

Stephen W. Hawking

**KRATKA
POVIJEST
VREMENA**

OD VELIKOG PRASKA DO CRNIH JAMA

Preveo
Damir Mikuličić



2

PROSTOR I VRIJEME

Naše sadašnje ideje o gibanju tijela potječu od Galileja i Newtona. Prije njih, ljudi su vjerovali Aristotelu koji je naučavao da je mirovanje prirodno stanje tijela te da se tijelo giba samo ako je na to natjerano nekom silom ili impulsom. Iz toga je slijedilo da će teško tijelo padati brže od lakog, budući da njega Zemlja jače privlači.

Aristotelova tradicija je također smatrala da se do svih zakona koji upravljaju svemirom može doći čistim razmišljanjem: nije bila potrebna provjera promatranjem. Tako se nitko prije Galileja nije gnjavio promatranjem padaju li tijela različitih težina doista i različitim brzinama. Priča se da je Galilei pokazao da je Aristotelovo vjerovanje krivo bacajući utege s Kosog tornja u Pisi. Priča je gotovo sigurno neistinita, ali Galilei je učinio nešto jednako vrijedno: puštao je kugle raznih težina da se kotrljaju niz glatku kosinu. Uvjeti su ovdje slični kao za slobodni pad, s tom razlikom da su promatranja lakša, jer su brzine manje. Galilei je mjerenjem pokazao da su sva tijela, bez obzira na težinu, povećavala svoju brzinu za iste

iznose, imala su ista ubrzanja. Na primjer, pustimo li kuglu da se spušta za jedan metar visine na svakih deset metara prevlađenog puta po kosini, kugla će putovati nizbrdo nakon jedne sekunde brzinom od otprilike jedan metar u sekundi, nakon druge sekunde dva metra u sekundi i tako dalje, bez obzira koliko teška bila. Dakako, olovni uteg pada brže od pera, ali to je samo zato, jer je pero jače usporavano otporom zraka. Pustimo li padati dva tijela na koja ne djeluje jako otpor zraka, na primjer dva različita olovna utega, oni će padati istom brzinom.

Galilejeva mjerenja upotrijebio je Newton za temelje svojih zakona gibanja. U Galilejevim pokusima, dok se tijelo kotrlja niz kosinu na njega je uvijek djelovala ista sila (njegova težina), a učinak te sile bilo je stalno ubrzavanje. To je pokazalo da je stvarni učinak sile uvijek promjena brzine tijela, a ne tek stavljanje tijela u gibanje, kako se ranije mislilo. To je također značilo da ukoliko na tijelo ne bude djelovala neka sila, ono će se nastaviti gibati pravocrtno i istom brzinom. Ova je zamisao prvi puta izričito izložena u Newtonovim *Principia Mathematica*, djelu objavljenom 1687, a poznata je kao Newtonov prvi zakon. Drugi Newtonov zakon izriče što se događa s tijelom kad na njega djeluje sila. On utvrđuje da će tijelo ubrzavati, odnosno mijenjati brzinu, u iznosu koji je razmjernan sili. (Na primjer, ukoliko je sila dvostruko veća, ubrzanje će biti dvostruko veće). Također, ubrzanje je to manje što je veća masa (ili količina tvari) tijela. (Ista sila, djelujući na dvostruko veću masu, izazvat će pola ubrzanja.) Poznati primjer za to je automobil: što je jači stroj, to je veće ubrzanje, ali što je automobil teži (veće mase), isti taj stroj stvara manje ubrzanje.

Kao dodatak svojim zakonima gibanja, Newton je otkrio zakon koji opisuje gravitacijsku silu, a koji izriče da svako tijelo privlači svako drugo tijelo silom razmjernom masi svakog tijela. Dakle, sila između dva tijela bit će dvostruko jača ako jedno od tijela (recimo, tijelo A) udvostruči svoju masu. To je upravo ono što se i očekivalo, budući da bi se novo tijelo A moglo zamisliti kao da se sastoji od dva tijela prvobitne mase.

Svako bi od njih privlačilo tijelo *B* prvobitnom silom. Stoga će sad ukupna sila između *A* i *B* biti dvostruka prvobitna sila. A ako, na primjer, jedno od tijela ima dvostruku masu, a drugo trostruku masu, sada će sila među njima biti šest puta jača. Može se sada vidjeti zašto sva tijela padaju istom brzinom: tijelo dvostruke težine vući će gravitacija prema dolje dvostruko jače, ali ono također ima i dvostruku masu pa ga je teže ubrzavati. Prema drugom Newtonovom zakonu, ova dva učinka će se točno poništavati i ubrzanje će biti jednako u svim slučajevima.

Newtonov zakon gravitacije izriče također da što su tijela međusobno udaljenija, to je sila slabija. Newtonov zakon gravitacije određuje da je gravitacijsko privlačenje neke zvijezde točno jedna četvrtina gravitacijskog privlačenja zvijezde iste mase koja se nalazi na pola udaljenosti. Taj zakon s velikom točnošću predviđa staze Zemlje, Mjeseca i planeta. Kad bi zakon bio takav da gravitacijsko privlačenje zvijezde opada brže s udaljenošću, tada staze planeta ne bi bile eliptične već spiralne prema padu na Sunce. Kad bi privlačenje opadalo sporije, gravitacijske sile udaljenih zvijezda nadvladale bi Zemljinu.

Velika razlika između zamisli Aristotela i onih Galileja i Newtona je u tome da je Aristotel vjerovao da je stanje mirovanja neko povlašteno stanje u kojem bi se našlo svako tijelo ako nije tjerano nekom silom ili impulsom. Posebno je smatrao da je Zemlja u stanju mirovanja. Ali iz Newtonovih zakona slijedi da ne postoji standard mirovanja. Moglo bi se jednako dobro reći da tijelo *A* miruje, a da se tijelo *B* giba stalnom brzinom u odnosu na *A*, jednako kao i da je tijelo *B* na miru, a tijelo *A* se giba. Na primjer, ako za trenutak zanemarimo rotaciju Zemlje i njeno gibanje oko Sunca, moglo bi se reći da Zemlja miruje, a da vlak po njoj putuje prema sjeveru brzinom od stotinu kilometara na sat ili da vlak miruje, a Zemlja se giba prema jugu stotinu kilometara na sat. Ako netko obavlja u vlaku pokuse s tijelima u gibanju, svi Newtonovi zakoni i dalje će vrijediti. Na primjer, igrač stolnog tenisa u vlaku ustanovit će da se loptica pokorava Newtonovim zakonima jednako kao i loptica na

čvrstom tlu. Stoga fizikalno gledajući nema načina ustanoviti putuje li to vlak ili Zemlja.

