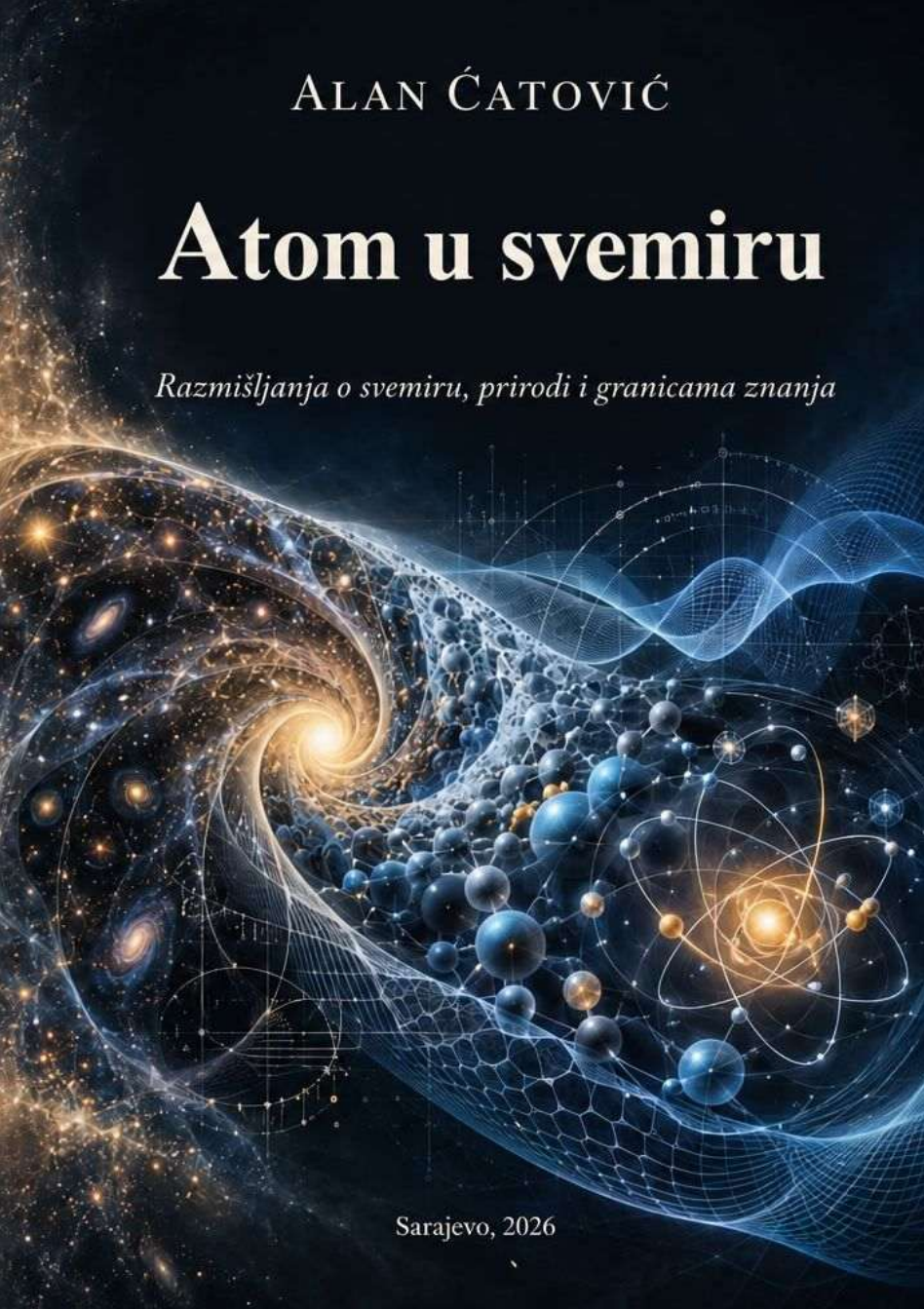


ALAN ĆATOVIĆ

Atom u svemiru

Razmišljanja o svemiru, prirodi i granicama znanja



Sarajevo, 2026

ALAN ĆATOVIĆ

Atom u svemiru

Razmišljanja o svemiru, prirodi i granicama znanja

Sarajevo, 2026

Alan Ćatović

Atom u svemiru

Razmišljanja o svemiru, prirodi i granicama znanja

Prvo izdanje

Sarajevo, 2026

© 2026 Alan Ćatović. Sva prava pridržana.

Predgovor

"Ovo ne samo da nije tačno, ovo nije čak ni pogrešno." (W. Pauli)

Ova je knjiga nastala iz tekstova koji su se gomilali na jednom mjestu - na blogu koji sam vodio (night-breaker.com), u trenucima između predavanja na fakultetu, numeričkih simulacija koje sam često vrtio i noći provedenih pod vedrim nebom iznad pitomih bosanskih planina.

Svaki od ovih oglada počeo je kao pokušaj da samom sebi razjasnim nešto što me je zaokupilo: kako iz jednostavnog nastaje složeno, šta zapravo znači "ništa", čemu vodi strijela vremena. U pisanju knjige pomogao mi je moj vjerni AI asistent Anthropic Claude (Opus). U razradi ideja za knjigu učestvovao je nesvjesno i moj otac, s kojim sam, šetajući obalom rijeke Dobrinje, znao do kasnih sati diskutovati o prirodi svemira i našem mjestu u njemu. Njegova legendarna izjava "šta će im ovolike zvijezde" sada je postala već kulturna.

Tekstovi koji su prvobitno bili objavljeni na blogu su prošli kroz reviziju i određenu preradu za potrebe ovog izdanja. Nisam želio samo zbirku blog-zapisa, nego knjigu u kojoj su poglavlja međusobno povezana, a ideja s jedne stranice odjekuje i na drugoj. Pisao sam je za radoznalog čitaoca koji ne traži ni popularno pojednostavljivanje stvari ni suhoparni udžbenik, nego iskren pokušaj da se o teškim stvarima govori malo jasnije i možda preciznije.

Ako vas bar jedno poglavlje ove knjige natjera da jedne vedre noći izađete iz grada, ugasite svjetla i pogledate prema gore - knjiga je ispunila svoju svrhu.

Alan Čatović, Sarajevo, 2026.

Sadržaj

1	Emergencija.....	1
2	Ništavilo	31
3	Strijela vremena.....	41
4	Samoorganizacija.....	63
5	Kosmološka prirodna selekcija.....	73
6	Geometrija nepravilnog svijeta.....	85
7	Fermijev paradoks	101
8	Koliko teško je napraviti čovjeka?	117
9	More koje leži na ledu	135
10	Šetnja kroz kvantni svijet	149
11	Univerzum koji računa	163
12	Zašto uopće nešto postoji?.....	177
13	Kvantna svijest	189
14	Zašto nema divova?	211
15	Zašto ne propadamo kroz pod?.....	227
16	Nerazumna djelotvornost matematike	241
17	Nevidljivi svemir	255
18	Mnoga lica inteligencije	277
19	Svrha bez dizajnera.....	299
20	Pepeo zvijezda	325
	Epilog	349

Dodatak A - Rječnik manje poznatih pojmova.....	351
Dodatak B - Indeks pojmova.....	371
O autoru	383

1

Emergencija

"Život postoji na rubu haosa" (S. Kauffman)



Priroda oko nas sastavljena je od bezbroj jednostavnih elemenata, ali njihovo međusobno povezivanje može dovesti do pojave nečeg sasvim novog i neočekivanog. Temperatura, život, inteligencija, društveni sistemi pa čak i strukture galaksija primjeri su pojava koje nije dovoljno posmatrati samo kroz njihove pojedinačne sastavne dijelove. Upravo se u tom prijelazu od jednostavnog ka složenom pojavljuje pojam "emergencije" - ideja da cjelina može imati svojstva koja nijedan njen pojedinačni dio ne posjeduje. Od fizike i termodinamike, preko biologije i evolucije, do mozga, svijesti i savremenih sistema umjetne inteligencije, emergencija nam nudi

drugačiji pogled na način na koji nastaje red i složenost. Ovaj tekst prati tu ideju kroz različite nivoe organizacije prirode i pokušava pokazati gdje završava redukcionističko objašnjenje, a gdje počinju novi zakoni i obrasci ponašanja. Na kraju se nameće možda i najzanimljivije pitanje: "da li je i sama svijest jedan od najdubljih emergentnih fenomena svemira?"

1.1 Gdje se skriva temperatura?

Dozvolite da počnem s pitanjem koje zvuči do te mjere jednostavno da ga rijetko ko zapravo postavlja: gdje se nalazi temperatura šoljice čaja koji upravo pijete? Ne u jednom molekulu vode - taj pojam nema smisla na razini pojedinačne čestice. Ne možete pokazati na jedan H_2O i reći "ovaj je vruć". Molekul može biti brz ili spor, ali nema temperaturu jednako kao što jedan član parlamenta nema kvorum. Temperatura je statistička osobina ogromnog skupa molekula, kolektivni fenomen koji se rađa tek kada se milijarde čestica povežu u zajednički sistem. Dakle, temperatura nije "tamo negdje unutra, samo mala", ona zapravo ne postoji na razini pojedinih sastavnih dijelova. Ona emergira.

Ova naizgled trivijalna opservacija otvara jedan od najznačajnijih intelektualnih labirinata moderne nauke: pitanje emergencije. Emergencija (lat. *emergere* - izroniti, pojaviti se) je fenomen pri kojemu sistem složen od relativno jednostavnih elemenata, međusobno djelujući prema lokalnim pravilima, razvija potpuno nova, neočekivana i nereducibilna svojstva koja nijedan od pojedinih elemenata ne posjeduje. Ukratko: cjelina postaje nešto kvalitativno drugačije od zbira svojih dijelova. I to nije filozofska metafora - to je fizikalna, biološka i matematički precizno opisiva činjenica.

Razlika između temperature jednog molekula (koja ne postoji) i temperature milijarde molekula (koja postoji i može izazvati opekotinu) nije razlika u količini, to je razlika u vrsti. Ne radi se samo o tome da je nešto "kompliciranije kad ga ima više" jer da je

tako, dovoljna bi nam bila bolja tabela u Excelu. Na višem nivou organizacije nastaju kvalitativno novi zakoni, novi koncepti, novi principi koji nisu jednostavna ekstrapolacija onoga što vrijedi na nižem nivou. Fizičar koji zna sve o pojedinom molekulu vode i dalje neće znati zašto led pluta, zašto voda ima anomalnu gustinu na 4 °C, ni zašto naši gradovi imaju vodovod pod niskim pritiskom umjesto pod visokim. Da bi razumio te stvari, mora se popeti stepenicu više.

Ovaj tekst prati tu nit kroz različite domene nauke i filozofije, oslanjajući se na jedan od najbogatijih skupova knjiga i radova posvećenih ovoj temi. Prpratit ćemo putovanje od fizike čestica do biologije, od termodinamike daleko od ravnoteže do kolektivnog ponašanja jata ptica, od neuronskih mreža do pitanja koje nas sve muči, ali o kojemu rijetko govorimo naglas: je li i svijest samo još jedan oblik emergencije? Usput ćemo naučiti kako je gospođa Eleanor Petersson iz New Yorka svakog jutra pouzdano dobivala svoju kiselu haringu iako grad nema centralnog komesarijata za haringu, zašto je Anderson pomiješao amonijak s Nobelovom nagradom i zašto je Sean Carroll zamalo poginuo na autoputu I-405.

1.2 Više je drugačije

Svaka intelektualna rasprava o emergenciji mora početi od jednog kratkog, ali nevjerovatno utjecajnog eseja. Philip W. Anderson, jedan od najvećih fizičara kondenzovane materije 20. vijeka i dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1977. godine, objavio je 1972. godine u časopisu Science rad naslova "More Is Different: Broken Symmetry and the Nature of the Hierarchical Structure of Science". Na svega četiri stranice formulisao je ideju koja je promijenila način na koji fizičari razmišljaju o vlastitoj disciplini i o prirodi uopće. Za rad koji ima onoliko riječi koliko prosječan doktorski disertant potroši samo u zahvalama, to je impresivan omjer utjecaja po slovu.

Andersonova polazna tačka je tzv. redukcionistička hipoteza: sve u svemiru poštuje iste fundamentalne zakone fizike. To je, u osnovi,

tačno. Ali Anderson upozorava da iz toga slijedi nešto opasno i pogrešno - tzv. konstrukcionistička hipoteza: da, ako znamo fundamentalne zakone, možemo u principu izvesti sve pojave u svemiru. Anderson pokazuje da to nije slučaj i pritom ne šteti kolege iz fizike čestica koji su tada, u zlatnom dobu Standardnog modela, hodali institutskim hodnicima s izvjesnom aureolom nadmoći.

"Konstrukcionistička hipoteza pada na ispitu kada se suoči s dvostrukim teškoćama razmjera i složenosti. Ponašanje velikih i složenih agregata elementarnih čestica ne može se razumjeti putem jednostavne ekstrapolacije osobina nekoliko čestica. Umjesto toga, na svakom nivou složenosti pojavljuju se potpuno nova svojstva."

Ovdje Anderson uvodi jedan od svojih ključnih koncepata: hijerarhiju nauka. Fizika elementarnih čestica podloga je za fiziku tijela s mnogo čestica; iz nje nastaje hemija; iz hemije molekularna biologija; iz nje stanična biologija; iz nje fiziologija; iz nje psihologija; a iz psihologije društvene nauke. Ali, i ovo je ključno, psihologija nije "primijenjena biologija", niti je biologija "primijenjena hemija". Na svakom stepeniku hijerarhije pojavljuju se kvalitativno novi koncepti i zakonitosti koji zahtijevaju isti stupanj fundamentalnog istraživanja i kreativnosti kao i prethodni nivo. Ekonomija, kako Anderson suptilno napominje, nije primijenjena psihologija iako mnogi ekonomisti u dubini duše žele da bude.

Andersonov najbolji primjer je molekul amonijaka (NH_3). Amonijak ima tri atoma vodika oko atoma dušika, u obliku male piramide. Hemičari će vam reći da je NH_3 piramidalan i da ima električni dipolni moment. Ali Anderson je već kao mladi fizičar naučio nešto drugo: nijedno stacionarno stanje kvantnog sistema nema električni dipolni moment. Kako pomiriti to dvojje? Odgovor: piramida amonijaka "prevrne se" naopako kvantnim tunelovanjem, oko 30 milijardi puta u sekundi. Prosječno gledano, dipolni moment se poništava. Ali čim molekul postane malo veći - recimo, molekul šećera - prevrtanje postaje nemoguće u razumnom vremenu.

Andersonov mehanizam za objašnjenje tog skoka između nivoa jest koncept slomljene simetrije (eng. broken symmetry). U kvantnoj mehanici, za manje skupove čestica, simetrija prostora i vremena nalaže da stacionarna stanja sistema imaju simetrična svojstva. Ali kada priđemo u granicu $N \rightarrow \infty$ (makroskopski sistem), sistem može spontano "izabrati" stanje nižeg simetrijskog stepena nego što to diktiraju zakoni sami po sebi. Kristal nastaje iz homogenog prostora, ali kristal nije homogen. Feromagnet nastaje iz skupa spinova bez posebnog smjera, ali feromagnet ima jasan magnetski moment. Supervodič nastaje iz elektrona koji ne poznaju posebnu faznu koherenciju, ali supervodič ima kolektivnu makroskopsku valnu funkciju. Anderson bi rekao: čestice su egalitarne, materija je aristokratska.

Andersonov tekst odjekuje i danas jer formulira problem koji nije riješen: ako je psihologija autonomna naučna disciplina nesvediva na biohemiju, a biohemija nesvediva na fiziku onda priroda nije samo lista čestica i sila. Ona je duboka hijerarhija nivoa, od kojih svaki ima svoje vlastite zakone i kategorije. Anderson to zaključuje duhovitim citatom razgovora između F. Scotta Fitzgeralda i Ernesta Hemingwaya u Parizu dvadesetih:

Fitzgerald: "Bogati se razlikuju od nas." - Hemingway: "Da, imaju više novca."

Kvantitativna razlika, naposljetku, postaje kvalitativna. Marx bi bio ponosan (i Anderson to eksplicitno napominje). Hemingway, doduše, vjerovatno ne bi razumio šta ima s time slomljena simetrija, ali i to je znak zdrave hijerarhije nauka.

1.3 Emergentni zakoni i kraj redukcionizma

Robert B. Laughlin, dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1998. godine (za otkriće frakcioniranog kvantnog Hall efekta), razvio je Andersonove ideje u svojoj knjizi "A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down" (2005.). Laughlinov

argument je još radikalniji: ne samo da su viši nivoi organizacije autonomni nego su zakoni koji na njima vladaju robustni i transcendentni, u smislu da bi opstali čak i kad bismo promijenili mikroskopske detalje. Kako je sam Laughlin rekao u jednom razgovoru sa svojim tastom (tokom partije bridža i gin-tonika), taj razgovor je počeo pokušajem izbjegavanja rasprave s vlastitim ženama o filmovima "emocionalne dubine", a završio je razmišljanjem o prirodi fizikalnog zakona. Ako to nije primjer emergencije u razgovoru, ne znam šta jest.

Laughlin otvara knjigu jednom od najljepših misli u modernoj fizici: postoje dva suprotstavljena impulsa u ljudskom umu - jedan da nešto svede na esencijalno, drugi da vidi ono što iz tog esencijalnog izvire. Fizika, tvrdi on, mora prihvatiti oboje. Zakoni prirode koji nas zanimaju - zakoni koji vladaju tekućinama, kristalima, supervodičima, živim stanicama - emergiraju kroz kolektivnu samoorganizaciju i ne zahtijevaju poznavanje svojih sastavnih dijelova da bismo ih razumjeli i koristili. Laughlinov tast, poštenu akademik u penziji, nakon nekoliko minuta razmišljanja izjavio je da je "duboko zbunjen o tome zašto se stvari uopće događaju".

Laughlin ide korak dalje od Andersona. Tvrdi da je "redukcionistička granica na razini svakodnevnih pojava službeno zatvorena" - fundamentalna fizika mikrosvijeta je dovršena, barem za svakodnevne pojave. Ali ta dovršenost, umjesto da nam daje potpuno razumijevanje prirode, otvara novu granicu: granicu emergentnih zakona. Voda nije "primijenjena kvantna elektrodinamika", ona je autonoman fenomen s vlastitim faznim dijagramom, površinskom napetošću, kapilarnošću, anomalnom gustinom na 4 °C. Zapravo, danas se zna za barem dvadeset različitih kristalnih faza leda i nijedna od njih nije bila korektno predviđena iz prvih principa. Fizika elementarnih čestica, sa svim svojim ponosom, ne može vam predvidjeti čak ni oblik snježne pahulje.

Laughlin posebno naglašava pojam zaštite (eng. protection) - emergentnih zakona koji su otporni na mikroskopske perturbacije. Supervodljivost se ne gubi ako zamijenimo jedan elektron s malim poremećajem, kolektivni fenomen je stabilan. Iste su zakonitosti na djelu u biološkim sistemima: DNA kod je stabilan unatoč termičkim fluktuacijama jer je mehanizam replikacije zaštićen emergentnim principima. Laughlin ovu ideju povezuje s idejom "univerzalnosti": različiti mikroskopski sistemi (magneti, tekućine, supervodiči) dijele isto ponašanje u blizini svojih kritičnih tačaka, jer isti principi organizacije diktiraju rezultat.

Priroda je, slično tome, hijerarhija zavisnosti gdje zakoni kretanja rađaju termodinamiku i hemiju, koje rađaju zakone kristalizacije, koje rađaju zakone krutosti i plastičnosti, koje rađaju zakone inženjerstva. "The Emergent Age" - naslov Laughlinovog zaključnog poglavlja - sugerira da živimo na pragu novog doba u fizici: doba u kojemu smo shvatili da "teorija svega" ne znači i "razumijevanje svega". Znati sve mikroskopske zakone nije isto što i razumjeti materiju, živu prirodu ili um. To je otprilike kao znati abecedu, ali ne znati čitati.

1.4 Red iz haosa

Kad god čujete da je priroda suprotnost redu, da su entropija i kaos neizbježni, sjetite se Ilye Prigogina. Belgijski fizičar ruskog porijekla, dobitnik Nobelove nagrade za hemiju 1977. godine, zajedno s filozofkinjom Isabelle Stengers pokazao je u knjizi "Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature" (1984.) nešto sasvim suprotno: da fizikalni sistemi daleko od termodinamičke ravnoteže mogu spontano stvarati uređene, složene, trajne strukture. Naslov knjige je manifest, i s pravom, jer nas je termodinamika devetnaestog vijeka učila da nas sve čeka "toplotna smrt svemira", što nije baš ohrabrujuća perspektiva za planiranje odmora.

Prigogineova ključna inovacija jest pojam disipativnih struktura (eng. dissipative structures). Ove strukture nastaju u sistemima koji su otvoreni prema toku energije ili materije iz okoline i koji se nalaze daleko od termodinamičke ravnoteže. Umjesto da se termodinamičke fluktuacije prigušuju i sistem relaksira prema ravnoteži (što bi nalagala klasična termodinamika), u nelinearnim sistemima daleko od ravnoteže fluktuacije mogu biti amplifikovane do tačke bifurkacije - tačke u kojoj sistem skače u novu, višu uređenu strukturu. Kad kažemo "bifurkacija" ono što se u stvarnosti događa jest da sistem stane pred izbor i, nasumice, izabere jednu od nekoliko mogućih ruta - kao putnik koji na raskrsnici zaista ne zna gdje ide, ali odabere lijevo.

Klasičan primjer su Bénardove ćelije: tekućina zagrijana odozdo, kad dosegne određeni temperaturni gradijent, spontano formira konvektivne ćelije - prekrasnu heksagonalnu mrežu cirkulacije. Nijedan od molekula tekućine ne "zna" da je dio heksagonalne mreže. Nijedan nema mikroskopski amblem s natpisom "Ja sam član šestougla broj 42". A ipak, mreža se formira, stabilna je i lijepa. Red nastaje iz haosa, organizacija nastaje iz nasumičnih fluktuacija, a sistem "pamti" kojim je putem prošao (histereza - zavisnost od putanje). Prigogine i Stengers tako pokazuju da sama činjenica da fizikalni sistem ima strelicu vremena nije pobjeda entropije nad redom, to je, paradoksalno, uvjet da red uopće može nastati.

Prigogine i Stengers uvode i još jedan koncept izuzetno važan za biologiju: ireverzibilnost. Klasična mehanika je simetrična u vremenu, jednačbe rade jednako dobro ako zamijenimo t sa $-t$. Ako biste snimili sudar bilijarskih kuglica i pustili film unazad, ništa se u newtonskoj mehanici ne bi pobunilo. Ali disipativni sistemi uvode strelicu vremena. Entropija se povećava, ali to povećanje, u sistemima daleko od ravnoteže, može stvoriti lokalni red. Prigogine formuliše to slikovito: nauka 19. vijeka bila je nauka "bića", nauka

20. vijeka jest nauka "postajanja". Nije više dovoljno pitati šta stvar jeste; treba pitati odakle je došla i kamo ide.

Posebno je uzbuđljiva Prigogineova misao da je sama pojava života moguće primjer disipativne strukture planetarnih razmjera. Zemlja je otvoreni sistem koji prima energiju od Sunca i emitira toplinu u svemir. Život bi mogao biti stabilna disipativna struktura koja se održava upravo zahvaljujući tom toku energije, ne unatoč entropiji, nego kao njezin nusproizvod. Da malo pojednostavim: mi smo, u termodinamičkom smislu, veoma elegantan način na koji Zemlja povećava entropiju svemira. Filozofski gledano, to zvuči skromno; ali termodinamički, to je zapravo veoma dostojanstveno - reći da vaše postojanje ubrzava toplotnu smrt kosmosa je jače od većine životopisa na LinkedInu.

1.5 Kompleksnost kao nauka

Sredinom osamdesetih godina 20. vijeka, u pustinji Novog Meksika, grupi od dvadeset i četiri naučnika i matematičara nije se svidjelo da im srodne discipline međusobno ne razgovaraju. Osnovali su Santa Fe Institut - istraživački centar posvećen proučavanju kompleksnih sistema. Institut je bio spoj fizičara, biologa, ekonomista, informatičara i filozofa, s implicitnim pravilom da niko ne smije reći "to nije moja specijalnost" (što je, priznajmo, revolucionarno). Jedna od najjasnijih i najvažnijih knjiga koja je izrasla iz tog projekta je "Complexity: A Guided Tour" (2009.) Melanie Mitchell s Portlandskog državnog univerziteta.

Mitchell odmah identificira temeljni problem redukcionizma. René Descartes je u 17. vijeku opisao vlastitu naučnu metodu: "podijeliti sve teškoće u što je moguće više dijelova i provoditi svoje misli u datom redoslijedu, počinjući od najjednostavnijeg i prelaziti postepeno do najsloženijeg". Za tri stotine godina, ova strategija se pokazala nevjerovatno uspješnom - dovela nas je do kvantne mehanike, molekularne biologije i tranzistora. Ali je, kako Mitchell

pokazuje, 20. vijek donio i njezino ograničenje. Unatoč spektakularnim uspjesima u objašnjenju jako velikog i jako malog, fundamentalna fizika je notorno "gluha" kada se radi o kompleksnim pojavama bliskim ljudskom iskustvu: nepredvidljivosti vremena, živim organizmima, ekonomskim ponašanjima, rastu mreža i prirodi inteligencije. Ako fizika može odrediti orbite Jupiterovih mjeseci s preciznošću veličine sekunde, a ne može reći hoće li sutra padati kiša - jasno je da nam nedostaje neki drugi jezik.

Mitchell čini nešto vrlo lično u knjizi: opisuje vlastito "antiredukcionističko iskustvo". Ona je, kao mlada, bila "duboko zaljubljena u fiziku i redukcionističke ciljeve". Ali kako je počela raditi sa Johnom Hollandom i Douglasom Hofstadterom, shvatila je da savremena fizika o inteligenciji nema šta reći, a čak ni neuronauka, koja zapravo proučava neurone, nema dovoljno razumijevanja o tome kako iz njihove aktivnosti nastaje mišljenje. Redukcionistički pristup kogniciji, zaključuje ona, jednostavno nije dovoljan. Ne zato što je pogrešan, već zato što je nepotpun.

Mitchellin pristup je dragocjen jer precizno razlikuje "kompleksnost" od "kompliciranosti". Avion je komplikovan (ima milion dijelova, ali svaki je dizajniran da radi predvidljivo); mravlja kolonija je kompleksna (svaki mrav je jednostavan, ali kolonija pokazuje globalne obrasce koje inženjer ne bi mogao izračunati unaprijed). Isto vrijedi za mozak, imunološki sistem, ekonomiju i evoluciju - sve su to sistemi u kojima se "samoregulirajuće ponašanje razvija iz jednostavnih pravila". Mitchellova knjiga pokriva sve klasične alate: dinamičke sisteme i kaos, teoriju informacija, ćelijske automate, genetske algoritme, teoriju mreža. Posebno je vrijedno njeno poglavlje o umu i inteligenciji - Mitchell je radila na Copycat projektu, računarskom sistemu koji rješava analogije, u okviru istraživanja kako se koncepti u ljudskoj kogniciji formiraju spontano.

Mitchell zaključuje da je nauka o kompleksnosti, kakvu njeguje Santa Fe Institut, zasad više elegantna formulacija problema nego

njegov odgovor - i to je, u naučnom smislu, mnogo vrijedniji doprinos. Kako sama kaže, ovo su nauke u nastanku. Onaj ko traži gotove odgovore trebao bi pokušati na drugom mjestu; onaj ko traži prava pitanja, došao je na pravu adresu.

1.6 Samoorganizacija i biološki red

Stuart Kauffman, biolog i teoretičar kompleksnosti koji je radio na Santa Fe Institutu, uputio je jedno od najsmjelijih pitanja u modernoj biologiji: je li Darwinov prirodni odabir dovoljan? U knjigama "The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution" (1993.) i "At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity" (1995.), Kauffman nudi provokativan odgovor: nije dovoljan, ali nije ni pogrešan. Pored selekcije, postoji još jedan temeljni izvor reda u biološkom svijetu: samoorganizacija.

Trideset godina istraživanja uvjerilo je Kauffmanu da su živi organizmi kakvi jesu ne samo zato što je selekcija "isklesala" nevjerovatne forme iz beskonačnog prostora slučajnosti - nego i zato što postoje duboki principi samoorganizacije koji biološke forme guraju prema određenim konfiguracijama nezavisno od selekcije. Standardna neodarvinovska priča kaže da smo mi "nezamislivo nevjerovatni primjeri slučajnosti u hladnom, beskrajnom svemiru". Kauffman se buni: to je istinski depresivna slika, a nije čak ni pouzdano tačna. "Samoorganizacija je korijen reda" piše on u predgovoru knjige "At Home in the Universe". Selekcija je važna, ali nije radila sama.

Kauffmanova ključna inovacija su NK Booleove mreže - teorijski model koji simulira regulacijske mreže gena. U ovim mrežama N označava broj "gena" (čvorova), a K broj ulaznih regulatora (veza) koje svaki gen prima. Kauffman otkriva fascinantnu faznu dijagram: kad je K mali (mreža slabo povezana), mreža pada u "zamrznuto" stanje - previše rigidna za evolutivni odabir, kao ured u kojemu svi rade po istoj proceduri od 1953. godine. Kad je K velik (mreža je

hipervezana), mreža je haotična - previše nestabilna da pohranjuje informaciju, kao ured u kojemu svi svakodnevno mijenjaju procedure jer im se tako sviđa. Ali postoji "rubna zona između reda i haosa" (eng. edge of chaos) gdje mreže pokazuju bogato, adaptivno ponašanje. I žive ćelije djeluju upravo na toj granici - što nije slučajnost, već rezultat dugotrajne evolucije prema tom rubnom stanju.

Kako to Kauffman poetski formuliše u "At Home in the Universe": "život postoji na rubu haosa". Voda postoji u tri faze: led, tekućina, para. Slično, kompleksni adaptivni sistemi imaju tri režima: zamrznuti, haotični, i onaj poseban prelazni gdje se javljaju najbogatiji obrasci.

Ako je vaš genom prezamrznut, vi ste potkovasti rak (*Limulus*), "živi fosil" - uspješan, ali evolutivno paraliziran. Ako je vaš genom prehaotičan, vi ste projekat koji nikad neće izaći iz beta faze. Život, kao dobar filmski scenarij, traži pravu ravnotežu između predvidljivog i iznenađujućeg.

Kauffman uvodi i pojam "autokatalitičkih setova" - skupova molekula koji međusobno kataliziraju vlastitu sintezu, zatvarajući petlju kauzalnosti. Kada broj vrsta molekula u rastvoru dosegne kritičnu vrijednost, gotovo je neizbježno da nastane autokatalitički set - analogno Kauffmanovom slavnom primjeru "dugmadi i konaca": ako uzmete dovoljno dugmadi i nasumice ih povežete koncima, u nekom kritičnom trenutku (kad prosječan broj veza po dugmetu dostigne oko jedan) odjednom nastaje ogromna povezana mreža. Fazni prijelaz.

Isti princip, tvrdi Kauffman, može objasniti pojavu života: s dovoljnom molekularnom raznolikošću, pojava života bila je praktički neizbježna, a ne kozmičko čudo. Što nas, u konačnici, čini "kod kuće u svemiru", a ne slučajnim nebitnim produktima kosmičke lutrije.

1.7 Skriveni red

Ako emergenciju želite razumjeti kroz konkretan primjer, John H. Holland, kompjuterski naučnik s Univerziteta Michigan i jedan od osnivača područja genetskih algoritama, otvara svoju knjigu "Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity" (1995.) jednim od najboljih uvoda u cijelom području. Junakinja je gospođa Eleanor Petersson iz New Yorka, koja ide u svoju omiljenu prodavnicu specijaliteta po teglicu ukiseljene haringe. Ona potpuno očekuje da će haringa tamo biti. I zaista, jest.

Holland pita: kako? New Yorčani svih vrsta troše ogromne količine hrane raznih vrsta, jedva razmišljajući o kontinuitetu isporuke. Isto očekuju stanovnici Pariza, Delhija, Šangaja i Tokija. To je "magija koja se svugdje uzima zdravo za gotovo". A ipak, ovi gradovi nemaju centralne planske komisije koje rješavaju problem nabavke i distribucije. Ne održavaju ni velike rezerve; hrane bi im ponestalo za sedmicu-dvije da svakodnevne isporuke prestanu. Kako gradovi izbjegavaju devastirajuće oscilacije između nestašice i preobilja, godinu za godinom, deceniju za decenijom? Kako Eleanor Petersson pouzdano dobija svoju haringu, a da nema Ministarstvo za haringu, Direkciju za haringu i Zavod za osiguranje haringe?

Odgovor je: "skriveni red". Grad je ono što Holland naziva "uzorak u vremenu" (eng. pattern in time), poput stojećeg vala ispred stijene u brzjoj rijeci. Nijedan pojedinac ne ostaje na mjestu, ali grad ostaje. To je Andersonova slomljena simetrija na razini društva - emergentna struktura koja se održava jer je stabilna, ne jer je centralno projektirana. Adam Smithova "nevidljiva ruka" je klasičan ekonomski odgovor, ali Holland pita: kako ta ruka funkcionira? Šta su njeni mehanizmi?

Hollandov centralni uvid je da kompleksni adaptivni sistemi (CAS) - u koje spadaju mravlje kolonije, imunološki sistem, mozak, ekosistemi, ekonomska tržišta i, da, grad New York - dijele niz

strukturnih osobitosti bez obzira na svoju specifičnu domenu. Holland ih ističe sedam: agregacija (svojstvo), tagovi (mekhanizam), nelinearnost, tokovi, raznolikost, unutarnji modeli (mekhanizam), i blokovske strukture (mekhanizam). Tagovi su nešto poput identifikacijskih oznaka koje omogućuju odgovarajuće interakcije: antitijelo prepoznaje antigen po tagovima na njegovoj površini; kupac prepoznaje robu po cijeni i brendu; član društva prepoznaje sunarodnika po jeziku i običajima. Bez tagova, nema selektivnog spajanja - nema kompleksnog sistema.

Holland ide dublje kroz svoj računarski model Echo - simulacijski okvir za CAS koji je razvijao godinama sa suprugom Mauritom (koja je, uzgred, predložila ime "Echo" - još jedan primjer emergencije, ovaj put bračne). U Echo modelu digitalni agenti troše i razmjenjuju resurse, formiraju koalicije, razvijaju unutrašnje modele okoline i evoluiraju kroz genetske algoritme. A ono što Holland zatim pokazuje zaista je neobično: isti apstraktni okvir jednako dobro opisuje tri naizgled potpuno nepovezana fenomena. Prvi je imunološki sistem - kako naš organizam kroz selekciju i mutaciju generira antitijela koja se sve preciznije prilagođavaju novopristiglim patogenima. Drugi je ekonomsko tržište - kako se sastav privrede mijenja kroz vrijeme dok firme rastu, propadaju i osvajaju nove niše (uzgred, matematika kojom Uber istiskuje taksiste iznenađujuće je slična onoj kojom penicilin istiskuje bakterije). Treći je ekološka sukcesija - onaj postepeni proces kojim se opustošen ekosistem sam obnavlja: nakon požara ili odrona, na goloj stijeni prvo se nasele lišajevi (izdržljivi, skromnih zahtjeva), pa mahovine, pa trave, pa niski grmovi, pa breza i bor kao pioniri, i, konačno, hrast i bukva.

Svaka generacija stanara priprema tlo za sljedeću - i to bukvalno, jer razgradnjom vlastite biomase stvara humus u kojem će se ukorijeniti oni koji dolaze poslije nje. Holland tvrdi da su ova tri sistema - imunitet, tržište, ekosistem - uz sve svoje površinske razlike, matematički istovrsni. To je jedna od hrabrijih intelektualnih tvrdnji

dvadesetog vijeka. Ako Holland ima pravo, imunolog, ekonomist i šumar imaju o čemu razgovarati na istoj konferenciji - pod uvjetom, naravno, da svi nauče isti apstraktni jezik.

Hollandova knjiga je vrijedna i u svjetlu distinkcije između slabe i jake emergencije (koju je precizno formulisao tek Bedau, 1997). Slaba emergencija: nova svojstva sistema postoje, ali su načelno izvediva iz znanja o sastavnim dijelovima - samo računski previše zahtjevno. Jaka emergencija: novi nivo realizacije posjeduje kauzalne moći nesvedive na niže nivoe. Holland uglavnom ostaje pri slaboj emergenciji i pokazuje da već ona pruža dovoljno bogat okvir za razumijevanje adaptivnih sistema. Njegova sljedeća knjiga "Emergence: From Chaos to Order" (1998.) fokusirana je posebno na to kako jednostavna pravila (kao ona u igrama, poput šaha ili dame) mogu proizvesti kompleksne obrasce - zato Holland iznosi da su i najsloženije stvari u svemiru možda samo posljedica malog broja dobro odabranih pravila. Otprilike kao Beethovenova Deveta - sto dvadeset i jedna stranica partiture, dvanaest tonova, i vaše naježene ruke kao emergentni rezultat.

1.8 Filozofija emergencije

Dok fizičari i biolozi razrješavaju konkretne mehanizme emergentnih pojava, filozofi postavljaju prethodno pitanje: što uopće znači reći da je neko svojstvo "emergentno"? Na to pitanje nema jednostavnog odgovora, kao što potvrđuje impozantna antologija "Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science" (2008.), koju su priredili Mark A. Bedau i Paul Humphreys. Ova zbirka, u kojoj se nalaze razmišljanja Andersona, Laughlina, Dennetta, Searlea, Kima, Wimsatta, Chalmersa, Fodora i Wolframa, među ostalima - vjerovatno je najbogatija enciklopedija emergentne rasprave u jednoj knjizi. Ako želite naučiti emergenciju, ovo je možda vaš najbolji izbor.

Bedau i Humphreys u uvodu identificiraju najmanje pet različitih pojmova koji se često skupljaju pod pojmom "emergencije": nesvodivost, nepredvidljivost, konceptualna novost, ontološka novost i supervencija. I upozoravaju: ne treba pretpostaviti da postoji samo jedna vrsta emergencije. Različite vrste mogu postojati, toliko različite da ih ne obuhvaća jedan opći opis. Emergencija nije riječ - to je porodica srodnih pojmova.

Historijski, Bedau i Humphreys identificiraju dvije temeljne tradicije u filozofiji emergencije. Prva je britanski emergentizam s prijeloma 19. u 20. vijek (J. S. Mill, C. D. Broad, Samuel Alexander), koji tvrdi da mentalne i vitalne pojave posjeduju autonomna kauzalna djelovanja nesvediva na fiziku. Ova je tradicija pala u nemilost s usponom fizikalizma sredinom 20. vijeka, dijelom zato što je zvučala malo previše kao Aristotel s modernim rječnikom. Druga tradicija je novija i raznolika: od teorije specijalnih nauka Jerryja Fodora ("svaka nauka ima svoje autonomne zakone koji se ne mogu prevesti u fiziku") preko Dennettove teorije "realnih obrazaca" do Kimovog skepticizma prema jakoj emergenciji.

Posebno je instruktivna Bedauova vlastita distinkcija između slabe i jake emergencije. Slaba emergencija precizno je definisana: makroskopsko svojstvo P slabo emergira iz mikrobaze kada se može izvesti samo ponavljanom lokalnom interakcijom mikro-elemenata (simulacijom), ali ne i analitički skraćenim putem. Temperatura plinovitog sistema ne može se jednostavno "izračunati" iz položaja jednog molekula - potrebna je statistička mehanika. Ali ona je načelno reducibilna. Jaka emergencija, pak, zahtijeva da viši nivo ima kauzalne moći koje su fundamentalno neizvedive iz nižeg - što je metafizički mnogo jača tvrdnja.

Jaegwon Kim, korejsko-američki filozof, u eseju "Making Sense of Emergence" iznosi možda najozbiljnije prigovore jakoj emergenciji. Ako mentalna stanja emergiraju iz neuronskih stanja, a neuronska stanja imaju kompletno fizikalno objašnjenje, kakvu kauzalnu ulogu

zapravo imaju mentalna stanja? Kim formuliše taj problem tako da fizika "isključuje" svaku dodatnu uzročnost koja ne bi bila fizikalna. Ako moja odluka da napišem ovu rečenicu ima potpuno fizičko objašnjenje na razini neurona, u kojemu smislu je "moja odluka" uzrokovala pisanje? Kim je tu, pošteno rečeno, jedan od najsofisticiranijih neprijatelja jake emergencije - i valja ga uzeti ozbiljno, čak i ako se s njim ne slažemo.

Dennettov esej "Real Patterns" nudi elegantnu alternativu Kimovom skepticizmu. Dennett tvrdi da je pitanje "postoje li zaista višenivovski entiteti" pogrešno postavljeno. Pravi kriterij je pragmatički: ako opis entiteta na višem nivou daje prediktivnu korist, taj entitet je realan - kao što je i "centar gravitacije" realan u fizici, iako nema lokalne materijalne realizacije. Ekonomska tržišta, mentalna stanja, kolonije mrava - sve su to "realni obrasci" koje ne možemo zanemariti bez gubitka prediktivne moći.

Antologija Bedaua i Humphreysa nezaobilazna je upravo zato što ne nudi jednostavne odgovore. Ona je mapa kontroverze, a ne njezino rješenje. I to je njena intelektualna vrijednost: pokazati koliko je duboko i koliko je važno pitanje s kojim se bavimo. Filozofsko pitanje bez lakog odgovora vrijedi više od stotinu tehničkih pitanja s lakim odgovorima.

1.9 Uzročnost odozgo prema dolje

Jedno od najaktuelnijih razmatranja emergencije dolazi od matematičara i kozmologa Georgea F. R. Ellisa. U tekstu objavljenom u prestižnom časopisu Nature 2023. godine, pod naslovom "How Purposeless Physics Underlies Purposeful Life", Ellis postavlja pitanje koje savremena fizika nije u stanju riješiti: zašto mreža krvnih žila u retini oka izgleda tačno onako kako izgleda? Zašto vaše srce pumpa krv u pravom smjeru? Zašto proteini u hemoglobinu vežu kisik na jednoj strani i otpuštaju ga na drugoj?

Sve su to funkcije. A fizika, to je Ellisova ključna misao, nema pojam funkcije.

Fizika opisuje elektrone, fotone, proteine i DNA. Ali fizika ne može razlikovati slučajnu nakupinu proteina od proteina koji obavlja specifičnu biološku funkciju. Zakoni fizike su "bezvremeni i vječni, nezavisni od historijskih događaja", pa se ne mogu koristiti za opis kako je prošla evolucija vrsta oblikovala njihovo sadašnje i buduće stanje. To je duboka praznina: biološki sistemi su konstituirani fizikalnim elementima, ali njihova organizacija ima svrhu. Ellis tvrdi da ovu prazninu može popuniti "teorija sastavljanja" (Sharma, Cronin, Walker i saradnici) (eng. assembly theory) - teorija koja kvantificira stupanj evolutivne selekcije potreban da nastane određeni molekularni sklop. Neki objekt s visokim "indeksom sastavljanja" (eng. assembly index) koji se pojavljuje u velikom broju kopija dokaz je selekcije. Ako pronađete komplikovan molekul u malo primjeraka, mogao je nastati slučajno. Ali ako pronađete komplikovan molekul u milijardama primjeraka - vjerovatno postoji nešto što ga stvara. To je ista logika kojom u prašumi zaključujete: ako vidite jednu kolibu, mogla je ispasti iz aviona; ako vidite hiljadu koliba raspoređenih u kružnicu, tamo vjerovatno neko živi.

Ellisov doprinos seže dublje od komentara jednog rada. On razvija koncept uzročnosti odozgo prema dolje (top-down causation) - ideju da organizacija višeg nivoa postavlja granične uvjete i vremenski zavisna ograničenja na niže nivoe, bez kršenja zakona fizike, ali oblikujući specifične ishode. Kako joni teku kroz nervne aksone u mozgu zavisi od toga šta čovjek vidi u svojoj okolini u danom trenutku - dakle, o globalnom stanju iskustvenog sistema, a ne samo o lokalnoj mikrofizici aksona. Isto se odnosi na regulaciju gena: ne određuju samo geni razvoj organizma, već i organizam kroz svoj razvojni kontekst "bira" koji će se geni izraziti gdje i kada.

Ellis time osigurava važan most između Andersonovog uvida o hijerarhiji nauka i konkretnih bioloških mehanizama. Tamo gdje

Anderson govori o "novim konceptima na svakom nivou", Ellis pokazuje kako ti koncepti imaju konkretnu kauzalnu realizaciju u biologiji - kroz regulatorne mreže, razvojne procese i evolutivnu selekciju. Ovo nije dualizam i nema nikakve "vitalne sile" izvan fizike. Ali to jest tvrdnja da fizika sama po sebi nije dovoljna za kompletno objašnjenje bioloških pojava. Fizika kaže od čega je stvar sastavljena; biologija kaže šta stvar radi; a Ellis kaže da to nije isto pitanje i da nema smisla drugo pokušavati svesti na prvo.

1.10 Kosmička perspektiva

Gdje je mjesto emergencije u cjelokupnoj slici svemira? Na to pitanje s neobičnom jasnoćom i književnom elegancijom odgovara Sean Carroll, kozmolog, tada s California Institute of Technology, u knjizi "The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself" (2016.). Ali Carroll svoje putovanje ne počinje kvantnom mehanikom, već ličnom anegdotom koja pomalo ledi krv: opisom kako je zamalo poginuo na autoputu I-405 u Los Angelesu. Kamion od osamnaest kotača, njegov kraj branika, tup udar, okretanje auta u smjeru kazaljke na satu, nakon čega njegov auto završava bokom zalijepljen za prednji kraj kamiona koji nastavlja jurcati autoputem. Carroll se izvukao neozlijeđen. Ali od tog trenutka, priznaje, često razmišlja o odnosu jednog kratkog ljudskog života i beskrajno velikog kosmosa. Naime: svemir ima oko 13,8 milijardi godina, sadrži stotine milijardi galaksija, svaka s prosjekom od stotinu milijardi zvijezda. Mi smo, ukratko, mali. A ipak, i Carroll to slavi, mi smo dio te priče.

Carrollova osnovna teza je "poetski naturalizam". Postoji hijerarhija "priča" (eng. stories) kojima opisujemo stvarnost, i sve te priče su legitimne na svom nivou. Fizika čestica govori jednim jezikom o kvantnim poljima. Hemija govori o molekulama i reakcijama. Biologija govori o selektivnoj prednosti i adaptaciji. Psihologija govori o uvjerenjima, željama i namjerama. Etika govori o dobrom i lošem. Nijedna od ovih priča nije "manje stvarna" od ostalih, svaka

zahvaća stvarne obrasce u organizaciji stvarnosti. Ključna riječ je "poetski": svaka priča ima svoju istinu, svoju gramatiku, svoje ograničenje. Nauka nam govori šta postoji; poezija nam govori kako to nazivamo.

Posebno je zanimljivo Carrollovo poglavlje "The Universe in a Cup of Coffee", u kojemu šoljica kafe postaje mala laboratorija za sve fundamentalne procese svemira. Termalni gradijent koji tjera konvekciju. Hemijska ravnoteža kofeinskih molekula. Elektromagnetske interakcije koje daju boju i aromu. Emergencija oblaka pare. Pa čak i mala verzija kosmičke strelice vremena: kad ulijete mlijeko u kafu, ono se prvo pojavljuje kao izražena struktura (uzburkani virovi), zatim postaje složena mješavina, i na kraju homogena. Carroll napominje da je faza "složene mješavine" najzanimljivija, tamo se događa najviše kompleksnosti, prije nego entropija sve izbriše. Naš svemir, na milijardama godišnjih skala, upravo je u toj fazi. Mi smo, drugim riječima, sredina filma i baš to čini priču zanimljivom.

Carroll prihvaća Dennettov pragmatizam u pitanju emergentnih entiteta: temperatura je stvarna, tržišta su stvarna, mišljenje je stvarno. Slobodna volja je realna: pod uvjetima u kojima koristimo jezik namjere i odluke, to je legitimna razina opisa, čak i ako je sve u principu određeno kvantnom mehanikom. Carroll zaključuje da smisao nije pronađen u svemiru - on je konstruiran. I to nije razlog za nihilizam. To je razlog za divljenje. Kao što on sam kaže, mi smo "oko tri milijarde otkucaja srca" - prema prosječnom životnom vijeku. Prilika za priču, dakle, postoji, ali je ograničena.

1.11 Od mravinjaka do mozga

Razmotrimo sada jedan od najljepših primjera emergencije koji ne zahtijeva nikakvu apstraktnu fiziku: mravinjak. Pojedinačni mrav ima tek oko četvrt miliona neurona i prati jednostavna feromonska pravila ("idi za mirisom hrane, ostavi trag, ako naiđeš na jaki trag

drugih pojačaj svoj"). Nema "razumijevanje" složenosti vlastite kolonije. Nema arhitekta, nema plana, nema ured za projektovanje. Ako vas u ime kolonije neko zamoli za izvještaj o kvartalnim rezultatima, mravinjak ga nema kome poslati. A ipak kolonija gradi složena gnijezda, a srodni društveni insekti, termiti, čak i termitnjake s termički regulisanim unutrašnjim prostorima (aktivna klimatizacija desetinama miliona godina prije naše), pronalazi kratke puteve do hrane, organizuje diobu rada, brani teritorij i odgovara na katastrofe. Algoritam kolonije mrava inspirirao je klasu rješenja za NP-teške optimizacijske probleme u računarskoj nauci - Ant Colony Optimization - što znači da mravinjaci rade i konsalting.

Isto vrijedi za jato ptica u murmuraciji - oni nevjerovatni tamni oblaci od stotinu hiljada čvoraka koji vijugaju nebom svake jeseni bez ikakvog centralnog vodstva. Svaka ptica prati samo tri jednostavna pravila: drži se na određenoj udaljenosti od susjeda, leti u smjeru prosječnog smjera susjeda, izbjegavaj sudare. Iz ta tri pravila nastaje globalni fenomen toliko lijepe koordinacije da izgleda kao koreografija. Baletni koreograf s pedagoškim iskustvom bi vjerovatno provjeravao da li ptice tajno vježbaju noću. One, naravno, ne vježbaju - jednostavno slijede lokalna pravila. Ovo je Hollandov "skriveni red" u čistom obliku.

Mozak je, naravno, najsuptilniji i najzagonetniji primjer emergencije. Svaki neuron je električki oscilator koji prima ulazne signale i šalje akcijski potencijal prema susjedima ako zbrojeni ulaz prijeđe određeni prag. To je sve. Neuron ne razmišlja, ne pati, ne raduje se - on samo prima i pušta signale. A ipak: sto milijardi neurona međusobno povezanih u hiljade sinaptičkih veza na svakom, tvore sistem koji piše simfonije, rješava diferencijalne jednačbe, osjeća bol, zaljubljuje se, smije se i pita o vlastitim temeljima.

Koja su emergentna svojstva neuronske mreže? Pamćenje nije pohranjeno u jednom neuronu nego u obrascima sinaptičkih jačina distribuiranih po mreži. Kad zaboravite gdje ste ostavili ključeve, to

nije zato što je jedan neuron podbacio, to je zato što se distribuirani obrazac aktivacije izgubio u šumu drugih obrazaca. Slaba utjeha, ali barem imate objašnjenje. Prepoznavanje lica nije u jednoj stanici nego u hijerarhiji konvolutivnih procesnih slojeva. Emocije nisu u jednoj regiji nego u dinamičkim stanjima limbičko-kortikalnih mreža.

I na kraju, a ovdje ulazimo u najtamniju sobu nauke, subjektivno iskustvo. Osjet boli, doživljaj crvene boje, okus kafe. To su tzv. qualia, i niko dosad nije ponudio zadovoljavajuće objašnjenje kako iz neuronalnog vatrometa nastaje iskustvo. David Chalmers ga je, s pravom, nazvao "teški problem svijesti". Sva ostala pitanja u kognitivnoj neuronauci su "laka" u poređenju s ovim. Postoji sofisticirani filozofski argument sa "zombijima" (Chalmers, u Bedau & Humphreys): zamislite biće koje se ponaša fizički identično kao vi, ima iste neurone koji se pale u istim trenucima, ali unutar sebe nema nikakvo iskustvo, nikakav "doživljaj" crvene, nikakav "osjećaj" hladnog piva. Ako je takvo biće barem zamislivo, onda je iskustvo nešto više od fizike neurona. To je jedan od najspornijih argumenata u modernoj filozofiji uma.

1.12 Slomljene simetrije u kosmičkim razmjerima

Emergencija nije samo fenomen laboratorija i bioloških sistema. Ona je, u dubljem smislu, princip organizacije čitavog kosmosa. Za nekoga ko je nekada u ranu zoru gledao u tamno nebo iz suvog kutka Hercegovine ili s vrha bosanske planine, sljedeći opis možda i nije nov, ali ga vrijedi ponoviti.

Ranih trenutaka nakon Velikog praska, svemir je bio gotovo savršeno homogen i izotropan, sitne kvantne fluktuacije jedina su asimetrija u moru vruće guste plazme. Odnos gustoća između najgušćeg i najrjeđeg dijela bio je otprilike 1:1,00001. To je zvučalo kao ništa. Ali gravitacija radi na fluktuacijama: malo gušće regije privlače više materije, postaju još gušće, privlače još više itd. Ovo je nestabilnost

koja završava formiranjem kosmičke mreže (eng. cosmic web) - ogromnih nitnih struktura, veza superklastera galaksija odvojenih gotovo praznim prazninama (eng. voids). Niko nije planirao tu strukturu. Ona emergira iz kombinacije početnih uvjeta i nelinearnih gravitacijskih interakcija kroz milijarde godina. Anderson i Prigogine bi prepoznali obrazac.

Zvijezde su takođe emergentne strukture: milijarde milijardi atoma vodika koji padaju zajedno pod gravitacijom, griju se do termonuklearne fuzije i postižu hidrostatičku ravnotežu između gravitacijskog sažimanja i radijacionog pritiska. Nijedan atom "ne zna" da je dio zvijezde. On ne dobija plaću za obavljanje termonuklearne fuzije. On samo poštuje lokalne zakone kvantne mehanike i elektromagnetizma, obrađujući svoj dio. A rezultat je Sunce, od kojeg naš planet crpi svaki gram energije koja omogućava život. U zvijezdama nastaju elementi teži od vodika i helija - ugljik, kisik, dušik, željezo - i raspršuju se u svemiru supernovama. Astrofizička istina o kojoj Carl Sagan i Carroll rado govore glasi: mi smo, doslovno, zvjezdana prašina koja je dosegla razinu organizacije dovoljnu da može razmišljati o zvijezdama. Ovo je fizika koja se čita kao poezija i, izuzetno, poezija koja je tačna.

Galaksije su emergentne na višem nivou: stotine milijardi zvijezda, oblaci međuzvjezdanog plina, tamna materija i crne rupe u centralnim regionima, sve to tvori gravitacijski vezani sistem koji ima spiralnu strukturu, specifične populacije zvijezda, hemijsku evoluciju. Sama Mliječna staza je disipativna struktura u Prigogineovom smislu: otvoreni sistem koji obrađuje tok materije i energije i organizira ga u trajne obrasce. Carroll vidi upravo ovaj kozmički lanac, od Velikog praska do galaksija, planeta, ćelija i uma, kao jednu neprekidnu priču emergencije koja traje 13,8 milijardi godina. Kad sljedeći put budete kroz teleskop gledali maglinu, ili u Andromedu, ili u Orionov pojas, sjetite se da svaka od tih pojava predstavlja jedan sloj emergencije, jedno kolektivno ponašanje

čestica koje se organiziralo u nešto što, na svojoj razini, ima vlastite zakonitosti. I sjetite se, uzgred, da vaš mozak, koji te magline može doživjeti kao lijepe - predstavlja još jedan sloj emergencije.

1.13 Jaka emergencija

Sada nam preostaje da se suočimo s najtežim pitanjem. Sve što smo dosad razmatrali može se, u principu, smjestiti u okvir slabe emergencije: nova svojstva postoje, ali su načelno reducibilna. Temperatura, magnetizam, disipativne strukture, evolucija, čak i neuronska dinamika, sve se to može u principu (ali ne u praksi) simulirati iz kvantnih jednadžbi. Naravno, "u principu" je fraza koju filozofi vole, a inženjeri mrze; u praksi to znači "strogo ne". Ali postoji li još nešto?

Jaka emergencija tvrdi da na nekim razinama organizacije nastaju kauzalne moći koje su istinski nove, ne samo kompjuterski nepraktične za izračunavanje, nego ontološki nesvedive na niže nivoe. Kandidati za jaku emergenciju su: (1) subjektivno iskustvo (qualia) - da li ono postoji "iznad i izvan" elektriciteta neurona?, (2) biološka funkcija - Ellis argumentira da fizika bez dodatnih pojmova ne može opisati svrhovitost živih sistema, (3) mentalna kauzalnost - da li naše odluke zaista "uzrokuju" naše akcije na način koji nije reducibilan na neuralnu mehaniku?

Kim je skeptičan prema jakoj emergenciji zbog problema "kauzalnog isključenja": fizikalni zakoni su kauzalno zatvoreni, pa bi jaka emergencija zahtijevala neku vrstu natprirodnog "probijanja" fizikalnih zakona.

Za Kima to je preskupo metafizičko plaćanje. Bedau nudi kompromis: slaba emergencija je dostatna za objašnjenje gotovo svih fenomena koji nas zanimaju. Ellis pak ne pristaje na potpunu eliminaciju top-down uzročnosti: uzročno zatvaranje nastaje tek kada uzmemo u obzir sve nivoe istovremeno.

Ovdje moramo biti intelektualno poštteni: nema konsenzusa. Pitanje jake emergencije je filozofski otvoreno. I možda je to dobro. Filozofska pitanja bez lakih odgovora su upravo ona koja pokreću samu nauku - kao što su nekad bila pitanja o beskrajinosti svemira, o dobi Zemlje, o uzroku bolesti, o mehanizmu nasljeđivanja.

Ne treba nas prestrašiti to što pitanje o svijesti nije riješeno. Trebalo bi nas prestrašiti kad bi neko rekao da jest jer to bi značilo da smo prestali gledati.

1.14 Silicijumska emergencija

Sve što smo dosad razmatrali odnosilo se na prirodne sisteme - čestice, molekule, ćelije, mozgove, galaksije. Ali od 2020-ih godina svjedočimo emergenciji nove vrste, one koja se, tako reći, događa pred našim očima na neuobičajenom supstratu: silicijumu. Veliki jezički modeli (Large Language Models, LLM) i drugi savremeni AI sistemi pokazuju "više je drugačije" u obliku koji bi Anderson prepoznao odmah.

Konkretno: Wei i saradnici u zapaženom radu iz 2022. godine su pokazali da određene sposobnosti jezičkih modela izgleda ne rastu glatko sa skalom modela - one se, na određenom pragu parametara ili količine treninga, jednostavno "upale". Manji modeli ne mogu izvesti aritmetiku u nekoliko koraka, ne razumiju "in-context learning", ne mogu slijediti složene lance zaključivanja. Onda se skalira model za faktor deset, i odjednom može. Fazni prijelaz u kognitivnom prostoru. Kauffmanova "ivica haosa" u obliku hardverske specifikacije. Doduše, valja napomenuti da su Schaeffer i saradnici 2023. godine argumentirali da je dio ovih "emergentnih sposobnosti" artefakt načina na koji ih mjerimo (kad se koriste kontinuirane, a ne diskretne metrike, sposobnosti izgleda rastu postepeno). Rasprava nije riješena, ali osnovni fenomen ostaje: skaliranje mijenja kvalitativno ponašanje sistema, ne samo kvantitativno. To je, u srži,

tačno ono što je Anderson rekao 1972. godine za spinove i supervodiče.

Situacija postaje još zanimljivija kad se pomjerimo od jednog modela ka višestrukim: tzv. multi-agentski AI sistemi. Više autonomnih AI agenata koji međusobno razmjenjuju poruke, kritikuju jedan drugog, dijele zadatke i formiraju privremene koalicije - to je, ustvari, Hollandov kompleksni adaptivni sistem. Agenti imaju tagove (uloge, specijalizacije). Imaju unutrašnje modele okoline (jedni drugih). Imaju blokovske strukture (podzadatke koji se kombinuju). Formiraju agregate (timove). Iz interakcije više ograničenih agenata izranjaju obrasci rješavanja problema koje pojedini agent nije programiran da izvede. Ako je grad New York primjer emergentnog reda bez centralnog planera, onda je moderni agentski AI sistem njegov mnogo brži silicijumski rođak.

Prirodno pitanje glasi: ako iz jednostavnih neurona nastaje ljudska inteligencija, i ako iz jednostavnih matričnih množenja i mnogo pažnje nastaju sposobnosti koje niko nije eksplicitno programirao - vodi li dalje skaliranje ka superinteligenciji? Neki ozbiljni mislioci (Nick Bostrom, Stuart Russell, Yoshua Bengio) uzimaju tu mogućnost dovoljno ozbiljno da o njoj pišu knjige i osnivaju institute za bezbjednost AI. Drugi (Yann LeCun, Gary Marcus) tvrde da bi kvalitativan skok ka opštoj inteligenciji zahtijevao temeljno drugačiju arhitekturu, ne samo jači GPU. Rasprava je otvorena, i nije trivijalna. Ono što je sigurno jest da je pitanje, po prvi put u historiji ljudske misli, prešlo iz filozofskih kabineta u konkretne kvartalne izvještaje tehnoloških kompanija.

Ovdje se emergencija spaja s jednim od najozbiljnijih pitanja našeg vremena. Ako Anderson ima pravo, ako svaki nivo hijerarhije zahtijeva nove koncepte i nove zakonitosti, onda superinteligencija, ako se ikad pojavi, vjerovatno neće biti "primijenjeno duboko učenje". Imat će vlastite zakonitosti koje ćemo tek morati otkriti,

jezik koji ćemo tek morati naučiti. Kao što jedna zvijezda ne može predvidjeti astronomiju, a jedan neuron ne može predvidjeti neuronauku, tako ni jedan trenutni AI model, ma koliko impresivan, vjerovatno ne može predvidjeti kognitivnu ekologiju sistema koji se sastoje od miliona takvih modela u međusobnoj interakciji.

1.15 Od kvarkova do uma i natrag

Počeli smo s pitanjem o temperaturi šoljice čaja. Završavamo s jednim od najtežih pitanja koje nauka i filozofija poznaju: što je priroda stvarnosti i koliko je duboka njezina hijerarhija?

Emergencija, kako smo vidjeli, nije filozofska metafora niti mistično objašnjenje. To je precizna naučna tvrdnja: da na određenim razinama kompleksnosti nastaju kvalitativno novi fenomeni, novi zakoni, novi koncepti, novi principi organizacije, koji se ne mogu svesti na znanje o nižim razinama bez gubitka bitnih informacija. Anderson pokazuje da svaka razina u hijerarhiji nauka zahtijeva vlastite fundamentalne istraživačke napore. Laughlin pokazuje da su emergentni zakoni robustni i transcendentni. Prigogine i Stengers otkrivaju da su strelica vremena i samoorganizacija dvije strane iste medalje. Mitchell kartografira čitavo područje kompleksnih sistema. Kauffman [5, 6] otkriva da su principi samoorganizacije suigrači evolucije. Holland [7, 11] identificira strukturne obrasce zajedničke adaptivnim sistemima u svim domenama. Bedau i Humphreys precizno razlikuju tipove emergencije i mapiraju filozofsku kontroverzu. Ellis pokazuje da fizika bez pojma funkcije ne može opisati biologiju. Carroll stavlja sve to u kosmički okvir i pokazuje da su naše priče o fizici, hemiji, biologiji, umu i vrijednostima sve legitimne razine opisa jedne iste stvarnosti.

I tu je, na kraju, jedna misao vrijedna pažnje. Možda je najveća lekcija emergencije ne ta da je cjelina "veća od zbira dijelova" mada je i to tačno. Možda je dublja lekcija ova: priroda nije plitka. Ona nije samo katalog čestica i sila. Ona je hijerarhija razina, od kojih

svaka ima vlastite zakone, vlastite koncepte, vlastiti jezik opisa. Elektron, atom, molekul, ćelija, organizam i um nisu samo različita "uvećanja" iste stvari - oni su različite razine organizacije, svaka sa svojom ontologijom.

I od svakog od tih nivoa dalje, od kvarkova do galaksija, od organele do ekosistema, od neurona do kulture, svemir koji je počeo kao gotovo homogen mlaz vruće guste plazme stvorio je, kroz 13,8 milijardi godina emergentne organizacije, supstanciju dovoljno složenu da sama sebe pita: Zašto postoji nešto, a ne ništa? Zašto su fizikalni zakoni takvi da rađaju složenost? Jeste li, dragi atomi, ikad pomislili da ćete, udruženi u pravi obrazac, postati nauka? Pretpostavljamo da niste. Ali jeste. I ako se to nije dogodilo namjerno, dogodilo se - kao Bénardove ćelije, kao Eleanorina haringa, kao Andromedina galaksija - spontano. Priroda ne treba plan da bi bila lijepa. Dovoljna joj je dovoljna količina interakcija i dovoljno vremena.

Literatura

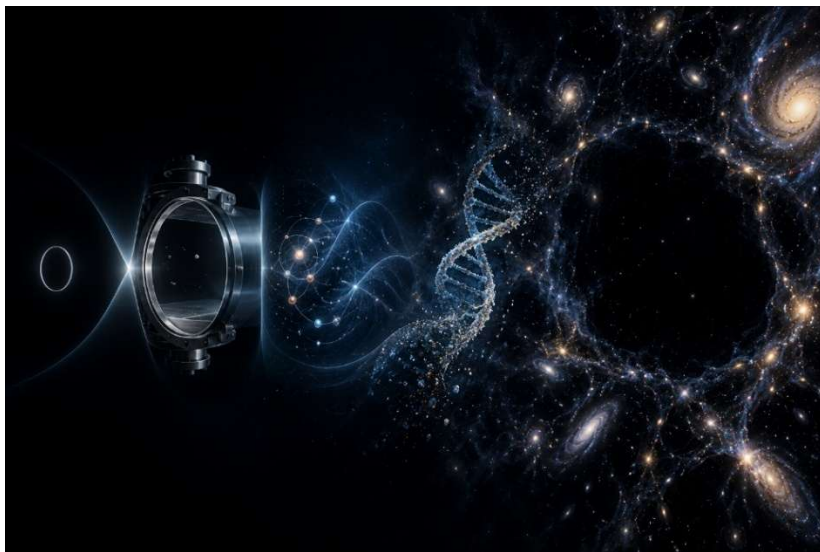
- [1] Anderson, P. W. (1972). More Is Different: Broken Symmetry and the Nature of the Hierarchical Structure of Science. *Science*, 177(4047), 393-396.
- [2] Laughlin, R. B. (2005). *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down*. New York: Basic Books.
- [3] Prigogine, I., & Stengers, I. (1984). *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. New York: Bantam Books.
- [4] Mitchell, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour*. New York: Oxford University Press.
- [5] Kauffman, S. A. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press.
- [6] Kauffman, S. A. (1995). *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. New York: Oxford University Press.
- [7] Holland, J. H. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA: Addison-Wesley.

- [8] Bedau, M. A., & Humphreys, P. (ur.) (2008). *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [9] Ellis, G. F. R. (2023). How Purposeless Physics Underlies Purposeful Life. *Nature*, 622, 247-249.
- [10] Carroll, S. (2016). *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*. New York: Dutton.
- [11] Holland, J. H. (1998). *Emergence: From Chaos to Order*. Reading, MA: Perseus Books.
- [12] Dennett, D. C. (1991). Real Patterns. *Journal of Philosophy*, 88(1), 27-51. (Pretiskano u [8].)
- [13] Kim, J. (2005). *Physicalism, or Something Near Enough*. Princeton: Princeton University Press.
- [14] Chalmers, D. J. (1996). *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory*. New York: Oxford University Press.
- [15] Laughlin, R. B., & Pines, D. (2000). The Theory of Everything. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(1), 28-31. (Pretiskano u [8].)
- [16] Sharma, A. i sar. (2023). Assembly Theory Explains and Quantifies Selection and Evolution. *Nature*, 622, 321-328.
- [17] Wei, J. i sar. (2022). Emergent Abilities of Large Language Models. *Transactions on Machine Learning Research*. arXiv:2206.07682.
- [18] Schaeffer, R., Miranda, B., & Koyejo, S. (2023). Are Emergent Abilities of Large Language Models a Mirage? *Advances in Neural Information Processing Systems* 36 (NeurIPS 2023). arXiv:2304.15004.
- [19] Bostrom, N. (2014). *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Oxford: Oxford University Press.
- [20] Waldrop, M. M. (1992). *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York: Simon & Schuster.

2

Ništavilo

*"No point is more central than this; that empty space is not empty."
(J. A. Wheeler)*



Šta zapravo znači ništa? Na prvi pogled, odgovor djeluje jednostavno, ali čim pokušamo precizno definisati prazninu, otvaraju se pitanja iz matematike, fizike, hemije, biologije i kosmologije. Od nule i praznog skupa do kvantnog vakuuma i kosmičkih praznina, pokazuje se da "ništa" gotovo nikada nije potpuno prazno.

2.1 Ništa kao pojam

Ništavilo je jedini predmet istraživanja koji, čini se, samo istraživanje uništava. Čim ga opišemo, pripisali smo mu neko

svojstvo; čim mu pripišemo svojstvo, prestalo je biti ništa. Ta je nelagoda stara koliko i sama filozofija, a najoštriju modernu formulaciju dao joj je Graham Priest kao paradoks izrazivosti: o ničemu se očito može govoriti - upravo to sada činimo - a ipak nema ničega o čemu bi se govorilo.

Prirodne nauke, srećom, ne rade s apsolutnim ništa. One rade s prazninama koje su rezultat postupaka. Vakuum je ono što ostane kada se ispumpa zrak; nula je ono što ostane kada se od broja oduzme on sam; nekirirajuća DNK je ono što ostane kada se iz genoma izdvoji sve što kodira protein; apsolutna nula je granica koju termometar aproksimira, ali ne dostiže. Svaka je od tih praznina operativna - definisana je procedurom, a ne odsustvom po sebi. Otuda i njihova neuporedivost: nema smisla pitati je li kosmička praznina "praznija" od praznog skupa, jednako kao što nema smisla pitati je li kilogram duži od metra.

Teza koju želim provesti kroz nekoliko naučnih disciplina je dvojaka. Prvo, nauka nikada ne raspolaže jednim "ništa", nego porodicom međusobno neuporedivih praznina, od kojih je svaka određena onim što je iz nje uklonjeno. Drugo, svaka se od tih praznina, čim se postupak uklanjanja usavrši, pokaže bogatijom nego što se očekivalo. Svako poboljšanje instrumenta otkriva u preostaloj praznini strukturu koja je i ranije bila tu, samo ispod praga mjerenja. Praznina se komplikuje proporcionalno kvaliteti opreme kojom je pravimo.

2.2 Matematička praznina

Od svih znakova kojima se matematika služi, nula je jedini koji je morao biti izmišljen dvaput: prvi put kao interpunkcija, drugi put kao broj. Između ta dva izuma prošlo je blizu devet stoljeća, a razlog kašnjenja nije bio tehnički nego psihološki - trebalo je prihvatiti da odsustvo količine i samo može biti količina.

Pozicijski zapis, u kojem vrijednost znamenke zavisi od mjesta na kojem stoji, bez oznake za praznu poziciju čini brojeve 14, 104 i

1400 nerazlučivim. Babilonci su takvu oznaku uveli oko 300. p.n.e., Maje nezavisno na drugoj strani planete. Drugi izum je indijski i ima datum: 628. godine Brahmagupta nulu prestaje tretirati kao rupu i definiše je kao rezultat oduzimanja broja od samog sebe, propisujući pravila računanja s njom.

Otpor na koji je nula naišla u Evropi nije bio matematički nego institucionalni. Statut firentinskog ceha bankara iz 1299. godine zabranjuje knjigovođama arapske znamenke, uz obrazloženje koje je bilo i tačno: nova se znamenka lako krivotvori, jer se nula sitnim potezom pera zatvara u šesticu ili devetku. Trag tog perioda nosimo u jeziku - arapsko sifr, "prazno", preko latinskog daje istovremeno riječ zero i našu cifru, a u engleskom i cipher, dakle šifru. Znak za ništa i riječ za tajno pismo istog su porijekla, i to ne slučajno.

Nula aritmetiku istovremeno drži na okupu i prijeti da je razgradi. Množenje njome sabija cijeli brojevni pravac u jednu tačku, a dijeljenje njome ruši konstrukciju iz temelja: za $1/0$ traži se broj koji pomnožen nulom daje jedinicu - takvog nema; za $0/0$ traži se broj koji pomnožen nulom daje nulu - a to je svaki broj. Zabrana dijeljenja nulom nije konvencija nego cijena koju plaćamo da bi u aritmetici ostalo više od jednog broja. Posljedica nije akademska: 1997. godine razarač USS Yorktown ostao je satima bez pogona nakon što je upravljački softver naišao na dijeljenje nulom u bazi podataka. Brod projektovan da izdrži torpeda srušila je odsutnost količine.

Najelegantniji matematički odgovor na pitanje šta je ništa nije nula, nego prazan skup - skup bez elemenata. On ima svojstvo koje ga čini sumnjivo sličnim vakuumu: podskup je svakog skupa, dakle sadržan je svuda, a sam ne sadrži ništa. Za razliku od vakuuma, postoji tačno jedan, jer dva skupa bez elemenata nemaju čime da se razlikuju. Iz njega se, korak po korak, izvode svi prirodni brojevi - praznina je, dakle, doslovno građevni materijal aritmetike.

2.3 Fizika ničega

Aristotelovsko načelo horror vacui - priroda prezire prazninu - nije bilo puko praznovjerje, nego kinematički argument: u praznini bez otpora tijelo bi padalo beskonačnom brzinom, što je apsurd. Hipoteza koja se brani logikom nema potrebu izlagati se mjerenju, pa je preživjela gotovo dvije hiljade godina. Srušila ju je praktična činjenica poznata svakom majstoru: pumpe tvrdoglavo odbijaju podići vodu iznad približno deset metara.

Rješenje je 1643. godine ponudio Evangelista Torricelli, pretpostavivši da zrak ima težinu i da visinu stupca ograničava atmosferski pritisak. Umjesto stupca vode od oko 10,3 metra uzeo je živu, gotovo četrnaest puta gušću, i dobio stupac od oko 76 centimetara; iznad žive ostao je prostor u koji zrak nije mogao ući - prvi održivi fizikalni vakuum.

Odlučujuću provjeru organizovao je Pascal 1648. godine (mjerenje je izveo njegov zet Florin Périer): barometar iznesen na vrh Puy-de-Dôme pokazao je stupac niži za oko osam centimetara, i pitanje je bilo zatvoreno. Vrijedi zapamtiti pouku koja se ponavlja kroz cijelu ovu temu: praznina nije bila proizvedena, nego je nastala kao ostatak postupka.

Devetnaesto stoljeće je vakuum ponovo napunilo. Maxwelllove jednačine zahtijevale su medij za širenje elektromagnetskih valova, pa je uveden luminiferni eter - s protivrječnim skupom svojstava: dovoljno krut da prenosi valove brzinom svjetlosti, a toliko rijedak da planete kroz njega prolaze bez otpora.

Michelson i Morley su 1887. godine osmislili mjerenje koje je hipotezu trebalo provjeriti izravno; izmjerili su nešto što se od nule nije dalo razlikovati. Eter nije opovrgnut zato što je bio prazan, nego zato što je bio suvišan.

2.4 Kvantni vakuum

Popularna slika atoma kao praznine s jezgrom u sredini ima brojčano uporište - kada bi jezgro bilo veličine milimetra, atom bi bio sfera prečnika nekoliko desetina metara. Ali ta unutrašnjost nije prazna: ispunjena je električnim i magnetskim poljima tolikog intenziteta da bi posjetioca zaustavila u mjestu. Upravo ta polja daju materiji čvrstoću; dok sjedite, lebdite na razmaku od jednog atomskog prečnika iznad atoma stolice - kontakt u svakodnevnom smislu u prirodi ne postoji.

Kvantna mehanika zabranjuje potpuno mirovanje. Kada bi oscilator potpuno stao, znali bismo istovremeno i njegov tačan položaj i tačan impuls, a to krši Heisenbergovu relaciju neodređenosti. Sistem se umjesto toga zaustavlja na najnižem dopuštenom nivou, čija energija nije nula - to je energija nulte tačke, doslovno ono što preostaje na apsolutnoj nuli. Primijenjeno na elektromagnetsko polje, to znači da prazan prostor prestaje biti prazan: on je zbir beskonačno mnogo modusa, od kojih svaki nosi svoj neuklonjivi doprinos.

Da to nije računski artefakt pokazao je Hendrik Casimir 1948. godine: dvije paralelne provodne ploče u vakuumu se privlače, jer između njih opstaje manje modova nego izvan njih. Sila raste s četvrtim stepenom bliskosti, pa na razmaku od svega deset nanometara dostiže red veličine atmosferskog pritiska - praznina na nanoskali gura jednako jako kao zrak oko nas.

To više nije kuriozitet: konstruktor mikroelektromehaničkih sistema mora Casimirov pritisak uvrstiti u proračun. Nedvosmislena eksperimentalna potvrda (S. Lamoreaux) objavljena je 1997. godine i slaže se s predviđanjem unutar pet procenata.

Najdublju reviziju pojma praznog prostora donosi Higgsov mehanizam. Za razliku od fluktuacija koje osciliraju oko nule, Higgsovo polje ima trajnu, nenultu vrijednost u vakuumu - i prostor

bez njega imao bi veću energiju nego prostor s njim. Praznina je, dakle, jeftinija kada nije prazna.

Posljedica je pojmovno neugodna: masa nije svojstvo koje čestica nosi sa sobom, nego rezultat njene interakcije s poljem koje prožima ono što nazivamo praznim prostorom.

2.5 Elementi koji ne rade ništa

Hemijski pandan ništavila je nereaktivnost. Plemeniti gasovi - helij, neon, argon, kripton, ksenon, radon - cijelo su se stoljeće smatrali potpuno inertnima; ime argona i dolazi od grčkog argos, "lijen". Otkriveni su zahvaljujući neskladu u trećoj decimali: Lord Rayleigh je uočio da azot iz zraka ima nešto veću gustinu od azota dobivenog hemijski, i taj mali ostatak pokazao se kao nova kolona periodnog sistema. Pouka je uzorna - Rayleigh nije tražio novi element, nego je pokušavao razumjeti zašto atomske mase nisu cijeli brojevi. Nauka redovno nalazi ono što nije tražila, pod uslovom da neko ozbiljno shvati treću decimalu.

Dogma o inertnosti pala je 1962. godine za nekoliko sekundi: Neil Bartlett je pomiješao platina-heksafluorid i ksenon, i stakleni se sud odmah prekrio žutom tvari - prvim jedinjenjem plemenitog gasa. "Ništa" je izdržalo tačno onoliko dugo koliko su trajali uslovi u kojima smo ga tražili.

Ako je vakuum praznina prostora, apsolutna nula je praznina toplotnog kretanja. Treći zakon termodinamike tvrdi da se ona ne može dostići nikakvim konačnim nizom koraka, jer bi hlađenje zahtijevalo medij hladniji od nule kelvina, kojeg nema. Put prema nuli redovno je otkrivao nepredvidiva stanja: Kamerlingh Onnes je 1911. godine, hladeći živu tečnim helijem, otkrio supravodljivost. Laserskim hlađenjem danas se dosežu nanokelvini, a u najnovijim eksperimentima i pikokelvini - ali kretanje ni tada ne prestaje, samo postaje sporije od svega što se može zamisliti. Praznina toplotnog kretanja ostaje asimptota.

2.6 Genom bez funkcije

Biološki pandan vakuuma nije organ bez funkcije nego sekvenca bez funkcije. Kod čovjeka proteine kodira između jedan i dva procenta od približno tri milijarde baznih parova; ostatak je Susumu Ohno 1972. godine nazvao "otpadnom DNK". Da veličina genoma nema mnogo veze sa složenošću organizma, pokazuje test s lukom: obični luk ima genom pet puta veći od ljudskog. Kada su iz mišjeg genoma uklonjene dvije velike nekodirajuće oblasti s preko hiljadu evolucijski očuvanih sekvenci, miševi su ostali živi, plodni i po svemu nerazlučivi od kontrolne skupine - što ne dokazuje da je izbrisano bilo bezvrijedno, nego da se u laboratorijskim uslovima njegov izostanak nije mogao izmjeriti.

Krajnja verzija postupka je sinteza minimalne ćelije. Tim Craiga Ventera je uklanjao gen po gen dok ćelija nije prestajala rasti, i 2016. godine dobio soj s manje od 500 gena. Očekivao se uredan popis funkcija koje život zahtijeva; nađeno je nešto drugo - gotovo trećina tih neophodnih gena nema poznatu biološku funkciju. Praznina je i ovdje uklanjanjem postala gušća: minimalna ćelija je manje razumljiva od one od koje je napravljena.

2.7 Hijerarhija praznina

Izraz "vakuum svemira" je, strogo uzevši, netačan, jer sugerira jedno stanje ondje gdje ih postoji čitav niz. Najpreglednije ga je izraziti prosječnim razmakom između čestica: na razini mora molekuli zraka razdvojeni su oko milionitog dijela milimetra; u orbiti svemirske stanice oko stotog dijela milimetra - što je i dalje lošiji vakuum od dobrih laboratorijskih pumpi na Zemlji. U sunčevom vjetru atomi su razmaknuti oko centimetar, u međuzvezdanoj materiji nekoliko centimetara, a u kosmičkim prazninama približno pet metara. Najbolji vakuum koji je čovječanstvo ikada napravilo stoji tek na trećoj stepenici te ljestvice.

Velike strukture svemira nisu skupine galaksija nego mreža vlakana i zidova koji okružuju praznine tipičnog prečnika oko 50 miliona svjetlosnih godina. Ni te praznine nisu prazne: kada bi se komora veličine dnevne sobe odnijela u najrjeđi dio kosmosa i otvorila, u njoj bi, nakon isticanja zraka, ostalo ništa - ili, ako baš nemate sreće, jedan atom. To je najbliže apsolutnoj praznini što priroda nudi, i dalje je nije dosegla.

Najveći otvoreni problem u fizici ničega je kvantitativan. Energija vakuuma zakrivljuje prostor-vrijeme i u Einsteinovim jednačinama se pojavljuje kao kosmološka konstanta. Ubrzano širenje svemira zahtijeva da ona bude različita od nule, ali izuzetno malena - dok naivni teorijski zbir doprinosa vakuumske energije premašuje opaženu vrijednost faktorom reda 10 na 120. To je najveće numeričko neslaganje u historiji fizike. Praznina, ukratko, nije samo strukturirana - ona kao da je fino ugođena, a razlog nije poznat.

2.8 Gdje je granica?

Popularna rečenica da je svemir nastao iz ničega koristi riječ "ništa" u smislu koji nijedan filozof ne bi prihvatio. Kada kosmolog kaže ništa, po pravilu misli na kvantno polje u stanju najniže energije, na prostor-vrijeme, na skup zakona i simetrija - dakle na vrlo bogato nešto. Apsolutno ništa nije pojam koji nauka koristi loše; to je pojam koji nauka uopšte ne koristi, jer nema operativnu definiciju: ne postoji postupak čiji bi ishod bio apsolutno ništa. To nije poraz nego razgraničenje.

Zajednički obrazac je jasan. Svaka naučna praznina je ostatak nekog postupka, i svaki put kada postupak postane bolji, ostatak postane zanimljiviji. Ništavilo se u prirodnim naukama ne pojavljuje kao stanje nego kao granica niza - koristan ideal prema kojem se aproksimira, ali koji se ne dostiže. U tom smislu je "ništa" vjerovatno najproduktivnija fikcija koju je nauka ikada koristila: nikada nije

pronađeno, a bez njega ne bi bilo ni pozicijskog zapisa, ni barometra, ni kriogenike, ni kosmologije.

Literatura

- [1] Webb, J. (ur.) (2013). *Nothing: From Absolute Zero to Cosmic Oblivion - Amazing Insights into Nothingness*. London: Profile Books.
- [2] Close, F. (2009). *Nothing: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- [3] Sorensen, R. (2022). *Nothing: A Philosophical History*. New York: Oxford University Press.
- [4] Barrow, J. D. (2002). *The Book of Nothing: Vacuums, Voids, and the Latest Ideas about the Origins of the Universe*. New York: Vintage Books.
- [5] Holt, J. (2012). *Why Does the World Exist? An Existential Detective Story*. New York: Liveright.
- [6] Genz, H. (1999). *Nothingness: The Science of Empty Space* (prev. K. Heusch). Reading, MA: Perseus Books. (Izvornik: *Die Entdeckung des Nichts*. München: Carl Hanser, 1994.)
- [7] Kaplan, R., & Kaplan, E. (2000). *The Nothing That Is: A Natural History of Zero*. Oxford: Oxford University Press.
- [8] Seife, C. (2000). *Zero: The Biography of a Dangerous Idea*. New York: Viking.
- [9] Spade, P. V. (1996). *Jean-Paul Sartre's Being and Nothingness: Class Lecture Notes*. Bloomington: Indiana University.
- [10] Priest, G. (2014). *One: Being an Investigation into the Unity of Reality and of its Parts, including the Singular Object which is Nothingness*. Oxford: Oxford University Press.
- [11] Ohno, S. (1972). So much 'junk' DNA in our genome. *Brookhaven Symposia in Biology*, 23, 366-370.
- [12] The ENCODE Project Consortium (2012). An integrated encyclopedia of DNA elements in the human genome. *Nature*, 489, 57-74.

3

Strijela vremena

"Zakon da entropija uvijek raste zauzima, mislim, najviše mjesto među zakonima prirode. ... ako se ustanovi da je vaša teorija u suprotnosti s drugim zakonom termodinamike, ne mogu vam dati nikakvu nadu; ne preostaje ništa drugo nego da propadne u najdubljem poniženju." (A. Eddington)



Vrijeme je jedna od najdubljih zagonetki prirode. Svi ga osjećamo kao neprekidan tok od prošlosti prema budućnosti: čaša se razbije, kafa se hladi, tragovi ostaju iza događaja, a mi pamtimo ono što je bilo, ali ne i ono što će tek doći. Ipak, kada zavirimo u temelje fizike, slika postaje mnogo čudnija - osnovni zakoni uglavnom ne razlikuju prošlost od budućnosti. Ovaj tekst vodi nas od svakodnevnog iskustva i entropije, preko Newtonovog i Einsteinovog shvatanja vremena, Velikog praska i kvantne mehanike, do pitanja koje zadire

u samu prirodu stvarnosti: zašto vrijeme uopće ima smjer i da li vrijeme zaista teče?

3.1 Zašto vrijeme ima smjer?

Svako od nas svakodnevno svjedoči jednosmjernosti svijeta, iako o njoj rijetko zastane da razmisli. Richard Feynman je tu očiglednost formulirao gotovo kao dosjetku: ispustite šoljicu i ona se razbije, pa možete sjediti podugo i čekati trenutak da se krhotine skupe, poskoče i vrate vam se čitave u ruku, ali taj trenutak nikada neće doći. Stanite pored mora i gledajte kako se valovi lome; uzalud ćete čekati trenutak kada se pjena sama sabere, digne iz mora i vrati unatrag. Dim iz šoljice kafe širi se po prostoriji i nestaje, nikada se ne skuplja natrag u tanku nit iznad ivice. Kafa se hladi, nikada se sama ne zagrijava na račun hladnijeg zraka oko sebe. Mi starimo, kosa sijedi, koljena škripe, a nikada obrnuto, koliko god to neki od nas priželjkivali.

Ovi primjeri djeluju banalno upravo zato što su savršeno pouzdani. Njihova pouzdanost je, međutim, duboka fizička zagonetka. Jer kada zavirimo ispod površine tih pojava, do pojedinačnih molekula, atoma i elementarnih čestica, otkrivamo nešto krajnje neočekivano: temeljni zakoni koji upravljaju tim mikroskopskim svijetom gotovo ne razlikuju prošlost od budućnosti.

Feynman to slikovito objašnjava: kada bi postojao zakon po kojem se toplo smije hladiti, ali se hladno nikada ne smije samo zagrijati, tada bi film pušten unatrag prikazivao nemoguć slijed događaja, na koji bi se svaki fizičar nasmijao. Takvog zakona, međutim, nema. Na razini pojedinih čestica film pušten unatrag izgleda jednako zakonito kao i film pušten unaprijed, i ozbiljan fizičar koji ga gleda ne bi imao razloga da se nasmije.

Odatle proizlazi pitanje: ako fizički zakoni na mikroskopskom nivou uglavnom ne prave razliku između prošlosti i budućnosti, zašto je

naš svijet na makroskopskom nivou tako očigledno vremenski asimetričan?

Tu asimetriju, činjenicu da prošlost i budućnost u našem iskustvu nikako nisu međusobno zamjenjive, fizičari nazivaju strijelom vremena. Izraz je 1927. skovao astrofizičar Arthur Eddington, želeći naglasiti da vrijeme, za razliku od prostora, ima ugrađen smjer: strijela pokazuje od jučer prema sutra, nikada obrnuto. U prostoru se možemo kretati lijevo i desno, gore i dolje, naprijed i nazad. U vremenu, čini se, možemo samo naprijed.

Sean Carroll upozorava da strijela vremena nije tek jedna zanimljivost među mnogima. Ona je razlog zašto se sjećamo prošlosti a ne budućnosti; zašto vjerujemo u uzrok i posljedicu; zašto uopće možemo govoriti o slobodnoj volji kao sposobnosti da mijenjamo budućnost, ali ne i prošlost; zašto se razvijamo, jedemo, starimo i naposljetku umiremo. I sve to, tvrdi on pomalo izazovno, "na kraju je posljedica Velikog praska".

Cilj ovog teksta je pokazati kako se ta smjela tvrdnja može opravdati. Pratit ćemo strijelu od svakodnevnog iskustva, preko klasične mehanike i termodinamike, do kozmologije i kvantne fizike, a na kraju i do zapanjujuće mogućnosti da vrijeme, barem onakvo kakvim ga doživljavamo, uopće nije temeljni sastojak stvarnosti, nego nešto što tek izranja iz dublje strukture svijeta. Kao što ćemo vidjeti, pitanje o smjeru vremena zapravo je čitav snop međusobno povezanih zagonetki, a najintrigantnije je to što odgovor, po svemu sudeći, ne leži u zakonima fizike, nego u posebnom stanju u kojem je naš svemir započeo.

3.2 Newtonovo vrijeme i Einsteinova revolucija

Da bismo razumjeli u čemu je problem, moramo se prvo prisjetiti kako je fizika shvatala vrijeme. Za Isaaca Newtona vrijeme je bilo apsolutno. U svom kapitalnom djelu iz 1687. napisao je da "apsolutno, istinsko i matematičko vrijeme, samo po sebi i po svojoj

prirodi, teče jednoliko, bez odnosa prema bilo čemu vanjskom". Vrijeme je, drugim riječima:

- postojalo nezavisno od svega ostalog i da nema nijedne čestice u svemiru, ono bi svejedno teklo;
- teklo jednako za svakog posmatrača, bez obzira gdje se nalazi i kako se kreće;
- predstavljalo neku vrstu univerzalnog sata svemira - jedno veliko "sada", isto na svakom kutku kosmosa.

Ta slika je stoljećima djelovala kao puki zdrav razum. Onda je 1905. i 1915. godine Albert Einstein srušio sve tri pretpostavke. Specijalna teorija relativnosti pokazala je da vrijeme zavisi od posmatrača: satovi koji se kreću velikim brzinama otkucavaju sporije, a dvoje ljudi u relativnom kretanju ne moraju se složiti oko toga koliko je vremena proteklo između dva događaja, pa čak ni oko toga koji se od dva udaljena događaja desio prvi. Rovelli podsjeća da to više nije puka teorija: usporavanje vremena danas se može izmjeriti čak i preciznim satovima razmaknutim za svega nekoliko centimetara po visini - vrijeme na podu vaše sobe teče neznatno sporije nego kod stropa.

Umjesto zasebnog prostora i zasebnog vremena, Einstein je uveo jedinstveni prostor-vrijeme, četverodimenzionalni kontinuum u kojem su vremenska i prostorna dimenzija isprepletene. Njegov nekadašnji profesor Hermann Minkowski dao je toj zamisli precizan geometrijski oblik. Kako naglašava Liebscher u "Geometriji vremena", Minkowskijev prostor-vrijeme ima vlastitu, pseudoeuklidsku geometriju, a u njenom središtu je svjetlosni konus: struktura koja u svakoj tački razdvaja događaje na one koji leže u apsolutnoj prošlosti, one u apsolutnoj budućnosti i one koji su, s obzirom na tu tačku, uzročno posve nedostupni. Ta kauzalna struktura je stvarna i invarijantna, ali sama po sebi ni ona ne govori

kojim smjerom "teče" vrijeme, ona samo razlikuje "ranije" od "kasnije", ostavljajući otvorenim pitanje zašto biramo baš jedan od dva smjera.

Opća teorija relativnosti otišla je i korak dalje: prostor-vrijeme nije kruta pozornica, nego se savija i rasteže pod uticajem mase i energije, a satovi u jačem gravitacijskom polju kucaju sporije od onih u slabijem. Vrijeme je time izgubilo svoju povlaštenu, apsolutnu ulogu i postalo, kako to sažeto formuliše Rovelli, lokalna, promjenljiva veličina, različita od mjesta do mjesta i od posmatrača do posmatrača.

Najradikalnija posljedica jeste da u relativnosti ne postoji univerzalno, kosmičko "sada". Ono što ja u ovom trenutku smatram "sadašnjošću" na nekoj dalekoj galaksiji, drugi posmatrač u kretanju smatrat će prošlošću ili budućnošću i oboje ćemo biti podjednako u pravu. Rovelli slikovito kaže da je pitanje "šta se sada dešava tamo daleko" jednako besmisleno kao pitanje "šta je ovdje" za neku tačku na drugom kraju svemira: ono ima smisla samo lokalno.

Ovdje se otvara suptilno i uznemirujuće pitanje: ako različiti posmatrači ne moraju dijeliti isto "sada", i ako je prostor-vrijeme jedna zamrznuta četverodimenzionalna cjelina, šta onda uopće znači da vrijeme "teče"? Einstein sam je bio duboko svjestan te dileme. U pismu porodici svog preminulog prijatelja Michelea Bessa napisao je poznatu rečenicu da je razlika između prošlosti, sadašnjosti i budućnosti samo "tvrdoglavo uporna iluzija". Toj mogućnosti, da je protok vremena iluzija, vratit ćemo se pred kraj.

