

# Polarizacija prasevanja in inflacija vesolja

Janez Strnad

17. marca letos je raziskovalna skupina BICEP2 objavila, da je izmerila polarizacijo B v prasevanju. Objava je zbudila pozornost, ker je podprla domnevo o inflaciji vesolja in o gravitacijskem valovanju, ki jo je spremljalo. S tem bi merjenje seglo še bliže začetku širjenja vesolja. Odločilno je, ali bodo druge raziskovalne skupine izid podprle.

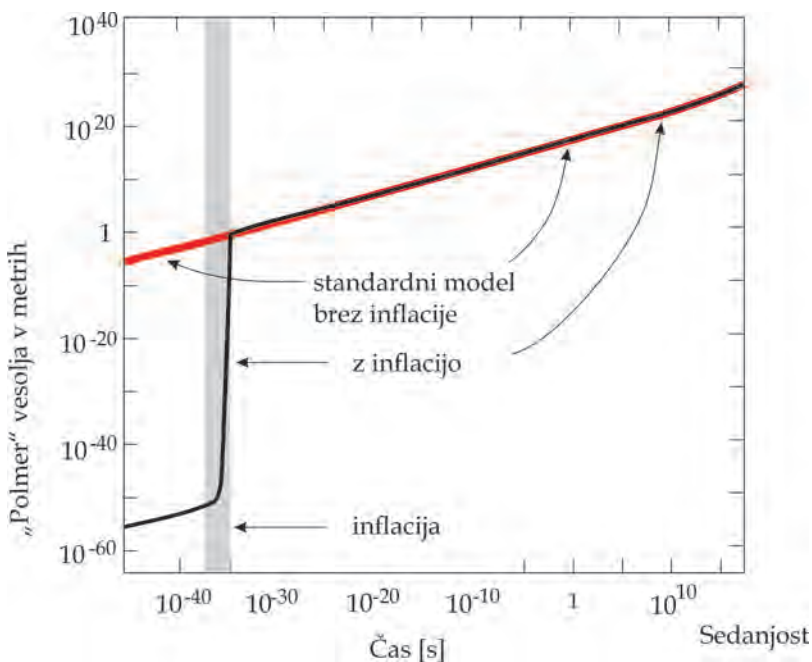
## Uvod

Iz vseh delov neba prihaja prasevanje ali vesoljsko mikrovalovno ozadje. To je preostanek sevanja z zgodnje razvojne stopnje vesolja, ko je bila temperatura zelo visoka. Galaksij in zvezd še ni bilo in vesolje je bilo enotno. Delci snovi in sevanje so bili v ravnovesju. Vesolje se je širilo in ohlajalo. Približno 380 tisoč let po začetku širjenja se je temperatura v vesolju znižala na dobrih tri tisoč stopinj. Prišlo je do rekombinacije: elektroni in jedra so se postopno spojili v

nevtralne atome in vesolje je postalo prepustno za svetlobo. Prasevanje izvira iz tistega časa. Potem sta se snov in sevanje razvijala ločeno. Danes prasevanju ustreza sevanje črnega telesa s temperaturo nekaj manj kot tri stopinje nad absolutno ničlo. To sevanje je najgostejše pri valovni dolžini milimeter in sodi med mikrovalove. Sevanje je zelo enakomerno, odmiki dosežejo le stotisočino stopinje več ali manj od navedene povprečne vrednosti. Po odmikih je mogoče presoditi, kako se je razvijalo vesolje (*Vesolje*, Proteus, 69, 2006/2007: 62-71).

## Polarizacija

Mikrovalovi so kot vsako elektromagnetno valovanje transverzalno valovanje. Na danem kraju električno polje niha v ravnini, ki je pravokotna na smer potovanja. V nepolariziranem valovanju se smer polja v tej ravnini neurejeno spreminja in o njej ni



Risba približno ponazori napihovanje vesolja med inflacijo. Napihovanje naj bi trajalo nekako od  $10^{-35}$  sekunde do  $10^{-34}$  sekunde. Med napihovanjem naj bi se vesolje povečalo vsaj za  $10^{25}$ -krat. Napihovanju naj bi ustrezala energija delca okoli  $10^{16}$  GeV. Številski podatki so ocene.



