

NOBELOVA NAGRADA ZA RAZVOJ FIZIKALNE KOZMOLOGIJE

DUNJA FABJAN

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

PACS: 11.11.Aa

Dobitnik polovice Nobelove nagrade za fiziko leta 2019 za pomemben doprinos k razvoju teoretičnega okvira kozmologije je bil James Peebles iz Univerze v Princetonu, ki si je nagrado delil z odkriteljema prvega planeta okrog Soncu podobne zvezde. V članku je predstavljen zgodovinski okvir delovanja Nobelovega nagrajenca. Zaradi širokega obsega znanstvenega delovanja nagrajenca se v članku omejimo le na izbrane teme, pri katerih je doprinos Peeblesovih raziskav predstavljal preskok k uveljavitvi fizikalne kozmologije kot celostne vede.

NOBEL PRIZE FOR THE DEVELOPMENT OF PHYSICAL COSMOLOGY

Half of the Nobel Prize in Physics 2019 was awarded to James Peebles, professor at University of Princeton, for »theoretical discoveries in physical cosmology«, who shared the award with the discoverers of the first planet observed around a Solar-type star. This article presents the historical frame where the Nobel Laureate developed his research. Since he tackled a number of different research topics I decided to emphasise selected themes, where contributions of his research represented a breakthrough and established the basis for the development of physical cosmology.

Eno izmed temeljnih vprašanj, ki si jih postavlja človeštvo, je, kako je nastalo in se razvijalo naše vesolje ter kakšno je naše mesto v njem. V ta okvir spada Nobelova nagrada za fiziko za leto 2019, saj so nagrajenci zaslužni za pomemben »doprinos k razumevanju razvoja vesolja in mesta, ki ga zaseda Zemlja v njem« [17, 16]. V iskanju odgovorov na ta vprašanja se je človekov pogled na vesolje v stoletjih spreminjal: postopoma smo se iz geocentričnega sistema premestili v heliocentrični sistem in kasneje odkrili, da se naše Osončje nahaja v spiralnih rokavih naše galaksije, ki ni nič kaj posebnega glede na druge galaksije, ki zapolnjujejo vesolje. Kozmologija, ki se ukvarja z vesoljem kot celoto, pa je v zadnjem stoletju razkrila zgodovino in razvoj vesolja ter njegovih sestavin, med katerimi sta najbolj nenavadni temna snov in temna energija.

James Peebles, nagrajen leta 2019 s polovico Nobelove nagrade za fiziko, je vsestranski kozmolog in *Albert Einstein Professor Emeritus of Science* na Univerzi v Princetonu (ZDA). Rodil se je leta 1935 v Winnipegu (Manitoba, Kanada) in se po končani diplomi iz znanosti na Univerzi v Manitobi od tam

odselil. Leta 1958 je študij nadaljeval na Univerzi v Princetonu, kjer se je na začetku zanimal za fiziko delcev in se nato preusmeril v kozmologijo po zaslugi uveljavljenega fizika Roberta Dickeja. Dicke je v Princetonu vodil skupino za raziskovanje gravitacije, bil je vsestranski fizik, ki je s svojimi raziskavami prispeval na več področjih, od gravitacije in atomske fizike do astrofizike in kozmologije. Peebles se je skupini pridružil in opravil doktorsko disertacijo pod Dickejevim mentorstvom. V njej je raziskoval spremembo konstante fine strukture α v daljših geoloških dobah. Iz radioaktivnega razpadnega časa zemeljskih kamnin in meteoritov je ocenil relativno spremembo konstante α na manj kot tisočinko v zadnjih 4,5 milijarde letih [8]. Kmalu za tem je Dicke mlademu Peeblesu predlagal, naj razišče teoretično ozadje ob morebitni detekciji prasevanja z radiometrom, ki sta ga medtem sestavljala sodelavca Peter Roll in Dave Wilkinson. Pomembna kozmološka odkritja so bila za vogalom.

Zgodovinski začetki in osnove kozmologije

Osnove moderne kozmologije, vede, ki se ukvarja z nastankom in razvojem vesolja kot celote, segajo v začetek 20. stoletja, ko je Albert Einstein izoblikoval splošno teorijo relativnosti. Rešitve Einsteinovih enačb polja za različna vesolja je med prvimi raziskal ruski matematik in kozmolog Alexander Friedmann in jih danes poznamo kot *Friedmannovi modeli* vesolja.

V istem obdobju se je pozornost astronomov usmerila v odkrivanje in proučevanje zunajgalaktičnih objektov. Od meritve oddaljenosti¹ Andromedine galaksije dalje so astronomi odkrili, da so nekatere od tako imenovanih *meglic* v resnici galaksije podobne naši, ter začeli z zbiranjem prvih spektroskopskih podatkov o galaksijah. Take podatke je uporabil belgijski matematik George Lemaître (izg. *ləméʔər*), ki je že leta 1927 v članku upošteval primer vesolja, ki se širi, ter objavil zvezo med oddaljenostjo in hitrostjo oddaljevanja galaksij. Dve leti kasneje je na osnovi novih in natančnejših podatkov isto zvezo objavil tudi ameriški astronom Edwin Hubble.² Zakonu

¹Henrietta Swan Leavitt (1868–1921), ki je delala na Harvardskem observatoriju, je leta 1912 objavila odkritje povezave med povprečnim izsevom in periodo za spremenljive zvezde tipa kefeid. S pomočjo te umeritve je Hubble določil razdaljo bližnjim galaksijam.

