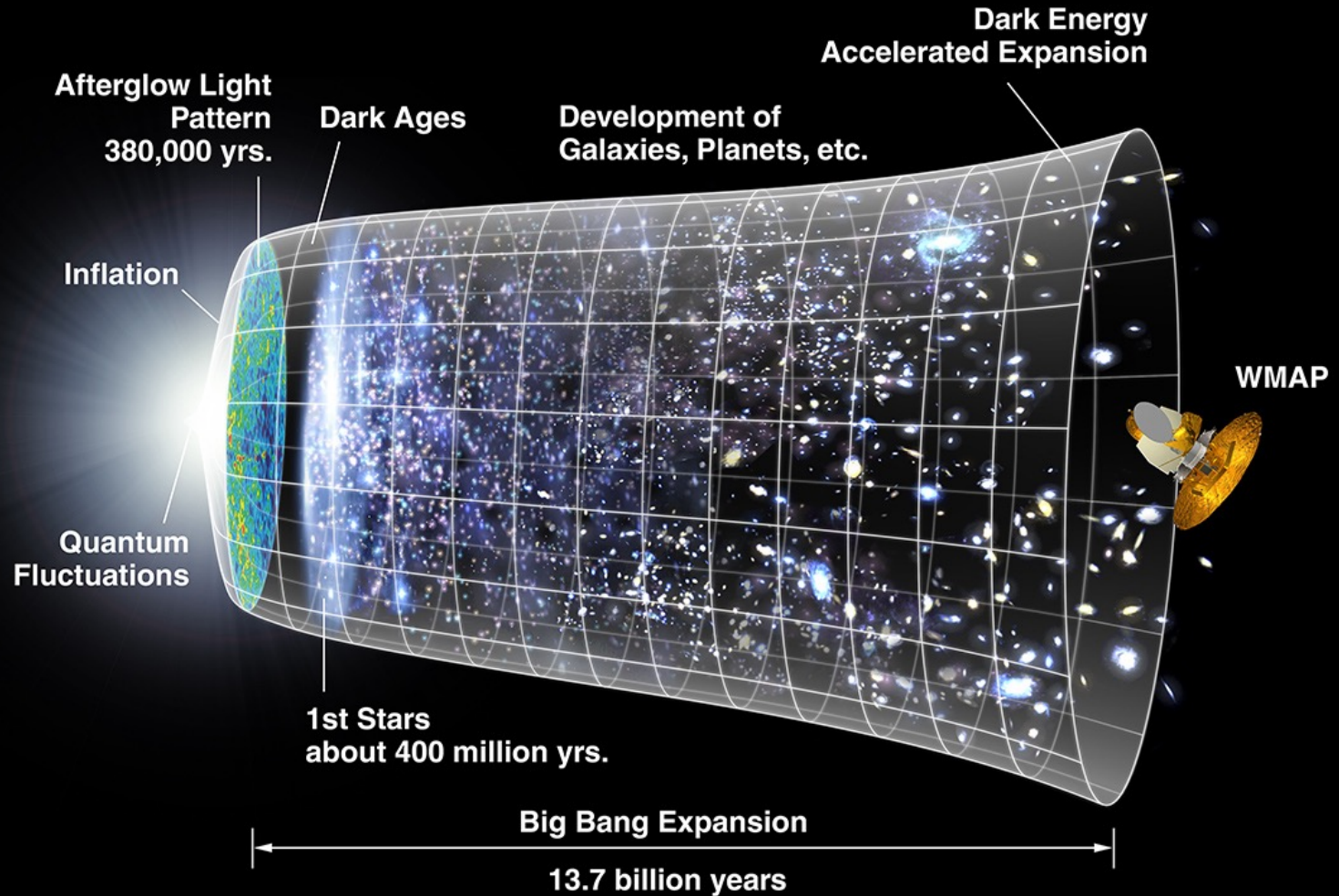


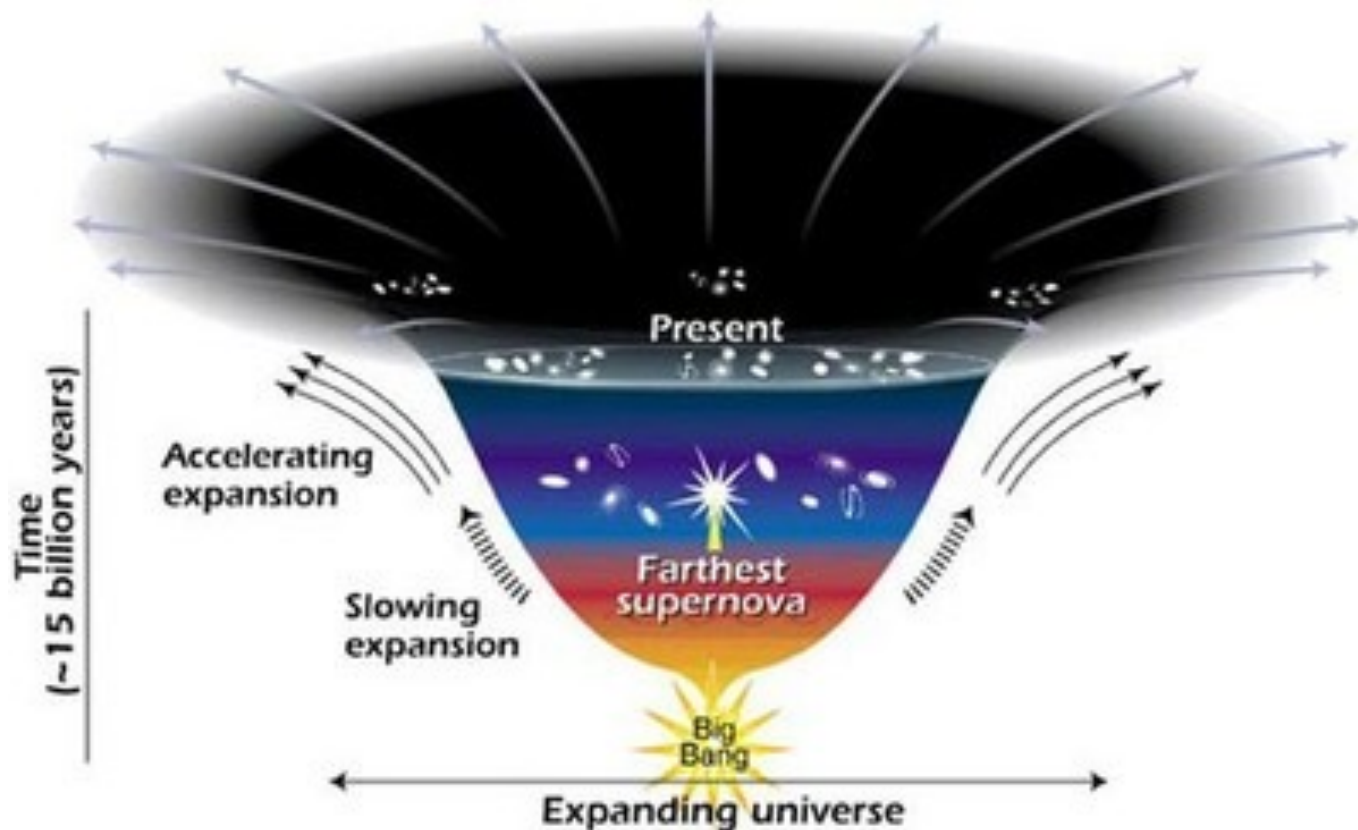
# Uvod u kozmologiju

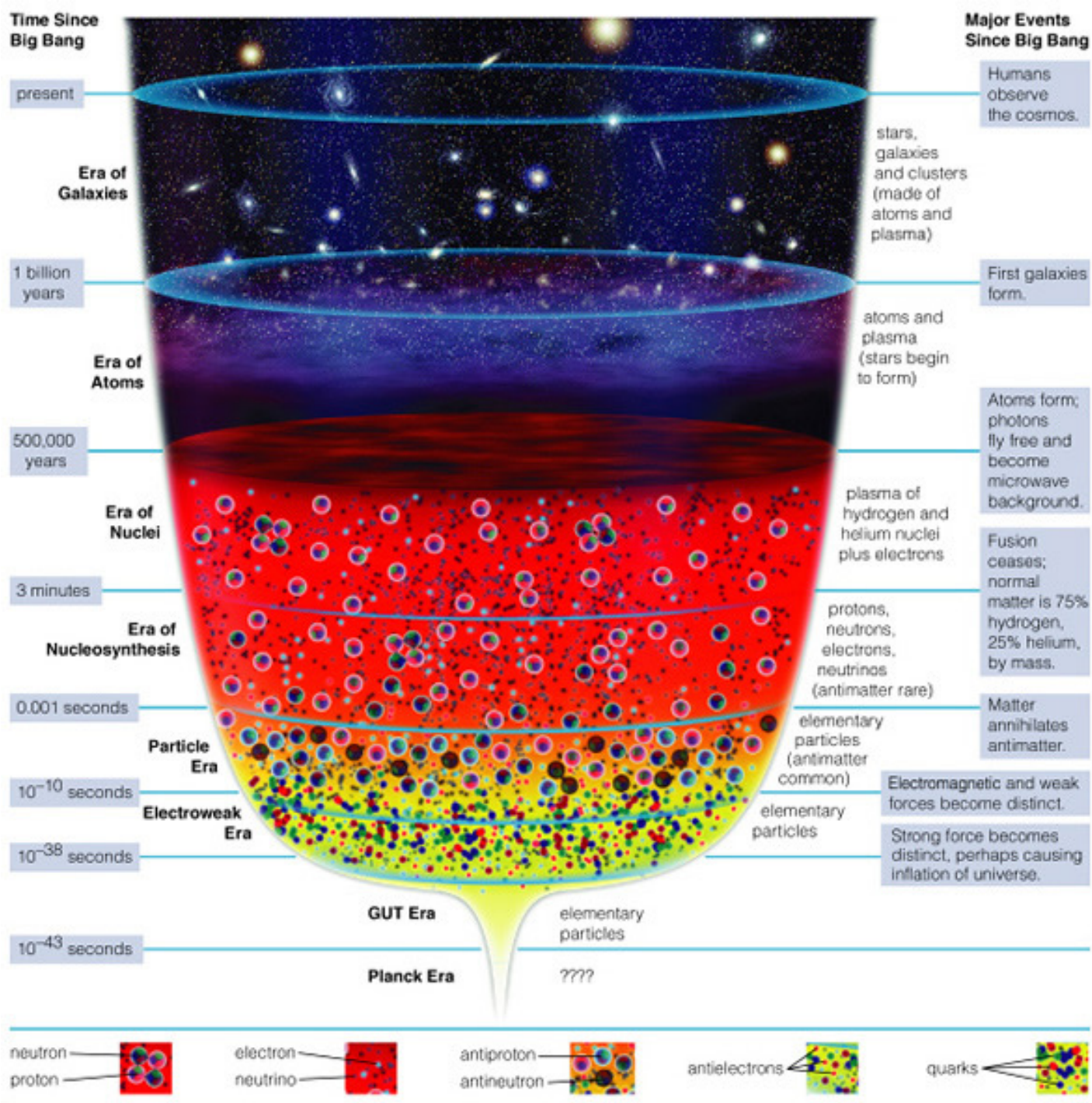


Nikola Godinovic  
Milky way Galaxy, FESB - Split

# Sadržaj

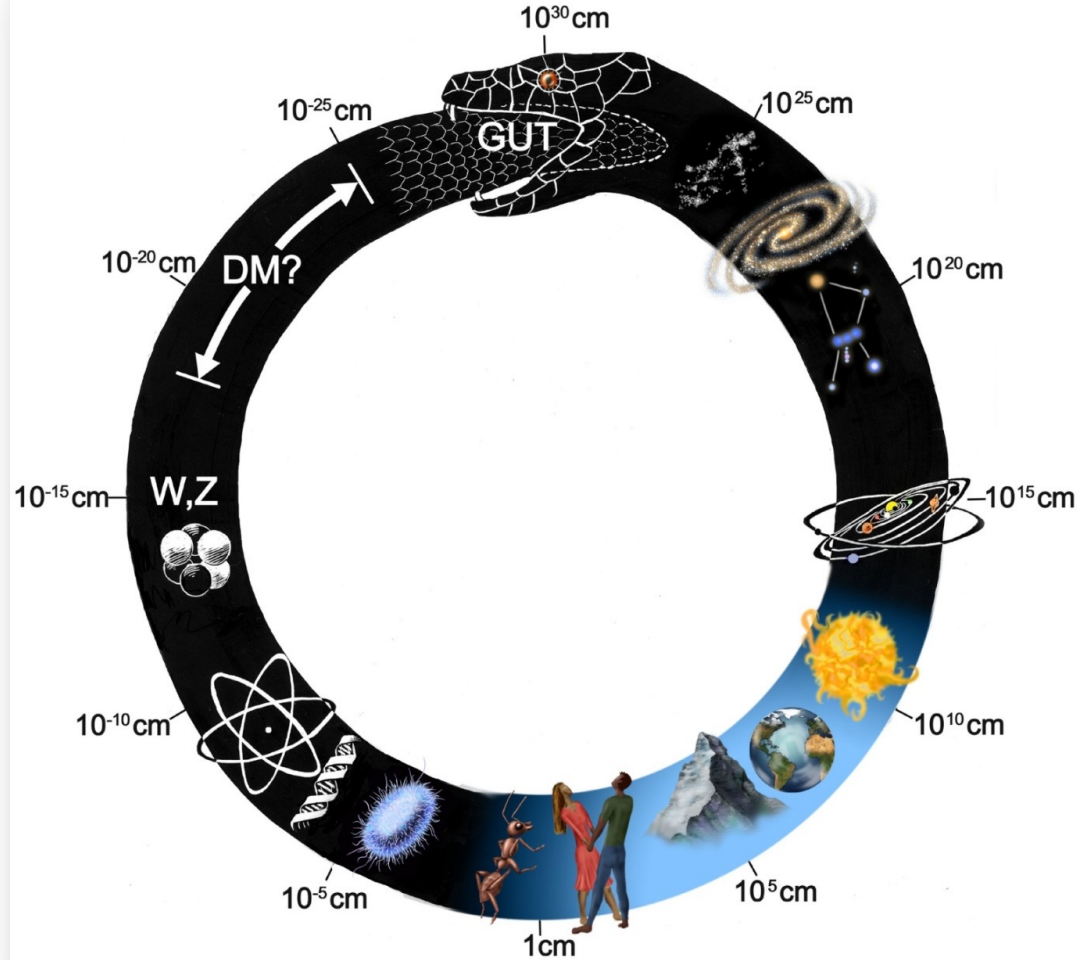
- Big Bang kroz epohe evolucije svemira
- Eksperimentalne činjenice & Big Bang
- Kozmološki princip & Friedmann-ova jednačba







# Ouroboros – simbol jednistva



Mi smo kreacije ovog svemira, tako da je priča o svemiru u osnovi i naša priča.