Nedostatak apsolutnog standarda mirovanja značilo je da se ne može odrediti jesu li se dva događaja, koja se zbivaju u različitim vremenima, dogodila u istome položaju u prostoru. Na primjer, pretpostavimo da naša ping-pong loptica u vlaku skakuće gore-dolje, potpuno okomito, udarivši pritom istu točku na stolu u vremenskom razmaku od jedne sekunde. Nekome tko stoji izvan vlaka pokraj pruge izgledalo bi da su se dva odbijanja loptice odigrala na međusobnoj udaljenosti od oko 30 metara, jer bi toliku udaljenost vlak prevalio u vremenu između dva odskoka loptice. Nepostojanje apsolutnog mirovanja značilo je stoga da se nekom događaju ne može pripisati apsolutni položaj u prostoru, kako je to vjerovao Aristotel. Položaji događaja i udaljenosti među njima bit će različiti za osobu u vlaku i osobu uz prugu, i nema razloga da se za jednu od tih dviju osoba smatra da ima povlašteni položaj prema drugoj.

Newton je bio vrlo zabrinut zbog nepostojanja apsolutnog položaja ili apsolutnog prostora, kako je on to zvao, jer se to nije slagalo s njegovom idejom apsolutnog Boga. U stvari, on je odbio prihvatiti nepostojanje apsolutnog prostora, premda je to proizlazilo iz njegovih zakona. Mnogi su ga oštro kritizirali zbog takvog iracionalnog pristupa, a pogotovo biskup Berkeley, filozof koji je smatrao da su svi tvarni predmeti te prostor i vrijeme samo prividi. Kad je poznatom dr. Johnsonu rečeno za Berkeleyjevo mišljenje, on je uzviknuo, "ovako ga pobijam", udarivši pritom vrhom cipele u poveći kamen.

I Aristotel i Newton vjerovali su u apsolutno vrijeme. To znači da su oni vjerovali da je moguće nedvojbeno mjeriti vremenski interval između dva događaja te da će to izmjereno vrijeme biti isto bez obzira tko ga mjeri, ako upotrebljava jednako dobru uru. Vrijeme je bilo potpuno nezavisno i odvojeno od prostora. To je uostalom i ono što bi većina ljudi smatrala zdravorazumskim gledištem. Ipak, morali smo promijeniti naše shvaćanje prostora i vremena. Premda naše

očito zdravorazumske predodžbe dobro služe kad se odnose na stvari poput jabuka ili planeta kad se relativno sporo gibaju, one potpuno zakazuju kod stvari koje se gibaju brzinama usporedivim s brzinom svjetlosti.

Činjenicu da svjetlost putuje nekom konačnom, premda vrlo velikom, brzinom prvi je otkrio 1676. danski astronom Ole Christensen Roemer. On je bio zamijetio da vremena potrebna Jupiterovim mjesecima za prolazak iza planeta nisu bila uvijek ista, što bi čovjek očekivao za mjesece koji kruže oko Jupitera istom stazom. No Zemlja i Jupiter gibaju se svaki na svoj način oko Sunca pa se udaljenosti između dva planeta tijekom vremena razlikuju. Roemer je zamijetio da pomrčine Jupiterovih mjeseći nastupaju to kasnije što smo mi (Zemlja) dalje od Jupitera. Zaključio da je to zbog toga što svjetlosti s tih mjeseći treba više vremena za putovanje do nas kad smo dalje. Njegova mjerenja promjena udaljenosti Zemlja — Jupiter nisu međutim bila jako točna pa je dobio za brzinu svjetlosti vrijednost od 225.000 kilometara u sekundi, umjesto sada nam znane vrijednosti od (okruglo) 300.000 kilometara u sekundi. Unatoč tome, Roemerov uspjeh, ne samo kao dokaz da svjetlost putuje konačnom brzinom već i kao izmjera te brzine, bio je vrlo značajan — pogotovu uzme li se u obzir da je učinjen jedanaest godina prije objavljivanja Newtonove *Principia Mathematica*.

Prikladna teorija širenja svjetlosti nije se pojavila sve do 1859. kad je britanski fizičar James Clerk Maxwell uspio objediniti djelomične teorije koje su se dotad upotrebljavale za opis električnih i magnetskih sila. Maxwellove jednadžbe su predviđale da se u združenom elektromagnetskom polju pojavljuju valoviti poremećaji te da će oni putovati određenom brzinom, poput valića od kamena bačenog na površinu jezera. Ako je valna dužina tih valova (udaljenost od jednog vrha vala do drugog) metar ili više, tada su oni ono što danas zovemo radiovalovi. Kraće valne dužine (nekoliko centimetara) nazivamo mikrovalovi, a još kraće (više od deset tisućinki centimetra) je već infracrveno. Vidljiva svjetlost ima valnu du-

žinu između četrdeset i osamdeset milijuntinki centimetra. Još kraće valne dužine nazivaju se ultraljubičasto zračenje, zatim rendgensko zračenje te gama-zrake.

Maxwellova teorija je predviđala neku stalnu brzinu tih radio i svjetlosnih valova. Ali Newtonova teorija se oslobodila ideje apsolutnog mirovanja pa ako za svjetlost pretpostavljamo da putuje nekom stalnom brzinom, mora se reći u odnosu na što se ta stalna brzina mjeri. Stoga je bilo predloženo postojanje neke tvari zvane "eter", koja je sveprisutna pa prožima i "prazan" prostor. Valovi svjetlosti putovali bi znači kroz eter kao što zvuk putuje kroz zrak pa bi i njihova brzina bila stoga brzina u odnosu na eter. Različiti promatrači, koji se pak samostalno gibaju u odnosu na eter, vidjeli bi da svjetlost stiže do njih različitim brzinama, dok bi brzina svjetlosti u odnosu na eter ostala ista. Jednako tako, budući da se Zemlja giba kroz eter dok kruži oko Sunca, brzina svjetlosti mjerena u smjeru gibanja Zemlje kroz eter (kad se gibamo prema izvoru svjetlosti) bila bi viša od brzine svjetlosti nadolazeće pod pravim kutom na to gibanje (kad se dakle ne gibamo prema izvoru). Godine 1887. Albert Michelson (koji je kasnije, kao prvi Amerikanac, dobio Nobelovu nagradu za fiziku) i Edward Morley napraviše u Školi za primijenjenu znanost u Clevelandu vrlo brižljivo proveden pokus. Usporedili su brzinu svjetlosti u smjeru gibanja Zemlje oko Sunca s onim iz smjera okomitog na to gibanje. Na njihovo veliko iznenađenje, obje te brzine bile su potpuno jednake.

