

**CRNE RUPE**



BRAJAN KOKS  
DŽEF FORŠO

# CRNE RUPE

KLJUČ ZA  
RAZUMEVANJE  
UNIVERZUMA

Prevod  
Ana Ješić



*Naslov originala*  
Brian Cox and Jeff Forshaw:  
BLACK HOLES  
(The Key to Understanding the Universe)

Originally published in the English language  
in 2022 by HarperCollins Publishers Ltd

Copyright © 2022 by Brian Cox and Jeff Forshaw  
Images © 2022 by HarperCollins Publishers  
Illustrations by Martin Brown and Jack Jewell

Copyright © 2024. za srpsko izdanje, Heliks  
Translated under licence from HarperCollins Publishers Ltd.

*Izdavač*  
Heliks

*Za izdavača*  
Brankica Stojanović

*Urednik*  
Bojan Stojanović

*Stručni redaktor*  
Dr Milan M. Ćirković

*Lektor*  
Aleksandra Dragosavljević

*Štampa*  
DMD štamparija, Beograd

Prvo izdanje

*Tipografija*  
*Adobe Garamond Pro i Josefina Sans*

ISBN: 978-86-6024-102-5

Smederevo, 2024.

[www.heliks.rs](http://www.heliks.rs)

Za Džefovu mamu, Silviju.



# SADRŽAJ

<i>Predgovor srpskom izdanju</i>	ix
1 Kratka povest crnih rupa	1
2 Objedinjavanje prostora i vremena	22
3 Postavljanje beskonačnosti na konačno mesto	46
4 Krivljenje prostorvremena	75
5 U crnoj rupi	97
6 Bele rupe i crvotočine	112
7 Kerova zemlja čuda	131
8 Stvarne crne rupe nastale kolapsom zvezda	149
9 Termodinamika crne rupe	163
10 Hokingovo zračenje	187
11 Špagetifikovani i ispareni	197
12 Zvuk tapšanja jednom rukom	208
13 Svet kao hologram	226
14 Ostrva u struji	239
15 Savršen kôd	254
<i>Izjave zahvalnosti</i>	265
<i>Napomene</i>	267
<i>Izvori ilustracija</i>	271
<i>Indeks</i>	273
<i>O autorima</i>	281





Predgovor srpskom izdanju

# HAMLET NA HORIZONTU DOGAĐAJA

ili

*Kako sam prestao da se nerviram  
i zavoleo crne rupe*

Šekspirov *Hamlet* je verovatno najznačajniji dramski tekst ikada napisan – činjenica koju i te kako vredi ponavljati baš danas, usred svih neutemeljenih osporavanja intelektualnih, ali i moralnih vrednosti prosvetiteljstva i kanona velike književnosti. U prvoj sceni prvog čina legendarne drame, stražari na zidinama Elsinora aludiraju na pojavu nove zvezde, na mestu na kome je do tada nije bilo (nasuprot tada dominantnom aristotelovskom pogledu na savršenost i nepromenljivosti nebeskog domena). Istoričari nauke su danas prilično saglasni da je ovo gotovo izvesno referenca na supernovu iz 1572. godine u Kasiopeji koju je Šekspir mogao videti kao dečaćić u Stratfordu, a koju je profesionalno posmatrao najveći astronom tog doba, danski plemić Tiho de Brahe. Knjiga koju je Tiho napisao o svojim posmatranjima ovog veoma retkog nebeskog spektakla odigrala je veliku ulogu u Kopernikanskoj revoluciji, toj drami koja je stvorila nauku kakvu danas poznajemo. Usput, sa mesta Tihovih opservatorija na ostrvu Ven u oresundskom moreuzu se, kad god je vedro, odlično vide upravo zidine Elsinora, a među brojnim Tihovim posedima nalazila su se i dva imanja koja su se zvala Gildenstern i Rozenkranc, imena koja će svakom čitaocu/gledaocu Hamleta biti poznata.

Svaka supernova, pa i Tihova, koja nosi „službenu“ oznaku SN1572, predstavlja očajnički pokušaj masivne zvezde – ili zvezda u dvojnog sistema – da spreči konačnu sudbinu svekolike materije, gravitacioni kolaps. Energija koja se oslobodi u eksplozijama supernovih u sva tri glavna oblika (zračenje, mehaničko širenje ostatka supernove i emisija neutrina) predstavlja najubedljiviju potvrdu u kojoj meri je gravitacija ključni pokretač svih značajnih događaja u univerzumu. Mnoge masivne zvezde i nakon eksplozije supernove doživljavaju gravitacioni kolaps koji se ničim ne može zaustaviti – sve dok ne postanu crne rupe. Ovo se, po svemu sudeći, desilo sa zvezdom koja je eksplodirala kao supernova 1987A u Velikom Magelanovom oblaku i to stanje materije, koje je – ako ne aristotelovski savršeno stabilno za večnost – bar najstabilnije poznato ljudima, predmet je knjige koju imate u rukama.

Delo Brajana Kokska i Džefa Foršoa koje čitate vredan je doprinos naučnopopularnoj literaturi sa više različitih aspekata. Ne samo što uspeva da predstavi čitaocu koji nije stručnjak za teoriju relativnosti, pa ni fiziku u celini, jednu izuzetno apstraktnu i složenu temu kao što je opšta relativnost i njena singularna rešenja; ova knjiga to čini na način koji je uzbudljiv, dramatičan i – naizgled paradoksalno, ali samo za doba u kojem živimo – ozbiljan. Ovo potonje je u toj meri postalo retko i egzotično da zaslužuje malo detaljnije razmatranje.

Dva su temeljna aspekta ove ozbiljnosti. Prvo, Koks i Foršo ne padaju u zamku da popularizaciju nauke pomešaju sa infantilizacijom nauke. Ova težnja, da se sva popularna nauka svodi na „nauku za decu“, izuzetno je snažno prisutna na javnoj sceni svuda u svetu, pa i u Srbiji. Sve je to lepo, ali niko od zagovornika ovog pristupa nikako da objasni zašto samo nauka za decu, a ne i nauka za penzionere? Penzioneri su, uzgred, društvena grupa koja je zbog velikog produženja životnog veka sve brojnija i sve više (gle čuda! nasuprot pučkom „zdravom razumu“) ima odlučujući uticaj na budućnost sveta i na politike koje će se u budućnosti sprovesti. Dovoljno je pogledati starosnu dob kandidata na američkim pred-

sedničkim izborima, a i lideri drugih zemalja su daleko od cveta mladosti. I to ne samo politički, već i akademski, kulturni i drugi lideri. Japanska vlada je još pre više decenija označila robotizaciju ekonomije kao najviši nacionalni prioritet, s obzirom da osobe starije od 65 godina sačinjavaju skoro 40% stanovništva ove tehnološki ultramoderne nacije.

Ali to je samo primer. Zašto samo popularna nauka za decu, a ne i za poslovne ljude, sportiste, bankare, donosioce odluka? Zašto ne popularizacija nauke za studente, poljoprivrednike, žene u drugom stanju? Knjiga Koksa i Foršoa ne upada u tu zamku – naprotiv, ona se čvrsto drži visokog i ozbiljnog nivoa i sasvim sigurno ne pati od preteranih pojednostavljenja na koja se zagovornici „nauke za decu“ praktično obavezuju. Na kraju krajeva, činjenica da u ovoj knjizi postoje desetine Penrouzovih dijagrama sama po sebi je impresivna – i nije nešto što bi se tipični popularizator nauke ili naučni novinar usudio da pokuša. Ko očekuje da u ovoj knjizi pronađe šarene kuce i mace, bolje da je odmah zaklopi.

Drugi ključni aspekt ozbiljnosti ove knjige sastoji se u njenom plodotvornom korišćenju riznice ljudske kulture, kako visokoprofilne, tako i popularne, za objašnjavanje komplikovanih naučnih poenti. Kako brojni astronauti u misaonim eksperimentima Koksa i Foršoa veselo poniru ka horizontu događaja crnih rupa, citirajući Monti Pajtonovce ili Dagleasa Adamsa, svako od njih se doslovce suočava sa hamletovskom dilemom biti ili ne biti. I u ovom slučaju, to ima daleko dublje posledice po naše razumevanje ne samo prostora i vremena, već i značenja postojanja u fizičkom prostorvremenu ili van njega koje uključuje i druge univerzume dostupne, makar na pojmovnom nivou, kroz Ajnštajn–Rozenove mostove, popularno poznate i kao crvotočine.

Analogija sa najvećom „Bardovom“ dramom – opušteno shvaćena – tu se ne završava. Poput duha Hamletovog oca, jedan drugi duh se provlači kroz knjigu Koksa i Foršoa – duh Ričarda Fajnmana. Jedan od najvećih umova 20. veka, Ričard Filips Fajnman, pored ogromnih istraživačkih rezultata bio je i izuzetan

inovator kako nastave nauke, tako i njene popularizacije i promocije. Njegova *Predavanja iz fizike* su i danas, više od 60 godina (!) nakon što su održana, najbolji opšti uvod u fiziku na fakultetskom nivou. Još jedno Fajnmanovo remek-delo, zbirka eseja pod naslovom *Karakter fizičkog zakona*, citirano je u knjizi koju držite u ruci, a odlikuje ga ne samo široka dostupnost, već i niz dubokih uvida u filozofiju nauke (makar je sam Fajnman nije nazivao tako, što je zasebna priča u koju ovde, nažalost, ne možemo ulaziti).

Međutim, jedno drugo ostvarenje, koje se takođe može naći na srpskom u izdanju Heliksa, ostvarilo je ključni uticaj na Koks i Foršoa. Fajnmanova popularna predavanja održana na Novom Zelandu i sakupljena u knjigu *QED: Neobična teorija svetlosti i materije* (Heliks, 2010) bila su i ostala briljantan pedagoški eksperiment: kako je moguće na popularnom nivou, bez jednačina i integrala, objasniti jednu od najkompleksnijih i tehnički najsloženijih teorija savremene nauke? S jedne strane, za korektno razumevanje kvantne elektrodinamike i kvantne teorije polja uopšteno, potrebno je razumevanje matematičke fizike na nivou (najmanje) doktorskih studija; s druge strane, genije poput Fajnmana bio je u stanju da ostvari nemoguće i pokaže, kako je sam rekao, „kako se apsurdnim procesom kombinovanja strelica izračunavaju tačni odgovori“. Naravno, upravo crtanje jednostavnih shema sa strelicama na papiru predstavlja slavnu metodu Fajnmanovih dijagrama, tih najvažnijih oruđa savremenih teoretičara polja.

Ono što je Fajnman uspeo da uradi s dijagramima koji nose njegovo ime, Koks i Foršo postižu sa Penrouzovim dijagramima koji opisuju prostorvreme opšte teorije relativnosti: ponekad je spektakularan – i šire razumljiv – uvid u dubinu neke teške problemske situacije samo par linija na papiru daleko. Pre svega, potrebno je ne plašiti se.

Naravno, Penrouzovi dijagrami zahtevaju izvesnu veštinu apstrakcije – pre svega sposobnost da se uklone „suvišne“ prostorne dimenzije i da se prihvati da dužina linija na dijagramu ne odgovara nužno udaljenosti u prostoru, pa čak i da linija na

dijagramu može označiti odsustvo udaljenosti u prostoru! Kao što je nedavno preminuli velikan fizike u Srbiji i naš veliki pedagog, profesor Fedor Herbut, govorio – apstrakciju valja vežbati na svakom mestu, posebno kad nemate na raspolaganju doslovan ili makar približno dostupan model pojave o kojoj se radi! Crne rupe su odličan primer i vodič u ovom smislu.

Sve u svemu, knjiga koju držite u ruci možda neće promeniti svet na način na koji su to učinile retke epohalne knjige ovog žanra poput Vajnbergova *Prva tri minuta* ili Guldovog *Čudesnog života*, ali ona i dalje ima odlike velikih ostvarenja iz ove kategorije i sva je prilika da će, poput *Neobične teorije svetlosti i materije*, ostati aktuelna još mnogo decenija. Crne rupe odista jesu ključ za razumevanje univerzuma, ali i to je jedna vrsta borhesovske dvostruke metafore, jer je poruka koju ova knjiga (kao i svaki projekat prosvetiteljstva) šalje dublja i opštija od astrofizike, pa i od čitave nauke. Istinski duhovni i intelektualni napredak uvek je bio i uvek će biti najintimnija i najviše individualna stvar; nacija, „klasa“, „rasa“, pol, esnaf, partija, kolhoz ili ma koji drugi identitetski kolektiv nikada neće niti mogu osetiti tanani treptaj istinskog nadahnuća i sazajnog skoka. To može samo usamljeni pojedinac, sa knjigom u ruci.

Spremite se za takvo nadahnuće.

Beograd,

9. mart 2024.

*Milan M. Ćirković*



# 1

## KRATKA POVEST CRNIH RUPA

*„Svest o tome da postoji nešto u šta ne možemo proniknuti, o ispoljavanjima najdubljeg racija i najsjajnije lepote – to saznanje i ta emocija čine istinski religiozan stav; u tom, i samo u tom smislu, ja sam duboko religiozan čovek.“*

Albert Ajnštajn

U srcu Mlečnog puta postoji izobličenje u tkanju kosmosa izazvano nečim što je četiri miliona puta masivnije od našeg Sunca. Prostor i vreme se toliko deformišu u njegovoj blizini da će svaki svetlosni zrak koji mu se približi na manje od 12 miliona kilometara biti zarobljen. Oblast iz koje nema povratka omeđena je horizontom događaja, tako nazvanim zato što je kosmos izvan te oblasti večno izolovan od svega što se dešava unutra. Bar smo tako mislili kada je taj naziv skovan. To nešto nazvali smo Strelac A\*, a predstavlja supermasivnu crnu rupu.\*

Crne rupe se nalaze tamo gde su nekada sijale najmasivnije zvezde, u središtu galaksija i na obodu našeg trenutnog razumevanja. Ti objekti nastaju prirodno i neizbežne su tvorevine gravitacije kad se previše materije uruši u dovoljno mali prostor. Premda naši prirodni zakoni predviđaju njihovo postojanje, ne uspevaju da ih opišu u potpunosti. Fizičari tokom čitavih svojih karijera tragaju

---

\* Čita se „Strelac A zvezdica“.

za problemima, sprovode eksperimente u potrazi za bilo čime što se ne može objasniti poznatim zakonima. Čudesno je u vezi sa sve većim brojem crnih rupa koje otkrivamo rasute po nebu to što je svaka od njih eksperiment koji priroda sprovodi, a mi ga ne možemo objasniti. To znači da nam uporno izmiče nešto duboko.