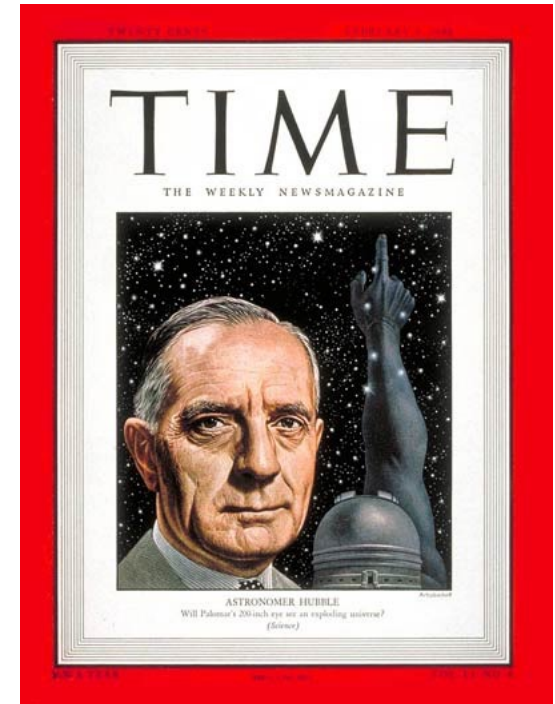
# Što je kozmologija?

- Kozmologija je dio znanosti koji proučava svojstva svemira kao cjeline
  - i to na velikoj prostornoj skali
- Kozmologija koristi znanstvenu metodu za razumijevanje
  - Nastanka svemira (?)
  - Evolucije
  - Konačne sudbine
- Teorija o (**nastanku?**) (i) evoluciji svemira koja danas predvladava zove se

**Teorija Velikog praska**  
The Big Bang theory

# Provjere teorije Velikog praska

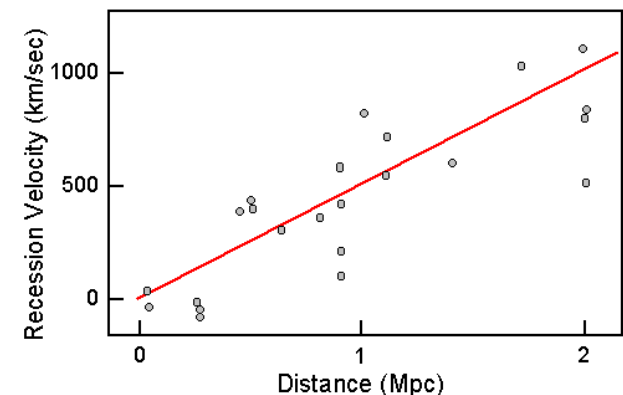
- Model velikog praska potvrđen je mnogim opažanjima
  - Najvažniji među njima su
    - Širenje svemira
    - Količina lakih elemenata (H, He, Li) u svemiru
    - Kozmičko pozadinsko zračenje
- Ova tri opažanja snažno podupiru hipotezu da je svemir evoluirao iz jako vrućeg i gustog plina
- Plin nije imao izraženu strukturu



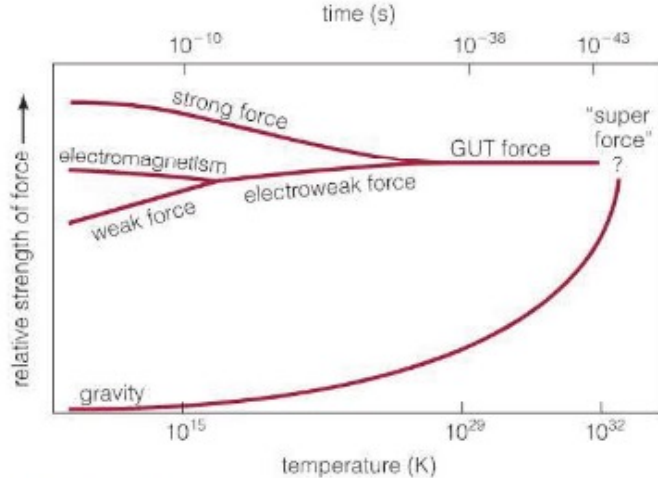
# Provjere Velikog praska: širenje svemira

- Hubbllov zakon:
  1. Objekti u dubokom svemiru se udaljavaju od Zemlje
  2. Brzina galaksija koje se udaljavaju od Zemlje proporcionalna je njihovoj udaljenosti  
Što su dalje udaljavaju se većim brzinama
- Ovaj zakon je prvi izveo Georges Lemaitre 1927.
  - Izvod slijedi iz Opće teorije relativnosti
  - Lemaitre je čak predložio i vrijednost konstante
    - Koju danas zovemo Hubbleova konstanta
- 1929. godine Hubble je eksperimentalno potvrdio ovaj zakon
  - I preciznije izmjerio konstantu
- Zakon u matematičkom obliku:
$$v = H_0 D$$
  - $v$  = brzina galaksije
  - Hubbleova konstanta  $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$
  - $D$  = udaljenost do galaksije

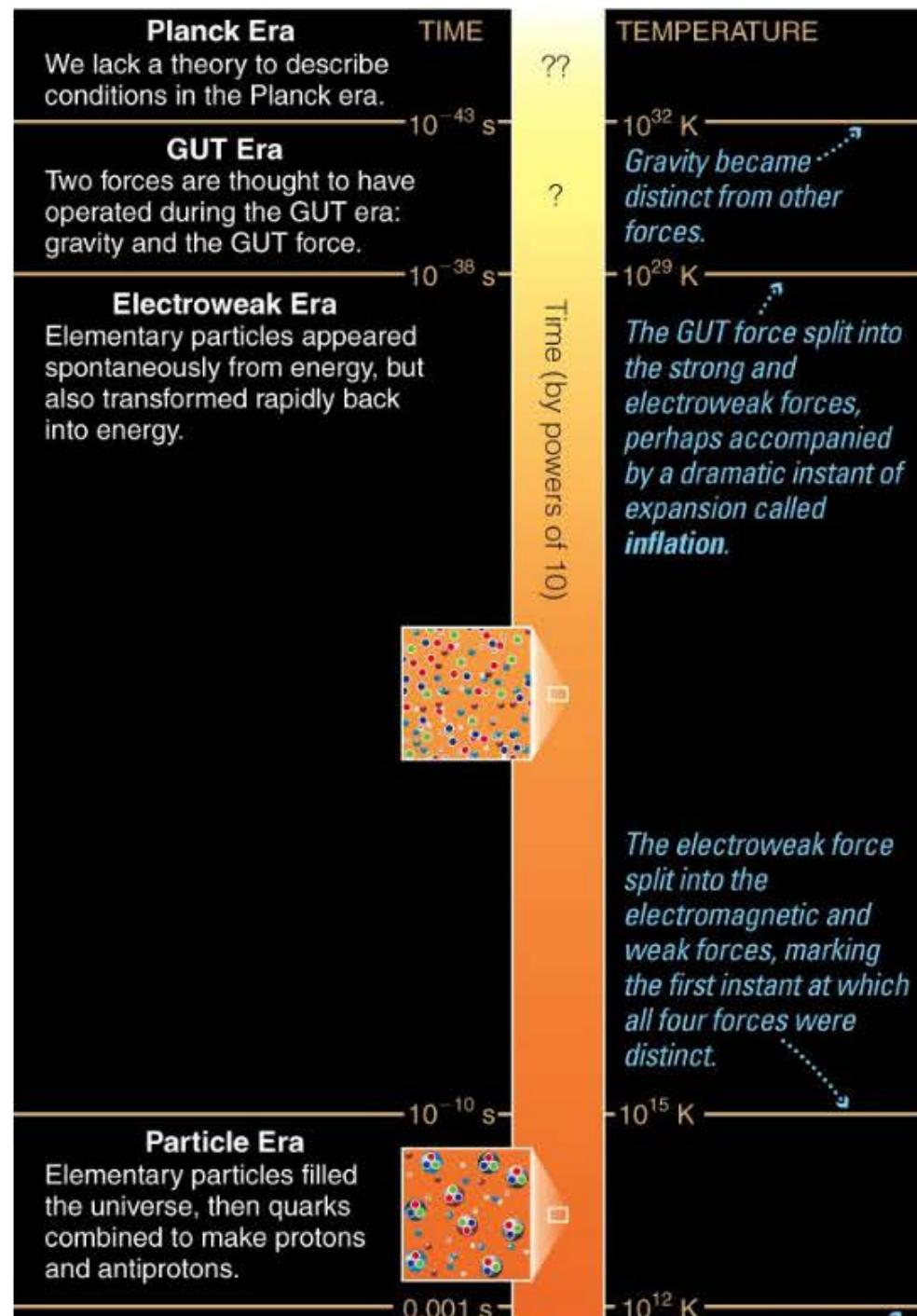
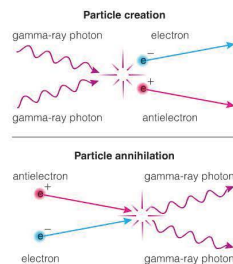
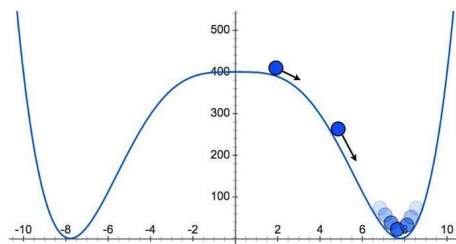
Hubble's Data (1929)

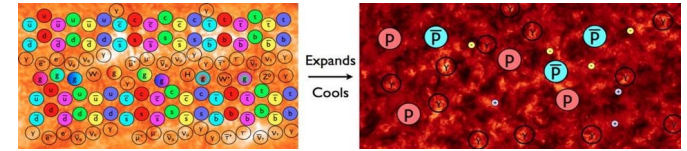
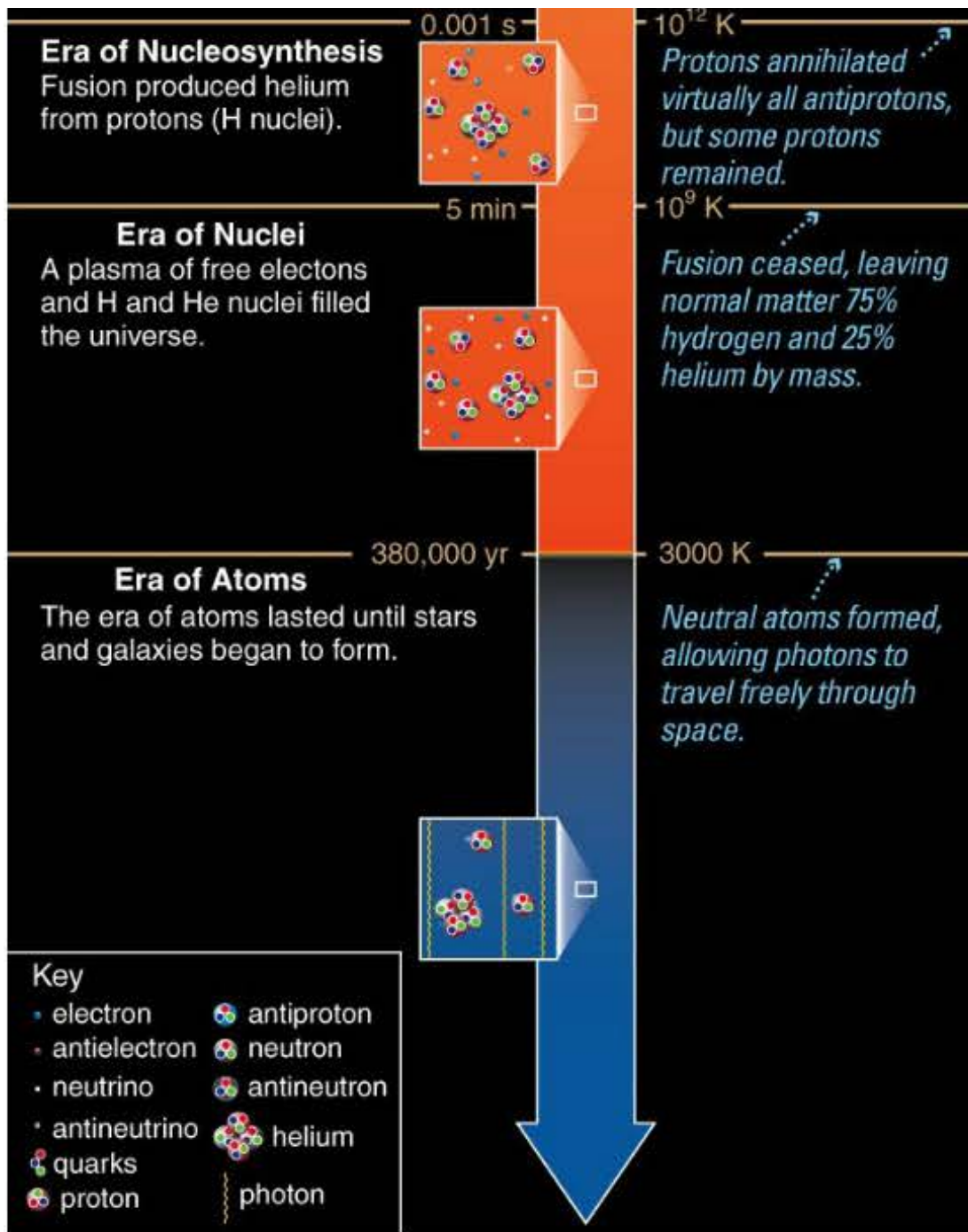






Inflacija je raširila Svemir, dala mu je svugdje iste početne uvjete, ali raširila fluktuacije – sjeme za područje veće i manje gustoće u našem današnjem Svemiru. Inflacija je možda ključ za razumijevanje je, iz čega su sve te čestice, antičestice i zračenje prvi put nastali? inflacija je morala prestati. inflacija se događa kada se polako kotrljate niz potencijal, ali kada se konačno skotrljate u dolinu, inflacija prestaje, pretvarajući tu energiju koja se oslobađa u materiju, antimateriju i zračenje, stvarajući ono što znamo kao Hot Big Bange.





Današnji svemir je izgrađen od materije (a ne antimaterije). Morao je postojati neki proces koji je stvorio nešto više čestica nego antičestica (u iznosu od oko 1-na-1,000,000,000) iz početnog simetričnog stanja, što je rezultiralo da naš vidljivi Svemir ima oko  $10^{80}$  čestica materije i preostalih  $10^{89}$  fotona. Kako se Svemir širi i hladi, nestabilne čestice i antičestice se raspadaju, dok se parovi materija-antimaterija anihiliraju, a fotoni se više ne mogu sudarati pri dovoljno visokim energijama da bi stvorili nove parove čestica i antičestica.