²Čeprav je Lemaître že leta 1927 opisal širjenje vesolja, njegov članek v francoščini ni bil znan raziskovalni skupnosti. Zakon o širjenju vesolja je zato dobil ime po Hubblu. Leta 1931 je bil Lemaïtrov članek preveden v angleščino, vendar brez odstavka z opisom širjenja vesolja. Pred desetimi leti je Mario Livio v korespondenci med Lemaïtrom in urednikom revije *Monthly Notices* odkril, da je sam Lemaître odločil, da izračuna s podatki ne objavi, ker so bili Hubblovi natančnejši [6]. Na tej podlagi je leta 2018 Mednarodna astronomska zveza volila za preimenovanje zakona v Hubble-Lemaïtrov zakon.

pravimo Hubble-Lemaîtreov zakon [3] in ga zapišemo kot

$$z = \frac{H}{c}d, \quad (1)$$

kjer je z kozmološki rdeči premik spektralnih črt opazovane galaksije, c svetlobna hitrost, d oddaljenost galaksije ter H Hubblov parameter. V tej obliki je zakon veljaven do $z \sim 0,2$ (kar ustreza približno $2,5 \cdot 10^9$ svetlobnim letom). Premo sorazmernost kozmološkega rdečega premika galaksij in njihove oddaljenosti ni posledica hitrosti oddaljevanja posamičnih galaksij, marveč širjenja vesolja samega.

Friedmannove osnovne enačbe, ki opisujejo širjenje vesolja, lahko uvedemo tudi brez uporabe splošne teorije relativnosti. Predpostavimo homogeno vesolje in si oglejmo razvoj sfernega volumna z radijem R , ki se širi zaradi širjenja vesolja. Za objekt z maso m na razdalji R od središča sfere, ki se od središča oddaljuje s hitrostjo $\dot{R} = dR/dt$ zaradi širjenja prostora, lahko zapišemo polno energijo kot:

$$E = \frac{m\dot{R}^2}{2} - \frac{GMm}{R}, \quad (2)$$

kjer je M masa znotraj volumna, ki ga omejuje radij R . Če upoštevamo homogeno porazdelitev mase $M = \rho(t)\frac{4}{3}\pi R(t)^3$, lahko zgornjo enačbo preuredimo v *prvo Friedmannovo enačbo*

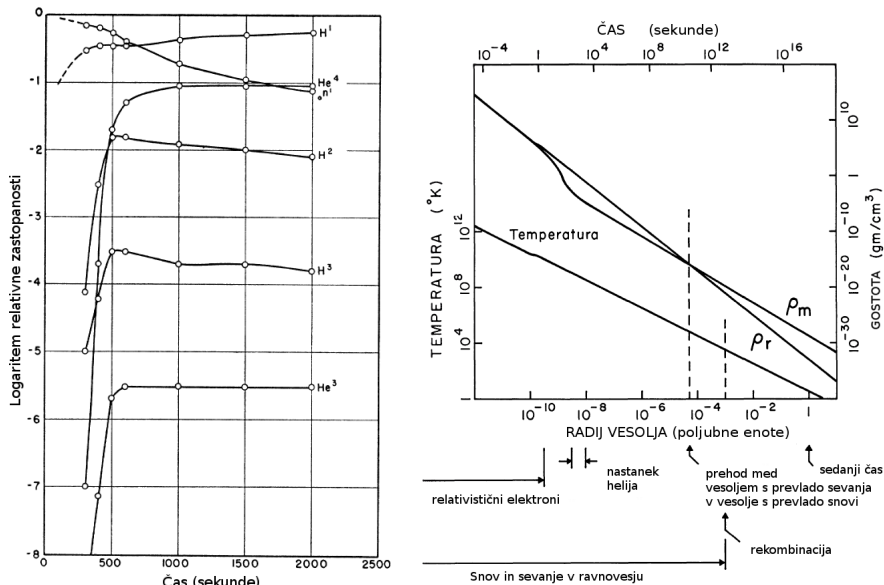
$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) - \frac{kc^2}{R(t)^2}, \quad (3)$$

kjer smo zapisali Hubblov parameter $H(t)$ v obliki $H(t) = \frac{\dot{R}}{R(t)}$, člen $2E/m$ na desni strani enačbe pa zamenjali z $-kc^2$, kjer je k parameter ukrivljenosti prostora, ki ima vrednost -1 , 0 ali 1 za primer odprtega, ravnega ali zaprtega vesolja. Ker se vesolje širi pospešeno, moramo na desno stran enačbe (3) dodati $+\Lambda c^2/3$, kjer nastopa kozmološka konstanta Λ , ki upošteva učinek še neznane temne energije [5].

