen, on ostaje nepomičan. Ali kada bismo mogli vidjeti njegove atome, uočili bismo da neprestano vibriraju. Kvantna mehanika otkriva nam da je svijet, što se više gledaju njegove pojedinsti, manje nepomičan. To je svijet neprestanog titranja, trajnog mikroskopskog rojenja mikrozbivanja. Svijet nije sačinjen od kamenčića, sačinjen je od titraja, micanja.

Antički atomizam pretkazao je i taj vid moderne fizike: pojavili su se, kao temeljno načelo, zakoni vjerojatnosti. Demokrit je, baš kao i Newton, smatrao da je kretanje atoma strogo određeno njihovim sudarima. No

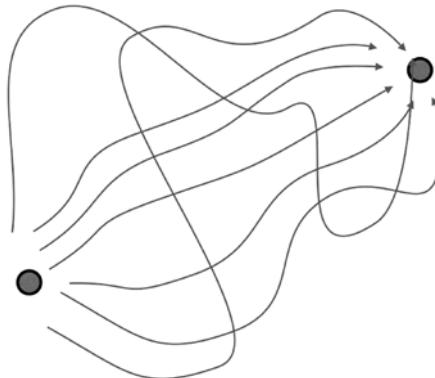
¹¹ Konačno područje faznog prostora, odnosno prostora mogućih stanja sustava, sadrži *beskonačan* broj različitih klasičnih stanja, ali *uvijek* odgovara *konačnom* broju ortogonalnih kvantnih stanja. Taj broj je određen volumenom područja podijeljenim s Planckovom konstantom s potencijom broja stupnjeva slobode. Taj rezultat je posve općenit.

njegov sljednik u atomizmu, Epikur, ispravlja strogu određenost učitelja i uvodi neodređenost u antički atomizam, baš kao što Heisenberg uvođi neodređenost u Newtonov atomistički determinizam. Za Epikura, atomi ponekad mogu slučajno skrenuti sa svog puta. Lukrecije je to lijepo sročio: to skretanje događa se „*incerto tempore.... incertisque loci*“,¹² u nepoznatom vremenu i na nepoznatom mjestu. Ista neodređenost, isto pojavljivanje vjerojatnosti na dubokoj razini, drugo je ključno otkriće o svijetu kvantne mehanike.

Kako se dakle može izračunati vjerojatnost da će se elektron na određenom početnom mjestu A pojaviti nakon određenog vremena u drugom konačnom mjestu B?

Richard Feynman je 1950-ih pronašao jedan krajnje sugestivni način da to izračuna: treba uzeti u obzir sve moguće linije od A do B, to jest sve moguće putanje koje elektron može prijeći (ravne, zakrivljene, vrludave...); za svaku od linija može se izračunati određeni broj: zbroj svih tih brojeva zatim omogućava odrediti vjerojatnost. Pojedinosti tog računanja nisu važne: važna je činjenica da elektron, kako bi od A došao do B, mora proći „svim mogućim putanjama“, odnosno da se otvorí u oblak i zatim se tajanstveno konvergira u točki B, gdje će se ponovno sudariti s nečim drugim (prikaz 4.6)

Taj način računanja vjerojatnosti kvantnih zbivanja nazvan je Feynmanovim „zbrojem staza“¹³ i vidjet ćemo njegovu ulogu u kvantnoj gravitaciji.



Prikaz 4.6. Da bi od točke A došao do točke B, elektron se ponaša kao da prolazi *svim* mogućim putanjama.

¹² „... gdjekad i negdje...“, Lukrecije Kar, *O prirodi*, II, 218, str. 49.

¹³ Ili „Feynmanov integral“. Vjerojatnost prelaženja od točke A do točke B kvadrat je modula integrala na svim putovima eksponenta klasičnog izračuna puta pomnoženoga s imaginarnom jedinicom i podijeljenoga s Planckovom konstantom.

