

# OAP 2022 Lekcija 11: Nastanak Svemira, Sunčevog Sistema i Zemlje

Ivan Milić (AOB / MATF)

22/12/2023

## Poslednje predavanje

- Ko bude htio da dodje u petak 30/12 na konsultacije i diskusiju – dobrodošli!
- Kurs je izgledao ovako:
- Šta vidimo na nebu, i zašto se ti objekti *prividno* pomeraju →

Kako uz pomoć toga merimo vreme →

Kako se ti objekti *zaista* kreću →

Zašto i kako ti objekti (zvezde) sijaju →

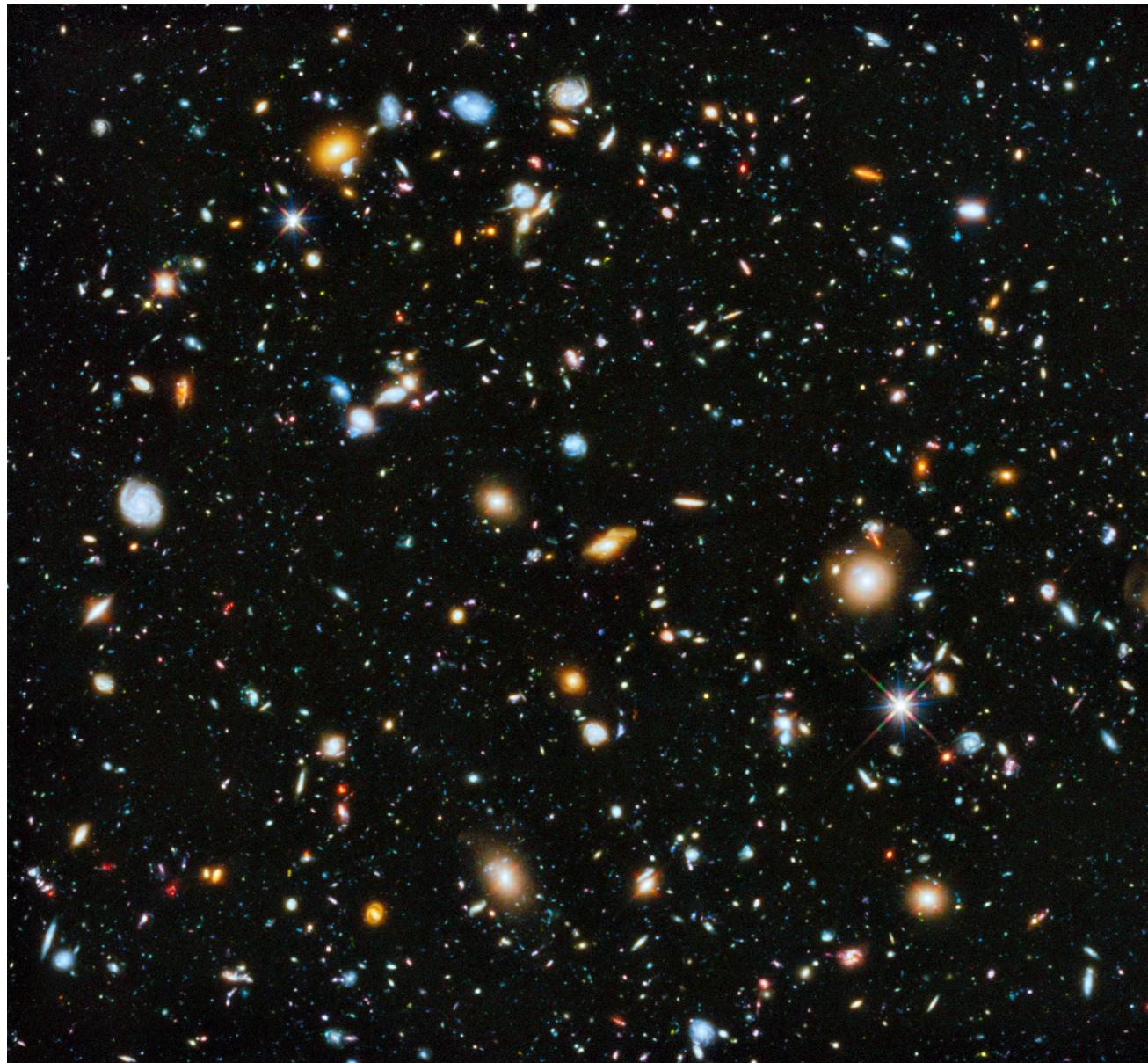
Kako ih posmatramo →

Kako su struktuirane i uredjene na velikim skalama →

Kako je sve to nastalo (ili barem kako mi mislimo da je to nastalo)

Vratimo se na ovaj snimak – on je napravljen 2004 godine

Šta smo mislili ranije?



# Velika debata 1920

- Ovo je slika Andromedine galaksije iz 1902 godine
- Mi tada nismo bili sigurni da li je u pitanju druga galaksija ili prosto skupina zvezda (maglina tj. *nebula*), u našoj Galaksiji
- **Shapley:** Postoji samo naša Galaksija. Druge magline pripadaju našoj galaksiji. **Argumenti:** ako su van, udaljenosti bi bile prevelike, van Maanen tvrdi da neke od njih rotiraju, supernove, etc.]
- **Curtis:** U pitanju su druge Galaksije, "ostrvske Univerzumi" (Kant). **Argumenti:** broj novih (nova – eksplozija zvezda u specifičnoj fazi evolucije), brzina ovih objekata u odnosu na nas je prevelika
- Danas znamo da je **Curtis** bio u pravu!



# Hablov Zakon (Hubble-Lemaitre law)

- Habi je, 1929, izmerio udaljenosti i brzine galaksija i dobio sledeće.
- Što je galaksija **dalje**, udaljava se brže od nas!
- Kako se ovo uklapa u teorijska predviđanja?

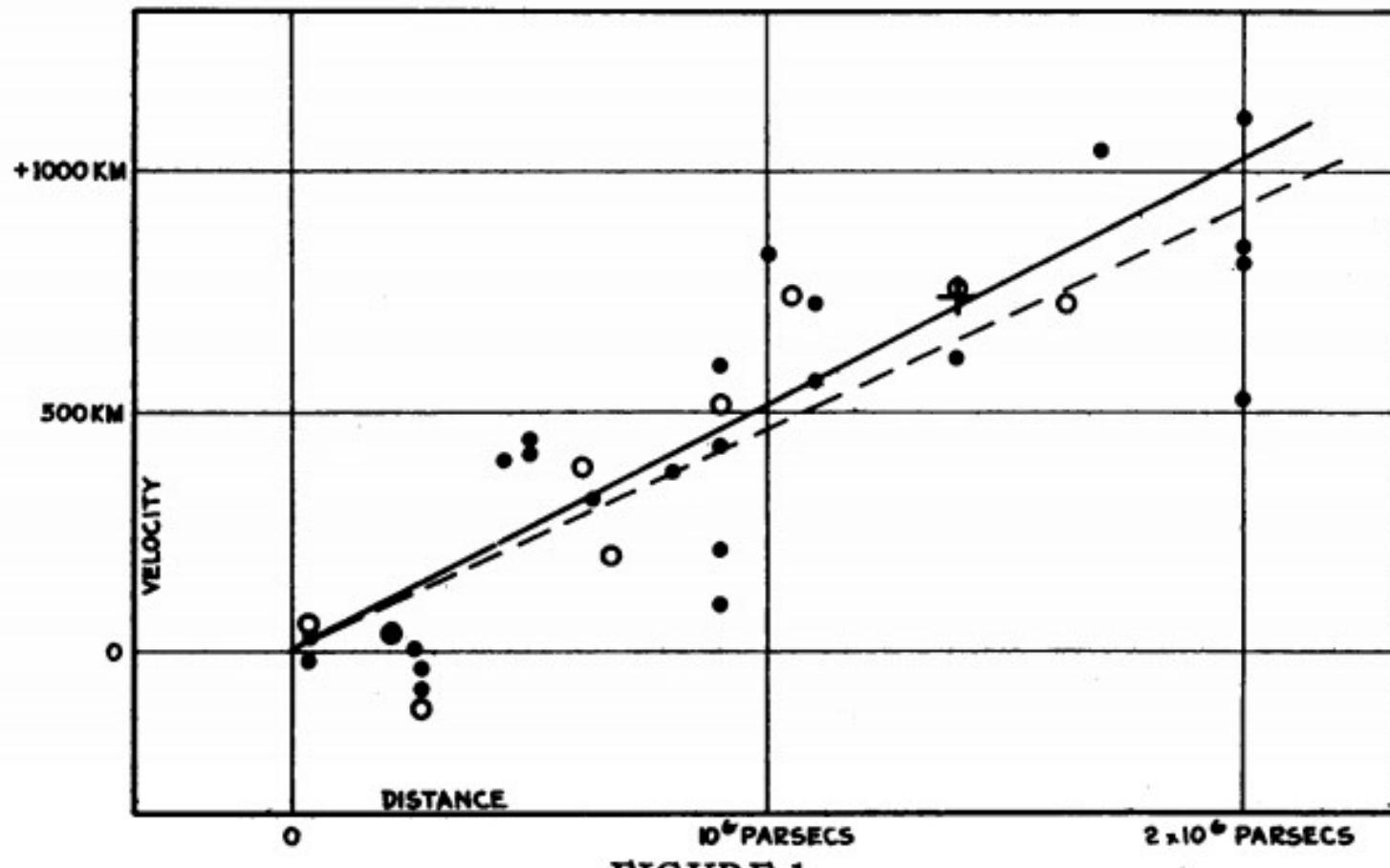


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

# Opšta relativnost

- Izmedju 1905 i 1917, Einstein je razvijao Opštu Teoriju Relativnosti.
- Ovo je generalizacija Njutnovih zakona kretanja i Njutnovog zakona gravitacije
- Opšta relativnost je **metrička** teorija gravitacije. Raspored mase i energije u prostoru menja **metriku** prostora vremena.
- Tela se kreću po **geodezicima** – najkraćim putanjama u zakrivljenom prostoru-vremenu

