

VANGALAKTIČKA ASTRONOMIJA

KOSMOLOGIJA

Metagalaksija (Astronomska vasiona)

Metagalaksija sadrži nekoliko milijardi galaksija

Galaksije su osnovne strukturne jedinice

Grupe galaksija broje nekoliko desetina galaksija (Lokalna grupa)

Jata galaksija broje stotine i hiljade galaksija (Virgo jato, na rastojanju oko 17Mpc, broji oko 2500 članova, sadrži spiralne i eliptične galaksije, u središtu se nalazi najmasivnija eliptična galaksija M87)

Bogata jata su pravilnog oblika, sadrže do 30000 galaksija, uglavnom eliptičnih i diskolikih (Coma, Perseus)

Medjugalaktička materija – merenja X-zračenja ukazuju na postojanje vrelog (oko 107 K) jonizovanog gasa

Superjata (jata jata galaksija).

Najveće poznate strukture (dimenzija 200-300 Mpc) su **džinovska vlakna** i zidovi u kojima je materija jako koncentrisana i koji okružuju ogromne prazne prostore. Najveći je tzv. Sloan veliki zid, prošireni 'filament' galaksija otkriven 2003. godine.

Lokalna grupa

Sadrži skoro 50 članova.

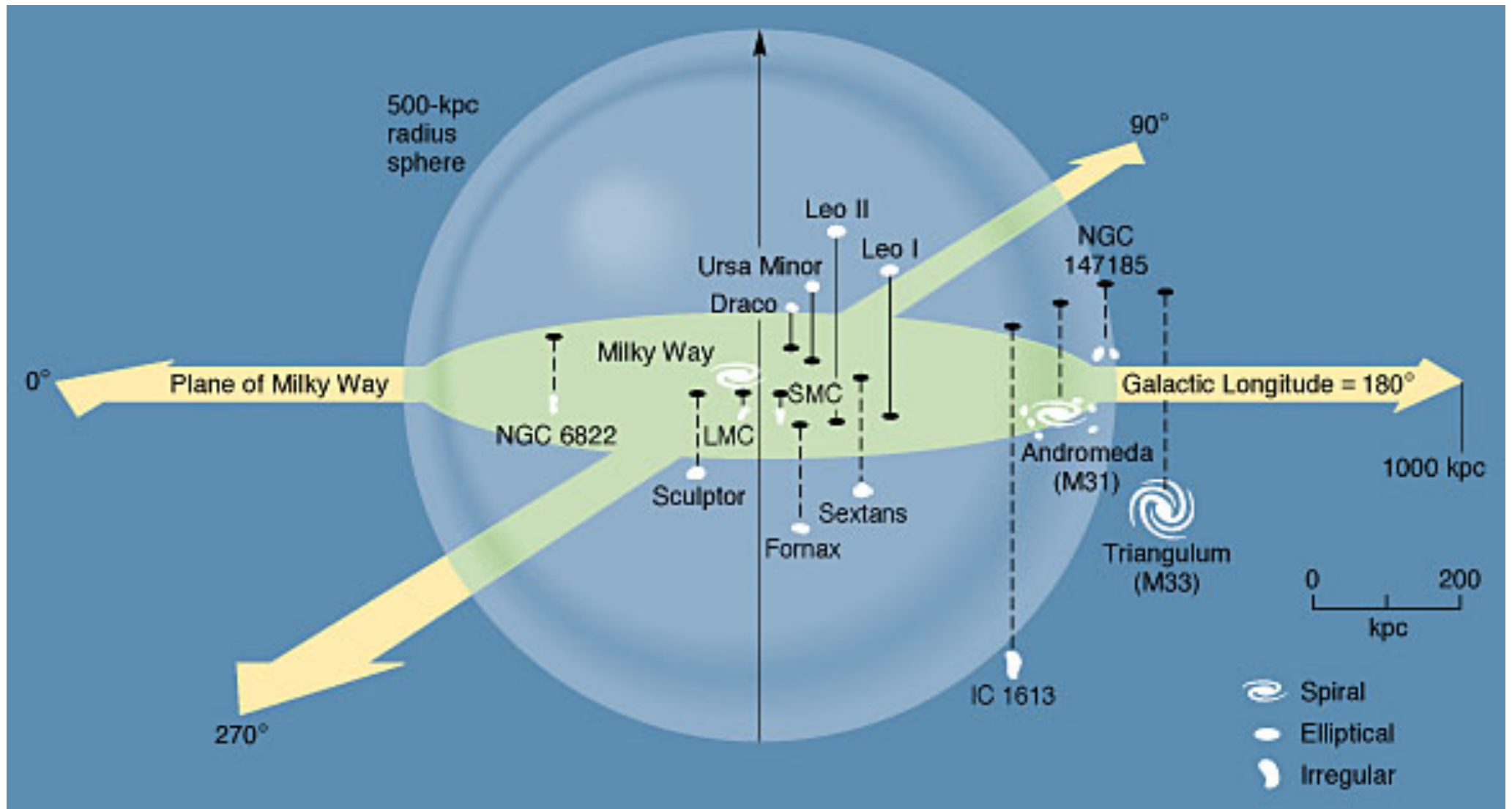
Tri spiralne galaksije:

- **Andromedina galaksija (M31)** prečnika 60kpc, na rastojanju od oko 690 kpc, ima 4 patuljaste eliptične galaksije kao satelite,
- **Mlečni put**, prečnika 30kpc, ima desetak satelitskih galaksija, najpoznatiji sateliti su nepravile galaksije Mali i Veliki Magelanov oblak, na rastojanju od oko 50kpc
- **Galaksija M33**, prečnika 20kpc, na rastojanju od oko 900kpc.

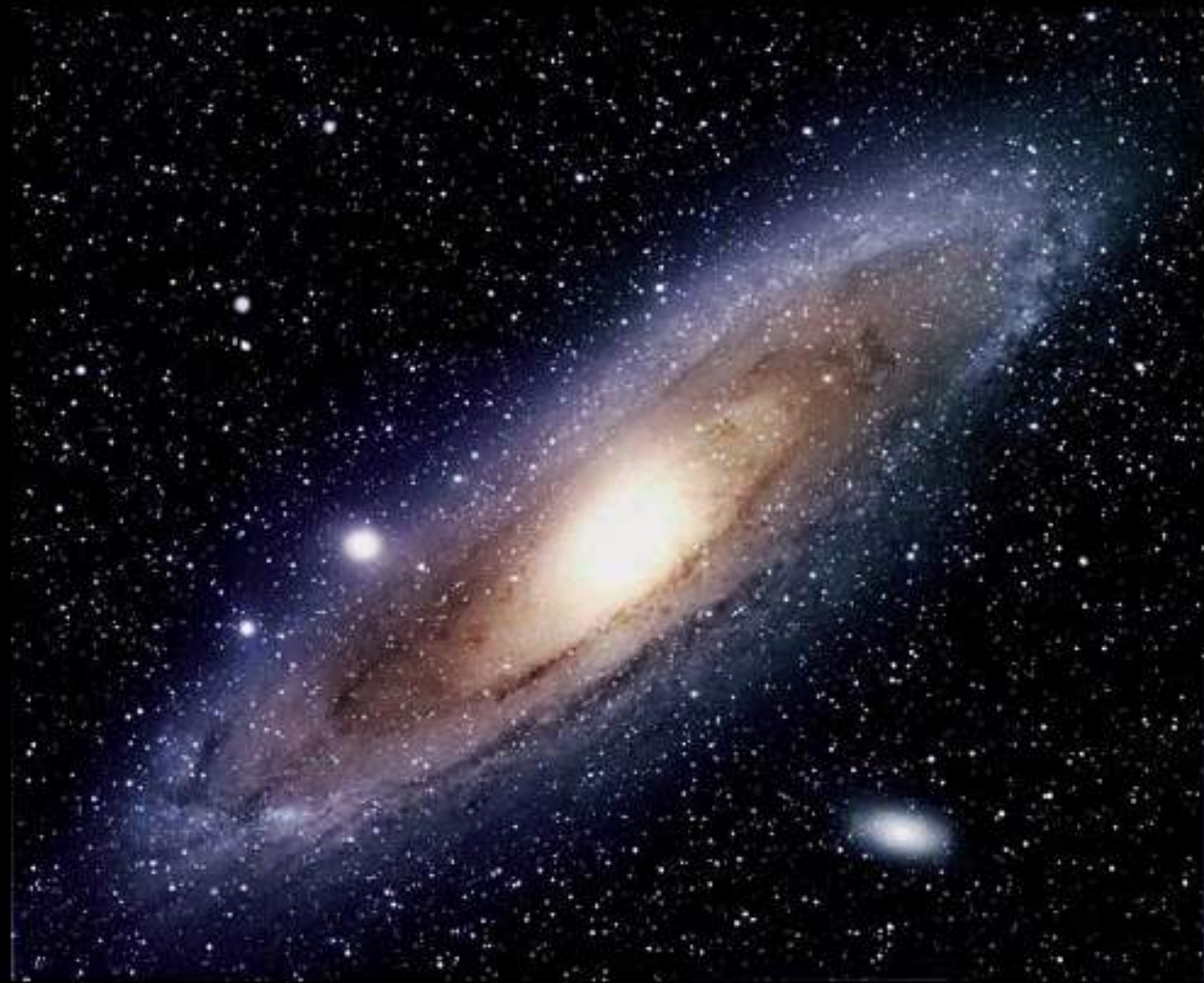
Sve ostale galaksije su ili male eliptične ili nepravilne.

Svi članovi Lokalne grupe se kreću ka jatu Virgo kao celina brzinom od oko 300km/s.

