

Oris sodobne kozmologije, IV. predavanje:

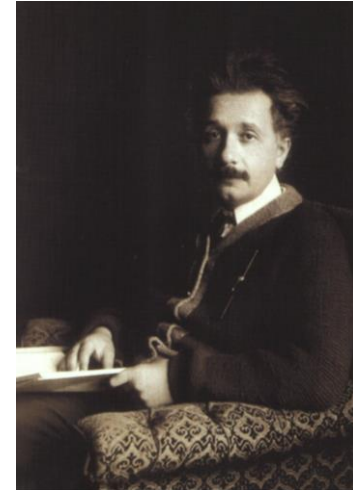
Kozmologija

ob koncu 20. in na začetku 21. stoletja

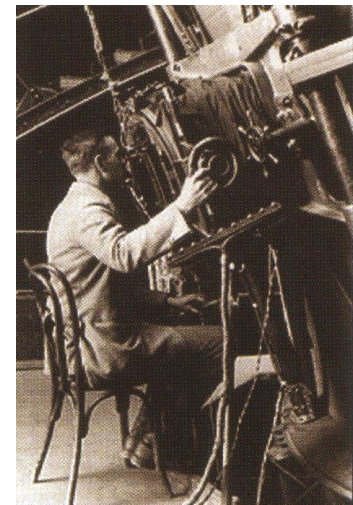


Ponovitev: Einstein in Hubble, utemeljitelja sodobne kozmologije

- Sodobni, “standardni” kozmološki model, splošno znan kot model “prapoka” (ali “velikega poka”, *Big Bang*), v katerem se vesolje razvija, se je začel oblikovati na osnovi:
 1. Einsteinove splošne teorije relativnosti (GTR, 1915) in Friedmannovih dinamičnih modelov prostora-časa (1922), slednje sta dopolnila Robertson in Walker (FRW-modeli); in
 2. Hubblevega odkritja raztezanja vesolja (rdeči premiki spektrov galaksij); to je *prvo kozmološko dejstvo*, ki ga je Hubble izrazil z zakonom:
$$v = H_0 \cdot d$$
 (Hubblev zakon, 1929).



Albert
Einstein,
1920

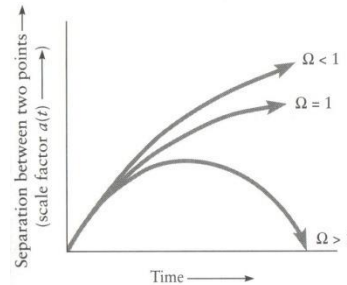


Edwin
Hubble pri
teleskopu
na gori
Wilson,
1930

Ponovitev: trije “klasični” modeli raztezanja vesolja

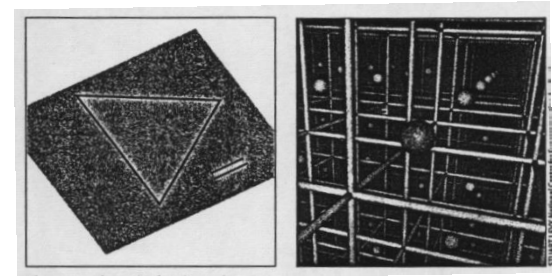


Aleksander
Friedmann
(1888-1925)

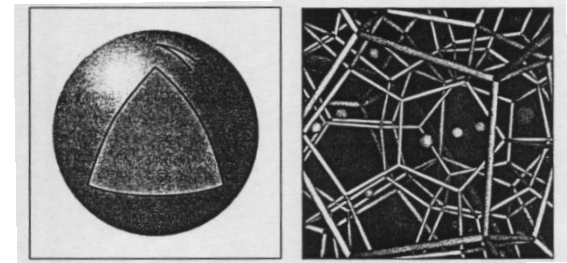


- Ruski matematik Friedmann je leta 1922 odkril takšne rešitve Einsteinovih “enačb polja”, pri katerih se (vesoljni) prostor v času razteza – in s tem predvidel “dinamične” modele vesolja.
- Razvoj vesolja (slika zgoraj) in tudi “optika” videnja objektov v njem (slika desno) sta v teh modelih – katerih metriko sta dopolnila Robertson in Walker, 1935 – odvisna od razmerja (Ω) med dejansko in “kritično” povprečno gostoto vesolja. Kot kaže, je vesolje znotraj našega horizonta “ravno” ($\Omega = 1$).
- Trije FRW-modeli so “idealni” v tem smislu, da:
 - predpostavljajo globalno homogenost vesolja;
 - da je v njih “kozmolška konstanta” (Einstein, 1917) enaka nič. Najnovejše meritve (od 1998 dalje) “geometrije vesolja” s pomočjo supernov pa kažejo, da (2) verjetno ne drži, a tudi (1) je zgolj induktivna generalizacija, ki ima znotraj našega horizonta podporo v izotropiji “prasevanja”.

