

zašto je $E=mc^2$?

zašto je $E=mc^2$?

(i zašto bismo marili?)

BRAJAN KOKS i DŽEF FORŠO

Prevod:

Aleksandar Dragosavljević



Naslov originala
Brian Cox & Jeff Forshaw:
WHY DOES $E = mc^2$?
(AND WHY SHOULD WE CARE?)

Copyright © 2009 by Brian Cox and Jeff Forshaw
Copyright © 2013 za srpsko izdanje, Heliks

Izdavač

Heliks

Za izdavača

Brankica Stojanović

Lektura

Aleksandra Dragosavljević

Štampa

Newpress, Smederevo

Tiraž

1000 primeraka

Prvo izdanje

Knjiga je složena
tipografskim pismima
Warnock Pro i Cronos Pro

ISBN: 978-86-86059-41-3

Smederevo, 2013.

www.heliks.rs

*Posvećeno našim porodicama, a posebno
Džiji, Mo, Džordžu, Dejvidu, Barbari, Sandri,
Naomi, Izabel, Silviji, Tomasu i Majklu*

SADRŽAJ

Izjave zahvalnosti ix

Predgovor xi

- 1 PROSTOR I VREME 1
- 2 BRZINA SVETLOSTI 15
- 3 SPECIJALNA TEORIJA RELATIVNOSTI 31
- 4 PROSTORVREME 49
- 5 ZAŠTO JE $E = mc^2$? 89
- 6 I ZAŠTO BISMO MARILI? O ATOMIMA,
MIŠOLOVKAMA I SNAZI ZVEZDA 123
- 7 POREKLO MASE 145
- 8 ZAKRIVLJENJE PROSTORVREMENA 185

Indeks 205

IZJAVE ZAHVALNOSTI

Zahvaljujemo se svom menadžmentu i agentima, Suzan, Dajen i Džordžu, kao i urednicima Benu i Siski. Zahvaljujemo se svojim kolegama naučnicima, posebno Ričardu Betiju, Fredu Lebindžeru, Robinu Maršalu, Sajmonu Marcaniju, Ijanu Morisonu i Gevinu Smitu. Naročitu zahvalnost upućujemo Naomi Bejker, zbog komentara koje je dala na prva poglavlja, i Džiji Milinovič na pitanju koje je postavila.

PREDGOVOR

Namera nam je da u ovoj knjizi opišemo Ajnštajnovu teoriju prostora i vremena na najjednostavniji način za koji znamo, ali da istovremeno otkrijemo njenu svekoliku lepotu. To će nam na kraju omogućiti da dođemo do njegove poznate jednačine $E = mc^2$ koristeći matematiku koja nije teža od Pitagorine teoreme. I ne brinite ako se ne sećate te teoreme – objasnićemo i nju. Što je jednako važno, želimo da svaki čitalac koji pročita ovu knjigu do kraja sazna kako savremeni fizičari promišljaju o prirodi i grade teorije koje postaju duboko korisne i na kraju menjaju naše živote. Gradeći model prostora i vremena, Ajnštajn je utro put ka razumevanju načina na koji zvezde sijaju, otkrio naoko skrivene razloge zbog kojih električni motori i generatori rade i postavio temelje celokupne savremene fizike. Ova knjiga ujedno treba da bude provokativna i izazovna. Sama fizika nije problem: Ajnštajnovе teorije dobro su postavljene, a potvrđuje ih veliki broj eksperimentalnih dokaza, što ćete i videti kako budete čitali knjigu. U dogledno vreme, vrlo je važno naglasiti, Ajnštajn će možda biti primoran da ustupi mesto onima koji će predložiti još tačniju sliku prirode. U nauci ne postoje univerzalne istine, samo pogledi na svet za koje tek treba pokazati da su pogrešni. Sve što, za sada, možemo sa sigurnošću da kažemo jeste to da Ajnštajnovе teorije daju tačna predviđanja. Provokaciju uočavamo u tome kako nas nauka izaziva da razmišljamo o svetu oko nas. Bio naučnik ili ne, svako od nas poseduje intuiciju i svi mi zaključujemo

o svetu na osnovu svakodnevnih iskustava. Međutim, ako izložimo svoja zapažanja hladnom i preciznom svetlu naučne metode, često otkrijemo da priroda zbunjuje našu intuiciju. Kako budemo napredovali kroz knjigu otkrićemo da se, kada se objekti kreću velikim brzinama, uobičajene predstave o prostoru i vremenu odbacuju i zamenjuju nečim potpuno novim, neočekivanim i elegantnim. Ta lekcija je blagodarna i nenametljiva, a kod mnogih naučnika izaziva osećaj divljenja: svemir je mnogo bogatiji nego što nam svakodnevno iskustvo govori. Možda je najčudesnija od svih činjenica ta da je nova fizika, sa svom svojim slojevitošću, ispunjena upečatljivom matematičkom elegancijom.

Iako ponekad može izgledati teška, nauka u suštini nije komplikovana disciplina. Neko bi se usudio da kaže kako je to pokušaj da srušimo naše urođene predrasude ne bismo li svet posmatrali što objektivnije. Nauka može da bude više ili manje uspešna u postizanju tog cilja, ali malo ko može da dovede u pitanje njen uspeh da nas pouči tome kako svemir funkcioniše. Najteže nam je da prihvatimo kako ne treba verovati onome o čemu volimo da razmišljamo kao o zdravom razumu. Učeći nas da prihvatimo prirodu onakvu kakva jeste a ne u skladu s našim predrasudama, naučna metoda dovela je do savremenog tehnološkog sveta. Ukratko, ona funkcioniše.

U prvoj polovini knjige izvešćemo jednačinu $E = mc^2$. Pod „izvođenjem“ mislimo da ćemo pokazati kako je Ajnštajn došao do zaključka da je energija jednaka masi pomnoženoj s kvadratom brzine svetlosti, kako jednačina glasi. Razmislite malo o tome i izgledaće vam veoma čudno. Možda je najpoznatiji oblik energije energija kretanja. Ako vam neko baci lopticu za kriket u lice, zboleće kad vas udari. Fizičar bi rekao da se to događa zato što je bacač preneo energiju na lopticu, a ta energija se prenosi na vaše lice kada ono zaustavi njeno kretanje. Masa je mera količine materije koju objekat sadrži. Loptica za kriket je teža od loptice za stoni tenis, ali mnogo lakša od

naše planete. Iz jednačine $E = mc^2$ sledi da se energija i masa mogu međusobno pretvarati jedna u drugu, kao dolari i evri, a da je kvadrat brzine svetlosti njihov međusobni kurs. Kako je Ajnštajn izveo takav zaključak i kako je brzina svetlosti mogla da nađe put do jednačine o vezi između energije i mase? Ne tražimo nikakvo naučno predznanje i gde god možemo izbegavamo matematiku. Bez obira na to, čitaocu nameravamo da ponudimo objašnjenje (a ne samo opis) nauke. U tom smislu, nadamo se da ćemo ponuditi nešto novo.

U kasnijim delovima knjige videćemo kako se naše razumevanje funkcionisanja svemira oslanja na jednačinu $E = mc^2$. Zašto zvezde sijaju? Zašto su elektrane na nuklearni pogon toliko efikasnije od onih na ugalj i naftu? Šta je masa? Ta pitanja uvešće nas u svet savremene fizike čestica, veliki hadronski sudarač u CERN-u u Ženevi i lov na Higsovu česticu koja možda vodi do objašnjenja samog porekla mase. Knjiga se završava Ajnštajnovim čudesnim otkrićem da je za gravitaciju odgovorna struktura prostora i vremena i neobičnom idejom da Zemlja pada „po pravoj liniji“ oko Sunca.

Prostor i vreme

Kakvo značenje za vas imaju reči prostor i vreme? Prostor možda zamišljate kao crno prostranstvo između zvezda koje vidite kada u hladnoj zimskoj noći podignete pogled prema nebu. Ili, možda vidite prazninu između Zemlje i Meseca kroz koju jezde kosmičke letelice zamotane u zlatnu foliju, okićene zvezdicama i prugama, a kojima na putu veličanstvene usamljenosti upravljaju na ćelavo ošišani istraživači s imenima kakvo je Baz. Vreme može biti otkucaj sata koji nosite na ruci ili opadanje lišća sa stabala kada se zbog okretanja Zemlje oko Sunca severna polulopta pomeri prema senci po petmilijarditi put. Svi imamo intuitivan osećaj za prostor i vreme. Oni su utkani u suštinu našeg postojanja. Dok vreme teče, mi se pomeramo kroz prostor na površini našeg plavog sveta.

