

# Skrivena jakost gravitacije i tamna materija

7

*Jesi li shvatio prostranstvo Zemlje?  
Gdje je put do boravišta svjetlosti,  
A gdje je mjesto tame?*

*Knjiga o Jobu*

Stvari su padale prema dolje od pamtivijeka. Od davnine se vjerovalo da Mjesec kruži oko Zemlje. Isaac Newton (1642.- 1727.) je bio prvi čovjek koji je shvatio da je uzrok ovih dviju različitih pojava jedna te ista sila. Newtonov zakon gravitacije je bio teorijski, zapravo prilično jednostavna matematička apstrakcija: svako tijelo privlači svako drugo tijelo silom koja je upravo proporcionalna umnošku njihovih masa, a obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti među njima. Gravitacija je sila koja djeluje na daljinu. Stalno pljuskanje valova o obalu djelomično je izazvano smjenom plime i oseke. Mjesec i Sunce su daleko od nas, ali njihov gravitacijski utjecaj vrlo je stvaran i osjetan ovdje na Zemlji. Konačno, i učinak Zemljine sile teže svakodnevno osjećamo kao vlastitu težinu. Isti zakon gravitacije vrijedi bilo gdje u svemiru, a **gravitacijska sila** je odgovorna za formiranje galaktika, zvijezda i planeta.