Izmerjene vrednosti Hubblovega parametra se danes trenutno gibljejo med 67 in 73 km/s/Mpc. Novejše raziskave so pokazale, da se vrednosti Hubblovega parametra, izmerjene na podlagi podatkov zgodnjega vesolja ter na podlagi podatkov lokalnega vesolja, ne skladajo znotraj nezanesljivosti. Razlog neskladja je trenutno še neznan [12].

Iz prej zapisane Friedmannove enačbe lahko izpeljemo tudi *kritično gostoto* $\rho_c(t) = \frac{3H(t)^2}{8\pi G}$, ki predstavlja povprečno gostoto snovi v vesolju, ki bi

zaustavila širjenje ravnega vesolja. Današnja vrednost kritične gostote je $\rho_{cr,0} = 2,78 \cdot 10^{11} \text{ M}_\odot/h \text{ (Mpc/h)}^{-3}$, kar ustreza povprečni masi galaksije na povprečni razdalji med galaksijami³ oz. približno petim atomarnim vodikom v kubičnem metru. Kritično gostoto uporabimo pri vpeljavi *parametra gostote*, ki ga izrazimo kot razmerje med gostoto in kritično gostoto, tj. $\Omega(t) = \rho(t)/\rho_{cr}(t)$. Vesolje sestavljajo različne sestavine, katerih gostota se različno spreminja s širjenjem vesolja in jih opišemo s posamičnimi parametri gostote. V primeru ravnega vesolja je njihov seštevek $\Omega = 1$, vrednosti za posamične komponente pa merijo danes $\Omega_m \sim 5 \%$, $\Omega_{dm} \sim 25 \%$ in $\Omega_\Lambda \sim 70 \%$ za navadno snov, temno snov in temno energijo.



Slika 1. Levo: relativna zastopanost lažjih elementov v odvisnosti od časa *po velikem poku* (model vesolja s širjenjem in prevlado sevanja), ki sta ga objavila Alpher in Herman. Koncentracija nukleonov je 10^{21} cm^{-3} pri 1 sekundi. Relativna zastopanost je izračunana kot razmerje med številsko gostoto izbranih nukleonov in številsko gostoto vseh nukleonov. Poleg končnih produktov modela (^1H , ^2H , ^3He in ^4He) so prikazani tudi tritij in nevtroni, ker imajo daljši razpolovni čas od 2000 sekund (12,46 let in 10,25 minut). Povzeto po [1]. Desno: razvoj temperature, gostote snovi (ρ_m) in sevanja (ρ_r) v odvisnosti od starosti oz. radija vesolja. Na sliki so spodaj označeni mejniki (z leve proti desni): prisotnost relativističnih elektronov, nastanek helija, prehod med vesoljem, v katerem prevladuje sevanje v vesolje s prevladujočo snovjo, rekombinacija (obdobje nastanka prasevanja) in sedanji čas. Črtasti navpični črti označujeta zadnji dve opisani obdobji. Povzeto po [2].

³V kozmologiji se pogosto v enotah pojavi brezdimenzijski Hubblov parameter h , kjer je $H = h \text{ 100 km/s/Mpc}$. Mpc je 10^6 parsekov, kjer je parsek (pc) $3,09 \cdot 10^{16} \text{ m}$.

Odkritje kozmičnega prasevanja

Naslednji preskok v zgodovini kozmologije je sledil po drugi svetovni vojni, ko je teoretski fizik in kozmolog George Gamow po namigu Lemaître raziskoval nastanek kemičnih elementov v procesu *prvinske nukleosinteze*. Če se vesolje širi, je moralo biti v preteklosti veliko manjše, snov in sevanje v njem pa imeti veliko višjo gostoto in temperaturo, ki bi omogočala nastanek elementov.⁴ Podlaga takemu razmisleku so bila opazovanja enakomerne zastopanosti elementov v zvezdah, ki jih je opravila Cecilia Payne Gaposchkin, kot tudi takratno (sicer zmotno) prepričanje, da zvezde v svojih središčih ne dosegajo dovolj visokih temperatur, ki bi omogočale jedrsko zlitje težjih elementov. V kratki časovni skali širitve zgodnjega vesolja pa ni bilo možno sintetizirati elementov težjih od helija. V petdesetih letih prejšnjega stoletja so znanstveniki odkrili trojni alfa proces, pri katerem lahko iz treh jeder helija nastane jedro ogljika, in sklepali, da lahko v zvezdah nastanejo težji kemijski elementi. Toda opazovanih visokih količin helija ($\sim 24\%$ v masnem deležu) zvezde v svoji življenjski dobi ne bi bile zmožne proizvesti, zato se je izvor helija iskalo v prvinski nukleosintezi. Okrog petdesetih let sta Ralph Alpher in Robert Herman sicer pokazala, da lahko v vesolju, ki se širi, nastanejo elementi devterij, tritij in helij v dovolj velikih količinah (slika 1 levo), raziskala sta pa tudi termično zgodovino vesolja in predvidela, da naj bi iz časa rekombinacije⁵ obstajalo difuzno ozadje sevanja črnega telesa s temperaturo okrog 5 K [1, 7].