Poslednjih godina 19. veka, niz naučnih otkrića u naizgled nepovezanim poljima primoravao je fizičare da preispitaju ta jednostavna i intuitivna viđenja prostora i vremena. Početkom 20. veka, Herman Minkovski, kolega i tutor Alberta Ajnštajna, počeo je da piše svoje sada već poznato posmrtno slovo za drevnu arenu unutar koje se

kreću planete i odigravaju zanimljiva putovanja: „Od tada su sâm prostor i samo vreme iščezli u senke i postoji samo neka vrsta njihove mešavine.“

Na šta je mislio Minkovski kad je pisao o mešavini prostora i vremena? Razumeti ovu izjavu, koja zvuči gotovo mistično, znači razumeti Ajnštajnovu specijalnu teoriju relativnosti, teoriju koja je svetu donela najslavniju od svih jednačina, $E = mc^2$, i u središte našeg poimanja tkanja kosmosa postavila veličinu koja se obeležava simbolom c – brzinu svetlosti.

Ajnštajnova specijalna teorija relativnosti u suštini je opis prostora i vremena. Najvažnija tačka u njoj je pojam jedne posebne brzine od koje se ništa u kosmosu, ma kako snažno bilo, ne kreće brže. To je brzina svetlosti – 299.792.458 metara u sekundi u vakuumu. Krećući se tom brzinom, blesak svetlosti odaslan sa Zemlje za osam minuta proći će pored Sunca, za 100.000 godina prešao bi preko Mlečnog puta, a za dva miliona godina stigao bi do Andromede, našeg najbližeg galaktičkog suseda. Najveći teleskopi na Zemlji večeras će se okrenuti ka tmini prostora i hvatati drevno svetlo s udaljenih, odavno ugašenih sunaca na obodu vidljivog kosmosa. Ta svetlost započela je svoje putovanje pre više od deset milijardi godina, nekoliko milijardi pre nego što se Zemlja formirala iz oblaka međuzvezdane prašine koji se zgušnjavao. Brzina svetlosti je ogromna, ali je i dalje mnogo manja od beskonačne. Kada se suoči s golemim udaljenostima između zvezda i galaksija, njena vrednost je frustrirajuće mala. Dovoljno je mala da minijaturne objekte možemo ubrzati gotovo do brzine bliske svetlosnoj pomoću uređaja kao što je Veliki hadronski sudarač, obima 27 kilometara, koji se nalazi u Evropskom centru za fiziku čestica (CERN) blizu Ženeve.

Postojanje posebne brzine, najveće brzine u kosmosu, čudan je koncept. Kao što ćemo videti u knjizi, povezivanje te posebne brzine s brzinom svetlosti svojevrсна je zabluda. Ta brzina ima mnogo važniju

ulogu u Ajnštajnovom kosmosu i postoji dobar razlog zašto svetlost putuje brzinom kojom putuje. Kasnije ćemo se vratiti na tu temu. Za sada je dovoljno reći da s objektima koji se približavaju toj brzini počinju da se događaju čudne stvari. Kako je moguće sprečiti objekat da prekorači tu brzinu? To je kao kada bi postojao univerzalan zakon fizike koji bi sprečavao vaš automobil da se kreće brže od 100 km/h, bez obzira na to koliko mu je snažan motor. Za razliku od zakona o ograničenju brzine kretanja automobila, ovom zakonu nije potrebna nikakva nebeska saobraćajna policija. Samo tkanje prostora i vremena takvo je da je apsolutno nemoguće prekršiti taj zakon. To se pokazalo kao vrlo srećna okolnost, jer bi u suprotnom došlo do neprijatnih posledica. Videćemo u daljem izlaganju da bi, kada bi bilo moguće prekoračiti brzinu svetlosti, mogao da se konstruiše vremeplov koji bi nas prenosio u bilo koji trenutak u prošlosti. Mogli bismo da zamislimo kako smo kroz vreme otputovali u trenutak pre nego što smo rođeni i, namerno ili slučajno, sprečili svoje roditelje da se upoznaju. To je odličan materijal za naučnu fantastiku, ali nije način na koji se gradi kosmos. Ajnštajn je stvarno pokazao da kosmos nije tako izgrađen. Prostor i vreme pažljivo su prepleteni ne bi li sprečili pojavu takvih paradoksa. Međutim, postoji cena koju treba da platimo: na nama je da odbacimo svoje duboko ukorenjeno shvatanje prostora i vremena. U Ajnštajnovom kosmosu časovnici koji se kreću kucaju sporije, objekti u pokretu se skraćuju i možemo da putujemo milijardama godina u budućnost. To je kosmos u kojem se ljudski život može produžiti gotovo beskonačno. Mogli bismo da gledamo kako Sunce gasne, okeani na Zemlji nestaju u pari, a ceo Sunčev sistem zahvata tama. Mogli bismo da posmatramo nastajanje zvezda iz vrtložnih oblaka prašine, formiranje planeta, možda i rađanje života na novim svetovima koji još nisu nastali. Ajnštajnov kosmos dozvoljava nam da putujemo u budućnost koliko god želimo daleko, ali ujedno drži čvrsto zatvorena vrata prošlosti.

Na kraju knjige videćemo kako je Ajnštajn sklopio tu fantastičnu sliku kosmosa i kako se u mnogim naučnim eksperimentima i tehnološkim primenama pokazalo da je ona tačna. Sistem satelitske navigacije u automobilu je, na primer, projektovan da uzme u obzir činjenicu kako sat sporije otkucava na satelitu koji se kreće u orbiti nego na Zemlji. Ajnštajnova slika je radikalna: prostor i vreme nisu onakvi kakvim ih mi vidimo.

U svojim spoznajama sve više napredujemo. Da bismo razumeli i mogli da cenimo Ajnštajnovu radikalno otkriće, prvo moramo pažljivo da razmislimo o dva koncepta koji leže u srcu teorije relativnosti – prostoru i vremenu.

Zamislite da čitate knjigu dok se vozite avionom. U 12:00 ste pogledali na sat, odlučili da zatvorite knjigu i odšetate niz prolaz do prijatelja koji sedi deset redova dalje. U 12:15 vraćate se do svog sedišta i ponovo uzimate knjigu. Zdrav razum govori vam da ste se vratili na isto mesto. Morali ste da prođete istih deset redova sedišta kako biste se vratili na svoje mesto i kada ste seli zatekli ste knjigu upravo tamo gde ste je i ostavili. Sada razmislite malo dublje o konceptu „istog mesta“. Možda vam se čini da cepidlačimo jer je očigledno na šta mislimo kada opisujemo mesto. Možemo pozvati prijatelja i dogovoriti se da se sastanemo u baru koji se neće pomeriti do trenutka kada obojica stignemo tamo. Gotovo je sigurno da će biti na istom mestu na kojem je bio kad smo ga sinoć napustili. Za mnoge stvari u ovom uvodnom poglavlju mislićete da su preterano detaljne, ali neka bude tako. Pažljivo razmišljanje o ovim naizgled očiglednim konceptima vodiće nas putevima Aristotela, Galileja, Njutna i Ajnštajna. Kako onda možemo precizno da definišemo na šta mislimo kada kažemo „isto mesto“? Već znamo kako to možemo da uradimo na površini Zemlje. Na površini globusa iscrтана je mreža linija geografske širine i dužine. Svako mesto može da se opiše pomoću dva broja koji označavaju položaj na mreži. Na

primer, grad Mančester u Velikoj Britaniji smešten je 53 stepena i 30 minuta severno te 2 stepena i 15 minuta zapadno. Ta dva broja tačno će nam reći gde da nađemo Mančester, pod uslovom da se svi slažemo u pogledu položaja ekvatora i nultog meridijana. Analogno tome, jedan od načina da lociramo ma koju tačku u prostoru, bilo da se nalazi na površini Zemlje ili negde drugde, bio bi da iscrtamo veliku trodimenzionalnu mrežu koja se prostire od površine Zemlje naviše. U stvari, mreža bi mogla da se prostire i nadole, kroz središte Zemlje i na drugu stranu. Tada bismo mogli da opišemo položaj bilo koje tačke u odnosu na mrežu, bez obzira na to jesmo li u vazduhu, na površini ili ispod površine. I ne bismo morali da se ograničimo samo na Zemlju. Mreža bi mogla da se prostire dalje u kosmos, iza Meseca, Jupitera, Neptuna i Plutona, dalje i od Mlečnog puta, do najdaljih kosmičkih kutaka. Nakon što smo napravili tu divovsku, a možda i beskonačno veliku mrežu, možemo da odredimo položaj svih objekata što je, da parafraziramo Vudija Alena, vrlo korisno ako ste tip osobe koja uvek zaboravlja gde je nešto ostavila. Naša mreža, dakle, definiše arenu u koju je smešteno sve što postoji. To je divovska kutija u kojoj se nalaze svi postojeći objekti u kosmosu. Možda ćemo čak doći u iskušenje da tu arenu nazovemo „prostor“.