## COSMIC CONTEXT FIGURE 23.5 The Early Universe

The Big Bang theory is a scientific model that explains how the present-day universe developed from an extremely hot and dense beginning. This schematic diagram shows how conditions in the early universe changed as the universe expanded and cooled with time.

- 1 Our expanding universe must have started out much hotter and denser than it is today because the expansion caused matter and energy to cool down and spread out with time.

This illustration depicts how a small portion of the entire universe changes as it expands with time, but the actual expansion is much greater than that shown.

This bright spot represents the instant of the Big Bang, when the universe came into existence.

This dramatic widening represents inflation—the rapid expansion that may have happened at the end of the GUT era.

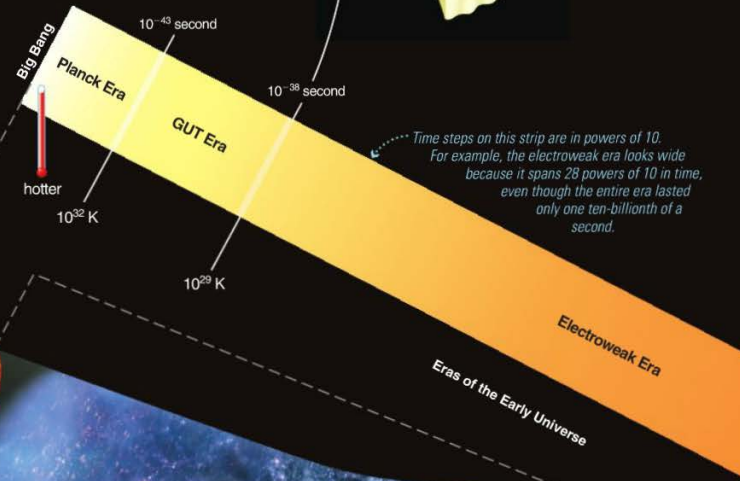
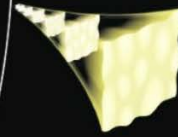
The early universe was filled with bright light everywhere. The gradually changing color represents the gradually cooling temperature over time.

This blotchy surface at 380,000 years marks the moment when photons first streamed freely through the universe. We can still see those photons today as the cosmic microwave background.

After the release of the cosmic microwave background, the universe was dark until the birth of stars and galaxies.

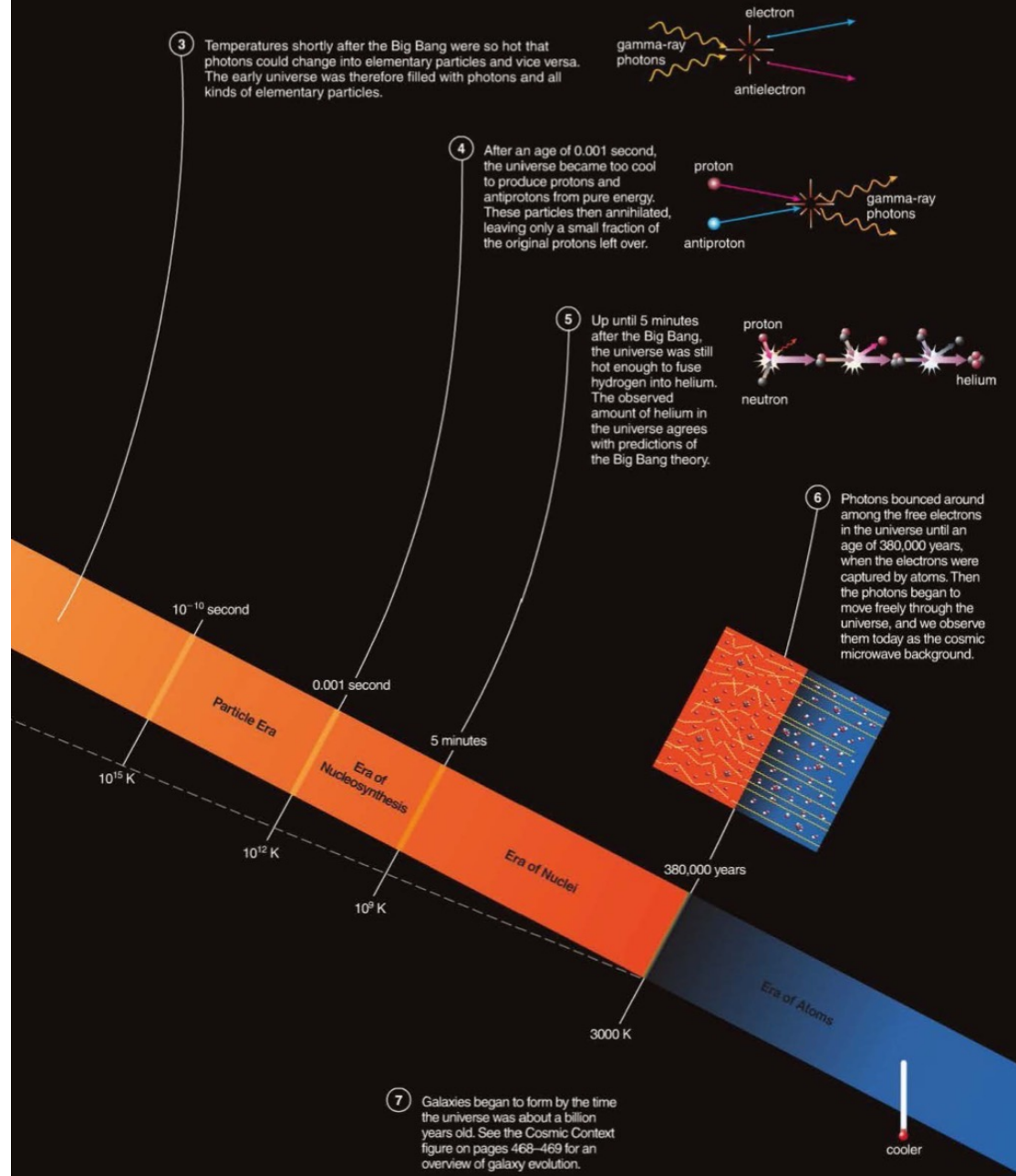
The era of galaxies was under way by the time the universe was about a billion years old, and it continues to this day.

- 2 As the universe cooled down, it may have undergone a brief period of very rapid expansion known as *inflation* that could account for several key properties of today's universe.



14 billion years  
(present day)



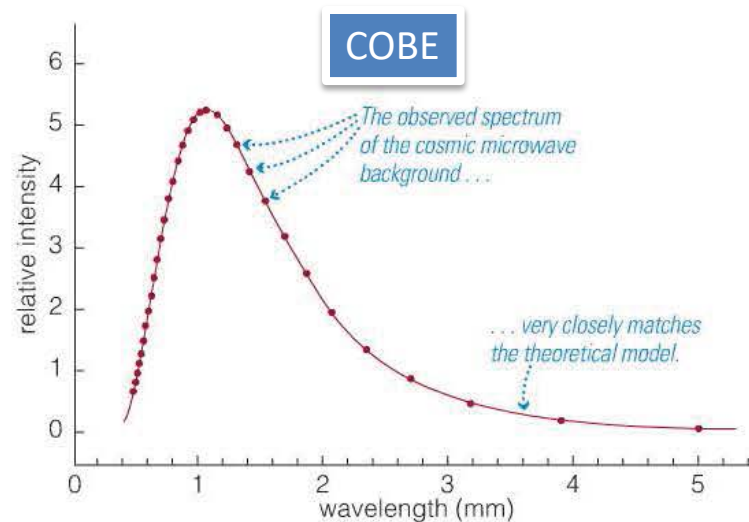
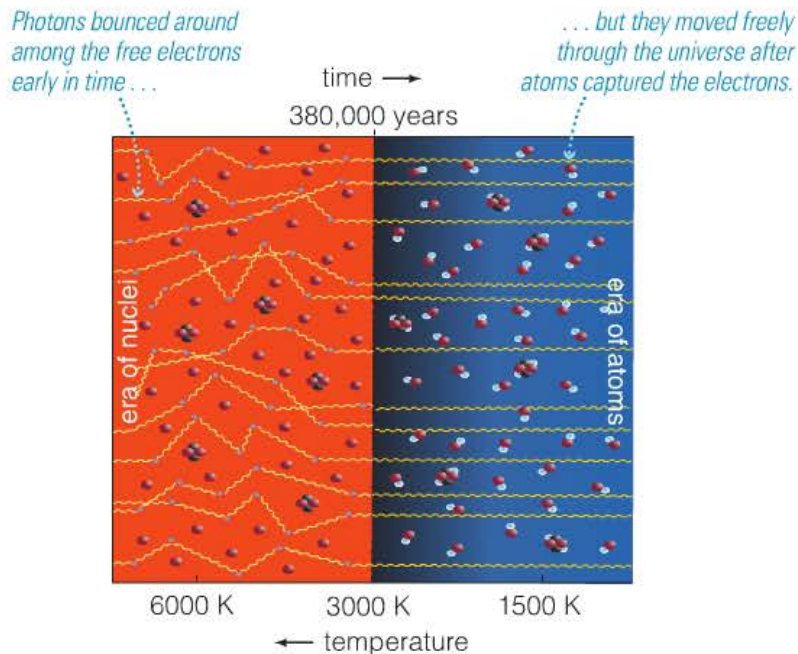


# Dokazi u prilog Big Bang

- Teorija Velikog praska dobila je široko znanstveno prihvatanje iz dva ključna razloga:
- Predviđa da bi zračenje koje se počelo širiti svemirom na kraju "ere jezgri" trebalo biti prisutno i danas.
- Zaista, nalazimo da je svemir ispunjen onim što nazivamo kozmičkom mikrovalnom pozadinom (CMB). Njegove karakteristike se precizno poklapaju s predviđanjima Big Bang modela.
- Predviđa da se dio izvornog vodika u svemiru trebao stopiti u helij tijekom ere nukleosinteze. Promatranja stvarnog sadržaja helija u svemiru blisko odgovaraju količini helija predviđenoj teorijom Big Banga.

# Povijest dokaza Big Banga

- 1965 Arno Penzias i Robert Wilson, mikrovalnom antenom otkrili sveprisutni "šum", prisutan i danju i noć i isti iz bilo kojeg smjera neba.
- Grupa na Princeton-u George Gamow, Ralph Alpher, and Robert Herman 1948 je predvidjela postojanje CMB zračenja



Idealan spektar crnog tijela



# CMB ipak nije uniforman (sreća za nas)

1900-tih COBE izmjerio CMB preko cijelog neba, precizno izmjerio temperature u različitim smjerovima i našao da spektar ipak nije perfektno uniforman.

U svemiru postoje područja koja su gušća ili rjeđa od prosjeka, temperatura varira od mjesta do mjesta za  $10^{-5}$  K.

2000-tih WMAP i Planck detektori još preciznije i detaljnije izmjerili CMB i potvrdili da gustoća varira od mjesta do mjesta.

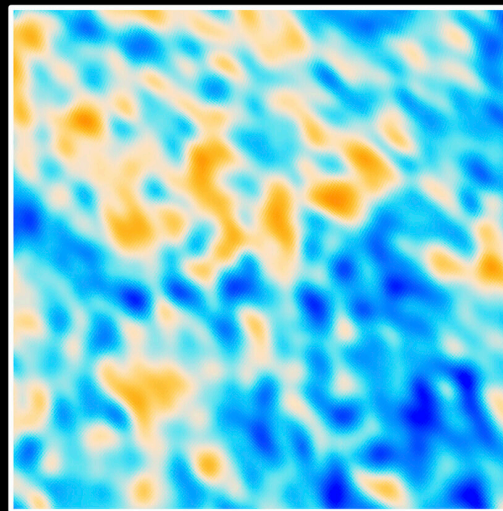
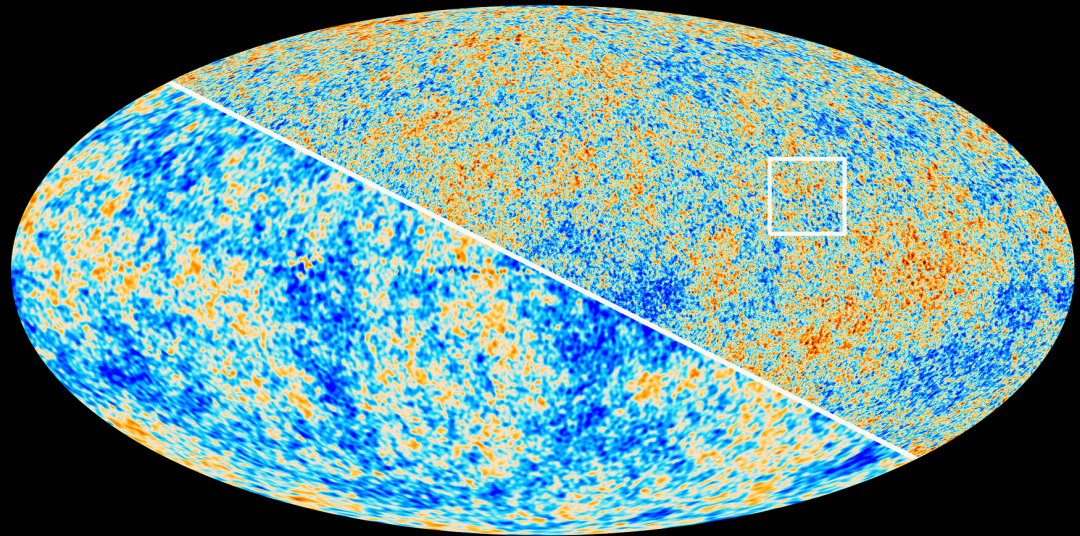
Područja veće gustoće su sjeme iz kojeg nastaju galaksije uslijed gravitacije.

CMB mjerenje pokazuju neuniformnosti u gustoću  $1/100\,000$ . Detaljni računi pokazuju da bi nastale galaksije neuniformnosti u gustoći moraju biti znatno veće od  $1/100\,000$  ? Ima još nešto u svemir. Tamna materija (uz CMB i rotacijske krivulje galaksija na to upućuju)

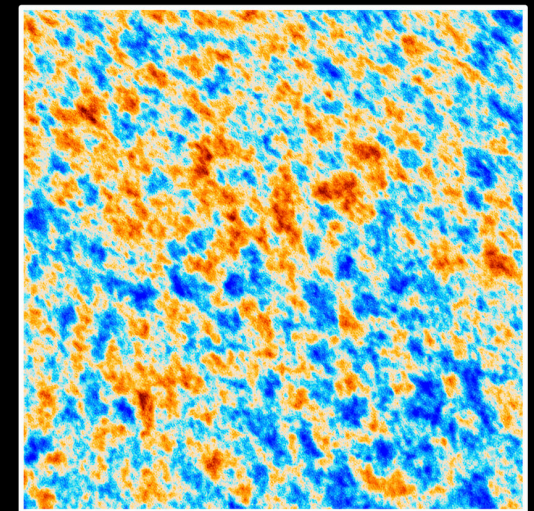
WIMP (kandidati za tamnu materiju) ne utječu na CMB ali svojom gravitacijom potpomažu formiranje nakupina barionske materije koja ima interakciju s CMB fotonima. Područja malo povećane gustoće koje detektira CMB odražavaju područja znatno veće gustoće uslijed nakupine WIMP u tom području.