Odvajanje zakriviljenog i neprekinutog prostora Einsteinove opće relativnosti i diskretni kvanti kvantne mehanike koji prebivaju u ravnom i jednoličnom prostoru sada je u potpunosti napušteno. Nema više prividnog proturječja. Između kontinuma prostorvremena i kvanta prostora ne postoji ništa drugo do istog postojećeg odnosa između elektromagnetskih valova i fotona. Valovi su približan prikaz fotona u velikom mjerilu. Fotoni su način na koji valovi međusobno djeluju. Kontinuirani prostor i vrijeme približno su viđenje u velikom mjerilu dinamike kvanta gravitacije. Kvanti gravitacije su način na koji prostor i vrijeme međusobno djeluju. Ista matematika dosljedno opisuje kvantno gravitacijsko polje, kao i ostala kvantna polja.

Konceptualna cijena koja je za to plaćena odricanje je od predodžbe prostora i vremena kao općih struktura unutar kojih se može oblikovati svijet. Prostor i vrijeme su aproksimacije koje se pojavljuju u velikom mjerilu. Kant je možda imao pravo kada je rekao da su subjekt spoznaje i njegov objekt nerazdvojivi, ali je pogriješio misleći da bi Newtonovi prostor i vrijeme mogli biti oblici *a priori* spoznaje, dijelovi osnovne gramatike za razumijevanje svijeta. Ta se gramatika razvila i razvija se rastom naše spoznaje.

Opća relativnost i kvantna mehanika nisu toliko nekompatibilne koliko se u početku činilo. Štoviše, kad se dobro pogleda, one surađuju i u otvorenom su dijalogu. Prostorni odnosi koji tkaju Einsteinov zakriviljeni prostor ista su međudjelovanja koja tkaju odnose među elementarnim sustavima kvantne mehanike. Jedna i druga postale su kompatibilne i povezane, dvije strane iste medalje, čim se uočilo da su prostor i vrijeme aspekti kvantnog polja i da kvantna polja mogu živjeti a da ne „stoje nogama“ na vanjskom prostoru.

Ta pročišćena slika temeljne strukture fizikalnog svijeta pogled je na stvarnost koji danas nudi kvantna gravitacija petlji.

Prva zasluga te fizike jest da, kao što ćemo vidjeti u nastavku, nestaje ono beskonačno. Beskonačno maleno više ne postoji. Beskonačnosti koje su opterećivale kvantu teoriju polja nestaju zato što su nastale upravo iz prepostavke, fizikalno pogrešne o kontinuiranosti prostora.

trebalo smatrati boljom i temeljitijom. To motrište sukladno je Anaksimandrovom učenju i uvjeren sam da je u modernoj fizici to motrište ispravno.“ (W. Heisenberg, *Fisica e filosofia*, tal. pr. Il Saggiatore, Milano 1961)

Singulariteti zbog kojih su Einsteinove jednadžbe postale besmislenima kada je gravitacijsko polje postajalo prejako nestali su: bili su posljedica zanemarivanja kvantizacije polja. Sve polagano sjeda na svoje mjesto. Pri kraju knjige opisat će nekoliko fizikalnih posljedica ove teorije. Može se činiti neobičnim i teškim razmišljati o tim diskretnim elementarnim entitetima koji nisu u prostoru i vremenu, nego prostor i vrijeme tkaju svojim odnosima. No kako li je tek čudno zvučao Anaksimandar kada je govorio da nam je pod nogama ono isto nebo koje vidimo iznad svojih glava? Ili Aristarh, kada je pokušao izmjeriti udaljenost od Zemlje do Mjeseca i do Sunca, otkrivši da su veoma udaljeni pa dakle nisu loptice nego divovi, a Sunce je golemo u odnosu na Zemlju? Ili Hubble, kad je shvatio da su maglice raspršene među zvijezdama golema mora zvijezda neizmjerno daleka?...