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

↑  
Metrički tenzor

Kosmološka konstanta

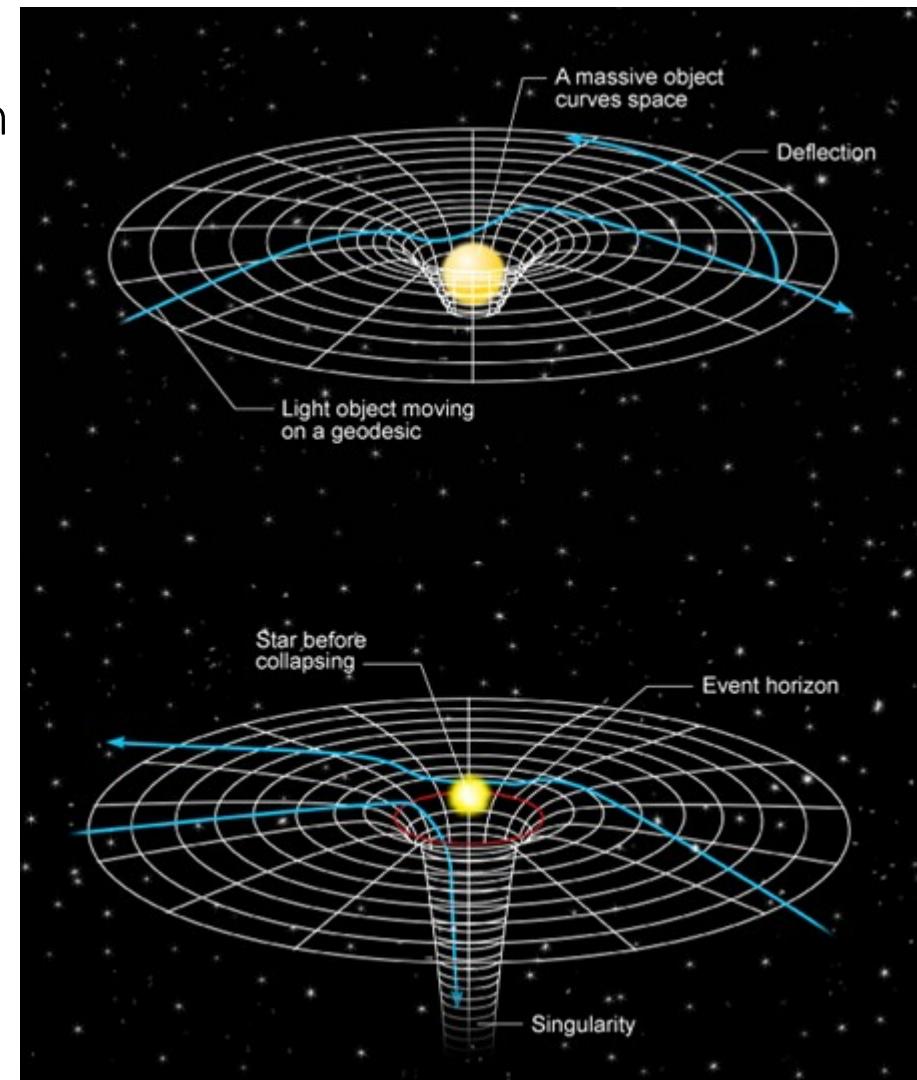
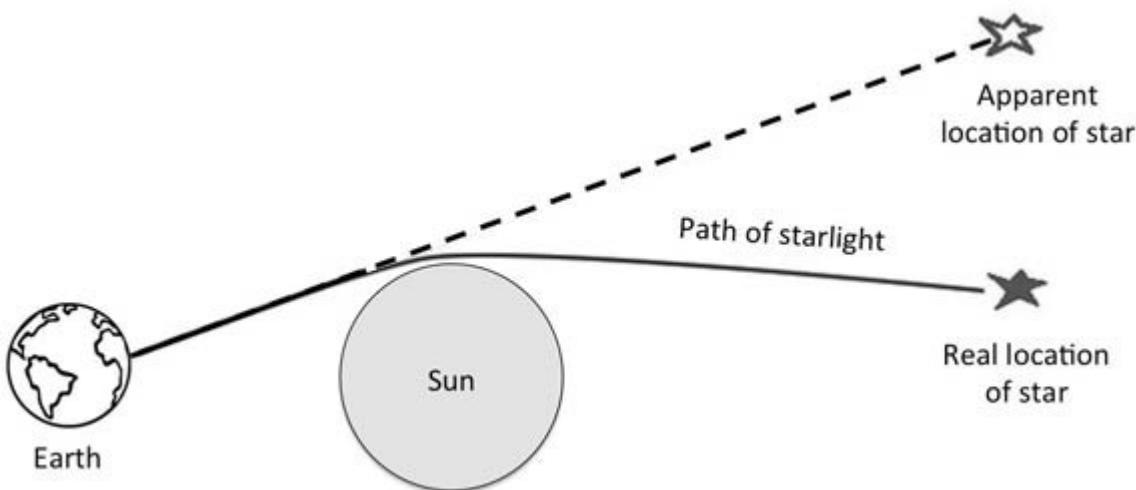
Tenzor mase i energije

Ricci-jev tenzor zakrivljenosti

- U ovoj formulaciji – masa i metrika su **spregnuti**.
- **John A. Wheeler:** *spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve*

# Opšta relativnost

- U jeziku opšte relativnosti: objekti se kreću po geodezicima ali nama, koji živimo u Euklidskom prostoru to izgleda kao delovanje sila
- Naravno, Njutnov zakon gravitacije je konzistentan sa OR
- Jedna od posledica OR je da i svetlost menja putanju kada prolazi pored masivnih objekata
- Jedan od prvih testova OR:



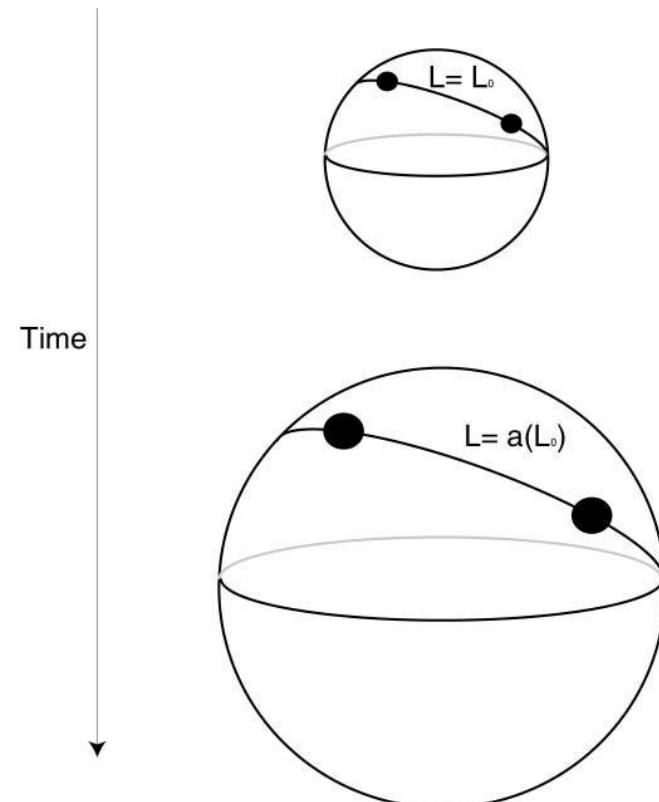
# Kosmološki princip

- "Gledano na dovoljno velikoj skali (milijarde svetlosnih godina), svemir je homogen i izotropan"
- Kosmološki princip nam omogućava da razumemo neke globalne osobine Univerzuma – za sve manje skale (jata galaksija, galaksije, zvezde, planete) moramo da se obratimo nekoj drugoj teoriji.
- Jedna od prvih primena Kosmološkog principa, Friedmannove jednačine:

" $a$ " je takozvani "scale factor", faktor skaliranja, koji nam govori koliko je svemir veliki

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

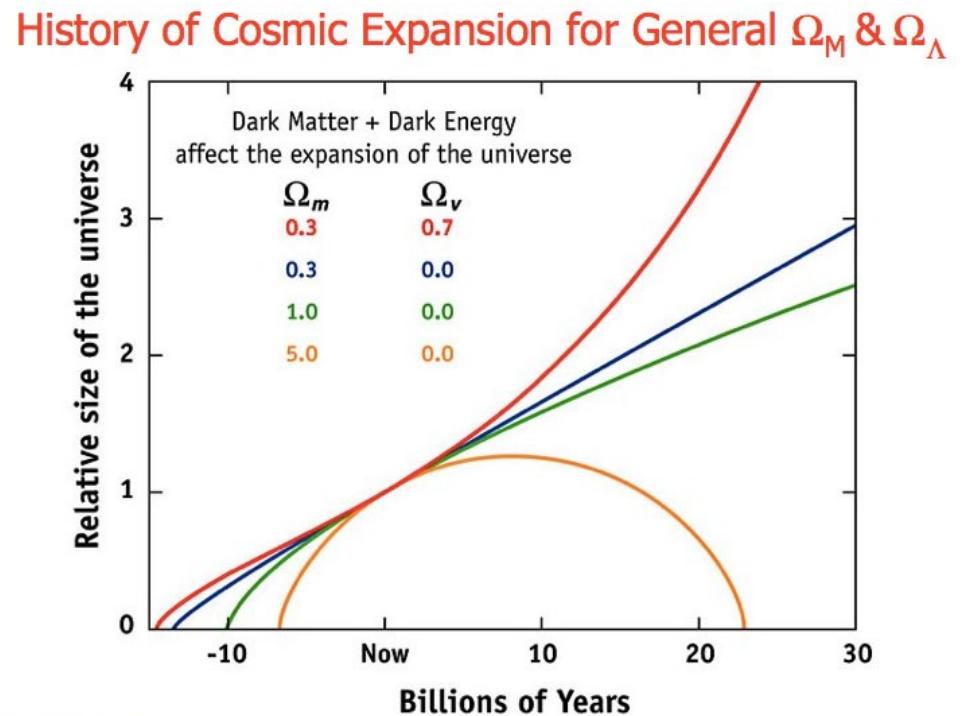
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$