No zasad zabilježimo ključni paradoks: relativnost je vrijeme učinila fleksibilnim, ali ga nije učinila asimetričnim. Njene jednačine, jednako kao i Newtonove, i dalje jednako dobro rade u oba smjera. Odakle, onda, strijela vremena?

3.3 Zakoni koji ne znaju za prošlost i budućnost

Da bismo osjetili srž problema, poslužimo se Feynmanovim omiljenim primjerom. Zamislite film snimka sudara dvije bilijske kugle, ili još bolje snimak planeta koji kruži oko Sunca. Pustite li taj film unazad, dobit ćete prizor koji je i dalje savršeno u skladu sa zakonom gravitacije. Feynman to formulira ovako: pokretna slika treba jednako dobro raditi u oba smjera, i fizičar koji je gleda ne bi trebao imati razloga da se nasmije. Nijedan gledalac ne bi mogao, samo iz fizike kretanja, reći koji je snimak "pravi", a koji pušten unatrag.

To svojstvo naziva se vremenska reverzibilnost, ili preciznije invarijantnost na obrat vremena. Formalno, ako u jednačinama zamijenimo vrijeme t njegovom negativnom vrijednošću $-t$ (uz odgovarajući obrat brzina), rješenje ostaje valjano rješenje. Velika većina temeljnih jednačina to poštuje: Newtonova mehanika, Maxwellov elektromagnetizam, Einsteinova gravitacija i Schrödingerova jednačina kvantne mehanike.

Drugim riječima, na fundamentalnom nivou priroda nema ugrađen kompas koji bi razlikovao prijelaz iz stanja A u stanje B od prijelaza iz B u A. Oba su podjednako dopuštena zakonima. Feynman iz toga izvlači ključan zaključak: pošto zakoni kretanja atoma ne prave razliku, ireverzibilnost svijeta koji vidimo ne može biti upisana u same zakone, moramo je potražiti negdje drugdje.

Uz to ide i jedna važna tehnička ograda, kojoj Bryan Roberts posvećuje čitavu knjigu. Slaba nuklearna sila pokazuje sitnu asimetriju: u rijetkim reakcijama elementarnih čestica (poznato kršenje CP-simetrije, otkriveno 1964. na neutralnim kaonima) priroda, preko CPT-teoreme, zapravo neznatno razlikuje smjer vremena. CPT-teorema kaže da svaki temeljni fizikalni zakon mora ostati nepromijenjen ako istovremeno izvršimo tri obrata: zamjenu čestica antičesticama (C - naboj), zrcaljenje prostora (P - parnost) i

obrat smjera vremena (T). Zato kršenje CP-simetrije (uočeno kod kaona) nužno znači i sitno kršenje T-simetrije, dakle priroda na toj mikroskopskoj razini ipak, makar neznatno, razlikuje prošlost od budućnosti. Roberts pažljivo pokazuje da postoji intimna veza između simetrija "vremena samog" i simetrije obrata vremena u našim najboljim teorijama i da nam ta veza čak dopušta da empirijski provjerimo ima li vrijeme ugrađen smjer. No i on priznaje ono presudno: ta čestična asimetrija je preslaba i prerijetka da bi objasnila zašto se kafa hladi ili čaše razbijaju. Ona nas ostavlja s jednako neriješenom zagonetkom svakodnevnog, makroskopskog strijela.

A ta zagonetka je nezgodna. U zbilji vidimo samo jedan smjer: toplina uvijek prelazi s toplijeg na hladnije tijelo, nikada obrnuto. Ovu čudnu neusklađenost prvi je oštro formulirao Josef Loschmidt u raspravi s Ludwigom Boltzmannom krajem 19. stoljeća, pa se i danas naziva Loschmidtovim paradoksom (ili prigovorom obrata): Ako su svi mikroskopski zakoni koji upravljaju česticama reverzibilni u vremenu, kako iz njih može proizaći makroskopski zakon - Drugi zakon termodinamike - koji je izrazito ireverzibilan i strogo bira jedan smjer vremena?

Loschmidtova zamisao bila je jednostavna i razorna: ako je bilo koje kretanje sistema koje povećava entropiju dopušteno zakonima, onda mora biti dopušteno i tačno obrnuto kretanje, ono koje bi entropiju smanjivalo. Za svaku evoluciju koja vodi u nered postoji zrcalna evolucija koja vodi u red. Zašto onda prirodu vidimo samo kako ide u nered? Odgovor na to pitanje odvest će nas do pojma entropije i do jedne suptilne, ali presudne uloge, uloge početnih uslova.

3.4 Entropija i fizička strijela vremena

Ako igdje strijela vremena ima jasan fizički oblik, onda je to u pojmu entropije i u Drugom zakonu termodinamike, koji kaže da entropija izolovanog sistema s vremenom ne opada već u pravilu raste. Da

bismo razumjeli zašto, moramo razlikovati dvije razine opisa jednog te istog sistema.

Iza toga stoji, kako pripovijeda Rovelli, tragična i romantična figura Ludwiga Boltzmanna, nemirnog Austrijanca koji je upravo iza znaka nejednakosti u Drugom zakonu termodinamike prvi nazreo dublju istinu.

a. Mikrostanja i makrostanja

Mikrostanje je potpuni, do posljednjeg detalja precizan opis sistema: tačan položaj i brzina svake pojedine molekule. Makrostanje, nasuprot tome, jeste grubi opis pomoću veličina koje zaista mjerimo: temperature, pritiska, zapremine, boje. Ključni uvid, koji dugujemo Boltzmannu, jeste da jednom istom makrostanju odgovara ogroman broj različitih mikrostanja.

Zamislite šoljicu vruće kafe u hladnoj sobi. Makrostanje "kafa je vruća, soba hladna" ostvarivo je kroz nezamislivo mnogo rasporeda molekula. Ali makrostanje "kafa i soba su iste temperature" ostvarivo je kroz astronomski još mnogo veći broj rasporeda. Entropija je, u Boltzmannovom shvatanju, upravo mjera tog broja: koliko mikrostanja pripada datom makrostanju.

b. Boltzmannova formula

Tu ideju Boltzmann je sažeo u jednu od najljepših jednačina fizike, uklesanu i na njegovom nadgrobnom spomeniku na bečkom Središnjem groblju: $S = k \cdot \log W$.

Ovdje je S entropija makrostanja, W broj mikrostanja koja mu odgovaraju (broj "načina" da se to makrostanje ostvari), a k Boltzmannova konstanta koja daje ispravne jedinice. Penrose skreće pažnju na dvije suptilnosti ove formule koje su za našu priču presudne. Prvo, logaritam nije tu iz estetike: brojevi mikrostanja tako su čudovišno veliki da bez logaritma s njima ne bismo mogli računati, a upravo logaritam čini entropiju "aditivnom" - entropija

dva sistema zajedno jednaka je zbiru njihovih entropija. Drugo, zbog logaritma i male vrijednosti konstante k , već i sasvim skromno smanjenje entropije odgovara zapanjujuće golemom smanjenju zapremine u prostoru stanja. Zato je, jednom kad sistem "ispliva" u područje visoke entropije, nevjerovatno da se sam vrati u malo područje niske entropije, bar ne u vremenu kraćem od "besmisleno dugog".

c. Zašto entropija raste?

Sada dolazi presudni korak, i s njim rješenje Loschmidtove zagonetke. Entropija ne raste zato što bi to nalagao neki tajanstveni zakon koji zna za smjer vremena. Ona raste iz čiste vjerovatnoće. Postoji neusporedivo više mikrostanja koja izgledaju "neuređeno" nego onih koja izgledaju "uređeno", jednostavno zato što neuređenih konfiguracija ima više. Sistem koji se, gonjen sudarima, praktično nasumično šeta kroz svoja moguća mikrostanja gotovo će sigurno završiti u makrostanju kojem pripada najviše mikrostanja, a to je stanje visoke entropije.

Feynman spominje sljedeću sliku. Zamislite posudu s plavom vodom s jedne i bistrom s druge strane, u početku uredno razdvojenima. Protresete li je, boje se izmiješaju u ujednačeno modrikastu tekućinu i nikada ih više nećete vidjeti kako se same razdvajaju. Vidite li takođe da su boje pri rubovima "glatko" razdvojene, možete pouzdano zaključiti nešto o prošlosti: nekada su bile još potpunije razdvojene. Ista logika vrijedi i za špil karata: postoji samo jedan raspored koji zovemo "savršeno poredan", ali astronomski mnogo onih koje zovemo "izmiješan". Miješanje gotovo uvijek daje nered, ne zato što karte "vole" nered, nego zato što ih je nemjerljivo više.

Primjeri termodinamičke strijele svuda su oko nas:

- Led u čaši toplinu iz okoline upija i prelazi u vodu; voda se ne pretvara spontano nazad u led vadeći toplinu iz toplije sobe.

- Vruća kafa se hladi izjednačavajući temperaturu sa sobom; nikada se sama ne zagrijava dok se soba hladi.
- Miris parfema iz otvorene bočice raširi se po cijeloj prostoriji; molekule mirisa nikada se same ne skupe natrag u bočicu.

Nijedan od obrnutih procesa nije zabranjen zakonima, oni su samo nevjerovatni do granice nemogućeg. Zaključak koji iz svega slijedi glasi: smjer u kojem entropija raste jeste ono što nazivamo termodinamičkom strijelom vremena.

No pažljiv čitalac već osjeća da nešto nedostaje, a upravo je na taj nedostatak Loschmidt i ciljao. Argument vjerovatnoće objašnjava zašto sistem visoke entropije ostaje na visokoj entropiji, i zašto sistem niske entropije teži ka višoj. Ali on jednako dobro "radi" i unatrag: statistički gledano, sistem koji danas ima nisku entropiju najvjerovatnije je i jučer imao višu, a ne nižu. Vjerovatnoća sama po sebi ne bira smjer, ona simetrično gura prema neredu u oba smjera vremena. Zašto onda prošlost izgleda uređenije od budućnosti? Time nas entropija sama vodi do dubljeg, kosmološkog pitanja.

3.5 Odakle dolazi strijela vremena?

Dosad smo utvrdili neugodnu činjenicu: sama statistika ne objašnjava zašto je prošlost drugačija od budućnosti. Ako je entropija svemira danas velika i raste, onda je jučer morala biti manja, a prekjueer još manja. Slijedimo li taj lanac unazad, dolazimo do neizbježnog zaključka: Svemir je u svojoj najranijoj fazi morao biti u stanju izuzetno niske entropije, u stanju nevjerovatne uređenosti.

Ali zašto? Zašto bi svemir uopće počeo u tako posebnom, tako nevjerovatnom stanju? To je srce cijele zagonetke. Ne trebamo objašnjavati zašto entropija raste, to slijedi iz statistike. Trebamo objasniti zašto je nekada bila tako niska da uopće ima kuda rasti.

a. Feynmanova slutnja i Albertova "hipoteza prošlosti"

Feynman je ovaj zaključak izveo s razoružavajućom jasnoćom već 1965. Kad bismo, kaže on, tvrdili da je svijet naprosto slučajna fluktuacija iz ravnoteže, statistika bi nas natjerala da očekujemo najmanju moguću "posebnost", a svijet oko nas neusporedivo je uređeniji nego što bi ijedna fluktuacija ikada proizvela.

Zato, zaključuje Feynman, moramo fizikalnim zakonima dodati zaseban postulat: pretpostavku da je svemir u prošlosti bio uređeniji, u tehničkom smislu, nego što je danas. I odmah dodaje ključno zapažanje: ta je pretpostavka "nesimetrična u vremenu", za razliku od svih ostalih zakona; ona jedina, sasvim otvoreno, izdvaja prošlost.

Filozof David Albert dao je toj pretpostavci ime koje se ustalilo: hipoteza prošlosti (eng. past hypothesis). U knjizi "Time and Chance" on je uzdiže na status novog, temeljnog i, što je bitno, nedinamičkog zakona prirode. Bez tog dodatnog uslova, tvrdi Albert, ne možemo opravdati čak ni najobičnije zaključke o prošlosti. Naime, isti statistički argument koji budućnosti pripisuje visoku entropiju, primijenjen naivno unatrag, rekao bi nam da je i prošlost bila neurednija, čime bi svaki naš trag postao nepouzdan. A tragova imamo bezbroj: možemo pokazati fotografije, pustiti snimke, pokazati na otiske stopa, iskopati fosile, zaviriti u stare novine ili se osloniti na vlastito sjećanje. Svi ti tragovi imaju smisla, tvrdi Albert, samo ako Hipotezu prošlosti uzmemo kao polaznu istinu. Ona je, kako se našalio, "majka svih" pretpostavki o prošlosti.

Time Veliki prasak dobija sasvim novo značenje. On nije samo početak širenja svemira; on je, prije svega, ono posebno početno stanje niske entropije koje uopće omogućava postojanje strijele vremena. Sva asimetrija koju vidimo: razbijene čaše, hlađenje kafe, naša sjećanja, sam tok života, u konačnici je "naslijeđena" iz te izvorne uređenosti. Živimo, kako to Carroll voli reći, na dugačkoj

nizbrdici entropije koja je počela na vrhu brda postavljenog Velikim praskom.

b. Penrose i zagonetka posebnog početka

Koliko je to početno stanje bilo posebno? Roger Penrose je pokušao staviti brojku na tu nevjerovatnost, i tu se skriva jedno iznenađenje. Kod običnog plina "uredno" znači skupljeno, a "neuredno" ravnomjerno razmazano. Ali kod gravitacije je obrnuto: ravnomjerno raspoređena materija predstavlja nisku entropiju, a zgrušavanje, nastanak zvijezda, galaksija i, u krajnjem slučaju, crnih rupa, predstavlja porast entropije. Rani svemir bio je izuzetno gladak i ujednačen (reliktno mikrovalno zračenje pokazuje ujednačenost bolju od jednog dijela na sto hiljada), a to gravitaciono glatko stanje upravo je stanje čudovišno niske entropije.

Uzimajući u obzir kolika je maksimalna entropija koju bi sva ta materija mogla imati kad bi se sabila u crne rupe, Penrose je procijenio "preciznost" kojom je početno stanje svemira moralo biti pogođeno. Slikovito je zamislio Stvoritelja koji iglom mora pogoditi jednu jedinu tačku u nezamislivo golemom prostoru mogućih stanja, i izračunao da je vjerovatnoća tog pogotka reda jedan naprema 10 na stepen 10^{123} . To je broj toliko velik da se ne može ni ispisati u decimalnom obliku: kada bismo na svaki atom u vidljivom svemiru upisali po jednu nulu, i dalje ne bismo imali dovoljno atoma. Uzgred, Penrose izričito odbacuje čestu zablude da rast entropije "samo slijedi" iz širenja svemira, kao da širenje diže neki "strop" dopuštene entropije. Naprotiv, kaže on, upravo je gravitaciono zgrušavanje ono što otvara golemo prostranstvo entropije, a strop je od početka bio nezamislivo visok.

Zašto je svemir počeo baš u tako izuzetnom stanju, na to pitanje iskren odgovor glasi: još uvijek ne znamo. Nudi se više pravaca. Neki se nadaju da će buduća teorija kvantne gravitacije pokazati da je nisko-entropijski početak nekako nužan (Penrose u tom duhu

predlaže svoju hipotezu o Weylovoj zakrivljenosti). Drugi, poput Carrola, razmatraju scenarije u kojima je naš svemir tek dio nekog većeg "multiverzuma" u kojem takvi niskoentropijski džepovi statistički nastaju kao rijetke, ali neizbježne fluktuacije.

c. Priceovo upozorenje i Arhimedova tačka

Huw Price ovdje unosi metodološki oprez koji je postao klasičan. Njegova knjiga nosi podnaslov koji sve govori: potraga za "Arhimedovom tačkom", mjestom izvan vremena s kojeg bismo mogli suditi o njemu bez pristrasnosti. Price tvrdi da fizičari i filozofi, razmišljajući o početku svemira, neprestano upadaju u "dvostruki standard": bez razmišljanja prihvataju da početni uslovi mogu biti posebni i tražiti objašnjenje, ali istu mogućnost prešutno uskraćuju konačnim uslovima. Mi, kao stvorenja koja pamte prošlost, a ne budućnost, neizbježno projiciramo vlastitu vremensku pristrasnost na sam kosmos. Da bismo pošteno postavili pitanje o strijeli vremena, upozorava Price, moramo naučiti gledati svijet iz atemporalne perspektive koja unaprijed ne pretpostavlja upravo ono što tek treba objasniti.

Bilo kako bilo, pouka je duboka: strijela vremena koju osjećamo pri svakoj razbijenoj čaši nije upisana u lokalne zakone fizike. Ona je otisak jednog jedinstvenog kosmičkog događaja od prije gotovo 14 milijardi godina.

3.6 Kosmološka strijela

Ako je početno stanje svemira izvor strijele, prirodno je zapitati se kako se ta strijela ogleda u samoj historiji kosmosa. Ovdje se pojavljuje kosmološka strijela vremena, smjer u kojem se svemir širi, i njena tijesna, iako suptilna, veza s termodinamičkom strijelom. Upravo je H. Dieter Zeh, u svom sistematskom djelu o fizikalnoj osnovi smjera vremena ("The Physical Basis of the Direction of Time"), popisao čitav niz naizgled različitih "strijela" i pokazao koliko su duboko isprepletene.

a. Zehove mnoge strijele

Zeh razlikuje nekoliko strijela vremena koje sve pokazuju u isti smjer, iako na prvi pogled pripadaju različitim područjima fizike:

- termodinamička strijela - rast entropije, o kojoj smo već govorili;
- radijaciona strijela - činjenica da valove (svjetlost, zvuk) uvijek vidimo kako se šire od izvora prema van, a nikada kako se sami sabiru prema izvoru;
- kvantno-mehanička strijela - nepovratnost povezana s mjerenjem i dekoherencijom;
- kosmološka strijela - smjer širenja svemira.

Zehova teza je da nijedna od njih nije samostalna; sve one, tvrdi on, u konačnici izviru iz jedne zajedničke "glavne strijele" (eng. master arrow) čiji korijen leži u niskoentropijskom kosmološkom početku. Kosmološka strijela nije puki dekor: ona zahtijeva, doslovno, da je svemir krenuo iz stanja niske entropije i da se materija otada neprestano "miješa" prema ravnoteži. Time se sve ostale strijele oslanjaju na istu Hipotezu prošlosti s kojom smo se već susreli.

b. Kako širenje stvara red i plaća račun?

Priča o kosmološkoj strijeli teče otprilike ovako. Iz vrelog, gustog i izuzetno glatkog početnog stanja svemir se počeo širiti i hladiti. U toj ekspanziji gravitacija je, malo po malo, pojačavala sitne početne nehomogenosti: gušća područja privlačila su još materije, rijetka postajala još praznija. Iz te igre nastale su prve zvijezde i galaksije, a s njima i strukture.

Ovdje se krije zanimljiv paradoks koji Penrose posebno naglašava: nastanak uređenih struktura poput zvijezda zapravo povećava ukupnu entropiju svemira. Sav "red" koji vidimo na Zemlji, od kristala do živih bića, u konačnici se plaća iz temperaturne

neravnoteže na nebu, one koju je stvorilo gravitaciono zgrušavanje pri nastanku Sunca.

Biljke crpe niskoentropijsku energiju iz koncentriranog Sunčevog svjetla i vraćaju u svemir mnoštvo niskokvalitetnih fotona; mi jedemo biljke i dišemo kisik koji one oslobađaju. Sunce, drugim riječima, pravi lokalni red na Zemlji tako što uredno plaća termodinamički račun rastom entropije negdje drugdje. Život nije iznimka od Drugog zakona, on je jedan od njegovih najdomišljatijih načina naplate.

c. Toplotna smrt i utihnuće vremena

A budućnost? Ako se sadašnji trend nastavi, a ubrzano širenje pod uticajem tamne energije sugerira da hoće, svemir ide prema stanju koje se tradicionalno naziva toplotnom smrću (eng. heat death). Zvijezde će "dogorjeti", galaksije se raspršiti, crne rupe nakon nezamislivo dugog vremena ishlapiti kroz Hawkingovo zračenje, a materija i energija razliti se u hladnu, gotovo savršeno ravnomjernu kašu maksimalne entropije.

I tu se krije melanholično, gotovo poetsko pitanje: ako svemir jednog dana dostigne stanje maksimalne entropije, stanje u kojem se više ništa ne mijenja jer se nema šta izjednačavati, šta tada uopće znači "protok vremena"? Ako je strijela vremena samo drugo ime za rast entropije, onda u svemiru bez rasta entropije nema ni strijele. Vrijeme bi, u nekom smislu, izgubilo svoj smjer i utihnulo, ne zato što bi "stalo", nego zato što više ne bi bilo promjene koja bi mu davala pravac. To je krajnja i pomalo otrežnjujuća posljedica ideje da vrijeme svoj smjer duguje entropiji.

3.7 Zašto se sjećamo prošlosti, a ne budućnosti?

Sve dosad rečeno bilo je uglavnom o vanjskom svijetu. Ali strijela vremena ima i intimno, subjektivno lice, koje je Feynman smatrao čak dubljim od svih laboratorijskih primjera: mi se sjećamo prošlosti,

a ne budućnosti. "Pamtimo prošlost, ne pamtimo budućnost", kaže on, i baš to psihološko iskustvo, a ne tek pokus, čini razliku između prije i poslije tako neodoljivo stvarnom. Imamo fotografije s prošlih ljetovanja, ne s budućih. Imamo fosile davno uginulih bića, ne fosile bića koja tek treba da nastanu. Imamo zapise, ožiljke, tragove i uspomene o onome što je bilo, a o onome što će tek biti imamo samo nagađanja. Ovu asimetriju nazivamo psihološkom (ili spoznajnom) strijelom vremena.

Zašto je tako? Zato što su sjećanje i svaki drugi trag u suštini fizički zapisi, a stvaranje zapisa ima svoju termodinamičku cijenu. Da bi neki sistem, filmska vrpca, kamen, sinapsa u mozgu, pouzdano zabilježio neki događaj, on mora prijeći iz nekog "praznog" stanja niske entropije u stanje koje nosi informaciju o tom događaju. Taj prijelaz je nepovratan i praćen porastom entropije negdje u okolini. Zato tragovi uvijek pokazuju prema prošlosti: da bi trag postojao, morala mu je prethoditi niska entropija - prazna vrpca, netaknut pijesak, um spreman da uči.

Huw Price i David Albert ovdje naglašavaju istu poentu iz različitih uglova: mogućnost pouzdanog pamćenja i vođenja tragova sama počiva na Hipotezi prošlosti. Naš mozak nije izuzet iz fizike, on je fizički sistem koji troši energiju (petina svih naših kalorija odlazi baš na taj kilogram i po sive mase), a formiranje trajnog sjećanja plaća se odvođenjem topline i porastom entropije. "Sjećanje na budućnost" bilo bi fizički isto što i spontano okupljanje dima natrag u šoljicu: nije zabranjeno zakonima, ali je nevjerovatno do nemogućnosti.

Zanimljivo je da neki autori idu i korak dalje, pokušavajući pokazati kako se psihološka strijela može izvesti unutar potpuno vremenski-simetrične fizike, dakle bez ikakvog dodatnog "psihološkog" zakona, oslanjajući se isključivo na statistiku i početne uslove. To je i dalje živo, otvoreno istraživačko pitanje, ali smjer je znakovit: sve više se čini da je naš doživljaj vremena posljednja karika u lancu koji počinje entropijom.

Time se nameće elegantan, objedinjujući zaključak, koji brane i Carroll i Albert i Zeh: naša psihološka strijela najvjerojatnije je tek posljedica iste, jedne jedine termodinamičke strijele. Osjećaj da "idemo" iz prošlosti u budućnost, da nam se sjećanja nižu iza leđa dok se nepoznato prostire ispred nas, sve to izvire iz činjenice da živimo u svemiru koji je krenuo iz stanja niske entropije i još uvijek se, milijardama godina, kotrlja niz tu blagu nizbrdicu prema neredu.

3.8 Kraj klasične slike vremena

Sve dosad izloženo uglavnom je klasična priča. No dvadeseto stoljeće donijelo je kvantnu mehaniku, koja unosi nove slojeve u pitanje o smjeru vremena i, moguće, novu strijelu.

Osnovna dilema slična je onoj iz klasične fizike, ali s dodatnim zaokretom. S jedne strane, temeljna kvantna evolucija, ona koju opisuje Schrödingerova jednačina, glatka je i savršeno reverzibilna. Kvantni sistem prepušten sam sebi zadržava svu svoju informaciju i mogao bi se, u načelu, "premotati" unatrag. S druge strane, čim izvršimo mjerenje, nastupa nešto naizgled nepovratno: superpozicija mogućnosti (čuvena mačka koja je istovremeno i živa i mrtva) naglo "kolabira" u jedan određeni ishod, i ta se promjena ne da poništiti. Penrose ovaj sukob dviju "razina" kvantne mehanike smatra toliko ozbiljnim da ga naziva paradoksom mjerenja i vjeruje da tek nagovještava dublju, još nenapisanu teoriju.

Savremeni pogled taj prividni kolaps u velikoj mjeri objašnjava pojmom dekoherencije. Nijedan sistem nije zaista izolovan: mjerni instrument, zrak, fotoni, sve to neprestano "dodiruje" kvantni sistem i s njim se isprepliće. Kroz to isprepletanje delikatna kvantna superpozicija brzo se rasipa u okolinu i praktično postaje nedostupna, pa sistem izgleda kao da je "izabrao" jedan klasičan ishod. Ključno je da dekoherencija ima izražen smjer u vremenu, informacija bježi iz sistema u okolinu, a ne obrnuto, i taj smjer je, opet, isti onaj termodinamički smjer rasta entropije. Zeh je, uzgred, bio jedan od

pionira upravo ove ideje, povezavši kvantnu nepovratnost sa svojom "glavnom strijelom".

Ostaje, međutim, otvoreno i duboko pitanje: ako je temeljna kvantna evolucija reverzibilna, kako iz nje tačno nastaje nepovratni, klasični svijet koji svakodnevno opažamo? Da li je nepovratnost mjerenja stvarna i temeljna, ili je samo još jedno lice statistike i posebnih početnih uslova? Odgovor zavisi od toga kako tumačimo samu kvantnu mehaniku, a oko toga fizičari još uvijek nisu postigli slaganje. Za našu priču dovoljno je uočiti da i kvantni svijet, čim ga povežemo sa stvarnim mjerenjima i okolinom, uredno pokazuje istu strijelu i da njeno konačno porijeklo, i tu, izmiče čistim zakonima.

3.9 Da li vrijeme uopće postoji?

Nakon svega, prirodno je napraviti filozofski zaokret i upitati se nešto još temeljnije: postoji li protok vremena uopće, ili je on, kako je slutio Einstein, vrsta uporne iluzije? Filozofija fizike nudi nekoliko velikih odgovora, a upravo se ovdje razilaze putevi naših autora.

a. Prezentizam

Prema prezentizmu, stvarna je samo sadašnjost. Prošlost više ne postoji, budućnost još ne postoji; jedino "sada" jeste. To je blisko našem svakodnevnom osjećaju. Nevolja je što se prezentizam teško miri s relativnošću: ako ne postoji univerzalno "sada" zajedničko svim posmatračima, teško je reći koji tačno presjek prostor-vremena čini tu jedinu stvarnu sadašnjost.

b. Eternalizam i blok-univerzum

Nasuprot tome stoji eternalizam, slika koju često nazivaju blok-univerzumom. Prošlost, sadašnjost i budućnost jednako su stvarne, sve su to dijelovi jednog zamrznutog, četverodimenzionalnog bloka prostor-vremena. "Protok" vremena je tada iluzija našeg položaja unutar bloka, slično kao što putnik u vozu ima utisak da pejzaž promiče, iako svaki dio pruge postoji cijelo vrijeme. Ta slika

prirodno proizlazi iz Minkowskijeve geometrije koju smo spomenuli, i mnogim fizičarima djeluje najuvjerljivije. Ali ima cijenu: teško objašnjava zašto tako snažno doživljavamo baš proticanje i baš jedan smjer. Noviji autori pokušavaju taj blok "oživjeti" modelom rastućeg bloka (eng. growing-block), u kojem prošlost i sadašnjost postoje, a budućnost se tek "dograđuje", nastojeći tako spojiti geometriju s našim osjećajem da se nešto uistinu dešava.

c. Emergentno vrijeme

Treća, najradikalnija mogućnost jeste da vrijeme uopće nije temeljni sastojak stvarnosti, nego emergentna pojava, nešto što izranja iz dublje, bezvremene strukture svijeta. Ovdje se javljaju najsmjeliji mislioci među autorima naše literature.

Carlo Rovelli, u sklopu istraživanja kvantne gravitacije, tvrdi da na najdubljem nivou u jednačinama nema veličine "vrijeme" uopće. Jedan po jedan, kaže on, svi karakteristični aspekti vremena pokazali su se kao puke aproksimacije, zablude uslovljene našom perspektivom, baš kao nekadašnja "ravnost" Zemlje ili "okretanje" Sunca. Ono što stvarno postoji jesu događaji i odnosi među njima; vrijeme je način na koji mi, kao topli, zaboravni, entropijski stvorovi, doživljavamo te odnose.

Njegova provokativna teza glasi da razlika između prošlosti i budućnosti izvire iz "zamućenja" - iz činjenice da svijet opisujemo grubo, statistički, ne prateći svaku pojedinu molekulu. Kada bismo mogli obuhvatiti sve mikroskopske detalje, tvrdi Rovelli, karakteristični protok vremena bi nestao. "Vrijeme je neznanje", sažima on; ono nastaje iz naše nepotpune slike svijeta. Kao u prvoj i najvećoj od svih detektivskih priča, Sofoklovom Kralju Edipu, krivac se na kraju ispostavi da je sam detektiv.

Julian Barbour ide i korak dalje: u knjizi "The End of Time" (1999) tvrdi da vrijeme naprosto ne postoji. Stvarnost je, po njemu, bezvremena zbirka svih mogućih trenutnih konfiguracija svemira,

prostor koji on pjesnički naziva "Platonijom", a pojedine konfiguracije "sada" (eng. nows). Ne postoji nikakvo kretanje kroz taj prostor; postoje tek same konfiguracije. Naš snažan utisak protoka i historije Barbour objašnjava pojmom "vremenskih kapsula" (eng. time capsules): posebnih konfiguracija koje u sebi nose uzajamno usklađene tragove - fosile, sjećanja, slojeve stijena - koji izgledaju kao zapis prošlosti, iako je svako "Sada" potpuno samostalno. Ono što zovemo poviješću tek je poredak koji um nameće toj bezvremenoj zbirci; niz kadrova filma koji nikada nije bio "pušten".

Roger Penrose, ipak, ostaje bliži čvrstoj fizici: za njega je vrijeme stvarno, ali je njegova asimetrija, kao što smo vidjeli, utisnuta izuzetnim, gotovo nevjerovatno posebnim početnim stanjem svemira, koje tek buduća fizika treba objasniti. Njegova monumentalna knjiga podsjeća nas da, ma koliko filozofski smjeli bili, odgovor na kraju mora položiti račun pred matematikom i mjerenjem, a ne pred našim sklonostima.

3.10 Kuda pokazuje strijela?

Vratimo se pitanju s početka: zašto vrijeme ima smjer? Nakon cijelog puta, od razbijene čaše, preko Newtona, Einsteina i Minkowskija, kroz reverzibilne zakone i Loschmidtov paradoks, do entropije, Feynmanove slutnje, Albertove Hipoteze prošlosti, Penroseove nezamislive brojke, Zehovih mnogih strijela, kosmologije, sjećanja i kvantne mehanike, nameće se pomalo iznenađujući odgovor.

Strijela vremena vjerovatno nije ugrađena izravno u temeljne zakone fizike. Ti zakoni, uz zanemarive iznimke o kojima piše Roberts, jednako dobro rade u oba smjera. Strijela prije izgleda kao proizvod jednog spleta činilaca:

- zakona fizike, koji određuju šta je uopće moguće;
- posebnog početnog stanja svemira niske entropije - Feynmanove i Albertove Hipoteze prošlosti;

- statistike i entropije, koje iz tog početka izvlače pouzdan smjer;
- informacije i sjećanja, koji tu asimetriju upisuju u naš um;
- i, na kraju, svijesti, koja sve to doživljava kao "proticanje".

Drugim riječima, smjer vremena nije nešto što nalazimo u jednačinama, nego nešto što nasljeđujemo od početnih uslova svemira i tumačimo kroz sopstvenu, termodinamički uvjetovanu perspektivu.

Strijela pokazuje od Velikog praska prema toplotnoj smrti, a mi, negdje na sredini tog puta, tu putanju osjećamo kao "prije" i "poslije". I upravo tu, upozorio bi Price, treba ostati skroman: lako je vlastitu vremensku pristrasnost pomiješati s objektivnom osobinom svemira.

Možda je, dakle, najtačnije reći ovako: vrijeme možda ne teče kroz svemir. Možda smo mi ti koji se, poput čitalaca koji okreću stranice već napisane knjige, krećemo kroz neprekinut niz promjena, i taj redoslijed nazivamo vremenom. A možda, ako su Rovelli i Barbour u pravu, ni te stranice ne postoje u nekom vremenu, nego jednostavno jesu, a "okretanje" dodaje um.

A ako je prošlost samo zapis, a budućnost samo mogućnost - šta je onda sadašnjost? Na to pitanje fizika, iskreno, još nema konačan odgovor. Ali sama činjenica da ga možemo postaviti, da smo dio svemira sposoban da razmišlja o vlastitom smjeru u vremenu, možda je najljepši trag koji je niska entropija Velikog praska za sobom ostavila.

Literatura

- [1] Albert, D. Z. (2000). Time and Chance. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [2] Barbour, J. (1999). The End of Time: The Next Revolution in Physics. Oxford: Oxford University Press.

- [3] Carroll, S. (2010). *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*. New York: Dutton.
- [4] Feynman, R. P. (1965). *The Character of Physical Law*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [5] Liebscher, D.-E. (2005). *The Geometry of Time*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [6] López, C., & Lombardi, O. (ur.) (2025). *The Arrow of Time: From Local Systems to the Whole Universe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [7] Penrose, R. (2004). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. London: Jonathan Cape.
- [8] Price, H. (1996). *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. Oxford: Oxford University Press.
- [9] Roberts, B. W. (2022). *Reversing the Arrow of Time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [10] Rovelli, C. (2018). *The Order of Time*. New York: Riverhead Books.
- [11] Zeh, H. D. (2007). *The Physical Basis of the Direction of Time* (5. izd.). Berlin: Springer.

4

Samoorganizacija

"Kod velikih objekata... ponašanje velikih i složenih skupova elementarnih čestica ne treba shvatiti kao jednostavnu ekstrapolaciju svojstava nekoliko čestica. Na svakom nivou složenosti pojavljuju se posve nova svojstva." (P. W. Anderson)



Samoorganizacija je jedna od najzanimljivijih sposobnosti prirode: da iz mnoštva jednostavnih elemenata nastanu složeni i uređeni obrasci bez centralnog plana, projektanta ili vođe. Na prvi pogled takav nastanak reda može izgledati gotovo paradoksalno, posebno u svijetu u kojem termodinamika govori o stalnom porastu entropije. Ipak, kada kroz sistem protiče energija i kada se nađe dovoljno daleko od ravnoteže, jednostavna lokalna pravila mogu proizvesti iznenađujuće složene strukture. Od vrtloga u zagrijanoj tekućini i

šara na životinjama, preko jata ptica i sinhronizovanih ritmova, pa sve do zvijezda, galaksija i kosmičke mreže, priroda neprestano pokazuje istu ideju: red može nastati bez naredbe, a složenost bez unaprijed nacrtanog plana.

4.1 Samoorganizacija kao fenomen

Postoji jedna scena koju je lako previdjeti, a koja bi, kad bismo je gledali prvi put, morala djelovati kao mađioničarski trik. Zagrijte tanak sloj ulja u tavi ravnomjerno odozdo i strpite se. Isprva se ništa ne događa, tekućina samo leži i grije se, dosadno kao u čekaonici. A onda, u jednom trenutku, kao na nevidljivi znak, površina se sama razdijeli na uredno saće šesterokutnih ćelija, od kojih svaka vrti tekućinu u vlastitom malom vrtlogu. Niko nije nacrtao tu mrežu. Nijedna molekula ne zna šta je šesterokut, niti je ikada čula za pčele. Pa ipak, obrazac je tu, pravilan, ponovljiv i, priznajmo, pomalo drzak u svojoj urednosti.

Ovaj tekst je o toj vrsti drskosti prirode: o sposobnosti materije da se, pod pravim uslovima, sama organizuje u složene i uredne strukture, bez ikakvog vanjskog projektanta, plana, nadzornika ili odbora za osiguranje kvaliteta. Fenomen se zove samoorganizacija, i kad ga jednom naučite prepoznavati, počecete ga viđati posvuda, u posudi s uljem, u jatu čvoraka, na krznu leoparda, u mravinjaku, u ljudskom srcu, u saobraćajnoj koloni na autoputu, pa i u samoj strukturi svemira. Zajednička im je jedna gotovo subverzivna ideja: da za nastanak reda nije potreban naredbodavac, nego tek nekoliko jednostavnih pravila i stalan dotok energije. Priroda je, ispostavlja se, izvrstan primjer uspješne organizacije koja nikada nije imala šefa.

4.2 Red koji se ne protivi neredu

Prva reakcija obrazovanog čitaoca obično je sumnjičava. Zar nam termodinamika ne govori da sve teži neredu, da se čaša prije razbije nego što se sama sastavi, da se soba prije zaprlja nego pospremi? Kako onda materija sama od sebe stvara red, a da pritom ne krši

jedan od najčvršćih zakona fizike - onaj za koji je Arthur Eddington rekao da svako ko se nada da će ga oboriti nema druge nego da doživi najdublje poniženje?

Odgovor je suptilan i vrijedi ga precizno postaviti, jer se na njemu spotiće mnogo dobronamjernih objašnjenja. Drugi zakon termodinamike ne zabranjuje nastanak reda - on zabranjuje smanjenje ukupne entropije u izolovanom sistemu. Ključna riječ je "izolovan". Sistemi u kojima nastaje samoorganizacija nisu izolovani: kroz njih neprestano protiče energija. Tava se grije odozdo i hladi odozgo; jato ptica jede velike količine hrane; grad troši struju.

Takvi sistemi, koje je Ilya Prigogine nazvao disipativnim strukturama, lokalno stvaraju red tako što ga plaćaju povećanjem nereda u okolini - najčešće u obliku otpadne toplote. Uredno saće u tavi postoji zato što se okolni zrak nešto jače zagrijava. Vaše tijelo, taj hodajući vrhunac lokalnog reda, svakodnevno u svemir otpušta toplotu i nered veći od reda koji u sebi održava. Živi ste, drugim riječima, zato što neprestano prljate okolinu - što je misao koja svakoj savjesti nudi barem malu termodinamičku utjehu.

Za taj je uvid Prigogine dobio Nobelovu nagradu za hemiju 1977. godine. Samoorganizacija nije čarolija koja prkosi fizici, ona je ono što fizika radi kad je gurnete dovoljno daleko od ravnoteže i pustite energiju da teče. Ravnoteža je, uzgred, u fizici sinonim za smrt: sistem u savršenoj ravnoteži je sistem u kojem se više ništa zanimljivo ne događa. Sav zanimljiv svijet - vrtlozi, oluje, otkucaji, misli - živi upravo na razmaku od te ravnoteže.

4.3 Geometrija iz haosa

Vratimo se onoj tavi, jer je ona najčistiji laboratorijski primjer i zaslužuje ime. Pojavu je početkom dvadesetog vijeka sistematski proučavao francuski fizičar Henri Bénard, pa ćelije nose njegovo ime. U tankom sloju sa slobodnom površinom, kakav je u tavi, ćelije zapravo pokreće uglavnom razlika površinske napetosti -

Marangonijev efekt; tzv. Rayleigh-Bénardova konvekcija uzgonom prevladava u debljim slojevima. Priča ide otprilike ovako. Dok je temperaturna razlika između dna i vrha tekućine mala, toplota se prenosi mirno, provođenjem - od molekule do molekule, bez vidljivog kretanja. Ali kada razlika pređe određeni prag, taj miran režim postaje nestabilan: topla tekućina koja je dole želi gore, hladna koja je gore želi dole, i cijeli sistem se mora "odlučiti" kako će to izvesti.

I tu se događa ono zanimljivo. Umjesto haotičnog komešanja, tekućina se organizuje u pravilne konvekcijske ćelije, često šesterokutne, u kojima topla struja u sredini raste, širi se, hladi i pada niz rubove, poput beskrajnog reda sitnih fontana koje su se dogovorile oko rasporeda. Milijarde milijardi molekula, od kojih svaki slijepo sluša tek lokalne sile na sebe, iznenada se ponašaju usklađeno preko udaljenosti milion puta većih od njih samih. Nastaje makroskopski obrazac kojeg ni u jednoj pojedinačnoj molekuli nema ni u tragu.

Fizičari ovo zovu spontanom narušavanjem simetrije: prije praga svi su smjerovi rotacije jednako mogući, a u trenutku prelaska sistem proizvoljno izabere jedan i cijela se ćelija posveti njemu, kao skupština koja nakon beskrajne rasprave napokon izglasa bilo šta samo da krene dalje. To je isti tip prelaza koji stoji iza mnogo dubljih pojava u fizici - od magnetizma do nastanka mase - ali ovdje ga možemo vidjeti golim okom, uz šoljicu kafe i malo strpljenja.

Isti mehanizam, uzgred, oblikuje i onu pravilnu šaru na dnu oblaka koju zovemo naoblakom "u redovima", a srodno spontano narušavanje simetrije (ovdje pucanje lave koja se hladi i skuplja) daje i šestougaone stupove bazalta poput onih u Irskoj, gdje je narodna predaja radije okrivila diva nego fiziku. Vrijedi zapamtiti taj recept, jer se ponavlja: nelinearni sistem, dotok energije, prag, i preko njega spontani red.

4.4 Matematika životinjske šare

Ako Bénardove ćelije pokazuju kako energija stvara obrazac u prostoru, sljedeći primjer pokazuje nešto još neočekivanije: kako čista hemija može naslikati pruge na tigru. Ideju je 1952. godine iznio Alan Turing - isti onaj čije ime obično vezujemo za računare i razbijanje šifri - u radu skromnog naslova o hemijskoj osnovi morfogeneze. Bio je to jedan od posljednjih radova koje je objavio, i jedan od najdalekovidnijih: čovjek koji je pomogao skratiti jedan svjetski rat u slobodno je vrijeme razmišljao o tome kako leopard dobija tačke.

Turingova zamisao bila je gotovo provokativno jednostavna. Zamislite dvije tvari koje reaguju jedna s drugom i pritom se šire (difundiraju) kroz tkivo, ali različitim brzinama: jedna je "aktivator" koji potiče i sebe i svog protivnika, a druga je "inhibitor" koji koči aktivatora, ali se širi brže od njega. Aktivator lokalno pojačava sam sebe, stvarajući mrlju; inhibitor otrči naprijed i spriječi da mrlja preraste u sve, ostavljajući prazan pojas oko nje. Rezultat te utrke između lokalnog pojačanja i bržeg kočenja nije ni jednolična boja ni kaos, nego stabilan, pravilan raspored tačaka ili pruga. Ukratko: nacрта ga svađa dviju hemikalija oko toga ko će prvi stići.

Iz te apstraktne igre dviju tvari izlaze, ispostavilo se, upravo obrasci koje vidamo na životinjama: tačke na leopardu, pruge na zebri, šare na školjkama i ribama, pa i raspored dlačica ili prstiju. Matematika čak predviđa duhovitu pravilnost - životinja s tačkastim tijelom može imati prugast rep, ali obrnuto gotovo nikada, jer geometrija repa, uska i izdužena, dopušta samo određene obrasce.

Priroda, izgleda, poštuje Turingove jednačine i tamo gdje za njih nikada nije čula, pa čak i u sitnicama poput toga da gepard i leopard imaju prstenast (prugast) kraj repa, dok životinja prugastog tijela s tačkastim repom ne postoji.

Trebalo je više od pola vijeka da se Turingova pretpostavka i eksperimentalno potvrdi u pravim sistemima. Danas znamo da isti mehanizam raspoređuje dlačice na koži miša, brazde na nepcu, pa čak i razmak između zuba; a 2012. godine pokazano je da upravo Turingov par molekula određuje raspored bora na nepcu sisara. Poenta za našu priču ista je kao kod tave: obrazac nije nigdje "upisan" unaprijed.

Nema gena koji nosi mapu pruga zebre crtu po crtu, jednako kao što nema note u DNK koja kaže "ovdje stavi šesnaestu prugu". Postoji samo pravilo - reaguj, širi se, koči - a šara se pojavi sama, kao neizbježna posljedica tog pravila. Zebra ne nosi svoj crtež; ona ga svaki put iznova izračuna.

4.5 Jato bez vođe

Do sada smo gledali molekule i hemikalije. Podignimo pogled do jata čvoraka koje se u sumrak prelijeva nad krovovima kao jedinstveno, tečno biće, čas se stanji u vrpcu, čas nabrekne u kuglu, čas se prospe kao dim. Prizor je toliko koordiniran da je stoljećima mamio pomisao na neku vrstu kolektivne telepatije ili tajnog vođe koji izdaje naredbe. Istina je i jednostavnija i čudesnija: vođe nema. Nikada ga nije ni bilo.

Godine 1986. Craig Reynolds napravio je računarski model - nazvao ga je "boids" - u kojem svaka simulirana ptica slijedi samo tri lokalna pravila: ne zalijeći se u susjede, poravnaj svoj smjer s prosjekom bližnjih, i drži se blizu grupe. Nikakav globalni plan, nikakva karta, nikakav dirigent. A na ekranu je, iz te tri banalne upute, nastalo jato koje se uvija, dijeli oko prepreke i ponovo spaja - do nerazlučivosti nalik pravome. Reynoldsov model danas leti u gotovo svakom filmu s računarski animiranim rojevima.

A onda su fizičari, umjesto da nagađaju, otišli mjeriti. Grupa u Rimu snimila je stvarna jata čvoraka s više kamera i rekonstruisala kretanje svake pojedine ptice u tri dimenzije. Rezultat je bio elegantan: svaka

ptica prati tačno šest do sedam najbližih susjeda - ne one unutar nekog kruga, nego uvijek tih šest-sedam, ma koliko jato bilo gusto ili razrijeđeno. Ta topološka, a ne geometrijska pažnja upravo je ono što jatu daje čvrstinu: kad jastreb udari i jato se rastegne, veze među pticama ne pucaju, jer se broje susjedi, a ne metri.

Isti princip vlada i tamo gdje bismo najmanje očekivali inteligenciju. Kolonija mrava nema arhitektu, a gradi klimatizirane građevine s tunelima, skladištima i grobljima uredno odvojenim od ostave; nema generala, a organizuje pohode i logistiku dostojnu vojske. Tajna je u komunikaciji putem tragova feromona: svaki mrav slijedi jednostavno pravilo "pojačaj miris na kraćem putu", i kolonija kao cjelina, a da nijedna jedinka to ne zna niti sluti, riješi problem najkraćeg puta koji i nas u matematici zna namučiti. Biolozi to zovu rojnom inteligencijom, i danas po uzoru na mrave pišemo algoritme koji usmjeravaju internetski saobraćaj i pakete kroz mrežu. Civilizacija koja je izmislila satelit uči logistiku od insekta koji ne zna koliko ima nogu. Priroda je, ukratko, patentirala distribuirano računarstvo mnogo prije nas, i nije naplatila licencu.

4.6 Ritam koji se sam pronade

Samoorganizacija ne stvara samo obrasce u prostoru, nego i u vremenu - spontani ritam ondje gdje ga niko ne kuca. Najpoznatiji primjer zabilježio je holandski fizičar Christiaan Huygens još u sedamnaestom vijeku. Bolestan i vezan za sobu, posmatrao je dva svoja zidna sata s klatnom obješena na istu gredu i primijetio nešto uznemirujuće: koliko god ih razdešeno pokrenuo, nakon nekog vremena klatna bi se sama uskladila i njihala u savršenom protuhodu. Krivac je bila jedva primjetna vibracija koju su kroz zajedničku gredu slali jedan drugome - dovoljna da se, bez ikakvog dogovora, sinhronizuju.

Ta ista sklonost oscilatora da se međusobno usklade objašnjava neke od najljepših prizora u prirodi. U dijelovima jugoistočne Azije čitava

stabla svitaca zabljesnu i utrnu u savršenom taktu, hiljade njih kao jedan - noćni orkestar bez dirigenta, u kojem svaki svirac gleda samo susjede. Pljesak publike u dvorani zna, sasvim sam od sebe, skliznuti u ujednačen ritam. Čelije srčanog mišića, svaka sa svojim vlastitim tempom, usklade se u jedan otkucaj koji vas drži na životu, a kada ta sinhronizacija zataji, srce zadrhti u haosu koji zovemo fibrilacijom.

Matematičar Steven Strogatz posvetio je čitavu knjigu toj tihoj sklonosti svijeta da nađe zajednički ritam, i naslovio je jednostavno "Sync". Poruka je ista kao i dosad: dajte mnoštvu oscilatora najslabiju moguću vezu, i oni će se, bez ijedne naredbe, složiti u zbor.

4.7 Od pješčane gomile do kosmičke mreže

Vrijedi se na trenutak zapitati zašto se priroda tako često zatekne baš na pragu - na onoj tački između mrtvila i haosa gdje se rađaju obrasci. Jedan dio odgovora nudi ideja samoorganizovane kritičnosti, koju su krajem osamdesetih predložili Per Bak i saradnici, s najslikovitijim mogućim modelom: gomilom pijeska. Sipajte zrno po zrno i gomila će sama, bez ikakvog podešavanja, narasti do kritičnog nagiba na kojem jedno jedino sljedeće zrno može izazvati lavinu bilo koje veličine - od nekoliko zrna do klizišta preko cijele padine. Sistem se sam dovede u stanje na rubu, i tu tvrdoglavo ostane, kao da mu je baš tamo najudobnije.

Ta ista matematika lavina - u kojoj su mali događaji česti, a veliki rijetki po strogo određenom pravilu - opisuje zapanjujuće raznolik svijet pojava: potrese, snježne lavine, šumske požare, izumiranja vrsta, pa i naglo pucanje finansijskih tržišta.

Priroda, čini se, ima upornu sklonost da se sama namjesti tačno na onu granicu gdje je najzanimljivije, a možda i najplodnije, jer se upravo na rubu između krutog reda i čistog haosa nalazi ono usko područje u kojem su mogući i stabilnost i promjena, dakle i sam život.

A onda podignimo pogled do kraja. Gravitacija je najstrpljiviji samoorganizator od svih: uzme gotovo savršeno ravnomjeran plin ranog svemira i, pojačavajući svaku sitnu nepravilnost, tokom milijardi godina isprede od njega zvijezde, galaksije i golemu paučinu vlakana i praznina koju zovemo kosmičkom mrežom. Isti onaj recept s početka - nestabilnost, pojačanje, prelazak praga - radi i u tavi i u svemiru, samo s drugim glumcem u glavnoj ulozi i s budžetom od nekoliko stotina milijardi galaksija. Postoji izvjesna utjeha u pomisli da šara na leptirovom krilu i raspored galaksija duguju svoje postojanje istoj tvrdoglavoj sklonosti materije da se, čim joj se pruži prilika, počne slagati u obrasce.

4.8 Poredak bez naredbodavca

Ono što povezuje tavu, tigra, jato, srce i galaksiju nije nikakva mistična sila, nego prepoznatljiv obrazac uzročnosti: mnoštvo jednostavnih dijelova, svaki od kojih posluša samo lokalna pravila, uz stalan dotok energije koji sistem drži daleko od ravnoteže - i, kao nagrada, globalni red kojeg ni u jednom pojedinačnom dijelu nema. Nijedna molekula ulja ne poznaje šesterokut; nijedan mrav ne vidi cijeli mravinjak; nijedan čvorak ne zna oblik jata; nijedna srčana ćelija ne čuje cijeli otkucaj. Pa ipak, obrazac je stvaran, mjerljiv i često zadivljujuće precizan.

Za mene je najzanimljivija posljedica te spoznaje pomalo skromna, gotovo ponizna: složenost oko nas ne traži nužno složen uzrok, a još manje projektanta koji bi je unaprijed do kraja zamislio. Traži samo određena pravila, malo energije i mnogo strpljenja - a strpljenja svemir ima na pretek. Život je, po svoj prilici, najambiciozniji domet te iste sklonosti: materija koja se organizovala do te mjere da je na kraju počela postavljati pitanja o vlastitom nastanku. A možda je i sama misao koja upravo prati ovu rečenicu tek još jedan obrazac izronio iz mnoštva jednostavnih dijelova koji slijede lokalna pravila - sto milijardi neurona koji, kao i jato čvoraka, nemaju vođu, a ipak nekako plešu u istom ritmu.

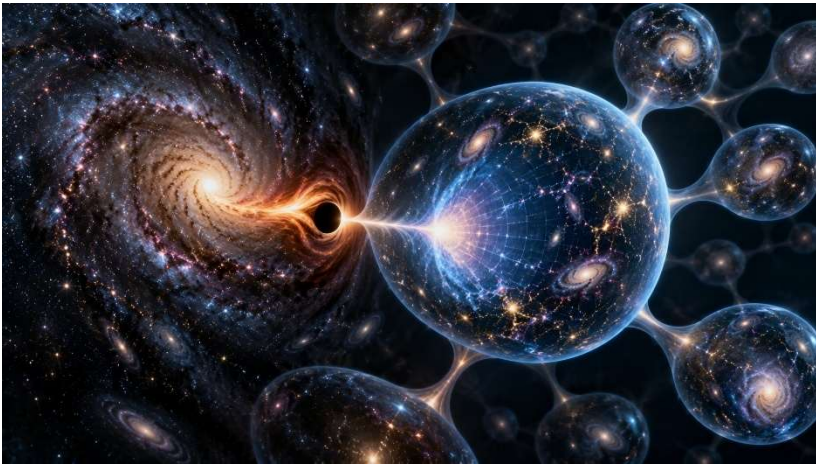
Literatura

- [1] Anderson, P. W. (1972). More Is Different: Broken Symmetry and the Nature of the Hierarchical Structure of Science. *Science*, 177(4047), 393-396.
- [2] Bak, P., Tang, C., & Wiesenfeld, K. (1987). Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise. *Physical Review Letters*, 59(4), 381-384.
- [3] Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus.
- [4] Ball, P. (2009). *Nature's Patterns: A Tapestry in Three Parts*. Oxford: Oxford University Press.
- [5] Ballerini, M. i sar. (2008). Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(4), 1232-1237.
- [6] Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York: Oxford University Press.
- [7] Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N. R., Sneyd, J., Theraulaz, G., & Bonabeau, E. (2001). *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton: Princeton University Press.
- [8] Cross, M. C., & Hohenberg, P. C. (1993). Pattern formation outside of equilibrium. *Reviews of Modern Physics*, 65(3), 851-1112.
- [9] Economou, A. D. i sar. (2012). Periodic stripe formation by a Turing mechanism operating at growth zones in the mammalian palate. *Nature Genetics*, 44(3), 348-351.
- [10] Kondo, S., & Miura, T. (2010). Reaction-diffusion model as a framework for understanding biological pattern formation. *Science*, 329(5999), 1616-1620.
- [11] Nicolis, G., & Prigogine, I. (1977). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*. New York: Wiley.
- [12] Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2001). *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [13] Prigogine, I., & Stengers, I. (1984). *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. New York: Bantam Books.
- [14] Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 21(4), 25-34.

5

Kosmološka prirodna selekcija

"Pretpostaviti univerzalne zakone prirode koji su umu dostupni, a ipak nemaju razloga za svoj poseban oblik, teško da je opravdiva pozicija. Zakon je par excellence ono što traži razlog." (Charles Sanders Peirce, 1891)



Zašto su zakoni prirode baš takvi kakvi jesu? Zašto osnovne konstante imaju vrijednosti koje omogućavaju nastanak zvijezda, planeta, složene hemije i, konačno, života? Ovaj tekst istražuje neobičnu ideju Leeja Smolina da bi odgovor mogao ležati u svojevrsnoj kosmičkoj evoluciji, u kojoj se svemiri rađaju, mijenjaju i "razmnožavaju" kroz crne rupe. Iako je riječ o spekulativnoj hipotezi, ona otvara zanimljivo pitanje: može li se fina podešenost

svemira objasniti historijom i prirodnim procesom, umjesto unaprijed zadatim planom?

5.1 Metafizika presvučena u jednačine

Postoji jedna vrsta neugode koja spopadne fizičara tek kad je s poslom već gotov. Napiše jednačine, provjeri ih, potvrdi mjerenjem i onda primijeti da u tim jednačinama sjede brojevi koje niko nije izveo ni iz čega. Jačine osnovnih sila. Mase elementarnih čestica. Gustoća energije praznog prostora. Standardni model fizike čestica ima dvadesetak takvih slobodnih parametara, i za svaki od njih vrijedi ista neugodna rečenica: mogao bi biti drugačiji, a da nijedan poznati zakon ne bi bio prekršen. Priroda ih je, tako reći, ostavila praznim, pa smo sami upisali vrijednosti, a upisane vrijednosti su, kad se bolje pogleda, sablasno pogodne za nas.

"Pogodne" je blaga riječ. Martin Rees je u knjizi "Just Six Numbers" pokazao da se najveći dio te pogodnosti može svesti na šest bezdimenzionalnih brojeva koji, kako kaže, "čine recept za svemir", a taj recept ne trpi improvizaciju. $N \approx 10^{36}$ je odnos elektromagnetne i gravitacione sile među protonima; da ima tek nekoliko nula manje, svemir bi bio minijaturan i kratkovječan, "u kojem nijedno biće ne bi naraslo veće od insekta, i ne bi bilo vremena za biološku evoluciju". Parametar $\varepsilon = 0,007$ mjeri koliko čvrsto se vezuju atomska jezgra i koliko efikasno zvijezde pretvaraju vodik u teže elemente; da je 0,006, ne bi bilo deuterija, a time ni hemije; da je 0,008, vodik bi izgorio već u Velikom prasku. Parametar Ω mjeri odnos gustoće materije i kritične gustoće (previše - svemir bi se davno urušio; premalo - galaksije se nikad ne bi ni formirale). A λ je gustoća tamne energije, čije je mjerenje 1998. bilo, Reesovim riječima, "najveća naučna vijest godine", i čija sićušnost i dalje ostavlja teoretičare bez daha. $Q \approx 10^{-5}$ je amplituda praiskonskih mreškanja iz kojih su izrasle galaksije; a $D = 3$ je broj prostornih dimenzija, jer u dvije nema dovoljno prostora, a u četiri se planetarne orbite raspadaju.

Rees svoju knjigu zatvara pitanjem: "Je li ovo ugađanje puka gruba činjenica, slučajnost? Ili je providnost dobroćudnog Stvoritelja?" I odmah odgovara: "Ja smatram da nije ni jedno ni drugo." Upravo to "ni jedno ni drugo" otvara prostor koji će Smolin popuniti trećim odgovorom.

Paul Davies je toj neugodi dao ime koje se primilo. U knjizi "The Goldilocks Enigma" - po engleskoj bajci o Zlatokosoj koja bira kašu koja nije ni prevruća ni prehladna nego taman - svemir je "taman kako treba" za život. Kaša nije slučajno pogodoena; neko ju je probao. Ili je, možda, bilo toliko zdjela da je jedna morala biti prava. Davies pošteno priznaje da je do nedavno "faktor Zlatokose" bio "gotovo potpuno ignorisan" u ozbiljnoj kosmologiji jer je mirisao na teologiju, a fizičari na taj miris reaguju alergijski.

Pred tom finom ugođenošću tradicionalno stoje dva odgovora, i Smolin oba smatra oblicima intelektualne lijenosti - svaki na svoj način. Prvi je dizajn: neko je (ili Nešto je) namjerno okrenuo dugmad. To je moderni potomak Paleyjeve "urarske analogije" - nađeš li sat, zaključuješ da ga je radio urar - koju je Darwin u biologiji davno demontirao prirodnom selekcijom - onim što će Richard Dawkins nazvati "slijepim urarom". Ali u kosmologiji, upozorava Davies, taj argument je "mnogo suptilniji" i "u velikoj mjeri imun na darvinistički napad", jer nema očiglednog kosmičkog Darwina koji bi ga oborio. Drugi odgovor je antropijski multiverzum: postoji beskrajni ansambl svemira sa svim mogućim vrijednostima konstanti, pa se mi - sasvim trivijalno - nalazimo u jednom od rijetkih koji dopuštaju posmatrača, jer u ostalima nema nikoga da se čudi. Rees tu poziciju otvoreno zastupa; Leonard Susskind je u "The Cosmic Landscape" gradi na golemom "pejzažu" teorije struna, s procijenjenih 10^{500} mogućih vakuuma - brojem toliko besmisleno velikim da uz njega i beskonačnost djeluje skromno.

Smolinov prigovor antropijskom rješenju nije moralni nego hirurški. U radu izazovnog naslova "Scientific Alternatives to the Anthropic

Principle" piše, s frustracijom koju i ne krije, da "inače razumni ljudi, među kojima su i naučnici koje najviše cijenim, zastupaju pristup kosmološkim problemima koji je lako prepoznati kao nenaučan". Razlog je jednostavan: antropijski princip ne daje nijedno provjerljivo predviđanje. Ako sve moguće vrijednosti negdje postoje, a mi vidimo samo jednu, iz te postavke ne slijedi baš ništa što bi se moglo oboriti mjerenjem. Objašnjava sve, dakle ne objašnjava ništa, a teorija koja ne može pogriješiti nije, po Popperovom kriteriju, ni teorija. Smolin postavlja pitanje koje pokreće cijelu njegovu zamisao: može li se sintagma "zašto baš ove konstante" tretirati kao nauka, dakle nešto što se da oboriti, a ne kao utješna metafizika presvučena u jednačine?

5.2 Analogija s Darwinom

Smolinov potez je istovremeno jednostavan i drzak: uzeti mehanizam koji je u biologiji objasnio prividni dizajn bez dizajnera, i preslikati ga na kosmos. Darwinistička selekcija počiva na tri sastojka i nijedan od njih ne zahtijeva namjeru. Prvi je nasljeđivanje - potomci liče na roditelje. Drugi je varijacija - potomci se sitno i nasumično razlikuju; to su mutacije. Treći je diferencijalno razmnožavanje - varijante koje ostavljaju više potomaka vremenom preovladaju u populaciji, prosto zato što ih ima više. Iz ta tri koraka, koja pojedinačno djeluju trivijalno, izranja oko oštrog vida, krilo kolibrija i ljudski mozak - bez ijednog nacrt. Red i "podešenost" su ishod procesa, ne plana. Isti duh Smolin prepoznaje u fizici samoorganizacije: sistem daleko od ravnoteže, kroz koji struji energija, sam od sebe rađa strukturu - vrtlog, Bénardove ćelije, spiralnu ruku galaksije.

Da bi se ta tri sastojka prenijela na svemire, potrebna su tri kosmološka pandana. Svemiri se moraju nekako rađati jedni iz drugih (nasljeđivanje). Pri rođenju se konstante moraju sitno mijenjati (varijacija). I neki svemiri moraju ostavljati više potomaka od drugih (diferencijalno razmnožavanje). Prva dva uslova zvuče kao naučna fantastika, treći kao besmislica jer, zaboga, kako se

razmnožava svemir i ko broji potomstvo? A ipak, Susskind, koji će cijelu ideju kasnije napadati, ne može da odoli da je ne nazove, s pola divljenja, pola podsmijeha "fizičarskim darvinizmom". Ostaje pronaći kosmički organ za razmnožavanje. Smolinov odgovor je toliko neočekivan da djeluje kao šala, a nije: crne rupe.

5.3 Crna rupa kao sjeme novog svemira

Teorija stoji na dva postulata, i vrijedi ih razdvojiti, jer je prvi fizika (za koju još nemamo dokaz), a drugi biologija (posuđena od Darwina).

Prvi postulat je fizikalni: kvantni efekti sprečavaju nastanak singulariteta. Klasična opća relativnost predviđa da se materija u srcu crne rupe sažima u tačku beskonačne gustoće. Da to nije puki artefakt idealizovanih, simetričnih rješenja dokazao je Roger Penrose 1965., a priča o tom dokazu previše je lijepa da se preskoči. Penrose je, prelazeći ulicu usred razgovora, imao misao koju je odmah zaboravio nastavivši razgovor na drugoj strani; iste večeri osjećao se neobjašnjivo sretno, pa je, vraćajući se u mislima kroz dan, rekonstruisao da je na pješačkom prijelazu shvatio kako se singulariteti pojavljuju u svakom razumnom rješenju i kako to može dokazati.

No tu opća relativnost prestaje vrijediti, jer ne poznaje kvantnu mehaniku. Smolin pretpostavlja da prava kvantna teorija gravitacije zamjenjuje singularitet odskokom (eng. bounce): kad gustoća dosegne oko 10^{79} puta gustoću atomskog jezgra - Planckovu skalu, gušću nego išta što smo u prirodi vidjeli - kolaps se preokrene u eksploziju koja rađa novu, uzročno odvojenu oblast prostor-vremena. Gledano iznutra, to je novi Veliki prasak. Gledano izvana, i dalje je obična crna rupa, s horizontom kroz koji ništa ne izlazi. Novi svemir raste, tako reći, "u pupčanoj vrpici" čiji je jedini spoj s roditeljem onaj prvi trenutak.

Ideja "odskoka" nije Smolinova; stara je koliko i strah od kraja svijeta. Već su tridesetih godina kosmolozi maštali o "Feniks-svemiru" koji se širi, urušava, pa opet plane, a John Archibald Wheeler je govorio o "reprocesiranju" svemira pri svakom novom prasku. Smolinov jedini, ali presudan doprinos jeste da tu zamisao primijeni ne na svemir u cjelini, nego na svaku crnu rupu u njemu - i da doda da je promjena pri odskoku mala. Time se od jednog Feniksa dobije čitava loza.

Posljedica je slika koja, kako i sam Smolin priznaje, "mora tjerati na razmišljanje i nakon mnogo godina". Naš svemir sadrži, konzervativno računato, oko 10^{18} crnih rupa - dakle "roditelj" je otprilike toliko svemira-potomaka. A naš vlastiti Veliki prasak mogao bi biti tek odskok neke crne rupe u nekom drugom svemiru, o kojem nikad ništa nećemo saznati. Vrijeme, piše Smolin, više nije jedna linija nego "se grana poput drveta, gdje je svaka crna rupa pupoljak koji vodi u novi svemir trenutaka". Genealoško stablo kosmosa, u kojem smo mi jedna graničica među neizbrojivima.

Drugi postulat je selekcijski: pri odskoku se konstante Standardnog modela mijenjaju malo i nasumično. Tim jednim potezom u igru ulaze nasljeđivanje (potomak nasljeđuje gotovo iste konstante kao roditelj) i varijacija (sitna "mutacija"). Smolin je izričit da to nije nikakav napad na postojanje fundamentalne teorije - nespojivo je jedino s idejom da ta teorija jednoznačno fiksira baš ove vrijednosti. Ako se npr. ispod svega krije teorija struna, "mutacija" bi bila skok između susjednih dolina u pejzažu vakuuma. I tu se, ironično, Smolinova slika i Susskindov landscape gotovo dodiruju - samo što jednu pokreće selekcija koja bira, a drugu puka statistika koja ne bira ništa. Ista mapa, a dva sasvim različita putnika.

5.4 Crne rupe kao kosmički trik

Sada dolazi korak koji kosmološku prirodnu selekciju izdvaja iz gomile spekulativnih multiverzuma i zbog kojeg je vrijedan pažnje

čak i onome ko u odskoke ne vjeruje. Zamislimo populaciju svemira koja se generacijama razmnožava. Prvi "svemir" gotovo sigurno nema sreće: nasumične konstante najvjerovatnije daju svijet koji traje jedan Planckov tren i splasne bez ijedne crne rupe. Smolin ga slikovito poredi s bakterijom koja se ne dijeli nego umire i rađa jednog jedinog potomka - Feniks-bakterija, koja generacijama tavori dok jednim mutiranim genom ne pronađe trik dijeljenja. Od tog trenutka populacija eksplodira, i uskoro su gotovo svi potomci onih koji su trik naučili.

Kosmički "trik dijeljenja" jeste praviti crne rupe. A za većinu vrijednosti konstanti zvijezde uopšte ne mogu nastati - pa nema ni crnih rupa iz zvjezdanog kolapsa, ni potomstva. Uski raspon koji dopušta zvijezde, tešku hemiju i molekularne oblake ujedno je i raspon koji dopušta obilnu proizvodnju crnih rupa. Nakon dovoljno generacija, populacijom neizbježno dominiraju svemiri podešeni za maksimalnu proizvodnju crnih rupa, jer su takvi jednostavno ostavili najviše kopija sebe. Izvučete li nasumice jedan svemir iz šešira, gotovo sigurno vučete potomka plodnog roditelja - kao što je nasumice odabran čovjek gotovo sigurno iz velike, a ne iz izumrle porodice.

Ako je naš svemir tipičan član te populacije - a to je nužna statistička pretpostavka - njegove konstante moraju ležati blizu lokalnog maksimuma proizvodnje crnih rupa. Iz toga slijedi tvrdnja britke poput noža: gotovo svaka mala promjena bilo koje konstante trebala bi smanjiti broj crnih rupa, nikada ga povećati. Dovoljan je jedan uvjerljiv protuprimjer - jedan zaokret dugmeta koji bi dao više crnih rupa - i cijela teorija pada. To je ono što antropijskom principu očajnički nedostaje: način da se pogriješi.

Smolin ne staje na načelu nego nudi konkretan, mjerljiv zalog. Gornja granica mase neutronske zvijezde - iznad koje ostatak zvijezde mora kolabirati u crnu rupu - zavisi od mase kaona (nestabilna subatomska čestica iz porodice mezona - čestica

sastavljenih od jednog kvarka i jednog antikvarka), a ova od mase stranog kvarka (eng. strange quark), jednog od parametara Standardnog modela. U tzv. Bethe-Brown scenariju, u kojem kaoni u supergustom jezgru neutronske zvijezde postaju lakši i kondenzuju (nešto vrlo nalik na to kako se elektroni ponašaju u superprovodniku), ta granica pada na oko 1,5-1,6 Sunčevih masa. Logika kosmološke prirodne selekcije je nemilosrdna: ako teorija vrijedi, strani kvark mora biti tako podešen da granica bude niska - jer bi je svako povećanje pretvorilo dio budućih crnih rupa natrag u puke neutronske zvijezde i smanjilo kosmički prinos. Opažene mase neutronske zvijezde tada su ležale u uskom pojasu od oko 1,3 do 1,5 Sunčevih masa, tik ispod predviđene granice. Otkriće dobro izmjerene neutronske zvijezde od, recimo, dvije Sunčeve mase ozbiljno bi ugrozilo teoriju - i to je, u tišini, njena najveća vrlina i najveća opasnost. Takve zvijezde su u međuvremenu i pronađene: PSR J1614-2230 (oko 1,9-2,0 Sunčeve mase, 2010), PSR J0348+0432 (oko 2,0; 2013) i PSR J0740+6620 (oko 2,1; 2019). Većina autora to smatra ozbiljnim udarcem za Smolinovo konkretno predviđanje zasnovano na kaonskom kondenzatu, pa ga danas treba čitati kao primjer testa koji teorija nije prošla.

Max Tegmark tvrdi da svi matematički mogući svjetovi jednako stvarno postoje - pozicija raskošna u metafizičkim posljedicama, a gotovo prazna u provjerljivim predviđanjima. Smolin ide u tačno suprotnom smjeru: svemiri evoluiraju u vremenu, i baš ta evolucija - jer proizvodi statistički tipičnog člana - vraća teoriji sposobnost da kaže nešto opovrgljivo o našem svemiru. On je hipotezu i smislio prije svega da pokaže jedno: kosmologija fine ugođenosti može biti nauka, a ne samo filozofija s teleskopom.

5.5 Šta je ovdje pogrešno?

Postoje i slabosti ove hipoteze, a ima ih nekoliko, i nisu sitne. Teorija koja se hvali provjerljivošću dužna je prva izložiti vlastiti vrat.

Prije svega, fizika odskoka nije potvrđena. Cijeli prvi postulat zavisi od kvantne gravitacije koje još nema. Da singularitet zaista biva zamijenjen odskokom koji rađa novu oblast prostor-vremena - to je nada oslonjena na teoriju u nastajanju, ne rezultat. Bez potvrđenog mehanizma reprodukcije, darvinistička analogija ostaje bez svog prvog stuba: svemir koji se ne razmnožava ne može biti podvrgnut selekciji, kao što ni najbolja teorija naslijeđa ne vrijedi za stijene.

Veza "crne rupe $\rightarrow$ život" je posredna. Hipoteza ne predviđa život - život je nusprodukt. Selekcija optimizuje proizvodnju crnih rupa, a dugovječne zvijezde i teška hemija tek slučajno prate iste uslove. Da se optimum crnih rupa i optimum života zaista poklapaju ostaje pretpostavka, a ne dokazan teorem i kritičari upravo tu najčešće napadaju. Moglo bi, naime, postojati podešavanje koje daje više crnih rupa, a manje zvijezda pogodnih za planete.

Daviesov prigovor je da selekcije, zapravo, nema. On upire prstom u najosjetljiviju tačku metafore. Smolinov model, primjećuje, sadrži nasljeđivanje i varijaciju, ali ne i pravu selekciju u darvinističkom smislu. Nema borbe za ograničene resurse, nema svemira koji "proždire" drugi svemir, nema natjecanja pod motom prirode "krvavih zuba i kandži". Ima samo diferencijalne plodnosti, a to je, strogo uzevši, bliže eksponencijalnom rastu bakterijske kulture u obilju hrane nego darvinovskom odabiru pod pritiskom oskudice. Metafora, dakle, možda vuče više nego što nosi: ono što Smolin naziva "prirodnom selekcijom" zapravo je "prirodno razmnožavanje", a to nije sasvim isto.

Susskind se sa Smolinom sporio decenijama. Spor nije o tome treba li teorija biti provjerljiva, nego o tome koliko strogo Smolin taj zahtjev primjenjuje. Susskind zastupa ideju string landscape-a - golemog skupa mogućih svemira (oko 10^{500}) koje dopušta teorija struna, svaki s drugačijim konstantama. Smolin tu ideju odbacuje kao neprovjerljivu, jer te druge svemire nikad ne možemo vidjeti.

Susskind uzvraća da je falsifikabilnost (mogućnost opovrgavanja) nepouzđano mjerilo. Mnoge ideje isprva odbačene kao "neprovjerljive" kasnije su potvrđene - kvarkovi (koji se nikad ne mogu izvući iz protona), inflacija, pa i Darwinova evolucija. "Nauka je konj koji vuče kola filozofije", kaže on onima koji se previše drže Popperovog pravila (teorija je naučna samo ako se može oboriti).

Ako je taj strogi kriterij dovoljan razlog da se odbaci "string landscape", onda istim tim kriterijem pada i Smolinova vlastita teorija, koja se jednako oslanja na svemire koje ne možemo vidjeti. Na kraju Susskind dodaje da pravo mjerilo ionako nije obaranje teorije, nego potvrda - pozitivan dokaz da je tačna.

5.6 Zašto je ideja lijepa čak i ako je pogrešna?

Vrijednost Smolinove ideje nije samo u tome hoće li se potvrditi, već u tome što je promijenila pitanje o tome zašto su zakoni i konstante prirode baš takvi. Umjesto odgovora koji podrazumijeva projektanta ili puku slučajnost, Smolin je ponudio evolucijski pristup: podešenost svemira možda ima historiju, nasljeđivanje i varijacije, slično kao evolucija u živom svijetu.

U knjizi "Time Reborn" tu je ideju proširio tvrdnjom da bi se kroz historiju mogli mijenjati čak i sami zakoni fizike. Njegova kosmološka prirodna selekcija (CNS) predstavlja konkretan pokušaj da se takva evolucija zakona opiše matematički.

Važno je da u toj slici život nije cilj svemira. Svemir ne teži stvaranju posmatrača; oni su samo posljedica procesa u kojem svemiri uspješni u stvaranju crnih rupa mogu imati određenu selekcijsku prednost.

Možda je Smolinova hipoteza pogrešna, ali njen značaj ostaje u tome što je na pitanje "zašto je svemir baš ovakav kakav jeste?" pokušala odgovoriti naučnim istraživanjem, a ne nekom pretpostavkom namjere.

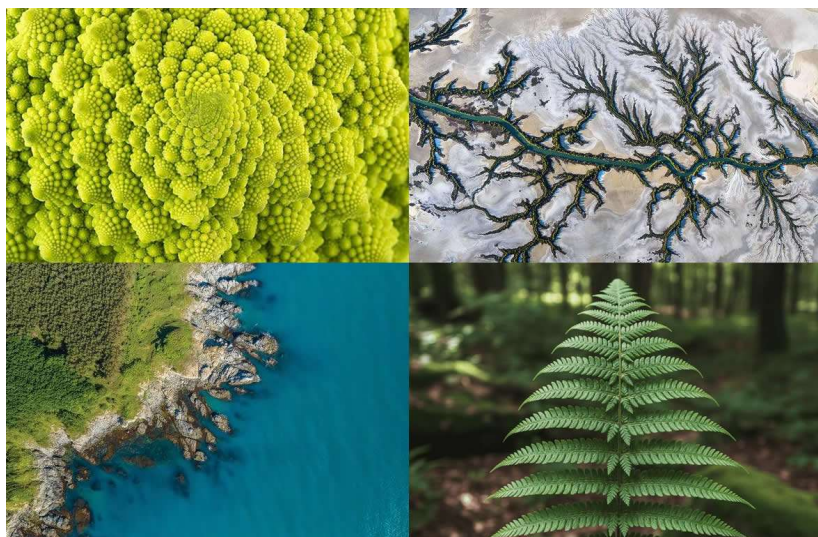
Literatura

- [1] Davies, P. (2006). The Goldilocks Enigma: Why Is the Universe Just Right for Life? London: Allen Lane.
- [2] Rees, M. (1999). Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe. London: Weidenfeld & Nicolson.
- [3] Smolin, L. (1992). Did the Universe Evolve? Classical and Quantum Gravity, 9(1), 173-191.
- [4] Smolin, L. (1997). The Life of the Cosmos. New York: Oxford University Press.
- [5] Smolin, L. (2006). The Status of Cosmological Natural Selection. arXiv:hep-th/0612185.
- [6] Smolin, L. (2013). Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe. Boston: Houghton Mifflin Harcourt.
- [7] Susskind, L. (2005). The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design. New York: Little, Brown.

6

Geometrija nepravilnog svijeta

"Oblaci nisu kugle, planine nisu kupe, obale nisu krugovi, a kora drveća nije glatka." (Benoît B. Mandelbrot)



Fraktalna geometrija počinje tamo gdje klasična geometrija više ne uspijeva opisati stvarni svijet. Oblaci, obale, planine, biljke, lomovi materijala i struktura svemira nisu sastavljeni od savršenih krugova, pravih i glatkih površina, već od nepravilnosti koje se ponavljaju kroz različite skale. Iza te prividne složenosti često se kriju jednostavna pravila, dok se iz prividnog nereda može pojaviti neočekivana pravilnost. Ovaj tekst prati tu zanimljivu vezu između jednostavnosti i složenosti u prirodi, od Mandelbrotovih fraktala i

matematičke dimenzije pa sve do haosa, prirode i inženjerskih primjena.

6.1 Pukotina u Euklidovom ogledalu

Postoji stara, pomalo nepravедna dosjetka da je matematika nauka koja pretvara kafu u teoreme. Fraktalna geometrija bila bi tada ona neobična grana koja je, umjesto teorema, počela proizvoditi slike, i to slike toliko uznemirujuće lijepe da su decenijama krasile korice udžbenika, postere studentskih domova i, povremeno, majice ljudi koji nikada nisu čuli za Hausdorffovu mjeru. No ispod te vizuelne raskoši krije se jedna ozbiljna i pomalo subverzivna misao, i upravo je ta misao, a ne slike, tema ovog teksta. Ona glasi: ugađena geometrija Euklida, geometrija tačaka bez dimenzije, pravih bez debljine i savršenih kružnica, jednostavno nije jezik kojim priroda govori.

Optužnicu je najsažetije formulisao Benoît Mandelbrot, čovjek koji je disciplini dao ime i lice: oblaci nisu sfere, planine nisu konusi, obale nisu kružnice, kora drveta nije glatka, niti munja putuje pravom linijom. Ta rečenica, kojom otvara knjigu "The Fractal Geometry of Nature", nije puka pjesnička dosjetka nego dijagnoza. Klasična geometrija, koju u školama predajemo kao vrhunac reda, zakazuje pred oblikom oblaka i obrisom planine, i to ne zbog manjka truda nego zbog pogrešnog polazišta. Ona pretpostavlja da je glatko normalno, a hrapavo izuzetak koji treba izglatiti. Cijela fraktalna geometrija počiva na obrnutoj slutnji: da je hrapavo pravilo, a glatko rijetka i gotovo neprimodna iznimka.

Postoje razne knjige o ovoj temi, od Mandelbrotovog manifesta, preko strogih matematičkih traktata Falconera te Pesina i Climenhage, radnih udžbenika Addisona i Feldmana, Barnsleyjevog kursa o iterisanim funkcijama, fizikalne monografije Federa, velike sinteze Peitgena, Jürgensa i Saupea, do dviju knjiga istog naslova, "The Beauty of Fractals", jedne slikovne (Peitgen i Richter) i jedne

interdisciplinarne (zbornik Gulicka i Scotta) - a razlikuju se po rigoroznosti, namijenjenoj publici i temperamentu. Ali čitane zajedno, one opisuju istu dilemu, i ta dilema je nit koja ih povezuje: dilema između krajnje jednostavnog pravila i krajnje složenog ishoda.

Ta raznolikost pristupa nije slabost nego prednost, jer pokazuje da nit izdržava provjeru iz posve različitih uglova. Isti pojam koji Falconer izvodi iz teorije mjere, Feder testira u laboratoriji, Barnsley pretvara u algoritam, Peitgen i Richter prevode u sliku, a Feldman objašnjava čitaocu koji strahuje od algebre, i svi dolaze do istog mjesta. Kad se jedna ideja može ispričati jezikom dokaza, jezikom eksperimenta, jezikom računara i jezikom slike, a da pritom ostane prepoznatljivo ista, to je znak da nismo pred pomodnim trikom nego pred istinskim pojmom.

6.2 Jednostavno pravilo, složeni ishod

Ako postoji jedna ideja koja fraktalnu geometriju čini cjelinom, a ne zbirkom lijepih kurioziteta, onda je to sljedeća: iznimno bogata, naizgled neiscrpna složenost može izrasti iz pravila koje stane u jedan red. Ta tvrdnja spaja objekte koji na prvi pogled nemaju ništa zajedničko: zupčastu Kochovu pahulju, paperjastu Barnsleyjevu paprat, beskonačno razučenu granicu Mandelbrotovog skupa, nazubljenu lomnu površinu metala, jer svi oni nastaju ponavljanjem jednostavne operacije na sve sitnijim skalama.

Odatle izvire i druga strana iste medalje, koja objašnjava zašto se fraktali i kaos tako uporno pojavljuju zajedno. Ako jednostavno determinističko pravilo može roditi beskonačno složen oblik u prostoru, onda isto takvo pravilo može roditi beskonačno složeno ponašanje u vremenu. Prvo zovemo fraktalom, drugo haosom, ali riječ je o istoj pojavi gledanoj iz dva ugla. Pesin i Climenhaga tu vezu uzimaju kao polazište, opisujući fraktale, dinamiku i kaos kao "trostruko uže" koje se ne da rasplesti, i pokazujući kako se orbite

tačaka pod nekim preslikavanjem mogu kodirati kao beskonačni nizovi simbola, čime geometrijski objekt i vremenski proces postaju dva zapisa istog sadržaja.

Ova nit ima i svoje naličje, jednako važno: ponekad red ne izranja iz jednostavnog pravila, nego se skriva u naizgled nesvodivom neredu. Obala, planinski greben ili raspored galaksija ne nastaju očiglednim ponavljanjem, a ipak posjeduju duboku pravilnost, istu vrstu hrapavosti na svakoj skali. Tu pravilnost nazivamo skalnom invarijantnošću ili samosličnošću. Zadatak fraktalne geometrije, u oba smjera, isti je: pronaći broj koji tu pravilnost hvata.

Vrijedi se zadržati na tome zašto je ta nit uopšte iznenađujuća. Naša intuicija, oblikovana euklidskim obrazovanjem, u osnovi poistovjećuje jednostavnost uzroka sa jednostavnošću posljedice: dakle, jednostavna jednačina, često mislimo, mora dati jednostavno ponašanje, a složena pojava mora imati složen uzrok. Fraktalna geometrija i teorija haosa zajednički su srušile tu pretpostavku. Pokazale su da između složenosti pravila i složenosti ishoda nema pouzdane srazmjere, da tri afine transformacije (matematičke transformacije koje mijenjaju položaj, veličinu, oblik ili orijentaciju nekog objekta, ali čuvaju prave linije i paralelnost) mogu opisati čitavu paprat, a da jedna kvadratna formula može roditi oblik koji nijedan čovjek ne bi mogao ni zamisliti ni iscrtati. Upravo taj raskorak, a ne same slike, čini disciplinu intelektualno uzbudljivom: on nas uči da je odsustvo vidljivog reda u nekoj pojavi loš dokaz za odsustvo jednostavnog zakona iza nje.

6.3 Broj koji mjeri hrapavost

Ono što fraktal opisuje jednim brojem je dimenzija, ali ne ona na koju smo navikli iz škole, gdje linija ima dimenziju 1, površina 2, a tijelo 3. Fraktali imaju dimenziju koja nije cijeli broj, i to zvuči čudno dok se ne vidi odakle dolazi.

Najlakše ju je razumjeti kroz Mandelbrotovo poznato pitanje: kolika je dužina obale Britanije? Ispostavlja se da odgovor zavisi od toga čime mjerite. Ako obalu mjerite dugim štapom (recimo 100 km), preskočit ćete sve male zaljeve i rtove i dobiti neku dužinu. Uzmete li kraći štap (10 km), uhvatit ćete i te manje uvale, pa će izmjerena dužina biti *veća*. Sa još kraćim štapom otkrit ćete još sitnije detalje, i dužina opet raste. I tako bez kraja - što je štap kraći, dužina je veća, i nikada se ne ustali na jednoj vrijednosti.

Zaključak je da obala nema jednu "pravu" dužinu. Ono što je kod nje stalno nije dužina, nego brzina kojom ta dužina raste dok smanjujemo štap. Upravo tu brzinu mjeri fraktalna dimenzija. Što je obala razvedenija, to dužina brže raste i dimenzija je veća. Za obalu Britanije ona iznosi oko 1,25 - pa je svaki podatak u enciklopediji tipa "obala je duga X kilometara" zapravo besmislen bez napomene kojim je štapom mjeren.

Kako se taj broj računa? Za jednostavne, pravilne fraktale postoji jasan recept. Ilustruju ga tri klasična primjera koji se ponavljaju u gotovo svakoj knjizi o fraktalima:

- Cantorov skup. Uzmete duž, izbacite srednju trećinu, pa iz svake preostale trećine opet izbacite srednju trećinu, i tako u nedogled. Ostane "prašina" tačkica koja ima ukupnu dužinu nula, ali ipak nije prazna. Njena dimenzija je oko 0,63 - dakle, između tačke (dimenzija 0) i linije (dimenzija 1).
- Kochova kriva. Radi obrnuto: umjesto da izbacuje, dodaje. Nad srednjom trećinom svake duži podigne trokutasti zub, pa to ponovi na svakom novom komadiću. Rezultat je kriva beskonačne dužine koja (zatvorena u Kochovu pahulju) ograđuje konačnu površinu, dimenzije 1,26 - gotovo ista kao kod obale, i to nije slučajnost.

- Sierpińskijev trokut. Iz trokuta izbacite srednji manji trokut, pa isto ponovite na tri preostala, i tako dalje. Dimenzija mu je oko 1,585.

Iza sva tri broja stoji jedna formula. Zamislite da je fraktal sastavljen od N umanjenih kopija samog sebe, gdje je svaka kopija r puta manja od cjeline. Tada je dimenzija:

$$D = \log N / \log(1/r)$$

Provjerimo na Sierpińskijevom trokutu: on se sastoji od 3 kopije ($N = 3$), a svaka je upola manja ($r = 1/2$). Uvrstimo: $D = \log 3 / \log 2 \approx 1,585$. To je sve. Formula, u suštini, mjeri koliko novih detalja iskrasne svaki put kad zavirimo dublje u objekt, a to je upravo ono što smo nazvali samosličnošću na svim skalama.

Ali tu je kvaka. Ova formula radi samo za savršeno pravilne fraktale, one koji su tačne kopije sebe. Stvarna obala ili planina nisu takve - one su nepravilne i tek približno samoslične. Za njih treba jače oruđe: Hausdorff-Besicovitcheva dimenzija, koju neki autori (Falconer, Pesin i Climenhaga) uzimaju kao temelj. Ona dimenziju mjeri posmatrajući kako se "količina" skupa mijenja dok ga pokrivamo sve sitnijim komadićima - složenije za izračunati, ali radi za bilo kakav, ma koliko divlji oblik.

Zanimljivo je da je i sam Mandelbrot, tražeći kratku definiciju, jedno vrijeme predlagao: fraktal je skup čija je Hausdorffova dimenzija veća od njegove obične (topološke) dimenzije. Kasnije je od te definicije odustao, jer je izbacivala neke oblike koje ipak osjećamo kao fraktale. To je dobar podsjetnik: fraktal nije pojam koji se da stegnuti u jednu formulu, nego prije porodična sličnost više osobina.

Za onoga ko fraktale želi ne samo razumjeti nego i izmjeriti, presudna je praktičnija rođaka Hausdorffove dimenzije - dimenzija brojanja kvadratića (eng. box-counting). Prostor se prekrije mrežom kvadratića stranice δ , prebroje se oni koje skup dodiruje, i posmatra

kako taj broj raste dok δ teži nuli. Manje je elegantna, ali se može izračunati iz slike ili eksperimentalnih podataka, pa je postala radni konj fizike i inženjerstva. Upravo ona je most kojim nit prelazi iz čiste matematike u laboratoriju.

Iza ove naizgled mladalačke discipline stoji, međutim, duga i pomalo nelagodna historija. Objekti koje danas slavimo kao fraktale - Cantorova prašina, Weierstrassova neprekidna a nigdje diferencijabilna funkcija, Peanova kriva koja ispunjava kvadrat, Kochova pahulja, Sierpińskijev trokut - matematičari su krajem 19. i početkom 20. stoljeća stvarali kao protivprimjere, kao "galeriju čudovišta" kojom su testirali granice pojmova neprekidnosti i dimenzije. Ti su objekti smatrani patološkim, gotovo nepristojnim, nečim što uredna analiza mora prognati. Mandelbrotov istinski prevrat nije bio izmišljanje novih oblika, nego preokret vrijednosnog suda: iste te "nakaze" proglasio je najvjernijim modelima stvarnosti. To je rijedak primjer naučne revolucije koja se nije dogodila otkrićem novih činjenica, nego promjenom pogleda na već poznate - i sama je nit, dakle, koliko matematička toliko i epistemološka.

6.4 Kako iz pravila izrasta oblik?

Najuvjerljiviji dokaz da složenost izvire iz jednostavnosti daje Barnsley, koji nas ne uči da fraktale otkrivamo, nego da ih pravimo, i to sa zapanjujuće malo sastojaka. Njegova knjiga otvara se rečenicom koja je postala gotovo legendarna: fraktalna geometrija će učiniti da sve gledate drukčije, i u daljem čitanju leži opasnost jer riskirate da zauvijek izgubite djetinji pogled na oblake, šume i lišće. Malo koji matematički udžbenik počinje upozorenjem da će vam trajno promijeniti percepciju svijeta, a Barnsley to čini bez trunke ironije, i, kako će se pokazati, s pravom.

Njegovo oruđe su sistemi iterisanih funkcija: mali skup jednostavnih transformacija, afinih preslikavanja koja ravan skupljaju, rotiraju i pomjeraju - koja, primijenjena iznova, neizbježno "usisaju" svaku

početnu sliku u jedan isti konačni oblik, atraktor. Da će se to dogoditi, garantuje teorema o kontrakciji; da je taj postupak upotrebljiv, pokazuje teorema kolaža: želite li modelirati list paprati, prekrijte ga sa nekoliko njegovih umanjenih kopija, očitajte transformacije i pustite ih da rade. Rezultat, čuvena Barnsleyjeva paprat, gotovo je nerazlučiv od stvarne biljke, a sav njen "genetski kod" staje u tabelu od dvadesetak brojeva. Tu nit dostiže svoj najčistiji izraz: beskonačna složenost oblika sažeta u šačicu parametara.

Da bi ta tvrdnja bila više od trika, ispod nje mora stajati ozbiljna matematika, i Barnsleyjev kurs je strpljivo gradi: prije nego što dođe do paprati, on uvodi metričke prostore, kompaktne skupove i sam prostor u kojem fraktali "žive", te dokazuje da je taj prostor potpun - tehnički preduslov bez kojeg teorema o kontrakciji ne bi imala uporišta. Poseban dragulj je ideja adresiranja: svaka tačka atraktora može se označiti beskonačnim nizom simbola koji bilježi kojom je transformacijom, u kom koraku, dosegnuta. Tako se geometrija prevodi u jezik simbola i gradi izravan most ka simboličkoj dinamici kojom Pesin i Climenhaga opisuju haos.

Iz te ideje slijedi zaključak koji je uzbudio čitavu jednu industriju: ako se složena slika opisuje sa nekoliko transformacija, onda se može i komprimirati. Fraktalna kompresija slika, koliko god se na kraju pokazala manje praktičnom nego što se devedesetih nadalo, izravan je potomak ove misli. Barnsley opisuje i igru haosa: nasumično bacanje "kockice" i skakanje po pravilima sistema, protiv svake intuicije, iscrta savršeno uređen fraktal. To je jedan od onih trenutaka gdje slučaj i red mijenjaju uloge, i time već nagovještava drugi smjer naše niti, u kojem će nasumičnost postati saveznik, a ne neprijatelj strukture.

