

# Kozmičko pozadinsko zračenje — prva fotografija svemira

Krešimir Kumerički, PMF Zagreb, Fizički odsjek, *kkumer@phy.hr*

## Sažetak

Kozmičko pozadinsko zračenje, emitirano u ranom svemiru, posljednjih je godina predmet intenzivnih eksperimentalnih i teorijskih studija. Ono omogućuje posredan uvid u većinu bitnih kozmoloških pitanja: sastav i geometriju svemira te njegovu povijest i budućnost. Ovdje ćemo se s pozadinskim zračenjem upoznati putem slijedećih tema: (1) Veliki prasak i povijest ranog svemira. (2) Nastanak pozadinskog zračenja. (3) Informacije zapisane u pozadinskom zračenju.

## 1 Veliki prasak i rani svemir

Svemir u kojem živimo i kojeg proučavamo prema svim indikacijama započeo je svoje postojanje prije 10-15 milijardi godina događajem kojeg nazivamo Veliki prasak. Dok su sam trenutak Velikog praska i prvih slijedećih  $10^{-43}$  sekundi još uvijek skoro sasvim izvan dosega znanstvenih metoda, o onome što je uslijedilo imamo više-manje konzistentnu sliku.

Početni uvjeti nakon Velikog praska su takvi da je svemir od svog početka pa sve do danas u stanju neprestanog širenja. Upravo je Hubbleovo otkriće tog širenja 1929. godine prva velika eksperimentalna potvrda teorije Velikog praska. (O drugim dvjema bit će riječi nešto kasnije.) Kao što se plinovi usljed ekspanzije hlade, tako i temperatura svemira pada s njegovim širenjem. Ako sada zavrtime film povijesti svemira unatrag, vidimo materiju koja se steže i čija gustoća i temperatura rastu sve to više kako se prmičemo Velikom prasku. Kako je ponašanje materije pri raznim gustoćama i temperaturama nešto o čemu je dosta poznato iz obične zemaljske fizike, u mogućnosti smo stvoriti prilično preciznu sliku zbivanja u ranom svemiru. I premda još mnoga pitanja traže odgovore, razvoj svemira u prvim minutama nakon Velikog praska najvjerojatnije je tekao na slijedeći način:

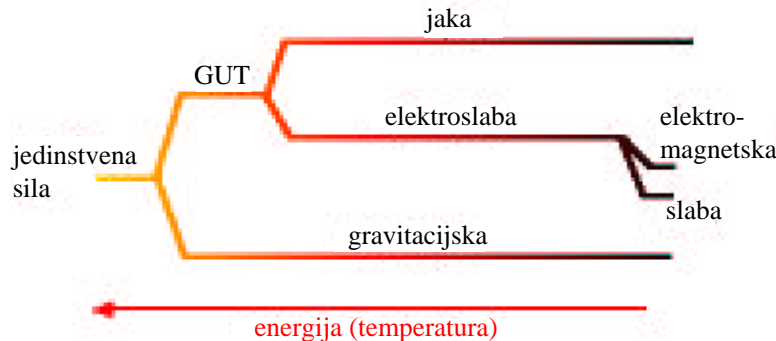
- **Veliki prasak.**  $0 - 10^{-43}$  s. Temperatura i gustoća su iznad područja u kojima vrijede trenutno poznati zakoni fizike. O tom se periodu može samo spekulirati.
- **Jedinstvena sila. Inflacija. Bariogeneza.**  $10^{-43} - 10^{-34}$  s. Detalji ovog perioda su isto slabo poznati. Prema tzv. GUT<sup>1</sup> teorijama očekuje se da su u njemu sve temeljne prirodne sile izuzev gravitacije bile združene. Također se smatra da je u ovom periodu svemir prošao kroz period izvanredno brzog širenja, tzv. *inflaciju*, i da su pri tom širenju malene fluktuacije gustoće napuhane do kozmičkih razmjera te da predstavljaju klicu kasnijeg stvaranja strukture svemira tj. galaktika i njihovih nakupina.

U ovom periodu je vjerojatno nastala i asimetrija između količina materije i antimaterije koja je rezultirala današnjim svemirom u kojem antimaterije ima mnogo manje nego materije. Proces stvaranja ove asimetrije se naziva *bariogeneza* i nije još sasvim rasvijetljen.