V obdobju po drugi svetovni vojni so postajali radijski sprejemniki občutljivejši za valovne dolžine okrog centimetra. V družbi Bell Telephone Laboratories so ob koncu petdesetih let preizkušali komunikacijo v mikrovalovih in pri testiranju sprejemnikov ugotavljali, da se jim nikakor ne uspe znebiti sevanja, ki ustreza temperaturi ~ 2 K. Po nekaj letih sta izvor te anomalije začela proučevati Bellova inženirja Arnold Penzias in Robert Wilson. Nedaleč stran, borih 35 km od Holmdelove antene, s katero sta se inženirja ukvarjala, se je Dickejeva skupina lotevala iskanja sledov prasevanja. Še med drugo svetovno vojno je Dicke na Massachusetts Institute of Techno-

⁴Po drugi svetovni vojni sta se uveljavili dve teoriji vesolja. Prva je bila teorija o stabilnem stanju vesolja, ki se širi, vendar ohranja iste lastnosti v času. V takem modelu bi morala snov v vesolju ves čas nastajati. Druga teorija je bila teorija prapoka, ki so jo podpirali George Gamow in sodelavci, po kateri naj bi vesolje nastalo ob enkratnem dogodku pred približno 13,8 milijarde let.

⁵Doba rekombinacije je mejnik ~ 380000 let po nastanku vesolja, ko so iz prostih elektronov in jeder nastali nevtralni elementi, sevanje pa se je še zadnjič sipalo. Iz tega obdobja, ko je snov v vesolju imela $T \sim 3000$ K, izhaja sevanje ozadja (ali prasevanje), ki ga danes opazujemo v mikrovalovih.

logy (MIT) izumil radiometer za mikrovalovno območje, ki ga je kasneje uporabil za meritve mikrovalovnega sevanja Sonca in Lune ter pokazal, da lahko zelo malo sevanja (ki ustreza temperaturam < 20 K) pri valovnih dolžinah med 1 in 1,5 cm pripiše preostali snovi v vesolju [8]. Leta 1964 je zato Dicke predlagal sodelavcema Petru Rollu in Daveju Wilkinsonu, da predelata Dickejev radiometer za meritve morebitnega prasevanja, Peeblesu pa predlagal, da razišče teoretično ozadje.

Spomladi 1965 sta obe skupini, ki sta slučajno izvedeli druga za drugo, objavili v reviji *The Astrophysical Journal Letters* ločena članka [2, 11] o teoretični razlagi meritev sevanja ozadja v mikrovalovih, h kateri je prispeval Peebles, ter meritve prasevanja s Holmdelovo anteno, ki je odkriteljema Penziasu in Wilsonu prinesla Nobelovo nagrado za fiziko leta 1978.

Dickejeva skupina ni bila prva, ki je predpostavila obstoj ostankov sevanja iz začetka vesolja (desni graf na sliki 1). V istem članku [2] so poudarili, da tudi opazovanja helija narekujejo zgornjo mejo za gostoto snovi v vesolju: v gostejšem vesolju bi s prvinsko nukleosintezo nastalo več helija. Obenem je opazovana temperatura prasevanja omejevala količino navadne, barionske snovi v vesolju na $3 \cdot 10^{-32}$ g/cm³, kar se sicer ni skladalo z večjo količino snovi iz takratnih astronomskih opazovanj in namigovalo na prisotnost eksotične komponente snovi.

V sedemdesetih letih sta Vera Rubin in Kent Ford objavila opazovanja rotacijskih krivulj bližnjih spiralnih galaksij. Ugotavljala sta, da hitrost kroženja zvezd ne pada z razdaljo po običajnem zakonu $v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ (kjer je M masa znotraj radija r), marveč ostaja konstantna z večanjem oddaljenosti od središča. To pa pomeni, da se masa veča z radijem, in ker je opazno manj vidne snovi prisotne na takih razdaljah, sta sklepala, da je prisotna nevidna *temna snov*. Že 40 let prej je posredni učinek temne snovi ugotavljal tudi švicarsko-ameriški astronom Fritz Zwicky, ko je za gravitacijsko vezane sisteme galaksij ugotavljal neskladje med njihovo dinamično maso iz virialnega teorema in maso vidnih galaksij, ki je bila veliko manjša. Tudi Nobelov nagrajenec Peebles se je lotil problema temne snovi, vendar z vidika stabilnosti galaktičnega diska. Z Jeremiahom Ostrikerjem sta leta 1973 uporabila numerične simulacije spiralnih galaksij in pokazala, da je za stabilnost diska potrebna prisotnost sfernega haloja temne snovi.