Moderno proučavanje crnih rupa počinje Ajnštajnovom opštom teorijom relativnosti, objavljenom 1915. godine. Ova vek stara teorija gravitacije vodi do dva zadivljujuća predviđanja: „Prvo, da je sudbina masivnih zvezda da se uruše iza horizonta događaja i formiraju ‘crnu rupu’ koja će sadržati singularnost; i drugo, da postoji singularnost u našoj prošlosti koja, u izvesnom smislu, predstavlja početak univerzuma.“ Ova izvanredna rečenica se pojavljuje na prvoj stranici uticajnog udžbenika o opštoj relativnosti, *Struktura prostorvremena na velikoj skali* (*The Large Scale Structure of Space-Time*), koji su 1973. godine napisali Stiven Hoking i Džordž Elis.<sup>1</sup> Tu se prvi put pominju upečatljivi izrazi – crna rupa, singularnost, horizont događaja – koji su postali deo popularne kulture. Autori navode i da će gravitacija primorati najmasivnije zvezde u kosmosu da se uruše na kraju svog života. Zvezda nestaje, ostavljajući otisak u tkanju kosmosa. Ali nešto ostaje iza horizonta – singularnost, trenutak, pre nego mesto, kad naše znanje o prirodnim zakonima gubi smisao. Prema opštoj relativnosti, singularnost čeka na kraju vremena. Singularnost postoji i u našoj prošlosti, i označava početak vremena: Veliki prasak. Mi treba da prihvatimo duboku ideju da se naš naučni opis gravitacije, poznate sile koja upravlja ponašanjem topovske đuladi i Meseca, u svojoj srži tiče prirode prostora i vremena.

Na prvi pogled, nije očigledno da bi gravitacija trebalo da ima veze s prostorom i vremenom. Još je manje očigledno da nastojanje da se ona opiše u naučnoj teoriji može dovesti do razmišljanja o početku i kraju vremena. Crne rupe zauzimaju središnje mesto u istraživanju ovog dubokog odnosa zato što su najekstremnije opazive tvorevine gravitacije. One su u intelektualnom pogledu toliko problematične da su mnogi fizičari još do pred kraj šezde-



setih godina prošlog veka smatrali da će priroda sigurno naći način da ih izbegne, iako predstavljaju ishod matematike opšte relativnosti. Sam Ajnštajn je 1939. godine napisao rad u kome je zaključio da crne rupe „ne postoje u fizičkoj stvarnosti“.<sup>2</sup> Ajnštajnov savremenik Artur Edington izrazio se jezgrovitije: „Trebalo bi da postoji prirodni zakon koji sprečava zvezdu da se ponaša tako apsurdno.“ Pa, ne postoji takav zakon, a zvezde se ponašaju apsurdno.

Sada shvatamo da su crne rupe prirodna i neizbežna faza u životima zvezda koje su nekoliko puta masivnije od našeg Sunca. Kako u našoj galaksiji postoje milioni takvih zvezda, postoji i mnogo miliona crnih rupa. Zvezde su velike grudve materije koje se bore protiv gravitacionog kolapsa. U ranim fazama svog života, one odolevaju unutrašnjem sažimajućem pritisku sopstvene gravitacije tako što pretvaraju vodonik u helijum u svojim jezgrima. Ovaj proces, poznat kao nuklearna fuzija, oslobađa energiju, a ona stvara pritisak koji sprečava urušavanje. Naše Sunce se trenutno nalazi u ovoj fazi, pretvarajući svake sekunde 600 miliona tona vodonika u helijum. Lako je površno preleteti preko veoma velikih brojeva u astronomiji, ali ipak bi trebalo da zastanemo i da se divimo zastrašujućoj razlici u razmeri između zvezda i objekata iz svakodnevnog ljudskog iskustva. Omanja planina ima masu od 600 miliona tona, a naše Sunce neprekidno sagoreva toliku količinu vodonika svake sekunde još od pre formiranja Zemlje. Ne brinite, ima dovoljno vodonika da Sunce nastavi svoju borbu s gravitacijom narednih pet milijardi godina. Sunce to može jer je veliko; u njega bi se lako smestilo milion Zemalja. Prečnik Sunca je 1,4 miliona kilometara; putničkom avionu bi trebalo šest meseci da ga obiđe. A ipak, Sunce je mala zvezda. Najveće poznate zvezde su hiljadu puta veće, s prečnicima reda veličine milijardu kilometara. Kad bi se našle u centru našeg solarnog sistema, takve zvezde bi progutale Jupiter. Čudovišta poput njih svoje živote okončavaju u katastrofalnom gravitacionom kolapsu.

Gravitacija je slaba, ali neumoljiva sila. Ona samo privlači, a u odsustvu bilo koje jače sile koja bi joj se suprotstavila, ona privlači bez ograničenja. Gravitacija pokušava da vas kroz pod dovuče u središte Zemlje, povlačeći pritom i tlo u istom smeru. Razlog zašto se sve ne uruši u središnju tačku jeste to što je materija kruta; sastavljena je od čestica koje se pokoravaju zakonima kvantne fizike i odbijaju se kada se previše približe jedna drugoj. Ali krutost materije je svojevrsna iluzija. Ne vidimo da je tlo ispod nas u suštini prazan prostor. Oblaci rasplesanih elektrona koji okružuju atomska jezgra drže atome na međusobnom rastojanju, a nas zavaraju pa mislimo da su čvrsti objekti gusto sažeti. Atomsko jezgro zapravo zauzima samo mali deo zapremine atoma, a tlo pod našim nogama je praznjikavo kao i para. Odbojne sile unutar materije su ipak veoma moćne. U stanju su da vas spreče da ne propadnete kroz pod, i da stabilizuju umiruće zvezde do dva puta masivnije od Sunca. Ali postoji granica, i nju „istražuju“ neutronske zvezde.

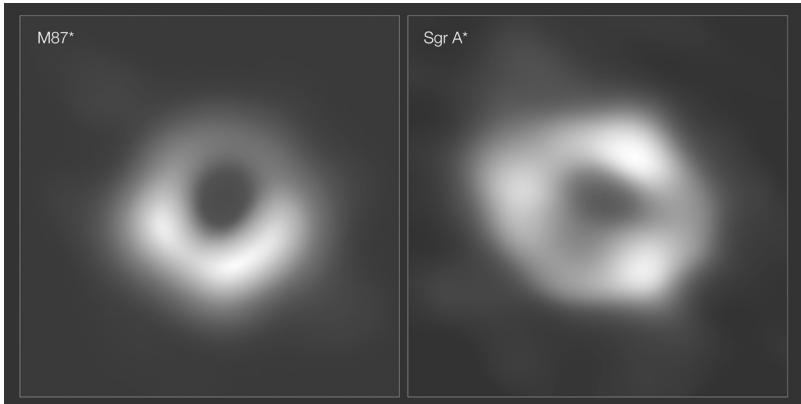
Tipična neutronska zvezda ima poluprečnik od samo nekoliko kilometara i masu oko 1,5 puta veću od mase Sunca. To je kao da se milion Zemalja sabije u oblast veličine grada. Neutronske zvezde imaju tendenciju da se vrlo brzo vrte, emitujući sjajne snopove radio-talasa koji obasjavaju kosmos poput svetionika. Takvu neutronsku zvezdu, poznatu kao pulsar, prvi su opazili Džoslin Bel Bernel i Entoni Hjuiš 1967. godine. Puls, koji prelazi preko Zemlje na svakih 1,3373 sekundi, tako je redovan da su ga Bernelova i Hjuiš prozvali *mali zeleni ljudi* (engl. *Little Green Men*). Najbrži pulsar do sada otkriven, poznat kao PSR J1748-2446ad, izvede 716 rotacija svake sekunde. Neutronske zvezde su nebeski objekti izuzetne energije. Dvadeset sedmog decembra 2004. godine, nalet energije pogodio je Zemlju, zaslepljujući satelite i šireći našu jonosferu. Energija je oslobođena usled preuređenja magnetnog polja oko neutronske zvezde zvane SGR 1806-20, koja se nalazi na drugoj strani galaksije, 50.000 svetlosnih

godina daleko od Zemlje. U petini sekunde ta zvezda je otpustila više energije nego što naše Sunce emituje za četvrt miliona godina.

Gravitaciono privlačenje na površini neutronske zvezde je 100 milijardi puta jače od Zemljinog. Sve što padne na površinu u trenu se spljošti i pretvori u nukleonsku supu. Ako biste pali na površinu neutronske zvezde, čestice koje su nekad bile deo vaših povećih atoma transformisale bi se u neutrone i sabile bi se jedna uz drugu tako čvrsto da bi se mrdale brzinom bliskom svetlosnoj u pokušaju da izbegnu jedna drugu. Ovo mrdanje može da održi neutronske zvezde koja ima oko dve solarne mase, ali ne više od toga. Preko ove granice, gravitacija pobeđuje. Ako bi se malo više mase izlilo na njenu površinu, zvezda veličine grada bi se urušila i formirala prostornovremensku singularnost. Žorž Lemetr, katolički sveštenik i jedan od osnivača moderne kosmologije, opisao je singularnost Velikog praska na početku našeg univerzuma kao dan bez juče. Singularnost koja nastaje iz gravitacionog kolapsa je trenutak bez sutra. Spolja ostaje tamni otisak onoga što je nekad sjalo: crna rupa.

Danas imamo konkretan opservacioni dokaz da naš kosmos naseljavaju crne rupe. Slika 1.1 dobijena je zahvaljujući programu saradnje na Teleskopu horizonta događaja, mreže radio-teleskopa smeštenih širom Amerike, Evrope, Pacifika, Grenlanda i Antarktika. Na levoj strani je prikazana središnja supermasivna crna rupa u galaksiji M87, udaljena 50 miliona svetlosnih godina od Zemlje. Kao što je to često slučaj u nauci, ova mutna slika dalekog objekta postaje sve čudasnija što više saznajete o onome u šta gledate.

Ova crna rupa ima masu 6,5 milijardi puta veću od Sunčeve i nalazi se u tamnoj centralnoj oblasti slike, poznatoj kao senka. Oblast je tamna zato što je gravitacija toliko jaka da svetlost ne može da umakne, a pošto ništa ne može da putuje brže od svetlosti, ništa ne može ni da pobegne. Unutar te senke nalazi se horizont događaja crne rupe M87, sfera prečnika 240 puta većeg



Slika 1.1. Levo: Supermasivna crna rupa u središtu galaksije M87. Desno: Strelac A\*, crna rupa u središtu naše galaksije. Obe su snimljene zahvaljujući programu saradnje na Teleskopu horizonta događaja. Videti na strani 1 umetka u boji.

od razdaljine između Zemlje i Sunca.\* Ona štiti spoljašnji kosmos od singularnosti. Svetao disk koji okružuje senku uglavnom čine svetlosni zraci što ih emituju gas i prašina koji u spirali putuju oko crne rupe i u nju, putanja uvrnutih i uobličjenih u karakterističan oblik krofne pod uticajem gravitacije rupe.

Desna slika predstavlja supermasivnu crnu rupu, Strelca A\*, u središtu naše galaksije. Sa masom od samo 4,31 miliona Sunčevih masa, minijatura je u poređenju s prethodno pomenutom. Svetleći disk bi se lako smestio u orbitu Merkura. Njeno postojanje je isprva posredno potvrđeno, posmatranjem orbita zvezda oko nje. Te zvezde su poznate kao S zvezde. Zvezda S2 kruži naročito blizu crne rupe, sa periodom od samo 16,0518 godina. Preciznost je važna, jer su detaljne opservacije orbite S2 upoređene

---

\* Ovo znači da je ona oko osam puta veća od Sunčevog sistema, ako je potonji omeđen putanjom najudaljenije planete, Neptuna. S druge strane, brojni „transneptunski“ objekti, komete i ledeni asteroidi imaju putanje koje odlaze na mnogo veću udaljenost – a da je to opet hiljadama puta manje od udaljenosti do Suncu najbliže zvezde, Proksime Kentauri. I najveće crne rupe su, dakle, veoma mali objekti u kosmičkom kontekstu. (*Prim. red.*)

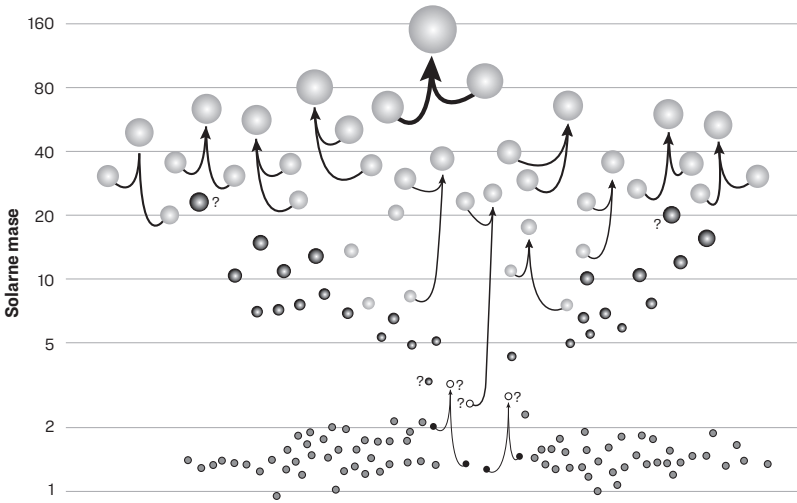
sa predviđanjima opšte teorije relativnosti i korišćene za zaključak o prisustvu crne rupe mnogo pre nego što je fotografisana. Za S2 je zapaženo da se najviše približila Strelcu A\* 2018. godine, kada je prošla na samo 120 astronomske jedinice od horizonta događaja.\* U trenutku kad je bila najbliže, njena brzina je iznosila tri procenta brzine svetlosti. Za ova izuzetno precizna posmatranja izvođena tokom mnogo godina Rajnhard Gencel i Andrea Gez dobili su Nobelovu nagradu 2020. godine. Zahvaljujući tim posmatranjima dokazano je da, kako je naveo komitet za dodelu Nobelove nagrade, postoji „supermasivni kompaktni objekat u središtu naše galaksije“. Nagradu su podelili sa ser Rodžerom Penrouzom, koji je matematički pokazao da „opšta teorija relativnosti neizbežno predviđa formiranje crnih rupa“.