# Rešenja Friedmanovih jednačina

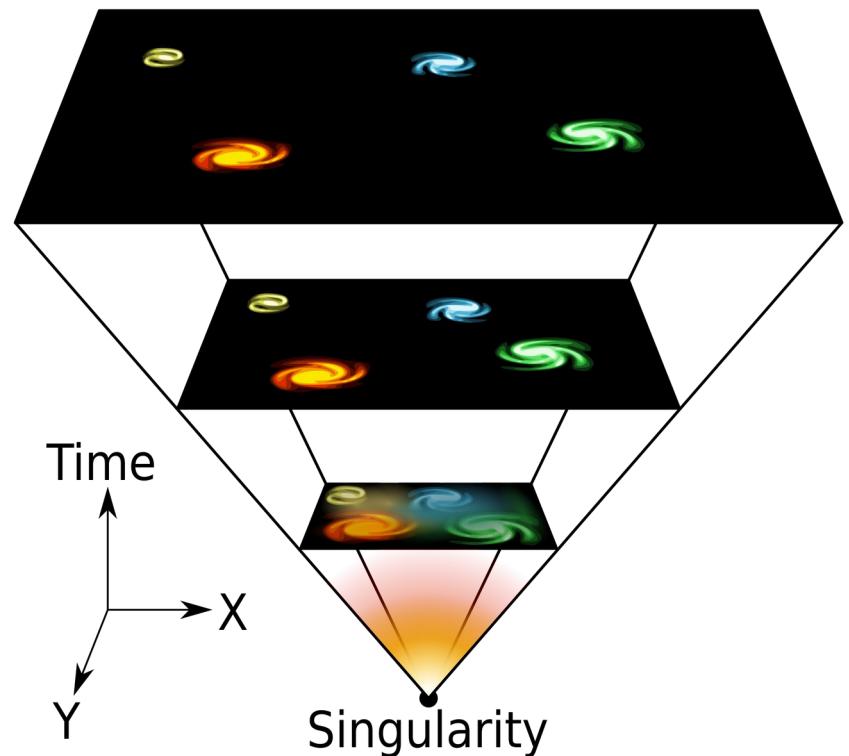
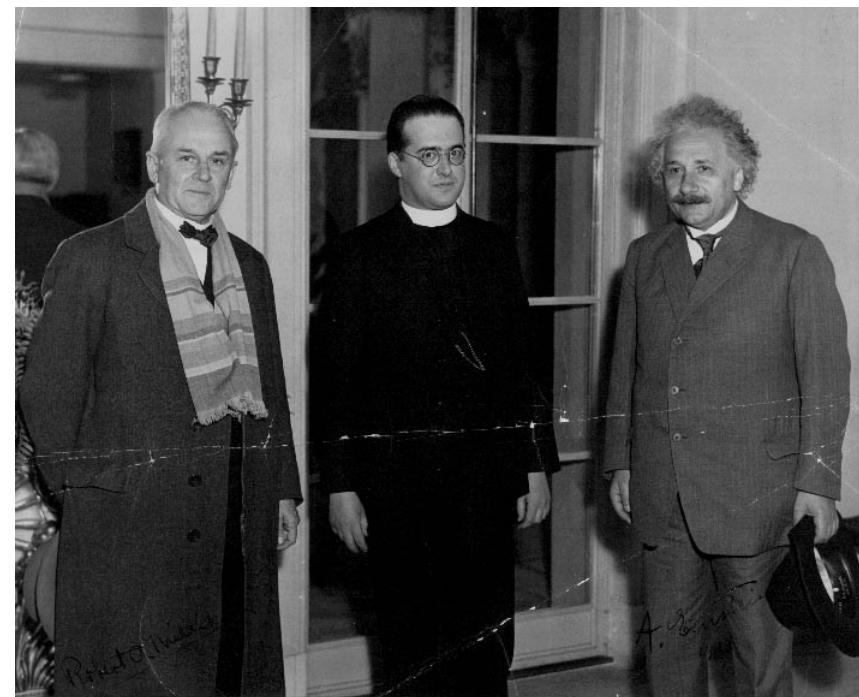
- Friedmanove jednačine povezuju scale factor (svemir je homogen i izotropan, dakle 1D), sa **pritiskom i gustinom materije** (čestica i zračenja) i **gustinom tamne energije**
- Rešavanjem ovih jednačina za zadatu vezu izmedju gustine i pritiska (jednačina stanja) i odabranou k, dobijamo evoluciju scale factora sa vremenom.

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$



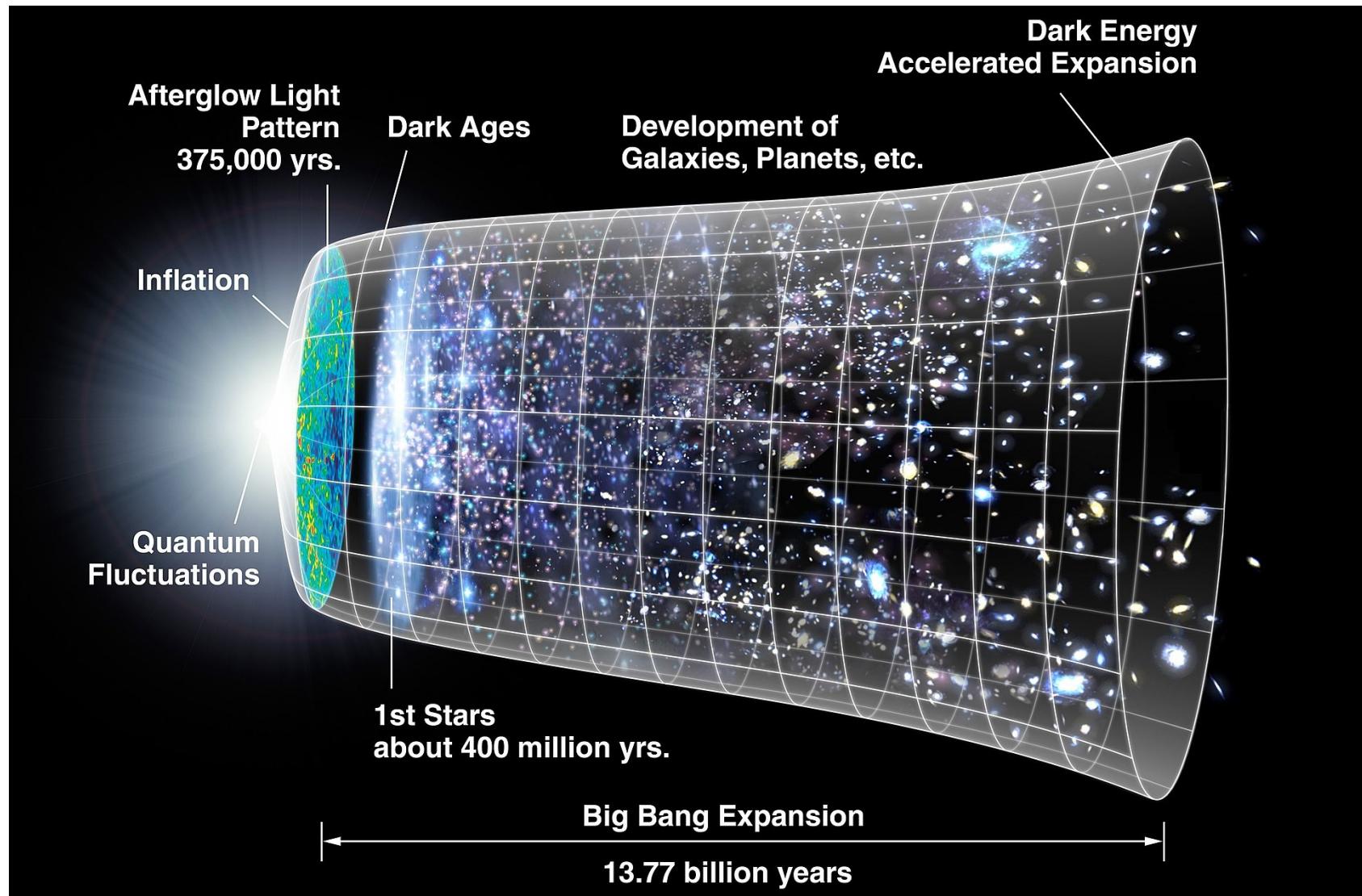
# Lemaitre i pretpostavka velikog praska

- Lemaitre (Lemetr) je iz rešenja Friedmanovih jednačina zaključio da je jedna od validnih mogućnosti da se svemir širi → Galaksije se udaljavaju jedne od drugih
- Izračunao / procenio je takozvanu Hablovu konstantu – odnos izmedju brzine udaljavanja tačke od nas i njene udaljenosti.
- Vrednost koju je on dobio ( $600 \text{ km/s} / \text{Mpc}$ ) je jako bliska prvoj vrednosti koju je dobio Hubble ( $500 \text{ km/s} / \text{Mpc}$ )
- Danas znamo da je ta vrednost (trenutno) oko  $70 \text{ km/s} / \text{Mpc}$
- Lemaitre je takođe pretpostavio "primordijalni atom" – danas poznatiji kao **veliki prasak**