Odkritje temne snovi pa je vplivalo tudi na kozmološke modele vesolja. Peebles je v svojem članku leta 1982 prvi upošteval učinek, ki ga ima na nastanek struktur (od nastanka prvih zvezd do galaksij in večjih sistemov) nerelativistična (torej hladna) temna snov. Ocenil je, da bi morala biti za prisotnost take temne snovi lokalna odstopanja temperature prasevanja na

ravni $\delta T/T \sim 3,5 \cdot 10^{-6}$. COBE (COsmic Background Explorer), prvi satelit, ki je bil namenjen meritvi prasevanja in ugotavljanju njegovega spektra, je bil izstreljen leta 1989. Njegovi rezultati, objavljeni leta 1992, so pokazali, da je prasevanje skladno s spektrom črnega telesa s temperaturo 2,725 K. Istočasno pa so izmerili temperaturne anizotropije, odmike od temperature omenjenega spektra, ki so bili reda velikosti $\Delta T/T \sim 10^{-5}$, podobni Peeblesovi oceni. Za to prelomno opazovanje prasevanja in njegovih anizotropij sta leta 2006 Nobelovo nagrado prejela vodja projekta John Maters in glavni vodja instrumenta za opazovanje anizotropij, George Smoot.

Fizikalna kozmologija

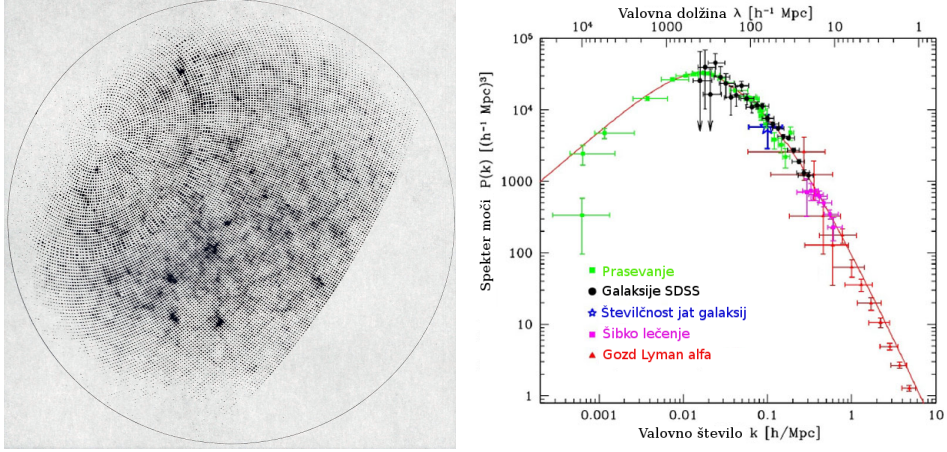
Začetni opis vesolja temelji na kozmološkem principu, osnovni predpostavki o homogenosti in izotropnosti vesolja. Taka predpostavka sicer velja na dovolj velikih prostorskih skalah, toda že sam pogled v nočno nebo nam razkrije, da je vesolje na manjših skalah nehomogeno. Vesoljsko strukturo, katere osnovni gradniki so galaksije, sestavljajo manjša združenja (skupine galaksij) ter večje gravitacijsko vezane strukture (jate galaksij), nadjate, podolgovati filamenti, kot tudi praznine (angl. *voids*).

Za vzpostavitev fizikalne kozmologije sta zaslužna predvsem Peebles in ruski kozmolog Jakov Zeldovič, ki sta v šestdesetih letih v kozmološkem kontekstu raziskovala nastanek in razvoj struktur v vesolju. Peebles je leta 1971 izdal svojo prvo knjigo ravno z naslovom *Physical cosmology* in v govoru ob prejetju Nobelove nagrade razložil izbiro naslova, saj je »nameraval raziskati fizikalne procese, ki so ali bi lahko delovali v vesolju, ki se širi, in raziskati, kako bi teorijo oblikoval na podlagi opazovanj«.

Kvantitativni opis nehomogenega vesolja temelji na raziskovanju kozmoloških modelov, ki imajo iste statistične lastnosti kot naše vesolje. V ta namen je treba opisati nehomogenosti oz. prej omenjeno vesoljsko strukturo. Za opis grozdenja (tj. združevanja) galaksij na večjih kotnih skalah se uporablja *dvo-točkovno korelacijsko funkcijo*. Opišemo jo s porazdelitvijo galaksij na nebu ali v obliki prostorske dvo-točkovne korelacijske funkcije v treh dimenzijah $\xi(r)$, in sicer

$$N(r)dV = N_0[1 + \xi(r)]dV, \quad (4)$$

kjer je $N(r)dV$ število galaksij v volumnu dV na razdalji r od posamične galaksije, N_0 pa povprečna gostota galaksij. $\xi(r)$ opisuje presežek števila galaksij na razdalji r od izbrane galaksije glede na povprečje. V opazovanjih funkcijo $\xi(r)$ določamo tako, da povprečimo produkte gostote galaksij za veliko število parov točk na razdalji r . Meritve primerjamo s potenčno funkcijo