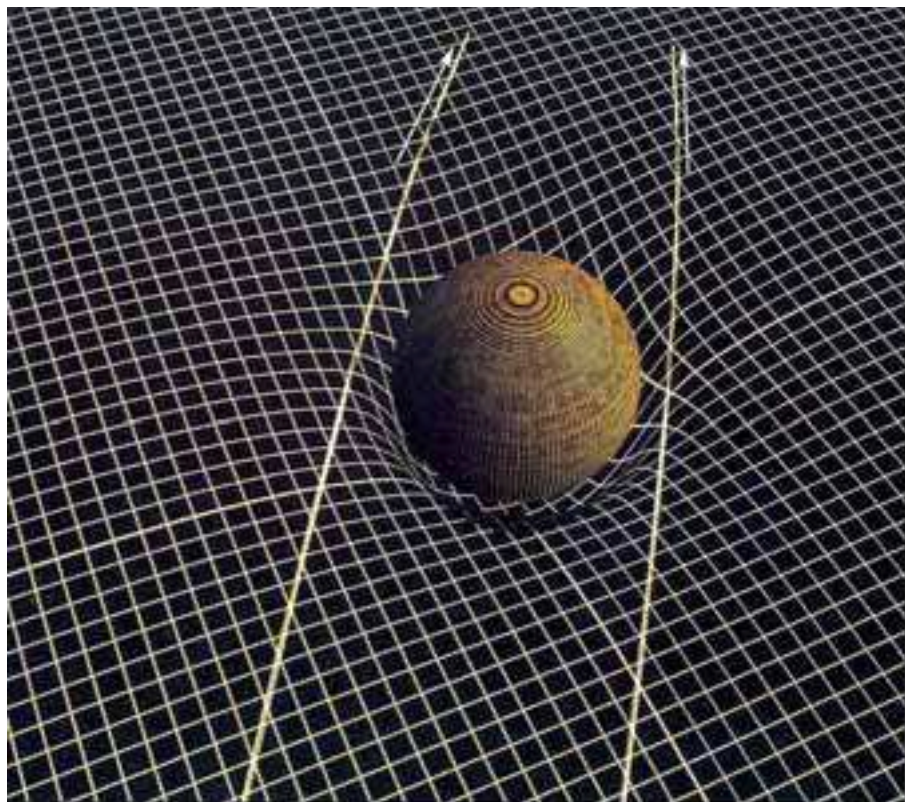


PIŠE: **MILICA KRČMAR**

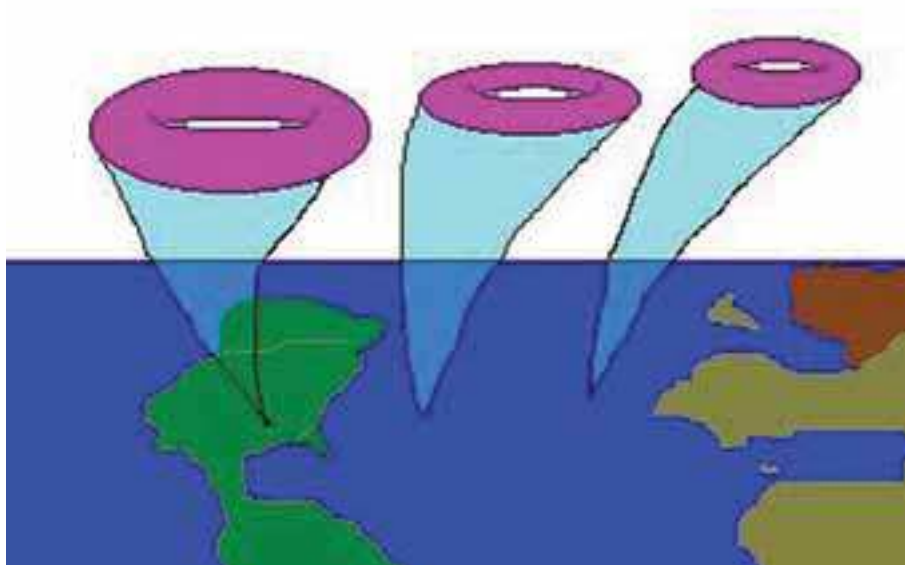
Masa je ono svojstvo materije koje je uzrok privlačenja drugog tijela, kao u Newtonovom zakonu o gravitaciji. Ili, masa je ono svojstvo tijela kojim se ono opire promjeni brzine, kao u drugom Newtonovom zakonu gibanja. U skladu s današnjim razumijevanjem prirode, sve materijalno što nas okružuje sazdano je od atoma, koji su opet sazdani od vrlo guste središnje jezgre okružene oblakom elektrona. Atome na okupu drži **elektromagnetska sila**, koja je osnova svih kemijskih reakcija. Naš svakidašnji život ovisi o strukturi atoma. Električna polja daju masi tjelesnost. Bez električnih sila, u svemiru ne bi postojale stvari, sve bi se raspalo u nevidljivu finu prašinu. Gusta jezgra atoma sastavljena je, pak, od protona i neutrona, a oni od elementarnih

čestica takozvanih kvarkova. Sve njih zajedno u jezgri atoma drži **jaka nuklearna sila**. Ona je važna u nuklearnim reakcijama kao što su fuzija i fisija, dok **slaba nuklearna sila** određuje radioaktivni raspad, odnosno spontanu emisiju beta čestica iz unutrašnjosti jezgre.

Od četiriju poznatih temeljnih sila (ili međudjelovanja) prirode – gravitacije, elektromagnetizma, slabe i jake nuklearne sile – gravitacija je daleko najslabija. Na primjer, gravitacijsko privlačenje između dva protona je 35 redova veličine (sto milijuna milijarda milijarda milijarda puta) slabije od njihovog elektromagnetskog odbijanja. Značaj gravitacije, međutim, nije u njejoj jakosti, već u njejoj univerzalnosti....



Masivno tijelo zakrivljuje prostor-vrijeme, savijajući tako staze svjetlosti u svojoj blizini.



**Prikazano na ekstremno shematski način: svakoj točki našeg četverodimenzionalnog svijeta pridruženo je klupko sitno smotanih dodatnih prostornih dimenzija.**

Objekti ne mogu biti gravitacijski neutralni, sva tijela s masom se privlače. Prema tome, kod dovoljno velikog broja čestica materije, gravitacijska sila preteže u odnosu na sve ostale sile. To je i razlog što gravitacija određuje razvoj, i u konačnici, sudbinu svemira. Čak i kada su u pitanju tijela veličine zvijezda, privlačno djelovanje gravitacije može nadjačati sve ostale sile i dovesti do urušavanja neke zvijezde do veličine kada je masa zvijezde stiješnjena u dovoljno mali prostor da gravitacijsko polje na njoj površini postaje toliko jako da mu ni svjetlost ne može pobjeći (takozvana crna jama).