- **Razdvajanje sila.**  $10^{-34} - 10^{-10}$  s. S hlađenjem svemira prvotna jedinstvena sila se raslojava na tri današnje temeljne sile: elektromagnetsku te slabu i jaku nuklearnu silu, kako je prikazano na slici 1.

---

<sup>1</sup>Grand unified theory — teorija velikog ujedinjenja



**Slika 1:** S porastom temperature u ranom svemiru dolazi do ujedinjavanja prirodnih sila. Ubrzivači čestica su nam posljednjih desetljeća omogućili detaljno izučavanje ujedinjenja elektromagnetske i slabe nuklearne sile. Nažalost, za proučavanje GUT ujedinjenja te ujedinjenja svih sila, jedini ubrzivač koji ima dovoljnu energiju je rani svemir, a on je prestao s radom prije više milijardi godina.

Zajedno s razdvajanjem temeljnih sila mijenjao se i sastav svemira. Teške nestabilne čestice koje su dominirale jako ranim svemirom s protokom vremena se raspadaju na lakše. Glavni sastojci današnjih galaktika, protoni i neutroni, u ovom periodu još uvijek ne postoje jer je svemir dovoljno vruć da ih razbije na njihove sastojke, kvarkove i gluone.

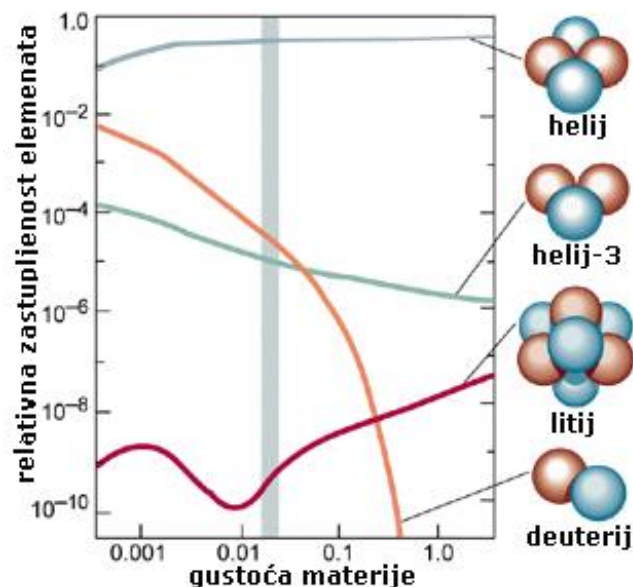
- **Stvaranje protona i neutrona.**  $10^{-5}$  s. Temperatura je oko  $10^{13}$  kelvina (K) i kvarkovi i gluoni se međusobno vežu u protone i neutrone. Ovaj prijelaz se posljednjih godina pokušava imitirati unutar velikih ubrzivača čestica u kojima se sudaraju teške jezgre u nadi da će temperatura sudara rastopiti protone i neutrone u tu tzv. *kvarkovsko-gluonsku plazmu*.

Inače, protoni i neutroni se originalno stvaraju u jednakom broju, ali u slijedeće tri minute dio neutrona se beta raspadom pretvori u protone tako da na kraju protona ima otprilike sedam puta više.

- **Prvotna nukleosinteza.** 100 s. Svemir je s  $10^9$  K dovoljno hladan da se protoni i neutroni vežu u jezgre: prvo deuterija, a zatim i helija, te manjim dijelom drugih lakih elemenata. To je prvotno stvaranje elemenata (tzv. *nukleosinteza*) koje će biti nastavljeno mnogo kasnije u zvijezdama u kojima će se stvoriti svi preostali elementi periodnog sustava.

Kako te procese nuklearne fuzije lakih elemenata razmjerno dobro razumijemo, moguće je predvidjeti relativne omjere ovih lakih elemenata. Odlično slaganje teorijskih predviđanja sa zaista izmjerenim količinama lakih elemenata u današnjem svemiru je druga velika eksperimentalna potvrda teorije Velikog praska, ilustrirana na slici 2. Kako većina lakih elemenata nastaje i kasnije, fuzijom u zvijezdama, posebno je važan podatak gustoća deuterija za kojeg se zna da ne nastaje u zvijezdama pa je njegova eksperimentalna identifikacija najčišća — praktički sav deuterij u svemiru potječe iz prvotne nukleosinteze. Usput, mjerenjem njegove relativne zastupljenosti u svemiru možemo pomoću grafikona sa slike 2 odrediti ukupnu gustoću materije (tj. protona i neutrona). Vidimo da materije ima manje od 10% tzv. *kritične gustoće* (riječ je o gustoći potrebnoj da svemir bude upravo ravne geometrije, vidi kasnije). To je snažna indikacija da svemirom dominira nepoznata *tamna materija* koja se ne sastoji od protona i neutrona.