Slika 2. Levo: porazdelitev galaksij na severni polobli iz kataloga Lick ([14]) (inverzne barve). Temni kvadrati predstavljajo del neba velikosti kvadratne stopinje, njihova velikost je premo sorazmerna s številom prešteti galaksij pod 19 magnitudo na posamičnem območju. Območja so razporejena po deklinaciji in rektascenziji. Svetli galaktični sestav v spodnjem delu slike je jata galaksij Berenikini kodri. Zemljevid pripravila J. A. Peebles in P. J. E. Peebles. Desno: spekter moči $P(k)$ za snov v vesolju v odvisnosti od valovnega števila k . V različnih barvah so prikazani podatki za prasevanje satelita COBE (zelena), galaksije pregleda neba SDSS (črna), številčnost jat galaksij (modra), šibko gravitacijsko lečenje galaksij (rožnata) in gozd Lyman- α (rdeča barva). Povzeto po [15].

$\xi(r) = \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\gamma}$, kjer je r_0 korelacijska razdalja. Današnja opazovanja kažejo, da tak opis velja na razdaljah od 2 do nekaj 10 Mpc/ h , in da je korelacijska razdalja $r_0 = 5$ Mpc/ h , eksponent γ pa ima vrednosti v območju 1,7 – 1,8. Na razdaljah, ki so večje od 10 Mpc/ h , korelacija pada hitreje od potenčne funkcije, kar pomeni, da je na večjih fizičnih skalah vesolje izotropno [7, 13].

Med prvimi, ki so opravili podobno analizo, in sicer z uporabo kotne korelacijske funkcije med galaksijami iz različnih katalogov, je bil ravno Peebles. Leta 1977 sta v članku [4] z Edwardom Grothom izračunala dvo- in tri-točkovno korelacijsko funkcijo z uporabo Zwickyjevega kataloga galaksij, Lickovega štetja galaksij (na sliki 2 levo) in galaksij iz Jagiellonskega globokega polja. Ugotavljala sta, kako se v lokalnem vesolju galaksije združujejo v večje sestave in nista opazila znakov prisotnosti filamentarnih struktur.

Alternativni (ekvivalentni) opis statističnih lastnosti naključnega polja fluktuacij in torej strukture vesolja je potenčni spekter $P(k)$. Potenčni spekter in korelacijska funkcija sta povezana s Fourierjevo transformacijo:

$$P(k) = 2\pi \int_0^\infty r^2 \frac{\sin(kr)}{kr} \xi(r) dr, \quad (5)$$

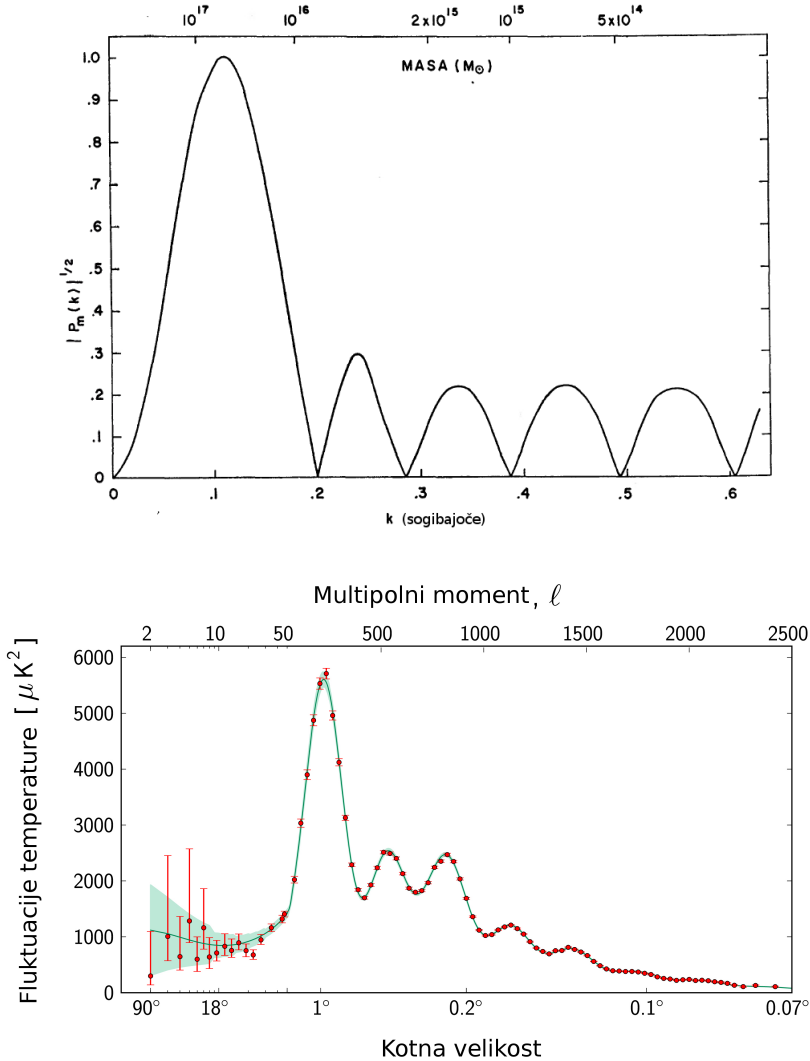
kjer je k valovno število. Spekter moči v grobem opisuje količino strukture v odvisnosti od velikostne skale. Višji potenčni spekter pomeni višjo amplitudo fluktuacij gostote na velikostni skali $2\pi/k$. Primer spektra moči za fluktuacije gostote najdemo na sliki 2 (desno), kjer so predstavljeni rezultati za zelo različna opazovanja vesoljskih objektov, ki zaobjamejo štiri rede velikosti v vesoljskih skalah. V grobem ta spekter opišemo s $P(k) \propto k$ na večjih skalah in $P(k) \propto k^{-3}$ na manjših skalah.