Između 1887. i 1905. bilo je više pokušaja, među kojima je najznačajniji onaj nizozemskog fizičara Hendrika Lorentza, da se rezultati Michelson-Morleyevog pokusa objasne kao posljedica kontrakcije dužina i usporavanja ura kad se oni gibaju kroz eter. Međutim, u slavnom radu iz 1905. godine dotad nepoznati činovnik u švicarskom patentnom uredu, Albert Einstein, objašnjava da je čitava zamisao o eteru nepotrebna, ukoliko se napusti zamisao o apsolutnom vremenu. Slično je gledište iznio nekoliko tjedana kasnije vodeći francuski matematičar Henri Poincaré. Einsteinovi dokazi su bili bliži fizici

negoli oni Poincaréa, koji je na to gledao kao na matematički problem. Einsteinu se obično pripisuje zasluga za novu teoriju, ali pamti se da je i Poincaréovo ime povezano s njenim važnim dijelom.

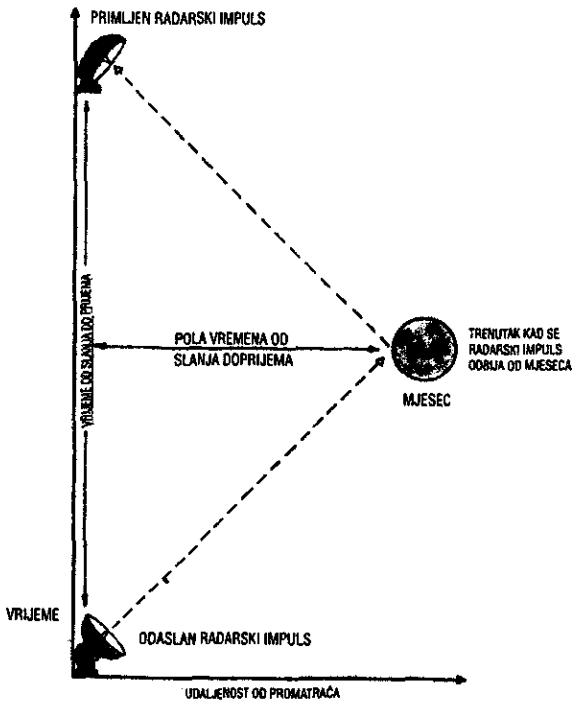
Temeljni postulat teorije relativnosti, kako je nazvana, je da su zakoni znanosti isti za sve promatrače koji se slobodno gibaju, bez obzira kojom brzinom. To je bilo istina za Newtonove zakone gibanja, ali sada je zamisao bila proširena tako da uključuje Maxwellovu teoriju i brzinu svjetlosti: svi promatrači mjere istu brzinu svjetlosti, bez obzira kako se brzo gibali. Ova jednostavna zamisao povlači za sobom neke značajne posljedice. Možda su najpoznatije jednakost mase i energije, izražena slavnom Einsteinovom jednadžbom $E = mc^2$ (gdje je E energija, m masa, a c brzina svjetlosti) i zakon da ništa ne može putovati brže od brzine svjetlosti. Zbog jednakosti mase i energije, energija koju neko tijelo nosi zbog svoga gibanja dodavat će se njegovoj masi. Drugim riječima, bit će mu sve teže povećavati brzinu. Ovaj posljedak postaje stvarno značajan tek kod tijela koji se gibaju brzinama bliskima brzini svjetlosti. Na primjer, kod brzine od 10% brzine svjetlosti masa tijela je samo 0,5% veća od mase u mirovanju, dok se kod 90% brzine svjetlosti masa tijela udvostručuje. Kako se tijelo približava brzini svjetlosti, njegova masa raste sve naglije pa mu je potrebno sve više i više energije za daljnje ubrzavanje. Zapravo, ono neće nikada postići brzinu svjetlosti, jer bi u tom slučaju njegova masa postala beskonačnom, a zbog jednakosti mase i energije trebalo bi uložiti beskonačnu energiju da bi se to postiglo. Zbog toga je svako obično tijelo teorijom relativnosti ograničeno na gibanje samo brzinama manjima od brzine svjetlosti. Samo svjetlost i drugi valovi bez stvarne mase mogu putovati brzinom svjetlosti.

Jednako značajna posljedica relativnosti je način na koji nam je izmijenila naše poimanje prostora i vremena. U Newtonovoj teoriji, ako se zraka svjetlosti pošalje s jednog mjesta na drugi, različiti promatrači bi se složili o vremenu trajanja putovanja (jer je vrijeme apsolutno), ali ne bi se

uvijek složili o tome koliko daleko je svjetlost putovala (jer prostor nije apsolutan). Budući da je brzina svjetlosti u stvari udaljenost koju prijeđe, podijeljeno s vremenom trajanja putovanja, različiti promatrači mjerili bi različite brzine svjetlosti. Suprotno tome, po teoriji relativnosti svi promatrači *moraju* ustanoviti istu brzinu svjetlosti. Oni se, međutim, ipak neće složiti oko udaljenosti koju je svjetlost prevalila pa se stoga moraju i razići i oko pitanja vremena koje je pritom proteklo. (Proteklo vrijeme je udaljenost koju prevali svjetlost — o čemu se promatrači ne slažu — podijeljena s brzinom svjetlosti — u čemu se slažu da je ista.) Drugim riječima, teorija relativnosti raskida s idejom o apsolutnom vremenu! Izgleda da svaki promatrač mora imati svoju vlastitu mjeru vremena, kakvu bilježi ura koju on nosi sa sobom, te da se jednake ure što ih nose razni promatrači neće nužno podudarati u pokazivanim vremenima.