Takođe smo opazili brojne manje crne rupe zvezdanih masa tako što smo detektovali mreškanje u prostoru i vremenu izazvano njihovim međusobnim sudarima. Septembra 2015. godine, detektor gravitacionih talasa LIGO† registrovao je mreškanja u prostorvremenu izazvana sudarom dve crne rupe do kog je došlo 1,3 milijarde svetlosnih godina daleko od Zemlje. Crne rupe su bile 29 i 36 puta masivnije od Sunca, a sudarile su se i spojile za manje od dve desetine sekunde. Tokom sudara, vrhunac izlazne snage za pedeset puta je premašio snagu svih zvezda u opazivom kosmosu. Kada su gravitacioni talasi stigli do nas nakon više od milijardu godina, promenili su raspon četiri kilometra dugih laserskih ruku LIGO detektora za hiljaditi deo prečnika protona, u gotovo trenutnom drhtaju, baš kao što je predviđala opšta teorija relativnosti. LIGO i njegov sestrinski detektor Virgo od tada su detektovali mnoštvo međusobnih spajanja crnih rupa. Nobelova nagrada za fiziku za 2017. godinu dodeljena je Rajneru Vajsu, Beriju Barišu i Kipu Tornu kao predvodnicima u osmišljavanju i

---

\* Astronomska jedinica je (približno) jednaka udaljenosti Zemlje od Sunca.

† LIGO je engleski akronim za Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory – laserska interferometarska opservatorija gravitacionih talasa. (*Prim. prev.*)



Slika 1.2. Poznate crne rupe zvezdanih masa i neutronske zvezde – one s najmanjim masama su na dnu. Najmanji krugovi su neutronske zvezde, a strelice ukazuju na opažene sudare i spajanja parova crnih rupa ili neutronske zvezde. Brojevi sleva su solarne mase (masa Sunca = 1 solarna masa).

izradi projekta LIGO i upravljanja njime. „Zvezdano groblje“ zvezdanih crnih rupa i neutronske zvezde, onako kako nam je poznato u trenutku pisanja ovih redova, prikazano je na slici 1.2.

Ove opservacije, nastale pomoću različitih teleskopa i tehnika, zajedno dokazuju bez ikakve opravdane sumnje da neutronske zvezde i crne rupe postoje. Naučna fantastika postaje nauka kada se u eksperimentalnim opservacijama potvrde teorije. Dok nas naše teorijsko putovanje vodi sve čudnijim stazama na sve zamršeniji intelektualni teren, moramo stalno da podsećamo sebe da su te apsurdne stvari – stvarne. One su deo prirodnog sveta, i zato bi trebalo da pokušamo da ih razumemo pomoću poznatih prirodnih zakona. Ako ne uspemo, imamo priliku da otkrijemo nove prirodne zakone, a upravo se to desilo, i premašilo najluđe snove ranih pionira.

## Pokušaji da se izbegne apsurdno

Ideja o crnim rupama potekla je 1783. godine od engleskog rektora i naučnika Džona Mičela i, nezavisno od njega, od francuskog matematičara Pjer-Simona Laplasa 1798. Mičel i Laplas su smatrali kako je moguće da postoje objekti koji imaju tako snažno gravitaciono privlačenje da su u stanju da zarobe svetlost, baš kao što Zemljina gravitacija usporava i povlači natrag loptu bačenu uvis.

Objekat bačen uvis s površine Zemlje mora imati brzinu veću od 11 kilometara u sekundi da bi pobegao u duboki svemir. To je poznato kao druga kosmička brzina (brzina napuštanja Zemlje). Gravitaciono privlačenje na površini Sunca je mnogo jače, te je brzina napuštanja Sunčevog sistema (treća kosmička brzina) shodno tome veća, i iznosi 620 kilometara u sekundi. Na površini neutronske zvezde, brzina napuštanja može biti približna značajnom delu brzine svetlosti.\* Laplas je izračunao da bi gravitaciono privlačenje tela gustine približne gustini Zemlje, ali prečnika 250 puta većeg od Sunčevog, bilo tako veliko da bi brzina napuštanja premašila brzinu svetlosti; zato „najveća tela u kosmosu mogu biti nevidljiva zbog svoje veličine“.<sup>3</sup> To je bila fascinantna ideja ispred svog vremena. Zamislite sfernu ljusku u svemiru koja se poklapa s površinom jedne od Laplasovih džinovskih tamnih zvezda. Brzina napuštanja ljuske bila bi jednaka brzini svetlosti. Zamislite sada da je zvezda malo gušća. Površina zvezde bi se smanjila, ali zamišljena ljuska bi ostala kakva jeste, predstavljajući granicu u prostoru. Ako biste se zadržali na ljusci, sada iznad površine zvezde, i uperili baterijsku lampu ka spolja, svetlost ne bi nigde otišla. Ostala bi zamrznuta zauvek, i ne bi bila u stanju da pobegne. Ta granica je horizont događaja. Unutar ljuske, svetlost baterijske lampe bi se okrenula i bila bi povučena ka zvezdi. Svetlost bi mogla da umakne samo ako je izvan ljuske.

---

\* Brzina svetlosti iznosi 299.792.458 metara u sekundi.

Mičel i Laplas su zamislili ove tamne zvezde kao ogromne objekte, možda zato što im je alternativa bila nezamisliva. Ali objekat ne mora biti veliki da bi gravitaciono privlačenje na njegovoj površini bilo snažno. Može biti veoma mali i veoma gust; takva je, na primer, neutronska zvezda. Za objekat proizvoljne mase moguće je pomoću Njutnovih zakona izračunati poluprečnik oblasti iz koje je nemoguće umaći, a koja bi se formirala oko njega ako bi bio dovoljno sabijen:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

gde je  $G$  Njutnova gravitaciona konstanta, koja predstavlja jačinu gravitacije, a  $c$  je brzina svetlosti. Ako bilo šta mase  $M$  sabijemo u loptu manju od ovog poluprečnika, dobili bismo tamnu zvezdu. Kada ubacimo masu Sunca u ovu jednačinu, dobijamo poluprečnik od približno tri kilometra. Za Zemlju, ta vrednost je nešto manja od 1 centimetra. Teško je zamisliti Zemlju sabijenu do veličine oblutka, što je verovatno razlog zašto Mičel i Laplas nisu razmatrali tu mogućnost. Koliko god nam tamne zvezde izgledale nestvarno, ipak se čini da nema ničeg posebno problematičnog ili apsurdnog u vezi s njima, ukoliko postoje. One bi zarobljavale svetlost, ali, kako je Laplas ukazao, to bi samo značilo da ne bismo mogli da ih vidimo.

Ovaj jednostavan njutnovski argument nam osvetljava prirodu crne rupe – gravitacija može postati toliko jaka da svetlost ne može da umakne – ali Njutnov zakon gravitacije nije primenljiv kad je gravitacija jaka, te se mora koristiti Ajnštajnova teorija. Prema opštoj teoriji relativnosti takođe je moguće da postoje objekti čija je gravitacija tako jaka da svetlost ne može da pobjegne, ali su posledice potpuno drugačije i nesumnjivo problematične i apsurdne. Kao u njutnovskom slučaju, ako se bilo koji objekat sabije ispod određenog kritičnog poluprečnika, zarobiće svetlost. U opštoj teoriji relativnosti ovaj poluprečnik poznat je



kao Švarcšildov poluprečnik, jer ga je prvi izračunao nemački fizičar Karl Švarcšild 1915. godine, vrlo brzo nakon što je objavljena opšta teorija relativnosti. Ispostavlja se da je izraz za Švarcšildov poluprečnik u opštoj teoriji relativnosti isti kao pomenuti Njutnov rezultat. Švarcšildov poluprečnik je poluprečnik horizonta događaja crne rupe.

O Švarcšildovom poluprečniku više ćemo govoriti u poglavlju 4, kad nam raspolaganju bude bila aparatura opšte teorije relativnosti, ali sada možemo pomenuti neke od apsurdnosti koje nas očekuju. Naučićemo da crne rupe utiču na tok vremena u svojoj blizini. Dok astronaut pada prema crnoj rupi, njegovo vreme teče sporije mereno satovima daleko u svemiru. To je zanimljivo, ali nije apsurdno. A posledica koja zvuči apsurdno je sledeća: prema tim dalekim satovima, vreme staje na horizontu događaja. Gledano spolja, nikad se ne vidi da išta pada u crnu rupu, što znači da će astronaut koji pada ka crnoj rupi ostati večno zamrznut na horizontu. To se odnosi i na površinu zvezde koja se urušava u sebe do poluprečnika s one strane horizonta događaja tako da formira crnu rupu. Na prvi pogled, čini se da teorija opšte relativnosti predviđa besmislicu. Kako zvezda može da se uruši iza horizonta događaja da bi formirala crnu rupu ako se nikad ne vidi da njena površina prelazi horizont? Ovakva zapažanja su mučila Ajnštajna i druge pionire, a to je samo jedan u lavini očiglednih paradoksa.

Ajnštajna, i većinu fizičara do šezdesetih godina prošlog veka, takve brige su navodile na zaključak da priroda nađe izlaz, a istraživanja crnih rupa su bila uglavnom usmerena na dokazivanje da one ne mogu da postoje. Možda nije moguće sabiti zvezdu bez ograničenja i stvoriti horizont događaja. To ne deluje nerazumno, s obzirom na to da bi grumen neutronske zvezde veličine kocke šećera težio najmanje 100 miliona tona. Možda ne razumemo u potpunosti kako se materija ponaša pri takvim ekstremnim gustinama i pritiscima.

Zvezde su velike grudve materije koje se bore protiv gravitacionog urušavanja, a kada potroše nuklearno gorivo sudbina im

zavisi od njihove mase. Godine 1926. Edingtonov kolega sa Kembriđža, R. H. Fauler, objavio je članak „O gustoj materiji“ u kojem je pokazao da nedavno formulisana kvantna teorija otkriva način da stara zvezda koja se urušava izbegne formiranje horizonta događaja zahvaljujući efektu poznatom kao *pritisak degeneracije elektrona*.<sup>4</sup> To je bio prvi uvid u „kvantno mrđanje“, na koje smo se osvrnuli ranije u kontekstu neutronske zvezde. Njegov zaključak se činio kao neizbežna posledica dva kamena temeljca kvantne teorije: principa isključenja Volfganga Paulija i principa neodređenosti Vernerera Hajzenberga.

Prema principu isključenja čestice poput elektrona ne mogu zauzimati isti deo prostora. Ako se usled gravitacionog urušavanja sabije veliki broj elektrona, svaki od njih će se naći u zasebnoj maloj zapremini kako bi se držali dalje jedni od drugih. Sada na scenu stupa Hajzenbergov princip neodređenosti. Prema tom principu, što je manji prostor na koji je čestica ograničena njen impuls je veći. Drugim rečima, ako ograničite elektron, on će se mrđati, i što ga više ograničavate, mrđanje će biti veće. To stvara pritisak slično kao što toplota od reakcija nuklearnih fuzija u ranim fazama života zvezde dovodi do mrđanja njenih atoma, čime se sprečava urušavanje. Međutim, za razliku od pritiska nastalog usled reakcija fuzije, za pritisak degeneracije elektrona nije potrebno oslobađanje energije da bi se održavao. Činilo se da zvezda može beskonačno dugo odolevati unutrašnjem privlačenju gravitacije.

Astronomi su znali za takvu zvezdu, poznatu kao beli patuljak. Sirijus B je bleđi pratilac Sirijusa, najsjajnije zvezde na nebu. Poznato je da je masa Sirijus B približna masi našeg Sunca, ali poluprečnik je uporediv sa Zemljinim. Njegova gustina, prema merenjima iz tog vremena, procenjena je na oko  $100 \text{ kg/cm}^3$ , što je, kako Fauler napominje, „već dovelo do najinteresantnijih teorijskih razmatranja“. U svojoj knjizi *Unutrašnja konstitucija zvezda (The Internal Constitution of Stars)*, Edington je napisao: „Mislim da se načelno smatra prikladnim dodati zaključak, što je

apsurdno'.“ Prema modernim merenjima, gustina je više nego deset puta veća. Međutim, koliko god apsurdnom se činila ova egzotična zvezda veličine planete, Fauler je otkrio mehanizam koji objašnjava kako se može odupreti gravitaciji. To je, reklo bi se, pružilo veliko olakšanje onovremenim fizičarima jer je sprečilo da se desi nezamislivo. Zahvaljujući Fauleru, činilo se da zvezde okončavaju svoje živote kao beli patuljci. S podrškom kvantnog mrđanja elektrona, one se neće urušiti unutar Švarcšildovog poluprečnika i horizont događaja se neće formirati.

Olakšanje je bilo kratkog veka. Godine 1930, tokom osamnaestodnevno putovanja iz Madrasa za Kembridž, gde je trebalo da radi sa Edingtonom i Faulerom, devetnaestogodišnji fizičar Subramanijan Čandrasedkar rešio je da izračuna koliko moćan može biti pritisak degeneracije elektrona. Fauler nije postavio gornju granicu za masu zvezde koja se održava na ovaj način, i čini se da je većina fizičara pretpostavljala da je ne bi ni trebalo biti. Ali Čandrasedkar je uvideo da pritisak degeneracije elektrona ima svoje granice. Iz Ajnštajnovе teorije relativnosti sledi da brzina mrđanja elektrona ne može premašiti brzinu svetlosti koliko god on bio ograničen. Čandrasedkar je izračunao da će se ograničenje brzine dostići u slučaju belog patuljka mase oko 90 posto mase Sunca.<sup>5</sup> Precizniji proračun otkriva da Čandrasedkarova granica, kako je sada zovemo, iznosi 1,4 mase Sunca. Ako zvezda koja se urušava premaši ovu masu, elektroni više neće pružati dovoljan pritisak da zvezda odoli unutrašnjem privlačenju gravitacije, pošto se kreću najbrže što mogu, tako da gravitacioni kolaps mora da se nastavi. Edington nije bio impresioniran. Smatrao je da je Čandrasedkar pogrešno spojio relativnost sa tada novom oblašću kvantne mehanike te da bi proračun, ako bi se izveo ispravno, pokazao da beli patuljci mogu imati proizvoljno velike mase. Rasprava između mladog Čandrasedkara i uglednog Edingtona koja je usledila duboko je uticala na Čandrasedkara. Decenijama nakon Edingtonove smrti 1944. godine, Čandrasedkar je i dalje opisivao taj period kao „veoma obeshrabrujuće iskustvo... jer je

astronomska zajednica potpuno diskreditovala moj rad“. Čandrasekar je na kraju dokazao da je bio u pravu, a za svoj rad na strukturi zvezda dobio je Nobelovu nagradu 1983. godine.