- **Razvezivanje pozadinskog zračenja od materije.** 300 000 godina. Vidi slijedeći odjeljak.



**Slika 2:** Teorijsko predviđanje relativnih zastupljenosti lakih elemenata u ovisnosti o ukupnoj gustoći materije. Najjaču ovisnost pokazuje zastupljenost deuterija. Mjerenjem količine deuterija u svemiru postavljamo okomitu traku, a onda je eksperimentalno slaganje količina helija, helija-3 i litija s vrijednostim predviđenim ovim grafikonom potvrda ispravnosti teorije prvotne nukleosinteze u Velikom prasku.

## 2 Nastanak kozmičkog pozadinskog zračenja

Nakon formiranja jezgara lakih elemenata u prvotnoj nukleosintezi, svemir je slijedećih 300 000 godina proveo u razmjerno dosadnom širenju i hlađenju. Jezgre, fotoni i elektroni neprestano su se sudarali i sačinjavali su homogenu, gustu i neprozirnu plazmu. Premda su se suprotno nabijeni elektroni i jezgre u toj plazmi privlačili, ako bi se neki od njih i uspjeli nakratko spojiti u čitave atome, fotoni visoke temperature brzo bi ih natrag razbijali (ionizirali) na sastavne dijelove.

Tek kad je temperatura pala na nekih 3000 K, fotoni više nisu imali dovoljno energije za ionizaciju i razmjerno brzo svi elektroni i jezgre se povezuju u neutralne atome. To je trenutak u kojem svemir postaje električno neutralan, a time i proziran. Fotoni se od tog trenutka nastavljaju više-manje neometano gibati sve do danas i u njima je zabilježena prva fotografija svemira.

Ti fotoni sačinjavaju ono što nazivamo *kozmičko pozadinsko zračenje*. Sa širenjem svemira i ta fotonska kupka se širi i gubi energiju. Četrdesetih godina 20. stoljeća George Gamow je prvi došao na ideju da bi svemir trebao biti ispunjen takvim zračenjem i on i Ralph Alpher su izračunali da bi se ono do danas trebalo ohladiti s početnih 3000 K do temperature od oko 5-10 K. Kad su 1965. godine Arno Penzias i Robert Wilson zaista i otkrili pozadinsko zračenje, Veliki prasak je postao opće prihvaćena teorija. Ovo otkriće predstavlja treću (povijesno gledano drugu) veliku eksperimentalnu potvrdu teorije Velikog praska.

Pozadinsko zračenje danas ima temperaturu od 2.73 K i u svakom kubičnom centimetru prostora nalazi se prosječno 411 pozadinskih fotona. Za usporedbu, gustoća protona i neutrona je milijardu puta manja.

Precizno snimanje i proučavanje spektra tog zračenja učinjeno je devedesetih godina pomoću COBE satelita, a posljednjih godina istraživanja su intenzivirana eksperimentima pomoću atmosfer-

skih balona (BOOMERANG, MAXIMA) i novih satelita MAP (nedavno lansiran) i Planck (lansiranje se očekuje 2007.).

### Tri eksperimentalne potvrde teorije Velikog praska

1. *Hubbleov zakon razmicanja galaktika* — galaktike u univerzalnom širenju sugeriraju da je svemir nekad bio manji i gušći.
2. *Kozmičko pozadinsko zračenje* — pokazuje da je svemir nekad bio na temperaturi od 3000 K.
3. *Relativne gustoće lakih elemenata* — pokazuju da je svemir nekad bio na temperaturi od  $10^9$  K.

## 3 Informacije zapisane u pozadinskom zračenju

Do kojih informacija možemo doći proučavajući pozadinsko zračenje? Kao prvo, spektar tog zračenja je skoro savršeno jednak spektru crnog tijela<sup>2</sup> temperature 2.73 K. Iz toga se može izračunati da su valne duljine tog zračenja u milimetarskom području, što znači da su energije fotona više od tisuću puta manje od energija fotona vidljive svjetlosti.