Svijet koji nas okružuje stoljećima se širi. Vidimo dalje, razumijemo bolje i nastavljamo se diviti njegovoj raznolikosti, većoj nego što je možemo zamisliti, koja izlazi iz okvira slika koje o njemu imamo. Istodobno, način kojim ga uspijevamo opisati postaje sve istančaniji, ali i jednostavniji.

Malene smo slijepе krtice koje znaju malo ili ništa o svijetu, ali i dalje uče...

(...) Ali cijela ta noćna priča kad se kazuje, i sve njihove naravi tako skupa preobražene, to više svjedoči nego slike maštanja, te izrasta u nešto uvelike dosljedno; ali svejedno, to je neobično i začudno.⁷

⁷ W. Shakespeare, „San Ivanske noći“, u: *Komedije*, 3. knjiga, preveo i priredio Mate Maras, Matica hrvatska, Zagreb, 2007, Peti čin, 1, str. 20 (op. prev.).

ČETVRTI DIO
S ONU STRANU
PROSTORA I VREMENA

INFORMACIJA

Bližimo se kraju putovanja. U posljednjih nekoliko poglavlja govorio sam o konkretnim primjenama kvantne gravitacije: pisao sam o onome što se dogodilo u svemiru oko Velikog praska, opisao sam termička svojstva crnih rupa i ukidanje beskonačnosti.

Prije zaključka htio bih se vratiti na teoriju, ali i pogledati u budućnost i govoriti o riječi „informacija“: bauku koji luta teorijskom fizikom izazivajući i oduševljenje i zbrku.

Ovo se poglavlje razlikuje od prethodnih zato što sam u prethodnima govorio o idejama i teorijama koje još nisu ispitane ali su utvrđene, a u ovom ću međutim govoriti o idejama koje su još zbrkane i nastoje se organizirati. Dakle ako vam se ovo putovanje činilo pomalo napornim, pripremite se na gore zato što ćemo letjeti u zrakopraznom prostoru. Ako vam se ovo poglavlje čini posebno zbumujućim, to nije zato jer su vaše misli zbrkane, onaj sa zbrkanim mislima sam ja.

Postoje mnogi znanstvenici koji naslućuju da pojam „informacija“ može biti temelj za nove korake u fizici. Govori se o „informaciji“ kada se govorи o temeljima termodinamike, znanosti o toplini, o temeljima kvantne mehanike i, u drugim područjima, ponekad veoma neprecizno. Mislim da postoji nešto važno u tim idejama i ovdje ću pokušati objasniti zašto i kakve veze informacija ima s kvantnom gravitacijom.

Ponajprije, što je informacija? Riječ „informacija“ u jeziku ima raznovrsna značenja i već je to izvor zbrke i na znanstvenom polju. U znanosti je taj pojam 1948. razjasnio Claude Shannon, američki matematičar i inženjer, i to je nešto veoma jednostavno: informacija je mjera broja mogućnosti za nešto. Na primjer ako bacim kocku, ona može pasti na 6 strana. Vidim li da je pala na određenu stranu, imam količinu informacija $N = 6$, zato što je bilo šest mogućnosti. Ako ne znam kada je tvoj

rođandan, postoji 365 različitih mogućnosti. Ako mi kažeš kad je tvoj rođandan, imam informaciju $N = 365$. I tako dalje.

Umjesto mogućeg broja N , za označavanje informacije prikladnije je koristiti logaritam u bazi 2 od N , zvan S . Shannonova informacija je dakle $S = \log_2 N$, gdje je N broj mogućnosti. Na taj način mjerna jedinica, $S = 1$, odgovara $N = 2$ (zato što $1 = \log_2 2$), to jest najmanjem izboru koji podrazumijeva samo dvije mogućnosti. Ta mjerna jedinica je informacija o dvije mogućnosti i zove se „bit“. Kada znam da je na ruletu izšao crveni a ne crni broj, imam dva bita informacije; ako znam da je izišlo crveno-parni-manque, imam tri bita informacija. Dva bita informacija odgovaraju četirima alternativama (crveno-parni, crveno-neparni, crno-parni, crno-neparni). Tri bita informacije daju osam mogućnosti i tako dalje.¹