Čandrasekarov rezultat, objavljen 1931. godine, nije smatran konačnim dokazom da je formiranje crnih rupe neizbežno. Ajnštajna je 1939. godine i dalje brinulo zamrzavanje vremena na horizontu događaja. Možda postoji neki drugi proces koji može održavati urušavajućeg belog patuljka kada pritisak degeneracije elektrona zakaže? Krajem tridesetih godina, američki fizičar Fric Cviki i ruski fizičar Lav Landau ispravno su sugerisali da možda postoje zvezde još gušće od belih patuljaka koje ne održava pritisak degeneracije elektrona, već pritisak degeneracije neutrona. U ekstremnim uslovima gravitacionog urušavanja, elektroni mogu prinudno da se spoje s protonima formirajući neutrone i lake čestice poznate kao neutriini, koji napuštaju zvezdu. Neutroni, baš kao i elektroni, mrđaju dok su sabijeni jedni uz druge, ali pošto su masivniji od elektrona, mogu pružiti više podrške. Ti objekti su neutronske zvezde.

Ima smisla zapitati se da li sve supermasivne zvezde čeka ovakva sudbina, premda iskustvo koje imamo s belim patuljcima upućuje na to da bi i pritisak degeneracije neutrona trebalo da ima granice. Možda najmasivnije zvezde izbacuju materijal u svemir dok se urušavaju, ili eksplodiraju kada dosegnu gustine neutronske zvezde. Te mogućnosti nisu se mogle tako lako odbaciti u ono vreme – nuklearna fizika je bila nova oblast, a neutron je otkriven tek 1932. godine.

Već 1939. godine, Dž. Robert Openhajmer i njegov student Džordž Volkov, nadovezujući se na rad Ričarda Tolmana, definisali su ono što se sada naziva Tolman–Openhajmer–Volkovljeva granica, gornje ograničenje za masu neutronske zvezde koje iznosi nešto manje od trostruke mase Sunca. Kasnije su Openhajmer i njegov student Hartland Snajder, pokazali da pod određenim pretpostavkama, najteže zvezde *moraju* da se uruše iza horizonta događaja da bi formirale crnu rupu.<sup>6</sup> Njihov prelomni rad počinje

rečima: „Kada se iscrpe svi termonuklearni izvori energije, dovoljno teška zvezda će se urušiti. Osim ako rotaciona fisija, zračenje mase ili odbacivanje mase zračenjem ne svedu masu zvezde na vrednost blisku Sunčevoj masi, ovo sažimanje će se beskonačno nastavljati.“ Završni redovi uvoda detaljno opisuju posledice po tok vremena na horizontu koje su zabrinjavale Ajnštajna: „Ukupno vreme urušavanja za posmatrača koji se kreće zajedno sa zvezdanom materijom je konačno, i u ovom idealnom slučaju i s tipičnim masama zvezda, reda je veličine jednog dana; spoljni posmatrač vidi zvezdu kako se asimptotski smanjuje do svog gravitacionog poluprečnika.“\* Drugim rečima, za nekoga ko se kreće ka unutra po površini zvezde koja se urušava, zvezda ne mnogo veća od Sunca nestane kroz urušavanje za otprilike jedan dan, ali za svakoga ko to posmatra spolja, urušavanje traje večno. To je ono zbunjujuće ponašanje vremena koje smo prethodno pomenuli. Openhajmer i Snajder su prihvatili ovaj osnovni rezultat opšte teorije relativnosti i pokazali da ne dovodi do kontradikcija. Ove intrigantne rezultate istražićemo detaljnije u narednim poglavljima.

Te godine počinje Drugi svetski rat i fizičari širom sveta se fokusiraju na podršku ratnim naporima. U Sjedinjenim Američkim Državama, stručnost iz oblasti nuklearne fizike izoštrena proučavanjem zvezda bila je posebno značajna za razvoj atomske bombe, i Openhajmer je postao poznat kao naučni vođa Projekta Menhetn. Po završetku rata, nova generacija fizičara bila je spremna da preuzme vodeću ulogu. U Sjedinjenim Američkim Državama, tu generaciju predvodio je Džon Arčibald Viler. Viler je prvi upotrebio termin crna rupa na predavanju u Zapadnoj dvorani Njujorškog hotela Hilton 29. decembra 1967. U autobiografiji, Viler opisuje svoje intelektualne borbe sa crnim rupama tokom pedesetih godina prošlog veka.<sup>7</sup> „Nekoliko godina, ideja o urušavanju u ono što sada nazivamo crnom rupom nije mi bila

---

\* Pod „gravitacionim poluprečnikom“ misli se na Švarcsildov poluprečnik.

prihvatljiva. Naprosto, nije mi se dopadala. Učinio sam sve što sam mogao da pronađem izlaz, da izbegnem neizbežnu imploziju velikih masa.“ Opisuje kako se na kraju uverio da „ništa ne može sprečiti dovoljno veliki komad hladne materije da se uruši do dimenzija manjih od Švarcšildovog poluprečnika“. Vilerovo intelektualno preobraćenje kulminiralo je u radu iz 1962. godine koji je napisao sa svojim studentom Robertom Fulerom; u njemu zaključuju kako „postoje tačke u prostorvremenu iz kojih se svetlosni signali nikada ne mogu primiti, koliko god dugo čekali na njih“.<sup>8</sup> To su tačke unutar horizonta događaja, oblasti zauvek izolovane od kosmosa. Čini se da su crne rupe neizbežne. Sve preostale teorijske nejasnoće otklonjene su 1965. godine zahvaljujući radu Rodžera Penrouza „Gravitaciono urušavanje i singularnosti prostorvremena“ (Gravitational Collapse and Space-Time Singularities), za koje je ovenčan Nobelovom nagradom. U tom remek-delu na tri strane Penrouz dokazuje da, kako je rekao Viler, „za skoro svaki opis materije ikada zamišljen, u centru crne rupe mora postojati singularnost.“<sup>9</sup>

## Duboki sjaj

Naša kratka istorija crnih rupa vodi nas u 1974. godinu, do rada Stivena Hokinga i naizgled jednostavnog pitanja koje je bilo glavni pokretač istraživanja crnih rupa narednih pola veka.\*

Sedamdesetih godina prošlog veka, teoretičari su većinom prihvatili da crne rupe postoje, premda ih astronomi još uvek nisu vizuelno detektovali, a mala grupa fizičara i dalje zainteresovana za njih preusmerila je pažnju ka konceptualnim izazovima koji proizlaze iz njihovog postojanja. Hokingov rad, objavljen u časopisu *Nature*, živopisno je naslovljen „Eksplozije crnih rupa?“ (Black hole

---

\* Hoking je takođe dao ogroman doprinos razvoju goreopisanih Penrouzovih rezultata o neminovnosti pojave singularnosti, tako da se oni često zajedničkim imenom nazivaju Penrouz–Hokingove teoreme o singularnostima. (*Prim. red.*)

explosions?)<sup>10</sup> Hoking je pokazao da prisustvo horizonta događaja ima dramatičan efekat na prostorni vakuum u njegovoj blizini. U kvantnoj teoriji prazan prostor nije prazan. Ispunjen je poljima u neprestanoj fluktuaciji, a te fluktuacije se ispoljavaju kao potencijal za stvaranje čestica: fotona, elektrona, kvarkova, zapravo, bilo kojih čestica. Vakuum ima strukturu. U običnom praznom prostoru, ove fluktuacije dolaze i prolaze; moglo bi se zamisliti kako se te takozvane virtuelne čestice neprestano pojavljuju i nestaju, ali, kad se podvuče crta, nikakve stvarne čestice ne nastaju nekim čudom ni iz čega. Postojanje horizonta narušava ovu ravnotežu, i to tako da te prolazne virtuelne čestice mogu postati stvarne. Te čestice, poznate kao Hokingovo zračenje, odlaze u kosmos odnoseći delić energije crne rupe. Tokom nezamislivo dugih vremenskih perioda, znatno dužih od trenutne starosti univerzuma, tipična crna rupa će isparavati i, naposljetku, eksplodirati. Da pomenemo čuvenu Hokingovu frazu – crne rupe nisu tako crne. One sijaju blago poput bledog ugljena na hladnom nebu. Vrlo bledog ugljena. Temperatura crne rupe mase Sunca je 0,00000006 stepeni Celzijusa iznad apsolutne nule, što je daleko hladnije od današnjeg univerzuma.\* Strelac A\* je još hladniji: tačno 4,31 milion puta hladniji. Ali temperatura crne rupe nije nula, i to je izuzetno važno. To znači, kako ćemo otkriti, da se crne rupe povinuju zakonima termodinamike – istim zakonima koji upravljaju svetlucavim ugljenom, parnim mašinama i zvezdama – i da nisu besmrtni. Jednog dana u dalekoj, dalekoj budućnosti, sve one će nestati.

Ovaj bleđi sjaj navodi na jedno duboko pitanje. Kada crna rupa nestane, šta se događa sa svim onim što je upalo u nju? Zbog jedinstvenog mehanizma generisanja Hokingovog zračenja, koje je praktično izvučeno iz vakuuma u blizini horizonta događaja, čini se da zračenje nema nikakve veze sa ičim što je upalo u crnu rupu za njenog života. Zato je veoma teško videti kako bi bilo koja

---

\* Temperatura kosmičkog mikrotalasnog pozadinskog zračenja danas je 2,725 stepeni Celzijusa iznad apsolutne nule.

informacija o nečem što je tu upalo, ili zvezda koja se urušila formirajući crnu rupu, mogla da se sačuva, nekako utisnuta u zračenje. Hokingov izvorni proračun bio je, zapravo, veoma jasan u vezi s tim. Zračenje, ostaci crne rupe, ne sadrži nikakve informacije.

Jedan od pionira modernog istraživanja crnih rupa, Leonard Saskind, ispričao je o sastanku koji se desio u malom potkrovlju u San Francisku 1983. godine, na kom je Hoking prvi put postavio ovo pitanje i, kako se ispostavilo, dao netačan odgovor. Saskindov osvrt iz prve ruke na titansku intelektualnu borbu koju je Hokingovo pitanje pokrenulo zove se *Rat zbog crnih rupa: moja borba sa Stivenom Hokingom da učinim svet bezbednim za kvantnu mehaniku* (The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics). Saskind je nadaren za naslove. Bio je koautor rada pod nazivom „In vazija džinovskih gravitona iz anti-de Sitterovog prostora“ (Invasion of the Giant Gravitons from Anti-de Sitter Space). On piše da je „Stiven tvrdio kako informacije nestaju prilikom isparavanja crne rupe i, još gore, činilo se da je to i dokazao. Ako bi to bilo tačno... temelji naše oblasti proučavanja bili bi uništeni.“

Saskind je mislio na jedan od stubova moderne fizike: determinizam. Ako znamo sve o sistemu, bilo da je to jednostavna kutija gasa ili kosmos, možemo predvideti kako će se menjati u budućnosti i kako je izgledao u prošlosti. Naravno, ovo je izjava koja važi „u načelu“. U praksi nije moguće znati sve o prošlosti i budućnosti, jer o nekom stvarnom fizičkom sistemu nikada nemamo potpune informacije. Ali za razliku od politike modernog doba, principi su važni u nauci. Ako je Hoking bio u pravu, kosmos bi s takvim crnim rupama bio fundamentalno nepredvidiv i temelji fizike bi se urušili.

Sad znamo da Stiven Hoking nije bio u pravu – informacije se ne uništavaju i fizika je bezbedna – što je sam Hoking na kraju prihvatio sa zadovoljstvom, a ne sa žaljenjem, najviše zato što aktuelni program istraživanja podstaknut njegovom prvobitnom tvrdnjom nastavlja da nas usmerava ka novom razumevanju prostora i vremena i prirode fizičke stvarnosti.



U posljednjem izdanju *Kratke povesti vremena* (*Brief History of Time*), Hoking piše da je na kraju promenio mišljenje 2004. godine i priznao da je izgubio opkladu sa Džonom Preskilom (sa čijim radom ćemo se upoznati kasnije). Nakon dalje rasprave o tome šta je zanimljivije, kriket ili bejzbol, iz koje je takođe izašao kao gubitnik, Hoking je Preskilu poklonio enciklopediju bejzbola. U vreme kad je pisao knjigu, Hoking primećuje, niko nije znao kako informacija izlazi iz crne rupe – samo da izlazi. Međutim, jasno je bilo da bi bilo vrlo teško dekodirati informacije. „To je kao spaljivanje knjige“, piše on. „Informacija tehnički nije izgubljena, ako sačuvamo pepeo i dim – što me ponovo navodi da razmišljam o enciklopediji bejzbola koju sam poklonio Džonu Preskilu. Možda je umesto toga trebalo da mu poklonim njene spaljene ostatke.“

## Iza horizonta

Zamislite da nađete sat na zemlji. Kada ga pažljivo pregledate, naprosto morate da se divite njegovoj delikatnoj složenosti i izuzetnoj preciznosti. Mehanizam je zasigurno dizajniran; mora biti da postoji tvorac. Zamenite reč „sat“ rečju „priroda“ i dobićete argument u prilog postojanju Boga koji je izneo sveštenik Vilijam Pejli 1802. godine. Sada znamo da je taj argument ozbiljno potkopan obiljem dokaza u prilog Darwinovoj teoriji evolucije prirodnom selekcijom. Časovničar je priroda, i ona je slepa. „Ima veličanstvenosti u ovome pogledu na život“, napisao je Darwin, „sa njegovim različitim moćima koje su prvobitno udah-nute u nekoliko oblika ili samo u jedan; i u tome što se, dok se naša planeta, pokoravajući se utvrđenom zakonu gravitacije kreće po svojoj kružnoj putanji, od jednog tako prostoga početka stvorio beskonačan broj najlepših i najdivnijih oblika, i još se evolucijom stvaraju.“\*

---

\* Ovo je, inače, *poslednji* (i najcitiraniji!) pasus Darwinove epochalne knjige *Postanak vrsta* iz 1859. godine. (*Prim. red.*)

Ali šta je sa nepromenljivim zakonom gravitacije, preduslovom za postojanje planeta na kojima su evoluirali beskrajni oblici? Ili sa zakonima elektriciteta i magnetizma, koji održavaju životinje celim? Ili sa menažerijom subatomske čestice od kojih smo sačinjeni? Ko ili šta je uspostavio zakone; okvir unutar kog sve nastavlja da se kreće?

Priča o modernoj fizici bila je priča o redukcionizmu. Ne treba nam obimna enciklopedija da bismo razumeli unutrašnje funkcionisanje Prirode. Umesto toga, možemo opisati gotovo beskonačan opseg prirodnih pojava, od unutrašnjosti protona do stvaranja galaksija, sa, reklo bi se, nepojmljivom efikasnošću izražavajući se na jeziku matematike. Teorijski fizičar Jene (Judžin) Vigner je rekao: „Čudo prikladnosti jezika matematike za formulisanje zakona fizike jeste divan dar koji niti razumemo niti ga zaslužujemo. Treba da smo zahvalni na njemu.“<sup>11</sup> Matematika 20. veka opisala je univerzum naseljen ograničenim brojem različitih tipova fundamentalnih čestica koje stupaju u međusobne reakcije na pozornici poznatoj kao prostorvreme prema skupu pravila koja se mogu ispisati na poledini koverta. Ako je univerzum bio dizajniran, izgleda da je njegov tvorac bio matematičar.

