

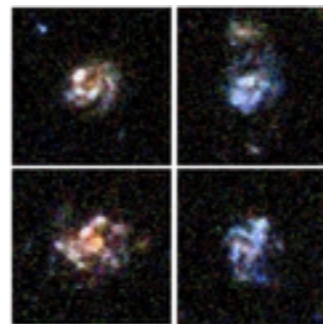
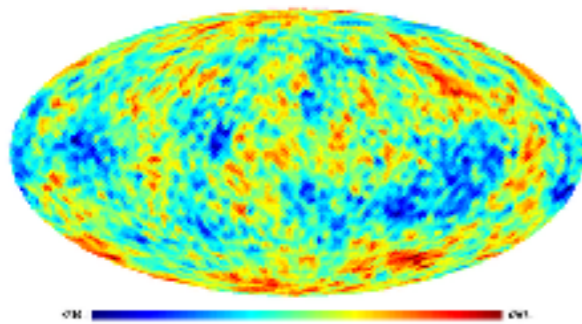
Kosmologija

Marko Simonović
CERN

Kosmologija kao istorijska nauka



fosili



“kosmološki fosili”

Cilj je razumevanje sastava i evolucije univerzuma kao celine

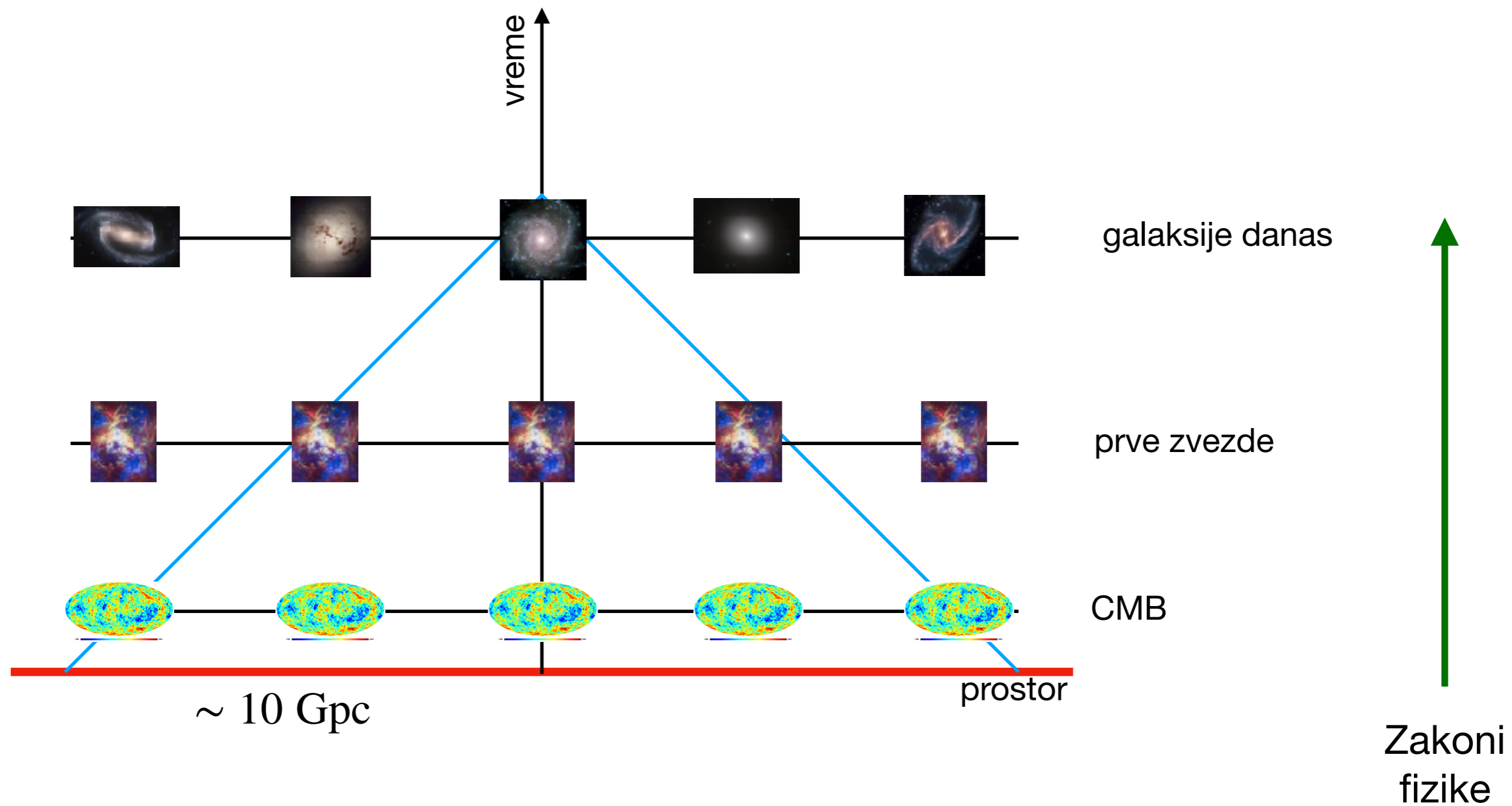
Kako možemo razumeti ceo univerzum?

Udaljene objekte vidimo direktno u prošlosti

Evolucija univerzuma prati zakone fizike

Univerzum je vema jednostavan na velikim skalama

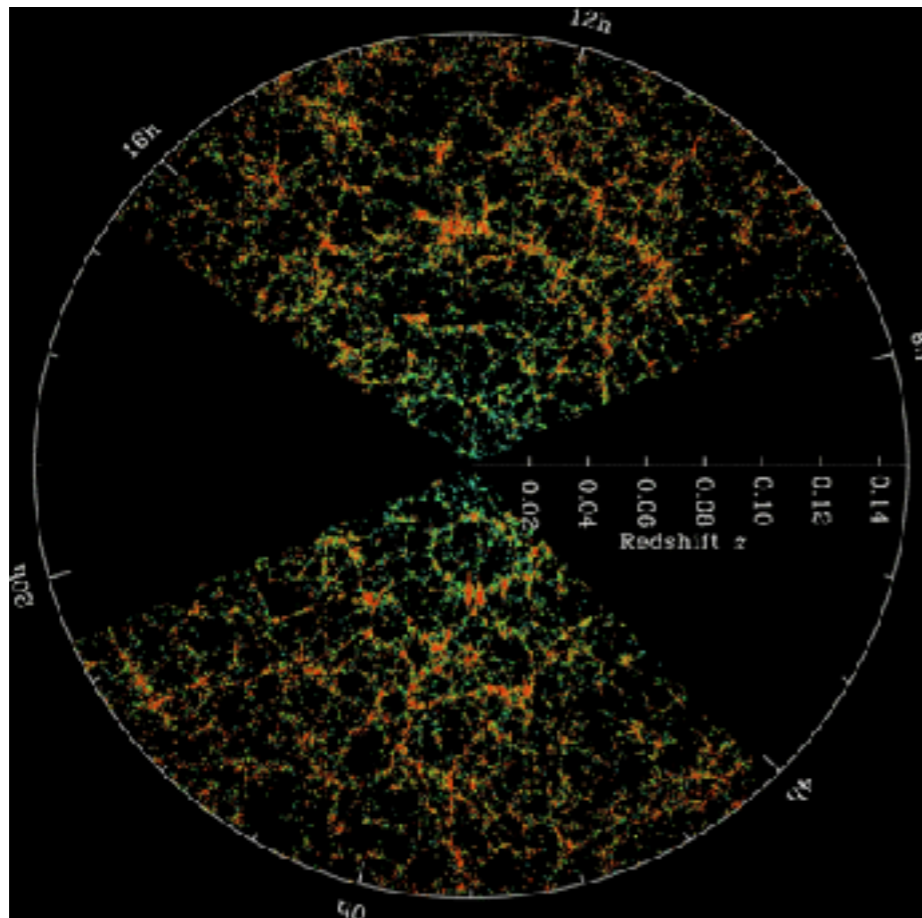
Kako možemo razumeti ceo univerzum?



$$1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} \approx 3.26 \cdot 10^6 \text{ ly} \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ km}$$

Kako možemo razumeti ceo univerzum?