Vratimo se na pitanje šta se podrazumeva pod „istim mestom“ i na primer iz aviona. Pretpostavite da ste u 12:00 i u 12:15 bili na istom mestu u prostoru. Sada zamislite kako bi taj sled događaja izgledao osobi koja sedi na Zemlji i posmatra avion. Ako avion leti iznad njene glave brzinom od 965 kilometara na sat, za petnaest minuta prevalio bi udaljenost od približno 240 kilometara. Drugim rečima, u 12:00 i 12:15 nalazili biste se u dve različite tačke u prostoru. Ko je u pravu? Ko se kretao a ko je mirovao?

Ako ne možete tačno da odgovorite na ovo naizgled jednostavno pitanje, onda ste u dobrom društvu. Aristotel, jedan od najvećih umova Staroga sveta, potpuno bi pogrešio. On bi nesumnjivo

odgovorio da ste se kretali vi, putnik u avionu, zato što je mislio kako Zemlja apsolutno miruje u središtu kosmosa. Sunce, Mesec, planete i zvezde okreću se oko Zemlje pričvršćene na pedeset i pet koncentričnih kristalnih sfera, složenih jedna u drugu kao ruske matrhoške. On je, dakle, s nama delio intuitivno prihvatljiv koncept prostora: to je kutija, ili arena, u kojoj su smešteni Zemlja i sfere. Slika kosmosa koji se sastoji samo od Zemlje i skupa sfera koje se okreću danas izgleda prilično zastarelo. Ali, promislite nakratko o tome koji biste zaključak vi sami izveli da vam niko nije rekao kako se Zemlja okreće oko Sunca i da su zvezde ništa drugo do daleka sunca, neka više hiljada puta svetlija od našeg i udaljena milijardama i milijardama kilometara. Sigurno ne izgleda kao da Zemlja pluta unutar nezamislivo velikog kosmosa. Do našeg savremenog pogleda na svet došli smo težim putem i on često nije intuitivno prihvatljiv. Ako bi slika kosmosa koju smo razvijali tokom hiljada godina eksperimenata i razmišljanja bila očigledna, onda bi velikani iz prošlosti, kakav je Aristotel, sigurno do nje i sami došli. To vredi zapamtiti za slučaj da u ovoj knjizi pronađete ijedan koncept koji vam se čini komplikovan. Najveći antički umovi sigurno bi se u tome složili s vama.

Da bismo pronašli nedostatke u Aristotelovom odgovoru, preuzmimo na trenutak njegovu viziju i pogledajmo do kakvog rezultata vodi. Prema njegovom viđenju, prostor bi trebalo da ispunimo mrežom zamišljenih linija s polazištem na Zemlji i utvrdimo gde se koji objekat nalazi i ko se tu kreće. Ako prihvatimo ovu sliku prostora kao kutije ispunjene objektima u čijem se središtu nalazi Zemlja, onda je očigledno da ste vi, putnik u avionu, promenili položaj dok je osoba koja vas je posmatrala nepomično stajala na površini Zemlje. Drugim rečima, postoji apsolutno kretanje a samim tim i apsolutni prostor. Objekat se apsolutno kreće ako tokom vremena menja položaj u prostoru, mereno prema zamišljenoj mreži fiksiranoj u središtu Zemlje.

Problem s ovakvom vizijom je to što Zemlja ne stoji nepokretna u središtu kosmosa. Naprotiv, Zemlja je lopta koja se okreće oko svoje ose i nalazi se u Sunčevoj orbiti. Zemlja se u odnosu na Sunce kreće brzinom od oko 107.000 kilometara na sat. Ako odete na spavanje i probudite se posle osam sati, za to vreme preći ćete više od 800.000 kilometara. Mogli biste čak da tvrdite kako će za 365 dana vaša spavaća soba da se vrati na tačno isto mesto u prostoru jer će Zemlja do tad prevaliti jednu punu orbitu oko Sunca. Mogli biste, dakle, da malo promenite sliku i pritom zadržite netaknutim duh Aristotelovog viđenja. Zašto središte mreže ne bismo postavili na Sunce? To je dovoljno jednostavna zamisao, ali takođe pogrešna jer je i Sunce u orbiti oko središta Mlečnog puta. Mlečni put je naše lokalno ostrvo s više od dvesta milijardi sunaca i, kao što pretpostavljate, ogroman je pa obilazak oko središta traje veoma dugo. Sunce zajedno sa Zemljom putuje oko središta Mlečnog puta brzinom od otprilike 780.000 kilometara na sat i na udaljenosti od oko 250.000 biliona kilometara od središta. Za obilaženje jedne orbite pri toj brzini i na toj udaljenosti potrebno je oko 226 miliona godina. Dakle, sa sledećim korakom možda bi moglo da se spasi Aristotelovo viđenje. Postavite mrežu u središte Mlečnog puta i doći ćete do još jedne uzbudljive zamisli: dok ležite u krevetu, zamislite kako je svet izgledao kada je Zemlja poslednji put bila „ovde“, u tačno ovoj tački prostora. Dinosaurusi su u senkama ranog jutra brstili praistorijsko lišće baš na ovom mestu gde se sada nalazi vaša spavaća soba. Opet pogrešno. Galaksije se udaljavaju jedna od druge i što je galaksija udaljenija, to se brže udaljava. Naše kretanje među brojnim galaksijama koje čine kosmos toliko je komplikovano da ga je vrlo teško pratiti.

Dakle, u ovakvom viđenju problem je što nije moguće tačno definisati stanje „apsolutnog mirovanja“. Drugim rečima, izgleda da je nemoguće da znamo gde da postavimo zamišljenu mrežu pomoću koje možemo odrediti gde se stvari nalaze, a prema tome i da li stoje

ili se kreću. Sam Aristotel nije morao da se sretne s tim problemom jer njegovo viđenje stacionarne Zemlje okružene rotirajućim sferama nije bilo upitno gotovo 2000 godina. Možda je taj koncept trebalo da se preispita ali, kao što je već pomenuto, te stvari nisu bile očigledne čak ni najvećim umovima. Ptolomej je radio u velikoj Aleksandrijskoj biblioteci u Egiptu u drugom veku n. e. Pažljivo je posmatrao noćno nebo i razmišljao o naizgled čudnom kretanju pet tada poznatih „zvezda lualica“, iz čijeg grčkog naziva je izvedena reč „planeta“. Kada se te planete tokom više meseci posmatraju sa Zemlje, vidi se da se ne kreću po glatkoj putanji preko zvezdane pozadine već izgleda da prave petlje. Takvo čudno kretanje naziva se *retrogradno kretanje* i za njega se znalo mnogo hiljada godina pre Ptolomeja. Drevni Egipćani opisivali su Mars kao planetu koja se „kreće unazad“. Ptolomej je, kao i Aristotel, mislio da se planete kreću oko stacionarne Zemlje, ali da bi objasnio retrogradno kretanje morao je da ih smesti na manje, ekscentrično postavljene tačke, koji su bili pričvršćeni na sfere. Ovaj prilično komplikovan model, iako nije elegantan, mogao je da objasni kretanje planeta na noćnom nebu. Pravo objašnjenje retrogradnog kretanja planeta ponudio je tek sredinom 16. veka Nikola Kopernik. On je predložio elegantnije (i tačnije) objašnjenje prema kojem Zemlja nije stacionarna u središtu kosmosa, već se kreće oko Sunca zajedno s ostalim planetama. Kopernikov rad nije bio bez protivnika i tek je 1835. godine skinut s liste zabranjenih radova Katoličke crkve. Precizna merenja Tiha Brahea i radovi Keplera, Galileja i Njutna naposljetku su pokazali da je Kopernik bio u pravu, i uz to su bili osnova za teorije kretanja planeta izražene preko Njutnovih zakona kretanja i gravitacije. Te zakone, kao naše najbolje vizije kretanja planeta lualica – ali i svih drugih tela pod delovanjem gravitacije, od galaksija do topovskih zrna – niko nije osporavao sve dok Ajnštajn nije objavio svoju opštu teoriju relativnosti 1915. godine.

Ova neprestana promena u viđenju položaja Zemlje, planeta i njihovog kretanja kroz prostor, trebalo bi da posluži kao nauk svima koji su apsolutno uvereni da nešto znaju. Mnoge stvari o ovome svetu same po sebi su naizgled nedvosmislene, a jedna od njih je da mirujemo. Detaljnija posmatranja mogu nas uvek iznenaditi, i često bude tako. Možda ne bi trebalo da se previše iznenadimo ako priroda ponekad izgleda neintuitivno plemenu pronicljivih potomaka čovekolikih majmuna čiji se metabolizam zasniva na ugljeniku, koji se muvaju po površini stenovite planete u orbiti oko neugledne, sredovečne zvezde na spoljašnjem obodu galaksije Mlečni put. Za teorije o prostoru i vremenu koje ćemo razmatrati u ovoj knjizi možda će se pokazati – zapravo, sigurno će se pokazati – da su aproksimacije neke dublje teorije koju tek treba otkriti. Nauka je disciplina koja slavi neodređenost i da bismo je razumeli suštinski je važno da prepoznamo tu njenu karakteristiku.