Poenostavljena  
ponazoritev polarizacije  
E in polarizacije B.  
Črte kažejo smer  
linearne polarizacije.

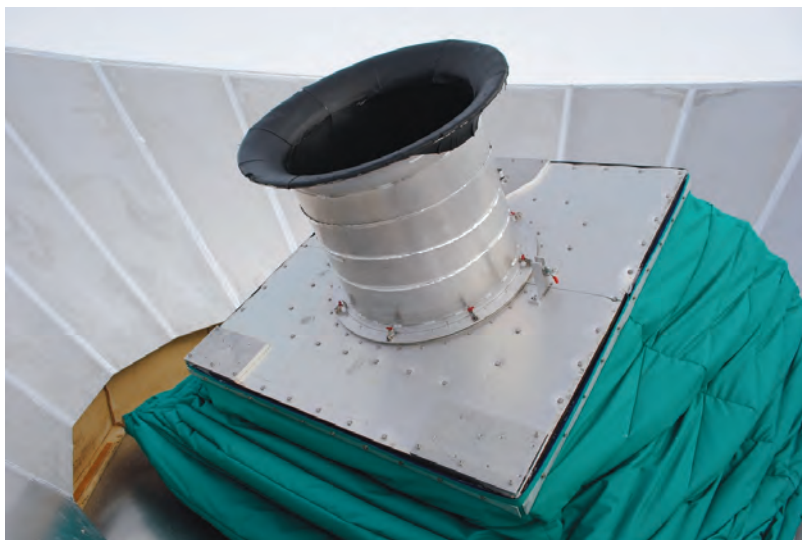
mamo dodatnega podatka. Zaradi kakega vzroka pa valovanje lahko postane *polarizirano*. V polariziranem valovanju natančneje poznamo smer električnega polja v ravnini, pravokotni na smer potovanja. V *linearnem polariziranem valovanju* se ta smer s časom ne spreminja. *Polarizator* ali *polarizacijski filter*, ki iz nepolarizirane svetlobe naredi linearno polarizirano svetlobo, dobro poznajo fotografi. Z njim se lahko znebijo neželene sipane svetlobe (*Polarizirana svetloba*, Proteus, 67, 2004/2005: 15-23).

Vprašanje polarizacije prasevanja je teoretične astrofizike močnejše pritegnilo proti koncu prejšnjega stoletja. Elektromagnetno

valovanje se sipa na elektronih. Če vpadno valovanje ni polarizirano, tudi sipano valovanje ni polarizirano. Elektromagnetno valovanje pa lahko postane polarizirano zaradi delovanja snovi ali *gravitacijskega valovanja*. Spremembe gravitacijskega polja, s katerim opišemo gravitacijo, po praznem prostoru potujejo s hitrostjo svetlobe. *Gravitacijsko valovanje* nastane, če se majhni zvezdi z veliko maso gibljeta v majhni razdalji okoli skupnega težišča, če taki zvezdi trčita ali če zvezda eksplodira. Gostota energijskega toka v gravitacijskem valovanju je zelo majhna, zato je gravitacijsko valovanje težko zaznati. Doslej ga neposredno še niso zaznali,



Postaja Amundsen-Scott.



Odprtina teleskopa  
BICEP2.

posredno pa so ugotovili, da obstaja. Na določenem kraju v gravitacijskem valovanju v ravnini, pravokotni na smer potovanja, v določenem trenutku v določeni smeri gravitacijsko polje ojači in v pravokotni smeri oslabi, v naslednjem trenutku pa v prvi smeri oslabi in v drugi ojači. Zaradi delovanja gravitacijskega valovanja elektromagnetno valovanje lahko postane polarizirano (*Nalovu za gravitacijskimi valovi*, Proteus, 73, 2010/2011: 317-323).