Isti smjer, od pravila ka obliku, vodi i do najpoznatijih slika cijele discipline, ali ovaj put pravilo živi u kompleksnoj ravni. Mandelbrotov skup i Julijini skupovi nastaju beskrajnim

ponavljanjem operacije u kojoj se svaki naredni član dobija kvadriranjem prethodnog i dodavanjem konstante, a svaka tačka ravni boji prema tome koliko dugo "preživi" prije nego pobjegne u beskonačnost.

Peitgen i Richter tu strukturu ne nude kao dekoraciju nego kao vizuelni dokaz naše niti: iz jedne trivijalne formule izranja oblik neiscrpne dubine, u kojem se, koliko god zumirali, pojavljuju novi detalji i minijature kopije cijele figure. Njihova knjiga taj nalaz uokviruje gotovo filozofski, motom preuzetim od arhitekta Hundertwassera da je prava linija strana prirodi, i pozivom da se prevaziđe Galilejevo uvjerenje kako je knjiga prirode napisana jezikom trokutova i kružnica; možda je, sugerišu autori, napisana jezikom fraktala.

Vrijedi zastati nad jednom finesom koja Mandelbrotov skup čini više od lijepe slike: on je karta svih Julijinih skupova. Svakoj tački kompleksne ravni odgovara jedan Julijin skup, i baš prema tome je li ta tačka unutar ili izvan Mandelbrotovog skupa, pripadajući Julijin skup je povezan ili se raspada u prašinu. Jedna figura tako u sebi nosi popis beskonačno mnogo drugih, a njena razučena granica, gdje se povezano i nepovezano sudaraju, upravo je mjesto najveće složenosti.

To je nit dovedena do vrhunca: ne samo da jednostavno pravilo rađa složen oblik, nego taj oblik postaje atlas cijelog jednog svijeta oblika, uređen po jednako jednostavnom pravilu. Determinizam i neiscrpna složenost ovdje nisu suprotnosti, nego lica iste kovanice.

6.5 Kako iz nereda izranja pravilnost?

Savršena samosličnost Kochove pahulje ima jednu manu: priroda je gotovo nikada ne poštuje. Stvarna obala nije tačna kopija sebe pod uvećanjem, nego samo statistički slična: ima isti karakter hrapavosti, ali ne i identične detalje. Zato drugi smjer naše niti kreće od nereda, a ne od pravila, i pita se kako u toj naizgled čistoj slučajnosti opstaje

mjerljiva pravilnost. Odgovor su slučajni fraktali, u kojima se ponavljanje miješa s dozom nasumičnosti, dajući oblike koji izgledaju uvjerljivo prirodno upravo zato što nisu previše savršeni.

Paradigmatski primjer je Brownovo kretanje, nasumično titranje čestica u tekućini, čiji je trag fraktalna kriva dovoljno divlja da gotovo ispuni ravan. Njegova poopćenja, kojima upravlja Hurstov eksponent, postala su standardni način da se generišu umjetni planinski pejzaži, oblaci i tereni u računarskoj grafici - digitalne planine u filmovima i igrama izravni su potomci ove matematike. Ista ideja, pokazuje Mandelbrot, objašnjava raspored kratera na Mjesecu i grozdova galaksija; ista, u zborniku Gulicka i Scotta, oživljava digitalne pejzaže građene L-sistemima i pomjeranjem središnje tačke. Pouka je suptilna, ali za zajedničku nit presudna: samosličnost ne mora biti doslovna da bi bila stvarna - objekt može biti fraktalan "u prosjeku", i upravo ta statistička verzija čini fraktalnu geometriju upotrebljivom u svijetu u kojem savršenih nema kopija, ali obrazaca ima.

Nigdje se drugi smjer niti ne vidi jasnije nego u fizici, gdje Feder fraktale ne posmatra kao crteže ni kao apstraktne skupove, nego kao mjerljive osobine stvarnih procesa. Perkolacija - pitanje kada će tečnost proći kroz poroznu stijenu ili požar prijeći sa stabla na stablo - kod njega postaje škola fraktalnog mišljenja, jer se na kritičnoj tački iz čiste slučajnosti spontano formiraju grozdovi fraktalne strukture. Difuziono ograničena agregacija, kojom nastaju paperjaste naslage u elektrolizi ili pahulje, još je jedan primjer reda rođenog iz nasumičnog lutanja čestica. Feder popularizuje i R/S analizu kojom je hidrolog Hurst mjerio dugoročnu "pamtljivost" nivoa Nila, i time daje drugom smjeru niti ono što mu je najviše trebalo - postupak da se skrivena pravilnost izvuče iz podataka.

Fizikalni pogled donosi i važnu opomenu koju čisto geometrijski pristup lako predviđi: dimenzija sama ne iscrpljuje strukturu. Dva fraktala mogu dijeliti istu dimenziju a izgledati posve različito -

jedan zbijen, drugi prozračan i šupljikav. Mandelbrot je za tu razliku uveo pojam lakunarnosti, mjeru "šupljikavosti" koja hvata upravo ono što dimenzija ispušta. To je suptilan, ali za primjenu presudan uvid: kad fraktalnu analizu prenesemo na realni materijal ili sliku, jedan broj rijetko je dovoljan da opiše teksturu. Nit koju pratimo, dakle, nije obećanje da se svaka složenost svodi na jedan podatak, nego poziv da složenost mjerimo s onoliko brojeva koliko je pojava zaslužila.

6.6 Gdje se dva pravca spajaju?

Dva pravca niti, red iz pravila i red iz nereda, susreću se u pojmu haosa, i tu se najbolje vidi da su cijelo vrijeme bili jedan. Nijedan prikaz te veze ne može zaobići logističku jednačinu, naizgled djetinjast obrazac kojim se modelira rast populacije: sljedeća vrijednost dobija se množenjem trenutne s parametrom rasta i s onim što od kapaciteta sredine preostaje. Pesin i Climenhaga, Feldman i Peitgenova škola svi joj posvećuju prostor, jer u tom jednoredom pravilu živi cijela drama nelinearne dinamike. Za male vrijednosti parametra sistem se smiruje u jednu ravnotežu; kako parametar raste, ravnoteža se cijepa na dvije, četiri, osam vrijednosti kroz koje sistem beskonačno kruži.

Udvostručavanje se ubrzava po strogom obrascu, a omjer razmaka između uzastopnih cijepanja teži univerzalnoj konstanti koju je otkrio Feigenbaum - broju koji se, zapanjujuće, pojavljuje u čitavoj klasi naizgled nepovezanih sistema, ne mareći za njihove detalje. Iza kritične vrijednosti nastupa kaos: ponašanje koje se nikada ne ponavlja i pojačava svaku, i najmanju razliku u početnom stanju, čuveni "efekat leptira". A dijagram koji sve to prikazuje i sam je fraktal, prošaran "prozorima" reda usred haosa i minijaturnim kopijama vlastite strukture. Krug se zatvara: pratili smo kako iz pravila izrasta oblik i kako iz nereda izranja pravilnost, da bismo ovdje vidjeli kako su to bila dva imena za istu pojavu.

Najopipljiviji spoj geometrije i dinamike jeste pojam čudnog atraktora. Kad haotični sistem - recimo Lorenzov model konvekcije ili Hénonovo dvodimenzionalno preslikavanje - pustimo da radi dovoljno dugo, njegove tačke se skupe na skup koji nikad ne ispune u cijelosti a nikad ni ne napuste. Taj skup nije ni tačka, ni kriva, ni površina: on je fraktal, sa svojom necjelobrojnom dimenzijom. Drugim riječima, "oblik" na kojem haotičan proces provede vječnost i sam je fraktalan, pa se dvije teme koje smo dosad pratili odvojeno - geometrija skupova i dinamika procesa - ovdje stapaju u jedan objekt. Zato govoriti o fraktalima bez haosa, ili o haosu bez fraktala, znači ispričati samo pola priče; naša nit je od početka bila jedna.

Tu sintezu najpotpunije nudi obimna monografija Peitgena, Jürgensa i Saupea, koja na gotovo devet stotina stranica povezuje Cantorov skup i teoriju mjere, iterisane funkcije i Newtonove metode, bifurkacije i Mandelbrotov skup - i ništa ne ostavlja kao magiju, nego sve izvodi i, gdje god može, poveže s algoritmom koji čitalac sam isprobava. Posebno je poučan način na koji tretira granice bazena privlačenja Newtonove metode: pustimo li tu pitomu numeričku metodu za traženje nula u kompleksnu ravan, granica između područja koja vode ka različitim rješenjima ispada fraktalna, prošarana beskonačno finom strukturom - otrežnjujuća lekcija da čak i najkrotkiji algoritam može kriti divlju geometriju u svom rubnom ponašanju.

Do iste tačke vode i pristupačniji tekstovi, i vrijedi ih spomenuti jer pokazuju da nit nije rezervisana za matematičare. Addisonov ilustrovani kurs drži korisnu sredinu - dovoljno ozbiljan da uvede Hausdorffovu i "box-counting" dimenziju te odnos obima i površine, a dovoljno pristupačan da studenta ne obeshrabri, uz dragocjeno upozorenje na pogrešne procjene dimenzije koje nastaju nepromišljenom primjenom. Feldman ide još dalje u pristupačnosti, gradeći priču strpljivo i gotovo grafički za čitaoca koji algebru gleda bez naročite naklonosti, i dokazujući da se o dubokim stvarima može

pisati bez zastrašivanja. Oba, svaki na svojoj razini, vode čitaoca istom niti do istog uvida.

6.7 Nit u rukama inženjera

Za inženjera nit prestaje biti apstrakcija onog trenutka kad shvati da su lomne površine, tragovi zamora i raspodjele fragmenata suštinski fraktalni - dakle, da su i oni ishod procesa koji se ponavlja na sve sitnijim skalama. Kad se materijal razlomi, nova površina nije glatka nego hrapava na svim skalama, a njena fraktalna dimenzija korelira sa žilavošću: krti i duktilni materijali daju različite dimenzije loma. Ova grana, fraktografija, oslanja se upravo na alate koje Feder i Falconer sistematski izlažu: box-counting dimenziju, odnos obima i površine, procjenu eksponenata iz podataka, i time povezuje apstraktnu nit s dodirljivim komadom metala.

Još je poučnija primjena na fragmentaciju, raspad tijela pod visokoenergetskim opterećenjem. Raspodjela masa i veličina nastalih fragmenata često slijedi zakon stepena - onu bez-skalnu zavisnost koju Feldman uvodi kao potpis fraktalnog procesa, a Feder mjeri Hurstovim eksponentom. Klasične inženjerske formule za takve raspodjele empirijske su, ali kroz fraktalnu prizmu dobijaju dublje opravdanje: fragmentacija je hijerarhijski proces cijepanja koji se ponavlja na sve sitnijim skalama, pa je i geometrija njenog ishoda samoslična. Za onoga ko se bavi terminalnom balistikom i mehanikom fragmentacije, ove knjige nude neočekivano konzistentan okvir koji spaja mjerenje hrapavosti, statistiku fragmenata i modeliranje oštećenja u jedan jezik.

Uz to ide i upozorenje koje Addison ističe, a koje nit čuva od zloupotrebe: fraktalna dimenzija je moćna, ali podložna samoobmani. Procjena iz uskog raspona skala, iz šumovitih podataka ili iz slike loše rezolucije lako daje prividno uredan broj koji ne znači ništa. Ozbiljna primjena traži provjeru da linearnost u log-log grafiku postoji preko dovoljno redova veličine.

Postoji i suptilnija zamka, koja vodi do jednog od najplodnijih proširenja niti. Realne pojave - turbulencija, raspodjela naprezanja, tekstura loma - rijetko se pokoravaju jednoj jedinoj dimenziji; njihova hrapavost sama varira od mjesta do mjesta, pa ih tačnije opisuje čitav spektar dimenzija umjesto jednog broja. Taj multifraktalni pristup, koji Feder i Falconer nagovještavaju, priznaje da priroda nije uvijek uredno samoslična, nego "samoslična na više načina istovremeno".

Za inženjera to nije komplikacija radi komplikacije, nego vjernije oruđe: spektar dimenzija razlikuje materijale i procese koje bi jedan broj proglasio istovjetnima. Nit se time ne kida, nego razgranava - jednostavno pravilo skalne invarijantnosti pokazuje se dovoljno gipkim da obuhvati i slučajeve u kojima se pravilo mijenja od tačke do tačke.

6.8 Domet i granica

Ista nit proteže se od najmanjeg do najvećeg. U biologiji fraktalna dimenzija opisuje razgranatost neurona, bronhijalnog stabla i krvnih žila, dok se u geofizici i astronomiji slični obrasci pojavljuju u rasporedu galaksija, međuzvezdanim oblacima i turbulenciji plazme. U obradi signala i slika fraktalna analiza koristi se za proučavanje tekstura, otkrivanje anomalija i kompresiju. Malo koja matematička ideja obuhvata tako širok raspon - od pluća do ostataka supernove - polazeći od jednostavne pretpostavke da se određeni obrasci ponavljaju kroz različite skale.

Fraktalna ideja, međutim, ne završava na granicama nauke. Pojavljuje se i u književnosti, muzici, računarskoj umjetnosti i nastavi, što pokazuje koliko je koncept postao široko primjenjiv.

Ipak, nisu svi nepravilni oblici fraktalni. Samosličnost stvarnih objekata postoji samo kroz ograničen raspon skala, a fraktalna dimenzija je prije svega opisni alat - govori kako je nešto strukturirano, ali ne nužno i zašto. Zrelost discipline upravo se

ogleda u tome što je od početne ideje da je "sve fraktalno" nastao precizniji alat s jasno određenim granicama.

I kada jednom u planini, paprati, Mandelbrotovom skupu ili lomnoj površini metala prepoznamo sličnu logiku, teško je svijet ponovo gledati na isti način. Fraktalna geometrija nije nam dala nove stvari za gledanje, dala nam je novi način da vidimo one koje su oduvijek bile pred nama.

Literatura

- [1] Feldman, D. P. (2012). *Chaos and Fractals: An Elementary Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- [2] Peitgen, H.-O., Jürgens, H., & Saupe, D. (2004). *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science* (2. izd.). New York: Springer.
- [3] Falconer, K. (2003). *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications* (2. izd.). Chichester: John Wiley & Sons.
- [4] Feder, J. (1988). *Fractals*. New York: Plenum Press.
- [5] Addison, P. S. (1997). *Fractals and Chaos: An Illustrated Course*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- [6] Barnsley, M. F. (1988). *Fractals Everywhere*. Boston: Academic Press.
- [7] Gulick, D., & Scott, J. (ur.) (2010). *The Beauty of Fractals: Six Different Views*. Washington, DC: Mathematical Association of America.
- [8] Peitgen, H.-O., & Richter, P. H. (1986). *The Beauty of Fractals: Images of Complex Dynamical Systems*. Berlin: Springer.
- [9] Mandelbrot, B. B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W. H. Freeman.
- [10] Pesin, Y., & Climenhaga, V. (2009). *Lectures on Fractal Geometry and Dynamical Systems*. Providence, RI: American Mathematical Society.

7

Fermijev paradoks

"Postoje dvije mogućnosti: ili smo sami u svemiru, ili nismo. Obje su podjednako zastrašujuće." (Arthur C. Clarke)



Fermijev paradoks počinje jednostavnim pitanjem koje krije jednu od najvećih zagonetki savremene astronomije: "ako je svemir toliko velik, star i bogat zvijezdama, gdje su svi vanzemaljci?" Milijarde zvijezda i planeta, kao i ogromna starost kosmosa, naizgled ostavljaju dovoljno vremena i prostora za nastanak brojnih civilizacija. Ipak, uprkos decenijama traganja, za sada nemamo potvrđen dokaz ni o jednoj vanzemaljskoj civilizaciji, niti o njihovom prisustvu. U ovom tekstu razmatramo različita moguća objašnjenja te velike kosmičke tišine - od mogućnosti da civilizacije postoje, ali ne komuniciraju s nama, do ideje da je inteligentan život

mного rjeđi nego što pretpostavljamo. Upravo taj sukob između ogromnog broja mogućnosti i potpunog nedostatka dokaza čini Fermijevo pitanje toliko snažnim: "ako bi trebali biti svuda oko nas, zašto ih još uvijek nigdje ne vidimo?"

7.1 Jedno pitanje postavljeno za ručkom

Ljeto 1950, Los Alamos. Fermi s nekoliko kolega, Tellerom, Yorkom i Konopinskim, ide na ručak, a uz put raspravljaju o dvije tada popularne teme: izvještajima o letećim tanjirima i o duhovitoj karikaturi iz lista The New Yorker koja je nestanak gradskih kanti za smeće šaljivo pripisala vanzemalcima. Razgovor je odlutao na to mogu li tanjiri putovati brže od svjetlosti, potom na svakodnevne stvari, i onda je Fermi, sasvim iznabuha, usred jela upitao: "A gdje su svi oni?"

Društvo je odmah shvatilo da misli na vanzemaljce. I pošto je pitanje postavio baš Fermi, vjerovatno su osjetili da je mnogo dublje nego što zvuči. York se sjeća da je Fermi na brzinu izveo nekoliko proračuna i zaključio da je davno trebalo da nas neko posjeti - i to ne jednom. Iako te račune nikad nije objavio, možemo naslutiti šta su sadržali: procjenu broja civilizacija u galaksiji. A to je, kao što ćemo vidjeti, tipično fermijevo pitanje.

Riječ "paradoks" dolazi od grčkih para ("nasuprot") i doksa ("mišljenje") - situacija u kojoj uz jedno tumačenje uporno stoji i ono suprotno. I upravo to je srž stvari: paradoks nije u tvrdnji da vanzemaljci ne postoje, nego u tome da ne vidimo nijedan jedini znak njihovog postojanja, iako bismo ga po svemu očekivali.

7.2 Zašto bi ih uopšte trebalo biti?

Starost svemira i nezamisliv broj zvijezda nagovještavaju da bi vanzemaljski život trebao biti sasvim uobičajena pojava. U našoj galaksiji vjerovatno ima barem 200 milijardi zvijezda, a u kosmosu je galaksija otprilike koliko i zvijezda u jednoj galaksiji. Još od

Kopernika nauka nas uči da Zemlja nije ništa posebno, pa slijedi da teško da može biti jedini dom inteligentnog života.

Zamislimo, dakle, da galaksija vrvi od vanzemaljskih civilizacija - skraćeno VZC. Pošto je galaksija izuzetno stara, velike su šanse da su neke od njih milionima, pa i milijardama godina ispred nas. Ruski astrofizičar Nikolaj Kardašev ponudio je zgodan način razmišljanja o tako naprednim društvima, svrstavši ih po tome kojom energijom raspolažu: civilizacija tipa K1 iskorištava energetske resurse vlastite planete (otprilike naš nivo); K2 ovladava energijom cijele svoje zvijezde; a K3 raspolaže energijom čitave galaksije. Prema nekim autorima, većina VZC trebala bi odgovarati tipovima K2 i K3.

A tu je i kvaka koja pravi paradoks. Sav zemaljski život ima urođenu sklonost da se raširi u svaki raspoloživi kutak. Zašto bi vanzemaljski bio drugačiji? Napredne civilizacije nesumnjivo bi željele da se sa matičnih svjetova prošire galaksijom, a tehnološki dovoljno zrelo društvo moglo bi to izvesti za svega nekoliko miliona godina. Vanzemaljci bi, dakle, već davno trebali biti ovdje. Galaksija bi trebala biti krcata životom. A ipak, ne vidimo ni trunke dokaza.

7.3 Kosmos sabijen u jednu godinu

Da bismo osjetili razmjere problema, korisno je cijelu historiju kosmosa (nešto više od 13 milijardi godina) sabiti u jednu "univerzalnu godinu" od 365 dana. Na toj skali jedna sekunda odgovara oko 400 stvarnih godina. Cijela zapadna nauka staje u posljednju sekundu prije ponoći 31. decembra, a čitava historija naše vrste u manje od sat vremena. Najranije civilizacije, međutim, mogle su se začeti već u proljetnim mjesecima univerzalne godine. Ako se galaksija može kolonizovati za ekvivalent svega nekoliko sati, neko je taj posao trebao odavno završiti. Kosmos, ipak, ostaje nijem i što više o njemu razmišljamo, paradoks izgleda značajniji.

Sušтина, dakle, leži u nadmetanju dva velika broja: ogromnog broja lokacija potencijalno pogodnih za život i ogromne starosti kosmosa.

Ako prihvatimo princip osrednjosti - da Zemlja ni po čemu nije posebna - slijedi da u galaksiji postoje milioni pogodnih mjesta (a u kosmosu milijarde). Uz toliko prilika i toliko vremena, život bi morao biti notorna činjenica. A kosmos, uprkos svemu, izgleda mrtav.

7.4 Tri moguća scenarija

Iako je raspon predloženih odgovora fascinant, svi se u principu svode na jedan od tri scenarija i svaki je, na svoj način, pomalo zastrašujući:

- Prvi, vanzemaljci su već ovdje (ili su bili), a mi to iz ovog ili onog razloga ne znamo.
- Drugi, vanzemaljci postoje, ali se, bar zasad, nisu javili.
- Treći, vanzemaljaca naprosto nema; ne primamo signale zato što nema koga da ih šalje.

Britanski fizičar Stephen Webb sabrao je predložena rješenja u nekoliko ideja koje prate ove scenarije. Proći ćemo kroz njih sažeto, ali prije toga, ipak, vrijedi upoznati čovjeka po kojem paradoks nosi ime, i jednačinu koja mu je dala matematički oblik.

7.5 Čovjek iza pitanja

Enrico Fermi (1901-1954) bio je vjerovatno najkompletniji fizičar dvadesetog vijeka, vrhunski teoretičar i istovremeno prvoklasni eksperimentator. Ta kombinacija danas je gotovo izumrla, jer se nauka previše proširila da bi je jedan čovjek mogao obuhvatiti.

Rođen u Rimu, već kao student u Pizi nadmašio je vlastite profesore. Po njemu su nazvane osnovne čestice materije - fermioni. Njegova teorija beta-raspada uvela je u fiziku "avetinjsku" česticu koju je duhovito nazvao neutrino, "neutralni mališa"; postojanje neutrina eksperimentalno je potvrđeno tek 1956. Za tehniku sondiranja atomskog jezgra i za metodu usporavanja neutrona, ključnu za rad nuklearnih reaktora, dobio je Nobelovu nagradu 1938.

Zbog Mussolinijevih antisemitskih zakona, koji su pogađali njegovu suprugu Lauru, Fermi je emigrirao u Ameriku i postao jedan od nosilaca projekta Manhattan. Dana 2. decembra 1942, u improvizovanoj laboratoriji ispod tribina čikaškog stadiona, njegova grupa je izvela prvu samoodrživu nuklearnu lančanu reakciju.

Jedan detalj savršeno ga opisuje. Pri probi Trinity 1945, ležeći petnaestak kilometara od nulte tačke, nakon eksplozije je pustio pregršt papirića u zrak i po njihovom horizontalnom pomaku od udarnog talasa na licu mjesta procijenio oslobođenu energiju. Ista strast pratila ga je do samog kraja: na samrti je štopericom mjerio protok vlastite infuzije brojeći kapi. Umro je 1954, u 54. godini života.

Ostavio je i pedagoško nasljeđe - takozvana "fermijevska pitanja", naizgled nemoguća pitanja poput "Koliko zrna pijeska ima na svim plažama svijeta?" ili "Koliko atoma iz posljednjeg Cezarovog daha udahnete sa svakim udisajem?". Njima je učio studente da rezultat procijene iz zdravog razuma i iskustva, a ne iz udžbenika. Pitanje "Koliko naprednih civilizacija postoji u galaksiji?" upravo je takvo.

7.6 Jednačina koja broji svjetove

Fermijev usputni proračun danas je formalizovan kao Drakeova jednačina, po radioastronomu Franku Drakeu koji ju je formulisao 1961. godine: $N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_i \cdot f_l \cdot f_c \cdot L$. Ovdje je N broj civilizacija sposobnih za komunikaciju, R godišnja stopa nastanka zvijezda, f_p udio zvijezda s planetama, n_e broj planeta pogodnih za život po sistemu, f_i udio na kojima život zaista nastane, f_l udio na kojima se razvije inteligencija, f_c udio koji razvije komunikacijsku kulturu, a L trajanje te komunikacijske faze.

Ljepota jednačine je u tome što daje uredan okvir; problem je u tome što je stepen našeg neznanja o pojedinim faktorima dramatično neujednačen. Kada astronome upitate za vrijednosti, odgovori idu od

"prilično smo sigurni" (za R), preko "na putu smo da to riješimo" (za f_p), pa sve do iskrenog "kako, dovraga, to da znamo?" (za L).

Fermi je 1950. mogao znati mnogo manje, ali je ipak mogao inteligentno nagađati - vođen, kao i uvijek, principom osrednjosti. Uz razumne, blago optimistične vrijednosti - pola zvijezda ima planete, život redovno prelazi u inteligenciju, civilizacije komuniciraju milion godina - jednačina lako daje N oko milion. Milion civilizacija koje bi upravo sada mogle pokušavati da nas dozovu. Pa zašto ih ne primjećujemo? I, još gore, zašto već nisu ovdje?

7.7 Oni su već ovdje

Ovo je vjerovatno najpopularnija kategorija u javnosti, jer je vjera u inteligentni vanzemaljski život vrlo raširena - ankete redovno pokazuju da velika većina ljudi vjeruje u život negdje u kosmosu. Nauka, međutim, nije demokratski proces: hipoteza se ne potvrđuje glasanjem, nego time koliko činjenica objašnjava uz najmanje pretpostavki, i može li izdržati ozbiljno preispitivanje.

Stara šala iz Los Alamosa je da su vanzemaljci ovdje i da žive u Mađarskoj. Budući da su mnogi vrhunski fizičari tog doba bili Mađari - Szilard, Wigner, Teller, von Neumann i drugi - kolege su se šalili da su vanzemaljci sletjeli i naselili Mađarsku: govorili su neobičnim jezikom (mađarski je uistinu čudan, srodan finskom), voljeli su lutati i bili su natprosječno inteligentni. Zabavno, ali kao rješenje teško.

Šta ako su vanzemaljci tu, ali se ne miješaju u naše poslove? Ako su leteći tanjiri stvarni svemirski brodovi, paradoks je odmah riješen i zato ovo rješenje uživa najveću podršku javnosti. Problem je što izuzetne tvrdnje nikad ne dolaze s izuzetnim dokazima.

Korisno je razlikovati neutralan pojam NLO (neidentifikovani leteći objekat) od "letećeg tanjira": gotovo svaki NLO nakon ispitivanja postane ILO - identifikovani objekat. Iza njih se najčešće kriju

Venera, avioni, meteori i rijetke atmosferske pojave (fatamorgana i sl.), a povremeno i sasvim prozaične stvari - jedno "misteriozno svjetlo" ispostavilo se kao loptica za golf koja je slučajno dospjela u vatru. Priče o otmicama i "autopsijama" iz Roswella redovno se svode na laži i unosne prevare. Popularno - da; uvjerljivo - ne.

Šta, s druge strane, ako su bili ovdje i ostavili tragove? Možda nisu skoro, ali su možda posjetili Sunčev sistem ranije? Tunguska, događaj iz 1908, pokazao se kao eksplozija meteoroida u atmosferi; von Dänikenove tvrdnje da su vanzemaljci gradili Stonehenge, crteže u Nasci i kipove na Uskršnjem otoku nisu sadržavale nijedan dokaz (autor je, uzgred, dio publiciteta stekao dok je zbog prevare izdržavao zatvorsku kaznu). "Lice na Marsu" koje je Viking snimio 1976. ispalo je kao igra svjetla i sjene na jednom brdu; kanali na Marsu bili su optička varka i greška u prijevodu, a Šklovskijeva ideja da je Fobos vještački satelit pala je pred saznanjem da je riječ o zarobljenom asteroidu. Sve se, redom, objasnilo prirodnim uzrocima.

Jedna ideja kaže da smo mi vanzemaljci (panspermija). Možda je život započeo negdje drugdje pa nekako stigao do Zemlje. Ideja panspermije stara je koliko i Anaksagora, a privlačna je jer uklanja problem vremena - objašnjava gotovo nepristojnu brzinu kojom se život pojavio na mladoj Zemlji. Klasična verzija (spore koje kroz kosmos putuju pod pritiskom zvjezdane svjetlosti) pala je jer teško da bi spora preživjela smrtonosno zračenje. Godine 1973. Crick i Orgel su ponudili usmjerenu panspermiju - namjerno zasijavanje pogodnih planeta sondama koje šalje neka drevna civilizacija. Zanimljiva ideja, ali izuzetno teško provjerljiva: kako, milijardu godina kasnije, razlikovati život iz primordijalne supe od onog stiglog u sondi?

Postoji i scenario zoološkog vrta. John Ball je predložio da su napredne VZC sveprisutne, ali nas jednostavno posmatraju, ostavljajući Zemlju kao svojevrsni galaktički nacionalni park - baš kao što mi omeđujemo prirodne rezervate (podsjeća na "Vrhunsku

direktivu" iz Zvezdanih staza). Martin Fogg je to proširio u "scenario zabrane", u kojem čitav Galaktički klub poštuje dogovoreni Codex Galactica da se ne miješa ni u jednu životvornu planetu. Glavna slabost oba scenarija: nisu provjerljivi i traže nevjerovatnu jednoobraznost ponašanja kroz milione godina. Dovoljno je da jedna nedisciplinovana civilizacija proviri u naš "kavez" pa da sve padne. Kako slikovito reče Webb: "McDonald's je možda osvojio svijet, ali nikad neće osvojiti galaksiju."

Zanimljiva je hipoteza planetarijuma (živimo u simulaciji). Stephen Baxter pita: šta ako je naš svijet samo simulacija, "planetarijum" podešen da nam pruži iluziju praznog kosmosa? Za razliku od prethodnih, ova ideja nudi provjerljivo predviđanje.

Savršena simulacija zahtijeva ogromne količine energije i informacija; prema Bekensteinovoj granici, civilizacija tipa K3 mogla bi savršeno simulirati sferu poluprečnika oko 100 astronomskih jedinica. Ako naše sonde odu dovoljno daleko izvan Plutona i naiđu na nekonsistentnosti - igra je gotova za konstruktore planetarijuma. Ockhamova britva nas ipak podsjeća da je jednostavnije (i vjerovatnije) pretpostaviti da je kosmos stvaran.

Šta ako Bog postoji? Pošto su VZC toliko naprednije, skloni smo ih zamišljati kao gotovo božanska bića; njihova tehnologija bila bi, kako reče Clarke, nerazlučiva od magije. Postoji i spekulacija iz teorijske fizike: ako "teorija svega" dopušta mnoštvo kosmosa s različitim konstantama, možda je jedan od njih (naš) izgradila neka civilizacija.

Lee Smolin je ponudio evolucijsku sliku - kosmosi se "razmnožavaju" preko crnih rupa, pa vremenom prevladavaju oni podešeni za nastanak crnih rupa (a time i zvijezda, hemije i, uzgred, života). Edward Harrison je otišao korak dalje: možda je naš kosmos namjerno stvorila neka civilizacija u laboratoriji unutar drugog kosmosa. Fascinantno, ali zasad bez dokaza.

7.8 Oni postoje, ali još uvijek šute

Najjednostavniji odgovor: rastojanja su prevelika, zvijezde i galaksije su predaleko. Napustiti Sunčev sistem nije problem - Voyager 1 to već čini - ali užasno sporo. Njemu bi do najbliže zvijezde trebalo oko 73000 godina. Da bismo stigli u razumnom roku, potrebna je brzina koja je značajan udio brzine svjetlosti c . Pri 0,1 c do Epsilon Eridani ide se stotinjak godina; pri 0,999 c posada bi zbog relativističke dilatacije vremena putovala samo 171 dan, iako bi na Zemlji prošlo više od deset godina.

Predloženo je mnogo pogona, od generacijskih brodova i kontrolisanog vegetiranja posade, preko jonskih, fuzionih i antimaterijskih raketa, Bussardovog fuzionog protočno-mlaznog motora i Forwardovih laserskih jedara, sve do egzotike koja načelno ne krši fiziku: tahiona (za sada čisto hipotetičnih), crvotočina, Alcubierreovog "warp" pogona (za koji bi trebalo više negativne energije nego što ima pozitivne energije u čitavom vidljivom kosmosu) i energije nulte tačke. Zaključak: zvijezde jesu daleko, ali to objašnjava samo zašto nas nisu posjetili - ne i zašto ne čujemo nijedan njihov signal.

Šta ako vanzemaljci nisu imali vremena? Uobičajena prva reakcija glasi: "pa nije bilo dovoljno vremena da nas dosegnu." Michael Hart je pokazao da to ne stoji: čak i uz umjerene pretpostavke, talas kolonizacije širio bi se brzo galaksijom (tu je milion godina treptaj na kosmičkoj skali).

Sagan je prigovorio da front kolonizacije ne mora ići brzinom pojedinačnog broda ("Rim nije sagrađen za jedan dan, iako ga pješice pređete za nekoliko sati"), pa su drugi razvili složenije modele (Jones, Newman i Sagan, Crawford, Fogg) s vremenima od nekoliko miliona do najviše pola milijarde godina. Ipak, i najsporije procjene prekratke su da posluže kao objašnjenje: na kosmičkoj skali front kroz galaksiju putuje kao munja.

Perkolacioni pristup je zanimljiv. Jeffrey Landis je ponudio elegantniju sliku. Ako je putovanje teško, svaka civilizacija kolonizuje tek nekoliko obližnjih zvijezda, kolonije razvijaju vlastite kulture, a neke od njih izgube poriv za daljim širenjem. Matematički, to je klasičan problem perkolacije - isti onaj koji opisuje cijeđenje vrele vode kroz sloj mljevene kafe. Rezultat je kolonizacija nalik švicarskom siru: civilizacije se šire, ali za sobom ostavljaju prazne rupe. Možda mi jednostavno živimo u jednoj takvoj rupi.

Umjesto da putuju sami, vanzemaljci bi možda mogli poslati tzv. samoreprodukujuće sonde. Ideju samoreprodukujućeg automata razvio je von Neumann; usput je shvatio da smo i mi sami takvi automati - DNK igra ulogu programa, a proteini ulogu konstruktora. Takva sonda na svakoj zvijezdi od dostupnog materijala pravi vlastite kopije i šalje ih dalje, pa se galaksija napuni za nekoliko miliona godina, jeftino i po sistemu "posao dalje preuzima sama galaksija". Ključno: ovo NE rješava paradoks - ono ga čak pojačava. Ako sonde postoje, gdje su? Ne vidimo ni vanzemaljce ni njihove naprave.

Mi smo solarni šovinisti i možda pogrešno pretpostavljamo da su najvažnija mjesta baš zvijezde poput Sunca i planete poput Zemlje. Napredna civilizacija mogla bi radije naseliti okoline blistavih zvijezda tipa O, koje isijavaju i do 800000 puta više energije od Sunca; graditi Dysonove sfere oko zvijezda; ili crpiti energiju iz crnih rupa i kvantnog vakuuma, ne osjećajući nikakvu potrebu da kroče na površinu ijedne planete. Ako je tako, naše skromno žuto Sunce ih naprosto ne zanima.

Možda vanzemaljci ostaju kod kuće ili surfaju internetom. Možda ih drži apatija i ekonomija: mi sami nismo hodali po Mjesecu od 1972. S druge strane, dugoročno postoji jak razlog za širenje - vrsta koja sva jaja drži u jednoj planetarnoj korpi riskira da postane kajgana (asteroid, supervulkan, umiranje vlastite zvijezde). Srodna, "ugodno prihvatljiva" ideja jeste da VZC sjede kod kuće uronjene u savršenu

virtuelnu stvarnost koja ih zanima više od stvarne - pomalo kao mi pred ekranima, samo mnogo uvjerljivije. Ali zašto bi baš svaka civilizacija odabrala pasivnost?

Šta ako VZC šalje signale, ali ih ne znamo uhvatiti? Možda naprosto ne znamo kako slušati. Radio-inženjer iz 1939. ne bi ni sanjao o laserima, optičkim vlaknima ili mobilnoj telefoniji. Ipak, elektromagnetni talasi ostaju logičan izbor: putuju brzinom c , jeftino se proizvode i lako primaju. Gravitacioni talasi su preslabi i preteški za detekciju, snopovi čestica nepouzdati (kosmička magnetna polja im iskrive putanju), neutrini gotovo neuhvatljivi, a tahioni hipotetični. Zato većina fizičara smatra da ipak znamo gdje gledati - u EM spektar.

Možda ne znamo na kojoj su frekvenciji VZC. EM spektar je golem. Morrison i Drake su potragu suzili na "tiho" područje između 1 i 10 GHz, gdje ni galaktički šum ni Zemljina atmosfera ne zaglušuju signal. Poseban značaj imaju linija H (1,42 GHz) i OH (oko 1,66 GHz) - a pošto H i OH zajedno grade vodu, područje između njih dobilo je nadimak "lokva" (pojilo), uz sliku raznih vrsta koje se okupljaju na zajedničkom izvoru života. Drakeov projekat Ozma bio je prva takva potraga čovječanstva.

Šta ako je signal skriven u podacima? Možda treba ciljati pojedine zvijezde ili češljati široka područja neba. Analize pokazuju da je za rijetke, ali snažne izvore isplativije široko pretraživanje. Za međugalaktičku komunikaciju postoji i "prirodna" frekvencija od 56,8 GHz, vezana za temperaturu kosmičkog pozadinskog zračenja (nažalost, kisik u našoj atmosferi je baš tu apsorbuje). Projekti poput META, BETA, Serendipity, Phoenix i SETI@home pretražili su milione i milijarde kanala. Slavni signal "Wow!" iz 1977. nikad se nije ponovio, a porijeklo mu je i danas sporno (predlagane su zemaljske smetnje i kometa, a analiza iz 2024. upućuje na naglo posvjetljenje oblaka vodika). Rezultat nakon više od šest decenija: milijarde kanala, a na njima - bar zasad - ništa. Zagovornici SETI-ja

s pravom kažu da nismo slušali dovoljno dugo; skeptici uzvraćaju da su dokazi trebali biti tu davno prije nego što smo se i počeli pitati.

Zanimljiva je i ideja da svi slušaju, a niko ne emituje. Poslati signal mnogo je teže i skuplje nego ga primiti. Izotropno emitovanje (jednako u svim smjerovima) tražilo bi više energije nego što je danas proizvodi cijeli svijet; usmjereno je jeftino, ali gotovo sigurno promašuje - igla u plastu sijena je dječija igra prema šansi da uzak snop slučajno pogodi nečiji prijemnik. Naše radio i TV emisije cure u kosmos, ali su preslabe da bi ih iko uhvatio dalje od Plutona (a i smanjuju se s prelaskom na kabl i satelit). Čovječanstvo je namjerno poslalo tek nekoliko poruka (najpoznatija je Arecibo 1974. ka zvjezdanom jatu M13). Možda su, dakle, svi u istoj nedoumici - pa svi slušaju, a niko ne progovara prvi.

Ima i mračnijih i egzotičnijih ideja. Berserkeri (po nordijskim ratnicima bez straha i milosti) su hipotetske samoreprodukujuće ubilačke mašine - paranoidne von Neumannove sonde - koje uništavaju svaki život. Ali i one pate od vlastitog paradoksa: ako postoje, kako smo mi još tu? Drugi predlažu da VZC koriste toliko drukčiju matematiku, ili poruke kodirane s takvom efikasnošću, da ih ne razaznajemo od zračenja crnog tijela. Treći nude čiste SF-scenarije: telepatiju, prelazak u nefizička stanja, putovanje kroz paralelne kosmose. Zabavno za priče, ali kao rješenja paradoksa neuvjerljivo, jer traže da se baš sve civilizacije ponašaju jednako.

Možda je faktor L (trajanje komunikacijske faze) mali zato što se civilizacije same unište. Kandidati su brojni: nuklearni rat, prenaseljenost, "sivi mulj" odbjeglih samoreplikujućih nanobota (koji bi, u najgorem slučaju, biosferu mogli pretvoriti u kašu za nekoliko sati), pa i katastrofe iz fizike čestica - crne rupe, urušavanje vakuuma. Sve te bojazni, treba reći, trezveni proračuni redom smiruju: priroda kosmičkim zracima milijardama godina izvodi mnogo žešće "eksperimente" od naših akceleratora, pa da je katastrofa moguća, odavno bi se dogodila.

Tu je i Gottov argument "delta t", koji iz same činjenice da smo posmatrači u slučajnom trenutku procjenjuje životni vijek naše vrste na, s 95% pouzdanosti, negdje između nekoliko hiljada i nekoliko miliona godina. Isti tip razmišljanja Gott primjenjuje i na Berlinski zid, i na brakove, i na samu galaktičku inteligenciju. Ključno pitanje ostaje: da li je katastrofa doista neizbježna za baš svaku civilizaciju?

Vernor Vinge je predvidio "singularnost" - trenutak kada inteligentne mašine počnu praviti sve inteligentnije mašine, s ishodom koji ne možemo ni zamisliti. Možda su sve VZC nestale u njoj, postavši nepojmljive. Ali i to prije pojačava paradoks: superinteligencija bi galaksiju kolonizovala još brže i efikasnije. Asimov je u priči "Sumrak" dočarao drugu ideju - civilizaciju kojoj vječno svjetlo šest sunaca skriva zvijezde, pa nikad ni ne pomišlja na kosmos izvan svoje planete. Nezamislivo je, međutim, da bi baš sve naseljive planete imale nebo trajno zastrto oblacima ili sjajem.

7.9 Vanzemaljaca uopće nema

Treća, najhladnija mogućnost je da ne primamo signale zato što nema koga da ih šalje. Ova grupa rješenja pokušava objasniti zašto bi Zemlja mogla biti izuzetno rijedak - možda i jedinstven - slučaj.

Na putu do tehničke civilizacije stoji niz kritičnih i malo vjerovatnih koraka: nastanak života, prelazak s prokariota na eukariote, višćelijski život, upotreba oruđa, simbolički jezik. Evolucionisti biolog Ernst Mayr nabrojao ih je više od deset. Brandon Carter je uz to primijetio i uznemirujuću podudarnost: životni vijek Sunca i vrijeme potrebno da se pojavi inteligencija skoro su jednaki, iako ih određuju potpuno nezavisni procesi (gravitacija i nuklearna fizika s jedne, hemija i evolucija s druge strane). Objašnjenje: mi neizbježno vidimo baš onaj kosmos u kojem su se ti teški koraci sretno poklopili. Uz, recimo, dvanaest teških koraka, jednostavan račun daje zastrašujuće malu vjerovatnoću da se druga inteligentna vrsta pojavi igdje u vidljivom kosmosu - pa nije ni čudo što ih ne vidimo.

Mario Livio je povezao trajanje biološke evolucije sa životnim vijekom zvijezde (preko vremena potrebnog da se razvije zaštitni ozonski sloj) i zaključio da bi VZC mogle nastati tek kada kosmos napuni desetak milijardi godina - dakle, da nas nijedna ne prethodi za više od tri milijarde godina. Ali čak i tri milijarde godina prednosti daju obilje vremena za kolonizaciju galaksije, pa ovo, samo za sebe, ne rješava paradoks.

Nekad se mislilo da planetarni sistemi nastaju samo u rijetkim bliskim susretima zvijezda. Ta je ideja odbačena: danas znamo za hiljade egzoplaneta, protoplanetarne diskove i direktno posmatramo, a zna se i kako je mlado Sunce magnetnom "kočnicom" predalo veći dio ugaonog momenta okolnom disku. Srodan prijedlog - da su stjenovite, metalima bogate planete rijetke (npr. teorija da su hondrule i naš planetarni sistem nastali blizu erupcije gama-zraka) - takođe ne stoji kao samostalno rješenje. Broj planeta naprosto je prevelik da bi tu bio uzrok tišine.

Možda su "metali" (astronomima: svi elementi teži od vodika i helija, među njima i tzv. SPONC: sumpor, fosfor, kisik, azot, ugljik) tek nedavno dostigli koncentraciju dovoljnu za život, pa smo među prvim civilizacijama, možda i prva. Problem: već poznajemo zvijezde poput 47 Ursae Majoris - hemijski slične Suncu, ali 2,5 milijardi godina starije, i s planetama. Ako nam je takva zvijezda praktično u komšiluku (bliža od 50 svjetlosnih godina), teško da smo baš prvi. Ostaje, doduše, mogućnost da su čitave galaksije siromašne metalima (eliptične i patuljaste galaksije, globularna jata) manje gostoljubive nego što smo mislili.

Da bi planeta milijardama godina zadržala tečnu vodu, mora ležati u "trajno naseljivoj zoni", koja je uža nego što se ranije mislilo (noviji modeli, koji uzimaju u obzir recikliranje ugljik-dioksida tektonikom ploča, ipak su je nešto proširili). Uz to treba i "galaktička naseljiva zona" - prsten dovoljno udaljen od burnog centra galaksije. Jupiter je, čini se, odigrao dvostruku ulogu: štitio je Zemlju odbijajući ili

gutajući zalutale objekte (kao kometu Shoemaker-Levy 9 iz 1994) i pomogao dopremiti vodu. Otkriće mnoštva "vrućih Jupitera" na bliskim ili izduženim orbitama sugeriraju da su stabilni, "dobri Jupiteri" možda rjeđi nego što bismo voljeli.

John Kramer je predložio da evoluciju "pokreću" povremene krize - poput udara asteroida izbačenih iz Kirkwoodove praznine na 2,5 AJ, koja nastaje rezonancom 3:1 s Jupiterom. Prebrzo, i inteligencija nema kad nastati; presporo, i život se zaglavi u sporednoj ulici (planeta puna zadovoljnih dinosaurus). Zemlja je možda naprosto imala baš pravu učestalost katastrofa. Galaksija je inače opasno mjesto - zalutale crne rupe, magnetari, aktivno jezgro - ali ti mehanizmi ne mogu sterilisati čitavu galaksiju.

Bliska supernova (unutar tridesetak svjetlosnih godina) mogla bi razoriti ozonski sloj i klasičnom forom - "prvo te ošamutim, pa te dokusurim" - prepustiti Zemlju smrtonosnom Sunčevom UV zračenju. Još su moćnije erupcije gama-zraka, najintenzivnije pojave u poznatom kosmosu, koje bi u nekoliko sekundi mogle "sterilisati" velike dijelove galaksije i stalno vraćati kosmički sat na početak, ne dajući inteligenciji priliku da uznapreduje do mjera samoodbrane. Ovo je jedan od rijetkih mehanizama dovoljno univerzalan da doista može objasniti paradoks.

Michael Hart nudi neobičan obrat. Ako je kosmos beskonačan, a nastanak života izuzetno rijedak, tada u beskonačnom prostoru postoji beskonačno mnogo naseljenih planeta, ali unutar našeg "horizonta čestica" (dijela kosmosa iz kojeg nas išta uopšte može dosegnuti) možda smo jedini. Kosmos bi tako vrvio od života, a mi bismo, u svakom praktičnom smislu, ipak bili sami.

7.10 Ulozi visoki, a dokaza malo

Nakon svih odgovora, iskren sažetak glasi ovako: nijedan sam za sebe ne zatvara slučaj. Neka rješenja su elegantna, ali neprovjerljiva (zoološki vrt, zabrana); neka su provjerljiva, ali sve manje vjerovatna

(planetarijum); dok druga, poput von Neumannovih sondi i singularnosti, paradoks čine još većim. Ona možda najuvjerljivija - dugačak niz teških evolucijskih koraka i povremene kosmičke sterilizacije gama-zracima - vode ka neugodnom zaključku da je napredni život rijedak, možda čak i jedinstven.

Vrijedi primijetiti obrazac: gotovo svako rješenje koje se oslanja na ponašanje vanzemaljaca ("ne žele kontakt", "poštuju zabranu", "ostaju kod kuće") pretpostavlja da se sve civilizacije kroz milione godina ponašaju slično. Uvjerljivija su ona objašnjenja koja ne zavise od tuđe psihologije, nego od fizike i vjerovatnoće.

Upravo zato Fermijev paradoks ostaje toliko privlačan: uloži su visoki, a eksperimentalna podloga još uvijek tanka. Sve dok ne pronađemo čvrst dokaz - signal, sondu ili nezavisan nastanak života drugdje - pitanje koje je postavljeno prije više od sedamdeset godina i dalje strpljivo čeka odgovor: "gdje su svi oni?"

Literatura

- [1] Webb, S. (2015). If the Universe Is Teeming with Aliens... WHERE IS EVERYBODY? Seventy-Five Solutions to the Fermi Paradox and the Problem of Extraterrestrial Life (2. izd.). Cham: Springer.
- [2] Ćirković, M. M. (2018). The Great Silence: The Science and Philosophy of Fermi's Paradox. Oxford: Oxford University Press.
- [3] Drake, F., & Sobel, D. (1992). Is Anyone Out There? The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence. New York: Delacorte Press.
- [4] Sagan, C. (1980). Cosmos. New York: Random House.
- [5] Ward, P. D., & Brownlee, D. (2000). Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe. New York: Copernicus.
- [6] Hart, M. H. (1975). An Explanation for the Absence of Extraterrestrials on Earth. Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 16, 128-135.
- [7] Hanson, R. (1998). The Great Filter - Are We Almost Past It? Online esej.

8

Koliko teško je napraviti čovjeka?

"Mikrobni život je čest u svemiru, ali višćelijski životinjski život je veoma rijedak." (Ward & Brownlee, Rijetka Zemlja)



Pitanje o rijetkosti složenog života jedno je od onih pitanja na kojima se susreću astronomija, geologija, hemija i biologija. Nije dovoljno da planeta samo kruži na odgovarajućoj udaljenosti od svoje zvijezde; potrebno je da se istovremeno ostvari čitav niz uslova - od tečne vode i stabilne klime, preko tektonike i zaštite od radijacije, pa sve do nastanka života i njegovog prelaska iz jednostavnih u složene oblike. Svaki od tih koraka može predstavljati svojevrzni filter, a njihova međusobna povezanost znači da uspjeh jednog ne garantuje uspjeh sljedećeg. Hipoteza Rijetke Zemlje upravo iz tog razloga postavlja pitanje da li je složeni život u kosmosu zaista čest ili je Zemlja prošla kroz neobičan niz događaja koji se rijetko ponavlja.

8.1 Pogrešno postavljeno pitanje

Postoji jedna vrsta pitanja koja unaprijed sadrži svoj odgovor. "Zašto je složeni život rijedak u svemiru?" upravo je jedno takvo pitanje - ono vas natjera da branite rijetkost i prije nego što ste je dokazali. Kada Peter Ward i Donald Brownlee 2000. godine objavljuju knjigu "Rijetka Zemlja", oni doista tvrde nešto provokativno: da je mikrobni život vjerovatno raširen kosmosom, ali da je životinjski, složeni život gotovo svugdje odsutan.

Umjesto da tu tvrdnju samo prepričamo, korisnije je zamku okrenuti naopak. Ne pitajmo koliko je Zemlja posebna, zapitajmo se: koliko je koraka potrebno da se od oblaka vodika i prašine dođe do bića koje gradi teleskope i piše eseje o vlastitoj rijetkosti? Jer ako je takvih koraka mnogo, a svaki ima vjerovatnoću manju od jedan, onda njihov umnožak može biti zastrašujuće malen, čak i ako je svaki pojedini korak, sam za sebe, sasvim "običan". Deset koraka od kojih svaki uspijeva u jednom od deset slučajeva daje jednu uspješnu Zemlju na deset milijardi pokušaja. A svemir, doduše, ima i više od deset milijardi zvijezda, pa je i to dio zagonetke.

Ovo je zapravo logika velikog filtera (eng. great filter): negdje između mrtve hemije i galaktičke civilizacije nalazi se barem jedna prepreka koju je izuzetno teško preskočiti. Ovaj tekst ne pokušava dokazati da je ta prepreka iza nas ili ispred nas. Umjesto toga, razlaže cijeli lanac uslova na deset filtera, i za svaki postavlja isto neugodno pitanje: koliko je vjerovatno da se baš ovaj korak dogodi?

Da priča ne bude propovijed nego rasprava, na scenu izvodimo dva suprotstavljena tabora. Na strani optužbe stoje graditelji i geolozi "rijetkosti" - Ward i Brownlee sa svojom hipotezom, James Kasting s astronomijom nastanjivosti, Wallace Broecker s hemijom planete, Paul Davies sa zagonetkom porijekla. Na strani odbrane su Simon Conway Morris, koji tvrdi da evolucija iznova pronalazi ista rješenja, i David Grinspoon, koji nas podsjeća da je naša predstava o "životu"

možda tek autoportret. Charles Cockell, sa svojim udžbenikom, igra ulogu suca koji stalno traži definicije. A Ward i Brownlee, u svom drugom nastupu ("The Life and Death of Planet Earth"), pojavljuju se i kao svjedoci odbrane i optužbe istovremeno - podsjećajući da je svaka pobjeda života ionako privremena.

Lanac koji ćemo pratiti izgleda ovako:

zvijezda → planetarni sistem → stjenovita planeta → tečna voda → stabilna klima → atmosfera → abiogeneza → prve ćelije → eukarioti → višećelijski život → složeni organizmi → inteligencija → tehnološka civilizacija

8.2 Računica rijetke Zemlje

Ward i Brownlee svjesno oponašaju čuvenu Drakeovu jednačinu, ali je okreću naglavačke. Dok je Drakeova jednačina bila optimistička sprava za brojanje civilizacija, jednačina rijetke Zemlje je pesimistička mašina za množenje malih brojeva. U proširenom obliku ona izgleda ovako:

$$N = N^{\star} \cdot f_p \cdot f_{pm} \cdot n_e \cdot n_m \cdot f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot f_m \cdot f_j$$

gdje je $N^{\star}$ broj zvijezda u galaksiji, a ostali faktori redom "odsijecaju" dijelove tog broja: udio zvijezda s planetama, udio metalima bogatih planeta, broj planeta u nastanjivoj zoni, udio planeta s ispravnom masom, udio na kojima život nastaje, na kojima postaje složen, na kojima preživi dovoljno dugo, koje imaju veliki mjesec i koje imaju Jupitera-čuvara. Svaki faktor je razlomak manji od jedinice; njihov produkt tone brzo.

Sušтина argumenta Rijetke Zemlje nije nijedan pojedinačni faktor nego to što se svi moraju poklopiti istovremeno i na istoj planeti. Charles Cockell u svom udžbeniku "Astrobiology" s pravom upozorava da su ovakve jednačine više okvir za razmišljanje nego mjerni instrument: gotovo svaki faktor poznamo s nesigurnošću od nekoliko redova veličine. Ipak, kao dijagnostičko sredstvo - spisak

stvari koje mogu poći po zlu - jednačina je neprocjenjiva. Zato je pretvaramo u deset filtera.

8.3 Deset filtera

Filter 1: Prava vrsta zvijezde

Sve počinje izborom zvijezde. James Kasting u "How to Find a Habitable Planet" pokazuje da izbor zvijezde postavlja granice svemu ostalom. Masivne, vruće zvijezde (tipovi O, B, A) gore raskošno, ali kratko - od nekoliko miliona do koju milijardu godina - što je premalo da bi se, sudeći po zemaljskom iskustvu, stigla razviti složena biosfera. Na drugom kraju, crveni patuljci (M-patuljci) traju milijardama godina i ima ih najviše, pa djeluju kao idealni domaćini.

Ali tu je kvaka koju Kasting detaljno razrađuje: da bi planeta oko crvenog patuljka imala tečnu vodu, mora orbitirati vrlo blizu - toliko blizu da je plimno zaključa, pa je jedna strana vječno okrenuta zvijezdi. Uz to su mladi M-patuljci skloni silovitim bljeskovima koji mogu oguliti atmosferu. Zvijezda poput Sunca (tip G) je kompromis: dovoljno dugovječna, dovoljno mirna, dovoljno svijetla. Prvi filter, dakle, već prepolovi svemir.

Ovom filteru pripada i suptilniji uslov - metalicitet. "Metali" su za astronoma svi elementi teži od helija, a upravo od njih se grade stjenovite planete i, kasnije, biološki molekuli. Najstarije zvijezde nastale su iz gotovo čistog vodika i helija i oko sebe naprosto nisu imale materijala za Zemlju. Tek nakon više generacija zvijezda koje su u supernovama zasijale svemir težim elementima postaje moguća stjenovita planeta.

Otud pojam "galaktičke nastanjive zone" koji Kasting uvodi: ne samo prava udaljenost od zvijezde, nego i pravo mjesto u galaksiji - dovoljno bogato metalima, ali dovoljno mirno, daleko od smrtonosne gužve galaktičkog jezgra. Rijetkost, vidimo, počinje da se gomila već na prvom koraku.

Filter 2: Prava udaljenost i tečna voda

Nastanjiva zona je onaj "zlatokosi" prsten oko zvijezde u kojem na površini planete može opstati tečna voda - ni prevruće da voda ispari, ni prehladno da se sva smrzne. Voda je ovdje glavni junak jer je izvrstan rastvarač i medij za hemiju ugljika. Broecker u "How to Build a Habitable Planet" to sažima jednostavno: za život bilo kakve složenosti potrebna je tečna voda.

Problem je što je nastanjiva zona uska i, što je gore, pomjera se. Sunce je od svog rođenja posvijetlilo za oko trećinu i nastavlja jačati - zvijezda je, u geološkom smislu, spora peć koja se ne da ugasiti. Zona koja je u prošlosti bila savršena, u budućnosti postaje pakao. Zato Kasting uvodi pojam "kontinuirano nastanjive zone" - mnogo užeg pojasa koji ostaje nastanjiv tokom milijardi godina, a ne samo u jednom trenutku. Zemlja je, srećom, sve to vrijeme ostala unutar njega, ali ne zahvaljujući sreći nego termostatu o kojem Broecker piše i koji ćemo sresti kao Filter 5. Već ovdje vidimo obrazac koji se provlači kroz cijelu knjigu prirode: nijedan filter ne stoji sam. Voda traži pravu udaljenost, prava udaljenost traži termostat, termostat traži tektoniku, a tektonika - pokazat će se - opet traži vodu. Priroda je ovdje spojila lance u prsten.

Vrijedi dodati i zašto baš voda, a ne neka druga tečnost. Cockell u svom udžbeniku strpljivo nabraja njene vrline: odličan je rastvarač, ostaje tečna u širokom rasponu temperatura, a led joj - jedinstveno - pluta, pa jezera zamrzavaju odozgo i štite život ispod. Deamer će nam u Filteru 7 pokazati da je voda i pozornica na kojoj se prve membrane same sklapaju. Ako je život drama, voda nije samo glumac - ona je i bina, i reflektor, i rasvjeta.

Filter 3: Stabilna orbita i pravi mjesec

Nije dovoljno biti na pravom mjestu; treba tamo i ostati, mirno. Ward i Brownlee posebno ističu ulogu Mjeseca. Naš neobično veliki satelit stabilizira nagib Zemljine ose, sprječavajući da se ona divlje ljulja

kao što se, prema simulacijama, ljuđa osa Marsa. Bez te stabilizacije klima bi lutala od pola do ekvatora u geološki kratkim ciklusima, a takva planeta teško da bi bila kolijevka za spor posao izgradnje složenog života. Otud faktor f_m u jednačini - udio planeta s velikim mjesecom nastalim srećnim, gotovo katastrofalnim sudarom.

Uz nagib ose, važan je i oblik orbite. Umjereno kružna putanja daje blage sezone; jako izdužena (ekscentrična) putanja baca planetu naizmjenično u vrelinu blizu zvijezde i led daleko od nje. Stabilnost orbite, međutim, ne zavisi samo od same planete nego od cijelog planetarnog društva: džinovske planete na pogrešnim mjestima mogu, kroz gravitacijske rezonancije, tokom miliona godina izmijeniti orbitu male planete i izbaciti je iz nastanjive zone.

Otkriće brojnih "vrelih Jupitera" - divova koji su migrirali skroz do svoje zvijezde, pomevši usput sve pred sobom - pokazalo je da su ovakve katastrofe u galaksiji vjerovatno česte. Naš uredni, gotovo dosadni Sunčev sistem, u kojem divovi mirno sjede daleko vani, počinje izgledati kao sretan izuzetak.

Filter 4: Tektonska aktivnost

Ovo je jedan od najoriginalnijih argumenata Warda i Brownleeja: tektonika ploča kao uslov za život. Pomjeranje kontinenata na prvi pogled nema veze s biologijom, ali je zapravo motor za tri vitalna sistema.

Prvo, ono reciklira ugljik i tako drži termostat planete. Drugo, konvekcija u Zemljinoj unutrašnjosti pokreće magnetsko polje koje nas štiti od zračenja. Treće, ono stvara kontinente, planine i raznolikost staništa koja gura evoluciju.

Broecker naglašava kako se ugljik pohranjuje u sedimentima kao karbonatni minerali, a tektonika ga vraća u atmosferu kroz vulkanizam. Bez te "pumpe", planeta bi ili zamrznula sav svoj CO_2 u

stijene, ili ga izgubila. Venera i Mars, svaka na svoj način, pokazuju šta se dešava kada termostat otkáže.

Vrijedi zastati nad time koliko je ovaj uslov krhak i, iskreno, koliko slabo razumijemo zašto Zemlja uopšte ima tektoniku ploča. To nije očigledna osobina stjenovite planete - Venera je gotovo Zemljin blizanac po masi i sastavu, a ipak nema pokretne ploče, nego, izgleda, povremeno prekuha cijelu koru odjednom. Zašto? Voda je vjerovatno dio odgovora: ona podmazuje i omekšava stijene i time olakšava klizanje ploča.

Ako je tako, dolazimo do lijepog kruga zavisnosti - treba nam voda da bismo imali tektoniku, a treba nam tektonika da bismo dugoročno zadržali vodu i ugljik u ravnoteži. Filteri, kako vidimo, nisu nezavisni; oni se drže jedan za drugoga, i ispadanje jednog povlači ostale.

Filter 5: Dugotrajna klima (termostat)

Karbonatno-silikatni ciklus je jedan od najljepših primjera samoregulacije u prirodi, i Kasting ga s razlogom stavlja u središte. Kada je toplije, više je padavina i brže trošenje stijena, što izvlači CO₂ iz atmosfere i hladi planetu.

Kada je hladnije, trošenje se usporava, vulkani nastavljaju ispuštati CO₂, i planeta se grije. To je negativna povratna sprema - geološki termostat koji je Zemlju držao pogodnom za vodu preko četiri milijarde godina, uprkos sve jačem Suncu.

Zapanjujuće je da ovaj mehanizam mora funkcionisati milijardama godina bez nekog ozbiljnog kvara. Argument hipoteze Rijetke Zemlje tvrdi da je upravo ta dugotrajna stabilnost, a ne sam nastanak povoljnih uslova, ono što je rijetko. Epizode "Snježne Zemlje" (eng. Snowball Earth) pokazuju koliko blizu ruba je naš termostat povremeno radio.

Filter 6: Zaštita od radijacije

Život treba štit. Magnetsko polje skreće naelektrisane čestice sunčevog vjetra i sprječava eroziju atmosfere - Mars je, izgubivši svoje polje, izgubio i najveći dio atmosfere. Ali Ward i Brownlee dodaju i vanjskog čuvara: Jupitera. Džinovska planeta djeluje kao gravitacijski usisivač koji hvata ili izbacuje komete i asteroide koji bi inače češće pogađali unutrašnje planete.

Ovdje je priča dvosjekli mač, i novije studije pokazuju da Jupiter jednako često šalje tijela prema nama koliko ih i "hvata". Naš navodni tjelohranitelj, ispostavlja se, povremeno gađa štićenika. "Jupiter kao štit" ostaje elegantna ideja, ali s velikim upitnikom.

Filter 7: Voda i prava hemija

Pretpostavimo da imamo stabilnu, toplu, zaštićenu stjenovitu planetu. Treba joj još isporučiti vodu i sirovine za hemiju života. Broecker pokazuje da je dostava vode na unutrašnje, suhe planete daleko od zagarantovane - zavisi od arhitekture cijelog planetarnog sistema i od tijela poput kometa i asteroida. David Deamer u "First Life" prati sljedeći korak: kako od raspoloživih organskih molekula nastaju amfifili - molekuli nalik sapunu koji se u vodi sami sklapaju u sitne mjehuriće (vezikule). Ti mjehurići su prototip ćelijske membrane, granice između "unutra" i "vani" bez koje nema ćelije.

Filter 8: Nastanak života (abiogeneza)

Ovdje ulazimo u najdublju tamu. Paul Davies u "The Fifth Miracle" tvrdi da pravi misterij nije hemija sama po sebi, nego informacija: kako je nastao molekularni sistem koji čuva i vjerno prenosi upute za vlastito kopiranje? Prijelaz od hemije koja se "dešava" do hemije koja "čita uputstva" za Daviesa je ključni, još neriješeni korak - otud i naslov o "petom čudu".

Deamer nudi konkretniji scenarij: protoćelije kao ogromne populacije membranskih mjehurića, svaki s malo drugačijim

sadržajem, koje kombinatorno "eksperimentišu" dok neki ne steknu sposobnost rasta i dijeljenja. Cockell, pak, podsjeća da ni sami nemamo saglasnu definiciju života, što čitav problem čini još skliskijim. Za tabor pobornika Rijetke Zemlje, abiogeneza je možda i laka - jer se na Zemlji dogodila brzo, čim su uslovi to dopustili. Ali "brzo na jednoj planeti" ne znači "često u svemiru": uzorak od jedan ne dopušta statistiku.

Davies pooštava problem jednom neugodnom analogijom s termodinamikom. Život lokalno stvara red i informaciju, a to, na prvi pogled, ide uz drugi zakon termodinamike samo ako se plati energijom i porastom nereda okoline. Prava zagonetka za njega nije "odakle molekuli" (njih Millerovi i sličniji eksperimenti daju obilato), nego "odakle uputstvo" - kako je nastao prvi sistem u kojem jedan molekul znači nešto, i kodira nešto drugo. To je prelazak s hemije na semantiku, s stvari na poruku, i on nema očiglednu fizikalnu adresu. Neki istraživači zato traže rješenje u hidrotermalnim izvorima na dnu okeana, gdje prirodni hemijski gradijenti mogu služiti kao "besplatna" baterija za prve reakcije; drugi, uključujući Daviesa u spekulativnijim trenucima, drže otvorenom čak i mogućnost da je život stigao izvana (panspermija), čime se pitanje samo premješta, ali ne i rješava.

Za naš lanac filtera važno je uočiti asimetriju argumenata. Ako je abiogeneza laka, ona nije veliki filter - ali onda mikrobi vrve svemirom i tišina postaje čudnija. Ako je teška, ona jeste veliki filter - i tada je najveći dio galaktičkih svjetova zauvijek sterilan, bez obzira na to koliko su savršeno nastanjivi. Obje mogućnosti su, na svoj način, uznemirujuće; i obje su, zasad, jednako u skladu s onim jednim jedinim podatkom koji imamo.

Filter 9: Od jednostavnog ka složenom životu

Ovo je, po mnogima, najuže grlo. Na Zemlji je jednostavan (prokariotski) život nastao gotovo odmah i vladao milijardama

godina. Ali skok na eukariotsku ćeliju - s jedrom, mitohondrijima, unutrašnjom organizacijom - dogodio se, koliko znamo, samo jednom. Taj događaj (endosimbioza, gutanje jedne bakterije od strane druge) izgleda kao izuzetno nevjerovatan sretan spoj. Ward i Brownlee upravo tu smještaju srce svog argumenta: napraviti složen život teže je nego napraviti sam život.

Nakon eukariota slijedi višćelijnost i, s njom, "Kambrijska eksplozija" - nagli procvat tjelesnih planova prije oko 540 miliona godina. Hipoteza Rijetke Zemlje naglašava da je i taj procvat bio geološki dugo odgađan, kao da je nešto dugo nedostajalo (možda dovoljno kisika, možda pravi genetski "alati").

Zašto baš eukariote smatrati najužim grlom? Iz jednostavnog razloga: raspodjele u vremenu. Život je nastao gotovo čim se Zemlja ohladila - dakle brzo. Ali potom je slijedila pauza od gotovo dvije milijarde godina prije nego što je nastala prva složena ćelija. Dvije milijarde godina je ogroman komad historije planete provedene u "dosadi" jednostavnog života.

Takva duga stanka sugerise da je taj korak izuzetno malo vjerovatan po jedinici vremena - da priroda mora bacati kockice nezamislivo mnogo puta prije nego padne pravi spoj. Ako je tako, onda mnogi svjetovi vjerovatno zauvijek ostaju na razini bakterijske sluzi: živi, ali nijemi.

Mitohondrij, ta "energetska fabrika" eukariotske ćelije, ovdje je ključan lik. Bez njega ćelija nema dovoljno raspoložive energije po genu da bi mogla održavati veliki, složen genom - a bez velikog genoma nema ni raskoši višćelijskog tijela. Gutanje jedne bakterije od strane druge, bez varenja, i njihov trajni savez, izgleda kao nevjerovatna slučajnost koja je, možda, otključala sve što slijedi. Upravo tu se pobornici Rijetke Zemlje i njeni kritičari najžešće spore: da li je to bio jedinstven kosmički dobitak na lutriji, ili tek jedan od mnogih puteva do istog cilja?

Filter 10: Nastanak inteligencije i civilizacije

Posljednji filter vodi od životinja do bića koja postavljaju pitanja poput ovog. Ovdje se najoštrije sukobljavaju dvije škole. Za pesimiste, tehnološka inteligencija je jedan usamljeni izum u milijardama vrsta koje su ikad postojale - dakle, statistička anomalija, a ne cilj kojem evolucija teži. Dinosauri su vladali sto pedeset miliona godina i nikad nisu izumili ni točak; da nije bilo jednog nesretno usmjerenog asteroida, možda ni danas ne bi. Inteligencija, po ovom čitanju, nije vrhunac ljestvice nego jedan slučajan list na razgranatom grmu.

Ima i tvrđa verzija tog pesimizma, vrijedna spomena jer vodi ravno u Fermijevu tišinu: čak i kad inteligencija nastane, put od nje do civilizacije koja šalje signale među zvijezdama krcat je vlastitim, novim filterima - jezik, pismo, nauka, stabilne institucije, tehnologija koja preživi vlastitu moć. Svaki od njih je novi razlomak manji od jedan.

Postskriptum uz filtere

Kada su Ward i Brownlee pisali (2000), poznatih planeta izvan Sunčevog sistema bilo je tek nekoliko desetina, i gotovo sve neprikladne (vreli divovi tik uz svoje zvijezde). Danas ih znamo na hiljade, i slika je nijansiranija nego što je ijedan tabor očekivao. Stjenovite planete su, čini se, obilne; mnoge se nalaze u nastanjivoj zoni svojih zvijezda. To na prvi pogled ide u prilog optimistima - sirovog materijala ne nedostaje.

Ali argument Rijetke Zemlje nikad i nije tvrdio da su nastanjive lokacije rijetke - tvrdio je da je rijedak čitav sklop uslova koji se održava milijardama godina i vodi do složenosti. Sam broj planeta u zoni ne rješava spor; on samo pomjera težište pitanja s astronomije (ima li mjesta?) na biologiju i geologiju (šta se na tim mjestima zaista dešava?). Sljedeći korak - mjerenje sastava atmosfera dalekih planeta u potrazi za tragovima života - tek je počeo. Tada ćemo,

možda, prvi put dopuniti naš uzorak od jedan, i cijela ova rasprava dobiti drugi, tvrdi podatak.

8.4 A šta uopšte brojimo?

Prije nego pređemo na odbranu, vrijedi zastati nad jednom neugodnom prazninom u temeljima cijele rasprave. Svi naši filteri traže "život", a Charles Cockell na samom početku svog udžbenika priznaje da nauka nema opšteprihvaćenu definiciju tog pojma. Uobičajeni radni popis - metabolizam, razmnožavanje, nasljeđivanje, evolucija - ima izuzetke i granične slučajeve (virusi, vatra, kristali, računarski programi), pa svaka definicija ili nešto propusti ili nešto suvišno uhvati.

To nije puko cjepidlačenje. Ako život tražimo isključivo po zemaljskom kalupu - ugljik, voda, DNK - onda ćemo, kako Grinspoon oštro primjećuje, naći samo ono što liči na nas, i proglasiti sve ostalo mrtvim. On taj refleks naziva ugljičnim šovinizmom. Naš uzorak života ima veličinu jedan, i sve što "znamo" o biologiji zapravo je znanje o zemaljskoj biologiji. Množiti vjerovatnoće filtera znači tiho pretpostaviti da drugdje važe ista pravila igre - a to je pretpostavka, ne činjenica.

Ovdje se sudaraju dva velika načela. Jedno je princip osrednjosti (Kopernikovsko naslijeđe): mi nismo posebni, naše mjesto u svemiru je tipično, pa bi i život trebao biti tipičan. Drugo je antropsko opažanje: mi, naravno, opažamo baš onakav svemir i onakvu planetu koji dopuštaju posmatrača - pa nas činjenica da smo ovdje ne smije zavarati u procjeni koliko je to vjerovatno.

Hipoteza Rijetke Zemlje suptilno igra na antropsku kartu: da, mi jesmo ovdje, ali upravo zato ne možemo iz vlastitog postojanja zaključiti da je ono bilo vjerovatno. Cijela rasprava, na kraju, jednim dijelom je i rasprava o tome kako uopšte smijemo rasuđivati iz jednog jedinog primjera.

8.5 Možda život ipak zna kuda ide?

Simon Conway Morris u "Life's Solution" ne spori nijednu činjenicu iz hipoteze Rijetke Zemlje - on spori zaključak. Njegov ključni pojam je konvergentna evolucija: pojava da nesrodne loze, suočene s istim problemom, iznova pronalaze isto rješenje. Oko tipa kamere evoluiralo je, po njemu, nezavisno barem šest puta. Krila, eholokacija, toplokrvnost, čak i oblici inteligencije - sve to izbija više puta, na različitim mjestima stabla života.

Poruka je snažna: ako je prostor mogućih "dobrih rješenja" uzak, onda evolucija nije nasumično lutanje nego navigacija ka predvidljivim ishodima. Conway Morris to slikovito kaže - život ima gotovo jezivu sposobnost da, iznova, dovede do ispravnog rješenja.

Ako je u pravu, onda mnogi od naših deset filtera možda i nisu tako neprobojni: kad se jednom pojavi život i dobije dovoljno vremena, oči, udovi, pa i mozgovi mogli bi biti gotovo neizbježni. Filter 10 tada nije zid nego blaga uzbrdica koju svaka dovoljno stara biosfera prije ili kasnije savlada. Vrijedi, međutim, uočiti gdje Conway Morris ne napada: on se ne dotiče Filtera 8 (nastanak života) ni Filtera 9 (eukariotska ćelija). Njegova konvergencija počinje da radi tek nakon što život već postoji i već je složen. Drugim riječima, i najveći optimista našeg žirija tiho priznaje da su rani filteri ti koji odlučuju.

Otud i zanimljiv paradoks njegove knjige: podnaslov obećava neizbježne ljude - ali u usamljenom svemiru. To nije protivrječnost nego precizna teza: ishod je predvidljiv ako se igra uopšte pokrene, ali pokretanje je rijetko. Evolucija zna kuda ide; problem je što rijetko uopšte krene na put. Ako Ward i Brownlee kažu "teško je stići", Conway Morris uzvraća "ali ako stigneš, znaš kamo ideš" - a to su, kad se dobro pogleda, komplementarne, a ne suprotne tvrdnje.

David Grinspoon u "Lonely Planets" dodaje epistemološku skromnost. On, možda s razlogom, upozorava na određeni "ugljični

šovinizam" i antropocentrizam: naša predstava o životu i inteligenciji možda je uska projekcija nas samih. Planete tretiramo kao mrtve kamene, a možda su, u nekom smislu, žive u cjelini (odjek Gaje). Grinspoonova poenta nije da vanzemaljaca sigurno ima, nego da je naša računica možda pogrešna jer brojimo pogrešne stvari - tražimo Zemlje, a život ne mora izgledati kao mi.

8.6 Čak i uspjeh je privremen

Ward i Brownlee u nastavku, "The Life and Death of Planet Earth", dodaju dimenziju koja se lako previdi: čak i kada se prođu svi filteri, rezultat traje ograničeno. Isto ono Sunce koje jača i pomjera nastanjivu zonu na kraju će učiniti Zemlju nenastanjivom - i to ne za pet milijardi godina koliko traje do crvenog diva, nego mnogo prije. Kako Sunce svijetli sve jače, termostat će morati izvlačiti sve više CO₂ iz atmosfere; kada ga ponestane, biljke izumiru, pa životinje, a naposljetku i mikrobi.

Njihova poenta je otrežnjujuća: složeni život nije trajno stanje planete nego kratka epizoda u njenoj biografiji - svijeća, a ne sunce. Ako to vrijedi za sve nastanjive svjetove, onda čak i tamo gdje složeni život nastane, on postoji samo u uskom vremenskom prozoru. Zamislite dvije šibice kresnute u ogromnoj, mračnoj dvorani u razmaku od milion godina; pitanje nije samo koliko ih je bilo, nego koliko ih je gorjelo istovremeno. Time se, na zadnja vrata, vraćamo Fermijevom pitanju: ako je svemir tako star i velik, gdje su svi? Možda su bili tu - samo ne sada, i ne ovdje.

8.7 Zašto se sve drži zajedno?

Ako postoji jedna nit koja provlači svih devet knjiga s naše police, to je ova: filteri nisu nezavisni. Naivno bismo mislili da je vjerovatnoća Zemlje prost proizvod deset odvojenih šansi. Ali knjige, čitane zajedno, crtaju gušću mrežu - mrežu u kojoj svaki uslov zaključava sljedeći, kao karike koje jedna drugu drže napetom.

Pogledajmo taj splet. Broecker pokazuje da termostat treba tektoniku; sve više dokaza sugeriraju da tektonika treba vodu koja podmazuje stijene; voda pak treba pravu udaljenost od zvijezde (Kasting) i dovoljno metala da uopšte nastane stjenovita planeta. Stabilnu klimu, dalje, čuva veliki Mjesec (Ward i Brownlee), a on je nastao gotovo nemogućim sudarom u pravom trenutku formiranja Sunčevog sistema. Kisik za složena tijela proizvele su bakterije tokom dvije milijarde godina strpljenja - što je bilo moguće samo zato što je termostat sve to vrijeme držao okeane tečnim. Deamer i Davies dodaju da su i prve membrane i prva informacija trebale baš takvu, vodenu, hemijski bogatu, energetski aktivnu pozornicu.

Drugim riječima, Zemlja nije prošla deset odvojenih ispita - prošla je jedan ispit s deset međusobno povezanih pitanja, gdje pogrešan odgovor na bilo koje ruši i ostale. To je istovremeno najjači i najslabiji dio argumenta Rijetke Zemlje. Najjači, jer objašnjava zašto rijetkost ne treba nijedan pojedinačni "čudesni" korak - dovoljno je da se lanac negdje prekine. Najslabiji, jer međuzavisnost može raditi i u korist života: ako voda automatski donosi i tektoniku, i termostat, i membrane, onda jedan srećan početak povlači niz drugih besplatno. Ista mreža koja može sve srušiti može i mnogo toga darovati odjednom.

Tu leži prava draž ove teme. Ista činjenica - da je sve povezano - jednima je dokaz krhkosti, drugima dokaz plodnosti. Podaci se ne mijenjaju; mijenja se temperament onoga ko ih čita.

8.8 Množenje neizvjesnosti

Šta ostaje kada sve posložimo? Slika koja se ne svodi na optimizam ni pesimizam, nego na raspodjelu tereta dokaza po lancu. Ako je tabor Rijetke Zemlje u pravu, veliki filter je iza nas: teški koraci (eukariotska ćelija, možda i sam nastanak života) toliko su nevjerovatni da smo mi kozmička rijetkost - što je, paradoksalno, dobra vijest za budućnost čovječanstva. Ako je Conway Morris u

pravu, filteri su probojni, ishodi predvidljivi, a tišina svemira traži drugačije objašnjenje.

Vrijedi primijetiti gdje se tabori zapravo slažu. I Ward-Brownlee i Conway Morris i Grinspoon dijele mišljenje da je mikrobni život vjerovatno relativno čest - spor oko rijetkosti odnosi se na složenost i inteligenciju. Neslaganje je, dakle, precizno lokalizovano: negdje između Filtera 8 i Filtera 10. Upravo tu leži i najveći filter, ma s koje strane mu prilazili.

Postoji i treća mogućnost, najmanje ugodna od svih: da veliki filter nije iza nas, nego ispred. Možda su raniji koraci lakši nego što se tvrdi, civilizacije nastaju redovno - ali se, dostigavši našu razinu, brzo same unište ili jednostavno ne uspiju prekoračiti prag međuzvezdanog putovanja. Tišina svemira tada ne bi bila znak naše rijetkosti, nego naše krhkosti. Vremenski prozor iz prethodne sekcije pojavljuje se i ovdje: čak i da je galaksija bila puna civilizacija, ako svaka traje kratko, one se mimoilaze u vremenu jednako lako kao u prostoru.

Zanimljivo je koliko se, pri svemu tome, mnogo toga svodi na dvije naizgled proste stvari: vrijeme i kisik. Vrijeme, jer svaki teški korak treba stabilnu planetu tokom milijardi godina - a to je, kroz filtere 4 i 5, netrivialno postignuće. Kisik, jer bez energetski izdašnog disanja teško je zamisliti krupne, aktivne, složene organizme; a slobodni kisik na Zemlji nastao je tek nakon što su ga cijanobakterije milijardama godina proizvodile. Duga odgoda "Kambrijske eksplozije" možda i nije misterija: možda je planeta jednostavno morala da diše prije nego što je mogla da razmišlja.

Da se vratimo na naslovno pitanje: da li je Zemlja zaista rijetka? Iskren odgovor glasi - ne znamo, jer još uvijek nemamo drugi primjer. Ali sada barem znamo gdje da tražimo odgovor: ne u pojedinačnom čudu, nego u dugom nizu koraka od kojih svaki mora uspjeti. Naša "rijetka" Zemlja nije dokaz da smo sami - to je popis

računa koje priroda mora platiti da bi negdje nastao posmatrač. Neki od tih računa možda su, kako se Conway Morris nada, jeftiniji nego što izgledaju; drugi su vjerovatno skuplji. Možda Zemlja nije rijetka. Možda samo još uvijek ne znamo koliko je teško napraviti čovjeka - i upravo je ta neizvjesnost, a ne lažna sigurnost bilo kojeg tabora, najpošteniji zaključak koji danas smijemo izvesti.

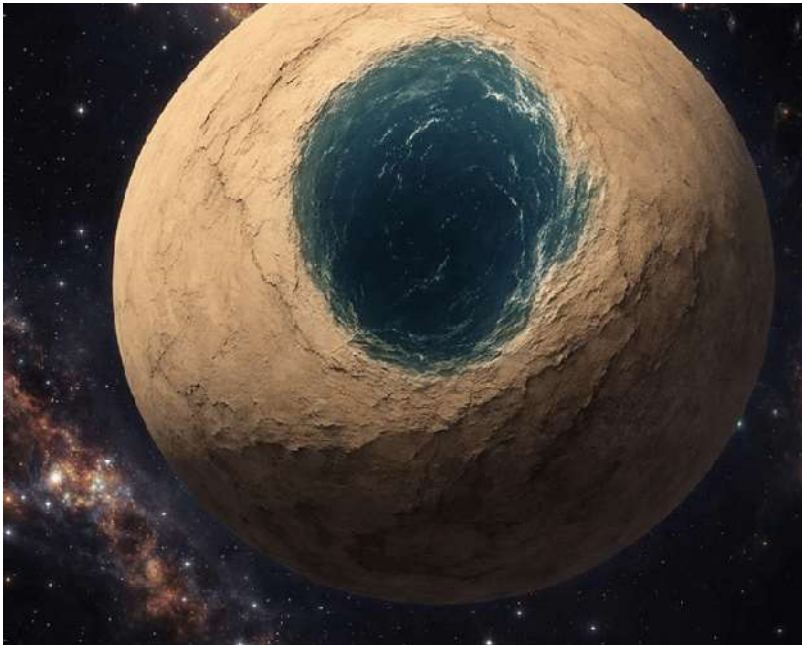
Literatura

- [1] Broecker, W. S. (1985). *How to Build a Habitable Planet*. Palisades, NY: Eldigio Press.
- [2] Cockell, C. S. (2015). *Astrobiology: Understanding Life in the Universe*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- [3] Conway Morris, S. (2003). *Life's Solution: Inevitable Humans in a Lonely Universe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [4] Davies, P. C. W. (1998). *The Fifth Miracle: The Search for the Origin of Life*. New York: Simon & Schuster.
- [5] Deamer, D. (2011). *First Life: Discovering the Connections between Stars, Cells, and How Life Began*. Berkeley: University of California Press.
- [6] Grinspoon, D. H. (2003). *Lonely Planets: The Natural Philosophy of Alien Life*. New York: HarperCollins.
- [7] Kasting, J. F. (2010). *How to Find a Habitable Planet*. Princeton: Princeton University Press.
- [8] Ward, P. D., & Brownlee, D. (2000). *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe*. New York: Copernicus.
- [9] Ward, P. D., & Brownlee, D. (2002). *The Life and Death of Planet Earth: How the New Science of Astrobiology Charts the Ultimate Fate of Our World*. New York: Times Books.

9

More koje leži na ledu

*"Ovo je najzanimljiviji planet koji sam vidio u zadnjih deset godina."
(Jason Dittmann)*



Zamislite da ste zakoračili na svijet udaljen oko 49 svjetlosnih godina, pod nebom koje ne poznaje izlazak ni zalazak zvijezde. LHS 1140 b nije samo obična egzoplaneta: njena atmosfera, mogući oceani i neobična klima otvaraju pitanje kako bi izgledao svijet potpuno drugačiji od Zemlje. Ono što slijedi je zamišljeno putovanje kroz taj daleki pejzaž, zasnovano na onom što znamo.

9.1 Sletanje i prvi šok

Prvo što registruješ nije pogled. Prvo je težina. Spuštaš se niz ljestve modula i već na trećoj prečki ti se koljena jave. Ne bolno, više kao pritužba, kao da si u ruksak spakovao još jednog sebe. Osamdeset kilograma tebe i šezdeset kilograma odijela ovdje zajedno vuku dolje kao dvjesta šezdeset.

Instruktorica je bila kratka: ne skači, ne trči i ne padaj. Pad s dva metra ovdje traje pola sekunde. Kod kuće traje šest desetina. Ta razlika zvuči smiješno malo sve dok tvoj mozak, naučen na zemaljsku aritmetiku, ne pošalje ruke prekasno.

Staješ na led. Ne na snijeg, na led, star, sinterovan, na -150 stepeni C tvrd kao granit. Čizma ne proizvodi nikakav zvuk koji bi kroz ovu atmosferu došao do tebe, a i da proizvede, ti si u odijelu. Površina je siva sa slabim bakrenim odsjajem i puna je plitkih polumjesečastih brazdi, kao pješčani sprud kad se voda povuče. Neko će morati objasniti kako su nastale.

Zatim podižeš glavu. Zvijezda stoji na četrdesetak stepeni iznad horizonta i ne miče se. To ti je rečeno, to si čitao, to si vidio u simulaciji i ništa od toga te nije pripremilo.

Nije riječ o tome da se sporo kreće. Ne kreće se. Stajala je tačno tu prije tvog rođenja, stajace tačno tu kad tvoji unuci budu stari, i stajala je tačno tu kad su na Zemlji prve ćelije otkrивale kako se dijele. Nebo bez izlaska i zalaska nije lijepo ni ružno. Ono je, čini se, nepristojno.

Široka je dva i po puna Mjeseca i ima boju grijača u tosteru. Ne moraš žmiriti. Možeš je gledati koliko hoćeš, i upravo je to ono što ti se uvlači pod kožu.

Prema jugozapadu, tamo gdje bi po svim tvojim instinktima trebalo biti podne, tlo se u daljini gubi u nečemu bijelom što se ne miče. To nije magla. To je oblak visok dvadeset kilometara i širok četiri hiljade, i on je jedini razlog zbog kojeg si ovdje.

9.2 Kakva je to zvijezda?

Zvijezda se zove LHS 1140 i prilično je nezanimljiva na prvi pogled. To je crveni patuljak spektralnog tipa M4,5, s oko petinom Sunčeve mase i poluprečnika, s površinskom temperaturom od oko 2800 stepeni C. Zrači 0,39 posto Sunčeve snage. Sa Zemlje se ne vidi ni kroz pristojan amaterski teleskop bez truda; nalazi se u sazviježđu Kita, na oko 49 svjetlosnih godina, što je po galaktičkim mjerilima susjedna ulica, a po svim ostalim mjerilima nedostižno.

Mnogi mladi crveni patuljci pokazuju snažnu magnetnu aktivnost - vrte se brzo, imaju uvijene magnetne petlje i bacaju bljeskove koji planetama u njihovoj bliskoj zoni nastanjivosti mogu ljuštiti atmosferu kao boju s radijatora. S godinama ta aktivnost opada, ali ne kod svih jednako ni jednakom brzinom. LHS 1140 je stara preko pet milijardi godina, okrene se oko sebe jednom u 131 dan i spada među neuobičajeno mirne M patuljke: u dosadašnjim posmatranjima kod nje nije zabilježen nijedan bljesak. To nije isto što i "nikad ne bljeska", ali jeste zvjezdani ekvivalent komšije koji bar ne buši zid nedjeljom.

Oko nje kruže dvije potvrđene planete. Unutrašnja, LHS 1140 c, obiđe zvijezdu za nepuna četiri dana i pretopla je. Vanjska, na 0,0946 astronomske jedinice - četrnaest miliona kilometara, četiri puta bliže nego što je Merkur Suncu - je LHS 1140 b.

LHS 1140 b ima poluprečnik od 1,73 zemaljskih i masu od 5,6 zemaljskih. Te dvije brojke zvuče suho dok ne izračunaš šta iz njih slijedi: gustina od 5,96 grama po kubnom centimetru, brojčano gotovo jednaka zemaljskoj, i površinsko ubrzanje od 18,4 metra u sekundi na kvadrat. Skoro dva g. Prima 42 posto svjetlosnog fluksa koji Zemlja prima od Sunca. Ravnotežna temperatura joj je oko -50 stepeni C, a na tu brojku odmah ide zvjezdica, jer ravnotežna temperatura nije temperatura tla nego ono što planeta mora zračiti da bi bila u ravnoteži s primljenim zračenjem, uz pretpostavljeni albedo

i bez ikakvog efekta staklene bašte. I ona podudarnost gustine vara. Cadieux i saradnici su zaključili da LHS 1140 b vjerovatno nije klasična stjenovita super-Zemlja, nego ili mini-Neptun s vrlo tankim vodikovim omotačem ili vodeni svijet. Ista gustina, sasvim druga unutrašnjost.

Ništa od toga je ne bi izdvojilo iz gomile. Ono što je izdvaja desilo se 16. jula 2026. Tog dana je tim predvođen Collinom Cherubimom objavio u časopisu Science da je spektrografom WINERED na teleskopu Magellan u Čileu uhvatio helij kako "bježi" iz gornje atmosfere LHS 1140 b. Rendgensko i ekstremno ultraljubičasto zračenje zvijezde grije taj sloj, on se širi i curi u svemir, i mi to curenje vidimo.

To zvuči kao loša vijest za planetu. Ali nije. Da bi nešto curilo, mora ga prvo biti. Centar za astrofiziku Harvard & Smithsonian rezultat je objavio kao prvu detekciju atmosfere na stjenovitoj planeti u zoni nastanjivosti neke druge zvijezde. Sam rad je oprezniji od naslova: mjerenje govori o gornjem sloju, i taj sloj je vjerovatno obogaćen helijem i osiromašen vodikom, upravo onako kako se očekuje poslije milijardi godina frakcionisanog gubitka mase. Šta je ispod, mjerenje ne kaže.

Do tada smo imali samo kandidate. James Webb je godinama gledao TRAPPIST-1, sistem koji je Phil Plait opisao u svojoj knjizi "Under Alien Skies", i redom nalazio - ništa. Gole stijene. Kod LHS 1140 b Webb je 2024. uradio nešto drugo: spektroskopijom u tranzitu snažno je ograničio mogućnost gustog omotača bogatog vodikom i ostavio kao vjerovatnije rješenje atmosferu visoke srednje molekulske mase, moguće azotnu, s vodenom parom i ugljik-dioksidom. Autori i sami naglašavaju da je pouzdanost tog zaključka skromna; naznaka azotne atmosfere ima svega 2,3 standardne devijacije (premalo da bismo rekli da je azotna atmosfera dokazana), a podaci su podložni kontaminaciji i od same zvijezde. Ali čak i kao naznaka, to bi bio zrak koji je po hemiji rođak našeg.

A onda je stvar postala komplikovanija, i to na način zbog kojeg volimo nauku. Trinaestog avgusta 2026, dakle prije nepunih sedmicu dana dok ovo pišem, na arXiv su istog dana stigla dva nezavisna rada - jedan Michaela Radice, drugi Katherine Bennett sa saradnicima - koji su prečešljali četiri tranzita LHS 1140 b snimljena instrumentom NIRISS na Webbu između decembra 2023. i jula 2026. Ni u jednom nisu našli helij.

Nije riječ o slabom signalu. Svaki od četiri tranzita govori protiv apsorpcije helija, a apsorpcija tačno one amplitude i širine koju je prijavio Cherubimov tim isključena je s odnosom izgleda od 300 do 86000 naprama jedan. Ali, i ovo je ključno, nijedno Webbovo posmatranje nije bilo istovremeno sa zemaljskim. Cherubimov tim je helij vidio 2024, pa ga u kasnijem pokušaju nije vidio, što je već tada nagovijestilo da bijeg atmosfere može biti vremenski promjenljiv. Bennett i saradnici to formulišu ovako: prijavljena detekcija je možda lažna, ali se promjenljivost ne može isključiti ako se helij pojavljuje u manje od pola tranzita.

Dakle, gdje smo sada? Imamo jedan snažan spektroskopski dokaz da ova planeta ima atmosferu i četiri kasnija mjerenja boljim instrumentom koja taj dokaz ne reprodukuju. To nije poraz. To je tačka u kojoj se prelazi iz saopštenja za medije u stvarnu nauku, gdje jedan tim provjerava drugi i gdje se odgovor ne dobija odmah.

Ovdje treba biti pošten prema konkurenciji, jer je konkurencija po nekim mjerilima bolja. Ovdje mislim na druge planete možda slične Zemlji.