Univerzum je vema jednostavan na velikim skalama



homogen

izotropan

ravan

Šta možemo naučiti u kosmologiji?

Sastav i evolucija univerzuma

Početni uslovi

Dugodometne interakcije i nove elementarne čestice

Novi zakoni fizike!

Sadržaj

Širenje svemira

Tamna materija i tamna energija

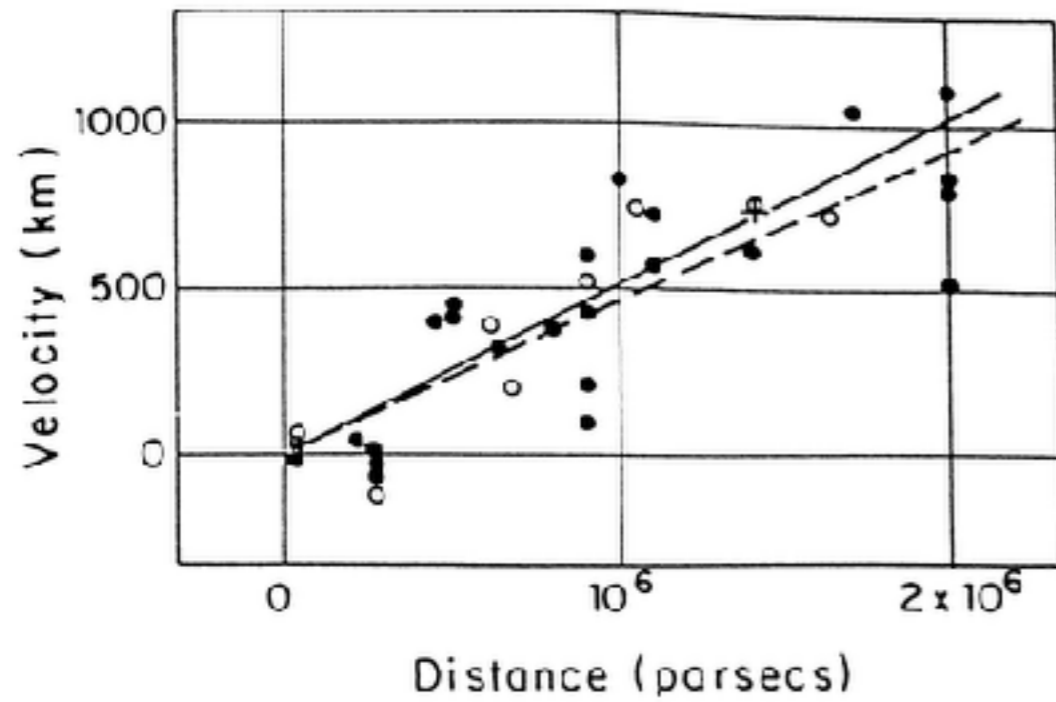
Nukleosinteza

Kosmičko mikrotalasno pozadinsko zračenje

Inflacija

Nastanak kosmoloških fluktuacija

Širenje univerzuma

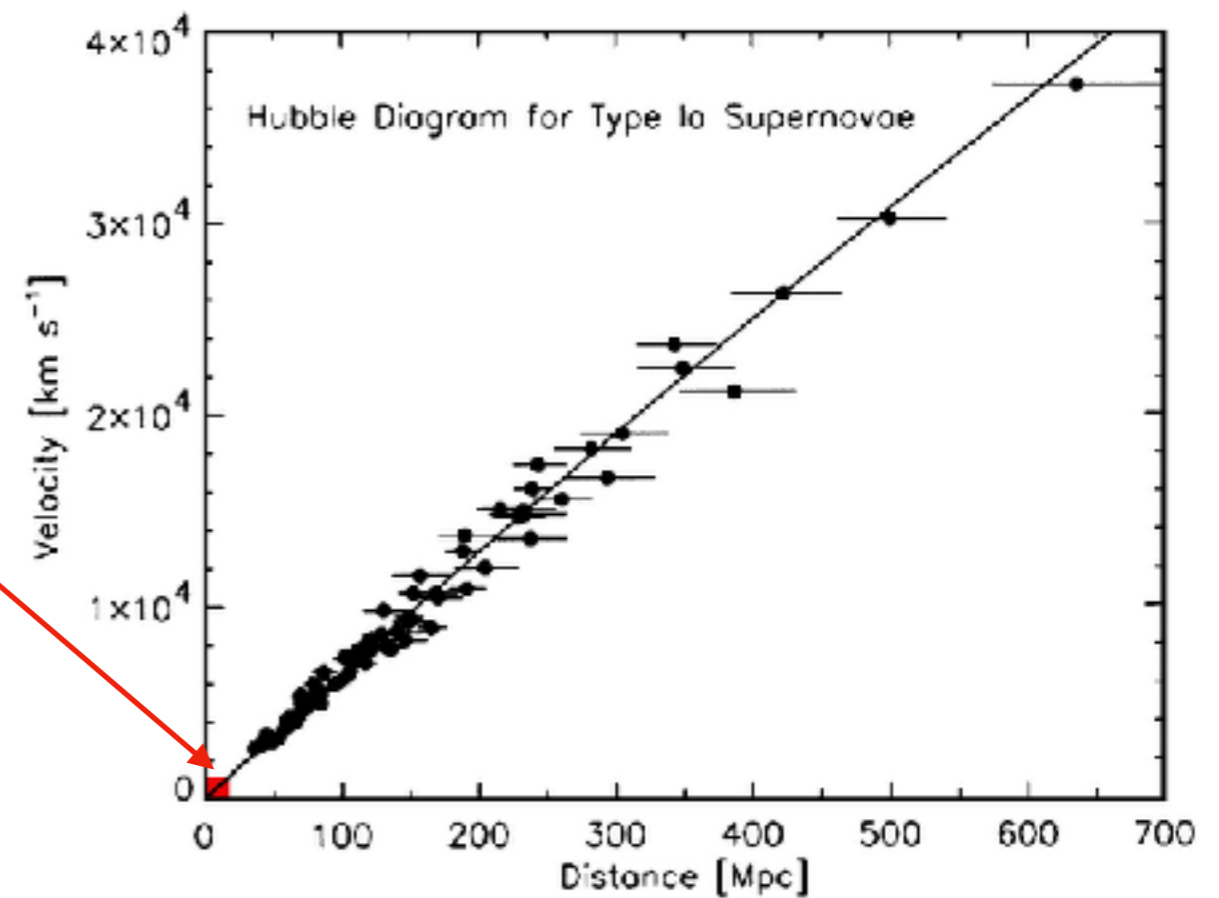


Habl (~1929)



$$v = H_0 \cdot d$$

$$H_0 \approx 68 \text{ km/s/Mpc}$$



Moderna merenja

Fridmanove jednačine (1924)