Lokalna grupa



M31

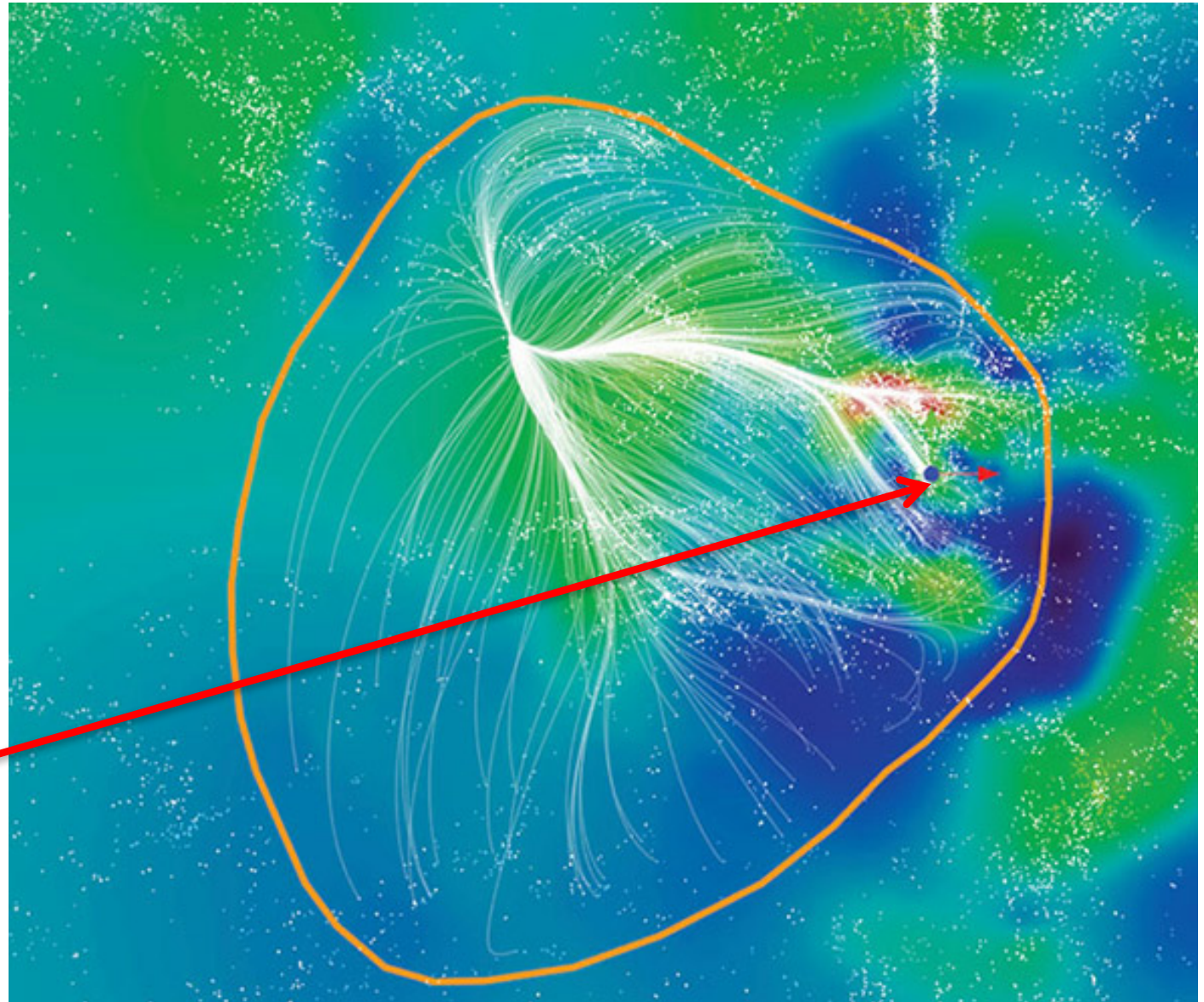


M33



Laniakea

- naše lokalno super jato
- 500 miliona svetlosnih godina
- mi smo ovde



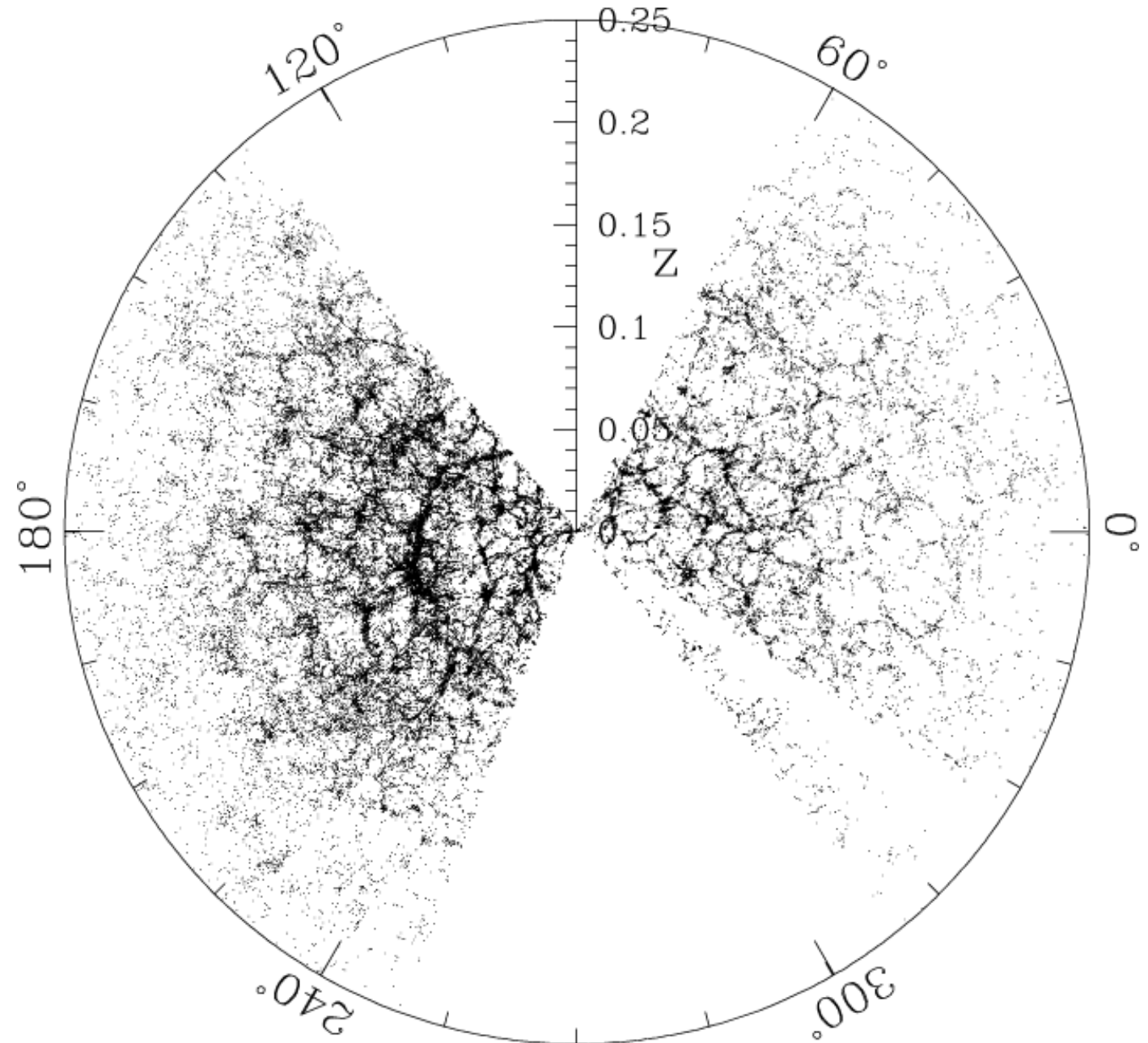


Hubble deep field (Hablovo duboko polje)
snimak galaksija do 30m, na više od 1000Mpc,
dobijen sa 100 sati ekspozicije

Coma jato galaksija



- pregled neba daje mapu svemira
- svaka tačka galaksija

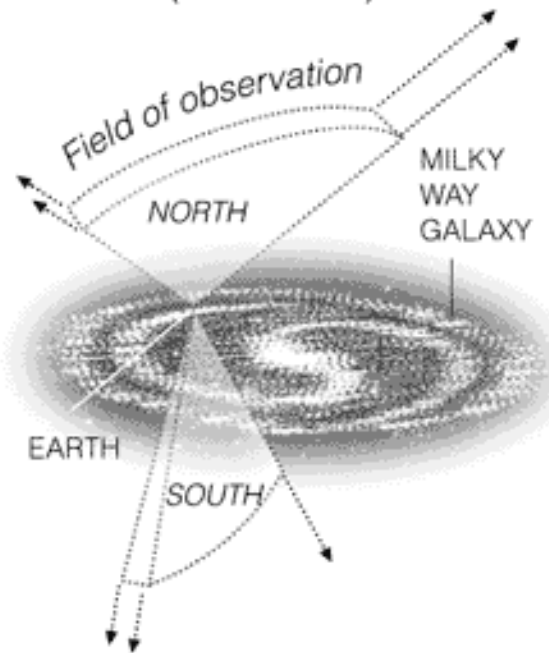


The Geography of the Universe on the Grandest Scale

An international team of astronomers has measured the distances to more than 100,000 galaxies, allowing them to construct the largest, most detailed map of a large section of the universe near our galaxy.

THE OBSERVATIONS

The directions of the two survey regions are shown below (schematic).

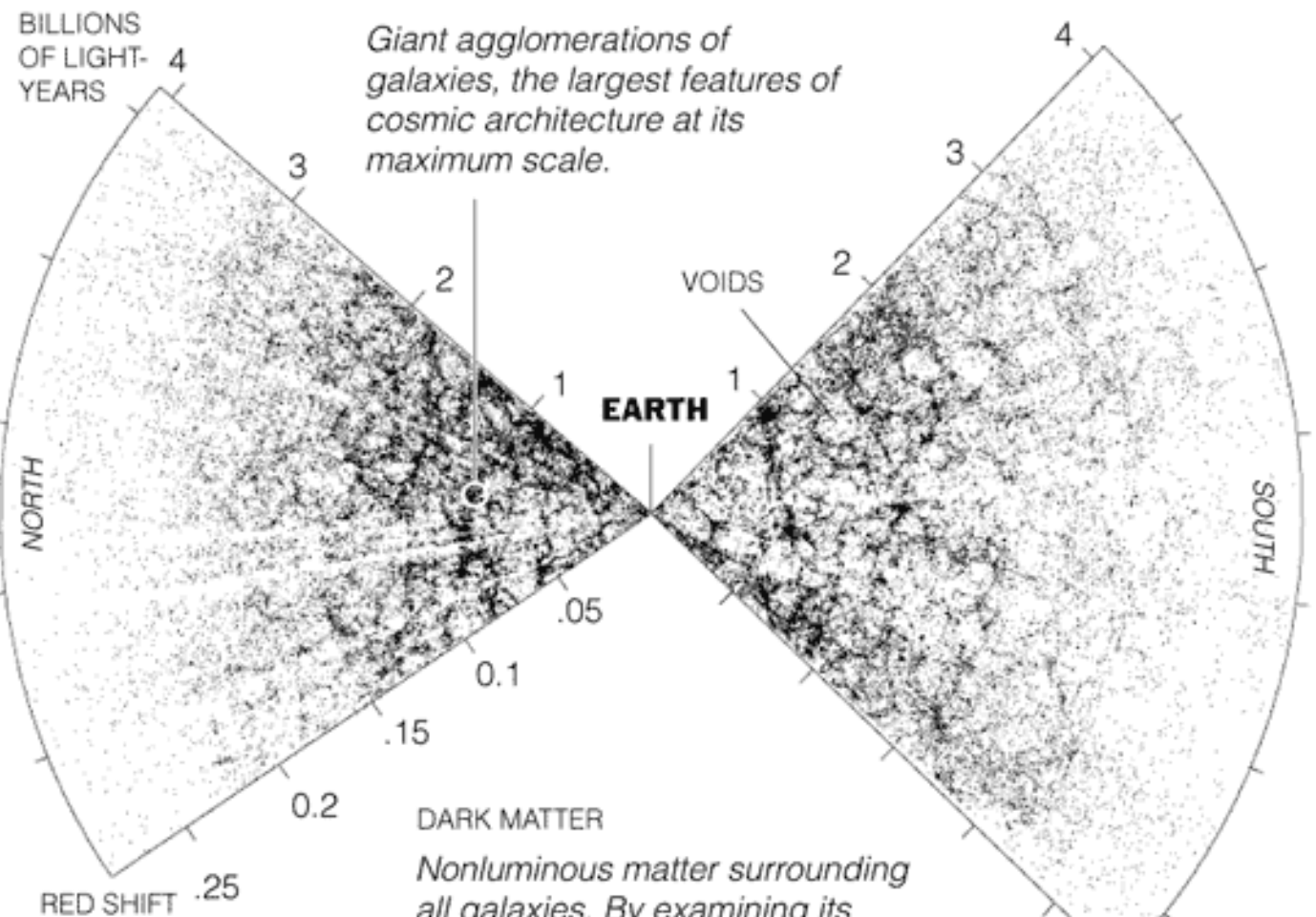


Survey regions extend outward for billions of light-years.

Sources: Dr. Robert Smith, The Australian National University; 2-Degree Field Galaxy Redshift Survey.

THE MAP

Each dot below is a galaxy, and the team eventually plans to locate 250,000.



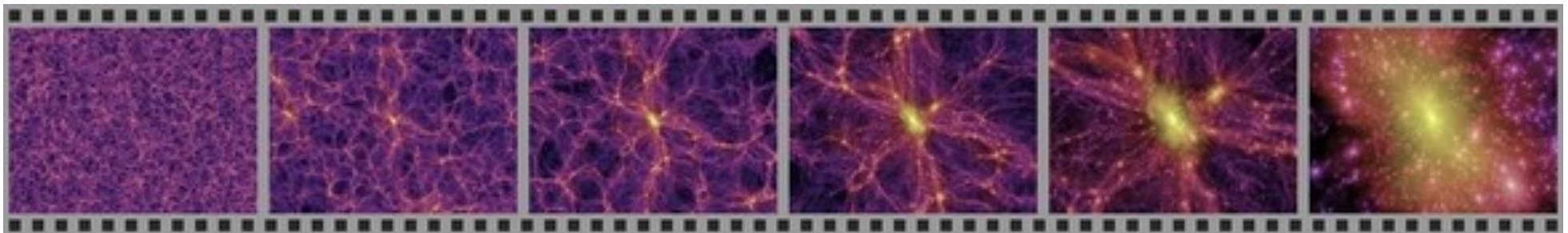
The more distant a galaxy the more its light shifts to the red end of the spectrum.

DARK MATTER

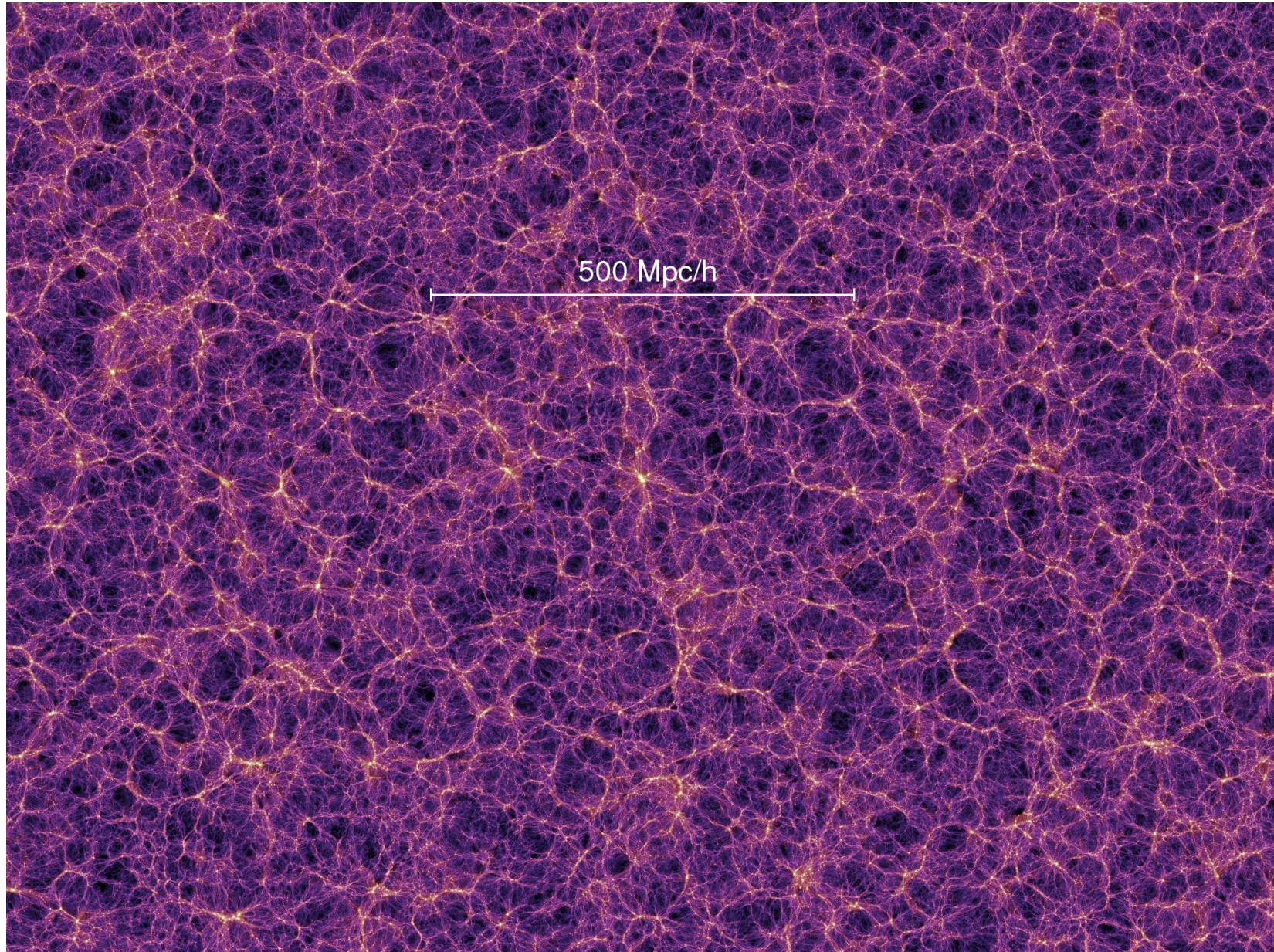
Nonluminous matter surrounding all galaxies. By examining its distribution, which is inferred by the patterns of galaxies, astronomers can estimate the amount of mass in the universe.