Galileo Galilej rođen je dvadeset godina nakon što je Kopernik predložio svoj heliocentrični model kosmosa i duboko je razmišljao o problemu kretanja. Njegova intuicija verovatno bi bila slična našoj: čini nam se da Zemlja miruje iako dokazi na osnovu kretanja planeta kroz tačke na nebu snažno ukazuju na to da nije tako. Galilej je izvuкао dubok zaključak iz ovog, naizgled, paradoksa. Osećamo kao da mirujemo, iako znamo da se krećemo u orbiti oko Sunca, jer nema načina da utvrdimo, čak ni načelno, šta stoji a šta se kreće. Drugim rečima, jedino вреди govoriti o kretanju u odnosu na nešto drugo. To je neverovatno važan uvid. U određenom smislu, on je očigledan, ali da bismo potpuno cenili njegov sadržaj potrebno je dodatno promišljanje. On može da izgleda očigledno jer, jasno, dok sedite u avionu s knjigom u ruci, knjiga se u odnosu na vas ne kreće. Ako je spustite na stočić ispred sebe, ostaće na istoj udaljenosti od vas. I naravno, iz perspektive posmatrača na površini Zemlje, knjiga se kreće kroz vazduh zajedno s avionom. Stvarna vrednost Galilejevog

uvida je u tome što su ovi iskazi jedini koji se mogu dati. Ako možete da govorite samo o tome kako se knjiga kreće u odnosu na vas dok sedite u avionu, ili u odnosu na Zemlju, ili u odnosu na Sunce, ili u odnosu na Mlečni put – uvek u odnosu na nešto – onda je apsolutno kretanje redundantan koncept.

Ova provokativna izjava naoko je dubokoumna, otprilike kao što su to i uzvici proroka. U ovom slučaju pokazalo se da ona to uistinu jeste. Galilej zaslužuje takvu reputaciju. Da bismo videli zašto, hajde da proverimo je li iz naučne perspektive korisna Aristotelova mreža na osnovu koje možemo utvrditi da li se neko telo kreće ili miruje. Korisno u naučnom smislu znači da ideja ima posledice koje se mogu posmatrati, to jest, da ima neku vrstu efekta koji se može prepoznati u eksperimentu. Pod eksperimentom podrazumevamo bilo koje merenje bilo čega – zamah klatna, boju svetlosti koju emituje sveća što gori ili sudar subatomske čestice u Velikom hadronskom sudaraču u CERN-u (kasnije ćemo se vratiti tom eksperimentu). Ako ideja nema posledice koje se mogu meriti, onda ona nije neophodna za poimanje kosmosa, iako može imati nekakvu vrednost zbog koje se osećamo bolje.

Ovo je vrlo moćan način da razdvojimo žito od kukolja u svetu prepunom ideja i mišljenja. U svojoj analogiji s porcelanskim čajnikom, filozof Bertrand Rasel ilustruje uzaludnost bavljenja konceptima koji nemaju posledice koje se mogu posmatrati. Rasel tvrdi kako veruje da u orbiti između Zemlje i Marsa postoji mali porcelanski čajnik. Čajnik je toliko majušan da se ne može otkriti ni pomoću najsnažnijih teleskopa koji trenutno postoje. Kad bi se izgradio veći i snažniji teleskop i ako se ni pomoću njega ništa ne bi pronašlo nakon dugotrajnog i detaljnog posmatranja celog neba, Rasel bi tvrdio da je čajnik tek nešto malo manji nego što smo očekivali ali da i dalje postoji. Ovo se često naziva „podizanje prečke“. Iako čajnik možda nikada nećemo opaziti, bilo bi „neprihvatljivo drsko“, kaže

Rasel, kada bi čovečanstvo sumnjalo da on postoji. Štaviše, ostatak ljudskog roda trebalo bi da poštuje njegovo mišljenje, bez obzira na to koliko nam apsurdno izgledalo. Rasel nije hteo da kaže kako ima pravo da bude u zabludi, nego da je besmisleno iznositi teoriju koja ne može da se potvrdi ili opovrgne posmatranjem jer nas ničemu ne uči, ma koliko strasno verujete u nju. Možete smisliti bilo kakav objekat ili izneti kakvu god ideju, ali ako nema načina da vidite taj objekat ili manifestacije te ideje, niste dali nikakav doprinos naučnom razumevanju kosmosa. Slično tome, ideja o apsolutnom kretanju bi nešto značila u naučnoj zajednici samo ako bismo mogli da osmislimo eksperiment u kojem bismo bili u stanju da ga potvrdimo. Na primer, mogli bismo da smestimo fizičku laboratoriju u avion ili izvodimo vrlo precizna merenja svih dostupnih fizičkih pojava u poslednjem hrabrom pokušaju da detektujemo kretanje. Mogli bismo da zanjišemo klatno i merimo vreme koje mu je potrebno za jedan ciklus, mogli bismo da izvodimo eksperimente s baterijama, električnim generatorima i motorima, ili bismo mogli da posmatramo kako se odvijaju nuklearne reakcije i merimo emitovano zračenje. U principu, ako bismo imali dovoljno velik avion, mogli bismo da izvedemo gotovo sve eksperimente koji su ikada izvedeni u istoriji. Ključna stvar koja podupire celu ovu knjigu i formira jedan od najvažnijih kamena temeljaca moderne fizike glasi: ako avion ne bi usporavao ili ubrzavao, nijedan pomenuti eksperiment ne bi pokazao da se krećemo. Čak ni kada bismo pogledali kroz prozor ne bismo mogli to da zaključimo, jer je jednako tačno reći da se Zemlja kreće brzinom od 960 kilometara na sat, a da avion miruje. Najpreciznije što možemo da kažemo je da smo „stacionarni u odnosu na avion“ ili da se „krećemo u odnosu na Zemlju“. To je Galilejev princip relativnosti – nema apsolutnog kretanja jer se ono ne može eksperimentalno pokazati. Verovatno nećete previše da se iznenadite jer nam je ta činjenica već intuitivno poznata.

Dobar primer je iskustvo koje doživite kad sedite u vozu koji stoji na stanici dok voz na susednom peronu polagano kreće. U deliću sekunde čini vam se da se vaš voz kreće. Teško prepoznamo apsolutno kretanje jer takvo nešto ne postoji.

Ovo izlaganje je možda previše filozofsko, ali takva razmišljanja vode do dubokog uvida o prirodi samog prostora i omogućavaju da napravimo prvi korak na putu prema Ajnštajnovim teorijama relativnosti. Iz Galilejevih razmišljanja izvlačimo sledeći zaključak o prostoru: ako u načelu nije moguće otkriti apsolutno kretanje, sledi da u konceptu posebne mreže za definisanje „mirovanja“ nema naučne vrednosti pa tako ni u konceptu apsolutnog prostora.

Ovo je važan zaključak pa ćemo ga dodatno analizirati. Već smo utvrdili da bi se kretanje u odnosu na mrežu kakvu je zamislio Aristotel, kada bismo širom kosmosa uspeli da definišemo tu mrežu, moglo smatrati apsolutnim. Takođe smo zaključili i ovo: pošto nije moguće osmisliti eksperiment iz kog bismo zaključili da li se krećemo, treba da odbacimo ideju o takvoj mreži jer nikada ne bismo mogli da pronađemo entitet za koji bismo je fiksirali. Ali, kako bi onda trebalo da definišemo apsolutni položaj objekta? Drugim rečima, gde se u kosmosu nalazimo? Bez Aristotelove specijalne mreže ova pitanja su besmislena za nauku. Možemo da govorimo samo o relativnom položaju objekata. Nema načina da se zada apsolutni položaj u prostoru i na to mislimo kada tvrdimo da apsolutni prostor sam po sebi nema smisla. Eksperimenti ne zahtevaju da o prostoru razmišljamo kao o ogromnoj kutiji u kojoj se stvari kreću. Koliko god isticali važnost ovog zaključka, nikako ne možemo preterati. Poznati fizičar Ričard Fajnman jednom je rekao da je teorija, bez obzira na to koliko je lepa, koliko ste vi pametni i kako se zovete, pogrešna ako se ne slaže s eksperimentom. U toj tvrdnji leži ključ nauke. Ako je drugačije formulišemo, kada koncept nije moguće eksperimentalno proveriti, onda ne možemo da kažemo je

li on tačan ili netačan, a tada ni u jednom ni u drugom slučaju nije bitan. Naravno, i dalje možemo da pretpostavimo kako je ideja tačna, čak i ako to ne možemo da proverimo, ali u tom slučaju se suočavamo s opasnošću da ometamo dalji napredak jer se zadržavamo na nebitnim predrasudama. Bez načina da postavimo tu posebnu mrežu, oslobođeni smo pojma apsolutnog prostora, baš kao što smo oslobođeni i pojma apsolutnog kretanja. Zašto je to bitno? Pa, to što smo oslobođeni bremena apsolutnog prostora igralo je važnu ulogu u Ajnštajnovim naporima da razvije svoju teoriju prostora i vremena. Obrazložiću to detaljnije u sledećem poglavlju. Za sada smo izvojevali slobodu, ali se još ne ponašamo kao oslobođeni naučnici. Da bismo vas podstakli na razmišljanje, samo ćemo reći kako bez apsolutnog prostora nema ni razloga zbog kojeg bi dva posmatrača obavezno morala da se usaglase oko veličine objekta. Za ovo ćete sigurno pomisliti da je čudno, jer ako je prečnik loptice četiri centimetra to je kraj diskusije. Ipak, ako nema apsolutnog prostora, to ne mora biti tako.

