



Kako je kozmologija postala fizikalnom – uz dodjelu Nobelove nagrade za fiziku 2019. g.

Ivica Picek¹

Polovina Nobelove nagrade iz fizike za 2019. godinu dodijeljena je *Jamesu Peeblesu* “za teorijska otkrića u fizikalnoj kozmologiji”. Zajedno s drugom polovinom koju su podijelili *Michel Mayor* i *Didier Queloz* “za otkriće egzoplaneta u orbiti zvijezde slične Suncu”, ukupno su nagrađeni “doprinosi našem razumijevanju evolucije svemira i razumijevanju mjesta Zemlje u svemiru”. Ovaj tekst će se ograničiti na prvu polovinu nagrade, koja je u stvari dodijeljena za izrastanje i ustanovljavanje “Fizikalne kozmologije” kroz rad Jamesa Peeblesa. Njegove knjige istog naslova iz 1971. i 1993. godine potaknule su nove generacije fizičara da se uključe u tu znanstvenu disciplinu, a istoimeni kolegij se već preko dva desetljeća odvija na studiju fizike PMF-a u Zagrebu.

U svakoj povijesnoj epohi i svakoj civilizaciji vladalo je uvjerenje kako je baš u njoj postignuto konačno razumijevanje svemira. Budući da mi nismo iznimka, ovdje ćemo prikazati kako se današnje razumijevanje svemira temelji na fizikalnoj kozmologiji, u kojoj su zakoni prirode primijenjeni na svemir kao cjelinu. Današnjem razumijevanju u tom smislu prethodio je Galilejev pogled kroz teleskop, kao pogled u prošlost svemira. Na njega se nadovezuje Newtonovo uočavanje da zakoni fizike koje smo spoznali na Zemlji upravljaju i nebeskim tijelima. Tako isti Newtonov zakon gravitacije koji upravlja padom jabuke sa stabla upravlja i padom Mjeseca u gravitacijskom polju Zemlje. Sljedeći povijesni korak je Einsteinova Opća teorija relativnosti iz 1915. koja svodi gravitaciju na geometriju: zakrivljenost prostora na lijevoj strani njegove jednadžbe bit će određena svim oblicima energije koji posjeduju masu, na desnoj strani jednadžbe

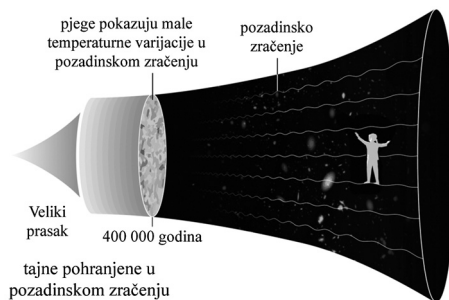
$$R_{\mu\nu} - \underbrace{\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{G_{\mu\nu}} = -8\pi G_N T_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}\Lambda.$$

Vrijedi i obrat, tj. da zakrivljenost prostora upravlja gibanjem tijela. Einsteinov tenzor G na lijevoj strani gradi tenzor zakrivljenosti i skalarna zakrivljenost R množena metrikom g , dok je na desnoj strani jednadžbe tenzor energije-impulsa T množen metrikom g . Za dodatni “lambda član” ostalo je otvoreno pitanje na koju ga stranu jednadžbe staviti.

Einstein je uočio da njegova jednadžba ne upravlja nužno samo nebeskim tijelima. Budući da je gravitacija dominantna sila na svemirskim udaljenostima, Einstein je promiče u kozmološku jednadžbu koja opisuje i svemir kao cjelinu. Kako bi svemir mogao učiniti *statičkim*, na što su ukazivala promatranja u vrijeme postavljanja kozmološke jednadžbe 1919. godine, on u jednadžbu dodaje i član Λ . No uskoro Edvin Hubble ustanovljava mjerenjima crvenog pomaka da svemir nije statičan. Takav svemir u stanju širenja opisao je još 1922. na temelju Einsteinove teorije ruski matematičar i kozmolog Aleksandar Friedman. Einstein u jednom kasnijem razgovoru s bivšim Friedmanovim studentom Georgom Gamowom svoje uvođenje “lambda člana” (*kozmoške konstante*)

