

Kozmologija

Uvod

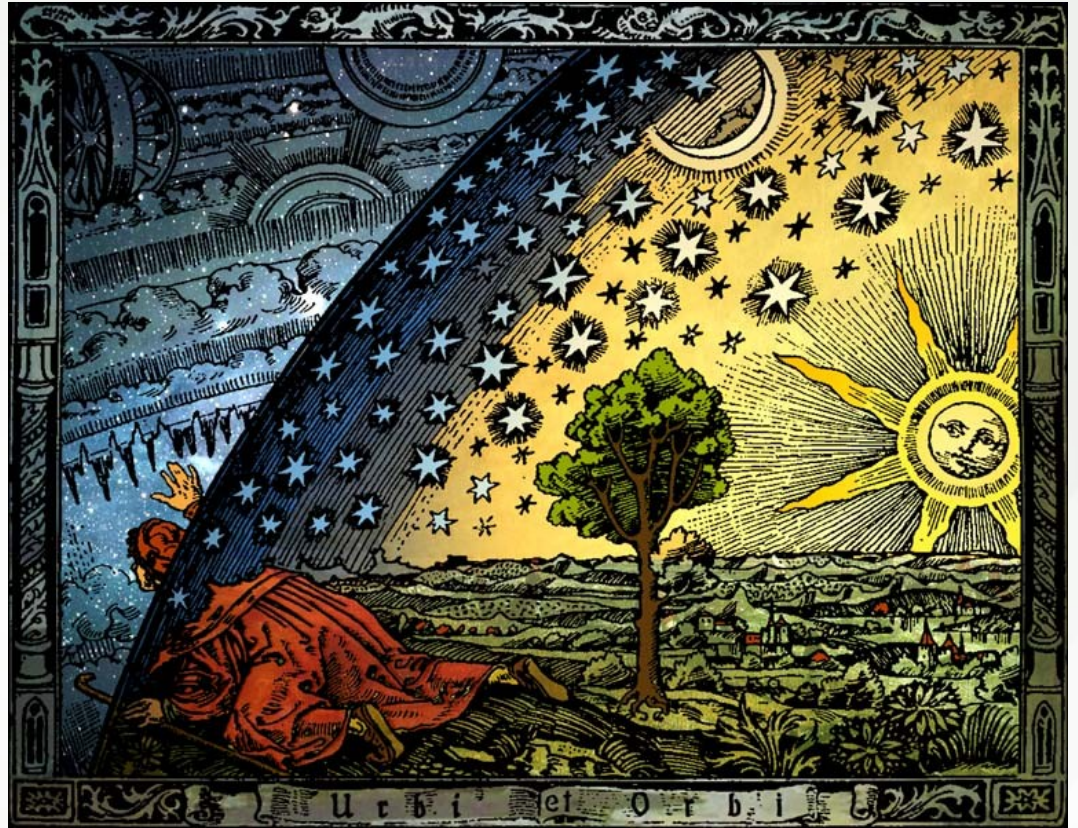
Viri: Jones, Lambourne (Chap. 5)

originalne prosojnice prof. Gomboc, dopolnitve in spremembe D. Fabjan

Kozmologija

veda o vesolju:

- sestava vesolja?
 - struktura?
 - izvor?
 - razvoj?
 - končna usoda?
-
- religiozna/filozofska vprašanja -> znanstvena
 - fizika zelo majhnega + zelo velikega



Empedocles Breaks through the Crystal Spheres (engraving by unknown artist) from a book by Camille Flammarion (1888) with the caption: "A missionary of the Middle Ages tells that he had found the point where the sky and the Earth touch..." Image: Wikimedia Commons

Kopernikanski princip

- nimamo posebnega položaja v vesolju

Kopernikanski princip

- nimamo posebnega položaja v vesolju

Kaj vemo o vesolju?

