

Problem tamne energije - što uzrokuje današnje ubrzano širenje svemira?

Hrvoje Štefančić¹

Zavod za teorijsku fiziku, Institut "Ruđer Bošković", Zagreb

Svemir, impresivan po mjerilima svakog čovjeka iz svake epohe, od davnina je objekt znatiželje ljudi. Istu, pa i veću znatiželju dijelili su znanstvenici iz raznih vremena i uvijek u razumijevanje svemira i pojava u njemu pokušavali ugraditi svoja najveća dostignuća. Tako je bilo s visoko geometriziranim antičkim kozmološkim modelima, provjerom Newtonova zakona gravitacije na stvarnim planetarnim gibanjima pa sve do stapanja najmodernijih znanja iz fizike visokih energija i Einsteinove opće teorije relativnosti u teoriji velikog praska. Želja za razumijevanjem svemira vrlo je često snažno vukla znanost, osobito fiziku, prema naprijed. Stupanj napretka koji je dosegla fizika do našeg doba mogao bi nas navesti na pomisao da danas razumijemo najveći dio svemira i pojava u njemu. Rezultati velikog broja različitih kozmoloških promatranja, prikupljenih mahom u posljednjih pet godina, međutim, upućuju na suprotno. Naše današnje znanje o građi svemira otkriva da nam priroda približno 95 % ukupne gustoće energije u svemiru nije poznata.

Prvi pokazatelji o postojanju dosad nepoznatih komponenti svemira dobiveni su iz promatranja supernova tipa Ia [1, 2]. Za supernove tog tipa promatranjem odnosa njihove luminozitetne udaljenosti (čiji je kvadrat obrnuto proporcionalan opaženom sjaju supernove) i njihova crvenog pomaka (određenog iz pomaka spektralnih linija) utvrđeno je da su (promatrane supernove) tamnije nego što bi se očekivalo na osnovi tada važećeg kozmološkog modela koji je pretpostavljao postojanje samo uobičajenih komponenti građe svemira: zračenja i nerelativističke materije. Manji sjaj supernova protumačen je većom udaljenošću opaženih supernova od očekivane ², odnosno svemir se u periodu između eksplozije pojedine supernove i trenutka kada je mi opažamo širio ubrzano. U to vrijeme prihvaćeni kozmološki model predviđao je usporeno širenje svemira pa je ovaj rezultat nedvojbeno revolucionarno promijenio našu sliku o svemiru i doveo kozmologiju do novog pitanja: Što uzrokuje ubrzano širenje svemira? Kao odgovor na to pitanje, uvedena je nova komponenta građe svemira nazvana *tamna energija*. Ona je uvedena prvenstveno kao komponenta koja može dovesti do ubrzanog širenja svemira. Takav utjecaj tamne energije na širenje svemira proizlazi iz njezina najbitnijeg svojstva: tlak tamne energije je *negativan*. Ostala njezina svojstva znatno su manje poznata i prava priroda tamne energije jedan je od najvažnijih ciljeva istraživanja u kozmologiji, ali i drugim područjima fizike, poput fizike elementarnih čestica. I druga su kozmološka opažanja potvrdila postojanje tamne energije. Posebnu važnost među njima zauzimaju vrlo precizna mjerenja anizotropija kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja koja je obavila NASA-ina sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [4]. Ta su mjerenja s većom preciznošću potvrdila rezultate niza prethodnih mjerenja anizotropija kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja [5, 6, 7] te dala snažnu podršku kozmološkom modelu

¹shrvoje@thphys.irb.hr

²Kritičko razmatranje ovih rezultata je obuhvatilo i proučavanje alternativnih razloga slabijeg sjaja opaženih supernova tipa Ia. Jedan od zanimljivijih alternativnih pokušaja objašnjenja slabijeg sjaja supernova je osnovan na pretpostavci oscilacija fotona emitiranih u supernovoj u hipotetske čestice *aksione* [3].

koji uključuje tamnu energiju. Dodatne potvrde stigle su iz promatranja korelacija anizotropija kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja i fluktuacija u raspodjeli “obične” materije u svemiru (npr. galaksija ili skupova galaksija) [8].