Danas se čini da se proučavanje crnih rupa odvija u novom smeru, ka jeziku koji češće koriste naučnici iz oblasti kvantnog računarstva – jeziku informacija. Prostor i vreme mogu biti pojavni entiteti koji ne postoje u najdubljem opisu Prirode. Umesto toga, sintetizovani su iz prepletenih kvantnih informacija na način koji podseća na vešto konstruisan računarski kôd. Ako je univerzum dizajniran, izgleda da je njegov tvorac programer.

Ali moramo biti oprezni. Kao Pejli pre nas, u opasnosti smo da preteramo u zaključivanju. Uloga informatike u opisivanju crnih rupa može nas upućivati ka novom opisu Prirode, ali to ne sugeriraju da smo programirani. Umesto toga, mogli bismo zaključiti da je jezik računarstva veoma prikladan za opisivanje algoritamskog razvoja kosmosa. Ako stvari tako postavimo, nema tu ni veće ni manje misterije nego što je Vignerovo čudo prigodnosti jezika

matematike za formulisanje zakona fizike. Obrada informacija – transformacija ulaznih bitova u izlazne – nije konstrukcija računarske nauke, već karakteristika našeg kosmosa. Umesto da koncept prostorvremena posmatramo kao kôd kvantnog računara koji upućuje na programera, možemo reći da su zemaljski računarski naučnici otkrili trikove koje je Priroda dosad koristila. Iz te perspektive, crne rupe su kosmičke kamene ploče iz Rozete, što nam omogućavaju da prevedemo svoja opažanja u novi jezik, onaj koji nam pruža uvid u najdublji racio i najsajjniju lepotu.

## 2

# OBJEDINJAVANJE PROSTORA I VREMENA

*„Reči ‘udaljenost’, samoj po sebi, nije mesto u knjizi o opštoj relativnosti. Reči ‘vreme’, samoj po sebi, nije mesto u knjizi o opštoj relativnosti.“*

Edvin F. Tejlor, Džon Arčibald Viler  
i Edmond Bertšinger<sup>12</sup>

Crne rupe su savršen predmet proučavanja kad se uči fizika – da biste ih razumeli, morate koristiti praktično sve oblasti ove nauke. Don Pejdž započinje svoj iscrpan „neiscrpan prikaz Hokingovog zračenja“ rečenicom: „Crne rupe su možda najsavršeniji termalni objekti u kosmosu, pa ipak njihova termalna svojstva nisu nam savim jasna.“<sup>13</sup> Termodinamika je jedan od stubova fizike, oblast koja obuhvata poznate koncepte poput temperature i energije, i jedan možda manje poznat koncept, entropiju. Zato ćemo morati da naučimo nešto o termodinamici. Uticajni rad Stivena Hokinga „Stvaranje čestica u crnim rupama“ (Particle Creation by Black Holes) počinje ovako: „Prema klasičnoj teoriji, crne rupe mogu samo da apsorbuju čestice, ne i da ih emituju. Međutim, pokazano je da kvantno-mehanički efekti dovode do toga da crne rupe stvaraju i emituju čestice kao da su topla tela...“<sup>14</sup> Zato ćemo morati da naučimo nešto o kvantnoj mehanici. I, naravno, tu je Ajnštajnova opšta teorija relativnosti, u kojoj, kako Misner, Torn i Viler pišu u svom zavidnom (po kvalitetu i obimu) udžbeniku *Gravitacija*, „čita-

lac odlazi u zemlju crnih rupa, i nailazi na kolonije statičkih granica, ergosfera i horizonata – iza čijih zastora se kriju zjapeće, žestoke singularnosti“.<sup>15</sup> To je zemlja koju ćemo prvo istražiti.

U školi učimo da je gravitacija prilično obična stvar – sila koja deluje između svakodnevnih predmeta; ne možeš skočiti previsoko s površine Zemlje jer postoji sila koja te vuče nazad na tlo. Godine 1687. Isak Njutn je formalizovao ovu ideju i objavio je u *Matematičkim principima*. Njutnova teorija dobro funkcioniše u većini situacija, omogućava nam da izračunamo putanje svemirskih letelica do Meseca i dalje, i na prvi pogled nema šta da kaže o prostoru i vremenu. Međutim, Njutn je pri formulisanju teorije usvojio dve pretpostavke o osobinama prostora i vremena. Pretpostavio je da je vreme univerzalno: ako svi u kosmosu nose savršen sat i ako su svi satovi sinhronizovani u nekom trenutku u prošlosti, svi će pokazivati isto vreme u budućnosti. Njutn je to rekao malo poetičnije: „Apsolutno, istinito i matematičko vreme, po sebi i po svojoj sopstvenoj prirodi, teče ujednačeno bez obzira na bilo šta spoljašnje ...“ Takođe je pretpostavio da je prostor apsolutan: velika arena u kojoj živimo svoje živote. „Apsolutni prostor, po svojoj sopstvenoj prirodi, bez obzira na bilo šta spoljašnje, uvek ostaje istovetan i nepokretan ... Apsolutno kretanje je pomeranje tela iz jednog apsolutnog mesta u drugo.“ Ove pretpostavke zvuče zdravorazumski – toliko da činjenica da se ipak osvrnuo na njih svedoči o njegovoj genijalnosti. Njutnova genijalnost postaje jasna kad otkrijemo da je njegov oprez bio proročki, jer obe pretpostavke su pogrešne. Kosmos nije sazdan na ovaj način, i pošto temelji teorije propadaju, to se mora desiti i sa samom teorijom. Zamenjena je Ajnštajnovom opštom teorijom relativnosti, a ona opisuje kosmos u kome razdaljine u prostoru i brzina otkucavanja vremena zavise od toga koliko je posmatrač blizu zvezdama i planetama i crnim rupama, ili čak od svoje putanje do prodavnice i natrag.

Eksperimentalno je potvrđeno da protok vremena varira od mesta do mesta i zavisi od toga koliko brzo se kreće jedan objekat u odnosu na drugi. U čudesno jednostavnom eksperimentu, izvedenom 1971.

godine, Džozef K. Hafeli i Ričard E. Kiting kupili su avionske karte za put oko sveta: za sebe i četiri veoma precizna atomska sata. Kako su rekli, pažljivo birajući reči: „U nauci, relevantne eksperimentalne činjenice nadmašuju teorijske argumente. U pokušaju da se baci neko empirijsko svetlo na pitanje beleže li makroskopski satovi vreme u skladu s konvencionalnim tumačenjem Ajnštajnovе teorije relativnosti, leteli smo oko sveta komercijalnim letovima sa četiri cezijumska sata, prvo prema istoku, zatim prema zapadu. Potom smo uporedili vreme koje su oni zabeležili tokom svakog putovanja sa odgovarajućim vremenom zabeleženim pomoću referentne atomske vremenske skale u američkoj Mornaričkoj opservatoriji. Kako se očekivalo prema teorijskim predviđanjima, leteći satovi su izgubili na vremenu (starili su sporije) tokom putovanja na istok, a dobili su na vremenu (starili su brže) putujući na zapad.“<sup>16</sup> Satovi su na putu na istok izgubili 59 nanosekundi, a pri putovanju na zapad su dobili 273 nanosekunde.\* To su male vremenske razlike za tako dug put, ali nisu nula i, što je najvažnije, ove eksperimentalne opservacije se podudaraju s matematičkim proračunima izvedenim pomoću Ajnštajnovе teorije.† Svoj rad Hafeli i Kiting završavaju na sličan način, koncizno: „U svakom slučaju, čini se da nema mnogo opravdanja za dalje rasprave o tome hoće li satovi pokazivati isto vreme nakon kružnog putovanja, jer mi zaključujemo da to ne čine.“ I tu se otkriva neobična i veoma neočekivana osobina našeg kosmosa koju opisuje teorija relativnosti: vreme nije kao što izgleda.

Ni prostor nije kao što izgleda: u sledećem izazovu za zdrav razum, neće se svi složiti oko udaljenosti između dve tačke u prostoru. Razmaknite prste. Ko bi se usudio da kaže da udaljenost

---

\* Nanosekunda je milijarditi deo sekunde.

† Razlika između smerova ka istoku i ka zapadu je u tome što se brzina rotacije naše planete (u odnosu na, recimo, koordinatni sistem vezan za središte Zemlje) sabira ili oduzima od brzine kretanja aviona. Ovo je, između ostalog, i uzrok „paradoksa“ (koji nema veze s relativnošću) da neki interkontinentalni letovi u smeru sa istoka ka zapadu mogu stići na odredište ranije nego što su krenuli – naravno, po lokalnom vremenu! (*Prim. red.*)

između vrhova prstiju zavisi od posmatračeve pozicije? Ajnštajn bi to rekao. To je takođe čvrsto potvrđena eksperimentalna činjenica. Veliki hadronski sudarač (Large Hadron Collider, LHC) u CERN-u je najmoćniji akcelerator čestica na svetu. Zadatak ove gigantske mašine je da ubrza protonske snopove do 99,999999 posto brzine svetlosti na putu kroz njen podzemni tunel, pre nego što se sudare. Cilj je istražiti strukturu materije i sile prirode koje pokreću naš svet. Sa stanovišta nekog ko stoji na tlu u Ženevi, diveći se ovom grandioznom građevinskom dostignuću, LHC ima obim od 27 kilometara. Sa stanovišta protona koji kruže duž prstena, obim je 4 metra.

Kada je 1905. godine definisao svoju teoriju, Ajnštajn nije znao za atomske satove, avione ili Veliki hadronski sudarač, a dotad nisu sprovedeni ni eksperimenti koji bi doveli u pitanje Njutnovu predstavu o apsolutnom prostoru i univerzalnom vremenu. Zašto je onda Ajnštajn odlučio da izmisli novu predstavu? Zato što je shvatio da postoji fundamentalno neslaganje između Njutnove teorije gravitacije iz 17. veka i teorije o elektricitetu i magnetizmu Džejmsa Klerka Maksvela iz 19. veka.

Neslaganje se odnosi na način na koji je brzina svetlosti predstavljena u Maksvelovoj teoriji. U toj teoriji, zasnovanoj na eksperimentalnim opservacijama koje su sprovedeli Majkl Faradej, Andre-Mari Amper i drugi tokom 19. veka, stoji da je svetlost elektromagnetni talas koji putuje kroz vakuum praznog prostora fiksnom brzinom od 299.792.458 metara u sekundi. Prema teoriji, brzina svetlosnog zraka uvek ima tačno ovu vrednost, bez obzira na to kako se osoba koja ga meri kreće u odnosu na izvor svetlosti. To je vrlo čudna predikcija, i objekti u prirodi najčešće se ne ponašaju tako.

U trenutku pisanja ovih redova, u međunarodnim kriket utakmicama rekord u bacanju loptice koja je dostigla najveću brzinu postignut je u meču protiv Engleske u Kejptaunu 2003. godine i pripada Pakistancu Šoaibu Aktaru. Nik Najt, udarač za engleski tim, izveo je udžbenički defanzivni udarac ka filderu, zaokružujući

time *maiden over* za Aktara. Loptica je putovala do viketa\* brzinom od 100,2 milja na sat.† Da je Aktar umesto toga bacio lopticu iz F-14 tomketa koji se kretao brzinom od 600 milja na sat direktno prema Najtu, loptica bi došla do udarača brzinom od  $600 + 100,2 = 700,2$  milja na sat, i možda ne bi uspeo da je uputi ka filderu. Ovo ne važi za svetlost. Ako bi se iz F-14 tomketa umesto loptice za kriket Najtu odaslao laserski zrak, svetlost bi ga i dalje dostigla brzinom svetlosti (a ne brzinom svetlosti + 600 milja na sat).

Postoje dva moguća rešenja za ovu neobičnu osobinu Maksvelovih jednačina. Očiglednije rešenje bilo bi izmeniti Maksvelove jednačine da bi se to izbeglo, tako da se svetlost ponaša kao loptica za kriket. U suštini, ovo je eksperimentalno pitanje; pitanje o tome što se zapravo dešava u prirodi. Nebrojeno mnogo opservacija različitih fizičkih pojava tokom više od stotinu godina govori nam da su Maksvelove jednačine tačne, i zato svetlost uvek putuje istom brzinom.

Drugo, manje očigledno rešenje bilo bi promeniti način na koji posmatrači koji se kreću različitim brzinama jedni u odnosu na druge različito opažaju rastojanja i razlike u vremenu, tako da je brzina svetlosti koju bilo ko izmeri uvek ista. Ajnštajn je izabrao ovaj put, odbacujući Njutnove ideje o apsolutnom prostoru i vremenu, i taj izbor ga je odveo do relativnosti.

## Ajnštajnova teorija relativnosti

Ajnštajnova teorija je model, odnosno matematički okvir koji nam omogućava da predviđamo kako se ponašaju objekti koji postoje u prirodi. Model je po svojoj prirodi geometrijski, i prikladan je za intuitivne vizuelne slike za koje je potrebno vrlo malo jednačina – što je dobro za knjigu poput ove. Verujemo da se relativnost

---

\* U kriketu, fizička struktura koja se sastoji od tri štapa zabodena u tlo i dve prečke koje leže na vrhu tih štapova. Cilj udarača je da štiti vikete. (*Prim. prev.*)

† Koristićemo imperijalne jedinice kada govorimo o kriketu.



najbolje može objasniti opisom ove geometrijske slike, umesto da se predstavi njena evolucija kroz istoriju. Naše opravdanje, jedino neophodno, jeste to što model funkcioniše. Ajnštajn je mogao naprosto da izvuče svoju teoriju iz vedra neba bez ikakve reference na Maksvelovu teoriju ili eksperimente, i bila bi podjednako važeća zato što je dobar model pošto su njena predviđanja do danas prošla svako eksperimentalno testiranje.

Da je Ajnštajn mogao da izvuče jednu jedinu ideju iz vedra neba koja bi ga odvela direktno do njegove teorije, uključujući i objašnjenje onoga što se dogodilo u Hafelijevom i Kitingovom eksperimentu i najpoznatiju jednačinu čitave fizike,  $E = mc^2$ , bio bi to koncept poznat kao „prostorvremenski interval“. Ideja je prelepo jednostavna.