Do sada smo donekle detaljno razmotrili vezu između kretanja i prostora. A šta je s vremenom? Kretanje se izražava preko brzine, a brzina se meri u kilometrima na sat – to je udaljenost prevaljena u prostoru za određeno vreme. Na taj način pojam vremena je već ušao u naše razmišljanje. Da li treba nešto reći o vremenu? Postoji li nekakav eksperiment u kome možemo da potvrdimo kako je vreme apsolutno, ili treba da odbacimo i taj jednako duboko ukorenjen koncept? Iako je Galilej odbacio pojam apsolutnog prostora, njegova razmišljanja ne govore nam ništa o apsolutnom vremenu. Prema Galileju, vreme je nepromenljivo. Nepromenljivo vreme znači da je moguće zamisliti u svakoj tački kosmosa savršene male satove sinhronizovane da pokazuju isto vreme. Jedan sat mogao bi da se nalazi u avionu, jedan na Zemlji, jedan (doduše, posebno izdržljiv) na Suncu, a jedan u orbiti oko centra udaljene galaksije i, pod uslovom

da savršeno otkucavaju (ne kasne i ne žure), svi će uvek prikazivati isto vreme. Zapanjujuće je, ali ova naizgled očigledna tvrdnja u direktnom je sukobu s Galilejevim iskazom da nam nijedan eksperiment ne može pokazati krećemo li se apsolutno. Dokazi koji su na kraju oborili koncept apsolutnog vremena zasnivaju se na eksperimentima kojih se mnogi od nas sećaju s časova fizike – eksperimentima s baterijama, žicama, motorima i generatorima. Da bismo se pozabavili pojmom apsolutnog vremena vratićemo se u 19. vek, u zlatno doba otkrića na polju elektriciteta i magnetizma.

Brzina svetlosti

Majkl Faradej, sin kovača iz Jorkšira, rođen je u južnom Londonu 1791. godine. Obrazovao se samostalno, jer je školu napustio sa četrnaest godina kako bi postao šegrt u knjigoveznici. Svoj proboj u svet profesionalne nauke zamislio je nakon što je 1811. u Londonu prisustvovao predavanju ser Hamfrija Dejvija, naučnika iz Kornvola. Faradej je Dejviju poslao pažljivo sastavljene beleške sa tog predavanja. Dejvija su te beleške toliko impresionirale da ga je postavio za svog naučnog asistenta. Faradej je bio na putu da postane div nauke 19. veka, nadaleko poznat kao jedan od najvećih eksperimentalnih fizičara svih vremena. Dejvi je, tako se pričalo, imao običaj da kaže kako je Faradej bio njegovo najveće naučno otkriće.

Naučnicima 20. veka teško je da bez ljubomore gledaju na početak 19. veka. Faradej nije morao da sarađuje sa hiljadama drugih naučnika i inženjera u CERN-u niti je morao da lansira teleskop veličine autobusa u visoku orbitu oko Zemlje ne bi li došao do važnih naučnih spoznaja. Njegov CERN komotno je mogao da stane na običan sto i pomoću takve aparature zapažao je stvari koje su urušile

koncept apsolutnog vremena. Doseg nauke sigurno se menjao tokom vekova, delom zbog toga što su već veoma detaljno proučene one oblasti koje ne zahtevaju tehnološki napredne aparature da bi se posmatrale. To ne znači da danas u nauci nema primera u kojima su jednostavni eksperimenti dali važne rezultate, već da su za pomeranje granica u opštem slučaju potrebne komplikovane mašine. U Londonu, na početku viktorijanskog doba, Faradeju nije bilo potrebno ništa egzotičnije ni skuplje od namotaja žice, magneta i kompasa kako bi pružio prvi eksperimentalni dokaz da vreme nije onakvo kakvim se čini. Dokaze je prikupio radeći ono što naučnici najviše vole da rade. Pripremio je sav pribor povezan sa najnovijim otkrićem – elektricitetom – igrao se sa njim i pažljivo posmatrao. Gotovo možete da osetite miris tamno lakirane radne klupe na koju padaju senke namotane žice i pomeraju se pod plinskom svetlošću. Jer, iako je Dejvi već 1802. godine zadivio publiku demonstracijom električne rasvete u Kraljevskom institutu, svet je morao da čeka do pred kraj veka da Tomas Edison usavrši električnu sijalicu za svakodnevnu upotrebu. Početkom 19. veka elektricitet je bio u fokusu istraživanja fizičara i inženjera.

Faradej je otkrio da se pomeranjem magneta kroz namotaj žice u toj žici stvara električna struja. Takođe je primetio da se igla kompasa postavljenog pored žice pomera ako se kroz tu žicu propusti električni impuls. Kompas nije ništa drugo do detektor magneta. Kad kroz žicu ne prolaze električni impulsi, kompas će se poravnati sa pravcem Zemljinog magnetnog polja i pokazivati prema Severnom polu. Dakle, izgleda da električni impuls proizvodi magnetno polje poput Zemljinog, ali očigledno jače od njega, jer igla skrene od magnetnog severa dok impuls prolazi. Faradej je shvatio da posmatra nekakvu duboku vezu između magnetizma i elektriciteta, dve pojave koje na prvi pogled izgledaju kao da uopšte nisu povezane. Kakva je veza između električne struje koja poteče kroz sijalicu kada pritisnete

prekidač na zidu dnevne sobe i sile koja drži male magnete u obliku slova na vratima frižidera? Veza sigurno nije očigledna, pa ipak Faradej je pažljivim posmatranjem prirode ustanovio da električna struja stvara magnetno polje, a da magneti koji se pomeraju stvaraju električnu struju. Ove dve jednostavne pojave, sada poznate kao elektromagnetna indukcija, temelj su na kojem počivaju mehanizmi generisanja elektriciteta u svim električnim centralama na svetu i svih elektromotora koje svakodnevno koristimo, od pumpe u frižideru do sklopa za izbacivanje CD-a iz radio-uređaja u automobilu. Faradejev doprinos napretku industrijskog sveta je nemerljiv.

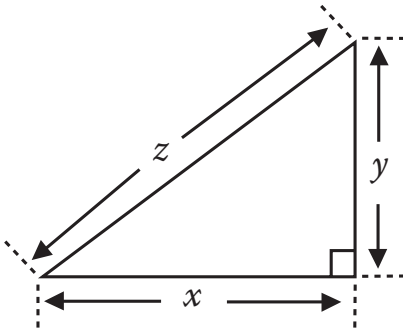
Napredak u fundamentalnoj fizici retko dolazi samo od eksperimenata. Faradej je hteo da razume mehanizme prirode koji leže u temeljima rezultata njegovih eksperimenata. Kako je moguće da magnet, koji nije fizički vezan sa žicom, može da utiče na tok električne struje? Kako impuls električne struje može da otkloni iglu kompasa od magnetnog severa? Nekakvo delovanje sigurno prolazi kroz prazan prostor između magneta, žice i kompasa, jer namotaj žice mora da „oseti“ magnet koji prolazi kroz njega, a igla kompasa mora da „oseti“ struju. To delovanje danas je poznato kao elektromagnetno polje. Reč „polje“ već smo koristili u kontekstu Zemljinog magnetnog polja. Polja su jedan od apstraktnijih koncepata u fizici. Ona su ujedno i jedan od najpotrebnijih i jedan od najplodnijih koncepata za razvoj dubljeg razumevanja prirode. Jednačine koje najbolje opisuju ponašanje milijardi subatomske čestice od kojih se sastoji ova knjiga, ruka kojom je držite pred očima pa i same vaše oči, jesu jednačine polja. Faradej je svoja polja vizuelizovao nizom linija. Nazvao ih je *linije fluksa* i one polaze od magneta i žica kroz koje teče struja. Ako ste ikada stavili magnet ispod papira po kom ste prosuli metalne opiljke, onda ste ih i sami videli. Jednostavan primer uobičajene veličine koja se može predstaviti poljem jeste temperatura vazduha u prostoriji. Pored radijatora, vazduh će biti topliji. Pored prozora, biće

hladniji. Mogli biste zamisliti da merite temperaturu u svakoj tački sobe i zapisujete taj ogroman niz brojeva u tabelu. Tabela bi tada bila prikaz polja temperature u prostoriji. U slučaju magnetnog polja, mogli biste zamisliti da beležite skretanje igle malog kompasa u svakoj tački i na taj način formirate „mapu“ magnetnog polja u sobi. Polje subatomske čestice još je apstraktnije. Njegova vrednost u nekoj tački prostora govori o verovatnoći da se čestica nađe u njoj. Sa tim poljima ponovo ćemo se sresti u poglavlju 7.