Iz svakodnevnog iskustva znamo da živimo u trodimenzionalnom prostoru. Drugim riječima, položaj neke točke u prostoru možemo odrediti sa trima brojevima: na primjer, geografskom dužinom i širinom te nadmorskom visinom. Prvi matematički model prostora i vremena dao je Newton. U tom su modelu, prostor i vrijeme bili samo pozadina na kojoj su se odigravali događaji. Albert Einstein (1879.- 1955.) je 1915. godine izložio potpuno novi matematički model: opću teoriju relativnosti, koja povezuje vrijeme i tri dimenzije prostora u četverodimenzionalno prostor-vrijeme, koje nije ravno već je zakrivljeno, izobličeno pod utjecajem mase i energije u njemu. Naime, već je Einsteinova specijalna teorija relativnosti, objavljena 1905. godine, pokazala da su energija i masa samo pismo i glava jednog te istog novčića, povezane

zauvijek čuvenom jednadžbom  $E = m c^2$  (gdje  $E$  predstavlja energiju,  $m$  masu, a  $c$  brzinu svjetlosti).

Zakrivljenost prostor-vremena određena je rasporedom mase i energije u svemiru, ali tim rasporedom, s druge strane, upravlja baš zakrivljenost prostora.

**Newtonova gravitacijska sila zamijenjena je zakrivljenim prostorom.**

Okolnost da je prostor zakrivljen znači da i svjetlost ostavlja utisak kao da se ne kreće pravocrtno u prostoru. U skladu s teorijom, očekuje se da će svjetlost (s neke daleke zvijezde) koja prođe pokraj Sunca biti skrenuta za jedan mali kut pa će nekom

promatraču na Zemlji izgledati da se ta zvijezda nalazi na različitom mjestu. Na spektakularan način to je i potvrđeno 1919. godine, kada je jedna britanska ekspedicija, koja je pratila pomrčinu Sunca u zapadnoj Africi, pokazala da Sunce doista savija zrake svjetlosti što prolaze pokraj njega.

Znamo da se u fizici nove teorije grade na prethodnima, pri čemu se zadržavaju zamisli koje izdrže pokusne provjere. Također je važno razumjeti pojam djelomičnih teorija. Newtonov zakon gravitacije vrlo je precizan samo kada je gravitacija slaba. U jakim gravitacijskim poljima moramo ga zamijeniti Einsteinovom općom teorijom relativnosti. Međutim, kada se ispituju međudjelovanja na mikroskopskoj razini, kao što je singularitet Velikog praska (trenutak rođenja svemira) ili crna jama, opća teorija relativnosti mora se zamijeniti kvantnom gravitacijom.

Kvantne teorije sustava kakav je atom, koji sadrži konačan broj čestica, postavili su još dvadesetih godina prošlog stoljeća Heisenberg, Schroedinger i Dirac. Jedna od bitnih postavki kvantne mehanike je Heisenbergovo načelo neodređenosti. Ono kaže da postoje granice preciznosti našeg promatranja određenih fizičkih veličina, kao što su položaj, brzina, energija i vrijeme. To nije ograničenje mjernih instrumenata, već sama bit svemira. Na primjer, mi pretpostavljamo da vakuum u svemiru ne sadrži apsolutno ništa i stoga

...

<sup>1</sup> Parovi virtualnih čestica-antičestica ne mogu se neposredno opažati, ali se njihova posredna djelovanja mogu mjeriti. Na primjer, postojanje kvantnih fluktuacija osnovnog stanja eksperimentalno je potvrđeno takozvanim Casimirovim efektom, slabom silom između paralelnih metalnih ploča.



