

UDK 524.88  
Pregledni članak  
Primljeno 12/04.

## Svemirska tamna energija

Josip PLANINIĆ\*

### Sažetak

*U svjetlu novih empiričkih podataka, razmatrana su pitanja ravne geometrije i ubrzanog širenja za standardni model svemira. Također je raspravljeno o mogućim teorijskim rješenjima problema tamne tvari, tamne energije i kozmološke konstante.*

Nova astrofizikalna mjerenja pokazuju da je svemir ravan ili sasvim malo zakrivljen, da se ubrzano širi i da takozvana kozmološka konstanta nije nula (nego je pozitivna).<sup>1</sup>

Kao većina suvremenika, i Albert Einstein je bio uvjeren da je svemir statičan, pa 1917. godine nastoji uskladiti svoju novu teoriju gravitacije, opću teoriju relativnosti, s tadašnjim shvaćanjem svemira (koji se ne širi, niti se skuplja) i dodaje jedan kozmološki član u svoje jednadžbe polja kako bi u rješenju jednadžbe gravitacija svemira bila uravnotežena<sup>2</sup>.

Dvanaest godina kasnije, američki astronom Edwin Hubble otkriva kako je svemir sve, samo ne statičan te da se galaksije hitro udaljavaju od naše Mliječne staze brzinom koja je razmjerna udaljenosti. Spomenuti kozmološki član više nije bio potreban za tumačenje ekspanirajućeg svemira i Einstein ga napušta kao »teorijski nezadovoljavajućeg« (u jednoj kozmološkoj raspravi navodi kako mu je uvođenje tog kozmološkog člana bio najveći promašaj u životu).

Međutim u posljednjih šest, sedam godina kozmološki član, sada nazvan kozmološka konstanta, ponovno se pojavljuje i nastupa u glavnoj ulozi u fizici 21. stoljeća, premda sa sasvim različitim motivima od prve izvorne zamisli; nova verzija tog člana pojavljuje se uz posljednja astronomska motrenja i zapažanja ubrzanog širenja svemira. Od kozmološke konstante se očekuje da bude ključ u dubljem razumijevanju prostora, vremena, gravitacije te možda i kvantne teorije koja bi ujedinila gravitacijsku silu s drugim osnovnim silama u prirodi.

\* Prof. dr. sc. Josip Planinić, Filozofski fakultet, Osijek.

1 Usp. M. Turner, Making sense of the new cosmology, *Int. J. Mod. Phys.* 17 (2002) 180; Usp. W. Freedman and M. Turner, Colloquium: Measuring and understanding the universe, *Rev. Mod. Phys.* 75 (2003) 1433; Usp. J. Planinić, Otvorena pitanja u novoj kozmologiji, *Filozofska istraživanja*, 92 (2004) 301.

2 Usp. L. Krauss and M. Turner, A cosmic condurum, *Scientific American*, Sept. (2004)53.

Inače, 1917. godine, nizozemski je kozmolog Willem de Sitter pokazao da se može dobiti prostorno–vremensko rješenje s kozmološkim članom čak i bez prisustva tvari, a takav model je nestatičan<sup>3</sup>. Ruski fizičar Alexander Friedmann izgradio je pak 1922. godine modele ekspandirajućeg i sažimajućeg svemira koji ne trebaju kozmološku konstantu; modeli su vezani za gustoće tvari: svemir velike gustoće će kolabirati (zgusnuti se u singularnu točku), dok će se svemir male gustoće tvari trajno, vječno širiti. U tome je, dakle, presudna granična ili kritična gustoća tvari (gustoća svemira veća od kritične vodi ka njegovu zgušnjavanju, manja gustoća od kritične znači trajno širenje svemira). Prema općoj teoriji relativnosti, geometrija ili zakrivljenost svemira povezana je s njegovom gustoćom: visokoj gustoći pripada pozitivna zakrivljenost (kao površina balona), gustoći manjoj od kritične gustoće svemira odgovara negativna zakrivljenost (poput površine sedla), a kod kritične gustoće svemir je prostorno ravan. Tako se u kozmologiji došlo do uvjerenja da će geometrija svemira u konačnici odrediti njegovu sudbinu.

I kozmološki član je bio progan iz kozmologije u idućih šest desetljeća; iznimka je bila njegovo pojavljivanje u teoriji stalnog, uravnoteženog svemira (steady-state universe, engl.), teoriji koja je dvadesetak godina (do 1960–ih) bila kontroverza sada prihvaćenom modelu Velikog praska i ekspandirajućeg svemira. Sada se pak čini da je prisustvo kozmološkog člana u kozmologiji neizbježno, iako njegovo pojavljivanje više ne dolazi iz teorije relativnosti nego iz kvantne mehanike, fizike najmanjih veličina.