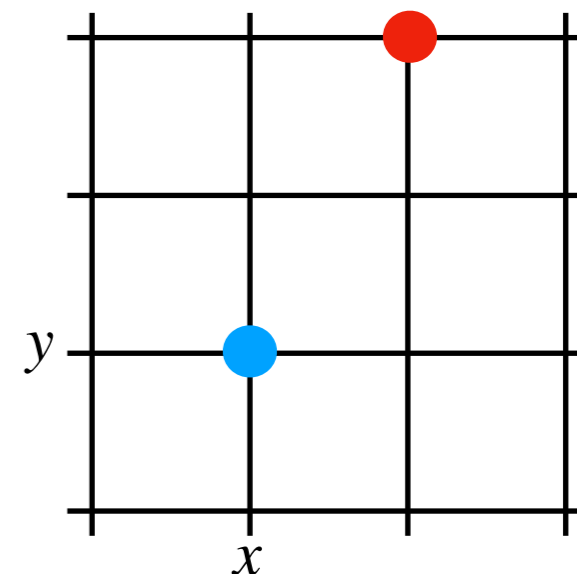
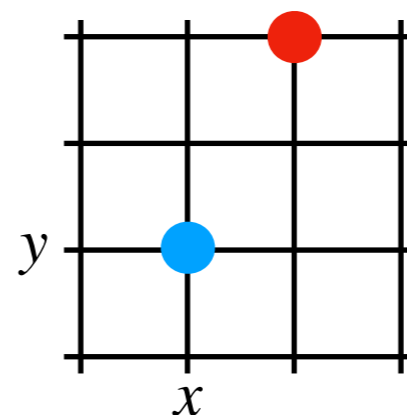
Za homogen, izotropan svemir (bez krivine prostora)

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

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a}, \quad H_0 = H(\text{danas})$$

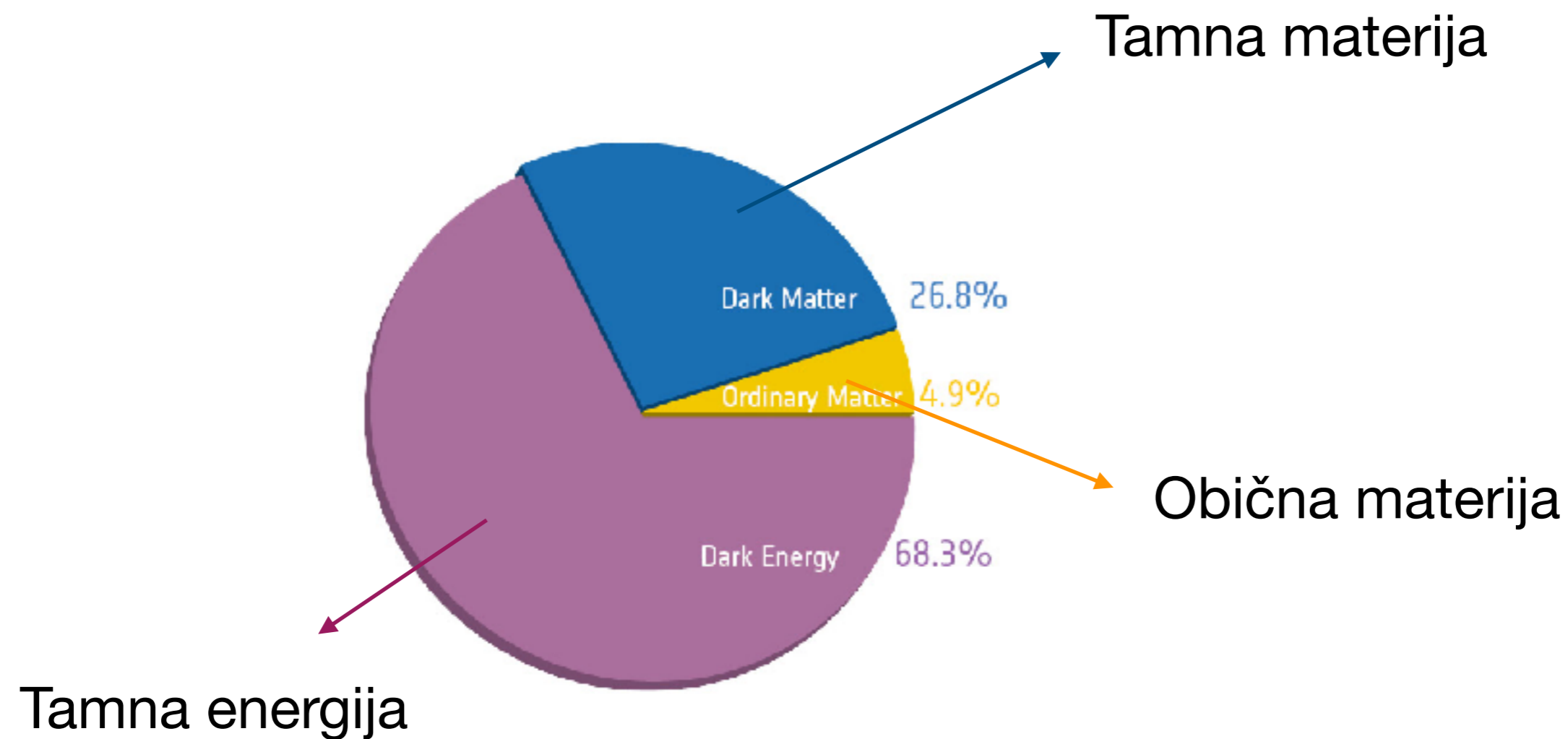
$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3}\rho(t)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$