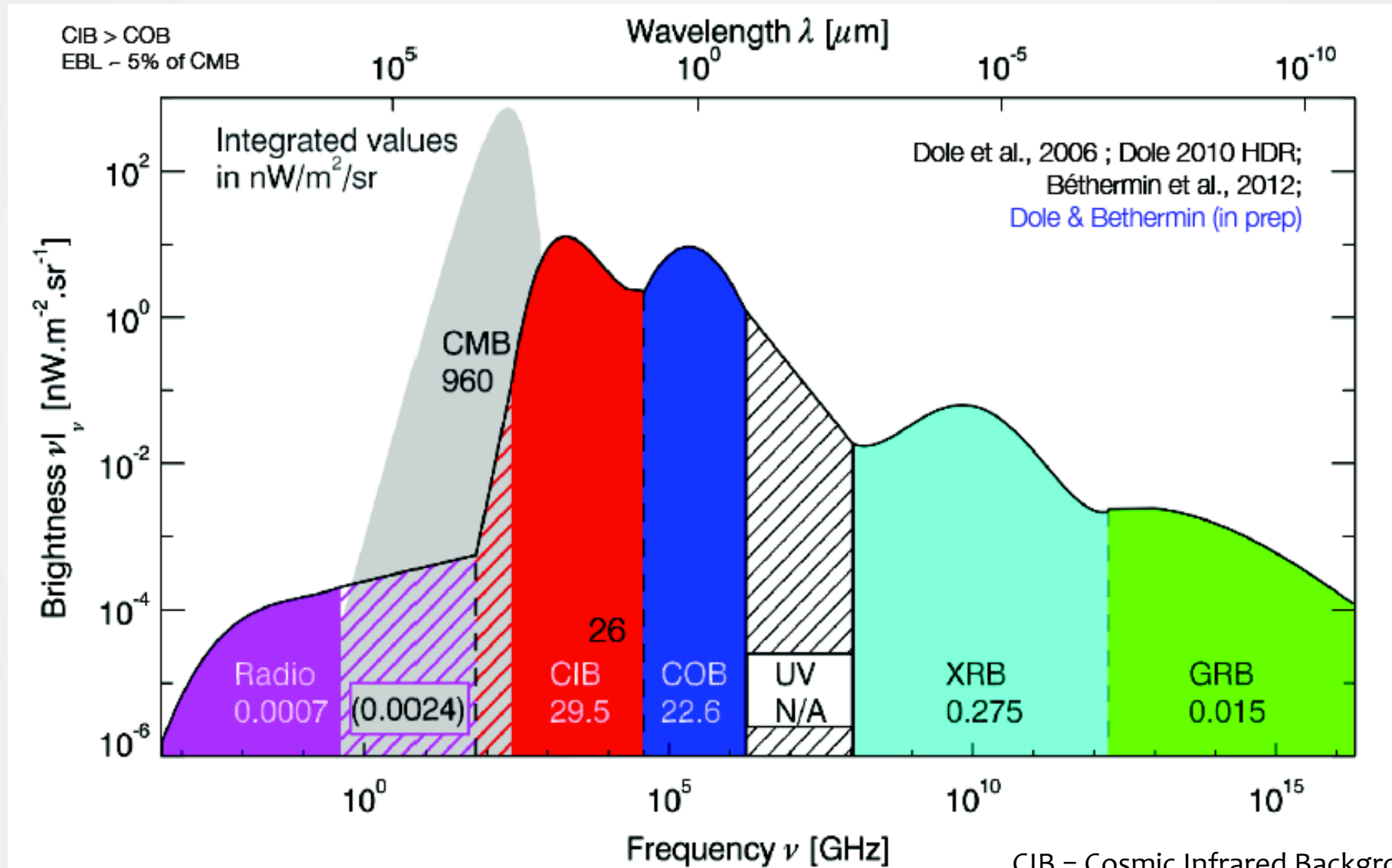
- snov
- sevanje
- uniformno vesolje
- vesolje se širi

Snov v vesolju

- sestava snovi
 - elektroni, jedra --> (nevtralni) atomi, plazma
- barionska snov
 - barioni = delci sestavljeni iz kvarkov (proton, nevtron)
 - snov, katere masa je v glavnem sestavljena iz barionov
- temna snov:
 - barionska ($1/6$ snovi)
 - nebarionska ($5/6$ snovi)

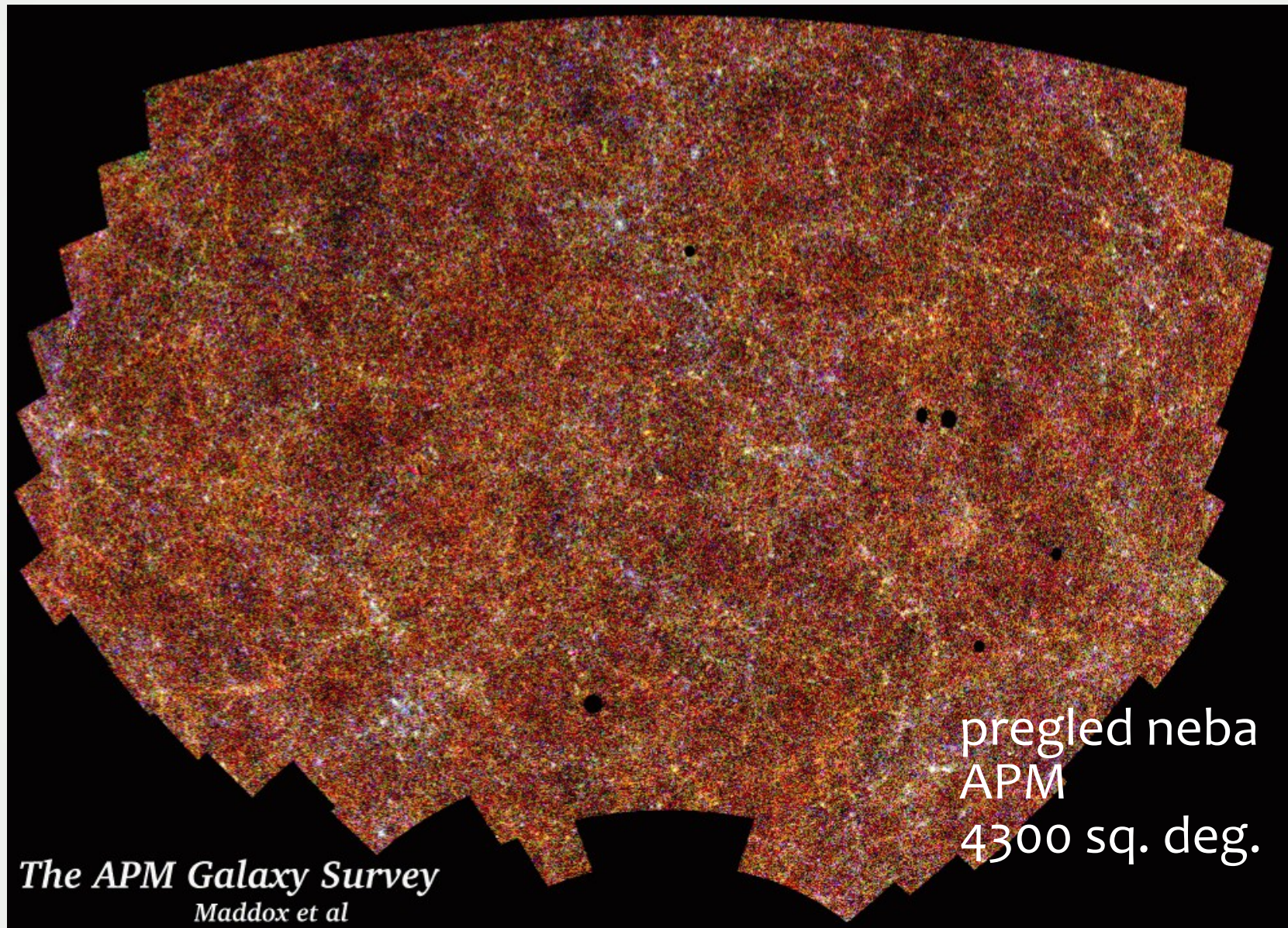
Sevanje v vesolju

Sevanje ozadja (*background radiation*)