TOI-700 d je po dimenzijama još bliža Zemlji: oko 1,07 Zemljinih poluprečnika i prima oko 85 posto Zemljinog zvjezdanog fluksa. Njena zvijezda je relativno miran M patuljak, a planeta se nalazi u nastanjivoj zoni. Zašto onda nije bolji kandidat od LHS 1140 b? Zato što joj još nemamo pouzdano izmjerenu masu. Bez mase ne možemo sigurno odrediti gustinu i unutrašnji sastav, a njen atmosferski signal

je, zbog male planete i relativno velike zvijezde (TOI-700 je oko dva puta veća od LHS 1140), mnogo teži za karakterizaciju. LHS 1140 b je veća i tranzitira preko mnogo manje zvijezde, pa je za sada povoljnija meta za proučavanje atmosfere.

Teegarden b je još izazovnija egzoplaneta: udaljena je svega 12,5 svjetlosnih godina i, prema novijim mjerenjima ima minimalnu masu od oko 1,16 Zemljinih masa. Na papiru, njen indeks sličnosti Zemlji jedan je od najviših među poznatim egzoplanetama. Ali otkrivena je metodom radijalnih brzina: njena gravitacija dok kruži oko zvijezde izaziva sitna, periodična pomjeranja same zvijezde, koja astronomi mogu registrovati u njenom spektru. Teegarden b ne prolazi ispred svoje zvijezde, pa ne znamo njen poluprečnik, a bez poluprečnika ne možemo pouzdano odrediti gustinu. A bez tranzita nemamo mogućnost da transmisijском spektroskopijom analiziramo svjetlost zvijezde koja prolazi kroz njenu atmosferu. Znamo da je tamo i to je zasad gotovo sve što možemo reći.

LHS 1140 b zato ostaje izuzetno zanimljiva egzoplaneta: imamo precizno izmjerene masu i poluprečnik, a uz to i jedan ozbiljan, ali trenutno osporen spektroskopski signal povezan s atmosferom. Zato je danas ona u fokusu.

Ono što slijedi je zamišljena scena zasnovana na klimatskim modelima, a ne predviđanje stvarnog izgleda površine LHS 1140 b. Fizika u njoj izvedena je iz mjerenih vrijednosti; geografija nije.

9.3 Iskustvo kakvo se ne doživi često

Vozilo ide sporo, dvadeset kilometara na sat, i to je namjerno. Pri skoro dva g svaki udarac u brazdu prolazi kroz sjedište, kroz kičmu i izlazi negdje kod zuba. Ideš prema subzvezdanoj tački, prema jedinom mjestu na planeti iznad kojeg zvijezda stoji u zenitu. Za tri dana pređeš oko hiljadu petsto kilometara i cijelo to vrijeme zvijezda se penje. Milimetar po milimetar, ali se penje, ne zato što se planeta okreće, nego zato što se ti krećeš ispod nje.

Led se mijenja pod točkovima. Prvo je sivi i tvrd. Onda počinje da bude šaren: tamne pruge, žućkaste mrlje, mreža pukotina koja izgleda kao razbijeno staklo veliko kao cijela Hercegovina. Onda postaje mokar. Ne otopljen, samo mokar, sjajan, pod tankim slojem nečega, i točkovi počinju da proklizavaju.

A onda oblak, koji je tri dana bio bijela crta na horizontu, više nije crta. On je zid. Diže se iznad tebe, prekriva zvijezdu, i po prvi put otkako si sletio nemaš svoju sjenku.

Počinje padati kiša. Prava, tečna, u kapima. Na 1,87 g one padaju brzo i udaraju u krov vozila kao sitni šljunak. Naime, na 1,87 g kapi imaju veću gravitacijsku akceleraciju nego na Zemlji, a njihova konačna brzina pada zavisila bi od veličine kapi i gustine atmosfere. Nekoliko sati kasnije prestaje led. Naprosto prestaje, u niskom nagibu, i ispred tebe je tamna voda kojoj se ne nazire kraj.

Planeta je vrlo vjerovatno plimno zaključana. To nije izmjereno nego izračunato. Na 0,0946 astronomskih jedinica od zvijezde, s orbitalnim periodom od 24,74 dana, vremenska skala plimnog kočenja mnogo je kraća od starosti sistema, pa je sinhrona rotacija vrlo vjerovatna (starost sistema se mjeri milijardama godina). Dan je jednak godini. Jedna hemisfera gleda u zvijezdu zauvijek, druga zauvijek u svemirsku prazninu.

Ono što se onda dešava zavisi isključivo od toga ima li planeta zrak. Bez zraka bi subzvjezdana tačka bila pećnica, a noćna strana zamka za sve što se može zalediti, i sva bi voda za nekoliko miliona godina otpuzala na mračnu stranu i tamo ostala kao ledeni oklop debeo kilometrima. S atmosferom nastaje cirkulacija: topao zrak se diže iznad subzvjezdane tačke, otiče prema noćnoj strani, hladi se, vraća prizemno nazad. Toplota se "razmazuje" po cijeloj planeti.

Ali kod LHS 1140 b se ne razmazuje dovoljno. Uz 42 posto zemaljskog fluksa i temperaturu ravnoteže od oko minus 50 °C, atmosfera može spasiti samo krug oko tačke koja gleda u zvijezdu.

Klimatski modeli - i naglašavam da je riječ o modelima, a ne o opažanju - daju sliku toliko sugestivnu da su joj astronomi dali ime: planeta tipa "oko". Bijela snježna gruda, i u njoj jedno tamno okruglo more prečnika oko četiri hiljade kilometara, po površini otprilike kao Evropa (oko osmine Atlantika). U tom scenariju bi u samom centru, tačno ispod zvijezde, temperatura vode mogla biti ugodnih dvadeset stepeni. Nijedna od te tri brojke nije izmjerena. Sve tri slijede iz pretpostavki o sastavu i pritisku atmosfere koje tek treba provjeriti.

Gustina planete je previše niska za čistu stijenu i željezo. Najbolje poklapanje traži da devet do devetnaest posto ukupne mase bude voda. Devet posto od 5,60 Zemljinih masa je oko 3 000 000 000 000 000 000 000 tona, otprilike dvije hiljade puta više nego u svim zemaljskim okeanima zajedno. Ako se taj inventar raspodijeli po planeti, dobiju se slojevi ogromne dubine, reda hiljada kilometara. Stvarna raspodjela zavisi od unutrašnje građe, odnosa stijene i metala, temperature i faza leda, i nije izmjerena. Ono što se pouzdano može reći jeste da se voda pri takvim pritiscima ne ponaša kao voda - duboko dolje prelazi u faze leda pod visokim pritiskom, čvrste na temperaturama daleko iznad tačke topljenja, samo zato što su jako komprimirane. U nekim modelima to znači da veliki dio vode leži iznad sloja leda, pa okean možda uopšte ne dodiruje silikatno dno.

Ako je ovaj scenarij tačan, LHS 1140 b nije Zemlja s previše snijega. To je nešto za šta u našem sistemu nemamo pravi analog: vođeni svijet veličine super-Zemlje, sa ledenim omotačem i jednim otvorenim okom prema zvijezdi.

Stojiš na obali i prvo što te iznenadi jeste koliko je mračno.

Ne mračno kao noć. Mračno kao kišno popodne u novembru, kao onih pola sata prije nego što upališ svjetlo u sobi jer si primijetio da čitaš u polumraku. Kroz oblačni pokrov dopire nekoliko hiljada

luksa. Kod kuće, na otvorenom podnevnom suncu, imaš sto dvadeset hiljada.

Sve ima boju. To je ono što nisi očekivao. Očekivao si crvenilo, filter, nešto marsovsko, ali tvoje oči za deset minuta preuzmu stvar, kalibrišu se, i more postane naprosto more, sivozeleno i tamno, a led na horizontu naprosto bijel. Tek kad pogledaš vlastitu rukavicu, koja je u katalogu bila hladno bijela, vidiš da je boje kosti.

Talasi su niski, gusti i brzi. Pri skoro dva g voda se vraća dolje mnogo odlučnije nego što bi trebalo. Nema pjene kakvu poznaješ. Udar u obalu je kraći i tvrdi, kao da more nema strpljenja.

Horizont je dalji nego ikad u tvom životu - šest kilometara umjesto četiri i po - a površina po kojoj bi mogao hodati ipak je manja od Zemljine, jer bi u ovom scenariju najveći dio površine bio pod ledom.

Onda se oblak razmakne. Zvijezda je tačno u zenitu. Ne blizu zenita - u zenitu, jer stojiš na tački koja po definiciji gleda pravo u nju. Široka je dva i po Mjeseca, tupo narandžasta, i na vodi ispod nje pali se jedna jedina bakrena mrlja odsjaja koja se ne pomjera na zapad, ne pomjera se na istok, ne pomjera se nikuda. Za četiri milijarde godina ta mrlja se nije pomjerila. Tek tada čovjek shvati šta zapravo znači riječ "plimno zaključan".

Vrijedi objasniti zašto je tamo tako tmurno, jer to nije stvar oblaka. Zvijezda na 2800 stepeni C zrači po Wienovom zakonu s maksimumom na oko 936 nanometara, tj. duboko u infracrvenom dijelu spektra. Ako integrišete Planckovu krivu, ispada da samo 17,5 posto njene snage pada u opseg koji ljudsko oko uopšte registruje. Kod Sunca je to 52,7 posto. Fizičari to pakuju u veličinu koja se zove luminozna efikasnost zračenja: za Sunce 96,5 lumena po vatu, za LHS 1140 svega 24,9. Planeta prima 587 vati po kvadratnom metru, što je pristojno, što odgovara fotometrijskoj osvijetljenosti od oko

14600 luksa iznad atmosfere. Dodajte oblake i dobijete pomenuto novembarsko popodne.

Boje ipak funkcionišu, i to je važno. Na nekoliko hiljada luksa čunjići u oku rade punom parom; ovo nije siva noćna slika kakvu dobijate u maglini. Ljudski vid ima i mehanizam hromatske adaptacije koji nakon nekoliko minuta pomjeri ono što mozak zove "bijelim" prema izvoru osvjtljenja. Isti razlog zbog kojeg papir pod starom sijalicom od 2700 kelvina ne izgleda narandžasto. Ali stvari koje same nemaju boju odaju prevaru - snijeg, oblaci, tvoja bijela rukavica - i one će uvijek biti blago boje slonovače.

Nebo je zasebno pitanje i tu treba priznati nesigurnost. Ako atmosfera zaista jeste azotna i pritiska reda zemaljskog, Rayleighovo rasijanje i dalje najjače raspršuje kratke talasne dužine, ali kratkih talasnih dužina jedva da ima. Rezultat vjerovatno nije plavo niti crveno nebo, nego nešto što naginje ljubičasto-sivom, tamnije nego što bi vam osjećaj govorio, s izraženim posvjtljenjem oko same zvijezde. Niko to još nije izmjerio i neće još dugo.

Atmosfera bi se razlikovala od Zemljine i po tome koliko je "zbijena" po visini. Na LHS 1140 b gravitacija je oko 1,87 puta jača nego na Zemlji. Ako pretpostavimo atmosferu sličnu našoj, sastavljenu uglavnom od azota i temperature oko -20 stepeni C, atmosferski pritisak bi s visinom opadao mnogo brže nego na Zemlji. Već nakon otprilike četiri kilometra visine pritisak bi pao na oko trećinu početne vrijednosti, dok je na Zemlji za isti pad pritiska potrebno oko 8,5 kilometara. Drugim riječima, atmosfera bi bila vertikalno mnogo "zbijenija": najveći dio zraka nalazio bi se bliže površini, a promjene pritiska s visinom bile bi izraženije.

Druga velika razlika je rotacija. LHS 1140 b napravi jednu rotaciju za oko 24,74 dana, pa joj je ugaona brzina približno 25 puta manja od Zemljine. Zbog toga je i Coriolisov efekat - sila koja na Zemlji usmjerava velike atmosferske tokove i pomaže oblikovanju ciklona i

anticiklona - mnogo slabiji. Njegova jačina ipak zavisi od geografske širine, pa se ne može opisati jednim brojem za cijelu planetu. Globalna cirkulacija zato bi vjerovatno izgledala drugačije nego na Zemlji: umjesto brzih i dobro organizovanih vrtloga, mogli bismo očekivati šire, sporije i dugotrajnije strukture.

Ostatak neba je kratka priča. Unutrašnja planeta c nikad se ne udalji više od 16,5 stepeni od zvijezde, pa je stalno u njenom bljesku; u najboljem trenutku je disk širok četiri do pet lučnih minuta, dakle vidljiv, ali samo ako zvijezdu zaklonite rukom.

Svakih četiri i po dana prođe preko njenog lica kao velika okrugla pjega. Sazviježđa su, sa 49 svjetlosnih godina, još uvijek prepoznatljiva, ali su bliske zvijezde vidljivo raseljene i nijedan ljubitelj neba s Balkana ne bi na prvu našao Orion.

Naše Sunce se odande vidi negdje na granici između Djevice i Berenikine kose.

I sad ono najvažnije, što se u ovakvim tekstovima obično zaboravi: ništa od gore opisanog nije potvrđeno. Nije potvrđeno od čega je atmosfera, koliki joj je pritisak, ima li tečne vode, ni je li scenarij "oka" tačan umjesto potpuno zaleđene kugle bez ijedne kapi na površini. Poslije avgusta 2026. imamo jedan uvjerljiv spektroskopski signal koji je interpretiran kao dokaz atmosferskog bijega i četiri kasnija mjerenja koja ga nisu reprodukovala.

Jedan od ključnih budućih ciljeva biće traženje apsorpcije CO₂ oko 4,2 mikrometra. U nekim modelima očekivani signal je reda desetina ppm, što pokazuje koliko je mjerenje zahtjevno.

Ali nit postoji, i prvi put je vezana za nešto stvarno. Od svih svjetova koje smo dosad pronašli, LHS 1140 b je prvi na kojem smo uspjeli uhvatiti trag nečega što bismo mogli nazvati nebom.

Literatura

Potvrda atmosfere

- [1] Cherubim, C., Vissapragada, S., Teske, J. i sar. (2026). Helium escaping from the atmosphere of a nearby rocky exoplanet orbiting in a habitable zone. *Science*.
- [2] Radica, M. (2026). Strict Limits on Helium Absorption from LHS 1140 b from Four JWST NIRISS Transits. *arXiv:2608.13470*.
- [3] Bennett, K. A. i sar. (2026). No Helium Detected in LHS 1140 b from Four JWST NIRISS/SOSS Transits. *arXiv:2608.13473*.

Masa, poluprečnik i unutrašnja grada

- [4] Dittmann, J. A. i sar. (2017). A temperate rocky super-Earth transiting a nearby cool star. *Nature*, 544, 333-336.
- [5] Ment, K. i sar. (2019). A Second Terrestrial Planet Orbiting the Nearby M Dwarf LHS 1140. *The Astronomical Journal*, 157, 32.
- [6] Lillo-Box, J. i sar. (2020). Planetary system LHS 1140 revisited with ESPRESSO and TESS. *Astronomy & Astrophysics*, 642, A121.
- [7] Cadieux, C. i sar. (2024). New Mass and Radius Constraints on the LHS 1140 Planets: LHS 1140 b Is either a Temperate Mini-Neptune or a Water World. *The Astrophysical Journal Letters*, 960, L3.

Atmosferska spektroskopija i klimatski modeli

- [8] Edwards, B. i sar. (2021). Hubble WFC3 Spectroscopy of the Habitable-zone Super-Earth LHS 1140 b. *The Astronomical Journal*, 161, 44.
- [9] Cadieux, C. i sar. (2024). Transmission Spectroscopy of the Habitable Zone Exoplanet LHS 1140 b with JWST/NIRISS. *The Astrophysical Journal Letters*, 970, L2.
- [10] Damiano, M., Hu, R. i sar. (2024). LHS 1140 b Is a Potentially Habitable Water World. *The Astrophysical Journal Letters*. *arXiv:2403.13265*.
- [11] Reanalysis of the LHS 1140 b atmosphere observed with the Hubble Space Telescope (2024). *arXiv:2403.20285*.
- [12] Madhusudhan, N. i sar. (2024). On the Ocean Conditions of Hycean Worlds. *arXiv:2402.12330*.

- [13] Wunderlich, F. i sar. (2021). Distinguishing between wet and dry atmospheres of TRAPPIST-1 e and f. *Astronomy & Astrophysics*, 647, A48.
- [14] Herbst, K. i sar. (2024). Modeling the astrosphere of LHS 1140. *arXiv:2412.04018*.
- [15] Highlights from Exoplanet Observations by the James Webb Space Telescope (2025). *arXiv:2505.20520*.

Zona nastanjivosti, indeksi i metodologija

- [16] Kopparapu, R. K. i sar. (2014). Habitable Zones Around Main-sequence Stars: Dependence on Planetary Mass. *The Astrophysical Journal Letters*, 787, L29.
- [17] Chen, J., & Kipping, D. (2017). Probabilistic Forecasting of the Masses and Radii of Other Worlds. *The Astrophysical Journal*, 834, 17.
- [18] Méndez, A., & Rivera-Valentín, E. G. (2017). The Equilibrium Temperature of Planets in Elliptical Orbits. *The Astrophysical Journal Letters*, 837, L1.

Uporedni sistemi

- [19] Gilbert, E. A. i sar. (2020). The First Habitable-zone Earth-sized Planet from TESS. I. Validation of the TOI-700 System. *The Astronomical Journal*, 160, 116.
- [20] Gilbert, E. A. i sar. (2023). A Second Earth-sized Planet in the Habitable Zone of the M Dwarf, TOI-700. *The Astrophysical Journal Letters*, 944, L35.
- [21] Evaluating Habitability and Biosignature Detection on TOI-700 d: The Role of UV Environment and Atmospheric Pressure (2025). *The Astrophysical Journal*.

Baze podataka

- [22] NASA Exoplanet Archive - Planetary Systems Composite Parameters (PSCompPars). Pasadena: NExScI/Caltech. Online baza podataka.
- [23] Planetary Habitability Laboratory, University of Puerto Rico at Arecibo. Habitable Worlds Catalog. Online baza podataka.
- [24] Gaia Collaboration (2023). Gaia Data Release 3. *Astronomy & Astrophysics*, 674, A1.

10

Šetnja kroz kvantni svijet

"Ako vas kvantna mehanika nije duboko šokirala, znači da je još niste razumjeli." (Niels Bohr)



Kvantna mehanika počinje tamo gdje naša svakodnevna intuicija prestaje biti pouzdan vodič. Kada bismo mogli povećati njene efekte do ljudskih razmjera, svijet bi postao mjesto u kojem se čestice ne ponašaju onako kako očekujemo: mogli bismo prolaziti kroz prepreke, biti u superpoziciji, biti kvantno spregnuti s udaljenim sistemima i susresti se s činjenicom da čestice iste vrste nemaju vlastiti identitet. Ovaj tekst koristi misaoni eksperiment "kvantne zemlje" kako bi te pojave približio intuiciji, ali istovremeno pokazuje gdje metafore prestaju važiti, a počinje stvarna fizika. Na kraju se vraćamo u naš svakodnevni svijet i otkrivamo da kvantna čuda nisu

nestala - ona su samo skrivena iza male vrijednosti Planckove konstante i neprekidne interakcije s okolinom.

10.1 Zašto ne smanjujemo čovjeka nego dižemo $\hbar$

Zamislite da se jednog jutra probudite, a svijet je ostao isti u svemu osim u jednome. Šoljica na stolu blago podrhtava, iako je niko ne dira. Kad posegnete za njom, ruka vam na trenutak zatreperi kao da je bila na dva mjesta prije nego što se odlučila. Pogledate kroz prozor: Mjesec, koji bi u ovo doba već trebao zaći, stoji nekako razmazano, kao slika koju je neko protresao dok se sušila. Niste poludjeli. Neko je, dok ste spavali, okrenuo jednu jedinu ručicu na upravljačkoj ploči svemira i vi ste se prvi put u životu probudili unutar svijeta kvantne mehanike, svijeta dovoljno krupnog da se vidi golim okom.

Ovaj ogled je putovanje u taj svijet. Ali ne putovanje kakvo obično nude popularne knjige - one koje vas uvjeravaju da je sve "čudno" i tu vas ostave, zadivljene i zbunjene. Ovdje ćemo pokušati nešto teže: proći kroz svako čudo do kraja, vidjeti kako izgleda iznutra, a onda tačno reći gdje slika koju smo upravo naslikali počinje lagati. Jer kvantna fizika ne traži da vjerujemo u nemoguće - traži da odustanemo od nekoliko stvari za koje smo bili sasvim sigurni da su istinite.

Postoji stara, primamljiva slika: da biste vidjeli kvantni svijet, treba se smanjiti. Zamislite da vas neko stisne do veličine atoma i da onda prošetate među elektronima kao među kućama u ulici. Slika je efektna, ali je pogrešna i to na način koji vrijedi objasniti odmah na početku, jer od njega zavisi sve što slijedi.

Čovjek nije mali skup atoma koji se može proizvoljno skalirati. Čovjek je emergentna, klasična struktura: temperatura, krutost, oblik, boja, čvrstoća kože - sve su to svojstva koja nastaju iz kolektivnog ponašanja ogromnog broja čestica i nemaju smisla na razini pojedinog atoma. Kada biste čovjeka "smanjili" na atomsku skalu, ne

biste dobili sićušnog čovjeka; ne biste dobili čovjeka uopće. Dobili biste nekoliko čestica bez ijednog svojstva po kojem bismo ga prepoznali. Posmatrač bi nestao zajedno s onim što je trebao posmatrati.

Zato posežemo za trikom koji je prije gotovo devedeset godina smislio George Gamow u svojoj besmrtnoj knjizi o gospodinu Tompkinsu. Umjesto da mijenjamo posmatrača, mijenjamo pravila svijeta oko njega. Gamow je uzeo prirodne konstante - brzinu svjetlosti, gravitacijsku konstantu, Planckovu konstantu - i, jednu po jednu, "okrenuo ručicu" tako da njihovi efekti postanu vidljivi golim okom. U njegovom kvantnom svijetu Planckova konstanta ($\hbar$) nije sićušna nego ogromna, pa biljarske kugle vrše difrakciju oko štapa, a tigar u zoološkom vrtu bude "razmazan" preko cijelog kaveza jer mu je valna priroda postala makroskopska.

Ova strategija - sačuvati makroskopskog posmatrača i podići Planckovu konstantu - jedini je način da smisleno govorimo o "čovjeku u kvantnom domenu". Ista narativna logika pokreće i Russella Stannarda, koji je Gamowog junaka osvježio za novu generaciju, i njegovog "ujaka Alberta", gdje dječak-posmatrač na biciklu ulazi u režim u kojem relativistički efekti postaju svakodnevni. Preuzimamo isti žanr, samo ga usmjeravamo prema kvantnom svijetu.

Vrijedi na trenutak zastati na tome zašto je baš Planckova konstanta prava "ručica". Ona je kvant djelovanja - najmanja jedinica one veličine koja povezuje energiju i vrijeme, odnosno impuls i položaj. Kad god u nekom procesu izmijenjeno djelovanje postane uporedivo s $\hbar$, klasična fizika prestaje važiti i mora je zamijeniti kvantna. U našem svijetu djelovanje bilo koje ljudske radnje - koraka, treptaja, bacanja kamena - nadmašuje $\hbar$ za desetke redova veličine, pa nikada ne osjetimo kvantno zrno stvarnosti. Podignuti $\hbar$ znači, u suštini, dovesti to zrno do veličine u kojoj počinjemo spoticati se o njega. Chad Orzel voli reći da je kvantna fizika zapravo fizika diskretnog -

svijeta koji dolazi u paketićima umjesto u glatkom kontinuumu; naš misaoni eksperiment jednostavno te paketiće uveća dok ih ne primijetimo.

I još jedna napomena o metodi, prije nego zakoračimo. Ovaj tekst namjerno se kreće između dvije razine: slike, koja govori u intuiciji, i brojke, koja je drži na uzici. Slika bez brojke sklizne u bajku; brojka bez slike ostane mrtva. Zato u svakom poglavlju stoji i jedno i drugo - vizija onoga što biste "vidjeli" i procjena reda veličine koja pokazuje zašto to inače ne vidite. Tamo gdje slika laže, to ćemo reći naglas, jer je, kako opominje Ball, pola posla u popularizaciji kvantne fizike upravo rušenje slika koje smo maloprije sami sagradili.

Numerička sidra držimo pri ruci od početka. Stvarna vrijednost Planckove konstante je $\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34}$ Js. Sve što slijedi svodi se na jednu misao: ta brojka je toliko mala da kvantni efekti na ljudskoj skali iznose 10^{-35} metara ili manje - nemjerljivo, nezamislivo, sakriveno. Naš misaoni eksperiment sastoji se u tome da tu ručicu podignemo za tridesetak redova veličine i pogledamo šta se dešava. Uz jednu ogradu, na kojoj insistiraju i Jean-Marc Lévy-Leblond i Françoise Balibar: ne može se promijeniti jedna konstanta a da se ostatak fizike ne raspadne. Ovo nije konzistentan svijet - to je pedagoški alat, most preko kojeg intuicija može preći tamo kamo je matematika već stigla.

Ostaje nam, dakle, samo da zakoračimo. Šest je čuda pred nama, i nijedno nije usamljeno: neodređenost će nas dovesti do prolaska kroz zidove, prolazak kroz zidove do bivanja na dva mjesta, a to do pitanja zašto sve to nestane čim neko pogleda. Odatle je samo korak do toga da budemo nevidljivo povezani s ljudima na drugom kraju svijeta i, na kraju, do otkrića da u ovom svijetu niko nema vlastito lice. Svako poglavlje otvorit će vrata sljedećem. Krenimo od najtišeg čuda - onoga koje se dešava dok samo pokušavamo mirno stajati.

10.2 Svijet bez mirovanja

Prvi šok nije spektakularan. Nema eksplozije, nema bljeska. Prvi šok je to što ne možete mirno stajati.

Pokušate se ukopati u mjesto. Što se čvršće upirete da budete tačno tu, na tom kvadratnom centimetru poda, to vas nešto nasilnije trza - ne u jednom smjeru, nego nepredvidivo, na sve strane. Nije to drhtanje od hladnoće niti od straha. To je cijena koju plaćate za pokušaj da istovremeno budete i tačno smješteni i savršeno mirni. U kvantnoj zemlji to dvoje se međusobno isključuju.

Iza slike stoji Heisenbergova relacija neodređenosti: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$. Što preciznije fiksirate položaj (mali Δx), to je veća neodređenost impulsa (veliki Δp) - i obrnuto. Nije riječ o tome da vam mjerni instrument nije dovoljno dobar; riječ je o tome da čestica jednostavno nema istovremeno oštru vrijednost i jednog i drugog. Čak i sistem ohlađen na apsolutnu nulu ne miruje: harmonijski oscilator zadržava nultu energiju $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$. Vakuum sam titra.

Zašto to nikada ne osjećate? Uvrstite brojke. Za čovjeka mase 70 kg kvantna neodređenost položaja iznosi reda 10^{-36} metara - otprilike milijarditi dio bilionitog dijela prečnika protona. Podignete li $\hbar$, ista formula daje pomake koje vidite: svijet oko vas počinje suptilno "ključati".

Ovdje treba biti oprezan, i tu je nezamjenjiv Philip Ball. On upozorava da nam metafore stalno podmeću krive slike. "Titranje" nije klasično vibriranje u vremenu, kao žica gitare; to je nemogućnost istovremene definiranosti dviju veličina. Kvantna neodređenost nije naše neznanje o tome gdje je čestica koja negdje ipak jest - ona je odsustvo činjenice koju bismo mogli znati. Razlika je suptilna, ali je srž cijele stvari; ako je propustite, sve ostalo klizi u misticizam.

Ima u tom prvom šoku i neočekivane utjehe. Nemogućnost mirovanja nije nedostatak svijeta nego njegov temelj: upravo nulta energija sprječava da se materija uruši sama u sebe. Da elektron može istovremeno imati oštar položaj u jezgri i nulti impuls, atom bi se u trenu srušio i nikakve strukture ne bi bilo. Neodređenost koja vas u kvantnoj zemlji ne pušta da mirno stojite ista je ona koja u stvarnom svijetu drži atome naduvanim i postojanim. Prvo čudo, dakle, nije prijetnja stabilnosti - ono je njezin izvor.

10.3 Prolazak kroz zid

Ako vas neodređenost iz prvog poglavlja nikada ne pušta da budete tačno na jednom mjestu, onda logično slijedi neugodno pitanje: ako niste posve sigurno ovdje, koliko daleko odavde zapravo možete biti? Odgovor je uznemirujući. Ponekad, s druge strane zida.

Naslonite se, umorni, na zatvorena vrata. Većinu vremena ostanete s ove strane, kao što i priroda nalaže. Ali ponekad - bez trzaja, bez zvuka lomljave, bez ikakvog osjećaja probijanja - jednostavno se zateknete s druge strane. Vrata su i dalje zatvorena, brava netaknuta. Vi ste prošli.

To je tuneliranje, i nije magija nego vjerovatnoća. Talasna funkcija čestice ne pada naglo na nulu na rubu prepreke; ona kroz prepreku eksponencijalno slabi. Ako je prepreka dovoljno tanka i niska, na drugoj strani ostane malen, ali nenulti "rep", a to znači konačnu šansu da se čestica ondje pojavi. Vjerovatnoća prolaza T opada eksponencijalno s debljinom prepreke d : $T \sim e^{(-2\kappa d)}$. Koeficijent κ određuje koliko brzo talasna funkcija slabi unutar prepreke: $\kappa = \sqrt{2m(V - E)}/\hbar$. Ovdje je m masa čestice, V visina barijere, E energija čestice, a $\hbar$ reducirana Planckova konstanta. Što je čestica masivnija i što joj više energije nedostaje da preskoči barijeru, to je κ veći, a vjerovatnoća prolaza manja.

Upravo ta zavisnost od mase objašnjava zašto ne prolazite kroz zidove. Za makroskopsko tijelo eksponent naraste do 10^{35} , pa je

vjerovatnoća toliko blizu nule da biste, pokušavajući, čekali neusporedivo duže od starosti svemira. Podignite $\hbar$ i eksponent se smanji - "prolazak kroz zid" postane svakodnevna neugodnost, nešto kao propuh.

Za osjećaj razmjera vrijedi zadržati se na eksponentu. Kad se u izrazu za T pojavi broj poput 10^{35} u negativnom eksponentu, ne govorimo o "maloj šansi" u svakodnevnom smislu - govorimo o vjerovatnoći tako nezamislivo sitnoj da za nju nemamo poređenja u iskustvu. Zato je razlika između mikrosvijeta i makrosvijeta ovdje kvalitativna, a ne postupna: za elektron koji nailazi na barijeru debljine nanometra tuneliranje je rutina, za tenisku lopticu je čudo koje se ne dešava nikada u životu svemira. Podizanjem $\hbar$ mi zapravo pomjeramo granicu između te dvije stvarnosti naviše, dok ne obuhvati i vas.

Lijepa je poetska pravda u tome što je baš Gamow - isti onaj koji nam je posudio gospodina Tompkinsa - 1928. godine tuneliranjem objasnio alfa-raspad: alfa-čestica pobjegne iz jezgre iako nema dovoljno energije da preskoči barijeru. Tuneliranje danas nije apstrakcija: pogoni skenirajući tunelski mikroskop kojim "vidimo" pojedinačne atome, tunelske diode, a u konačnici i fuziju u jezgri Sunca. David Kaiser u svojim "depešama iz neizvjesnog svijeta" podsjeća koliko je takvih naizgled ezoteričnih efekata s vremenom postalo temelj cijelih tehnologija.

10.4 Biti na dva mjesta

Tuneliranje nam je već nagovijestilo herezu: da ista osoba može biti i s ove i s one strane zida. Sljedeće čudo tu herezu dovodi do kraja. Jer ako možete biti na dvije strane vrata, zašto biste, kad dođete do raskršća, uopće morali birati?

Hodnik se pred vama grana: lijevo i desno. U kvantnoj zemlji ne birate. Krenete objema stranama odjednom - i na kraju se, gdje se

hodnici opet spoje, pojavite ili pojačani ili poništeni, zavisno od toga kako se dva "vas" slože kad se sretnu.

To je superpozicija, a njezin vidljivi potpis je interferencija. Ključ za "vidljivost" je de Broglieva valna dužina $\lambda = h/mv$. Za čovjeka koji hoda ona iznosi oko 10^{-35} metara - nikakve interferencije nema, jer je valna dužina neizmjereno manja od bilo kakvog otvora kroz koji biste prošli. Za elektron je reda nanometra, sasvim mjerljiva. Podizanjem $\hbar$ rastegnute λ do ljudskih razmjera i dvostruki prorez odjednom radi na vama.

Gdje priroda zaista dopušta da se ovaj efekt popne prema "velikom"? Eksperimenti grupe Marka Arndta i Antona Zeilingera pokazali su još 1999. interferenciju molekula fulerena C_{60} - grumena od šezdeset atoma ugljika - a kasniji radovi potvrdili su je za molekule teže od 25000 atomskih jedinica mase (sastavljene od gotovo 2000 atoma).

To je otprilike najbliže što se stvarnost primiće makroskopskoj superpoziciji: stvarni rub, ne mašta. Marco Masi ovakve eksperimente uzima kao okosnicu "kvantne revolucije 21. stoljeća" - trenutka u kojem su misaoni eksperimenti postali laboratorijska rutina.

I ovdje vreba najopasnija zamka, na koju posebno oštro upozoravaju Ball i Lévy-Leblond. Superpozicija ne znači "čestica je istovremeno na dva mjesta kao dva duha". Nije ni "ne znamo na kojem je od dva mjesta". To je treće stanje, bez klasičnog pandana - stanje za koje naš jezik jednostavno nema imenicu. Reći "bio je i lijevo i desno istovremeno" znači nasilno ugurati kvantnu stvarnost u klasične pretince u koje ona ne stane. Bolji vodič je slika nego rečenica: Bob Coecke i Stefano Gogioso u "Quantum in Pictures" zato superpoziciju i interferenciju crtaju kao tokove i spajanja žica, izbjegavajući riječi koje varaju.

10.5 Pogled koji sve pokvari

Do sada ste, priznajmo, uživali. Prolazili kroz zidove, hodali kroz oba hodnika istovremeno, titrali kroz svijet oslobođeni klasične ukočenosti. Vrijeme je za lošu vijest, onu koja objašnjava zašto ništa od svega toga nikada niste iskusili u stvarnom životu. Sva ta čuda imaju jednog jedinog, nemilosrdnog neprijatelja: pogled.

Sva ta čuda - drhtanje, prolazak kroz zid, biti na oba kraja hodnika - traju samo dok vas niko i ništa ne gleda. Neko upali svjetlo, baci pogled u vašem smjeru, i vi ste u tom trenu opet na jednom mjestu, obični, jednoznačni. Kao da vas je posmatranje prizemljilo.

Iskušenje je zaključiti da ljudska svijest ruši valnu funkciju. Taj mit treba odbaciti izričito. Ono što "mjeri" nije svijest, nego okolina: jedan jedini foton koji se od vas odbije, jedna molekula zraka koja u vas udari. Svaki takav dodir odnese sa sobom djelić informacije o vašem stanju i time uništi krhke faze potrebne za interferenciju. Taj proces zove se dekoherencija. Wojciech Zurek pokazao je kako okolina zapravo "bira" stabilna stanja - takozvane "pointer-states" - koja preživljavaju stalno njuškanje svijeta, dok se sva ostala trenutno raspadnu.

Ovdje se naš boravak u kvantnoj zemlji izravno spaja s pitanjem kvantno-klasične granice. Razlog zašto u stvarnom životu nikada ne doživimo ništa od dosad navedenog nije to što $\hbar$ mora biti malo - nego to što nas okolina neprestano mjeri. Vi ste, u svakom trenu, obasjani, zagrijani i bombardirani; svemir vas gleda bez prestanka, i zato ste određeni.

Ali potrebna je i iskrenost o granicama znanja. Dekoherencija objašnjava zašto vidimo određene ishode - zašto svijet izgleda klasičan. Ona ne objašnjava zašto se ostvaruje baš ovaj ishod, a ne onaj drugi. Tu počinje najdublji otvoreni spor u fizici. Sean Carroll u "Something Deeply Hidden" zastupa tumačenje mnoštva svjetova: ništa se ne "ruši", nego se svemir grana, a svaki mogući ishod stvaran

je u svojoj grani. Kopenhagenska škola kaže drugo; postoje i teorije skrivenih varijabli. Naš ogled ne presuđuje - samo bilježi da čovjek koji je prošao kroz kvantnu zemlju izlazi mudriji upravo utoliko što zna gdje prestaje ono što znamo.

10.6 Zapleteni s drugima

Rekli smo da vas okolina "mjeri" tako što se s vama spregne - što se za vas veže nevidljivom niti. Ta nit zaslužuje vlastito poglavlje, jer je najčudnija i najzloupotrebljavanija stvar u cijeloj kvantnoj fizici. Vratimo se, dakle, na trenutak čina spajanja: šta se zapravo desi kad se dvoje ljudi u kvantnoj zemlji dodirne?

Rukujete se s nekim na rastanku. On otputuje na drugi kraj svijeta. Ali i dalje, kad vi na sebi nešto izmjerite, u istom trenutku znate odgovarajuću stvar o njemu - bez obzira na to koliko je daleko otišao. Djeluje kao telepatija, ali nije.

To je kvantna spregnutost (eng. entanglement). Dvije čestice koje su jednom bile u interakciji dijele jedno zajedničko stanje koje se ne može rastaviti na "njeno" i "njegovo". Mjerenje na jednoj trenutno određuje ishod na drugoj - i te su korelacije jače nego što ijedna klasična teorija sa skrivenim varijablama može objasniti. To je sadržaj Bellove teoreme, eksperimentalno potvrđene u nizu sve strožih testova; Nobelovu nagradu 2022. za njih su dobili Alain Aspect, John Clauser i Anton Zeilinger.

Korelacija nije komunikacija. Vi svojim mjerenjem ne možete odabrati šta će ishod biti, pa time ne možete ni prenijeti nikakvu poruku. Ishod je slučajan; tek kad kasnije - običnim, sporijim od svjetlosti kanalom - uporedite bilješke, vidite da su bile savršeno usklađene. To jamči teorema o nemogućnosti signaliziranja (no-signaling). Spregnutost ne krši relativnost i ne prenosi informaciju brže od svjetlosti.

Spregnutost, uz to, nije rijetka egzotika rezervisana za laboratorij. Ona je pravilo, a ne izuzetak: čim dvije čestice međudjeluju, sklone su ostati spregnute, a budući da svaka čestica u vašem tijelu neprestano međudjeluje s okolinom, vi ste u svakom trenu spregnuti s bezbroj čestica svijeta oko sebe.

Upravo to širenje spregnutosti u okolinu - a ne neki poseban čin posmatranja - je dublje lice dekoherencije iz prethodnog poglavlja. Mjerenje i spregnutost dvije su strane istog novčića: mjeriti nešto znači spregnuti se s njim.

Za personifikaciju ovakvih odnosa neprevaziđena je Alice in Quantumland Roberta Gilmorea, gdje kvantni pojmovi hodaju i razgovaraju kao likovi. A za pravu mjeru u tome koliko daleko smijemo ići s pričom o "sablasnom djelovanju na daljinu" - koliko je ono stvarno, a koliko naš jezik - dragocjen je opet Ball, koji cijelu mistiku spregnutosti strpljivo vraća na tlo.

10.7 Ista lica bez pojedinačnosti

Spregnutost nas je naučila da dvoje ljudi mogu dijeliti jedno stanje koje se ne da razlučiti na "njeno" i "njegovo". Posljednje čudo ide korak dalje i pita nešto još dublje: a šta ako se ni same osobe ne mogu razlučiti jedna od druge? Ovo je čudo koje dira u ono što mislimo da najsigurnije jesmo - u vlastitu pojedinačnost.

U kvantnoj zemlji stanovnici nemaju identitet. Dvije čestice iste vrste nisu "vrlo slične"; one su nerazlučive u najdubljem smislu - zamijenite ih i svijet je doslovno isti svijet, jer ne postoji nikakav eksperiment, ni u načelu, koji bi razliku otkrio. Nije da ne umijemo razlikovati dva elektrona; nema šta da se razlikuje.

Iz te nerazlučivosti izrasta podjela svega postojećeg u dva plemena. Ako ste fermion (kao elektron), vrijedi Paulijev princip isključenja: nikada dvoje ne može zauzeti isto stanje. Kao red koji se sam održava, čuvate vječni razmak.

Ako ste bozon (kao foton), zbiva se suprotno: svi težite istom stanju, gomilate se, stapate - što se u Bose-Einsteinovom kondenzatu i dešava. Iza toga stoji simetrija valne funkcije pri zamjeni dviju čestica: kod fermiona ona mijenja znak, kod bozona ostaje ista.

Zašto bi nas to trebalo dirnuti više od ostalih čuda? Zato što upravo Paulijev princip daje strukturu materiji. On je razlog zašto elektroni u atomu zauzimaju ljuske umjesto da se svi sruče na najnižu energiju; zašto postoji periodni sistem, hemija, i čvrsto tlo pod nogama koje se ne stapa s vašim stopalima. Stabilnost klasičnog svijeta - onog gore, iz kojeg smo sišli - počiva na jednom kvantnom pravilu zabrane.

A veza s ovim područjima seže sve do zvijezda. Bijeli patuljci opiru se gravitaciji pritiskom degenerisanog elektronskog plina - čistim Paulijevim odbijanjem; neutronske zvijezde istim principom, ali na neutronima.

Kada taj kvantni pritisak popusti pred masom, zvijezda kolabira u crnu rupu. Isto pravilo koje vam u kvantnoj zemlji ne da da se stopite s drugim čovjekom drži uspravnim čitave mrtve zvijezde. Chad Orzel - koji kvantnu fiziku objašnjava svome psu i time pogađa pravu mjeru vedrine i tačnosti - voli podsjetiti da su najčudnija pravila ujedno i ona koja svijet drže na okupu.

10.8 Povratak u stvarnost

Vratimo se u sobu iz koje smo i krenuli. Ono jutro kad je šoljica podrhtavala, ruka treperila, a Mjesec stajao razmazan na nebu. Neko sada, jednako tiho, vraća ručicu natrag. Konstanta $\hbar$ sklizne na svojih $1,05 \cdot 10^{-34}$ Js, i sva se čuda povuku. Šoljica se smiri. Ruka posegne pravo. Mjesec se izoštri i sjedne tačno tamo gdje ga astronomske tablice očekuju. Ali - i to je poenta cijele šetnje - čuda nisu nestala. Ona su i dalje tu, ispod svega, samo zakopana pod dvostrukom bravom: pod sićušnošću Planckove konstante i pod neprestanom dekoherencijom kojom nas svijet mjeri iz sekunde u sekundu. Svaki atom vašeg tijela u ovom trenu radi sve ono što ste maloprije radili vi

u kvantnoj zemlji - titra, tunelira, spregnut je - samo neizmjerljivo tiše, i pod budnim okom svemira koji nikad ne trepće.

Čovjek koji se vratio iz kvantne zemlje ne nosi kući zaključak da je stvarnost "čudna negdje dolje, sitna i nebitna". Nosi nešto obrnuto i mnogo dublje: da je taj čudni domen temelj iz kojeg emergira pouzdan, određen, klasičan svijet u kojem živimo. Mjesec ne treperi na nebu upravo zato što ga svemir bez prestanka gleda - svaki foton Sunčeve svjetlosti koji se od njega odbije je jedno mjerenje, jedna dekoherencija, jedan razlog više da Mjesec ostane tamo gdje jest.

Literatura

- [1] Ball, P. (2018). *Beyond Weird: Why Everything You Thought You Knew about Quantum Physics Is Different*. London: The Bodley Head.
- [2] Carroll, S. (2019). *Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime*. New York: Dutton.
- [3] Coecke, B., & Gogioso, S. (2023). *Quantum in Pictures: A New Way to Understand the Quantum World*. Cambridge: Quantinuum.
- [4] Gamow, G. (1965). *Mr Tompkins in Paperback*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [5] Gamow, G., & Stannard, R. (1999). *The New World of Mr Tompkins*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [6] Gilmore, R. (1995). *Alice in Quantumland: An Allegory of Quantum Physics*. New York: Copernicus.
- [7] Kaiser, D. (2020). *Quantum Legacies: Dispatches from an Uncertain World*. Chicago: University of Chicago Press.
- [8] Lévy-Leblond, J.-M., & Balibar, F. (1990). *Quantics: Rudiments of Quantum Physics*. Amsterdam: North-Holland.
- [9] Masi, M. (2019). *Quantum Physics: An Overview of a Weird World. A Guide to the 21st Century Quantum Revolution*. Samostalno izdanje.
- [10] Orzel, C. (2009). *How to Teach Quantum Physics to Your Dog*. New York: Scribner.
- [11] Stannard, R. (2005). *The Time and Space of Uncle Albert*. London: Faber & Faber.

11

Univerzum koji računa

"Svako it - svaka čestica, svako polje sile, čak i sam prostor-vrijeme - svoju funkciju, svoje značenje, svoje samo postojanje izvodi iz odgovora na pitanja da/ne, iz bitova."

(J. A. Wheeler; "It from Bit", 1989)



Informacija je jedna od onih ideja koje naizgled pripadaju računarima i ljudskoj komunikaciji, ali se sve dublje pojavljuju i u samim temeljima fizike. Od Shannonovog bita i poruka koje se probijaju kroz šum, preko Landauerove granice i termodinamike, dolazimo do pitanja može li informacija biti više od opisa stvarnosti - možda čak njen temelj. Na tom putu susrećemo kvantnu mehaniku, crne rupe, holografsko načelo i ideju da prostor i vrijeme možda izranjaju iz dublje mreže informacijskih odnosa. Ipak, važno je razlikovati ono što je eksperimentalno potvrđeno od smjelih hipoteza

koje tek pokušavaju pronaći svoje mjesto u fizici. Na kraju ostaje fascinanta mogućnost: možda svemir nije samo nešto što posmatramo i opisujemo, već sistem koji na naša pitanja odgovara kroz samu strukturu stvarnosti.

11.1 Poruka koja je putovala kroz prašumu

Prije nego što uronimo u atome i crne rupe, prošećimo načas kroz afričku prašumu. Više od jednog stoljeća prije nego što je iko izgovorio riječ bit, stanovnici sliva rijeke Kongo prenosili su poruke na udaljenostima od desetina kilometara - pomoću bubnjeva. Nisu koristili Morseovu azbuku; bubnjevima su oponašali melodiju i ritam vlastitog jezika. Ali takav način komunikacije imao je očigledan problem: kada se bogatstvo govornog jezika svede na samo dva tona bubnja, mnoge različite riječi počinju zvučati isto. Kako onda razlikovati mjesec od kokoši?

Bubnjari su pronašli elegantno rješenje. Umjesto da odbubnjaju samo jednu riječ, oni bi je smjestili u kratku, ustaljenu frazu koja je nosila dodatno značenje. Mjesec - nije se izgovarao samostalno, nego kao "mjesec koji gleda dolje na zemlju". Kokoš bi postala "kokoška, ona mala što kaže ki-o-kio". Ono što je na prvi pogled izgledalo kao nepotrebno ponavljanje zapravo je bilo savršeno rješenje za problem šuma i nejasnoće: svaka dodatna riječ sužavala je broj mogućih značenja sve dok ne bi ostalo ono pravo. Kako James Gleick opisuje u svojoj historiji informacije, bubnjari su tako intuitivno koristili redundanciju - višak u poruci koji omogućava da se značenje sačuva čak i kada se dio informacije izgubi u šumu.

Zapamtite tu sliku oblaka mogućnosti koji se sužava sa svakim novim znakom. Ona je, vidjet ćemo, srce cijele priče o informaciji - i, ako su neki fizičari u pravu, možda i srce samog svemira. Čovjek koji je toj slici dao egzaktni oblik nije bio bubnjar, nego povučeni američki inženjer koji je u slobodno vrijeme žonglirao vozeći jednocikl hodnicima laboratorije.

11.2 Čovjek koji je izmjerio iznenađenje

Taj čovjek zvao se Claude Shannon, a godina je bila 1948 - ista ona u kojoj su u Bellovim laboratorijima predstavili prvi tranzistor. Shannon je htio riješiti posve praktičan problem: kako pouzdano prenijeti poruku telefonskom žicom punom šuma. Ali da bi to postigao, morao je prvo odgovoriti na naizgled nemoguće pitanje - koliko informacije uopće ima u nekoj poruci? Kako izmjeriti nešto tako neuhvatljivo?

Shannonov odgovor bio je jednostavan i dubok u isti mah. Količina informacije nije u tome šta poruka znači, nego koliko nas iznenađuje - koliko mogućnosti isključuje. Najmanji mogući djelić informacije je odgovor na jedno pitanje s dva jednako vjerovatna ishoda: da ili ne, glava ili pismo, nula ili jedan. Taj djelić nazvan je bit (od binary digit, binarna znamenka); izraz je Shannonu predložio kolega John Tukey. Jedno bacanje novčića - jedan bit. Tri bacanja - tri bita, dovoljno da se razlikuje osam mogućih nizova glava i pisama.

Shannon je najviše volio moć bita pokazivati kroz igru "Dvadeset pitanja". Prijatelj zamisli pojam, vi ga pogađate isključivo da/ne pitanjima. Tajna dobre igre, govorio je, jest da svako pitanje preostale mogućnosti dijeli na dvije približno jednake polovine. "Je li živo?" - pola svemira otpada. "Stane li u ruku?" - opet pola. Svaki pametno postavljen odgovor nosi tačno jedan bit i prepolovi neizvjesnost. Zamislite li da na svijetu postoji milion mogućih pojmova, dvadeset dobro postavljenih pitanja dovoljno je da se dođe do bilo kojeg od njih - jer dva na dvadesetu prelazi milion. To je isti onaj oblak mogućnosti iz prašume koji se, znak po znak, steže oko istine.

11.3 Igra u kojoj svemir vara

A sada zamislite pakleniju verziju te igre, onu koju je najviše volio američki fizičar John Archibald Wheeler - čovjek koji je, uzgred,

skovao izraz crna rupa, a bio je i mentor cijeloj generaciji fizičara, među njima i Richardu Feynmanu. U Wheelerovoj verziji, dok vi izlazite iz sobe, ostali se dogovore da ne zamisle nijednu riječ.

Vraćate se i postavljate pitanja, uvjereni da negdje čeka tajni odgovor. "Je li živo?" - neko kaže da. "Je li veliko?" - ne. Ono što ne znate jest da svaki igrač smije odgovoriti kako god poželi, uz jedan jedini uslov: mora u glavi imati neku riječ dosljednu svim dotadašnjim odgovorima. Riječ, dakle, ne postoji unaprijed. Ona se rađa iz vaših pitanja. Na kraju ipak "pogodite" - recimo, oblak - i imate savršen osjećaj da ste otkrili nešto što je mirno čekalo tamo. A zapravo ste to, svojim pitanjima, zajedno stvorili.

Wheeler je tvrdio da svemir na svojoj najdubljoj razini možda igra upravo tu igru s nama. Volio je to dočarati pričom o trojici sudija u bejzbolu. Prvi kaže: "Sudim ubačaje onako kako ih vidim." Drugi, stroži realist: "Sudim ih onako kakvi jesu." A treći slegne ramenima: "Oni nisu ništa dok ih ja ne prozovem." Taj treći sudija, govorio je Wheeler, opisuje kvantni svijet. Elektron "nije nigdje određen" dok ga ne izmjerimo; tek čin mjerenja - postavljeno pitanje - iznudi konkretan odgovor. Wheeler je to nazvao participativnim svemirom: stvarnost nije gotova roba koja mirno čeka da je otkrijemo, nego nešto što djelomično oblikujemo samim činom posmatranja. Pitanje i odgovor, posmatrač i svijet, u toj slici više nisu uredno razdvojeni.

11.4 It from bit

Iz te slike izrasla je jedna od najsmjelijih ideja moderne fizike, sažeta u Wheelerovu sloganu "it from bit" - otprilike "stvar iz bita". Prijevod glasi ovako: ono što nazivamo materijalnim svijetom - jabuka, zvijezda, vaše tijelo - na dnu nije sazdano od nekakve tvari u starom smislu, nego od odgovora na pitanja. Od informacije. Materija bi, po toj zamisli, bila tek način na koji se informacija pokazuje.

Zvuči kao filozofska dosjetka sve dok ne shvatite koliko je ozbiljno fizičari uzimaju. U čast Wheelerovog devedesetog rođendana, 2002. godine, kolege iz cijelog svijeta okupile su se na simpoziju znakovitog naslova "Nauka i konačna stvarnost". Umjesto poklona, mjesecima su elektronskom poštom vodili žustru, gotovo bezobzirn raspravu o pet Wheelerovih "stvarno velikih pitanja". Kako prepričava Hans Christian von Baeyer, ta su pitanja bila dovoljno kratka da stanu na naljepnicu za auto, ali dovoljno duboka da im se posvete cijele karijere: Otkud postojanje? Zašto kvant? Participativni svemir? Šta stvara značenje? It from bit? Posljednja dva nisu bila retorika - bila su ozbiljan pokušaj da se dokuči da li je informacija možda temeljnija od atoma.

Da ideja nije samo Wheelerova čud, pokazuje i to što su joj se priklonili neki od najoštrijih umova. Austrijski fizičar Anton Zeilinger, dobitnik Nobelove nagrade za pokuse s kvantnom spregnutošću, formulisao je princip koji bismo mogli sažeti ovako: najmanji mogući djelić prirode nosi tačno jedan bit informacije. Nije, dakle, da čestica ima svoja svojstva pa ih mi mjerenjem tek očitamo - nego su ta svojstva i to mjerenje jedno te isto. Informacija po Zeilingeru nije opis stvarnosti nalijepljen naknadno. Ona je korijen stvarnosti.

11.5 Bit ima cijenu

Ovdje je lako skliznuti u mistiku i zamisliti informaciju kao bestjelesni duh koji lebdi iznad svijeta. Ali priroda nam je pripremila otrežnjujući dokaz da je informacija posve fizička stvar - a taj dokaz nosite u džepu. Vaš se telefon, kad naporno radi, zagrije. Prenosni računar na krilu ugrije bedra. Golemi podatkovni centri troše struje kao manji gradovi, uglavnom na hlađenje. Zašto obrada nula i jedinica uopće proizvodi toplotu?

Odgovor je 1961. godine dao njemačko-američki fizičar Rolf Landauer - čovjek koji je, poput mnogih iz ove priče, kao dječak

pobjegao pred nacizmom u Ameriku. Njegov je zaključak bio iznenađujući. Pokazao je da računanje samo po sebi ne mora trošiti energiju: bitove možete sabirati, množiti, negirati - u načelu besplatno. Postoji tačno jedna radnja koja neizbježno proizvodi toplotu, a to je brisanje bita. Kad memorija zaboravi podatak, izgubljena informacija mora nekamo otići i odlazi u okolinu kao toplota.

Landauer je izračunao i tačno koliko: brisanje jednog jedinog bita na sobnoj temperaturi oslobađa oko $3 \cdot 10^{-21}$ džula. Fizičari to pišu kao $k \cdot T \cdot \ln 2$ (k je Boltzmannova konstanta, a T temperatura u K); to je Landauerova granica - najmanja energija ($\approx 2,9 \cdot 10^{-21}$ J na sobnoj temperaturi) koja se neizbježno oslobodi kao toplota pri brisanju jednog bita informacije. Sićušno, ali nije nula.

Informacija, dakle, ima cijenu izraženu u džulima, cijenu koju priroda naplaćuje. "Informacija je fizička veličina", glasila je Landauerova čuvena rečenica. Da to lakše zamislimo, pisac Charles Seife predlaže da memoriju računara zamislimo kao bilijarski sto s jednom kuglom: kugla lijevo znači 0, kugla desno znači 1. Dok god samo gurkate kuglu tamo-amo, načelno ne rasipate energiju. Ali čim kažete "zaboravi gdje je kugla i vrati je na početak", morate je gurnuti bez obzira gdje je bila, a to slijepo gurkanje nepovratno troši rad. Zaborav, a ne pamćenje, je ono što košta.

11.6 Demon koji je htio prevariti fiziku

Landauerovo otkriće riješilo je zagonetku staru gotovo cijelo stoljeće - priču o malenom biću koje je zamalo srušilo jedan od najsvetijih zakona prirode. Godine 1867. veliki škotski fizičar James Clerk Maxwell zamislio je sićušnog stvora (kolega Lord Kelvin brzo ga je prozvao Maxwellovim demonom) koji sjedi na vratašcima između dvije polovine kutije pune plina. Demon pomno gleda molekule kako nalijeću: brze propušta na jednu stranu, spore na drugu. Nakon nekog

vremena jedna strana postane vruća, druga hladna, a demon, naizgled, nije uložio nikakav rad.

Time bi prekršio drugi zakon termodinamike, zakon koji kaže da nered (entropija) u zatvorenom sistemu mora rasti. Demon bi, ukratko, bio vječni motor - nešto što ne bi smjelo postojati. Fizičari su se s njim hrvali decenijama, jer ga nikako nisu uspijevali uhvatiti u prijestupu. Rješenje je stiglo tek kad se shvatilo ono Landauerovo: da bi razvrstavao molekule, demon mora pamtit i koja je brza a koja spora. Njegova se memorija postupno puni. A da bi nastavio raditi, prije ili kasnije mora tu memoriju brisati - i baš to brisanje proizvodi tačno onoliko entropije koliko je demon prividno uštedio. Knjige se namire do posljednje pare.

Kako primjećuje Paul Davies u knjizi "Demon u mašini", demona nije zaustavilo nikakvo pravilo, nego činjenica da i sama informacija ima svoju cijenu. Ali priča ima i naličje koje je Daviesu najzanimljivije. Taj isti demon, tvrdi on, danas se vraća - i to na velika vrata biologije. Jer živa ćelija radi upravo kao roj minijaturnih Maxwellovih demona. U svakoj vašoj ćeliji sitne molekularne mašine zvane ribosomi "čitaju" uputu prepisanu iz DNK u glasničku RNK, znak po znak, i po njoj slažu bjelančevine - hvatajući pravu molekulu iz haotične vrve i stavljajući je na pravo mjesto. Život, po toj slici, nije ništa drugo nego materija koja je naučila upravljati sobom pomoću informacije.

11.7 Život kao borba protiv zaborava

Ta misao vodi nas do jednog od najljepših uvida cijele nauke o informaciji. Drugi zakon termodinamike neumoljivo gura sve prema neredu: kocke leda se tope, dvorci od pijeska se ruše, tijela stare. Kako onda uopće postoji nešto tako nevjerovatno uređeno kao živo biće, koje se održava danima, godinama, milijardama godina u nizu naraštaja?

Odgovor je da život ne krši drugi zakon termodinamike - on ga nadmudruje. Seife to sažima gotovo pjesnički: sve dok postoji izvor energije (za nas na Zemlji to je Sunce) i način da se otpadna entropija izbací van, informacija se može umnožavati i čuvati relativno bez greške, prkoseći raspadu. Molekula DNK savršen je primjer: njena jedina svrha jest da nosi informaciju, da je štiti od rasipanja i da je vjerno prepisuje kad zatreba. Gleick to dočarava brojkom koja para pamet - jedna jedina molekula hemoglobina precizan je niz od gotovo šest stotina aminokiselina u tačnom redoslíjedu. Atomi vodika, kisika, ugljika i željeza mogli bi se nasumično miješati kroz cijeli vijek svemira i ne bi je vjerovatnije sastavili nego što bi poslovični majmuni nasumičnim tipkanjem sastavili Shakespearea.

Kad se tako pogleda, i vaše je tijelo poruka - nevjerovatno dugačka poruka koja putuje kroz vrijeme, prepisujući samu sebe iz naraštaja u naraštaj, boreći se protiv zaborava jednako kao onaj bubnjar koji ponavlja frazu da ga šum prašume ne proguta.

11.8 Svemir kao računar koji računa sam sebe

Ako informacija ima fizičku težinu, ako čestice djeluju kao odgovori na pitanja, a život je obrada poruke - nameće se vrtoglava misao: nije li onda cijeli svemir jedna golema mašina za obradu informacija? Fizičar sa MIT-a Seth Lloyd, jedan od pionira kvantnih računara, na to odgovara bez okolišanja.

U knjizi "Programiranje svemira" Lloyd opisuje kako je, baš na Wheelerov izazov, održao predavanje pod naslovom "It from Bit" pred dvoranom punom fizičara i nobelovaca. Da dokaže poentu, u ruci je držao jabuku govoreći da je i ona samo "nakupina bitova", tek nekoliko puta brojnijih od njenih atoma. Lloydova teza glasi ovako: svaki atom, svaka čestica registruje bitove; svaki sudar među njima obrađuje te bitove po pravilima kvantne mehanike. A obrada bitova po pravilima upravo je ono što zovemo računanjem. Dakle, kaže

Lloyd, svemir računa. I to nije puka metafora - on je izračunao i razmjere: već u prvoj milijarditinki sekunde svog postojanja svemir je izveo oko 10 na 67 elementarnih operacija nad svojim bitovima. A šta svemir računa? Odgovor je poetičan: računa sam sebe. Svoju vlastitu historiju. Od jednostavnih početnih uzoraka, kroz zvijezde i galaksije, pa do ćelija, mozгова i vas koji ovo čitate - sve je to ishod jednog neprekidnog, gigantskog kvantnog izračuna koji teče od Velikog praska.

Lloyd se pobrinuo i za jednu staru zabludu. Ako svemir nasumično baca bitove, ne bi li prije ili kasnije sam od sebe "istipkao" nešto smisleno, poput onih majmuna za pisačim mašinama? Izračunao je granicu: kad bi baš svaka čestica u svemiru tipkala najvećom brzinom koju fizika dopušta od početka vremena, najduži komad Hamleta koji bi tako nastao bio bi tek - "Hamlet, čin I, scena I... Ko je tamo?" Samo toliko. Za bilo šta složenije nema dovoljno resursa u cijelom kosmosu. Poruka svijeta, zaključuje Lloyd, nije mogla nastati slučajno; ona je izračunata.

11.9 Poruka zapisana na rubu ponora

Najčudniji trag da je informacija temelj svega stigao je s najneočekivanijeg mjesta - iz crnih rupa. Sedamdesetih godina Jacob Bekenstein i Stephen Hawking otkrili su nešto naizgled apsurdno. Kad u crnu rupu ubacite bilo šta, njena entropija - dakle količina informacije koju je progutala - ne raste srazmjerno zapremini crne rupe, nego srazmjerno površini njenog horizonta. Kao da se sav sadržaj neke sobe, njen čitav inventar, može zapisati isključivo na zidovima, a ne u prostoru unutra.

Iz te zagonetke izrasla je prava intelektualna bitka, koju je Leonard Susskind opisao u knjizi rječitog naslova "Rat oko crnih rupa". Hawking je najprije tvrdio da crna rupa informaciju uništava zauvijek - a kad ispari (jer i crne rupe polako isparavaju), od nje ne ostaje nikakav trag onoga što je pojela.

Susskindu i holandskom fizičaru Gerardu 't Hooftu to je zvučalo kao smak fizike, jer najtemeljnije pravilo prirode kaže da se informacija nikada ne smije izgubiti bez traga. Godinama su, kako sam Susskind kaže, bili "vojska od dvojice" protiv gotovo cijele struke.

Nakon decenija spora, pobijedili su oni. Informacija se čuva, ali je pohranjena na dvodimenzionalnoj "opni" oko crne rupe, poput sitnih piksela od kojih svaki zauzima najmanju moguću, tzv. Planckovu površinu. To je holografsko načelo.

A poenta koja para pamet je sljedeća: ako to vrijedi za crnu rupu, možda vrijedi i za sve ostalo. Možda je čitav trodimenzionalni svijet koji doživljavamo - ova knjiga, soba u kojoj sjedite, vi sami - zapravo projekcija informacije zapisane na nekoj dalekoj, dvodimenzionalnoj granici svemira. Hologram. Susskind to izriče bez ustručavanja: sve u našem svijetu moglo bi biti slika projektovana s najudaljenijih rubova prostora.

11.10 Kada prostor prestaje biti temelj?

Ovdje priča dobija još jedan, gotovo nestvaran obrat. Ako se svijet može zapisati na svojoj granici, onda ni sam prostor u kojem mislimo da živimo možda nije ono najosnovnije.

Novinar i fizičar George Musser u svojoj knjizi "Sablasno djelovanje na daljinu" vodi nas do sve glasnije ideje među teoretičarima, koju su neki autori saželi u tri gotovo heretičke riječi: prostor-vrijeme je osuđeno.

Misao je ova: prostor i vrijeme možda nisu pozornica na kojoj se sve zbiva, nego posljedica nečeg dubljeg - mreže informacijskih veza među česticama. Kvantna spregnutost, ono "sablasno djelovanje na daljinu" koje je zbunjivalo i samog Einsteina, pokazuje da dvije čestice mogu biti povezane bez obzira na razdaljinu, kao da za njih razmak i ne postoji. Sve je više naznaka da upravo iz te mreže veza izranja ono što doživljavamo kao prostor i udaljenost.

Ako je tako, onda informacija nije samo ono od čega je svijet sazdan - ona je i ono iz čega se sazda sama pozornica. To je, valja naglasiti, područje aktivnog istraživanja, a ne gotova istina; ali sama činjenica da ozbiljni fizičari to razmatraju govori koliko je duboko informacija zašla u temelje univerzuma.

11.11 Možda smo u nečijoj igrici?

Kad jednom prihvatite da bi svemir mogao biti obrada informacija, teško je ne postaviti pitanje koje danas rado postavljaju i tinejdžeri i filozofi: ako je stvarnost u srži računanje, po čemu se ono razlikuje od simulacije? Nije li onda moguće da živimo unutar nečijeg divovskog računara, poput junaka filma "Matrix"?

Popularizator nauke Brian Clegg u knjizi "Deset milijardi sutrašnjica" podsjeća da to nije samo filmska dosjetka. Filozof Nick Bostrom ponudio je uredan argument: ako napredne civilizacije jednom postanu sposobne pokretati uvjerljive simulacije čitavih svjetova, takvih bi simulacija moglo biti mnogo više nego "pravih" svemira - pa bi, čisto brojčano, bilo vjerovatnije da smo mi u jednoj od simulacija nego u jedinom originalu.

Argument je golicav, ali ovdje valja biti pošten, u duhu cijele ove knjige: to je filozofska spekulacija, a ne provjerena fizika. Nemamo nijedan pokus koji bi je potvrdio ili opovrgnuo. A ono što se u načelu ne može provjeriti - ma koliko bilo zavodljivo - stoji izvan nauke, barem zasad. Zabavno je razmišljati o tome uz kokice; opasno je pomiješati to s dokazanim znanjem.

11.12 Koliko čvrsto tlo stoji pod ovim idejama?

Baš zato vrijedi razlučiti tri tvrdnje koje se u ovakvim pričama često nesretno pomiješaju, jer nisu ni izdaleka jednako pouzdane.

Prva: informacija je koristan jezik za opis fizike. To je danas nesporno - od termodinamike do genetike, pojam informacije

objašnjava stvari koje se drukčije teško objašnjavaju. Ovdje smo na čvrstom tlu.

Druga: informacija je fizička veličina, s mjerljivom energetskom cijenom. I to je danas eksperimentalno potvrđeno - Landauerova granica brisanja bita izmjerena je u laboratoriju, s koloidnom česticom zarobljenom u laserskoj optičkoj pinceti (Bérut i saradnici, 2012). Laserska optička pinceta (eng. optical tweezers) je snažno fokusiran laserski snop koji može uhvatiti i držati sićušnu česticu, obično kuglicu prečnika oko jednog mikrometra. Čestica je prozirna i lomi svjetlost, pa je sile nastale iz promjene impulsa fotona povlače prema žarištu snopa, gdje je svjetlost najjača. Tako ostaje zarobljena u tački, kao da je drži pinceta.

Treća: svemir je doslovno računar, a stvarnost je u srži informacija, možda čak i hologram. To je fascinantna, ali još nedokazana hipoteza. Ovdje tlo postaje meko. I baš je taj prijelaz, od prve preko druge do treće tvrdnje, ono najzanimljivije: što dalje idemo, to je manje dokaza a više hrabrosti.

11.13 Zašto je ovo, ipak, nadahnjujuće?

Možda vam se čini da nas sve ovo ostavlja praznih ruku: ne znamo je li svemir računar, ne znamo jesmo li u simulaciji, ne znamo je li informacija zaista dno svega. Ali obratite pažnju na nešto neobično. Ista ta ideja - da je stvarnost, na dnu, informacija - povezuje stvari koje naizgled nemaju nikakve veze: toplinu vašeg telefona i entropiju crne rupe; afričke bubnjeve i ponašanje elektrona; molekulu DNK u vašoj ćeliji i najstariji zakon termodinamike; igru "Dvadeset pitanja" i sam oblik prostora. Kad jedna zamisao ovako širom baca mostove, to obično znači da je dotakla nešto duboko - čak i ako je još ne razumijemo do kraja.

Gleick podsjeća da su ljudi porukom vladali mnogo prije nego što su je razumjeli - afrički su bubnjari prenosili složene poruke kroz

prašumu stoljećima prije nego što je Shannon dokazao šta je zapravo bit. Možda smo i danas u sličnom položaju spram svemira: već slutimo da je sav sazdan od poruke, ali njegovu gramatiku tek saznajemo, znak po znak, kao dijete koje uči čitati.

A najljepše u svemu je ovo: ako je Wheeler bio makar malo u pravu, onda svemir nije gotova knjiga koju pasivno čitamo. On je bliži onoj paklenoj igri "Dvadeset pitanja" - odgovor se dovršava tek našim pitanjima. Svaki put kad neko od nas pogleda kroz teleskop, pokrene proračun ili jednostavno upita *zašto*, mi ne otkrivamo samo svemir. Mi, na neki mali ali stvaran način, pomažemo da on postane. Zato jedne vedre noći, kad ugasite svjetla i pogledate gore, imajte na umu: možda ne gledate tek u zvijezde. Možda postavljate pitanje na koje svemir tek smišlja odgovor.

Literatura

- [1] von Baeyer, H. C. (2003). Information: The New Language of Science. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [2] Clegg, B. (2015). Ten Billion Tomorrows: How Science Fiction Technology Became Reality and Shapes the Future. New York: St. Martin's Press.
- [3] Davies, P. (2019). The Demon in the Machine: How Hidden Webs of Information Are Solving the Mystery of Life. Chicago: University of Chicago Press.
- [4] Gleick, J. (2011). The Information: A History, a Theory, a Flood. New York: Pantheon Books.
- [5] Lloyd, S. (2006). Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos. New York: Alfred A. Knopf.
- [6] Musser, G. (2015). Spooky Action at a Distance. New York: Farrar, Straus and Giroux.
- [7] Seife, C. (2006). Decoding the Universe: How the New Science of Information Is Explaining Everything in the Cosmos. New York: Viking.

- [8] Susskind, L. (2008). The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics. New York: Little, Brown.
- [9] Vedral, V. (2018). Decoding Reality: The Universe as Quantum Information (2. izd.). Oxford: Oxford University Press.
- [10] Wheeler, J. A. (1990). Information, Physics, Quantum: The Search for Links. U: W. H. Zurek (ur.), Complexity, Entropy, and the Physics of Information. Redwood City, CA: Addison-Wesley.

12

Zašto uopće nešto postoji?

"Zašto postoji nešto, umjesto ništa?"

(G. W. Leibniz, 1714)



Pitanje zašto postoji nešto, a ne ništa jedno je od najdubljih pitanja koje su čovjek i filozofija ikada postavili. Priznajem, ovo pitanje me zaokuplja ponekad kad šetam Dobrinjom sa starim, dok pokušavamo kao stari peripatetičari odgonetnuti najdublje tajne svemira. Moderna fizika pokušala je to drevno pitanje približiti naučnom jeziku, istražujući prirodu vakuuma, kvantne fluktuacije, nastanak strukture i porijeklo samog svemira. Ali što dublje ulazimo u problem, postaje jasnije da "ništa" nije tako jednostavno kako na prvi pogled izgleda. Na granici između fizike i filozofije ostaje pitanje koje još uvijek nema konačan odgovor: zašto uopće postoji bilo šta?

12.1 Pitanje koje dolazi samo djetetu i metafizičaru

Postoji jedno pitanje koje je istovremeno najjednostavnije i najteže koje čovjek može postaviti. Toliko je jednostavno da ga postavi svako dijete čim prvi put zastane pred veličinom svijeta; toliko je teško da su se nad njim mučili najveći umovi tri stoljeća, a odgovor još nemamo. Njemački filozof Gottfried Wilhelm Leibniz zapisao ga je 1714. godine u obliku koji od tada odzvanja: "zašto postoji nešto, umjesto ništa?" Novinar Jim Holt, koji je toj zagonetki posvetio cijelu knjigu, kaže da ju je prvi put sreo kao mladić, među stranicama Heideggera, i da ga je pogodila svojom "golom snagom", jer iza nje, osjetio je, stoji svako drugo pitanje koje je čovječanstvo ikad postavilo.

Lako je pitanje otpuhnuti kao praznu igru riječi. Ali zastanite načas. Nije riječ o tome zašto postoji baš ovaj svijet, s ovim zvijezdama i ovim zakonima. Riječ je o tome zašto uopće postoji bilo šta. Zamislite da mislji uklonite sve, svaku zvijezdu, svaki atom, sav prostor, svako vrijeme. Ostaje li vam u glavi slika crne praznine? Ako da, niste otišli dovoljno daleko: i ta crna praznina je nešto, ona je prostor. Pravo "ništa" nema ni pozornice, ni glumaca, ni svjetla koje bi obasjalo prazninu. A ipak, svijet postoji. Zašto?

Ovo poglavlje neće ponuditi konačan odgovor, jer ga niko nema. Ali pokazat će nešto uzbudljivo: kako je fizika u posljednjem stoljeću to drevno filozofsko pitanje uzela u svoje ruke i, korak po korak, počela ga rastavljati na dijelove na koje može odgovoriti, sve do granice iza koje počinje tišina. A da bismo tamo stigli, moramo prvo razumjeti jednu naizgled laku riječ koja krije više zamki nego ijedna druga: ništa.

12.2 Tri lica ništavila

Najveća zbrka u cijeloj raspravi nastaje zato što riječ "ništa" ne znači svima isto. Kad fizičar kaže da je nešto nastalo iz ničega, a filozof

mu na to prigovori, često se prepiru o dvije posve različite stvari, a da toga nisu ni svjesni. Zato prvo razdvojimo tri lica ništavila, od najplićeg do najdubljeg.

Prvo lice je prazan prostor. Uzmite kutiju i isišite iz nje sav zrak, svu prašinu, svako zrno svjetlosti, sve što se da ukloniti. Ostaje vakuum. Naš svakodnevni osjećaj kaže da je to "ništa". Vidjet ćemo, međutim, da je taj vakuum sve samo ne prazan.

Drugo lice je ništa bez prostora i vremena. Ovdje nema ni same kutije. Nema pozornice na kojoj bi se išta moglo dogoditi. Fizičar Alexander Vilenkin ponudio je za to neočekivano precizan opis: zamislite svemir kao napuhanu loptu pa je u mislima počnite ispuhivati dok joj polumjer ne padne na nulu. Kad iščezne i posljednja tačka prostora, ostaje ono što Vilenkin definiše kao zatvoreni prostor-vrijeme poluprečnika nula ili geometrijski način da se kaže "nema ničega", pa ni pozornice.

Treće lice je apsolutno ništa - ono filozofsko. Tu nema ni prostora, ni vremena, ni čestica, ali ni zakona, ni mogućnosti, ni pravila koja bi dopustila da išta nastane. To je ništa u kojem ne postoji čak ni "moglo bi". Jim Holt takvo stanje naziva "Nultim svijetom" i pokazuje, pomalo vrtoglavo, da je ono logički posve dosljedno: ne postoji nikakva protivrječnost u pretpostavci da nikad ništa nije postojalo.

Leibniz je davno primijetio da je baš to najjednostavnije od svih mogućih stanja, a nauka voli jednostavnost. Utoliko je veća zagonetka što to najjednostavnije stanje očito nije ono u kojem se nalazimo.

Držite ova tri lica na umu, jer je cijela priča koja slijedi zapravo priča o tome kako fizika objašnjava nastanak strukture iz prvog ništavila, ozbiljno napada drugo, a pred trećim - bar zasad - zastaje.

12.3 Strah od praznine

Da je i prvo, najpliće ništa dugo bilo nezamislivo, govori nam historija. Stari Grci su vakuum smatrali nemogućim. Priroda, tvrdili su, "prezire prazninu" (horror vacui). Frank Close u svom sažetom pregledu te ideje podsjeća kako je već Aristotel dokazivao da praznina ne može postojati, i kako je ta misao vladala evropskim umom gotovo dvije hiljade godina. Ako biste razdvojili dvije priljubljene ploče, pitali su se, šta bi na tren bilo između njih prije nego što nahrupi zrak? Praznina? Nemoguće!

Tek u sedamnaestom stoljeću taj se strah počeo lomiti. Torricelli je, prevrnuvši cijev punu žive, nad njom dobio prostor u koji ništa nije moglo dospjeti - prvi laboratorijski vakuum. Pokazalo se da stub žive ne drži nikakva "mržnja prema praznini", nego sasvim prozaičan pritisak zraka izvana. Priroda se, ispostavilo se, ne boji praznine; samo smo je se mi bojali. No otkriće vakuuma bilo je tek uvod u mnogo veće iznenađenje. Jer kad su fizičari dvadesetog stoljeća zavirili u tu prazninu s alatima kvantne teorije, otkrili su da ona uopće nije prazna.

12.4 Vakuum koji ključa

Evo srca cijele priče. Ono što nazivamo praznim prostorom nije mirna, mrtva pozadina. To je, riječima nobelovca Franka Wilczeka, "složeni medij pun spontane aktivnosti". Wilczek za taj svuda prisutni medij ima čak i ime - naziva ga "Grid", mrežom koja prožima sav prostor i daje česticama njihova svojstva. Ono što oku izgleda kao praznina, umu se otkriva kao nešto gusto, živo i djelatno.

Kako prazan prostor može biti pun? Odgovor leži u Heisenbergovom načelu neodređenosti, jednom od stubova kvantne mehanike. Ono, pojednostavljeno, kaže da priroda nikada ne može istovremeno savršeno tačno odrediti sve veličine. Energija nekog područja ne može biti tačno nula, jer bi to značilo previše savršenu određenost.

Zato prazan prostor neprestano "posuđuje" sićušne količine energije na nezamislivo kratke trenutke, i u tim trenucima iz ničega iskaču parovi čestica - čestica i njena antičestica - koji istog časa nestaju, prije nego što ih iko stigne izmjeriti. Lawrence Krauss ih naziva virtualnim česticama i priznaje da zvuče kao izmišljotina - kao da neko tvrdi da na vrhu igle sjede anđeli koje niko ne vidi. Ali, dodaje, razlika je presudna: ti anđeli ostavljaju tragove.

Najljepši od tih tragova nosi ime holandskog fizičara - Casimirov efekt. Postavite u vakuum dvije savršeno glatke metalne ploče, vrlo blizu jedna drugoj. Iako između njih nema baš ničega, ploče se počnu privlačiti. Henning Genz, u svojoj knjizi posvećenoj upravo nauci o praznom prostoru, objašnjava zašto: virtualne čestice i treperenja polja postoje i unutar i izvan ploča, ali između njih stane manje tih treperenja nego vani, pa vanjski "pritisak praznine" gura ploče jednu prema drugoj. Praznina, dakle, gura. To nije misaoni eksperiment - Casimirova sila je izmjerena u laboratoriju. Prazan prostor ima opipljivu fizičku prisutnost.

John Barrow tu prisutnost naziva energijom vakuuma - energijom koja "prožima svako vlakno svemira" i koju je nemoguće ukloniti ma koliko čistili prostor. A jednom kad prihvatimo da prazno nije prazno, otvaraju se vrata najsmjelijoj misli moderne kozmologije: ako vakuum nosi energiju i neprestano treperi, možda upravo iz tog treperenja može nastati - sve.

12.5 Besplatan ručak veličine svemira

Postoji stara mudrost da besplatnog ručka nema. Alan Guth, otac teorije kozmičke inflacije, naslovio je prvo poglavlje svoje knjige upravo izazovom tog mudrosti: svemir je, kaže, možda "krajnji besplatni ručak". Kako to misli?

Ključ je u jednoj neobičnoj osobini gravitacije: njena energija je negativna. Da biste dva tijela razdvojili protiv njihove međusobne

privlačnosti, morate uložiti rad; znači da je sistem u kojem su ona spojena na nižoj, negativnoj energiji. Kad se sve pažljivo zbroji na razini cijelog svemira, ispada nešto zapanjujuće: golema pozitivna energija sadržana u svoj materiji i zračenju gotovo se savršeno poništava s golemom negativnom energijom gravitacijskog polja. Krauss to potkrepljuje mjerenjem: naš je svemir, koliko možemo utvrditi, "ravan", a ukupna energija svega u njemu, uračunavši i onu gravitacijsku - nula.

Posljedica je vrtoglava. Ako je ukupni račun svemira nula, onda za njegov nastanak nije trebalo "platiti" nikakvu neto energiju. Svemir pun galaksija energetski ne košta ništa više nego prazan svemir. A stvari koje ništa ne koštaju priroda, kako izgleda, rado stvara. Guth je time riješio i jednu praktičnu zagonetku: odakle sva ta silna materija? Odgovor - niotkuda i besplatno, jer je uravnotežena vlastitom gravitacijom.

12.6 Kako je treperenje postalo galaksija?

Ostaje, međutim, najveće pitanje: ako je svemir mogao nastati iz sićušne kvantne mrlje, kako je iz te glatke, jednolike klice nastala sva raskošna struktura - galaksije, zvijezde, planeti, mi? Zašto svemir nije ostao dosadno ujednačena kaša?

Odgovor je Guthova inflacija - zamisao da je svemir u prvom, nezamislivo kratkom djeliću sekunde svog postojanja proživio bljesak nevjerovatno brzog širenja, napuhavši se za najmanje dvadeset i šest redova veličine u vremenu kraćem od djelića sekunde. Ta ideja objašnjava zašto je svemir na velikim skalama tako gladak i "ravan": kao što napuhavanje balona zaglađuje svaku boru na njegovoj površini, tako je inflacija razvukla i izgladila sve početne nepravilnosti.

Ali tu dolazi obrat od kojeg zastaje dah - možda najljepša pojedinost u cijeloj kozmologiji. Inflacija nije mogla izgladiti baš sve. Ono

kvantno treperenje vakuuma, o kojem smo govorili, postojalo je i u tom prainflacijskom svemiru - sićušne, slučajne fluktuacije gustoće. A onda ih je inflacija, šireći prostor munjevito, razvukla do kozmičkih razmjera. Mrlje kvantne neodređenosti, manje od atoma, napuhane su u područja veličine galaksija. Tamo gdje je slučajno bilo malo više gustoće, gravitacija je kasnije skupila više materije i iz tih zametaka izrasle su galaksije.

Nije to puka priča. Guth opisuje kako su te fluktuacije zapisane u kozmičkom mikrovalnom pozadinskom zračenju - slabom sjaju zaostalom iz mladosti svemira - u obliku sitnih razlika u temperaturi, reda veličine jednog dijela na sto hiljada. Te mrljice, izmjerene satelitima, savršeno se slažu s onim što inflacija predviđa. Drugim riječima: kad noćas pogledate neku galaksiju, gledate uvećani otisak kvantnog treperenja praznine od prije 13,8 milijardi godina. Struktura svemira je fosilizirana kvantna slučajnost. Malo koja rečenica u nauci spaja tako sitno i tako veliko.

12.7 Svemir koji se sam upalio

Sad možemo sastaviti dijelove. Vakuum nije prazan, nego pun energije i treperenja. Ukupni energetske račun svemira je nula, pa njegov nastanak ništa ne košta. Kvantna teorija dopušta da se događaji dese bez klasičnog uzroka. Spojite li to troje, dolazite do najsmjelije tvrdnje moderne fizike: svemir je mogao nastati spontano, sam od sebe, bez ičije ruke koja bi upalila fitilj.

Stephen Hawking i Leonard Mlodinow izrekli su to bez uvijanja u knjizi Veliki plan: "Zato što postoji zakon poput gravitacije, svemir može i hoće sam sebe stvoriti iz ničega." Za njih spontano stvaranje objašnjava zašto postoji nešto umjesto ničega, i zaključuju da nije nužno prizivati božansku iskru da bi se svemir pokrenuo. Vilenkin je pak razradio konkretan mehanizam: kao što čestica u kvantnom svijetu može "protunelirati" kroz zid koji je klasično neprobojan,

tako je i cijeli svemir mogao protunelirati u postojanje iz stanja bez prostora i vremena iz onog Vilenkinovog ništavila poluprečnika nula.

Holt takve fizičare pomalo obješenjački naziva "teoretičarima ničega" i primjećuje mješavinu smjelosti i naivnosti u njihovom uvjerenju da mogu riješiti zagonetku koja je vjekovima smatrana nedodirljivom za nauku. Jer tu se, ispod svega, krije jedna tiha zamjena teza.

12.8 Sitna prevara u velikoj priči

Kad Krauss kaže "svemir iz ničega", na koje od tri lica ništavila misli? Na prvo, možda drugo - na kvantni vakuum, na stanje bez prostora i vremena ali sa zakonima fizike koji i dalje vrijede. A upravo tu leži prigovor koji su mu uputili mnogi filozofi, najoštrije David Albert: to nije pravo ništa.

Kvantni vakuum koji treperi po zakonima kvantne teorije već je nešto - bogato, strukturirano nešto, s pravilima igre. Objasniti kako iz njega nastaje materija veličanstveno je postignuće, ali to nije isto što i objasniti zašto uopće postoji igra s pravilima.

Krauss je toga svjestan i pošteno se s tim rve. Prizna li neko, kaže, da ni zakoni nisu "pravo ništa", može se pokušati i korak dalje: možda su i sami zakoni prirode nastali spontano. Ali onda slijedi neizbježno pitanje - a odakle to iz čega su zakoni nastali? Fizika ovdje gura granicu sve dublje i dublje, ali svaki put kad odgovori "iz ovoga", ostaje pitanje odakle to ovo.

U jednom trenutku dolazimo i do trećeg lica ništavila - onog bez ijednog "moglo bi" - i tu fizika, po samoj svojoj prirodi, više nema za šta da se uhvati u proračunu. Jer nauka objašnjava jednu stvar pomoću druge, povezujući pojave u lanac uzroka i posljedica. A kada ne postoji nijedna druga stvar, nijedan uzrok ili proces na koji bismo mogli pokazati, nema ni objašnjenja te vrste. Ostaje samo činjenica

postojanja, bez dubljeg odgovora na pitanje zašto uopće postoji nešto, umjesto ničega.

12.9 Kako je ništa postalo nešto?

Vrijedi se na tren odmaknuti od fizike i sjetiti da je čovječanstvu i sama ideja ništavila dugo bila strana. John Barrow u svojoj knjizi o ništavilu pripovijeda kako je trebalo hiljade godina da ljudi izmisle broj nula. Egipćanima nije trebala, Babilonci su se snalazili s prazninom u zapisu, a tek su je u Indiji uzdigli u pravi broj s kojim se računa. Evropa ju je dugo odbijala kao sumnjivu, gotovo opasnu - kako broj koji znači "ništa" može biti nešto s čime se množi i dijeli?

Ta priča nije tek zanimljiva digresija. Ona pokazuje obrazac koji se ponavlja kroz cijelo ovo poglavlje: svaki put kad se čovjek usudio ništa uzeti ozbiljno - kao broj, kao vakuum, kao stanje svemira - otvorila su se golemo nova vrata. Nula je omogućila modernu matematiku. Vakuum je omogućio modernu fiziku. A ozbiljno shvaćeno kozmičko ništavilo danas omogućuje da uopće postavimo pitanje o nastanku svega. Ništa se, paradoksalno, stalno pokazuje kao jedno od najplodnijih nešto, kao što smo vidjeli u poglavlju "Ništavilo".

12.10 Zašto baš takav svijet?

Recimo da prihvatimo kako je svemir mogao nastati spontano. Ostaje potpitanje koje mnoge muči jednako kao i glavno: zašto je nastao baš ovakav? Zašto zakoni prirode imaju baš one vrijednosti koje dopuštaju zvijezde, hemiju, život? Sitna promjena poneke konstante i svemir bi bio mrtva, prazna kaša.

Jedan odgovor, koji ozbiljno razmatraju i Hawking i Vilenkin, glasi: možda naš svemir nije jedini. Možda inflacija neprestano rađa bezbroj svemira, svaki sa svojim slučajnim zakonima - golemi multiverzum. U većini njih nema nikoga da postavi pitanje; mi se,

sasvim očekivano, nalazimo u jednom od rijetkih u kojima su uvjeti dopustili posmatrača. To nije mistika, nego, kako pokazuje Hawking, prirodna posljedica zbrajanja svih mogućih historija svemira. Odgovor je zavodljiv, ali valja ostati trijezan: multiverzum je zasad teorijska mogućnost, a ne izmjerena činjenica, i sam otvara nova pitanja umjesto da zatvori staro.

12.11 Mir s pitanjem bez odgovora

Gdje nas sve ovo ostavlja? Sean Carroll, u svojoj knjizi o velikoj slici svijeta, nudi stav koji naziva poetskim naturalizmom. Postoji, kaže, samo jedan svijet - prirodni - ali o njemu se može govoriti na više istinitih načina: jezikom čestica i jezikom ljudi, jezikom uzroka i jezikom smisla. Za pitanje "zašto postoji nešto" Carroll predlaže skromnost: možda ono naprosto nema odgovor one vrste kakvu tražimo. Možda je "svijet postoji" jedna od onih temeljnih činjenica koje se ne izvode ni iz čega dubljeg, jer ispod njih više ničega nema.

To nije predaja, nego iskrenost. Fizika je, kako smo vidjeli, ono drevno pitanje rastavila na komade i na većinu njih dala zapanjujuće odgovore: prazan prostor nije prazan, struktura može nastati iz treperenja, svemir energetski ne košta ništa, a njegov nastanak ne mora imati klasičan uzrok. Ostao je samo posljednji, najtvrdi komad - zašto postoji išta, uključujući i same zakone - i pred njim nauka zastaje. To nije rupa u znanju koju će sutra popuniti bolji teleskop; to je granica same vrste objašnjenja kojom nauka barata.

12.12 Razlog za čuđenje, a ne za očaj

Moglo bi se pomisliti da je nemati odgovor na najveće pitanje porazno. Ja mislim suprotno. Pogledajte šta smo usput dobili. Krenuli smo od naivne slike praznine, a otkrili vakuum koji ključa. Pitali smo odakle materija, a našli svemir koji energetski staje u nulu. Pitali smo odakle galaksije, a našli ih zapisane u treperenju praznine od prije trinaest milijardi godina. Svako od tih pitanja nekad je

izgledalo jednako beznadno kao ono glavno, a fizika ih je, jedno za drugim, dovela bliže odgovoru.

Možda ćemo jednog dana i pred posljednjim pitanjem pomaći granicu još malo dublje. A možda i nećemo, i moraćemo naučiti živjeti s čuđenjem umjesto s odgovorom. Ali to čuđenje nije praznina - ono je najstariji pokretač i nauke i filozofije. Leibniz ga je zapisao kao pitanje, Holtovi sugovornici su ga vrtjeli na sto načina, a svaki fizičar u ovom poglavlju napao ga je svojim alatom i otkinuo mu komad. Da postoji nešto umjesto ničega, i da smo mi to nešto koje je sposobno pitati zašto - to samo po sebi graniči s čudom.

Zato kad jedne vedre noći ugasite svjetla i pogledate uvis, sjetite se: svaka od tih galaksija je uvećani otisak treperenja praznine, a sama praznina među njima nije ništa, nego uzavrelo more mogućnosti. I usred svega toga stojite vi - komad svemira koji je, na tren, postao svjestan sebe i usudio se upitati zašto ga uopće ima. Odgovor možda nikad nećemo dobiti. Ali samo postavljanje pitanja jedan je od najljepših dokaza da nešto, ipak, postoji.

Literatura

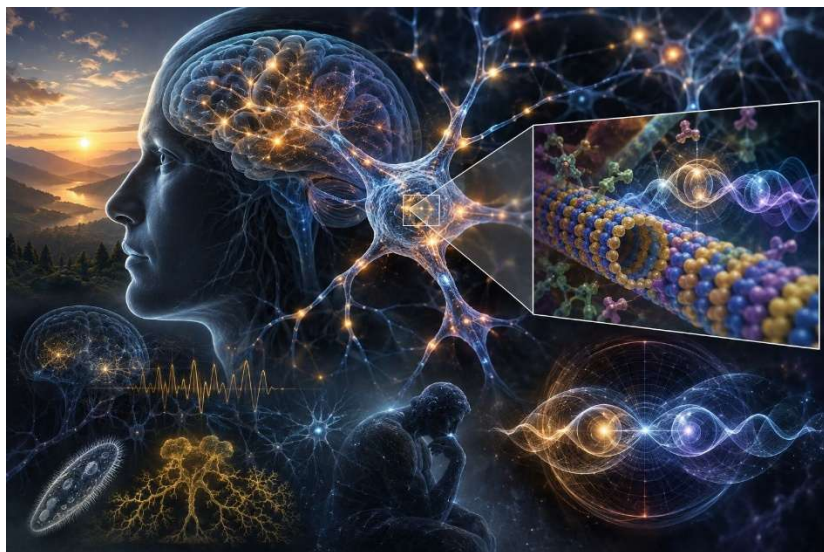
- [1] Barrow, J. D. (2000). The Book of Nothing: Vacuums, Voids, and the Latest Ideas about the Origins of the Universe. London: Jonathan Cape.
- [2] Carroll, S. (2016). The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself. New York: Dutton.
- [3] Close, F. (2009). Nothing: A Very Short Introduction. Oxford: Oxford University Press.
- [4] Genz, H. (1999). Nothingness: The Science of Empty Space. Reading, MA: Perseus Books.
- [5] Guth, A. H. (1997). The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins. Reading, MA: Addison-Wesley.
- [6] Hawking, S., & Mlodinow, L. (2010). The Grand Design. New York: Bantam Books.

- [7] Holt, J. (2012). *Why Does the World Exist? An Existential Detective Story*. New York: Liveright.
- [8] Krauss, L. M. (2012). *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather Than Nothing*. New York: Free Press.
- [9] Vilenkin, A. (2006). *Many Worlds in One: The Search for Other Universes*. New York: Hill and Wang.
- [10] Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. New York: Basic Books.