Detaljno modeliranje temperaturnih varijacija pokazuje konzistentnost s područjima povećane gustoće zbog tamne materije koja je potrebna da bi se objasnila današnja struktura svemira.

*The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP*

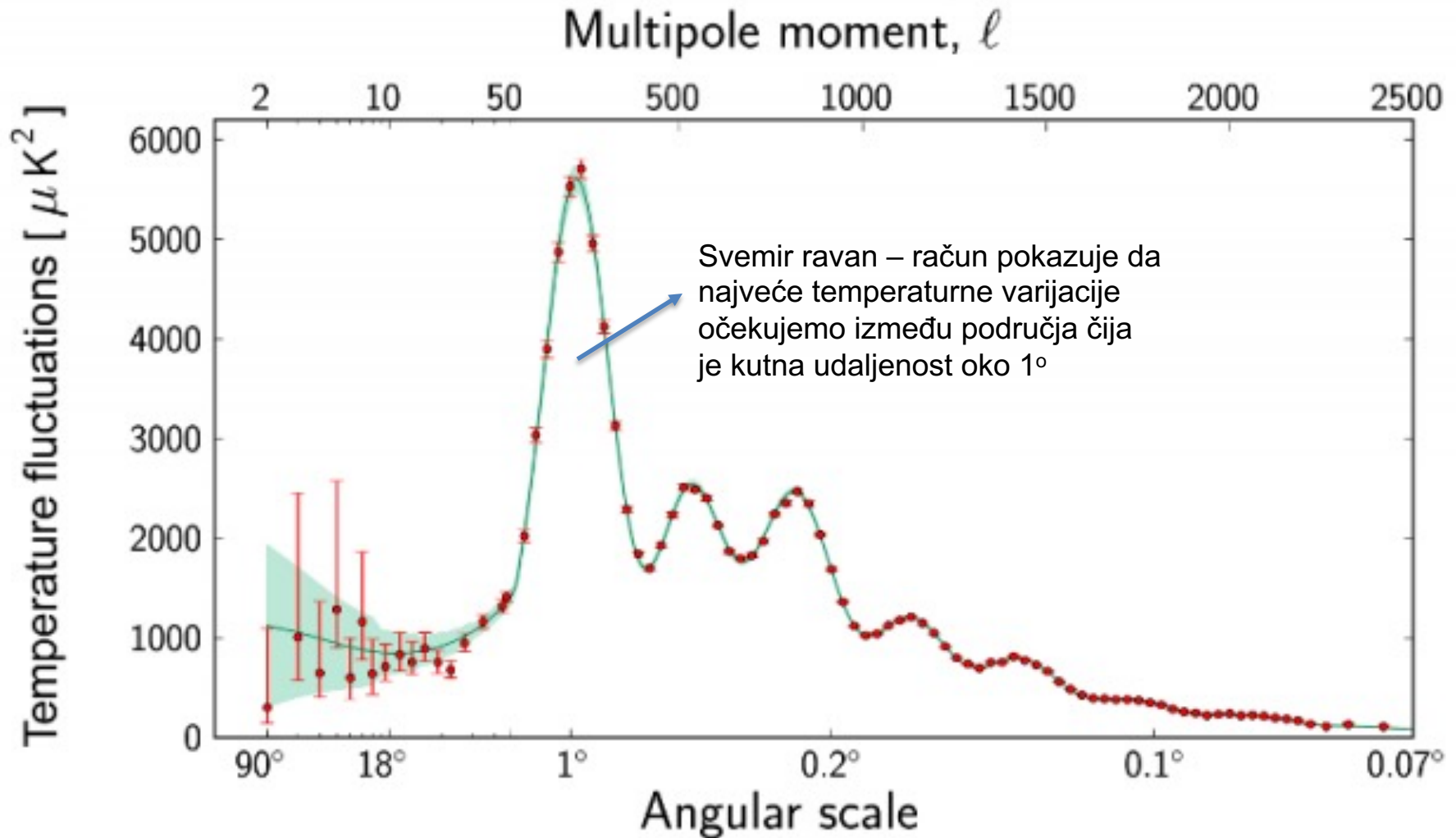


**WMAP**



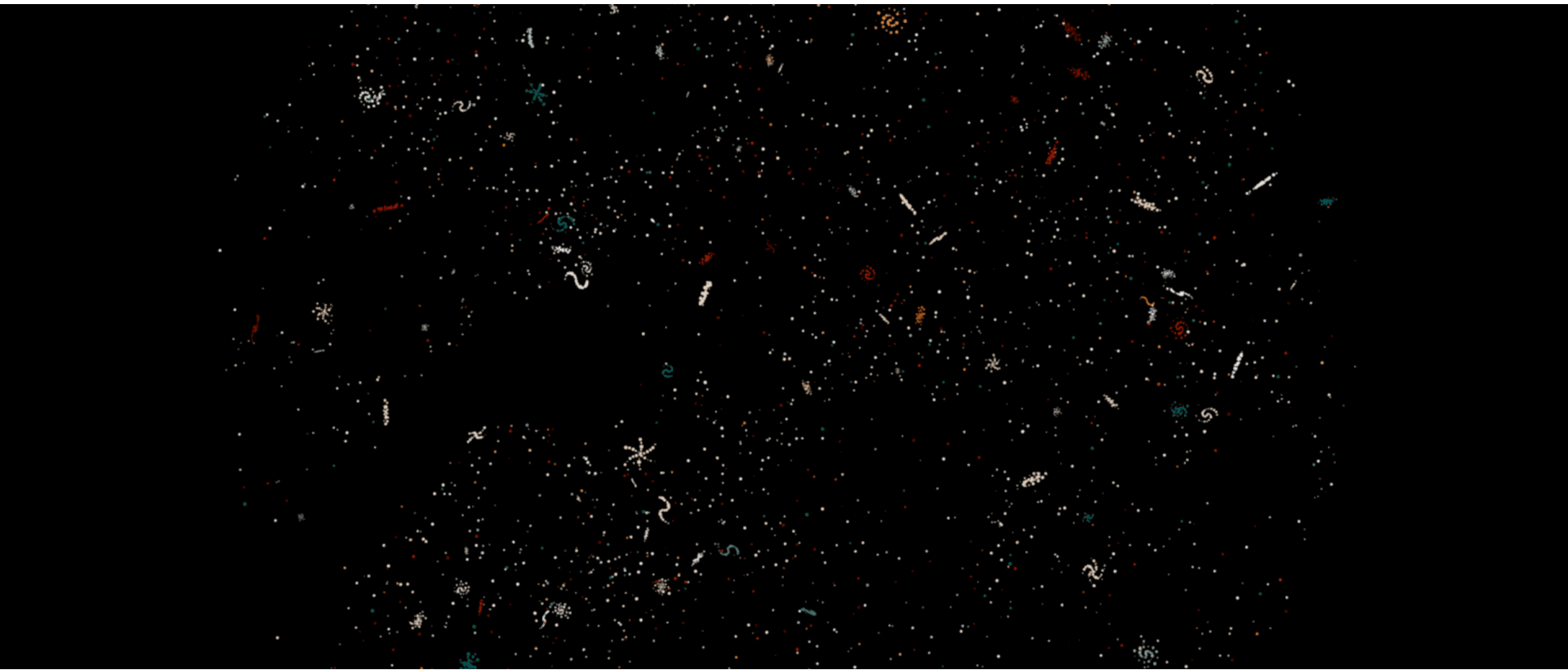
**Planck**

# CMB – fluktuacije temperature



Daje odgovor o geometriji svemira, starosti svemira i sastavu svemira. Analizom spektra CMB se nalaze svi relevantni parametri Big Bang modela svemira

Kvantne fluktuacije gustoće energije u ranom svemiru raširila je inflacija i uzrokovala varijacije u gustoći koje vidimo u CMB.  
Područja pojačane gustoće su sjeme iz kojih je nastala galaksije



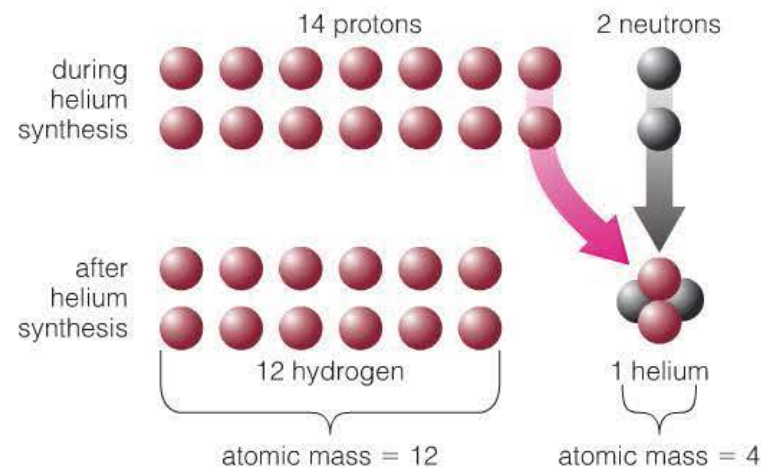
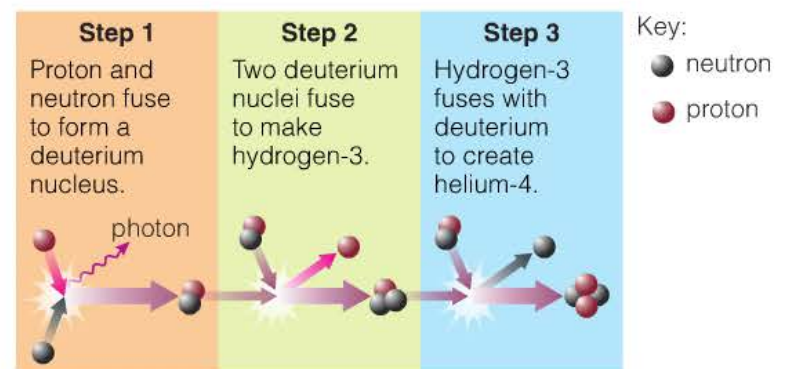


# Kako produkcija lakih elementa podupire BB

- Opažanja:  $\frac{1}{4}$  mase barionske materije je zbog He (naša galaksija – 28% mase opada na He, nema galaksije u kojoj je doprinos mase He manji od 25%)
- Fuzija u zvijezdama može proizvesti oko 10% He
- Većina He u svemiru morala je biti prisutna u protogalaktičkom oblaku iz kojeg su nastale galaksije.
- Svemir je mora biti dovoljno vruć za fuziju vodika u helij
- Trenutna temperatura od 2.73 K CMB omogućuje nam da precizno izračunamo koliko je svemir bio vruć u dalekoj prošlosti te egzaktno predvidimo koliko je udio mase He.
- Procesi tijekom nukleosinteze BBN (koja završava 5 minuta nakon BB):
  - @  $T > 10^{11} \text{K}$ ,  $n \rightleftharpoons p$ , broj neutrona i protona je u ravnoteži
  - Kako se svemir hladi  $n \rightleftharpoons p$ , konverzija favorizira protone ( $m_n > m_p$ ) @  $T < 10^{11} \text{K}$  energija za proizvodnju neutrona nije dostupna
  - Reakcija koja  $n \rightarrow p$  se nesmetano odvija i oslobađa se energija, tako da opadanje temperature zbog širenja svemira ne utječe na raspada neutrona u proton
  - @  $T < 10^{10} \text{K}$  broj protona postaje veći od broja neutrona

# Big Bang nukleosinteza (BBN)

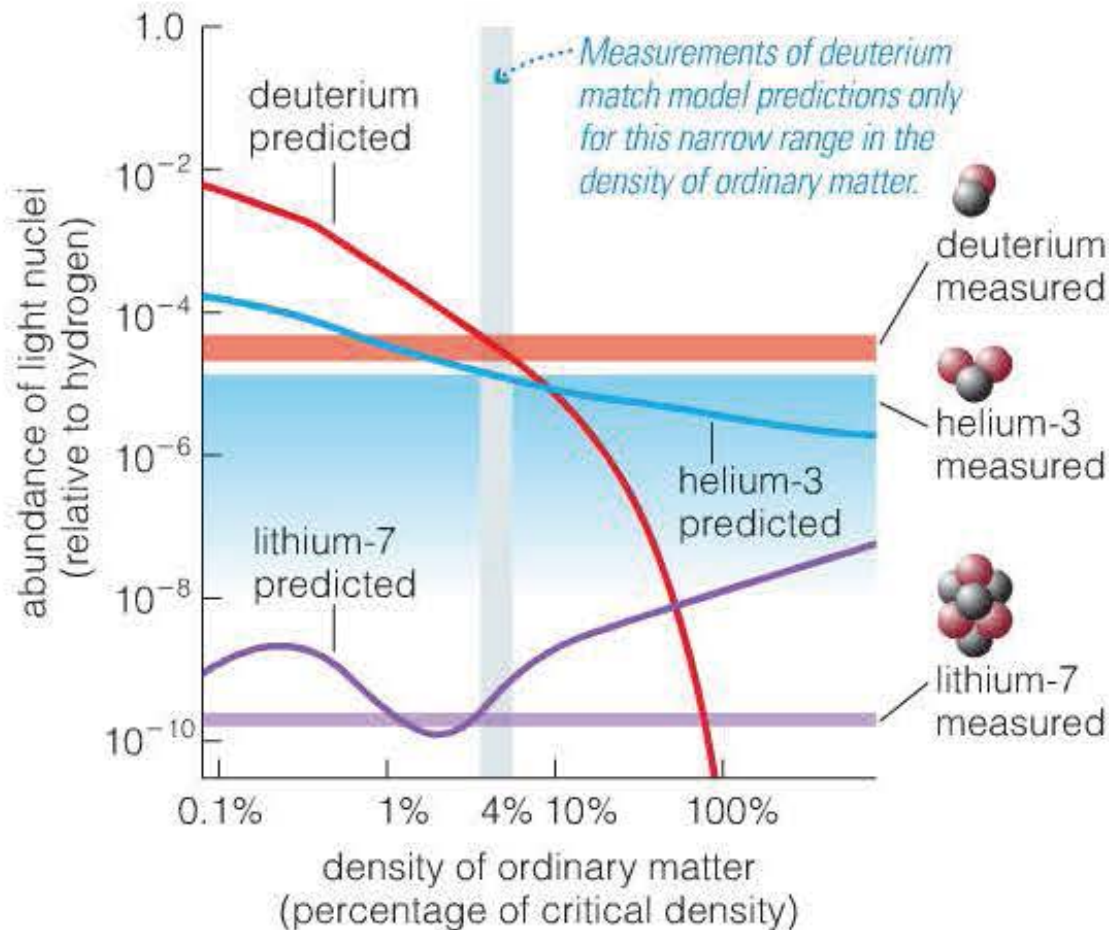
- Kroz sljedećih nekoliko minuta svemir je dovoljno vruć i gust da podržava nuklearnu fuziju neutrona i protona u deuterij
- Odvija se i fuzija deuterija u helij, ali i fotoni (gama zrake) razbijaju helij (helij se proizvodi i disocira)
- Fuzija stvorila He kojeg danas opažamo kad temperatura padne toliko da fotoni nemaju dovoljno energije da disociraju He (svemir star 1 cca. Minuta)
- Račun pokazuje @  $t \approx 1$  min omjer  $p/n \approx 7$
- $1/7$  je kao  $2/14$ ; Ima 12 jezgri vodika (p) na jednu jezgru He.
- Omjer mase H prema masi He je  $12/4$  odnosno 75 % (masa -p) 25 % ( $^4\text{He}$ )
- **BBN daje jednoznačnu predikciju kemijskog sastava ranog svemira koja je potvrđena opažanjem.**