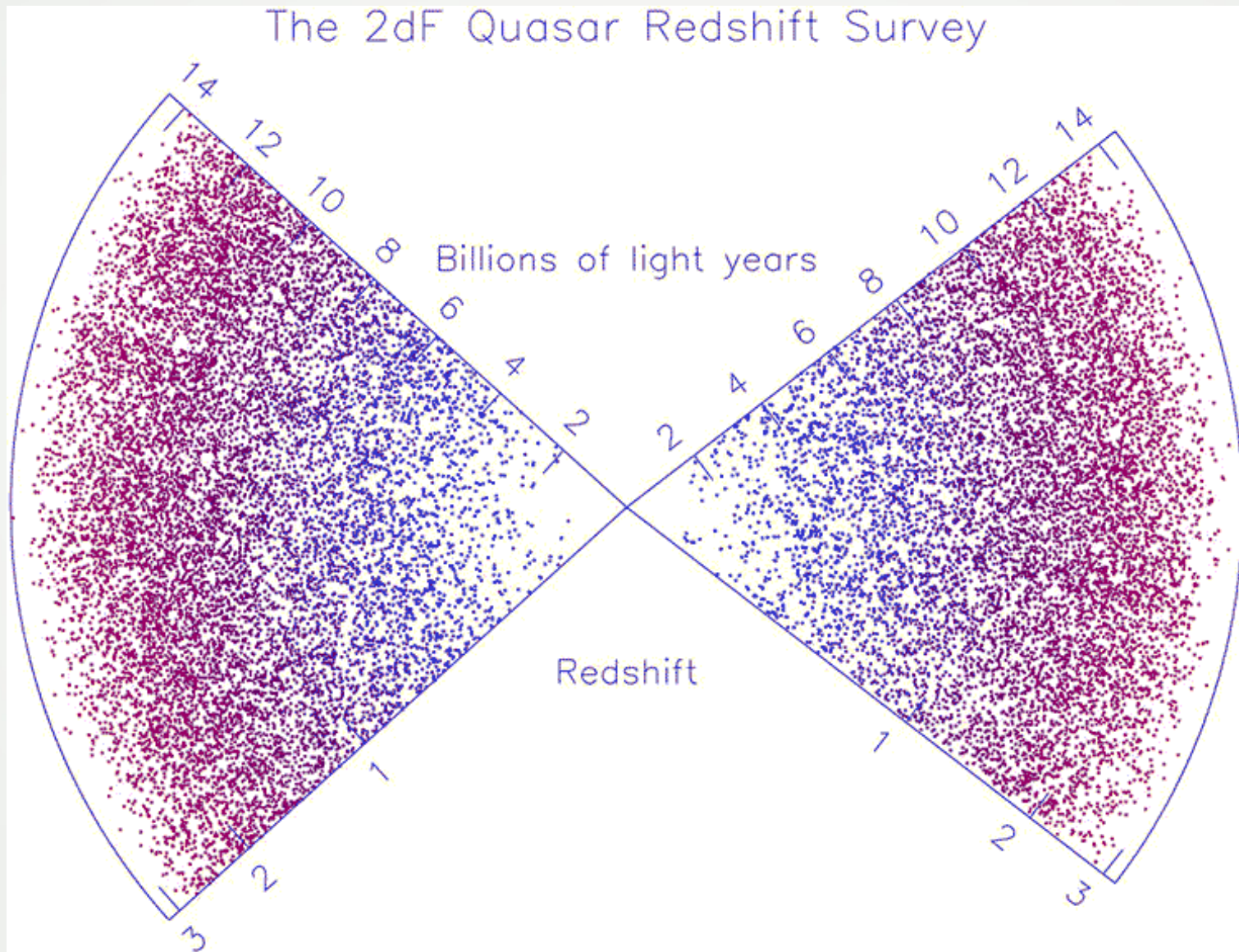


CIB = Cosmic Infrared Background
COB = Cosmic Optical Background
XRB = X-ray Background
GRB = Gamma Ray Background