Med rekombinacijo je prišlo do sipanja sevanja na elektronih, dokler se vsi elektroni še niso vezali v atome. Vendar je tedaj prostih elektronov moralo biti že malo, da je sevanje po sipanju lahko potovalo in ga danes zaznavamo. Sevanje je postalo polarizirano v kratkem razdobju proti koncu rekombinacije. Samo majhen del prasevanja je polariziran. Polarizacijo je težko izmeriti, meriti je treba deset do stokrat natančneje kot pri ugotavljanju neenakomernosti. Preko polarizacije je sevanje povezal predele, ki jih vidimo pod kotom od 1 do 5 stopinj.

Pomembno je k zanimanju za polarizacijo prasevanja prispeval tudi Uroš Seljak, ki je leta 1997 kot član Harvardskega Smithsonovega centra za astrofiziko objavil članek *Merjenje polarizacije v vesoljskem mikrova-*

*lovnem ozadju*. Zdaj je Uroš Seljak profesor za fiziko in za astronomijo na Centru za kozmološko fiziko v Berkeleyju, ki ga vodi (*Uroš Seljak – Packardov nagradjenec*, Proteus, 63, 2000/2001: 126-127).

Valovanje se lahko polarizira še zaradi drugih vzrokov. Potem ko so se v vesolju razvile zvezde in galaksije, se je valovanje lahko polariziralo zaradi delovanja snovi. Snov ukrivi curek svetlobe (kot Sonce pritegne svetlobo z zvezde, kar lahko opazujejo med popolnim Sončevim mrkom). To je *gravitacijsko lečenje*.

Ločimo *polarizacijo E* in *polarizacijo B*. Polarizacija E spominja na električno polje, ki nima vrtincev, polarizacija B pa na magnetno polje, ki ima vrtince. Medtem ko polarizacija E lahko nastane zaradi spremenljive gostote snovi, zaradi gibanja snovi ali gravitacijskega valovanja, polarizacija B nastane samo zaradi gravitacijskega valovanja.

Ob času 0, »velikem puku«, naj bi bile gostota snovi, energija delca in temperatura v vesolju neskončne. Ta *singularnost* priča, da je teorija pomanjkljiva. Med začetkom širjenja vesolja in Planckovim časom bi morali uporabiti kvantno teorijo gravitacijskega

polja. Take teorije, ki bi združila kvantno mehaniko in splošno teorijo relativnosti, še ni. Zato tega dela širjenja vesolja ne moremo zajeti s teorijo. Po Planckovem času pa moremo vesolje opisati s kvantno mehaniko in z nekvantno teorijo gravitacijskega polja, to je s splošno teorijo relativnosti.

Planckov čas je  $5,4 \cdot 10^{-44}$  sekunde, Planckova energija delca  $1,2 \cdot 10^{19}$  GeV, Planckova temperatura  $1,4 \cdot 10^{32}$  kelvinov. (Elektronvolt, eV, je enota za merjenje energije delcev. Za 1 eV se poveča energija delca z enim osnovnim nabojem, ko v praznem prostoru preleti napetost 1 volt. 1 gigaelektronvolt, GeV, je milijarda elektronvoltov.) Planckov čas je tako majhen, da lahko navajamo čas v vesolju od Planckovega časa namesto od »začetka širjenja vesolja«.

### Inflacija

Vesolje je krajevno ravno. Gostota snovi, h kateri poleg običajne snovi štejemo temno snov in snov, ki ustreza temni energiji, ima določeno, *kritično vrednost*. Vesolje je v povprečju na velikih razdaljah enakomerno in v vseh smereh enako. Niso zaznali *magnetnih monopolov*, ki naj bi nastali ob začetku širjenja. (Monopol ima en sam magnetni pol, ali severni ali južni, medtem ko sicer naletimo vedno na sodo število magnetnih polov, in to enako število severnih in južnih.)