Omenili smo, da kozmološki modeli slonijo na predpostavki enakomerne porazdelitve snovi, vendar je današnje vesolje daleč od enakomernega. Kmalu po odkritju prasevanja sta Rainer Sachs in Arthur Wolfe prva napovedala anizotropije v prasevanju. Raziskala sta, kako spremembe gravitacijskega potenciala (zaradi fluktuacij v gostoti) učinkujejo na temperaturo prasevanja. Učinek Sachs-Wolfe, ki sta ga opisala, temelji na kombinaciji dveh procesov: rahle zgostitve, ki so prisotne na začetku vesolja, bodo spremenile temperaturo prasevanja: fotoni bodo za izhod iz potencialne jame izgubili del svoje energije (gravitacijski rdeči premik) in istočasno se bodo fotoni v zgostitvi sipali nekoliko prej, torej pri višji temperaturi (gravitacijski časovni zamik). Efekt Sachs-Wolfe je povezan z anizotropijami prasevanja na velikih skalah.

V zgodnjem vesolju se zaradi začetnih fluktuacij v gostoti v plazmi iz fotonov in barionov pojavijo tudi akustični valovi, ki zamrznejo ob nastanku prasevanja, ko se fotoni še zadnjič sipljejo od atomov in začnejo prosto potovati po vesolju. Akustične valove opazujemo v spektru moči anizotropij prasevanja (slika 3 spodaj) in so povezani z geometrijo vesolja (prvi vrh), količino navadne snovi (drugi vrh) ter temno snovjo (tretji vrh) [17]. Fizikalno sta akustične vrhove razložila Rashid Sunyaev in Jakov Zeldovič, medtem ko sta Peebles in njegov magistrski študent Jer Yu poračunala gostotne fluktuacije za različne kozmološke parametre (primer na sliki 3 zgoraj) in postavila svoje delo v kontekst opazovanj [10].

Kozmološka konstanta in usklajeni model vesolja

Omenili smo prispevek letošnjega nobelovca k povezovanju opazovanj struktur v vesolju in teorije, ki bi te strukture znala napovedati. Peebles je, kot smo že zapisali, prvi uporabil hladno temno snov, da bi izračunal njen učinek na nastanek struktur v vesolju. V istih letih se je razvila teorija inflacije, po kateri naj bi bilo vesolje ravno in kritično ($\Omega = 1$). Toda opazovanja astronomov so ugotavljala bistveno nižji prispevek navadne in temne snovi k parametru gostote Ω . Da bi lahko pojasnil tako nastanek struktur kot tudi vključil inflacijo, je Peebles pri izračunih v svojem članku leta 1984



Slika 3. Zgoraj: spekter moči perturbacij za model ravnega vesolja, ki sta ga v svojem članku poračunala Peebles in Yu. Spekter je normaliziran na 1. Maksimalno amplitudo doseže tak model pri kritični masi $\sim 5 \cdot 10^{16} M_\odot$. Povzeto po [10]. Spodaj: kotni spekter moči fluktuacij temperature v prasevanju v odvisnosti od kotne velikosti fluktuacij (spodnja skala) oz. multipolni moment (zgornja skala). Med momentom ℓ in kotno velikostjo θ v grobem velja $\theta \sim 180^\circ/\ell$. V rdeči barvi so prikazani podatki vesoljskega satelita Planck, z zeleno barvo pa je predstavljeno območje, ki ga zajema trenutno uveljavljeni model, ki opisuje vesolje, tj. standardni model vesolja (avtorstvo: ESA in Kolaboracija Planck).

uporabil kozmološko konstanto, ki je bila do takrat opuščena. Z leti pa je postalo jasno, da je kozmološka konstanta potrebna in leta 1995 so se večji deli sestavljanke končno sestavili v sliko vesolja, ki mu danes pravimo usklajeni model vesolja (angl. *concordance cosmology*), ki upošteva zelo različna in komplementarna opazovanja. Le nekaj let kasneje so opazovanja oddaljenih eksplozij supernov tipa Ia potrdila pospešeno širjenje vesolja, za kar je odgovorna še neznana temna energija. Vodilnim znanstvenikom pri teh meritvah pospešitve širjenja vesolja je bila leta 2011 podeljena Nobelova nagrada (glej članek v Obzorniku [5]).