Sa pravom se možda pitate zašto uvodimo taj prilično apstraktan pojam polja. Zašto se ne držimo stvari koje možemo da izmerimo: električne struje i skretanja igle kompasa? Faradej je to smatrao dobrom idejom, jer je bio praktičan čovek, a tu vrlinu delio je sa mnogim velikim eksperimentatorima i inženjerima iz doba industrijske revolucije. Instinktivno je hteo da napravi mehaničku sliku veze između pokretnih magneta i namotaja žice. Prema njegovom mišljenju, polja su premošćivala prostor između njih i služila kao fizička veza za koju su mu eksperimenti govorili da mora postojati. Međutim, dublji je razlog zbog kojeg su polja neophodna i zbog kojeg savremeni fizičari smatraju da su ona jednako stvarna kao i električna struja i otklon magnetne igle kompasa. Ključ za to dublje razumevanje prirode leži u radu škotskog fizičara Džejmisa Klerka Maksvela. Na stogodišnjicu Maksvelovog rođenja, 1931. godine, Ajnštajn je za njegov rad na teoriji elektromagnetizma rekao da je to „najdublji i najplodniji rad u oblasti fizike još od vremena Njutna“. Godine 1864, tri godine pre Faradejeve smrti, Maksvel je uspeo da razvije skup jednačina koje su opisivale sve električne i magnetne pojave koje su Faradej i mnogi drugi pažljivo proučavali i dokumentovali u prvoj polovini 18. veka.

Jednačine su najsnažniji alat na raspolaganju fizičarima koji nastoje da razumeju prirodu. One ujedno spadaju u gradivo od kog učenici najviše zaziru tokom školovanja. Zbog toga osećamo

obavezu da uputimo nekoliko reči zabrinutim čitaocima pre nego što nastavimo dalje. Naravno, znamo da se ne osećaju svi tako prilikom susreta s matematikom. Iskusnije čitaoce zamolićemo za malo strpljenja i nadamo se da neće misliti kako previše pažnje poklanjamo osnovnim temama. Na najjednostavnijem nivou, jednačina omogućava da predvidite rezultat eksperimenta bez potrebe da ga izvodite. Vrlo jednostavan primer koji ćemo kasnije u knjizi koristiti da pokažemo razne neverovatne rezultate o prirodi vremena i prostora, jeste poznata Pitagorina teorema o odnosu dužina kateta i hipotenuze u pravouglom trouglu. Pitagora kaže da je „kvadrat nad hipotenuzom jednak zbiru kvadrata nad katetama“. Koristeći matematičke simbole, Pitagorinu teoremu možemo zapisati u obliku $x^2 + y^2 = z^2$, gde je z dužina hipotenuze, najduže strane u pravouglom trouglu, a x i y dužine njegovih kateta. Ovaj primer ilustrovan je na slici 1. Simboli x , y i z prihvataju se kao mesta za upisivanje stvarnih dužina strana, dok je x^2 skraćeni zapis za x pomnoženo sa x . Na primer, $3^2 = 9$, $7^2 = 49$ i tako dalje. Nema ničega posebnog u tome što smo odabrali da koristimo simbole x , y i z . Za rezervisana mesta mogli smo da upotrebimo i bilo koje druge. Možda će vam matematički zapis Pitagorine teoreme izgledati prihvatljivije ako ga napišemo ovako: $\mathbb{C}^2 + \uparrow^2 = \odot^2$. U ovakvom zapisu smeško predstavlja dužinu hipotenuze. Evo primera u kojem se koristi ta teorema: ako su katete trougla dužine 3 i 4 centimetra, onda je prema teoremi hipotenuza dugačka 5 centimetara jer je $3^2 + 4^2 = 5^2$. Naravno, brojevi ne moraju da budu celi. Merenje dužina strana trougla lenjijom je isto eksperiment, premda vrlo dosadan. Pitagora nas je spasio dosade time što je napisao jednačinu za svoju teoremu, jer nam ona omogućava da izračunamo dužinu treće stranice ako znamo dužine druge dve. Fizičarima je najbitnije da jednačine izražavaju odnose između „stvari“ i da se pomoću njih mogu iznositi precizni stavovi o stvarnom svetu.



SLIKA 1

Maksvelove jednačine su matematički mnogo komplikovanije, ali u suštini obavljaju isti posao. Iz njih vidimo, na primer, u kom smeru će se igla kompasa zakrenuti kada kroz žicu propustite električni impuls, a da ne morate da gledate kompas. Jednačine su dobre i zbog toga što otkrivaju

duboke veze između vrednosti koje ne mogu odmah da se vide iz rezultata eksperimenata. One zbog toga mogu da nas odvedu do obuhvatnijeg i temeljnijeg razumevanja prirode. Pokazalo se da to važi i za Maksvelove jednačine. U centru pažnje Maksvelovog matematičkog opisa električnih i magnetnih pojava jesu apstraktna električna i magnetna polja koja je prvi prikazao Faradej. Maksvel je svoje jednačine zapisao na jeziku polja jer nije imao drugog izbora. To je bio jedini način da se pod objedinjen skup jednačina svede široki raspon električnih i magnetnih pojava koje su Faradej i drugi posmatrali. Baš kao što Pitagorina jednačina izražava odnos između dužina strana trougla, Maksvelove jednačine izražavaju odnose između naelektrisanja i struja i električnog i magnetnog polja koje stvaraju. Maksvelova genijalnost bila je u tome što je polja izvukao iz sene i postavio ih u središte pažnje. Da ste, na primer, pitali Maksvela zašto baterija uzrokuje struju u provodniku, on bi možda rekao: „Zato što baterija stvara električno polje u žici, a ono uzrokuje tok struje“. Ili, da ste ga pitali zašto se igla kompasa pomeri u blizini magneta, njegov odgovor bi bio: „Zato što oko magneta postoji magnetno polje koje izaziva pomeranje igle“. A na pitanje zašto magnet koji se pomera kroz namotaj žice izaziva u njoj električnu struju, on bi verovatno odgovorio da u namotaju postoji

promenljivo magnetno polje koje izaziva pojavu električnog polja u žici zbog kog počinje da teče struja. U objašnjenju svake od ovih različitih pojava pominju se električno i magnetno polje i interakcije među njima. U fizici se često dešava da se postignu jednostavniji i potpuniji uvidi u skup više različitih i naizgled nepovezanih pojava uvođenjem novog, objedinjavajućeg koncepta. U stvari, to bi se moglo posmatrati kao uzrok uspeha nauke u celini. U Maksvelovom slučaju to je dovelo do jednostavne i jedinstvene slike svih zapaženih električnih i magnetnih pojava koja je odlično funkcionisala, jer je omogućavala predviđanje i razumevanje svih pionirskih eksperimenata što su ih izvodili Faradej i njegove kolege. To je, samo po sebi, bilo veliko dostignuće, ali u procesu izvođenja tačnih jednačina dogodilo se nešto još upečatljivije. Maksvel je u jednačine morao dodati još jednu stavku koju eksperimenti nisu uslovljavali. Iz Maksvelove perspektive to je bilo neophodno kako bi njegove jednačine bile matematički konzistentne. U ovoj prethodnoj rečenici sadržan je jedan od najdubljih i, na neki način, najtajnovitijih uvida u funkcionisanje savremene nauke. Fizički objekti se u stvarnom svetu ponašaju predvidljivo koristeći tek nešto više od osnovnih matematičkih zakona za koje je Pitagora znao dok je računao svojstva trougla. To je empirijska činjenica i nikako se ne može reći da je očigledna. Godine 1960. nobelovac i teorijski fizičar Eugen Vigner napisao je poznati esej „Neobjašnjiva efikasnost matematike u prirodnim naukama“ u kojem je rekao: „Nije nimalo prirodno da zakoni prirode postoje, a još manje da ih čovek može otkriti“. Iskustvo nam govori da zakoni prirode, pravilnosti u načinima na koji se objekti ponašaju, zaista postoje i da se oni najbolje opisuju matematičkim jezikom. To ukazuje na zanimljivu mogućnost da se matematička konzistentnost može iskoristiti da nas zajedno sa eksperimentalnim posmatranjima vodi do zakona koji opisuju fizičku stvarnost, što se i pokazalo tačnim više puta u istoriji nauke. U ovoj knjizi videćete

kako se to dogodilo, a zaista je jedna od najdivnijih misterija našeg kosmosa što je to tako.