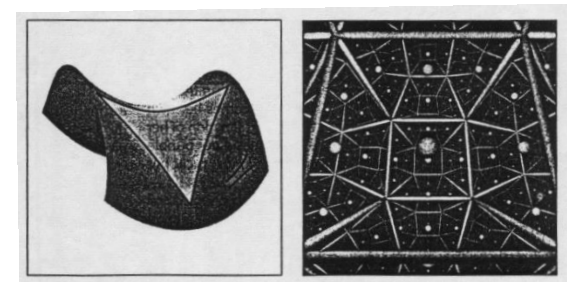
- “evklidski kozmos” ($\Omega = 1$)



- “sferični kozmos” ($\Omega > 1$)



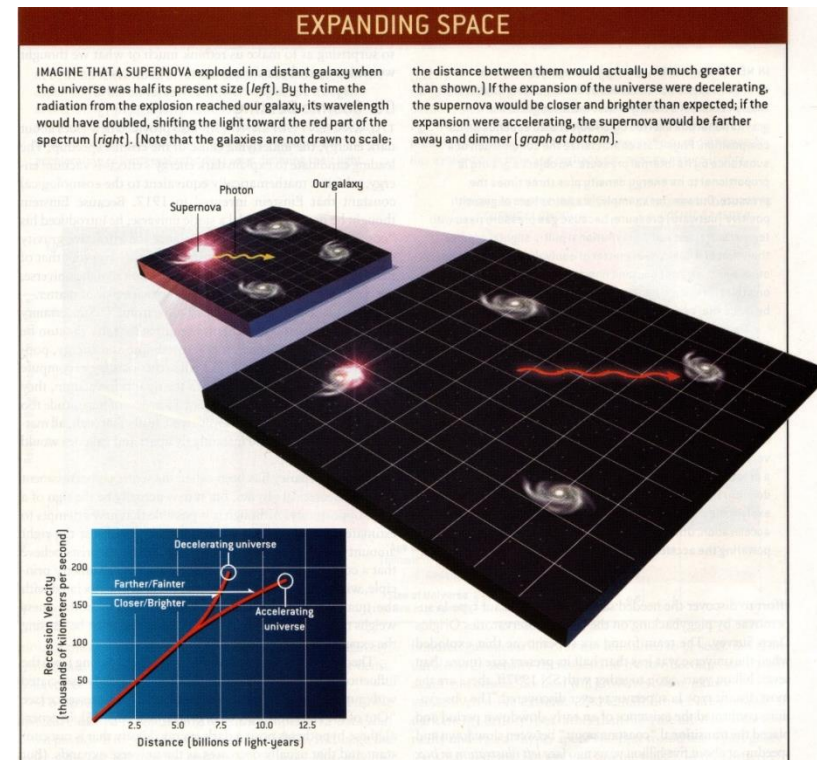
- “hiperbolični kozmos” ($\Omega < 1$)



Vir slik: *Scientific American*, 1999.

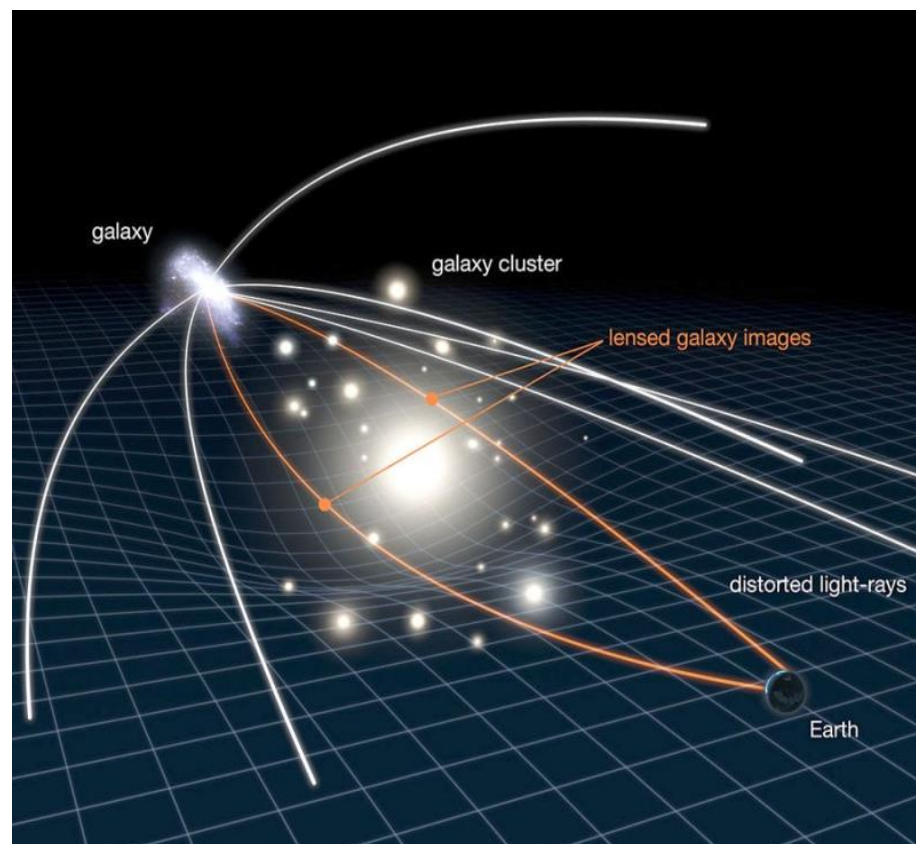
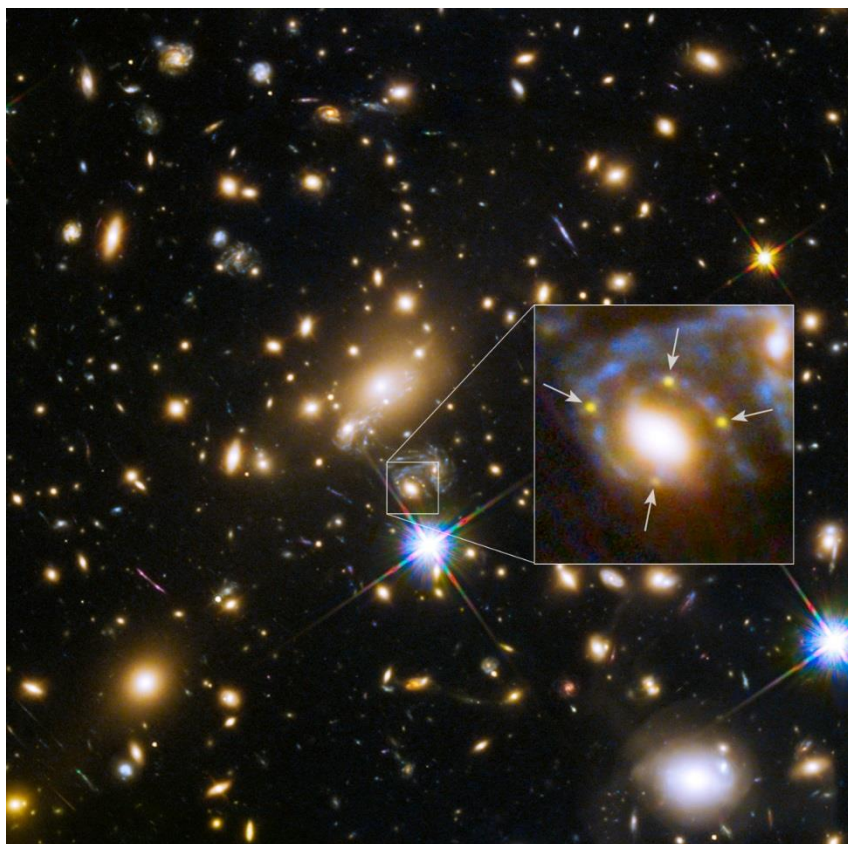
Novi “scenariji” (tj. variante standardnega modela) razvoja vesolja