S tamnom energijom, međutim, ne završava popis nepoznatih komponenti svemira. Možemo li ostatak ukupne gustoće energije u svemiru objasniti pomoću nama poznatih komponenti poput tzv. barionske materije (od koje smo izgrađeni mi sami i velika većina stvari na našem planetu) i zračenja (poput npr. elektromagnetskog zračenja Sunca)? I u ovom slučaju kozmologija daje negativan odgovor. U svemiru je prisutna još jedna tamna komponenta, *tamna materija*. Prisutnost tamne materije nužna je za objašnjenje ukupne gustoće energije u svemiru, no njezini su učinci već vidljivi na razini galaksija pri promatranju brzine kruženja zvijezda i skupova zvijezda oko galaktičkog središta. Priroda tamne materije gotovo je jednako tajnovita kao i priroda tamne energije.

Raspodjela ukupne gustoće energije po komponentama [4] otkriva zanimljiv poredak. U svemiru u današnjem trenutku ima približno

- 73 % tamne energije
- 23 % tamne materije
- 4 % barionske materije

što pokazuje da tamna energija danas prevladava u građi svemira, a tamne komponente zajedno čine više od 95 % svemira. Današnja gustoća energije fotona i neutrina čini vrlo malen dio ukupne gustoće energije u svemiru.

Razmotrimo detaljnije mehanizam širenja svemira i način kako tamna energija vodi do njegovog ubrzanja. Udaljenosti u širećem svemiru opisane su *faktorom skale*³ a . Ta veličina određuje stvarnu udaljenost između dva objekta u svemiru, mjerenu npr. vremenom potrebnim svjetlosnom signalu da dođe od jednog objekta do drugoga. Opažena homogenost i izotropnost raspodjele materije i struktura na najvećim skalama u svemiru omogućuje da svaku od komponenti svemira na kozmološkim skalama opišemo kao homogen idealni fluid. Temeljna jednadžba idealnog fluida, tzv. jednadžba stanja idealnog fluida, povezuje tlak p i gustoću energije fluida ρ :

$$p = w\rho. \quad (1)$$

Parametar jednadžbe stanja w može biti konstantan, no isto tako može biti promjenjiv i ovisiti o npr. vremenu ili drugim varijablama relevantnim u kozmologiji. Za nerelativističku materiju (i za barionsku i za tzv. hladnu tamnu materiju) vrijedi $w \approx 0$, dok je za zračenje, odnosno relativističku materiju, $w = 1/3$. Za komponentu koja je opisana jednadžbom stanja (1) s konstantnim w i koja ne izmjenjuje energiju s drugim komponentama u svemiru, jednadžba stanja određuje promjenu gustoće energije te komponente s promjenom faktora skale a :

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-3(1+w)}. \quad (2)$$

³Faktor skale a je element složenijeg objekta koji se naziva metrički tenzor $g_{\mu\nu}$. Određivanje metričkog tenzora cilj je rješavanja svakog problema u općoj teoriji relativnosti.

Indeks 0 označava veličine u današnjem trenutku. Tako za nerelativističku materiju vrijedi $\rho \sim a^{-3}$, a za relativističku materiju dobivamo $\rho \sim a^{-4}$. Iz osnovnog svojstva tamne energije, negativnog tlaka, slijedi da je za tamnu energiju parametar w *negativan*. Ta činjenica, zajedno s jednadžbom (2), upućuje da gustoća energije nerelativističke ili relativističke materije brže opada u odnosu na gustoću tamne energije pri širenju svemira. Različite brzine promjene gustoće energije svemirskih komponenti otkrivaju da je u prošlosti svemira gustoća nerelativističke i relativističke materije bila znatno veća od gustoće tamne energije. Isto tako, u budućnosti će tamna energija, s obzirom na gustoću energije, potpuno prevladavati u odnosu na druge komponente građe svemira. Posebna zanimljivost može se iščitati iz podataka za današnji udio pojedinih komponenti u ukupnoj gustoći energije svemira. Naime, u današnjem trenutku širenja svemira, gustoće tamne energije i ostalih komponenti istog su reda veličine, tj. usporedive. Budući da se gustoće energije komponenti mijenjaju vrlo različitim brzinama, postavlja se pitanje zašto su navedene komponente usporedive upravo sada. Taj problem, koji se u osnovi svodi na pitanje zašto gustoća tamne energije ima svoj izmjereni iznos, naziva se i *problem koincidencije*.