Kako naj vse to pojasnimo, ko pa nekateri deli vesolja med razvojem niso mogli vplivati na druge dele? Alan Guth je leta 1980 zato uvedel domnevo o *inflaciji*. Vesolje se je kmalu po začetku širjenja v zelo kratkem času močno napihnilo. Na začetku je bilo manjše od atoma in so bili njegovi deli med seboj povezani. Napihovanje je bilo tako hitro, da se to ni spremenilo. Med napihovanjem so se izravnale morebitne neenakomernosti. Ostale so samo majhne naključne neenakomernosti, ki jih zahteva kvantna mehanika. Te so se razvile v zvezde in galaksije, ki zdaj sestavljajo vesolje. Guthova prvotna zamisel je imela pomanjkljivosti, ki so jih odpravili Andrei Linde in drugi. Do-

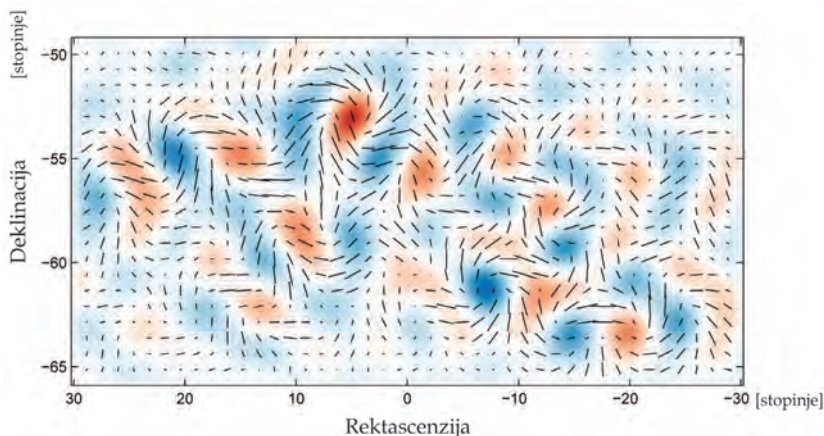
me neva o inflaciji ni imela neposredne eksperimentalne opore in so jo nekateri astrofiziki odklonili.

Napihovanje je vzbudilo gravitacijsko valovanje. Amplituda tega valovanja je bila tem večja, čim hitreje se je vesolje napihovalo in je bila sorazmerna s kvadratom energije delca. Ta ne more biti znatno večja od  $10^{16}$  GeV. To je skoraj  $10^{13}$ -krat več od energije, ki jo doseže Veliki hadronski trkalnik. Pri tolikšni energiji so v okviru velikega poenotenja močna, šibka in elektromagnetna *interakcija* (po domače sila) bile enako močne. Nekateri astrofiziki so iz inflacije izvedli sklep, da je naše vesolje samo eno od številnih vesolj v *mnogoterem vesolju* (v angleščini *multiverse* nasproti universe). Drugi se sprašujejo, kakšen smisel ima razpravljati o vesoljih, ki jih ne moremo opazovati.

### Merilniki

Umetni sateliti, na primer COBE (Cosmic Background Explorer), niso zaznavali polarizacije prasevanja. Polarizacijo so merili z merilniki na zemeljskem površju ali na balonih. Tak merilnik je bil DASI (Degree Angular Scale Interferometer), ki je v letih 1999 in 2000 deloval na postaji Amundsen-Scott na južnem tečaju. Južni tečaj je najbolj pripraven za zaznavanje elektromagnetnega valovanja z valovno dolžino okoli milimetra. Zaradi velike nadmorske višine 2.800 metrov je ozračje redko. Zaradi nizke temperature je v ozračju malo vodne pare, ki absorbira valovanje in ga seva. Sonce dnevno ne vzhaja in ne zahaja, zato je ozračje zelo mirno. Med antarktično zimo sploh ni sončnega sevanja.