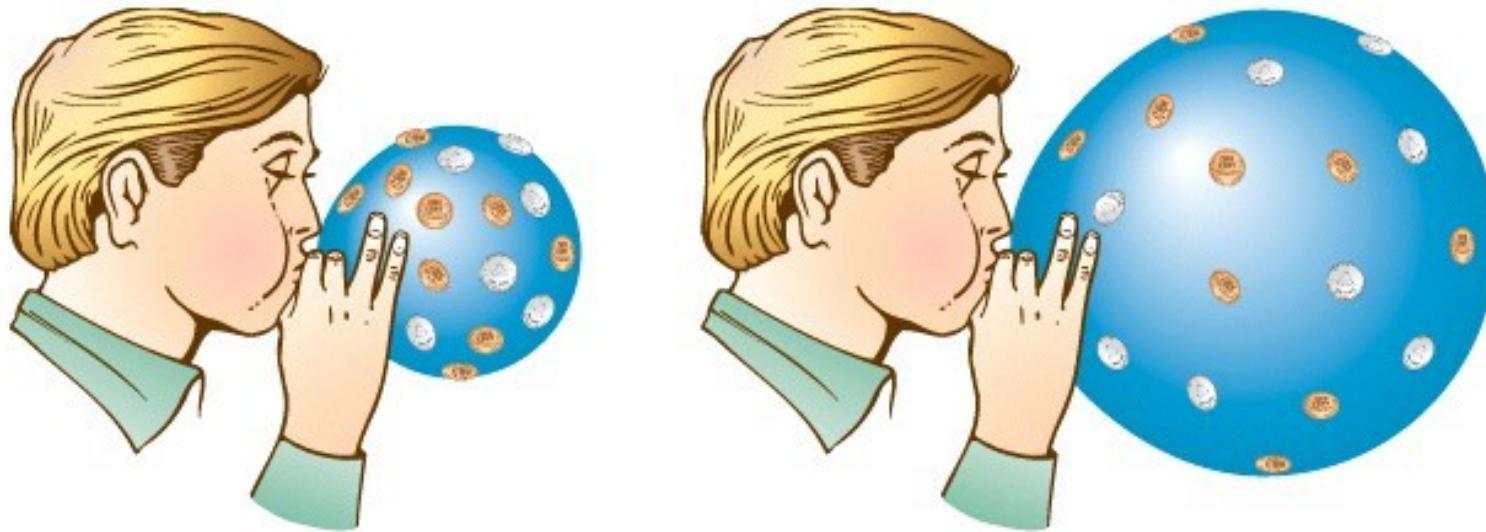
# Veliki Prasak (Big Bang)

- Prepostavka da je Univerzum nastao iz (praktično) tačke.
- Može se reći da su prostor i vreme tako nastali tako da nema smisla pitati **a šta je bilo pre?**



## Šta znači da se svemir širi?

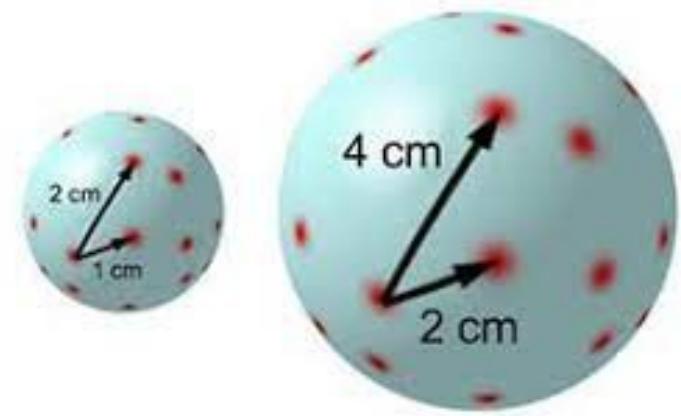
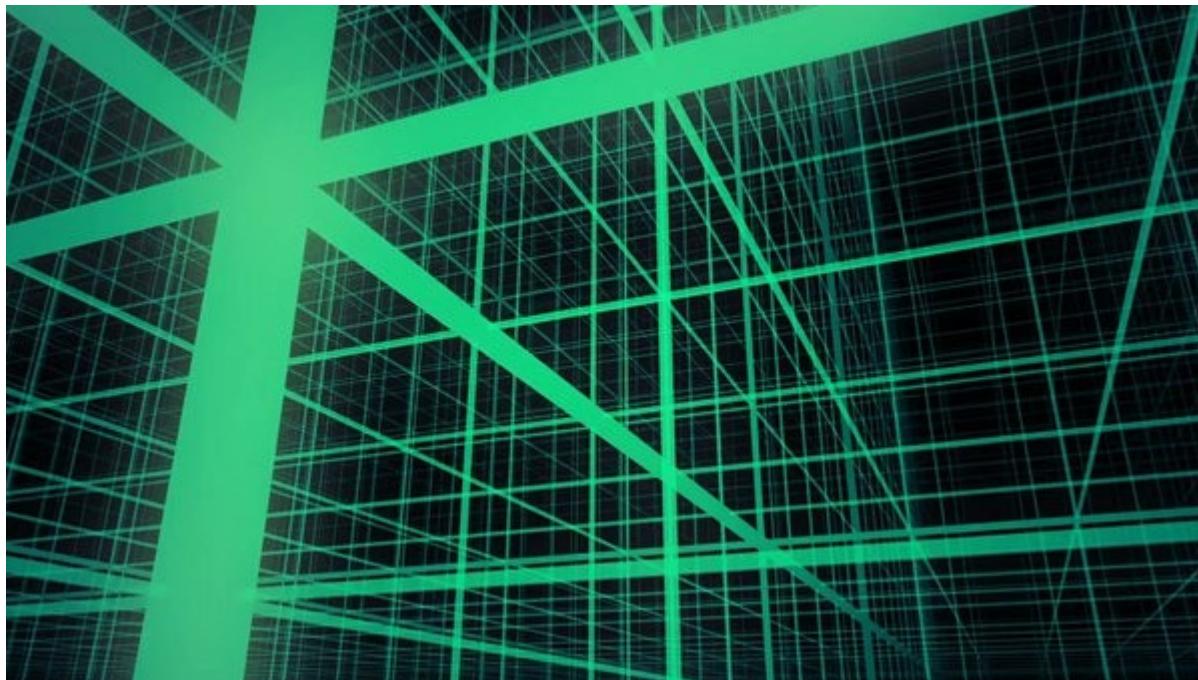
- Svemir nije kugla koja se širi unutar druge kugle → Svemir se širi u četvrtu (ili ako računamo vreme, petu) dimenziju.
- Analogija: mravi koji žive na površini balona koji se širi i koji ne mogu da pogledaju “gore”, jer žive u 2D prostoru



- Obratite pažnju: Što su galaksije dalje – brže se udaljavaju! Hablov zakon!

# Širenje svemira

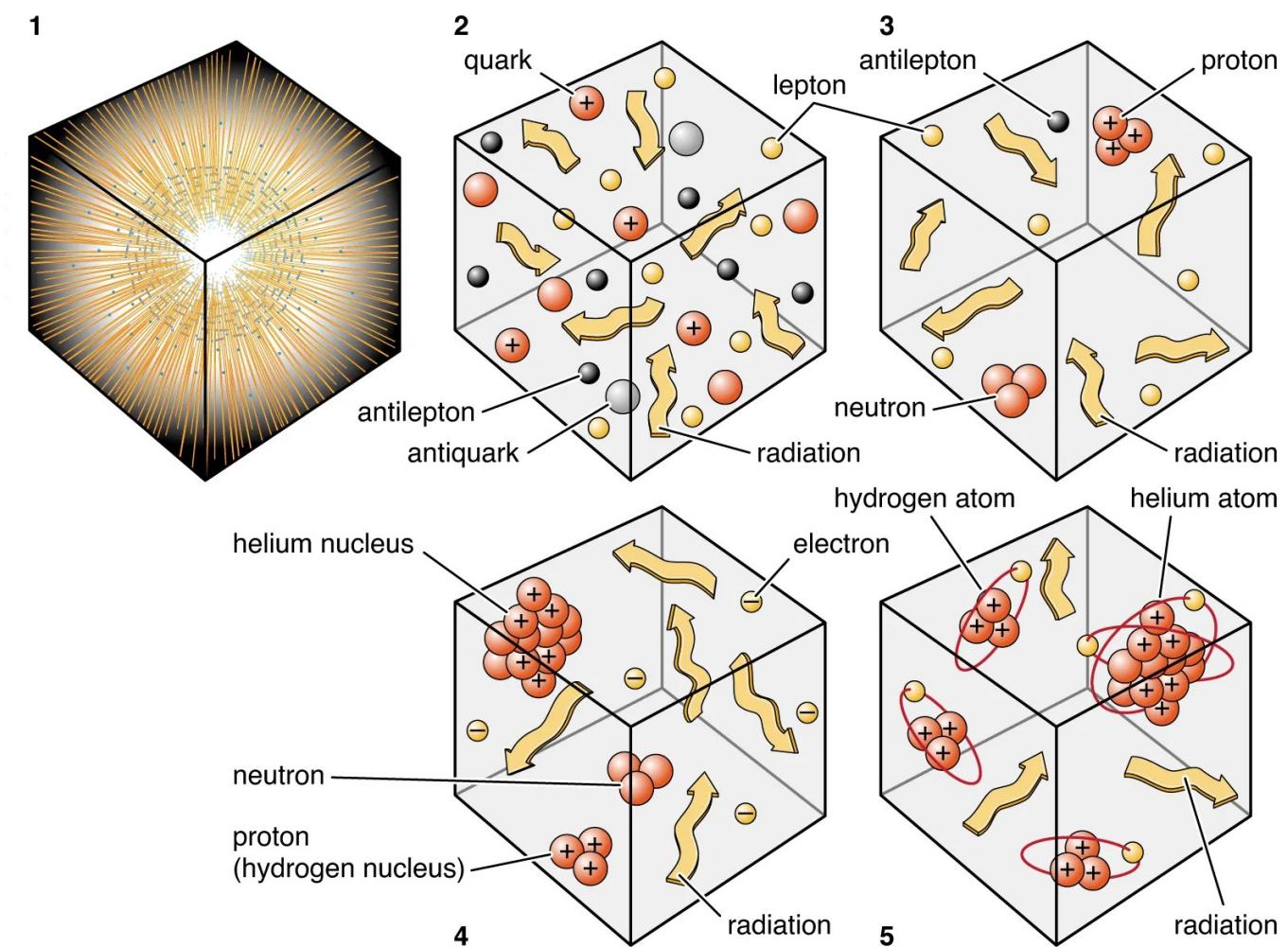
- Atomi, molekuli, ljudi, mačke planete zvezde ostaju iste veličine
- Ukoliko su **gravitaciono vezane** galaksije i jata galaksija ostaju iste veličine
- Količina prostora se povećava (prostor se razmiče)
- Ne-očigledno: **količina tamne energije se povećava, jer je gustina tamne energije konstantna!**