Svaki promatrač bi mogao upotrijebiti radar i — šaljući impulse svjetlosti ili radiovalova — ustanoviti gdje i kada se neki događaj zbije. Dio impulsa se reflektira od događaja i promatrač mjeri vrijeme koje protekne do primanja jeke. Vrijeme kad se događaj (refleksija) zbije je pola vremena proteklog od slanja impulsa do primanja njegove jeke: udaljenost događaja je ta polovica vremena pomnožena s brzinom svjetlosti. (Događaj, u ovom smislu, je nešto što se događa u jednoj točki prostora, i u određenoj točki vremena.) Ova zamisao je prikazana na slici 2.1 koja je primjer prostorvremenskog dijagrama. Koristeći ovaj postupak, promatrači koji se gibaju jedan u odnosu na drugoga, utvrdit će za potpuno isti događaj različita vremena i položaje. Mjerenja ni jednog osobitog promatrača nisu ništa više točna od mjerenja bilo kojeg drugog promatrača, ali su sva ta mjerenja u srodstvu. Svaki promatrač može točno odrediti koje će vrijeme i položaj dodijeliti događaju neki drugi promatrač, pod uvjetom da mu je poznata promatračeva brzina u odnosu na njega.

I dandanas koristimo ovu metodu za točna mjerenja udaljenosti, jer vrijeme možemo mjeriti s mnogo većom točnošću



SLIKA 2.1 Vrijeme se mjeri okomito, a udaljenost od promatrača mjeri se vodoravno. Promatračev put kroz prostor i vrijeme prikazan je kao okomita crta lijevo. Staze svjetlosnih zraka (radarskih impulsa) do i od događaja prikazane su crtkanim dijagonalama.

negoli dužinu. U stvari, metar i je definiran kao udaljenost koju prevali svjetlost za 0,000000003335640952 sekunde, mjereno atomskom (cezijevi atomi) urom. (Ovaj neobičan broj posljedica je povijesne definicije metra — kao razmaka između dvije oznake na posebnoj šipci od platine i iridija koja se čuva u Parizu.) Shodno tome, možemo uvesti mnogo prikladniju novu dužinu zvanu svjetlosna sekunda. Ona je jednostavno definirana kao udaljenost koju svjetlost prevali za jednu sekundu. U teoriji relativnosti, sad definiramo udaljenost pomoću vremena i brzine svjetlosti pa tako automatski slijedi da će svaki promatrač mjeriti da svjetlost ima istu brzinu (po definiciji, 1 metar u 0,000000003335640952 sekunde). Nema potrebe za uvođenjem zamisli o eteru, čije se prisutnost iona-

ko ne može otkriti, kao što je to pokazao Michelson-Morleyev pokus. Međutim, teorija relativnosti nas sili na temeljitu promjenu naših ideja o prostoru i vremenu. Moramo prihvatiti da vrijeme nije potpuno odvojeno i nezavisno od prostora već je združeno s njim i oblikuje nešto što zovemo prostorvrijeme.

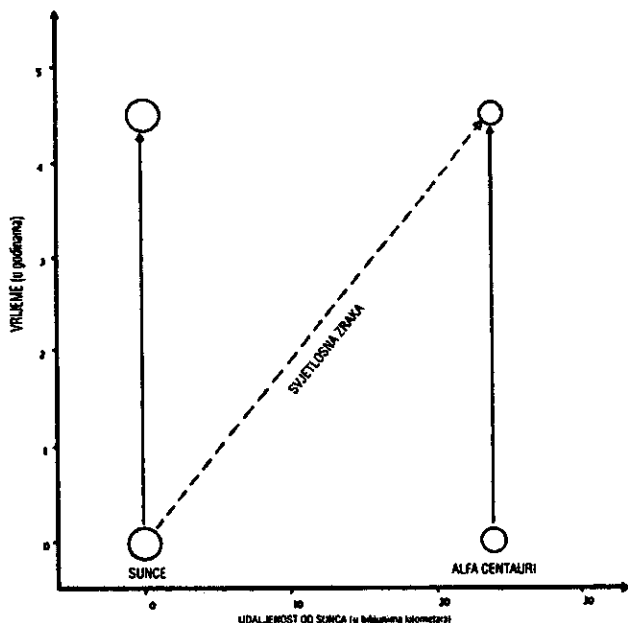
Poznato nam je i iz općeg iskustva da se položaj neke točke u prostoru može opisati pomoću tri broja ili koordinata. Na primjer, može se reći da je neka točka u nekoj sobi udaljena dva metra od jednog zida, jedan metar od drugog i dva metra iznad poda. Ili, može se reći da neka točna ima određenu geografsku širinu i dužinu te visinu iznad morske razine. Slobodni smo upotrijebiti bilo koje tri raspoložive koordinate, premda one imaju samo ograničeni doseg važnosti. Nitko neće izraziti položaj Mjeseca brojem kilometara sjeverno i brojem kilometara zapadno od Piccadilly Circusa i jedan metar iznad razine mora. Umjesto toga, izrazit će njegov položaj pomoću udaljenosti od Sunca, udaljenosti od ravnine ekliptike i kutom što ga zatvaraju spojnica Mjesec-Sunce i, recimo, spojnica Sunce-Alfa Centauri, nama bliska zvijezda. A čak ni takve koordinate ne bi bile od velike koristi pri opisivanju položaja Sunca u našoj Galaktici ili položaja naše Galaktike u lokalnoj skupini galaktika. U stvari, možemo čitav svemir opisivati pomoću niza preklapajućih ulomaka. U svakome ulomku, može se za označavanje položaja neke točke upotrijebiti skup od tri koordinate.

Pojmom "događaj" nazivamo nešto što se dogodilo u nekoj posebnoj točki prostora i u nekom posebnom vremenu. Stoga se položaj može opisati pomoću četiri broja ili koordinata. I opet, izbor koordinata je proizvoljan; mogu se upotrijebiti bilo koje tri dobro određene prostorne koordinate i neka mjera vremena. U relativnosti, nema neke stvarne razlike između koordinata vremena i prostora, kao što nema razlika ni između bilo koje dvije prostorne koordinate. Možemo odabrati i neki novi skup koordinata u kojem bi, recimo, prva prostorna koordinata bila kombinacija stare prve i druge prostorne koordinate. Na primjer, umjesto mjerenja položaja neke točke

na Zemlji u kilometrima sjeverno od Piccadillyja i kilometrima zapadno od Piccadillya, mogu se upotrijebiti kilometri sjeveroistočno od Piccadillya i kilometri sjeverozapadno od Piccadillya. Slično, u relativnosti, može se upotrijebiti nova vremenska koordinata koja je bila staro vrijeme (u sekundama) plus udaljenost (u svjetlosnim sekundama) sjeverno od Piccadillya.