- Vesolje je velikansko, razsrediščeno in v našem kozmološkem obdobju skoraj prazno: med galaksijami, vesoljnimi “atomi”, so velikanske razdalje, ki se še, celo pospešeno, povečujejo.
- Raziskave rdečih sprektralnih premikov supernov iz drugih galaksij po letu 1998 (gl. večjo *sliko desno*) namreč kažejo, da se vesolje razteza pospešeno - ne pa pojemajoče, kot so predvidevali zdaj že polpretekli Friedmannovi modeli.
- To pa pomeni, da v vesolju vseskozi deluje neka “antigravitacija” (“sila vakuum”, “temna energija” ...?), ki naj bi, kot kažejo meritve, na razdalji ≈ 5 milijard SL, tj. pred ≈ 5 milijardami let (gl. manjšo *sliko desno*), prevzela pobudo in na globalni ravni prevladala nad gravitacijo (ki pa lokalno seveda še vedno trdno veže zvezde v galaksije in galaksije v jate).
- Einsteinova “največja zmota”, uvedba “kozmološke konstante”, je spet aktualna!



Vir slike: *Scientific American*, februar, 2004

Globinsko kartiranje vesolja s pomočjo eksplozij supernov in gravitacijskega lečenja



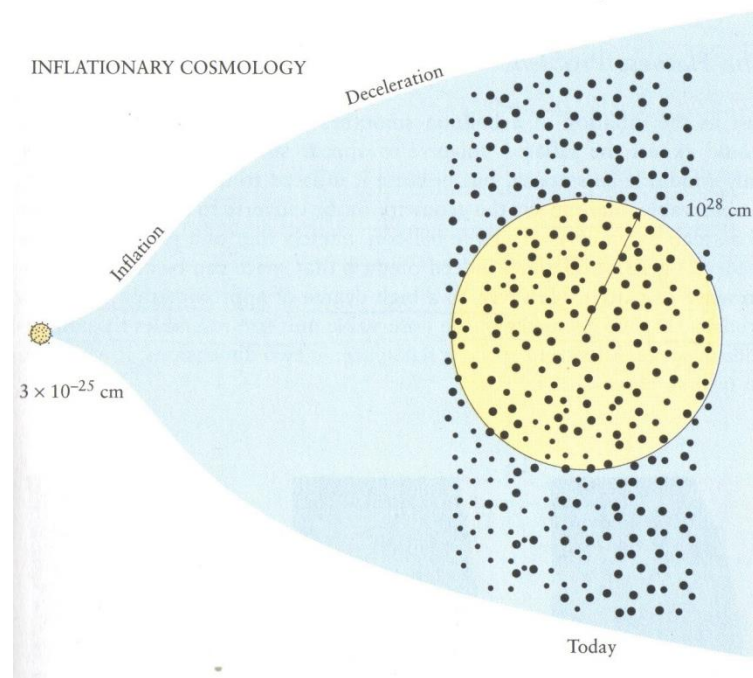
Hubblev posnetek supernove SN Refsdal (11.11.2014), imenovane po norveškem astrofiziku, ki je prvi 1964 predlagal merjenje hitrosti raztezanja daljnega (=zgodnjega) vesolja s pomočjo gravitacijskega lečenja žarkov iz supernov. Skica na desni kaže gravitacijsko lečenje svetlobe z neke daljne galaksije, ki se ukrivlja v gravitacijskem polju bližjih galaksij in prihaja na Zemljo s časovnimi zamiki: le-ti omogočajo globinsko kartiranje vesolja. (Vir: NASA in članek dr. Maruše Bradač v *Delu*, 12.3.2015.)