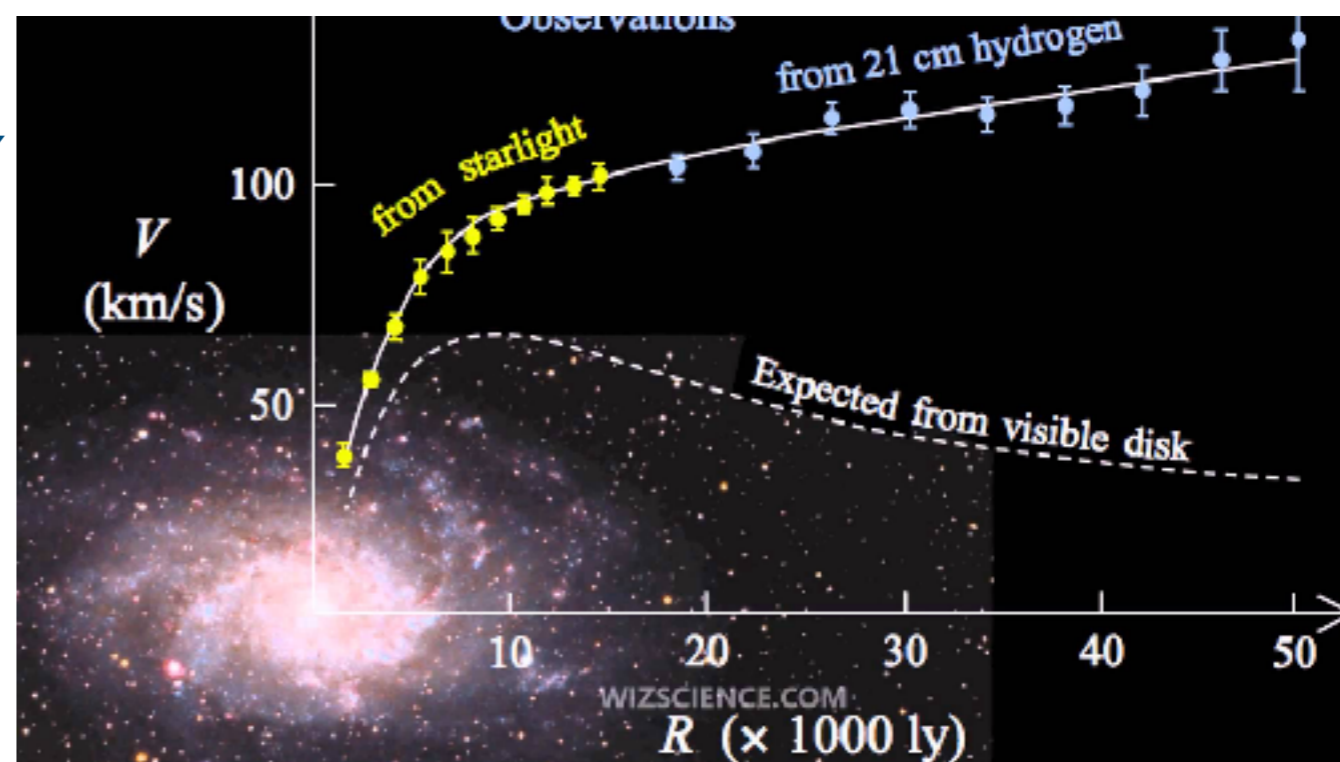
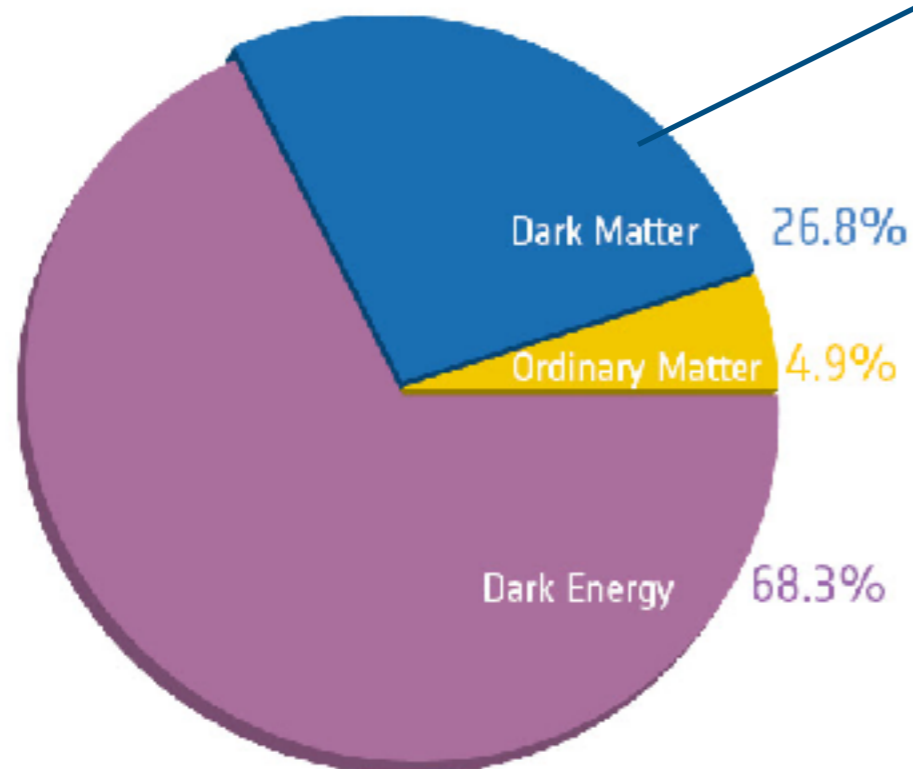
Svemir ispunjen “fluidom” sa nekom gustinom i pritiskom

Osnovni sastojci univerzuma



Početni uslovi + jednačine kretanja = evolucija!

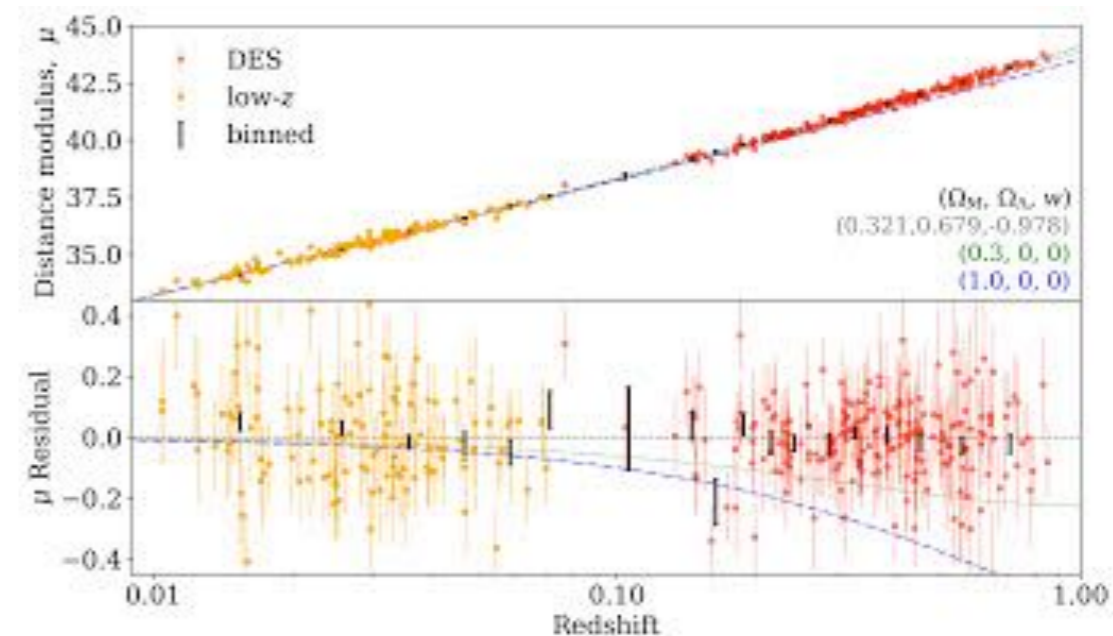
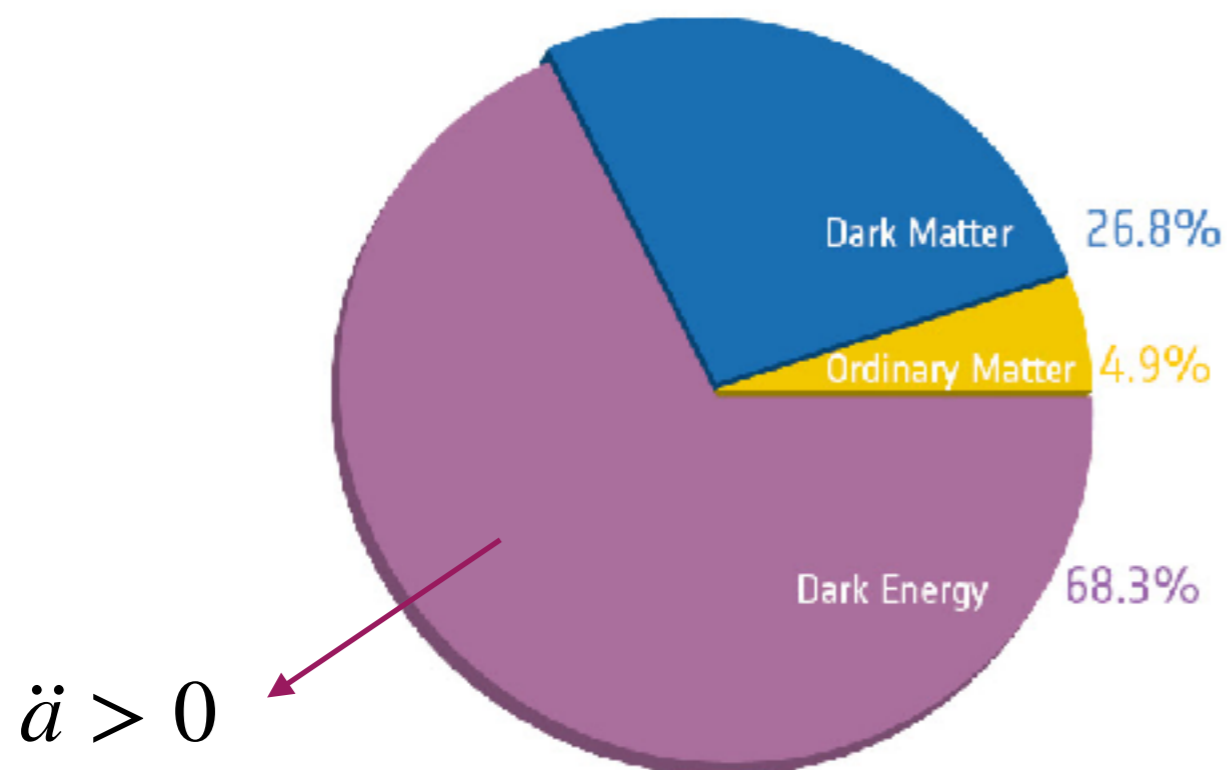
Tamna materija