Einsteinova opća teorija relativnosti daje jednadžbe za brzinu i ubrzanje širenja svemira. Brzina širenja svemira dana je tzv. Friedmannovom jednadžbom

$$\dot{a}^2 + kc^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \sum_i \rho_i a^2, \quad (3)$$

gdje $\dot{a}$ označava brzinu širenja svemira, G je gravitacijska konstanta, c je brzina širenja svjetlosti, sumira se po svim komponentama građe svemira, a k je tzv. *parametar zakrivljenosti*. Jednadžba (3) pokazuje da brzina širenja svemira u svakom trenutku ovisi o gustoći energije u njemu. Iz te jednadžbe vidi se da bi za svemir koji bi sadržavao samo nerelativističku i relativističku materiju $\dot{a}$ opadao sa širenjem svemira. Ubrzanje svemirskog širenja dano je izrazom

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} \sum_i (\rho_i + 3p_i). \quad (4)$$

U tom izrazu G označava gravitacijsku konstantu, c je brzina svjetlosti, $\ddot{a}$ označava ubrzanje širenja svemira, a sumira se po svim komponentama građe svemira. Izraz za ubrzanje otkriva nam još jedno svojstvo koje mora zadovoljavati jednadžba stanja tamne energije. Parametar jednadžbe stanja mora biti $w < -1/3$ kako bi za tamnu energiju izraz $(\rho + 3p)$ postao negativan, a, kad tamna energija postane dominantna komponenta, ubrzanje svemira pozitivno.

Bilo je mnogo pokušaja i izgrađeni su mnogi modeli u smjeru teorijskog razumijevanja prirode tamne energije. Jedan od najistaknutijih i, prema nekim svojim svojstvima, nezaobilaznih modela jest model vakuumske energije [9, 10, 11]. U sklopu tog modela pretpostavlja se da je tamna energija zapravo jednaka energiji vakuuma. Taj je model ekvivalentan standardnom kozmološkom modelu s *kozmoškom konstantom* (koja je mjera energije vakuuma) koji je Einstein uveo kao sastavni dio opće teorije relativnosti u samim njezinim počecima [12]. Prema danas najbolje potvrđenoj kvantnoj teoriji, *kvantnoj teoriji polja*, postojanje vakuumske energije, odnosno kozmološke konstante,

neizbježna je činjenica⁴. Naime, kvantna teorija polja predviđa da kvantne fluktuacije svih kvantnih polja pridonose energiji vakuuma te da postoje doprinosi energiji vakuuma zbog tzv. faznih prijelaza u ranim fazama života svemira. Postojanje neiščezavajuće vakuumske energije teorijski je dobro utemeljeno. Problem je u brojčanom iznosu koji je teorijski predviđen. Naime, teorijska vrijednost za gustoću energije vakuuma neusporedivo je veća od vrijednosti dobivene kozmološkim opažanjima (ako se u analizi podataka pretpostavi postojanje kozmološke konstante, tj. vakuumske energije). U nekim teorijskim varijantama neslaganje teorijski predviđene i opažene gustoće vakuumske energije čak je u približno 120 redova veličine (faktor od 10^{120}). Navedeni problem jedan je od najdubljih problema fizike uopće i katkad se naziva i *problemom kozmološke konstante*. Rješenje tog problema zasigurno je jedan od najvećih izazova za kozmologiju i fiziku visokih energija u budućnosti. Posebno je bitno iznaći teorijsko objašnjenje mehanizma koji vrijednost gustoće vakuumske energije svodi s izuzetno velike teorijski predviđene vrijednosti na opaženu. Parametar jednadžbe stanja kozmološke konstante iznosi $w = -1$. Iz izraza (2) proizlazi da se gustoća energije pridružena kozmološkoj konstanti ne mijenja s faktorom skale a . U svemiru s neiščezavajućom pozitivnom kozmološkom konstantom u dalekoj budućnosti svemirom dominira upravo kozmološka konstanta, dok je gustoća energije ostalih komponenti zanemariva. Iz Friedmannove jednadžbe (3) vidi se da u ovakvom svemiru u dalekoj budućnosti faktor skale raste eksponencijalno s vremenom. Vrlo zanimljivi rezultati dobivaju se ako se kozmološka konstanta promatra kao dinamička veličina⁵ [14]. Ovisno o parametrima modela, sudbina svemira može biti vrlo različita: svemir se u dalekoj budućnosti može neograničeno širiti, ali i asimptotski težiti nekoj maksimalnoj vrijednosti faktora skale, slika 1.