Vratimo se na meč Pakistan–Engleska u Kejptaunu i rekorda vredan hitac Šoaiba Aktara upućenog ka Niku Najtu. Zasad ćemo pojednostaviti stvari i isključićemo gravitaciju – ponovo ćemo je uključiti na kraju ovog poglavlja. To znači da će loptica, kada napusti Aktarovu šaku, leteti ka Najtu po savršeno pravoj liniji konstantnom brzinom od 100,2 milje na sat u odnosu na tlo.\* Zamislimo sada da se u loptici za kriket nalazi sat. Loptica, u trenutku kad napusti Aktarovu šaku, emituje svetlosni blesak i beleži vreme na svom unutrašnjem satu. Istog trena kad dospe do Najtove palice, loptica emituje drugi svetlosni blesak i beleži vreme dolaska na svom unutrašnjem satu. Vreme između dva bleska izmerno u loptici za kriket nazvaćemo  $\Delta\tau$  – čita se „delta tau“.

U komentatorskom boksu, Džonatan Egnju (poznat po nadimku Egers), prenosi utakmicu za BBC, beleži dolazak dva svetlosna bleska iz loptice i izračunava vremenski interval između emitovanja blesaka sa svoje pozicije:  $\Delta t_{\text{Egers}}^\dagger$  Uz to, Egnju meri

---

\* Tehnički govoreći, pretpostavljamo da je teren za kriket inercijalni referentni sistem. Možemo ga zamisliti kao da je odvojen od Zemlje i slobodno pluta među zvezdama. Takođe, zanemarujemo otpor vazduha.

† Moraće da napravi korekciju za vreme potrebno svetlosti da pređe put od loptice do njegovih očiju kako bi izračunao kada je zapravo emitovan blesak.

udaljenost između mesta gde loptica napušta Aktarovu šaku i mesta gde pogađa Najtovu palicu:  $\Delta x_{\text{Egers}}$ .

U svom F-14 tomketu koji leti preko terena u pravoj liniji između viketa brzinom od 600 milja na sat, pilot Tom takođe registruje dva svetlosna bleska i izračunava sa svoje pozicije vremenski interval između emitovanja dva bleska:  $\Delta t_{\text{Tom}}$ . Kao i Egers, Tom meri udaljenost između mesta gde loptica napušta Aktarovu šaku i mesta gde pogađa Najtovu palicu i rezultat tog merenja je  $\Delta x_{\text{Tom}}$ .

Rezultat Hafelija i Kitinga nam govori da će se svi vremenski razmaci između emitovanja blesaka, kako ih mere Egers, Tom i loptica za kriket, međusobno razlikovati. I udaljenost koju loptica prelazi od bacača do udarača takođe će se razlikovati. Za one koji se prvi put susreću sa Ajnštajnovim idejama, te razlike dođu kao veliki šok. One su suprotne intuiciji, jer znače da razdaljine i vremenski intervali nisu nešto oko čega se svi mogu složiti. Međutim, ovde možemo izdvojiti izuzetan i važan rezultat. Ako Egers izračuna vrednost  $(\Delta t_{\text{Egers}})^2 - (\Delta x_{\text{Egers}})^2$  i Tom izračuna vrednost  $(\Delta t_{\text{Tom}})^2 - (\Delta x_{\text{Tom}})^2$ , obojica će dobiti isti rezultat, koji će biti jednak kvadratu vremenskog intervala izmerenog pomoću loptice za kriket,  $(\Delta \tau)^2$ :

$$(\Delta \tau)^2 = (\Delta t_{\text{Egers}})^2 - (\Delta x_{\text{Egers}})^2 = (\Delta t_{\text{Tom}})^2 - (\Delta x_{\text{Tom}})^2$$

$(\Delta \tau)^2$  je prostorvremenski interval između dva događaja: događaj 1 je loptica koja napušta šaku igrača, a događaj 2 je loptica koja udara u palicu. Možda ćete se zapitati: „Šta znači oduzeti kvadrat udaljenosti u prostoru od kvadrata vremenske razlike?“ Odgovor je da udaljenost između dva događaja moramo izraziti kroz vreme potrebno svetlosti da putuje između tih događaja, što znači da udaljenost treba izraziti u svetlosnim sekundama. Interval prostorvremena (ili skraćeno „interval“) važan je jer predstavlja vrednost oko koje se svi slažu, odakle god vršili merenja. U fizici takvu vrednost zovemo invarijantna. Budući da priroda ne mari za našu

tačku gledišta,\* trebalo bi da se trudimo da prirodu opisujemo samo preko invarijantnih vrednosti. Kad otkrijemo invarijantu, to ima veliku važnost, jer saznajemo još nešto o osnovnoj strukturi kosmosa.

U svojoj knjizi *Istraživanje crnih rupa (Exploring Black Holes)*, Tejlor, Viler i Bertšinger opisuju jednačinu za interval kao „jednu od najvećih jednačina u fizici, možda i u celoj nauci“. Kip Torn i Rodžer Blandford u knjizi *Moderna klasična fizika (Modern Classical Physics)* pišu da je interval „među najfundamentalnijim aspektima fizičkog zakona“. Reč „fundamentalan“ je važna. Mogli biste se s pravom zapitati: „Zašto je interval ovakav? Zašto se svi slažu baš u vezi s ovom kombinacijom vremena i prostora?“ Odgovor, kako Torn i Blandford sugerišu upotrebom reči „fundamentalan“, jeste da je kosmos tako sazdan. Ne znamo ni za jedno dublje objašnjenje oblika intervala.

Dodatno pitanje koje biste mogli postavljati bilo bi: „Na koji način bi trebalo da razmišljam o intervalu, tom najfundamentalnijem aspektu fizičkog zakona?“ To je dobro pitanje. Fizičari obično nastoje da razviju mentalnu sliku onog što se dešava u njihovim jednačinama: fizička intuicija oživljava jednačine. Na sreću, interval ima jednostavno fizičko tumačenje. Povezan je s nečim što ćemo nazvati „udaljenost između dva događaja“. To nije uobičajena udaljenost između njih u prostoru, već udaljenost u prostorvremenu. Hajde da istražimo tu ideju.

## Događaji i svetske linije u prostorvremenu

Koncept događaja je fundamentalan za relativnost. Događaj je nešto što se događa negde i nekad. Pucketanje prstima je dobra aproksimacija događaja: dešava se vrlo brzo i na dobro definisanom mestu. Emitovanje bleska svetlosti iz naše loptice za kriket je događaj. Strogo govoreći, događaj je idealizovan koncept, nešto

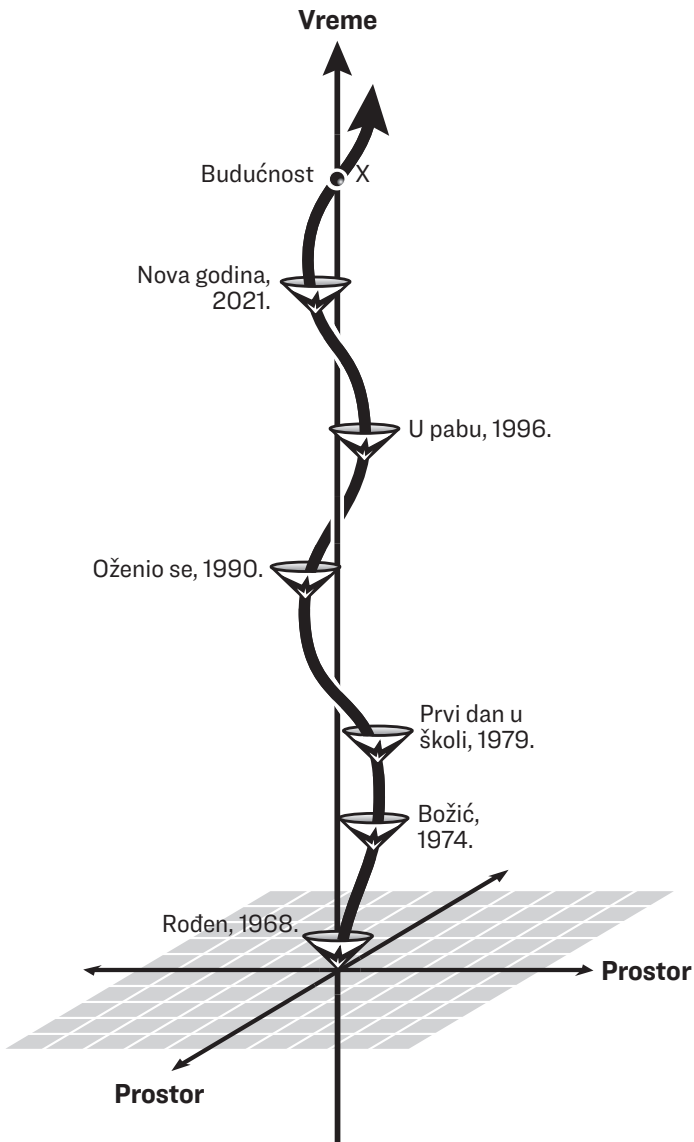
---

\* Ovo će šokirati izvestan tip ljudi.

što se zbiva tako brzo i na tako malom području da odgovara jednoj tački u prostoru i vremenu. Teorija relativnosti bavi se odnosom između događaja; koliko su međusobno udaljeni u prostorvremenu i da li utiču jedan na drugi. Ovo je vrlo intuitivan način razmišljanja o svetu, a baš tako govorimo u svakodnevnom životu; „Vidimo se sutra uveče u osam u kafani.“ „Rođen sam 3. marta 1968. u Oldamu.“ Ono što nam se dogodilo i ono što će nam se dogoditi redom su događaji u prostoru i vremenu, i događaju se negde i nekad. I eto osnove teorije relativnosti: ono što nam se dogodilo i ono što će nam se dogoditi – sve su događaji u prostorvremenu. Šta je to prostorvreme? To je skup svih događaja. Sve što je ikada bilo i što će ikada biti u kosmosu.

Evo slike prostorvremena. Predočite sebi događaje u svom životu. Prvi dan u školi. Božić s bakama i dekama. Noć u kafani. Letopis trenutaka od radosti do očaja i svega između. Događaji su atomi iskustva. Iz naše ljudske perspektive, događaji dolaze s etiketama; govorimo o njima vezujući ih za mesta i vreme zbivanja. Zamislite da brižljivo postavite događaje iz svog života jedan za drugim, formirajući liniju koja se proteže kroz prostorvreme; neprekinutu stazu koja prikazuje vaš put kroz svet. To je vaša svetska linija.

Na slici 2.1 je svetska linija koja krivuda svojim putem kroz prostorvreme. Ovo je poznato kao dijagram prostorvremena. Zamislite da je ovo vaša svetska linija, vaš život koji se odvija pred vama. Promenite datume, dodajte svoje događaje i sećanja, načinite mapu sopstvenog iskustva. Prostorvreme je moćna stvar. Skup svih događaja u vašem životu, u prošlosti, sadašnjosti i budućnosti. Vaša sećanja su na događaje u prostorvremenu. Trenuci koji čine vaš život – davni Božići, letnja popodneva s drugaricama, prvi poljupci i poslednji pozdravi – nisu zauvek izgubljeni. Ti trenuci su negde tamo, negde u prostorvremenu. Vaša budućnost – sve što vam se još nije dogodilo – svaki događaj, uključujući vašu smrt na kraju vaše svetske linije – očekuje vas, negde u prostorvremenu. Ako sve događaje rasporedimo na ovaj način,



Slika 2.1. Događaji iz života u prostoru i vremenu. Linija koja prolazi kroz događaje poznata je kao svetska linija. Kupe na svakom događaju poznate su kao svetlosne kupe. To su putanje bleska svetlosti emitovanog u događaju. Pošto ništa ne može putovati brže od svetlosti, izvorni događaj može da utiče samo na buduće događaje unutar ovih kupa.

napravićemo mapu prostorvremena, a udaljenost između događaja određena je intervalom. Kako bi bilo lepo da se slobodno krećemo po ovoj mapi, da ponovo posetimo svaki trenutak. Možemo da se krećemo bilo kuda po prostornoj mapi, zašto onda da nemamo istu slobodu nad mapom prostorvremena? Odgovor treba tražiti u intervalu.

Hajde da rezimiramo. Iz određene posmatračke pozicije, razdaljina u prostoru između dva događaja meri se kao  $\Delta x$ , a razlika u vremenu između događaja meri se kao  $\Delta t$ . Iz druge pozicije,  $\Delta x$  i  $\Delta t$  biće drugačiji, što je veoma suprotno intuiciji. Ali presudno je što interval  $(\Delta \tau)^2$  ne zavisi od posmatračke pozicije:

$$(\Delta \tau)^2 = (\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$$

Pomoću ideje intervala možemo uvesti koncept dužine svetske linije. Konkretno, zamislite svetsku liniju na slici 2.1 kako se proteže od rođenja 1968. godine do tajanstvenog budućeg događaja obeleženog sa X. Koliko je dug ovaj deo svetske linije? Ako se događaj X odigrava tačno na istom mestu kao i rođenje, onda iz navedene jednačine zaključujemo da je interval između ta dva događaja (rođenje i X) dat samo vremenom, tj.  $\Delta \tau = \Delta t$  jer je  $\Delta x = 0$ . Ovo je interval između dva događaja, ali nije dužina svetske linije. To je dužina svetske linije koja ide nagore po vremenskoj osi (vertikalna linija na slici 2.1). Baš kao što razdaljina putovanja između Oldama i Vigana zavisi od rute kojom se ide, tako je i sa udaljenostima u prostorvremenu. One zavise od prostorvremenske putanje koju prati svetska linija. Dužinu vijugave svetske linije na slici 2.1 možemo da izračunamo ako zamislimo kako je delimo na mnoštvo sićušnih segmenata. Svaki segment je približno prava linija.\* Zatim

---

\* To znači da osoba koja se kreće svetskom linijom ne ubrzava duž tog segmenta. Za bilo koju krivu putanju, kroz prostor ili kroz prostorvreme, možemo smatrati da se sastoji od mnoštva malih pravolinijskih putanja.

možemo izračunati  $\Delta\tau$  za svaki segment, koristeći pomenutu formulu, i sabrati sve vrednosti  $\Delta\tau$  da bismo dobili ukupnu dužinu.

Takođe, možemo izvesti važno opažanje, o tome da postoje tri vrste intervala:  $(\Delta\tau)^2$  može biti pozitivan, negativan ili nula. Mogli bismo reći da postoje tri različite vrste „udaljenosti“ u prostorvremenu, za razliku od samo jedne vrste udaljenosti u prostoru.