13

Kvantna svijest

"Šta god da je razumijevanje, ono mora biti nešto što nadilazi izračunljivu fiziku." (Roger Penrose)



Svijest je možda najneobičniji fenomen koji poznajemo: nastaje iz fizičkog mozga, a ipak nam neposredno daje osjećaj vlastitog postojanja i unutrašnjeg svijeta. Nauka danas može sve detaljnije opisivati neurone, sinapse i električnu aktivnost mozga, ali još uvijek nema konačan odgovor na pitanje kako iz tih fizičkih procesa nastaje subjektivno iskustvo. Upravo u tom prostoru između neurobiologije, fizike i filozofije pojavila se jedna od hrabrijih hipoteza modernog doba - Orch-OR teorija Rogera Penrosea i Stuarta Hameroffa. Prema toj ideji, ključni procesi ne odvijaju se samo na nivou neurona i

sinapsi, već bi mogli biti povezani s kvantnim stanjima unutar mikrotubula, sitnih struktura koje čine dio unutrašnjeg skeleta naših ćelija. Ako je takva pretpostavka tačna, pitanje svijesti više ne bi bilo samo pitanje neuronauke, već i pitanje same prirode prostora, vremena i kvantne stvarnosti. No između intrigantne hipoteze i naučno potvrđenog objašnjenja nalazi se veliki prostor koji tek treba popuniti eksperimentima, dokazima i kritičkim preispitivanjem.

13.1 Misterija svijesti

Malo je pitanja koja su tako blizu i tako nedostupna istovremeno kao pitanje svijesti. Svako od nas u svakom trenutku posjeduje neposredan dokaz da svijest postoji, upravo doživljaj nakon čitanja ovih riječi, unutrašnji glas koji ih prati. A ipak, kada pokušamo objasniti kako iz kilograma i po nervnog tkiva nastaje taj doživljaj, nauka ostaje bez uvjerljivog odgovora. Možemo izmjeriti napone na membranama neurona, snimiti aktivnost čitavih moždanih područja, čak predvidjeti neke odluke prije nego što ih čovjek postane svjestan, ali između tih fizičkih procesa i samog osjećaja i dalje zjapi jaz koji nijedna jednačina za sada ne premošćuje.

Ovaj tekst bavi se jednom od najhrabrijih i najkontroverznijih ponuđenih hipoteza o tome kako taj jaz premostiti - teorijom orkestrirane objektivne redukcije, ili Orch-OR, koju su devedesetih godina prošlog vijeka predložili matematički fizičar Roger Penrose i anesteziolog Stuart Hameroff. Prema njihovom prijedlogu, svijest nije samo proizvod klasičnog računanja u nervnim mrežama, nego posljedica kvantnih procesa koji se odvijaju unutar sitnih cjevastih struktura u neuronima - mikrotubula. Cilj teksta nije proglasiti tu hipotezu tačnom ili netačnom. Cilj je prikazati čitav problem: šta znamo o svijesti, šta Orch-OR predlaže i koliko je ta hipoteza danas zaista potkrijepljena dokazima.

Odmah na početku treba istaknuti jednu razliku koja se u popularnim prikazima često gubi: Orch-OR je hipoteza o mehanizmu svijesti, a

ne prihvaćena naučna činjenica. Penrose i Hameroff tvrde da se kvantna stanja u mikrotubulama završavaju procesom objektivne redukcije kvantnog stanja i da su upravo ti događaji povezani sa pojedinačnim trenucima svjesnog iskustva. To je smjela, elegantna i provjerljiva ideja, ali i ideja koja od svog nastanka trpi ozbiljne kritike, dijelom i s pravom.

Osnovno pitanje kojim ćemo se voditi kroz cijeli tekst može se sažeti ovako: da li je svijest potpuno klasičan neurobiološki fenomen, koji se u principu može objasniti istim zakonima kojima objašnjavamo rad računara, ili u njenoj osnovi leži nešto suštinski kvantno? Da bismo na to pokušali odgovoriti, moramo prvo razumjeti šta je uopšte mozak kao fizički sistem.

13.2 Mozak kao fizički sistem

Standardni naučni okvir za razumijevanje mozga je izuzetno uspješan. Mozak čini oko osamdeset i šest milijardi neurona, međusobno povezanih preko sinapsi - tačaka na kojima jedna nervna ćelija hemijskim ili električnim putem prenosi signal drugoj. Svaki neuron sakuplja ulazne signale na svojim dendritima i tijelu ćelije, integriše ih, i kada zbir pređe određeni prag, generiše akcioni potencijal - nagli električni impuls koji putuje niz akson do sljedeće sinapse. Ovaj model "integriši i okini" (eng. integrate-and-fire), čiji korijeni sežu do Lapiquea (1907), a biofizičku osnovu dao mu je Hodgkin-Huxleyev rad iz 1952. godine, temelj je gotovo cjelokupne moderne neuronauke.

Iz kolektivnog rada ogromnog broja tako povezanih neurona nastaju svojstva koja povezujemo sa umom: percepcija, pažnja, pamćenje, jezik, planiranje. Posebno je važna pojava sinhronizacije - neuroni u udaljenim područjima mozga mogu uskladiti svoju aktivnost, oscilirajući zajedno. Najbolji mjerljivi korelat svijesti koji danas poznajemo jeste upravo gama-sinhronizacija: koherentne oscilacije membranske aktivnosti u opsegu od otprilike trideset do devedeset

herca, raspoređene preko sinhronizovanih moždanih regija. Kada smo budni i svjesni, taj obrazac je prisutan; u dubokoj anesteziji ili bez svijesti, on se raspada.

Zanimljiv i često zanemaren detalj jeste da gama-sinhronizaciju ne stvaraju okidanja aksona, nego integracijski procesi u dendritima i tijelima ćelija. To je navelo neke istraživače da svijest prije vežu za integracijsku fazu neuronskog rada - fazu u kojoj se mnoštvo mogućnosti sažima u jednu odabranu percepciju ili radnju. Anestetici, molekuli koji pouzdano ukidaju svijest, djeluju upravo na postsinaptičke dendrite, a jedva utiču na sposobnost aksona da okine. To je trag koji ćemo kasnije morati imati na umu.

Postoje, međutim, dvije opservacije koje pomjeraju pažnju sa membrane na unutrašnjost ćelije.

Prva: jednoćelijski organizmi poput paramecijuma i sluzavih plijesni pokazuju iznenađujuće "inteligentno" ponašanje: rješavaju lavirinte, pronalaze hranu, uče, a nemaju nijednu sinapsu ni nervno vlakno. Ako oni obrađuju informacije, to čine unutrašnjim sredstvima, prije svega citoskeletom.

Druga opservacija: mjerenja na kortikalnim neuronima budnih životinja pokazala su da prag okidanja varira od impulsa do impulsa mnogo više nego što Hodgkin-Huxleyev model predviđa. Kao da neki dodatni, unutrašnji "x-faktor", mimo samih sinaptičkih ulaza, utiče na to hoće li neuron okinuti ili ne. Zagovornici Orch-OR-a upravo taj neobjašnjeni faktor vide kao moguće mjesto za djelovanje svijesti.

Za sada je ključno uočiti sljedeće: čak i kada bismo mozak modelirali kao izuzetno složenu, aktivnu neuronsku mrežu, taj bi sistem, ako izuzmemo slučajni šum, bio potpuno algoritamski i deterministički. On bi, u principu, mogao izračunati bilo šta što može izračunati dovoljno moćan računar. I upravo tu se javljaju dva problema koja klasičnu sliku ostavljaju nepotpunom - filozofski

"teški problem" svijesti i, prema Penroseu, matematički problem granica računanja.

13.3 "Teški problem" svijesti

Filozof David Chalmers je 1995. godine napravio razliku koja je od tada obilježila cijelo polje. "Laki problemi" svijesti, iako su naučno zahtjevni, u principu su rješivi: kako mozak razlikuje boje, usmjerava pažnju, integriše informacije, izvještava o svom stanju. Sve su to pitanja o funkcijama, o obradi informacija, i za njih možemo zamisliti mehanističko objašnjenje. "Teški problem" je nešto drugo: zašto obrada informacija uopšte prati subjektivni doživljaj? Zašto crvenilo crvene boje, oštrina bola ili boja tona nisu samo podaci koji se obrađuju, nego i nešto što se osjeća?

Ono što filozofi nazivaju kvalija (eng. qualia) - kvalitativni, doživljajni aspekti iskustva - čini srž problema. Zamislivo je, barem logički, da postoji biće koje se ponaša potpuno kao čovjek, obrađuje iste informacije, izvještava o "bolu", a da pri tom iznutra ne osjeća baš ništa - tzv. filozofski zombi. Činjenica da mi nismo takvi zombiji, da posjedujemo unutrašnji život, upravo je ono što treba objasniti. A klasična fizika, koja opisuje samo mjerljive strukture i funkcije, naizgled nema mjesto za taj doživljajni aspekt.

Ovdje se otvara odlučujuće raskršće. Jedan tabor, kojem pripadaju filozofi poput Daniela Dennetta, tvrdi da je teški problem prividan, da će se, kada dovoljno detaljno objasnimo sve funkcije, i osjećaj "rastopiti" u to objašnjenje, ili da je subjektivnost naprosto korisna iluzija koju mozak konstruiše. Drugi tabor smatra da tu zaista nešto nedostaje. Ako je mozak samo fizički sistem, a subjektivno iskustvo se ne da izvesti iz klasične fizike, onda su moguća dva zaključka: ili svijest leži izvan nauke, ili nam nedostaje dublji fizički princip koji tek treba otkriti. Penrose bira ovu drugu, naučnu, ali radikalnu opciju i do nje ga vodi sasvim neočekivan put, preko matematičke logike.

13.4 Penrose i granice računanja

Roger Penrose je u knjigama "Carev novi um" (1989) i "Sjenke uma" (1994) iznio argument koji i danas izaziva žustre rasprave. Meta njegove kritike bila je tzv. jaka umjetna inteligencija - stav da su svi mentalni procesi u potpunosti računski, to jest da su, u načelu, samo izvršavanje algoritma. Penrose tvrdi suprotno: da ljudsko razumijevanje sadrži element koji nijedan algoritam ne može reprodukovati.

Da bismo razumjeli o čemu je riječ, korisno je podsjetiti na pojam algoritamskog računanja. Alan Turing je još tridesetih godina formalizovao šta znači "izračunljivo": to je sve što može uraditi idealizovana mašina koja slijedi konačan skup jednoznačnih pravila. Cijela moderna informatika počiva na toj ideji, a jaka umjetna inteligencija pretpostavlja da i ljudski um, ma koliko složen, na kraju pripada istoj klasi - da je, u suštini, jedan veoma veliki algoritam. Penrose upravo to osporava.

Njegov argument oslanja se na Gödelove teoreme nepotpunosti. Kurt Gödel je dokazao da u svakom dovoljno moćnom, konzistentnom formalnom sistemu postoje istinite tvrdnje koje se unutar tog sistema ne mogu dokazati. Penrose iz toga izvlači sljedeći zaključak: matematičar može, sagledavanjem, uvidjeti istinitost takve tvrdnje - istinitost koju sam formalni sistem ne može dokazati. Ako je tako, tvrdi on, onda ljudsko matematičko razumijevanje nije samo izvršavanje nekog fiksnog algoritma, jer bi inače bilo zarobljeno unutar granica tog algoritma, kao i svaki formalni sistem.

Ovaj argument je od početka bio predmet oštih kritika. Protivnici ističu da čovjek nije nužno konzistentan, da uvid u istinitost može biti pogrešiv, i da Gödelov rezultat ne isključuje da smo mi zapravo veoma složeni, možda i nespoznatljivi algoritmi. Bilo bi nepošteno prešutjeti da većina logičara i filozofa smatra Penroseov gödelovski argument nedovoljno uvjerljivim. Ipak, za razumijevanje Orch-OR-a

bitno je vidjeti kuda taj argument vodi Penrosea: ako je ljudsko razumijevanje ne-računsko (eng. non-computable), onda taj ne-računski sastojak mora dolaziti iz nekog dijela fizike koji sami još ne razumijemo do kraja - iz oblasti gdje su naše sadašnje teorije nepotpune. A jedina ozbiljna kandidatura za takvu nepotpunost, po Penroseu, jeste sama kvantna mehanika, tačnije njen čuveni problem mjerenja.

13.5 Od kvantne superpozicije do objektivne redukcije (OR)

Da bismo razumjeli Penroseov prijedlog, potrebno je ukratko podsjetiti na dva lica kvantne mehanike. S jedne strane, dok se kvantni sistem ne mjeri, on se razvija glatko, deterministički i kontinuirano, prema Schrödingerovoj jednačini - taj proces fizičari označavaju slovom U (unitarna evolucija). U toj fazi čestica može biti u superpoziciji, to jest istovremeno u više stanja ili lokacija, opisanih talasnom funkcijom. S druge strane, u trenutku mjerenja, sistem naglo i nasumično "skoči" u jedno određeno stanje - taj proces se označava slovom R (redukcija, ili "kolaps valne funkcije").

Sukob između ta dva procesa - kontinuiranog, determinističkog U i naglog, vjerovatnosnog R - naziva se problem mjerenja. Zašto ne vidimo mačke koje su istovremeno žive i mrtve, iako sama Schrödingerova jednačina dozvoljava takvu superpoziciju? Standardna, tzv. kopenhagenska interpretacija na to odgovara pragmatično: kolaps se dešava "pri mjerenju", a talasnoj funkciji se ne pripisuje stvarna fizička realnost. Mnogi fizičari, uključujući Einsteina i samog Schrödingera, smatrali su takav odgovor nedovoljnim, pukim zaobilaženjem problema.

Slavni misaoni eksperiment sa Schrödingerovom mačkom osmišljen je upravo da pokaže apsurdnost doslovne primjene kvantnih pravila na svakodnevni svijet: mačka zatvorena u kutiji, čija sudbina zavisi od raspada radioaktivnog atoma, po Schrödingerovoj jednačini bila bi u superpoziciji živog i mrtvog stanja sve dok neko ne otvori

kutiju. Fizika je na ovaj paradoks odgovorila na više načina: kopenhagenskim tumačenjem (kolaps "pri mjerenju"), Everettovom hipotezom mnoštva svjetova (svaka mogućnost ostvaruje se u zasebnom univerzumu), i idejom dekoherencije okoline (interakcija sa okolinom "razgrađuje" superpoziciju). Penrose smatra da nijedno od tih rješenja nije potpuno: dekoherencija, na primjer, objašnjava kako superpozicija izgleda kao da je nestala, ali ne i kako jedno određeno stanje zaista postaje jedina stvarnost. Za njega, potrebna je stvarna, objektivna redukcija.

Penrose predlaže drugačije rješenje. Prema njegovoj ideji, kolaps R nije ni iluzija ni stvar posmatrača, nego stvaran, objektivan fizički proces - otuda naziv objektivna redukcija (eng. Objective Reduction, OR). Ono što ga čini posebnim jeste okidač koji ga izaziva: gravitacija. Prema Diósi-Penroseovoj (DP) verziji, svaka superpozicija podrazumijeva superpoziciju dvije različite raspodjele mase, a time i dvije različite zakrivljenosti prostor-vremena. Priroda, tvrdi Penrose, ne trpi da takva superpozicija geometrije prostor-vremena traje neograničeno. Kada razlika između dvije geometrije dosegne kritičnu, sasvim sitnu Planckovu mjeru, superpozicija postaje nestabilna i spontano se "raspada" u jedno stanje.

Vrijeme koje je za to potrebno dato je procjenom $\tau \approx \hbar/E_G$, gdje je E_G gravitaciona samo-energija (eng. self-energy) razlike između dvije raspodjele mase. Samo-energija je gravitaciona potencijalna energija neke raspodjele mase sa samom sobom - govori koliko energije treba da tu masu sastaviš dovodeći njene komadiće iz beskonačnosti (ekvivalentno: energija sadržana u gravitacionom polju koje ona stvara). Formula ima elegantnu posljedicu: što je masa u superpoziciji veća, to E_G raste, a vrijeme do kolapsa τ postaje kraće. Usamljeni nukleon mogao bi ostati u superpoziciji milionima godina; Schrödingerova mačka od desetak kilograma raspala bi se u neizmjereno kratkom djeliću sekunde. Upravo taj obrnuti odnos mase

i vremena kasnije će biti presudan za pitanje da li mozak uopšte može iskoristiti OR.

Za Penrosea, međutim, OR nije samo rješenje problema mjerenja. On dodaje smjelu tvrdnju: svaki OR događaj nosi sa sobom sićušan djelić iskustva, trenutak "proto-svijesti". U beskrajnom mnoštvu nasumičnih OR događaja u svemiru, ti djelići su bezoblični, bez sadržaja i značenja. Ali ako bi ih neki sistem uspio organizovati i povezati, mogli bi, prema hipotezi, izrasti u pravo svjesno iskustvo. Ostaje pitanje: gdje bi u mozgu takav sistem mogao postojati? Odgovor je Hameroff pronašao u mikrotubulama.

13.6 Hameroff i mikrotubule

Unutrašnjost svake naše ćelije nije bezoblična tečnost, nego je prožeta citoskeletom - mrežom bjelančevinastih vlakana koja ćeliji daju oblik, pokreću je i organizuju. Glavne komponente tog skeleta su mikrotubule: šuplje cjevaste strukture prečnika svega dvadeset i pet nanometara, izgrađene od proteina tubulina. Svaki tubulin je dimer (molekul sastavljen od dvije spojene podjedinice), sastavljen od alfa i beta jedinice, i u zidu mikrotubule obično je raspoređen u trinaest uzdužnih niti (protofilamenata). Njihov spiralni raspored slijedi Fibonaccijev niz - 3, 5, 8, 13 - detalj koji je Hameroffu djelovao previše elegantno da bi bio slučajan.

U klasičnoj biologiji mikrotubule imaju jasnu i nespornu ulogu. One su nosive grede ćelije, tračnice po kojima motorni proteini poput kinezina prenose teret, i osnova diobenog vretena koje razdvaja hromosome pri diobi. U neuronima su posebno zanimljive: neuroni se nakon formiranja više ne dijele, pa njihove mikrotubule mogu ostati stabilne neograničeno dugo, što ih čini pogodnim za dugotrajno pohranjivanje informacija. U dendritima i tijelu ćelije mikrotubule su isprekidane, mješovitog polariteta i povezane u lokalne mreže, raspored koji, prema Hameroffu, podsjeća na sistem sposoban za obradu informacija.

Hameroffova ključna ideja bila je da mikrotubule mogu biti više od pukog strukturnog elementa. Još je čuveni neurofiziolog Sherrington 1957. godine spekulisao da bi, ako nervnih vlakana kod jednoćelijskih organizama nema, "možda citoskelet mogao poslužiti". Jednoćelijski organizmi poput paramecijuma zaista plivaju, love, uče i pare se - bez ijedne sinapse. Ako oni obrađuju informacije pomoću citoskeleta, zašto to ne bi činili i neuroni, na nivou dubljem od sinaptičkog?

Fizička osnova tih stanja, prema novijim verzijama teorije, leži u aromatičnim aminokiselinama tubulina - fenilalaninu, tirozinu i triptofanu - čiji prstenovi nose oblake takozvanih π -elektrona sposobnih da se rasprše preko prostora. Ti oblaci se, poput kapi ulja u vodi, skupljaju u nepolarne, hidrofobne džepove unutar proteina. Rani Orch-OR govorio je o mehaničkim promjenama oblika tubulina; novije verzije oslanjaju se isključivo na dipolna stanja tih elektronskih oblaka - bilo električna (razdvajanje naboja), bilo magnetna (vezana za spin elektrona). Poravnani duž spiralnih staza mikrotubule, ti dipoli mogli bi, prema hipotezi, prenositi i obrađivati kvantnu informaciju uz tek femtometersko pomjeranje atomskih jezgara.

Prema modelu, svaki tubulin može postojati u različitim stanjima, opisanim orijentacijom njegovih električnih ili magnetnih dipola, i ta stanja mogu djelovati poput bitova. Susjedni tubulini utiču jedni na druge, pa čitava mikrotubula postaje neka vrsta molekularnog automata, sposobnog za računanje. Sam po sebi, taj kapacitet je impresivan: uz oko milijardu tubulina po neuronu i moguće prebacivanje stanja na megahercnim frekvencijama, jedan jedini neuron mogao bi teorijski izvoditi red veličine deset na šesnaestu operacija u sekundi - koliko se u klasičnoj procjeni pripisuje čitavom mozgu. Ali klasično računanje, ma koliko moćno, i dalje ne rješava teški problem. Zato Hameroff i Penrose čine odlučujući korak:

pretpostavljaju da mikrotubule nisu samo klasični, nego i kvantni računari.

13.7 Kako funkcionise Orch-OR?

Sada možemo sastaviti čitavu sliku. Orch-OR predlaže sljedeći slijed događaja. Unutar tubulina, u nepolarnim "džepovima" bogatim aromatičnim aminokiselinama, elektronski oblaci mogu se naći u kvantnoj superpoziciji - tubulin postaje kvantni bit, ili qubit. Sinaptički ulazi "orkestriraju" ta stanja, usmjeravajući ih. Veliki broj tubulina u mnoštvu mikrotubula ulazi u zajedničku, koherentnu superpoziciju, međusobno kvantno spregnutu, i tokom integracijske faze neurona izvodi neku vrstu kvantnog računanja po Schrödingerovoj jednačini (U proces).

Superpozicija raste, a s njom raste i E_G . Kada dosegne prag zadan formulom $\tau \approx \hbar / E_G$, nastupa objektivna redukcija - i to, prema teoriji, ne nasumična, nego "orkestrirana". Taj trenutak OR-a je, prema hipotezi, jedan trenutak svjesnog iskustva. Odabrana tubulinska stanja potom utiču na okidanje aksona i time na ponašanje. Niz takvih OR događaja - na primjer četrdeset u sekundi - činio bi tok svijesti, a odgovarao bi opaženoj gama-sinhronizaciji.

Ostaje pitanje šta znači ono "orkestrirano" u nazivu teorije. Orkestrirano znači da kvantni procesi nisu zamišljeni kao potpuno izolovani od ostatka mozga. Naprotiv, oni su povezani sa sinaptičkim signalima, pamćenjem, aktivnošću susjednih neurona - preko takozvanih pukotinskih spojeva (eng. gap junctions), koji mogu spajati citoplazmu susjednih ćelija i omogućiti da se kvantno stanje proširi na više neurona. Riječ "orkestracija", dakle, opisuje pokušaj da se kvantni nivo poveže sa klasičnom neuronskom aktivnošću u smisleni cjelinu. Neorkestrirani OR događaji, kojih je u svemiru bezbroj, ostaju bezoblični djelići proto-svijesti; tek orkestrirani, u pravoj strukturi, daju bogato, kognitivno svjesno iskustvo.

Kako bi jedan svjesni trenutak povezao mnoštvo neurona rasutih po mozgu, teorija se oslanja na pukotinske spojeve i na model "svjesnog pilota". Prema toj slici, zona sinhronizovane dendritske aktivnosti kreće se kroz mozak poput reflektora, otvarajući i zatvarajući pukotinske spojeve, a unutar te pokretne zone izolovane, spregnute mikrotubule izvide kvantno računanje i orkestrirani OR. Time bi se, tvrde autori, mogla razlikovati svjesna aktivnost od one na "autopilotu", i objasniti zašto se svijest može javljati u različitim moždanim područjima.

Teorija ide i korak dalje, u evoluciju. Penrose i Hameroff spekuliraju da su neorkestrirani OR događaji - sićušni djelići proto-svijesti - postojali u svemiru oduvijek, a da je biologija tek postepeno naučila da ih organizuje. Kako su se biomolekuli udruživali u mikrotubule, kvantna stanja mogla su se sve duže održavati i sve bolje orkestrirati. Autori idu tako daleko da nagađaju da je pojava rudimentarne svijesti mogla ubrzati kambrijsku eksploziju prije oko 540 miliona godina. Ovo su, treba jasno reći, najspekulativniji dijelovi teorije, zanimljivi kao ideje, ali bez neposredne potvrde.

U novijoj verziji teorije, iz 2014. godine, autori su dodali i pojam frekvencija otkucaja (eng. beat frequencies). Umjesto da spore frekvencije svijesti (poput 40 Hz) budu direktno vrijeme kolapsa τ , one bi mogle biti razlika dvije mnogo brže mikrotubulske vibracije - slično kao što se pri sviranju dvije bliske note čuje spori "otkucaj". To bi značilo da kvantna koherencija mora opstati tek djelić mikrosekunde, a ne desetinke sekunde - čime bi cijela ideja postala fizički mnogo lakše ostvariva. Taj potez, međutim, istovremeno pokazuje koliko je teorija fleksibilna, što je i njena snaga i njena slabost.

13.8 Kvantna koherencija i dekoherencija

Ovdje dolazimo do najtežeg i najspornijeg dijela cijele priče. Kvantna superpozicija je krhka. Da bi opstala, sistem mora ostati

koherentan - izolovan od okoline. Svaka interakcija sa okolinom - sudar molekula, toplotna vibracija, električno polje jona - uzrokuje dekoherenciju, brzo brisanje kvantnih svojstava i prelazak u klasično ponašanje. Zato tehnološki kvantni računari rade na temperaturama bliskim apsolutnoj nuli i u vakuumu.

A mozak je, riječima kritičara, sve suprotno: topao, mokar i bučan. Ima temperaturu od 37 stepeni, prepun je vode i jona, u njemu se molekuli neprestano sudaraju. Na prvi pogled, to je najgore zamislivo okruženje za očuvanje kvantne koherencije. Upravo je ovaj prigovor - problem dekoherencije - najozbiljnija prepreka Orch-OR-u i predmet najžešćih rasprava.

Hameroff i saradnici na to odgovaraju u nekoliko pravaca. Prvo, tvrde da se relevantna kvantna stanja odvijaju u nepolarnim, "uljanim" džepovima unutar tubulina, zaštićenim od polarnih interakcija okoline. Drugo, ističu da superpozicija u njihovom modelu ne zahtijeva pomjeranje čitavog proteina, nego samo sićušno pomjeranje atomskih jezgara - reda femtometra - što dekoherenciju čini sporijom. Treće, i najvažnije, pozivaju se na sve brojnije dokaze da priroda i na sobnoj temperaturi koristi kvantnu koherenciju: u fotosintezi, gdje se energija svjetlosti prenosi kroz protein koristeći više puteva istovremeno, u navigaciji ptica, u čulu mirisa. Ako biljke to mogu, argumentuju oni, zašto ne bi mogle i mikrotubule?

Poseban oslonac hipoteze je ideja koju je još 1968. godine iznio Herbert Fröhlich - da biološki sistem, ako se u njega uliva dovoljno metaboličke energije, može "ispumpati" koherentno kolektivno stanje, slično kao što laser prisilno stvara koherentnu svjetlost iz nereda. Prema Orch-OR-u, upravo bi takva Fröhlichova kondenzacija mogla održavati kvantnu koherenciju u mikrotubulama, dodatno zaštićenu uređenim slojevima vode, aktinskim gelom i jakim električnim poljima mitohondrija. Ovdje kritičari uzvraćaju najoštrije: prema njihovim proračunima, energija dostupna u ćeliji višestruko je premala da bi pokrenula pravu, koherentnu Fröhlichovu

kondenzaciju - postoji samo njena "slaba" varijanta, koja ne daje koherentno kretanje. Kada bi mehanizam zaista radio kako teorija traži, tvrde oni, iz svih bioloških tkiva vidjeli bismo stimulirano zračenje, čega nema. Rasprava oko toga do danas nije zaključena.

Kvantni efekti u biologiji na sobnoj temperaturi zaista postoje i danas su nesporni, ali oni traju izuzetno kratko (femtosekunde do pikosekundi) i odvijaju se u strogo određenim, evolucijski podešenim strukturama. Pitanje nije da li kvantna biologija postoji, nego da li se relevantna koherencija u mikrotubulama može održati dovoljno dugo i na dovoljno velikoj skali da bi imala ulogu u svijesti. Na to pitanje, kao što ćemo vidjeti, još nema pouzdanog odgovora.

13.9 Anestezija i mikrotubule

Jedan od najzanimljivijih i, mora se priznati, najzavodljivijih argumenata u prilog Orch-OR-u dolazi iz Hameroffove vlastite struke - anesteziologije. Pitanje je naizgled jednostavno: kako to da opšti anestetici, hemijski veoma raznorodni molekuli, tako pouzdano i reverzibilno gase svijest, a da pri tom ostave netaknute mnoge druge moždane funkcije?

Klasično objašnjenje traži djelovanje anestetika na membranske proteine, na primjer na jonske kanale. Ali postoji i drugi trag. Anestetici se vežu u nepolarnim, hidrofobnim džepovima proteina - upravo onakvim kakvi se, prema Orch-OR-u, nalaze u tubulinu i u kojima bi trebalo da se odvijaju kvantni dipolni procesi. U jednom od uvjerljivijih eksperimenata, na punoglavcima je pokazano da anestetik zaustavlja ponašanje vežući se specifično za moždane mikrotubule. Hameroff iz toga izvodi hipotezu: anestetici gase svijest tako što raspršuju kvantne dipole neophodne za orkestrirani OR.

Ovo je elegantna ideja i vrijedan pravac istraživanja. Ali i nju treba predstaviti onako kako i sami autori priznaju da je treba shvatiti - kao hipotezu, a ne kao dokaz. Činjenica da anestetici djeluju u hidrofobnim džepovima i da mogu zahvatiti mikrotubule ne dokazuje

da svijest nastaje kvantnim procesima u njima; postoje i klasična objašnjenja djelovanja anestetika na te iste strukture. Anestezija je, dakle, jedna od linija indicija u prilog hipotezi, ali nikako njen krunski dokaz.

13.10 Šta zaista imamo?

Da tekst ne bi postao nekritičko slavljenje jedne teorije, ovaj dio je najvažniji. Dokaze u vezi sa Orch-OR-om treba jasno razvrstati po tome šta zaista pokazuju, jer se u popularnim prikazima ti nivoi rutinski miješaju.

A. Postojanje mikrotubula. Ovo je apsolutno nesporno. Mikrotubule su temeljna struktura svake eukariotske ćelije i njihova građa je detaljno poznata.

B. Važne funkcije mikrotubula u neuronima. Također nesporno. Mikrotubule učestvuju u transportu, u oblikovanju sinapsi, a njihov poremećaj povezan je sa oboljenjima poput Alzheimerove bolesti. Da su mikrotubule biološki važne - u to nema sumnje.

C. Kvantni efekti u biološkim sistemima. Postoje i dokumentovani su, prije svega u fotosintezi. Grupa Anirbana Bandyopadhyaya u Japanu izvijestila je i o rezonantnoj provodljivosti pojedinačnih mikrotubula na određenim frekvencijama u gigahercnom, megahercnom i kilohercnom opsegu - nalazi koje Hameroff i Penrose ističu kao snažnu podršku. Ti rezultati su intrigantni, ali ih treba nezavisno ponoviti i potvrditi prije nego što se na njih čvrsto osloni.

D. Kvantni procesi u mikrotubulama stvaraju svijest. Ovo je odlučujuća karika - i upravo ona nedostaje. Ne postoji nijedan eksperiment koji je pokazao da mikrotubule izvide kvantno računanje relevantno za svijest, niti da postoji uzročna veza između OR događaja u njima i svjesnog iskustva. Sve između tačke C i tačke D za sada je teorijska konstrukcija, ma koliko dosljedna bila.

Treba biti pošten i u drugom smjeru: Orch-OR je, za razliku od mnogih drugih teorija svijesti, izložio niz konkretnih, provjerljivih predviđanja - još 1998. godine objavljeno ih je dvadeset. Neka od njih su djelimično potvrđena (na primjer da psihoaktivni lijekovi i anestetici djeluju preko mikrotubula, i da postoje gigahercne ekscitacije u njima). Druga ostaju nepotvrđena ili nejasna (kvantna sprega između odvojenih mikrotubula, kvantno tuneliranje kroz pukotinske spojeve). Ta provjerljivost je stvarna vrlina teorije. Ali provjerljivost nije isto što i potvrđenost.

13.11 Kritike teorije

Orch-OR se od svog nastanka suočava sa ozbiljnim kritikama iz više pravaca, i svaki pošten prikaz mora im dati prostora.

Dekoherencija. Najpoznatiji prigovor iznio je fizičar Max Tegmark 2000. godine. On je izračunao da bi vrijeme dekoherencije u mikrotubulama iznosilo oko 10^{-13} sekundi, prekratko za bilo kakvu fiziološku ulogu. Hameroffova grupa (Hagan i saradnici) odgovorila je da je Tegmark koristio pogrešne pretpostavke: uzeo je razdvajanje superpozicije reda dvadeset i četiri nanometra, dok Orch-OR govori o razdvajanju na nivou atomskih jezgara, sedam redova veličine manjem. Ponovnim računom, uz Orch-OR pretpostavke, dobili su vremena od 10^{-5} do 10^{-4} sekundi. Rasprava oko toga ko je u pravu i dalje nije konačno riješena i zavisi od pretpostavki koje se teško nezavisno provjeravaju.

Biološka neizvodljivost. Možda najoštrije rad protiv teorije objavili su 2009. godine McKemmish, Reimers i saradnici. Njihov argument nije o gravitaciji, nego o biohemiji. Orch-OR pretpostavlja da svaki tubulin može zauzeti dva različita prostorna oblika - dvije konformacije, poput ruke koja može biti otvorena ili stisnuta u šaku (ne mijenja se sastav proteina, nego samo njegov oblik) - i da poput prekidača brzo i mnogo puta skače iz jednog oblika u drugi; ta dva stanja predstavljala bi bit, a njihova kvantna superpozicija qubit. Ali,

pokazuju autori, u stvarnoj biologiji ta dva oblika tubulina vezana su za to je li na njega vezan energetska molekul GTP ili GDP: ravan oblik dok tubulin ulazi u mikrotubulu, ili blago skraćeni, zakrivljen oblik nakon što se GTP potroši. Ključni problem je što se ta izmjena ne događa u već sklopljenoj mikrotubuli - da bi se tubulin vratio u prvobitni oblik, mikrotubula se mora rastaviti i ponovo sastaviti, proces koji traje sekundama do satima, neuporedivo sporije od misaonih procesa. Zamišljeni prekidač je, dakle, u praksi gotovo jednosmjerni i predalek da bi mogao služiti kao računski element svijesti. Dodatno tvrde da nijedan poznati fizički mehanizam - uključujući Fröhlichovu kondenzaciju na koju se teorija poziva - ne može obezbijediti koherentno kretanje dovoljno dugo; energija dostupna u ćeliji, po njihovom računu, deset je redova veličine premala. Njihov zaključak je nedvosmislen: Orch-OR nije biološki izvodljiv.

Hameroff i Penrose su na ovaj i druge prigovore odgovorili tako što su malo izmijenili hipotezu. Priznali su da su rane ilustracije sa konformacijskim promjenama tubulina bile obmanjujuće, i prešli na model zasnovan isključivo na dipolnim stanjima elektronskih oblaka (a ne na GTP/GDP prebacivanju), za koji tvrde da izbjegava problem energije i topline. Ovaj potez je legitiman - hipoteze se s pravom mijenjaju pred kritikom, ali otvara i pitanje da li teorija, mijenjajući se, postaje teže oboriva.

Ostali prigovori. Kritikovana je i sama fizička osnova: Tuszynski i saradnici pitali su kako tako slaba gravitaciona energija (reda 10^{-29} džula) uopšte može imati bilo kakvu ulogu naspram toplotne energije stotinama miliona puta veće. Autori odgovaraju da E_G i ne djeluje kao energija koja pokreće proces, nego samo kao mjera neizvjesnosti koja određuje vrijeme kolapsa - suptilna distinkcija koju svi kritičari ne prihvataju. Oспораван je i sam gödelovski argument, i pitanje da li je Penroseov OR uopšte fizički potvrđen (nije - još nijedan eksperiment nije dovoljno osjetljiv da ga provjeri). Konačno, ostaje

najdublji filozofski prigovor: čak i kad bi sve fizičko funkcionisalo, kako tačno prelazak iz kvantnog u klasično stanje proizvodi osjećaj? Taj korak Orch-OR postulira, ali ne objašnjava, pa se može reći da teški problem premješta na Planckovu skalul, a ne da ga rješava.

13.12 Druge teorije svijesti

Da bi slika bila objektivna, Orch-OR treba smjestiti među druge ozbiljne teorije svijesti - od kojih većina uopšte ne poseže za kvantnom mehanikom, nego ostaje unutar klasične neuronauke. Ovdje nema pobjednika kojeg treba proglasiti; cilj je pokazati da je Orch-OR samo jedan od više mogućih pristupa, i to daleko od najprihvaćenijeg.

Teorija globalnog radnog prostora (Global Workspace Theory). Prema ovoj vrlo uticajnoj ideji (Baars, Dehaene), sadržaj postaje svjestan kada se "emituje" širom mozga i postane dostupan mnogim specijalizovanim sistemima - poput informacije osvjetljene na globalnoj pozornici. Stanislas Dehaene je ovaj okvir potkrijepio nizom eksperimenata i on predstavlja svojevrsnu protutežu Orch-OR-u, jer svijest objašnjava čisto neuronskom, klasičnom dinamikom.

Teorija integrisane informacije (IIT). Giulio Tononi predlaže da je svijest identična integrisanoj informaciji sistema, mjerljivoj veličinom Φ . Što je sistem integrisaniji i diferenciraniji, to je svjesniji. IIT je matematički ambiciozan i primjenjiv na bilo koji sistem, ali i sam izaziva rasprave o tome šta zapravo tvrdi.

Teorije višeg reda i prediktivno procesiranje. Prve tvrde da je stanje svjesno kada postoji misao višeg reda o njemu - svijest kao reprezentacija vlastitih mentalnih stanja. Druge (eng. predictive processing) posmatraju mozak kao mašinu za predviđanje, koja neprestano generiše model svijeta i ispravlja ga na osnovu grešaka; svjesno iskustvo bilo bi "najbolja trenutna pretpostavka" mozga o stvarnosti.

Zanimljivo je da Orch-OR ima i svoje filozofsko zaleđe. Penrose i Hameroff ga povezuju sa procesnom filozofijom Alfreda Northa Whiteheada, koji je mentalnu aktivnost shvatao kao niz "prilika iskustva" - prostorno-vremenskih kvanata, od kojih je svaki, obično na veoma niskom nivou, nosilac tračka doživljaja. Neorkestrirani OR događaji odgovarali bi Whiteheadovim "dosadnim, jednoličnim" prilikama, a orkestrirani - visokoj, koherentnoj, punoj svijesti. Ova srodnost smješta Orch-OR u tradiciju panpsihizma, prema kojoj su elementi iskustva utkani u samu strukturu stvarnosti. To je za jedne najintrigantniji, a za druge najproblematičniji aspekt teorije.

Sve ove teorije imaju zajedničku osobinu koja Orch-OR nema: ne zahtijevaju nikakvu novu fiziku. One se u potpunosti oslanjaju na poznatu neuronsku aktivnost. To je istovremeno njihova prednost (skromnije pretpostavke) i, prema Penroseu i Hameroffu, njihovo ograničenje - jer, tvrde oni, nijedna od njih ne dotiče teški problem niti pitanje ne-računskog razumijevanja.

13.13 Da li je svijest kvantni fenomen?

Vrijedi razlikovati dvije tvrdnje koje se lako pobrkaju. Prva je trivijalno tačna: mozak je, kao i sve u prirodi, na kraju sačinjen od kvantnih čestica, pa je u tom banalnom smislu "kvantni". Druga je netrivijalna i sporna: da su specifično kvantni efekti - superpozicija, spregnutost, koherencija - funkcionalno bitni za nastanak svijesti. Orch-OR zastupa upravo ovu drugu, jaku tvrdnju.

Zanimljivo je da Orch-OR nije jedina kvantna teorija svijesti. Fizičar Matthew Fisher predložio je 2015. godine sasvim drugačiji mehanizam: da bi nosilac kvantne informacije u mozgu mogli biti nuklearni spinovi atoma fosfora, zaštićeni u takozvanim Posnerovim molekulima, koji spinsku koherenciju mogu održati neuporedivo duže od elektronskih stanja. Fisherova hipoteza je, za razliku od Orch-OR-a, biohemijski konkretna i lakše provjerljiva, i pokazuje da "kvantna svijest" nije jedinstvena teorija nego čitava porodica

različitih prijedloga. Savremeni pregledi te prijedloge razvrstavaju u nekoliko odvojenih familija, među kojima je Orch-OR samo jedna - historijski najpoznatija, ali ni najskromnija ni najbolje potkrijepljena.

Postoji i još starija, potpuno drugačija veza kvantne mehanike i svijesti - ona iz same interpretacije kvantne teorije. Neki fizičari (poput Wignera) svojevremeno su tvrdili da mjerenje, a time i kolaps, izaziva svjesni posmatrač. Vrijedi naglasiti da je Orch-OR gotovo suprotan tome: kod Penrosea nije svijest ta koja izaziva kolaps, nego je svaki kolaps sam po sebi primitivan "trenutak iskustva". To je važno razgraničenje, jer se Orch-OR često pogrešno svrstava u misticizam "svijest stvara stvarnost", čemu se sami autori izričito protive.

13.14 Kakav je onda zaključak?

Kao što priliči temi ovog obima, zaključak je bolje ostaviti u obliku pitanja nego tvrdnji. Ako je svijest posljedica neuronske aktivnosti, moramo li onda razumjeti i kvantnu fiziku tih neurona da bismo je objasnili? Ili se kvantni efekti na mikroskopskom nivou u toplom i bučnom mozgu neizbježno gube prije nego što mogu imati bilo kakvu ulogu u svjesnom iskustvu?

Trenutno stanje dokaza dopušta samo oprezan odgovor. Postojanje i biološka važnost mikrotubula su nesporni. Postojanje kvantnih efekata u biologiji je stvarno. Ali karika koja bi te dvije činjenice povezala sa svjesnim iskustvom - dokaz da kvantno računanje u mikrotubulama zaista proizvodi svijest - još uvijek nedostaje, a ozbiljni prigovori o dekoherenciji i biološkoj izvodljivosti nisu do kraja pobijeni. Većina neuronaučnika i fizičara ostaje skeptična, i to s razlogom.

I pored svega, Orch-OR zaslužuje poštovanje po nečemu što mnoge druge teorije nemaju: hrabrosti da bude konkretan i oboriv. On ne bježi u nejasnoće, nego iznosi provjerljiva predviđanja i izlaže se riziku opovrgavanja. Ostaje intrigantna, ali kontroverzna hipoteza

koja pokušava spojiti tri područja koja se tradicionalno proučavaju odvojeno - kvantnu fiziku, neuronauku i filozofiju svijesti. Da li je taj most stvaran ili samo lijepo zamišljen, pokazaće tek eksperimenti. A dotle, možda je najpoštenije reći da svijest ostaje ono što je i bila na početku ovog teksta: najbliža i najdalja misterija koju poznajemo.

Literatura

- [1] Hameroff, S. R., & Penrose, R. (2014). Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory. *Physics of Life Reviews*, 11(1), 39-78.
- [2] McKemmish, L. K., Reimers, J. R., McKenzie, R. H., Mark, A. E., & Hush, N. S. (2009). Penrose-Hameroff orchestrated objective-reduction proposal for human consciousness is not biologically feasible. *Physical Review E*, 80, 021912.
- [3] Penrose, R. (1989). *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. Oxford: Oxford University Press.
- [4] Penrose, R. (1994). *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford: Oxford University Press.
- [5] Hameroff, S. R. (1987). *Ultimate Computing: Biomolecular Consciousness and Nanotechnology*. Amsterdam: North-Holland.
- [6] Hameroff, S., & Penrose, R. (1996). Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: A model for consciousness. *Mathematics and Computers in Simulation*, 40, 453-480.
- [7] Chalmers, D. J. (1996). *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory*. New York: Oxford University Press.
- [8] Damasio, A. R. (1999). *The Feeling of What Happens: Body and Emotion in the Making of Consciousness*. New York: Harcourt Brace.
- [9] Dehaene, S. (2014). *Consciousness and the Brain: Deciphering How the Brain Codes Our Thoughts*. New York: Viking.
- [10] Gao, S. (ur.) (2022). *Consciousness and Quantum Mechanics*. New York: Oxford University Press.
- [11] Rosenblum, B., & Kuttner, F. (2011). *Quantum Enigma: Physics Encounters Consciousness* (2. izd.). New York: Oxford University Press.
- [12] Tuszynski, J. A. (ur.) (2006). *The Emerging Physics of Consciousness*. Berlin: Springer.

- [13] Penrose, R., Hameroff, S., & Kak, S. (ur.) (2011). *Consciousness and the Universe: Quantum Physics, Evolution, Brain & Mind*. Cambridge, MA: Cosmology Science Publishers.
- [14] Diósi, L. (1989). Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations. *Physical Review A*, 40, 1165-1174.
- [15] Penrose, R. (1996). On gravity's role in quantum state reduction. *General Relativity and Gravitation*, 28, 581-600.
- [16] Tegmark, M. (2000). The importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, 61, 4194-4206.
- [17] Hagan, S., Hameroff, S., & Tuszynski, J. (2002). Quantum computation in brain microtubules? Decoherence and biological feasibility. *Physical Review E*, 65, 061901.
- [18] Fisher, M. P. A. (2015). Quantum cognition: The possibility of processing with nuclear spins in the brain. *Annals of Physics*, 362, 593-602.
- [19] Tononi, G. (2004). An information integration theory of consciousness. *BMC Neuroscience*, 5, 42.

14

Zašto nema divova?

"Za svaku vrstu životinje postoji najprikladnija veličina, a svaka veća promjena veličine neizbježno povlači i promjenu oblika." (J. B. S. Haldane, 1926)



Zašto nema mrava veličine konja, ni čovjeka visokog dvadeset metara? Zašto planine imaju plafon, a najveće životinje koje su ikada živjele plivaju, a ne hodaju? Odgovor se krije u jednom naizgled dosadnom geometrijskom pravilu - zakonu kvadrata i kuba - koje diktira da oblik nije slobodan izbor, nego posljedica veličine.

Ovaj tekst prati tu nit od Galilejevih kostiju do vrhova Marsa, i pokazuje kako iste jednačine koje zabranjuju divove određuju i to koliko brzo kuca srce, koliko dugo živi slon i dokle može narasti drvo.

Djeca vole divove, a odrasli ih se boje - i jedni i drugi pretpostavljaju da bi div, kada bi postojao, bio naprosto uvećan čovjek: iste građe, istih proporcija, samo krupniji. Upravo ta tiha pretpostavka je pogrešna, i to na način koji je jedan od najdubljih i najmanje slavljenih uvida u cijeloj prirodnoj nauci. Priroda ne poznaje slobodno uvećanje. Ne možete uzeti biće, pomnožiti sve njegove dimenzije s deset i očekivati da će raditi. Nešto se uvijek slomi - kost, pluća, srce ili sama logika oblika. Veličina nije nevino svojstvo koje se dodaje gotovom nacrtu; ona je sila koja taj nacrt prisiljava da se mijenja. Zato nema divova. A da bismo razumjeli zašto, moramo se vratiti čovjeku koji je prvi to matematički dokazao, i to pod kućnim pritvorom, pišući o kostima.

14.1 Galilejev div

Godine 1638, star, gotovo slijep i osuđen od inkvizicije, Galileo Galilei objavio je u Leidenu svoje posljednje i, po mišljenju mnogih, najbolje djelo - "Razgovore o dvije nove nauke". Prva od te dvije nauke nije bila astronomija zbog koje je stradao, nego nešto na prvi pogled skromnije: čvrstoća materijala, otpornost greda i kostiju na lomljenje. Upravo tu, gotovo usput, u obliku dijaloga trojice sagovornika, Galileo je postavio temelj čitave nauke o razmjerima.

Njegov ključni uvid glasi: kada tijelo uvećamo zadržavajući mu oblik, ono ne postaje srazmjerno jače, nego srazmjerno slabije. Razlog je čisto geometrijski. Snaga kosti ili grede zavisi od površine njihovog poprečnog presjeka - od toga koliko vlakana nosi teret. A ta površina raste s kvadratom dimenzija. Težina koju kost mora nositi zavisi, međutim, od zapremine tijela, a zapremina raste s kubom dimenzija. Udvostručite biće, i njegova nosiva površina naraste četiri puta, ali njegova težina osam puta. Uvećanje uvijek ide u korist tereta, a na štetu potpore.

Galileo je tu misao doveo do njene slikovite krajnosti. Nacrtao je kost čija je prirodna dužina utrostručena, ali toliko podebljanu da bi

krupnijoj životinji služila jednako dobro kao što mala kost služi maloj - i priznaje koliko ta uvećana kost izgleda "nesrazmjerno" i čudovišno. Zaključak je neumoljiv: priroda ne može napraviti konja velikog kao dvadeset običnih konja, niti diva deset puta višeg od čovjeka, a da mu pritom drastično ne izmijeni proporcije udova, prije svega kostiju, ili da ne pribjegne nekom tvrđem materijalu. U protivnom, div bi se srušio i smrskao pod vlastitom težinom već pri prvom koraku. Isto vrijedi i za neživu prirodu: golemi mramorni stup puca pod vlastitom težinom ondje gdje mali stoji bez muke, a stogodišnji hrast visok dvjesto lakata (oko 100 m) ne bi mogao nositi vlastite grane raspoređene kao u obična stabla.

Galileo iz toga izvlači zaključak: baš zato što su mali, sitni stvorovi su srazmjerno mnogo jači od velikih. Pas, primjećuje on, vjerovatno može ponijeti na leđima dva ili tri psa svoje veličine; konj ne bi mogao ponijeti ni jednog jedinog konja. Kad bismo umanjili tijelo, njegova snaga ne bi opala u istoj mjeri kao njegova težina - dapače, što je tijelo manje, to je srazmjerno snažnije. Tri stoljeća prije nego što je iko izmjerio jednu jedinu kost slona, Galileo je čistom geometrijom znao zašto slon mora imati stupaste noge, a gazela smije imati tanke.

14.2 Aritmetika skale

Zaustavimo se na trenutak kod tog pravila, jer je ono junak cijelog poglavlja i vrijedi ga zapamtiti. Zamislite kocku stranice jedan centimetar. Njena površina je šest kvadratnih centimetara, a zapremina jedan kubni centimetar; odnos površine i zapremine je šest naprema jedan. Sada udvostručite stranicu na dva centimetra. Površina naraste na dvadeset četiri, zapremina na osam - odnos je pao na tri naprema jedan. Uvećajte stranicu deset puta i odnos padne na svega šest naprema deset. Što je tijelo veće, to relativno manje površine ima na svaku jedinicu svoje zapremine. To je cijela tajna, i gotovo sve ostalo u ovom poglavlju samo je njena posljedica.

Zašto je taj odnos toliko važan? Zato što priroda gotovo sve svoje najvažnije poslove obavlja preko površina, a plaća ih zapreminom. Kost nosi teret svojim presjekom (površina), a nosi težinu koja dolazi od mesa (zapremina). Životinja prima kisik i hranu kroz opne (površina), a treba ih srazmjerno svojoj masi (zapremina). Toplota gubi kroz kožu (površina), a proizvodi je cijelim tijelom (zapremina). U svakom od tih slučajeva, kako biće raste, potražnja (vezana za zapreminu) neumitno preraste ponudu (vezanu za površinu). Dođe trenutak kada jednostavno uvećanje više ne može držati korak, i tada se mora promijeniti ili oblik, ili građa, ili način života. Priroda bira sve tri strategije, zavisno od prilike, i upravo iz tih izbora nastaje raskoš oblika koju vidimo oko sebe.

Vrijedi odmah reći i suprotno: ono što je za divove prokletstvo, za patuljke je blagoslov. Baš zato što maleni imaju obilje površine na malo zapremine, oni rade stvari koje bi krupnima bile nezamislive - penju se uz okomite zidove, padaju s velikih visina bez ozljede, dišu kroz kožu. Ista jednačina koja slonu vezuje noge, buhi daruje moći koje graniče s magijom. Skala nije ni prijatelj ni neprijatelj; ona je pravilo igre, a svaka veličina igra svoju igru.

14.3 Zašto se divovi ruše pod svojom težinom?

Najsuroviju posljedicu tog pravila trpe upravo divovi iz bajki. Godine 1926. britanski biolog J. B. S. Haldane napisao je kratak esej "O tome kako biti prave veličine" (eng. On Being the Right Size), koji je i danas najbistrije napisana stranica o ovoj temi. Haldane uzima diva iz knjige svog djetinjstva, visokog šezdeset stopa - dakle desetak puta višeg od čovjeka - i podvrgava ga aritmetici skale. Deset puta viši, deset puta širi i deset puta deblji div teži hiljadu puta više od čovjeka. Ali poprečni presjeci njegovih kostiju veći su samo stotinu puta. To znači da svaki kvadratni centimetar divovske kosti mora podnijeti deset puta veće opterećenje nego kod čovjeka. Budući da se ljudska bedrena kost lomi već pri otprilike deseterostrukoj

tjelesnoj težini, Haldane suho zaključuje da bi div lomio obje butne kosti pri svakom koraku. Zato su, dodaje s osmijehom, divovi na ilustracijama iz njegovog djetinjstva uvijek bili naslikani kako sjede.

Priroda, naravno, poznaje životinje koje su uspješno postale velike - ali nijedna od njih nije samo uvećana verzija svog malog pretka. Haldane to pokazuje na gazeli: poželi li ona narasti, mora učiniti jedno od dvoga. Ili će skratiti i zadebljati noge, kao nosorog, da svaki kilogram težine i dalje ima približno istu površinu kosti da ga nosi; ili će, kao žirafa, izdužiti noge ukoso i zbiti tijelo da zadrži stabilnost. Slon, najveća kopnena životinja današnjice, u potpunosti je rob tog pravila: njegove noge nisu uvećane gazeline noge, nego stubovi postavljeni gotovo okomito pod tijelo, jer samo tako presjek kosti može pratiti masu. Divljenje koje osjećamo pred slonom zapravo je divljenje pred rješenjem jednog inženjerskog problema koji čovjek nikada nije morao riješiti.

Tu se krije i tiha pouka o formi. Zdepastost velikih životinja nije estetski hir prirode niti znak nespretnosti; ona je matematički nužna. Kada gledate nosoroga, hrasta ili stupove antičkog hrama, gledate isti odgovor na isti problem: da bi nešto veliko stajalo uspravno, mora biti nesrazmjerno debelo. Vitkost je povlastica malih.

14.4 Insekt ne može biti velik

Ako kost ograničava divove, dah ograničava patuljke - odozgo. Zašto nema insekta veličine psa? Odgovor je opet u odnosu površine i zapremine, ali ovaj put na strani disanja. Sitno biće, poput mikroskopskog crva, prima sav kisik koji mu treba jednostavno kroz kožu: površine ima napretek u odnosu na zapreminu. Uvećajte to biće deset puta i zapremina, a s njom i potreba za kisikom, naraste hiljadu puta, dok koža naraste samo stotinu puta. U jednom trenutku koža više ne može upiti dovoljno, pa se mora izmisliti dodatna površina - pluća ili škrge, naborane i granate baš zato da u malu zapreminu spakuju ogromnu površinu. Čovjek, podsjeća Haldane, u

grudima nosi stotinjak kvadratnih metara plućne opne. Viša bića nisu složenija zato što su veća bez razloga; ona su složena zato što ih je veličina na to prisilila.

Insekti su, međutim, izabrali drugačiji put disanja. Umjesto da kisik raznose krvlju, oni ga puštaju da uđe kroz sistem sitnih zračnih cjevčica - traheja - koje se otvaraju na površini tijela i granaju u unutrašnjost. U najtanjim ograncima kisik više ne struji, nego se kreće samo difuzijom, sporim lutanjem molekula. A difuzija je upotrebljiva tek na vrlo malim udaljenostima. Dijelovi tijela udaljeni više od nekoliko milimetara od zraka jednostavno bi ostali gladni kisika. Zato, zaključuje Haldane, gotovo nijedan insekt nije deblji od otprilike jednog centimetra. Kopneni rakovi, građeni po sličnom nacrtu ali s kisikom u krvi, mogu narasti mnogo veći - a da su insekti slučajno "izmislili" pumpanje zraka kroz tijelo umjesto pukog upijanja, mogli bi doseći veličinu jastoga.

Priroda je taj račun već jednom provjerila, i to velikodušno. Prije oko tristo miliona godina atmosfera je sadržavala znatno više kisika nego danas; procjene idu do 35%, naspram današnjeg 21%. To je ključno jer insekt ne udiše aktivno u dubinu tijela, nego kisik do njegovih unutrašnjih tkiva stiže difuzijom, putujući od zraka prema unutra. A difuzija ima domet: što je zrak bogatiji kisikom, to kisik prodire dublje prije nego se "potroši". U gušćoj, kisikom bogatijoj atmosferi taj domet bio je veći, pa je debljina tijela porasla i nekom su poletjele zvijeri nalik vretencima (insekti iz reda Odonata), poput roda Meganeura, s rasponom krila do 70 cm, najveći insekti koji su ikada postojali. Kada je, milionima godina kasnije, nivo kisika pao, domet difuzije se skratio, dopuštena debljina tijela se smanjila, i ti divovi su nestali. Upravo zato njihova sudbina nije igra brojeva, nego najbolji mogući dokaz Haldaneovog argumenta: koliko velik smije biti insekt određeno je time koliko duboko kisik može difuzijom prodrijeti u njegovo tijelo, a to opet zavisi od toga koliko ga ima u zraku. Promijenite sastav atmosfere i pomjerili ste samu granicu veličine.

14.5 Muha, kap vode i strah od gravitacije

Za nas je gravitacija sveprisutna prijetnja: pad je jedan od najčešćih uzroka ozbiljnih povreda. Za insekta, gravitacija gotovo da ne postoji. Haldane to ilustruje sljedećom slikom: bacite miša niz okno duboko hiljadu metara i on će, stigavši na dno, dobiti lak udarac i otići dalje; pacov bi poginuo, čovjek bi se slomio, a konj bi se rasprsnuo. Razlog je opet skala. Otpor zraka pri padu srazmjern je površini tijela, a sila pada srazmjerna je težini, dakle zapremeni. Umanjite biće deset puta i njegova težina padne hiljadu puta, a površina samo stotinu puta - otpor zraka postane, relativno, deset puta jači. Zato mali padaju polako i meko. Insekt se gravitacije ne boji; on se boji nečeg sasvim drugog.

Ta druga sila, za sitne stvorove strašnija od gravitacije, je površinska napetost vode. Kada čovjek izađe iz kupke, na sebi ponese film vode debeo oko pola milimetra, težak oko pola kilograma, jedva primjetan teret. Mokar miš mora nositi otprilike vlastitu težinu vode. Mokra muha mora nositi mnogostruko više od sebe i jednom pokvašena muha nalazi se u ozbiljnoj nevolji. Za insekta, otići na piće opasno je koliko za čovjeka nagnuti se preko provalije: padne li u stisak površinske napetosti, obično se iz njega ne izvuče. Neki insekti se brane time što su nekvašljivi, drugi drže odstojanje od vode dugim rilcem, ali svi žive u svijetu u kojem je kap vode opasna zamka.

Ovdje se otvara jedan dublji uvid koji seže sve do granica žive materije. Što se više spuštamo niz ljestvicu veličine, to više blijede sile na koje smo navikli - gravitacija, inercija - a jačaju one koje jedva primjećujemo: viskoznost, površinska napetost, difuzija. Fizičar Edward Purcell je u čuvenom predavanju o "životu pri niskom Reynoldsovom broju" pokazao da za bakteriju voda nije tekućina kroz koju se klizi, nego gusti sirup kroz koji se probija; zaustavi li se, staje istog trena, jer inercije praktično nema. Svijet malog nije naš svijet ali umanjen - to je drugi svijet, s drugim vladajućim silama. Upravo tu, na najsitnijoj skali, susreću se ovo

poglavlje i sam naslov knjige: da bismo razumjeli mrava, moramo razumjeti fiziku koja vlada blizu atoma.

14.6 Nebo, skok i džinovsko oko

Kad smo već kod letenja, i ono ima vlastiti porez na veličinu, koji je Haldane izveo iz aeronautike. Najmanja brzina potrebna da se tijelo zadanog oblika održi u zraku raste s korijenom njegove dužine, a snaga potrebna za tu brzinu raste brže od same težine. Uvećajte letjelicu tako da bude šezdeset četiri puta teža i trebat će joj sto dvadeset osam puta više snage da se dignu. Primijenimo li isti račun na ptice, granica se brzo dostiže: anđeo čiji bi mišići, kilogram za kilogram, bili jaki kao orlovi, morao bi imati grudnu kost isturenu više od metra da smjesti mišiće za mahanje, a noge svedene na štapiće da uštedi na težini. Zato veliki letači, orlovi i jastrebovi, uglavnom jedre na uzlaznim strujama umjesto da mašu; i zato orao ne može biti velik kao tigar. Nebo, kao i tlo, prima samo one koji su platili porez skale.

Skok je možda najstariji nesporazum o veličini. Već je Giovanni Borelli (1680) ismijao vjerovanje, koje i danas živi, da bi buha narasla do veličine čovjeka mogla skočiti stotine metara uvis. Istina je gotovo suprotna: visina na koju biće može skočiti skoro da ne zavisi od njegove veličine. Buha skoči nekih pola metra, čovjek oko metar i po - dakle u istom, uskom rasponu, uprkos hiljadama puta razlike u masi. Razlog je opet u skali: energija potrebna da se tijelo dignu na zadanu visinu srazmjerna je njegovoj težini, a ako mišići čine stalan udio tijela, onda svaki gram mišića daje jednako energije bez obzira na veličinu životinje. Zato divovska buha ne bi preskočila neboder; skočila bi otprilike koliko i obična, jer je maksimalna visina skoka svojstvo mišića, a ne razmjera.

Na kraju, i osjetila plaćaju danak skali, i to na najljepši mogući način. Mrežnica oka sastavljena je od sitnih ćelija, štapića i čunjića, čiji je prečnik tek nešto veći od talasne dužine svjetlosti. Ispod te

granice slika se ne može izoštriti, jer nijedan detalj manji od talasne dužine svjetlosti ne može se oblikovati. To znači da oko ne može biti proizvoljno umanjeno: mišje oko nije umanjeni model ljudskog, jer su mu štapići gotovo jednako veliki kao naši, samo ih je mnogo manje, pa miš ne bi razlikovao dva ljudska lica s razdaljine od nekoliko koraka. Da bi uopće nešto vidjele, sitne životinje moraju imati oči nesrazmjerno velike u odnosu na tijelo - otud golemo oko tarzijera ili sove. Slično vrijedi i za mozak: kada učetverostručimo tjelesnu masu srodnih životinja, masa mozga tek se udvostruči, pa veliki mogu "štedjeti" na mozgu i očima. Iza svih tih pojava krije se ista logika kao iza kosti i pluća: postoji fizička znatost svijeta (talasna dužina svjetlosti, veličina molekula) koja se ne umanjuje zajedno s tijelom, pa maleni moraju platiti da bi je nadmudrili.

14.7 Toplota, hrana i brzina života

Odnos površine i zapremine ne odlučuje samo o obliku, nego i o samom tempu života. Toplokrvne životinje gube toplotu kroz kožu (površina), a proizvode je cijelim tijelom (zapremina). Što je životinja manja, to relativno više površine ima, i to brže gubi toplotu - pa mora više jesti samo da bi ostala topla. Haldane to sažima nezaboravnom slikom: pet hiljada miševa teži koliko jedan čovjek, ali njihova ukupna površina, a time i potrošnja hrane i kisika, sedamnaest je puta veća od čovjekove. Miš pojede otprilike četvrtinu svoje težine u hrani svakog dana, najvećim dijelom da se ne smrzne. Zato u polarnim krajevima nema sitnih sisavaca; najmanji stanovnik dalekog sjevera je lisica, a sitne ptice zimi bježe na jug. Haldaneova tvrdnja je, doduše, pretjerana: leminzi, voluharice i rovčice žive i na dalekom sjeveru, ali zimu preživljavaju pod izolacionim pokrivačem snijega. Biti malen i toplokrvan u hladnoći znači izgubiti bitku s vlastitom površinom.

Kada su, mnogo kasnije, biolozi počeli precizno mjeriti koliko energije životinje troše, otkrili su nešto još dublje i ljepše od pukog

odnosa dva naprema tri. Metabolizam - brzina kojom tijelo troši energiju - ne raste srazmjerno masi. Kad bi rastao srazmjerno, dvostruko teža životinja trošila bi dvostruko više energije; u stvarnosti troši samo oko sedamdeset posto više. Preciznije, metabolizam raste otprilike sa stepenom tri četvrtine mase (masa podignuta na stepen 0,75): uvećate li masu šesnaest puta, potrošnja energije naraste samo osam puta, a ne šesnaest. Ta "ušteda na veličini" znači da svaka pojedinačna ćelija u krupnoj životinji radi sporije i troši manje od ćelije u sitnoj. Tu pravilnost, poznatu kao Kleiberov zakon, popularizovao je fizičar Geoffrey West u knjizi "Scale". Posljedica je zapanjujuća ekonomija veličine: slon je oko deset hiljada puta teži od pacova i ima otprilike deset hiljada puta više ćelija, ali troši samo oko hiljadu puta više energije. Drugim riječima, ćelija u slonu radi na otprilike desetini tempa ćelije u pacovu. Svako udvostručenje mase donosi uštedu od oko dvadeset pet posto na energiji - popust na veličinu koji priroda dosljedno naplaćuje.

Iz istog zakona slijedi i tempo srca i dužina života. Kako masa raste, broj otkucaja srca u minuti opada - po stepenu jedne četvrtine - pa mali sisavci žive brzo i kratko, a veliki sporo i dugo. Miš navrši nekoliko stotina otkucaja u minuti i živi godinu-dvije; slon kuca polako i doživi decenije; a broj otkucaja srca u jednom prosječnom sisarskom životu, zanimljivo, ispada slično velik bez obzira na veličinu.

West i njegovi saradnici tvrde da iza svih tih "četvrtinskih" zakona stoji ista dublja geometrija: mreže kojima tijelo raznosi krv, zrak i hranjive tvari - krvožilni sistem, dišni putevi, žile u biljci - granaju se poput fraktala, popunjavajući prostor i opskrbljujući svaku ćeliju uz najmanji mogući utrošak energije. Ista fraktalna geometrija koju smo sreli u obliku obale i krošnje ovdje kuca u ritmu srca. Skala i oblik, pokazuje se, dvije su strane iste medalje.

14.8 Zašto planine imaju plafon?

Napustimo sada živi svijet, jer isti zakon vlada i planinama. Zašto Zemlja nema planinu visoku sto kilometara? Fizičar Victor Weisskopf posvetio je dio svog opusa zanimljivoj ideji da se najkrupnije osobine svijeta - pa čak i visina planina - mogu procijeniti iz najsitnijih, osnovnih atomskih konstanti. Njegov kolega Edward Purcell zabilježio je tu Weisskopfov ambiciju kao program "objašnjavanja svega, uključujući visine planina, pomoću elementarnih konstanti". Ideja je da makroskopski svijet nije proizvoljan: veličine kontinenata, zvijezda i vrhova upisane su, preko dugog lanca fizike, u snagu veza među atomima.

Argument za planinu ide ovako. Planina pritišće vlastitu osnovu svojom težinom; pritisak na dnu srazmjeran je gustoći stijene, gravitaciji i visini. Ako taj pritisak pređe granicu čvrstoće stijene, stijena pri dnu popušta - teče, puca ili se topi - i planina se ne može više dizati. Stijena izdrži pritiske reda nekoliko stotina megapaskala; uvrstimo li tu čvrstoću, gustoću stijene i Zemljinu gravitaciju u jednostavnu procjenu, dobijemo najveću moguću visinu reda desetak kilometara. I zaista, Mount Everest, visok 8,8 kilometara, opasno je blizu tog krova: kopnena kamena planina na Zemlji teško da može biti bitno viša, jer bi se počela urušavati pod vlastitom težinom. Nije slučajno da najviši vrh planete stoji baš tu gdje stoji.

Moramo dodati i drugi dio priče, koju geofizika naziva izostazijom. Zemljina kora ne stoji na tlu kao zid na temelju; ona pliva na gušćem, tečnijem plaštu, poput drveta na vodi, po Arhimedovom zakonu. Zato planina nije samo ono što viri iznad tla - ispod svakog visokog lanca krije se duboki "korijen" lakše kore utonuo u plašt, poput podvodnog dijela sante leda. Kora debela tridesetak kilometara diže se, po tom računu, tek pet-šest kilometara iznad okolnog nivoa; ostalo je uronjeno. Planina, dakle, ne raste samo dok je čvrstoća stijene drži, ona i tone onoliko koliko je Arhimedov zakon tjera. Dva pravila, čvrstoća i plutanje, zajedno postavljaju krov.

Najljepšu potvrdu tog zaključka nalazimo tako što napustimo Zemlju. Na Marsu se diže Olympus Mons, ugašeni vulkan prečnika gotovo šesto kilometara i visine preko dvadeset šest kilometara - najviša planina u Sunčevom sistemu, gotovo tri puta viša od Everesta. Kako je to moguće, ako čvrstoća stijene svuda postavlja krov? Zato što krov ne postavlja samo stijena, nego stijena podijeljena gravitacijom. Marsova gravitacija iznosi tek nešto više od trećine Zemljine, pa ista stijena podnosi gotovo tri puta višu planinu prije nego popusti. Uz to, Mars je manji i hladniji, pa ima deblju i krući vanjsku ljusku koja bez pomjeranja može nositi golemi teret vulkana na jednom mjestu. Everest i Olympus Mons nisu dva hira geologije; oni su dvije tačke na istoj krivulji, na kojoj visinu planine određuje omjer čvrstoće materijala i gravitacije. Promijenite gravitaciju, i pomjerite planinski krov - baš kao što ste, mijenjajući atmosferu, pomjerali veličinu insekata.

14.9 Drveće do neba

Između mrava i planine stoji drvo, i ono ima svoj plafon - iz istog razloga iz kojeg ga imaju Galilejeve kosti. Visoko, vitko deblo koje nosi vlastitu težinu ne prijeti da se smrskaa (za to je predebelo), nego da se savije, da izgubi ravnotežu i preklopi se u stranu, kao što se predugačak štap izvija pod svojim vrhom. Taj problem izvijanja prvi je precizno riješio matematičar Alfred Greenhill davne 1881. godine. Pošao je od stvarnog jarbola u londonskom botaničkom vrtu u Kewu, visokog šezdeset sedam metara i debelog pri dnu pola metra, i zapitao se koliko bi visok mogao biti valjkasti jarbol tog istog prečnika prije nego se savije pod vlastitom težinom. Odgovor mu je bio oko devedeset metara.

Iz Greenhillovog računa slijedi pravilo koje je, u srži, isto ono Galilejevo: da bi ostalo stabilno, drvo mora rasti u debljinu brže nego u visinu. Preciznije, prečnik mora rasti otprilike s visinom dignutom na stepen $3/2$ - udvostručite li visinu drveta, morate mu prečnik

povećati skoro tri puta. Zato su najviša stabla svijeta, sekvoje, tako nevjerovatno zdepasta pri dnu; ona ne mogu biti i visoka i vitka, jednako kao što to ne može ni div. Kada su biolozi izmjerili stotine najvećih stabala Sjeverne Amerike i ucrtali njihovu visinu i debljinu, tačke su legle uredno duž Greenhillove linije izvijanja, ostavljajući sigurnosnu rezervu: prosječno stablo moralo bi narasti oko četiri puta više da se stvarno prevrne. Priroda, izgleda, gradi drveće s inženjerskim faktorom sigurnosti, baš kao konstruktor mostova.

Ima u toj priči i određene ljepote. Podaci o proporcijama stabala mjereni su, između ostalog, u šumi Instituta za napredne studije u Princetonu - istoj onoj kroz koju su decenijama šetali Albert Einstein i Robert Oppenheimer, raspravljajući o jedinstvenim teorijama i sudbini svijeta, a da, koliko znamo, nijednom nisu zastali pred alometrijom koja je rasla svuda oko njih. Zakon razmjera je takav: očigledan je tek kad ga počnete tražiti, a onda ga vidite u svakom deblu, svakoj kosti i svakom vrhu planine.

14.10 Inženjerski most

Sve što smo dosad vidjeli u prirodi ima svog blizanca u inženjerstvu, i tu priča o razmjerima prelazi iz radoznalosti u alat. Inženjer koji gradi model mosta ili aviona u razmjeri jedan naprema sto zna da ne smije naivno "pomnožiti" rezultate. Mali model je, baš kao i mali stvor, srazmjerno jači, lakši i drugačije se ponaša u zraku i vodi nego njegov veliki original. Otpor zraka, protok tekućine, prijenos toplote, savijanje greda - svaka od tih pojava skalira se po vlastitom stepenu, i ako se ti stepeni ne usklade, model nije adekvatan.

Nauka koja to proučava zove se teorija sličnosti ili dimenziona analiza. Njena je srž zapanjujuće jednostavna: svaka smisljena fizikalna jednačina mora biti dimenziono usklađena, pa se veličine mogu grupisati u bezdimenzionalne omjere koji ostaju isti bez obzira na skalu. Poznati Reynoldsov broj, koji odlučuje hoće li strujanje biti mirno ili vrtložno, upravo je takav omjer; zato aerotunel s

umanjenim modelom daje upotrebljive rezultate samo ako se taj broj održi jednakim. Ista logika govori inženjeru da veća mašina, izrađena od istog materijala i u istim proporcijama, nije srazmjerno jača - što je, slično kao i Galilejev zaključak iz 1638., preveden u moderni jezik.

Zbog toga inženjer, kao i priroda, gradi s rezervom i s promjenom oblika. Veliki nosač nije uvećani mali nosač; on je deblji, ojačan, drugačije oblikovan, jer zna da ga vlastita težina napada srazmjerno jače. Faktor sigurnosti koji ugrađujemo u mostove i zgrade daleki je rođak one četverostruke rezerve koju smo vidjeli kod stabala. U tom smislu, priroda je bila prvi inženjer sličnosti - milijardama godina prije nego što je iko napisao prvu jednačinu, ona je gazeli skraćivala noge, drvetu debljala stablo, a insektu postavljala strop veličine, poštujući zakone koje ćemo mi tek mnogo kasnije zapisati.

14.11 More koje ukida težinu

Ostaje jedno prividno protivrjeđe koje je uočio već Galileo, i koje čitavu priču zaokružuje. Ako veličina zaista tako nemilosrdno kažnjava divove, kako to da najveće životinje koje su ikada postojale nisu izumrle bajke, nego su još uvijek s nama - u moru? Plavi kit dostiže dužinu od oko trideset metara i masu veću od sto pedeset tona; nijedan dinosaurus, nijedan mamut, nijedan kopneni div nikada mu se nije približio. Kako to da more dopušta ono što kopno zabranjuje?

Odgovor je Galileo naslutio prije četiri stoljeća, kada mu je sagovornik prigovorio primjerom kita. Tajna je u uzgonu. Voda gotovo posve poništava težinu tijela uronjenog u nju: kit ne mora nositi vlastitu masu, jer ga more održava. Oslobođen tereta koji kopnene divove lomi, kit može biti golem, a da mu kosti ne moraju biti nesrazmjerno debele; kostur kita je, u odnosu na njegovu masu, gotovo lagan. Voda je, ukratko, ukinula upravo onu silu koja postavlja gornju granicu na kopnu. Zato su najveći stvorovi svih

vremena morali živjeti tamo gdje ih težina ne pritišće. Div je moguć, ali samo ako mu neko drži leđa.

14.12 Prava veličina

Vratimo se pitanju s početka. Zašto nema divova? Zato što oblik nije slobodan. Kada biće ili planinu ili drvo pokušate uvećati zadržavajući proporcije, jedan te isti geometrijski nesklad - površina raste s kvadratom, zapremina s kubom - neumitno pretegne, i nešto popusti. Da bi ostalo funkcionalno, veliko mora promijeniti oblik: zadebljati kosti, izmisliti pluća, sagraditi razgranate mreže, utopiti korijen u plašt ili se preseliti u vodu. Sitno, oslobođeno te tiranije težine, dobija na dar moći koje krupnom nisu dostupne. Za svaku veličinu postoji, kako je rekao Haldane, prava veličina, a promijeniti je znači promijeniti i sam oblik.

Ono što tu priču čini posebno lijepom jeste njena univerzalnost. Isto pravilo koje slonu vezuje noge određuje koliko brzo kuca srce miša, koliko dugo živi kit, dokle raste sekvoja, koliko visok može biti Everest i zašto Olympus Mons smije biti tri puta viši. Od bakterije koja se probija kroz sirup viskoznosti do vulkana koji tone u plašt, jedan jedini odnos - kvadrat naprema kubu - piše granice mogućeg. Nauka o razmjerima je, u tom smislu, jedan od najčišćih primjera onoga o čemu je cijela ova knjiga: da su najsitnije i najkrupnije stvari u svemiru vezane istim, iznenađujuće jednostavnim zakonima. Atom i planina, buha i kit, kost i jarbol - svi oni plešu po istoj geometriji.

Možda je, na kraju, najveća pouka ova: priroda ne voli divove ne zato što joj nedostaje mašte, nego zato što suviše dobro poznaje matematiku. A mi, koji smo slučajno završili baš u onoj uskoj traci veličine u kojoj su moguća i čvrsta kost i složen mozak i dovoljno dug život da se sve to shvati, mogli bismo u tome prepoznati i tračak sreće. Da smo bili mnogo veći, slomili bismo se; da smo bili mnogo manji, ne bismo imali mjesta za misao koja upravo prati ovu rečenicu. Ispali smo, čini se, taman prave veličine.

Literatura

- [1] Galilei, G. (1914). *Dialogues Concerning Two New Sciences* (prev. H. Crew i A. de Salvio). New York: Macmillan. (Izvornik 1638.)
- [2] Haldane, J. B. S. (1926). On Being the Right Size. *Harper's Magazine*, 152, 424-427. (Pretiskano u: *On Being the Right Size and Other Essays*. Oxford: Oxford University Press, 1985.)
- [3] Thompson, D. W. (1942). *On Growth and Form* (2. izd.). Cambridge: Cambridge University Press. (Prvo izdanje 1917.)
- [4] Schmidt-Nielsen, K. (1984). *Scaling: Why Is Animal Size So Important?* Cambridge: Cambridge University Press.
- [5] McMahon, T. A., & Bonner, J. T. (1983). *On Size and Life*. New York: Scientific American Library.
- [6] Bonner, J. T. (2006). *Why Size Matters: From Bacteria to Blue Whales*. Princeton: Princeton University Press.
- [7] West, G. B. (2017). *Scale: The Universal Laws of Life and Death in Organisms, Cities and Companies*. London: Weidenfeld & Nicolson.
- [8] Greenhill, A. G. (1881). Determination of the greatest height consistent with stability that a vertical pole or mast can be made. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 4, 65-73.
- [9] Weisskopf, V. F. (1975). Of Atoms, Mountains, and Stars: A Study in Qualitative Physics. *Science*, 187(4177), 605-612.
- [10] Weisskopf, V. F. (1972). *Physics in the Twentieth Century: Selected Essays*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [11] Purcell, E. M. (1977). Life at Low Reynolds Number. *American Journal of Physics*, 45(1), 3-11.
- [12] Turcotte, D. L., & Schubert, G. (2014). *Geodynamics* (3. izd.). Cambridge: Cambridge University Press.
- [13] Vogel, S. (1998). *Cats' Paws and Catapults: Mechanical Worlds of Nature and People*. New York: W. W. Norton.

15

Zašto ne propadamo kroz pod?

"Ako se naslonim na ovaj sto, neću propasti kroz njega; ili, da budem sasvim precizan, vjerovatnoća da moj lakat propadne toliko je mala da je u životu možemo zanemariti." (Arthur Eddington, 1928)



Sjedite na stolici. Ona vas drži, pod vas ne pušta, čaša mirno stoji na stolu. Ništa neobično. A ipak, iza te svakodnevne čvrstoće krije se jedno od najdubljih pitanja cijele fizike, pitanje na koje je konačan, strog odgovor stigao tek 1967. godine. Jer materija je, kako ćemo vidjeti, gotovo savršeno prazna. Zašto onda ne propadnemo jedni kroz druge, kroz stolicu, kroz pod? Naivni odgovori - "materija je puna" ili "elektroni se odbijaju" - ili su pogrešni ili su tek pola priče. Pravi razlog je kvantni, i sastoji se od dva pravila bez kojih ne bi bilo ni atoma, ni hemije, ni tla pod nogama: Heisenbergovog načela neodređenosti, koje atomu daje veličinu, i Paulijevog principa

isključenja, koji materiji daje zapreminu. Ovo poglavlje prati kako se ta dva mikroskopska pravila uzdižu do makroskopske tvrdoće poda - i, na kraju, do zvijezda.

15.1 Prazan atom

Godine 1909. Hans Geiger i Ernest Marsden, saradnici Ernesta Rutherforda, bombardovali su tanki listić zlata teškim, brzim alfa-česticama i očekivali da će one gotovo bez skretanja proći kroz njega. Većina i jeste prošla. Ali pokoja čestica odbila se pod velikim uglom, poneka i pravo nazad. Rutherford je taj rezultat kasnije opisao kao najnevjerovatniji događaj svog života - kao da ste, kaže, ispalili tešku granatu na komad papira, a ona se odbila i vratila da vas pogodi. Zaključak je bio neizbježan: gotovo sva masa atoma i sav njegov pozitivni naboj sabijeni su u sićušno jezgro u središtu, dok elektroni zauzimaju golem prostor oko njega. Atom se pokazao praznijim nego što je iko slutio.

Brojke to čine opipljivim. Prečnik atoma iznosi otprilike stotinu pikometara, dakle oko jedne desetmilijardinke metra; prečnik jezgra je oko sto hiljada puta manji, reda veličine jednog femtometra. Kako je to slikovito opisao Richard Feynman, kad bismo atom uvećali dotle da bude velik kao velika soba, jezgro bi bilo tek mrvica koju biste jedva razaznali okom - a u toj mrvici sabijena je gotovo sva težina atoma. Ako vam je draža druga slika: kad bi jezgro bilo veliko kao zrno graška na sredini nogometnog stadiona, prvi elektroni kružili bi negdje na tribinama, a sve između bila bi praznina.

Budući da zapremina raste s kubom dimenzija, odnos prečnika sto hiljada naprema jedan znači odnos zapremina od otprilike jedan naprema bilijardu (jedan naprema 10^{15}). Drugim riječima, čvrsta materija je prazna do na jedan dio u bilijardi. Kad bismo iz svih atoma jednog čovjeka istisnuli sav prazan prostor i ostavili samo zbijena jezgra, ono što bi preostalo stalo bi u zrno prašine - a težilo bi gotovo koliko i čitav čovjek. Upravo tu prazninu je engleski

astrofizičar Arthur Eddington pretočio u čuvenu sliku "dva stola": onog svakodnevnog, čvrstog i smeđeg, i onog naučnog, koji je, kako kaže, uglavnom praznina u kojoj su rijetko razbacani električni naboji što jure velikom brzinom. Njihov ukupni obujam manji je od milijarditog dijela obujma samog stola. Pa ipak, dodaje Eddington, taj naučni sto uredno drži njegov papir, i naslonivši se na njega on neće propasti.

Ako je atom gotovo posve prazan, zašto se dva komada materije jednostavno ne proture jedan kroz drugi, kao dva rijetka oblaka dima? Zašto praznina odbija prazninu? Zašto, kad pritisnem dlan o sto, osjetim otpor, a ne pad? Odgovor ima dva dijela. Prvi objašnjava zašto atom uopće ima svoju veličinu, zašto elektroni ne padnu u jezgro i ne poravnaju tu praznu strukturu. Drugi objašnjava zašto se te prazne strukture, kad ih spojimo, odbijaju umjesto da se stope. Prvi dio je objasnio Heisenberg, a drugi Pauli. Proučimo ih redom.

15.2 Zašto elektron ne padne u jezgro?

Prije kvantne mehanike, atom je bio nemoguć. Po klasičnoj fizici, negativni elektron koji kruži oko pozitivnog jezgra je ubrzana čestica, a ubrzani naboj mora zračiti energiju u obliku elektromagnetnih talasa. Gubeći tako energiju, elektron bi se morao spiralno survati u jezgro - i to, po računu, za svega desetak pikosekundi (oko 10^{-11} sekundi). Klasični atom urušio bi se u trenu, materija bi se sažela u gustu kašu jezgara, i ničega od svijeta kakav poznajemo ne bi bilo. Sama činjenica da atomi postoje i mirno traju bila je, dakle, dokaz da klasična fizika tu ne vrijedi.

Prvi pokušaj spasa dao je 1913. Niels Bohr. On je jednostavno rekao da se elektron smije kretati samo po određenim, izdvojenim orbitama i da na njima, protivno klasičnoj fizici, ne zrači. To je čudesno tačno opisalo spektar vodika, ali je bilo više recept nego objašnjenje: Bohr je zabranio pad elektrona, a nije rekao zašto ga priroda zabranjuje. Pravi razlog stigao je tek s punom kvantnom mehanikom

Heisenberga i Schrödingera, sredinom dvadesetih godina, i sakriven je u jednom dubokom načelu.

Rješenje je donijelo Heisenbergovo načelo neodređenosti. Ono kaže da se položaj i količina kretanja čestice ne mogu istovremeno tačno odrediti: što tačnije znamo gdje je čestica, to je neizvjesnija njena brzina, i obratno. Kako to sprečava pad elektrona? Feynman je taj argument izložio nezaboravno jasno. Kad bi elektron pao u jezgro, njegov položaj bio bi određen vrlo precizno, jer je jezgro sićušno. Ali tada bi, po načelu neodređenosti, njegova količina kretanja morala biti golema i neizvjesna - dakle imao bi ogromnu kinetičku energiju, koja bi ga smjestila izbacila napolje. Elektron zato pravi nagodbu: ostaje na izvjesnoj udaljenosti od jezgra, dovoljno maloj da ga privlačenje drži vezanim, a dovoljno velikoj da mu to nesmirivo kvantno gibanje ne košta previše energije.

Tu nagodbu možemo i izračunati. Kako se elektron primiče jezgru i sabija u sve manji prostor, njegova kinetička energija raste otprilike s kvadratom skupljanja, dok privlačna potencijalna energija pada tek s prvom potencijom udaljenosti. Zbir to dvoje ima najnižu vrijednost na jednoj određenoj, konačnoj udaljenosti - a ne u nuli. Ta udaljenost je poznati Bohrov radijus, oko pola desetmilijardinke metra, i ona određuje veličinu atoma vodika; pripadna energija vezivanja iznosi oko 13,6 elektronvolti. Upravo zato materija ima veličinu kakvu ima: veličina atoma nije proizvoljna, nego je upisana u masu elektrona, njegov naboj i Planckovu konstantu.

Isti razlog objašnjava naizgled bizarnu činjenicu: da atomi "podrhtavaju" čak i kad ih ohladimo do apsolutne nule. Potpuno mirovanje značilo bi savršeno poznat položaj i savršeno poznatu, nultu brzinu istovremeno, što načelo neodređenosti zabranjuje. To nesmirivo treperenje zovemo energijom nulte tačke, i ono nije puka teorijska dosjetka. Tečni helij, na primjer, zbog velike energije nulte tačke svojih lakih atoma ostaje tečan i na apsolutnoj nuli; da biste ga uopće natjerali da se ukruti, morate ga stisnuti na oko dvadeset pet

atmosfera. Helijski se, drugim riječima, opire smrzavanju istom onom kvantnom nemirnošću koja atomu ne da da se uruši.

Fizičari to svojstvo - da energija atoma nije beskonačno negativna, da atom ne može kolabirati u tačku - nazivaju stabilnošću prve vrste. Kako lijepo primjećuju Elliott Lieb i Robert Seiringer, Schrödingerova jednačina iz 1926. objasnila je upravo tu novu, nekласičnu činjenicu: da kinetička energija elektrona nužno raste kako se on primiče jezgri, tako da najmanja ukupna energija pada na neko pozitivno rastojanje, a ne na nulu. Od Rutherfordovog otkrića jezgre 1911. do tog objašnjenja prošlo je petnaest godina. Ali to je bila tek polovina priče o tome zašto ne propadamo kroz pod. Druga polovina čekala je još četrdeset i jednu godinu.

15.3 Isto se odbija

Kad zagonetku postavite fizičaru na ulici, najčešći odgovor glasi: materija odbija materiju jer se istoimeni naboji odbijaju - elektronski oblaci dvaju atoma naprosto se guraju. U tome ima istine, ali kao potpun odgovor to ne prolazi, i vrijedi razumjeti zašto. Prvo, obični atomi su električki neutralni: svako jezgro nosi tačno onoliko pozitivnog naboja koliko njegovi elektroni nose negativnog. Na većim udaljenostima atomi se stoga jedva osjećaju, a kad se sasvim primaknu, privlačenje elektrona jednog atoma prema jezgri drugog može čak nadjačati odbijanje. Upravo iz te nježne ravnoteže privlačenja i odbijanja rađaju se hemijske veze - da elektrostatika samo odbija, ne bi bilo ni molekula, ni hemije, ni nas.

Drugi, i dublji odgovor glasi: sama elektrostatika ne objašnjava zašto se materija opire sabijanju tako nepopustljivo, niti zašto zauzima stalnu, određenu zapreminu. Kad biste imali samo Coulombove sile i kvantnu kinetičku energiju, ali biste ukinuli jedno dodatno pravilo o kojem tek treba da govorimo, materija se ne bi pristojno odbijala - urušila bi se sama u sebe. Zato je odbijanje elektronskih oblaka stvarno i elektromagnetne je prirode, ali ono nije glavni junak priče o

čvrstoći. Glavni junak je pravilo koje elektronima zabranjuje da se svi stisnu u isto stanje - Paulijev princip isključenja.

15.4 Paulijeva zabrana

Godine 1925. mladi Wolfgang Pauli je, pokušavajući objasniti zašto se elektroni u atomu raspoređuju baš onako kako periodni sistem nalaže, postavio naizgled tehničko pravilo, a zapravo temeljno: bilo koja dva elektrona u istom sistemu ne mogu se nalaziti u potpuno istom kvantnom stanju. Ubrzo se pokazalo da svakom elektronu treba pridružiti i unutrašnji "okretaj", spin, koji može imati samo dvije vrijednosti. Tako u svaku orbitalu mogu stati najviše dva elektrona, i to suprotnih spinova - i odatle, prečka po prečku, izrasta cijela građevina periodnog sistema. Da nema te zabrane, svi elektroni svakog atoma sručili bi se u najnižu orbitu, svi elementi bili bi gotovo jednaki i tromi, i ne bi bilo ni raznolikosti materije ni hemije. Struktura ljsaka, a s njom i cio svijet materijala, izravna je posljedica Paulijevog pravila.

Do tog pravila Pauli je došao gotovo prisilno, tjeran zagonetkama spektra. Već je eksperiment Sterna i Gerlacha iz 1922. pokazao da atomski snop, propušten kroz nehomogeno magnetno polje, ne pravi mrlju nego se cijepa na dva odvojena traga - kao da elektron nosi neku unutrašnju, dvovrijednu osobinu. "Dvovrijedna osobina" znači svojstvo koje može poprimiti samo dvije moguće vrijednosti - ovdje spin elektrona, koji je ili "gore" ili "dole", i ništa između. Tu osobinu su 1925. Goudsmit i Uhlenbeck prepoznali kao spin. Iste godine Pauli je izrekao svoju zabranu, a već 1926. Enrico Fermi i Paul Dirac izveli su statistiku koja opisuje mnoštvo takvih čestica - po njima danas fermione i zovemo fermionima. Za to naizgled skromno pravilo, koje drži na okupu cijelu građu materije, Pauli je 1945. dobio Nobelovu nagradu.

Iza tog pravila krije se jedna od najdubljih činjenica prirode. Čestice se dijele na dvije velike porodice: fermione, čestice polucijelog spina

(poput elektrona, protona i neutrona), i bozone, čestice cijelog spina (poput fotona). Zajednička talasna funkcija dva istovjetna fermiona ima izuzetno svojstvo: mijenja znak kad zamijenimo mjesta tim česticama. Iz te antisimetrije matematički slijedi da dva fermiona ne mogu dijeliti isto stanje - jer bi talasna funkcija tada morala biti jednaka svom negativu, a to je moguće samo ako je nula. Bozoni se, naprotiv, rado gomilaju u istom stanju. Vezu između spina i tog ponašanja - takozvani teorem spina i statistike, koji je Pauli dokazao 1940. - Roger Penrose ubraja među najdublje i najsuptilnije rezultate cijele fizike. Za nas je važna jedna njegova posljedica: elektroni su, srećom po nas, fermioni.

15.5 Zabrana koja zauzima prostor

Paulijev princip čini nešto još opipljivije od uređivanja hemije: on materiji daje zapreminu. Zamislite da pokušavate sabiti mnoštvo elektrona u sve manji prostor. Budući da se svako kvantno stanje može popuniti samo jednom, sabijeni elektroni prisiljeni su zauzimati sve viša energetska stanja, sa sve većim količinama kretanja. To opiranje rađa pritisak - ne toplotni, jer postoji i na apsolutnoj nuli, i ne od elektrostatičkog odbijanja, nego čisto kvantni pritisak koji potiče od same zabrane. Fizičari ga zovu degeneracijskim, ili, kako predlaže David Griffiths, "isključnim" pritiskom.

Griffiths kaže: razlog zašto se hladno čvrsto tijelo naprosto ne uruši je stabilizirajući unutrašnji pritisak koji nema veze ni s odbijanjem među elektronima ni s toplotnim kretanjem, nego je strogo kvantne prirode i potiče u konačnici iz zahtjeva antisimetrije za talasne funkcije istovjetnih fermiona. Upravo taj pritisak objašnjava zašto je čvrsto tijelo tako teško stisnuti: da biste zapreminu komada čelika osjetno smanjili, morate savladati degeneracijski pritisak elektrona, a on je golem. Nestišljivost vode, krutost kamena, tvrdoća metala - sve su to, na najdubljem nivou, mjere koliko se elektroni opiru tome da

budu natjerani u ista stanja. Kad se, dakle, naslonite na sto, ono što vas doslovno drži jeste Paulijeva zabrana pretočena u silu.

Taj pritisak nije neka egzotična pojava rezervisana za laboratorij; on nosi svaki komad metala oko vas. U metalu se najudaljeniji elektroni odvajaju od svojih atoma i slobodno lutaju kroz kristal, tvoreći takozvano Fermijevo more - gust roj elektrona koji, pokoran Paulijevoj zabrani, popunjava stanja sve do visokih energija čak i kad je metal leden. Upravo taj degenerisani elektronski roj daje metalu dobar dio njegove krutosti i drži atome na stalnom razmaku. Kad savijate kašiku ili kucate po stolu, opirete se, u konačnici, Fermijevom moru koje ne da svojim elektronima da se stisnu.