Homogeno vesolje



Homogeno vesolje

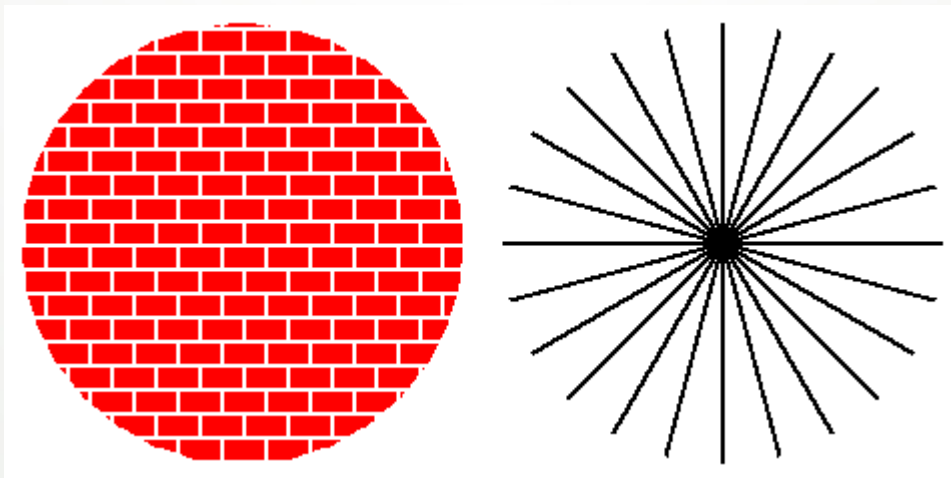


Porazdelitev snovi in sevanja v vesolju

Kozmološki princip

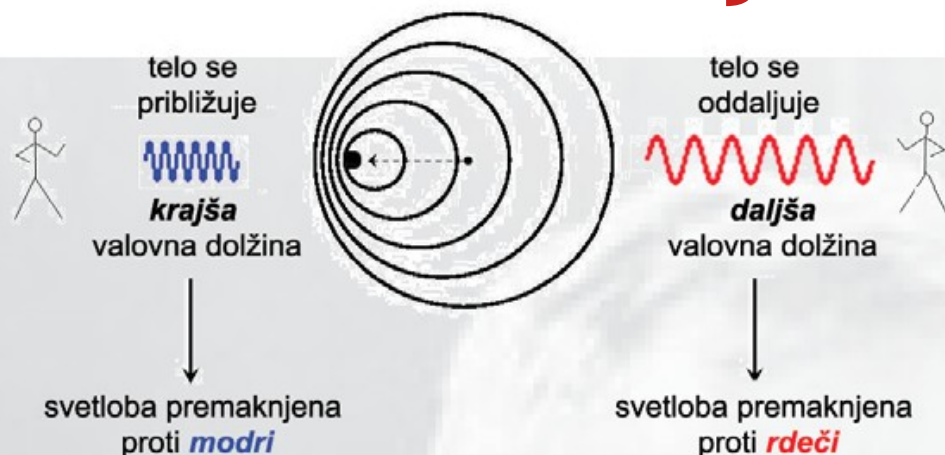
Na dovolj velikih skalah (povprečeno po večjih obmocjih neba, ki merijo več 100 Mpc počez) je vesolje **homogeno** (t.j. povsod enako) in **izotropno** (t.j. neodvisno od smeri gledanja).

homogeno,
vendar
neizotropno



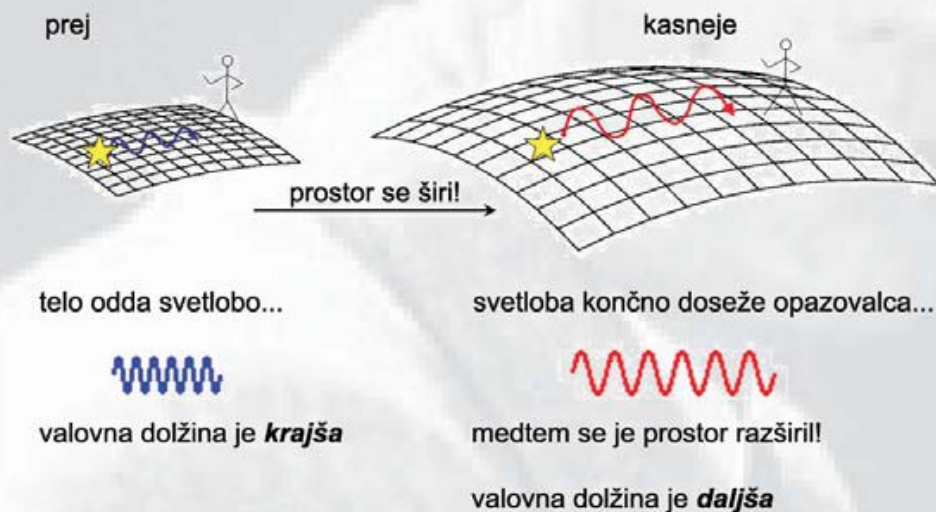
izotropno,
vendar
nehomogeno

Vesolje se širi



Dve razlagi rdečega premika:

(i) **Dopplerjev pojav.** Zaradi gibanja izvora svetlobe v stran od opazovalca so vrhovi valov videti raztegnjeni – valovna dolžina je daljša, premaknjena k rdečemu delu spektra.



(ii) **Širjenje prostora.** Svetloba z oddaljene galaksije potrebuje dolgo časa, da doseže opazovalca. Med tem potovanjem se je vesolje širilo – in skupaj z njim se je valovna dolžina raztegnila – premaknila proti rdeči.