Često je od pomoći razmišljati o četiri koordinate događaja kao o određenjima njegovog položaja u četverodimenzionom prostoru zvanom prostorvrijeme. Nemoguće je zamisliti četverodimenzioni prostor. Ja osobno smatram da je već dovoljno teško predočiti sebi trodimenzioni prostor! Međutim, lako je nacrtati dijagrame dvodimenzionih prostora, kakva je površina Zemlje. (Površina Zemlje je dvodimenziona, jer položaj neke točke na njoj može biti određen dvjema koordinatama, širinom i dužinom.) Ja ću upotrebljavati dijagrame u kojima je (rastuće) vrijeme nanoseno na okomitu, a jedna od prostornih dimenzija na vodoravnu koordinatu. Druge dvije prostorne koordinate su u ovakvom prikazu zanemarene ili će, ponekad, jedna od njih biti ucrtane u perspektivi. (To zovemo prostorvremenski dijagrami, poput onog na slici 2.1) Na primjer, na slici 2.2 vrijeme je označeno u godinama, a udaljenost između Sunca i Alfa Centauri na vodoravnoj koordinati mjeri se kilometrima (točnije, bilijunima kilometara). Staze od Sunca i do Alfe Centauri kroz prostorvrijeme prikazane su kao okomite crte lijevo i desno u dijagramu. Zraka svjetlosti slijedi isprekidanu dijagonalnu crtu i da bi stigla od Sunca do Alfe Centauri treba joj oko četiri godine.

Kako smo vidjeli, Maxwellove jednadžbe predviđale su da brzina svjetlosti mora biti ista bez obzira na brzinu izvora, a to je i potvrđeno točnim mjerenjima. Iz toga slijedi da ako se svjetlosni impuls emitira u nekom trenutku iz neke točke prostora, on će se tijekom vremena širiti kao kugla svjetlosti čija veličina i položaj su nezavisni od brzine izvora. Nakon jedne milijuntinke sekunde svjetlost će, šireći se, oblikovati kuglu polumjera 300 metara; nakon dvije milijuntinke sekunde njen polumjer

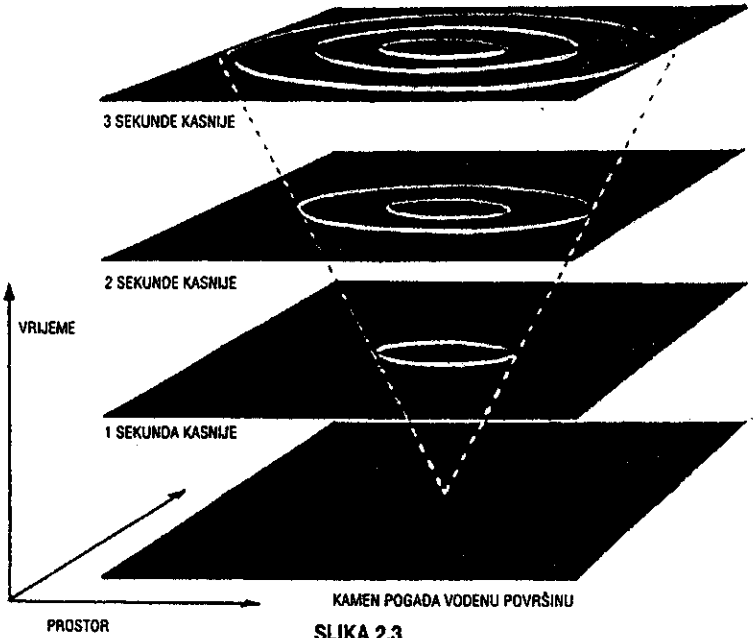


SLIKA 2.2

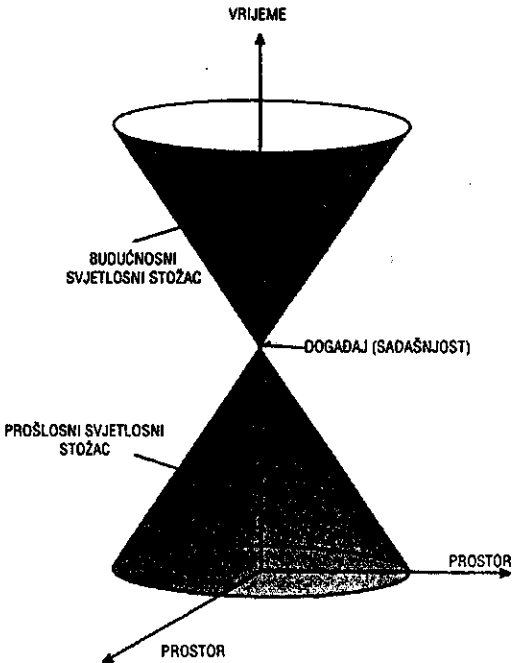
će biti 600 metara i tako dalje. Bit će poput valova koji se šire na površini jezera nakon bačenog kamena. Valovi se šire kao krugovi, tijekom vremena sve većeg polumjera. Zamislimo li trodimenzioni model sastavljen od dvije dimenzije površine jezera i jedne dimenzije vremena, šireći krug valnog brijega prikazat će nam se u obliku stošca s vrhom na mjestu i u vremenu pada kamena u vodu (slika 2.3). Slično tome, svjetlost koja se širi iz nekog događaja oblikuje trodimenzioni stožac u četverodimenzionom prostorvremenu. Ovaj stožac se naziva budućnosni svjetlosni stožac događaja. Na isti način možemo nacrtati drugi stožac, zvan prošlosni svjetlosni stožac, a predstavlja niz događaja iz kojih svjetlost može stići do danog događaja (slika 2.4).