15.6 Teorema koja je čekala 41 godinu

Sad možemo postaviti pitanje u njegovom najstrožem obliku. Uzmimo običnu materiju - mnoštvo jezgara i elektrona koji se privlače i odbijaju Coulombovim silama, pokorni zakonima kvantne mehanike. Da li je matematički zajamčeno da takav sistem neće imati beskonačno negativnu energiju, da se neće urušiti? I, još važnije za svakodnevni svijet: da li je zajamčeno da će dvostruko više materije imati otprilike dvostruko veću energiju i dvostruko veću zapreminu, a ne, recimo, četverostruko? To svojstvo srazmjernosti s brojem čestica - fizičari ga zovu stabilnošću druge vrste, ili ekstenzivnošću - toliko je samorazumljivo iz iskustva da ga gotovo nikad ne dovodimo u pitanje. A ipak, da ono ne vrijedi, svijet obične materije kakav poznajemo ne bi mogao postojati.

Dokazati da to svojstvo slijedi iz kvantne mehanike pokazalo se iznenađujuće teškim. Uspjeli su tek Freeman Dyson i Andrew Lenard, u dva rada objavljena 1967. i 1968. godine, gotovo pola vijeka nakon rođenja kvantne teorije. Njihov rezultat glasi: energija sistema od N čestica ima donju granicu srazmjernu s N - dakle materija je stabilna, ali, presudno, samo ako su elektroni fermioni. Paulijev princip nije ukras nego uvjet postojanja stabilne materije.

Sam dokaz bio je toliko složen i naporan u nizanju nejednakosti da je konstanta koju su dobili ispala apsurdno velika, reda deset na četrnaestu, iako je, kako su i sami priznali, prava vrijednost morala biti reda jedinice. Elegantnije i s razumnom konstantom problem su 1975. riješili Elliott Lieb i Walter Thirring, uvodeći nejednakosti koje i danas nose njihova imena.

Zašto je taj dokaz uopće bio tako težak? Zato što je materija splet mnoštva čestica koje se istovremeno privlače i odbijaju, pa energija lako može krenuti da raste brže od broja čestica. Ono što treba dokazati je da priroda posjeduje svojstvo zasićenja: da energija vezivanja po čestici ostaje ograničena koliko god sistem bio velik. Baš to su Dyson i Lenard nazvali suštinom problema. Bez tog zasićenja ne bi bilo smisljeno govoriti o energiji po jedinici mase, o gustoći, o bilo kojoj postojanoj osobini materije jer bi se sve mijenjalo čim bismo uzeli veći komad.

Najdramatičniji dio te priče otkrivamo kad upitamo: šta bi bilo da elektroni nisu fermioni? Dyson je pokazao da bi za materiju sačinjenu od bozona - čestica koje ne poštuju Paulijevu zabranu - energija ne bi padala ne srazmjerno s N , nego otprilike kao N na stepen $7/5$. To znači da bi energija po čestici rasla što je materije više, pa bi velike količine takve materije bile sve nestabilnije. Kako sažimaju Lieb i Seiringer, svijet sačinjen od bozona urušio bi se u sićušnu grudu bezoblične materije hiljadama puta gušće od one koju poznajemo. Materija ne bi zbrajala, nego bi eksplozivno pretjerivala; spajanje dva komada ne bi davalo dvostruko, nego neuporedivo više. To da naša materija naprosto "sabira" - da dvije cigle teže i zauzimaju dvostruko koliko jedna - nije trivijalnost, nego tiha, svakodnevna posljedica činjenice da je elektron fermion.

Ta stabilnost ima i posljedicu koja seže do samih temelja nauke o toploti. Da bi termodinamika uopće imala smisla, energija i slobodna energija velikog sistema moraju biti srazmjerne njegovoj veličini - inače pojmovi poput energije po jedinici zapremine ne bi imali

stabilnu vrijednost. Kako su pokazali Lebowitz i Lieb, upravo stabilnost materije jamči da takva granična vrijednost postoji. Drugim riječima, Paulijeva zabrana ne drži samo pod nogama, nego i samu mogućnost da o materiji govorimo zakonima termodinamike.

15.7 Ista zabrana drži zvijezde

Ako Paulijev princip drži pod vašim nogama, on drži i mrtve zvijezde iznad ponora vlastite gravitacije - i to je jedan od najljepših mostova između najmanjeg i najvećeg u prirodi, kao veza koja se provlači kroz cijelu ovu knjigu. Kad zvijezda poput Sunca potroši gorivo, više je ništa ne zagrijava da se odupre gravitaciji, pa se sažima dok je ne zaustavi upravo degeneracijski pritisak njenih elektrona - isti onaj kvantni pritisak koji čvrstom tijelu daje zapreminu. Tako nastaje bijeli patuljak: zvijezda mase poput Sunčeve sabijena do veličine Zemlje, tolike gustoće da bi joj jedan kubni centimetar težio oko tone. U njemu Paulijeva zabrana nosi teret čitave zvijezde.

Ali ta zabrana ima granicu. Subrahmanyam Chandrasekhar je početkom tridesetih godina, kao vrlo mlad čovjek, pokazao da elektronski degeneracijski pritisak može nositi zvijezdu samo do određene mase - danas je znamo kao Chandrasekharovu granicu, oko 1,4 mase Sunca. Iznad nje elektroni bi morali juriti gotovo brzinom svjetlosti, pritisak popušta na presudan način, i bijeli patuljak se više ne može održati. Zamisao da zvijezda može nadmašiti tu granicu i nastaviti se urušavati isprva je naišla na oštar otpor - najglasniji protivnik bio je niko drugi do Arthur Eddington, ali se Chandrasekharov račun pokazao tačnim i danas je temelj astrofizike zvijezda.

Šta biva sa zvijezdom težom od te granice? Ona se urušava dalje: elektroni i protoni stapaju se u neutrone, i sažimanje na kraju zaustavlja novi bedem - degeneracijski pritisak neutrona, koji su

također fermioni. Nastaje neutronska zvijezda, masa poput Sunčeve stisnuta u kuglu prečnika svega dvadesetak kilometara, gusta gotovo kao atomsko jezgro; njen bi naprstak težio stotine miliona tona. Takve zvijezde nisu puka teorija: 1967. godine, iste one godine kad su Dyson i Lenard dokazivali stabilnost materije, otkrivene su i prve neutronske zvijezde, kao pravilni radio-otkucaji koje danas zovemo pulsarima. A kad i taj, posljednji Paulijev bedem popusti, pod još većom masom, više ništa poznato ne može zaustaviti urušavanje i rađa se crna rupa. Od poda u vašoj sobi do horizonta događaja proteže se, dakle, jedna te ista ljestvica otpora, a njene prve tri prečke drži ista kvantna zabrana.

Da se dočara kako je nevjerovatno prazna obična materija, a kako gusta ona zbijena, često se navodi jedan račun: kad bi se iz svih ljudi na Zemlji istisnuo prazan prostor i njihova jezgra zbila do gustoće neutronske zvijezde, čitavo čovječanstvo stalo bi u kocku šećera. Sve što nas čini glomaznima i opipljivima jeste, dakle, prostrana praznina koju Paulijeva zabrana drži razapetom. U neutronske zvijezde te praznine više nema i zato je naprstak njene tvari težak kao planina.

15.8 Nikad se zaista ne dodirujemo

Iz svega ovoga slijedi zaključak koji zvuči kao paradoks, a tačan je: vi nikada niste dotakli stolicu na kojoj sjedite, niti je ijedan predmet ikada fizički dodirnuo drugi. Ono što zovemo dodirom jeste susret elektronskih oblaka - njihovo elektromagnetno odbijanje pojačano Paulijevom zabranom, koja elektronima jednog tijela ne da da uđu u već zauzeta stanja elektrona drugog. Kad dlanom pritisnete sto, vaši i njegovi elektroni brane se objema tim silama i zaustavljaju vaš dlan na sićušnoj udaljenosti, mnogo manjoj od talasne dužine vidljive svjetlosti, pa je oku nevidljiva.

Osjećaj tvrdoće koji pri tom imate nije, dakle, dodir materije s materijom, nego napetost polja i kvantne zabrane. Ista ta priča stoji iza svakog koraka, svakog stiska ruke, svakog otkucaja tastature:

trenje, oslonac, hvat - sve su to elektromagnetne sile i Paulijevo isključenje na djelu. "Normalna sila" iz udžbenika mehanike, ona okomita sila kojom nas pod gura naviše dok mirno stojimo, na najdubljem nivou nije ništa drugo do makroskopski izraz mikroskopskog pravila da dva fermiona ne smiju u isto stanje. Čvrstoća svijeta je, u tom smislu, uljudnost koju elektroni pokazuju jedni prema drugima.

15.9 Prava tvrdoća

Vratimo se, na kraju, stolici s početka. Zašto ne propadamo kroz pod? Zato što se u svakom atomu odvija ista dvostruka drama. Heisenbergovo načelo neodređenosti brani elektronu da padne u jezgro i tako svakom atomu daje konačnu veličinu; Paulijev princip isključenja brani elektronima da se svi zguraju u ista stanja i tako materiji daje zapreminu, nestišljivost i stabilnost. Tvrdoća dijamanta, otpor čelika, pouzdanost poda - sve su to makroskopske sjenke ta dva mikroskopska pravila. Čvrstoća nije "punoća" materije, jer materije gotovo i nema; ona je krutost zakona koji vladaju u praznini.

U tome ima nečeg dostojnog naslova ove knjige. Victor Weisskopf je volio pokazivati kako se najkrupnije osobine svijeta mogu izvesti iz najsitnijih, iz osnovnih atomskih konstanti: veličina atoma, a s njom i gustoća obične materije, pa i najveća moguća visina planine, upisane su u masu elektrona, njegov naboj i Planckovu konstantu. Gustoća stolice, kamena i planete potiče, u konačnici, iz Bohrovog radijusa - iz onog kompromisa koji elektron sklapa s načelom neodređenosti.

Da bismo razumjeli zašto nas pod drži, morali smo sići do zabrane koja vlada među elektronima, a ta ista zabrana, uzdignuta na kosmičku skalu, drži bijele patuljke i neutronske zvijezde.

Možda je najljepša pouka ova: svijet je čvrst ne zato što je pun, nego zato što je pokoran pravilima. Praznina u nama sabijena je zakonima koji joj ne daju ni da se uruši, ni da se stopi sa susjednom prazninom.

Sljedeći put kad se naslonite na sto možete se sjetiti da vas u tom trenu drži jedan od najdubljih rezultata cijele fizike, i da elektron slučajno nije fermion, taj mirni sto bio bi nemoguć jednako kao i vi koji se na njega naslanjate.

Literatura

- [1] Eddington, A. S. (1928). *The Nature of the Physical World*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [2] Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1963). *The Feynman Lectures on Physics*, sv. I. Reading, MA: Addison-Wesley.
- [3] Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1965). *The Feynman Lectures on Physics*, sv. III: Quantum Mechanics. Reading, MA: Addison-Wesley.
- [4] Griffiths, D. J. (2005). *Introduction to Quantum Mechanics* (2. izd.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- [5] Dyson, F. J., & Lenard, A. (1967). Stability of Matter. I. *Journal of Mathematical Physics*, 8(3), 423-434.
- [6] Lenard, A., & Dyson, F. J. (1968). Stability of Matter. II. *Journal of Mathematical Physics*, 9(5), 698-711.
- [7] Lieb, E. H., & Thirring, W. E. (1975). Bound for the Kinetic Energy of Fermions Which Proves the Stability of Matter. *Physical Review Letters*, 35(11), 687-689.
- [8] Lieb, E. H., & Seiringer, R. (2010). *The Stability of Matter in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [9] Dyson, F. J. (1967). Ground-State Energy of a Finite System of Charged Particles. *Journal of Mathematical Physics*, 8(8), 1538-1545.
- [10] Chandrasekhar, S. (1931). The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 74, 81-82.
- [11] Shapiro, S. L., & Teukolsky, S. A. (1983). *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects*. New York: Wiley.
- [12] Thorne, K. S. (1994). *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. New York: W. W. Norton.
- [13] Penrose, R. (2004). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. London: Jonathan Cape.

- [14] Pais, A. (1986). *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford: Oxford University Press.
- [15] Weisskopf, V. F. (1975). Of Atoms, Mountains, and Stars: A Study in Qualitative Physics. *Science*, 187(4177), 605-612.

16

Nerazumna djelotvornost matematike

"Najneshvatljivije u svemiru je to što je uopće shvatljiv." (Albert Einstein)



Postoji vic koji je fizičar Eugene Wigner ispričao na početku svog čuvenog esaja o efikasnosti matematike. Dvojica školskih drugova sretnu se nakon mnogo godina; jedan je postao statističar i pokazuje drugom rad o kretanju stanovništva. Objasnjava simbole, i dođe do slova π . "A šta je to?" pita drug. "Odnos obima kruga i njegovog prečnika." "Sad stvarno tjeraš šalu predaleko", kaže drug, "kakve veze ima broj stanovnika s obimom kruga?" Možemo se smijati prostodušnosti tog pitanja, ali ono je posve razumno. Zašto se broj koji dolazi iz geometrije kruga pojavljuje u statistici ljudi? Zašto apstraktni pojmovi, često smišljeni iz čiste igre uma i bez ikakve namjere da opisuju svijet, kasnije s nevjerovatnom preciznošću

pogađaju fiziku? Ovo poglavlje je o toj zagonetki, o tome što je Wigner nazvao "nerazumno djelotvornošću matematike", daru, kako je rekao, koji ne razumijemo i koji ne zaslužujemo.

Zagonetka je stara koliko i nauka. Galileo Galilei je u sedamnaestom vijeku zapisao da je velika knjiga prirode napisana jezikom matematike, i da je bez tog jezika ne možemo pročitati. Tri stoljeća kasnije ta tvrdnja je istinitija nego ikad: od kretanja planeta do ponašanja elektrona, priroda se pokorava jednačinama s tačnošću koja daleko premašuje sve što bismo imali pravo očekivati. A ipak, niko zapravo ne zna zašto. Nije očito da svijet uopće mora imati zakone, još manje da ti zakoni moraju biti zapisivi u simbolima koje je ljudski um u stanju izmisliti i njima baratati. Ovo poglavlje neće ponuditi konačan odgovor, jer ga niko nema, ali će izvagati zagonetku i najbolje pokušaje da se ona ukroti, od onih koji u njoj vide dokaz da je svemir u srži matematički, do onih koji tvrde da čuda tu i nema.

16.1 Wignerovo čudo

Godine 1960. Eugene Wigner, kasniji dobitnik Nobelove nagrade za fiziku (1963), objavio je esej neobičnog naslova: "Nerazumna djelotvornost matematike u prirodnim naukama". U njemu je razdvojio dva odvojena čuda. Prvo je da zakoni prirode uopće postoje, da usred zbunjujuće složenosti svijeta postoje pravilnosti dovoljno jednostavne da ih um može uhvatiti. Kao što je primijetio Erwin Schrödinger, već je čudo što se u toj složenosti uopće mogu otkriti pravilnosti; Galilejevo zapažanje da dva tijela puštena s iste visine padaju jednako dugo, bez obzira na to od čega su načinjena, jedno je takvo čudo. Drugo, i za Wignera dublje čudo je to da se ti zakoni mogu opisati matematikom, i to matematikom izmišljenom sasvim nezavisno od njih.

Wignera je najviše zapanjivala tačnost. Newton je svoj zakon gravitacije izveo iz vrlo grubih mjerenja i mogao ga je provjeriti s

tačnošću od svega nekoliko procenata; danas znamo da vrijedi s tačnošću boljom od deshiljaditog dijela procenta. Uzmemo li kvantnu mehaniku, sličan se obrazac ponavlja: teorija izgrađena na šačici apstraktnih pretpostavki predviđa energiju atoma helija s tačnošću od jednog dijela u deset miliona. "Iz jednačina", pisao je Wigner, "izvučemo nešto što u njih nismo unijeli." Posebno ga je mučila uloga kompleksnih brojeva - onih koji uključuju korijen iz minus jedan, izmišljenih kao čista algebarska dosjetka. Ništa u našem iskustvu ne sugerije takve brojeve; a ipak, oni leže u samom srcu kvantne mehanike, ne kao računski trik nego kao nužnost. Wigner je svoj esej zaključio riječima da je podudarnost jezika matematike i zakona prirode čudesan dar koji niti razumijemo niti zaslužujemo, i za koji bismo trebali biti zahvalni.

Ali Wigner je uz čudo vidio i sablast. Ako ne razumijemo zašto matematika radi, kako možemo biti sigurni da je teorija koju smo izgradili jedina moguća? Možda bismo, usmjerivši pažnju na pojave koje sada zanemarujemo, mogli sagraditi sasvim drugačiju teoriju koja jednako dobro objašnjava isto toliko činjenica. Wigner je tu upornu podudarnost matematike i iskustva nazvao "empirijskim zakonom epistemologije" i priznao da je ona više članak vjere teorijskog fizičara nego dokazana istina. Sablast je u tome što tačnost neke teorije ne mora biti dokaz njene istinitosti: uspijevali smo poput čovjeka s punim svežnjem ključeva koji svaka vrata otvori iz prvog ili drugog pokušaja, pa se s pravom počeo pitati je li podudarnost ključeva i brava uopće jednoznačna.

16.2 Matematika koja je čekala svoju fiziku

Najuznemirujući oblik te zagonetke je onaj koji je Mario Livio nazvao "pasivnom" djelotvornošću: matematika izmišljena iz čiste radoznalosti, decenijama ili vijekovima prije nego što je iko pomislio na primjenu, ispostavi se kao tačno onaj alat koji je fizici trebao. Primjeri su brojni i zapanjujući. Stari Grci su proučavali konusne

presjeke - elipsu, parabolu, hiperbolu - kao apstraktne krive, dvije hiljade godina prije nego što je Kepler otkrio da se planete kreću upravo po elipsama. Bernhard Riemann je sredinom devetnaestog vijeka razvio geometriju zakrivljenih, ne-euklidskih prostora kao misaonu vježbu; pola vijeka kasnije, ta geometrija je Einsteinu poslužila kao jezik opće teorije relativnosti. Kompleksni brojevi, izmišljeni da bi se riješile jednačine koje "nemaju rješenja", postali su nezaobilazni u kvantnoj mehanici.

Isti se obrazac, takođe, ponavlja i sa teorijom grupa, apstraktnom matematikom simetrije, razvijanom u devetnaestom vijeku bez ikakve veze s fizikom - koja je u dvadesetom postala sam jezik fizike čestica. Ponekad je podudarnost gotovo nadrealna. Freeman Dyson je, baveći se iz rasonode jednom starom funkcijom iz teorije brojeva, naišao na neobičan niz cijelih brojeva; tek nakon što je nizu dugo zaludno zurio u lice shvatio je da su to, redom, dimenzije osnovnih algebr simetrije koje je bezbroj puta susretao kao fizičar. Broj po broj se poklapao, osim jednog jedinog - broja dvadeset šest - koji je, kako je zapisao, i dalje ostao zagonetka. Dvije naizgled nespojive grane, teorija brojeva i teorija simetrije, potajno su govorile isti jezik.

Možda najljepšu ilustraciju ponudio je matematičar G. H. Hardy, koji se ponosio time da se bavi najčistijom, najbeskorisnijom matematikom. U svom "Matematičkom izvinjenju" s ponosom je istakao da niko nije pronašao nikakvu ratnu primjenu teorije brojeva. Ironija historije je gorka i divna: upravo je teorija brojeva danas temelj kriptografije koja štiti svaku bankovnu transakciju i svaku šifrovanu poruku na svijetu.

Hardyjeva "beskorisna" igra postala je jedna od najprimjenjivanijih grana matematike. Priroda, čini se, ima naviku da pokupi alat koji je matematičar odbacio kao puku ljepotu, i da ga, mnogo kasnije, ugradi u same temelje stvarnosti.

16.3 Ljepota koja predviđa

Ako je "pasivna" djelotvornost zagonetna, "aktivna" je gotovo jeziva: u više navrata matematička ljepota jedne jednačine predviđjela je postojanje nečega što niko nije ni tražio. Godine 1928. Paul Dirac je, tražeći jednačinu koja bi spojila kvantnu mehaniku i relativnost, dobio rješenja s negativnom energijom. Umjesto da ih odbaci, povjerovao je matematici i zaključio da mora postojati dotad neviđena čestica - antielektron. Četiri godine kasnije, pozitron je pronađen. Kada je James Clerk Maxwell svoje jednačine elektromagnetizma doveo do kraja, iz njih je ispio talas koji putuje brzinom svjetlosti; Heinrich Hertz je taj radio-talas kasnije i uhvatio u laboratoriji. Murray Gell-Mann je, uređujući čestice po obrascima jedne apstraktne matematičke simetrije, primijetio prazno mjesto u shemi i predvidio novu česticu; omega-minus (egzotična subatomska čestica iz porodice bariona) otkrivena je 1964, tačno onakva kakvim ga je matematika opisala.

Fizičari su iz takvih iskustava izvukli naizgled mističnu pouku: da je ljepota jednačine vodič ka istini. Steven Weinberg, i sam nobelovac, u knjizi "Snovi o konačnoj teoriji" priznaje da su fizičari iznova i iznova bili vođeni svojim osjećajem za ljepotu, i da se teoriji koja je matematički ružna jednostavno ne vjeruje. Einstein je isto tvrdio: da su jedine fizikalne teorije koje smo spremni prihvatiti one lijepe. To je, naravno, opasan kriterij - ljepota nije dokaz, ali njegov uspjeh u historiji fizike toliko je velik da ga je nemoguće opisati kao puko praznovjerje. Nešto u strukturi svijeta, izgleda, odgovara onome što ljudski um doživljava kao matematičku eleganciju.

Niko taj kredo nije izrekao smjelije od Paula Diraca, koji je tvrdio da je važnije da jednačine budu lijepe nego da se slažu s eksperimentom - jer ako se lijepa jednačina zasad ne slaže s mjerenjima, vjerovatnije je da nešto ne valja s mjerenjima nego s jednačinom. Zvuči kao bahatost, ali historija mu je često davala za pravo. Kvantna elektrodinamika, teorija izgrađena upravo takvim vođenjem, danas

predviđa magnetno svojstvo elektrona u skladu s eksperimentom do otprilike dvanaest decimala - jedan dio u bilion - i time važi za najtačnije provjereno predviđanje u cijeloj nauci. Teško je otići se utisku da priroda, na svojoj najdubljoj razini, dijeli naš ukus za matematičku ljepotu.

16.4 Dva lica matematizacije

Da bismo razumjeli kako matematika uopće uspijeva istraživati nepoznato, korisno je razlikovati, kako predlažu filozofi Johannes Lenhard i Michael Otte, dva načina na koja je koristimo. Prvi je utemeljujući: matematika kao alat za provjeru i dokazivanje, koja polazi od svijeta već pojmovno razvrstanog i unosi u njega red i strogost. Takvo je bilo shvaćanje Gottloba Fregea, po kojem formula ima smisla samo ako izražava misao, tvrdnju koja je istinita ili lažna. Drugi je istraživački: matematika kao sredstvo za istraživanje onoga što još nije shvaćeno, gdje se najprije računa, a smisao se pojavljuje tek naknadno, iz posljedica računa. U tom duhu je matematičar Hermann Grassmann tvrdio da se u njegovom novom računu svaka formula sama pretvara u smislen zakon.

Najčistiji primjer tog istraživačkog lica je rođenje kvantne mehanike. Mladi Werner Heisenberg je 1925, pokušavajući opisati atom pomoću samih mjerljivih veličina, sastavio čudan sistem računanja čija svojstva ni sam u početku nije razumio. Max Born je potom prepoznao da su Heisenbergova pravila zapravo davno poznata matematika matrica. Heisenberg je, kako je kasnije zapisao, jedva vjerovao da pred sobom ima bogatstvo matematičkih struktura koje mu je priroda tako velikodušno razastrla, i osjećao gotovo vrtoglavicu pred zadatkom da ih istraži. Matematika mu ovdje nije bila sluga koji sređuje poznato, nego svjetiljka kojom je pipao kroz svijet stran svakoj intuiciji. Upravo u tom istraživačkom licu, tvrde Lenhard i Otte, i leži dobar dio tajne djelotvornosti: matematika nije

samo ogledalo stvarnosti, nego i sredstvo kojim otkrivamo dijelove stvarnosti za koje nismo ni znali da postoje.

Ta priča ima i naličje koje pojačava zagonetku. Samo nekoliko mjeseci nakon Heisenbergove matrične mehanike, Erwin Schrödinger je istu fiziku opisao posve drugačijom matematikom - jednačinom talasa, bez ijedne matrice i bez kvantnih skokova. Dvije teorije, izgrađene na nespojivim slikama svijeta, ubrzo su se pokazale matematički istovjetnima: davale su potpuno ista predviđanja. To otvara nelagodno pitanje na koje je upozorio i Wigner: ako istu stvarnost mogu jednako vjerno opisati dva sasvim različita matematička ruha, koje je od njih "pravo"? Možda djelotvornost matematike ne znači da smo pronašli jedinstveni nacrt svijeta, nego samo jedan od više njih koji jednako dobro rade.

16.5 Otkriveno ili izmišljeno?

Iza cijele zagonetke stoji jedno drevno pitanje, staro koliko i Platon: da li matematiku otkrivamo ili je izmišljamo? Za platoniste, brojevi i teoremi postoje u nekom bezvremenom, apstraktnom svijetu, nezavisno od ljudi; matematičar ih ne stvara nego ih, poput istraživača, pronalazi. Roger Penrose, uvjereni platonista, govori o tri svijeta - fizičkom, mentalnom i platonskom svijetu matematičkih oblika - i o misteriji kako se oni zrcale jedan u drugom. Na suprotnoj strani stoje formalisti, za koje je matematika igra simbola po dogovorenim pravilima, i invencionisti, za koje je ona ljudska tvorevina, jezik koji smo skovali kao što smo skovali šah. Između njih su konstruktivisti, kojima je matematika stvar uma koji gradi, korak po korak.

Rasprava je stara koliko i nauka. Već su pitagorejci učili da je broj mjera svih stvari. David Hilbert je početkom dvadesetog vijeka branio formalizam, viziju matematike kao besprijeckorne igre simbola. Luitzen Brouwer joj je suprotstavio intuicionizam, po kojem matematika živi jedino u umu koji je konstruiše, a Kurt Gödel,

o kojem će još biti riječi, bio je uvjereni platonista, siguran da matematičke istine postoje jednako stvarno kao planine. Sam Hardy, jedan od najvećih matematičara svog doba, opisao je matematičara kao tvorca obrazaca, poput slikara ili pjesnika, kojem je ljepota prvi sud - jer, kako je rekao, za ružnu matematiku na svijetu nema trajnog mjesta. Da je matematika tek puki dogovor, teško bi bilo objasniti zašto se ti obrasci, jednom stvoreni, opiru našoj volji i kriju iznenađenja koja tek treba otkriti.

Argumenti postoje na obje strane, i oba su neugodno jaka. U prilog otkrivanju govori upravo pasivna djelotvornost: kako bi puka ljudska izmišljotina mogla unaprijed pogoditi pitanja koja priroda tek treba postaviti? Matematičar Leopold Kronecker sažeo je platonistički instinkt riječima da je cijele brojeve stvorio Bog, a sve ostalo je djelo čovjeka. U prilog izmišljanju govori sloboda kojom biramo aksiome i proširujemo pojmove - od cijelih brojeva, preko razlomaka i negativnih, do kompleksnih - svaki put mijenjajući pravila kad nam to odgovara. Mario Livio, nakon što je knjigu posvetio tom pitanju, nudi trezven zaključak: matematika je, izgleda, i otkrivena i izmišljena. Izmišljamo pojmove i aksiome; ali odnosi i teoremi koji iz njih slijede potom nam se nameću kao da su oduvijek bili tu, izvan naše volje.

16.6 Skromniji odgovori

Ne misle svi da je tu posrijedi ikakvo čudo. Inženjer i matematičar Richard Hamming napisao je 1980. esej istog naslova kao Wigner, ali s namjerom da čudo obrazloži. Ponudio je četiri trezvena objašnjenja. Prvo: vidimo ono što tražimo. Kao što onaj ko stavi plave naočale svijet vidi plavim, tako i mi u prirodu unosimo matematičku mrežu i onda se ne čudimo što u ulovu nalazimo matematiku. Hamming se poziva na Eddingtonovu parabolu o ribarima koji su, pregledavši ulov, zaključili da u moru nema riba manjih od veličine njihove mreže - ne shvatajući da su granicu

nametnuli sami, veličinom mreže. Drugo objašnjenje: sami biramo matematiku koja pristaje. Kad obični brojevi ne rade, izmislimo vektore; kad ni oni ne rade, tenzore. Matematika ne pristaje uvijek - mi zadržavamo samo onu koja pristaje, i onda se divimo pristajanju.

Hammingova preostala dva razloga jednako su otrežnjujuća: da nauka zapravo odgovara na iznenađujuće malo pitanja, pa naši uspjesi izgledaju veći nego što jesu; i da nas je evolucija oblikovala tako da mislimo upravo na način koji pristaje svijetu u kojem smo preživjeli. Ali Hamming je bio pošten do kraja: kad je iznio sva svoja objašnjenja, priznao je da ostatak zagonetke ostaje tako velik da je pitanje u suštini i dalje bez odgovora. Isti oprez dolazi i iz neočekivanog izvora. Freeman Dyson je upozorio da je stari, plodni brak matematike i fizike u dvadesetom vijeku "završio razvodom", i u nizu "propuštenih prilika" pokazao koliko su te dvije discipline zapravo često prolazile jedna pored druge. A ipak, sama činjenica da su se Maxwellove jednačine "sjećale" relativnosti pola vijeka prije Einsteina, ili da su se dimenzije apstraktnih algebri krile u teoriji brojeva, svjedoči da veza nije puka projekcija: ona je tu, dublja od svake mode, i čeka da bude otkrivena.

Dyson je tu vezu, paradoksalno, osvijetlio upravo popisom promašaja. Kada je Maxwell 1865. objavio jednačine elektromagnetizma, matematičari su ih gotovo ignorisali; da su ih shvatili ozbiljno, tvrdi Dyson, mogli su decenijama prije Einsteina otkriti specijalnu relativnost, koja je u njima već bila skrivena. Slično, kada su Hamilton i Grassmann sredinom devetnaestog vijeka stvorili nove algebarske sisteme, niko nije postavio pravo pitanje - kako to da se svojstva prostora daju opisati sa dvije tako različite strukture - pa je teorija koja ih ujedinjuje, teorija spinora presudna za opis elektrona, zakasnila možda čitavih četrdeset godina. Teorija spinora je matematički okvir koji opisuje posebnu vrstu objekata - spinore - koji se koriste za opisivanje čestica sa polucijelim spinom, poput elektrona, kvarkova i neutrina. Pouka je dvostruka: veza

matematike i svijeta je stvarna i duboka, ali je nikakva sudbina ne isporučuje sama od sebe - nju treba izboriti, a prilike se lako propuštaju.

16.7 Antropocentrična sumnja

Filozof Mark Steiner zaoštrio je zagonetku na način koji mnogima smeta. Pregledavajući kako su fizičari zapravo dolazili do velikih otkrića - Diracove antimaterije, kvantne mehanike, čestica simetrije - primijetio je da su se iznova oslanjali na čisto matematičke i estetske analogije: birali su jednačine zbog njihove ljepote, simetrije i formalne elegancije, a priroda ih je nagrađivala novim istinama. Ali takva strategija, upozorava Steiner, potajno pretpostavlja nešto duboko antropocentrično: da je svemir na neki način "prilagođen" ljudskom osjećaju za ljepotu, da je ono što se nama čini matematički skladnim ujedno i putokaz ka tome kako je svijet zaista sazdan.

Ta pretpostavka je u suprotnosti sa cijelim duhom moderne nauke, koja nas je, od Kopernika naovamo, uporno micala iz središta svega. Ako čovjek nije u središtu svemira ni po položaju ni po porijeklu, zašto bi baš ljudski ukus za matematičku eleganciju bio pouzdan kompas kroz kosmos? Steiner iz toga izvlači zaključak koji naturalistima nije po volji: da uspjeh takve "pitagorejske" strategije predstavlja stvaran filozofski izazov shvatanju svijeta kao ravnodušnog prema čovjeku. Ne mora se prihvatiti njegov zaključak da bi se osjetila težina pitanja - a upravo ta nelagoda čini ovu zagonetku više od puke znatiželje.

16.8 Nerazumna nedjelotvornost

Poštenje nalaže i drugu stranu priče, koja se rijetko spominje: matematika je nerazumno djelotvorna u fizici, ali je jednako nerazumno NEdjelotvorna gotovo svuda drugdje. Matematičar Izrael Gelfand navodno je volio reći da postoji samo jedna stvar čudnija od nerazumne djelotvornosti matematike u fizici, a to je njena

nerazumna nedjelotvornost u biologiji. I zaista: nijedna jednačina ne opisuje živu ćeliju, ljudsko društvo ili ekonomiju onako kako Diracova jednačina opisuje elektron. U tim područjima matematika daje grube modele i vjerovatnoće, ali ne i ono gotovo natprirodno poklapanje koje vidamo u fizici čestica. Wigner je i sam naslutio mračnu mogućnost: da bi jednog dana neka uvjerljiva teorija svijesti ili života mogla doći u sukob s fizikom, a da taj sukob nećemo moći razriješiti - jer, na kraju, ne znamo zašto naše teorije uopće rade tako dobro. Djelotvornost matematike, drugim riječima, nije univerzalni zakon nego uska, dragocjena povlastica jednog dijela stvarnosti - onog najjednostavnijeg i najdubljeg istovremeno.

16.9 Gödel i gubitak izvjesnosti

Postoji i granica koja pogađa samu matematiku iznutra, i ona je dio ove priče o granicama spoznaje. Vijekovima se vjerovalo da je matematika stjenovito tlo apsolutne izvjesnosti, tijelo vječnih istina do kojih se dolazi čistim razumom. Taj san počeo se ljuljati u devetnaestom vijeku, kada je otkriveno da euklidska geometrija nije jedina moguća: ravnopravno uz nju stoje geometrije zakrivljenih prostora, i priroda je, ironično, izabrala baš jednu od tih "neistinitih". Konačan udarac zadao je Kurt Gödel 1931. godine, dokazavši da u svakom dovoljno moćnom formalnom sistemu postoje istinite tvrdnje koje se unutar njega ne mogu dokazati, i da takav sistem ne može dokazati vlastitu neprotivrječnost. San Davida Hilberta o potpunoj, samodokazivoj formalizaciji cijele matematike time se srušio. Kako je taj preokret nazvao matematičar Morris Kline, bio je to gubitak izvjesnosti. Matematika koja tako nadmoćno opisuje svemir ni sama, pokazalo se, ne stoji na temeljima apsolutne sigurnosti - što zagonetku njene djelotvornosti čini samo dubljom.

16.10 Matematički svemir

Postoji i najradikalniji mogući odgovor, koji zagonetku ne pokušava ublažiti nego je gura do kraja. Fizičar Max Tegmark polazi od

skromne pretpostavke koju dijeli većina fizičara - da postoji vanjska stvarnost nezavisna od nas - i tvrdi da iz nje, uz dovoljno široku definiciju, slijedi nešto krajnje smjelo: da naša vanjska fizička stvarnost nije samo opisana matematikom, nego da ona jeste matematička struktura. Put do tog zaključka je poučan. Zapišimo se, kaže Tegmark, šta je zapravo prostor. Kada ga matematičar opiše, sva njegova suštinska svojstva - broj dimenzija, zakrivljenost, topologija - ispadnu čisto matematička. Prostor, dakle, nema nikakvih osobina osim geometrijskih; a ako je tako, onda prostor nije stvar koju geometrija opisuje, nego upravo jeste geometrijski objekt. Tegmark taj argument proširuje s prostora na sve ostalo: budući da se, kako smo vidjeli kroz cijelu ovu knjigu, svaki dio svijeta na kraju povinuje matematičkim zakonima i iscrpljuje u matematičkim odnosima, sama stvarnost je, tvrdi on, jedno golemo geometrijsko-matematičko tijelo.

Ako je to tačno, zagonetka djelotvornosti naprosto nestaje. Ne pitamo se zašto je karta tako vjerna predjelu kad su karta i predio jedno te isto; matematika tako savršeno opisuje svemir zato što je svemir, sam po sebi, matematički. Mi bismo, po toj zamisli, bili samosvjesni obrasci unutar jedne goleme matematičke strukture koja proučava samu sebe - pa bi djelotvornost matematike bila tautologija, a ne čudo.

Zanimljivo je da Tegmark svoju ideju izričito povezuje s Penroseovim platonskim svijetom oblika, o kojem sam ranije već govorio: obojica, svako svojim putem, dolaze do slutnje da je matematičko carstvo stvarnije od same materije. Cijena te elegancije je visoka i mnogima neprihvatljiva: ona od stvarnosti pravi apstrakciju, a materiju, iskustvo i svijest svodi na odnose bez ikakvog nosioca. Hipoteza je spekulativna i daleko od dokazane; ali vrijedi je znati, jer pokazuje dokle seže iskušenje da se čudo ukine tako što ćemo reći da čuda nema - jer je sve, do posljednjeg atoma, matematički oblik.

16.11 Zašto je svemir razumljiv?

Vratimo se, na kraju, Wignerovom vicu s početka. Zašto se pi pojavljuje ondje gdje mu, naizgled, nije mjesto? Pošten odgovor je da ne znamo. Možemo reći da u prirodu unosimo matematičku mrežu i biramo baš onu koja pristaje; možemo, s platonistima, vjerovati da otkrivamo bezvremene istine upisane u samu strukturu stvarnosti; možemo, s Tegmarkom, otići do kraja i reći da je stvarnost matematika. Nijedan od tih odgovora nije potpun, i svaki ostavlja jezgru misterije netaknutom. Ono što ostaje je činjenica pred kojom je i Einstein zastao u čudu: da je svemir uopće razumljiv, da se najdublje pravilnosti prirode daju uhvatiti u nekoliko simbola koje um jednog sisara na maloj planeti može zapisati na komadu papira.

I tu se ova zagonetka dodiruje sa samim naslovom ove knjige. Ista šačica jednačina koja opisuje kvarkove u jezgru opisuje i galaksije na rubu vidljivog svemira; isti zakon vrijedi za atom i za zvijezdu. Ta duboka, neobjašnjiva "jednost" - da najsitnije i najkrupnije govori istim matematičkim jezikom - možda je najveće od svih čuda o kojima smo govorili. Bilo da je matematika ogledalo stvarnosti, njen nacrt, ili sama njena građa, ostaje neosporno da nam je dala ključ kojim otključavamo vrata za koja nismo ni znali da postoje. Wigner je bio u pravu: to je dar koji ne razumijemo i koji ne zaslužujemo. A možda je najmudrije, kao i on, jednostavno biti zahvalan na njemu - i nastaviti se čuditi.

Literatura

- [1] Wigner, E. P. (1960). The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences. Communications on Pure and Applied Mathematics, 13(1), 1-14.
- [2] Hamming, R. W. (1980). The Unreasonable Effectiveness of Mathematics. The American Mathematical Monthly, 87(2), 81-90.
- [3] Livio, M. (2009). Is God a Mathematician? New York: Simon & Schuster.

- [4] Steiner, M. (1998). *The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [5] Penrose, R. (2004). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. London: Jonathan Cape.
- [6] Hardy, G. H. (1940). *A Mathematician's Apology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [7] Kline, M. (1980). *Mathematics: The Loss of Certainty*. New York: Oxford University Press.
- [8] Weinberg, S. (1992). *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon Books.
- [9] Tegmark, M. (2014). *Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality*. New York: Alfred A. Knopf.
- [10] Barrow, J. D. (1992). *Pi in the Sky: Counting, Thinking, and Being*. Oxford: Oxford University Press.
- [11] Dyson, F. J. (1972). Missed Opportunities. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 78(5), 635-652.
- [12] Lenhard, J., & Otte, M. (2018). The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem: Mathematization as Exploration. *Foundations of Science*, 23(4), 719-737.
- [13] Stewart, I. (1995). *Nature's Numbers: The Unreal Reality of Mathematics*. New York: Basic Books.
- [14] Galilei, G. (1623). *Il Saggiatore*. Rim: Giacomo Mascardi.

17

Nevidljivi svemir

"Svemir nije samo čudniji nego što pretpostavljamo; on je čudniji nego što možemo pretpostaviti." (J. B. S. Haldane)



Ponekad svemir ne otkriva ono što postoji, otkriva ono što mora postojati da bi ono što vidimo imalo smisla. Kada pogledamo noćno nebo, prirodno je pretpostaviti da gledamo svemir kakav on zaista jeste. Zvijezde, galaksije, magline i jata galaksija ispunjavaju tamu između nas i kosmičkog horizonta i stvaraju gotovo potpunu sliku stvarnosti. Ali ta slika je varljiva. Svjetlost nam pokazuje ono što zrači, reflektuje ili apsorbira zračenje; gravitacija nam, međutim, omogućava da naslutimo i ono što ne svijetli. Upravo iz tog neslaganja između onoga što vidimo i onoga što gravitacija zahtijeva

rodila se jedna od najvećih zagonetki moderne fizike: tamna materija.

Još je čudnije što tamna materija nije jedina nepoznata komponenta. Krajem dvadesetog stoljeća pokazalo se da se širenje svemira ubrzava, što je zahtijevalo još jednu komponentu, danas nazvanu tamna energija. U savremenoj kosmologiji tako se pojavljuje slika prema kojoj obična materija, ona od koje su načinjeni ljudi, planete, zvijezde i teleskopi, predstavlja tek mali dio ukupnog kosmičkog sadržaja. U različitim izdanjima i epohama knjige koje koristimo navode različite procenete, ali suština je ista: većina svemira pripada komponentama čiju prirodu još ne razumijemo.

Ovo poglavlje zato nije samo priča o dvije nepoznate stvari. To je priča o tome kako nauka zaključuje o postojanju nečega što ne može neposredno vidjeti, kako se jedna hipoteza pretvara u čitav istraživački program, kako se konkurentne ideje poput MOND-a opiru prihvatanju dominantne slike i kako se, na kraju, iza svega pojavljuje mnogo veće pitanje: koliko možemo biti sigurni da je naša slika stvarnosti potpuna ako je najveći dio svemira definisan prvenstveno preko svojih posljedica? MOND (eng. Modified Newtonian Dynamics) je teorija prema kojoj za objašnjenje neobično brzog kretanja zvijezda u galaksijama možda nije potrebna tamna materija, već se gravitacija pri veoma malim ubrzanjima ponaša drugačije nego što predviđa Newtonova dinamika. Predložio ju je Mordehai Milgrom 1983. godine.

Najzanimljiviji dio ove priče nije to što astronomi tvrde da u svemiru postoji nešto što ne vide. Zanimljivije je pitanje kako uopšte možemo znati da nešto postoji kada nijedan teleskop ne može napraviti njegovu fotografiju. Tamna materija i tamna energija predstavljaju upravo takav slučaj: njihova imena su jednostavna, ali ono što iza njih stoji spada među najdublje nedovršene probleme moderne fizike.

17.1 Prije nego što smo znali šta tražimo

Ideja da u svemiru postoji nevidljiva masa starija je od savremenog pojma tamne materije. U historiji astronomije više puta se pokazalo da se kretanje vidljivog tijela može objasniti postojanjem nečega što još nije opaženo. Klasičan primjer je Neptun: nepravilnosti u kretanju Urana mogle su se tumačiti kao posljedica nepoznate planete. U tom slučaju hipoteza je dobila spektakularnu potvrdu kada je Neptun zaista pronađen. Ali upravo tu leži važna razlika između Neptuna i tamne materije. Kod Neptuna je nevidljivi uzrok na kraju postao vidljiv objekat. Kod tamne materije takva potvrda još nije stigla.

Robert Sanders u historijskom pregledu naglašava da je savremeni problem tamne materije nastao iz potrebe da se usklade astronomska posmatranja sa gravitacionom dinamikom. Ako objekti u nekom sistemu imaju brzine koje su prevelike da bi ih vidljiva masa mogla gravitaciono vezati, postoje najmanje dvije logičke mogućnosti: nedostaje nam masa ili nedostaje nam ispravan zakon gravitacije. Ta dilema će se kroz čitavu historiju problema iznova pojavljivati.

To je možda najvažnija historijska nijansa cijele priče: "tamna materija" u početku nije bila ime za česticu. Bila je ime za problem - za razliku između gravitacionog ponašanja i onoga što je svjetlost pokazivala. Tek kasnije je problem dobio fizičku interpretaciju.

Godine 1933. Fritz Zwicky proučavao je jato Coma, ogromnu gravitaciono povezanu skupinu galaksija. Posmatrajući njihove radialne brzine, primijetio je da se pojedinačne galaksije kreću toliko brzo da ukupna vidljiva masa nije izgledala dovoljnom da ih zadrži u zajedničkom sistemu. Ako bi u jatu zaista bilo samo ono što je svjetlost pokazivala, galaksije bi se, u dovoljno dugom vremenu, morale razbježati.

Zwicky je primijenio alat koji povezuje tipične brzine čestica u gravitaciono vezanom sistemu sa njegovom ukupnom masom. Dobio

je mnogo veću dinamičku masu od one koja se mogla pripisati zvijezdama koje su tada bile vidljive. Njegov zaključak bio je smion: u jatu mora postojati velika količina materije koja ne doprinosi vidljivoj svjetlosti. Nazvao ju je "dunkle Materie" - tamna materija.

Ali naučna historija rijetko izgleda kao trenutak u kojem genije izgovori tačan odgovor, a ostatak svijeta klimne glavom. Zwickyjeva ideja decenijama nije postala centralni problem astronomije. Posmatračka tehnika, procjene masa i razumijevanje galaksija još nisu bili dovoljno razvijeni da bi se anomalija pretvorila u čvrstu paradigmu. Tek će druga vrsta mjerenja, na skalama pojedinačnih galaksija, vratiti isto pitanje u mnogo snažnijem obliku.

Zwickyjev slučaj je važan i zbog jedne metodološke pouke. U astronomiji ne moramo uvijek vidjeti objekt da bismo znali da postoji. Možemo vidjeti njegov gravitacioni potpis. Problem nastaje kada isti potpis možemo objasniti na više načina. Tada više nije dovoljno pronaći anomaliju; potrebno je pronaći nezavisne tragove koji razlikuju konkurentska objašnjenja.

Ako se Sunčev sistem koristi kao intuitivna slika, očekujemo da objekti dalje od dominantne mase kruže sporije. Brzina planeta opada s udaljenošću od Sunca jer većina mase sistema pripada Suncu. Kada bismo isti obrazac jednostavno prenijeli na spiralnu galaksiju, zvijezde na njenom rubu trebale bi, nakon prolaska kroz većinu vidljive mase, imati sve manje orbitalne brzine.

Posmatranja su pokazala suprotno. Radioastronomija je omogućila mjerenje neutralnog vodika daleko izvan sjajnog optičkog diska, dok su optička spektroskopska mjerenja omogućila praćenje kretanja zvijezda i gasa. Umjesto očekivanog Keplerovskog pada, rotacione krive mnogih spiralnih galaksija ostaju približno ravne: materija na velikim udaljenostima nastavlja da kruži brzinama koje zahtijevaju mnogo veću ukupnu masu nego što je sadržano u zvijezdama i gasu koji vidimo.

Vera Rubin, Kent Ford i njihovi saradnici postali su posebno važni u ovoj priči, ali historija je šira od jednog imena. Sanders detaljno opisuje kako su radovi različitih astronoma, uključujući radio-posmatranja neutralnog vodika i kasniji sistematski rad Alberta Bosme, postepeno pokazali da se problem ne pojavljuje samo u jednoj ili dvije neobične galaksije.

To mijenja karakter anomalije. Jedna čudna galaksija može biti posljedica greške u mjerenju, neobičnog rasporeda zvijezda ili pogrešne procjene mase. Ali ako isti obrazac vidimo u velikom broju različitih sistema, onda je mnogo teže pobjeći od pitanja šta se zapravo događa.

Najjednostavnija interpretacija bila je da se spiralne galaksije nalaze u ogromnim, proširenim haloima nevidljive mase. Zvijezde nisu "prebrze" zato što krše gravitaciju, one su prebrze samo ako pretpostavimo da je ono što vidimo sva masa koja postoji. Dodamo li veliki tamni halo, njihove brzine postaju upravo ono što gravitaciona dinamika očekuje.

Ali tu se već pojavljuje filozofski obrat. Tamna materija objašnjava anomaliju tako što dodaje nešto što ne vidimo. MOND će kasnije pokušati da je objasni tako što mijenja zakon koji koristimo da izračunamo gravitacioni odgovor. Jedno rješenje dodaje novi entitet; drugo mijenja pravilo. I jedno i drugo imaju cijenu.

17.2 Gravitacija otkriva ono što svjetlost ne može

Rotacione krive nisu jedini način da se pronađe nevidljiva masa. Einsteinova opšta teorija relativnosti daje još moćniji alat: gravitaciono sočivo. Masa zakrivljuje prostor-vrijeme, a svjetlost se kroz tako zakrivljen prostor kreće po putanjama koje se nama mogu pokazati savijenim, izduženim ili uvećanim. Ako iza masivnog objekta postoji udaljena galaksija, njena slika može biti deformisana.

Ovdje je čarolija u tome što za gravitaciono sočivo nije presudno da li masa emituje svjetlost. Ono reaguje na ukupnu masu koja zakrivljuje prostor-vrijeme. Zbog toga astronomi mogu rekonstruisati raspored mase i tamo gdje nema odgovarajućeg sjaja. Evalyn Gates upravo gravitaciono sočivo opisuje kao neku vrstu "Einsteinovog teleskopa": sam prostor postaje optički instrument koji omogućava da mapiramo ono što obični teleskop ne može direktno pokazati.

Ovo je više od zgodne tehnike. Rotacione krive zavise od dinamike objekata i pretpostavki o njihovom kretanju. Gravitaciono sočivo daje drugačiji put do mase. Kada različite metode, zasnovane na različitim fizičkim pojavama, uporno ukazuju na isti višak gravitacione mase, hipoteza o tamnoj materiji dobija znatno čvršću osnovu.

Posebno dramatičan primjer predstavlja tzv. Bullet Cluster, sudar dva jata galaksija. U takvom događaju imamo dvije komponente koje se ponašaju različito. Vrući gas, koji čini značajan dio obične barionske materije, međusobno djeluje elektromagnetno i pri sudaru se usporava. Galaksije su mnogo rjeđe i gotovo slobodno prolaze jedna kroz drugu. Ako postoji tamna materija koja slabo djeluje sa običnom materijom, ona bi takođe trebala proći kroz sudar bez velikog usporavanja.

Posmatranja upravo daju takvu sliku. Rendgenska opažanja pokazuju gdje se nalazi vrući gas, dok gravitaciono sočivo pokazuje gdje je koncentrisana najveća količina gravitacione mase. Te dvije raspodjele nisu iste. Tamna gravitaciona komponenta prati područja povezana s galaksijama, dok se veliki dio običnog gasa zadržao između njih. Freese ističe Bullet Cluster kao posebno upečatljivu potvrdu slike u kojoj tamna komponenta prolazi kroz sudar mnogo lakše nego obična materija.

Ovdje postaje teško problem svesti samo na jednostavnu grešku u procjeni svjetlosti. Ne govorimo više samo o tome da je galaksija

teža nego što izgleda. Govorimo o situaciji u kojoj se gravitaciono određena masa i vidljiva barionska masa prostorno razdvajaju. To je upravo vrsta nezavisnog dokaza koja je potrebna kada pokušavamo razlikovati novu materiju od pogrešne procjene postojeće.

17.3 Od nevidljive mase do nepoznate čestice

Nakon što je postalo jasno da u svemiru postoji gravitaciona komponenta koja nije lako vidljiva, sljedeće pitanje bilo je gotovo neizbježno: od čega je napravljena? U početku su kandidati mogli biti sasvim obični objekti koje jednostavno nismo dovoljno dobro vidjeli. Kasnije je postalo jasno da kosmologija postavlja mnogo strožije zahtjeve.

MACHO je naziv za masivne, kompaktne objekte u galaktičkom halou: slabe zvijezde, bijele patuljke, smeđe patuljke, planete, zvjezdane ostatke ili crne rupe. Takvi objekti su tamni ili teško uočljivi, ali su napravljeni od obične barionske materije. Gravitaciono mikrosočivo moglo je otkriti njihov prolazak ispred udaljene zvijezde jer bi njihova gravitacija privremeno pojačala njen sjaj.

Problem je što količina obične materije nije proizvoljna. Rani svemir ostavlja trag u nukleosintezi lakih elemenata, a kosmičko mikrovalno pozadinsko zračenje daje dodatne informacije o ukupnoj i barionskoj materiji. Ne možemo jednostavno sakriti dovoljno protona i neutrona u tamne zvijezde ili planete da bismo dobili svu potrebnu masu, a da pritom ne pokvarimo uspjeh drugih kosmoloških mjerenja. Zato je pažnja sve više prelazila na nebarionsku tamnu materiju.

Tu nastupa čestica koju popularna literatura često stavlja u središte priče: WIMP, skraćeno od engleske sintagme "weakly interacting massive particle". Ideja je privlačna jer bi takva čestica mogla biti dovoljno masivna, električno neutralna i da dovoljno slabo djeluje da je teleskopi ne vide, a opet dovoljno prisutna da gravitaciono izgradi strukturu svemira. Bertone ovu mogućnost povezuje s idejom da

tamna materija predstavlja svojevrsnu nevidljivu skelu na kojoj je izgrađena kosmička struktura.

WIMP, međutim, nije otkrivena čestica. To je klasa hipotetičkih kandidata. Isto važi i za aksione, lake čestice koje su prvobitno uvedene u sasvim drugi teorijski problem, a zatim prepoznate kao mogući tamni sastojak svemira. Aksion je posebno zanimljiv jer je toliko lagan da se ne traži na isti način kao WIMP: umjesto udara u atomsko jezgro, eksperiment može registrovati njegovo pretvaranje u foton u snažnom magnetnom polju.

Još jedna mogućnost su sterilni neutrimi, hipotetičke čestice koje bi bile mnogo slabije povezane s običnom materijom od poznatih neutrina. U zavisnosti od mase i načina nastanka, mogli bi dati doprinos tamnoj materiji. Ovaj kandidat pokazuje koliko je prostor mogućnosti širok: tamna materija može biti teška ili lagana, čestična ili kolektivna, hladna ili toplija, sa sasvim različitim eksperimentalnim potpisima.

Ovo je mjesto gdje je važno razlikovati dvije tvrdnje. Prva glasi: postoji masa koju ne vidimo. Druga glasi: ta masa je neka nova, nebarionska supstanca. Prva tvrdnja je mnogo starija i oslanja se prvenstveno na gravitaciju. Druga dolazi iz kombinacije kosmologije, strukture svemira i fizike ranog univerzuma.

Kada bi sva tamna komponenta bila napravljena od običnih atoma, morali bismo je uklopiti u količinu barionske materije koju dopuštaju rani kosmos i opažanja kosmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja. Međutim, posmatrani svemir traži više mase nego što se može dobiti samo od bariona. Zbog toga moderna slika razlikuje "normalnu" materiju, odnosno barionski sadržaj, od dominantne nebarionske komponente tamne materije.

Ta razlika ima i dublju posljedicu. Ako je tamna materija nebarionska, onda je naše razumijevanje materije nepotpuno na fundamentalnom nivou. Standardni model čestica opisuju izuzetno

uspješan skup poznatih čestica i interakcija, ali nijedna njegova standardna čestica nije očigledno kandidat koji daje potrebnu stabilnu hladnu tamnu materiju u kosmološkoj količini. Problem tako prelazi granicu astronomije i ulazi direktno u fiziku čestica.

17.4 Potraga za sjenom

Ako tamna materija prolazi kroz Zemlju, logično je pokušati je uhvatiti. Ideja direktne detekcije je jednostavna u principu, ali zastrašujuće teška u praksi. Ako WIMP povremeno udari jezgro atoma, prenesena energija može biti sićušna. Istovremeno, kosmičke zrake i radioaktivnost stvaraju ogroman broj neželjenih događaja. Zato se detektori spuštaju duboko pod zemlju, gdje slojevi stijene služe kao štit.

Postoje različiti načini na koje naučnici pokušavaju direktno otkriti čestice tamne materije. Kriogeni detektori, poput onih korištenih u eksperimentima CDMS, rade na ekstremno niskim temperaturama i pokušavaju registrovati sićušni porast energije koji nastaje kada hipotetička čestica tamne materije udari u atom materijala detektora. Drugi eksperimenti, poput LUX-a i XENON-a, koriste velike rezervoare tečnog ksenona: ako čestica tamne materije prođe kroz njih i sudari se s atomom ksenona, trebalo bi nastati veoma slabo svjetlosno i električno pražnjenje koje detektori mogu zabilježiti. Postoje i eksperimenti koji traže druge, indirektno tragove, na primjer, moguće čestice ili zračenje koje bi nastalo raspadom ili međusobnim sudarima čestica tamne materije. Zajednički cilj svih ovih eksperimenata je pronaći rijedak i dovoljno karakterističan signal koji se ne može uvjerljivo pripisati poznatim izvorima pozadinskog zračenja.

Upravo zato je historija direktne detekcije važna. Decenije rada nisu rezultirale općeprihvaćenom direktnom identifikacijom WIMP-a. Umjesto jednostavnog otkrića dobili smo sve strožija ograničenja na to gdje bi takva čestica mogla biti skrivena. To nije isto što i dokaz

da WIMP ne postoji. Znači samo da je veliki dio najjednostavnijih i najpopularnijih scenarija postao teži za održavanje.

A potraga se i dalje pomjera prema osjetljivijim detektorima. XENONnT je 2025. objavio nova ograničenja za WIMP interakcije, a u 2026. eksperiment je došao do režima u kojem solarni neutritini počinju stvarati takozvanu "neutrinsku maglu" - pozadinu koja može imitirati upravo one male signale kakve tražimo. LZ je 2026. objavio i događaj od interesa u visokoenergetskom području nuklearnih odboja, ali globalna statistička značajnost od 2,6 sigma nije dovoljna da se proglasi otkriće tamne materije.

Ovo je fascinantan trenutak. Detektori postaju toliko osjetljivi da se približavaju granici gdje prirodni neutritini počinju izgledati kao šum za potragu za tamnom materijom. Čak i ako nikada ne pronađemo WIMP, sama tehnologija napravljena da ga traži otvara novu eksperimentalnu granicu fizike.

17.5 Šta ako problem nije u materiji?

U nauci je opasno pretpostaviti da je jedino moguće rješenje ono koje nam je najdraže. Ako galaksije rotiraju brže nego što očekujemo, možemo dodati tamnu materiju. Ali možemo postaviti i drugo pitanje: možda zakon gravitacije koji koristimo na veoma malim ubrzanjima nije potpun.

Godine 1983. Mordehai Milgrom predložio je Modified Newtonian Dynamics - MOND. Umjesto nove vrste materije, MOND uvodi promjenu dinamike u režimu veoma malih ubrzanja. Kada je ubrzanje dovoljno veliko, vraća se poznata Newtonova fizika; kada postane izuzetno malo, odnos između sile i ubrzanja se mijenja. U galaksijama upravo takvi režimi postoje na velikim udaljenostima od centra.

Privlačnost MOND-a leži u tome što nije samo proizvoljno podešavanje jedne krive. Sanders ističe da MOND uspješno hvata

određene sistematske odnose između vidljive materije i orbitalnih brzina. Posebno je zanimljiva veza s Tully-Fisherovim odnosom između luminoznosti spiralnih galaksija i njihove rotacione brzine. Ako je tamna materija potpuno nezavisna komponenta, zašto su detalji rotacionih krivih tako usko povezani s rasporedom vidljive materije? MOND na to pitanje daje vrlo direktan odgovor.

Ali MOND ima težak problem kada se izađe izvan pojedinačnih galaksija. Sanders i Gates opisuju kako sama modifikacija dinamike ne rješava sve probleme jata galaksija i kosmoloških posmatranja. Za neke sisteme potrebno je ipak dodati određenu količinu nevidljive materije, čime se gubi dio prvobitne jednostavnosti. Potrebna je i relativistička formulacija ako teorija treba da se suoči s gravitacionim sočivom, kosmičkim mikrovalnim pozadinskim zračenjem i evolucijom strukture svemira.

Zato rasprava nije pošteno predstavljena ako se kaže da je jedna strana "dokazana", a druga "glupost". Tamna materija ima izuzetno široku moć objašnjenja i uklapa se u veliki broj nezavisnih posmatranja. MOND je, s druge strane, posebno zanimljiv na galaktičkim skalama i postavlja neugodno pitanje o tome zašto se dinamika tako precizno povezuje s rasporedom barionske materije. Pravi naučni problem nije samo izabrati stranu, nego pronaći eksperiment ili posmatranje koje bi ih moglo razlikovati.

17.6 Kada je počelo ubrzanje svemira?

Činilo se da je problem tamne materije već dovoljno dubok. Onda je svemir napravio nešto još čudnije. Tokom 1990-ih astronomi su koristili supernove tipa Ia kao kosmičke standardne svijeće. Ako znamo njihovu približnu stvarnu luminoznost, iz opaženog sjaja možemo procijeniti udaljenost. Kombinacijom udaljenosti i crvenog pomaka moguće je rekonstruisati kako se širenje svemira mijenjalo kroz vrijeme.

Očekivanje je bilo intuitivno: gravitacija materije trebala bi usporavati širenje. Svemir se širi, ali masa bi trebala djelovati kao kočnica. Umjesto toga, 1998. dvije nezavisne istraživačke grupe, Supernova Cosmology Project i High-Z Supernova Search Team, došle su do istog iznenađujućeg zaključka: udaljene supernove bile su slabije, odnosno dalje, nego što bi bile u svemiru koji se širi konstantnom ili usporavajućom brzinom. Širenje se, izgleda, ubrzava.

Panekova historija tog otkrića pokazuje koliko je rezultat bio neugodan čak i ljudima koji su ga dobili. Jedna od posebnosti priče jeste da se nije pojavio elegantan novi teorijski objekat koji je čekao da bude pronađen. Posmatrači su prvo dobili anomaliju, a zatim su fizičari morali pronaći jezik kojim će je opisati. Taj jezik postao je "tamna energija".

Nobelova nagrada za fiziku 2011. dodijeljena je Saulu Perlmutteru, Brianu Schmidtu i Adamu Riessu za otkriće ubrzanog širenja svemira kroz posmatranja udaljenih supernovih. Ali ime "tamna energija" ne treba zamijeniti s objašnjenjem. To je naziv za komponentu ili mehanizam koji uzrokuje opaženo ubrzanje. Znamo mnogo o njenom efektu, ali vrlo malo o njenoj prirodi.

Jedan od najljepših obrata u ovoj priči vezan je za Einsteinovu kosmološku konstantu. Kada je Einstein razvijao opštu teoriju relativnosti, kosmološka konstanta Λ omogućila mu je da u jednačine uvede svojstvo koje je moglo podržati statičan svemir. Nakon otkrića širenja svemira činilo se da je taj dodatak nepotreban. Decenijama kasnije, upravo se Λ vratila kao najjednostavniji matematički opis tamne energije.

Važno je, međutim, ne pretvoriti priču o "najvećoj grešci" u legendu koja je jednostavnija od historije. Einsteinova kosmološka konstanta nije bila besmislena matematička greška; bila je odgovor na tadašnje razumijevanje svemira. Danas ista veličina dobija sasvim drugačiji

fizički kontekst. Ako je tamna energija zaista kosmološka konstanta, ona nije samo neka nepoznata supstanca koja se kreće kroz prostor, nego svojstvo samog prostora-vremena ili vakuuma.

Tu se javlja još veća misterija. Zašto je vrijednost Λ upravo takva kakva jeste? Zašto je mala, ali nije nula? I zašto je postala kosmički dominantna tek relativno kasno u historiji svemira? Ta pitanja čine problem tamne energije mnogo dubljim od jednostavnog pitanja "šta ubrzava širenje?".

Kvantna teorija polja donosi radikalnu ideju: vakuum nije jednostavno prazna kutija. Kvantna polja imaju osnovno stanje, a fluktuacije polja mogu doprinositi energiji vakuuma. Kada se takva energija spoji s gravitacijom, više nije moguće reći da je apsolutna vrijednost energije nevažna. Gravitacija "vidi" energiju.

Problem nastaje kada pokušamo izračunati očekivanu vakuumsku energiju najjednostavnijim metodama. Procjene zavise od toga do koje energije smatramo da važi teorija, ali na prirodnoj visokoj skali dobijamo rezultat koji je mnogo veći od posmatrane gustoće tamne energije. U popularnoj literaturi često se navodi neslaganje od oko 120 redova veličine.

To nije obična greška tipa "računali smo s pogrešnim znakom". Ako je naivna procjena uzeta doslovno, svemir bi imao toliko vakuumske energije da bi njegova dinamika izgledala potpuno drugačije od one koju posmatramo. Činjenica da postoje galaksije, zvijezde i mi znači da neki mehanizam mora objasniti zašto je efekt toliko mali.

Ovdje se nauka približava granici na kojoj više nije dovoljno dodavati još jedan parametar. Tamna energija povezuje kosmologiju, kvantnu teoriju polja i gravitaciju. Problem vakuuma je jedan od razloga zbog kojih mnogi fizičari očekuju da će konačno rješenje zahtijevati dublju teoriju od sadašnjih teorija kvantnih polja i opšte relativnosti pojedinačno.

Kada se u jednu sliku spoje posmatranja galaksija, jata, gravitacionog sočiva, kosmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja i ubranog širenja, dobija se standardni kosmološki model Λ CDM. Slova označavaju hladnu tamnu materiju (eng. Cold Dark Matter) i kosmološku konstantu Λ . U gruboj savremenoj slici, tek oko pet posto ukupnog kosmičkog sadržaja čini obična materija, oko četvrtine tamna materija, a približno sedam desetina tamna energija. Tačni brojevi zavise od skupa podataka i parametara modela, ali odnos je ono što je najvažnije.

Freese je tu sliku duhovito pretvorila u "kosmički koktel": ono što poznajemo iz svakodnevnog iskustva čini samo mali dio recepta. Clegg i Natarajan koriste sličnu ideju da bi pokazali koliko je dramatično promijenjena naša predstava o kosmosu.

Ali postoji zamka u načinu na koji govorimo o ovim procentima. Oni nisu nezavisno izmjereni kao da smo stavili svemir na vagu i očitali tri broja. Oni su rezultat modela koji istovremeno pokušava objasniti više različitih opažanja. Upravo zato je Λ CDM toliko moćan: jedan okvir uspješno povezuje različite pojave. Ali upravo zato treba biti oprezan: ako se u budućnosti pojavi sistematsko neslaganje, ono može biti znak da nije pogrešan samo jedan broj nego čitava pretpostavka o sastavu kosmosa.

Jedno od najzanimljivijih novijih neslaganja odnosi se na Hubbleovu konstantu, H_0 , broj koji opisuje današnju brzinu širenja svemira. Postoje različiti načini da se ona odredi. Jedan pristup koristi kosmološke podatke iz ranog svemira, posebno strukturu kosmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja, i zatim kroz Λ CDM model zaključuje koja bi današnja vrijednost trebala biti. Drugi pristup koristi kasniji svemir i kosmičku ljestvicu udaljenosti, uključujući cefeide i supernove.

Ako je standardna slika potpuno ispravna i ako su sistematske greške pod kontrolom, ove dvije metode trebale bi se sastati. Umjesto toga,

razlika je postala dovoljno velika da se govori o "Hubbleovoj tenziji".

Ovdje je posebno važno ne pretjerivati. Hubbleova tenzija još nije automatski dokaz nove fizike. U astronomiji sistematske greške mogu biti izuzetno suptilne: kalibracija udaljenosti, svojstva zvijezda, izbor uzorka, modeliranje prašine i drugi efekti mogu pomjeriti rezultat. Ali ako se neslaganje potvrđuje iz nezavisnih metoda, tada postaje nešto drugo: potencijalni prozor kroz koji se može vidjeti fizika izvan standardnog kosmološkog modela.

I tu se vraća ista tema koja prati čitavo poglavlje. Nauka napreduje ne samo kada se dvije stvari slože, nego i kada se tvrdoglavo odbijaju složiti. Zwicky je imao prebrze galaksije. Rubin je imala ravne rotacione krive. Supernove su bile predaleko. Danas imamo različita mjerenja H_0 koja ne daju potpuno isti odgovor. Svaki put anomalija može biti greška, ali može biti i poruka.

17.7 Nevidljiva mreža

Tamna materija nije važna samo zato što objašnjava današnje brzine zvijezda. Ona igra ključnu ulogu u priči o tome kako je svemir izgradio strukturu. U ranom svemiru postoje male nejednakosti u gustini materije. Gravitacija ih vremenom pojačava: malo gušća područja privlače još materije, postaju još gušća i na kraju nastaju zvijezde, galaksije, jata i kosmička mreža.

Ako je dominantna materija sastavljena od čestica koje rano mogu početi gravitaciono da se grupišu i koje ne osjećaju elektromagnetni pritisak kao obična barionska materija, struktura može početi da se gradi na način koji odgovara posmatranom svemiru. To je jedan od razloga zbog kojih je hladna tamna materija postala centralna u standardnim simulacijama kosmičke strukture.

Natarajan u knjizi "Mapping the Heavens" širu priču predstavlja kao promjenu našeg kosmičkog kartografskog instinkta. Nekada smo

pokušavali napraviti mapu zvijezda i galaksija; danas pokušavamo mapirati i gravitacionu mrežu koja ih drži na okupu. Gravitaciono sočivo je u tom smislu više od metode mjerenja: ono omogućava da pravimo mape mase koja nije direktno vidljiva.

Kada se na velikim skalama simulira razvoj svemira, tamna materija postaje neka vrsta nevidljive mreže. Gas pada u gravitacione potencijale, zvijezde se formiraju u galaksijama, galaksije se spajaju, jata rastu. Vidljivi svemir tako izgleda kao svjetleća površina nečega mnogo većeg što ne možemo direktno fotografisati.

17.8 Od čega zavisi budućnost kosmosa?

Sudbina svemira zavisi od prirode tamne energije. Ako je ona zaista kosmološka konstanta, ubrzano širenje će se nastaviti. Galaksije koje nisu gravitaciono vezane za našu lokalnu grupu postepeno će se udaljavati iz našeg vidljivog horizonta. Formiranje novih zvijezda će se smanjivati kako se gas troši, a kosmos će postajati sve hladniji i tamniji. Taj scenario često se naziva "veliko smrzavanje" ili "toplotna smrt".

Ali kosmološka konstanta nije jedina mogućnost. Ako je tamna energija dinamička komponenta, njen intenzitet može evoluirati kroz vrijeme. Jedna mogućnost je tzv. kvintesencija, polje čija se gustoća mijenja. Druga, ekstremnija mogućnost uključuje takozvanu fantomsku energiju, za koju je efektivna jednačina stanja ispod vrijednosti -1 . U određenim modelima tada ubrzanje postaje sve snažnije i završava scenarijem "velikog rascjepa".

U tom hipotetičkom scenariju redoslijed je gotovo nadrealan: prvo bi se razdvajale gravitaciono vezane velike strukture, zatim galaksije, kasnije zvjezdani sistemi, a u krajnjoj fazi i sve manje vezane strukture. Važno je naglasiti da ovo nije predviđanje da će se "veliki rascjep" i dogoditi. To je posljedica određenih modela tamne energije. Ako je Λ CDM tačan, takva katastrofa nije potrebna.

Postoji i suprotan ekstrem: ako bi tamna energija oslabila ili promijenila znak, širenje bi se jednog dana moglo zaustaviti i preći u kontrakciju, otvarajući mogućnost "velikog sažimanja". Današnja opažanja favorizuju sliku dugotrajnog ubrzanog širenja, ali buduća mjerenja mogu preciznije odrediti da li je tamna energija zaista konstanta ili nešto dinamičko.

17.9 Koliko zapravo znamo?

Postoji nešto uzbudljivo u činjenici da se priča o tamnoj materiji i tamnoj energiji ne završava otkrićem, nego otvorenim pitanjem. U mnogim oblastima fizike nakon dugog eksperimentisanja dobijemo novu česticu, novu vrijednost ili novu jednačinu. Ovdje smo dobili nešto neobičnije: vrlo precizan opis posljedica i veoma slabu ideju o uzroku.

Znamo da galaksije imaju dinamiku koju vidljiva materija sama ne objašnjava u okviru obične Newtonove gravitacije. Znamo da jata pokazuju višak gravitacione mase. Znamo da gravitaciono sočivo mapira masu tamo gdje nema odgovarajuće svjetlosti. Znamo da kosmička struktura i rana kosmologija snažno podržavaju prisustvo hladne nebarionske komponente. Znamo i da se širenje svemira ubrzava. Ali između "znamo da nešto postoji" i "znamo šta je to" nalazi se ogromna provalija.

To je razlog zbog kojeg riječ "tamno" može biti varljiva. Tamna materija nije nužno tamna u smislu da je crna. Ona je tamna zato što nije direktno vidljiva kroz elektromagnetno zračenje. Tamna energija nije nužno energija koju bismo jednog dana mogli sipati u rezervoar. To je naziv za kosmički efekt koji trenutno opisujemo kao komponentu s negativnim pritiskom ili kao kosmološku konstantu.

Drugim riječima, jezik je ovdje skromniji nego što ponekad zvuči. Imena označavaju prazna mjesta u našem razumijevanju. "Tamna materija" kaže: postoji gravitacioni efekt koji se ponaša kao materija. "Tamna energija" kaže: postoji efekt odgovoran za ubrzano širenje.

Ni jedno ni drugo ime samo po sebi ne govori šta se nalazi iza pojave.

Na kraju se vraćamo broju koji je toliko puta ponovljen da lako izgubi svoju neobičnost: oko pet posto. To je približan udio obične barionske materije u savremenoj kosmološkoj slici. Ali tih pet posto uključuje sve što nam je intuitivno poznato. Uključuje atome našeg tijela, Zemlju pod nogama, Sunce, planete, međuzvezdani gas, teleskope, detektore, knjige i same fizičare koji pokušavaju razumjeti ostatak.

Ako je Λ CDM približno tačan, najveći dio svemira nije sastavljen od materije kakvu poznajemo. Oko četvrtine pripada tamnoj materiji, a oko dvije trećine tamnoj energiji. Naša svakodnevna intuicija tako je izgrađena na manjinskom sastojku kosmičke stvarnosti.

Ali postoji još dublja mogućnost. Možda tamna materija zaista jeste nova vrsta čestice i jednog dana ćemo je uhvatiti u detektoru. Možda će LHC ili neki budući akcelerator proizvesti česticu koja pripada novom sektoru. Možda će teleskopi otkriti novi trag aksiona ili sterilnog neutrina. Možda će gravitaciono sočivo, precizna kosmologija i simulacije nastaviti da potvrđuju Λ CDM. A možda će se pojaviti posmatranje koje će nas natjerati da promijenimo samu teoriju gravitacije.

Nauka nema obavezu da čuva lijepu priču. Ako se podaci ne uklapaju, teorija mora da se mijenja. To je upravo ono što ovu temu čini toliko važnom. Tamna materija i tamna energija nisu samo dvije stavke u tabeli kosmoloških parametara. One su mjesta na kojima sadašnja fizika pokazuje gdje joj nedostaje komad slagalice.

Možda će taj komad biti nova čestica. Možda novo polje. Možda nova teorija gravitacije. Možda nešto što danas još ne možemo ni pravilno imenovati. Ali već sama činjenica da možemo izračunati koliko nečega ima, pratiti njegove gravitacione efekte i mapirati

njegovu raspodjelu, a da ne znamo šta je to, pokazuje koliko je moćna naučna metoda.

I zato je "Nevidljivi svemir" možda pogrešan naziv poglavlja. On nije potpuno nevidljiv. Naprotiv: vidimo ga gotovo svuda - u brzini zvijezda, u obliku galaksija, u savijanju svjetlosti, u rastu kosmičke mreže i u ubrzanju širenja prostora. Ono što ne vidimo nije njegov trag. Ne vidimo njegovu prirodu.

To je možda najčudnija lekcija moderne kosmologije: ponekad najvažniji objekti u nauci nisu oni koje možemo pokazati prstom, nego oni čije odsustvo iz našeg objašnjenja više ne možemo ignorisati.

17.10 Najveći dio stvarnosti nema ime

Ako sutra otkrijemo WIMP, dobićemo mnogo više od imena čestice. Dobili bismo prozor u fiziku izvan Standardnog modela, informaciju o ranom svemiru i vjerovatno novi skup pitanja o tome kako se ta čestica uklapa u širu teoriju. Ako otkrijemo aksion, otvorio bi se potpuno drugačiji put kroz fiziku kvantnih polja i moguće rješenje jednog drugog fundamentalnog problema. Ako se pokaže da je MOND ili neka njegova relativistička verzija bolji opis prirode, posljedice bi bile još dramatičnije: morali bismo mijenjati naše razumijevanje gravitacije. Ako se tamna energija pokaže kao dinamičko polje, dobili bismo novu fiziku kosmičkog prostora.

Zato nije sasvim tačno reći da tražimo samo "nedostajuću masu". Tražimo komad teorije. Tamna materija i tamna energija su mjesta gdje se astronomija, fizika čestica, gravitacija i kosmologija preklapaju. Eksperiment pod zemljom, akcelerator u CERN-u, teleskop koji mjeri supernove i satelit koji mapira mikrovalno pozadinsko zračenje zapravo postavljaju različite verzije istog pitanja: od čega je napravljen svemir i koji zakoni upravljaju njegovim razvojem?

Možda će se jednog dana ispostaviti da je tamna materija zaista čestica, a tamna energija kosmološka konstanta. Tada će sadašnja slika izgledati kao jedna od velikih uspješnih sinteza fizike. Ali moguće je i da će buduća teorija pokazati da smo nekoliko različitih anomalija pokušavali objasniti sa dva imena koja su samo privremeno popunila praznine. Historija fizike već poznaje takve trenutke: ono što je nekada izgledalo kao zaseban fenomen kasnije postane dio dublje teorije. Najzanimljivije je što nijedan od tih ishoda ne umanjuje vrijednost onoga što danas znamo. Naprotiv. Naučna vrijednost Λ CDM-a nije u tome što je posljednja riječ, nego u tome što veoma precizno povezuje ogroman broj opažanja i zato jasno pokazuje gdje počinju problemi. Dobra teorija ne skriva svoje granice. Ona ih čini mjerljivim.

A granice su ovdje neobično velike. Znamo gdje je većina gravitacione mase. Znamo kako utiče na galaksije. Znamo kako oblikuje kosmičku mrežu. Znamo da se svemir ubrzava. Znamo približne omjere njegovih glavnih komponenti. Ali kada pokušamo postaviti jednostavno pitanje "šta je to?", odgovor još uvijek nije spreman.

Zato naslov ovog poglavlja ne znači da je većina svemira skrivena iza neke kosmičke zavjese. Tamni svemir je svuda oko nas. Njegovo prisustvo je utkano u gotovo svaku veliku strukturu koju gledamo kroz teleskop. Nevidljivost se ne odnosi na posljedice. Odnosi se na prirodu uzroka.

Možda je upravo to najljepša i najneugodnija lekcija koju nam moderna kosmologija može dati. Čovjek je uspio napraviti mapu svemira čiji najveći dio ne može direktno vidjeti. Uspio je iz gravitacije zaključiti postojanje nepoznate mase, iz savijanja svjetlosti napraviti mapu nevidljive strukture i iz udaljenih supernova zaključiti da se sam prostor širi ubrzano. A onda je, nakon svega toga, morao priznati da još ne zna šta čini većinu stvarnosti.

Literatura

- [1] Sanders, R. H. (2010). The Dark Matter Problem: A Historical Perspective. Cambridge: Cambridge University Press.
- [2] Bertone, G. (2013). Behind the Scenes of the Universe: From the Higgs to Dark Matter. Oxford: Oxford University Press.
- [3] Clegg, B. (2019). Dark Matter & Dark Energy: The Hidden 95% of the Universe. London: Icon Books.
- [4] Hooper, D. (2007). Dark Cosmos: In Search of Our Universe's Missing Mass and Energy. New York: HarperCollins.
- [5] Nicolson, I. (2007). Dark Side of the Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Fate of the Cosmos. Bristol: Canopus Publishing.
- [6] Gates, E. (2009). Einstein's Telescope: The Hunt for Dark Matter and Dark Energy in the Universe. New York: W. W. Norton.
- [7] Natarajan, P. (2016). Mapping the Heavens: The Radical Scientific Ideas That Reveal the Cosmos. New Haven: Yale University Press.
- [8] Panek, R. (2011). The 4 Percent Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality. Boston: Houghton Mifflin Harcourt.
- [9] Randall, L. (2015). Dark Matter and the Dinosaurs: The Astounding Interconnectedness of the Universe. New York: Ecco.
- [10] Freese, K. (2014). The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter. Princeton: Princeton University Press.
- [11] XENON Collaboration (2024-2026). Rezultati eksperimenta XENONnT: potraga za tamnom materijom i dostizanje "neutrinske magle" (koherentno rasijanje solarnih 8B neutrina). arXiv:2409.17868.
- [12] LZ (LUX-ZEPLIN) Collaboration (2026). Search for dark matter particle interactions in an extended nuclear recoil energy window with the LUX-ZEPLIN (LZ) experiment. arXiv:2609.02823.
- [13] Cai, R.-G., & Wang, S.-J. (2026). The Hubble tension: A decade review. arXiv:2606.20434.

18

Mnoga lica inteligencije

"Kad bi lav mogao govoriti, ne bismo ga razumjeli." (Ludwig Wittgenstein)



Postoji jedna tiha pretpostavka koju nosimo sa sobom kad god izgovorimo riječ inteligencija: da već znamo kako ona izgleda. Zamišljamo mozak, jezik, rješavanje zadataka, možda računar koji igra šah bolje od svakog čovjeka. U toj slici inteligencija je nešto što se prepoznaje na prvi pogled, jer manje-više liči na nas. Ali čim pokušamo reći šta je ona zapravo, tlo pod nogama počne popuštati.

Da li je inteligencija sposobnost rješavanja problema? Onda je i termostat pomalo inteligentan. Možda je to učenje iz iskustva? Onda uče i bakterije. Da li je to postavljanje ciljeva i njihovo ostvarivanje

uprkos preprekama? Onda cilju teži i korijen biljke koji u mraku zaobilazi kamen tražeći vodu. Svaka definicija koju ponudimo ili propušta ono što nesumnjivo smatramo umnim, ili u svoje okrilje prima pojave koje smo navikli zvati pukom mehanikom.

Problem nije u tome što nam nedostaje prava definicija, nego u tome što pogrešno postavljamo pitanje. Pitamo gdje se inteligencija nalazi, kao da je stvar zatvorena u kutiju, umjesto da pitamo kako se ona ponaša i u koliko se oblika može pojaviti. Kada pitanje okrenemo na tu stranu, otvara se mogućnost koja je istovremeno uzbudljiva i pomalo uznemirujuća: da smo okruženi umovima koje ne prepoznajemo, i da je i naš vlastiti um nešto sasvim drugačije od onoga što nam se čini iznutra.

Pitanje nije samo akademsko. Način na koji odgovorimo na njega određuje koga i šta uvrštavamo u krug bića prema kojima imamo obaveze, kako se odnosimo prema životinjama, a odnedavno i prema mašinama koje sve uvjerljivije oponašaju razgovor. Ako pogriješimo u jednom smjeru, pripisat ćemo um onome što ga nema; ako pogriješimo u drugom, previdjet ćemo um tamo gdje ga ima. Rijetko koje pitanje istovremeno dira i najdublju metafiziku i sasvim svakodnevnu etiku.

Krenut ćemo zato zaobilaznim putem. Umjesto da odmah ponudimo odgovor, prošetat ćemo kroz slučajeve koji ruše naše pretpostavke jednu po jednu: kroz bića koja misle bez mozga, kroz um raspršen po pipcima, kroz osjetilne svjetove u kojima bismo se izgubili, kroz mozak koji izmišlja stvarnost prije nego što je vidi, i, na kraju, kroz mašine koje govore našim jezikom, a možda ne razumiju nijednu riječ. Svaki od tih slučajeva odnijet će po jedan komad naše sigurnosti, dok na kraju ne ostanemo pred pitanjem koje je mnogo dublje od onoga s kojim smo krenuli.

18.1 Šta uopšte tražimo?

Kada bismo napravili spisak svih ponuđenih definicija inteligencije, dobili bismo popis koji se sam sebi protivi. Za jedne je to sposobnost apstraktnog mišljenja, za druge brzina prilagođavanja, za treće moć predviđanja budućnosti, za četvrte jednostavno ono što mjere testovi inteligencije. Problem nije što su te definicije loše. Problem je što svaka od njih hvata jednu nit, a ispušta ostale, pa se nijedna ne može uzdići do konačne.

Zato je korisnije priznati da se iza jedne riječi krije snop različitih pitanja. Mora li um imati mozak, ili je mozak samo jedno od rješenja koje je priroda pronašla? Mora li um imati tijelo, ili može lebdjeti u čistoj apstrakciji? Mora li iza inteligencije stajati život, ili je moguća i u neživom? I, najteže od svega, možemo li uopšte prepoznati inteligenciju koja je toliko drugačija od naše da nema nijednu osobinu koju smo navikli tražiti?

Ta posljednja mogućnost najviše uznemiruje. Mi smo, na kraju krajeva, sudije koje ocjenjuju da li je nešto pametno, a svaki sudija sudi po vlastitoj mjeri. Prepoznajemo inteligenciju kad govori našim jezikom, rješava naše zadatke, kreće se u našem tempu. Sve što je previše sporo, previše raspršeno ili previše strano jednostavno ne ulazi u naše polje pažnje. Moguće je, dakle, da pitanje "šta je inteligencija" u sebi krije skriveno "šta je inteligencija koja liči na nas", a to su dva vrlo različita pitanja.

Ima još jedna zamka, suptilnija od svih. Skloni smo misliti o inteligenciji kao o jednoj ljestvici, s kamenom na dnu i čovjekom na vrhu, uz sve ostalo poredano između. Ali priroda ne poznaje takvu ljestvicu. Pas nadmašuje čovjeka u svijetu mirisa jednako uvjerljivo koliko ga čovjek nadmašuje u algebri. Ne postoji jedno mjerilo pameti, nego mnoštvo sposobnosti, svaka skrojena za svoj zadatak. Uspoređivati ih po jednoj osi jednako je besmisleno kao pitati da li je čekić bolji od pile.

Da bismo se odmaknuli od vlastitog odraza u ogledalu, najbolje je krenuti od slučajeva koji nas tjeraju da protrljamo oči. Od bića bez mozga koja ipak rješavaju probleme, od bića s mozgom koji ni po čemu ne liči na naš, i od svjetova osjeta toliko drugačijih od našeg da bismo, uronjeni u njih, prestali vjerovati da uopšte poznajemo stvarnost.

18.2 Um bez mozga

Prva pukotina u uobičajenoj slici pojavljuje se čim shvatimo da rješavanje problema ne zahtijeva ništa što bismo prepoznali kao mozak. Sluzava plijesan, jednoćelijski organizam *Physarum polycephalum*, nema nervni sistem, nema neurone, nema ništa što bismo nazvali centrom odlučivanja. Pa ipak, kada je stavljena u lavirint s hranom na dva kraja, ta žućkasta masa povukla se iz slijepih hodnika i razapela svoje tijelo tačno duž najkraćeg puta između izvora hrane. U jednom kasnijem pokusu naučnici su rasporedili zobene pahulje po mapi Japana, na mjestima gdje leže gradovi oko Tokija. Plijesan je izrasla u mrežu veza koja je po efikasnosti bila začuđujuće slična stvarnoj mreži tokijske željeznice, koju su projektovale inženjeri. Organizam bez ijednog neurona riješio je optimizacijski zadatak nad kojim bi se i čovjek s olovkom oznojio.

Slične priče stižu iz svijeta biljaka. Mimoza, biljka koja sklapa listove na dodir, nakon ponovljenog bezopasnog uznemiravanja prestaje reagovati, kao da je naučila da opasnosti nema, i to naučeno ponašanje zadržava sedmicama. Rezultati takvih pokusa su osporavani i o njima se još raspravlja, ali sama činjenica da ozbiljno raspravljamo o pamćenju kod bića bez nervnog sistema pokazuje koliko su nam granice pojma postale nesigurne. Ni imuni sistem nije ništa manje zagonetan: on pamti neprijatelje s kojima se sreo prije više decenija, razlikuje svoje od tuđeg i uči na iskustvu, a nema nijedan neuron.

I najskromnija bakterija donosi neku vrstu odluke. Plivajući, ona neprestano upoređuje koncentraciju hrane sada s onom maloprije, i po toj razlici bira hoće li nastaviti pravo ili se nasumično preokrenuti i krenuti iznova. To je, u najsićušnijem obliku, isti posao koji radi i naš mozak: mjeriti svijet, upoređivati ga s očekivanjem i djelovati da se stanje popravi. Mnoge bakterije čak i razgovaraju hemijskim signalima, broje se, i tek kada ih se skupi dovoljno, zajednički pokreću ponašanja koja pojedinačna ćelija ne bi mogla izvesti.

Najdalje u tom smjeru otišao je biolog Michael Levin, čiji istraživački program pomjera granicu između materije, organizma i uma na način koji mnoge uznemiruje. Levin proučava bioelektricitet, sitne razlike u naboju između ćelija, koje tijelo koristi kao neku vrstu unutrašnjeg nacrta oblika. U njegovoj laboratoriji planarije, sitni crvi poznati po sposobnosti obnavljanja, mogu se navesti da iz odsječenog dijela izrastu s dvije glave umjesto jedne, i da tu izmijenjenu shemu tijela pamte kroz naredne cikluse regeneracije, iako im se genetski kod uopšte nije promijenio. Pamćenje oblika, dakle, ne mora ležati samo u genima; može biti zapisano i u obrascu električne aktivnosti tkiva.

Iz istog programa nikli su i ksenoboti, sićušni sklopovi napravljeni od žabljih ćelija koje su, oslobođene svoje uobičajene uloge, počele same graditi nova, pokretna tijela. Ti sklopovi plivaju, zacjeljuju kada ih se ošteti, a u nekim uslovima čak i skupljaju rasute ćelije u nove kopije samih sebe. Nijedan inženjer im nije rekao šta da rade; sposobnost da teže nekom obliku i da ga održe bila je već upisana u samu tvar od koje su načinjeni.

Levin iz svega toga izvlači radikalni zaključak. Sposobnost da se teži cilju, da se prepozna odstupanje od željenog stanja i da se ono ispravi, nije rezervisana za mozgovu. Ona postoji, u sve slabijim oblicima, sve do razine pojedinačne ćelije, koja na svoj način "rješava problem" kako da od dostupnih dijelova izgradi ispravno tkivo. Svaki takav sistem, kaže Levin, ima svoj domet ciljeva do

kojih može posezati, od ćelije koja se brine samo za lokalnu ravnotežu, preko organa, do bića koje planira godine unaprijed. Um u toj slici nije nešto što se naglo pojavi kada se sakupi dovoljno neurona, nego nešto što blijedi postepeno, poput svjetlosti koja se stišava, ali nikada sasvim ne ugasi.

Filozof Daniel Dennett ponudio je pojam koji ovdje savršeno pristaje: kompetencija bez razumijevanja. Bakterija koja pliva prema hrani izuzetno je kompetentna, a da nema pojma šta radi niti zašto. Priroda je puna takve umješnosti bez svijesti o njoj. Ako smo spremni prihvatiti da je kompetencija stvarna i tamo gdje nema nikakvog razumijevanja, onda inteligenciju moramo prestatu gledati kao svjetlo koje se ili upali ili ne upali, i početi je gledati kao nešto što dolazi u bezbroj nijansi.

18.3 Um raspršen po krakovima

Ako nas bića bez mozga tjeraju da spustimo donju granicu, hobotnica nas tjera da napustimo pretpostavku da um mora biti organizovan poput našeg. Filozof Peter Godfrey-Smith opisuje glavonošce kao možda najbliže susretu s inteligentnim vanzemalcem koji ćemo ikada doživjeti, a da pritom uopšte ne napustimo Zemlju. Razlog je u historiji: linija koja vodi do hobotnice i linija koja vodi do nas razišle su se prije više od pola milijarde godina, davno prije nego što je iko imao išta nalik mozgu. Složeni nervni sistem nastao je, dakle, najmanje dvaput, nezavisno, i to dvaput različito.

Kod hobotnice ta razlika nije mala. Od pola milijarde njenih neurona, većina se ne nalazi u glavi, nego u krakovima. Svaki krak je donekle samostalan: istražuje, kuša okus onoga što dotakne, reaguje i kada je odsječen od ostatka. Um hobotnice nije jedan zapovjednik koji izdaje naredbe, nego nešto bliže savezu poluautonomnih dijelova koji se dogovaraju. Životinja koja mijenja boju i uzorak kože brže nego što mi trepnemo, a pritom je gotovo sigurno slijepa za boje, pokazuje da

se rješenja za "prepoznati okolinu i uklopiti se u nju" mogu naći na načine koje jedva možemo zamisliti.

Čudnovatosti tu ne prestaju. Glavonošci u ogromnoj mjeri prepravljaju vlastite genetske poruke već nakon što ih pročitaju, kao da su dio nasljeđa zamijenili za trenutnu prilagodljivost. Žive kratko, često tek godinu ili dvije, pa se sva ta bistrina razvije i nestane u treptaju, bez starijih koji bi je prenijeli mlađima. U akvarijima pokazuju lične čudi, dosađuju se, igraju, prepoznaju pojedine ljude i bježe iz posuda uz smišljene podvale. Inteligencija je tu buknila na grani života toliko udaljenoj od naše da nam je istovremeno bliska i potpuno strana.

Pouka nije samo u tome da je hobotnica pametna. Pouka je u tome da mišljenje nije jedinstveni izum koji je evolucija pronašla jednom pa ga posvuda kopirala. Ono je iznova izronilo na različitim granama stabla života, iz sasvim različitih tijela, sa sasvim drugačijom unutrašnjom organizacijom. Ako je um mogao nastati bar dvaput na jednoj planeti, onda pretpostavka da svaka inteligencija mora biti raspoređena oko jednog središnjeg mozga počinje ličiti na provincijsku predrasudu.

