

Najnovija mjerenja kozmičkog pozadinskog zračenja*

Krešimir Kumerički

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb

Satelit Planck Europske svemirske agencije (ESA) od svog lansiranja 2009. godine mjeri kozmičko mikrovalno pozadinsko (CMB = Cosmic Microwave Background) zračenje. U ožujku 2013. su objavljeni prvi službeni rezultati koji su u najvećoj mjeri u skladu sa standardnim kozmološkim modelom pa tako potvrđuju postojanje velike količine tamne tvari i tamne energije u svemiru, ali također potvrđuju i neka neobična svojstva CMB zračenja koja će tek trebati objasniti.

1. Kozmičko mikrovalno pozadinsko zračenje

Nakon velikog praska svemir je proveo nekoliko minuta u stanju izvanredno brze pretvorbe raznih egzotičnih čestica i egzotičnih vrsta energije dok se nije ustalio u stanju vruće plazme koja se sastojala prvenstveno od ioniziranog vodika (dakle slobodnih protona i elektrona), nešto malo helija, i obilja fotona koji su dominirali dinamikom ranog svemira. U tom stanju svemir je proveo sljedećih 380 tisuća godina šireći se i hladeći se. Danas, zahvaljujući između ostalog i mjerenjima CMB zračenja, znamo da se u toj vrućoj kupki nalazio i veliki broj čestica tamne tvari. Neki zamišljeni promatrač u tom ioniziranom svemiru ne bi vidio ništa jer svaka zraka svjetlosti biva brzo apsorbirana od strane slobodnih nabijenih elektrona i protona. Ukoliko se neki elektron i proton i vežu u atom vodika, energetske fotone brzo razbijaju takve veze. Tek nakon što se svemir dovoljno ohladio, na oko 4000 kelvina, elektroni i protoni se počinju vezati u atome vodika u procesu koji se naziva rekombinacija (čudan izbor riječi — to je zapravo *prvo* kombiniranje tih čestica u povijesti). Obzirom da su električki neutralni, atomi vodika slabo raspršuju svjetlost i u tom trenutku svemir postaje proziran. Onaj zamišljeni promatrač bi imao osjećaj kao da se oko njega raščistila magla. Fotoni koji u tom trenutku postoje nastavljaju se gibati slobodno sve do današnjih dana dokad su se ohladili na 2.7 kelvina. Spektar fotona te temperature je najistaknutiji u mikrovalnom području i

*Objavljeno u Matematičko-fizičkom listu LXIII 4 (2012–2013) 250–255

zato se to zračenje zove kozmičko mikrovalno zračenje. Otkriveno je specijalnom antenom 1964. godine (Nobelova nagrada 1978.) i smatra se jednim od najčvršćih dokaza velikog praska. Istovremeno, CMB zračenje predstavlja i prvu fotografiju svemira [1] — njegovim proučavanjem dobivamo izvanredno kvalitetne podatke o svojstvima svemira, o čemu će biti riječi u ostatku ovog članka.

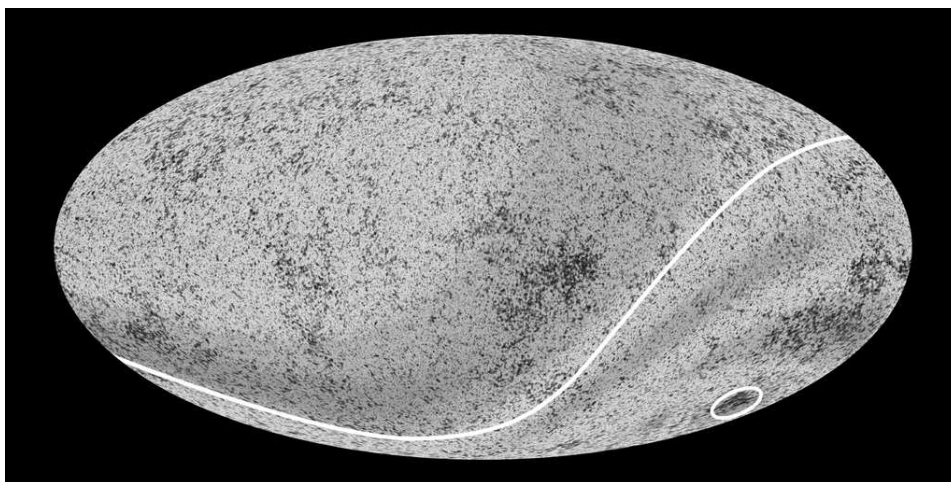
2. Opažanje klica iz kojih su nastale galaktike