Nova, masivna, neinteragujuća čestica? Nije u SM!

Setite se helijuma!

Tamna energija



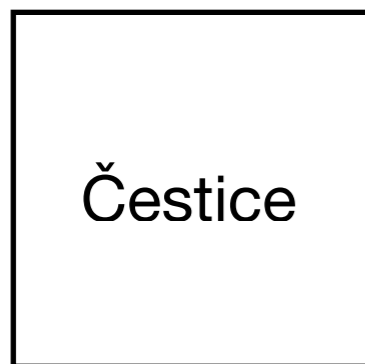
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

“Fluid” sa negativnim pritiskom!

Tamna energija: $\rho = \text{const.}$ $p = -\rho$

$$\rho \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

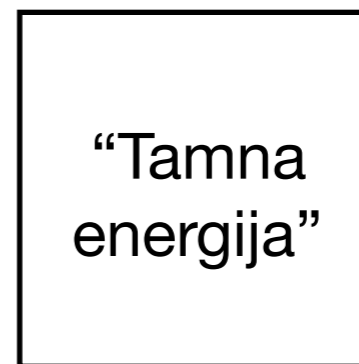
Rešenja za materiju, zračenje i tamnu energiju



$$\rho \sim a^{-3}$$

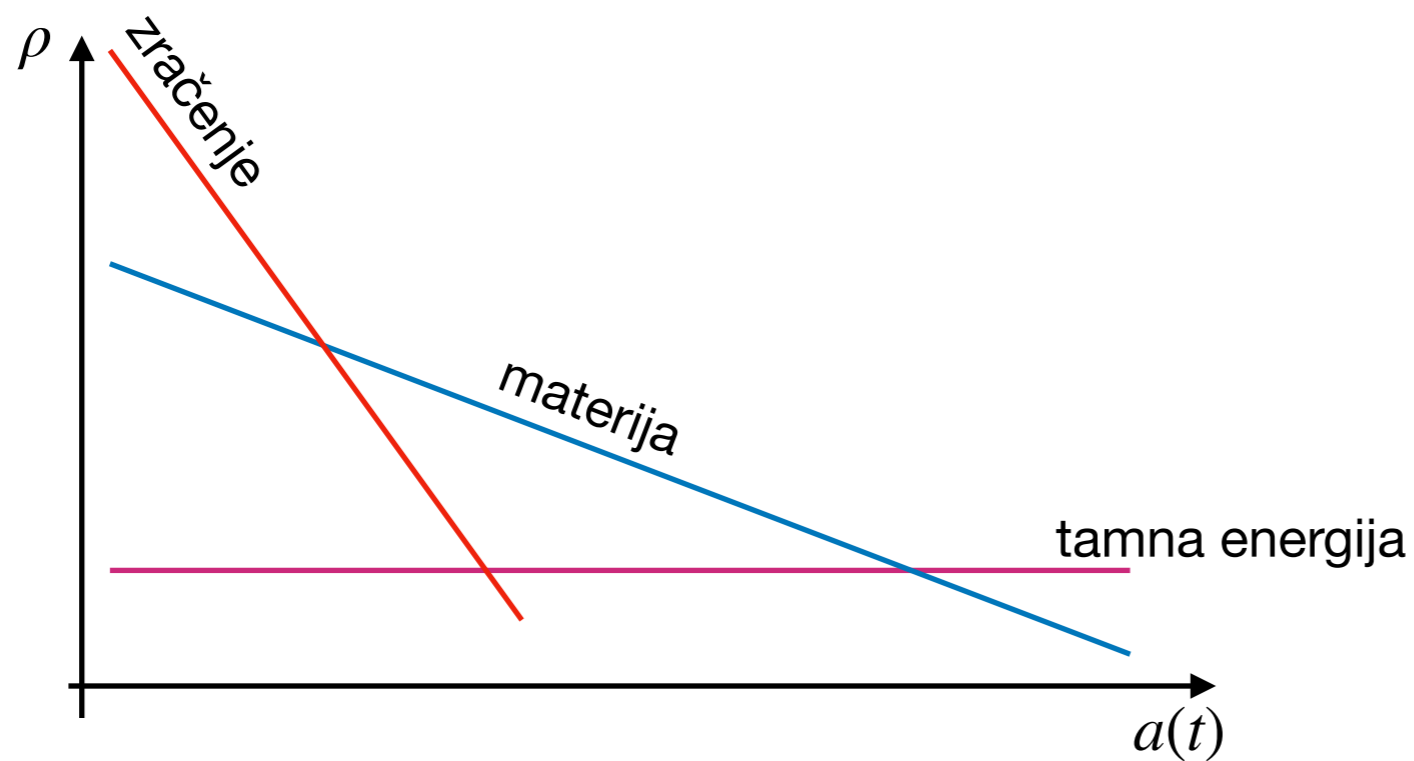