DASI je sestavljalo 13 togo povezanih radijskih anten v obliki rogov s premerom po 20 centimetrov. Bližnji sta bili oddaljeni 25 centimetrov, najbolj oddaljeni pa 121 centimetrov. DASI je deloval kot *interferometer*. Zaznavali so valovanje, ki je nastalo z interferenco valovanj iz dveh anten. Pomislimo na valovanje, ki nastane, ko sestavimo va-



Črtice kažejo povprečno smer polarizacije. Rdeča barva nakazuje območja z vrtinci v smeri urinega kazalca, modra pa območja z vrtinci v nasprotni smeri. Računalniki izluščijo prispevek polarizacije B in polarizacije E. Polarizacija E nima vrtincev.

lovanji iz dveh ozkih rež. Vseh dvojic anten je bilo 78. Zaznavali so radijske valove med valovnima dolžinama 8 in 12 milimetrov. Polarizacijo so uravnavali s polarizatorji iz izolatorjev v valovnih vodnikih s krožnim presekom, v katere so se stekle antene v obliki roga. Potem je valovni vodnik s krožnim presekom prešel v valovni vodnik s pravokotnim presekom, ki je prenašal linearno polarizirano valovanje. Časovno povprečje produkta signalov iz dveh anten so zaznavali s tranzistorji z veliko elektronsko gibljivostjo. Na poti do rezultatov so imeli veliko vlogo zmogljivi računalniki in premišljeni programi. Leta 2002 so kot prvi ugotovili, da je prasevanje delno polarizirano in da se smer polarizacije po nebu spreminja. Delovanje interferometra DASI lahko primerjamo z delovanjem Zelo velike antene (VLA), ki povezuje paraboloidne antene s premerom 25 metrov v razmiku po več deset kilometrov. Med tem ko želijo z VLA doseči čim boljšo ločljivost, DASI zadostuje ločljivost okoli ene kotne stopinje. Merile so tudi druge skupine. Zelo blizu nekdanjega DASI na južnem tečaju deluje raziskovalna skupina SPT (South Pole Telescope). Ta skupina uporablja teleskop s paraboloidno anteno s premerom 10 metrov. Zaznavajo valovanje z valovnima dolžinama 2 in 3 milimetra. Leta 2013 je prva zaznala

polarizacijo B, ki je nastala zaradi gravitacijskega lečenja.

Na južnem tečaju raziskuje tudi skupina BICEP (Background Imaging for Cosmic Extragalactic Polarization). Skupina BICEP2 je delovala med letoma 2010 in 2012. Z ločljivostjo 0,52 stopinje so opazovali »južno luknjo«, del neba, na katerem je zelo malo vesoljskih teles. Leča objektiva s premerom 26 centimetrov je v goriščni ravnini zbrala valovanje z valovno dolžino 2 milimetra. V tej ravnini je bila ploščica s potiskanim vezjem s 512 germanijevimi senzorji, ki so neposredno zaznavali polarizacijo. Naprava je bila v helijevem kriostatu, to je v toplotno izolirani posodi, v kateri so vdrževali zelo nizko temperaturo. Po dva in dva senzorja sta bila povezana v slikovni element (piksel). Tudi ta merilnik je deloval kot interferometer, le da so sevanje zaznavali drugače, *bolometrično*. Bolometer se segreje, ko ga zadene valovanje, in zaznajo spremembo električnega upora, do katere pride zaradi tega. V tem primeru so uporabili posebne superprevodne bolometre, ki se jim je upor močno zmanjšal, ko so se le za malenkost segreli. Spremembo upora so zaznali s posebno superprevodno napravo, ki je delovala pri temperaturi četrtr stopinje nad absolutno ničlo. Na njo so bile priključene elektronske naprave pri sobni temperaturi.

Z napravami te vrste je mogoče zaznavati posamezne fotone mikrovalov. Na podoben način zaznavajo sevanje pri SPT. Merilnike ves čas izboljšujejo. Tako je na primer skupina BICEP leta 2012 število senzorjev povečala na 2.480.