**Tehnika gravitacijskih leća (koje su predviđene općom teorijom relativnosti) pokazuje da je oko devet desetina mase jata galaktika u formi tamne materije (prikazana plavom bojom).**

ima nultu energiju. Ali, i u praznom prostoru, zbog principa neodređenosti pojavljuju se parovi virtualnih čestica- antičestica<sup>1</sup>, koji kratkotrajno opstaju, a onda se međusobno poništavaju. Problem je što bi ove kvantne fluktuacije vakuuma vodile na beskonačnu količinu energije osnovnog stanja (takozvana vakuumska energija). Budući da je energija (kao i materija) izvor gravitacije, ova beskonačna gustoća energije morala bi značiti da u svemiru postoji dovoljno gravitacijskog privlačenja da zakrivi prostor-vrijeme u jednu točku. Ali to očito nije slučaj. Mogućnost razrješenja problema beskonačnosti u kvantnoj gravitaciji danas se nazire u takozvanoj supersimetričnoj teoriji struna. Kvantna teorija struna nije, međutim, matematički konzistentna u četiri dimenzije, već samo pri deset ili jedanaest dimenzija. Premda nam se čini da deset ili jedanaest dimenzija ima malo što zajedničkog s prostor-vremenom kakvog znamo iz iskustva, osnovna zamisao je u tome da su sve ostale dimenzije tako sitno sklupčane da ih mi ne zamjećujemo; svjesni smo samo postojanja četiriju velikih i gotovo ravnih dimenzija. Štoviše, kad je opća teorija relativnosti pokazala da bismo ono što opažamo kao gravitacijsku silu mogli povezati sa zakrivljenošću prostora, nije više

bilo skandalozno razmišljati o tome da bi i druge sile mogle biti povezane sa zakrivljenošću još nekih dimenzija! **Možda bi se i sve prirodne sile dale objasniti teorijom koja predviđa postojanje dodatnih prostornih dimenzija** i prema kojoj su sve dimenzije, osim četiriju nam poznatih, smotane u krug s promjerom jednakim Planckovoj dužini (jedna stotisućinka milijardinke milijardinke milijardinke milimetra), zbog čega su danas nemjerljive.

**N**edavno su se, pak, pojavile zamisli da su jedna ili više dodatnih dimenzija razmjerno velike ili su čak beskonačne. Njihovo postojanje bi vodilo na zaključak da živimo na jednoj četverodimenzionalnoj površini ili brani u

jednom višedimenzionalnom prostor-vremenu. Takozvana obična materija (građena od atoma) te elektromagnetska, slaba i jaka nuklearna sila bile bi ograničene na branu i ponašale bi se stoga kao u četiri dimenzije. Za razliku od toga, gravitacija bi ispunjavala cjelokupno višedimenzionalno prostor-vrijeme. Budući da bi gravitacija bila proširena i u  $n$  dodatnih dimenzija, brže bi opadala s povećanjem udaljenosti (kao  $1/r^{2+n}$ ) nego što bi se to očekivalo (kao  $1/r^2$ ). Ako se ovo brzo opadanje gravitacijske sile proširi na astronomske udaljenosti, uočili bismo njegov utjecaj na staze planeta: one ne bi bile postojane, planeti bi se srušili na Sunce ili bi odbjegli u tamu međuzvezdanog prostora. Ali to se ne događa, a i ne bi se dogodilo ako bi se dodatne dimenzije završavale na drugoj brani<sup>2</sup>, ne predalekoj od brane na kojoj mi živimo. To bi značilo da se gravitacija ne bi mogla slobodno prostirati na udaljenostima većim od razmaka između brana, već bi njeno djelovanje bilo ograničeno na branu. Stoga bi staze planeta bile stabilne. S druge strane, gravitacija bi se brže mijenjala na udaljenostima manjim od razmaka između brana. U scenariju branskog svijeta, mi bismo živjeli na jednoj brani, ali u neposrednoj

<sup>2</sup> Umjesto da se dodatne dimenzije završavaju na drugoj brani, moguće je, također, da budu jako zakrivljene. Ta zakrivljenost sprečava gravitacijsko polje materije na brani da se širi daleko u dodatne dimenzije.