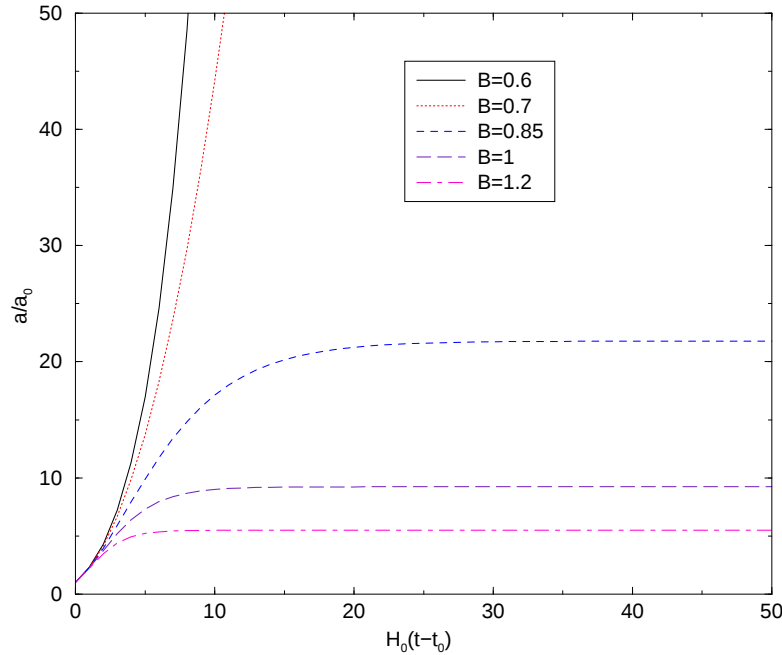
Niz drugih modela za tamnu energiju pretpostavlja da za sada nepoznati mehanizam, koji vakuumsku energiju svodi s vrlo velikih vrijednosti, ne završava na opaženoj vrijednosti tamne energije, već svodi vakuumsku energiju na nulu. Oni, dakle, pretpostavljaju da vakuumska energija iščezava i da je tamna energija drukčije prirode. U tim je modelima uobičajeno tamnu energiju smatrati dinamičkom komponentom opisanom pomoću skalarnog polja koje se razvija u vremenu u prikladno odabranom potencijalu [15]. Široko prihvaćeni naziv za takav tip tamne energije je *kvintesencija*⁶. Parametar jednadžbe stanja za ove modele je $w \geq -1$, što znači da gustoća tamne energije u ovim modelima općenito opada sa širenjem svemira, ali znatno sporije od gustoće energije ostalih komponenti. Prisutni su i modeli koji idu za ujedinjenjem tamne energije i tamne materije te ujedno nastoje objasniti i već spomenuti problem koincidencije. Jedan od istaknutih modela iz te grupe jest model Čapljiginova plina [16].

Posebna skupina modela tamne energije pretpostavlja da gustoća tamne energije raste s faktorom skale a . Ta je skupina modela karakterizirana parametrom jednadžbe stanja $w < -1$. Tip tamne energije razmatran u tim modelima dobio je naziv *fantomska energija* [17]. Prema svojim svojstvima ti su modeli teorijski kontroverzni, no dopušteni s obzirom na rezultate kozmoloških promatranja. Ovisno o načinu i brzini rasta gustoće fantomske energije, faktor skale može poprimiti beskonačnu vrijednost nakon konačnog vremenskog intervala u odnosu na sadašnji trenutak. Takav način širenja svemira ima dramatične učinke na vezane sustave u svemiru, neovisno o vrsti međudjelovanja zbog

⁴Jedna od manifestacija vakuumske energije jest i Casimirov efekt [13]

⁵U ovom slučaju primjereniji je naziv *kozmoški član*

⁶od engleske riječi *quintessence*



Slika 1: Vremenska ovisnost faktora skale za pet različitih vrijednosti parametra u modelu vremenski ovisne kozmološke “konstante”. H_0 označava *Hubbleov parametar*. Za drukčije vrijednosti parametara svemir može imati bitno drukčiju sudbinu.