### Objava

Skupina BICEP2 ima štiri enakopravne vodje. Kot vodilni raziskovalec nastopa John Kovac s Harvardskega Smithsonovega centra za astrofiziko, ki je sodeloval pri DASI in se je nato pridružil BICEP2. Triindvajsetkrat je priletel na južni tečaj, na njem preživel tudi antarktično zimo ter napravo podrobno pozna. Konec decembra je na južnem tečaju sklical sestanek vse raziskovalne skupine. Vsi člani so se strinjali, da so rezultati trdni, češ da so jih vsestransko preizkusili in po najboljših močeh poskrbeli, da se ni vtihotapila kaka napaka. Odločitve za objavo ni omajalo, da so za razmerje med energijskim tokom polarizacije B in energijskim tokom polarizacije E dobili 0,2. Po podatkih misije Planck bi pričakovali le polovico tega. Kot kaže, so se pri BICEP2 tudi bali, da bi jih katera od skupin prehitela (*Misija Planck je izostrila pogled na vesolje*, Proteus, 75, 2012/2013: 365-369).

Podobne meritve izvaja več raziskovalnih skupin in misija Planck namerava letos objaviti rezultate pri merjenju polarizacije. Kovac je omenil, da je bilo najteže rezultate zadržati v tajnosti, čeprav so prebivali skupaj s člani skupine SPT. Na tiskovni konferenci 17. marca, ki sta se je udeležila tudi Alan Guth in Andrei Linde, so nastopili vsi štirje vodje BICEP2. Nekaj dni po konferenci je skupina BICEP2 poslala v objavo dva daljša članka.

Nekateri astrofiziki svarijo pred prezgodnjim navdušenjem in opozarjajo na to, kaj bi lahko šlo narobe. Eden od kritikov je menil, da naj »šampanjec postavijo nazaj v hladilnik«. Na drugi strani pa - predvsem novinarji - odkritje BICEP2 primerjajo z odkritjem Higgsovega bozona leta 2012 in

že razpravljajo o Nobelovi nagradi. Napeto pričakujemo poročila o rezultatih drugih raziskovalnih skupin.

Uroš Seljak meni, da sklepom BICEP2 ne gre zaupati. To je utemeljil v članku *Skupna analiza polarizacije B Plancka in BICEP2 z upoštevanjem negotovosti polarizacije prahu*, ki ga je z Michaelom Mortensenom pripravil za objavo. V model sta vključila prispevke k polarizaciji B gravitacijskega lečenja, gravitacijskega valovanja in vesoljskega prahu. Upoštevala sta tudi podatke, ki jih je pred nedavnim objavila Misija Planck o polarizaciji prasevanja zaradi prahu. Obstoječim podatkom o polarizaciji B po mnenju piscev dobro ustrezajo računi, ki ne zajamejo prispevka gravitacijskega valovanja.

**Do podobnega sklepa so prišli Raphael Flauger, David Spergel in Colin Hill. Nekateri pa branijo trditve BICEP2.**

»Na podlagi tega, kar vemo zdaj, nimamo opore ne za gravitacijske valove ne proti njim.«

U. Seljak

»Mislim sem, da je bil rezultat zelo trden. Zdaj se je položaj spremenil.«

A. Guth

#### Literatura:

Ade, P. A. R., in drugi (BICEP2, 47 raziskovalcev s 16 ustanov), 2013: *Detection of B-mode polarization at degree angular scales*. ArXiv: 1403.3975.

Ade, P. A. R., in drugi (BICEP2, 51 raziskovalcev s 16 ustanov), 2013: *Experiment and three-year data sheet*. ArXiv: 1403.4302.

Cowen, R., 2013: *Polar star*. Nature, 508: 28-30.

Leitch, E. M., Kovac, J. M., in drugi (9 raziskovalcev s petih raziskovalnih ustanov), 2002: *Measurement of polarization with the Degree Angular Scale Interferometer*. Nature, 420: 763-771.

Takahashi, Y. D., 2003: *Cosmic microwave background polarization* <http://cosmology.berkeley.edu/~yuki/CMBpol/CMBpol.htm>.