Napihnjenje (“inflacija”) vesolja kot dopolnitev “standardnega modela”

Hipoteza kozmičnega napihnjenja ali “inflacije”

(Alan Guth, 1980) pravi:

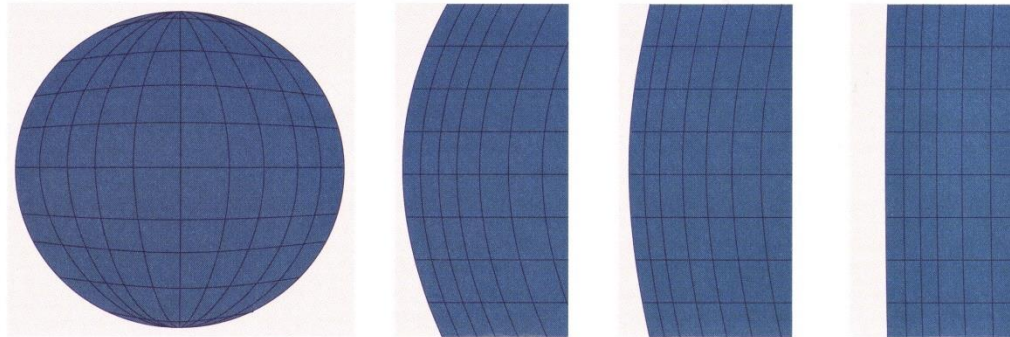
- V zelo kratkem časovnem intervalu, v delčku prve sekunde po prapoku (tj. po domnevni prvotni singularnosti), od $t_K \approx 10^{-35}$ do 10^{-32} , se vesolje napihne za velikanski faktor $\approx 10^{50}$.
- Vzrok tega fantastičnega dogodka naj bi bila “energija (kvantnega) vakuuma”, ki naj bi se sprostila v obliki “fazne spremembe” pri “lomu simetrije” med močno jedrsko in elektrošibko silo.
- Napihnjenje naj bi se zgodilo silno pospešeno in vesolje naj bi se razširilo nadsvetlobno hitro (širil naj bi se namreč sam prostor-čas).
- Nekateri menijo, da prav temu silnemu dogodku, vesoljnemu “napihnjenju” bolj ustreza izraz *prapok* kot domnevni prvotni singularnosti. (Treba pa ju je razlikovati.)



Vir slike: Joseph Silk,
A Short History of the Universe, 1997

“V inflacijskem univerzumu je prostor, ki se je razširil v času inflacije, postal večji od horizonta (rumeni krog), tj. razdalje, ki jo je svetloba prepotovala od prapoka [do danes]. Iz tega sledi, da je vesolje mnogo večje, kot ga lahko vidimo [v našem kozmološkem času].”

Hipoteza o napihnjenju vesolja rešuje probleme standardnega modela



Vir slike:
Joseph Silk,
*A Short History
of the Universe*,
1997.

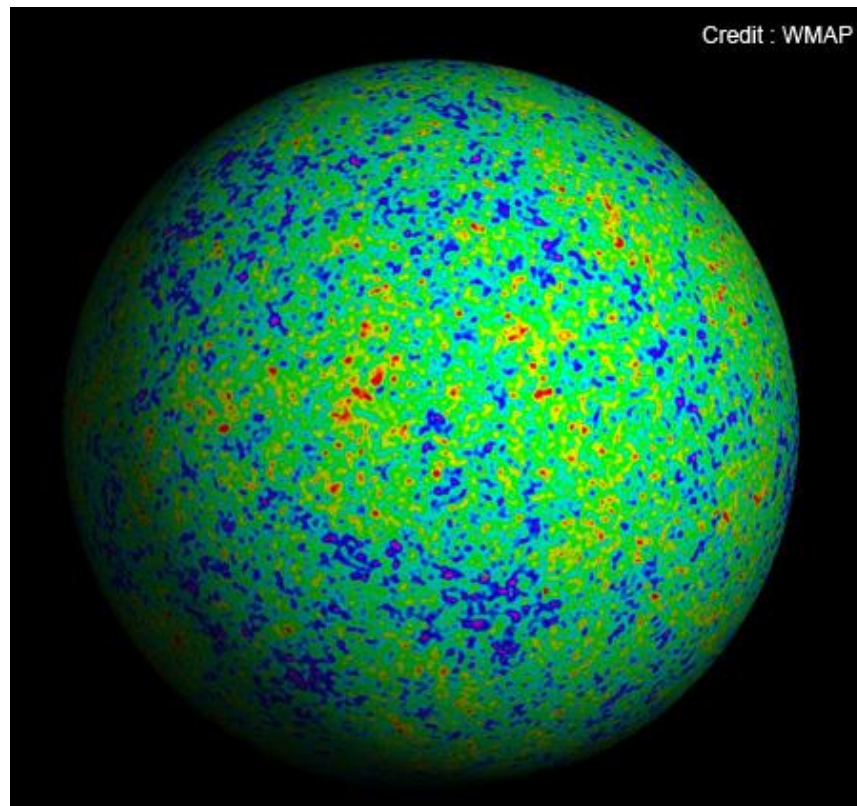
- Slika pokaže, kako “inflacija predvideva takšno geometrijo vidnega vesolja [tj. vesolja znotraj našega lokalnega horizonta, Hubblove sfere], ki je zelo blizu geometriji evklidskega [tj. ‘ravnega’] prostora” (Silk, str. 82, [op.] M.U). Kajti:
 1. napihnjenje “izravna” prostor – in tako razreši “problem ravnosti”
 2. napihnjenje “homogenizira” prostor – in tako razreši “problem horizonta” oz. izotropije neba (predvsem prasevanja).
- Torej: Če je napihnjenje res bilo, *potem* razrešuje probleme standardnega modela.
- Ostaja pa odprto vprašanje, ali je hipoteza napihnjenja sploh resnična. Energije (frekvence sevanj), ki so takrat delovale, so prevelike, da bi jih lahko simulirali in proučevali v današnjih pospeševalnikih delcev.
- Pač pa kozmologi poskušajo empirično pokazati, da je napihnjenje vtisnilo svoj “pečat” v prasevanje (→ gl. poznejša slida: “zvočni valovi” pri napihnjenju).