kojeg je sustav vezan. Naime, zbog negativnog i rastućeg tlaka fantomske energije, svi vezani sustavi postaju slobodni, odnosno dolazi do njihova raspada ili “razvezivanja”. Upravo zbog takva djelovanja na vezane sustave, ova vrsta konačne sudbine svemira dobila je naziv “*veliko razdiranje*”⁷. Razmotrimo i jedan brojčani primjer [18]. Kada bi parametar jednadžbe stanja fantomske energije iznosio $w = -3/2$, “veliko razdiranje” nastupilo bi za približno 22 milijarde godina (za usporedbu, svemir je star $13,7 \pm 0,2$ milijardi godina [4]). Raspad pojedinih vezanih sustava u svemiru slijede ovim redoslijedom. Milijardu godina prije “velikog razdiranja” skupovi galaksija više ne mogu održavati pojedinačne galaksije u vezanom stanju. Približno 60 milijuna godina prije kraja svemira, naša se galaksija raspada. Tri mjeseca prije “velikog razdiranja” Sunce više ne može svojom gravitacijskom silom zadržati planete u orbiti i dolazi do raspada Sunčeva sustava. Približno pola sata prije “velikog razdiranja” Zemlja više nije gravitacijski vezana i dolazi do njezina raspada. Atomi se raspadaju 10^{-19} s prije kraja svemira, a ubrzo slijede i raspad atomskih jezgara i nukleona. Istaknimo da je ovakav dramatični kraj svemira samo jedan od mogućih kozmoloških scenarija koji uključuju fantomsku energiju. Postoje kozmološki modeli s fantomskom energijom koji ne vode do “velikog razdiranja”, već se u dalekoj budućnosti ponašaju slično svemiru s kozmološkom konstantom.

Na kraju spomenimo da su izgrađeni i modeli koji posebnosti širenja svemira nastoje objasniti bez uvođenja tamne energije. Neki od tih modela uzimaju da je gravitacijsko međudjelovanje modificirano na najvećim udaljenostima, što se sada očituje u ubrzanom širenju svemira [19]. Drugi modeli pak polaze od pretpostavke da je naš svemir dio svemira s većim brojem dimenzija te tako nastoje objasniti kozmološku dinamiku [20].

⁷prema engleskom nazivu “*Big Rip*”

Utvrđivanje razloga ubrzanog širenja svemira te daljnje testiranje hipoteze o tamnoj energiji kao uzroku tog ubrzanja bit će i u budućnosti jedan od temeljnih ciljeva moderne kozmologije. Velik broj različitih modela i predloženih objašnjenja prirode tamne energije prisutnih u kozmološkoj literaturi govori o golemom interesu znanstvene zajednice za taj problem. S druge strane, postojanje bitno različitih modela za istu pojavu, kao što je ubrzano širenje svemira, otkriva da je znanost još daleko od ukupnog razumijevanja te pojave. Daljnja i sve preciznija kozmološka opažanja u budućnosti će izdvojiti modele koji najbolje opisuju nama dostupna svojstva svemira i tako nas još više približiti potpunom razumijevanju tamne energije i svemira u cjelini.

Literatura

- [1] A. G. Riess et al., *Astron. J.* 116 (1998) 1009; <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/HighZ.html>.
- [2] S. Perlmutter et al., *Astrophys. J.* 517 (1999) 565; <http://www-supernova.lbl.gov/public/>.
- [3] C. Csaki, N. Kaloper, J. Terning, *Phys. Rev. Lett.* 88 (2002) 161302, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0111311>.
- [4] D. N. Spergel et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 148 (2003) 175; <http://map.gsfc.nasa.gov/>.
- [5] <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>.
- [6] <http://cosmology.berkeley.edu/group/cmb/>.
- [7] <http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang/>.
- [8] M. R. Nolta et al., <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0305097>.
- [9] S. Weinberg, *Rev. Mod. Phys.* 61 (1989) 1.
- [10] P.J.E. Peebles, B. Ratra, *Rev. Mod. Phys.* 75 (2003) 559, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0207347>.
- [11] T. Padmanabhan, *Phys. Rept.* 380 (2003) 235, <http://arxiv.org/abs/hep-th/0212290>.
- [12] A. Einstein, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. phys.-math. Klasse VI* (1917) 142.
- [13] H. B. G. Casimir, *Kon. Ned. Akad. Wetensch. Proc.* 51 (1948) 793.
- [14] B. Guberina, R. Horvat, H. Štefančić, *Phys. Rev. D* 67 (2003) 083001, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0211184>.
- [15] R. R. Caldwell, R. Dave, P. J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 1582, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9708069>.

-
- [16] A. Yu. Kamenshchik, U. Moschella, V. Pasquier, Phys. Lett. B 511 (2001) 265, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0103004>;
N. Bilić G.B. Tupper, R.D. Viollier, Phys. Lett. B 535 (2002) 17, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0111325>.
- [17] R. R. Caldwell, Phys. Lett. B 545 (2002) 23, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9908168>.
- [18] R. R. Caldwell, M. Kamionkowski, N. N. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 071301, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0302506>.
- [19] K. Freese, M. Lewis, Phys. Lett. B 540 (2002) 1, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0201229>.
- [20] V. Sahni, Yu. Shtanov, JCAP 0311 (2003) 014, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0202346>.