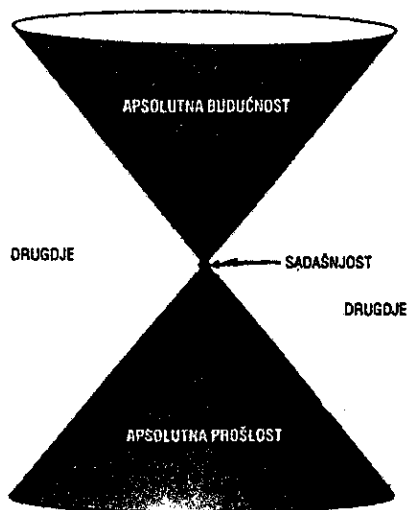
Prošlosni i budućnosni svjetlosni stošci nekog događaja P dijele prostorvrijeme u tri područja (slika 2.5). Apsolutna budućnost događaja P je područje unutar budućnosnog sve-

ŠIRENJE NABORA NA VODI

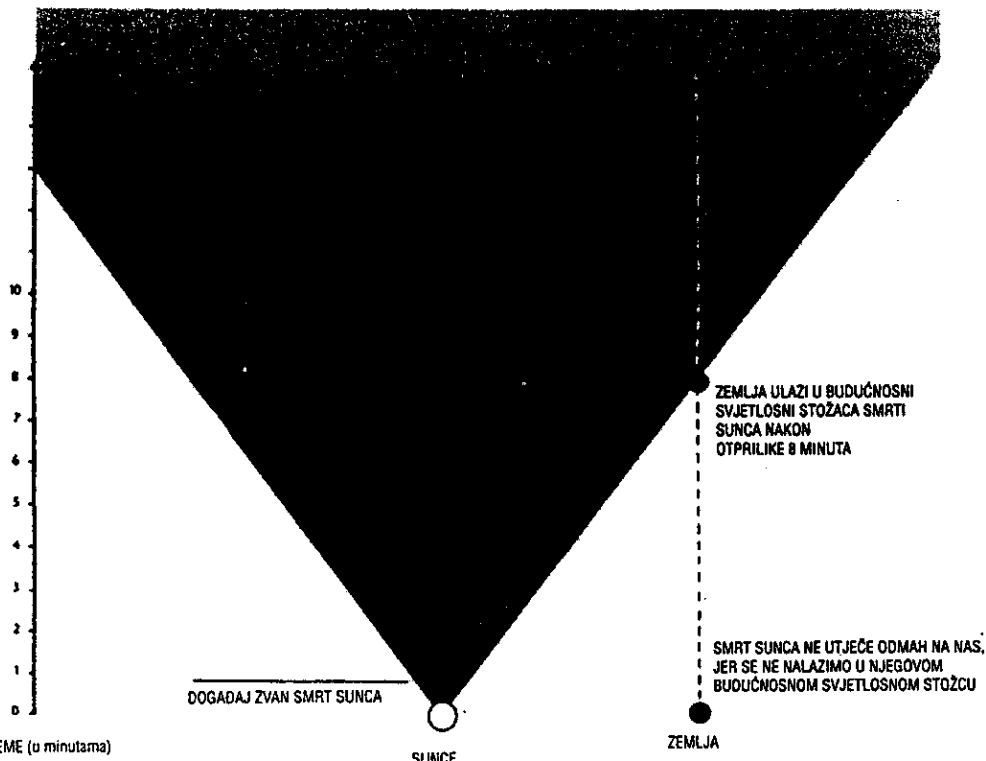


SLIKA 2.3



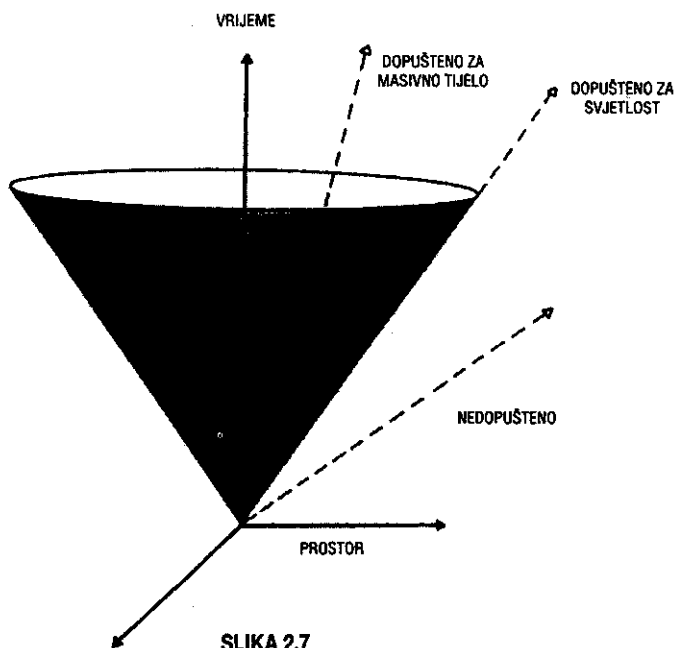


SLIKA 2.5



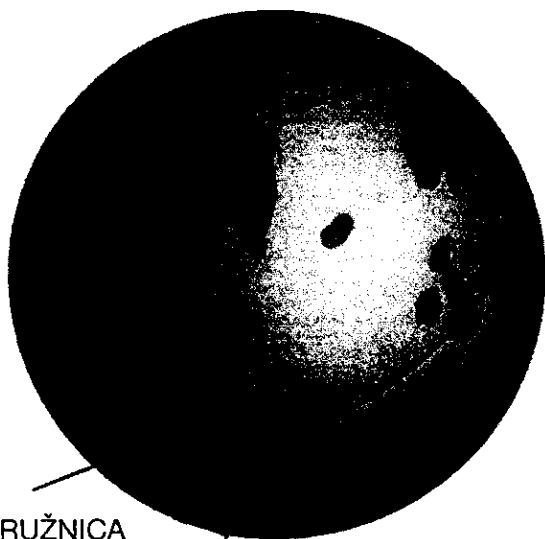
tlosnog stošca. To je skup svih događaja na koje bi moglo djelovati ono što se dogodi u P . Događaje izvan svjetlosnog stošca od P ne mogu pak doseći signali iz P , jer ništa ne može putovati brže od svjetlosti. Stoga na te događaje ne može nikako utjecati ono što se dogodi u P . Apsolutna prošlost događaja P je područje unutar prošlognog stošca. To je skup svih događaja iz kojih signali, putujući brzinom svjetlosti ili nižom, mogu doseći P . To je dakle skup svih događaja koji možda mogu utjecati na ono što se dogodi u P . Znamo li što se događa u neko određeno vrijeme svugdje u području prostora koje leži unutar prošlognog stošca od P , možemo predvidjeti što će se dogoditi u P . Preostalo područje ("drugdje") je područje prostorvremena koje ne leži ni u prošlosnom ni u budućnosnom svjetlosnom stošcu od P . Događaji u području drugdje ne mogu imati utjecaja niti biti pod utjecajem događaja u P . Na primjer, ako bi Sunce točnog ovoga trenutka prestalo sjati, to ne bi zasad imalo nikakvog utjecaja na zbivanja na Zemlji, jer bi u trenutku gašenja Sunca Zemlja bila u odnosu na taj događaj u području "drugdje" (slika 2.6). O događaju bismo saznali tek nakon osam minuta, koliko je svjetlosti potrebno da stigne od Sunca do nas. Tek tada bi događaji na Zemlji ležali u budućnosnom svjetlosnom stošcu događaja koji se zove gašenje Sunca. Slično tome, mi ne znamo što se ovoga trenutka događa daleko u svemiru: sada primana svjetlost dalekih galaktika krenula je od njih prije milijuna godina, a u slučaju najudaljenijih nebeskih tijela koja vidimo, svjetlost ih je napustila prije osam milijardi godina. Kad gledamo svemir, vidimo ga onakvog kakav je bio u prošlosti.