Obzirom da je nastalo u vrijeme kad je svemir bio vrlo jednodimenzionalan, CMB zračenje je na prvi pogled dosadno i jednodimenzionalno. U kojem god smjeru neba pogledamo našim antenama, vidimo jednako zračenje (tzv. zračenje crnog tijela) temperature 2.725 K. Međutim, kozmolozi su bili jasno da iz savršeno jednodimenzionalnog svemira ne bi mogla nastati današnja izvanredno nejednodimenzionalna struktura gdje s jedne strane imamo galaktike i zvijezde, a s druge skoro prazni međugalaktički prostor. Istina, i sama sila gravitacije može u određenoj mjeri stvarati strukturu tako da male slučajne fluktuacije gustoće pojačava i pretvara u još gušće nakupine tvari. Međutim proračuni i simulacije jasno pokazuju da u desetak milijardi godina, koliko je star svemir, gravitacija nema dovoljno vremena za stvaranje struktura koje vidimo. Nužne su neke klice, neke početne nejednodimenzionalnosti gustoće uzrokovane posebnim fizikalnim mehanizmom. Kakav god taj mehanizam bio, te početne nejednodimenzionalnosti se trebaju odražavati i na CMB zračenju: na mjestima veće gustoće se zračenje gravitacijski sažima i zagrijava, a na onima drugima hladi, a te varijacije bi trebale biti vidljive mjerenjima. Kako to pomiriti sa izvanredno jednodimenzionalnom temperaturom od 2.7 K iz svih smjerova? Pa proračuni pokazuju da su za formiranje strukture svemira dovoljne klice nejednodimenzionalne gustoće koje uzrokuju da nejednodimenzionalnosti temperature CMB zračenja u vrijeme rekombinacije budu oko $1 : 10^5$ (najtopliji dijelovi svemira moraju biti za oko tisućinku postotka topliji od najhladnijih). Tako mala odstupanja, od nekoliko mikrokelvina, zaista su i opažena, po prvi put mjerenjima COBE satelita [2] za što je dodijeljena Nobelova nagrada 2006.

Nakon COBE-a, mjerenja kutnih nejednodimenzionalnosti (tzv. anizotropija) temperature pozadinskog zračenja su uzela maha jer je postalo jasno da je iz njih moguće izvući obilje kvalitetnih kozmoloških informacija. Kako atmosfera apsorbira dio mikrovalnog zračenja, mjerenja se obično rade ili iz balona ili iz satelita, a daleko najvažnija mjerenja su dobivena prvo satelitom WMAP 2001-2010. [3] dok zadnju riječ ovog područja predstavljaju netom objavljeni rezultati misije satelita Planck.

3. Akustički vrhovi

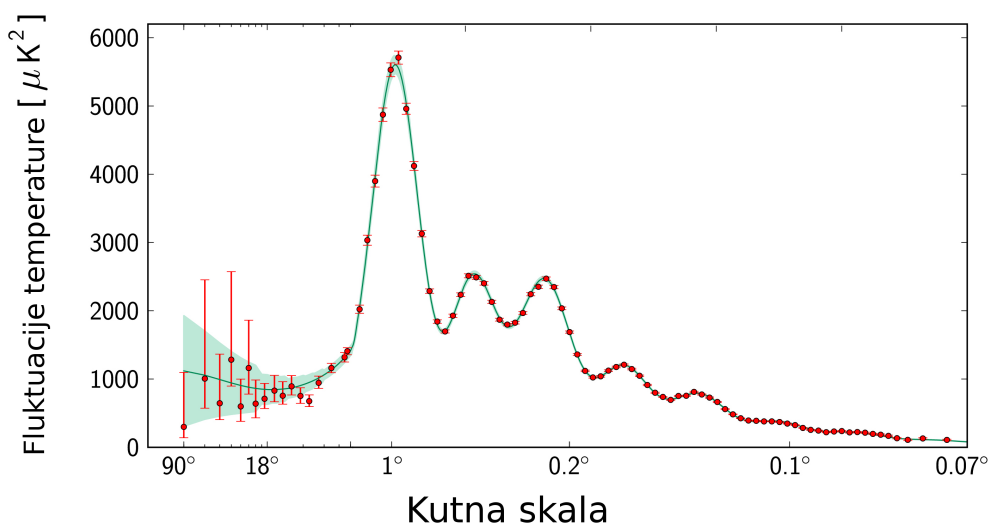
Prije nego navedemo neke rezultate tih novih mjerenja, objasniti ćemo ukratko fiziku nastajanja ovih kutnih nejednodimenzionalnosti temperature CMB zračenja. Očekuje