Ključno je to da se informacija negdje nalazi. Zamislite da u ruci držite kuglicu koja bi mogla biti bijela ili crna. Zamislite da i ja držim kuglicu koja bi mogla biti bijela ili crna. Dvije su mogućnosti kod vas i dvije kod mene. Ukupan broj mogućnosti je 4 (to jest 2×2): bijela-bijela, bijela-crna, crna-bijela i crna-crna. Ako su boje dviju kuglica međusobno neovisne, sve se te mogućnosti mogu ostvariti. No prepostavimo da smo, zbog nekog fizičkog razloga, sigurni da su dvije kuglice iste boje (na primjer zato što smo ih dobili na dar od iste osobe, koja *uvijek* daruje kuglice iste boje ili zato što smo obje izvukli iz paketa kuglica istih boja). Ukupan broj mogućnosti je dakle *samo* 2 (bijela-bijela ili crna-crna), iako ostaju 2 mogućnosti kod vas i 2 kod mene. U tom slučaju ukupan broj mogućnosti (dva) manji je od umnoška (četiri) broja mogućnosti na vašoj strani (dva) za broj mogućnosti na mojoj strani (dva). Primjećujete da se, u tom slučaju, događa nešto posebno: gledate li svoju kuglicu, *znate koje je boje moja*. U tom slučaju kažemo da su boje dviju kuglica „povezane“, to jest međusobno povezane, i da je informacija o boji *moje* kuglice također u *vašoj*. Moja kuglica „ima informaciju“ o vašoj.

Ako dobro razmislite, to se uvijek događa u životu kada komuniciramo: na primjer, ako vam telefoniram, znam da je telefon nešto što

¹ Napomena: informacija ne mjeri ono što znam, nego broj mogućih alternativa. Informacija koja mi kaže da je na ruletu izšao broj 3 je $N = 37$, zato što ima 37 brojeva; no informacija koja mi govori da je od crvenih brojeva izšao broj 3 je $N = 18$, zato što ima 18 crvenih brojeva. Koliku informaciju imam ako znam koji je od braće Karamazov ubio oca? Odgovor ovisi o tome koliko ima braće Karamazov.

će kod vas zvoniti i ta zvonjava nije neovisna o zvonjavi kod mene. Zvukovi zvona na obje strane su povezani, kao i boje kuglica. Primjer nije slučajno odabran: Shannon, koji je smislio teoriju informacije radio je u telefonskoj tvrtki i tražio je način kako precizno izmjeriti „nosivost“ telefonske linije. No što „prenosi“ telefonska linija? Prenosi informaciju. Prenosi sposobnost razlikovanja alternativa. Zbog toga je Shannon informaciju definirao.

Zašto je pojam informacije koristan, štoviše, možda i nužan za razumijevanje svijeta? Razlog je suptilan. Zato što mjeri mogućnost fizikalnih sustava da međusobno komuniciraju.

Vratimo se posljednji put Demokritovim atomima. Zamislimo svijet oblikovan beskrajnim morem atoma koji se odbijaju, privlače, sudaraju, i ništa drugo. Zar nešto ne nedostaje?

Platon i Aristotel ustrajali su na tome da nešto nedostaje i smatrali su da je *oblik* stvari ono nešto što je *povrh same tvari* od koje su sačinjene. Za Platona ti oblici postoje sami po sebi, u apsolutnom svijetu, svijetu ideja. Ideja o konju postojala je prije i neovisno o bilo kojem stvarnom konju. Štoviše, za Platona je stvaran konj samo bliјed odraz idealnog konja. Eventualni atomi od kojih je sačinjen konj vrijede malo ili ništa: ono što se računa je „konjstvo“, apstraktni oblik. Aristotel je realističniji, ali i za njega se oblik ne svodi na tvar. Kip je nešto više od kamenja od kojih je napravljen. To *više*, za Aristotela, jest oblik. To je bila antička kritika vladajućeg Demokritovog materijalizma, i do danas je ostala glavna kritika materijalizma.