**Gravitacija tamne tvari odgovorna je i za raspored vidljive tvari u svemiru.**

blizini mogla bi postojati još jedna "brana-sjena". Taj svijet-sjenu ne bismo mogli vidjeti jer bi svjetlost bila ograničena na pojedinačne brane i ne bi se širila kroz međuprostor. Mogli bismo samo osjećati gravitacijski utjecaj materije s brane-sjene. Na našoj brani činilo bi se da su izvori te gravitacijske sile doista **"tamni"**, u smislu da je jedini način na koji ih možemo otkriti njihova gravitacija.

Pustimo, načas, po strani ove spekulativne zamisli o branskom svijetu. Zapravo, da bi se objasnio pomicanje zvijezda na rubovima galaktika, mora, kako izgleda, u galaktikama postojati više mase nego što iz promatranja zaključujemo da ima **vidljive (obične)** materije. I dok galaktike blistaju zahvaljujući "termonuklearnim pećima", što u središtima zvijezda sagorijevaju vodik u helij, natapajući svemir svjetlošću, **tamna materija** drži jata galaktika na okupu i zadržava zvijezde u njima da se ne razlete. Astronomi su napravili i karte te za sada neuhvatljive supstancije, odgovorne za raspored svega što vidimo na nebu. Predviđanja opće teorije relativnosti (gravitacija tamne tvari nabire prostor-vrijeme i savija zrake svjetlosti koje tuda prolaze) ukazuju na mogućnost da bi tamna tvar mogla sačinjavati i do devet desetina galaktičke materije. U vidljivom svemiru prevladava nevidljiva tvar<sup>3</sup>.

Pitanje o naravi, porijeklu i rasporedu tamne materije jedno je od najzbudljivijih neriješenih pitanja današnje fizike. Postoje jaki argumenti, povezani s prvobitnom sintezom atomskih jezgara, da je tamna tvar sačinjena od čestica sasvim različitih od protona, neutrona i elektrona koji tvore običnu materiju. Te egzotične elementarne čestice neće se zgrudati u nebeska tijela nego će tvoriti difuzni plin što protječe kroz galaktike. Budući da s običnom materijom reagiraju u najboljem slučaju tek neznatno, te bi čestice mogle

neopazice prolaziti kroz naše tijelo, kroz Zemlju. Možda tamna materija potječe od masa vrlo lakih čestica kao što su aksioni ili od još egzotičnijih vrsta čestica, kakve su WIMP-ovi (masivne čestice slabog međudjelovanja). Njihovo postojanje predviđaju suvremene teorije elementarnih čestica, premda još nisu otkrivene u pokusima. Ove bi čestice vjerojatno bile ostaci proizvodnih procesa u vreloj "juhi" sasvim ranog svemira, mnogo mlađeg od jedne sekunde (danas bi se na rođendanskoj torti svemira nalazilo oko 14 milijarda svijećica!).

Danas fizičari tragaju za identitetom tamne materije i pokušavaju otkriti tu nikad viđenu supstanciju u brojnim sofisticiranim eksperimentima. Grupa fizičara<sup>4</sup> iz Laboratorija za elektromagnetske i slabe interakcije u Zavodu za eksperimentalnu fiziku na Institutu "Ruđer Bošković" (LEI/ZEF/IRB) uključila se u traganje za aksionima sredinom 1990-tih. Eksperimenti izvedeni na IRB-u ocijenjeni su od najeminentnijih znanstvenika iz područja fizike čestica, okupljenih u Particle Data Group, kao otvaranje novog područja u istraživanju aksiona. Neki članovi Laboratorija također sudjeluju i u međunarodnoj kolaboraciji koja traga za aksionima pomoću CERN-ovog<sup>5</sup> teleskopa za Sunčeve aksione (engleska kratica CAST), koji je ujedno i najveći