Da se vratimo našoj priči. Maksvel je u potrazi za matematičkom konzistentnošću dodao jednu komponentu – struju pomeraja – u jednačinu koja opisuje Faradejeva zapažanja iz eksperimenata s pomeranjem igle kompasa dok kroz provodnik teče struja. Struja pomeraja nije bila neophodna za opisivanje Faradejevih zapažanja, jednačina je opisivala eksperimentalne podatke iz tog vremena i bez nje. Uz ovaj jednostavan dodatak, Maksvelove jednačine pružale su, a da on to nije ni znao, mnogo više od opisa funkcionisanja električnog motora. Kada se uvede struja pomeraja, pojavljuje se dubok odnos između električnog i magnetnog polja. Konkretno, nove jednačine mogu se formulisati u obliku poznatom pod imenom *talasne jednačine* koje – kakvog li iznenađenja! – opisuju kretanje talasa. Jednačine koje opisuju širenje zvuka kroz vazduh jesu talasne jednačine, jednako kao i jednačine koje opisuju putovanje talasa na moru. Prilično neočekivano, Maksvelov matematički opis Faradejevih eksperimenata sa magnetima i žicama predvideo je postojanje nekakvih talasa koji se kreću. Ali, dok su okeanski talasi poremećaji koji se prostiru kroz vodu, a zvučni talasi nastaju pomeranjem molekula vazduha, Maksvelovi talasi sačinjeni su od oscilujućih električnih i magnetnih polja.

Kakva su to tajanstvena oscilujuća polja? Zamislite električno polje koje biva sve veće jer Faradej propušta električni impuls kroz žicu. Već smo naučili da se magnetno polje stvara kada kroz provodnik teče električna struja (Faradej je posmatrao otklon igle kompasa smeštenog u blizini provodnika). Maksvelovim jezikom rečeno, promenljivo električno polje generiše promenljivo magnetno polje. Faradej nam takođe govori i ovo: kad menjamo magnetno polje pomeranjem magnetna kroz namotaj žice, stvara se električno polje koje izaziva tok struje kroz žicu. Sada zamislite da ste uklonili struju

i magnete. Ostala su nam samo polja koja se menjaju od vrednosti do vrednosti, jer promena jednog znači promenu drugog. Maksvelove jednačine opisuju kako su ta dva polja povezana dok osciluju od jedne vrednosti do druge. One takođe predviđaju da talasi moraju da se kreću napred određenom brzinom. Možda ne iznenađuje da je ta brzina određena kvantitetima koje je Faradej merio. U slučaju zvuka, brzina talasa je oko 330 metara u sekundi, tek nešto malo brže od putničkog aviona. Brzina zvuka je ograničena detaljima interakcije između molekula vazduha koji prenose talas. Ona se menja zavisno od atmosferskog pritiska i temperature, parametara koji određuju koliko često se molekuli vazduha približavaju i odbijaju jedan od drugog. U slučaju Maksvelovih talasa predviđa se da je brzina jednaka odnosu električnog i magnetnog polja koji se može vrlo jednostavno izračunati. Jačina magnetnog polja može se odrediti merenjem sile između dva magneta. Povremeno ćemo pominjati reč „sila“ i pod njom podrazumevamo intenzitet kojim se nešto vuče ili gura. Količina povlačenja ili guranja može se kvantifikovati i izmeriti, a ako želimo da razumemo kako svet funkcioniše, ne bi trebalo da iznenađuje što želimo da znamo odakle potiče sila. Na jednako jednostavan način, električno polje može da se izmeri naelektrisanjem dva objekta i merenjem sile između njih. Verovatno ste i sami doživeli spontano naelektrisanje statičkim elektricitetom. Možda ste po suvom danu hodali po sintetičkom tepihu i zatim doživeli električni udar kada ste uhvatili metalnu kvaku na vratima. To neprijatno iskustvo događa se zato što ste hodanjem „otrgnuli“ elektrone, fundamentalne čestice naelektrisanja, i sakupili ih na đonu obuće. U tom procesu postali ste naelektrisani, a to znači da između vas i metalne kvake postoji električno polje. Kada mu pružite priliku (hvatanjem metalne kvake), to polje će izazvati tok električne struje, a upravo to je Faradej uočio u eksperimentima.

Izvođenjem takvih jednostavnih eksperimenata naučnici mogu da mere jačinu električnog i magnetnog polja i preko Maksvelovih jednačina izračunaju brzinu talasa. Koji je rezultat tog računanja? Koju brzinu širenja elektromagnetnih talasa predviđaju Faradejevi eksperimenti kombinovani sa Maksvelovim matematičkim formulama? Ovo je jedan od ključnih trenutaka u našoj priči. To je divan primer koji pokazuje zašto je fizika lepa, snažna i duboka nauka: Maksvelovi talasi šire se brzinom od 299.792.458 metara u sekundi. Štaviše, to je brzina svetlosti – Maksvel je slučajno došao i do otkrića same svetlosti. Možete da posmatrate svet oko sebe zato što se Maksvelovo elektromagnetno polje prostire kroz tminu do vaših očiju brzinom koja se može predvideti korišćenjem samo namotaja žice i magneta. Maksvelove jednačine su odškrinuta vrata kroz koja svetlost ulazi u našu priču na način koji je jednako važan kao i Ajnštajnova otkrića koja su one podstakle. Postojanje te posebne brzine u prirodi, jedinstvenih, nepromenljivih 299.792.458 metara u sekundi, dovodi nas do sledećeg poglavlja, jednako kao što je Ajnštajna dovelo do toga da odbaci koncept apsolutnog vremena.

Pažljiv čitalac možda je ovde primetio problem ili u najmanju ruku neprecizno izražavanje s naše strane. Prema onome što smo rekli u poglavlju 1, jasno je da nema smisla navoditi brzinu a da ne kažemo u odnosu na šta ona toliko iznosi. Maksvelove jednačine o tome ne govore ništa. Brzina tih talasa – odnosno brzina svetlosti – pojavljuje se kao konstanta prirode, odnos između relativnih jačina električnog i magnetnog polja. U toj elegantnoj matematičkoj strukturi nigde nema mesta za brzinu izvora talasa, niti za primaoca. Maksvelu i njegovim savremenikima to je bilo poznato, ali nije ih zabrinjavalo zato što je većina naučnika tog vremena, ako ne i svi, verovala da svi talasi, uključujući i svetlost, moraju da se kreću u nekom mediju – mora da postoji neka „opipljiva“ stvar koja se talasa. Oni su bili praktične osobe, uzor im je bio Faradej, i smatrali

su da stvari ne mogu da se talasaju same, bez podrške. Talasi u vodi mogu da postoje samo ako postoji i voda, dok se zvučni talasi šire samo u prisustvu vazduha ili neke druge supstance, ali sigurno ne u vakuumu. („U kosmosu niko ne može da čuje kako vrištite.“)

Krajem 19. veka prevladavalo je mišljenje da svetlost mora da putuje kroz medij – etar. Brzina koja se pojavila u Maksvelovim jednačinama tada je imala vrlo prirodnu interpretaciju – tumačila se kao brzina svetlosti u odnosu na etar. Taj mehanizam potpuno je analogan kretanju zvučnih talasa kroz vazduh. Ako je vazduh pod nepromenljivim pritiskom i temperaturom, zvuk će se uvek širiti konstantnom brzinom koja zavisi samo od detalja interakcije između molekula vazduha, a ne i od kretanja izvora talasa.

Etar mora da je vrlo čudna stvar. Biće da prožima sav prostor jer svetlost putuje kroz prazninu između Sunca i Zemlje, ali i između udaljenih zvezda i galaksija i Zemlje. Dok hodate niz ulicu sigurno prolazite kroz etar. Zemlja takođe mora da prolazi kroz etar na svom putovanju oko Sunca. Sve što se kreće u kosmosu mora da se kreće kroz etar, a on ne sme da pruža nikakav otpor kretanju čvrstih tela, uključujući i vrlo velika tela kakva su planete. Kada bi etar pružao otpor kretanju čvrstih tela, tada bi Zemlja tokom svake od svojih pet milijardi orbita oko Sunca usporavala, kao što bi kuglični ležaj usporavao kad biste ga ubacili u teglu meda, i trajanje solarne godine s vremenom bi se skraćivalo. Jedina razumna pretpostavka je da se Zemlja i svi drugi objekti kreću kroz etar bez otpora. Mogli biste pomisliti da će ta karakteristika etra onemogućiti njegovo otkrivanje, ali eksperimentalci viktorijanskog doba bili su skoro genijalni pa su u nizu impresivnih i vrlo preciznih eksperimenata Albert Majkelson i Edvard Morli počevši od 1881. godine nameravali da otkriju ono što se činilo nemogućim. Koncept eksperimenata je bio vrlo jednostavan. U odličnoj knjizi o relativnosti koju je 1925. godine napisao Bertrand Rasel, kretanje Zemlje kroz etar upoređeno je sa

šetnjom po vetrovitom danu. U jednoj tački hodaćete uz vetar, a u drugoj niz vetar. Na sličan način, pošto se Zemlja kreće kroz etar dok kruži oko Sunca, jednako kao i Sunčev sistem u kretanju oko središta Mlečnog puta, Zemlja u nekom trenutku godine mora da se kreće uz vetar etra, a u drugom niz njega. Čak i u malo verovatnom slučaju mirovanja Sunčevog sistema u odnosu na etar, kretanje Zemlje oko Sunca stvaralo bi vetar etra, poput onog koji osetite ako gurnete glavu kroz prozor automobila u vožnji po savršeno mirnom danu.