Prasevanje kot najstarejši vesoljni “fossil”

Prasevanje, ki prihaja s “Hubbleve sfere” (tj. našega vesoljnega horizonta, ki je oddaljen od nas ~ 14 milijard svetlobnih let), je najstarejši vesoljni “fossil”, namreč odtis prvotne strukture oz. energetske “zrnatosti” zgodnjega vesolja.

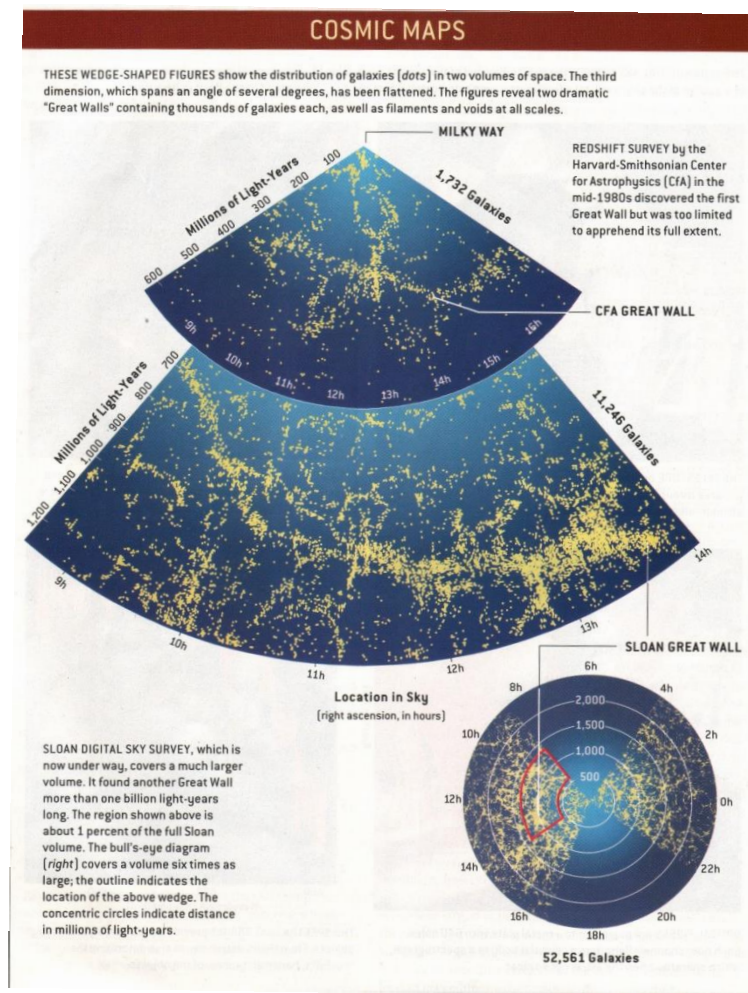
Na sliki vidimo to zrnatost na “globusu prasevanja”, posneto z raziskovalnim satelitom WMAP (in pozneje umetno obarvano). Prasevanje je namreč *skoraj* popolnoma izotropno (tj. v vseh smereh enako) s temperaturo $T \approx 3^\circ\text{K}$, vendar so na njem opazne majhne temperaturne oziroma energetske razlike ($\pm 10^{-4} \text{ }^\circ\text{K}$).

Na najstarejšem vesoljnem “fosilu” so torej “zrnati” odtisi prvotnih razlik v temperaturi prasevanja, ki so nekakšna “semena”, iz katerih pozneje nastanejo makrostrukture: galaktične jate, galaksije itd. Izvor teh razlik so kvantne fluktuacije (nihanja) že v prvi sekundi po “prapoku”.



Katere so največje znane strukture (“makrostrukture”) v vesolju?

- Sodobne astronomske meritve – s pomočjo zvezd supernov (kot “standardnih svetilnikov”), najsvetlejših eksplozij v drugih galaksijah – omogočajo globinsko kartiranje vesolja.
- Čeprav je vesolje “globalno”, tj. na horizontu (Hubblovi sferi), skoraj povsem izotropno in homogeno, kar je razvidno iz prasevanja, pa se galaktične jate in nadjate strukturirajo v velikanske “zidove” ali “opne” (pajčevinaste strukture *na sliki*: vsaka rumena pikica predstavlja galaksijo); te strukture so tudi večje od milijarde SL, med njimi pa so ogromne praznine, “mehurji”.
- Na sliki vidimo dve doslej največji raziskavi vesoljnih “makrostruktur”: prva, harvarska raziskava (do 1986) je odkrila prvi “Veliki zid” (*Great Wall*); druga raziskava, “Sloan Digital Sky Survey”, pa je segla še mnogo globlje in do leta 2001 kartirala več kot milijon galaksij do razdalje dveh milijard SL ter odkrila še veliko večje “zidove”.