Bravo Bing Bang



## Zašto svemir nije proizveo teže elemente?

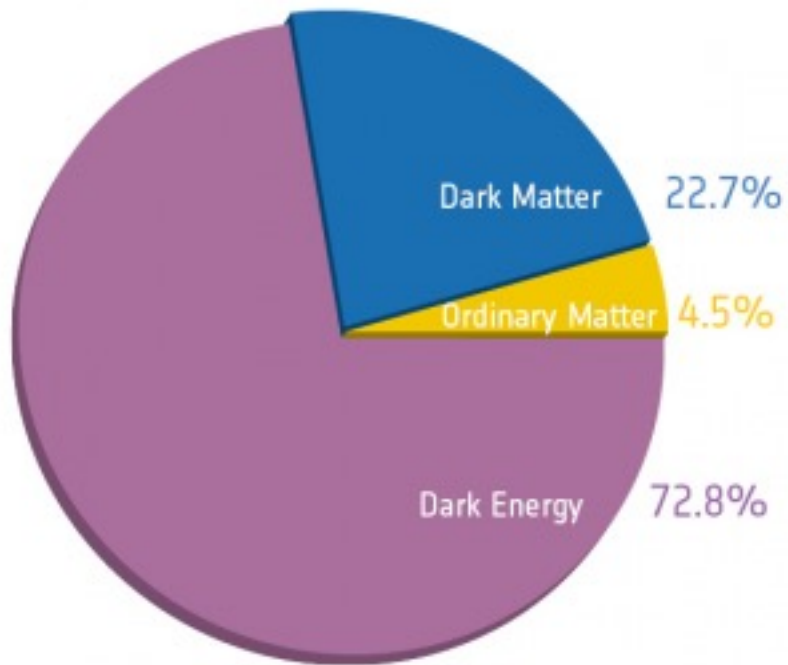


Opažanja pokazuju da samo 1 od 40 000 jezgri vodika je izotop deuterij. Proračun temeljen na prisutnosti deutrija pokazuje da je gustoća obične barionske materije čini oko 4 % kritične gustoće.

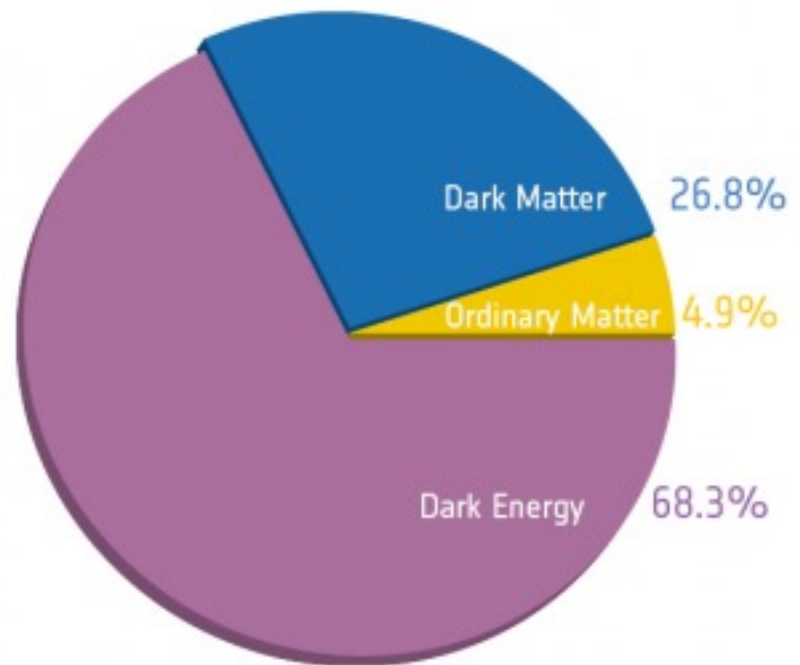
**PS. Malo kasnije o kritičnoj gustoći**

Ovaj grafikon pokazuje kako izmjerene količine deuterija, helija-3 i litija-7 dovode do zaključka da je gustoća obične materije oko 4 % kritične gustoće. Tri horizontalna pojasa pokazuju izmjerenu količinu (debljina svakog predstavlja raspon nesigurnosti u mjerenjima). (Gornji rub plave trake označava gornju granicu količine helija-3; donja granica još nije utvrđena). Tri krivulje predstavljaju modele temeljene na teoriji Big Bang; ove krivulje pokazuju kako očekivana brojnost svake vrste jezgre ovisi o gustoći obične materije u svemiru. Primijetite da se predviđanja (krivulje) podudaraju s mjerenjima (horizontalni pojasevi) samo u sivoj okomitoj traci, koja predstavlja gustoću od oko 4 % kritične gustoće.

# Sastav svemira danas



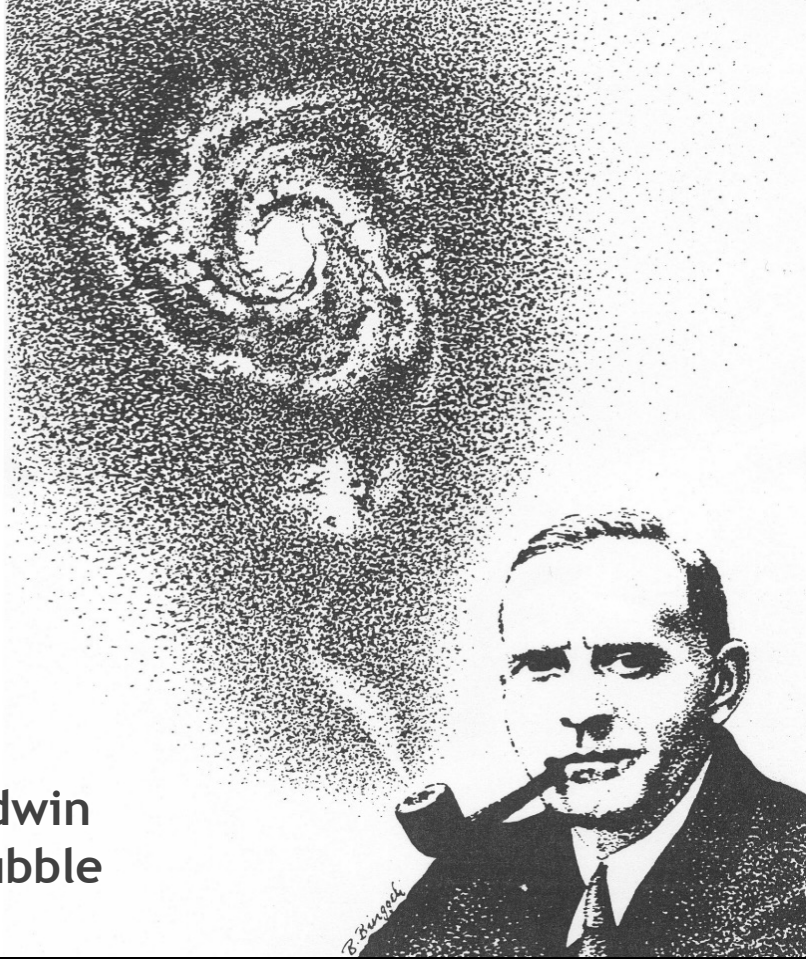
Before Planck



After Planck



# Expanding Universe and the Big Bang



**Hubble's law**

$$V_{\text{expansion}} = H_0 \times \text{distance}$$

**Hubble's constant**

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

**Measured value**

$$h = 0.72 \pm 0.04$$

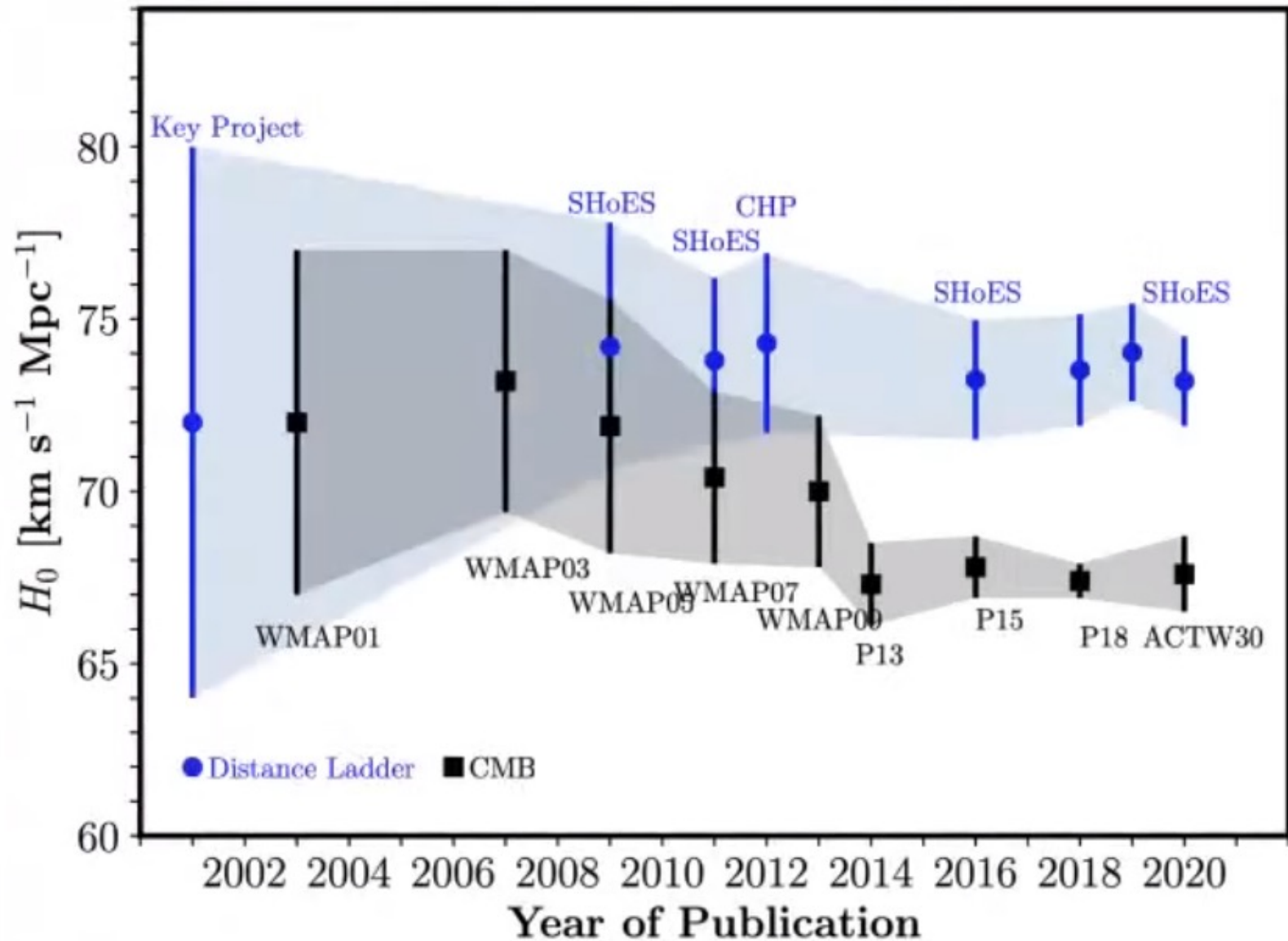
$$\begin{aligned} 1 \, \text{Mpc} &= 3.26 \times 10^6 \, \text{lyr} \\ &= 3.08 \times 10^{24} \, \text{cm} \end{aligned}$$

**Expansion age of the universe**

$$t_0 \approx H_0^{-1} \approx 14 \times 10^9 \, \text{years}$$



# Hubblova tenzija



# Kozmološki princip – homogenost i izotropnost

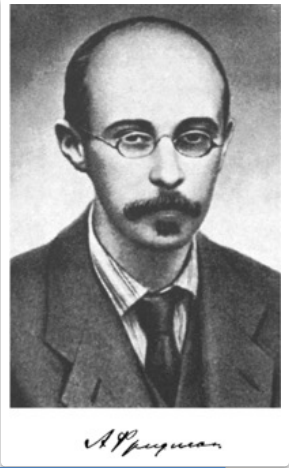
- Svemir izgleda isto opažan iz bilo koje točke (homogen) i u bilo kojem smjeru (izotropan)



Razumna i moćna pretpostavka, koja pojednostavljuje matematički/fiziklani model evolucije svemira



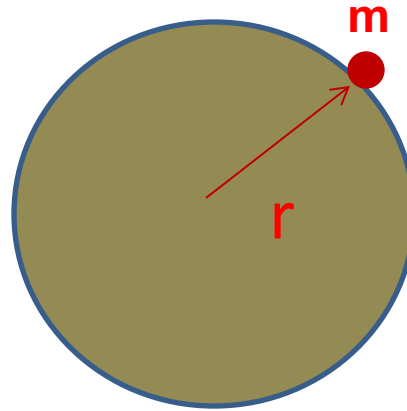
# Friedmann equation (1922)



- Friedmann-ova jednačba opisuje širenje svemira:

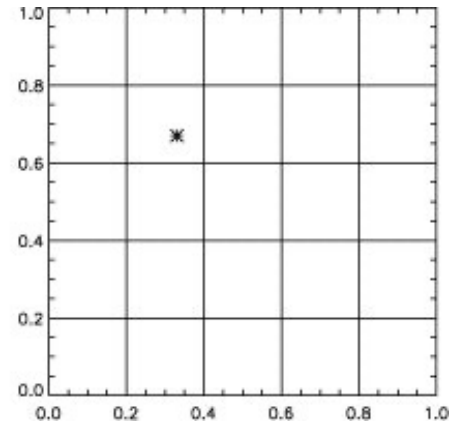
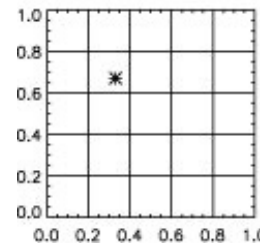
$$U = T + V = \frac{1}{2} m \dot{r}^2 - \frac{4\pi}{3} G \rho r^2 m$$

$$\vec{r} = a(t) \vec{x} \quad k = -\frac{2U}{mc^2 x^2}$$



Uniform expanding medium

- $r$  – fizikalna udaljenost;  $r = a(t)x$
- $x$  – comoving koordinate (fiksne  $dx/dt = \dot{x} = 0$ )
- $a(t)$  – cosmic scale factor
- $k$  – konstanta za dani svemir
- $\rho$  – gustoća svemira



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

Friedmann equation

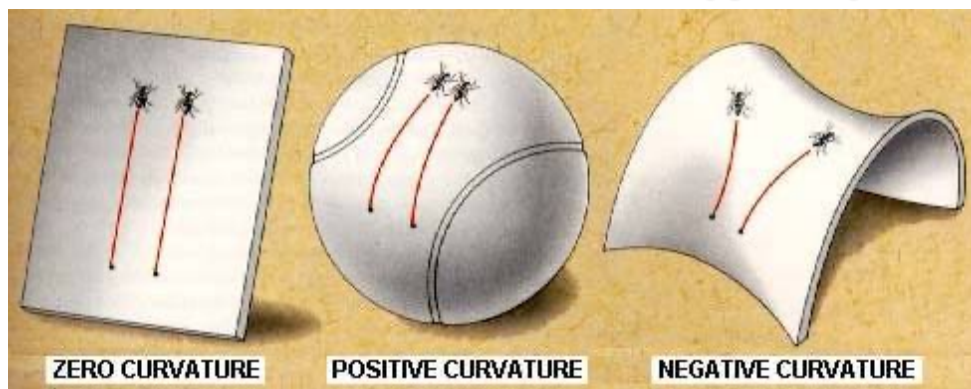
# Geometrija svemira

- Gravitacija je posljedica geometrije svemira – zakrivljenosti prostor-vremena
- Zakrivljenost prostorvremena je definirana gustoćom materije (tvar + energija)
- $k$  – povezan s energijom,  $k$  mjeri zakrivljenost prostor vremena.