¹ Ivica Picek je profesor emeritus na Fizičkom odsjeku PMF-a, Sveučilišta u Zagrebu; e-pošta: picek@phy.hr

naziva najvećom pogreškom: propustio je predvidjeti širenje svemira! No još manje je Einstein mogao slutiti da će ipak do trijumfnog povratka kozmološke konstante doći u 80-tim godinama prošlog stoljeća. Među ostalima, James Peebles ima tu svoje prste, kako bi kozmološka konstanta zastupala tzv. tamnu energiju. Dalekovidnim se pokazalo Peeblesovo uvjerenje da bi to mogla biti jedna od tajni svemira koje su kodirane u pozadinskom mikrovalnom zračenju (slika 1). Teorijskom izučavanju CMB-a (od engl. Cosmic Microwave Background) je posvetio svoj život, a otkrićima koja su odatle proizašla dodijeljena je Nobelova nagrada za 2019. godinu.



Slika 1. U pjegama pozadinskog zračenja oslobođenog 400 tisuća godina nakon Velikog praska kodirane su mnoge tajne iz ere koja mu je prethodila.

Slučajno otkriće najstarije svjetlosti svemira

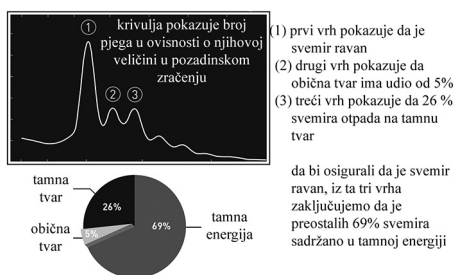
Hubbleovu ekspanziju svemira Gamow je vizualizirao terminom Velikog praska: u stanju koje podsjeća na ono po eksploziji, sve se krhotine međusobno udaljavaju, a najdalje stižu one koje imaju najveću brzinu. U takvom scenariju svemirske eksplozije Gamow nalazi i porijeklo lakih kemijskih elemenata. Svemirski “nuklearni reaktor” će se razletjeti prije nego proizvede teže elemente, za koje 1956. godine pokazuje da će se moći oformiti tek u unutrašnjosti zvijezda. No još 1948. Gamow ukazuje da mora postojati ohlađeni ostatak zračenja iz ranog svemira, za koji njegovi studenti R. Alpher i R. Herman sugeriraju temperaturu od oko 5 kelvina. Time je predviđeno zračenje u mikrovalnom području, kao “jeka” Velikog praska. No tko je tada kozmologe shvaćao ozbiljno!

Ipak, početkom 60-tih Robert Dicke sa suradnicima na Princetonu, među kojima je i Jim Peebles, pokreće potragu za tim zračenjem. Ironijom sudbine, 1964. godine, kratko vrijeme prije no što se trebao ostvariti princetonski eksperiment, došlo je do neočekivanog otkrića signala u mikrovalnom području. Arno Penzias i Robert Wilson s Bellova laboratorija opažaju zračenje koje do njih dolazi podjednako iz svih smjerova neba, no tek iz kontakta s princetonskom grupom postaju svjesni da je riječ o kozmičkoj mikrovalnoj pozadini, CMB-u. Tako je “Mjerenje temperature antene na 4080 MHz” grupe s Bell Labs objavljeno istovremeno s teorijskim predviđanjem takvog signala od grupe s Princetona. Otkriće koje im se posrećilo, odjeknulo je na naslovnici New York Timesa i stavljeno uz bok Hubbleovog otkrića širenja svemira. Penziasu i Wilsonu je za njega dodijeljena Nobelova nagrada iz fizike za 1978. godinu, a čitava epizoda slučajnog otkrića svjedoči o tome da još sredinom prošlog stoljeća kozmologija nije uzimana ozbiljno. No upravo je to otkriće označilo prekretnicu koja je povukla za sobom nove kozmološke projekte.