Simulacija - Millennium

- *The Millennium Run used more than 10 billion particles to trace the evolution of the matter distribution in a cubic region of the Universe over 2 billion light-years on a side.*
- *supercomputer at the Max Planck Society's Supercomputing Centre in Garching, Germany worked for more than a month.*
- *to recreate evolutionary histories both for the 20 million or so galaxies which populate this enormous volume and for the supermassive black holes which occasionally power quasars at their hearts.*
- *<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>*



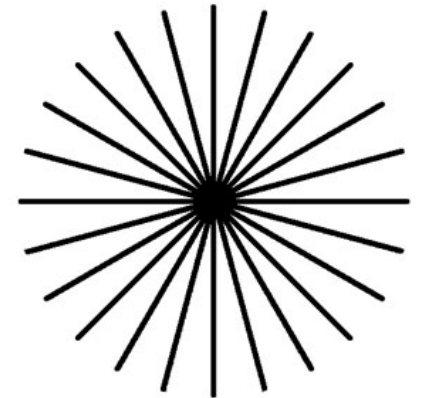
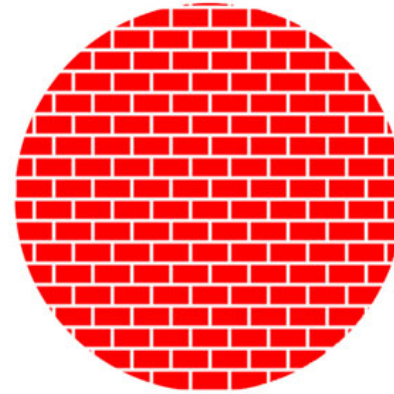
Univerzum na najvećim skalama



Kosmološke hipoteze i modeli

- **Kosmologija** – naučna disciplina koja izučava vasionu u celini, njenu prošlost, sadašnjost i budućnost pomoću osnovnih fizičkih teorija i empirijski dobijenih saznanja
- **Cilj**: objašnjenje postanka vasiona i etapa njene evolucije
- **Pitanje**: Da li fizički zakoni koji važe **ovde i sada** važe **svuda i uvek**?

- **Kosmološki princip:**
pretpostavka da je vasiona
u velikim razmerama
homogena i izotropna

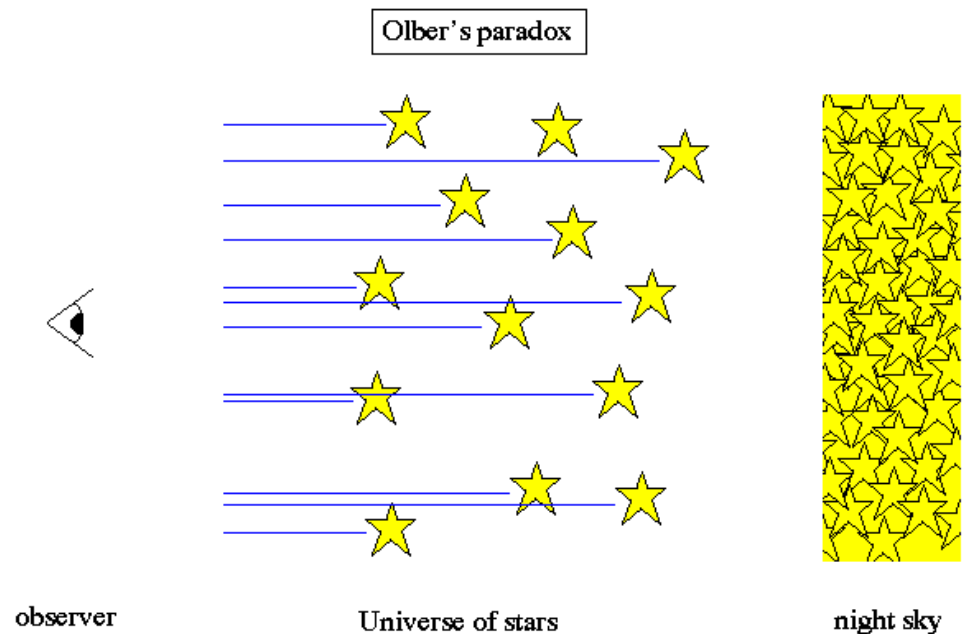


- Pretpostavke da je vasiona, još i beskonačna i stacionarna dovode do fotometrijskog (Olbersovog) i gravitacionog paradoksa. Paradoksi su posledica Njutnovskog poimanja prostora, vremena i gravitacije.
- STR (1905): merenje vremena, dužine i mase zavisi od kretanja posmatrača
- OTR (1916): geometrija prostor-vremena je uslovljena materijom

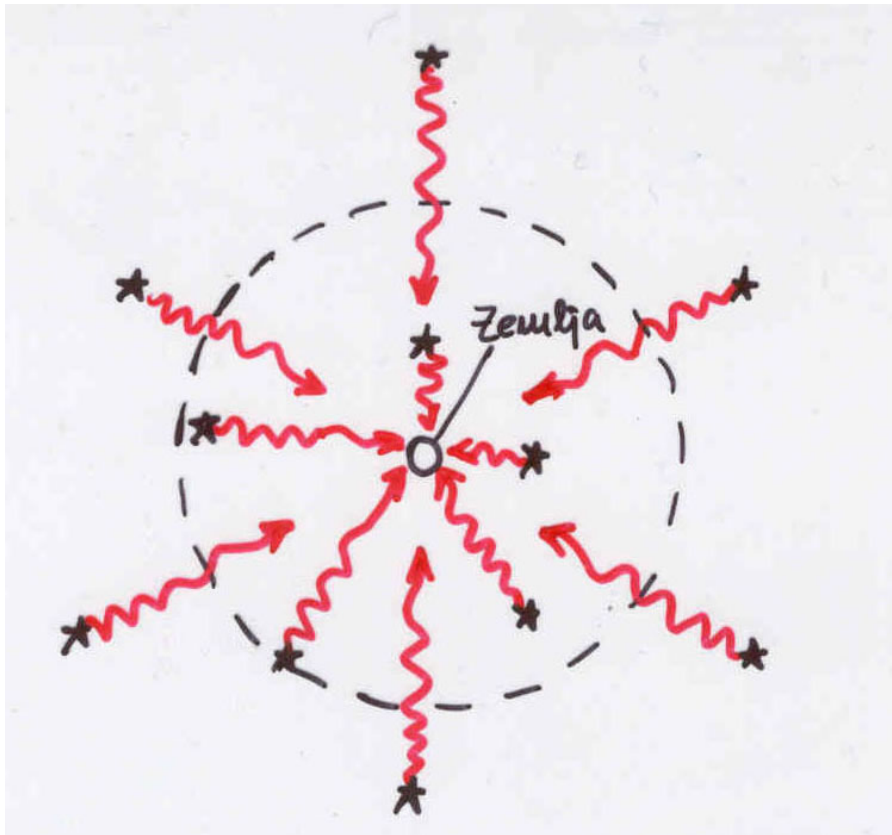
Gravitacioni paradoks Kako sistem u kome je jedina sila privlačna da ostane statičan (čak i u slučaju prostorno beskonačnog kosmosa)?

Olbersov paradoks Noćno nebo je tamno!

Ako su zvezde ravnomerno rasporedene u prostoru, njihov broj se povećava sa kvadratom rastojanja, a kako količina svetlosti koja stiže sa zvezda takode opada sa kvadratom rastojanja, ova dva uticaja se poništavaju. Noćno nebo bi trebalo da bude uniformno svetlo, sto nije slučaj. Univerzum postoji konačno vreme i/ili ima konačnu dimenziju.



Kosmički horizont



Radius kosmičkog čestičnog horizonta – rastojanje koje je svetlost prešla od Big bang-a.

Ako se Big bang desio pre 13.8 milijardi godina, horizont je na rastojanju od 13.8 milijardi godina.

Ne možemo videti objekte dalje od ovog horizonta jer njihova svetlost nije imala dovoljno vremena da stigne do nas.

Astronomska vasiona je smeštena unutar ove sfere.

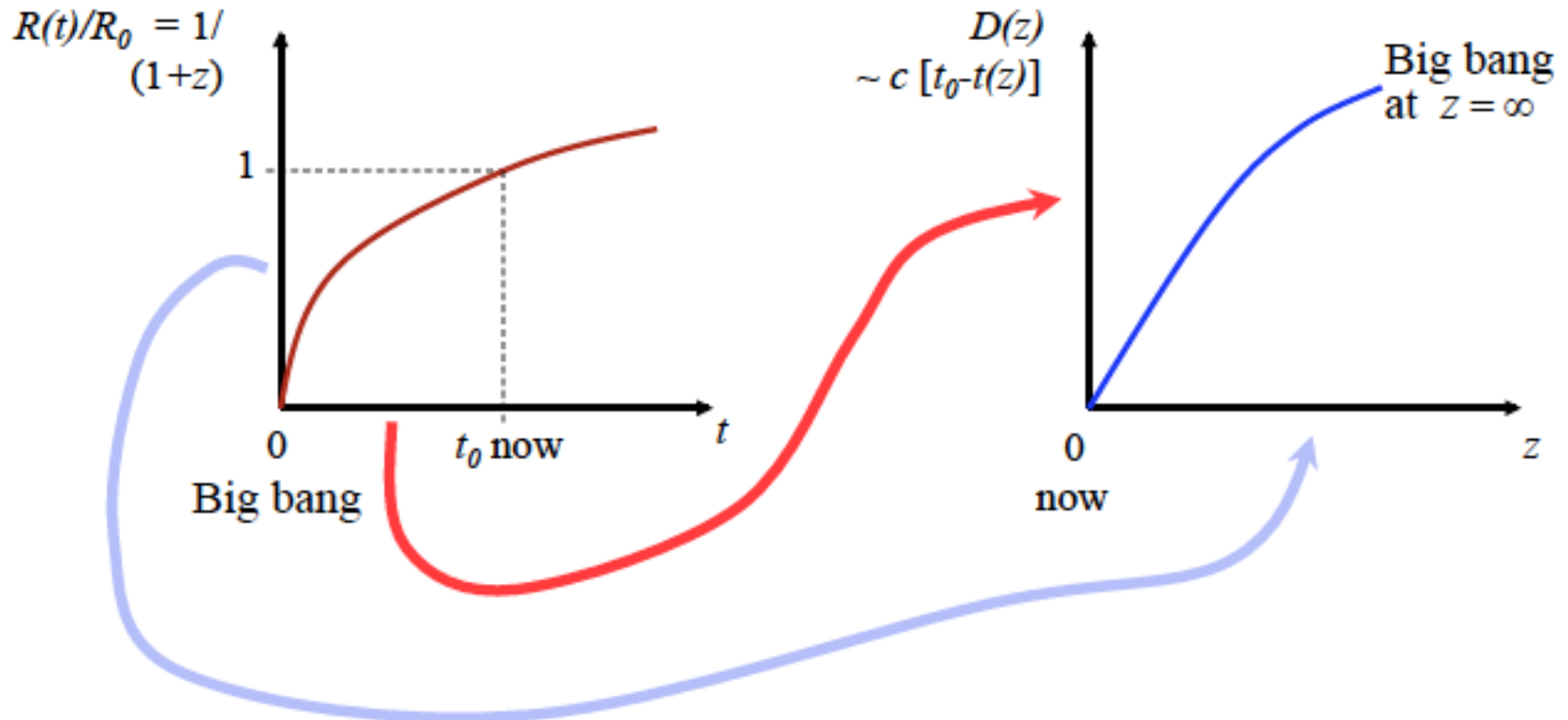
- Ajnštajn (1916) je primenio jednačine OTR na vasionu kao celinu i pretpostavio da je vasiona homogena, izotropna i stacionarna (tzv. **idealni kosmološki princip**) i modifikovao jednačine uvodeći novi član. Ovaj tzv. **λ član ili kosmološka konstanta** je uvedena kao repulzivna sila nepoznatog porekla koja uravnotežava efekte gravitacije

- Fridmanova jednačina (jednačina kretanja)
- **rezultat je $\Rightarrow R(t)$**

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho = -\frac{k}{R^2}$$

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda = -\frac{kc^2}{R^2}$$

Određivanje rastojanja važno!



- Svi kosmološki testovi u suštini porede neku meru (relativnog) rastojanja (ili vreme pre koliko je svetlost krenula *eng. look-back time*) sa crvenim pomakom.