# Primordijalna nukleosinteza

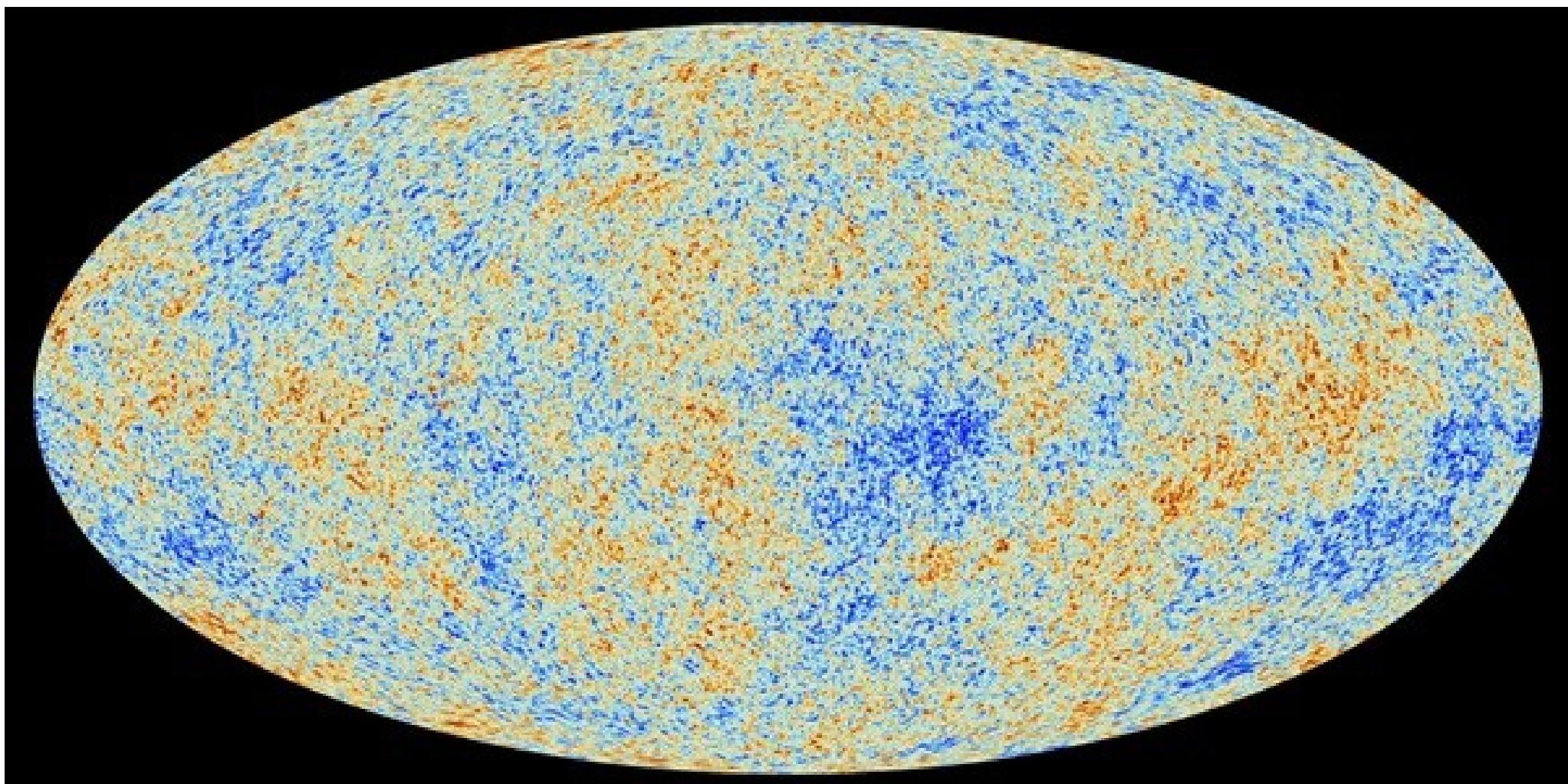
- Na početku (sekunde nakon velikog praska) – materija je bila u formi kvarkova i leptona
- Kvarkovi su se spojili u protone i neutrone a ovi u vodonik, helijum i jako malo težih elemenata:

- Ovo se desilo od 10 s nakon BB do 20-ak minuta nakon BB
- Kako je svermi na početku bio vreo, svi gasovi su bili potpuno jonizovani



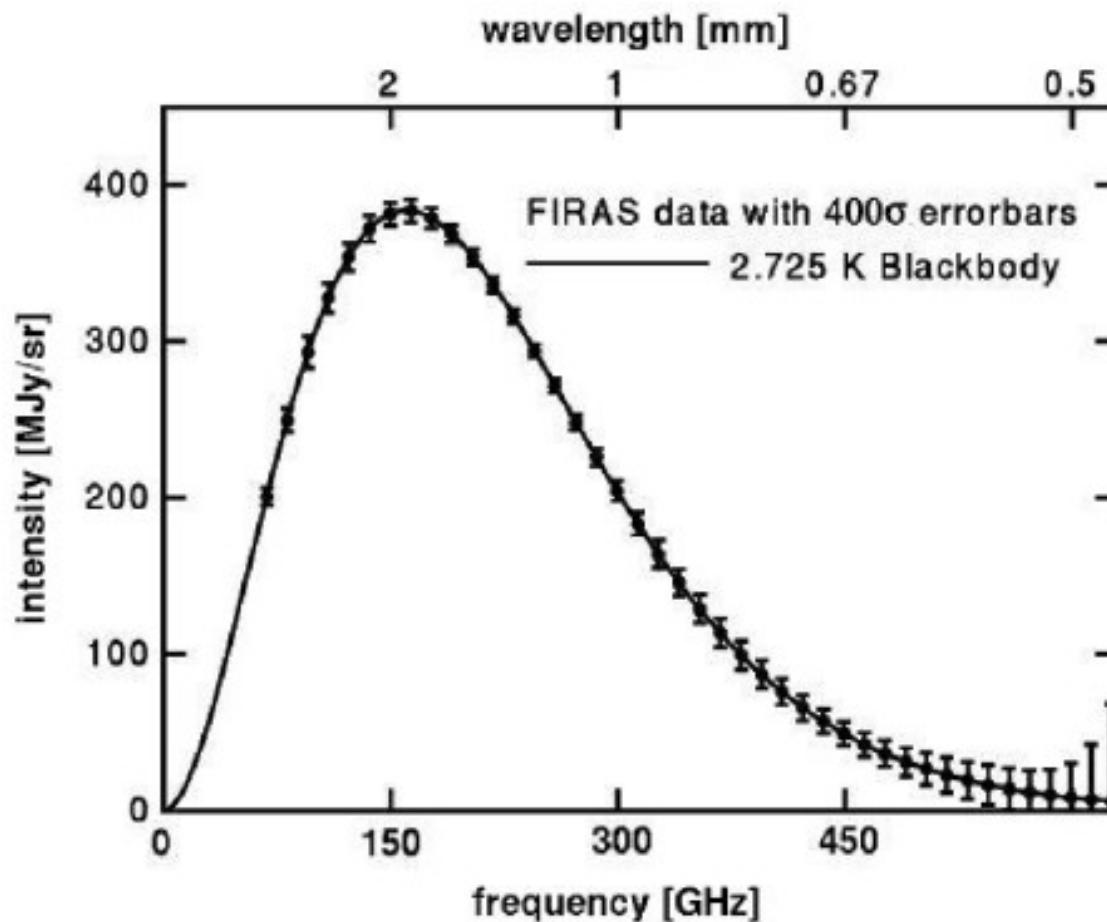
## Prvo zračenje – CMB : Mikrotalasno pozadinsko zračenje

- Fotoni koji se slobodno prostiru od trenutka kada je svemir postao prozračan
- Skoro izotropno, ali nam jako male fluktuacije govore o fluktuacijama u raspodeli materije kada je CMB nastao (380 000 godina nakon nastanka svemira)