Hubblov zakon in širjenje vesolja

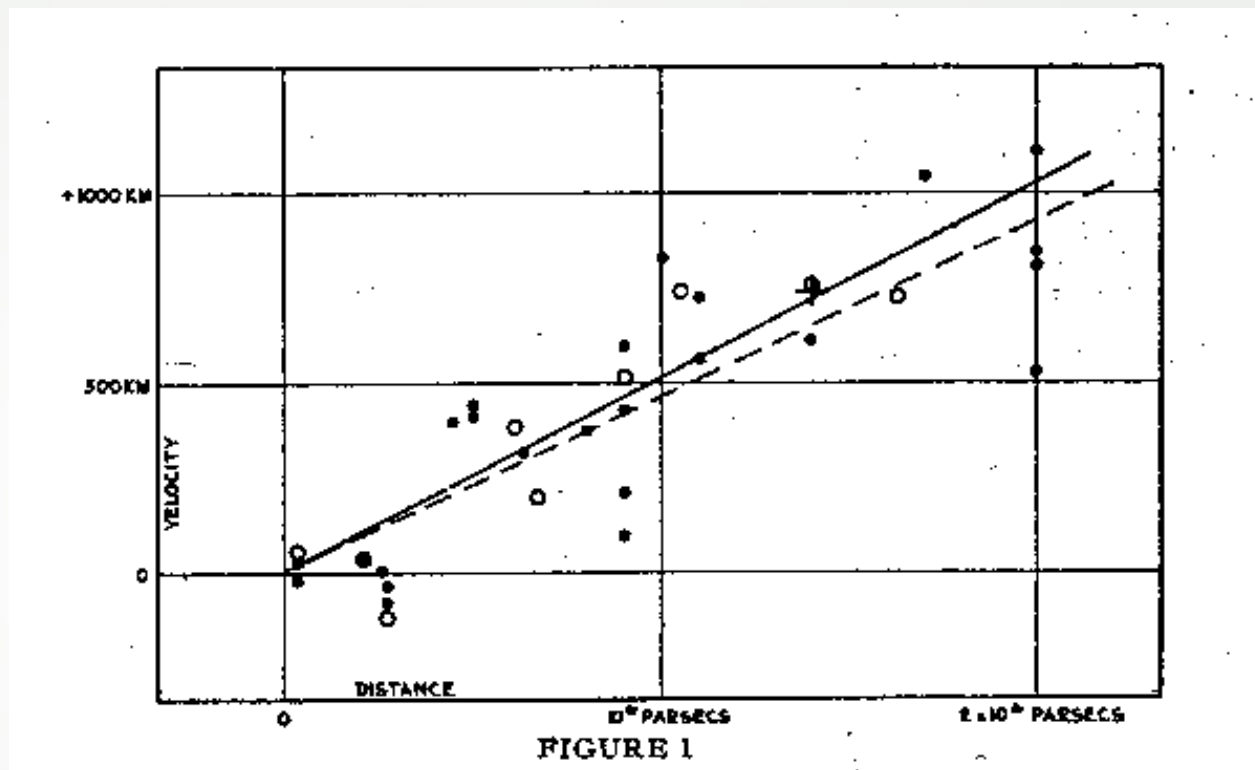
širjenje vesolja (ne Dopplerjev premik)!

$$z \propto d$$

$$z = H_0 \frac{d}{c}$$

rdeči premik

$$1 + z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}}$$



$$H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}, h \sim 0.7$$

linearna zveza velja le do $z \approx 0.2$!

za $z > 0.2$ moramo poznati kozmološki model, če želimo iz z določiti oddaljenost

Pospešeno širjenje vesolja

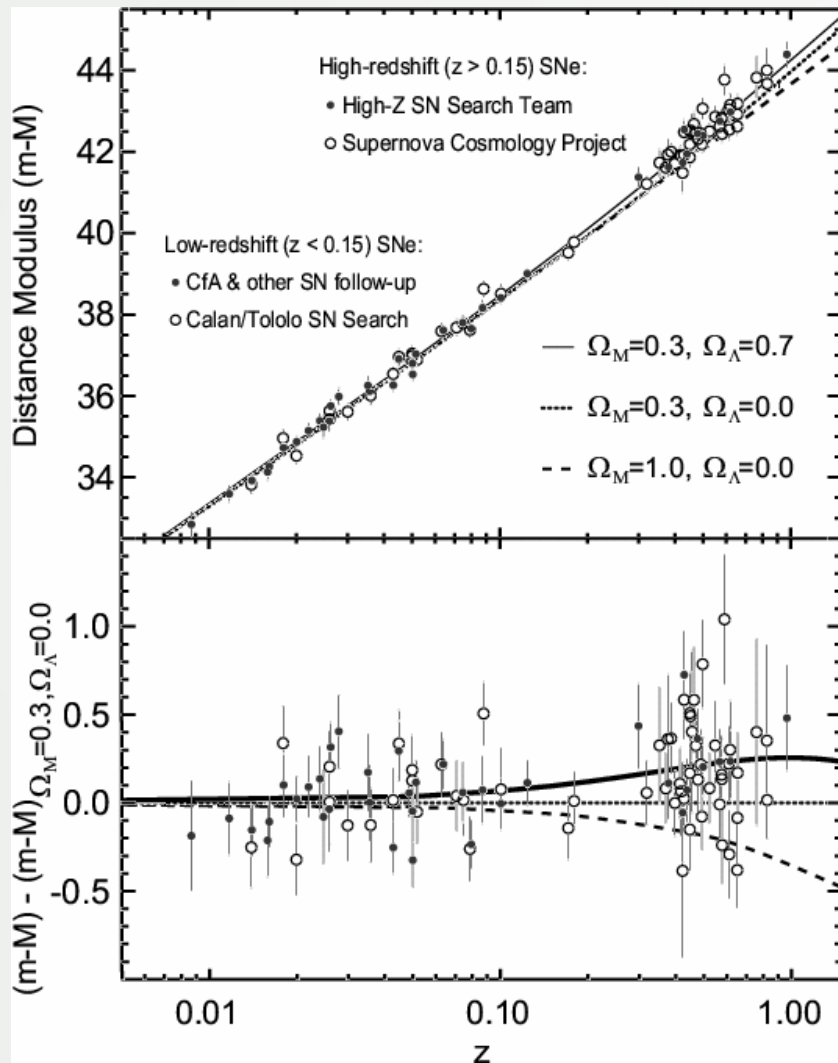


Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



Photo: U. Montan

Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

opazovanje supernov tipa Ia
na visokih rdečih premikih

parameter pojemka:
 $-0.6 < q_0 < 0$

Olbersov paradoks

- najenostavnejše kozmološko opazovanje: nočno nebo je temno
- neskončno, nespremenljivo vesolje -> svetlo nebo
- 2D analogija:



bolj poglobljeno o Olbersovem paradoksu:

Harrison E.R., The Dark Night Sky Riddle, "Olbers's Paradox",
<http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1990IAUS..139....3H>

Olbersov paradoks

- najenostavnejše kozmološko opazovanje: nočno nebo je temno
- neskončno, nespremenljivo vesolje -> svetlo nebo
- 2D analogija:

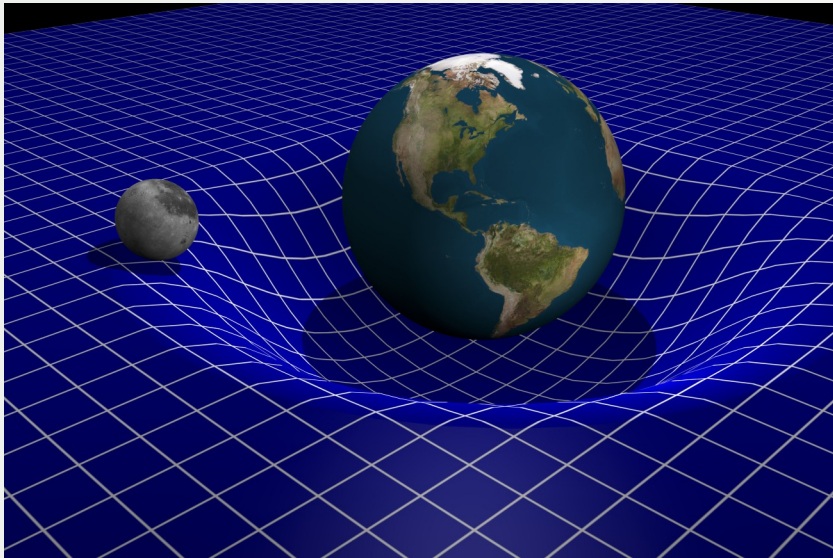
Minute Physics - Why is it Dark at Night?

<https://www.youtube.com/watch?v=gxJ4M7tyLRE>

bolj poglobljeno o Olbersovem paradoksu:

Harrison E.R., The Dark Night Sky Riddle, "Olbers's Paradox",
<http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1990IAUS..139....3H>

Modeli vesolja

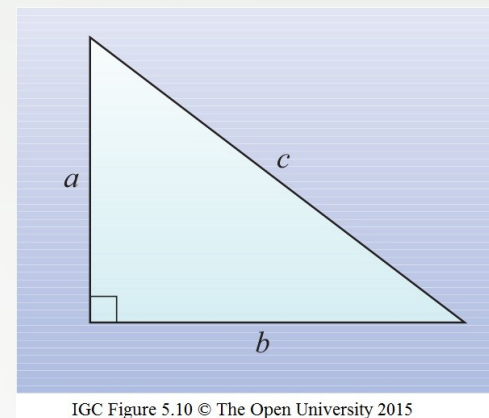


- kozmološki modeli: enačbe + parametri (meritve!)
 - 1916: splošna teorija relativnosti
-
- *sestavine vesolja*: prostor+čas ter snov in sevanje
 - *geometrijske lastnosti prostorčasa* (npr. ukrivljenost) določata porazdelitvi energije in gibalne količine (ki sta povezani s porazdelitvijo snovi in sevanja)
 - *porazdelitev energije/gib. količine na velikih skalah + splošna t.r.* = matematični opis prostor-časa na velikih skalah

Geometrijski opis prostor-časa

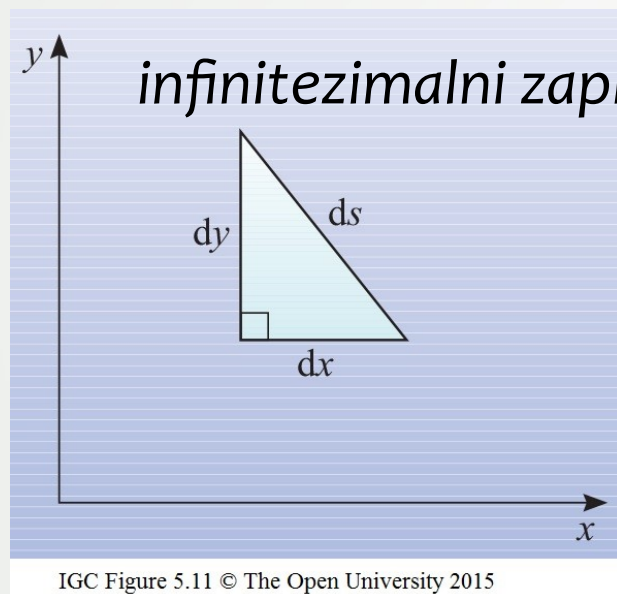
Pitagorov izrek (2D):

$$(c)^2 = (a)^2 + (b)^2$$



infinitesimalni zapis (2D)

$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2$$



(3D)