Parametar H_0

- $R(t)$ – kosmički dimenzioni faktor (mera veličine vasiona kao funkcije vremena)

$$H \equiv \frac{\dot{R}}{R}$$

- Hablova konstanta predstavlja sadašnju brzinu širenja vasiona H_0 (ukazuje na starost vasiona)
- Kritična gustina zavisi od vrednosti H_0
- $t=1/H_0$ - Hablovo vreme
 - Što je veća brzina širenja, tj. što je veća vrednost H_0 , vasiona je mlađa, jer je vasioni koja se brže širi potrebno kraće vreme da dostigne današnje dimenzije

Ostali kosmološki parametri

- Ravan svemir: $k=0$ kritična gustina $\rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G}$

- Parametar gustine materije

$$\Omega_M = \frac{\rho}{\rho_{crit}}$$

- Parametar gustine tamne energije

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$$

- q_0 – parametar usporavanja

$$q = -R\ddot{R}/\dot{R} = \frac{\Omega_M}{2} - \Omega_\Lambda$$

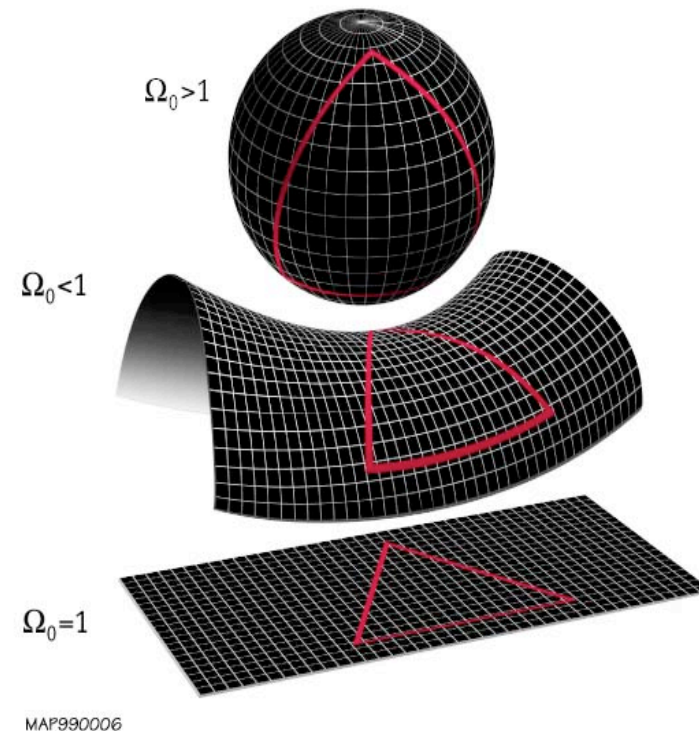
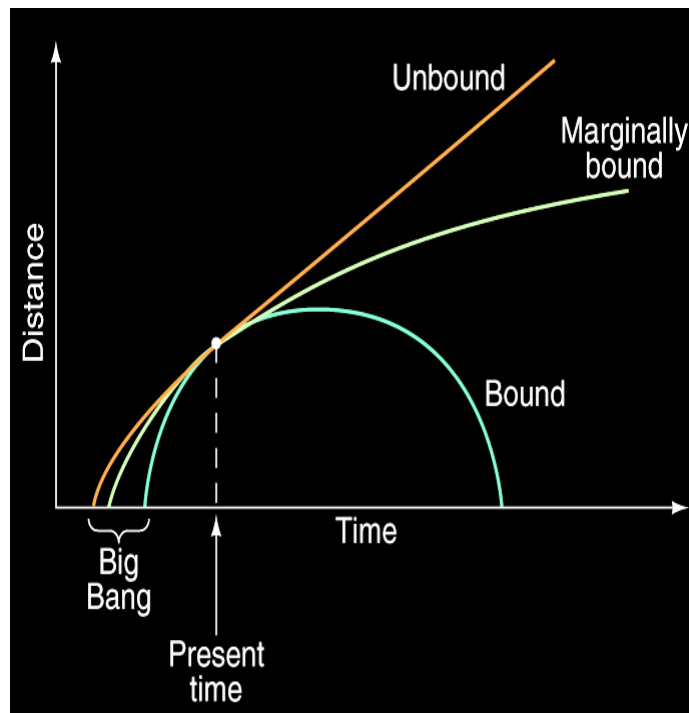
- **Ovi parametri daju oblik krive koja opisuje skalu svemira**

Tri Fridmanova kosmološka modela (1922god):

Otvoreni – Fridman-Lemetrov → širenje počinje iz nulte tačke i nastavlja se u beskonačnost 3- hiperboloid zakrivljen poput površine sedla $k = -1, \Lambda < 1$

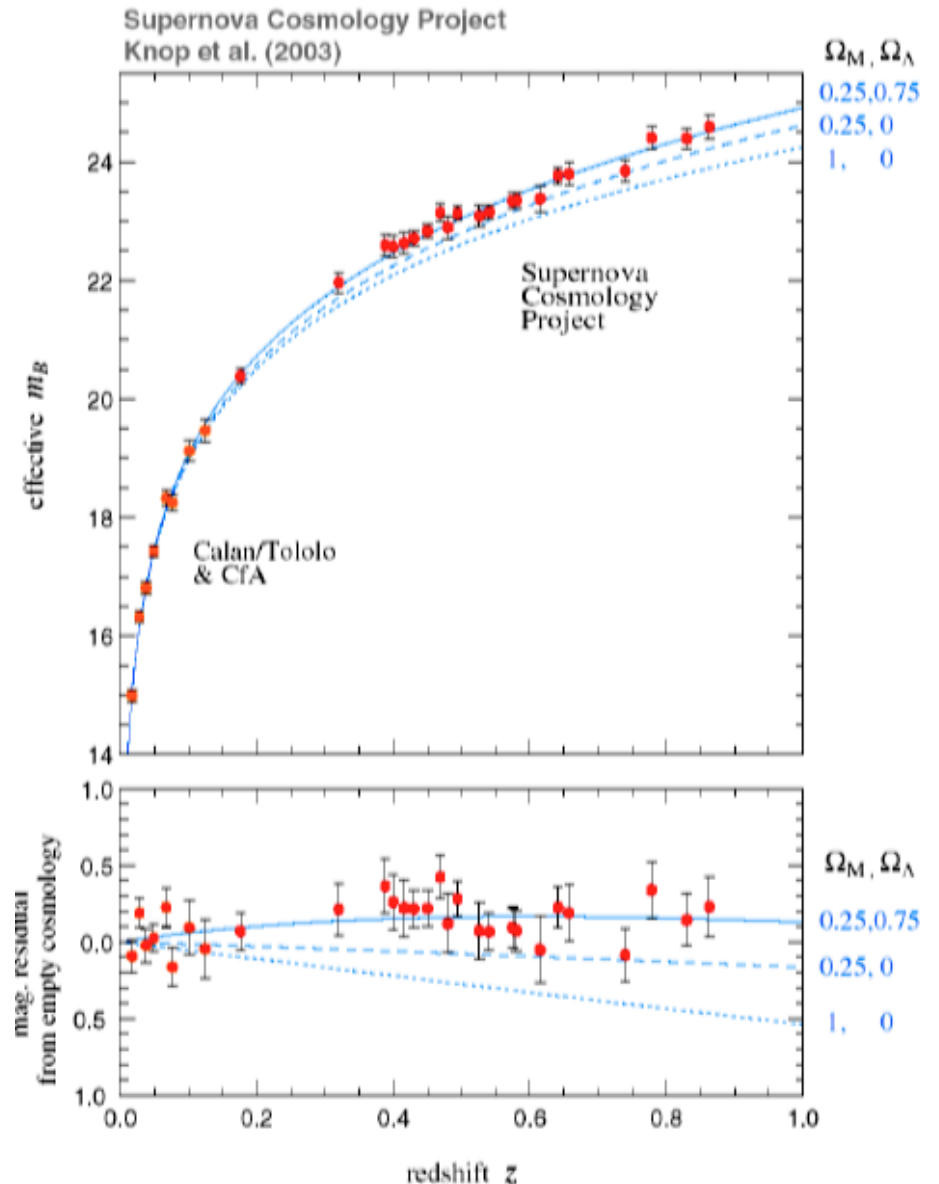
Zatvoreni – Fridman-Lemetrov → širenje se zaustavi u jednom trenutku nakon čega počinje sažimanje, prostor konačan i zakrivljen, sfera $k = +1, \Lambda > 1$

Ravan – Ajnštajn- de Siterov → širenje se nastavlja u beskonačnost, prostor je beskonačan, ali ravan, euklidski $k = 0, \Lambda = 1$



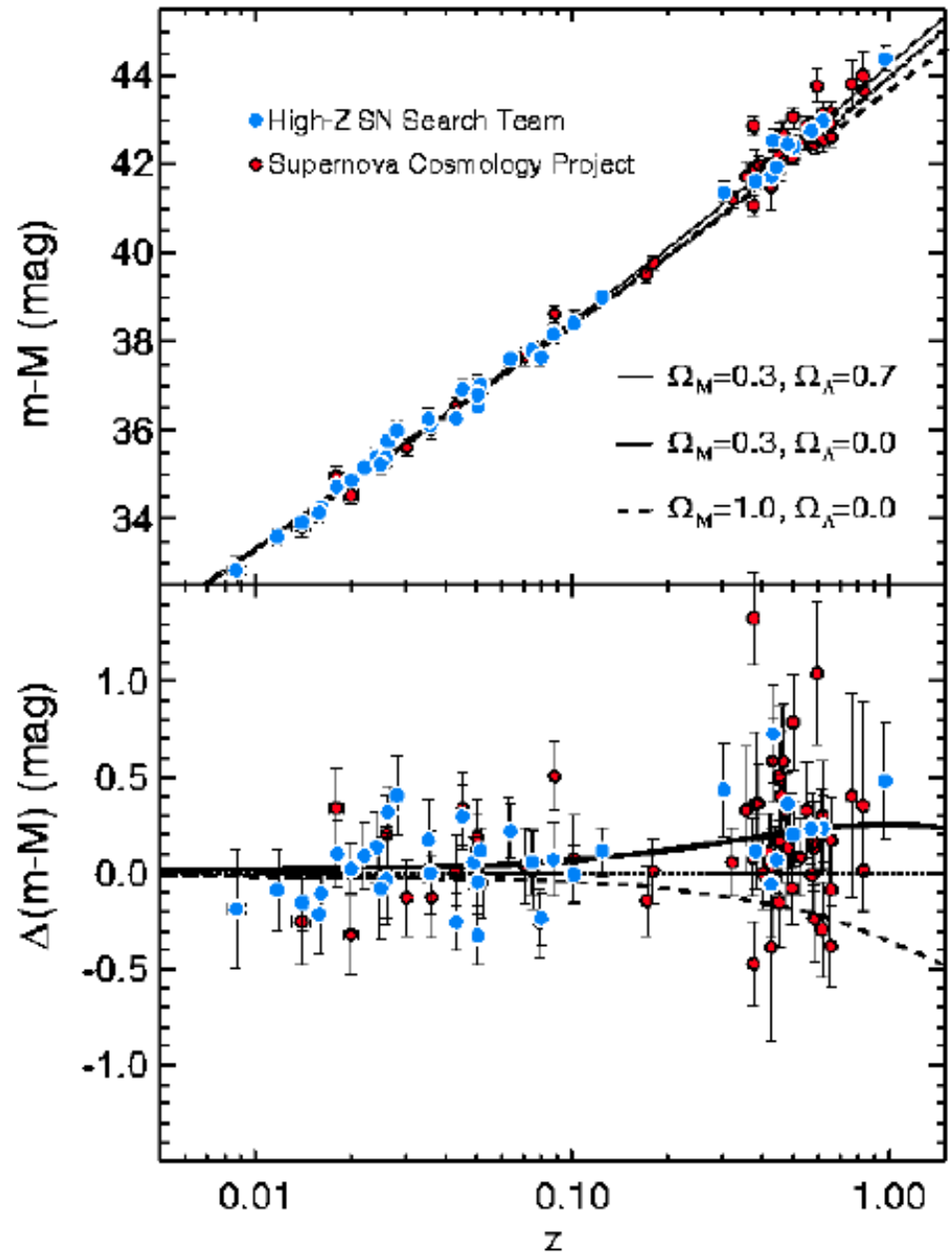
Hablov dijagram za SN Ia

- dokaz za svemir koji se ubrzano širi i za pozitivnu kosmološku konstantu, daju nezavisno i simultano dve grupe:
- The Supernova Cosmology Project, LBL (Perlmutter et al.), i...



Hablov dijagram za SN Ia

- ... i High-Z Supernova Team (B. Schmidt, A. Riess, et al.)
- Oba tima daju veoma slične rezultate ...



Nobelova nagrada 2012.