Zaključek

Nobelov nagrajenec James Peebles je še vedno aktiven na področju fizikalne kozmologije, na katerem se ukvarja z znanstvenimi vprašanji, ki so podcenjena in kot sam trdi je takih vprašanj veliko. Zanimajo ga predvsem nenavadne lastnosti galaksij v kozmološkem kontekstu [18]. Naj navedemo tri posebne primere, s katerimi se ukvarja. Prvi primer predstavljajo izolirane galaksije, ki so odmaknjene od drugih, zato bi pričakovali, da je bila njihova rast konstantna, posledično pa njihova oblika aksialno simetrična, kar pa ne drži.

Drug problem je povezan z nastankom različnih generacij zvezd v galaksijah. Iz novejših opazovanj je razvidno, da je približno polovica večjih bližnjih galaksij sestavljena samo iz zvezdnega diska, v katerem so pretežno zvezde poznejših generacij. Prve generacije zvezd naj bi sestavile središčno odebelitev, ki pa v teh galaksijah ni prisotna. Odgovor na vprašanje, kje so prve generacije zvezd v takih galaksijah, iščejo z uporabo simulacij nastanka struktur na velikih skalah, s katerimi sledijo zvezdam in njihovi razporeditvi znotraj galaksij.

Tudi raziskovanje gibanja in preteklih orbit bližnjih galaksij je izredno zanimivo. Z analizo 23 najbližjih znanih galaksij je pred kratkim Peebles ocenil, da je 21 manjših galaksij Lokalne skupine nastalo v dveh skupkih. Ena izmed teh galaksij naj bi nekoč bila bližje naši galaksiji, vendar tokovi plina, ki nastanejo ob takih bližnjih srečanjih, niso jasno razvidni v opazovalnih podatkih in velja temu posvetiti dodatna opazovanja.

Zakaj naj bi se Nobelov nagrajenec ukvarjal z znanstvenimi vprašanji, ki niso trenutno med najbolj pribljubljenimi ali aktualnimi? Taka vprašanja nam, po besedah nobelovca, »pomagajo preveriti sprejete ideje, kar je vedno dobro, in še vedno obstaja možnost, da je Narava pripravila za nas še kako presenečenje.«

LITERATURA

- [1] R. A. Alpher in R. C. Herman, *Theory of the Origin and Relative Abundance Distribution of the Elements*, Rev. Mod. Phys., **22** (1950), 153.
- [2] R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll in D. T. Wilkinson, *Cosmic Black-Body Radiation*, Astroph. Journal, **142** (1965), 414.
- [3] E. Gibney, *Belgian priest recognized in Hubble-law name change*, Nature, 30. oktober 2018.
- [4] E. J. Groth in P. J. E. Peebles, *Statistical analysis of catalogs of extragalactic objects. VII. Two- and three-point correlation functions for the ghig-resolution Shane-Wirtanen catalog of galaxies*, ApJ, **217** (1977), 385.
- [5] V. Iršič in A. Slosar, *Nobelova nagrada za fiziko 2011 – temna energija*, Obzornik mat. fiz., **58** (2011), 221–231.
- [6] M. Livio, *Mystery of the missing text solved*, Nature, **479** (2011), 171–173.
- [7] M. S. Longair, *Galaxy formation*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [8] P. J. E. Peebles, *Seeing Cosmology Grow*, Annual Review Astr. Astrophys., **50** (2012), 1–12.
- [9] P. J. E. Peebles, *Cosmology's early days*, Nat. Astron., **3** (2019), 1055-1057.
- [10] P. J. E. Peebles in J. T. Yu, *Primeval Adiabatic Perturbation in an Expanding Universe*, ApJ, **162** (1970), 815.
- [11] A. A. Penzias in R. W. Wilson, *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*, Astroph. Journal, **142** (1965), 419.
- [12] A. G. Riess, *The expansion of the Universe is faster than expected*, Nat. Rev. Phys **2** (2020), 10–12.
- [13] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [14] C. D. Shane in C. A. Wirtanen, *The distribution of extragalactic nebulae*, Astron. Journal, **59** (1954), 285.
- [15] M. Tegmark, M. R. Blanton, M. A. Strauss, F. Hoyle, D. Schlegel, R. Scoccimarro, M. S. Vogeley, et al., *The Three-Dimensional Power Spectrum of Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey*, ApJ, **606** (2004), 702.
- [16] T. Zwitter, *Nobelova nagrada odkriteljema planetov drugih zvezd*, Obzornik mat. fiz., **66** (2019), 132–145.
- [17] *The Nobel Prize in Physics 2019*, NobelPrize.org, Nobel Media AB 2020, dostopno na www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/summary/, ogled 25. 10. 2021.
- [18] *P. James Peebles*, dostopno na phy.princeton.edu/people/p-james-peeble, ogled 25. 10. 2021.