Era satelitskih mjerenja

Prvo što je još trebalo nezavisno potvrditi bilo je kozmičko porijeklo otkrivenog zračenja. Ukoliko je riječ o “jeki” Velikog praska, zračenje mora biti termičko (zračenje crnog tijela): ono je opisano poznatom Planckovom krivuljom zračenja, gdje valna duljina na kojoj je intenzitet maksimalan ovisi o temperaturi zračenja. Za zračenje očekivane temperature 3 kelvina krivulja intenziteta ima vrh kod 2 mm, dok je mjerenje Penziasa i Wilsona učinjeno u samo jednoj točki, na 7.35 cm. Uslijedila su i mjerenja na drugim valnim duljinama, no rezultati tih mjerenja odstupali su od spektra zračenja crnog tijela i time izazvali potrebu za novim mjerenjima.

Prilika za neovisno mjerenje se ukazala 1974. godine, kada je američka svemirska agencija NASA obznanila otvoreni poziv za “nespecificirani astrofizički projekt”. Nakon 15 godina priprema, u studenom 1989. uspješno je lansiran satelit COBE (COsmic Background Explorer). Njegova uspješna 4-godišnja misija detaljno je opisana u prijašnjem broju MFL-a povodom dodjele Nobelove nagrade iz fizike za 2006. godinu². Nagrada je pripala Johnu Matheru i Georgeu Smootu “za otkriće da kozmička mikrovalna pozadina ima oblik zračenja crnog tijela te za otkriće njezine anizotropije”. COBE-om je isporučeno najsavršenije do tada izmjereno mjerenje spektra zračenja crnog tijela, temperature 2.725 ± 0.002 K. Pravo otkriće se odnosilo na mjerenje anizotropije CMB-a, koje bi trebalo biti nešto toplije (na razini milikelvina) u smjeru u kojem se gibamo kroz kozmičku pozadinu. Izmjerena dipolna anizotropija savršeno odgovara poznatom Dopplerovom učinku porasta frekvencije kod izvora valova, kad nam se on približava. Uz to, zamisliva su i dodatna mala odstupanja od izotropnosti zračenja, koja bi ukazivala na postojanje nehomogenosti u prošlosti svemira. Dugotrajnijom analizom razotkrivene su takve dodatne temperaturne varijacije od $18 \mu\text{K}$. Tople i hladne pjegice koje je na karti neba iscrtalo mjerenje, ocijenjene su kao dotad najstarije opažene strukture. Uočljivo je da njihove dimenzije znatno premašuju one od jednog lučnog stupnja, unutar kojega bi područje pjegice u prošlosti moglo biti kauzalno povezano, tako da bi temperatura bila izjednačena. Objašnjenje ove zagonetke nudi Veliki prasak praćen inflacijom, “inflacijski svemir”. Eksponencijalno brza ekspanzija u ranom svemiru omogućuje preslikavanje svemira na područja neba koja su prividno kauzalno nepoveziva.



Slika 2. Intenzitet odnosno broj pjega u ovisnosti o njihovoj kutnoj veličini (od većih prema manjima).

Uočimo da je priznanje COBE-u dodijeljeno tek nakon što su njegova mjerenja, provedena na malim isječcima neba, potvrđena i profinjena na cijelom nebu. Izvedeno je to NASA-inim sljedećim, WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) satelitom. Riječ je o 9-godišnjoj misiji započetoj lansiranjem 2001. godine. U njoj ugrađeno

² MFL 2/ 226, 2006-07, str. 104

iskustvo i ljudstvo prethodnog COBE-a dovelo je do revolucije u preciznosti mjerenja, a time i do strogog testa standardnog kozmološkog modela. Kruna tog testa je mjerenje ravnosti svemira (slika 2). Ona nalazi objašnjenje u inflacijskom svemiru, prema kojemu su temperaturne varijacije kod većih skala (većih pjega) nešto intenzivnije (brojnije) nego kod manjih. Iz tri vrha kutnog spektra anizotropija izmjenjenog WMAP-om određeni su udjeli obične (barionske) tvari, tamne (nebarionske) tvari i tamne energije.