Izvorna Einsteinova jednadžba polja,  $G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$ , povezuje zakrivljenost prostora (tenzor  $G_{\mu\nu}$ ) s raspodjelom tvari i energije (tenzor  $T_{\mu\nu}$ );  $G$  označuje Newtonovu konstantu gravitacije. Dodajući kozmološki član s lijeve strane jednadžbe,  $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$ , Einstein je naglasio kako taj član ima svojstvo samog prostora (kozmoška konstanta  $L$  pomnožena s prostorno–vremeniskim tenzorom  $g_{\mu\nu}$ ). Ali ako se kozmološki član prebaci na desnu stranu jednadžbe,  $G_{\mu\nu} = 8\pi G(T_{\mu\nu} + \rho_{\text{vac}} g_{\mu\nu})$ , on poprima novo značenje, kakvo ima danas ( $\rho_{\text{vac}}$  označuje gustoću energije vakuuma).

Kvantna teorija drži da oblik vakuumske energije nastaje iz virtualnih parova čestica–antičestica koje stalno napuštaju vakuum, postoje vrlo kratko vrijeme i onda nestaju.

Tako kozmološki član predstavlja novi neobičan oblik gustoće energije, koja ostaje stalna čak i kad svemir ekspandira i kad je njegova gravitacija više odbojna nego privlačna. Prema Lorentzovoj invarijantnosti, temeljnoj simetriji u specijalnoj i općoj teoriji relativnosti, takvu vrstu gustoće energije može imati samo prazan prostor, vakuum (premda bi se intuitivno reklo kako je energija vakuuma — nula).

U vrlo malim razmjerima, gdje kvantni efekti postaju važni, čak ni prazan prostor nije više zbiljno prazan; virtualni parovi čestica–antičestica izlaze iz vakuuma,

3 Usp. H. Kragh, *Cosmology and controversy*, Princeton University Press, Princeton, 1996.

putuju na kratkoj udaljenosti i onda ponovno nestaju u vremenskoj skali tako da ih se ne može zapaziti izravno, ali njihov neizravan efekt je vrlo važan i njega se može izmjeriti (npr. virtualne čestice djeluju proračunljivo na spektar vodika, što onda potvrđuju mjerenja). Tako virtualne čestice ostavljaju prazan prostor s energijom koja nije nula.

No poteškoća je u tom prikazu da svi proračuni vakuumske energije daju ogromne, nerazumljivo velike vrijednosti koje su od pedeset i pet do stotinu i dvadeset redova veličina veće od energije ukupne tvari i zračenja zamjetljivog svemira; to stoji kao problem u teorijskoj fizici već nekoliko desetljeća (premda kvantna teorija nije puno brinula o primjeni svojih postavki u kozmologiji).

Tada su upriličena astronomska motrenja, mjerenja kojima bi se provjerilo moguće usporeno širenje svemira, kako to predviđa opća teorija relativnosti pri ekspanziji prostora, a zbog gravitacijskog privlačenja. Koristeći za baždarenje kao standardna svjetlila tip Ia supernove (što je termonuklearna eksplozija zvijezde bijelog diva koja ima masu 1,4 puta veću od Sunca), dvije istraživačke grupe (s voditeljima S. Perlmutter i B. Schmidt) poduzele su 1998. godine mjerenja brzine ekspanzije svemira; obje grupe su neovisnim motrenjima ustanovile da je u proteklih pet milijardi godina širenje svemira bilo ubrzano, a ne usporeno. Dakle, s podacima supernove ustanovljeno je ubrzano širenje svemira, ali u prethodnom razdoblju i usporeno širenje, kao i novi oblik energije koji upravlja svemirskom ekspanzijom.

O ranom svemiru najbolju sliku daje kozmičko mikrovalno pozadinsko zračenje, što je zaostalo zračenje od Velikog praska (Big bang, engl.); od 2000. godine, mjerenja varijacije kuta pozadinskog zračenja na nebeskom prostoru (npr. WMAP letjelica) pokazala su da je geometrija svemira ravna.