Majkelson i Morli postavili su sebi zadatak da izmere brzinu svetlosti u različito vreme tokom godine. Oni su, baš kao i svi drugi, nesumnjivo očekivali da se brzina menja tokom godine, ali za mali iznos, jer bi Zemlja (a zajedno s njom i eksperimentalna oprema) trebalo da neprekidno menja brzinu u odnosu na etar. Eksperimenti su bili vrlo precizni, jer se u njima koristila *interferometrija*, tehnika koju su Majkelson i Morli dodatno poboljšavali šest godina pre nego što su 1887. godine objavili rezultate. Rezultat je neupitno bio negativan. Ni u jednom smeru ni u jedno posmatrano doba godine nije bilo razlike u brzini svetlosti.

Ukoliko je hipoteza o etru tačna, ovaj rezultat je teško objasniti. Zamislite, na primer, da ste odlučili da skočite u brzu reku i plivate nizvodno. Ako plivate brzinom od pet kilometara na sat, a voda teče brzinom od tri kilometra na sat, onda ćete se u odnosu na obalu kretati brzinom od osam kilometara na sat. Ako se okrenete i počnete da plivate uzvodno, u odnosu na obalu kretaćete se brzinom od dva kilometra na sat. Majkelsonov i Morlijev eksperiment je potpuno analogan tome. Zrak svetlosti je plivač, etar je reka u kojoj on pliva, a obala reke Majkelsonova i Morlijeva aparatura čvrsto postavljena na površini Zemlje. Sada možemo da vidimo zašto je rezultat Majkelson–Morlijevog eksperimenta bio tako veliko iznenađenje. Isto bi bilo kao kada biste u odnosu na obalu uvek plivali brzinom od

pet kilometara na sat bez obzira na to u kom smeru plivate i kojom brzinom reka teče.

Dakle, Majkelson i Morli nisu uspeli da otkriju prisustvo etra u svojoj aparaturi. Evo sledećeg izazova za našu intuiciju: prema onome što smo do sada videli, veliki korak bio bi odbaciti koncept etra jer se njegovi efekti ne mogu posmatrati, baš kao što smo u prvom poglavlju odbacili koncept apsolutnog prostora. Pomenuću i da je iz filozofske perspektive etar uvek bio ružno rešenje jer bi određivao reper u kosmosu u odnosu na koji bi moglo da se definiše apsolutno kretanje, što je u suprotnosti sa Galilejevim principom relativnosti. Istorijski, izgleda da je to bilo Ajnštajново lično gledište jer je on malo znao o rezultatima Majkelson–Morlijevog eksperimenta kada je napravio krupan iskorak i odbacio etar u formulaciji specijalne teorije relativnosti 1905. godine. Sigurno je da filozofska istančanost nije pouzdan vodič za mehanizme funkcionisanja prirode i, u konačnoj analizi, najispravniji razlog za odbacivanje etra je taj što nije neophodan za eksperimentalne rezultate.*

Iako odbacivanje etra možda doprinosi estetici i ne sukobljava se sa eksperimentalnim rezultatima, ako se odlučimo na taj korak i dalje ćemo imati ozbiljan problem: Maksimalne jednačine daju vrlo precizno predviđanje brzine svetlosti, ali ne sadrže nikakve informacije o tome u odnosu na šta je treba meriti. Budimo na trenutak hrabri, prihvatimo jednačine kakve jesu i pogledajmo u kom smeru vodi to intelektualno putovanje. Ako dobijemo rezultat koji nema smisla, uvek se možemo vratiti i pokušati sa drugom hipotezom, osećajući se ispunjeno jer smo se bavili naukom. Maksimalne jednačine predviđaju da se svetlost uvek kreće brzinom od 299.792.458 metara u sekundi i u njima nema mesta da se ubaci brzina izvora svetlosti ili

* Nakon Majkelson–Morlijevog eksperimenta izvedeni su još mnogi kako bi se pokazalo da etar postoji, ali nijedan nije dao rezultat.

brzina primaoca. Jednačine tvrde da će brzina svetlosti uvek biti jednaka, bez obzira na to kojom se brzinom izvor i primalac kreću jedan u odnosu na drugog. Izgleda da nam Maksvelove jednačine govore da je brzina svetlosti prirodna konstanta. To je zaista čudna tvrdnja pa ćemo potrošiti nešto vremena na proučavanje njenog značenja.

Zamislite da svetlost dolazi iz džepne svetiljke. Zdrav razum nam govori da bismo, ako možemo da trčimo dovoljno brzo, mogli da stignemo front svetlosnog snopa dok napreduje. Zdrav razum nam govori i da bismo mogli da trčimo uporedo sa frontom ako možemo da postignemo brzinu svetlosti. Ali, ako bismo se doslovno držali Maksvelovih jednačina, onda bi se zrak svetlosti, nezavisno od toga kojom se brzinom mi krećemo, i dalje udaljavao od nas brzinom od 299.792.458 metara u sekundi. Ako to ne bi bilo tako, brzina svetlosti bi bila drugačija za osobu koja drži džepnu svetiljku i osobu koja trči. To je kontradiktorno rezultatima Majkelson–Morlijevog eksperimenta i našoj tvrdnji da je brzina svetlosti konstanta prirode, uvek isti broj, bez obzira na kretanje izvora ili posmatrača svetlosti. Izgleda da smo se doveli u apsurdnu situaciju. Zdrav razum bi nam sigurno savetovao da odbacimo ili bar modifikujemo ili drugačije tumačimo Maksvelove jednačine – možda su samo donekle tačne. To ne zvuči kao nerazuman predlog jer će kretanje svake stvarne eksperimentalne aparature izazvati samo male varijacije vrednosti od trista miliona metara u sekundi koja se pojavljuje u Maksvelovim jednačinama. Toliko male da verovatno mogu da prođu nezapažene u Faradejevim eksperimentima. Alternativa je prihvatiti ispravnost Maksvelovih jednačina i čudnu posledicu da nikada ne možemo stići front svetlosnog snopa. Ne samo da je ta ideja u suprotnosti sa zdravim razumom već, kao što ćemo videti u sledećem poglavlju, implicira kako treba da odbacimo i koncept apsolutnog vremena.

Nama je danas podjednako teško da prihvatimo prekidanje veza sa apsolutnim vremenom kao što je bilo i naučnicima iz 19. veka.

Razvili smo snažnu intuiciju prema apsolutnom prostoru i vremenu koju je teško slomiti, ali treba da znamo kako je ta intuicija ništa drugo do – intuicija. Štaviše, Njutnovi zakoni su utemeljeni na toj apsolutnosti, a oni čak i danas čine osnovu za rad mnogih inženjera. U 19. veku Njutnovi zakoni su bili nedodirljivi. Dok je Faradej otkrivao način funkcionisanja elektriciteta i magnetizma u Kraljevskom institutu, Isambard Kingdom Brunel je gradio Veliku zapadnu prugu od Londona do Bristolu. Brunelov poznati viseći most Klifton završen je 1864. godine, iste godine kada je Maksvel postigao veličanstvenu sintezu Faradejevog rada i otkrio tajnu svetlosti. Brukliniski most otvoren je osam godina kasnije, a 1889. godine Ajfelova kula uzdigla se iznad Pariza. Sva ta monumentalna dostignuća iz doba parnih mašina projektovana su i izgrađena primenom konceptata koje je osmislio Njutn. Njutnova mehanika je bila daleko od apstraktnih matematičkih analiza. Simboli njenog uspeha podizali su se širom zemaljske kugle u sve većem slavlju zbog čovekovog ovladavanja prirodnim zakonima. Zamislite zaprepašćenje koje je zavlдалo među naučnicima s kraja 19. veka kada su se sreli s Maksvelovim jednačinama i njihovim implicitnim napadom na same temelje njutnovskog pogleda na svet. Jasno, pobednik može biti samo jedan. Jasno, Njutn i koncept apsolutnog vremena svakako će odneti pobedu. Ali, 20. vek je osvanuo a problem konstantne brzine svetlosti i dalje je unosio nemir: ne mogu i Njutn i Maksvel da budu u pravu. Tako je bilo do 1905. godine kada je objavljen rad do tada nepoznatog fizičara Alberta Ajnštajna koji je konačno pokazao da je priroda na Maksvelovoj strani.