$$\rho \sim a^{-4}$$



$$\rho \sim \text{const.}$$

Lako je rešiti Fridmanove jednačine

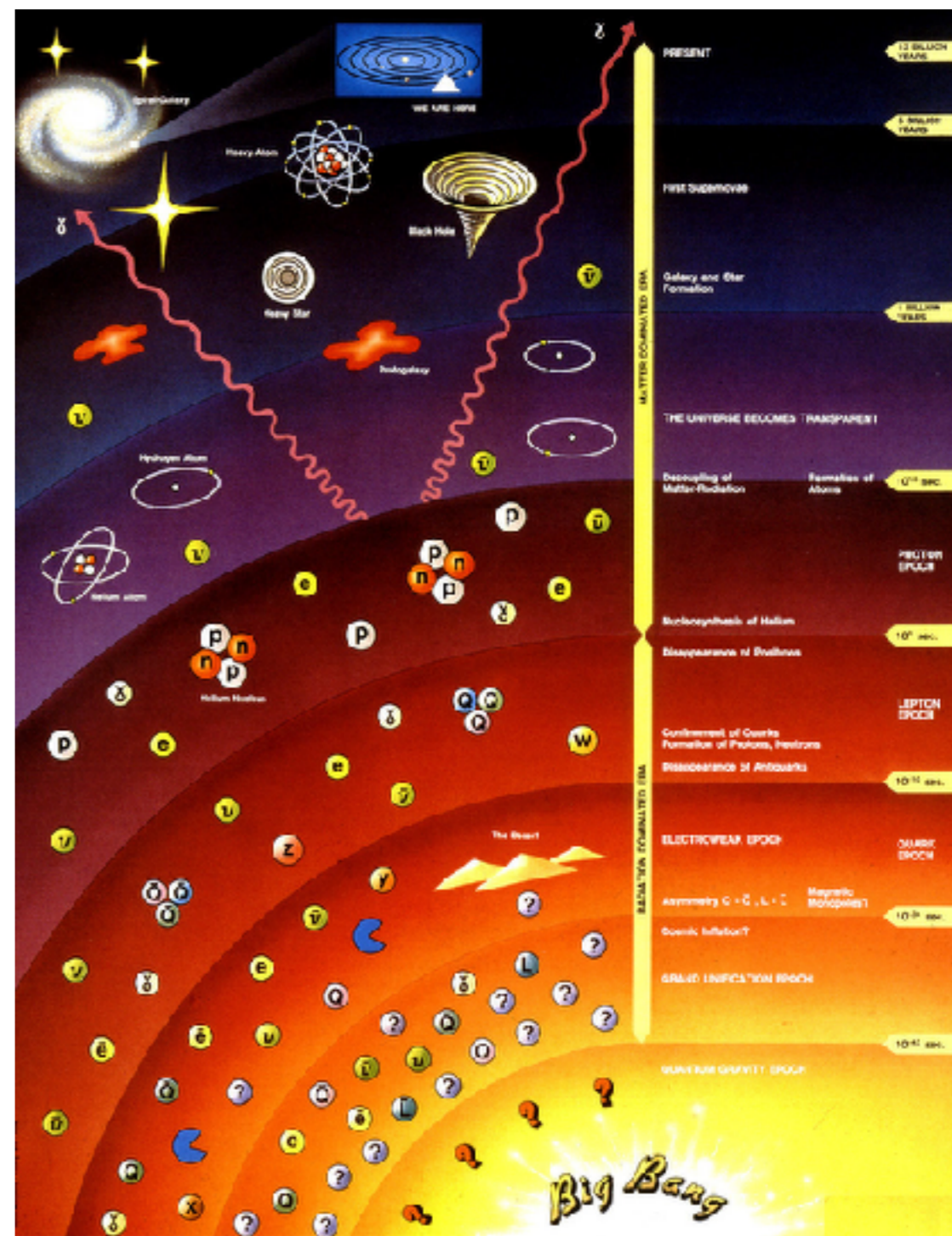


Termalna istorija

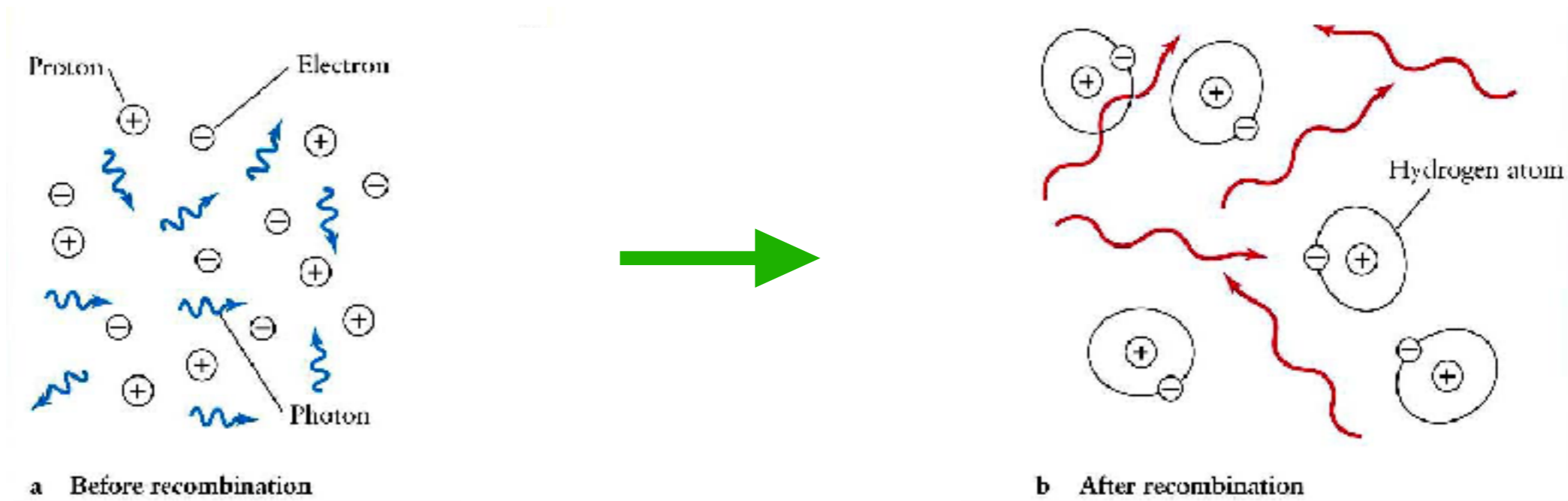
Svemir je u prošlosti bio mnogo topliji i gušći

Kakva predviđanja možemo da napravimo iz toga?

- ___ Mikrotalasno pozadinsko zračenje
- ___ Nukleosinteza
- ___ Veza sa fizikom čestica



Kosmičko mikrotalasno pozadinsko zračenje



Čitav svemir je ispunjen zračenjem koje ostaje nakon rekombinacije!