Godine 2009. je Europska svemirska agencija (ESA) postavila u 1.5 milijuna kilometara udaljenu Lagrangeovu točku L2 satelit PLANCK na 4.5-godišnju misiju. Ona je dovela opažačku kozmologiju na još viši stupanj preciznosti [3]. Umjesto COBE-ovih 7 lučnih stupnjeva, PLANCK-ova rezolucija od 10 lučnih minuta i temperaturna rezolucija od jedne milijuntinke stupnja dovela je do nove preciznosti i oštine slika.

Kozmološki model s tamnom tvari i tamnom energijom

Opisana satelitska mjerenja ustanovljavaju kozmologiju kao preciznu znanost u kojoj se teorijski kozmološki proračuni uspoređuju sa stvarnim mjerenjima! PLANCK-ova mjerenja potvrđuju kozmološki model koji uključuje dvije nepoznate ("tamne") sastavnice nazvane tamnom materijom i tamnom energijom. Obje te komponente uvedene su u ključnim Peeblesovim radovima, prva 1982. i druga 1984. godine.

Prva, hladna tamna tvar odlikuje se gravitacijom kao jedinom silom koju priznaje. U ranom svemiru u njen gravitacijski potencijal upadat će vruća svemirska plazma i dodatno se ugrijavati sve dok tlak ugrijanog zračenja ne nadvlada gravitaciju i dovede do ekspanzije. Ekspanzijom tlak fotona zračenja padne, gravitacija ga nadvlada i slijede ponovljeni oscilatorni ciklusi.

Druga sastavnica, gravitacijski odbojna tamna energija, pokretač je sadašnje ubrzane ekspanzije svemira – male inflacije. Za to otkriće ubrzane ekspanzije svemira dodijeljena je Nobelova nagrada za fiziku za 2011. godinu S. Perlmutteru, B. Schmidtu i A. Riessu. No iz mjerenja CMB-a iščitava se i ekstremno snažna ubrzana ekspanzija vrlo ranog svemira – velika inflacija. Peebles je godinama bio zaokupljen povezivanjem slike CMB-a i onog što se stvarno vidi na nebu i zaključuje da se može iščitati kako je inflacijom posijano sjeme za kasnije stvaranje struktura u svemiru.

Osim same anizotropije CMB-a, PLANCK-ova misija omogućila je i mjerenje polarizacije pozadinskog zračenja, koja nosi informaciju o zadnjim interakcijama zračenja i čestica tvari. One se odvijaju nešto prije otprilike 380 000 godina starosti svemira, kad temperatura fotonske kupelji padne na 3000 K. Tu naime dolazi do "rekombinacije", vezanja elektrona i protona u električki neutralne vodikove atome, pa se fotoni konačno mogu slobodno širiti. CMB dolazi od te kozmičke fotosfere u potpunoj analogiji s fotonima koji su otpušteni s površine Sunca, nakon što u njemu u "raspršenjima" lutaju prosječno stotinu tisuća godina. Svemirska površina "zadnjih raspršenja" predstavlja zid neprozirnosti koji nas sprječava da putem fotona gledamo u raniji svemir. No same pjege, koje je po prvi put razotkrio COBE, ipak otvaraju pogled u raniji svemir. One potječu otprilike iz vremena 100 000 godina starosti svemira, kad je u igri gore opisano nadmetanje gravitacijskog sažimanja i ekspanzije od pritom proizvedenog tlaka. Kod "rekombinacije" fotoni se oslobode i stižu do nas kao CMB zračenje s toplijim i hladnijim pjegama, dok barioni ostaju uhvaćeni u sfernim ljuskama određenog radijusa. One će se kao barionske akustične oscilacije (BAO) vidjeti na slici 2 koja se u velikoj mjeri podudara sa slikom u članku koji su J. Peebles i J. Yu objavili 1970. Doista, BAO su potvrđene i mjerene putem formiranja galaktičkih grozdova u neovisnim potragama Baryon oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) 2012. i 2013. godine.