Godfrey-Smith dodaje i suptilniju misao. Nervni sistemi, tvrdi on, nisu prvobitno nastali da bi razmišljali, nego da bi uskladili djelovanje, da povežu ono što tijelo osjeti s onim što tijelo učini. Um je, u tom smislu, izrastao iz pokreta, iz potrebe da se mnoštvo mišića i čula sabere u jedno smisljeno djelovanje. To nas već vodi ka sljedećem koraku: ideji da inteligencija nije nešto što se dešava odvojeno od tijela i svijeta, nego upravo na granici gdje se biće i njegova okolina dodiruju.

18.4 Roj koji odlučuje

Do sada smo um tražili unutar jednog tijela, bilo da je sabran u glavi ili raspršen po krakovima. Ali priroda poznaje i inteligenciju razapetu preko mnoštva odvojenih tijela. Kolonija mrava nema nijednog

mrava koji zna plan. Svaki slijedi nekoliko prostih pravila i ostavlja hemijske tragove za drugima. Pa ipak, kolonija kao cjelina pronalazi najkraći put do hrane, raspoređuje radnike prema potrebi, održava temperaturu gnijezda i vodi ratove, kao da iza svega stoji jedan um kojeg nigdje nema.

Pčele idu i korak dalje. Kada se roj podijeli i mora pronaći novi dom, izviđačice odlijeću na sve strane, pa se vraćaju i plešu, a žustrina plesa govori koliko je pronađeno mjesto dobro. Druge pčele odlaze provjeriti najbolje kandidate i, ako se slože, i same zaplešu. Tako se, bez ijednog vođe, kroz nadmetanje i postepeno okupljanje glasova, roj privoli na jednu jedinu odluku, i to gotovo uvijek na najbolju ponudenu. Rojenje nalikuje razmišljanju: mnoštvo pojedinačnih pčela igra ulogu neurona u mozgu koji je i sam napravljen od pčela.

I tu se ponovo javlja isto nelagodno pitanje. Gdje se nalazi um kolonije? Nigdje posebno, a ipak je nesumnjivo prisutan u onome što kolonija čini. A ako je moguć um bez središta, raspoređen po hiljadama tijela koja o njemu ništa ne znaju, onda vrijedi okrenuti pogled prema sebi. Jer i mi smo, na kraju, zajednica desetina biliona ćelija od kojih nijedna ne zna da postoji ja, a koje zajedno tvore biće uvjereno da je jedno i nedjeljivo.

18.5 Svaki stvor u vlastitom svijetu

Prije stotinu godina biolog Jakob von Uexküll uveo je pojam koji bi trebao biti obavezan za svakog ko razmišlja o umu: Umwelt, vlastiti svijet nekog bića. Umwelt nije okolina kakva ona objektivno jeste, nego okolina kakva postoji za to biće, sazdana isključivo od onoga što ono može osjetiti i što mu je važno. Krpelj, u njegovom čuvenom primjeru, živi u svijetu satkanom od tek nekoliko niti: mirisa znoja sisara, topline kože, dodira dlake. Sve ostalo za njega naprosto ne postoji.

Pisac Ed Yong ovu je zamisao pretvorio u putovanje kroz osjetilne svjetove drugih životinja, i to putovanje ostavlja čovjeka poniznim.

Postoje bića koja vide ultraljubičastu svjetlost, koja čuju kroz tlo, koja se orijentišu prema Zemljinom magnetnom polju, koja "vide" toplotu tijela plijena u potpunom mraku, koja opažaju električna polja drugih stvorenja u mutnoj vodi. Ono što mi zovemo stvarnošću tek je uski isječak, jedan kanal na radiju koji ima bezbroj stanica. Svaka životinja okrenuta je svojoj šačici stanica, uvjerena, ako je uopšte išta uvjerena, da čuje cijeli program.

Zašto je to važno za pitanje inteligencije? Zato što opažanje nije pasivno primanje gotovih činjenica, nego već neka vrsta znanja. Svaki Umwelt je model svijeta, sažet i skrojen tako da izdvoji ono što je za to biće pitanje života i smrti, a odbaci sve ostalo. Pčela koja u laticama vidi uzorke nevidljive nama, i po njima nalazi nektar, u tom sažimanju već obavlja nešto duboko srodno mišljenju. Inteligencija ovdje ne počinje u nekom naknadnom razmišljanju o svijetu, nego u samom činu opažanja, u načinu na koji biće izrezuje smislen svijet iz beskonačnog šuma stvarnosti.

Filozof Thomas Nagel je istu granicu iskusio kroz jedno naizgled jednostavno pitanje: kako je to biti šišmiš? Šišmiš svijet doživljava odjekom vlastitog krika, gradeći sliku prostora od zvuka koji se odbija. Možemo o toj sposobnosti znati sve što nauka može reći, a da ipak nemamo ni najblažu predstavu kako je to iznutra. I tu leži neugodno saznanje o nama samima. Mi ne možemo iskoračiti iz vlastitog Umwelta. Naše intuicije o tome šta je pametno oblikovane su onim što naša čula slučajno hvataju i tempom u kojem se naš svijet odvija. Sasvim je moguće da postoje oblici uma za koje smo osjetilno slijepi, jednako kao što je krpelj slijep za sve osim topline i mirisa.

18.6 Mozak koji predviđa

Ako opažanje jeste model svijeta, moramo se zapitati kako taj model uopšte nastaje. Dugo se mislilo da mozak radi otprilike kao fotoaparat: čula prikupe podatke, mozak ih obradi, i tako nastaje

slika svijeta. Novije razumijevanje, koje filozof Andy Clark sažima pod imenom prediktivna obrada (eng. predictive processing), okreće tu sliku naglavačke. Mozak, tvrdi on, nije uređaj koji čeka da mu stignu podaci, nego uređaj koji neprestano pogađa kako svijet izgleda, pa tek onda upoređuje svoje pretpostavke s onim što čula dojavе.

Po toj slici, ono što vidimo nije svjetlost koja ulazi u oko, nego najbolja pretpostavka mozga o tome šta je tu svjetlost izazvalo. Čula ne grade sliku, nego uglavnom samo ispravljaju mozgove pogreške. Opažanje je, kako se ponekad kaže, kontrolisana halucinacija: san usklađen sa stvarnošću tek toliko da nas ne odvede u provaliju. Optičke varke, loši okusi, fantomski udovi koje osjećaju ljudi bez ruke ili noge, čak i djelovanje placeba, sve to postaje razumljivo čim shvatimo koliko je ono što doživljavamo zapravo nacrt mozga, a ne vjeran otisak svijeta.

Posljedica je čudnija nego što se čini na prvi pogled. Ako je ono što doživljavamo najvećim dijelom pretpostavka mozga, onda gotovo cijeli život provodimo unutar vlastitog modela svijeta, a ne u svijetu samom. Očekivanje mijenja okus jela prije nego što ga zagrizemo, boju vina prije nego što ga okusimo, pa i jačinu bola. Ne primamo stvarnost, mi je neprestano dovršavamo. Um nije prozor kroz koji gledamo van, nego radionica u kojoj se svijet iznova sastavlja svakog trena.

Kad se pretpostavke i dojave razilaze, mozak ima dva izbora: da promijeni svoju pretpostavku, ili da promijeni svijet djelovanjem. Ispruži ruku, pomjeri pogled, priđe bliže, dok neslaganje ne nestane. Djelovanje tako postaje nastavak opažanja drugim sredstvima: ne mijenjamo samo sliku da odgovara svijetu, nego i svijet da odgovara slici. Time se u jednu nit povezuju pojave koje su izgledale odvojeno. Opažanje, djelovanje, učenje i planiranje postaju vidovi jednog jedinog posla: smanjivanja iznenađenja, održavanja sklada između unutrašnjeg modela i vanjskog svijeta.

Kad se pitanje tako postavi, granica prema onome iz prethodnih poglavlja odjednom nestaje. Jer i ćelija koja održava svoju unutrašnju ravnotežu, i planarija koja pamti svoj oblik, i sluzava plijesan koja bira najkraći put, na svoj minimalni način rade istu stvar: nose u sebi neku pretpostavku o tome kako treba biti, i djeluju da tu pretpostavku održe uprkos svijetu koji je stalno remeti. Predviđanje budućnosti, makar i najbljeđe, izgleda kao zajednička nit koja povezuje termostat i Bacha.

18.7 Kompetencija bez razumijevanja

Ostaje, međutim, jedno tvrdoglavo pitanje. Ako i bakterija i biljka i ćelija na svoj način obavljaju nešto pametno, gdje je onda razlika između te slijepe umještosti i onoga što radimo mi, kada zaista razumijemo šta činimo? Daniel Dennett je čitavu jednu knjigu, s naslovom koji ide od bakterije do Bacha, posvetio upravo tom rasponu.

Njegov odgovor počiva na obratu koji je i sam Darwin morao progutati. Uobičajeno mislimo da red i svrsishodnost mogu doći samo odozgo, od nekog ko razumije i planira. Darwin je pokazao suprotno: da najsloženija svrsishodnost može nastati odozdo, iz slijepog procesa varijacije i odabira, bez ijednog trenutka razumijevanja. Dennett to zove postepenim dizanjem u prostoru mogućih oblika, uz pomoć "dizalica", a ne "kuka spuštenih s neba". U prirodi postoje razlozi zašto je nešto tako a ne drugačije, a da te razloge niko ne mora imati na umu; oni slobodno lebde, upisani u samu djelotvornost onoga što opstaje.

Iz toga slijedi neočekivan način gledanja na um. Kada nekom biću, ili čak mašini, pripišemo namjere, želje i uvjerenja, mi ne moramo tvrditi da ono uistinu razumije. Mi zauzimamo, kako Dennett kaže, intencionalni stav: opisujemo ga kao da ima ciljeve, jer nam to daje najbolji način da predvidimo šta će uraditi. Dio zagonetke uma time se seli s pitanja "šta je unutra" na pitanje "kako se ponaša i kako ga

najbolje opisujemo". Inteligencija je, bar djelimično, u oku onoga ko predviđa.

Ali Dennett ne završava tu, i to je važno. Kompetencija bez razumijevanja je svuda, no razumijevanje jednom ipak nastaje, i s njim nešto zaista novo. Kod čovjeka se, zahvaljujući jeziku i kulturi, pojavljuje sposobnost da razloge koji su dotad slobodno lebdjeli konačno uhvatimo, imenujemo i prevrćemo po glavi. Riječi i ideje, koje se prenose s uma na um, postale su alati mišljenja jednako moćni kao što je kotač bio alat kretanja. Put od bakterije do Bacha je neprekinut, ali nije ravan; negdje na njemu materija je počela ne samo činiti pametne stvari, nego i shvatati zašto ih čini.

18.8 Mašine koje govore, a ne razumiju

Nijedno razmišljanje o inteligenciji danas ne može zaobići mašine koje, dok ovo pišem, sve uvjerljivije oponašaju ljudski govor i ponašanje. Programi koji predviđaju sljedeću riječ u nizu naučili su to raditi tako dobro da vode razgovore, pišu, prevode i objašnjavaju naizgled bez napora. Prvi susret s njima gotovo neizbježno izazove pomisao: pa ovo razmišlja. A onda dolazi mučnije pitanje: razmišlja li, ili samo izuzetno dobro glumi da razmišlja?

Filozof John Searle davno je, prije nego što su takve mašine postale stvarnost, ponudio misaoni pokus koji ovdje odzvanja. Zamislite čovjeka zatvorenog u sobi, koji ne zna kineski, ali ima ogroman priručnik s pravilima kako na dolazne nizove kineskih znakova odgovoriti drugim nizovima. Onima izvana čini se da soba tečno govori kineski. Pa ipak, tvrdi Searle, unutra niko ne razumije ni riječi; postoji samo mehaničko premetanje simbola. Da li današnje mašine rade išta više od izuzetno brze sobe s pravilima? To je pitanje na koje još nemamo saglasan odgovor.

Dennettov pojam pomaže da se pitanje bar jasno postavi. Ono što te mašine nesumnjivo imaju jest kompetencija, i to zapanjujuća. Ono što je sporno je razumijevanje. Moguće je da smo prvi put u historiji

napravili umješnost bez svijesti o njoj u razmjerama koje nadmašuju svaku bakteriju i svaku biljku, čistu djelotvornost koja proizvodi smislene rečenice ne razumijevajući nijednu. A moguće je i da se, negdje u tim golemim mrežama, u tragovima počinje javljati nešto nalik razumijevanju. Iskreno priznanje glasi da još ne znamo kako bismo tu razliku uopšte izmjerili.

David Deutsch tu unosi važno upozorenje. Prava snaga ljudskog uma, po njemu, nije u ponavljanju obrazaca viđenih u prošlosti, nego u stvaranju posve novih objašnjenja, u sposobnosti da smislimo ono što se nikada nije dogodilo. Mašine koje uče iz mora ranije napisanog teksta izvrsne su u prvom, ali još ne pokazuju drugo; one vješto premeću ono što je čovječanstvo već pomislilo.

Douglas Hofstadter, koji je decenijama branio ideju da um ne zavisi od svoje podloge i da bi u načelu mogao živjeti i u mašini, priznao je nelagodu pred tim mašinama: upravo zato što je vjerovao da je mišljenje moguće u kremenu, uznemirilo ga je koliko uvjerljivo one mogu oponašati misao a da, čini se, iza toga nema nikoga. Možda je najvažnije što nam te mašine donose baš to: primoravaju nas da priznamo koliko slabo razumijemo šta zapravo tražimo kad tražimo um.

Ono što te mašine već sada nesumnjivo rade je da nas hvataju u vlastitoj zamci. Ne možemo se othrvati da im pripišemo namjere i osjećaje čim progovore glatkom rečenicom, jednako kao što ih pripisujemo psu ili čak automobilu koji neće da upali. Intencionalni stav koji je Dennett opisao uključuje se sam od sebe. Zato je pošteno priznati da odgovor na pitanje razumiju li mašine možda neće doći iz njih, nego iz nas: iz toga koliko smo spremni preispitati šta smo oduvijek podrazumijevali pod razumijevanjem. Mašina koja savršeno oponaša um ogledalo je u koje je neugodno dugo gledati.

18.9 Red za džabe

Svi ovi primjeri dijele jednu tihu pretpostavku: da negdje mora postojati organizacija, uređenost iz koje inteligencija može izrasti. Odakle onda ta uređenost? Uobičajeni odgovor glasi: od prirodnog odabira, koji strpljivo bira ono što funkcionira. Biolog Stuart Kauffman upozorio je, međutim, da odabir nije jedini izvor reda. Priroda, tvrdi on, dobija dio uređenosti besplatno, samim tim što su njeni sistemi umreženi na određene načine.

Kauffman je proučavao mreže mnoštva elemenata koji jedni druge uključuju i isključuju. Pokazalo se da takve mreže, kada dostignu određenu gustinu veza, spontano upadaju u mali broj urednih, ponovljivih obrazaca ponašanja, umjesto da tonu u kaos. Red se, dakle, ne mora mukotrpno graditi; on ponekad naprosto izbije iz same strukture povezanosti. Kauffman je slutio da je i sam život mogao započeti tako, kao skup molekula koji zajedno katalizuju vlastito nastajanje, mreža koja održava samu sebe prije nego što je iko išta odabrao. Najzanimljiviji sistemi, primijetio je, ne leže ni u krutom redu ni u čistom haosu, nego na uskoj granici između njih, na rubu haosa, gdje su istovremeno dovoljno stabilni da pamte i dovoljno gipki da se mijenjaju.

Fizičar Philip Ball pokazao je koliko su takvi samonikli obrasci sveprisutni u prirodi. Rijeke koje se granaju u delte, munje, krošnje drveća, žile lista, krvni sudovi, pa i sami ogranci nervnih ćelija, svi slijede istu geometriju grananja, jer je grananje najjeftiniji način da se nešto raspodijeli po prostoru. Zapanjujuće je koliko malo pravila treba da nastane toliko složenosti; ista matematika oblikuje riječnu deltu i pluća i mrežu neurona u mozgu. Priroda, izgleda, ne izmišlja svaki put iznova, nego poseže za istim rješenjima kad god se isti problem ponovi.

Ista pravila daju i mjerljive pravilnosti. Grane se u drvetu, rijeci i krvotoku razdvajaju pod začuđujuće sličnim uglovima, a debljina

cijevi koja se grana slijedi isti odnos bilo da je riječ o arteriji ili o rukavcu delte, jer je to najekonomičniji način da se tečnost razvede uz najmanji gubitak. Priroda ne uči te odnose; oni izvire iz fizike protoka i geometrije prostora. Kad u mozgu vidimo raskošno razgranata stabla neurona, gledamo isti drevni obrazac, sada u službi nečega što će naučiti, upamtiti i, na kraju, pomisliti.

I tu se krije obrat koji vodi u srce ovog poglavlja. Sama građa mozga, ta gusta razgranata mreža, prirodni je obrazac srodan rijeci i drvetu. Podloga na kojoj počiva naše mišljenje nije neki natprirodni izuzetak, nego nastavak istog stvaralaštva oblika koje nalazimo posvuda u neživoj i živoj prirodi. A ako organizacija dolazi prije uma i omogućava ga, nameće se drsko pitanje: nije li već i svaki samoodrživi obrazac, svaka struktura koja se bori da opstane, najsićušnija najava onoga što ćemo, na višim razinama, nazvati mišljenjem?

18.10 Obrazac koji misli

Uzmimo tu misao ozbiljno i povucimo je do kraja. Plamen svijee izgleda kao stvar, ali to nije. Materija kroz njega neprestano prolazi; molekule koje sada gore za tren su nestale, a plamen ostaje isti. On nije komad materije, nego postojan proces, oblik koji se održava dok kroz njega teče gorivo. Isto vrijedi za vrtlog u rijeci: stvaran je, ima granice i ponašanje, a ipak nije zaseban predmet, nego uzorak kretanja vode koja se stalno smjenjuje. Kroz naše tijelo, uostalom, materija protiče jednako neumoljivo; atomi od kojih smo danas sazdani nisu oni od prije nekoliko godina. Ono što traje nismo mi kao materija, nego mi kao obrazac.

Douglas Hofstadter je predložio da bi i ono što zovemo "ja" moglo biti upravo takva vrsta stvari, tačnije, takva vrsta ne-stvari. Kada neki sistem postane dovoljno složen da počne graditi modele svijeta, a među tim modelima i model samoga sebe, nastaje petlja koja pokazuje natrag na sebe. Hofstadter je zove čudnom petljom (eng.

strange loop). "Ja" nije sitno biće koje sjedi negdje u glavi, nego samopozivajući obrazac simbola, vrtlog značenja koji se održava tako što neprestano govori o sebi. Ako je tako, onda um u načelu ne zavisi od toga od čega je napravljen, jednako kao što vrtlog ne zavisi od toga koje su baš molekule vode u njemu ovog trenu.

Ali tu nailazimo na najtvrdi orah cijele priče, koji je filozof i neuronaučnik Terrence Deacon postavio u središte svog razmišljanja. Kako iz svijeta gole materije, koja samo jeste, nastaju stvari koje su određene onim čega nema, ciljem koji tek treba dostići, značenjem koje upućuje na nešto odsutno, svrhom koja je usmjerena u budućnost? Znak nije ono na šta pokazuje; želja nije ono što se želi. Um se bavi upravo takvim odsustvima. Deacon tvrdi da je ključ u ograničenjima: red i svrha nastaju ne od onoga što se dodaje, nego od onoga što se sprječava, od suženja mogućnosti koje usmjerava proces prema nekom ishodu. Živo biće lokalno stvara red tako što nered izbacuje u okolinu; na toj razlici, na onome što je spriječeno da bude drugačije, gradi se, korak po korak, svrhovitost.

Iza te ideje stoji i jedan od najdubljih zakona fizike. Drugi zakon termodinamike kaže da nered u cjelini uvijek raste. Živo biće naizgled prkosi tom zakonu, gradeći i održavajući izuzetnu uređenost, ali prkosi samo prividno: red koji stvara u sebi plaća tako što još više nereda izbacuje u okolinu. Svrhovitost, pamćenje i cilj, tvrdi Deacon, nisu čarolija iznad fizike, nego posljedica načina na koji određeni procesi kroz sebe propuštaju energiju i pritom oblikuju sami sebe. Um se, u toj slici, održava kao uzvodni vrtlog u rijeci koja neumoljivo teče nizvodno, ka sve većem neredu.

Time se pitanje inteligencije neočekivano spaja s onim što je ova knjiga već doticala kada je govorila o ništavilu. Um je jedini dio prirode za koji ono čega nema, moguće a neostvareno, prošlo i buduće, cilj i promašaj, ima jednaku težinu kao ono što jeste. Misliti znači stalno baratati odsutnostima. Možda je zato tako teško smjestiti um u sliku svijeta sačinjenu samo od onoga što postoji: jer um je

upravo mjesto na kojem mogućnost, a ne samo stvarnost, počinje imati posljedice.

18.11 "Ja" koje mozak proizvodi

Ostaje još da se osvrnemo na onog ko u nama, čini se, sve to razumije, na osjećaj da iza očiju sjedi neko ko gleda, misli i odlučuje. Upravo je taj osjećaj, tvrdi filozof Thomas Metzinger, najuvjerljivija iluzija koju mozak proizvodi. Ne postoji, kaže on, malo biće u glavi, nikakav unutrašnji gledalac. Postoji samo model, slika koju mozak neprestano crta o samom organizmu, o njegovom tijelu, položaju, stanju i granicama.

Kvaka je u tome što tu sliku ne doživljavamo kao sliku. Metzinger to naziva prozirnošću modela: mozak ne pokazuje sam čin prikazivanja, pa nam se model nas samih čini kao neposredna stvarnost, a ne kao konstrukcija. Kao što ne vidimo staklo naočala nego svijet kroz njega, tako ne vidimo model sebe nego naprosto sebe. "Ja" je, u toj slici, tunel koji je mozak sagradio, uzak prolaz kroz beskraj informacija, a mi cijeli život živimo unutra, uvjereni da smo mi taj tunel. Da je tako, pokazuju i jednostavni pokusi: gumenu ruku na stolu, ako se miluje istovremeno kad i skrivena prava ruka, mozak nakon nekoliko trenutaka počne osjećati kao vlastitu. Granica onoga što zovemo "ja" pomjeri se za par centimetara, tiho, bez našeg pristanka.

Za pitanje inteligencije to ima prilično krupnu posljedicu. Sjedište uma koje zamišljamo, središnji poznavalac koji sve nadgleda, i sam je proizvod, a ne temelj. Nema nekog komandnog mosta; postoje mreže procesa koji zajedno stvaraju privid komandnog mosta. To se sasvim lijepo slaže sa onime što smo vidjeli: s raspršenim umom hobotnice, s tijelom koje predviđa, s obrascem koji se održava. Inteligencija nema jedno mjesto na kojem "stvarno" boravi, ni kod hobotnice, ni kod nas. Ona je raspodijeljena, modelirana, sastavljena,

čak i onda kada nam se najsnažnije čini da je cijela okupljena u jednoj tački iza čela.

18.12 Znanje, objašnjenje i doseg uma

Ako je sve dosad rečeno tačno, prijeti opasnost da se izgubi razlika koja je ipak stvarna: između bakterije koja pametno pliva i čovjeka koji piše jednačine kojima opisuje početak svemira. Fizičar David Deutsch smatra tu razliku ne razlikom u stepenu, nego u vrsti. Ono što čovjeka izdvaja nije brzina ili pamćenje, nego sposobnost stvaranja objašnjenja, gradnje znanja koje seže daleko izvan svega što smo ikada iskusili. Mi smo, kaže Deutsch, univerzalni tumači: um sposoban da, u načelu, razumije bilo šta što se uopšte može razumjeti.

Znanje u Deutschovoj slici nije puki zapis podataka, nego nešto s dosegom. Ispravno objašnjenje o atomima jednako vrijedi ovdje i u srcu daleke zvijezde koju nikada nećemo dotaknuti. Takvo znanje je, tvrdi on, fizička pojava s posljedicama: kada ga jednom neki um stvori, ono može oblikovati svijet daleko izvan tijela u kojem je nastalo. To je iskorak koji planarija i hobotnica ne prave. One sjajno rješavaju probleme svog svijeta; mi smo počeli rješavati probleme svjetova u kojima nikada nismo bili, pa i onih koji, možda, nikada neće ni postojati.

Deutsch tu vezu vidi i u samoj prirodi računanja. Postoji, pokazao je još Alan Turing, takozvani univerzalni računar, mašina koja, uz dovoljno vremena i prostora, može oponašati bilo koji drugi mogući računar. Jednom kada se pređe taj prag univerzalnosti, nema više posebnih granica: isti um koji je smislio brojanje mogao je smisliti i geometriju, i muziku, i teoriju svemira. Ljudsko mišljenje je, čini se, prešlo upravo takav prag, i zato se, za razliku od svih drugih umova koje poznajemo, ne zadržava ni na jednoj temi.

A opet, taj iskorak ne mora biti pukotina u prirodi. Fizičar Sean Carroll nudi način da se dvije slike pomire, koji naziva poetskim

naturalizmom. Postoji, kaže on, samo jedan svijet, opisan u posljednjem sloju jezikom čestica i polja, ali o njemu se može istinito govoriti na mnogo razina. Na razini fizike nema želja ni ciljeva; na razini biologije i psihologije ima ih, i te priče su jednako stvarne, samo izrečene drugim rječnikom prikladnim toj razini. Reći da je um "samo" atomi jednako je pogrešno kao reći da je roman "samo" mrlje tinte. Značenje, namjera i znanje stvarni su na svojoj razini, iako u temelju svijeta ne postoji nijedan njihov sastojak.

Ovamo se, na kraju, uklapa i uvid Carla Rovellija, iako je on prvenstveno govorio o vremenu. Svijet, podsjeća Rovelli, u svojoj dubini nije sazdan od stvari nego od događaja, od procesa koji se odvijaju i prepliću, a i samo vrijeme je nešto što izranja iz tih odnosa, a nije unaprijed dati okvir. Ako je tako, onda smo cijelo poglavlje tražili pogrešnu vrstu odgovora. Um nije stvar koju treba pronaći i smjestiti, poput organa ili predmeta. Um je događaj koji traje, proces koji se održava u vremenu, poput plamena, poput vrtloga, poput rijeke koja je uvijek ista i uvijek druga.

18.13 Posljednje pitanje

Šta nam, dakle, ostaje kada saberemo sve ove poglede? Inteligencija se pokazuje ne kao svjetlo koje se pali u mozgu, nego kao obrazac ponašanja koji dolazi u bezbroj jačina i oblika: kao sposobnost bića, tijela, tkiva pa i pojedine ćelije da nose model svoga svijeta, teže nekom stanju i ustraju u tome uprkos otporu. Taj obrazac može se održavati na neuronima, ali i na električnim poljima ćelija, u krakovima hobotnice, u mreži sluzave plijesni, možda jednom i u kremenu naših mašina. Ne mora ličiti na nas da bi bio stvaran, i vjerovatno postoji u oblicima koje, zarobljeni u vlastitom svijetu osjeta, još ne umijemo ni primijetiti.

To saznanje ima dva lica. Jedno je poniznost: moguće je da smo okruženi umovima, od tla pod nogama do kolonija i ekosistema, a da ih ne vidimo jer su prespori, preveliki ili previše strani za našu

pažnju. Drugo je nelagoda okrenuta prema unutra: onaj koji u nama, kako nam se čini, sve to razumije i sam je obrazac, model koji je mozak sagradio, a ne čvrsta tačka od koje je sve počelo. Tražeći tuđe umove, na kraju ostajemo bez pouzdanog tla i pod vlastitim.

Ne treba, međutim, iz svega toga izvući poraz. Činjenica da inteligencija nema jednu jedinu definiciju, jedno mjesto i jedan oblik ne znači da je manje stvarna, nego da je bogatija nego što smo se usudili pretpostaviti. Umjesto usamljenog plamčiaka razuma u tami neživog svemira, dobijamo svemir u kojem mišljenje tinja na bezbroj načina i razina, od ćelije do civilizacije. Nismo izuzetak koji strši iz prirode, nego jedan od njenih najčudnijih plodova.

Vratimo li se putu koji je ova knjiga već prešla, vidimo da se i ovdje ponavlja ista silazna stepenica. Oduzmemo li umu tijelo, ostaje obrazac. Oduzmemo li obrazac, ostaju zakoni koji određuju koji su obrasci uopšte mogući. Oduzmemo li i njih, stojimo pred istim ponorom pred kojim smo stajali govoreći o ništavilu: pred pitanjem šta uopšte mora postojati da bi išta moglo biti spoznato.

Jer možda je najčudnija činjenica u vezi s inteligencijom upravo ta da uopšte postoji. Svemir sazdan od čestica i polja, koji ni o čemu ne mora voditi računa, na jednom je svom sićušnom mjestu savio sam sebe u petlju i počeo praviti model samoga sebe, pitati odakle je došao i kuda ide. Nije najveća zagonetka to što smo pametni. Najveća je zagonetka što stvarnost, u kojoj u temelju nema nijedne misli, ipak dopušta da nastanu bića koja je mogu misliti, i da se, kroz njih, na tren pogleda u vlastito lice.

Literatura

- [1] Godfrey-Smith, P. (2016). *Other Minds: The Octopus, the Sea, and the Deep Origins of Consciousness*. New York: Farrar, Straus and Giroux.
- [2] Yong, E. (2022). *An Immense World: How Animal Senses Reveal the Hidden Realms Around Us*. New York: Random House.

- [3] Dennett, D. C. (2017). *From Bacteria to Bach and Back: The Evolution of Minds*. New York: W. W. Norton.
- [4] Hofstadter, D. R. (2007). *I Am a Strange Loop*. New York: Basic Books.
- [5] Deacon, T. W. (2011). *Incomplete Nature: How Mind Emerged from Matter*. New York: W. W. Norton.
- [6] Clark, A. (2016). *Surfing Uncertainty: Prediction, Action, and the Embodied Mind*. Oxford: Oxford University Press.
- [7] Metzinger, T. (2009). *The Ego Tunnel: The Science of the Mind and the Myth of the Self*. New York: Basic Books.
- [8] Kauffman, S. A. (1995). *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford: Oxford University Press.
- [9] Ball, P. (2009). *Branches: Nature's Patterns - A Tapestry in Three Parts*. Oxford: Oxford University Press.
- [10] Carroll, S. (2016). *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*. New York: Dutton.
- [11] Deutsch, D. (1997). *The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes - and Its Implications*. London: Allen Lane.
- [12] Rovelli, C. (2018). *The Order of Time*. New York: Riverhead Books.
- [13] Levin, M. (2019). The Computational Boundary of a "Self": Developmental Bioelectricity Drives Multicellularity and Scale-Free Cognition of All Kinds. *Frontiers in Psychology*, 10, 2688.
- [14] Kriegman, S., Blackiston, D., Levin, M., & Bongard, J. (2020). A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 1853-1859.
- [15] Nakagaki, T., Yamada, H., & Toth, A. (2000). Maze-solving by an amoeboid organism. *Nature*, 407, 470.
- [16] Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebbber, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R., & Nakagaki, T. (2010). Rules for biologically inspired adaptive network design. *Science*, 327, 439-442.
- [17] von Uexküll, J. (2010). *A Foray into the Worlds of Animals and Humans* (prev. J. D. O'Neil). Minneapolis: University of Minnesota Press. (Izbornik 1934.)
- [18] Gagliano, M., Renton, M., Depczynski, M., & Mancuso, S. (2014). Experience teaches plants to learn faster and forget slower. *Oecologia*, 175, 63-72.

- [19] Nagel, T. (1974). What Is It Like to Be a Bat? *The Philosophical Review*, 83(4), 435-450.
- [20] Searle, J. R. (1980). Minds, Brains, and Programs. *Behavioral and Brain Sciences*, 3(3), 417-424.
- [21] Deutsch, D. (2011). *The Beginning of Infinity: Explanations That Transform the World*. London: Allen Lane.

19

Svrha bez dizajnera

"Priroda ništa ne čini uzalud." (Aristotel)



Svako ko je proveo noć uz teleskop pod usamljenom lampom poznaje prizor. Noćni insekti kruže oko svjetla, udaraju u staklo, odlete u mrak i ponovo se vrate, gotovo očajnički. Teško se oteti utisku da nešto žele. Stara priča kaže da se leptiri noću orijentišu prema Mjesecu, držeći stalan ugao prema dalekom izvoru svjetlosti, pa ih blizu lampe isti taj ugao uvlači u spiralu. Priča je bila toliko uvjerljiva da se izučavala u udžbenicima, iako je niko nije provjerio.

Kada je 2024. godine jedan tim istraživača snimio insekte oko umjetnog svjetla brzim kamerama, u tri dimenzije, pokazalo se nešto sasvim drugo. Insekti ne ciljaju svjetlo i ne navigiraju po Mjesecu. Oni okreću leđa prema najsvjetlijem dijelu okoline, jer je u prirodi, stotinama miliona godina, nebo uvijek bilo gore. Taj drevni refleks

drži ih uspravnim u letu. Pored lampe, međutim, "gore" je odjednom postalo sa strane, pa insekt kruži oko izvora, gubi visinu, zastaje i ponekad se prevrne na leđa. Leptir ne želi svjetlo. On samo pokušava ostati uspravan u svijetu u kojem je ono što svijetli oduvijek bilo iznad njega.

Pouka je dvostruka. Prvo, vrlo lako vidimo svrhu tamo gdje je nema. Drugo, iza privida ipak stoji nešto stvarno: refleks postoji zato što je bezbrojnim generacijama pomagao insektima da lete uspravno. Leptir nema namjeru, ali njegov refleks ima funkciju. Između te dvije rečenice krije se jedno od najtvrdokornijih pitanja nauke.

Fizika poznaje samo jednu vrstu odgovora na pitanje "zašto": zato što. Kamen pada zato što na njega djeluje gravitacija. Voda ključa zato što joj je dovedena toplota. Fizika nikada ne kaže "da bi". A biologija bez "da bi" ne može napraviti ni korak. Srce kuca da bi pumpalo krv. Oko postoji da bi se vidjelo. Bakterija pliva prema šećeru da bi se nahranila. Te rečenice nisu pjesnički ukras; bez njih biolog ne bi mogao ni postaviti svoja pitanja. A ipak, ako neko kaže da srce postoji da bi proizvodilo zvuk otkucaja, reći ćemo da griješi, iako srce taj zvuk nesumnjivo proizvodi. Po čemu jedna posljedica postaje svrha, a druga ostaje puki nusproizvod?

U prethodnom poglavlju pitali smo gdje u prirodi počinje mišljenje. Ovdje se spuštamo za stepenicu niže, do pitanja starijeg i temeljnijeg od uma: kako u svijetu u kojem se sve naprosto dešava nastaje nešto što se dešava radi nečega. Put će nas voditi od Aristotela, preko sata pronadenog u travi, termostata i protivavionskog topa, do bakterije koja računa, ćelije koja sama sebe sklapa i, na kraju, do nas, bića koja ne samo da imaju ciljeve nego ih i biraju.

19.1 Prognani uzrok

Aristotel je razlikovao četiri vrste odgovora na pitanje zašto je nešto onakvo kakvo jeste. Materijalni uzrok kaže od čega je stvar napravljena, formalni kakav oblik ima, pokretački šta ju je dovelo u

postojanje, a svrhoviti ili konačni uzrok, telos, radi čega ona postoji. Za kip su to redom mermer, lik boga, vajar i ukras hrama. Za Aristotela konačni uzrok nije bio rezervisan za ljudske proizvode. Žir izraste u hrast zato što je hrast njegov telos, njegovo ispunjenje. Priroda, govorio je, ništa ne čini uzalud.

Zanimljivo je da je Aristotel ozbiljno razmotrio i suprotnu mogućnost. U drugoj knjizi svoje Fizike pita: šta ako kiša ne pada da bi rasla pšenica, nego naprosto pada, a pšenica raste kad se to desi? Šta ako zubi nisu oštri sprijeda i široki pozadi zato da bi jedni grizli a drugi žvakali, nego su se tako složili slučajno, a bića kod kojih se to slučajno desilo preživjela su, dok su ostala propala, kako je naučavao Empedoklo? Aristotel je tu mogućnost odbacio. Ono što se dešava uvijek ili gotovo uvijek, rekao je, ne može biti djelo slučaja. Dvadeset i dva stoljeća kasnije Darwin je taj odlomak naveo u fusnoti kasnijih izdanja Porijekla vrsta, kao jedan od najranijih nagovještaja ideje koju je on sam razradio. Aristotel je držao ključ u ruci i odložio ga.

Moderna nauka rođena je upravo iz progonstva konačnog uzroka. Francis Bacon je zajedljivo uporedio traganje za svrhama u prirodi s djevicom posvećenom Bogu: ništa ne rađa. Galilej je pitao kako tijela padaju, a ne zašto teže padu. Descartes je životinje proglasio složenim mašinama. Newton je ispisao zakone koji planetama ne pripisuju nikakvu želju. Planeta ne kruži oko Sunca da bi nešto postigla; ona u svakom trenutku čini samo ono što joj diktira sila u tom trenutku, a putanja je zbir bezbroj takvih trenutaka. Taj rez bio je izvor snage nove fizike. Umjesto da pita šta priroda smjera, ona je počela pitati kako se stanje mijenja iz trenutka u trenutak, i taj skromniji pristup pokazao se nevjerovatno moćnim.

Pa ipak, i u samom srcu fizike ostao je jedan duh teleologije, dobro poznat svakom ko se bavio optikom. Pierre de Fermat pokazao je 1662. godine da svjetlost između dvije tačke putuje putanjom za koju joj treba najmanje vremena, preciznije, putanjom za koju je vrijeme

putovanja stacionarno, i iz toga izveo zakon loma. Zvuči kao da svjetlost unaprijed zna kuda ide i bira najbrži put, poput spasioca koji dio puta do davljenika pretrči po pijesku, a dio prepliva, jer zna da je na kopnu brži. Maupertuis je osamdesetak godina kasnije tu misao uopštio u načelo najmanjeg djelovanja i u njemu vidio dokaz Božje štedljivosti. Ubrzo se, međutim, pokazalo da su takva načela matematički ekvivalentna lokalnim diferencijalnim jednačinama koje su izveli Euler i Lagrange. Svjetlost ne mora gledati unaprijed; dovoljno je da se u svakoj tački pokorava lokalnom zakonu. Najdublji odgovor dala je tek kvantna elektrodinamika: svjetlost, u određenom smislu, "isprobava" sve moguće putanje, a doprinosi putanja bliskih onoj stacionarnoj zbrajaju se u fazi, dok se svi ostali međusobno poništavaju. Privid izbora posljedica je interferencije, a ne namjere. Fizika je tako naučila važnu lekciju: izraz koji zvuči kao cilj može biti samo drugačiji zapis uzroka.

Sa živim bićima, međutim, taj trik nije uspijevaao. Oko nije samo sklop sočiva koji se pokorava zakonima loma; ono je tu radi gledanja, i to "radi" nije se dalo prevesti ni u kakvo "zato što". Fizika je svrhu protjerala, ali je ona tvrdoglavo ostala da stoji na pragu biologije. Biolog J. B. S. Haldane tu je nelagodu, po predanju, sažeo u šalu koja i danas kruži među biologima: teleologija je za biologa poput ljubavnice, ne može živjeti bez nje, ali ne želi da ga s njom vide u javnosti.

19.2 Sat u travi

Najslavniji pokušaj da se svrha u prirodi pretvori u dokaz dao je sveštenik William Paley 1802. godine. Zamislite, piše on, da hodajući po travi udarite nogom u kamen. Ako se upitate kako je tu dospio, zadovoljit ćete se odgovorom da je oduvijek bio tu. Ali ako na istom mjestu nađete sat, odgovor više ne zadovoljava. Njegovi točkići, opruga i kazaljke oblikovani su i složeni radi jedne jedine stvari, mjerenja vremena. Sat je morao imati tvorca.

Paley je zatim prešao na oko i o njemu pisao s pravim optičarskim žarom. Uporedio ga je s teleskopom i zaključio da je dokaz kako je oko napravljeno za gledanje potpuno isti kao dokaz da je teleskop napravljen da mu pomogne. Sočivo, prilagođavanje žarišne daljine različitim udaljenostima, zjenica koja se sužava na jakom svjetlu, sve je u oku govorilo o nacrtu. Argument je bio toliko jasan da ga je teško bilo odbiti bez osjećaja da se poriče očigledno.

Mladi Charles Darwin, student u Cambridgeu, čitao je Paleya s oduševljenjem. U autobiografiji je kasnije zapisao da mu je Paleyeva logika pričinjavala zadovoljstvo nalik onom koje je nalazio u Euklidu. Možda je upravo zato njegov odgovor bio tako temeljit. Darwin je prihvatio Paleyevu činjenicu, da živa bića izgledaju kao da su projektovana, ali je odbacio njegov zaključak. Varijacija, nasljeđivanje i razlike u preživljavanju, ponavljani kroz bezbroj generacija, proizvode privid nacrtu bez ikakvog crtača. Oko nije nastalo zato što ga je neko zamislio, nego zato što je svaka mala promjena koja je makar malo poboljšala vid donijela svojim nosiocima nešto više potomaka. Daniel Dennett je tu ideju nazvao univerzalnom kiselinom, jer rastvara svaki pojam s kojim dođe u dodir, od porijekla vrsta do porijekla uma.

Postoji, međutim, i jedan paradoks koji se često previdi. Darwin nije ukinuo svrhu u biologiji, nego joj je, po prvi put, dao prirodno uporište. Američki botaničar Asa Gray napisao je 1874. u časopisu *Nature* da treba odati priznanje Darwinu što je prirodnoj nauci vratio teleologiju, a Darwin mu je odgovorio da ga je baš ta primjedba posebno obradovala. Prije Darwina, reći da srce postoji da bi pumpalo krv značilo je pozivati se na Tvorca ili na neku tajanstvenu životnu silu. Poslije Darwina, ta rečenica znači nešto sasvim prizemno: srca koja su bolje pumpala ostavila su za sobom više srca. Svrha je postala zgusnuta historija uspjeha. Zato je pumpanje funkcija srca, a zvuk otkucaja nije. Selekcija je "vidjela" pumpanje; ali za zvuk joj je bilo svejedno.

Oko je Darwinu zadavalo najviše muke. U jednom pismu Asi Grayu priznao je da ga i dalje hvata jeza kad pomisli na oko, a u Porijeklu vrsta posvetio mu je posebno razmatranje: pokazao je da u živom svijetu postoji cijeli niz međustupnjeva, od pjege osjetljive na svjetlo, preko udubljene čašice koja otkriva smjer izvora, do komore s malim otvorom i, na kraju, oka sa sočivom. Svaki stupanj je koristan sam po sebi, pa nijednom nije potrebno da "zna" za sljedeći. Optičar će u oku kralježnjaka primijetiti i nešto što Paleyev argument ne može objasniti. Mrežnjača je okrenuta naopako: svjetlost mora proći kroz slojeve nervnih ćelija i krvnih sudova prije nego što stigne do fotoreceptora, a snop nervnih vlakana probija mrežnjaču na jednom mjestu i ostavlja slijepu mrlju. Nijedan konstruktor optičkih instrumenata ne bi postavio ožičenje ispred senzora. Oko hobotnice, koje je nastalo potpuno nezavisno, nema taj nedostatak. Nesavršenosti su potpis historije, a ne nacrt: selekcija ne projektuje od nule, nego krpi ono što je već zatečeno.

Ali Darwin je, odgovorivši na jedno pitanje, otvorio drugo. Prirodni odabir objašnjava zašto su dijelovi organizma tako dobro prilagođeni, ali on podrazumijeva da već postoje stvari koje se održavaju i razmnožavaju, stvari kojima je, u nekom smislu, stalo do vlastitog opstanka. Selekcija dotjeruje svrhovitost, ali ne objašnjava otkud je prvi put nastalo bilo šta što nečemu teži. Da bi se nešto moglo birati, mora najprije postojati nešto što se trudi da ne nestane. Ta praznina pratit će nas do kraja ovog poglavlja.

19.3 Termostat, torpedo i protivavionski top

Najjednostavnija svrha nije nastala u prirodi, nego u radionici. Ktesibije iz Aleksandrije je u trećem stoljeću prije nove ere regulisao dotok vode u vodeni sat plovkom koji je zatvarao ventil kada bi nivo porastao. Bio je to vjerovatno najstariji poznati uređaj s povratnom spregom. James Watt je 1788. godine na parnu mašinu postavio centrifugalni regulator: dvije kugle na zglobnim krakovima koje se, kada mašina ubrza, razmaknu i smanje dovod pare, a kada uspori,

spuste i otvore ga. James Clerk Maxwell je 1868. u radu "O regulatorima" prvi matematički pokazao zašto takvi uređaji ponekad, umjesto da smire mašinu, počnu divlje oscilovati. Inženjeri su, dakle, gradili mašine koje teže zadanom stanju mnogo prije nego što su filozofi znali šta bi s njima.

Rat je tu inženjersku tradiciju spojio s biologijom. Početkom Drugog svjetskog rata matematičar Norbert Wiener i inženjer Julian Bigelow radili su na Tehnološkom institutu u Massachusettsu na prediktoru za protivavionsku vatru, uređaju koji iz dotadašnje putanje aviona procjenjuje gdje će se on nalaziti kada granata stigne do visine njegovog leta. Pilot nije bio pasivna meta; manevrisao je da bi izbjegao pogodak, pa je prediktor morao nagađati namjeru iz ponašanja. Wiener je u pilotu i topu vidio jedan zatvoreni krug, čovjeka i mašinu vođene istim principom: razlikom između trenutnog stanja i cilja. Fiziolog Arturo Rosenblueth, dugogodišnji saradnik Waltera Cannona, istraživača koji je popularizovao pojam homeostaze, prepoznao je isti krug u živom tijelu, koje neprestano održava temperaturu, šećer u krvi i pritisak unutar uskih granica.

Iz tog susreta nastao je 1943. godine kratki članak od svega sedam stranica, "Ponašanje, svrha i teleologija", koji su potpisala sva trojica. Autori su predložili da se ponašanje, bilo mašine bilo organizma, razvrsta po jednostavnim dihotomijama. Ponašanje je aktivno ili pasivno; aktivno je svrhovito ili nasumično; svrhovito je vođeno povratnom spregom ili nije; ono vođeno povratnom spregom može biti prediktivno ili neprediktivno; a prediktivno može biti prvog, drugog ili višeg reda. Primjeri kojima su to ilustrovali i danas su poučni. Sat je napravljen s namjerom i radi uredno, ali ne teži nijednom konačnom stanju. Rulet je napravljen upravo zato da bude besciljan. Puška se koristi za postizanje cilja, ali pogađanje nije svojstvo same puške. Torpedo s mehanizmom za traženje mete, naprotiv, ima svrhu ugrađenu u vlastito ponašanje.

Svrhovito ponašanje bez povratne sprege, pisali su, vidimo kod zmije koja napada žabu ili žabe koja hvata muhu: pokret je toliko brz da oko nema vremena da ga ispravi usput. Svrhovito ponašanje s povratnom spregom je ono u kojem signali od cilja neprestano ograničavaju izlaz koji bi inače prebacio metu. To je negativna povratna sprega, i ona je, tvrdili su autori, neophodna za svako ponašanje usmjereno cilju.

Najupečatljiviji primjer u članku dolazi iz klinike. Bolesnik s oštećenjem malog mozga u mirovanju ne pokazuje ništa neobično. Ali kada ga zamolite da prinese čašu vode ustima, ruka počne oscilovati, sve jače što je bliže cilju, i voda se prolije. Autori su u tome prepoznali sliku regulatora s nedovoljno prigušenom povratnom spregom, Maxwellov problem u ljudskom tijelu, i pretpostavili da je jedna od glavnih zadaća malog mozga upravo upravljanje povratnim petljama svrhovitog pokreta. Tremor koji se pojačava pri približavanju cilju i danas je jedan od klasičnih znakova oštećenja malog mozga.

Prediktivno ponašanje autori su opisali primjerom koji će prepoznati svako ko se bavio spoljnom balistikom. Ameba samo prati izvor na koji reaguje. Mačka, međutim, ne trči prema mjestu gdje je miš sada, nego prema mjestu gdje će biti; to je predviđanje prvog reda. Gađanje pokretne mete kamenom zahtijeva predviđanje drugog reda, jer treba predvidjeti i putanju mete i putanju kamena, a gađanje praćkom ili lukom još viših redova. Nije slučajnost da je članak izrastao iz rada na upravljanju vatrom: problem protivavionskog topa je upravo problem predviđanja višeg reda. Autori su čak nagovijestili da bi jedna od razlika između čovjeka i ostalih sisara mogla ležati u tome koliko visok red predviđanja nervni sistem uopšte može izvesti.

Najsmjeliji potez članka bio je filozofski. Teleologija je, pisali su, izgubila ugled zato što je podrazumijevala uzrok koji dolazi poslije posljedice, budućnost koja nekako vuče sadašnjost. Oni su predložili drugačiju, skromniju definiciju: svrhovito je ono ponašanje koje je

upravljano greškom, razlikom između sadašnjeg stanja sistema i stanja koje tumačimo kao cilj. Cilj ne djeluje iz budućnosti. Djeluje signal iz sadašnjosti, koji mjeri koliko smo od cilja udaljeni. Teleologija se u tom smislu, zaključili su, ne suprotstavlja determinizmu, nego samo ne-teleologiji. Članak je okrunjen i s dvije duhovite opaske: da je najbolji model mačke, na kraju krajeva, druga mačka, i da nijedno živo biće ne putuje na točkovima, pa bi inženjeri koji bi slijepo oponašali prirodu lokomotivama dali noge umjesto točkova. Pet godina kasnije Wiener je iz tih ideja stvorio novu nauku i nazvao je kibernetikom, po grčkoj riječi za kormilara.

Pa ipak, termostat ostavlja nelagodu. Njegov cilj, recimo dvadeset i jedan stepen, nije njegov. Postavio ga je neko drugi. Termostatu je potpuno svejedno da li je u sobi dvadeset i jedan ili četrdeset stepeni; ako se pokvari, ne gubi ništa. Torpedo koje promaši ne pati. Filozofi tu razlikuju izvedenu i intrinzičnu svrhovitost. Svrha termostata posuđena je od onoga ko ga je napravio i postavio. Kibernetika je objasnila mehaniku težnje, ali nije objasnila kome je stalo. A to "stalo" je upravo ono što živa bića izdvaja od svih mašina koje smo do sada napravili.

19.4 Cilj bez namjere

Biolozi su u međuvremenu tražili riječ kojom bi mogli govoriti o ciljevima bez stida. Našao ju je 1958. godine Colin Pittendrigh, stručnjak za biološke satove: teleonomija. Teleonomija označava usmjerenost ka cilju bez ikakve pretpostavke o svjesnoj namjeri ili budućem uzroku. Riječ je bila pažljivo skovana tako da zvuči kao teleologija, ali da se od nje ogradi, otprilike onako kako se astronomija ogradila od astrologije.

Ernst Mayr je 1974. godine pojam izoštrio razlikovanjem dvije vrste procesa koji "idu nekamo". Teleomatski procesi završavaju u nekom krajnjem stanju samo zato što ih tamo vode zakoni fizike: kamen koji pada, kuglica koja se otkotrlja na dno posude, radioaktivni atom koji

se raspadne. Krajnje stanje je tu, ali nema ničega što bi mu težilo. Teleonomski procesi, nasuprot tome, vođeni su programom, zapisanim uputstvom koje unaprijed sadrži informaciju o cilju: ptica selica koja pronalazi put preko kontinenta, oplođena jajna ćelija koja se razvija u pile. Program je nastao prirodnim odabirom i zapisan je u genima, ili naučen. Svrha je tu stvarna, ali kao zapis prošlosti, a ne kao povlačenje budućnosti. Mayr je istovremeno odlučno odbacio kosmičku teleologiju, ideju da cijela evolucija, ili cijeli svijet, putuje prema nekom unaprijed zadanom cilju.

Najoštrije je problem, međutim, postavio francuski biolog Jacques Monod, nobelovac iz 1965. godine, u knjizi Slučaj i nužnost iz 1970. godine. Monod počinje misaonim pokusom: zamislimo da konstruišemo program koji bi, recimo na Marsu, trebao razlikovati prirodne predmete od umjetnih, onih koje je neko napravio. Program bi tražio pravilnost, ponavljanje i očiglednu svrhovitost oblika. Brzo bi se našao u nevolji. Kristali bi mu izgledali sumnjivo pravilni, a oko kralježnjaka bi s pouzdanjem proglasio artefaktom, rođakom fotoaparata. Živa bića, zaključuje Monod, u tom su smislu čudni predmeti: jedini u prirodi koji su obdareni projektom.

Monod je u živim bićima istakao tri svojstva: teleonomiju, autonomnu morfogenezu, to jest sposobnost da se oblikuju iznutra a ne silama izvana, i reproduktivnu invarijantnost, sposobnost da svoju strukturu vjerno prenesu na potomke. I tu se, kaže on, otvara duboki paradoks. Kamen temeljac naučne metode je postulat objektivnosti: priroda se ne smije objašnjavati pozivanjem na namjere i projekte. A opet, živa bića nesumnjivo imaju projekte. Kako nauka može priznati ono što joj vlastiti temelj zabranjuje? Monodovo rješenje je bilo da invarijantnost dođe prva. Jedini temeljni "projekat" živog bića je prenošenje invarijantnog sadržaja na sljedeću generaciju; sve ostale svrhe, od enzima koji poput Maxwelllovih demona biraju tačno određene molekule do oka koje traži svjetlo, samo su njegove podsvrhe. Svrha je, u Monodovoj slici, kćerka slučaj a nužnosti.

Metafora programa bila je plodna, ali je u njoj ostala skrivena ista zamka kao kod termostata. Računarski program ne želi da bude izvršen. Pomjerivši svrhu u molekulu nasljeđa, Monod je pitanje "kome je stalo" samo premjestio na drugo mjesto. Hemičar Addy Pross pokušao je zato pristupiti istom problemu odozdo, iz hemije. Teleonomija je, kaže on, empirijski neoboriva činjenica; pitanje je samo kako hemija postaje biologija. Njegov odgovor počiva na pojmu koji je nazvao dinamičkom kinetičkom stabilnošću.

Uobičajena stabilnost, ona na koju mislimo kada kažemo da je zlato stabilno, znači da se stvar ne mijenja: atomi ostaju gdje jesu, jer nema energetski povoljnijeg stanja u koje bi prešli. Ali postoji i drugačija stabilnost, stabilnost rijeke ili vodoskoka, koji traju iako kroz njih neprestano protiče nova voda. Populacija molekula koje se same kopiraju stabilna je upravo na taj način: pojedinačne molekule se raspadaju, ali ih replikacija obnavlja brže nego što nestaju. Kada hemija jednom pređe taj prag, pravila igre se mijenjaju. Više ne opstaje ono što je najtrajnije, nego ono što se najefikasnije obnavlja. Iz te kinetičke logike, tvrdi Pross, izrasta teleonomski karakter života: sistem se ponaša kao da ima cilj, održati i umnožiti sebe, jer je to jedini način na koji ta vrsta stabilnosti uopšte može postojati. Kada smo u osmom poglavlju pitali koliko je teško napraviti čovjeka, ovo je bila jedna od tihih prekretnica na tom putu: trenutak kada je materija počela opstajati tako što se mijenja.

19.5 Ono što je samo sebi uzrok

Sedamdesetak godina prije Darwina, Immanuel Kant je u Kritici moći suđenja iz 1790. godine uočio nešto što nije vidio ni Paley ni, stoljeće i po kasnije, kibernetika. Razlika između organizma i sata nije samo u složenosti. U satu jedan dio postoji zbog drugog dijela, ali ne i pomoću njega. Točkić ne proizvodi drugi točkić. Pokvaren sat se ne popravlja sam. Sat ne pravi druge satove.

Drvo, naprotiv, radi sve troje. Proizvodi samo sebe kao vrstu, jer iz njegovog sjemena niče novo drvo. Proizvodi samo sebe kao jedinku, jer raste pretvarajući materiju iz okoline u vlastitu supstancu. I, najvažnije, njegovi dijelovi proizvode jedni druge: list hrani drvo, a drvo hrani list; ako se list odstrani, drvo pati, a ako se drvo posijee, list vene. Kant je takvu tvorevinu nazvao prirodnom svrhom i definisao je kao stvar koja je istovremeno uzrok i posljedica same sebe. Iz toga je izveo pesimističan zaključak: mehaničkim zakonima nikada nećemo objasniti ni nastanak jedne vlati trave. Nikada, pisao je, neće biti Newtona vlati trave. Svrhovitost živog bića možemo koristiti kao vodilju razmišljanja, ali ne i kao pravo objašnjenje.

Stuart Kauffman, koga smo u prošlom poglavlju sreli kao zagovornika "reda za džabe", u knjizi "Svijet s one strane fizike" iz 2019. godine vraća se upravo Kantu. Organizam je, kaže on, kantovska cjelina: tvorevina u kojoj dijelovi postoje za cjelinu i pomoću cjeline. Srce pumpa krv, ali proizvodi i zvuk otkucaja i pomjera tečnost u perikardu (dvoslojna ovojnica srca s tankim slojem tečnosti koja smanjuje trenje). Zašto je funkcija srca pumpanje, a ne zvuk? Zato što je srce dio kantovske cjeline, organizma koji postoji i razmnožava se dijelom upravo zahvaljujući pumpanju, i zato što je selekcija birala organizme, a ne srca. Van takve cjeline, riječ "funkcija" gubi svaki oslonac. Kamen na obali također ima bezbroj posljedica, ali nijedna od njih nije njegova funkcija.

Kauffman tu uvodi i jednu ideju blisku svakom mašincu. Rad je, u termodinamičkom smislu, oslobađanje energije kroz ograničenja: eksplozija goriva u otvorenom prostoru samo zagrije zrak, a ista eksplozija u cilindru, iza klipa, gura klip i pokreće točkove. Cilindar i klip su ograničenja koja usmjeravaju oslobađanje energije. Ali da bi se napravio cilindar, potreban je rad. Čelija, kaže Kauffman, radi nešto što nijedan motor ne može: rad koji obavlja koristi za izgradnju upravo onih ograničenja koja taj rad usmjeravaju, i tako zatvara krug.

On to naziva zatvorenošću ograničenja. Čelije to rade, automobili ne. Automobil ne izgrađuje vlastiti cilindar.

Razlika nije samo tehnička. Mašinu projektuje neko ko je izvana, ko zna šta ona treba raditi, pa njena svrha ostaje kod projektanta. Kantovska cjelina nema projektanta izvan sebe; njena organizacija je istovremeno i proizvod i proizvođač. Zato kod mašine možemo jasno razdvojiti nacrt od izvođenja, a kod organizma ne možemo. Nema mjesta u ćeliji na kojem je zapisano šta je ćelija, odvojeno od procesa koji je čine ćelijom. Genom je blizu takvog zapisa, ali on bez ćelije koja ga čita nije ništa više od hemijski neobično složene molekule.

Početkom sedamdesetih godina dvojica čileanskih biologa, Humberto Maturana i Francisco Varela, dala su toj ideji ime autopoeza (samostvaranje). Autopoetski sistem je mreža procesa koja proizvodi vlastite komponente, a te komponente ponovo grade istu mrežu, kao i granicu koja je odvaja od okoline. Ćelijska membrana nastaje iz metabolizma, a metabolizam je moguć samo unutar membrane. Kokoš i jaje, zatvoreni u krug koji traje dok ćelija živi. Filozof Evan Thompson, Varelin saradnik, pokazao je koliko se iz tog skromnog početka može izvesti. Kada se autopoezi doda sposobnost prilagođavanja, praćenja vlastitog stanja i reagovanja prije nego što bude kasno, dobija se ono što on zove stvaranjem smisla: svijet prestaje biti puka okolina i postaje svijet za nekoga.

19.6 Sloboda koja mora jesti

U prethodnom poglavlju opisan je organizam kao plamen ili vrtlog, obrazac kroz koji materija neprestano protiče. Njemački filozof Hans Jonas je u knjizi "Fenomen života" iz 1966. godine iz te iste slike izveo zaključak koji je daleko nadilazio poređenje. Metabolizam, tvrdio je, nije samo hemijski proces; on je rođenje slobode u prirodi. Kamen je identičan sam sebi bez ikakvog truda; njegovi atomi su njegov identitet. Organizam nije identičan ni sa jednim svojim atomom. Slobodan je od svake pojedinačne molekule koja ga

trenutno čini. Ali upravo zbog te slobode ne smije ni za trenutak prestati razmjenjivati materiju s okolinom. Jonas je to nazvao potrebnom slobodom: slobodom koja mora jesti.

S metabolizmom je u svemir ušlo nešto sasvim novo: mogućnost "nebivanja" kao stalna prijetnja. Kamen ne može umrijeti. Može se raspasti, ali za njega raspadanje nije neuspjeh, nego samo još jedna promjena. Za organizam raspadanje je neuspjeh. Sa prvim sistemom koji je sebe održavao aktivno, uz trošak i rizik, pojavilo se biće kojem nešto u svijetu može biti dobro ili loše. Vrijednost nije dodatak koji je um kasnije naljepio na neutralnu prirodu; ona je nastala zajedno sa životom, kao drugo lice činjenice da se život može izgubiti.

Jonas je išao i korak dalje. S pojavom kretanja i opažanja na daljinu, kod životinja, između potrebe i njenog zadovoljenja otvorio se razmak u prostoru i vremenu. Biljka je uronjena u ono što joj treba: svjetlost, vodu i zrak dobija tamo gdje stoji. Životinja mora ići za hranom koja je negdje drugdje, a da bi išla, mora je najprije opaziti izdaleka, pa zatim željeti ono što još nema. U tom razmaku, tvrdio je Jonas, rađaju se želja i emocija. Svrha tu prvi put dobija ono što ćemo kasnije kod sebe prepoznati kao napetost između onoga što jeste i onoga što bi trebalo biti. Glad je, u tom smislu, najstariji oblik budućnosti koji živo biće nosi u sebi.

Thompson taj uvid ilustruje bakterijom koja pliva uz gradijent šećera, istom onom koju smo sreli u prethodnom poglavlju. Saharoza ima svoja hemijska svojstva bez obzira na to postoji li ijedna bakterija. Ali hranom postaje tek u odnosu na metabolizam bakterije. Značenje ne leži u molekuli, nego u odnosu između molekule i sistema kojem je potrebna. Bakterija ne reaguje samo na hemiju; ona reaguje na vrijednost koju ta hemija ima za nju. Tu se, po prvi put, razlika između termostata i bakterije može izreći precizno. Termostatu je svejedno. Bakteriji nije, jer je u toj igri ona sama ulog.

19.7 Bakterija koja zna integrisati

Pogledajmo tu bakteriju izbliza, očima inženjera, jer ona to zaslužuje. Crijevna bakterija *Escherichia coli* duga je oko dva mikrometra i ima nekoliko bičeva. U podnožju svakog biča nalazi se pravi rotacioni motor, s rotorom, statorom i ležajem, koji se okreće i više od stotinu puta u sekundi, pokretan protokom protona kroz membranu. Kada se svi motori okreću u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, bičevi se upletu u jedan snop i bakterija pliva pravo, obično oko jedne sekunde. Kada se neki od njih okrenu na drugu stranu, snop se raspadne i bakterija se na desetinku sekunde nasumično prevrne, pa krene u novom, slučajnom smjeru.

Bakterija je premala da bi osjetila razliku u koncentraciji hrane između svoja dva kraja. Zato upoređuje u vremenu: je li sada bolje nego prije sekundu ili dvije? Ako jeste, prevrtanja se prorijede i plivanje u dobrom smjeru se produži. Ako nije, prevrće se češće. Nasumična šetnja tako postaje pristrasna, i bakterija, iako nikada ne zna gdje je hrana, pouzdano stiže do nje. Biofizičar Howard Berg, koji je taj mehanizam proučavao decenijama, pokazao je koliko je on blizu fizičkih granica onoga što se uopšte može izmjeriti s nekoliko hiljada receptora i u svijetu u kojem molekule stižu nasumično.

Najfiniji detalj tek slijedi. Ako bakteriju prebacimo u sredinu u kojoj je hrane svuda jednako mnogo, ona se nakratko uzbudi, a zatim se učestalost prevrtanja vrati na staru vrijednost, bez obzira na to koliko je koncentracija visoka. Receptori se prilagode dodavanjem ili uklanjanjem sitnih metilnih grupa, tako da bakterija uvijek osjeća promjenu, a ne apsolutnu vrijednost. Zbog toga ona prati gradijente kroz raspon koncentracija od više redova veličine. Godine 2000. grupa istraživača s Caltecha, među kojima i teoretičar automatskog upravljanja John Doyle, pokazala je da je taj mehanizam matematički upravo integralna povratna sprega, isti princip koji inženjer ugrađuje u integralni član PID regulatora da bi uklonio grešku u ustaljenom

stanju. Evolucija je otkrila integralno upravljanje milijardama godina prije prvog udžbenika automatske regulacije.

Neuronaučnik Kevin Mitchell u knjizi "Slobodni agenti" iz 2023. godine upravo ovdje traži korijen onoga što će kod nas postati volja. Ono što bakteriju čini agentom nije njena složenost, nego način na koji je ustrojena. Ona ne reaguje na to koja je baš molekula udarila u koji receptor, nego na makrostanje svojih ulaza, na grubu, ali za nju presudnu informaciju da je hrane sve više. Njeno ponašanje ne može se razumjeti na razini pojedinačnih sudara molekula, nego samo na razini značenja koje ti sudari imaju za nju. U tome, kaže Mitchell, leži klica svega što slijedi: organizam koji djeluje na osnovu onoga što stvari znače, a ne samo onoga što stvari jesu. Razlog je, u najskromnijem mogućem obliku, postao uzrok.

19.8 Čelija koja popravlja samu sebe

Ostaje, međutim, pitanje koje je Darwin ostavio otvorenim, a Kant proglasio nerješivim. Kako je nastala prva stvar kojoj je bilo stalo? Između hemije koja se samo dešava i bakterije koja pliva prema hrani zjapi provalija. Terrence Deacon, čije smo razmišljanje o odsutnostima dotakli u prethodnom poglavlju, u knjizi "Nedovršena priroda" predlaže način da se preko te provalije baci most, i to u tri koraka.

Prvi korak su procesi koje Deacon naziva homeodinamičkim. To su procesi koji spontano teže ravnoteži: toplota koja se širi iz toplijeg u hladnije, kamen koji pada, gas koji ispunjava posudu. To je Mayrov teleomatski svijet, u kojem krajnje stanje postoji, ali mu ništa ne teži. Drugi korak su morfodinamički procesi, u kojima kroz sistem neprestano teče energija, pa nastaju samonikli obrasci: Bénardove ćelije u zagrijanom ulju, pahulje, vrtlozi i uragani, sve ono o čemu smo govorili u poglavlju o samoorganizaciji. Oni su nevjerovatni, ali imaju jednu fatalnu manu. Samorazorni su. Troše upravo onaj gradijent koji ih stvara, i nestaju kada ga potroše. Uragan ne čuva

more toplim; on ga hladi, i time sam sebe ubija. Treći korak Deacon naziva teleodinamikom. On nastaje kada se dva morfodinamička procesa spregnu tako da svaki proizvodi uslove potrebne onom drugom. Kao najjednostavniji primjer on predlaže hipotetičku tvorevinu koju je nazvao autogen. Zamislimo, s jedne strane, autokatalitički skup, grupu molekula od kojih svaka katalizuje nastajanje neke druge, pa skup kao cjelina ubrzava vlastito nastajanje. Takav skup, prepušten sam sebi, brzo se razrijedi i potroši sirovine. Zamislimo, s druge strane, molekule koje se same slažu u zatvorenu ljusku, poput proteinskog omotača virusa. Ni taj proces nije dugog vijeka: kada se ljuska zatvori, sve staje.

A sada zamislimo da autokatalitički skup kao nusproizvod proizvodi baš one molekule od kojih se sklapa ljuska. Ljuska se tada zatvara oko katalizatora i drži ih na okupu, sprječavajući da se razidu. Kada se ljuska ošteti, katalizatori se oslobode u novom okruženju, s novim sirovinama, ponovo prorade i proizvedu nove komade ljuske, koja se opet zatvori oko njih. Takav autogen popravljja sam sebe, a ako se raspadne na dva dijela, može se i umnožiti. Nema gene, nema metabolizam u punom smislu riječi, ali ima nešto što nijedan kristal, plamen ili uragan nema: njegovi procesi rade na održavanju upravo onih ograničenja koja te procese omogućavaju. To je, po Deaconu, najmanji mogući "ja" i najranija svrha u prirodi, nešto što postoji radi sebe.

Deacon za sve pojave određene nečim odsutnim, funkcijom, svrhom, značenjem, predlaže zajedničko ime: entencionalne pojave (eng. *ententional phenomena*). Njegova ključna poruka je da svrha nije novi sastojak koji se u nekom trenutku doda materiji. Svrha je obrazac ograničenja. Ona nije ono što sistem ima, nego ono što sistem ne dozvoljava da se desi. Autogen je svrhovit ne zato što u sebi nosi neku sliku budućnosti, nego zato što se njegova dinamika vrti oko jedne jedine stvari koju sprječava: vlastitog raspadanja.

19.9 Termodinamika težnje

Ako svrha počiva na procesima kroz koje teče energija, onda bi morala imati i svoju termodinamiku. Fizičar Jeremy England s Tehnološkog instituta u Massachusettsu posvetio je tom pitanju knjigu s naslovom "Svaki život je u plamenu". Njegova središnja ideja zove se disipativna adaptacija. Sistem sastavljen od mnogo dijelova, izložen stalnom vanjskom izvoru energije, apsorbira tu energiju različito, zavisno od toga kako su mu dijelovi raspoređeni. Apsorbovana energija, opet, utiče na to kako se raspored dijelova mijenja. Kada se taj krug ponovi mnogo puta, oblici sistema počinju se iskrivljavati u smjeru koji odražava odnos između oblika i toka energije. Ponekad to znači razvoj prema stanjima koja su izuzetno vješta u hvatanju energije iz okoline, a ponekad prema stanjima koja su izuzetno otporna na njeno razorno djelovanje.

Neživa materija pod stalnim pogonom može tako poprimiti izgled prilagođenosti, kao da je "naučila" nešto o svojoj okolini. England je pritom oprezan i sam naglašava da to nije isto što i život. Disipativna adaptacija je sirovina, a ne gotov proizvod; ona objašnjava zašto su prilagođeni oblici u neravnotežnoj prirodi češći nego što bi očekivali, ali ne zamjenjuje samoodržanje ni prirodni odabir. Veza s trećim poglavljem ove knjige je, međutim, očigledna. Svrhovitost se ne rađa uprkos strijeli vremena, nego zahvaljujući njoj, poput vira koji se okreće uzvodno samo zato što rijeka neumoljivo teče nizvodno.

Drugi, još općenitiji okvir dolazi iz neuronauke. U prethodnom poglavlju opisali smo mozak koji neprestano predviđa i djeluje da bi smanjio iznenađenje. Karl Friston, sa saradnicima Thomasom Parrom i Giovannijem Pezzulom, tu ideju širi na sve što uopšte postoji kao zasebna cjelina. Svaki sistem koji opstaje, koji se ne rastvori u okolini, mora čuvati granicu između sebe i svijeta i zadržavati se u ograničenom skupu stanja. Formalno se može pokazati da se takav sistem ponaša kao da minimizira jednu veličinu, varijacionu slobodnu energiju, koja je mjera njegovog iznenađenja.

Riba "preferira" da bude u vodi ne zato što ima ukus za vodu, nego zato što riba izvan vode prestaje biti riba. Njena preferirana stanja su naprosto stanja spojiva s njenim postojanjem.

U toj slici odnos svrhe i postojanja se okreće. Ne postojimo zato da bismo ostvarili neke ciljeve; naši ciljevi su opis onoga što znači nastaviti postojati, gledan iznutra. Kritičari Fristonovog okvira s pravom upozoravaju da je on toliko uopšten da mu prijeti opasnost da postane nepobitan, a time i manje koristan kao naučna teorija. Ali kao jezik, on sjajno pokazuje ono što ovo poglavlje pokušava reći: opažanje, djelovanje, svrha i opstanak nisu četiri odvojena problema, nego četiri lica jednog.

19.10 Ljestve svrhe

Sada možemo složiti cijelu sliku, ne kao ljestvicu vrijednosti, nego kao ljestvicu sposobnosti. Na prvoj prečki su teleomatski procesi: kamen koji pada i kuglica koja se smiri na dnu posude. Krajnje stanje postoji, ali mu ništa ne teži. Na drugoj prečki je povratna sprega s izvedenim ciljem: termostat, Wattov regulator, torpedo. Tu postoji prava težnja, mjerenje greške i njeno ispravljanje, ali nema uloga; cilj je posuđen, a neuspjeh ne boli nikoga.

Na trećoj prečki je samoodržanje: autogen, ćelija, bakterija. Tu se prvi put pojavljuje nešto što se može izgubiti, pa time i vrijednost. Cilj više nije posuđen, jer je sistem sam sebi cilj. Na četvrtoj prečki su modeli i predviđanje: životinje s nervnim sistemom, koje mogu težiti cilju koji nije prisutan u njihovim čulima, poput mačke koja trči tamo gdje će miš tek biti. Mitchell ovdje naglašava postepeno odvajanje ponašanja od neposrednog podražaja. Što je taj razmak veći, to više prostora ostaje za procjenu, poređenje mogućnosti i izbor.

Mitchell se tu dotiče i pitanja koje fizičari obično smatraju zatvorenim: ima li u svijetu kojim vladaju fizički zakoni ikakvog mjesta za izbor? Njegov odgovor nije da organizmi krše zakone

fizike, nego da zakoni fizike ne određuju sve ono što organizam čini na razini na kojoj on djeluje.

Mikroskopska neodređenost, šum u neuronima i nasumičnost molekularnih sudara ostavljaju prostor koji sam po sebi nije izbor, ali ga organizam može iskoristiti. Nervni sistem od šuma pravi mogućnosti, a od mogućnosti bira na osnovu onoga što mu je važno. Uzročnost, u toj slici, ne teče samo odozdo prema gore, od molekula prema ponašanju, nego i odozgo prema dolje: ciljevi organizma usmjeravaju šta će se desiti s njegovim molekulama. Hoće li ta slika izdržati kritiku, ostaje otvoreno, ali ona pokazuje koliko se daleko protekao put koji je počeo bakterijom koja upoređuje sada i maloprije.

Na petoj prečki smo mi: bića sa ciljevima o ciljevima. Mi možemo zamisliti budućnost udaljenu decenijama, birati ciljeve i napuštati ih, pa čak i djelovati protiv vlastitih bioloških imperativa, kroz post, zavjet ili žrtvu. Možemo se, najčudnije od svega, pitati šta bi uopšte trebalo htjeti. Svaka viša prečka ne ukida nižu, nego se na nju oslanja. Vaša odluka da pročitate ovo poglavlje počiva na neuronima koji, svaki za sebe, obavljaju posao ne mnogo drugačiji od bakterijskog, i na ćelijama koje se neprestano obnavljaju poput Deaconovog autogena.

Filozof Denis Walsh u knjizi "Organizmi, agencija i evolucija" iz 2015. godine dodaje ovoj slici važan obrat. U standardnoj slici evolucije organizam je pasivan predmet selekcije; svrha je proizvod evolucije, ali ne i njen uzrok. Walsh tvrdi suprotno. Organizmi su agenti koji svojim svrhovitim ponašanjem, prilagodljivošću tokom života, biranjem sredine i preoblikovanjem okoline, mijenjaju pravac evolucije. Dabar gradi branu i time mijenja selekcijske pritiske i za sebe i za hiljade drugih vrsta u dolini. Gliste, pokazao je sam Darwin u svojoj posljednjoj knjizi iz 1881. godine, stvaraju tlo u kojem žive. Walsh svoj pristup naziva situiranim darvinizmom: svrha nije samo ono što evolucija proizvodi, nego i jedna od sila koje je pokreću.

Sličan zaokret opisuje i Philip Ball u knjizi "Kako život radi" iz 2023. godine. Monodova slika ćelije kao mašine koja izvršava genetski program, piše on, pokazala se preuskom. Geni nisu nacrt nego resurs, i ćelija ih koristi u skladu s okolnostima, gotovo kao što se zanatlija služi alatom. Agencija i značenje, pojmovi koje je biologija dugo izbjegavala kao sumnjive, vraćaju se u njen središnji rječnik. Pola stoljeća nakon Monoda, svrha u biologiji više ne izgleda kao neugodna ljubavnica koju treba kriti, nego kao pojava koju treba objasniti i s kojom se ozbiljno računa.

19.11 Mozak koji svuda vidi namjeru

Ako je svrha tako stvarna, zašto je onda toliko lako pogriješiti u vezi s njom? Razvojna psihologinja Deborah Kelemen godinama je proučavala kako djeca objašnjavaju svijet. Pitala ih je, na primjer, zašto je neko kamenje šiljato. Djeca su rado birala objašnjenje da je kamenje šiljato kako bi se životinje mogle češati o njega, radije nego ono da se šiljci stvaraju kada se komadići nagomilaju tokom vremena. Kelemen je tu sklonost nazvala promiskuitetnom teleologijom: djeca pripisuju svrhu ne samo živim bićima i predmetima koje je neko napravio, nego i oblacima, planinama i kamenju.

Odrasli nisu mnogo bolji, samo to bolje skrivaju. Kada su odrasli morali procjenjivati rečenice pod vremenskim pritiskom, znatno češće su prihvatili netačne tvrdnje u kojima prirodne pojave postoje radi nečega. Najupečatljiviji rezultat dolazi iz 2013. godine. Kelemen i saradnici testirali su fizičare, hemičare i geologe s vodećih američkih univerziteta. I oni su, kada su morali brzo odlučivati, češće nego inače prihvatili rečenice poput one da drveće proizvodi kisik kako bi životinje mogle disati. Naučno obrazovanje prigušuje sklonost teleološkom mišljenju, ali je ne briše.

Otkud ta sklonost? Najvjerojatniji odgovor je evolucijski. Za naše pretke bilo je jeftino pogrešno pretpostaviti da iza šuštanja u travi

stoji neko ko nešto hoće, a skupo previdjeti grabežljivca koji zaista nešto hoće. Osim toga, mi smo i sami agenti, pa svijet najlakše tumačimo po vlastitoj mjeri. Dennettov intencionalni stav, o kojem je bilo riječi u prethodnom poglavlju, izuzetan je alat, ali alat koji se uključuje sam, bez pitanja, i kod leptira, i kod oblaka, i kod automobila koji neće da upali.

Za svakog ko predaje prirodne nauke tu se krije konkretna pouka. Rečenica "žirafa je izdužila vrat da bi dohvatila lišće" zvuči bezazleno, ali u sebi krije dvije greške. Nijedna žirafa nije izdužila vrat tokom života da bi ga prenijela potomcima, i niko u tom procesu ništa nije htio. Tačnije je reći da su žirafe s nešto dužim vratom, u određenim uslovima, ostavljale više potomaka. S druge strane, rečenica "oko postoji da bi se vidjelo" nije pogrešna, ako znamo šta znači. "Da bi" u biologiji je ponekad skraćenica za historiju selekcije, a ponekad opis stvarne težnje organizma, poput bakterije koja pliva prema hrani ili mačke koja vrebma miša. Dobro razumijevanje biologije počinje upravo onda kada naučimo razlikovati ta dva značenja.

19.12 Ima li svemir svrhu?

Ako svrha nastaje svuda gdje se nešto samo održava, nameće se i posljednje, najveće pitanje: može li svrhu imati i svemir kao cjelina? Fizika je tom pitanju najbliže prišla kroz ideje o kojima je bilo riječi u petom poglavlju. Lee Smolin je predložio da crne rupe rađaju nove svemire s malo izmijenjenim fizičkim konstantama, pa bi se svemiri, kroz generacije, "prilagođavali" tako da proizvode što više crnih rupa. To je najbliže što je kosmologija ikada prišla ideji svrhovitog kosmosa. Ali i tu je mehanizam selekcija, a ne namjera, a sama hipoteza ostaje nepotvrđena.

Svemiru kao cjelini, izgleda, nedostaje upravo ono što ima i najskromnija ćelija. On nema granicu prema nečemu drugom, od čega bi uzimao i u šta bi izbacivao. Nema šta izgubiti. Toplotna smrt,

o kojoj smo govorili u poglavlju o strijeli vremena, nije njegov neuspjeh, nego samo ishod. Svrha je lokalna pojava, vir u rijeci koja teče nizvodno. Ali to je ne čini manje stvarnom. Na razini čestica i polja nema ciljeva; na razini ćelije i čovjeka ih ima, i obje priče su istinite, svaka na svojoj razini, kako smo već vidjeli u prethodnom poglavlju.

Vratimo se, na kraju, noći s početka ovog poglavlja. Astrofotograf je postavio teleskop, a mala kamera za vođenje prati jednu zvijezdu i svakih nekoliko sekundi šalje montaži sitne korekcije, da bi zvijezda ostala tačno tamo gdje treba. To je Rosenbluethova, Wienerova i Bigelowova negativna povratna sprega u najčistijem obliku. Teleskop "želi" zadržati zvijezdu u središtu kadra, ali ta želja nije njegova; posuđena je. Iza nje stoji čovjek koji želi sliku daleke magline. Iza njega je mozak koji neprestano predviđa, a iza mozga milijarde ćelija koje neumorno obnavljaju same sebe. Iza njih se proteže lanac dug oko četiri milijarde godina, sve do prvog sistema koji je, sklapajući vlastitu granicu, prvi put odvojio sebe od svijeta i počeo ga koristiti.

Oko lampe i dalje kruže leptiri. Fotoni koji padaju na senzor putovali su hiljadama godina od magline, ni zbog čega i ni radi čega. Tek ovdje, na samom kraju svog puta, u uređaju koji je neko postavio s namjerom, oni postaju dio nečije svrhe. Svemir, koliko znamo, nema cilj. Ali je u sebi napravio mjesta za bića koja ciljeve imaju, i koja se, pod vedrim nebom, ponekad zapitaju odakle su im.

Literatura

- [1] Aristotel (1984). *Physics*, Book II. U: J. Barnes (ur.), *The Complete Works of Aristotle*, sv. 1. Princeton: Princeton University Press.
- [2] Paley, W. (1802). *Natural Theology; or, Evidences of the Existence and Attributes of the Deity*. London: R. Faulder.
- [3] Kant, I. (2000). *Critique of the Power of Judgment* (prev. P. Guyer i E. Matthews). Cambridge: Cambridge University Press. (IzvorNIK 1790.)

- [4] Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. London: John Murray.
- [5] Dennett, D. C. (1995). *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. New York: Simon & Schuster.
- [6] Maxwell, J. C. (1868). On Governors. *Proceedings of the Royal Society of London*, 16, 270-283.
- [7] Rosenblueth, A., Wiener, N., & Bigelow, J. (1943). Behavior, Purpose and Teleology. *Philosophy of Science*, 10(1), 18-24.
- [8] Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [9] Pittendrigh, C. S. (1958). Adaptation, natural selection, and behavior. U: A. Roe i G. G. Simpson (ur.), *Behavior and Evolution* (str. 390-416). New Haven: Yale University Press.
- [10] Mayr, E. (1974). Teleological and teleonomic: A new analysis. *Boston Studies in the Philosophy of Science*, 14, 91-117.
- [11] Monod, J. (1971). *Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology*. New York: Alfred A. Knopf. (Izvornik: *Le Hasard et la Nécessité*. Paris: Seuil, 1970.)
- [12] Pross, A. (2012). *What Is Life? How Chemistry Becomes Biology*. Oxford: Oxford University Press.
- [13] Kauffman, S. A. (2019). *A World Beyond Physics: The Emergence and Evolution of Life*. Oxford: Oxford University Press.
- [14] Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1980). *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. Dordrecht: D. Reidel.
- [15] Thompson, E. (2007). *Mind in Life: Biology, Phenomenology, and the Sciences of Mind*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press.
- [16] Jonas, H. (1966). *The Phenomenon of Life: Toward a Philosophical Biology*. New York: Harper & Row.
- [17] Berg, H. C. (2004). *E. coli in Motion*. New York: Springer.
- [18] Yi, T.-M., Huang, Y., Simon, M. I., & Doyle, J. (2000). Robust perfect adaptation in bacterial chemotaxis through integral feedback control. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9), 4649-4653.
- [19] Mitchell, K. J. (2023). *Free Agents: How Evolution Gave Us Free Will*. Princeton: Princeton University Press.

- [20] Deacon, T. W. (2011). *Incomplete Nature: How Mind Emerged from Matter*. New York: W. W. Norton.
- [21] England, J. (2020). *Every Life Is on Fire: How Thermodynamics Explains the Origins of Living Things*. New York: Basic Books.
- [22] Parr, T., Pezzulo, G., & Friston, K. J. (2022). *Active Inference: The Free Energy Principle in Mind, Brain, and Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [23] Walsh, D. M. (2015). *Organisms, Agency, and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [24] Ball, P. (2023). *How Life Works: A User's Guide to the New Biology*. London: Picador.
- [25] Kelemen, D. (1999). Why are rocks pointy? Children's preference for teleological explanations of the natural world. *Developmental Psychology*, 35(6), 1440-1452.
- [26] Kelemen, D., & Rosset, E. (2009). The Human Function Compunction: Teleological explanation in adults. *Cognition*, 111(1), 138-143.
- [27] Kelemen, D., Rottman, J., & Seston, R. (2013). Professional physical scientists display tenacious teleological tendencies: Purpose-based reasoning as a cognitive default. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(4), 1074-1083.
- [28] Fabian, S. T., Sondhi, Y., Allen, P. E., Theobald, J. C., & Lin, H.-T. (2024). Why flying insects gather at artificial light. *Nature Communications*, 15, 689.
- [29] Darwin, C. (1881). *The Formation of Vegetable Mould, through the Action of Worms, with Observations on Their Habits*. London: John Murray.

20

Pepeo zvijezda

"...Ja, univerzum atoma, atom u univerzumu." (R. Feynman, 1955)



Svaki atom u našem tijelu stariji je od Zemlje, stariji od Sunca i, u slučaju vodika, star gotovo koliko i sam svemir. Ovo poglavlje prati kako je nastao svaki od njih: od prve tri minute nakon Velikog praska, preko nuklearnih peći u srcima zvijezda i eksplozija supernovih, do sudara neutronskih zvijezda koje je čovječanstvo 2017. godine prvi put istovremeno "čulo" i vidjelo. Usput ćemo sresti filozofa koji je tvrdio da nikada nećemo saznati od čega su zvijezde, mladu astronomkinju koja je otkrila da je Sunce gotovo sav vodik pa u to nije smjela vjerovati, fizičara koji je iz postojanja ugljika predvidio stanje atomskog jezgra koje niko nije vidio, i jedan

element koji u zvijezdi ne bi smio postojati, a ipak je tu. Na kraju ćemo se vratiti na obalu mora na kojoj je nastao naslov ove knjige, i pogledati vlastitu ruku kao kosmički arhiv.

20.1 Na obali

U jesen 1955. godine Richard Feynman održao je pred Nacionalnom akademijom nauka Sjedinjenih Država predavanje o vrijednosti nauke. Usred tog predavanja, bez upozorenja, prešao je s proze na nešto što je nalikovalo pjesmi. Opisao je čovjeka koji sam stoji na obali mora i posmatra talase: brda molekula, od kojih svaki tvrdoglavo gleda svoja posla, bezbroj njih, svaki za sebe, a ipak zajedno podižu bijelu pjenu. Tako je bilo vijekovima prije nego što je ijedno oko moglo da ih vidi, na mrtvoj planeti, bez ikoga da se tome divi. Zatim, duboko u moru, molekuli počinju ponavljati obrasce jedni drugih, prave sebi slične, i počinje novi ples; rastu u veličini i složenosti, postaju živa bića, DNK i proteini. Izlaze iz kolijevke na suho tlo, i sada tu stoje: atomi sa sviješću, materija s radoznalošću. Stoje pored mora i čude se vlastitom čuđenju. Feynman taj niz završava riječima koje su bile inspiracija za naslov ove knjige: "...ja, univerzum atoma, atom u univerzumu".

Odmah nakon toga Feynman se, gotovo s gorčinom, požalio da pjesnici o tome ne pišu. Vrijednost nauke, rekao je, niko ne opjevava, pa je publika osuđena da umjesto pjesme sluša večernje predavanje. Ova knjiga je, na neki način, pokušaj da se ta praznina bar malo popuni. Njen naslov preuzima drugu polovinu Feynmanovog stiha, a putovanje kroz poglavlja išlo je u oba smjera: od atoma prema svemiru, i od svemira natrag prema atomu.

Ali Feynmanova scena na obali ostavlja jedno pitanje otvorenim, i to pitanje je tema ovog, posljednjeg poglavlja. Molekuli koji prave pjenu, atomi koji su postali radoznali, sve to već postoji kada njegova priča počinje. Odakle su došli? Ko je napravio ugljik u proteinima, kisik u talasima, kalcij u kostima čovjeka koji stoji na

pijesku? Pitanje zvuči kao dječije, ali odgovor na njega jedno je od najvećih, ali i najmanje prepoznatih dostignuća nauke dvadesetog vijeka. A priča počinje, kao i mnoge dobre priče u nauci, tvrdnjom da je nešto nemoguće.

20.2 Ono što nikada nećemo saznati

Godine 1835. francuski filozof Auguste Comte, otac pozitivizma, pokušao je povući granicu ljudskog znanja o nebu. Moći ćemo, pisao je, jednog dana izmjeriti udaljenosti zvijezda, njihova kretanja, veličine i oblike. Ali njihov hemijski sastav ostat će nam zauvijek skriven. Tvrdnja je bila razumna. Zvijezde su nezamislivo daleko, niko do njih neće otputovati, a bez uzorka, kako bi iko ikada mogao znati od čega su?

Odgovor je, zapravo, već postojao, samo ga niko nije umio pročitati. Dvadeset godina ranije, bavarski optičar Joseph von Fraunhofer, jedan od najboljih proizvođača stakla i sočiva svog vremena, propustio je Sunčevu svjetlost kroz prizmu i ugledao u dugi stotine tamnih linija. Pažljivo ih je izmjerio i popisao, oko pet stotina sedamdeset, ne znajući šta znače. Objašnjenje je stiglo tek 1859. godine u Heidelbergu, gdje su fizičar Gustav Kirchhoff i hemičar Robert Bunsen, zagrijavajući soli u plamenu Bunsenovog plamenika, otkrili da svaki element svijetli i upija svjetlost samo na sebi svojstvenim talasnim dužinama. Dvije žute linije natrija u plamenu stajale su tačno tamo gdje su bile dvije Fraunhoferove tamne linije u Sunčevom spektru. Sunce je, dakle, sadržavalo natrij. Ubrzo su u njemu pronađeni željezo, kalcij, magnezij i niz drugih elemenata. Comte je umro 1857. godine. Nije doživio da vidi kako mu je tvrdnja pala samo dvije godine kasnije.

Spektroskopija je, uostalom, otišla i korak dalje od čitanja poznatog. Tokom pomračenja Sunca 18. augusta 1868. godine astronomi su u svjetlosti Sunčeve hromosfere uočili jarko žutu liniju na talasnoj dužini od oko 587,5 nanometara koja nije odgovarala nijednom

poznatom elementu. Norman Lockyer je nepoznatu materiju nazvao po grčkom imenu za Sunce, helios. Helij je tako otkriven na zvijezdi dvadeset i sedam godina prije nego što ga je William Ramsay 1895. godine izdvojio na Zemlji. Prvi element koji smo upoznali izvan vlastitog planeta bio je, kako će se pokazati, drugi po zastupljenosti u cijelom svemiru.

Svako ko je ikada kroz amaterski spektroskop pogledao Sunce, ili snimio spektar neke sjajne zvijezde, zna koliko je ovaj trenutak ljudske historije i danas opipljiv. Tamne linije su tu, oštre i poslušne, iste one koje je Fraunhofer popisivao olovkom. Svaka od njih je potpis jednog atoma koji je, u vanjskim slojevima zvijezde, upio foton tačno određene energije. Comte je bio u pravu da do zvijezda nikada nećemo otputovati. Nije predvidio da će zvijezde same doći do nas, u svjetlosti.

20.3 Sunce od vodika

Ipak, dugo nakon Kirchhoffa, astronomi su tamne linije u spektrima čitali kao popis sastojaka, ali ne i kao recept s količinama. Pretpostavljalo se, sasvim prirodno, da su zvijezde građene otprilike kao Zemlja: od željeza, silicija, kisika, magnezija, s nešto vodika u tragovima. Da je ta slika pogrešna, pokazala je 1925. godine mlada britanska astronomkinja Cecilia Payne, koja je zbog isključivanja žena iz britanske astronomije doktorat radila na Harvardu. Primijenila je tada novu teoriju jonizacije indijskog fizičara Meghnada Sahe na harvardsku zbirku zvjezdanih spektara i izračunala koliko atoma svakog elementa mora biti u atmosferi zvijezde da bi linije imale izmjerenu jačinu.

Rezultat je bio šokantan. Za većinu elemenata dobila je omjere slične zemaljskim. Ali vodika i helija bilo je neuporedivo više od svega ostalog; po njenom računu, ta dva najlakša elementa činila su gotovo svu masu Sunca. Henry Norris Russell, najuticajniji američki astronom tog doba, bio je uvjeren da je to nemoguće, pa je Payne u

disertaciji svoj nalaz nazvala vjerovatno lažnim i ogradila se od njega. Četiri godine kasnije Russell je, drugim metodama, i sam došao do istog zaključka i priznao ga. Danas znamo da vodik čini oko 74%, a helij oko 25% mase Sunca; svi ostali elementi zajedno, sve ono od čega su načinjene stijene, mora i ljudi, čine tek oko 1,5%.

Taj sićušni ostatak jedan je od ključnih brojeva ove priče. Svemir je, u prvoj aproksimaciji, vodik i helij. Sve ostalo, što astronomi pomalo nespretno nazivaju zajedničkim imenom metali, pa u to ubrajaju i kisik, ugljik i neon, sitna je primjesa. A upravo od te primjese sastavljeni smo mi. Pitanje odakle ona dolazi postaje: ako je svemir počeo kao vodik i helij, ko je i gdje napravio taj preostali dio?

20.4 Prve tri minute

Da bismo razumjeli porijeklo teških elemenata, moramo prvo razumjeti porijeklo lakih. Krajem četrdesetih godina prošlog vijeka George Gamow i njegov student Ralph Alpher pokušali su pokazati da su svi elementi nastali u vrelom, gustom početku svemira, nizanjem neutrona na jezgra. Rad je 1948. godine objavljen pod imenima Alpher, Bethe i Gamow. Hans Bethe u njemu nije učestvovao; Gamow ga je dodao jer mu je potpis zvučao kao alfa, beta, gama, i datum objave, prvi april, nije bio slučajan. Iste godine Alpher i Robert Herman izračunali su da bi od tog vrelog početka do danas trebalo da preostane slabo zračenje temperature od nekoliko kelvina. Otkriveno je slučajno 1965. godine, kao kosmičko mikrovalno pozadinsko zračenje.