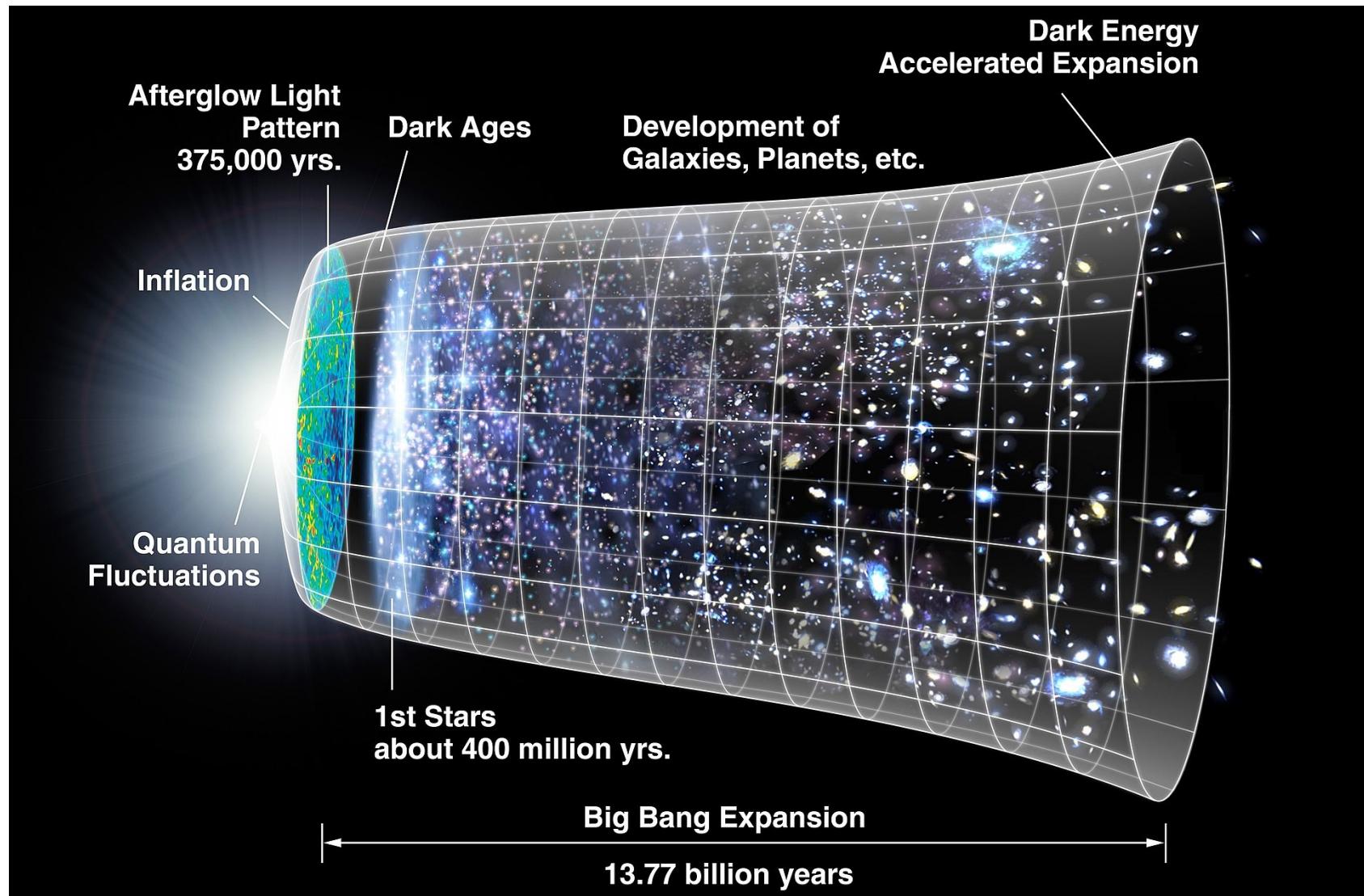
# Spektar CMB-a

- Je spektar apsolutno crnog tela temperature oko 2.7K
- Vremenom do nas dolazi CMB iz daljih i daljih delova svemira (naravno, tokom naših života mi nećemo primetiti razliku)
- CMB prožima ceo univerzum, pa možemo reći da je najniža smislena temperatura u svemiru 2.7K



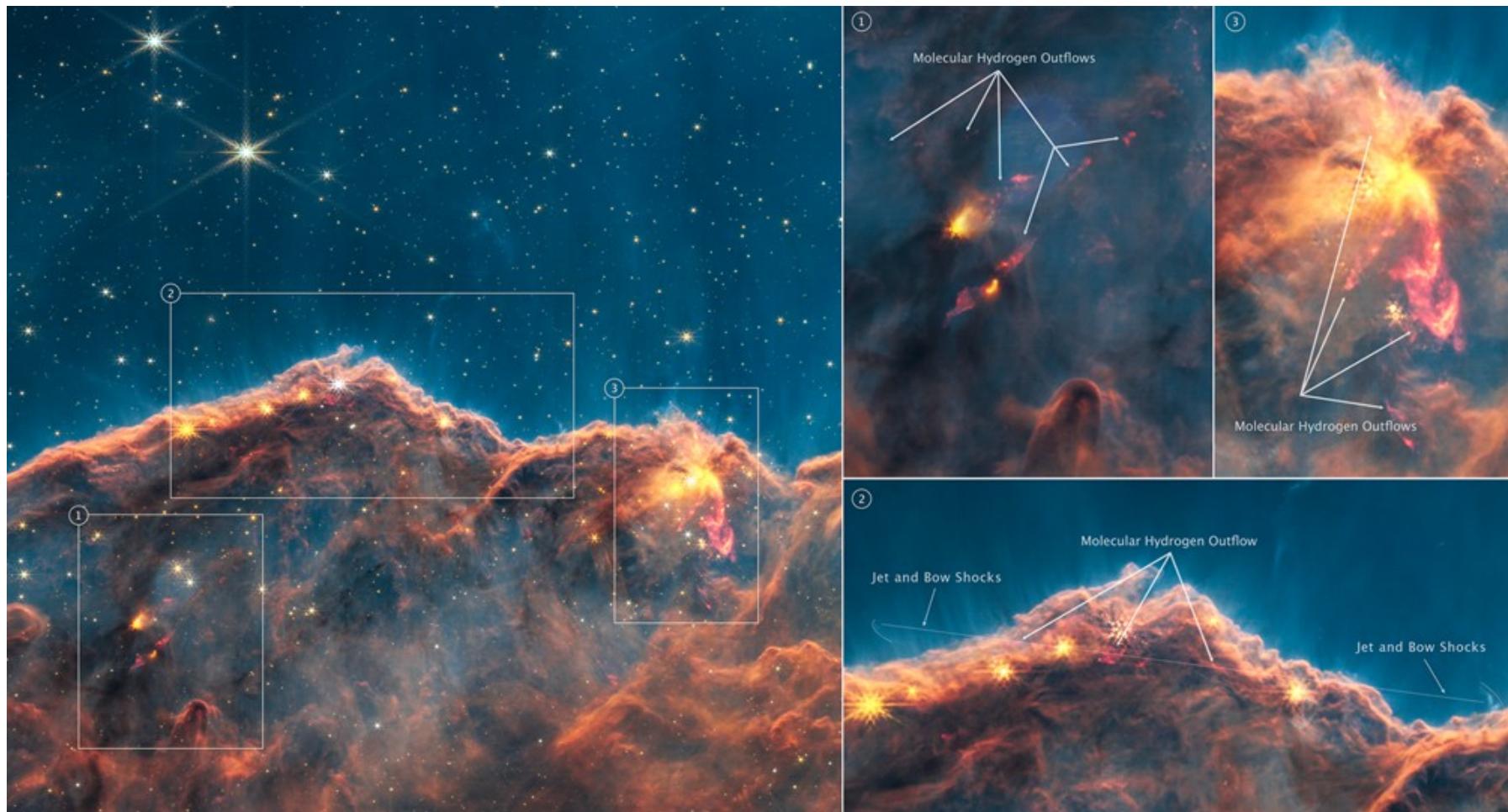
# Veliki Prasak (Big Bang)

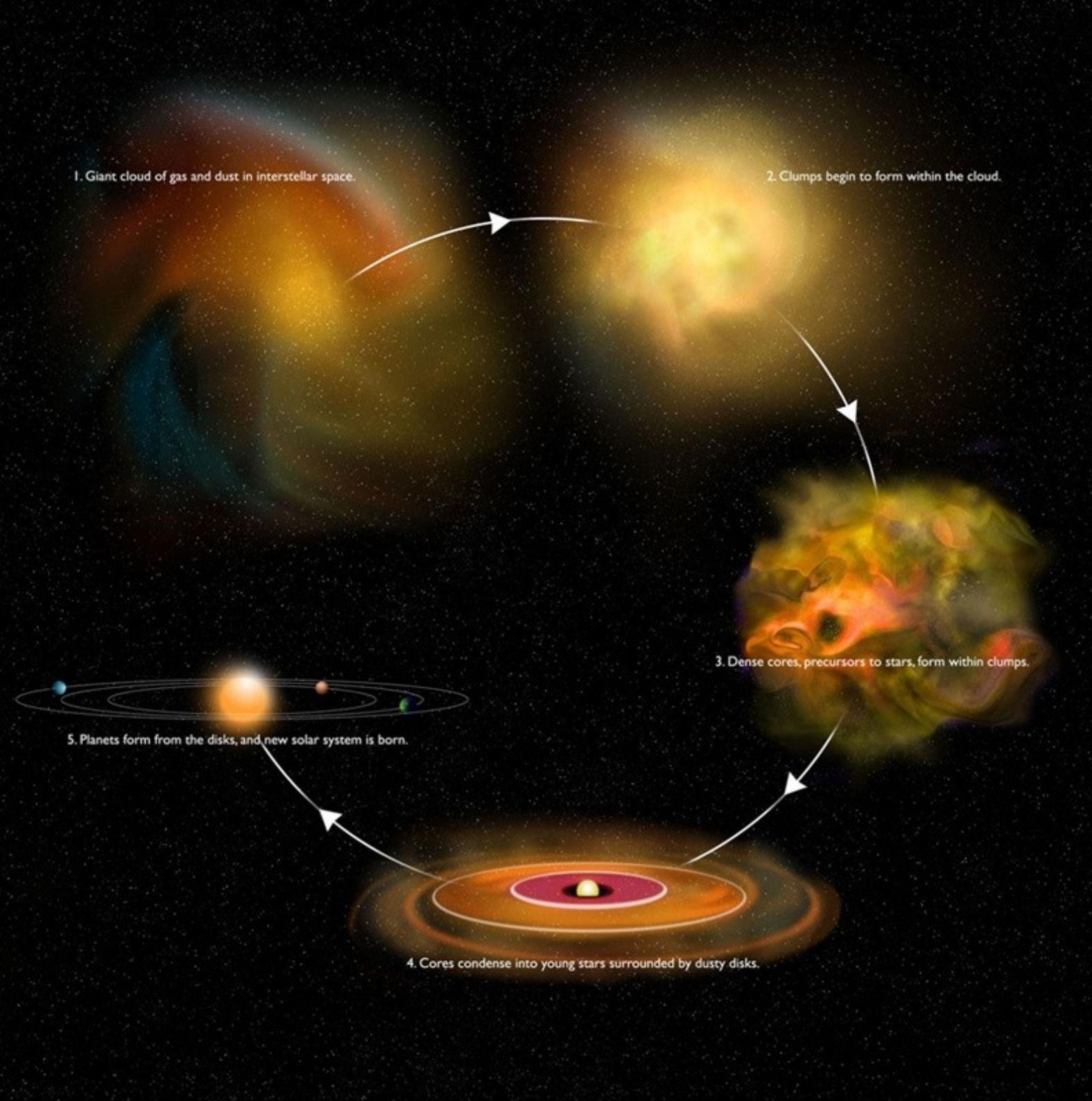
- Prepostavka da je Univerzum nastao iz (praktično) tačke.
- Može se reći da su prostor i vreme tako nastali tako da nema smisla pitati **a šta je bilo pre?**