$$E_i \sim 10 \text{ eV} \quad T \sim 10^4 \text{ K}$$

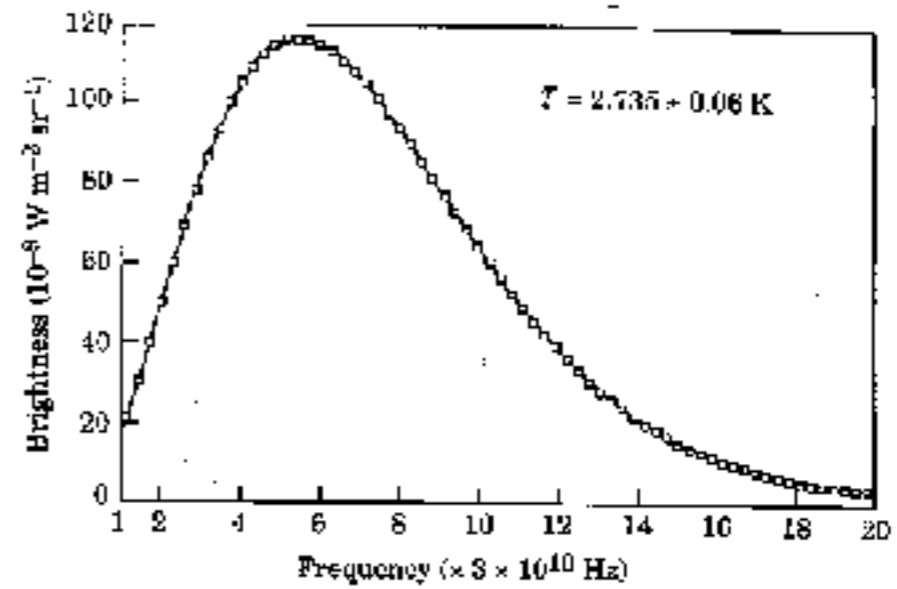
$$\text{Ali: } T_{rec} \sim 10^3 \text{ K}$$

$$\frac{n_b}{n_\gamma} \sim 10^{-9}$$

Kosmičko mikrotalasno pozadinsko zračenje

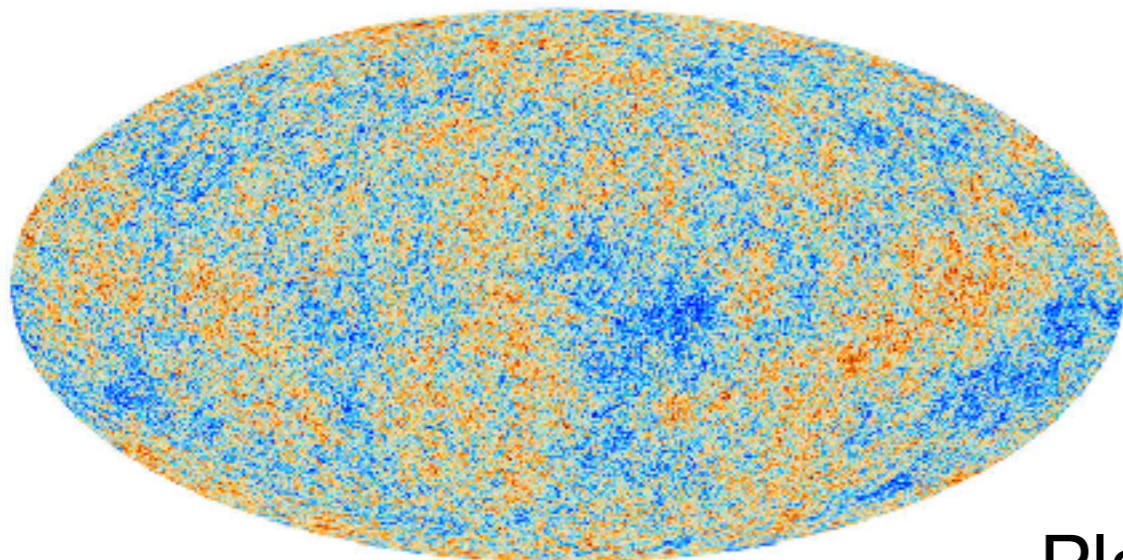


Penzias, Wilson 1965.



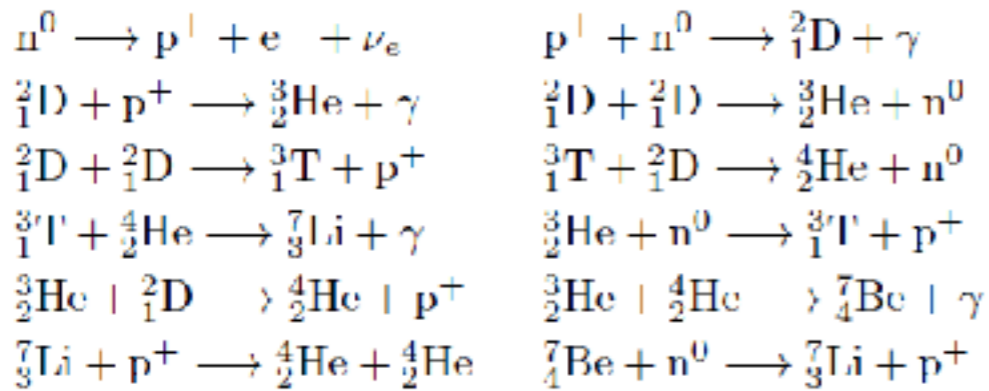
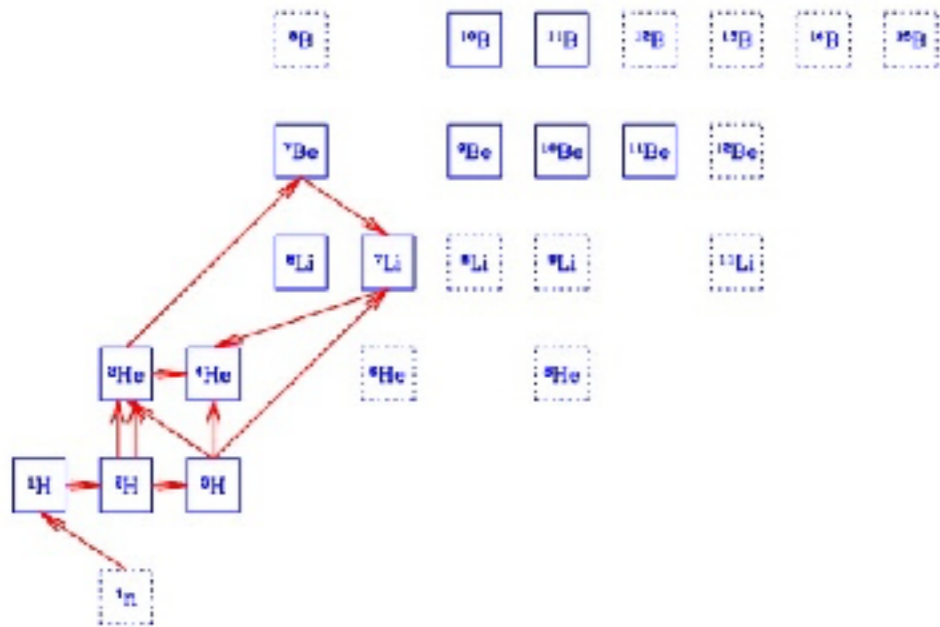
COBE, 1992.