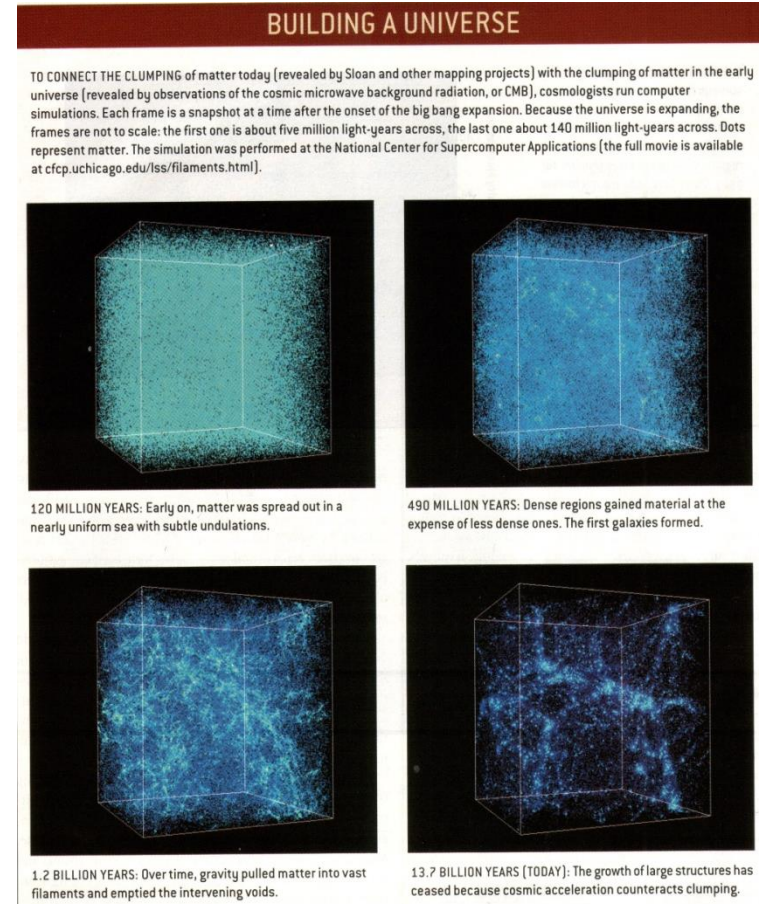
Vir slike: *Scientific American*, februar, 2004

Kako so nastale “makrostrukture” v vesolju?

- Kako se je v razvoju vesolja snov zbrala v te “makrostrukture”? Kozmologi poskušajo najti odgovor na to vprašanje predvsem na dva načina:

1. z opazovanjem prasevanja, majhnih razlik v njegovi siceršnji izotropiji (“granulacija” prasevanja);
2. z računalniškimi simulacijami raztezajoče se, prvotno homogene “snovi” (*gl. slike*).

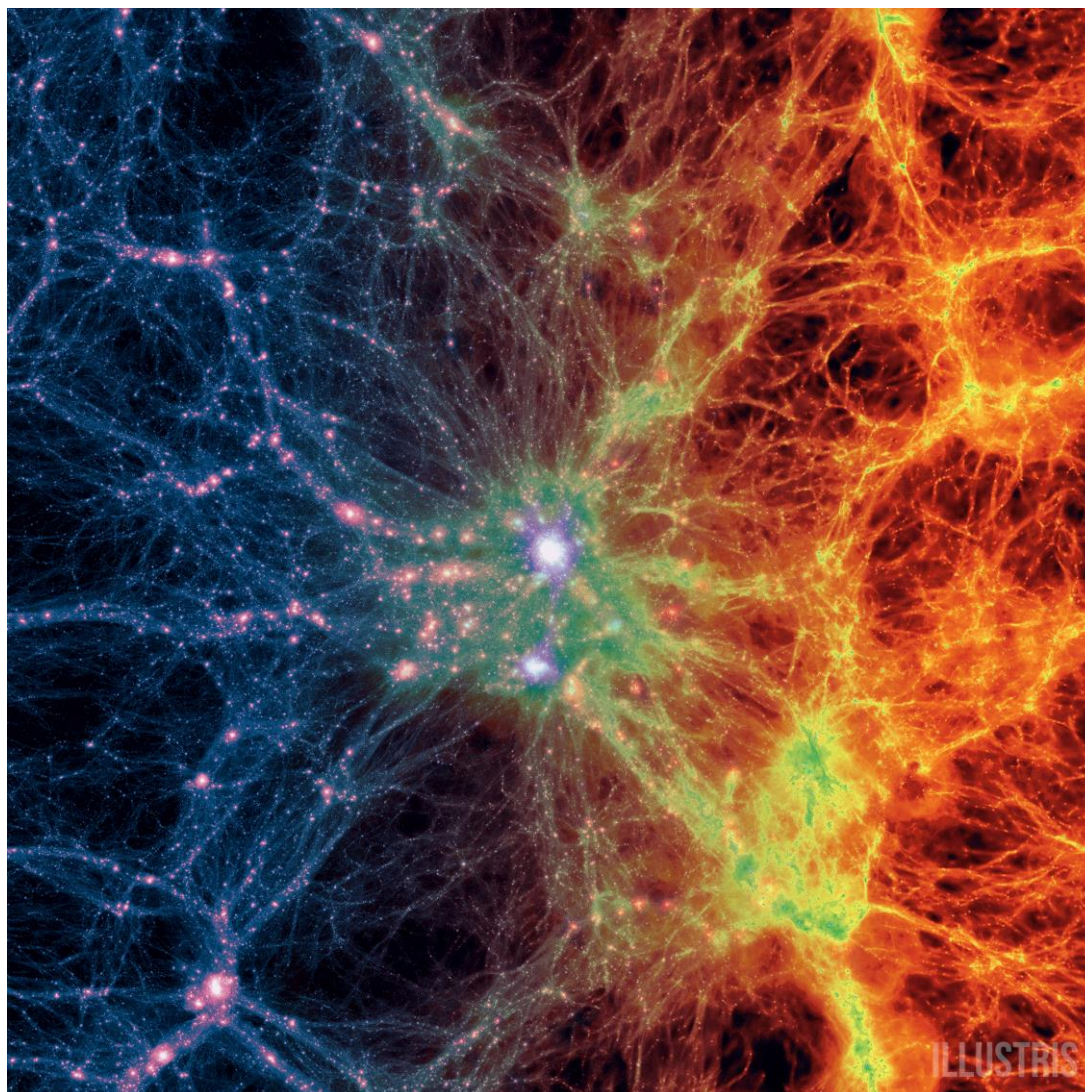
Na slikah vidimo računalniško simulacijo štirih časovnih presekov raztezajočega se vesolja: po 120 milijonih let, po 490 milijonih let, po 1,2 milijarde let in po 13,7 milijardah let (danes).