Slika 1: Kutne nejednolikosti kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja, izmjerene satelitom Planck. Bijela crta razgraničava dvije nebeske polutke, a dolje desno je zaokružena "tamna mrlja" - neočekivano hladno područje. (Izvor: ESA i kolaboracija Planck)

se da su početne klince u nejednolikosti gustoće nastale već u prvim trenucima nakon velikog praska. Vodeća teorija njihovog nastanka (podržana između ostalog i ovim mjerenjima) je tzv. teorija kozmičke inflacije — perioda u kojem se usljed snažne antigravitacijske sile svemir eksponencijalno brzo širi. To širenje je bilo toliko veliko (barem za 10^{26} puta) da su mikroskopske kvantne fluktuacije, koje su stalno prisutne zbog kvantno-mehaničke neodređenosti mikro-svijeta, bile naglo "napuhane" na velike kozmičke dimenzije. Vrlo važno svojstvo tih početnih nejednolikosti je njihov spektar tj. ovisnost njihovog intenziteta o prostornim dimenzijama fluktuacije gustoće. Jedno od razlikujućih svojstava kozmičke inflacije je da je taj intenzitet skoro neovisan o skali tj. amplitude fluktuacija gdje se koherentno zgušnjava veliki komad svemira su iste kao amplitude gdje se zgušnjava mali komad svemira. Kad se ta struktura fluktuacija gustoće odrazi na CMB zračenje, superpozicija svih mogućih skala rezultira onda strukturom nejednolikosti temperature prikazanoj na slici 1.

Na toj slici su rezultati mjerenja satelita Planck, gdje su dijelovi neba topliji od prosjeka prikazani kao svjetliji, a oni hladniji kao tamniji. Za kozmološka razmatranja puno je zanimljivije te rezultate (intenzitet temperaturnih varijacija na nebu) matematički pretočiti u dijagram koji prikazuje intenzitet temperaturnih fluktuacija kao funkciju odgovarajućih kutnih skala na nebu, što je prikazano na slici 2. Ta slika npr. pokazuje da su najintenzivnije mrlje sa slike 1 one koje vidimo na nebu pod kutem od oko jednog stupnja.



Slika 2: Spektar temperaturnih fluktuacija CMB zračenja. Točke su mjerenja satelita Planck, a linija je standardni kozmološki model. (Izvor: ESA i kolaboracija Planck)

Osim zagrijavanja zbog zgušnjavanja usljed gravitacijskog privlačenja, ove mrlje su posljedica i tzv. akustičkog titranja spomenute plazme. Naime, kad originalne nejednolikosti gustoće počnu gravitacijski privlačiti k sebi fotone (zračenje), elektrone i protone, tlak zračenja se poput opruge opire kompresiji i nastaje titranje cijelog sustava od stanja razrjeđenja do stanja sažimanja i natrag. (Vidi sliku 3.) U trenutku rekombinacije, fotoni postaju slobodni i trenutna faza titranja u kojoj se nalazi neki dio prostora određuje relativnu temperaturu zračenja koju onda vidimo danas (slika 1). Tako se inflacijski spektar fluktuacija, neovisan o skali, pretvara u spektar sa slike 2.

3.1. Prvi vrh

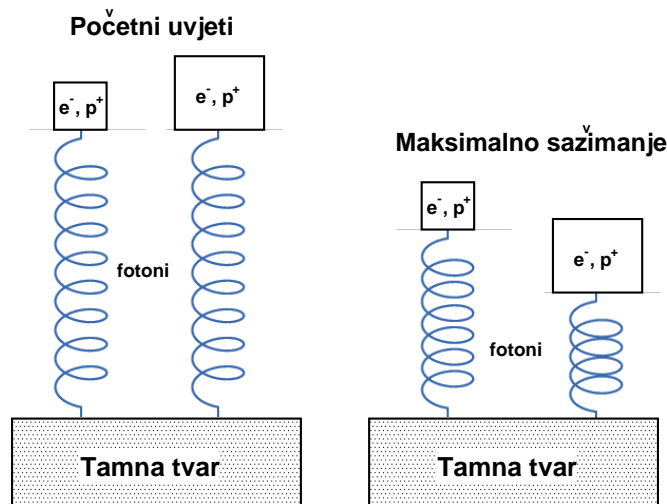
Od ključnog značaja je najsporiji mogući titraj koji od velikog praska do trenutka rekombinacije obavi točno pola ciklusa titranja i po prvi put završi u maksimumu sažimanja. Tom titraju odgovara prvi vrh u dijagramu na slici 2. Položaj tog vrha je skoro sasvim određen dobro poznatom fizikom plazme, vremenom od velikog praska do rekombinacije (isto dobro poznato) te jednim od najzanimljivijih kozmoloških parametara, a to je zakrivljenost svemira. Zakrivljenost svemira je posljed-