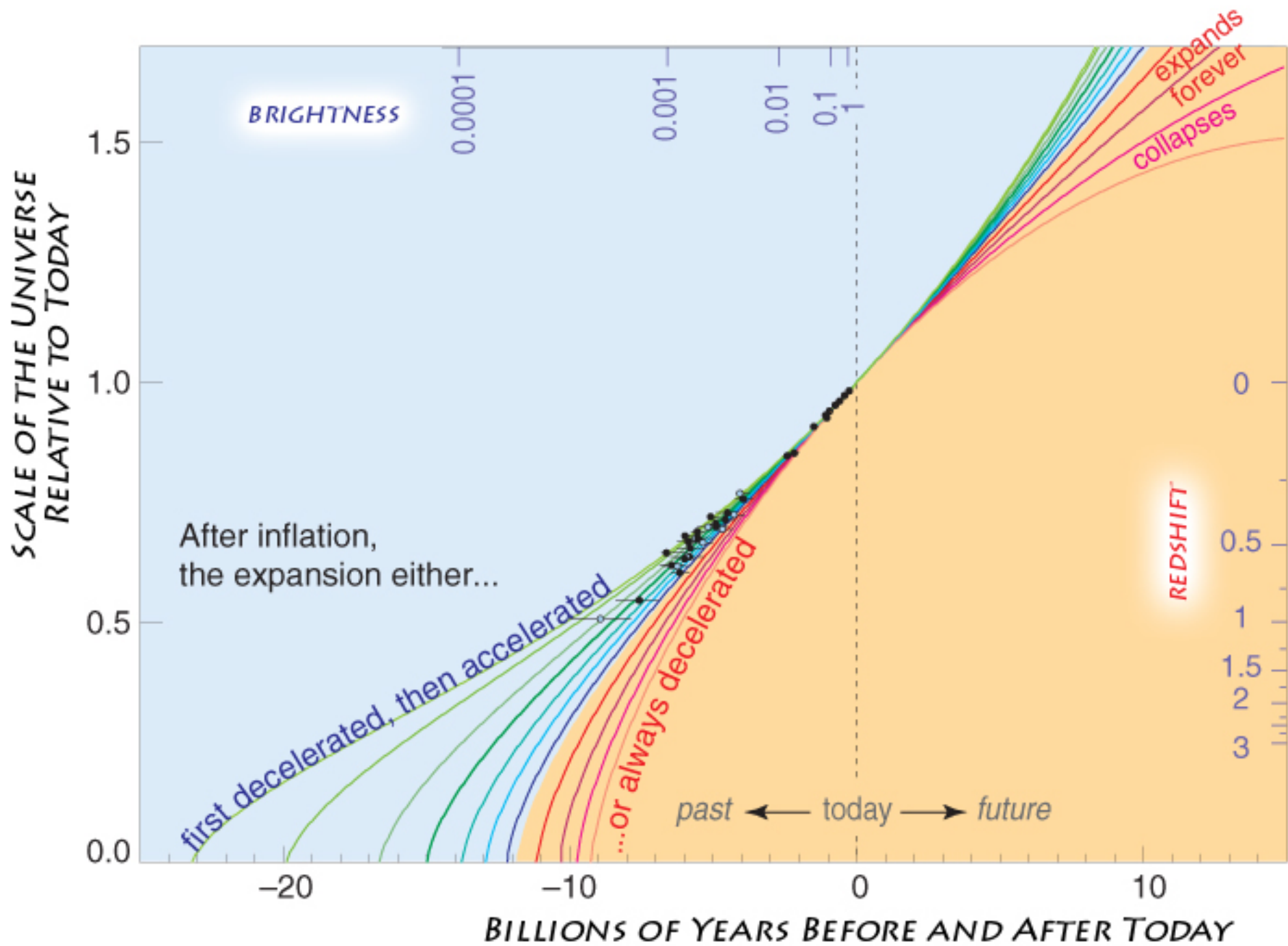
A. Riess



S. Perlmutter



B. Schmidt

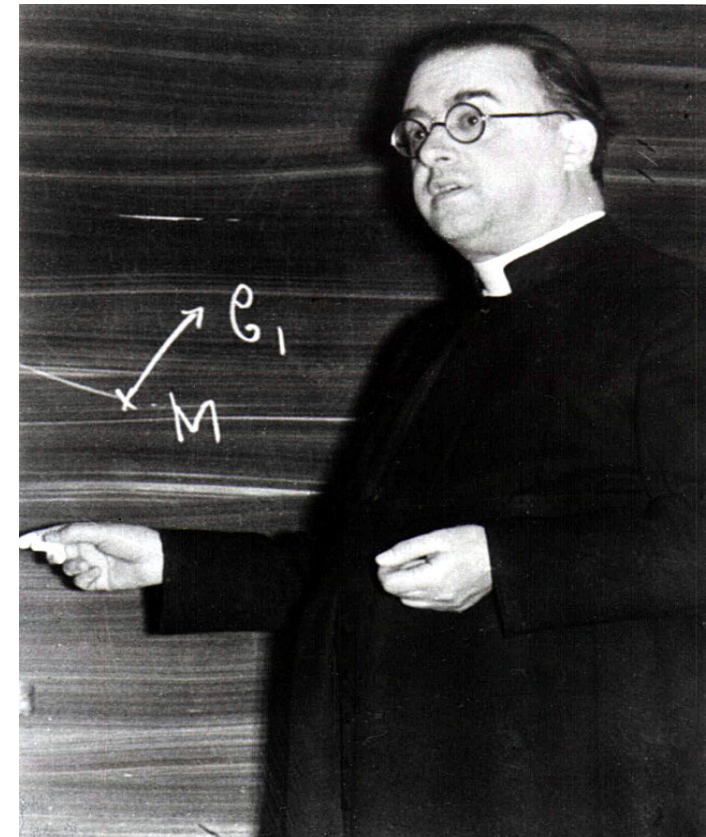


Hablov zakon: Fridmanov rad nije privukao veću pažnju sve dok Hابل nije pokazao da se svemir stvarno širi.

Ako se prihvati kosmološki princip onda bi i hipotetički posmatrač u drugoj galaksiji video da se sve galaksije udaljavaju → vasiona se širi kao celina.

Galaksije u prošlosti bile mnogo bliže → u jednom trenutku sva masa je bila koncentrisana u jednoj tački → nulta tačka Fridmanovog modela → Trenutak koji zovemo **Veliki prasak**.

S druge strane Žorž Lemetr belgijski sveštenik, astronom i profesor fizike nezavisno je od Fridmana predložio teoriju o širenju svemira. Prvi izveo ono što je danas poznato kao Hablov zakon i procenio vrednost konstante H_0 i to je publikovao dve godine pre Habla. Predložio je ono što je danas poznato kao teorija Velikog praska o poreklu univerzuma, koju je nazvao **Hipoteza o iskonskom atomu** ili “kosmičkom jajetu”.



Velika eksplozija (Big Bang)

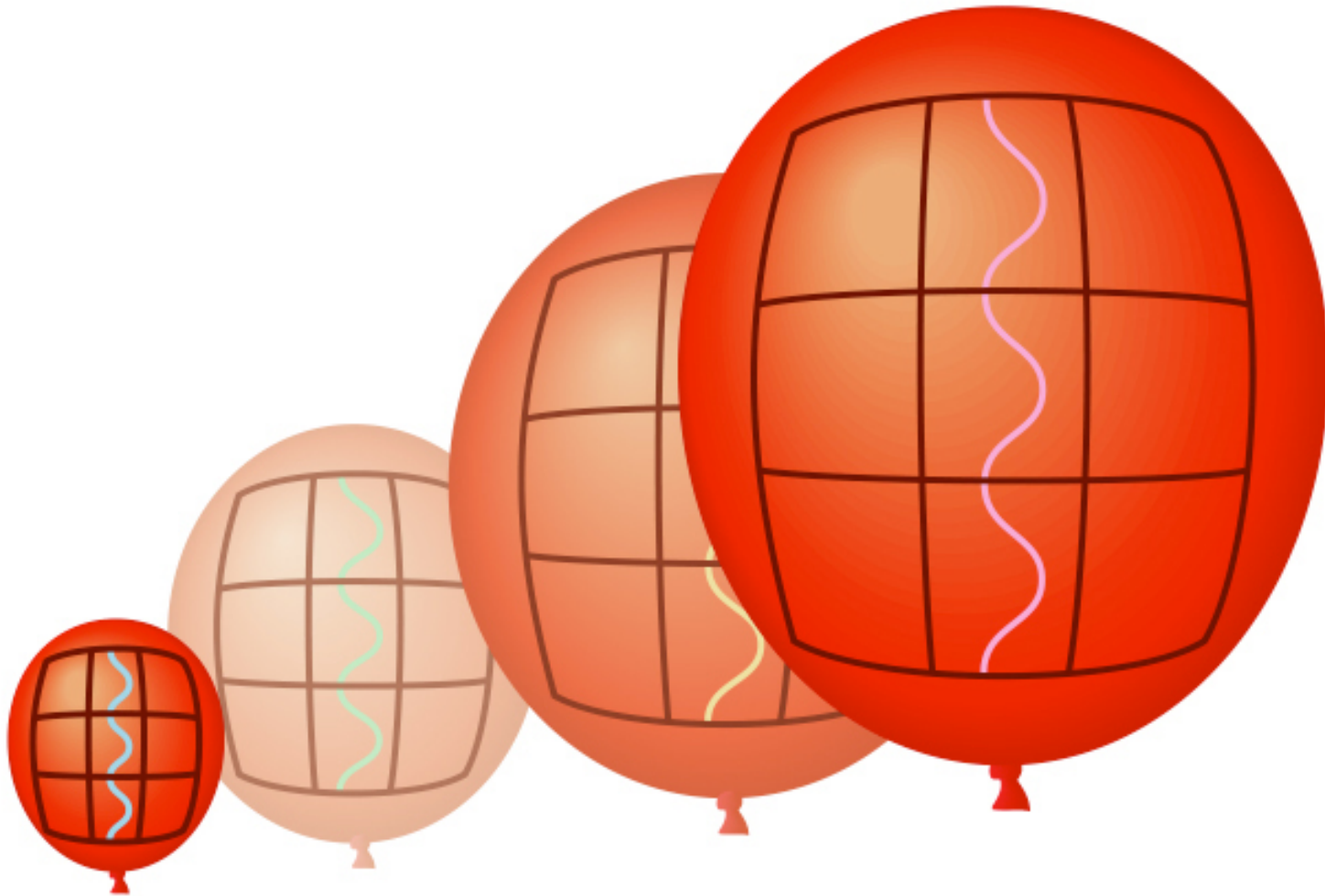
Kosmološki model u kome su sva materija i zračenje u vasioni (kao i sam prostor) nastali u eksploziji u određenom trenutku u prošlosti

Ova teorija je veoma uspešna u objašnjenju:

- širenja vasiona
- mikrotalasnog pozadinskog zračenja
- zastupljenosti helijuma u vasioni

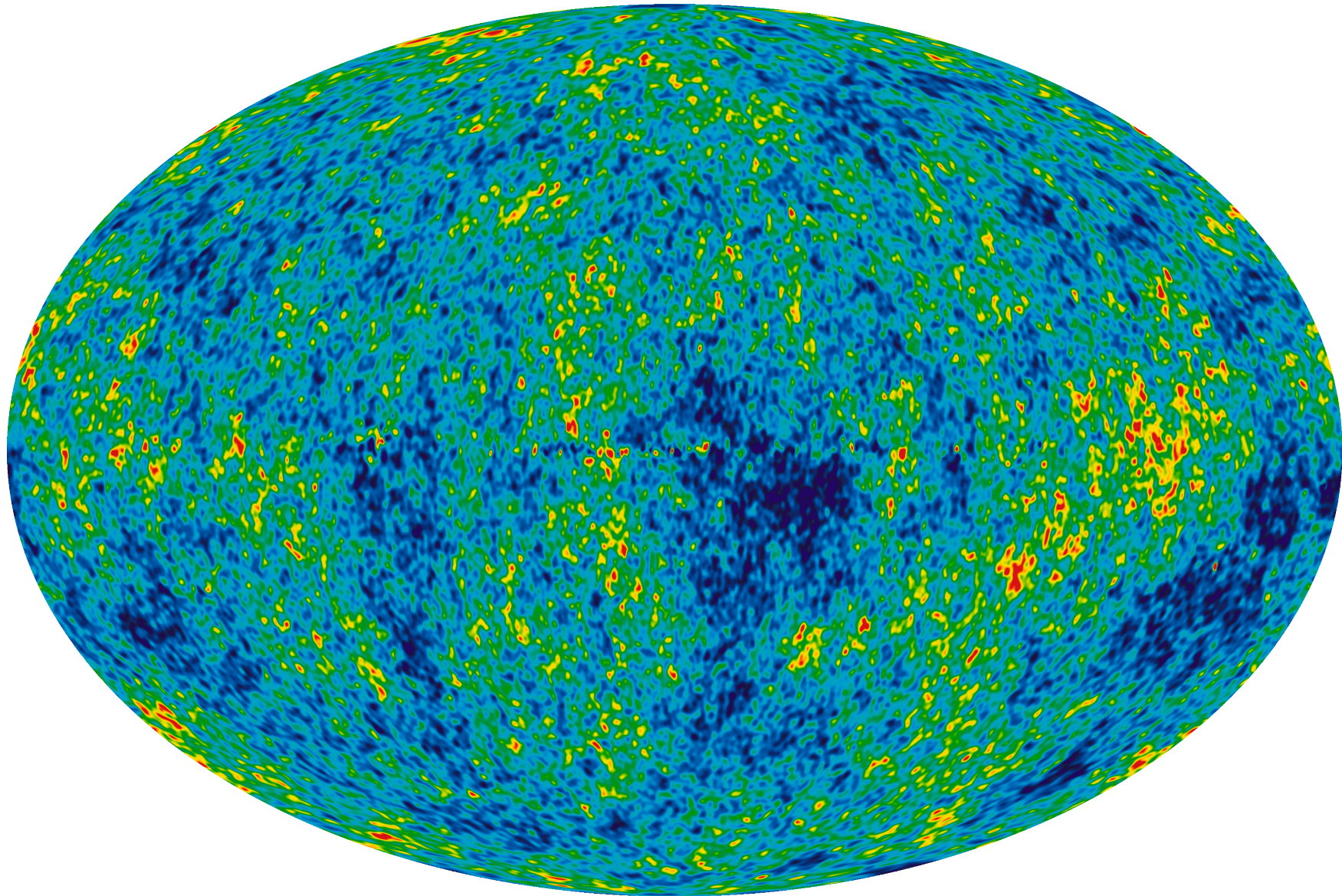
U pokušaju da objasni posmatranu zastupljenost elemenata kosmološkom nukleosinteziom → vrela velika eksplozija (hot Big bang), **Džordž Gamov** (1948). Predvideo je i postojanje kosmičkog pozadinskog zračenja 'sazdanog od drevnih fotona oslobođenih prilikom velikog praska'.