Ako je vremenska razlika između događaja veća od udaljenosti u prostoru između njih, interval je pozitivan. Ovakvi parovi događaja nazivaju se „vremenski odvojeni“ ili, preciznije, odvojeni intervalom vremenskog tipa. Svi događaji na vašoj svetskoj liniji su vremenski odvojeni jedan od drugog. U ovom slučaju, postoji jednostavno fizičko tumačenje intervala. Da ste imali savršen hronometar koji ste pokrenuli u trenutku svog rođenja, i da ga nosite tokom celog života, sat bi merio dužinu vaše svetske linije, od trenutka rođenja do sadašnjeg trenutka. Stoga dužina svetske linije predstavlja vaše godine. Interval ima takvo značenje za vremenski odvojene događaje. To je vreme mereno satom koji se kreće duž svetske linije između događaja.\*

Ako je udaljenost u prostoru između događaja veća od vremenske razlike, interval je negativan. Kažemo da su ovi događaji razdvojeni intervalom prostornog tipa. Sada više ne možemo tumačiti interval putem sata koji se kreće između događaja. Međutim, postoji fizička interpretacija. U slučaju kada se dva događaja dese istovremeno, interval možemo tumačiti kao zapis udaljenosti između tih događaja mereno lenjirom. Ispostavlja se da je za prostorno odvojene događaje uvek moguće pronaći posmatrača (tj. posmatračku poziciju) iz čije perspektive se događaji dešavaju u isto vreme. To znači da nije moguće da neko (ili nešto) bude fizički prisutan na oba događaja, jer bi to zahtevalo da se istovremeno nalazi na dva mesta. Ovo je samo

---

\* Sat se nikada ne kreće u odnosu na samog sebe, pa je  $\Delta\tau = \Delta t$  jer je  $\Delta x = 0$ .

drugi način da se iskaže kako ne možemo da prenosimo sat između događaja.

Dakle, postoje dve fundamentalno različite oblasti prostorvremena koje okružuju svaki događaj: oblast koja sadrži događaje koji bi mogli da budu na svetskoj liniji sata što prolazi kroz taj događaj, i oblast s događajima koji to ne bi mogli. Značaj ove podele biće vam jasan za koji trenutak.

Treća mogućnost je da je vremenska razlika između dva događaja jednaka udaljenosti u prostoru između njih. Ovo je slučaj kada svetska linija između dva događaja predstavlja putanju svetlosnog zraka. Da biste to shvatili, setite se da vreme merimo u sekundama, a udaljenost u svetlosnim sekundama. Svetlost pređe jednu svetlosnu sekundu za jednu sekundu, dve svetlosne sekunde za dve sekunde i tako redom. Dakle, za svaki par događaja koji leže na putanji svetlosnog snopa  $(\Delta t)^2 = (\Delta x)^2$  a interval je nula. Ovi događaji su poznati kao razdvojeni intervalom svetlosnog tipa. Ako iz događaja izvučemo putanje svetlosnih zrakova u prostorvremenu, one formiraju takozvanu buduću svetlosnu kupu događaja. Na slici 2.1 svetlosne kupe su prikazane kao male kupe za svaki događaj. Svetlosne kupe se šire pod uglom od 45 stepeni iz svakog događaja. Unutar buduće svetlosne kupe, svi događaji su vremenski odvojeni od izvornog događaja dok su svi događaji van buduće svetlosne kupe prostorno odvojeni od izvornog događaja. Kako smo bili prisutni na svakom događaju u našem životu, naša svetska linija krivuda unutar svetlosnih kupa.\*

Vrlo je važno razumeti značenje svetlosnih kupa i šta nam govore o odnosima između događaja u prostorvremenu. One će biti presudno važne za razumevanje crnih rupa i paradoksa koje

---

\* Svetlosne kupe su kupe u prostorvremenu ako je prostor dvodimenzionalan, jer će se svetlosni blesak širiti u krug rastućeg poluprečnika. U tri dimenzije, blesak se širi u sferičnu ljusku čime se stvara neka vrsta hiperkupe u prostorvremenu. To nije moguće vizuelno predstaviti, te ćemo se držati dve dimenzije prostora da bismo lakše crtali dijagrame.



stvaraju. Hajde da zumiramo određeni događaj na našoj liniji sveta da bismo stekli bolju predstavu o svetlosnoj kupi i odnosima između susednih događaja u prostorvremenu.

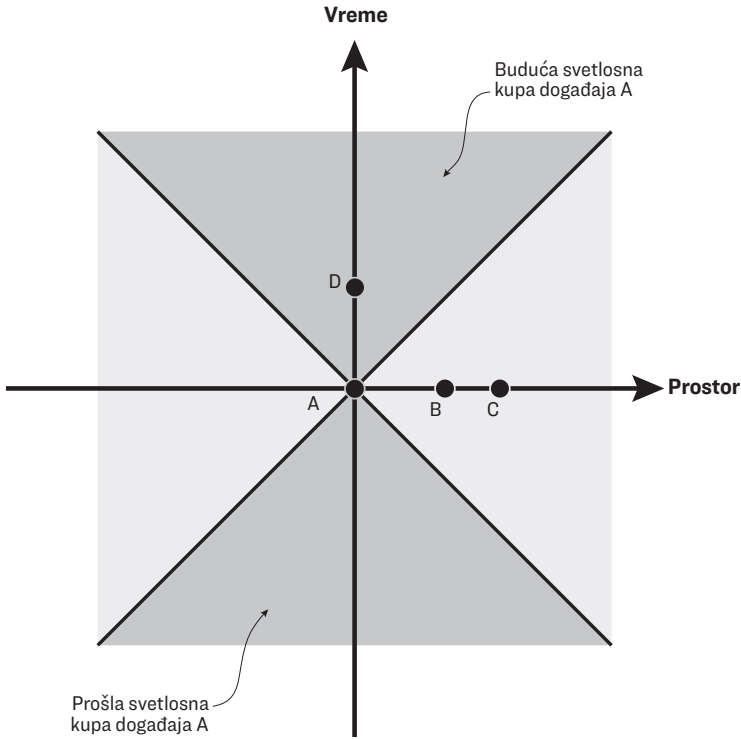
### Božić u prostorvremenu

Zamislimo da smo zumirali oblast prostorvremena u blizini „Božića 1974“ na našoj svetskoj liniji. Vaša porodica sedi pred televizorom raspravljajući da li da gleda Brusa Forsajta i *Igru generacija* (*The Generation Game*) na BBC1 ili Lorensa Olivijea u *Henriju V* na BBC2. Očekivano zabrinuta zbog nadolazećeg kulturnog rata, baka skače na noge i obara čašu šerija na električnu grejalicu.\* Glavni osigurač tada pregori, i debata gubi smisao.

Slika 2.2 prikazuje oblast prostorvremena oko „Božića 1974“, nacrtanu iz ugla nekoga ko sedi u vašoj kući. Događaj A je „baka dolazi u kontakt sa čašom šerija“, a događaj D je „pregoreva osigurač“. Iz ove perspektive, događaji A i D se dešavaju na gotovo istom mestu u prostoru, ali u različitim vremenima; D je, u odnosu na A, u budućnosti. Dijagonalne linije koje idu prema gore i spolja od A iscrtavaju buduću svetlosnu kupu događaja A. Nacrtali smo i dijagonalne linije koje idu prema prošlosti od događaja A. To je prošla svetlosna kupa događaja A. Svi događaji u zasenčenoj oblasti unutar buduće svetlosne kupe vremenski su razdvojeni od A, što znači da svako ko prisustvuje događaju A takođe može prisustvovati bilo kom događaju unutar buduće svetlosne kupe događaja A. Svi događaji unutar prošle svetlosne kupe takođe su vremenski razdvojeni od A. To znači da svako ko prisustvuje bilo kom događaju unutar prošle svetlosne kupe može prisustvovati i događaju A. Izraz za interval između A i D je naročito

---

\* Oba grejača su uključena, a ispod sudopere je sredstvo za ribanje.



Slika 2.2. Događaj A u prostorvremenu i njemu susedna oblast. Dijagonalne linije su linije koje isctavaju svetlosni zraci koji prolaze kroz A. Oni čine buduće i prošle svetlosne kupa za događaj A.

jednostavan:  $(\Delta \tau)^2 = (\Delta t)^2$ , gde je  $\Delta t$  vremenska razlika između A i D merena satom u vašoj kući.\*

Na dijagramu smo obeležili još dva događaja, označena slovima B i C. Iz perspektive kuće, oni se odigravaju u isto vreme kad i događaj A, ali na drugom mestu. Recimo da je reč o budilniku

\* Za bezmalo sve događaje iz našeg svakodnevnog života, otprilike je tačno da je  $(\Delta \tau)^2 = (\Delta t)^2$ . To se dešava zato što razdaljine u prostoru koje su nam obično značajne iznose nekoliko metara ili kilometara ili čak nekoliko hiljada kilometara, a sve su prilično male mereno u svetlosnim sekundama. U svakodnevnom životu,  $\Delta x$  je mnogo manje od jedne svetlosne sekunde, i to je razlog zašto nam se čini da je vreme univerzalno.

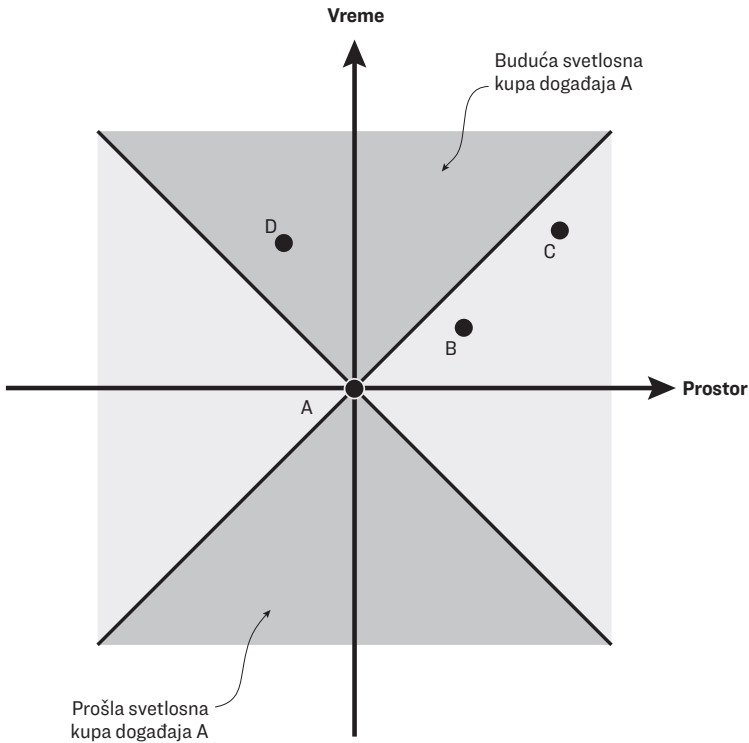
koji zvoni na drugom kraju ulice i automobilu čiji motor startuje u susednom gradu. Interval između A i B je  $(\Delta\tau)^2 = -(\Delta x_{AB})^2$ , a interval između A i C je  $(\Delta\tau)^2 = -(\Delta x_{AC})^2$ . Interval je negativan, što znači da su događaji B i C prostorno odvojeni od događaja A;  $\Delta x_{AB}$  i  $\Delta x_{AC}$  jesu rastojanja koja bi se mogla izmeriti lenjirom.

Evo ključne stvari. Događaj A je izazvao događaj D (baka je oborila čašu i to je dovelo do pregorevanja osigurača). Međutim, događaj A nije mogao izazvati događaje B i C. Da bi se to desilo, neki uticaj bi morao trenutno da se prenese od A do B i C, jer se sve desilo u isto vreme. Ovo razgraničavanje uzročno-posledičnih veza je razlog zašto su svetlosne kupe tako važne. Događaji unutar svetlosnih kupa mogu imati uzročnu-posledičnu vezu, jer je moguće da neki signal ili uticaj putuje između njih. Događaji van svetlosnih kupa ne mogu imati uzročnu-posledičnu vezu. Interval, dakle, sadrži u sebi pojam o uzroku i posledici. Određeni događaji mogu izazvati druge događaje, a svetlosne kupe na svakom događaju pokazuju nam gde su linije razgraničavanja u prostorvremenu.

Razmotrimo sada iste događaje u prostorvremenu iz dve različite perspektive. Slika 2.3 je dijagram prostorvremena konstruisan pomoću merenja rastojanja i vremena koje je obavio posmatrač prolazeći konstantnom brzinom kraj vaše kuće na putu ka automobilu u susednom gradu. Kako smo već objasnili, taj posmatrač će izmeriti različita vremena i različita rastojanja između događaja, ali intervali između događaja moraju ostati isti jer interval je invarijantan. Priroda ne mari za vašu posmatračku poziciju, a interval je fundamentalno svojstvo prirode. Da bi tako bilo i ostalo, nešto prilično iznenađujuće se dešava. Prema ovom posmatraču, događaji B i C se odigravaju *nakon* događaja A.

Slika 2.4 pokazuje dijagram prostorvremena nacrtan rukom posmatrača koji se kreće pored vaše kuće u suprotnom smeru konstantnom brzinom. Ovaj posmatrač kaže da se događaji B i C odigravaju *pre* događaja A.

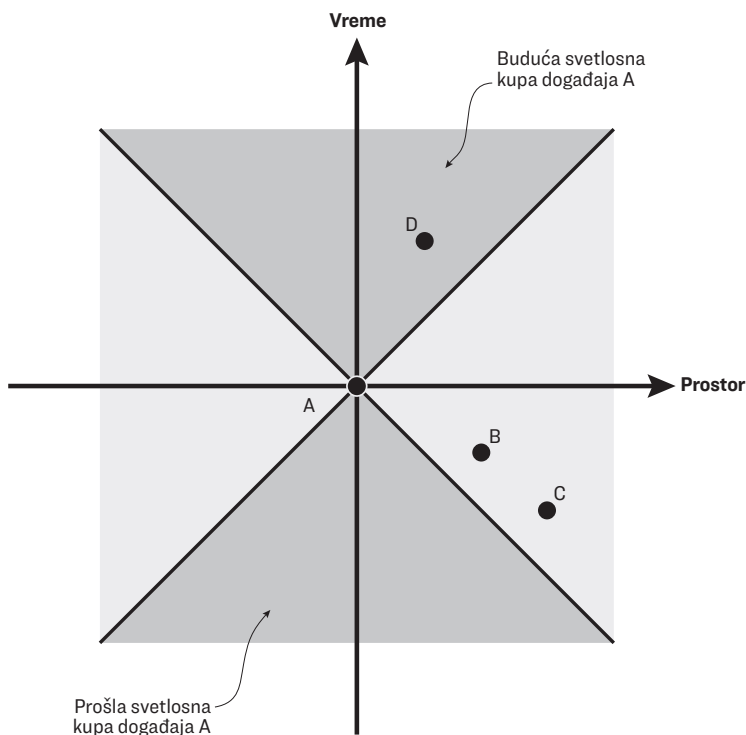
Na prvi pogled, čini se da je predstava prostorvremena dovela do katastrofe. Kako možemo prihvatiti teoriju koja dopušta



Slika 2.3. Događaji A, B, C i D opisani u tekstu, iz ugla posmatrača koji prolazi kraj događaja A konstantnom brzinom, putujući sleva nadesno na dijagramu.

promenu vremenskog redosleda događaja? Šta ako su ti događaji vaše rođenje i smrt? Zar bi neko mogao videti kako umirete pre nego što ste rođeni?