$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2$$

$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2 - c^2(dt)^2$$

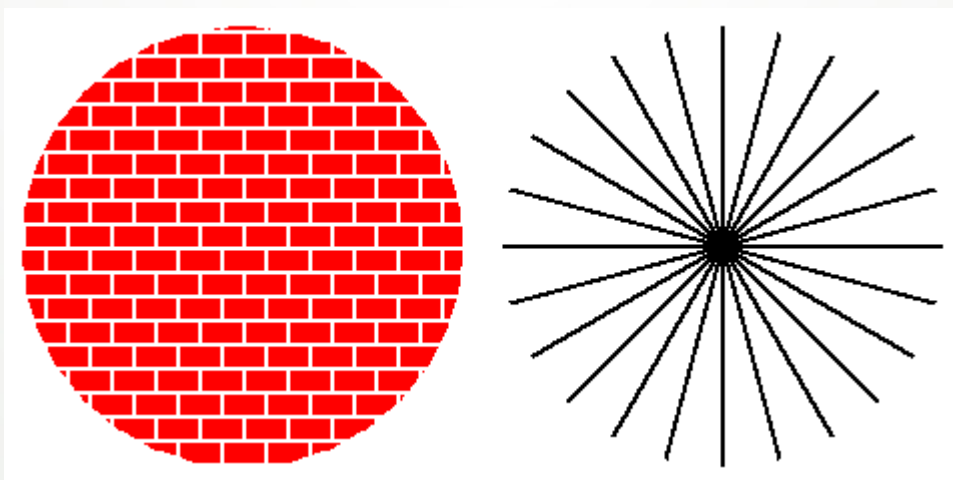
razdalja med **dogodki** v štirirazsežnem ravnem prostoru

Porazdelitev snovi in sevanja v vesolju

Kozmološki princip

Na dovolj velikih skalah (povprečeno po večjih obmocjih neba, ki merijo več 100 Mpc počez) je vesolje **homogeno** (t.j. povsod enako) in **izotropno** (t.j. neodvisno od smeri gledanja).

homogeno,
vendar
neizotropno



izotropno,
vendar
nehomogeno

Relativistični modeli vesolja

Einsteinova
enačba polja

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

tenzor, povezan z metriko
(ukrivljenost prostorčasa)

tenzor, ki opisuje
porazdelitev energije
in gibalne količine

I. 1917 vključi Einstein
dodaten termin za opis kozmologije:

kozmoška konstanta

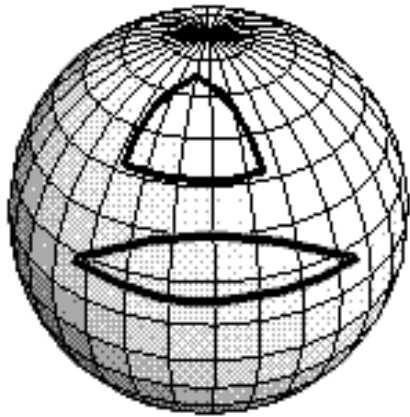
$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

temna energija

Einsteinov model

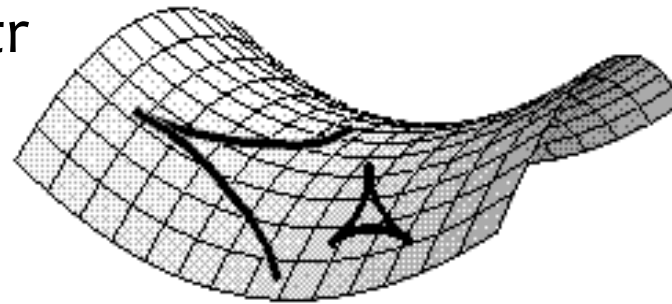
- kozmološki princip
- Λ za nespremenljivo, **statično vesolje**
- $p = 0$
- kozm. konst. uravnovesi gravitacijo: $\Lambda = \frac{4\pi G \rho}{c^2}$
- **končno vesolje** volumen: $V \propto \Lambda^{-3/2}$
- **neomejeno vesolje** (*ukrivljen prostor, vesolje ki nima roba, vendar se lahko znajdemo vnovič na začetni točki*)



$$k = +1$$

$$C < 2\pi r$$

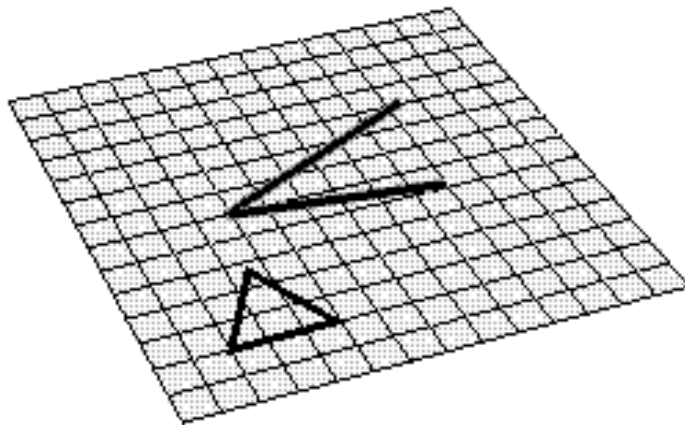
Universe with *positive* curvature. Diverging line converge at great distances. Triangle angles add to more than 180° .



$$k = -1$$

$$C > 2\pi r$$

Universe with *negative* curvature. Lines diverge at ever increasing angles. Triangle angles add to less than 180° .



k – parameter ukrivljenosti

$$k = 0$$

$$C = 2\pi r$$

Universe with no curvature. Lines diverge at constant angle. Triangle angles add to 180° .