Ambicija Gamowa da iz Velikog praska izvede cijeli periodni sistem se, međutim, izjalovila, i to na zanimljiv način. Priroda je ispred njega postavila dvije prepreke. Ne postoji nijedno stabilno jezgro s pet nukleona, niti ijedno s osam. Helij-4, izuzetno čvrsto vezan, stoji kao na vrhu stepeništa kojem nedostaju dvije sljedeće stepenice: dodate li mu proton ili neutron, dobijate jezgro koje se raspadne za

djelić sekunde; spojite li dva jezgra helija, dobijate berilij-8, koji se ponovo raspadne na dva helija za oko jednu desetinu femtosekunde.

Kakav je, onda, pravi recept prvih minuta? Sekundu nakon početka svemir je bio vreliji od deset milijardi kelvina, a protoni i neutroni neprestano su se pretvarali jedni u druge u sudarima s elektronima, pozitronima i neutrinima. Kako se svemir hladio, ta ravnoteža se zamrzнула na otprilike jedan neutron na svakih šest protona. Slobodan neutron, međutim, nije stabilan; raspada se s vremenom poluraspada od nešto više od deset minuta. Nukleosinteza nije mogla odmah početi, jer je svaki novonastali deuterij odmah razbijao neki od milijardi fotona po svakom nukleonu. Tek oko tri minute nakon početka, kada je temperatura pala ispod milijardu kelvina, deuterij je mogao preživjeti, i tada su se gotovo svi preostali neutroni, otprilike jedan na svakih sedam protona, za nekoliko minuta zaključali u helij.

Iz tog omjera slijedi jedan od najljepših proračuna kosmologije. Ako na svakih sedam protona dolazi jedan neutron, od dva neutrona i dva protona pravi se jedno jezgro helija, pa od šesnaest nukleona njih četiri završi u heliju, a dvanaest ostane kao vodik. Helij, dakle, čini oko četvrtinu, a vodik tri četvrtine ukupne mase obične materije. Upravo to i mjerimo u najstarijim zvijezdama i u oblacima plina gdje zvijezde još nisu ništa prerađivale. Uz to je ostalo nešto deuterija, oko dvadeset pet atoma na svaki milion atoma vodika, nešto helija-3 i sićušan trag litija-7. Nakon petnaestak minuta svemir se previše ohladio i razrijedio, i kosmička kuhinja se zatvorila.

Priča nije sasvim završena, i to je dobro. Teorija predviđa oko tri puta više litija nego što ga nalazimo u atmosferama najstarijih zvijezda naše galaksije. Da li je problem u zvijezdama koje su dio litija s vremenom sagorjele, u podacima ili u nečemu dubljem, zasad niko ne zna. Taj takozvani problem kosmičkog litija sitan je raskorak u inače zapanjujuće uspješnoj teoriji, ali upravo takve pukotine, kao što smo vidjeli u poglavlju o nevidljivom svemiru, ponekad vode do nove fizike.

Za našu priču važnija je druga posljedica. Zvijezde deuterij ne proizvode; one ga uništavaju, jer on u njima prvi sagorijeva. Svaki atom deuterija koji danas postoji, dakle, nastao je u prvim minutama svemira. U vodi okeana deuterija ima nešto više nego u prvobitnoj smjesi, jer hemijski procesi u hladnim oblacima i na mladoj Zemlji teške izotope pomalo koncentrišu u molekulima vode, ali ga nisu mogli stvoriti. Svaka čaša vode koju popijemo sadrži, dakle, nešto od onoga što je napravljeno kada je svemir bio star tri minute.

20.5 Peć koja gori zahvaljujući tuneliranju

Ako Veliki prasak nije napravio teške elemente, preostaju zvijezde. Ali zašto uopće zvijezde sijaju? Krajem devetnaestog vijeka to je bio ozbiljan problem. Lord Kelvin je izračunao da Sunce, kada bi sjalo samo zahvaljujući gravitacionom sažimanju, ne bi moglo biti starije od nekoliko desetina miliona godina, što je bilo premalo i za geologe i za Darwina. Rješenje se naziralo 1920. godine, kada je Francis Aston u Cambridgeu izmjerio da je jezgro helija oko sedam desetina posto lakše od četiri protona. Arthur Eddington je odmah shvatio šta to znači: ako se u Suncu vodik pretvara u helij, razlika mase odlazi u energiju po Einsteinovom $E = mc^2$, i to je dovoljno da Sunce sija milijardama godina.

Postojala je samo jedna nevolja. Protoni su pozitivno naelektrisani i snažno se odbijaju. Da bi se približili dovoljno da ih nuklearna sila spoji, po klasičnoj fizici trebali bi temperaturu koja je stotinama puta veća od one u središtu Sunca, gdje je izmjereno oko petnaest miliona kelvina. Kritičari su Eddingtonu prigovorili da Sunce nije dovoljno vruće. On im je kasnije, u svojoj knjizi o unutrašnjosti zvijezda, poručio da onda odu i potraže toplije mjesto, što je bila tek blago prikrivena psovka.

Eddington je bio u pravu, ali razlog je tada bio nepoznat. Otkrio ga je 1928. godine George Gamow, objašnjavajući alfa-raspad kvantnim tuneliranjem, istim onim fenomenom koji smo upoznali u desetom

poglavlju. Čestica koja nema dovoljno energije da preskoči barijeru ipak kroz nju, s malom ali konačnom vjerojatnošću, prolazi. Godinu kasnije Robert Atkinson i Fritz Houtermans primijenili su tu ideju na zvijezde. Protoni u Suncu ne moraju preskočiti električni zid; dovoljno je da kroz njega povremeno tuneliraju. Hans Bethe je 1938. i 1939. godine razradio dva puta kojima zvijezde vodik pretvaraju u helij: proton-proton lanac, koji dominira u Suncu, i CNO ciklus, u kojem ugljik, azot i kisik služe kao katalizatori i koji prevladava u masivnijim zvijezdama. Za to je 1967. godine dobio Nobelovu nagradu.

Prvi korak proton-proton lanca jedna je od najneobičnijih reakcija u prirodi. Dva protona koja su se uspjela približiti moraju se, u tom istom trenutku, spojiti u deuterij, a to znači da se jedan od njih mora pretvoriti u neutron uz pomoć slabe nuklearne sile, uz emisiju pozitrona i neutrina. Ta kombinacija rijetkog tuneliranja i još rjeđeg djelovanja slabe sile toliko je malo vjerovatna da prosječan proton u središtu Sunca čeka milijardama godina prije nego što uđe u takvu reakciju. Upravo zbog te sporosti Sunce ne eksplodira nego mirno gori oko deset milijardi godina. Zvijezde postoje zato što je nuklearna fuzija, paradoksalno, izuzetno teška.

Brojevi su ipak vrtoglavi. Sunce svake sekunde pretvara oko šest stotina miliona tona vodika u helij, a pritom oko četiri miliona tona mase nestaje kao energija. Dio te energije stiže do nas kao Sunčeva svjetlost, nakon što fotoni desetinama hiljada godina (i do milion!) lutaju kroz gustu unutrašnjost prije nego što izađu na površinu. Dio odlazi kao neutrinu, koji iz središta izlete gotovo bez zastoja; kroz svaki kvadratni centimetar vašeg tijela svake sekunde ih prolazi oko šezdeset milijardi.

Iza svega toga stoji jedna kriva koja je, u doslovnom smislu, sudbina svih zvijezda: kriva energije vezivanja po nukleonu. Kod najlakših jezgara ona strmo raste, što znači da spajanje lakih jezgara oslobađa energiju. Maksimum doseže kod jezgara oko željeza i nikla, a zatim

lagano pada, pa se kod najtežih jezgara energija oslobađa cijepanjem, a ne spajanjem. Najčvršće vezano jezgro, gledajući po energiji po nukleonu, zapravo je niki-62, a željezo-56 ga slijedi; zato se govori o "željeznom vrhu". Za zvijezdu to znači da fuzijom može graditi elemente i dobijati energiju sve do željeza. Dalje ne može. Atomsko jezgro, ta najsitnija struktura o kojoj ova knjiga govori, određuje kako će živjeti i kako će umrijeti tijela milionima puta veća od Zemlje. Svemir u atomu, u najdoslovnijem smislu.

20.6 Rezonancija koja je napravila ugljik

Zvijezda koja potroši vodik u središtu počinje se sažimati i grijati, sve dok temperatura ne dosegne oko sto miliona kelvina. Tada počinje sagorijevati helij. Ali ovdje se ponovo pojavljuju one dvije rupe iz prvih minuta svemira. Dva helija daju nestabilni berilij-8. Da bi nastao ugljik, treći helij mora udariti u berilij-8 u onoj desetini femtosekunde koliko on postoji. Početkom pedesetih godina Edwin Salpeter je pokazao da je u gustom i vreloj jezgri crvenog diva takav trostruki sudar ipak moguć, jer se tamo stalno održava sićušna ravnotežna količina berilija. Ali kada su fizičari izračunali brzinu reakcije, dobili su premalo ugljika, daleko manje od onoga što vidimo u svemiru.

Tu na scenu stupa Fred Hoyle, britanski astrofizičar tvrdoglave, genijalne i pomalo nepopularne naravi. Godine 1953. Hoyle je zaključio da reakcija mora biti rezonantna: jezgro ugljika-12 mora imati pobuđeno stanje s energijom vrlo bliskom zbiru energija berilija-8 i helija, tako da se oni spajaju gotovo bez gubitka, kao što se ljuljaška najlakše zanese kada je guramo u pravom ritmu. Izračunao je da to stanje mora ležati na oko 7,65 megaelektronvolti iznad osnovnog stanja ugljika. Takvo stanje niko nije poznavao. Hoyle je otišao u Kellogg laboratoriju na Caltechu i nagovorio skeptičnog Williama Fowlera i njegove saradnike da ga potraže. Grupa oko Warda Whalinga pronašla ga je nakon desetak dana, na 7,65 megaelektronvolti (MeV), tamo gdje je rekao da mora biti.

Priča ima i drugi, jednako važan zaokret. Kada nastane ugljik, sljedeći helij može ga pretvoriti u kisik-16. Da i tu postoji odgovarajuća rezonancija, sav ugljik bi brzo izgorio u kisik i ne bi ga ostalo za nas. Ali najbliže stanje kisika leži malo ispod praga, na 7,12 MeV, dok je prag za reakciju oko 7,16. Razlika od svega oko 0,045 MeV dovoljna je da ta reakcija ostane spora. Zato zvijezde proizvode i ugljik i kisik, u omjeru koji je, sretnim spletom okolnosti, pogodan za hemiju života.

Hoyleova rezonancija često se navodi kao primjer antropičkog predviđanja: stanje mora postojati jer mi postojimo. U poglavlju o kosmološkoj prirodnoj selekciji vidjeli smo koliko su takvi argumenti privlačni i koliko su sporni. Historičar nauke Helge Kragh je, međutim, pažljivim čitanjem izvornih dokumenata pokazao da je ta antropička interpretacija uglavnom nastala kasnije. Hoyle 1953. godine nije rasuđivao iz postojanja ljudi, nego iz izmjerene zastupljenosti ugljika u svemiru. To je, ako ništa drugo, bolja priča: ne mistična slutnja o nama, nego hrabro predviđanje iz podataka, izloženo riziku da ga eksperiment obori za deset dana.

20.7 Glavica luka

Zvijezda poput Sunca stat će na ugljiku i kisiku. Njena jezgra neće se nikada dovoljno zagrijati za sljedeći korak, pa će se na kraju sažeti u bijelog patuljka kojeg drži Paulijev princip isključenja, kao što smo vidjeli u petnaestom poglavlju, dok će vanjske slojeve lagano otpuhati u svemir kao planetarnu maglinu, sličnu možda maglini Heliks. Zvijezde teže od osam Sunčevih masa idu dalje. Nakon helija sagorijeva ugljik, stvarajući neon, natrij i magnezij; zatim neon; zatim kisik, iz kojeg nastaju silicij i sumpor; i na kraju silicij, iz kojeg se, u gustom mreži reakcija, grade elementi željeznog vrha.

Svaka sljedeća faza oslobađa manje energije po reakciji, a sve više energije zvijezda gubi kroz neutrine koji neometano bježe iz jezgra. Faze se zato ubrzavaju do vrtoglavosti. U zvijezdi od petnaest

Sunčevih masa vodik u središtu gori milionima godina, ugljik nekoliko hiljada godina, kisik nekoliko sedmica, a silicij svega nekoliko dana. Na kraju, zvijezda iznutra podsjeća na glavicu luka: željezno jezgro mase oko jedne i po Sunčeve mase, okruženo ljuskama u kojima redom gore silicij, kisik, neon, ugljik, helij i, sasvim spolja, vodik. Svaka ljuska je jedan sloj nuklearne historije zvijezde.

Kada željezno jezgro više ne može proizvoditi energiju, dolazi ono što astrofizičari nazivaju "željeznom katastrofom". Fotoni razbijaju jezgra, elektroni se utiskuju u protone pretvarajući ih u neutrone, pritisak koji je držao jezgro nestaje, i ono se ruši u slobodnom padu, za manje od sekunde, od veličine Zemlje do kugle prečnika dvadesetak kilometara. Kada gustoća premaši gustoću atomskog jezgra, nuklearna sila se opire, materija odskoči, i nastaje udarni talas. U masivnim zvijezdama taj talas, uz pomoć ogromnog toka neutrina čiji je tačan doprinos i danas predmet istraživanja, raznese vanjske slojeve zvijezde u eksploziji supernove s kolapsom jezgra. Ostaje neutronska zvijezda ili, ako je masa prevelika, crna rupa.

Supernova obogaćuje svemir na tri načina. Prvo, izbacuje u prostor sve ono što je zvijezda proizvela tokom života: najveći dio kisika, magnezija i neona u svemiru nastao je prije eksplozije, a eksplozija ga samo raspršuje. Drugo, udarni talas prolazi kroz ljuske silicija i kisika i u njima, za nekoliko sekundi, pokreće eksplozivnu nukleosintezu; upravo odatle, a ne iz samog jezgra, dolazi željezo koje supernova izbacuje. Treće, udarni talas kasnije ubrzava čestice iz okolnog plina gotovo do brzine svjetlosti, stvarajući kosmičke zrake.

Jedan detalj posebno je zanimljiv. Eksplozivno sagorijevanje silicija ne proizvodi direktno željezo-56, nego nikl-56, radioaktivno jezgro s vremenom poluraspada od oko šest dana, koje se raspada u kobalt-56, a on, s vremenom poluraspada od oko 77 dana, u stabilno željezo-56. Svjetlost supernove nekoliko mjeseci nakon eksplozije

uglavnom je svjetlost tog radioaktivnog raspada. Kada je 23. februara 1987. godine u Velikom Magellanovom oblaku eksplodirala supernova 1987A, najbliža u posljednja četiri stoljeća, astronomi su u njenoj krivoj sjaja doslovno mogli pratiti vrijeme poluraspada kobalta. Nekoliko sati prije nego što je njena svjetlost stigla, tri podzemna detektora u Japanu, Americi i Rusiji zabilježila su ukupno dvadeset i četiri neutrina iz urušavanja jezgra. Bila je to prva potvrda da su se zvijezde zaista urušile onako kako je teorija predviđala.

20.8 Osam procesa

Do sredine pedesetih godina svi ti dijelovi teorije bili su razbacani po časopisima. Godine 1957. objedinjeni su u jednom radu, dugom sto i četiri stranice, u časopisu *Reviews of Modern Physics*. Potpisali su ga britanski bračni par astronoma Margaret i Geoffrey Burbidge, William Fowler i Fred Hoyle, pa je rad ušao u historiju pod kraticom B²FH. Autori su pokazali da se gotovo cijeli periodni sistem može objasniti s osam procesa u zvijezdama: sagorijevanjem vodika, sagorijevanjem helija, alfa-procesom, e-procesom koji gradi željezni vrh u uslovima statističke ravnoteže, dva procesa hvatanja neutrona, sporim s-procesom i brzim r-procesom, p-procesom koji stvara rijetka jezgra bogata protonima, i x-procesom, kako su nazvali ono što nisu umjeli objasniti, a to su litij, berilij i bor. Iste godine kanadski fizičar Alastair Cameron nezavisno je, u izvještaju laboratorije Chalk River, iznio vrlo slične zaključke.

Rad B²FH ima neobičnu osobinu da se, više od šezdeset godina kasnije, i dalje čita kao aktuelan. Neki detalji su promijenjeni, mjesta pojedinih procesa su premještena, ali okvir je ostao. Fowler je 1983. godine dobio Nobelovu nagradu za fiziku, zajedno sa Subrahmanyonom Chandrasekharom. Hoyle, bez čijih ideja rad ne bi postojao, ostao je bez nje, što mnogi i danas smatraju jednom od najvećih nepravdi u historiji te nagrade.

Za našu priču najvažnija su dva procesa hvatanja neutrona. Zvijezda fuzijom ne može graditi elemente teže od željeza, jer bi ih to koštalo energije, a osim toga električno odbijanje sve težih jezgara postaje nepremostivo. Neutron, međutim, nema naboj i ne odbija se. Jezgro koje ga uhvati postaje teži izotop istog elementa; ako je taj izotop nestabilan, jedan od njegovih neutrona se beta-raspadom pretvara u proton, i jezgro postaje sljedeći element u periodnom sistemu. Hvatanje i raspad, hvatanje i raspad: tako se, stepenicu po stepenicu, ide od željeza do olova i urana. Da bi se od željeznog vrha stiglo do elemenata rijetkih zemalja, potrebno je najmanje stotinu uzastopnih hvatanja. Sve zavisi od toga koliko se brzo hvataju neutroni u poređenju s tim koliko se brzo nestabilna jezgra raspadaju.

20.9 Element koji ne bi smio postojati

Godine 1952. američki astronom Paul Merrill objavio je rezultat koji je izgledao nemoguće. U spektrima nekoliko hladnih crvenih divova, među njima i zvijezde R Geminorum, pronašao je linije tehnečija, elementa s rednim brojem 43. Tehnečij nema nijedan stabilan izotop. Tehnečij-99, onaj koji nastaje hvatanjem neutrona, ima vrijeme poluraspada od oko dvjesto hiljada godina, a ni najdugovječniji njegovi izotopi ne žive duže od nekoliko miliona godina. Crveni div je, s druge strane, zvijezda stara stotine miliona ili milijarde godina. Sav tehnečij s kojim je rođena odavno se morao raspasti.

Zaključak je bio neizbježan i uzbudljiv: zvijezda je tehnečij napravila nedavno, u sebi, i miješanjem ga iznijela na površinu. Merrillovo otkriće bilo je prvi direktan dokaz da se nukleosinteza u zvijezdama događa sada, a ne samo u dalekoj prošlosti. Nijedan argument o porijeklu elemenata nije tako elegantan kao ovaj: element koji ne bi smio postojati svjedoči o peći u kojoj upravo nastaje.

Danas znamo da je to rad s-procesa u zvijezdama malih i srednjih masa, u kasnoj fazi njihovog života koju astronomi zovu asimptotska grana divova. U tankoj ljusci oko jezgra, gdje se naizmjenično pale

vodik i helij, reakcije poput one u kojoj ugljik-13 hvata jezgro helija i oslobađa neutron stvaraju skroman, ali postojan tok neutrona. Jezgro, obično željezo iz ranijih generacija zvijezda, uhvati neutron svakih nekoliko sedmica ili mjeseci. Između dva hvatanja gotovo svaki nestabilni izotop stigne da se raspadne, pa s-proces polako napreduje uskom stazom stabilnih jezgara, kroz stroncij, barij i olovo, sve dok se ne zaustavi kod bizmuta, iza kojeg ga radioaktivni raspad vraćaju unazad. Konvekcija zatim iznosi proizvode na površinu, a zvijezda ih, u vjetrovima koji traju stotinama hiljada godina, predaje svemiru. Tako će, jednog dana, učiniti i Sunce: ne eksplodirati, nego tiho otpuhati svoj omotač.

Ali s-proces ima granicu. Torij i uran ne može napraviti, jer nikada ne preskoči bizmut. Nešto drugo mora stvarati najteže elemente, nešto u čemu je neutrona toliko da jezgra hvataju desetine njih brže nego što se stignu raspasti, pa se niz odvija daleko od doline stabilnosti, u sekundama umjesto u milenijima. To je r-proces. Šest decenija nakon B²FH niko nije sa sigurnošću znao gdje se on dešava.

20.10 Dolazak gravitacionog talasa

Dana 17. augusta 2017. godine, u 12 sati, 41 minutu i 4 sekunde po koordiniranom svjetskom vremenu, dva detektora LIGO u Sjedinjenim Državama i detektor Virgo u Italiji zabilježili su signal koji je trajao oko sto sekundi i prošao kroz njihov osjetljivi opseg u oko tri hiljade ciklusa, sve bržih i sve jačih. Bio je to gravitacioni talas od dvije neutronske zvijezde koje su se, kružeći jedna oko druge, spiralno približavale i na kraju sudarile. Ukupna masa sistema bila je oko 2,74 Sunčeve mase, a pojedinačne mase, uz pretpostavku malih spinova, između 1,17 i 1,60 Sunčeve mase, tačno u rasponu poznatih neutronskih zvijezda. Izvor je bio udaljen oko četrdeset megaparseka, oko sto trideset miliona svjetlosnih godina. Kada je taj talas krenuo prema nama, po Zemlji su hodali dinosauri.

Samo 1,7 sekundi nakon sudara, svemirski teleskop Fermi zabilježio je kratak bljesak gama-zraka iz istog dijela neba. Kombinacijom podataka tri detektora gravitacionih talasa izvor je lokalizovan na područje od svega 28 kvadratnih stepeni u sazviježđu Hidre, i u roku od nešto manje od 11 h jedan mali teleskop u Čileu pronašao je novu tačku svjetlosti uz galaksiju NGC 4993. Narednih sedmica stotine teleskopa, na svim talasnim dužinama, od radio do rendgenskog zračenja, pratile su je kako blijedi i crveni. Bila je to prva kilonova koju smo ikada detaljno posmatrali, eksplozija hiljadu puta sjajnija od obične nove, koju ne pokreće nuklearna fuzija nego radioaktivni raspad svježe skovanih teških jezgara.

Kada se dvije neutronske zvijezde sudare, plimne sile ih trgaju, a dio materije, po procjenama nekoliko stotinki Sunčeve mase, izleti brzinom od desetine do trećine brzine svjetlosti. Ta materija se sastoji gotovo isključivo od neutrona, pa u njoj r-proces teče punom snagom: jezgra u nekoliko sekundi hvataju desetine i stotine neutrona, dosežući mase iznad dvije stotine pedeset, a zatim se, raspadajući se, spuštaju prema stabilnim elementima, od stroncija i joda do zlata, platine i urana. Promjena boje kilonove od plave prema crvenoj odgovara očekivanom: lantanidi, teški elementi iz reda rijetkih zemalja, izuzetno snažno upijaju plavu svjetlost.

Ipak, dvije godine niko nije mogao u spektru kilonove sa sigurnošću pokazati nijedan pojedinačni element. Spektri su bili izmjereni, ali linije su bile široke, pomaknute i isprepletene. Godine 2019. Darach Watson s Instituta Niels Bohr u Kopenhagenu i saradnici ponovo su analizirali spektre koje je instrument X-shooter na VLT (teleskopu Evropske južne opservatorije) snimio oko dan i po nakon sudara. Pokazali su da jaku, široku apsorpciju oko 810 nanometara, i onu u ultraljubičastom dijelu, može objasniti samo jednostruko jonizovani stroncij, čije linije u laboratoriji leže oko jednog mikrometra, ali su u materiji koja juri prema nama brzinom od oko četvrtine brzine svjetlosti pomaknute prema plavom. U narednim danima iste linije

pojavile su se kao karakteristični profili tipa P Cygni, kakvi nastaju u oblaku koji se širi. Stroncij je element koji može nastati samo u ogromnom toku neutrona i u vremenu od nekoliko sekundi. Bio je to prvi direktan spektroskopski dokaz da se r-proces zaista odvija u sudarima neutronske zvijezde, i istovremeno prvi dokaz da su neutronske zvijezde zaista sastavljene od materije bogate neutronima, što se pretpostavljalo još od 1934. godine.

Treba reći i ono što još ne znamo. Neutronske zvijezde se sudaraju rijetko, a svaki sudar mora pričekati da dvije masivne zvijezde eksplodiraju i da se njihovi ostaci spiralno približe, što ponekad traje stotine miliona godina. Postoje stare zvijezde u kojima je r-proces očigledno bio aktivan vrlo rano u historiji galaksije. Zato dio astrofizičara smatra da značajan dio teških elemenata potiče i iz kolapsara, posebne vrste supernova kod kojih se jezgro odmah urušava u crnu rupu okruženu vrelim diskom. Koliko doprinosi svaki od tih izvora, danas je jedno od otvorenih pitanja nuklearne astrofizike. Sigurno je samo da je prvi odgovor stigao na način koji Comte ne bi mogao ni zamisliti: dvostruko, kao drhtaj prostor-vremena i kao svjetlost, iz sudara koji se dogodio dok su na Zemlji još živjeli dinosaurusi.

20.11 Svemir se tek počeo kuhati

Nisu svi elementi pepeo zvijezda. Litij, berilij i bor, x-proces iz rada B²FH, u zvijezdama se lakše uništavaju nego stvaraju. Njihovo porijeklo otkriveno je tek krajem šezdesetih godina: nastaju kada kosmičke zrake, protoni i jezgra helija ubrzani udarnim talasima supernovih, udaraju u jezgra ugljika, dušika i kisika u međuzvjezdanom plinu i "odlamaju" od njih komade određene veličine. Tim razbijanjem, tzv. spalacijom, nastaje najveći dio berilija i bora u svemiru, i dobar dio litija. Litij u baterijama naših telefona tako ima trostruko porijeklo: dio iz prvih minuta svemira, dio iz kosmičkih zraka, a dio iz hladnih zvijezda koje su ga iznijele na površinu prije nego što je stigao izgorjeti.

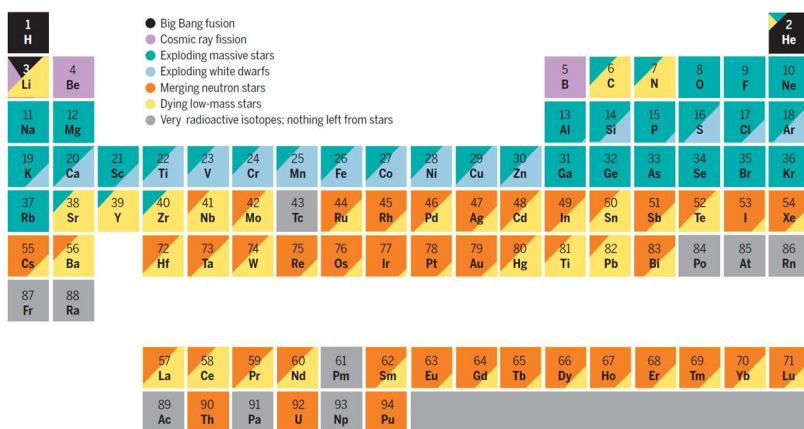
Posebnu ulogu ima još jedna vrsta eksplozije. Bijeli patuljak u bliskom dvojnem sistemu može od pratioca preuzimati materiju ili se s drugim bijelim patuljkom spojiti, sve dok ga u ugljiku i kisiku ne zahvati termonuklearna eksplozija koja ga potpuno raznese. To su supernove tipa Ia, iste one koje su, kao standardne svijeće, otkrile ubrzano širenje svemira. One ne proizvode neutrone, pa ni teške elemente, ali proizvode obilje elemenata željeznog vrha. Budući da prvo mora nastati bijeli patuljak, a zatim mora proći dugo vrijeme dok se ne stvore uslovi za eksploziju, njihov doprinos postaje značajan tek oko milijardu godina nakon početka stvaranja zvijezda. Oko polovine željeza u Sunčevom sistemu potiče upravo od njih; drugu polovinu dale su supernove masivnih zvijezda.

Američka astronomkinja Jennifer Johnson sažela je sve to 2019. godine u jednu sliku koja je od tada obišla svijet: periodni sistem u kojem je svaki element obojen prema izvorima iz kojih potiče. Vodik je crn, iz Velikog praska. Helij je dijelom iz Velikog praska, a dijelom iz zvijezda. Ugljik i dušik uglavnom su iz umirućih zvijezda malih masa. Kisik, magnezij, silicij, sumpor, kalcij dolaze iz eksplozija masivnih zvijezda. Željezo je podijeljeno između masivnih zvijezda i bijelih patuljaka. Veliki dio elemenata težih od željeza obojen je bojom sudara neutronske zvijezde. Neke ćelije periodnog sistema su sive: elementi poput tehnecija i prometija, kojih u Sunčevom sistemu nema jer su se odavno raspali. Na toj slici periodni sistem prestaje biti tabela iz hemije i postaje historijska karta svemira.

Johnson navodi i broj koji vrijedi zapamtiti. Za gotovo četrnaest milijardi godina, koliko zvijezde rade, u našoj galaksiji je tek oko dva posto vodika i helija pretvoreno u sve ostale elemente. Svaka stijena, svaki okean, svako živo biće izgrađeno je od te tanke kore. Svemir se, drugim riječima, tek počeo kuhati.

Neki od tih elemenata i danas rade. Uran-238, s vremenom poluraspada od oko četiri i po milijarde godina, i uran-235, s oko

sedam stotina miliona godina, oba isključivo proizvod r-procesa, zajedno s torijem i kalijem-40 griju unutrašnjost Zemlje. Mjerenja geoneutrina (antineutrina koji nastaju u Zemljinoj unutrašnjosti tokom radioaktivnog raspada prirodnih elemenata) pokazala su da otprilike polovina toplote koja izlazi iz Zemljine unutrašnjosti potiče od radioaktivnosti. Tektonika ploča, koja nam je u poglavlju o rijetkoj Zemlji izgledala kao jedan od uslova složenog života, dijelom je pogonjena toplotom jezgara skovanih u zvijezdama koje su umrle prije nego što je nastalo Sunce.



Nukleosintetski izvori elemenata u Sunčevom sistemu. Svaki element periodnog sistema označen je prema relativnom doprinosu različitih izvora nukleosinteze u vrijeme nastanka Sunčevog sistema. Prikazani su samo prirodno prisutni elementi; umjetno proizvedeni elementi i oni nastali isključivo radioaktivnim raspadom dugovječnih jezgara označeni su sivom bojom. [26]

20.12 Zvezdana prašina na dlanu

Sve dosad rečeno oslanja se na svjetlost i proračune. Postoji, međutim, i opipljiv dokaz. Dana 28. septembra 1969. godine u blizini mjesta Murchison u Australiji pao je meteorit, danas jedan od najproučavanijih na svijetu. Takvi primitivni meteoriti čuvaju sitna

zrna prašine koja su starija od Sunčevog sistema: preživjela su oblak iz kojeg je nastalo Sunce, jer su bila dovoljno otporna, poput zrna silicij-karbida, grafitu i nanodijamanata. Prvi put su izdvojena 1987. godine. Njihov identitet otkriva izotopski sastav koji potpuno odstupa od svega što nalazimo na Zemlji: omjeri izotopa ugljika, silicija ili titana u njima nose potpis pojedinačnih zvijezda, najčešće crvenih divova na asimptotskoj grani, a ponekad i supernovih.

Ta zrna nisu nagađanje o zvjezdanoj prašini; ona su zvjezdana prašina, komad tuđe zvijezde koji se može staviti pod mikroskop. Kada je 2020. godine grupa istraživača izmjerila koliko su dugo pojedina zrna bila izložena kosmičkim zracima u međuzvjezdanom prostoru, pokazalo se da je većina zrna starija od Sunčevog sistema desetinama do stotinama miliona godina, a neka, po tim procjenama, i do oko tri milijarde godina. Neke od zvijezda koje su ih stvorile ugasile su se prije nego što je Sunce uopće zasjalo.

I sam početak Sunčevog sistema nosi otisak susjednih zvijezda. Najstarija čvrsta tijela u meteoritima, bijela zrna bogata kalcijem i aluminijem, stara oko 4,567 milijardi godina, sadržavala su u trenutku nastanka radioaktivni aluminij-26, čije je vrijeme poluraspada oko sedam stotina hiljada godina. Taj izotop je morao nastati u nekoj masivnoj zvijezdi i dospjeti u oblak iz kojeg je nastalo Sunce vrlo kratko prije toga, u kosmičkim razmjerima gotovo trenutno. Sunce se, drugim riječima, nije rodilo samo; vjerovatno je rođeno u jatu, u društvu zvijezda koje su živjele brzo i umrle blizu.

20.13 Inventar jedne ruke

Sada možemo učiniti ono što je bilo nemoguće kad je Comte pisao. Pogledajte vlastitu ruku i čitajte je kao arhiv.

Gotovo dvije trećine atoma u vašem tijelu su atomi vodika, u vodi, mastima i proteinima. Svaki od njih nastao je u prvim minutama svemira, prije oko 13,8 milijardi godina, i od tada je, u ovom ili onom obliku, putovao kroz oblake, zvijezde, okeane i živa bića.

Među njima je i oko dva grama deuterija, od kojeg svaki atom, kao što smo vidjeli, može biti samo iz tih prvih minuta Velikog praska, jer ga zvijezde uništavaju.

Ugljik u vašim proteinima i DNK nastao je u trostrukom alfa-procesu, zahvaljujući Hoyleovoj rezonanciji, većim dijelom u umirućim zvijezdama malih i srednjih masa koje su ga tiho otpuhale u svojim vjetrovima, a dijelom u masivnim zvijezdama. Azot u vašim aminokiselinama uglavnom potiče iz CNO ciklusa u zvijezdama malih masa. Kisik, koji čini gotovo dvije trećine mase vašeg tijela, gotovo sav je izbačen iz masivnih zvijezda, najvećim dijelom u eksplozijama supernovih.

Kalcij u vašim kostima i zubima, oko kilogram u prosjeku, potiče uglavnom iz eksplozivne nukleosinteze u supernovim masivnih zvijezda. Fosfor u vašim kostima i u kičmi svake molekule DNK takođe je iz masivnih zvijezda. Željezo u hemoglobinu, oko četiri grama u odraslom čovjeku, otprilike je pola iz supernovih masivnih zvijezda, a napola iz eksplozija bijelih patuljaka, i gotovo sve je nekada bilo radioaktivni nikel-56 čiji je raspad nekoliko mjeseci osvjetljavao neku daleku galaksiju.

Jod u vašoj štitnoj žlijezdi, svega desetak do dvadesetak miligrama, jedan je od najtežih elemenata koji su neophodni za život, i gotovo sav je nastao r-procesom: u sudaru dvije neutronske zvijezde ili u nekoj rijetkoj vrsti supernove, u nekoliko sekundi nezamislivog toka neutrona. Isti je izvor i zlata u vjenčanom prstenu ili zubnim plombama koje su toliko cijenile komunističke zemlje. Ako ste ikada držali komad zlata u ruci, držali ste materiju koja je nekada bila dio neutronske zvijezde.

A u vama se i u ovom trenutku nešto događa. Oko sto četrdeset grama kalija u tijelu odrasle osobe sadrži sićušan udio radioaktivnog kalija-40, nastalog u masivnim zvijezdama prije nego što je Sunce postojalo. U vašem tijelu se svake sekunde raspadne oko četiri

hiljade takvih jezgara. Svaki taj raspad je tihi otkucaj sata koji je navijen u zvijezdi čije ime nikada nećemo saznati, i koji još nije stao.

Nijedan od tih atoma nije napravljen za vas. Kao što smo vidjeli u poglavlju o svrsi bez dizajnera, zvijezde nisu imale nikakav cilj; one su samo sagorijevale gorivo i umirale na načine koje su im propisivali zakoni nuklearne fizike. Ali između tih slijepih procesa i vaše ruke proteže se neprekinut lanac uzroka koji možemo pratiti, element po element, sve do početka. To je možda najdublji smisao u kojem je čovjek kosmičko biće: ne zato što ga je svemir htio, nego zato što je od svemira doslovno napravljen.

20.14 Povratak na obalu

Vratimo se, na kraju, Feynmanovom čovjeku na obali. Talasi i dalje udaraju u pijesak, a molekuli u njima i dalje tvrdoglavo gledaju svoja posla. Ali sada znamo nešto novo. Vodik u pjenu star je koliko i svemir. Kisik u vodi prošao je kroz srce zvijezde koja je eksplodirala prije nego što je nastalo Sunce. Kalcij u školjkama na pijesku i u kostima čovjeka koji ih posmatra potiče iz istih ljuski davno raznesenih zvijezda. Sićušna zrna zlata u pijesku nekada su bila dio neutronske zvijezde. Obala nije samo mjesto gdje se more susreće s kopnom. To je mjesto gdje se susreću svi dijelovi kosmičke historije.

Feynman je poentu svoje pjesme stavio u čuđenje: materija s radoznalošću, koja se čudi vlastitom čuđenju. Kroz dvadeset poglavlja ove knjige vidjeli smo odakle to čuđenje izrasta: iz emergencije i samoorganizacije, iz strijele vremena koja dopušta da nastane složenost, iz kvantnih pravila koja atomima daju veličinu i drže nas da ne propadnemo kroz pod, iz nerazumne djelotvornosti matematike kojom sve to uopće možemo opisati, i iz mnogo lica inteligencije koja su se u prirodi razvila da o svemu tome razmišljaju. Ovo posljednje poglavlje dodaje samo jednu stvar: materijal. Sve te priče ispričane su od istih atoma, a svaki od njih nosi datum i mjesto rođenja.

Zato naslov ove knjige nije samo metafora. Atom u svemiru: svaki od nas je sićušna nakupina materije na jednoj planeti oko jedne od stotina milijardi zvijezda u jednoj od stotina milijardi galaksija. Takođe, može se reći i da je svemir u atomu: u svakom od tih atoma zapisana je historija svemira, od prvih minuta, kroz peći zvijezda i njihove eksplozije, do sudara koje danas čujemo kao drhtaj prostor-vremena. Kada jedne vedre noći ugasite svjetla i pogledate gore, imajte na umu da ne gledate u nešto strano. Gledate u radionice u kojima ste napravljeni, i u one u kojima se, upravo sada, pravi materijal za neke buduće oči koje će jednog dana stajati na nekoj drugoj obali i čuditi se.

Literatura

- [1] Feynman, R. P. (1955). The Value of Science. *Engineering and Science*, 19(3), 13-15. (Pretiskano u [2].)
- [2] Feynman, R. P. (1999). The Pleasure of Finding Things Out: The Best Short Works of Richard P. Feynman. Cambridge, MA: Perseus Books.
- [3] Comte, A. (1835). *Cours de philosophie positive*, Tome II. Paris: Bachelier.
- [4] Payne, C. H. (1925). *Stellar Atmospheres: A Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars*. Harvard Observatory Monographs No. 1. Cambridge, MA: Harvard Observatory.
- [5] Eddington, A. S. (1920). The Internal Constitution of the Stars. *The Observatory*, 43, 341-358.
- [6] Bethe, H. A. (1939). Energy Production in Stars. *Physical Review*, 55(5), 434-456.
- [7] Alpher, R. A., Bethe, H., & Gamow, G. (1948). The Origin of Chemical Elements. *Physical Review*, 73(7), 803-804.
- [8] Hoyle, F. (1954). On Nuclear Reactions Occurring in Very Hot Stars. I. The Synthesis of Elements from Carbon to Nickel. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1, 121-146.

- [9] Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1957). Synthesis of the Elements in Stars. *Reviews of Modern Physics*, 29(4), 547-650.
- [10] Merrill, P. W. (1952). Spectroscopic Observations of Stars of Class S. *The Astrophysical Journal*, 116, 21-26.
- [11] Weinberg, S. (1993). *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* (dopunjeno izd.). New York: Basic Books.
- [12] Clayton, D. D. (1983). *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*. Chicago: University of Chicago Press.
- [13] Rolfs, C. E., & Rodney, W. S. (1988). *Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics*. Chicago: University of Chicago Press.
- [14] Arnett, D. (1996). *Supernovae and Nucleosynthesis: An Investigation of the History of Matter, from the Big Bang to the Present*. Princeton: Princeton University Press.
- [15] Clayton, D. (2003). *Handbook of Isotopes in the Cosmos: Hydrogen to Gallium*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [16] Pagel, B. E. J. (2009). *Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies* (2. izd.). Cambridge: Cambridge University Press.
- [17] Iliadis, C. (2015). *Nuclear Physics of Stars* (2. izd.). Weinheim: Wiley-VCH.
- [18] Kragh, H. (1996). *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press.
- [19] Kragh, H. (2010). When is a prediction anthropic? Fred Hoyle and the 7.65 MeV carbon resonance. *Archive for History of Exact Sciences*, 64(6), 721-751.
- [20] Chown, M. (1999). *The Magic Furnace: The Search for the Origins of Atoms*. London: Jonathan Cape.
- [21] Gribbin, J., & Gribbin, M. (2000). *Stardust: Supernovae and Life - The Cosmic Connection*. New Haven: Yale University Press.
- [22] Abbott, B. P. i sar. (LIGO Scientific Collaboration i Virgo Collaboration) (2017). GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Physical Review Letters*, 119, 161101.

- [23] Kasen, D., Metzger, B., Barnes, J., Quataert, E., & Ramirez-Ruiz, E. (2017). Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event. *Nature*, 551, 80-84.
- [24] Watson, D., Hansen, C. J., Selsing, J. i sar. (2019). Identification of strontium in the merger of two neutron stars. *Nature*, 574, 497-500.
- [25] Siegel, D. M., Barnes, J., & Metzger, B. D. (2019). Collapsars as a major source of r-process elements. *Nature*, 569, 241-244.
- [26] Johnson, J. A. (2019). Populating the periodic table: Nucleosynthesis of the elements. *Science*, 363(6426), 474-478.
- [27] Heck, P. R., Greer, J., Kööp, L. i sar. (2020). Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 1884-1889.

Epilog

Ova knjiga počela je jednim pitanjem, a završava se drugim. Između njih stalo je dvadeset poglavlja, nekoliko hiljada godina ljudske radoznalosti i otprilike 13,8 milijardi godina kosmičke historije. Ipak, nijedno od tih poglavlja ne daje konačan odgovor. To nije propust, nego priroda stvari o kojima smo govorili.

Kada se osvrnete na put koji smo zajedno prešli, vidjećete da se kroz sve teme provlači ista nit. Emergencija nam je pokazala da cjelina može znati ono što nijedan njen dio ne zna. Ništavilo nas je naučilo da ni praznina nije sasvim prazna. Strijela vremena otkrila je da naša prošlost počiva na jednom veoma neobično urednom početku. Samoorganizacija, fraktali i rojevi pokazali su da red ne mora imati graditelja. Kvantna mehanika nas je uvjerila da je svijet na najsitnijoj skali stran, ali i da nas upravo ta "stranost" drži da ne propadnemo kroz pod. Matematika se pokazala nerazumno djelotvornom, a svemir tamniji nego što smo mislili. Inteligencija ima mnogo lica, svrha može postojati bez dizajnera, a atomi od kojih smo sazdani nose u sebi historiju zvijezda.

Svaki put kada bismo pomislili da smo stigli do dna, pod nogama bi se otvorio novi sprat. Mislim da je to najvažnija lekcija ove knjige: svemir nije zagonetka koja čeka da je jednom zauvijek riješimo, nego razgovor koji se nastavlja. Svaki odgovor koji nauka pronade postaje prag za novo pitanje, preciznije i dublje od prethodnog. Richard Feynman je govorio da bi radije živio s neznanjem nego s odgovorima koji bi mogli biti pogrešni. U tome nema razočarenja. U tome je sloboda.

Pisao sam ove tekstove u vremenu u kojem je lako izgubiti osjećaj za mjeru. Svakodnevica nas uvjerava da je sve važno i da je sve hitno. Noćno nebo govori suprotno. Svjetlost koju večeras vidimo s neke

daleke galaksije krenula je na put prije nego što je na Zemlji postojao ijedan čovjek. Pred tim razmjerima naše brige se ne gube, ali dobijaju pravu veličinu. Istovremeno, to isto nebo nas podsjeća da nismo stranci u svemiru. Napravljeni smo od njegovog materijala, i kroz nas svemir, na jednoj maloj planeti, pokušava razumjeti samog sebe.

Moj otac je, šetajući obalom Dobrinje, jednom pogledao u nebo i upitao: "Šta će im ovolike zvijezde?" Prvobitno sam se nasmijao. Danas mislim da je to bilo jedno od najdubljih pitanja koje sam ikada čuo. Nakon svega što smo prošli kroz ovu knjigu, usuđujem se ponuditi odgovor. Te zvijezde su bile potrebne da bi nastao ugljik u našim ćelijama, kisik koji dišemo, kalcij u našim kostima i željezo u našoj krvi. Trebalo ih je bezbroj, i trebale su milijarde godina, da bi se jednog dana na obali jedne rijeke našla dva čovjeka i zapitala zašto ih ima toliko. Zvijezde nisu tu zbog nas. Ali mi smo tu zbog njih.

Knjiga se ovdje završava, ali pitanja ostaju. Neka ostanu. Nadam se da vas je bar jedno od njih natjeralo da zastanete, da potražite neku od knjiga iz literature ili da jedne vedre noći ugasite svjetla i dugo gledate gore. I možda se upitate: zašto postoji nešto umjesto ništa?

Jer na kraju, kao i na početku, stojimo na istom mjestu: mali, radoznali i sačinjeni od zvjezdane prašine. Atom u svemiru, koji se usudio pitati kako je svemir dospio u njega.

Dodatak A

Rječnik manje poznatih pojmova

Abiogeneza - Nastanak živog iz neživog; proces kojim su iz jednostavnih hemijskih spojeva na ranoj Zemlji nastali prvi samoodrživi, živi sistemi.

Aksion - Hipotetička vrlo laka čestica, prvobitno uvedena zbog drugog problema u fizici čestica, a danas jedan od vodećih kandidata za tamnu materiju; traži se preko mogućeg pretvaranja u foton u jakom magnetnom polju.

Alometrija - Proučavanje kako se oblik i proporcije živih bića pravilno mijenjaju s njihovom veličinom - na primjer, kako debljina kosti raste u odnosu na masu tijela.

Antisimetrija - Svojstvo zajedničke talasne funkcije dva istovjetna fermiona da mijenja znak kad im se zamijene mjesta; iz njega slijedi Paulijev princip isključenja.

Antropsko načelo - Zapažanje da su svojstva svemira nužno takva da dopuštaju postojanje posmatrača; činjenica da mi postojimo ograničava vrijednosti koje temeljne konstante mogu imati.

Asimptotska grana divova (AGB) - Kasna faza života zvijezda malih i srednjih masa u kojoj se oko jezgra naizmjenično pale ljuske vodika i helija; mjesto s-procesa i izvor velikog dijela ugljika i azota u svemiru.

Atraktor - Stanje ili skup stanja kojima dinamički sistem teži tokom vremena, bez obzira na to od kojih je početnih uvjeta krenuo.

Autogen - Deaconov hipotetički najjednostavniji samoodrživi sistem: autokatalitički skup molekula spregnut s ljuskom koja se

sama sklapa oko njega, pa se sistem sam popravlja i može se umnožiti; model najranijeg "ja" u prirodi.

Autokataliza - Reakcija u kojoj je jedan od proizvoda ujedno i katalizator te iste reakcije, pa se ona sama ubrzava i podržava; ključan korak ka samoodrživim hemijskim mrežama.

Autopoeza - Samostvaranje; organizacija živog sistema kao mreže procesa koja proizvodi vlastite komponente i granicu koja ga odvaja od okoline. Pojam su uveli Humberto Maturana i Francisco Varela.

B²FH - Skraćenica za rad Margaret i Geoffreya Burbidgea, Williama Fowlera i Freda Hoylea iz 1957. godine, u kojem je nastanak gotovo svih elemenata objašnjen sa osam procesa u zvijezdama.

Barionska materija - "Obična" materija sastavljena od bariona (protona i neutrona) zajedno s elektronima; sve od čega su načinjene zvijezde, planete i mi, a čini tek oko pet posto sadržaja svemira.

Bifurkacija - Tačka u razvoju sistema u kojoj mala promjena uvjeta uzrokuje naglo grananje na kvalitativno različita moguća ponašanja.

Bijeli patuljak - Zvezdani ostatak zvijezde slične Suncu nakon što potroši gorivo; sažet je do veličine planete, a od potpunog urušavanja brani ga kvantni degeneracijski pritisak elektrona.

Bioelektricitet - Sitne razlike u električnom naboju između ćelija koje živo tkivo koristi kao unutrašnji nacrt oblika; po Levinu, nosilac "pamćenja" oblika i temelj kognicije na razini ćelija.

Biosignatura - Hemijski ili fizikalni trag u atmosferi ili na površini nekog svijeta koji bi mogao ukazivati na prisustvo života, poput određenih kombinacija plinova.

Bohrov radijus - Karakteristična veličina atoma vodika, oko pola desetmilijardinke metra; određena masom i nabojem elektrona te Planckovom konstantom, i postavlja mjeru gustoće obične materije.

Bose-Einsteinov kondenzat - Stanje materije na temperaturi blizu apsolutne nule u kojem mnoštvo bozona zauzme isto, najniže kvantno stanje i počne se ponašati kao jedna cjelina.

Bozon - Vrsta čestice (poput fotona) koja, za razliku od fermiona, dopušta da se proizvoljno mnogo istovjetnih čestica nađe u istom kvantnom stanju.

Bullet Cluster (jato Metak) - Sudar dva jata galaksija u kojem se vrući gas (vidljiv u rendgenskom području) i najveći dio gravitacione mase (mjeren gravitacionim sočivom) prostorno razdvajaju; jedan od najuvjerljivijih dokaza postojanja tamne materije.

Casimirov efekt - Slaba privlačna sila između dvije bliske ploče u vakuumu, koja nastaje jer između njih stane manje kvantnih treperenja polja nego izvan njih; opipljiv dokaz da prazan prostor nije prazan.

Chandrasekharova granica - Najveća masa koju degeneracijski pritisak elektrona može nositi, oko 1,4 mase Sunca; iznad nje se bijeli patuljak urušava u neutronska zvijezdu ili crnu rupu.

Citoskelet - Mreža bjelančevinastih vlakana unutar ćelije koja joj daje oblik, pokreće je i organizuje; glavne komponente su mikrotubule.

CNO ciklus - Niz nuklearnih reakcija u kojem ugljik, azot i kisik služe kao katalizatori pretvaranja vodika u helij; prevladava u zvijezdama masivnijim od Sunca.

Crna rupa - Područje prostor-vremena u kojem je gravitacija tako jaka da ni svjetlost ne može pobjeći; omeđeno je horizontom događaja.

Čudna petlja - Samopozivajući obrazac koji nastaje kada sistem postane dovoljno složen da počne modelirati samoga sebe; Hofstadterov prijedlog za prirodu osjećaja "ja".

De Broglieva talasna dužina - Talasna dužina pridružena svakoj čestici koja se kreće; što je čestica masivnija i brža, to je manja, zbog čega talasna priroda krupnih tijela ostaje neprimjetna.

Degeneracijski pritisak - Pritisak koji proizlazi iz kvantnog Paulijeve načela, a ne iz topline; drži bijele patuljke i neutronske zvijezde da se ne uruše pod vlastitom gravitacijom.

Dekoherencija - Proces kojim kvantni sistem, stupajući u dodir s okolinom, gubi svoja čisto kvantna svojstva (poput superpozicije) i počinje se ponašati klasično.

Deuterij - Teški izotop vodika čije jezgro čine jedan proton i jedan neutron; gotovo sav je nastao u prvim minutama svemira, jer ga zvijezde samo uništavaju.

Difuzija - Spontano širenje čestica iz područja veće u područje manje koncentracije, bez ikakvog pumpanja; djelotvorno je samo na vrlo malim udaljenostima, pa insektima ograničava debljinu tijela.

Dimenziona analiza (teorija sličnosti) - Metoda kojom se fizikalne veličine grupišu u bezdimenzionalne omjere; omogućava da se ponašanje velikog sistema predvidi iz umanjenog modela i pokazuje da veće nije naprosto srazmjerno jače.

Dinamička kinetička stabilnost - Prossov pojam za stabilnost populacije molekula koje se same kopiraju; ona ne počiva na nepromjenjivosti, nego na tome da se molekule obnavljaju brže

nego što se raspadaju, poput vodoskoka koji traje iako kroz njega stalno teče nova voda.

Disipativna adaptacija - Englandova ideja da sistemi izloženi stalnom izvoru energije tokom vremena poprimaju oblike koji odražavaju način na koji tu energiju apsorbuju ili joj odolijevaju, pa neživa materija može dobiti izgled prilagođenosti.

Disipativna struktura - Uređena struktura koja se održava samo dok kroz nju protiče energija i dok izbacuje entropiju u okolinu; poput vrtloga ili živog bića.

Drakeova jednačina - Formula koja procjenjuje broj civilizacija u galaksiji sa kojima bismo mogli komunicirati, množeći niz činilaca poput stope nastanka zvijezda i vjerovatnoće života.

Dvostruki prorez - Klasičan pokus u kojem čestice propuštene kroz dva otvora stvaraju interferencijski uzorak, pokazujući da se ponašaju i kao valovi.

Ego-tunel - Metzingerov naziv za model samoga sebe koji mozak neprestano gradi, a koji doživljavamo kao neposrednu stvarnost, ne kao konstrukciju; otud osjećaj jedinstvenog "ja".

Egzoplaneta - Planeta koja kruži oko neke druge zvijezde, a ne oko Sunca.

Elastična sličnost - Pravilo po kojem stub, kost ili deblo, da se ne bi savili pod vlastitom težinom, moraju rasti u debljinu brže nego u visinu (prečnik otprilike sa stepenom tri polovine visine).

Emergencija - Pojava novih svojstava na višem nivou složenosti koja se ne mogu jednostavno predvidjeti iz svojstava pojedinačnih dijelova; kako iz mnoštva jednostavnog nastaje kvalitativno novo.

Energija nulte tačke - Najmanja energija kretanja koju kvantni sistem zadržava čak i na apsolutnoj nuli, jer bi potpuno mirovanje prekršilo načelo neodređenosti.

Energija vezivanja - Energija potrebna da se atomsko jezgro razdvoji na pojedinačne protone i neutrone; po nukleonu je najveća kod jezgara oko željeza i nikla, pa energiju oslobađa spajanje lakših i cijepanje težih jezgara.

Entropija - Mjera nereda ili broja načina na koje se sistem može rasporediti; prema drugom zakonu termodinamike, u izolovanom sistemu vremenom raste.

Fantomska energija - Krajnji oblik tamne energije kod kojeg je efektivna jednačina stanja ispod -1 , pa ubrzano širenje s vremenom jača i može voditi "velikom rascjepu".

Fermatov princip - Načelo da svjetlost između dvije tačke putuje putanjom za koju je vrijeme putovanja stacionarno (najčešće najkraće); iz njega slijede zakoni odbijanja i loma svjetlosti.

Fermijevo more - Mnoštvo elektrona (ili drugih fermiona) koje, pokorno Paulijevoj zabrani, popunjava sva stanja do određene energije čak i kad je tijelo hladno; metalima daje dio krutosti.

Fermion - Vrsta čestice (poput elektrona) za koju vrijedi Paulijevo načelo: dvije istovjetne čestice ne mogu istovremeno zauzeti isto kvantno stanje, što daje materiji strukturu.

Filozofski zombi - Zamišljeno biće koje se ponaša potpuno kao svjestan čovjek, ali iznutra ne osjeća ništa; koristi se da istakne teški problem svijesti.

Fluktuacija (kvantna) - Sićušno, spontano treperenje (mreškanje) energije u praznom prostoru koje dopušta načelo neodređenosti; iz takvih fluktuacija, razvučenih inflacijom, nastale su galaksije.

Formalizam (matematički) - Shvatanje da je matematika igra simbola po dogovorenim pravilima, bez nužne veze sa stvarnošću; program potpune formalizacije uzdrmale su Gödelove teoreme.

Fraktal - Geometrijski oblik koji pokazuje sličnu strukturu na svim nivoima uvećanja; dio nalikuje cjelini, kao kod obale, pahulje ili krošnje drвета.

Fraunhoferove linije - Tamne linije u spektru Sunca i zvijezda koje nastaju kada atomi u vanjskim slojevima upijaju svjetlost tačno određenih talasnih dužina; svaki element ima svoj raspored linija.

Fröhlichova kondenzacija - Pretpostavljeno kolektivno, koherentno stanje koje bi biološki sistem mogao "ispumpati" ako se u njega uliva dovoljno energije, slično načinu na koji laser stvara koherentnu svjetlost.

Gama-sinhronizacija - Usklađene moždane oscilacije u opsegu od otprilike 30 do 90 herca; danas najbolji mjerljivi korelat svjesnog stanja.

Gödelove teoreme nepotpunosti - Rezultati po kojima u svakom dovoljno moćnom i konzistentnom formalnom sistemu postoje istinite tvrdnje koje se unutar njega ne mogu dokazati.

Gravitacioni talasi - Talasi zakrivljenosti prostor-vremena koji se šire brzinom svjetlosti, a nastaju pri ubrzanom kretanju velikih masa, na primjer pri sudaru neutronske zvijezde ili crnih rupa.

Gravitaciono sočivo - Savijanje svjetlosti udaljenog izvora u polju masivnog objekta, prema opštoj teoriji relativnosti; omogućava mapiranje ukupne mase, uključujući onu koja ne svijetli.

Haos (deterministički) - Ponašanje sistema koji slijedi tačne zakone, ali je tako osjetljiv na početne uvjete da mu je dugoročno ponašanje praktično nepredvidivo.

Heisenbergovo načelo neodređenosti - Temeljno kvantno pravilo po kojem određene parove veličina (npr. položaj i impuls) nije moguće istovremeno savršeno tačno odrediti.

Hemotaksija - Kretanje organizma, na primjer bakterije, prema hemijskoj tvari ili od nje, vođeno promjenom njene koncentracije u prostoru ili vremenu.

Hipoteza matematičkog svemira - Tegmarkova radikalna zamisao da fizička stvarnost nije samo opisana matematikom, nego da ona jeste matematička (geometrijska) struktura.

Holografsko načelo - Zamisao da se sav sadržaj nekog područja prostora može u potpunosti opisati informacijom zapisanom na njegovoj dvodimenzionalnoj granici, poput holograma.

Homeostaza - Sposobnost organizma da aktivno održava unutrašnje veličine, poput temperature, šećera u krvi ili pritiska, unutar uskih granica, uprkos promjenama u okolini; pojam je popularizovao Walter Cannon.

Horizont događaja - Granica oko crne rupe iza koje ništa, pa ni svjetlost, ne može pobjeći; jednom pređena, nema povratka.

Hoyleova rezonancija - Pobuđeno stanje jezgra ugljika-12 na oko 7,65 MeV, koje je Fred Hoyle predvidio 1953. godine; bez njega trostruki alfa-proces ne bi proizvodio dovoljno ugljika.

Hubbleova konstanta - Veličina (oznaka H_0) koja opisuje današnju stopu širenja svemira; različite metode mjerenja daju nešto različite vrijednosti.

Hubbleova tenzija - Uporno neslaganje između vrijednosti Hubbleove konstante dobivene iz ranog svemira (kosmičko mikrovalno pozadinsko zračenje) i iz kasnog svemira (cefeide i supernove).

Inflacija (kosmička) - Kratak period nezamislivo brzog širenja svemira u prvom djeliću sekunde, koji objašnjava njegovu ravnoću i glatkoću te sjeme buduće strukture.

Integralna povratna sprega - Način regulacije u kojem se korekcija zasniva na nagomilanoj (integriranoj) grešci, pa sistem vraća izlaz tačno na zadanu vrijednost; u tehnici je to član PID regulatora, a u prirodi mehanizam adaptacije bakterijske hemotaksije.

Intencionalni stav - Pristup (Dennett) u kojem sistem opisujemo kao da ima ciljeve, želje i uvjerenja, jer nam to omogućava da mu predvidimo ponašanje - bez tvrdnje da išta uistinu razumije.

Interferencija - Preklapanje talasa pri kojem se oni mogu pojačati ili poništiti; u kvantnoj fizici javlja se i kod pojedinačnih čestica.

Intuicionizam - Gledište, koje je zastupao Brouwer, po kojem matematika ne postoji nezavisno, nego živi jedino u umu koji je korak po korak konstruiše.

Izostazija - Ravnoteža po Arhimedovom zakonu kojom Zemljina kora "pliva" na gušćem plaštu; zbog nje planinski lanci imaju duboke korijene, poput uronjenog dijela sante leda.

Kantovska cjelina - Kauffmanov pojam, izveden iz Kanta: organizovana cjelina u kojoj dijelovi postoje za cjelinu i pomoću cjeline; tek unutar takve cjeline pojam funkcije dobija jasan smisao.

Kataliza - Ubrzavanje hemijske reakcije pomoću određene materije (katalizatora) koja se pritom sama ne troši.

Kibernetika - Nauka o upravljanju i komunikaciji u živim bićima i mašinama, zasnovana na pojmu povratne sprege; ime joj je 1948. dao Norbert Wiener, po grčkoj riječi za kormilara.

Kilonova - Sjajna, kratkotrajna eksplozija koja prati sudar dvije neutronske zvijezde; sija zahvaljujući radioaktivnom raspadu svježih stvorenih teških jezgara r-procesa.

Kleiberov zakon - Empirijsko pravilo po kojem metabolizam živog bića raste otprilike sa stepenom tri četvrtine njegove mase, pa krupnije životinje troše srazmjerno manje energije po kilogramu.

Kolapsar - Masivna zvijezda čije se jezgro na kraju života urušava direktno u crnu rupu okruženu vrelim diskom; mogući izvor elemenata r-procesa.

Kompetencija bez razumijevanja - Sposobnost sistema da obavlja svrsishodne radnje bez ikakvog razumijevanja onoga što čini; po Dennettu, takva umješnost prožima cijelu prirodu, od bakterije naviše.

Kompleksni brojevi - Brojevi koji uključuju korijen iz minus jedan; izmišljeni kao algebarska dosjetka, pokazali su se nezaobilaznim u kvantnoj mehanici.

Konačni uzrok (telos) - Aristotelov uzrok koji odgovara na pitanje radi čega nešto postoji ili se dešava; moderna fizika ga je izbacila iz objašnjenja prirode.

Kondenzat - Vidi Bose-Einsteinov kondenzat.

Kosmičke zrake - Protoni i atomska jezgra ubrzani do brzina bliskih brzini svjetlosti, najvećim dijelom u udarnim talasima supernova; njihovi sudari s međuzvjezdanim plinom stvaraju litij, berilij i bor.

Kosmičko mikrovalno pozadinsko zračenje - Slabo zračenje zaostalo iz mladog, vrelog svemira, koje ispunjava cijelo nebo i nosi otisak najranijih fluktuacija gustine.

Kosmološka konstanta (Λ) - Član koji je Einstein uveo u jednačine opšte relativnosti; danas najjednostavniji opis tamne energije kao svojstva samog vakuuma.

Kosmološka prirodna selekcija - Spekulativna hipoteza po kojoj crne rupe rađaju nove svemire, pa se kroz naraštaje svemira "selektiraju" oni čiji zakoni pogoduju stvaranju crnih rupa.

Ksenoboti - Sićušni pokretni sklopovi sastavljeni od živih ćelija (izvorno žabljih) koji se sami organizuju, kreću, zacjeljuju i u nekim uslovima umnožavaju.

Kvantna elektrodinamika - Kvantna teorija elektromagnetnog međudjelovanja; predviđanja joj se slažu s mjerenjima do oko dvanaest decimala, pa važi za najtačnije provjerenu teoriju u nauci.

Kvantna koherencija - Svojstvo kvantnog sistema da zadrži tačno usklađene faze svojih stanja, preduvjet za superpoziciju; dodir s okolinom ga uništava (dekoherencija).

Kvantna spregnutost - Pojava u kojoj dvije čestice ostaju povezane tako da mjerenje jedne trenutno određuje ishod za drugu, bez obzira na udaljenost, ali bez prenosa poruke.

Kvantno tuneliranje - Kvantna pojava u kojoj čestica prođe kroz energetske barijere koju po klasičnoj fizici nikako ne bi mogla savladati.

Kvintesencija - Hipotetičko dinamičko polje čija se gustoća mijenja kroz vrijeme, kao moguća alternativa kosmološkoj konstanti u ulozi tamne energije.

Lambda-CDM (Λ CDM) - Standardni kosmološki model koji objedinjuje hladnu tamnu materiju (eng. Cold Dark Matter) i kosmološku konstantu (Λ), a uspješno povezuje širok raspon posmatranja.

Landauerovo načelo - Pravilo da brisanje jednog bita informacije neizbježno oslobađa najmanju količinu topline ($k \cdot T \cdot \ln 2$); dokaz da je informacija fizička veličina.

Lantanidi - Grupa od petnaest teških elemenata, od lantana do lutecija, poznatih i kao elementi rijetkih zemalja; nastaju pretežno r-procesom i snažno upijaju plavu svjetlost.

MACHO - Masivni kompaktni objekti u halou galaksije (slabe zvijezde, patuljci, crne rupe); kandidati za tamnu materiju od obične materije, kojih ne može biti dovoljno da objasne sav manjak mase.

Makrostanje - Ukupno, krupno stanje sistema opisano veličinama poput temperature ili pritiska, koje odgovara ogromnom broju mogućih mikrostanja.

Maxwellov demon - Zamišljeno biće koje razvrstavanjem molekula naizgled krši drugi zakon termodinamike; zagonetku rješava spoznaja da i njegovo pamćenje i brisanje informacije imaju termodinamičku cijenu.

Metabolizam - Ukupnost hemijskih procesa kojima organizam pretvara hranu u energiju; brzina metabolizma mjeri koliko energije tijelo troši u jedinici vremena.

Metalicitet - Udio elemenata težih od helija u zvijezdi ili plinu; astronomi sve takve elemente, pa i kisik i ugljik, nazivaju "metalima".

Mikrostanje - Tačan, potpun raspored svih čestica sistema; mnoštvo mikrostanja odgovara jednom istom makrostanju.

Mikrotubule - Šuplje cjevaste strukture prečnika oko dvadeset i pet nanometara, izgrađene od proteina tubulina; dio unutrašnjeg skeleta ćelije i, prema Orch-OR teoriji, moguće mjesto kvantnih procesa svijesti.

MOND - Modifikovana Newtonova dinamika (Milgrom, 1983): pretpostavka da se pri veoma malim ubrzanjima mijenja odnos sile i ubrzanja, čime se kretanje u galaksijama objašnjava bez tamne materije.

Multiverzum - Hipotetički skup mnoštva svemira, od kojih svaki može imati različite vrijednosti fizikalnih zakona i konstanti.

Nastanjiva zona - Pojas oko zvijezde u kojem temperatura dopušta postojanje tečne vode na površini planete, često nazvan i "zona Zlatokose".

Ne-euklidska geometrija - Geometrija zakrivljenih prostora, u kojima ne vrijede sva Euklidova pravila; razvijena kao apstrakcija, poslužila je kao jezik opće relativnosti.

Negativna povratna sprega - Mehanizam u kojem se informacija o izlazu vraća na ulaz tako da smanjuje odstupanje od zadane vrijednosti; osnova svakog regulatora i, po Rosenbluthu, Wieneru i Bigelowu, svakog svrhovitog ponašanja.

Neutrinska magla - Granica osjetljivosti detektora tamne materije na kojoj koherentno rasijanje solarnih neutrina počinje davati signale slične onima koje bi ostavila sama tamna materija.

Neutronska zvijezda - Izuzetno gust ostatak masivne zvijezde, sažet gotovo isključivo u neutrone; od urušavanja je brani degeneracijski pritisak neutrona.

Ništavilo - Pojam potpunog odsustva; u fizici se razlikuje prazan prostor (koji ipak treperi), stanje bez prostora i vremena, te filozofsko apsolutno ništa bez ijednog zakona ili mogućnosti.

Nukleosinteza (prvobitna) - Stvaranje lakih elemenata u prvim minutama svemira; njen ishod ograničava koliko obične (barionske) materije svemir može sadržavati.

Nukleosinteza (zvjezdana) - Stvaranje elemenata težih od helija nuklearnim reakcijama u zvijezdama, u eksplozijama supernovih i u sudarima neutronske zvijezde.

Objektivna redukcija (OR) - Penroseov prijedlog po kojem kolaps kvantne superpozicije nije stvar posmatrača, nego stvaran fizički proces koji izaziva gravitacija kada razlika u zakrivljenosti prostor-vremena dosegne Planckovu mjeru.

Orch-OR (orkestrirana objektivna redukcija) - Hipoteza Penrosea i Hameroffa da svijest nastaje iz kvantnih procesa u mikrotubulama neurona, okončanih orkestriranim događajima objektivne redukcije.

Panpsihizam - Filozofsko gledište prema kojem su elementi iskustva, makar u tragovima, utkani u samu strukturu stvarnosti, a nisu svojstvo isključivo složenih mozgova.

Panspermija - Hipoteza da se život, ili njegovi gradivni elementi, može prenositi između svjetova, na primjer unutar meteorita.

Paulijev princip isključenja - Pravilo da dva istovjetna fermiona ne mogu istovremeno zauzeti isto kvantno stanje; temelj strukture atoma i čvrstoće materije.

Platonizam (matematički) - Gledište da matematički objekti postoje u bezvremenom, apstraktnom svijetu nezavisno od ljudi, pa ih matematičar ne izmišlja nego otkriva.

Poetski naturalizam - Gledište (Carroll) da postoji samo jedan svijet, u temelju opisan česticama i poljima, ali da su viši opisi - želje, ciljevi, značenje - jednako istiniti, svaki na svojoj razini.

Potrebna sloboda - Pojam Hansa Jonasa: organizam je slobodan od svake pojedinačne molekule koja ga čini, ali upravo zato mora neprestano razmjenjivati materiju s okolinom da bi opstao.

Površinska napetost - Sila koja površinu tekućine drži zategnutom poput opne; za sitne organizme opasnija je od gravitacije, jer ih kap vode može zarobiti.

Prediktivna obrada - Shvatanje da mozak nije pasivni prijemnik osjeta, nego uređaj koji neprestano predviđa svijet, a čula uglavnom samo ispravljaju njegove pogreške; opažanje kao "kontrolisana halucinacija".

Presolarna zrna - Sitna zrna prašine u primitivnim meteoritima, starija od Sunčevog sistema, čiji izotopski sastav otkriva zvijezde u kojima su nastala.

Problem koincidencije - Pitanje zašto baš u sadašnjoj epohi gustoće materije i tamne energije imaju sličan red veličine, iako se kroz historiju svemira mijenjaju.

Promiskuitetna teleologija - Sklonost, posebno izražena kod djece, da se svrha pripisuje i neživim prirodnim pojavama, poput kamenja, oblaka ili planina; pojam je uvela psihologinja Deborah Kelemen.

Proton-proton lanac - Glavni niz nuklearnih reakcija kojim zvijezde poput Sunca pretvaraju vodik u helij; prvi korak zahtijeva kvantno tuneliranje i djelovanje slabe nuklearne sile, pa je izuzetno spor.

Qualia - Kvalitativni, doživljajni aspekti iskustva - poput crvenila crvene boje ili oštine bola; ono "kako je" nešto osjetiti.

Qubit (kvantni bit) - Osnovna jedinica kvantne informacije koja, za razliku od običnog bita, može biti u superpoziciji vrijednosti 0 i 1 istovremeno.

Redukcionizam - Pristup koji nastoji objasniti cjelinu svođenjem na svojstva i zakone njenih najsitnijih dijelova.

Reynoldsov broj - Bezdimenzionalni omjer koji pokazuje prevladavaju li u strujanju sile inercije ili viskoznosti; pri malim vrijednostima (kao za bakteriju u vodi) tekućina se ponaša poput gustog sirupa.

Ribosom - Molekularna mašina u ćeliji koja "čita" uputu prepisanu iz gena (glasničku RNK) i po njoj slaže bjelančevine.

Rojna inteligencija - Oblik inteligencije razapet preko mnoštva jednostavnih jedinki (mrava, pčela) koje bez vođe, slijedeći lokalna pravila, zajednički rješavaju složene zadatke.

Rotaciona kriva - Grafik brzine kruženja zvijezda i gasa u zavisnosti od udaljenosti od centra galaksije; njena neočekivana ravnoca glavni je trag postojanja tamne materije.

r-proces - Brzo hvatanje neutrona u okruženju s ogromnom gustoćom neutrona, pri kojem jezgra hvataju neutrone brže nego što se stignu raspasti; stvara oko polovine elemenata težih od željeza, uključujući zlato, platinu i uran.

Samooorganizacija - Spontano nastajanje uređenih struktura iz lokalnih pravila i međudjelovanja, bez ikakvog središnjeg plana ili naredbodavca.

Singularitet - Tačka, npr. u središtu crne rupe, u kojoj poznate fizikalne veličine postaju beskonačne i teorije prestaju važiti.

Spalacija - Razbijanje atomskih jezgara pri sudaru s česticama visoke energije, na primjer s kosmičkim zrakama.

Spektroskopija - Razlaganje svjetlosti na talasne dužine radi proučavanja sastava, temperature i kretanja njenog izvora; iz nje saznajemo od čega su načinjene zvijezde.

Spin - Unutrašnji kvantni "okretaj" čestice koji može imati samo izdvojene vrijednosti; kod elektrona su moguće dvije, a spin određuje pripada li čestica fermionima ili bozonima.

s-proces - Sporo hvatanje neutrona u zvijezdama asimptotske grane divova, pri kojem se nestabilna jezgra raspadnu prije sljedećeg hvatanja; gradi elemente od željeza do olova i bizmuta.

Stabilnost materije - Svojstvo da energija i zapremina tijela rastu srazmjerno broju čestica, tako da se materija niti uruši niti ponaša nepredvidivo pri povećanju; zajamčena je samo ako su elektroni fermioni.

Standardna svijeća - Vidi Supernova tipa Ia.

Sterilni neutrino - Hipotetička vrsta neutrina koja bi s običnom materijom djelovala još slabije od poznatih neutrina; mogući kandidat za tamnu materiju.

Strijela vremena - Jasan smjer u kojem vrijeme teče, od prošlosti ka budućnosti; obično se povezuje s porastom entropije, iako temeljni zakoni ne razlikuju smjer.

Supernova s kolapsom jezgra - Eksplozija masivne zvijezde, teže od oko osam Sunčevih masa, nakon što se njeno željezno jezgro uruši; iza nje ostaje neutronska zvijezda ili crna rupa.

Supernova tipa Ia - Eksplozija bijelog patuljka; služi kao "standardna svijeća" za mjerenje kosmičkih udaljenosti, čime je otkriveno ubrzano širenje svemira.

Superpozicija - Kvantno stanje u kojem sistem istovremeno objedinjuje više klasično nespojivih mogućnosti, sve dok ga mjerenje ne svede na jednu.

Talasna funkcija - Matematički opis kvantnog stanja iz kojeg se izvode vjerovatnoće mogućih ishoda mjerenja.

Tamna energija - Nepoznata komponenta odgovorna za ubrzano širenje svemira; čini oko dvije trećine njegovog sadržaja, a najčešće se opisuje kao kosmološka konstanta.

Tamna materija - Nevidljiva masa koja se očituje isključivo gravitacijom; drži galaksije i jata na okupu i čini oko četvrtine sadržaja svemira, dok joj priroda još nije poznata.

Teleodinamika - Deaconov naziv za procese u kojima se spregnuti samoorganizujući procesi međusobno održavaju, pa sistem čuva uslove vlastitog postojanja; smatra je izvorom svrhovitosti u prirodi.

Teleologija - Objašnjenje pojava pomoću svrhe ili cilja kojem služe ("da bi"), za razliku od objašnjenja pomoću prethodnih uzroka ("zato što").

Teleomatski proces - Mayrov naziv za proces koji završava u krajnjem stanju samo zato što ga tamo vode fizički zakoni, bez ikakvog programa ili težnje, poput kamena koji pada.

Teleonomija - Usmjerenost ka cilju bez svjesne namjere ili budućeg uzroka, zasnovana na programu nastalom prirodnim odabirom; pojam je 1958. uveo Colin Pittendrigh.

Teorem spina i statistike - Rezultat po kojem čestice polucijelog spina moraju biti fermioni (antisimetrična stanja), a čestice cijelog spina bozoni (simetrična stanja).

Teorija grupa - Grana matematike koja proučava simetriju; razvijena apstraktno u devetnaestom vijeku, postala je temeljni jezik fizike čestica.

Teški problem svijesti - Pitanje zašto obradu informacija u mozgu uopće prati subjektivni doživljaj; za razliku od "lakih problema" o funkcijama, njega mehaničko objašnjenje naizgled ne dohvaća.

Traheje - Sistem sitnih zračnih cjevčica kojima insekti dovode kisik izravno do tkiva; budući da se u najtanjim ograncima kisik kreće samo difuzijom, ograničavaju najveću moguću veličinu insekta.

Trostruki alfa-proces - Nuklearna reakcija u kojoj se tri jezgra helija-4 spajaju u ugljik-12, preko kratkoživućeg berilija-8 i Hoyleove rezonancije.

Tubulin - Proteinska gradivna jedinica (dimer od alfa i beta podjedinice) od koje su izgrađene mikrotubule.

Tully-Fisherov odnos - Empirijska veza između svjetlosti (mase) spiralne galaksije i njene rotacione brzine.

Umwelt - Vlastiti svijet nekog bića, sazdan isključivo od onoga što ono može osjetiti i što mu je važno; pojam koji je uveo Jakob von Uexküll.

Univerzalni računar - Zamišljena mašina (A. Turing) koja, uz dovoljno vremena i memorije, može oponašati bilo koji drugi mogući računar; temelj ideje o univerzalnosti računanja.

Univerzalni tumač - Deutschov pojam za um sposoban da, u načelu, stvori objašnjenje za bilo šta što se uopšte može razumjeti; osobina po kojoj se ljudsko mišljenje razlikuje u vrsti, a ne samo u stepenu.

Vakuum (kvantni) - Prazan prostor koji, prema kvantnoj teoriji, nije prazan nego neprestano treperi zbog nastajanja i nestajanja virtualnih čestica.

Veliki filter - Pretpostavljena prepreka u razvoju života ili civilizacija koja bi objasnila zašto svemir djeluje tih; može biti iza nas ili tek pred nama.

Veliki prasak - Vodeći naučni model po kojem se svemir prije oko 13,8 milijardi godina razvio iz izuzetno vrelog i gustog početnog stanja.

Veliki rascjep - Hipotetički kraj svemira u kojem sve snažnije ubrzano širenje na kraju razdvaja jata, galaksije, zvijezde i naposljetku samu materiju.

Virtualne čestice - Parovi čestica koji na tren iskaču iz vakuuma i odmah nestaju, prekratko da bi bili izravno izmjereni, ali s mjerljivim posljedicama.

Vrijeme poluraspada - Vrijeme za koje se raspadne polovina jezgara nekog radioaktivnog izotopa.

WIMP - Slabo interagujuća masivna čestica (od eng. weakly interacting massive particle); dugo vodeći kandidat za tamnu materiju, koji se traži osjetljivim podzemnim detektorima.

Zakon kvadrata i kuba - Geometrijsko pravilo da pri uvećanju tijela površina raste s kvadratom, a zapremina (i masa) s kubom dimenzija; zbog njega oblik ne može ostati isti pri velikoj promjeni veličine.

Zatvorenost ograničenja - Kauffmanov pojam za svojstvo sistema koji rad što ga obavlja koristi za izgradnju upravo onih ograničenja koja taj rad usmjeravaju; odlikuje žive ćelije, ali ne i mašine.

Željezni vrh - Grupa elemenata oko željeza i nikla s najvećom energijom vezivanja po nukleonu; granica do koje zvijezde mogu graditi elemente fuzijom.

Dodatak B

Indeks pojmova

A

Abiogeneza, 124-125
Aksion, 260, 267, 273
Alometrija, 223
Alpher, Ralph, 327
Aluminij-26, 341
Aminokiseline, 170
Anestezija, 190, 202-204
Antimaterija, 250
Antisimetrija, 233
Antropocentrizam, 250
Antropsko načelo, 128
Aristotel, 16, 34, 180, 298-300
Asimptotska grana divova, 335, 341
Aston, Francis, 329
Atraktor, 92, 96
Autogen, 314, 316
Autokataliza, 12, 314
Autopoeza, 310

B

Bacon, Francis, 300
Ball, Philip, 152-153, 156, 159, 289, 318
Barionska materija, 261-262, 265
Berg, Howard, 312
Bethe, Hans, 80, 327, 330
 B^2FH , 334, 336, 338
Bifurkacija, 8, 96
Bigelow, Julian, 304, 320
Bijeli patuljak, 160, 236, 261, 332, 339, 342

Bioelektricitet, 280
Biosignatura, 147
Bit (informacija), 165, 172-173
Bohr, Niels, 229-230
Bohrov radijus, 230, 238
Boltzmann, Ludwig, 47-48, 168
Bose-Einsteinov kondenzat, 160
Bosma, Albert, 259
Bozon, 160, 233, 235
Bullet Cluster (Metak-jato), 260
Bunsen, Robert, 325
Burbidge, Margaret i Geoffrey, 334

C

Cameron, Alastair, 334
Cannon, Walter, 304
Carroll, Sean, 3, 20, 23, 27, 43, 51, 57, 157, 186, 293
Casimirov efekt, 35, 181
Chandrasekhar, Subrahmanyam, 236
Chandrasekharova granica, 236
Citoskelet, 192, 197-198
Clark, Andy, 285
CNO ciklus, 330, 342
Coma (jato galaksija), 257
Comte, Auguste, 325-326, 338, 341
Crna rupa, 77-78, 166, 171-172, 237, 261, 319, 333, 338

Č

Čudna petlja, 290

D

Darwin, Charles, 11, 75-77, 82, 286, 300, 302-303, 308, 313, 317
Deacon, Terrence, 291, 313, 317
De Broglieva talasna dužina, 156
Degeneracijski pritisak, 233, 236
Dekoherencija, 57, 157, 161, 196, 200-201, 204, 208

Dennett, Daniel, 15, 17, 20, 193, 281, 286-288, 302, 319
Deuterij, 74, 328-330, 342
Deutsch, David, 288, 293
Difuzija, 216-217
Dimenziona analiza, 223
Dinamička kinetička stabilnost, 308
Dirac, Paul, 245, 250-251
Disipativna adaptacija, 315
Disipativna struktura, 8, 24, 65
DNK, 32, 68, 110, 128, 169, 174
Drakeova jednačina, 105, 116, 119
Dvostruki prorez, 156
Dyson, Freeman, 234-235, 237, 244, 249

E

Eddington, Arthur, 227, 229, 236, 248, 329
Ego-tunel, 292
Egzoplaneta, 114, 127, 140
Elastična sličnost, 222-223
Emergencija, 13, 17, 20-22, 24-29
Empedoklo, 300
Energija nulte tačke, 230
Energija vezivanja, 330
England, Jeremy, 315
Entropija, 51-57, 59-60, 63, 65
Escherichia coli, 312
Everest, 221-222, 225

F

Fantomska energija, 270
Fermat, Pierre de, 300
Fermijevo more, 234
Fermijev paradoks, 101, 116
Fermion, 104, 160, 232-233, 235, 237-238
Feynman, Richard, 228, 230, 323-324, 343
Ford, Kent, 259
Formalizam (matematički), 247, 251

Foton, 18, 55-56, 157, 161
Fowler, William, 331, 334
Fraktal, 89-92, 94-99, 220
Fraunhofer, Joseph von, 325-326
Fraunhoferove linije, 325-326
Friston, Karl, 315
Fröhlichova kondenzacija, 201, 205

G

Galilei, Galileo, 211-213, 222, 224, 242, 300
Gama-sinhronizacija, 191-192, 199
Gamow, George, 151, 155, 327, 329
Gell-Mann, Murray, 245
Gödel, Kurt, 194, 205, 247, 251
Godfrey-Smith, Peter, 282
Gravitacioni talasi, 111, 337
Gravitaciono sočivo, 260-261, 265, 268, 271
Gray, Asa, 303
Greenhill, Alfred, 222-223
GW170817, 337

H

Haldane, J. B. S., 211, 214-219, 225, 301
Hameroff, Stuart, 189, 197-198, 200-205
Hamming, Richard, 248-249
Haos (deterministički), 8, 10, 12, 15, 67, 70, 72
Hardy, G. H., 244, 248
Heisenbergovo načelo neodređenosti, 35, 153, 180, 227, 229-230, 238
Hemotaksija, 311-312
Hilbert, David, 247, 251
Hipoteza matematičnog svemira, 252
Hobotnica, 282, 292-294, 303
Hofstadter, Douglas, 10, 288, 290
Holografsko načelo, 163, 172
Homeostaza, 304
Horizont događaja, 77, 171
Hoyle, Fred, 331-332, 334, 342

Hoyleova rezonancija, 332-333, 342
Hubbleova konstanta, 268
Hubbleova tenzija, 269

I

Inflacija (kosmička), 82, 181-182, 185
Informacija, 168-176
Intencionalni stav, 286, 319
Interferencija, 157, 301
Intuicionizam, 247
Izostazija, 221

J

Johnson, Jennifer, 339
Jonas, Hans, 310

K

Kant, Immanuel, 309, 313
Kantovska cjelina, 309-310
Kataliza, 12
Kauffman, Stuart, 1, 11-12, 25, 28, 289, 309
Kelemen, Deborah, 318
Kibernetika, 306, 308
Kilonova, 337
Kirchhoff, Gustav, 325-326
Kleiberov zakon, 220
Kolapsar, 338
Kompetencija bez razumijevanja, 281, 286-287
Kompleksni brojevi, 243-244, 248
Konačni uzrok (telos), 300
Kosmička mreža, 269, 273
Kosmičke zrake, 263, 333, 338
Kosmičko mikrovalno pozadinsko zračenje, 183, 261, 263, 265, 273, 327
Kosmološka konstanta (Λ), 266, 274
Kosmološka prirodna selekcija, 73, 80
Kragh, Helge, 332

Kronecker, Leopold, 248
Ksenoboti, 280
Kvantna elektrodinamika, 245, 301
Kvantna koherencija, 200-202, 204, 207-208
Kvantna mehanika, 9, 35, 41, 46, 57-58, 149-150, 195, 208, 229, 234, 243-247, 250
Kvantna spregnutost, 159, 172, 199-200, 207
Kvantno tuneliranje, 154-155, 329
Kvintesencija, 270

L

Lambda-CDM (Λ CDM), 268, 270, 272
Landauerovo načelo, 168, 174
Lantanidi, 337
Leibniz, G. W., 177-178
Levin, Michael, 280
Lieb, Elliott, 231, 235-236
Livio, Mario, 243, 248
Lockyer, Norman, 326

M

MACHO, 261
Makrostanje, 47-48
Mali mozak, 305
Maturana, Humberto, 310
Maxwell, James Clerk, 245, 249, 304
Maxwellov demon, 169, 307
Mayr, Ernst, 113, 306-307, 313
Meganeura, 216
Merrill, Paul, 335
Metabolizam, 220, 310, 314
Metzinger, Thomas, 292
Mikrostanje, 47
Mikrotubule, 190, 197-205, 208
Milgrom, Mordehai, 256, 264
Mitchell, Kevin, 313, 316
MOND, 256, 259, 264, 273

Monod, Jacques, 307-308, 318
Multiverzum, 53, 75, 78, 185
Murchison (meteorit), 340

N

Nagel, Thomas, 284
Nastanjiva zona, 121-122
Ne-euklidska geometrija, 244, 251
Neptun, 257
Neutrinska magla, 264, 275
Neutronska zvijezda, 80, 160, 237-238, 261, 323, 333, 337-339, 342-343
Nikl-56, 333, 342
Ništavilo, 31, 36, 38, 178, 182, 184, 291, 295
Noćni leptiri, 298-299, 319
Nukleosinteza, 261, 328, 333, 335, 342

O

Objektivna redukcija (OR), 190, 195-196, 199
Olympus Mons, 222, 225
Orch-OR, 189-190, 194, 201-208

P

Paley, William, 75, 302-303, 308
Panpsihizam, 207
Panspermija, 107, 125
Pauli, Wolfgang, 227, 232, 235
Paulijev princip isključenja, 160, 227, 229, 232-238, 332
Payne, Cecilia, 326
Penrose, Roger, 189-191, 193-198, 207-210, 247, 252
Periodni sistem, 36, 160, 232, 327, 335, 339
Perlmutter, Saul, 266
Pittendrigh, Colin, 306
Planarije, 280, 286, 293
Planckova dužina/skala, 79, 150, 154, 172, 196, 206
Platonizam (matematički), 247-248
Plavi kit, 224

Poetski naturalizam, 294
Posnerovi molekuli, 207
Potrebna sloboda, 311
Povratna sprega, 123, 304, 312, 316, 320
Površinska napetost, 217
Prediktivna obrada, 285
Presolarna zrna, 341
Prigogine, Ilya, 7-8, 28, 65, 72
Problem koincidencije, 281
Pross, Addy, 308
Prostor-vrijeme, 43, 49, 58, 76, 81, 87, 163, 260, 267, 273
Proton-proton lanac, 330
Pulsar, 237
Purcell, Edward, 217, 221

Q

Qualia, 193
Qubit, 199, 204

R

Redukcionizam, 3, 6, 9
Relativnost, 44-45, 77, 158, 259, 265, 273
Reynoldsov broj, 217, 223
Ribosom, 169
Riemann, Bernhard, 244
Rojna inteligencija, 282-283, 294
Rosenblueth, Arturo, 304, 320
Rotaciona kriva, 259-260, 265, 269
Rovelli, Carlo, 44-45, 48, 59, 61, 294
r-proces, 334, 337-338, 340, 342
Rubin, Vera, 259, 269
Russell, Henry Norris, 327
Rutherford, Ernest, 228, 231

S

Salpeter, Edwin, 331

Samoorganizacija, 11, 27, 63, 69, 313
 Schmidt, Brian, 266
 Schrödinger, Erwin, 242, 247
 Searle, John, 15, 287
 Shannon, Claude, 163, 165, 175
 Simetrija, 5, 13, 22, 43, 47, 60, 244-245, 250
 Singularitet, 77, 81
 Sluzava plijesan (Physarum), 279, 294
 Smolin, Lee, 73, 75-78, 80-83, 108, 319
 SN 1987A, 334
 Spalacija, 338
 Spektroskopija, 138-140, 146, 258, 326, 338
 Spin, 232-233
 s-proces, 334, 336
 Stabilnost materije, 234-238
 Steiner, Mark, 250
 Sterilni neutrino, 262
 Strijela vremena, 41, 47, 50-51, 55, 57, 60, 315, 320
 Stroncij, 336, 338
 Supernova s kolapsom jezgra, 333, 339, 342
 Supernova tipa Ia, 265, 339
 Superpozicija, 57, 149, 156, 195-196, 199-201, 204, 207
 Svrhovitost, 24, 291, 300, 304-307, 309, 314-315, 317

T

Tamna energija, 256, 263, 266-267, 271-273
 Tamna materija, 256-257, 259-262, 264-266, 269-271, 273-274
 Tegmark, Max, 251-252
 Tehnecij, 335, 339
 Teleodinamika, 314
 Teleologija, 301-302, 304-307, 318
 Teleomatski proces, 306, 313, 316
 Teleonomija, 306-308
 Teorem spina i statistike, 233
 Teorija grupa, 244
 Termodinamika, 7, 41, 47, 63-64, 291, 309, 315
 Termostat, 121-123, 131, 276, 286, 299, 303, 306, 308, 311, 316

Teški problem svijesti, 193, 207
Thompson, Evan, 310
Traheje, 216
Trostruki alfa-proces, 331, 342
Tubulin, 197-199, 201-202, 204-205
Tully-Fisherov odnos, 265
Turing, Alan, 67, 72, 194, 293

U

Uexküll, Jakob von, 283
Umwelt, 283-284
Univerzalni računar, 293
Univerzalni tumač, 293
Uran, 335, 337, 339
Uzgon, 224

V

Vakuum, 181-186, 267, 274
Valna funkcija, 5, 157, 160
Varela, Francisco, 310
Veliki filter, 118, 131-132
Veliki prasak, 23, 41, 43, 52, 61, 78, 323, 327, 339
Veliki rascjep, 270
Virtualne čestice, 181

W

Walsh, Denis, 317
Watson, Darach, 337
Watt, James, 303
Weinberg, Steven, 245
Weisskopf, Victor, 221, 238
West, Geoffrey, 220
Wiener, Norbert, 304, 306, 320
Wigner, Eugene, 241-243, 247-248, 251
WIMP, 261, 273

Z

Zakon kvadrata i kuba, 211

Zatvorenost ograničenja, 310

Zvezdana prašina, 340

Zwicky, Fritz, 257, 269

Ž

Željezni vrh, 331-332, 335, 339

Riess, Adam, 264

O autoru

Alan Čatović rođen je i živi u Sarajevu. Doktorirao je tehničke nauke i vanredni je profesor na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Njegov rad i interesovanja kreću se između dva svijeta koja na prvi pogled nemaju mnogo zajedničkog - inženjerske nauke i astronomije.

Astronomijom se bavi strastveno već više od 10 godina. Pod imenom Nightbreaker vodi astronomsku grupu od oko 1500 članova i uređuje jedan od najsadržajnijih astronomskih blogova u regiji, na kojem objavljuje tekstove o astrofizici, opremi, tehnikama snimanja i obradi, kao i vlastite astrofotografije nastale u periodu od 2015. godine do danas.

Aktivan je astrofotograf specijaliziran za klasičnu i uskopojasnu astrofotografiju dubokog neba, pejzažnu astrofotografiju Mliječnog puta te planetarno i solarno snimanje. Bavi se i spektroheliografijom, spektroskopijom zvijezda, fotometrijom varijabilnih zvijezda, detekcijom asteroida i egzoplaneta diferencijalnom fotometrijom. Osmislio je nekoliko instrumenata i softverskih alata, uključujući idejni dizajn apohromatskog refraktorskog teleskopa i aplikaciju za obradu snimaka Sunca, Mjeseca i planeta.

Jedan je od pokretača i učesnika astronomskih okupljanja u Bosni i Hercegovini, te zagovornik zaštite tamnog neba i razvoja astroturizma. Kroz javna posmatranja, predavanja i popularno-naučne tekstove nastoji astronomiju približiti široj publici i podsjetiti je na vrijednost noćnog neba iznad nas.