No je li Demokritova postavka zaista bila upravo ta da se sve svodi na atome? Promotrimo je pozornije, u svjetlu modernog znanja. Demokrit kaže da, kada se atomi povezuju, ono što je važno jest njihov oblik, njihov raspored u strukturi kao i način na koji se povezuju. Daje primjer slova abecede, kojih ima dvadesetak, ali koja se, kako kaže, „mogu kombinirati na razne načine, stvarajući komedije ili tragedije, smiješne priče ili epske pjesme“.

U toj ideji ima mnogo više od samih atoma: postoji nešto što je povezano s *načinom* na koji se međusobno raspoređuju. Međutim kakvo značenje može imati način na koji se atomi raspoređuju, u svijetu u kojem postoe samo drugi atomi?

Ako su atomi svojevrsna abeceda, tko može čitati rečenice napisane tom abecedom?

Odgovor je oštroman: način na koji se atomi raspoređuju može biti povezan s načinom na koji se raspoređuju *drugi* atomi. Dakle skup atoma može nositi *informaciju*, u već opisanom tehničkom i preciznom smislu, o nekom drugom skupu.

To se, u svijetu fizike, neprestano i posvuda događa, u svakom trenutku i bilo gdje: svjetlost koja dopire do naših očiju nosi informacije o objektima iz kojih dolazi, boja mora ima informacije o boji neba iznad njega, stanica ima informacije o virusu koji ju je napao, novo ljudsko biće ima informacije zato što je povezano sa svojim roditeljima i sa svojom vrstom, a vi, dragi čitatelji, dok čitate ove retke primate informacije o onome što ja mislim pišući ih, to jest o onom što se događa u mojojem mozgu u trenutku kada pišem ovaj tekst. Ono što se događa u atomima vašeg mozga nije više neovisno o onome što se događa u atomima mojeg mozga.

Svijet dakle nije samo mreža atoma koji se sudaraju: on je i mreža odnosa među skupovima atoma, mreža uzajamne informacije među fizičkim sustavima.

U svemu tome nema ničega idealističkog ni duhovnog; to je tek primjena Shannonove ideje da se mogućnosti mogu izbrojiti. No sve je to dio svijeta, kao što su stijene u Dolomitima, rojevi pčela i morski valovi.

Jednom shvativši da postoji ta uzajamna mreža informacija u svemiru, prirodno je pokušati njome opisati svijet. Počnimo aspektom svijeta objašnjenim krajem XIX. stoljeća: toplinom. Što je toplina? Što znači da je nešto toplo? Zašto se šalica vrućeg čaja hlađi, a ne grijije?

Austrijski znanstvenik Ludwig Boltzmann koji je utemeljio statističku mehaniku bio je prvi koji je to razumio.² Toplina je slučajno mikroskopsko gibanje molekula: što je čaj topliji, molekule se brže kreću. No zašto se čaj hlađi? Boltzmann je iznio sjajnu hipotezu: zato što je broj mogućih stanja molekula koje odgovaraju vrućem čaju i hladnom zraku veći od broja onih koje odgovaraju hladnom čaju i blago zagrijanom zraku. Riječima Shannonovog pojma informacije, ta se ideja odmah pretvara u objašnjenje: zato što je količina informacija sadržana u hladnom čaju i toplijem zraku manja od one sadržane u topлом čaju i hladnijem zraku. A čaj se ne može ugrijati zato što se količina informacija nikad ne povećava sama.

² Boltzmann nije koristio pojam informacije, ali se njegov rad može čitati na taj način.