k – parameter ukrivljenosti

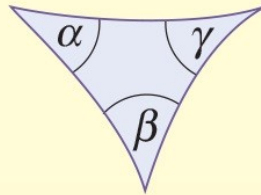
seštevek kotov
v trikotniku

obseg

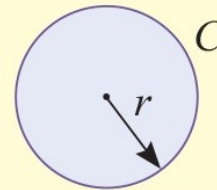
vzporedni
premici

negativna
ukrivljenost

$$k = -1$$



$$\alpha + \beta + \gamma < 180^\circ$$



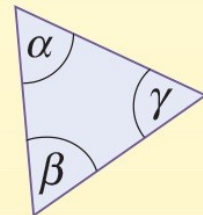
$$C > 2\pi r$$



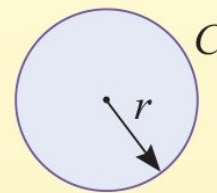
nearby straight
parallel lines may diverge

ničta
ukrivljenost

$$k = 0$$



$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$



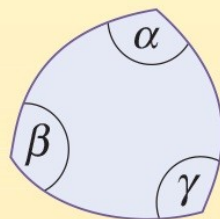
$$C = 2\pi r$$



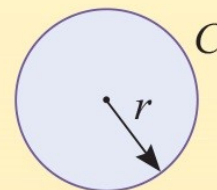
straight parallel
lines remain parallel

pozitivna
ukrivljenost

$$k = +1$$



$$\alpha + \beta + \gamma > 180^\circ$$



$$C < 2\pi r$$



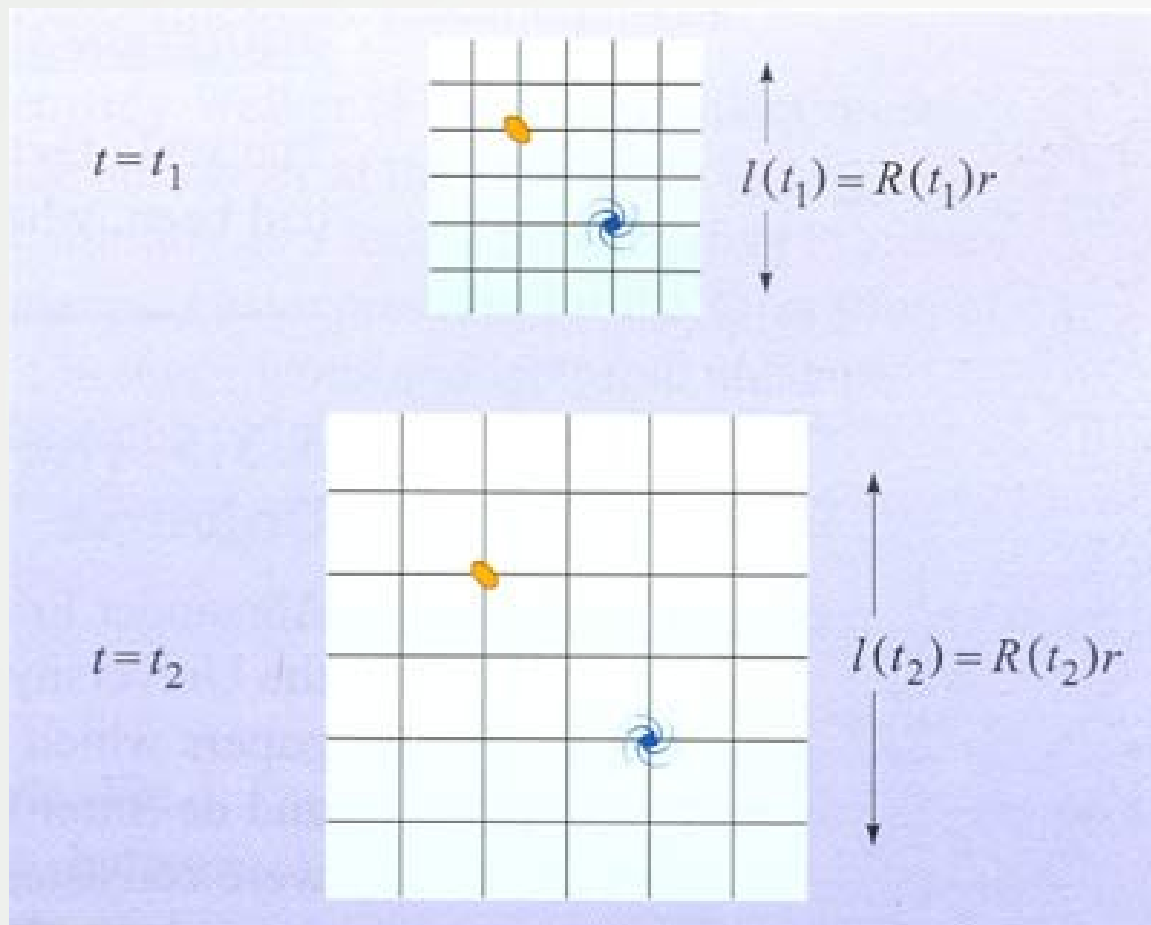
nearby straight
parallel lines may converge

de Sitterjev model

de Sitter-jev model

- nizozemski astronom Willem de Sitter
- kozmološki princip (homogeno in izotropno)
- *nestatično vesolje*
- v povprečju sta ρ in p ničelna
- geometrija vesolja popolnoma odvisna od Λ
- neskončna pospešena širitev vesolja
- eksponentno širjenje: $R(t) \propto e^{Ht}$, $H = \sqrt{\frac{\Lambda c^2}{3}}$

Opis širitve vesolja



r sogibajoča koordinata

R(t) skalirni faktor

fizična oddaljenost

$$(ds)^2 = R(t)^2 [(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2]$$

$$(ds)^2 = R(t)^2 (dr)^2$$

občasno najdemo skalirni faktor zapisan kot $a(t)$ namesto $R(t)$

Friedmann-Robertson-Walkerjeva metrika

Friedmann-Robertson-Walkerjeva metrika:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2 = c^2 dt^2 - R^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

- generalizacija ukrivljenega prostorčasa
- vsebuje *parameter ukrivljenosti* k
- vsebuje skalirni faktor $R(t)$, ki opisuje širjenje/sesedanje vesolja v odvisnosti od časa
- (r, θ, φ) so *sogibajoče koordinate*

Fridmann-Robertson-Walkerjevi (FRW) modeli