<sup>3</sup> Danas znamo da tamna materija nije jedina tamna strana svemira. Nakon 1920-tih smatralo se da gravitacija usporava širenje svemira. Nedavno se, međutim, promatranjem dalekih zvijezda (supernove tipa Ia) utvrdilo upravo suprotno: širenje svemira se danas ubrzava! Sila koja bi to mogla učiniti jest zagonetna "tamna energija". Suprotstavljajući se gravitacijskom privlačenju, ona bi na kraju mogla nadvladati sve sile koje povezuju materiju.

<sup>4</sup> Dr. Raul Horvat, Mr. Krešimir Jakovčić, Dr. Dalibor Kekez, Dr. Milica Krčmar, Dr. Zvonko Krečak, Dr. Biljana Lakić, Dr. Ante Ljubičić i Dr. Mario Stipčević.

<sup>5</sup> CERN je Europski laboratorij za fiziku visokih energija i jedan od najvećih akceleratorskih centara u svijetu. Sagrađen je u blizini Ženeve zajedničkim naporima europskih zemalja.



**CERN-ov teleskop za Sunčeve aksione sastoji se od 10 metarskog LHC test magnet nominalne jakosti 9 Tesla, montiranog na pokretnu platformu koja omogućuje praćenje Sunca oko tri sata dnevno.**

aksionski teleskop na svijetu. CAST je dizajniran za traganje za aksionima koji mogu nastati konverzijom toplinskih fotona u električnom polju jezgara vodika i helija te elektrona u središtu Sunca. Tako nastali aksioni su širokog energijskog spektra sa srednjom energijom od oko  $4 \text{ keV}$ <sup>6</sup>. U jakom transverzalnem magnetskom polju supravodljivog magnet, aksioni se mogu pretvoriti ponovno u fotone, koji se detektiraju na krajevima magnet pomoću detektora X-zračenja. Ubacivanjem plinovitog helija u magnetsko polje postiže se velika selektivnost teleskopa na aksionsku masu. Upravo koristeći ovo svojstvo teleskopa, nedavno su znanstvenici iz LEI-a pokazali da je CAST, osim na aksione, osjetljiv i na moguću prisutnost dodatnih prostornih dimenzija<sup>7</sup>. Naime, pored gravitacije i slabo-interagirajuće čestice, poput aksiona, mogu se širiti u dodatne dimenzije. To bi, opet, imalo za posljedicu da se umjesto jedne mase aksiona, u četverodimenzionalnom prostor-vremenu pojavljuje čitav toranj aksionskih masa, čija bi detekcija ukazala na postojanje branskog svijeta.

Spekulativne zamisli branskog svijeta su plod najnovijih istraživanja. One nude nove mogućnosti koje se mogu provjeriti u pokusima. Trenutačno se poduzimaju mjerenja gravitacijske sile između masivnih tijela na udaljenostima kraćim od dvije

desetinke milimetra. Mnogo se očekuje i od Velikog sudarača hadrona (LHC) koji se gradi u CERN-u, a pomoću kojeg će se moći proniknuti do dužina od interesa za postojanje branskog svijeta. Time bi se mogla objasniti i **tajna skrivene jakosti gravitacije**. Gravitacija je možda vrlo jaka u osnovnoj teoriji, ali njeno prostiranje kroz dodatne dimenzije imalo bi za posljedicu da će sila teže biti slaba na velikim udaljenostima na brani na kojoj živimo. ■



#### **OPIS NASLOVNICE:**

**Dvodimenzionalni svijet s netrivijskom topologijom.**

<sup>6</sup> Jedan kilo elektronvolt (keV) je energija koju elektron dobije ubrzanjem kroz razliku potencijala od tisuću Volta.

<sup>7</sup> R. Horvat, M. Krčmar and B. Lakić, Phys. Rev. D 69 (2004) 125011.