Kosmološki crveni pomak



Copyright © Addison Wesley

Reliktno (pozadinsko) zračenje



Mikrotalasno pozadinsko zračenje

-1965. **Penzias i Wilson** (Bell laboratorije) na $\lambda = 7.35$ cm otkrili neočekivani radio-sjaj pozadine neba (mikrotalasna antena je bila namenjena satelitskoj komunikaciji). Intenzitet zračenja odgovarao je zračenju apsolutno crnog tela $T \sim 3K$.



- merenja intenziteta ovog zračenja i na ostalim talasnim dužinama sa Zemlje i sa satelita (COBE, 1989)
- COBE je potvrdio izotropnost fluksa zračenja i termalni spektar sa maksimumom na oko 1mm – spektar zračenja crnog tela sa

$$T = 2.735 \pm 0.06 \text{ K}$$

Merenja su potvrdila kosmološko poreklo ovog zračenja, tj. da **mikrotalasno reliktno zračenje potiče od zračenja koje se oslobađalo na $T \sim 3000K$ pri rekombinaciji elektrona i protona u H-atome.**

Izotropnost mikrotalasnog reliktnog zračenja ukazuje na homogenost rane vasionne.

- Dobitnici polovine Nobelove nagrade 1978. god



The Nobel Prize in Physics 1978

Pyotr Kapitsa, Arno Penzias, Robert Woodrow Wilson

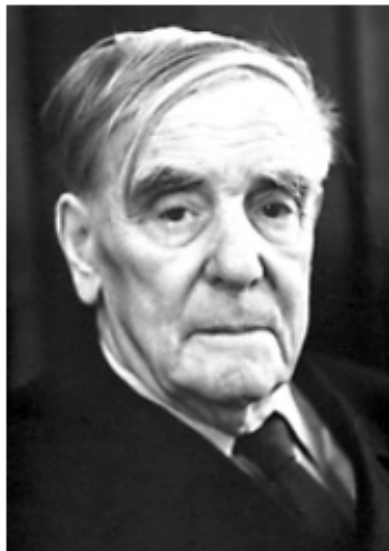
The Nobel Prize in Physics 1978

Nobel Prize Award Ceremony

Pyotr Kapitsa

Arno Penzias

Robert Woodrow Wilson



Pyotr Leonidovich
Kapitsa



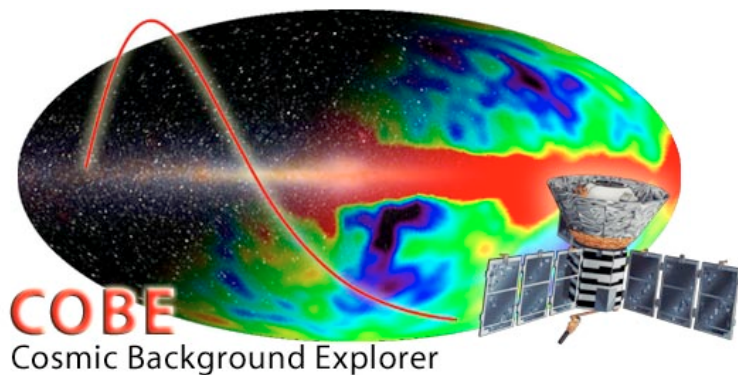
Arno Allan Penzias



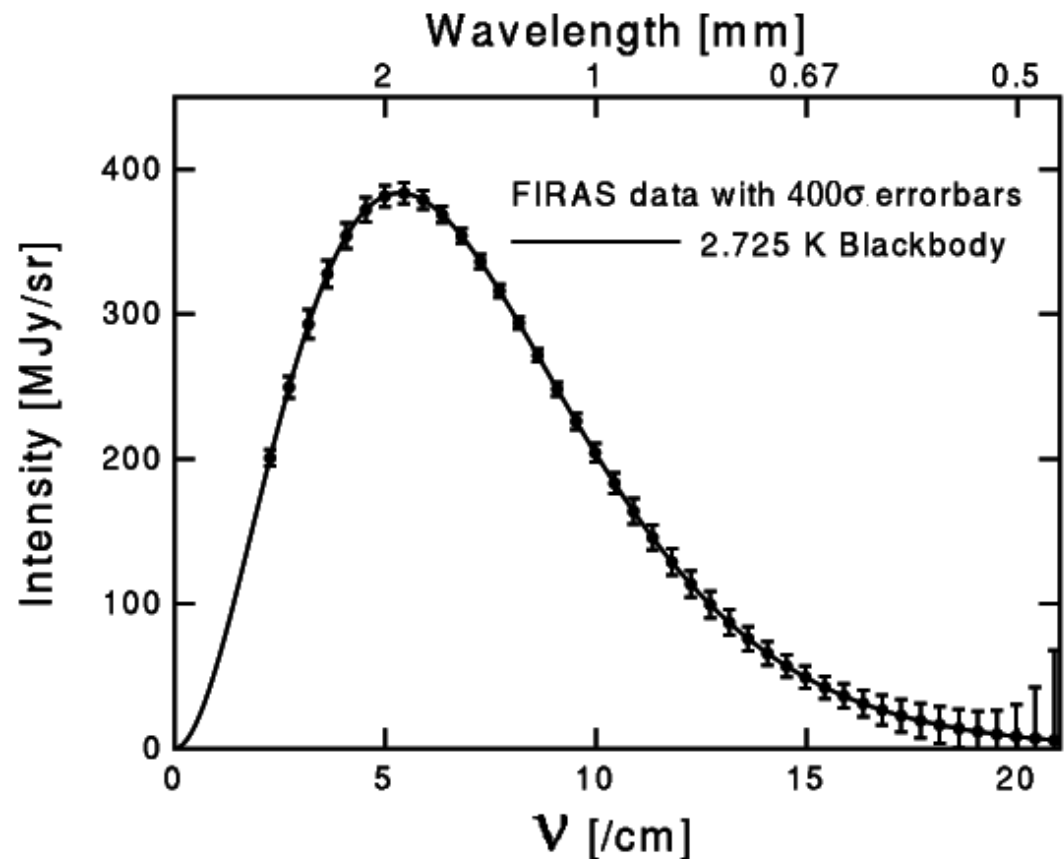
Robert Woodrow
Wilson

The Nobel Prize in Physics 1978 was divided, one half awarded to Pyotr Leonidovich Kapitsa *"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"*, the other half jointly to Arno Allan Penzias and Robert Woodrow Wilson *"for their discovery of cosmic microwave background radiation"*.

- Zračenje se hladilo od $T \sim 3000\text{K}$ do današnja 3K (mikrotalasno pozadinsko zračenje), a materija je u interakcijama formirala zvezde i galaksije.
- Potvrda modela velikog praska.

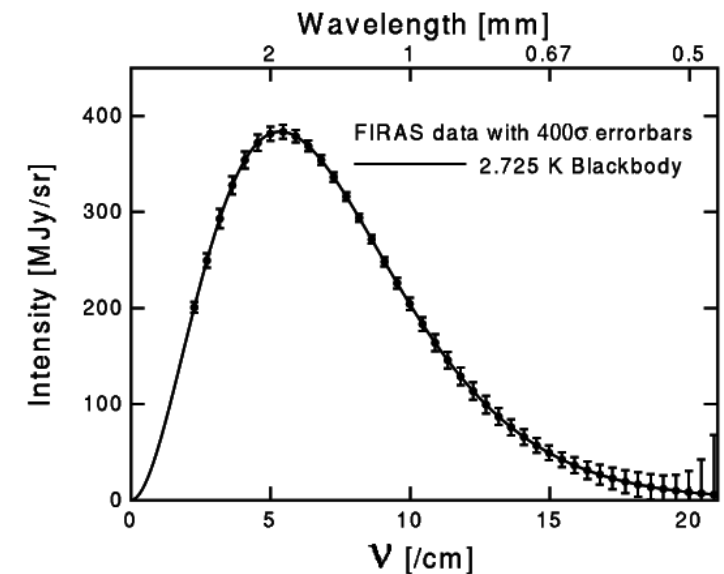
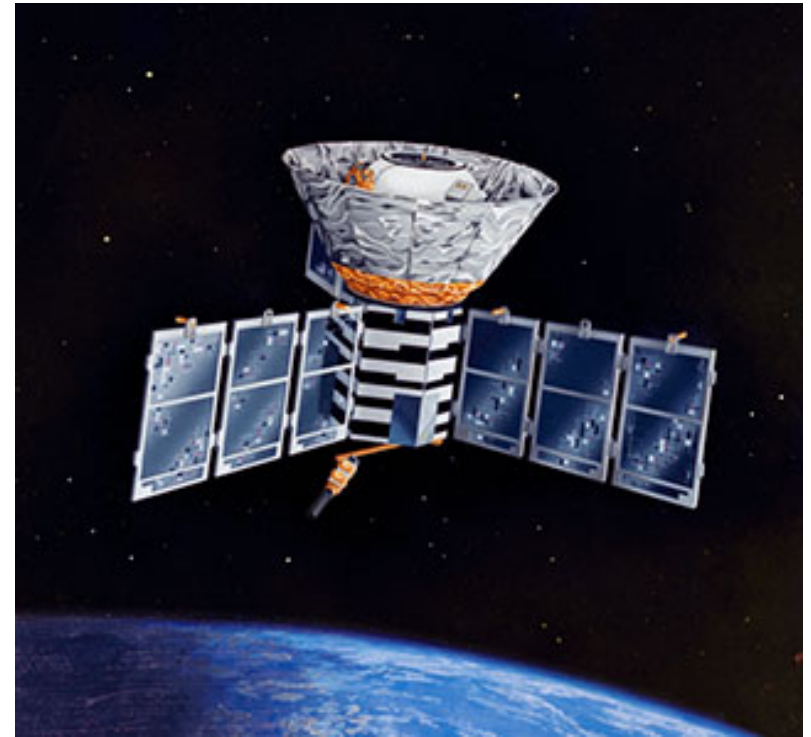


Merenje mikrotalasnog pozadinskog zračenja satelitom COBE



COBE satelit

- COBE meri od $1\mu\text{m}$ do 1cm
- lansiran 1989. god
- $T=2.725 \pm 0.002 \text{ K}$
(Mather et al. 1999)
- odstupanje od 0.03%:
među najpreciznijim
eksperimentima u
astronomiji



Nobelova nagrada za fiziku 2006.



The Nobel Prize in Physics 2006
John C. Mather, George F. Smoot

The Nobel Prize in Physics 2006

Nobel Prize Award Ceremony

John C. Mather

George F. Smoot



Photo: P. Izzo

John C. Mather

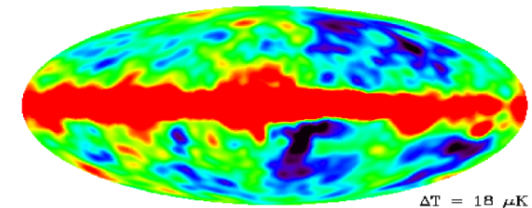
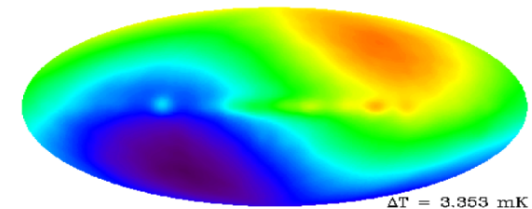
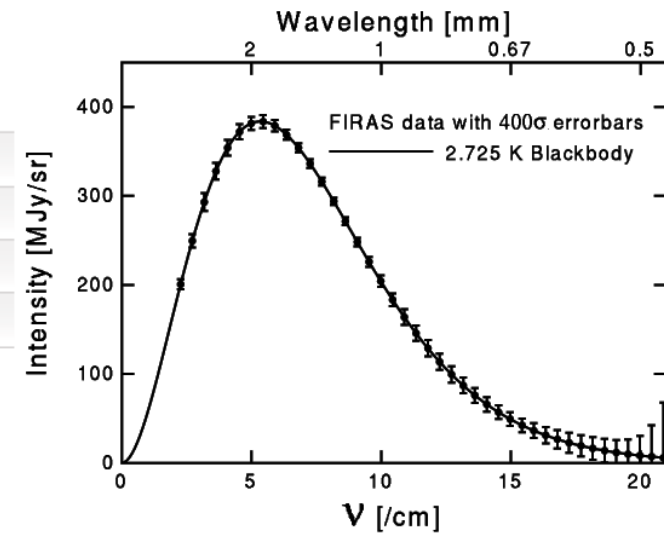