# Nastanak Sunčevog sistema

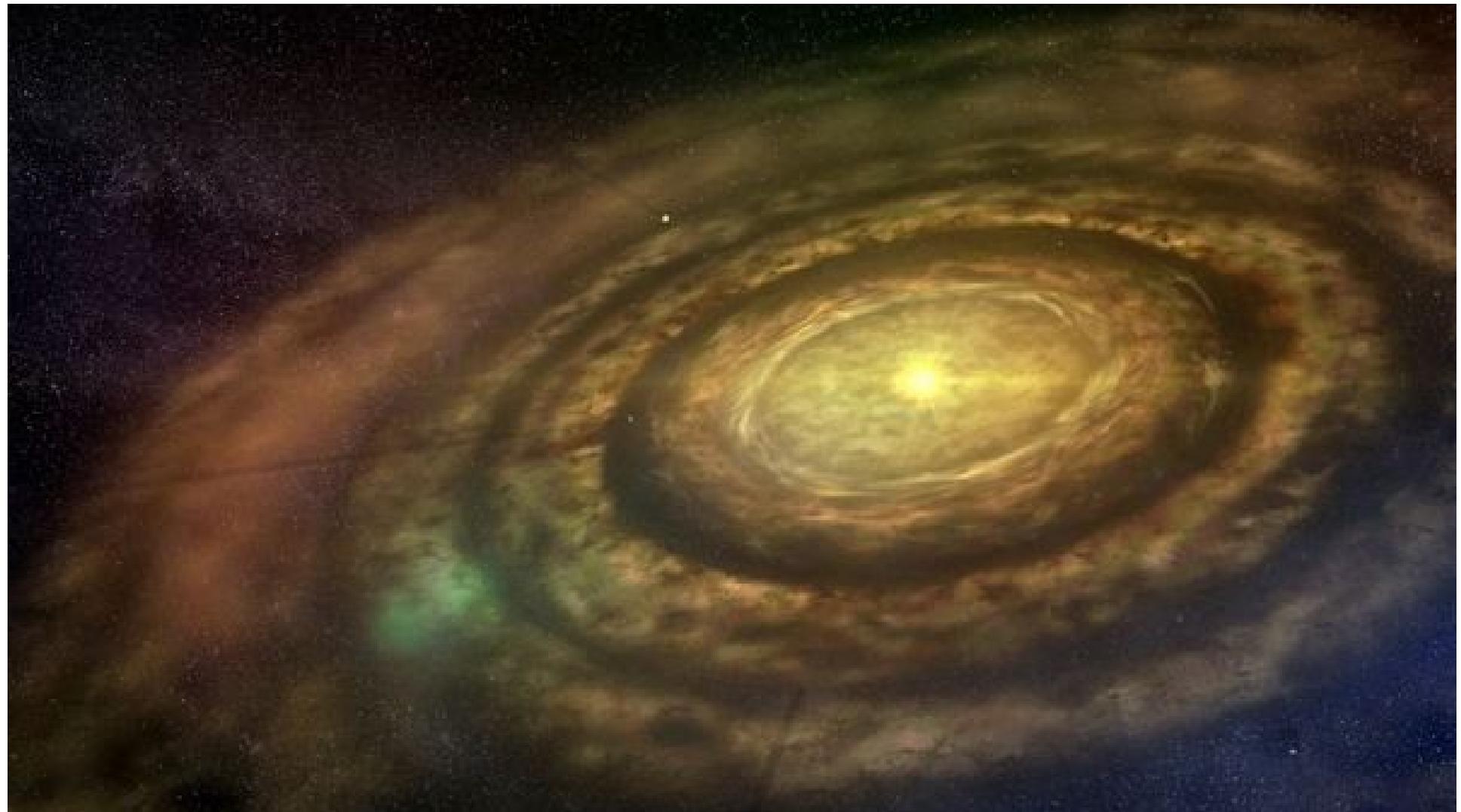
- Sunce je nastalo pre oko 5 milijardi godina. Zvezde nastaju iz molekulskih oblaka koji su dovoljno hladni da počnu da kolapsiraju
- Oblak koji kolapsira je sve neprozračniji, pa se kombinacijom apsorpcije i sažimanja zagreva
- Eventualno, dostižemo uslove neophodne za termonuklearne reakcije...



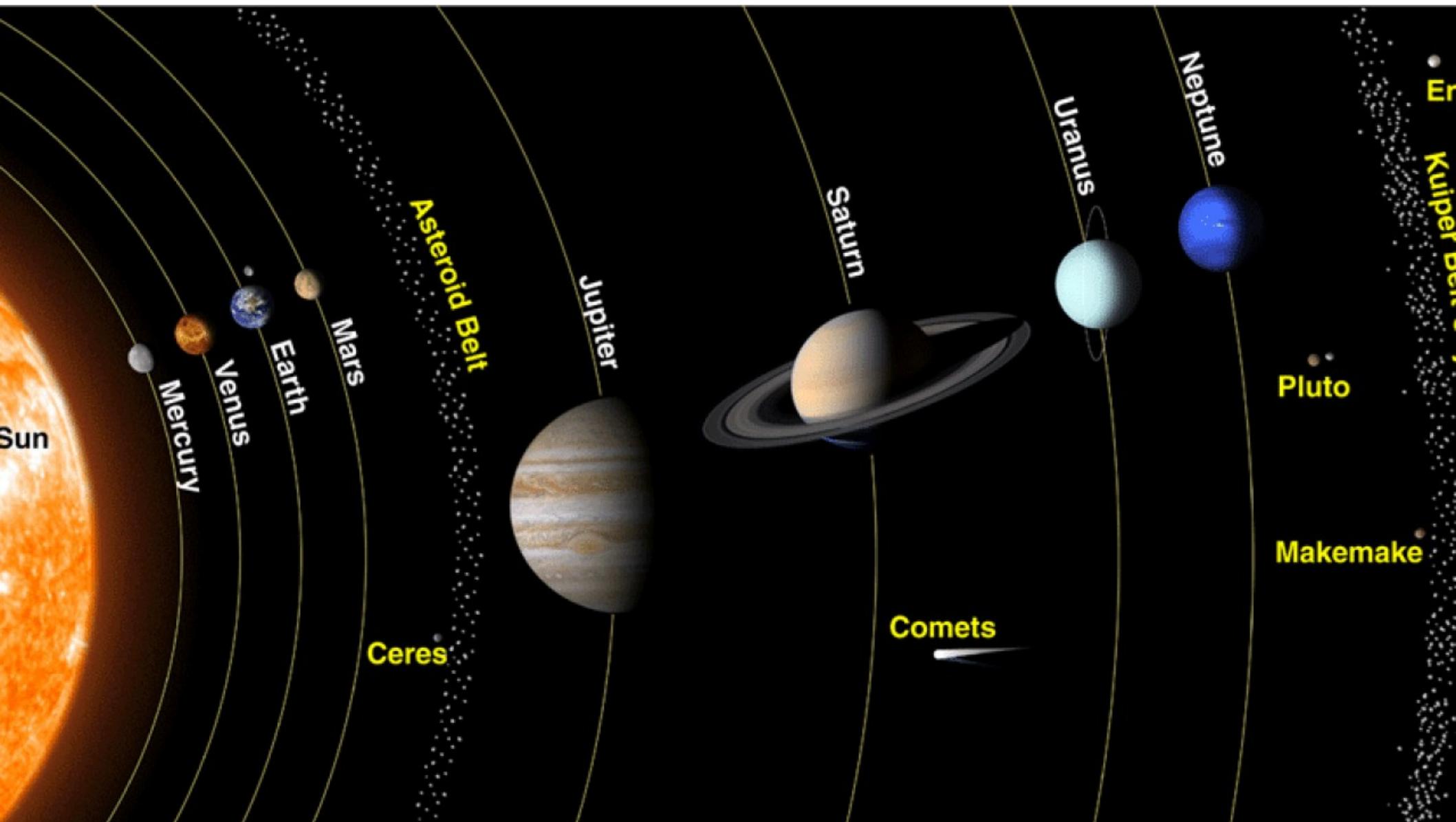


## Nastanak planeta

- Mlade zvezde imaju diskove oko sebe. Taj disk sadrži molekule, gas, prašinu



Planete u Sunčevom Sistem su dosta različite:

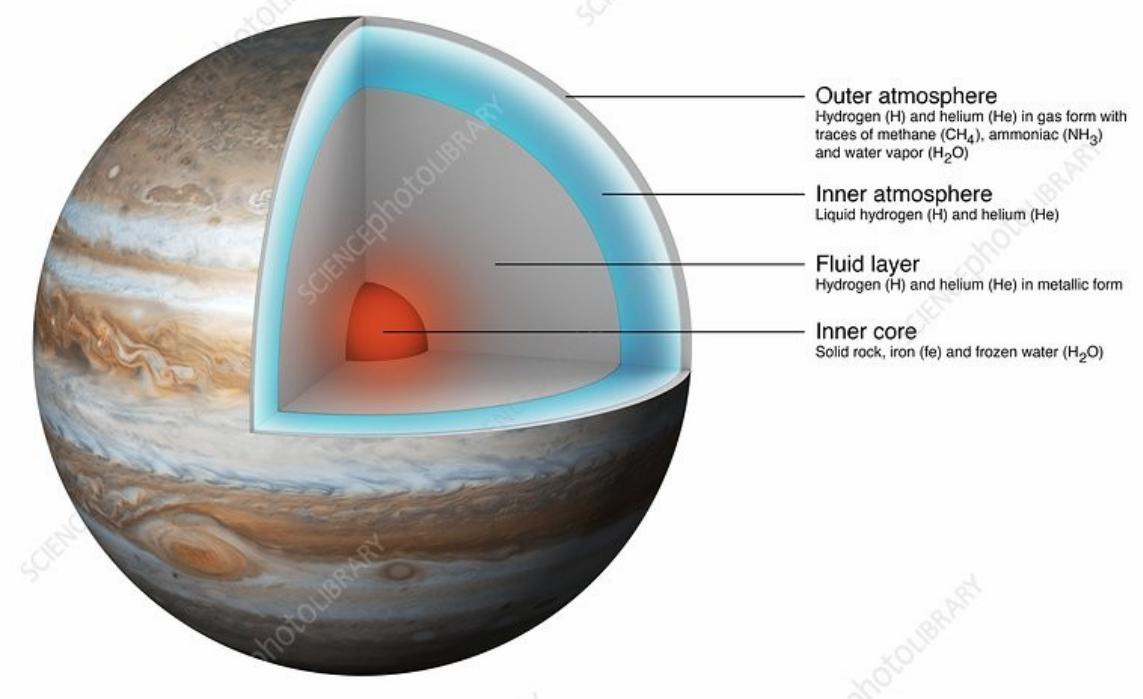


Koje su sve razlike izmedju Zemlje i Jupitera?