$k=0$

$k=1$

$k=-1$



curvature	geometry	angles of triangle	circumference of circle	type of Universe
$k > 0$	spherical	$> 180^\circ$	$c < 2\pi r$	Closed
$k = 0$	flat	$180^\circ$	$c = 2\pi r$	Flat
$k < 0$	hyperbolic	$< 180^\circ$	$c > 2\pi r$	Open

Homogenost svemira znači i da je zakrivljenost u bilo kojoj točki ista. Samo tri prostora mogu imati homogenu zakrivljenost. (Parabola i elipsa nemaju svugdje istu zakrivljenost)

# Jednadžba fluida

- To solve Friedmann equation we need to know density of stuff in the Universe,  $\rho(t)=?$   $\rho(a)=?$
- From first law of thermodynamics  $dE+pdV=TdS$
- $V=(4\pi/3)a^3$ ,  $dV=4\pi a^2 da$
- $E=mc^2 = E=(4\pi/3) a^3 \rho c^2$
- $dS=0$ , reversible adiabatic expansion

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) = 0$$

- **Fluid equation** which just specify what is going with  $\rho$  when the pressure is known.
- $p=p(\rho)$  – **equation of state**
- When we know  $p=p(\rho)$  Friedmann and fluid equation are all we need to describe the evolution of the Universe

# Akceleracijska jednađžba

- Kombiniranje Friedmannove jednađžbe i jednađžbe fluid dobije se akceleracijska jednađžba:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

- $a$  - druga derivacija po vremene govori koilak je akceleracija scale faktor. Scale faktor  $a$  nema jedinica, na jedinica za prvu derivaciju po vremenu ( $da/dt$ ) tj.  $a$  je  $(1/s)$  a za drugu derivaciju po vremenu  $(1/s^2)$
- Uočite da ako materija ima neki tlak da to povećava gravitacijsku silu i doprinosi usporavanju širenja svemira. Iz gornje jednađžbe je razvidno da kad bi postajala neka tvar u svemiru čiji je tlak negativan to bi doprinosilo ne privlačnoj već odbojnoj sili tj. širenju svemira. Ako su svi članovi na desnoj strani jednađžbe negativni (a to će biti za slučaj kad su tlak i gustoća pozitivni) onda je druga derivacija scale faktora po vremenu negativna a što ukazuje da se širenje usporava.**
- Kad bi postajala "materija" u svemiru čiji je tlak negativan ta bi komponenta doprinijela ubrzavanju širenju a ne usporavanju ... (kozmołška konstanta)**



# Rješenje jednačbe svemira $a(t)$

- Rješenja jednačbi za dva slučaja:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) = 0$$

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

- **Sastavom svemira dominira materija** (nerelativističke čestice, imaju tlak  $p=0$  iz za  $k=0$ , ravan svemir, rešenja su:

$$\rho(t)=\rho_0/a^3; a(t)=(t/t_0)^{2/3}; H=2/(3t) \quad (\rho_0 - \text{trenutna gustoća sada})$$

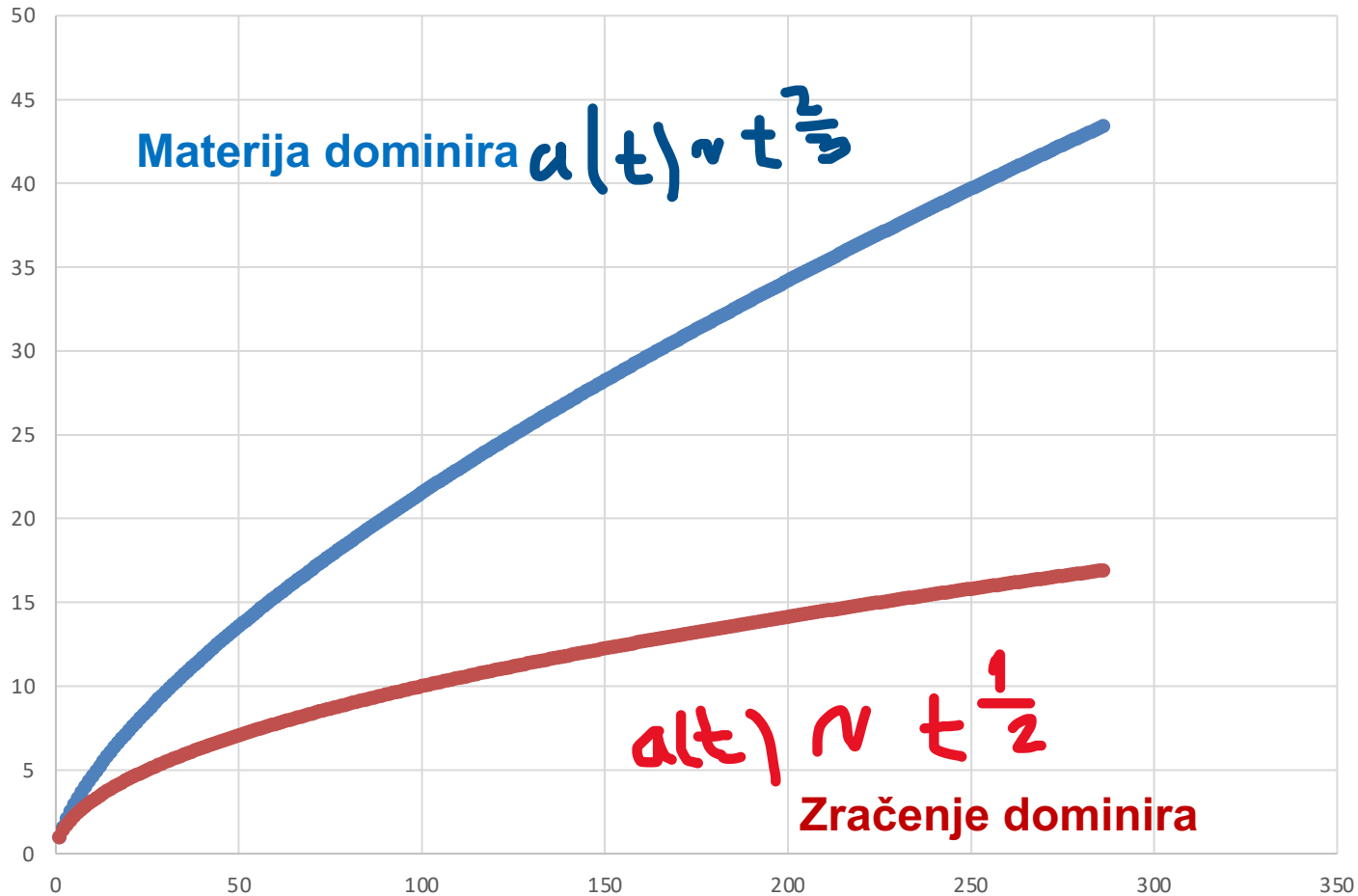
- **Sastavom svemira dominira zračenje**, uz gustoći  $\rho$  imamo tlak  $p=\rho c^2/3$ , reješenje su za  $k=0$ :

$$\rho(t)=\rho_0/a^4; a(t)=(t/t_0)^{1/2}; H=1/(2t)$$

- Svemir se širi sporije kad je dominantna sastavnica svemira zračenje (tada gravitaciji ne doprinosi samo gustoća (masa) već i tlak.
- Opći slučaj:  $\rho = \rho_{\text{mat}} + \rho_{\text{rad}}$
- Gustoća zračenja opada brže od materije, tako svemir koji dominira zračenje nakon nekog vremena, malo koliko bila mala komponenta materije, na kraju ipak sastavom svemira će u nekom trenutku početi dominirati materija, kao je i slučaj sada za naš svemir