Photo: J. Bauer

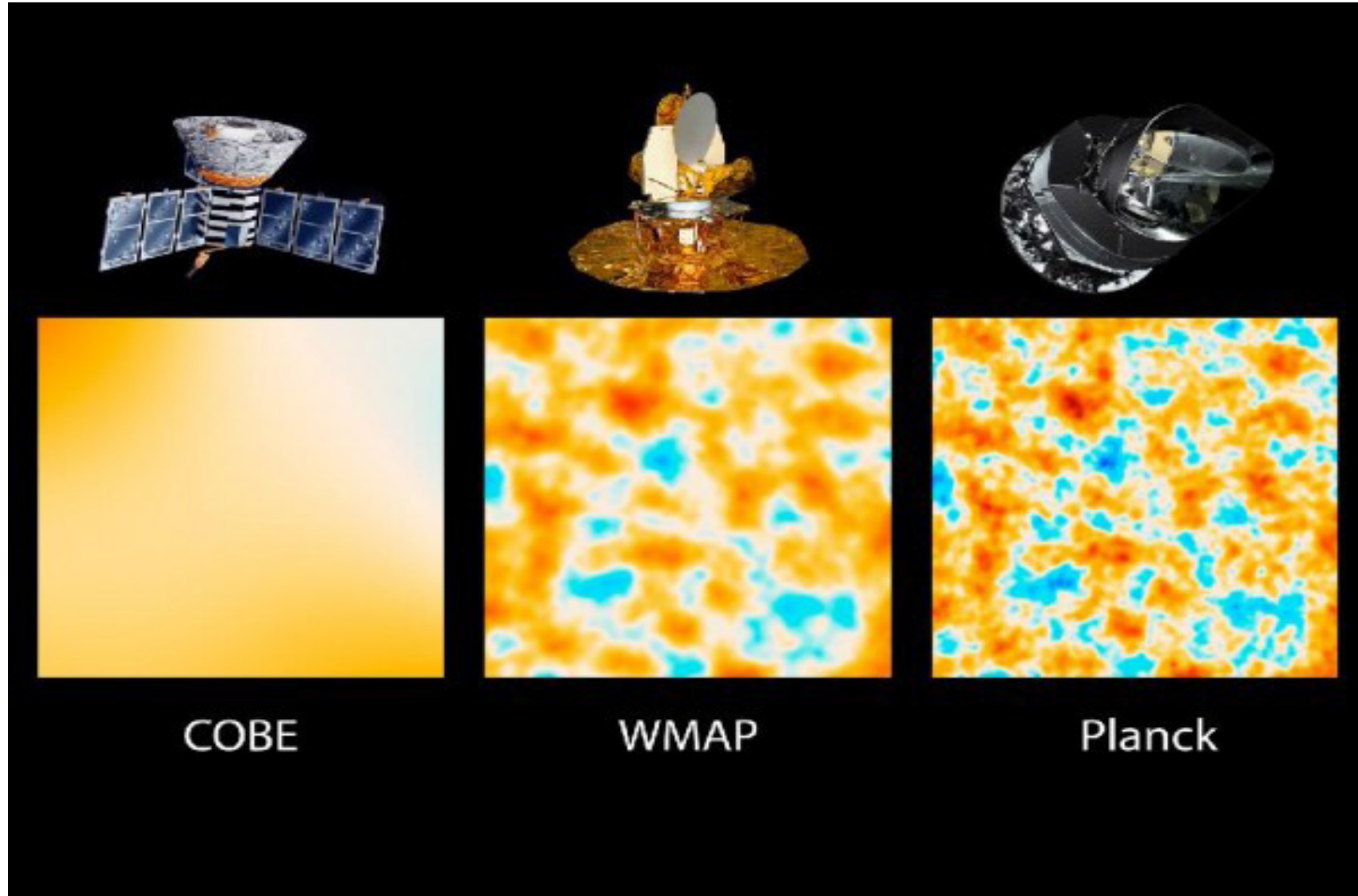
George F. Smoot

The Nobel Prize in Physics 2006 was awarded jointly to John C. Mather and George F. Smoot "for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"

Photos: Copyright © The Nobel Foundation



Sateliti za detekciju CMBR

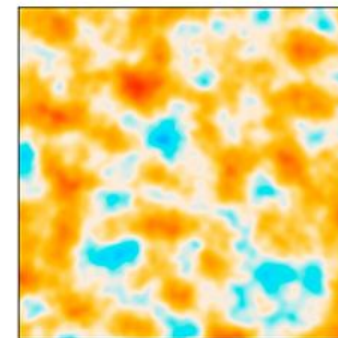
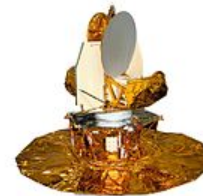


Najnoviji rezultati Plank satelita

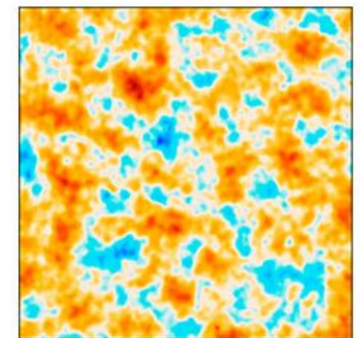
- 21. marta 2013. je objavljena mapa mikrotalasnog pozadinskog zračenja, koja ukazuje na to da je svemir nešto malo stariji nego što se ranije mislilo
- Svemir je star 13.798 ± 0.037 milijardi godina
- Sadrži: 4.9% poznate (barionske) materije, 26.8% tamne materije i 68.3% tamne energije
- Hablova konstanta:
 67.80 ± 0.77 (km/s)/Mpc



COBE



WMAP



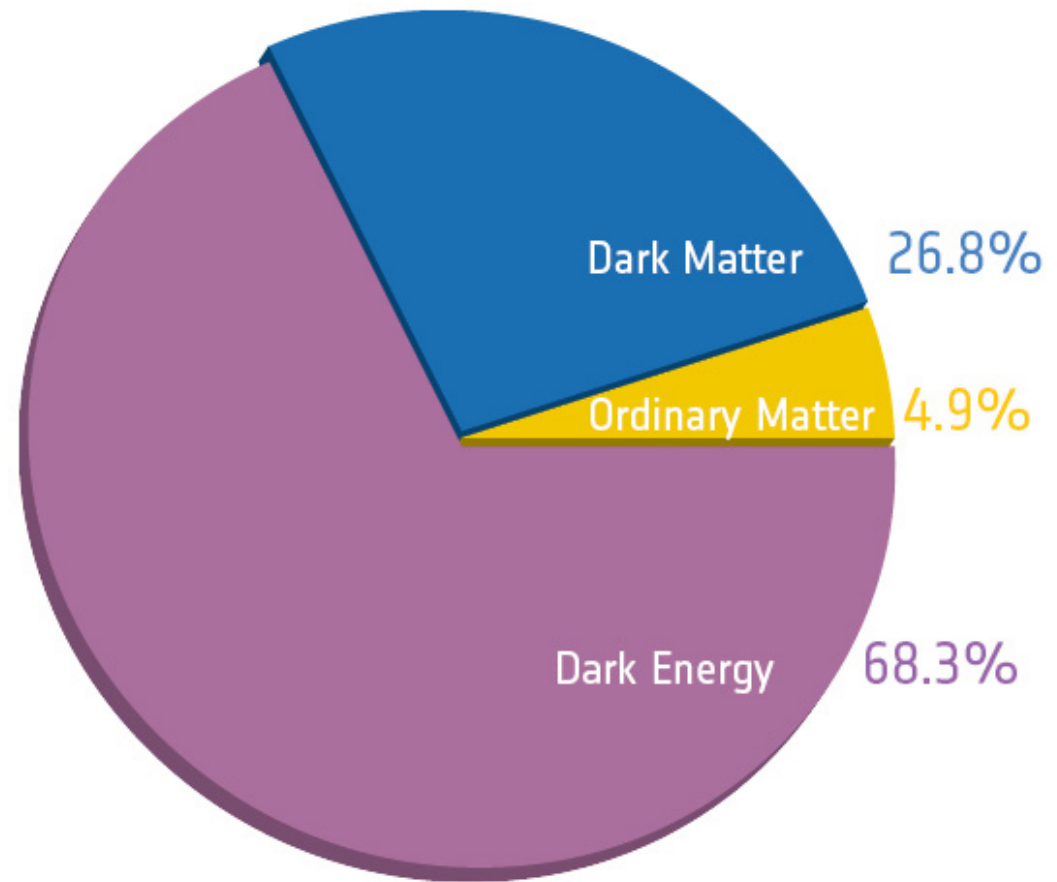
Planck

Sastav vasione

4.9% barionske
(poznate) materije

26.8% tamne
(nepoznate) materije

68.3% tamne energije
(kosmološka konstanta)



THE BIG BANG THEORY



Time	10^{-43} sec.	10^{-32} sec.	10^{-6} sec.	3 min.	300,000 yrs.	1 billion yrs.	15 billion yrs.
Temperature		10^{27} °C	10^{13} °C	10^8 °C	$10,000$ °C	-200° C	-270° C

1 The cosmos goes through a superfast "inflation," expanding from the size of an atom to that of a grapefruit in a tiny fraction of a second

2 Post-inflation, the universe is a seething, hot soup of electrons, quarks and other particles

3 A rapidly cooling cosmos permits quarks to clump into protons and neutrons

4 Still too hot to form into atoms, charged electrons and protons prevent light from shining; the universe is a superhot fog

5 Electrons combine with protons and neutrons to form atoms, mostly hydrogen and helium. Light can finally shine

6 Gravity makes hydrogen and helium gas coalesce to form the giant clouds that will become galaxies; smaller clumps of gas collapse to form the first stars

7 As galaxies cluster together under gravity, the first stars die and spew heavy elements into space; these will eventually form into new stars and planets

NOTE: The numbers in cosmology are so great and the numbers in subatomic physics are so small that it is often necessary to express them in exponential form. Ten multiplied by itself, or 100, is written as 10^2 . One thousand is written as 10^3 . Similarly, one-tenth is 10^{-1} , and one-hundredth is 10^{-2} .

Source: *The Birth of the Universe*; *The Kingfisher Young People's Book of Space* TIME Graphic by Ed Gabel

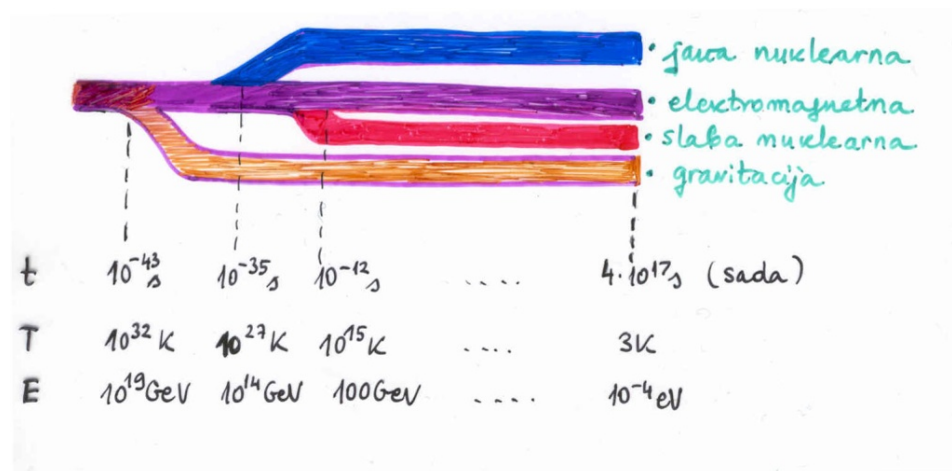
Postoje 4 interakcije medju elementarnim česticama

- 1) **Jaka** (izmedju kvarkova i hadrona)
- 2) **Elektromagnetna** (izmedju elektrona i protona)
- 3) **Slaba** (izmedju leptona i hadrona)
- 4) **Gravitacija** (izmedju svih čestica)

60-ih godina XX veka – elektroslaba teorija objedinjuje elektromagnetnu i slabu silu

Nekoliko teorija unifikacije objedinjuje jaku, elektromagnetnu i slabu silu

Simetrija koja povezuje jednu silu sa drugom važi samo kada je $T > 10^{27} \text{K}$ što se može pojaviti samo u ranoj vasioni neposredno posle Big Banga (značaj ovih teorija za kosmologiju)

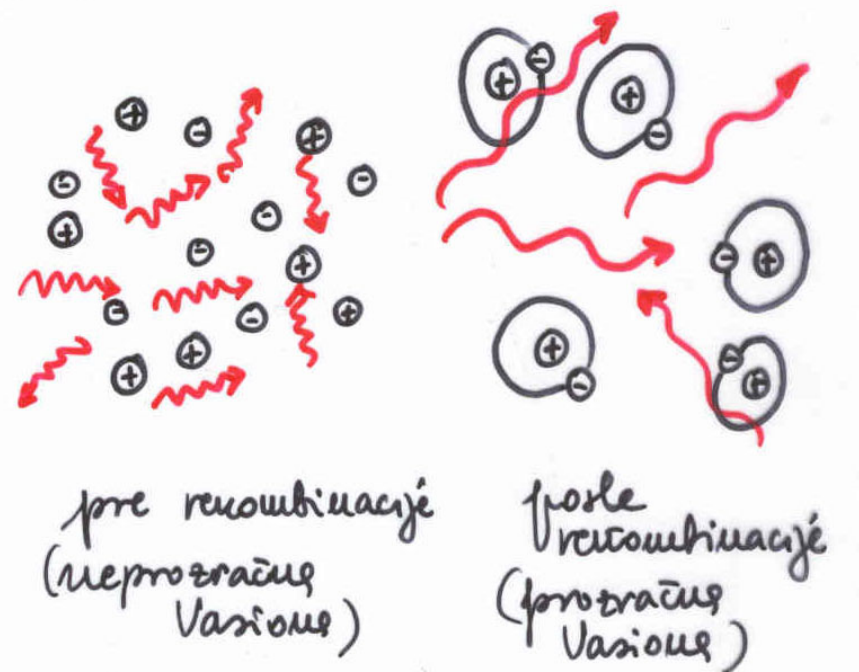
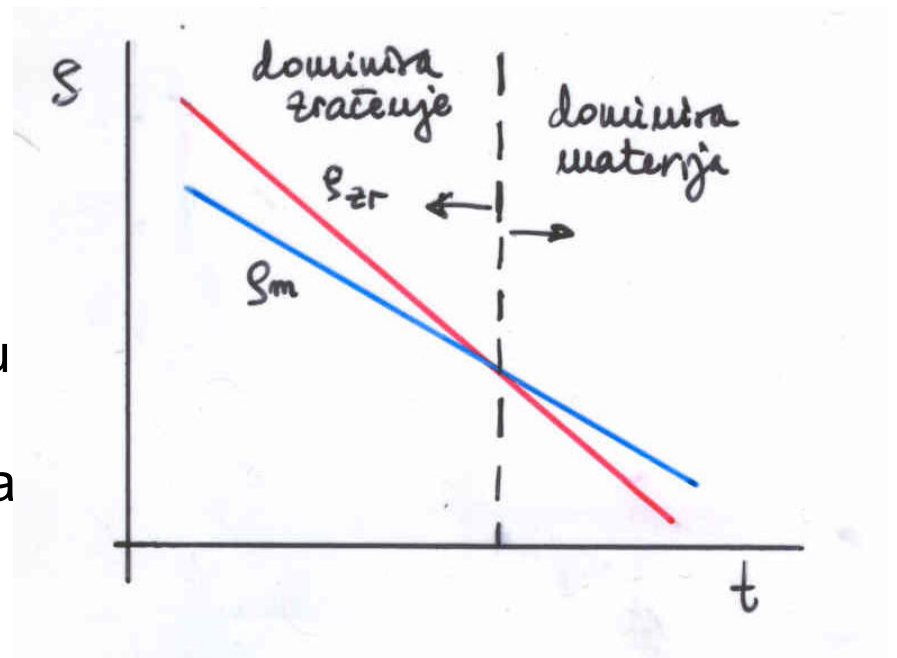


razdvajanje sila

- Vasiona je nastala pre ~13.8 milijardi godina u velikoj eksploziji i od tada se širi i hladi od početnog stanja ekstremne gustine i temperature.
- $t < 10^{-43}$ s (Plankovo vreme)
- $t \sim 10^{-35}$ s teorije elementarnih čestica: vasiona se sastojala od jednake količine materije i antimaterije, elektrona i pozitrona, neutrina i antineutrina, kvarkova i antikvarkova (asimetrični raspad hipotetičkih čestica doveo je do dominacije materije u vasioni).
- Širenjem se vasiona hladila, a temperatura je određivala vrste reakcija među česticama
- Kvarkovi koji su preživeli anihilaciju formirali su neutrone i protone
- Oko 100s posle Big banga – sinteza deuterona i jezgra helijuma ($T \sim 10^9$ K) oko 25% He (primordijalni helijum)