Ravna geometrija prostora pak zahtijeva da je prosječna gustoća svemira jednaka kritičnoj gustoći; međutim, mnoga različita mjerenja svih oblika tvari, uključujući i hladnu tamnu tvar (što bi bilo mnoštvo sporih čestica koje ne odašilju svjetlost, ali sudjeluju u privlačnoj gravitaciji), pokazala su da tvar doprinosi samo oko 30 % od kritične gustoće. Od navedenih 30 % svemirske mase tvari samo 4 % je obična, barionska tvar (zvijezde, planeti, plin i zvjezdana prašina), koja je velikim dijelom optički nevidljiva (tek 0,5 % barionske mase pripada sjajećim zvijezdama), a 0,3 % mase nose neutrini, dok sva preostala masa svemira pripada tamnoj tvari; masa te skrivene, tamne tvari mogla bi najvećim dijelom pripadati još neotkrivenim elementarnim česticama (vodeći kandidat je čestica neutralino).

Stoga ravni svemir zahtijeva neke druge oblike (podjednako) raspoređene energije koja ne bi imala zamjetljiv utjecaj na lokalne skupine objekata, a trebala bi »nositi« 70 % kritične gustoće. Vakuumska energija, ili nešto vrlo slično tome, točno bi proizvela taj traženi učinak.

Ali znanstvenici još ne znaju dolazi li ta energija doista od kvantnog vakuuma; stoga je nova žurna potreba i potraga za kvantifikacijom vakuumske energije. Teoretičari bi trebali sada obrazložiti zašto vakuumska energija ne smije biti nula nego tako mala vrijednost da njen učinak u svemiru postaje značajan tek od prije nekoliko milijardi godina — to je sada kozmološka zagonetka.

Poteškoće oko »ugradnje« zakona kvantne mehanike u Einsteinovu teoriju gravitacije mogu više osvijetliti kozmološka motrenja, a od teorijskih pristupa dobri izgledi se daju string teoriji (teoriji struna, sada često nazivana M–teorijom) s osnovnim zamislima koje sadrži teorija supersimetrije (SUSY).

Opća relativnost podrazumijeva da je gravitacija nekog objekta razmjerna njegovoj gustoći energije plus trostruki unutarnji tlak. Oblik energije s velikim negativnim tlakom (koji pulsira prema unutra, umjesto prema van kao kod pozitivnog tlaka, npr. za jednu loptu s plinom) ima odbojnu gravitaciju. Tako kozmičko ubrzanje može značiti postojanje nekog neobičnog oblika energije, zvučno nazvanog »tamnom energijom«, što nije pretkazala ni kvantna mehanika ni string teorija.

U svakom slučaju, otkriće kozmičkog ubrzanja pokazuje da sudbina svemira nije više vezana za geometriju; s prihvaćanjem postojanja vakuumske energije, ili nečeg sličnog, mogućnosti su brojne. Ravni svemir s dominantnom vakuumskom energijom ekspanzirat će trajno rastućom brzinom, dok dominirajuća negativna vakuumska energija vodi svemir u kolaps (sažimanje). Ako pak tamna energija uopće nije vakuumska energija, budući događaji u širenju svemira su sasvim neodređeni; moguće je, za razliku od kozmološke konstante, da gustoća tamne energije raste ili pada trajno. Ako gustoća raste, kozmičko ubrzanje će rasti, što će poslije nekog vremena razdvajati i udaljavati galaksije, sunčev sustav, planete i atome. Ako pak gustoća opada, ubrzanje svemira će se zaustaviti. U slučaju da gustoća postane negativna, svemir će se skupiti u singularnu točku.

Za rješenje ove zagonetke potrebna je jedna temeljna teorija koja će dopustiti pretkazivanje i kategorizaciju gravitacijskog utjecaja svakog mogućeg doprinosa energije praznog prostora. Drugim riječima, fizika ničega (vakuuma) odredit će sudbinu našeg svemira! Pronalaženje rješenja, međutim, može zahtijevati nova mjerenja kozmičke ekspanzije i struktura koje predvidi teorija. Povoljno je u svemu da su predviđeni i pripremaju se mnogi eksperimenti, uključujući nove svemirske i zemaljske teleskope za motrenje udaljenih zvijezda supernova, za ispitivanje tamne energije u razvoju struktura velikih razmjera.

## *THE DARK ENERGY OF THE UNIVERSE*

*Josip PLANINIĆ*

### *Summary*

*With regard to the common Big Bang model of the creation of the universe, the issues of the earth's flatness and the accelerating rate of expansion of the Universe are discussed in light of new empirical data. The theoretical possibilities of solving the problems of dark matter, dark energy and cosmological constant were discussed.*