Budućnost fizikalne kozmologije kozmičkog suglasja

Mjerenja CMB-a su prekretnica kojom je kozmologija dovedena od spekulativne do fizikalne znanosti. Ustanovljeni “prvi akustični vrh”, na jednom lučnom stupnju na slici CMB-a, svojom je lokacijom utvrdio do na nekoliko postotaka da je geometrija svemira ravna (da se paralelni pravci neće presjeći ni na kozmološkim udaljenostima). Širina tog vrha daje potporu inflacijskom ranom svemiru (da se Veliki prasak na samom početku odvija ekstremno brzom ekspanzijom). Dodatni opaženi vrhovi odgovaraju teorijski izučenim mehanizmima gravitacijskih nestabilnosti i ukazuju da barionska tvar u svemiru predstavlja samo 5 % tvari, dok na tamnu tvar opada 26 %, a na tamnu energiju 69 %. Dešifriranje same prirode tamnih sastojaka ostaje kao izazov za budućnost fizikalne kozmologije.

Što se tiče objašnjenja tamne energije, najjednostavniji kandidat za fluid negativnog tlaka je Einsteinova kozmološka konstanta Λ . No tu se javlja problem da je ona ekvivalentna energiji fizikalnog vakuuma, koji se pokazuje većim za 120 redova veličine. To je čuveni problem kozmološke konstante³. Ostaje otvoreno pitanje je li gustoća tamne energije “konstanta” ili je podložna nekoj dinamici kojom evoluirala kroz ekspanziju svemira.

Kod tamne tvari, doživjeli smo pomak od masivnih astrofizičkih (MACHO) kandidata, prema čestičnim kandidatima, za koje traju “direktne” i “indirektne” potrage. Napomenimo da najopipljivije kandidate za moguće čestice tamne tvari nude modeli koji pokušavaju objasniti neutrinse mase. Usput, PLANCK-ova mjerenja daju kozmološko ograničenje na zbroj masa neutrina. Laki neutriini ne mogu biti hladna tamna tvar, no oni nesmetano prolaze kroz plohu CMB-a (kao što prolaze i kroz Sunce) te je “neutrinским teleskopima” otvoren pogled u rani svemir.

Kao zanimljivost, PLANCK-ova mjerenja omogućuju da se iz podataka koji se odnose na rani svemir predvidi koju bi vrijednost trebala imati Hubbleova konstanta danas. Tako predviđena vrijednost je $H_0 = 67.4$ km/s/Mpc, u usporedbi s vrijednošću $H_0 = 73.5$ km/s/Mpc koju za lokalni sadašnji svemir mjere NASA/ESA-in Hubble Space Telescope i ESA-ina misija Gaia. Još jedna otvorena zagonetka!

Određene nade polažu se i u moguća buduća mjerenja CMB-a koja bi razlikovala tzv. skalarnu, od tenzorskih fluktuacija. Naime, inflacija za koju smo dobili potporu putem CMB-a i mjerenja struktura u svemiru, temelji se na skalarnom polju koje ju pogoni. Ukoliko bi fluktuacije tog skalarnog polja uspjeti izmjeriti u odnosu na fluktuacije prvotnog tenzorskog polja, bilo bi to prvo ustanovljavanje prvotnih gravitacijskih valova. No kako su oni stvoreni u kvantnim fluktuacijama, bilo bi to ujedno i detekcija gravitona – dokaza realizacije kvantne gravitacije.

Briljantna prošlost svemira otvorila je sjajnu budućnost fizikalnoj kozmologiji!

Slike prilagođene s poveznica

[1] <http://nobelprize.org/>

[2] E-škola – Fizika svemira, http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/svemir.html

[3] KREŠIMIR KUMERIČKI, *Najmanja mjerenja kozmičkog pozadinskog zračenja*, Matematičko-fizički list, 2012./2013., 4/252.

³ MFL 1/156, 1988–89, str. 1