Rešenje ovog navodnog paradoksa otkriva nam se ako pogledamo svetlosne kupe. One su na istom mestu na sva tri dijagrama – tako i mora biti, jer se svi posmatrači slažu u pogledu brzine svetlosti. Iako se događaji B, C i D redom premeštaju na dijagramu prostorvremena u odnosu na događaj A kako menjamo posmatračke perspektive, obratite pažnju na to da događaj D uvek ostaje unutar buduće svetlosne kupe događaja A, dok su događaji B i C uvek van svetlosnog konusa budućnosti i prošlosti događaja



Slika 2.4. Događaji A, B, C i D opisani u tekstu, iz ugla posmatrača koji prolazi kraj događaja A konstantnom brzinom, putujući zdesna nalevo na dijagramu.

A. Da bi vam bilo jasno da tako mora biti, imajte na umu da je interval između dva događaja invarijantan: ako je interval vremenski određen iz jedne perspektive, on je vremenski određen iz svih perspektiva. To znači da je vremenski redosled događaja koji mogu uticati jedni na druge očuvan iz svih perspektiva. Za događaje koji ne mogu uticati jedni na druge, vremenski redosled nije očuvan, ali to nije važno jer se uzročnost ne remeti. Ne bi bilo protivrečnosti ako bi neko video da se kućni alarm aktivira ili da se auto pokreće u susednom gradu pre ili nakon što baka obori čašu, jer ti događaji nikada nisu mogli uticati jedni na druge – oni su prostorno razdvojeni. Naravno, protivrečnost bi postojala ako bi

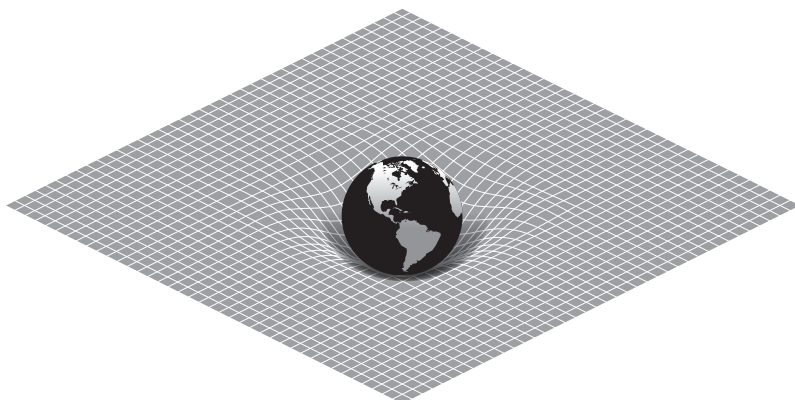
osigurač pregoreo pre nego što baka obori čašu, zbog čega je osigurač i pregoreo. Ali to ne može da se desi za događaje A i D jer D je uvek u budućoj svetlosnoj kupi događaja A, bez obzira na posmatračku poziciju.

Buduća svetlosna kupa nam zato pokazuje koje su oblasti prostorvremena dostupne iz tog događaja, a koje su zabranjene. Slično tome, prošla svetlosna kupa događaja nam pokazuje koji su događaji u prostorvremenu mogli imati uticaj na taj događaj. Ako se osvrnete na svetsku liniju na slici 2.1, videćete da je nemoguće da otputujete natrag u trenutke iz prošlosti, do ljudi i sećanja koje ste ostavili za sobom, jer nikada ne možemo preći iz unutrašnjosti u spoljašnjost svetlosne kupe bilo kog događaja u našim životima. Za to bismo morali da putujemo brže od svetlosti. Ali interval je invarijantan, tako da to ne možemo učiniti. U izvesnom smislu, naša sećanja su tamo negde u prostorvremenu, ali ih nikada ne možemo ponovo proživeti.

Predstava prostorvremena koju smo prethodno dočarali je iz Ajnštajnovе specijalne teorije relativnosti, prvi put objavljene 1905. godine. Ona opisuje kosmos bez gravitacije, zbog čega smo preduzeli neuobičajen korak da isključimo gravitaciju kad smo raspravljali o utakmici između Engleske i Pakistana u Kejptaunu. Uključivanjem gravitacije u predstavu prostorvremena bavi se Ajnštajnova opšta teorija relativnosti, objavljena 1915. godine.

## **Od specijalne relativnosti do opšte relativnosti**

Centralna ideja opšte relativnosti je da prostorvreme ima geometriju koja dopušta zakrivljenje. Kako ćemo videti, to znači promenu pravila za interval između događaja. Materija i energija zakrivljuju prostorvreme u svojoj blizini, a Ajnštajn je definisao jednačine koje nam omogućavaju da izračunamo kako je zakrivljeno. Šema na slici 2.5 to prikazuje. Objekti poput Međunarodne svemirske stanice koji se kreću blizu Zemlje prolaze kroz oblast zakrivljenog prostorvremena. Da smo njutnovci, njihovo kretanje



Slika 2.5. Šema zakrivljenja prostorvremena u blizini Zemlje.

tumačili bismo kao posledicu sile koja ga odvlači od prave linije i baca u orbitu. Ali u Ajnštajnovoj predstavi nema sile: gravitaciju moramo sagledavati isključivo kao geometriju.

Potpuno je razumljivo ako na prethodni pasus reagujete pitanjem o čemu to pričamo. Šta znači govoriti o zakrivljenju prostora i vremena? Kako da zamislimo zakrivljeno prostorvreme? Do sada smo crtali dijagrame kao na slici 2.1, s vremenom koje pokazuje prema gore i jednom ili dve dimenzije u prostoru prikazane vodoravno. Ali naš svet nije takav. Živimo u tri prostorne dimenzije: napred i nazad, levo i desno, gore i dole. Dodavanje četvrte dimenzije – vremena – veoma je teško zamisliti.

Da bismo lakše shvatili ideju prostorvremena, napravimo korak unazad i zamislimo dvodimenzionalni svet nazvan ravanija, naseľjen ravnim stvorenjima.\* Ravanci mogu da hodaju unaokolo, napred i nazad, levo i desno, ali nikada gore ili dole. Njihove ravne oči mogu da vide samo ravne stvari na ravnim površinama,

\* Inspirisao nas je roman *Ravanija* Edvina Abota iz 1884. godine. A, na neki način, i pesma „Flat Beat“ (Ravan bit) Mr. Oiza u kojoj se pojavljuje Ravni Erik.

a njihovi ravni mozgovi razumeju samo ravne stvari. Zamislite kako bi reagovali na renomiranog fizičara Ravnog Alberta kad bi se usudio da kaže da je prostor zapravo trodimenzionalan. „Postoji još jedna dimenzija, još jedan pravac koji ne možemo prikazati“, tvrdi on, a sa svojom matematikom ne bi imao nikakvih poteškoća u opisivanju tog trodimenzionalnog sveta.

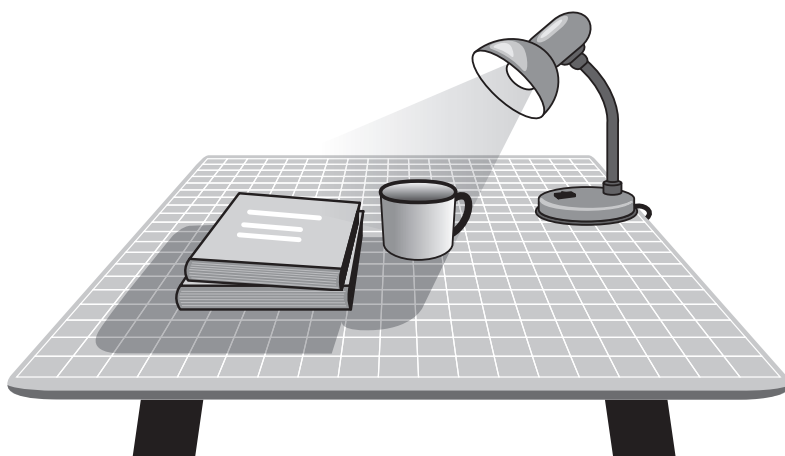
Pretpostavimo da je Ravni Albert u pravu, i da Ravanci zapravo žive na površini velikog neurednog stola u kancelariji, kako je prikazano na slici 2.6. Treća dimenzija je stvarna; to je smer nagore od površine stola, ali Ravanci ga ne mogu videti. Njihova istraživanja još nisu otkrila da se prostor završava na ivici stola, ali otkrili su da postoje neprobojne oblasti u koje ne mogu da kroče. Moraće da obilaze oko šolje za kafu i lampe i knjiga, a u čudu su zašto su zabranjene oblasti ponekad kružne, ponekad pravougaone, a povremeno nekog drugog, manje pravilnog oblika. Osim toga, zemlja je prekrivena oblastima pod svetlom i tamom koje menjaju oblik i veličinu.

Kako je Ravni Albert zaključio da postoji dodatna dimenzija u svetu, samo na osnovu opažanja na ravnom stolu? „Sve to ima veze s tim promenljivim svetlim i tamnim oblastima“, kaže on. „Znam šta su. To su senke.“

Albert je pomoću matematike zaključio da senke predstavljaju dvodimenzionalne projekcije objekata koji obitavaju u tri dimenzije (šolje za kafu i knjige) i utvrdio kakvi su to trodimenzionalni oblici objekata koji bacaju te senke. Od pomoći je to što senke povremeno menjaju oblik, a Albert to ispravno tumači kao promenu izvora svetlosti iz više dimenzije. Iz našeg trodimenzionalnog ugla gledanja, odmah vidimo da je razlog to što neko pomera lampu na stolu.

Možda zapazate analogiju. Interval – ono što se ne menja s posmatračkom pozicijom – obitava u četiri dimenzije prostorvremena. Razlike u prostoru i razlike u vremenu su samo senke; one se menjaju kako usvajamo različite posmatračke pozicije u trodimenzionalnom svetu našeg svakodnevnog iskustva. Ne možemo





Slika 2.6. Ravanija.

zamisliti nešto što živi u četiri dimenzije, baš kao što Ravni Albert nije mogao da zamisli šolju za kafu ili lampu ili knjigu. Ali to ga nije sprečilo da podigne pogled s dvodimenzionalnog sveta svog iskustva i da s divljenjem sagleda istinsku realnost trodimenzionalnog prostora i nepromenljivih objekata koji obitavaju na stolu.

Ako odemo korak dalje u analogiji s ravanijom, možemo da naslutimo i kako se opšta teorija relativnosti uklapa u ovu predstavu. Stanovnici ravanije mogli bi biti skloni pretpostavci da je površina njihovog stola ravna. Ako bi to bio slučaj, paralelne linije što se pružaju preko ravanije nikada se ne bi presecale i zbir unutrašnjih uglova trouglova bio bi 180 stepeni. Takvu ravnu geometriju zovemo Euklidovom.

Međutim, ako je sto unekoliko zakrivljen, stanovnici ravanije će otkriti mala odstupanja od Euklida. Koristeći precizne merne uređaje, sa zaprepašćenjem će otkriti da postoje trouglovi čiji uglovi se ne sabiraju do tačno 180 stepeni, a paralelne linije se presecaju ili se razilaze jedne od drugih. Upravo u tom smislu govorimo kako je prostor zakrivljen ili izobličen u Ajnštajnovoj teoriji gravitacije; to pokušavamo da ilustrujemo na slici 2.5.

Ravanija nam pomaže da zamislimo kako prostor može imati više dimenzija, van našeg direktnog iskustva, kao i da može biti iskrivljen. Izuzmemo li jednu dimenziju, možemo sagledati širu sliku dvodimenzionalnog prostora (površine stola) uklopljenog u trodimenzionalni prostor (sobu). Ne možemo da se izmestimo iz sebe kako bismo videli širu sliku četvorodimenzionalnog prostor-vremena, jer je naša mašta ograničena na zamišljanje stvari u tri ili manje dimenzija. U tom smislu vrlo smo slični stanovnicima ravanije, osuđeni da svet gledamo u premalo dimenzija.

Nije lako usvojiti ideju višedimenzionalnog prostora, ali ako je za utehu, profesionalni fizičari nisu ništa bolji u zamišljanju četvorodimenzionalnog prostorvremena od vas. Kada je reč o prostorvremenu, svi smo mi Ravni Albert dok zuri u senke. Srećom, nije neophodno da pokušavamo vizuelno da dočaramo prostorvreme u svoj njegovoj četvorodimenzionalnoj veličanstvenosti. Često je moguće izbaciti par dimenzija iz naše mentalne slike a da se time ne izgubi ništa važno. Već smo to videli na dijagramima prostorvremena koje smo koristili da istražimo osnovne činjenice o specijalnoj teoriji relativnosti – tu smo svuda (osim na slici 2.1) prikazivali samo jednu dimenziju prostora i vremena. Crtanjem dvodimenzionalnog prostora ne bismo produbili naše razumevanje, premda bi naši dijagrami možda bili lepši. Ako bismo pokušali da nacrtamo sve tri dimenzije prostora plus vremensku dimenziju, suočili bismo se s problemima.

Retko kad ćemo morati da pratimo više od jedne dimenzije prostora u našem proučavanju crnih rupa, jer će nam fokus biti na udaljenosti od crne rupe.\* Najviše će nas zanimati kako iskrivljenje geometrije utiče na odnos između uzroka i posledice, što znači da ćemo pratiti svetlosne kupe. Fizičari su imali čitav vek da osmisle lep vizuelni sistem za to, a onaj koji se najčešće

---

\* Kao i ogromna većina nebeskih tela poput planeta, zvezda ili međuzvezdanih maglina, crne rupe su dovoljno *simetrične* da izgledaju isto ili barem dovoljno slično iz bilo kog ugla. (*Prim. red.*)

koristi nazvan je po ser Rodžeru Penrouzu. U sledeća dva poglavlja predstaviceemo Penrouzove dijagrame. Naoružani ovim prelepim mapama prostorvremena, bićemo spremni da zađemo s one strane horizonta.