Zanemarimo li gravitacijske učinke, kako su 1905. učinili Einstein i Poincaré, imamo ono što se zove specijalna teorija relativnosti. Za svaki događaj u prostorvremenu možemo konstruirati neki svjetlosni stožac (skup svih mogućih putova svjetlosti koju u prostorvremenu emitira taj događaj), a budući da je brzina svjetlosti ista za sve događaje i za sve smjerove, svi svjetlosni stošci će biti jednaki i svi okrenuti u istom smjeru. Teorija nam također veli da ništa ne može biti brže od sve-



tlosti. To znači da staza bilo kojeg tijela kroz prostor i vrijeme mora biti predočena crtom koja leži unutar svjetlosnog stošca svakog događaja na njemu (slika 2.7).

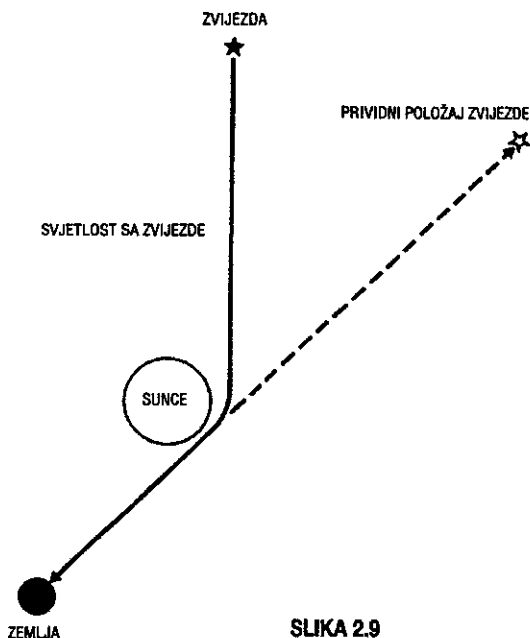
Specijalna teorija relativnosti vrlo uspješno je objasnila zašto brzina svjetlosti izgleda ista svim promatračima (kako je to ustanovio Michelson-Morleyev pokus) te je opisala što se događa kad se tijela gibaju brzinama bliskim brzini svjetlosti. Međutim, bila je u neskladu s Newtonovom teorijom gravitacije koja izriče da se tijela međusobno privlače silom čiji je iznos zavisao o udaljenosti među njima. To je značilo da ako se jedno od tijela pomakne, sila na drugo tijelo će se trenutno promijeniti. Drugim riječima, gravitacijski učinci bi morali putovati beskonačnom brzinom, umjesto brzinom svjetlosti ili manje, kako to zahtijeva teorija relativnosti. Einstein je između 1908. i 1914. bezuspješno pokušavao naći teoriju gravitacije koja bi bila u skladu s teorijom relativnosti. Konačno, 1915. je predložio rješenje koje je poznato kao opća teorija relativnosti.



VELIKA KRUŽNICA

SLIKA 2.8

Einsteinova je revolucionarna zamisao bila da gravitacija nije sila poput drugih sila, već je činjenica koja proizlazi iz prirode prostorvremena: ono naime nije ravno, kao što se nekoć smatralo, već je savijeno ili "iskrivljeno" zbog raspodjele masa i energije u njemu. Tijela poput Zemlje ne prisiljava na gibanje po zakrivljenim stazama sila zvana gravitacija; umjesto toga, ona slijede stazu koja je u zakrivljenom prostoru jednaka pravcu u ravnom prostoru, a zove se geodetska crta. Geodetska crta je najkraći (ili najduži) put između dvije točke. Na primjer, površina Zemlje je dvodimenzioni zakrivljeni prostor. Geodetska crta na Zemlji zove se i velika kružnica i ona je najkraća spojnica između dvije točke (crtež 2.8). Budući da je geodetska crta najkraća spojnica između dvije zračne luke, ona je i put po kojem će navigator zrakoplova voditi pilota tijekom leta. U općoj teoriji relativnosti, tijela se u četverodimenzionom prostorvremenu uvijek gibaju po pravcima, ali se nama unatoč tomu čini da se ta tijela u našem trodimen-



SLIKA 2.9

ziona prostora gibaju duž zakrivljenih staza. (Nešto slično tomu zamjećujemo prilikom promatranja leta zrakoplova iznad brežuljkastog kraja. Premda zrakoplov u trodimenzionom prostoru leti ravno, po pravcu, njegova sjena na tlu putuje po zakrivljenoj stazi.)

Masa Sunca zakrivljuje prostorvrijeme na taj način da nama izgleda da, premda u četverodimenzionom prostoru putuje ravno, Zemlja slijedi kružnu stazu u trodimenzionom prostoru. Zapravo, staze planeta predviđene teorijom relativnosti gotovo su točno jednake onima kakve predviđa Newtonova teorija gravitacije. Ipak, u slučaju Merkura, koji zbog blizine Suncu osjeća najjači gravitacijski učinak te ima dosta eliptičnu stazu, opća teorija relativnosti predviđa da će duža os elipse rotirati oko Sunca za otprilike jedan stupanj u deset tisuća godina. Premda je taj učinak sitan, on je zamijećen još prije 1915. i poslužio je kao jedan od prvih potvrda valjanosti Einsteinove teorije. U posljednje vrijeme su i kod drugih

planeta zahvaljujući radaru izmjerena još manja odstupanja staza planeta od Newtonove teorije i sva se ona potpuno slažu s pretkazivanjima opće teorije relativnosti.