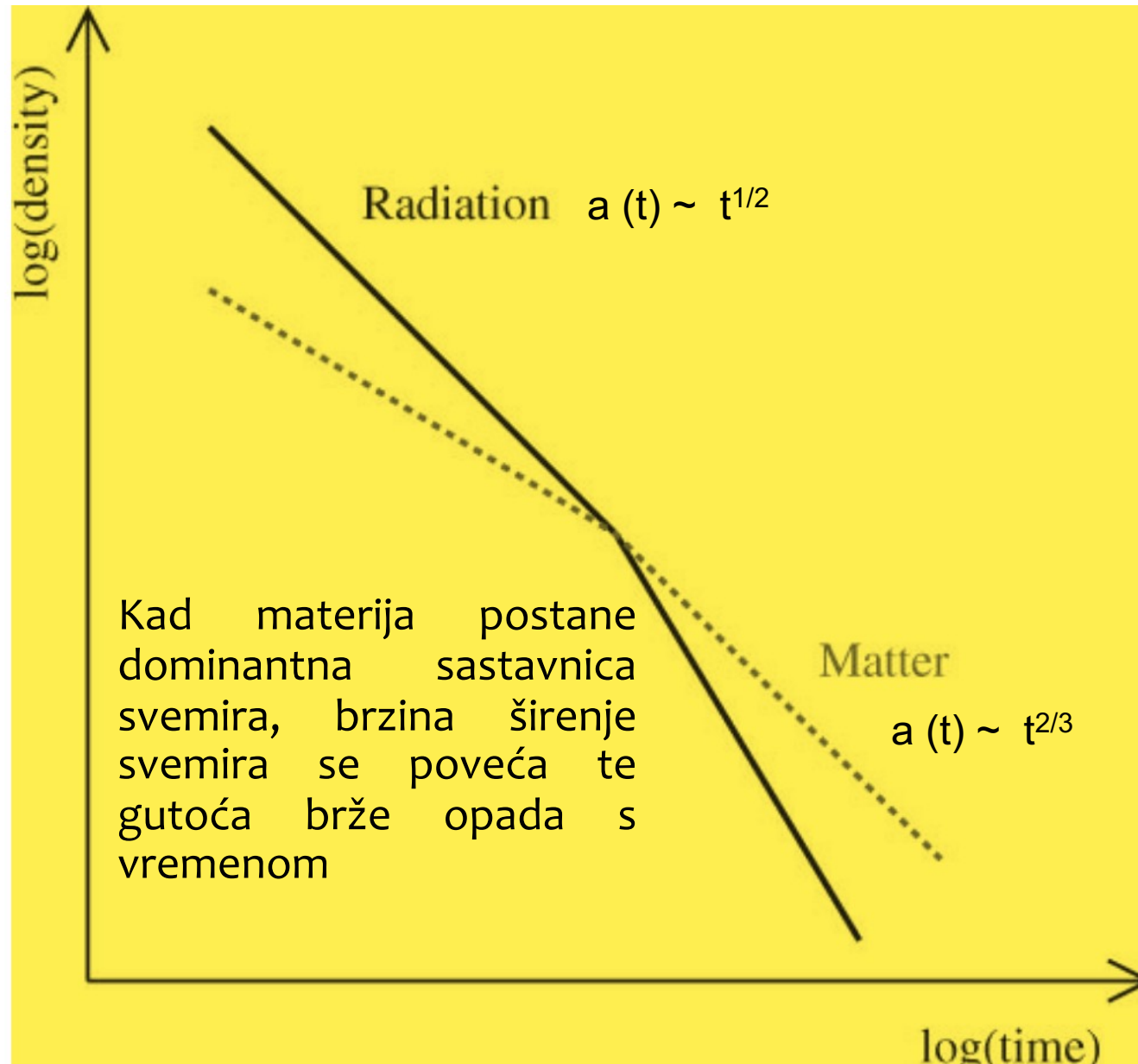
# Scale faktor vs. vrijeme

Q

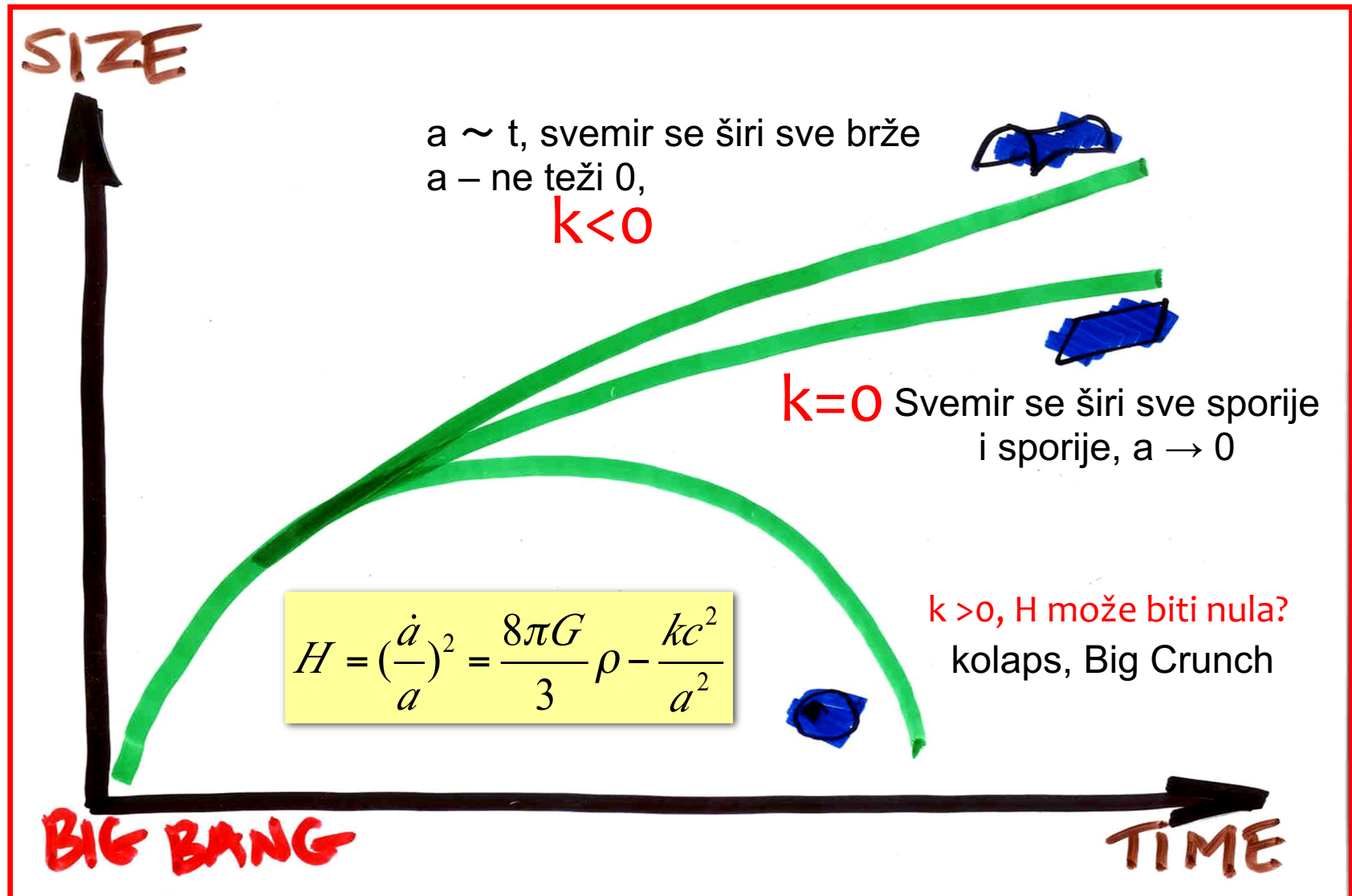


$t$  (a.u.)

# Svemir -mješavina materije i zračenja



# Evolucija svemira i zakrivljenost prostor vremena





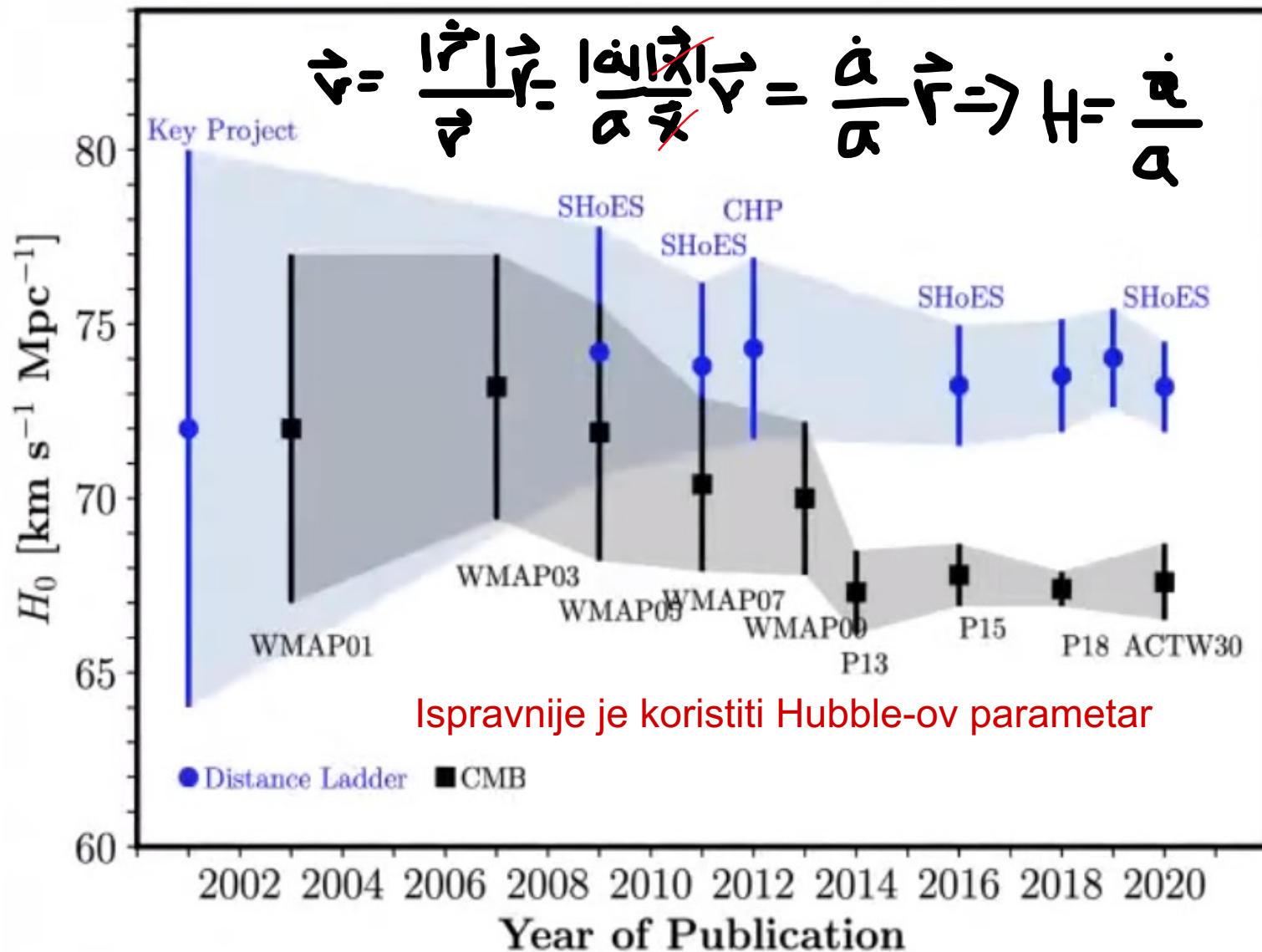
# Opažачka kozmologija

- Bing Bang model ne daje jedinstven opis našeg sadašnjeg svemira. Definira parametre modela koji se moraju odrediti promatranjem kako bi se odlučilo koja verzija modela najbolje opisuje naš Svemir.
- Prirodno je prvo izmjeriti trenutnu vrijednost Hubblovog parametera (**H<sub>0</sub> – sada**), preko relacije **H<sub>0</sub>=v/r**
- Potrebno je izmjeriti brzinu **v –kojom se udaljavaju galaksije i udaljenost galaksije r**
- Brzina v se dobije iz pomaka prema crvenom
- Udaljenost r – znatno zahtjevnije preko ”standardnih svijeća” SNIa
- Hubblov parametar se često izražava ovako:  
**H= v/r=100 h ((km/s)/Mpc,**
- **Danas ( h=0,68 – 0,74) Hubble tension**
- Galaksija udaljena 100 Mpc (330 milijuna l.y.) udaljava se od nas brzinom of 68 000(74 000) km/s

$$H = 100 \left( \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}} \right) h$$

# Hubblova tenzija

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{a}{a} \vec{r} \right) = \frac{\dot{a}}{a} \vec{r} \Rightarrow H = \frac{\dot{a}}{a}$$



# Kritična gustoća

- Za danu vrijednost  $H$  i uz pretpostavku da je svemir ravan ( $k=0$ ) možemo naći kritičnu gustoću  $\rho_c$  ( $G=6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ):

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

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

$$\begin{aligned}\rho_c &= 1,88 h^2 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \\ &= 2,78 h^{-1} 10^{11} M_\odot / (h^{-1} \text{ Mpc})^3\end{aligned}$$

- Kritična gustoća je oko 6 - 7 atoma vodika po metru kubnom ( $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) (Napomena: za slučaj da je svemir ravan i da je  $H$  precizno izmjereno)

# Parametar gustoće $\Omega$

- Friedmannova jednačba (Big Bang model) ne daje jednoznačan opis evolucije svemira, već je potrebno opažanjem izmjeriti,  $H$  – parameter koji opisuje širenje svemira i  $\rho$  – sastav svemira
- Uobičajena je praksa definirati kozmološki model preko nekoliko parametara koji se mogu mjeriti tako odlučiti koji kozmološki model najbolje opisuje naš svemir.
- Koji su to parametri
  - Hubbleov parameter (?)  **$H = 100 h \text{ km}/(\text{sMpc})$ ,  $h = 0,72 \pm 0,08$**

$$\vec{v} = \left| \frac{\vec{r}}{\vec{r}} \right| \dot{\vec{r}} = \frac{\dot{a}}{a} \vec{r} = H \vec{r} \quad H = \frac{\dot{a}}{a} \quad H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2}$$

→  
k=0,  
flat universe

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

$\rho_c = 1,88 h^2 \times 10^{-26} \text{ kg}/\text{m}^3$  – kritična gustoća

Density parameter:  $\Omega(t) = \rho/\rho_c$



$$\Omega - 1 = \frac{k}{a^2 H^2}$$

Za  $\Omega = 1$ ,  $\rightarrow k=0$  svemir ostaje ravan za sva vremena



# Parametar gustoće $\Omega$

- Relacija  $\Omega - 1 = \frac{k}{a^2 H^2}$  (Friedmannova jednačba drugačije zapisana pokazuje da za slučaj  $\Omega=1$ , svemir ravan ( $k=0$ ) a budući je  $k$ - konstanta, svemir ostaje ravan za sva vremena.
- Ovo vrijedi za bilo koji tip materije u svemiru, a naš svemir sadrži različite oblike materije,
- Ovakav zapis Friedmannove jednačbe se može koristiti za različite tipove materije u svemiru (tvar, zračenje,...)
- Možemo definirati parametar gustoće za član koji opisuje zakrivljenost svemir

$$\Omega_k \equiv -\frac{k}{a^2 H^2}$$

- Friedmannova jednačba se može zapisati u ovom obliku

$$\Omega + \Omega_k = 1$$

# Parametar usporavanja širenja $q_0$

- Može se definirati parameter usporavanja širenja svemira:

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}(t_0)}{a(t_0)} \frac{1}{H_0^2} = -\frac{a(t_0)\ddot{a}(t_0)}{\dot{a}^2(t_0)}$$

- Razumna je pretpostavka da se svemir zbog gravitacijskog privlačenja, bilo kad svemirom dominira materija bilo zračenje, širi sve sporije i sporije.
- Naravno, krenula su mjerenja usporavanja širenja svemira  $q_0$ .
- Dvije nezavisne grupe koristile su udaljene supernova tip Ia (standardne svijeće) te iz mjerenja njihovog sjaja (udaljenost) i pomaka ka crvenom (brzina kojom se udaljavaju) brzine širenja kroz povijest svemira ... očekujući da se svemir širio brže dok je bio mlađi a kako stari da se širi sve sporije i sporije
- Dvije grupe (Supernova Cosmology Project & High-Z Supernova Search Team) izmjerile ubrzano širenje svemira ( $q_0 < 0$ ) a ne usporavanje koje su očekivali (1998) !!!!??**
- Što to još ima u svemiru ? Jedan od najdramatičnijih rezultata opažanja svemira!**

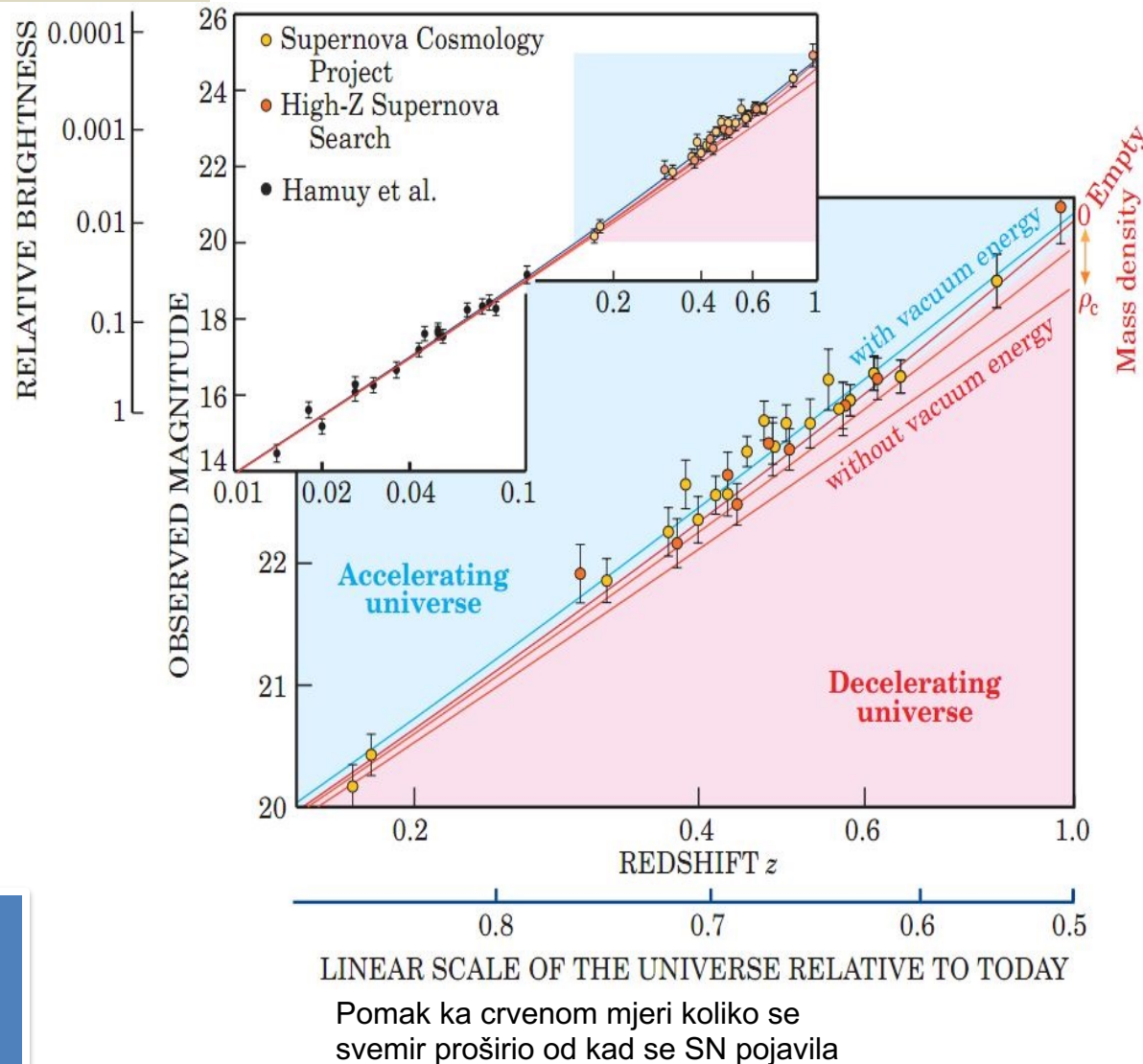
# Opažanje: ubrzano širenje svemira

Sjaj se smanjuje jer su dalje a dalje su jer brzina udaljavanja raste

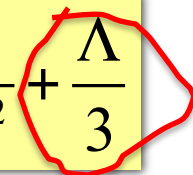
Uspoređujući promatrani sjaj supernove s očekivanim sjajem na temelju crvenog pomaka i udaljenosti, astronomi su mogli odrediti koliko se brzo svemir širio u vrijeme kada je supernova eksplodirala.