$$\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$

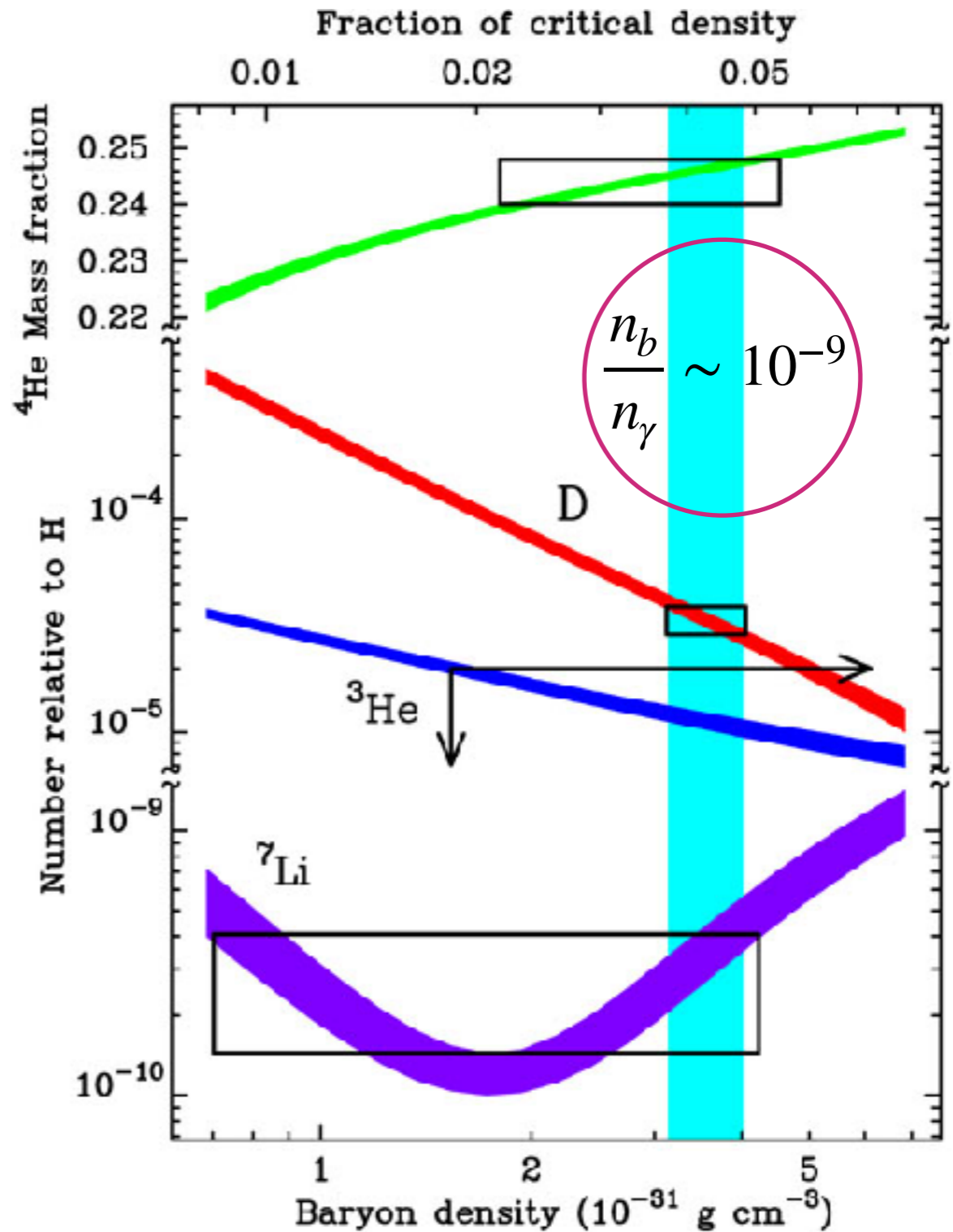


Planck, 2015.

Nukleosinteza



Još jedan dokaz za tamnu materiju!



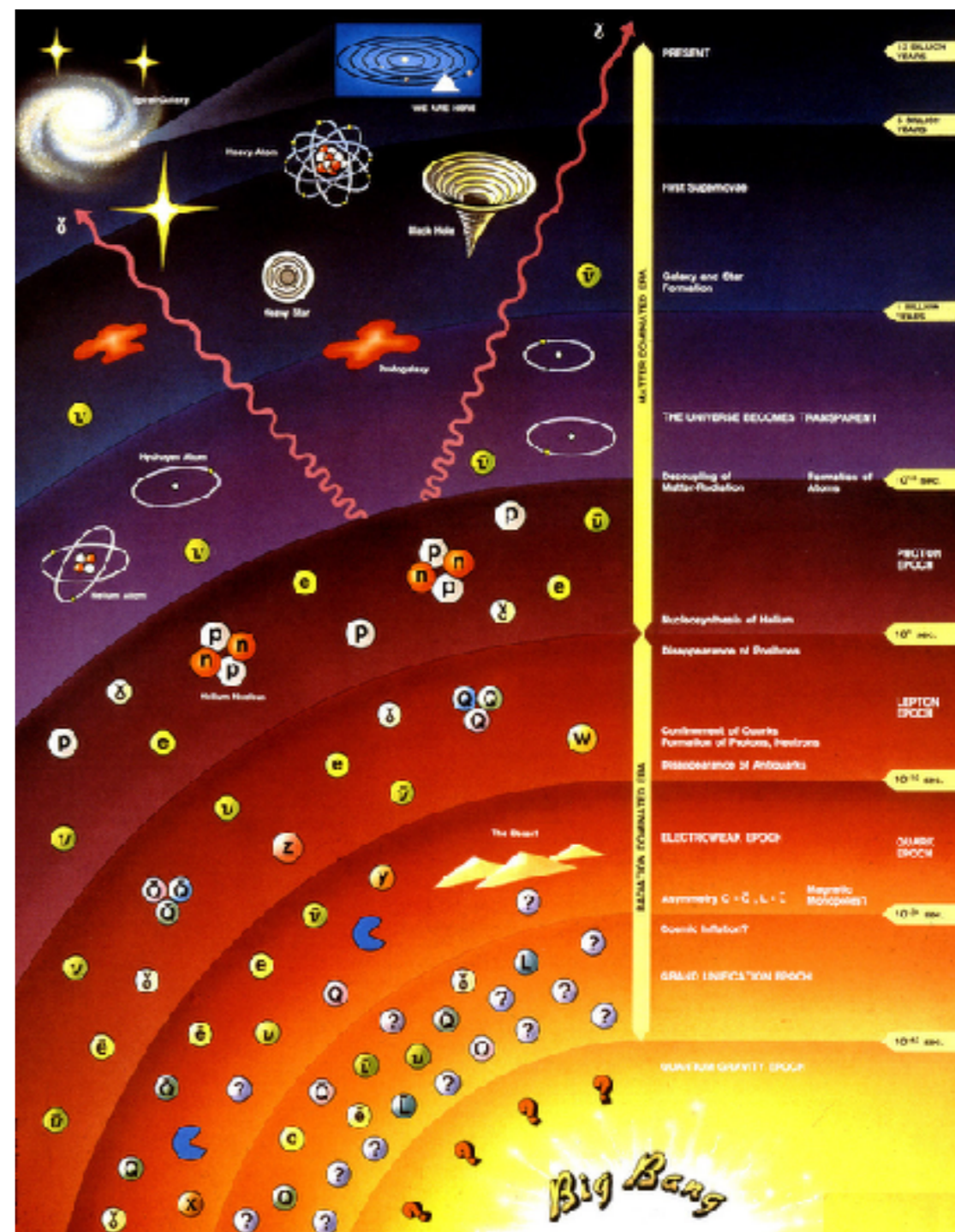
Veza sa fizikom čestica

Nastanak tamne materije

Fazni prelazi

Asimetrija materije i antimaterije

$$\frac{n_b}{n_\gamma} \sim 10^{-9}$$



Stubovi moderne kosmologije

1. Opšta relativnost i širenje svemira
2. Mikrotalasno pozadinsko zračenje
3. Nukleosinteza, predviđanje relativnih koncentracija lakih hemijskih elemenata

Konzistentna slika evolucije svemira