ica mase i energije u svemiru i ona je prema Einsteinovoj općoj teoriji relativnosti način na koji se manifestira sila gravitacije.

Kako ta zakrivljenost utječe na spektar CMB zračenja? Osnovna struktura nejednolikosti temperature zračenja je stvorena u trenutku rekombinacije i nakon toga se 14 milijardi godina giba kroz svemir do nas promatrača. U tom gibanju, cijeli svemir se može ponašati kao velika leća. Ukoliko je prostor svemira pozitivno zakrivljen (početno paralelne zrake svjetlosti se primiču) svemir djeluje kao uvećavajuća leća, a ukoliko je negativno zakrivljen (početno paralelne zrake se razmiču) svemir djeluje kao smanjujuća leća. U prvom slučaju će se "mrlje" nejednolikosti zračenja sa slike 1 povećati, što će položaj prvog vrha pomaknuti ulijevo, dok će se u drugom slučaju vrh pomaknuti udesno. Proračuni pokazuju da je za ravni svemir (u kojem paralelne zrake ostaju paralelne) položaj tog prvog vrha na oko jedan stupanj. Kao što se vidi na slici 2, vrh zaista i jest na oko jedan stupanj što znači da je naš svemir geometrijski ravan.

Ako je svemir ravan, znači da ima točno određenu prosječnu gustoću mase i energije, tzv. kritičnu gustoću od 10^{-26} kg/m³ što otprilike odgovara desetak atoma vodika po kubičnom metru. Međutim, brojna druga promatranja nam govore da obične materije (čijoj masi doprinose uglavnom protoni i neutroni) u svemiru ima znatno manje.

3.2. Drugi vrh



Slika 3: Prikaz akustičkog titranja plazme u ranom svemiru. Veći udio obične materije rezultira većom razlikom između maksimuma razrjeđivanja i sažimanja, a time i većom razlikom prvih dvaju vrhova spektra sa slike 2.

Jedno od tih drugih promatranja je upravo i slijedeće važno svojstvo spektra akustičkih oscilacija CMB zračenja, a riječ je o relativnoj visini prvog i drugog vrha na slici 2. Taj drugi vrh odgovara titranjima koji su od velikog praska do rekombinacije uspjeli obaviti čitavi ciklus do sažimanja i natrag do maksimalnog razrjeđenja. Tu treba uočiti da je ordinata na slici 3 *kvadrat* varijacije temperature, pa se i brijegovi i dolovi titranja (najtamnije i najsvjetlije točke sa slike 1; razrjeđenja i sažimanja) pretvaraju u vrhove na slici 2.

Kod normalnog titranja na opruzi bez trenja, udaljenost brijega i dola od položaja ravnoteže je jednaka. Ovdje međutim i sam medij koji titra doprinosi gravitacijskoj sili koja je uzrok titranja (glavnina gravitacijske sile dolazi od tamne tvari). Protoni u tom mediju svojim doprinosom ukupnoj gravitirajućoj masi pomažu sažimanju, a odmažu razrjeđivanju. Stoga će drugi vrh (rarjeđivanje) biti manje istaknut, niži od prvog vrha (sažimanje). Iz relativne visine tih dvaju vrhova može se dobro odrediti ukupna količina obične materije u svemiru i ona, prema Planckovim mjerenjima, iznosi samo 5 % kritične gustoće. Preostalih 95 % mora otpasti na vrste tvari i energije koje su nam u ovom trenutku još potpuno nepoznate.