Vir slike: *Scientific American*, februar, 2004

»Virtualno vesolje« ponazarja nastajanje makrostruktur

Projekt *Illustris* (2013):
računalniška simulacija
nastajanja makrostruktur,
tj. galaktičnih »grozdov«,
iz katerih so pozneje
nastale jate galaksij.
V tem procesu imata
pomembno vlogo »temna
snov« in »temna energija«,
ki po izračunih tvorita 95%
celotne vesoljne mase-
energije, tj. vidna svetla
snov tvori samo 5% vsega.
(Vir: MIT in članek
Radovana Kozmosa v
Delu, maja 2014).

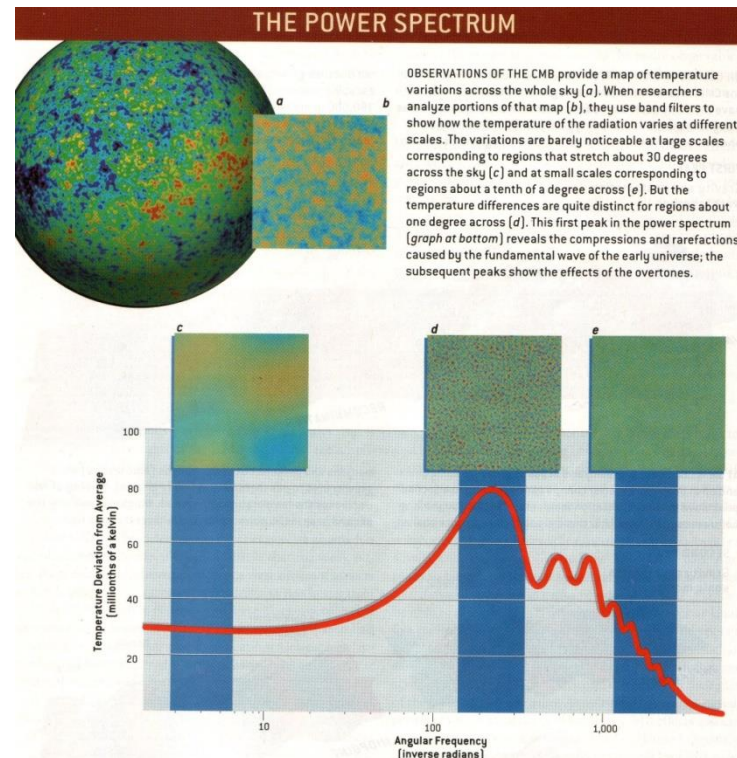


Ali je mogoče z opazovanjem prasevanja empirično preveriti hipotezo vesoljnega napihnjenja (inflacije)?

Satelit, imenovan WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) od leta 2001 dalje raziskuje fino *strukturo prasevanja*, tj. njegovo anizotropijo oziroma (majhne) odklone od globalne izotropije, ki so sledi prvotnih “zrn”, iz katerih so se razvile makrostrukture.

Dosedanja poročila posredno in vsaj delno potrjujejo teorijo napihnjenja na tri načine:

1. Povprečna kotna velikost te zrnatosti (okrog 1°) je v skladu s teoretskim predvidevanjem, kajti njen izvor naj bi bile (izračunane) kvantne fluktuacije v inflatornem polju, ki naj bi povzročile “zvočne valove” <*acoustic waves*>, tj. zgoščine in razredčine v plazmi (“ognjeni krogli” zgodnjega vesolja), ki se ob koncu stanja plazme “vtisnejo” v fotonsko prasevanje.
2. Izmerjeni zvočni valovi na prasevanju so skalno invariantni <*scale invariant*>, tj., amplitude valov se ne razlikujejo pri večjih ali manjših valovnih dolžinah, kar tudi predvideva teorija napihnjenja.
3. Gl. naslednji slide →



Vir slike: Wayne Hu & Martin White,
“The Cosmic Symphony”
Scientific American, februar 2004

“Vesoljne harmonije”