Ono što su otkrili bilo je iznenađujuće: udaljena supernova la bila je konstantno slabija od očekivanog, što ukazuje na to da se stopa širenja svemira s vremenom ubrzava, a ne usporava kao što se ranije mislilo.

Brzina kojom se daleke galaksije udaljavaju od nas kontinuirano raste s vremenom.



# Kozmološka konstanta/taman energija – još jedan parametar ☺

- Einstein “greatest blunder” (najveća glupost) nije vjerovao svojim vlastitim jednačbama. Da je vjerovao otkrio bi da se svemir širi ☺!?.  


$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

- Da osigura statičan svemir uvodi kozmološku konstantu,  $\Lambda$  da dobije  $H=0$  ( sva tri člana na desno kad se zbroje dobije se nula)  
Akceleracijska jednačba s kozmološkom konstantom

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda}{3}$$

- $\Lambda$  može biti pozitivan i negativan
  - $\Lambda > 0$  efektivno djeluje kao odbojna sila
  - $\Lambda < 0$  efektivno djeluje kao privlačna sila
- Ako je  $\Lambda > 0$  i dovoljno velik može nakon nekog vremena nadvladati gravitacijsko privlačenje i učiniti da se svemir ubrzano širi.



# Kozmološka konstanta – fluid u svemiru

- Prikladno je opisati kozmološku konstantu kao fluid čija je gustoća  $\rho_\Lambda$  a tlak  $p_\Lambda$
- Definiramo li gustoću energije za  $\Lambda$ , kao :  $\rho_\Lambda = \Lambda / (8\pi G)$ , tada Friedmannova jednačba poprima oblik:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho + \rho_\Lambda) - \frac{k}{a^2}$$

- Parametar gustoće za kozmološku konstantu je  $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_c$ ;
- Koliki je efektivni tlak kozmološke konstante  $\Lambda$  možemo naći ako napišemo jednačbu fluida za  $\Lambda$ :  $\dot{\rho}_\Lambda + 3\frac{\dot{a}}{a} \left( \rho_\Lambda + \frac{p_\Lambda}{c^2} \right) = 0$

- **Po definiciji  $\rho_\Lambda$  je konstanta te je  $\dot{\rho}_\Lambda = 0$** , gornja jednačba fluida za  $\Lambda$ , će biti zadovoljena ako je :

$$\rho_\Lambda + \frac{p_\Lambda}{c^2} = 0$$

- Slijedi:  $p_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2$  – tlak kozmološke konstante je negativan ( $< 0$ )
- Zbog negativnog tlaka kozmološka konstanta djeluje kao odbojna sila. Gustoća energije kozmološkog fluida ostaje konstantna kako se svemir širi.

# Kozmološka konstanta – tamna energija

- Akceleracijska jednažba:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

- Napišimo akceleracijsku jednažbu koja uključuje i kozmološku konstantu opisanu kao fluid gustoće  $\rho_\Lambda$  i  $p_\Lambda$  ( $p_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2$ )

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \rho_\Lambda + \frac{3p}{c^2} - 3 \frac{\rho_\Lambda c^2}{c^2} \right)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} - 2\rho_\Lambda \right)$$

- Kozmološka konstanta se interpretira kao gustoća energije praznog prostora (vakuma) – tamna energija, koja doprinosi sve bržem širenju svemira

# Jeli ravan svemir stabilan ?

- Opažanja ukazuju da je praktički svemir ravan. Kako osigurati stabilnost ravnog svemira ( $k=0$ ) &  $\Omega_{\text{tot}} = \Omega_0 + \Omega_\Lambda = 1$ ?

$$|\Omega_{\text{tot}}(t) - 1| = \frac{|k|}{a^2 H^2}$$

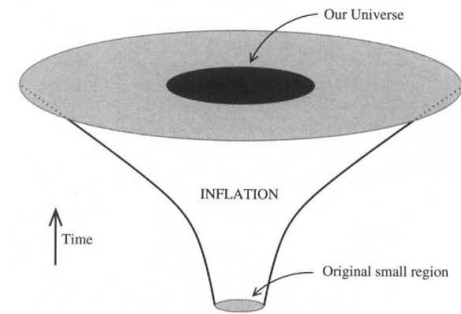
- Ako je  $\Omega_{\text{tot}} = 1$  ostaje takav za sva vremena

$\Omega + \Omega_\Lambda - 1 = \frac{k}{a^2 H^2} \begin{cases} aH^2 \sim t^{-1} - \text{radiation domination} \\ aH^2 \sim t^{-2/3} - \text{matter domination} \end{cases}$	$\begin{aligned}  \Omega_{\text{tot}} - 1  &\propto t && \text{radiation domination} \\  \Omega_{\text{tot}} - 1  &\propto t^{2/3} && \text{matter domination.} \end{aligned}$
---	--

- I kad dominira zračenje i kad dominira tvar, razlika između  $\Omega_{\text{tot}}$  i 1 raste s vremenom.
- Svemir mora imati početni  $\Omega_{\text{tot}}$  vrlo blizu 1, mora biti jako fino podešen da bi tijekom vremena ostao ravan, kao što . U trenutku  $t=10^{-10}$  s (electroweak era)  $\rightarrow |\Omega_{\text{tot}} - 1| \leq 10^{-30}$  a u trenutku  $t=10^{13}$  s (CMB)  $\rightarrow |\Omega_{\text{tot}} - 1| \leq 10^{-5}$ .
- Ravni svemir je vrlo nestabilna situacija?!

# Infalcija – rješava probleme Bing Banga !

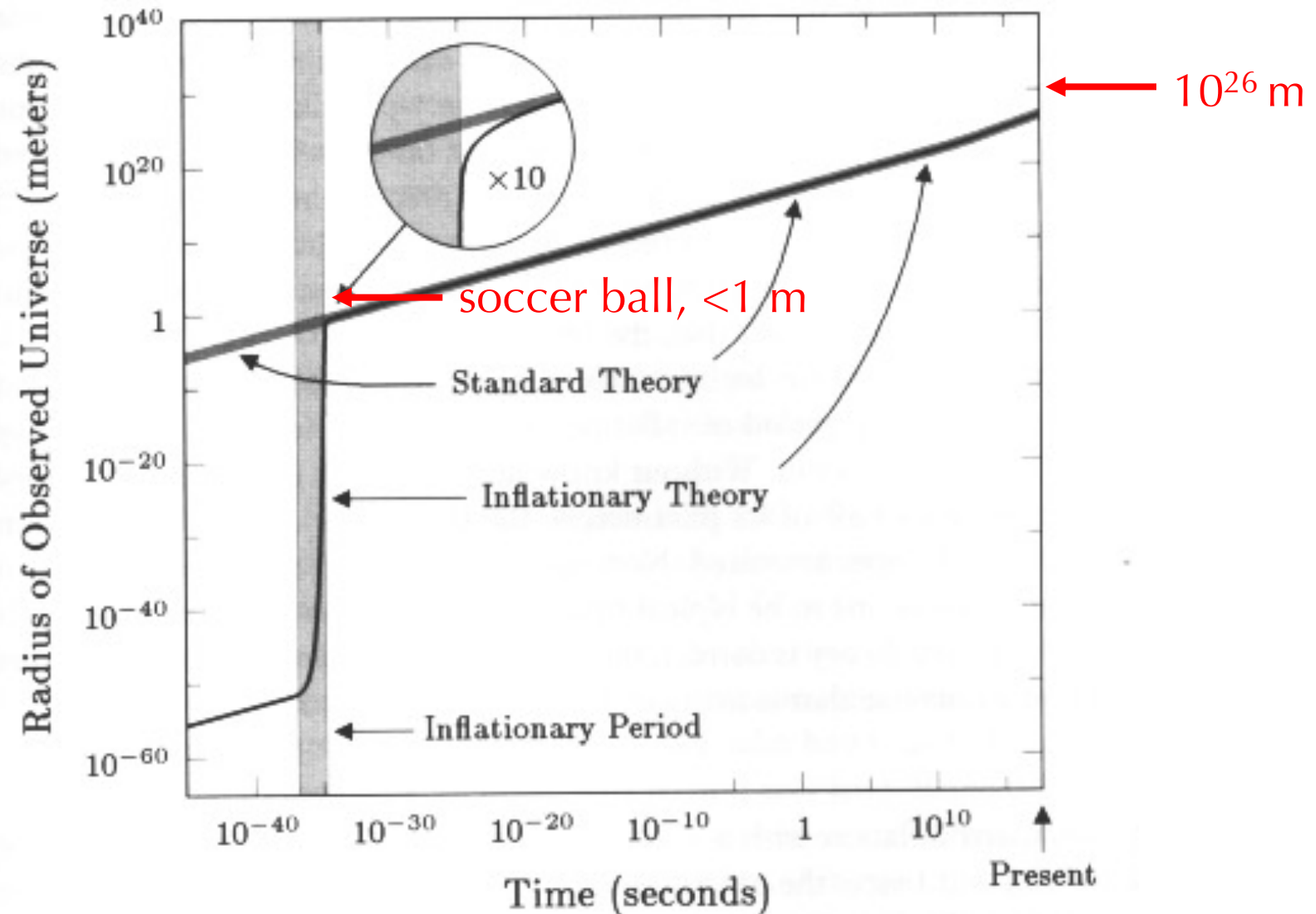
- Alan Guth (1981) predlaže inflaciju  $(d^2a(t)/dt^2 > 0$  – eksponencijalno širenje svemira u kratkom vremenu, koja rješava probleme:
  - Zašto je svemir ravan?
  - Problem horizonta?
  - Problem magnetskog monopola?
- Inflacija gura  $\Omega_{\text{tot}}$  prema 1
  - Inflacija završava  $t = 10^{-34}$  s
  - Između  $10^{-36}$  s  $10^{-34}$  svemir se proširio za faktor  $10^{26}$
  - 1 cm  $\rightarrow 10^7$  Milky way
- Inflacija predviđa ravan svemir,  $\Omega + \Omega_{\Lambda} = 1$
- Nemamo jasnu fizikalnu sliku što uzrokuje inflaciju



$$|\Omega_{\text{tot}}(t) - 1| \propto \exp\left(-\sqrt{\frac{4\Lambda}{3}} t\right)$$

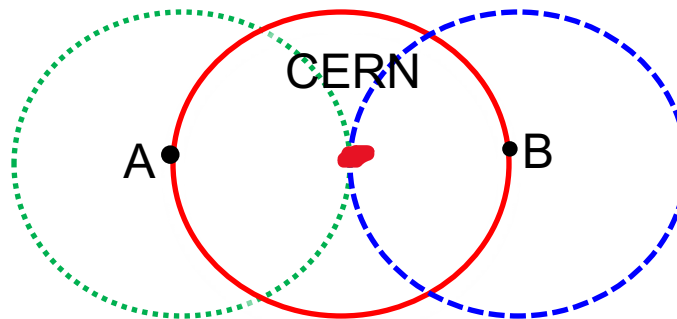


The radius of our cosmic horizon today is 14 billion lyr (about  $10^{26}$  m). This graph shows the physical size of this region back in time.



# Inflacija u svemiru & problem horizonta i magnetskog monopola

- Problem horizonta: različiti dijelovi svemira koji su jako udaljeni ipak su termodinamičkoj ravnoteži (ista temperatura svugdje) iako nije bilo dovoljno vremena da se ostvari interakcija.



Područja A i B nikad nisu bili  
a kontaktu a imaju istu temperaturu  
Zašto?

- GUT teorija predviđa postojanje čestica – magnetskih monopola mase  $10^{16}$  GeV. Tako masivne čestice su nerelativističke gotovo kroz čitavu povijest svemira te bi tvar ( $\rho \sim 1/a^3$ ) trebala dominirati nad zračenjem ( $\rho_{\text{rad}} \sim 1/a^4$ ) a svemirom je dominiralo zračenje najmanje 1000 godina.
- Potraga za monopolima nije urodila plodom (zanimljivo: magnetski monopol vodi na kvantizaciju električnog naboja)

# Kozmološki parametri

Izvor: Planck Collab. 2018 Results VI, Astron. Astrophys. 641, A6 (2020),  
[arXiv:1807.06209] &

<https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-cosmological-parameters.pdf>

	<i>Planck</i> TT,TE,EE+lowE+lensing	+BAO
$\Omega_b h^2$	$0.02237 \pm 0.00015$	$0.02242 \pm 0.00014$
$\Omega_c h^2$	$0.1200 \pm 0.0012$	$0.1193 \pm 0.0009$
$100 \theta_{\text{MC}}$	$1.0409 \pm 0.0003$	$1.0410 \pm 0.0003$
$n_s$	$0.965 \pm 0.004$	$0.966 \pm 0.004$
$\tau$	$0.054 \pm 0.007$	$0.056 \pm 0.007$
$\ln(10^{10} \Delta_{\mathcal{R}}^2)$	$3.044 \pm 0.014$	$3.047 \pm 0.014$
$h$	$0.674 \pm 0.005$	$0.677 \pm 0.004$
$\sigma_8$	$0.811 \pm 0.006$	$0.810 \pm 0.006$
$\Omega_m$	$0.315 \pm 0.007$	$0.311 \pm 0.006$
$\Omega_\Lambda$	$0.685 \pm 0.007$	$0.689 \pm 0.006$

# DENNIS the MENACE



\*LOTS OF THINGS ARE INVISIBLE, BUT WE DON'T  
KNOW HOW MANY BECAUSE WE CAN'T **SEE** THEM.\*

# ChatGPT-4 & vic o kozmologiji



Ipsričaj mi neki vic o kozmologiji



Naravno, evo jednog vica za tebe:

Zašto su kozmolozi tako dobri u pripovijedanju priča?

Jer uvijek imaju puno prostora za priče!



Tell me some funny joke about cosmology



Sure, here's a joke for you:

Why did the astronomer break up with the astrologer?

Because they didn't see the same universe!



**HVALA  
NA PAŽNJI  
PITANJA!**