4. Standardni kozmološki model

Ova dva primjera samo površno ilustriraju bogatu fiziku zapisanu u temperaturnim anizotropijama sa slike 1. Pozadinsko zračenje je sustav iz kojeg smo saznali više preciznih podataka o svemiru kao cjelini nego iz bilo kojeg drugog izvora. Složena analiza slike 2 nam omogućuje npr. mjerenje Hubbleove konstante (brzine širenja svemira), a onda i starosti svemira. Većina tih parametara su bili dobro izmjereni već i satelitom WMAP, ali Planck je omogućio znatno povećanje preciznosti. Neki od Planckovih rezultata su:

- udio tamne energije u svemiru - 68.3 %
- udio tamne tvari - 26.8 %
- udio obične tvari - 4.9 %
- Hubbleova konstanta - 68 km/s po megaparseku
- starost svemira - 13.8 milijardi godina

Zahvaljujući mjerenjima ovih parametara, danas imamo prihvaćeni standardni kozmološki model prema kojem svemirom dominiraju tamna energija i tamna tvar. Vjerovanje da je taj model dobar pojačavaju i potpuno neovisna istraživanja poput promatranja dalekih supernova, opažanja relativnih udjela lakih elemenata u svemiru ili promatranja načina i brzine postupnog organiziranja strukture svemira

u galaktike i galaktičke skupove. Sva ta istraživanja su u izvanrednom suglasju i daju nam model svemira poznat kao Lambda-CDM model, gdje Lambda stoji za tamnu energiju, a CDM (engl. cold dark matter) za hladnu tamnu tvar. Pridjev "hladna" dolazi od činjenice da se čestice tamne tvari gibaju relativno sporo i okupljaju u galaktičkim haloima.

Čestice tamne tvari još nisu opažene jer interagiraju izvanredno slabo s našim detektorima, ali veliki naponi se ulažu u te eksperimente, neke kontroverzne indikacije već postoje i nada u skoro izravno otkriće čestica tamne tvari nije neosnovana. Što se tiče tamne energije, njena priroda je velika misterija moderne znanosti i vjerojatno traži revolucionarne nove ideje.

5. Anomalije CMB zračenja

Opažanja satelita Planck nam daju izvanredno precizne vrijednosti parametara standardnog kozmološkog Lambda-CDM modela, ali možda najzanimljiviji novi rezultat predstavlja potvrda nekoliko neobičnih svojstava CMB zračenja, tzv. CMB anomalija, koje je opazio već satelit WMAP. Najočitiya je tzv. "tamna mrlja", zaokružena dolje desno na slici 1, što je dio neba na kojem je CMB zračenje neočekivano hladno. Zatim, spektar na slici 2 je na krajnjem lijevom kraju znatno slabiji nego što se očekuje prema standardnom Lambda-CDM modelu. Na kraju, posebno su bizarne neobična usklađenost smjera akustičkog titranja na dvije najveće skale s osi Sunčevog sustava (ne vidi se na slikama uz ovaj tekst) te asimetrija po kojoj je CMB zračenje sa sjeverne nebeske polutke značajno različite prosječne temperature nego ono s južne. Naravno, nema nikakvog smislenog objašnjenja zašto bi svojstva CMB zračenja bila ikako usklađena sa orijentacijom Zemlje tj. Sunčevog sustava. Pokušaj objašnjavanja takvih anomalija inspirira kozmologe, ali tek će vrijeme pokazati da li su neke od njih ipak samo slučajne što je trenutno možda ipak najvjerojatnije. Važno je da sklad Plancka i WMAP-a pokazuje da te anomalije nisu neki trivijalni problemi s instrumentima i obradom podataka već realne pojave na nebu.

Satelit Planck još nije obradio sva svoja mjerenja. Vrlo interesantni rezultati se očekuju od mjerenja polarizacije CMB zračenja, dakle određene usmjerenosti njegovog elektromagnetskog polja. Takva usmjerenost je posljedica raznih kozmoloških efekata, a posebno zanimljiv uzrok polarizacije su gravitacijski valovi nastali u razdoblju inflacijskog širenja svemira. Planck vjerojatno neće moći dokazati postojanje tih gravitacijskih valova, ali mogao bi dati veliku podršku toj ideji, a time i dodatnu podršku teoriji kozmičke inflacije.

Literatura

- [1] K. Kumerički, *Kozmičko pozadinsko zračenje - prva fotografija svemira*, Zbornik 18. ljetne škole mladih fizičara "Svjetlost - fizika, tehnologija, kozmologija", Korčula, 23-29 lipnja 2002. <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~kkumer/articles/korcula02proc.pdf>
- [2] I. Picek, *Nastupanje ere preciznih kozmoloških mjerenja*, Matematičko-fizički list **LVIII** 2 (2007-2008), 104-109.
- [3] K. Kumerički, *Nova mjerenja kozmičkog pozadinskog zračenja*, Matematičko-fizički list, **LIII** 4 (2002-2003), 278-279.