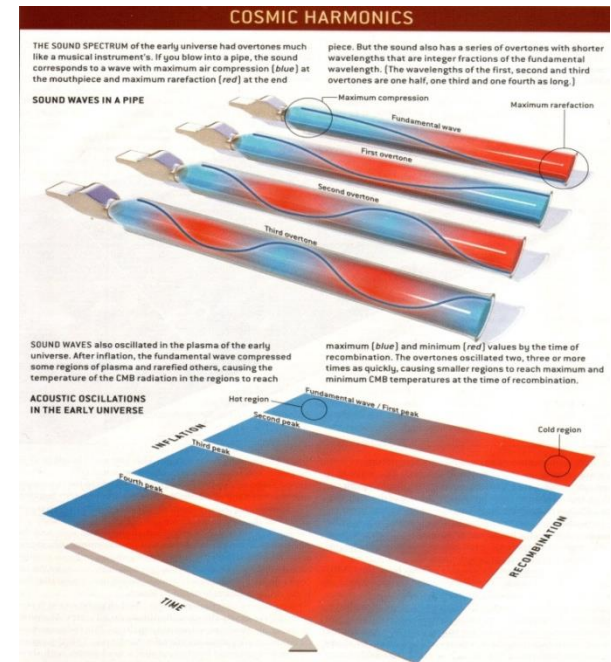
3. Zvočni valovi imajo obliko sinhroniziranih harmoničnih nihanj, iz česar lahko sklepamo, da so nastali tako rekoč v istem trenutku (inflacija je trajala en sam “hip”, 10^{-35} s).

Hu & White povzemata: “Inflacija, hitro raztezanje vesolja v prvih trenutkih po prapoku, je sprožila zvočne valove, ki so izmenoma zgostili in razredčili prvotno plazmo. Potem ko se je vesolje dovolj ohladilo, da so lahko nastali nevtralni atomi [tj. ≈ 300.000 let po prapoku, ob koncu stanja plazme], je bil vzorec variacij gostote, ki so ga povzročili zvočni valovi, zamrznjen v prasevanje.” (*Scientific American*, 2004/II, str. 34, podč. M.U.)

- Ob tem optimistično ugotavljata: “Evidenca, ki podpira teorijo inflacije, je zdaj torej najdena v podrobnem vzorcu zvočnih valov v prasevanju.” (*Ibid.*) – Morda res, vendar ta evidenca še ni dovolj znanstveno prepričljiva za vse kozmologe, je pa filozofsko lepa (pitagorejci ...).

Te raziskave spadajo v kvantno kozmologijo.

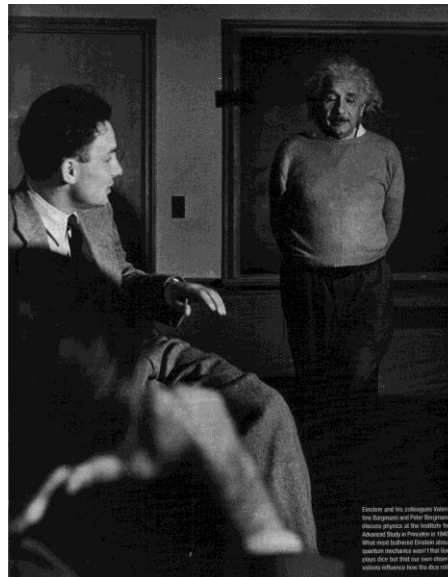
Brian Greene pravi : “Po inflacijski teoriji več kot 100 milijard galaksij, ki svetijo v vesolju kot nebeški diamanti, ni nič drugega kot kvantna mehanika, vtisnjena v celotno nebo. Zame ta ugotovitev predstavlja eno največjih čudes sodobne znanstvene dobe.” (*Tkanina vesolja*, 364)



Vir slike: Wayne Hu & Martin White,
“The Cosmic Symphony”.
Scientific American, februar 2004

Glavni teoretski problem sodobnega kozmološkega modela: neusklajenost teorije relativnosti in kvantne mehanike

- V standardnem kozmološkem modelu nastopata Einsteinova teorija gravitacije (GTR) in kvantna mehanika, ki pa (še) nista teoretsko kompatibilni –
- Med drugim je *tudi* to razlog, da je sam prapok v strogem pomenu le domneven (kot “singularnost?”), saj se znanstvena razlaga konča pri Planckovem času, pri 10^{-43} s.



Sedem možnih odgovorov (*inter alia*) na vprašanje:
Zakaj je vesolje tako velikansko in razsrediščeno?

1. Vprašanje *zakaj*... je za vesolje nesmiselno, saj dejansko ni nobenega zadostnega razloga za takšno velikost oziroma razsrediščenost vesolja – “tako pač JE”. (Ampak s tem se razum težko sprijazni.)
2. V “multiverzumu” (brezštevilnem mnoštvu svetov) se že najde ravno pravšnje, namreč takšno vesolje, kot je naše, druga so pač manjša – morda pa celo večja? (“Antropično načelo”, evolucija brez smotra.)
3. Naše vesolje je nujno tako veliko v prostoru-času, zato da lahko iz sebe rodi en sam samcat “otok zavesti”: našo zemljico, človeško telo, možgane. (Ali s tem predpostavljamo smotrnost vesolja?)
4. Neskončnost in razsrediščenost vesolja sta lepši in boljši od končnosti in središčnosti. (Klasiki se s tem nikakor ne bi strinjali, pač pa je “oceansko občutje” ugajalo Brunu in romantikom.)
5. Vesolje mora biti neskončno zaradi naše svobodne volje/zavesti, da bi imela na razpolago neomejeno količino prostora-časa – le kako naj bo svobodna, če naleti na mejo? (Ali je brezmejnost res bistvo svobode?)
6. Vesolje sploh ni zares tako neznansko veliko – takšnega zgolj vidimo zaradi neke “iluzije”, npr. zrcaljenja prostorskih replik v času ipd. (Tudi če bi bilo to “globalno” res, bi bilo vesolje še vedno velikansko.)
7. Edino, kar je v vesolju resnično pomembno, je duša in/ali duh, zanju pa bližina in daljavo pomenita nekaj povsem drugega, saj sta v Enem, edinem pravem “središču” vsega, kar je. (Da, morda, morda res ...)