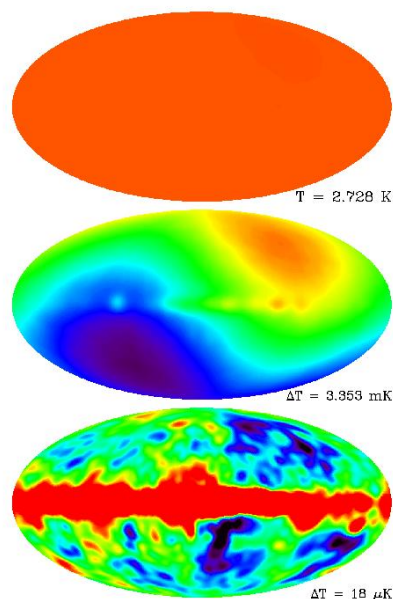
### 3.1 Rani svemir je homogen

Fotografija neba u mikrovalnom spektru prikazana je na slici 3 (gore) i premda djeluje prilično nezanimljivo ona potvrđuje vrlo važnu činjenicu da je svemir u vrijeme nastanka pozadinskog zračenja bio izvanredno homogen. Zgodno je uočiti kontrast te jednolične fotografije neba s fotografijom današnjeg izrazito nehomogenog neba s njegovim zvijezdama i galaktikama.

### 3.2 Brzina gibanja Zemlje kroz svemir

Do još zanimljivijih informacija možemo doći ukoliko mjerenje temperature zračenja iz raznih dijelova svemira obavimo s milikelvinskom preciznošću. Tako dobijemo sliku 3 (sredina) na kojoj nije više prikazana apsolutna temperatura zračenja već razlika od srednje vrijednosti 2.728 K. Vidimo da se temperatura pravilno mijenja za nekoliko milikelvina od jedne točke na nebeskoj sferi do njoj upravo nasuprotne točke. Razlog te varijacije je apsolutno gibanje Zemlje kroz svemir zbog njenog gibanja oko središta naše galaktike, te gibanja naše galaktike kroz svemir. Usljed tog gibanja, valna duljina zračenja na koje nalijećemo se prividno skraćuje pa njegova temperatura prividno raste. Ta se pojava naziva Dopplerov učinak i poznata je iz svakodnevice gdje primijećujemo promjenu visine zvuka automobila ovisno o tome da li nam automobil prilazi ili se odmiče od nas. Mjereći razliku temperature lako se određuje brzina gibanja Zemlje i dobiva se da je ona jednaka  $371 \pm 1$  km/s. Tako precizno mjerenje teško je izvesti drugim metodama.

<sup>2</sup>Vidi predavanje prof. Klabučara za detalje o zračenju crnog tijela.



**Slika 3:** Snimke pozadinskog zračenja učinjene pomoću COBE satelita. Za opis vidi tekst. Traka po sredini treće fotografije su smetnje od naše galaktike.