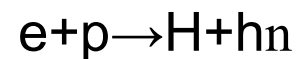
Širenjem vasionne gustina materije je opadala kao R^{-3} , a gustina zračenja kao R^{-4} .

Zračenje nastalo u anihilacijama materije i antimaterije je u ranoj vasioni dominiralo: **era zračenja**. Širenjem, zračenje je gubilo energiju (kosmološki crveni pomak). Gustina energije zračenja opada brže nego gustina materije, pa na $T < 10000\text{K}$: **era materije** (e, p, He)

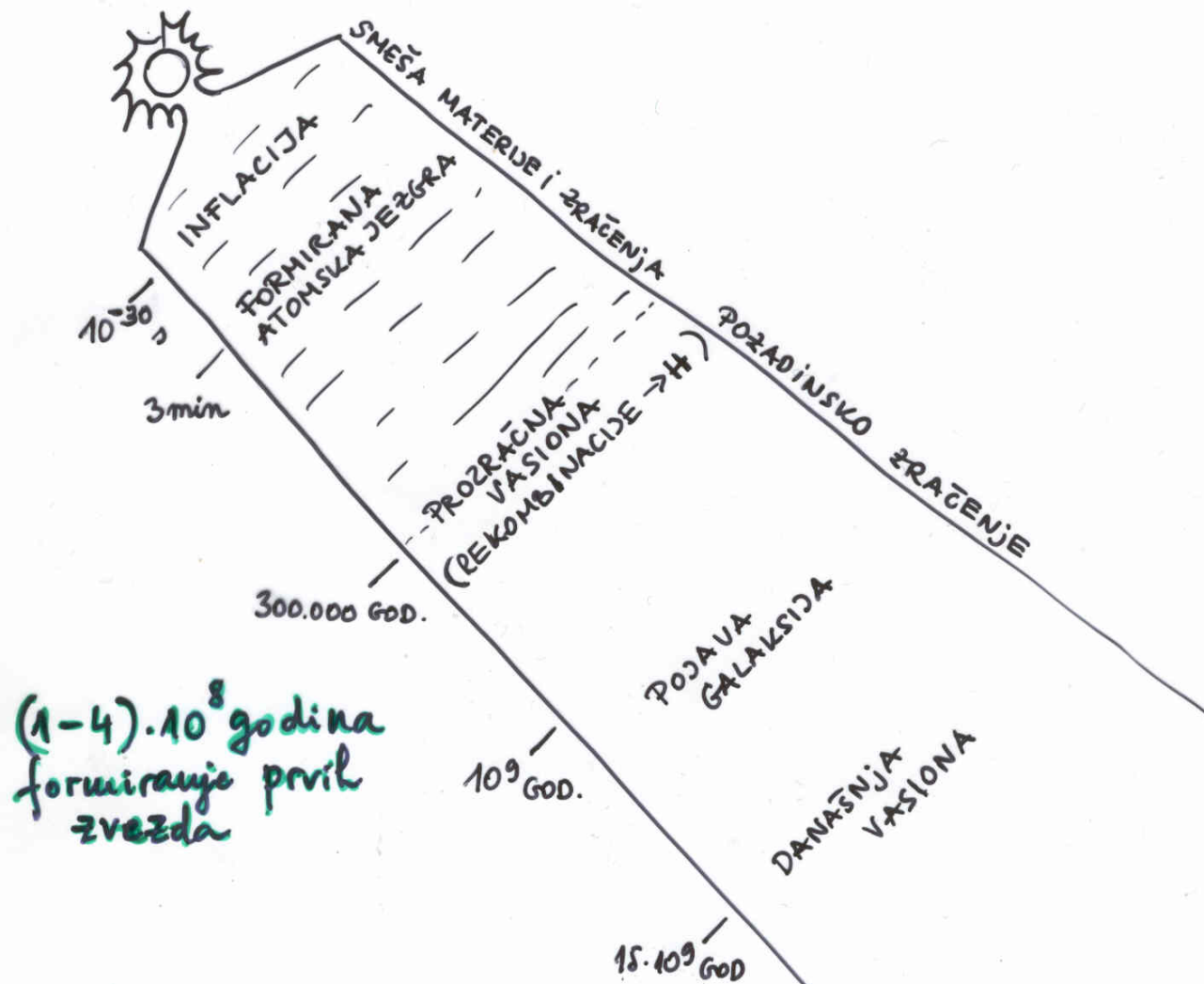


Na $T > 3000\text{K}$ materija i zračenje su bili u TDR, fotoni su se rasejavali na elektronima.

Na $T \sim 3000\text{K}$ (300 000 godina posle Velikog praska) - **rekombinacija** protona i elektrona (stvaranje vodonikovih atoma)



Fotoni su počeli da se kreću slobodno → **vasiona je postala transparentna**



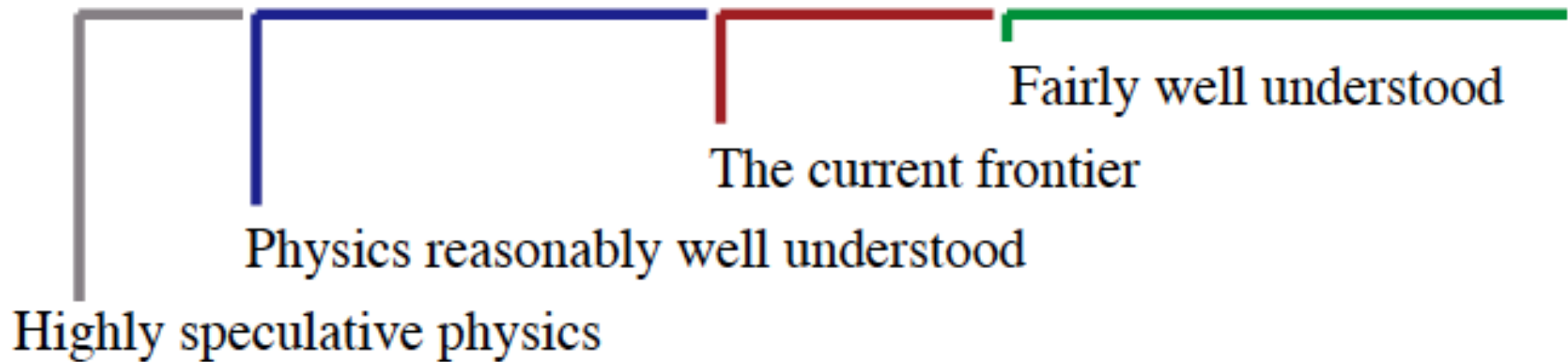
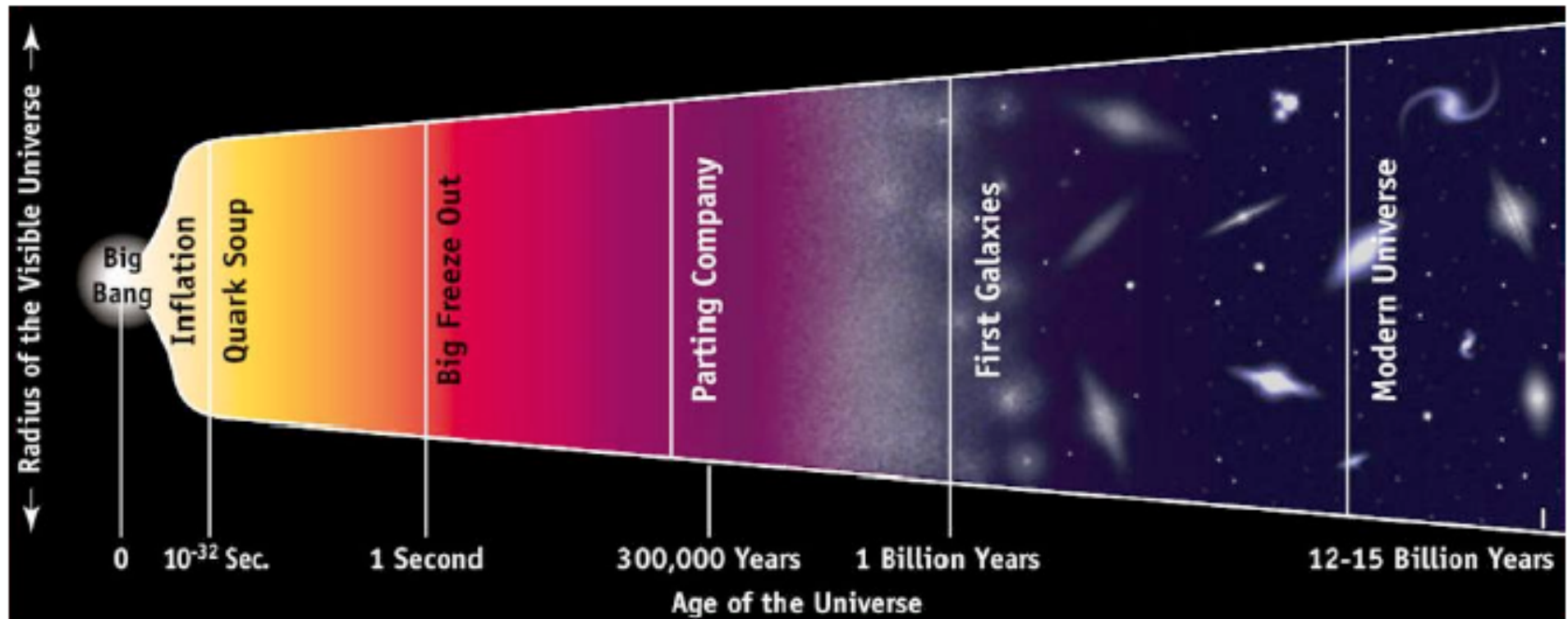
Starost vasione (Maj 2003)

$(13.7 \pm 0.2) \cdot 10^9$ godina



Based on $\Omega=0.3$, $H_0=72$

Evolucija kosmosa



The Universe in a Day

Event	When it happened
Big Bang	12:00:00 midnight
First Atoms form	12:00:08 a.m.
Stars and Galaxies form	12:29:00 a.m.
Our Sun is born	4:00:00 p.m.
Earth born	4:38:00 p.m.
Moon formed	4:48:00 p.m.
Earliest life on Earth	5:55:00 p.m.
First multi-cellular life on Earth	10:53:00 p.m.
Dinosaurs appear	11:41:00 p.m.
Dinosaurs die	11:54:00 p.m.
Humans arise	11:59:56 p.m.
Present Day	12:00:00 midnight tomorrow
Sun becomes Red Giant	8:00:00 a.m. tomorrow
Sun becomes White Dwarf	8:19:00 a.m. tomorrow

Standardni model širenja vasiona nije
dao odgovore na niz pitanja:

Kako je nastala vasiona?

Zašto materija dominira nad antimaterijom?

Kako nastaju galaksije?

Koliko dimenzija ima vasiona?

Šta je tamna materija?

Šta je tamna energija?

Kakva je sudbina vasiona?

- **SUPERNOVAE Cosmology Project**
 - <http://supernova.lbl.gov/>
- **Planck misija**
 - http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck
- **WMAP projekat**
 - <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- **COBE misija**
 - <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>
- **Pregledni naucni clanak o status kosmologije**
 - Frieman, Joshua A.; Turner, Michael S.; Huterer, Dragan 2008ARA&A, 46, 385F
 - “Dark Energy and the Accelerating Universe” <http://arxiv.org/abs/0803.0982>
- **Predavanje o tamnoj energiji na Seminaru Katedre za astronomiju**
 - <http://poincare.matf.bg.ac.rs/katedre/astronomija/beta/lat/sci/seminar/milan.bozic.102.pdf>
- **Interesantni informativni clanci o Supernova projektu**
 - <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/sabl/2007/Nov/darkenergy1.html>
 - <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/sabl/2007/Nov/darkenergy2.html>