I svjetlosne zrake moraju u prostorvremenu također slijediti geodetske crte. I opet, činjenica da je prostor zakrivljen znači da svjetlost ne putuje prostorom pravocrtno. Tako opća teorija relativnosti pretkazuje da će se svjetlost savijati u gravitacijskom polju. Na primjer, teorija pretkazuje da će svjetlosni stošci točaka blizu Sunca biti blago svinuti prema unutra zbog mase Sunca. To znači da će svjetlost s neke daleke zvijezde, koja svjetlost na putu do našeg oka slučajno prolazi vrlo blizu Sunca, doživjeti malen otklon sa svog pravca. Nama, promatračima na Zemlji, će se činiti da je zbog toga zvijezda promijenila položaj u odnosu na onaj kad nije bila tik do Sunca (slika 2.9) Dakako, kad bi svjetlost sa zvijezde uvijek prolazila tik do Sunca, mi ne bismo bili u stanju reći je li to svjetlost otklonjena ili je zvijezda doista ondje gdje vidimo. Međutim, budući da se Zemlja giba oko Sunca, razne se zvijezde povremeno nađu u položaju tik do Sunca pa im se tada svjetlost savija. Tada i promijene svoj prividni položaj u odnosu na druge zvijezde.

U uobičajenim okolnostima je vrlo teško zamijetiti ovaj učinak gravitacijskog polja, jer je zbog sjaja Sunca nemoguće promatrati zvijezde na danjem nebu, a pogotovo ne one tik do Sunca. Međutim, ovaj učinak je zamjetan tijekom totalne pomrčine Sunca, kad je Sunčeva sjajna ploča pokrivena Mjesecom. Einsteinova pretkazivanja otklona zraka svjetlosti nisu se mogla provjeriti odmah 1915, jer je u tijeku bio Prvi svjetski rat; tek je 1919. jedna britanska ekspedicija, promatrajući pomrčinu Sunca iz Zapadne Afrike, ustanovila da je svjetlost zaista otklonjena od Sunca, točno kako je to tražila teorija. Ovaj dokaz jedne njemačke teorije od strane britanskih istraživača bijaše pozdravljen kao veliki čin izmirenja između dvije zemlje nakon rata. Ironija je ipak, da su kasnija ispitivanja fotografija s te ekspedicije pokazala kako su na njima pogreške jednako tolike velika koliki su i učinci koje je trebalo

snimiti. Bila je to dakle stvar čiste sreće ili pak poznavanje rezultata koji se želio dobiti, što i nije neobičan slijed događaja u znanosti. Dakako, otklon svjetlosti kasnije je dovoljno točno potvrđen u brojnim drugim promatranjima.

Drugo predviđanje opće teorije relativnosti je sporiji tijek vremena u blizini tijela velikih masa, poput Zemlje, a pojava nastaje zbog veze između energije svjetlosti i njene frekvencije (to jest broja valova svjetlosti u sekundi): što veća energija — to viša frekvencija. Kad svjetlost putuje kroz gravitacijsko polje Zemlje, gubi energiju i time mu i frekvencija opada. (To znači da raste vremenski razmak između jedne kreste vala i sljedeće). Nekome tko je na većoj visini činit će se da sve što je ispod njega treba više vremena za neko događanje. Ovo predviđanje teorije ispitano je 1962. pomoću dvije vrlo točne iste ure, jedne postavljene na vrhu, a druge pri dnu nekog vodenog tornja. Za uru pri dnu, koja je bila Zemlji bliže, ustanovljeno je da ide sporije, za točno onoliki iznos koliki je predviđen općom teorijom relativnosti. Razlika u hodu ura na različitim visinama iznad morske razine od znatne je praktične važnosti sada, otkako su u uporabi vrlo točni navigacijski sustavi koji koriste signale sa satelita. Kad bi se zanemarili učinci pretkazani teorijom relativnosti, pogreška u izračunatom položaju iznosila bi više kilometara!

Newtonovi zakoni gibanja pokopali su ideju o apsolutnom položaju u prostoru. Teorija relativnosti oslobodila se apsolutnog vremena. Pogledajmo par blizanaca. Pretpostavimo da jedan od njih ode živjeti na vrh planine, a drugi ostaje na morskoj razini. Prvi blizanac bi stario brže od drugoga. Dakle, ako se ponovno sretnu, jedan će biti stariji od drugoga. U našem primjeru starosna razlika bila bi vrlo sitna, no bila bi bitno veća kad bi jedan od blizanaca krenuo na dugačak put u svemirskom brodu brzinom bliskom brzini svjetlosti. Kad bi se vratio s puta, bio bi mnogo mlađi od blizanca koji je ostao na Zemlji. Ovo ispričano poznato je pod nazivom paradoks blizanaca, no to je paradoks samo onome kome je u glavi ideja o apsolutnom vremenu. U teoriji relativnosti ne postoji jedin-

stveno apsolutno vrijeme već umjesto njega svaki pojedinac ima svoju osobnu mjeru vremena koja zavisi o tome gdje je on i kako se giba.

Prije 1915. prostor i vrijeme bijahu zamišljeni kao čvrsta arena u kojoj se zbivaju događaji, ali na koju ne utječe ono što se u njoj odigrava. Tako je bilo čak i u specijalnoj teoriji relativnosti. Tijela su se gibala, sile privlačile ili odbijale, ali vrijeme i prostor su jednostavno ustrajavali, nedodirnuti. Bilo je posve prirodno smatrati da su prostor i vrijeme postojali oduvijek i zauvijek.

Međutim, u općoj teoriji relativnosti slika se bitno mijenja. Vrijeme i prostor sada su dinamičke veličine: kad se tijelo giba, odnosno djeluje neka sila, to utječe na zakrivljenost prostora i vremena — a zauzvrat ustroj prostorvremena utječe na način na koji se tijela gibaju i sile djeluju. Prostor i vrijeme ne samo da utječu već i na njih same utječe sve što se događa u svemiru. Baš kao što se ne može govoriti o događanjima u svemiru bez pojmova prostora i vremena, jednako tako u općoj teoriji relativnosti nema smisla govoriti o prostoru i vremenu izvan granica svemira.

Ovo novo razumijevanje prostora i vremena revolucioniralo je naš pogled na svemir tijekom posljednjih desetljeća. Stara predodžba o bitno nepromjenjivom svemiru koji bi mogao postojati, i nastaviti postojati, napokon je zamijenjena pojmom dinamičkog, širećeg svemira koji čini se da je započeo prije nekog konačnog vremena i koji može završiti u nekom konačnom vremenu u budućnosti. Ova revolucija je sadržaj sljedećeg poglavlja. A godinama kasnije bijaše također i polazište moga rada u teorijskoj fizici. Roger Penrose i ja smo pokazali da iz Einsteinove opće teorije relativnosti proizlazi da svemir mora imati početak i, možda, kraj.