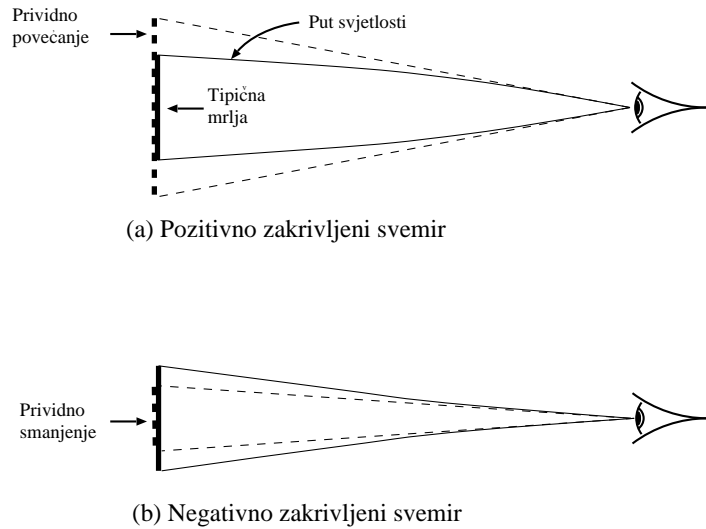
### 3.3 Klice stvaranja galaktika

Najvažnije podatke ipak dobijemo tek kad kompenziramo ovaj kozmološki nezanimljiv učinak gibanja Zemlje (računski ga eliminiramo sa slike) i povećamo rezoluciju do razine mikrokelvina. Rezultat vidimo na slici 3 (dolje) gdje tamnija i svjetlija područja označavaju područja različite temperature pozadinskog zračenja. Vidimo da svemir u trenutku razvezivanja fotona od materije ipak nije bio baš savršeno homogen već su postojale male varijacije gustoće. Premda su te varijacije tada bile svega oko tisućinku postotka prema srednjoj vrijednosti, gušća područja su ipak malo-pomalo gravitacijski privlačila materiju iz rijedih područja i tako s vremenom postajala još gušća, da bi se milijardama godina kasnije iz njih formirale današnje galaktike i nakupine galaktika. Tako možemo reći da slika 3 (dolje) prikazuje klica razvoja strukture današnjeg svemira.

Koje je porijeklo ovih sitnih varijacija gustoće? Zašto svemir nije savršeno homogen? To je još jedno od pitanja na koja nemamo sasvim pouzdan odgovor, ali najšire prihvaćena teorija je ona u kojoj su te varijacije posljedica kvantnomehaničkih fluktuacija vakuuma. Naime, Heisenbergov princip neodređenosti omogućuje da se u vakuumu privremeno sama od sebe pojave područja odstupanja od nulte energije. To se događa u svakom trenutku, ali odstupanja su ili vrlo mala ili se vrlo brzo međusobno poništavaju pa ih ne primjećujemo. Međutim, vjeruje se da je period izvanredno brzog širenja svemira (inflacije) spomenut u prvom odjeljku mogao ta područja napuhati do kozmičkih razmjera i da su tako nastale varijacije sa slike 3 (dolje).

### 3.4 Određivanje geometrije svemira

Jedan od najvažnijih zadataka kozmologije je određivanje da li je naš svemir prostorno ravan ili zakrivljen. Kako je zakrivljenost prostora prema Einsteinovoj teoriji gravitacije posljedica ukupnog



**Slika 4:** Svemir kao povećalo. Prividna promjena veličine temperaturnih područja pozadinskog zračenja usljed putovanja zrake svjetlosti kroz svemir zakrivljene geometrije.

gravitacijskog utjecaja mase koja se u tom prostoru nalazi, poznavajući zakrivljenost tj. geometriju svemira možemo saznati dosta i o njegovom sastavu. To nam onda posredno omogućuje i uvid u budućnost svemira: Da li je gustoća mase dovoljna da se svemir gravitacijski iznova sažme u Velikom sažimanju ili će se on ipak zauvijek širiti?

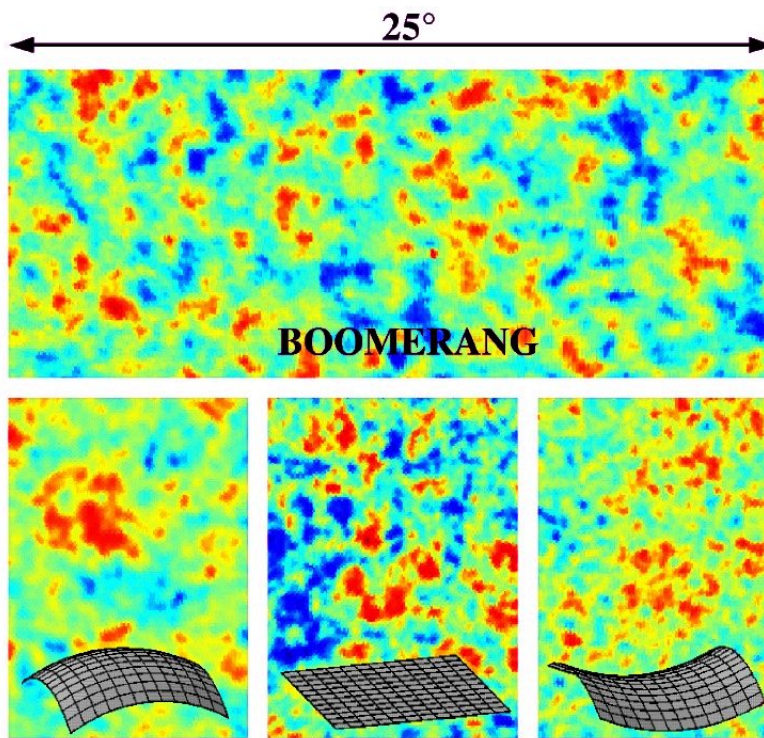
Iste ove varijacije u temperaturi kozmičkog pozadinskog zračenja sa slike 3 (dolje) koje prikazuju klice razvoja galaktika, omogućuju nam i mjerenje zakrivljenosti svemira. Naime, budući da razmjerno dobro poznajemo dinamiku stvaranja tih varijacija u temperaturi poznata nam je, slobodnije govoreći, prosječna veličina mrlji sa slike 3 (dolje). Međutim, ukoliko svemir nije ravan, slika tih mrlji koju nam donose fotoni pozadinskog zračenja će do nas doputovati zakrivljenom putanjom i čitav svemir će funkcionirati kao svojevrsno povećalo, kako je skicirano na slici 4. Iz iznosa prividnog povećanja ili smanjenja mrlji možemo onda odrediti zakrivljenost svemira. Na slici 5 vidimo simulacije kako bi varijacije u pozadinskom zračenju izgledale za pozitivno zakrivljeni, ravni i negativno zakrivljeni svemir. Usporedbom s realnom slikom dobivenom iz atmosferskog balona eksperimentalne kolaboracije BOOMERANG ustanovljeno je da je naš svemir ravan do na nekoliko postotaka.

To je inače vrlo poželjan rezultat jer kad svemir ne bi bio ravan kozmolozi bi se našli pred vrlo teškim teorijskim problemima u koje ovdje nećemo ulaziti. Recimo još, da ne bi bilo zabune, kako je ovdje čitavo vrijeme riječ o globalnom zakrivljenju svemira kao cjeline. Naravno da masa raspodijeljena u galaktikama i međugalaktičkom plinu izaziva lokalne neravnine prostora u svojoj okolini, što u našoj priči ne igra nikakvu ulogu.

### 3.5 Tamna tvar

Za kraj, prisjetimo se da smo u prvom odjeljku spomenuli da je gustoća obične materije<sup>3</sup> manja od 10% tzv. kritične gustoće, potrebne da svemir bude ravan. Kako nam gore spomenuto mjerenje varijacija pozadinskog zračenja govori da svemir *jest* približno ravan, to znači da preostalih 90% gustoće mora dolaziti od neke još nepoznate i neotkrivene *tamne tvari*. U kombinaciji s nekim drugim

<sup>3</sup>Pod *običnom* materijom ovdje se misli na protone i neutrone (elektroni su zanemarivo lagani) udružene u jezgre elemenata periodnog sustava. Za tu običnu materiju kozmolozi obično rabe stručni izraz *barionska* materija.



**Slika 5:** Mjerenjem veličine hladnih i toplih mrlja na fotografijama pozadinskog zračenja moguće je odrediti geometriju svemira. Kozmološke simulacije predviđaju u slučaju *ravne* geometrije (one koja se uči u školi) dominaciju mrlja veličine otprilike jednog lučnog stupnja (dolje sredina). S druge strane, ukoliko je geometrija prostora zakrivljena, zakrivljavanje putanja zraka svjetlosti će deformirati sliku. U *pozitivno zakrivljenom* svemiru (u kojem paralelni pravci konvergiraju jedan drugom) svemir će djelovati kao povećalo i strukture će izgledati veće od jednog stupnja (dolje lijevo). Nasuprot tome, u *negativno zakrivljenom* svemiru (u kojem paralelni pravci divergiraju jedan od drugog) strukture će izgledati manje (dolje desno). Usporedba ovih modela sa fotografijama projekta BOOMERANG (gore) sugerira da je naš svemir približno ravan.

kozмолоškim promatranjima (prvenstveno dalekih supernova) ova mjerenja ukazuju još i da otprilike 70% otpada ne na tamnu *tvar* već na nešto što se naziva tamna *energija* i što ima vrlo zanimljiva antigravitirajuća svojstva te uzrokuje da se širenje svemira sve više ubrzava.

U slijedećem desetljeću očekuju nas nova mjerenja pozadinskog zračenja (prvenstveno pomoću satelita MAP i Planck) koja će omogućiti precizno određivanje udjela obične tvari, tamne tvari i tamne energije u ukupnom sastavu svemira te još preciznije određivanje geometrije i starosti svemira. Tako je pred kozmolozima zaista zanimljivo razdoblje.