# Velike, gasovite planete

- U sudarima čestice ponekad bivaju spojene pa vremenom dolazi do formiranja sve većih i većih objekata
- Prašina je posebno pogodna, jer se na nju "hvata" led
- Kako smo daleko od zvezde, gas je spor (mala temperatura), pa čestice gasova bivaju privučene slabom gravitacijom ovih "grudvica"
- Mislimo da su Jupiter, Saturn, Neptun i Uran nastali ovako, tokom prvih  $\sim 10$  miliona godina.
- Temperature ovih objekata su tako male, da je većina gasova u tečnom stanju



## Male, kamene planete

- Bliže zvezdi nema mnogo gasa – ili ga je zvezda privukla, ili ga je zračenje “oduvalo”
- Ostaju samo teži elementi – prašina i led, koji formiraju manje planete, koje su pak, dosta gušće
- Zato je struktura, npr. Zemlje mnogo drugačije od strukture Jupitera
- Obratite pažnju na razliku u sastavu Zemlje (Fe, O, Si), i u sastavu zvezda (H, He)

## MARS FACTS / STRUCTURE

The diagram illustrates the comparative internal structures of Earth and Mars. On the left, a cross-section of Earth shows its multi-layered interior with labels for the Crust (brown), Mantle (orange), Liquid Outer Core (yellow), and Solid Core (black). A second Earth image shows its surface from space. On the right, a similar cross-section of Mars is shown, featuring a hatched pattern in the solid core area. A dashed arrow points from the text about Mars' core uncertainty to this hatched region. A legend on the right side defines the colors for each layer: brown for Crust, orange for Mantle, yellow for Liquid Outer Core, and black for Solid Core.

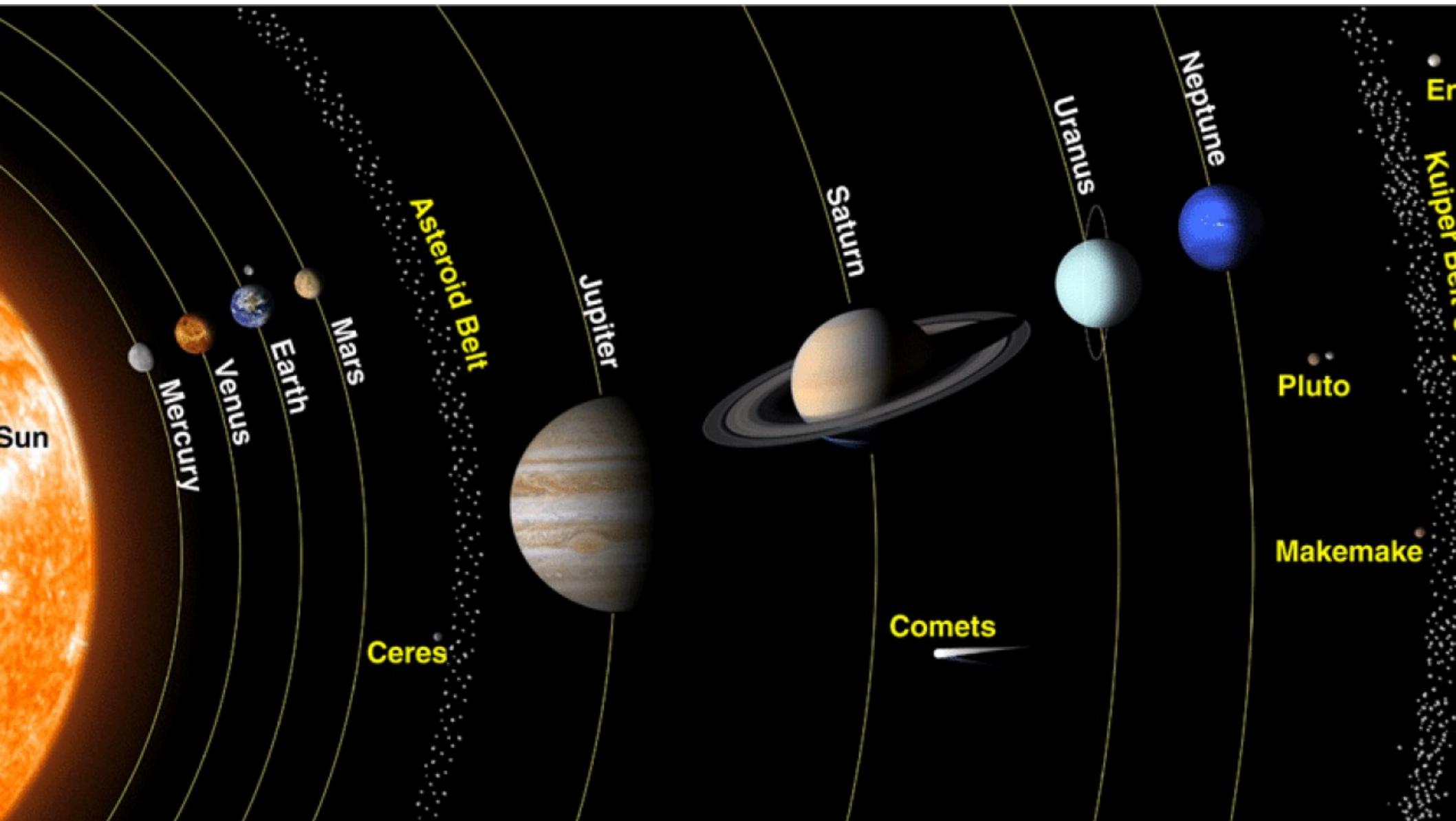
Scientists are not yet certain if the core of Mars is solid, liquid, or in two distinct sublayers, like Earth's. Future measurements will tell us more.

#JOURNEYTOMARS  
mars.nasa.gov

# Nastanak planeta

- Snežna linija – 2.5-5 A.J. izvan nje vodonik formira led
- Van snežne linije – Gasovite planete
- Unutar snežne linije – Kamene planete
- Gasovite planete su morale da nastanu u isto vreme kad i Sunce, da bi stigle da skupe gas!
- Komete i asteroidi su ostaci tog procesa akrecije
- Ostaju neki čudni fenomeni: Uran i Venera imaju **retrogradnu** rotaciju
- Neke planete imaju veliki nagib
- Bitnu ulogu su, verovatno igrali i sudari sa drugim objektima, možda i sa drugim zvezdanim sistemima!

Praćenjem drugih sistema zaključujemo o našem, ali izgleda da je Sunčev Sistem poseban! Planete nisu tamo gde bi trebale da budu

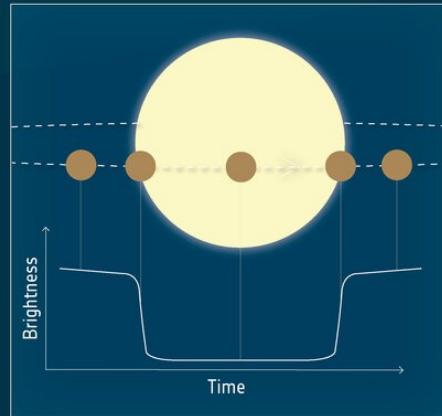


# Ekstrasolarne Planete

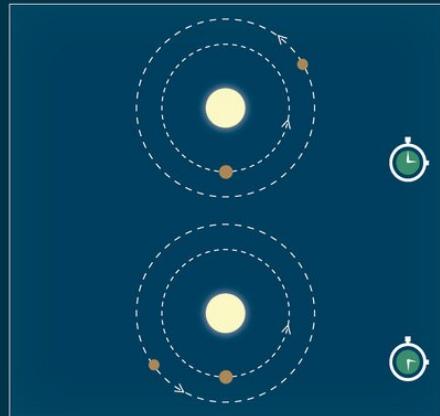
- Planete oko drugih zvezda
- Kako znamo da postoje?
- Ili tako što pomračuju zvezdu ili tako što je blago pomeraju usled rotacije oko zajedničkog centra mase.
- Nekad možemo i da ih vidimo direktno
- Ili da koristimo neke jako napredne metode kao što su gravitaciona sočiva

## → EXOPLANET DETECTION METHODS

Transit photometry



Transit-timing variation



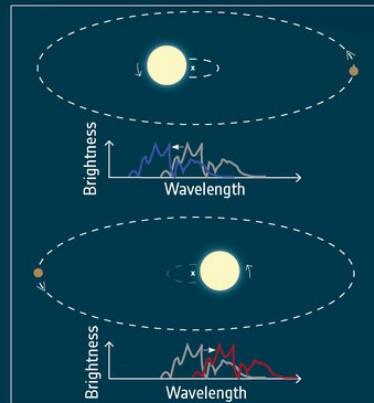
**Transit photometry** is one of the main techniques used to **discover** exoplanets. Cheops will use this technique to **measure the sizes** of known exoplanets and to start to **characterise** them.



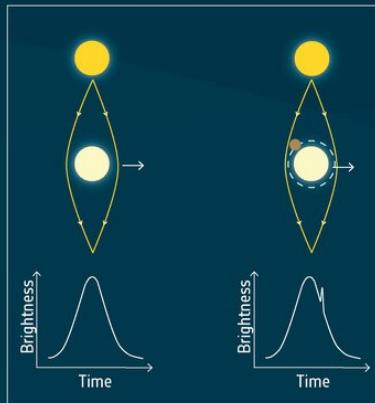
By using the **transit-timing variation** technique, Cheops will be able to **discover** additional, previously unknown planets around some stars, and also determine the planet **masses**.

*Other techniques used to discover new exoplanets (not employed by Cheops) are: radial velocity, microlensing, astrometry and direct imaging.*

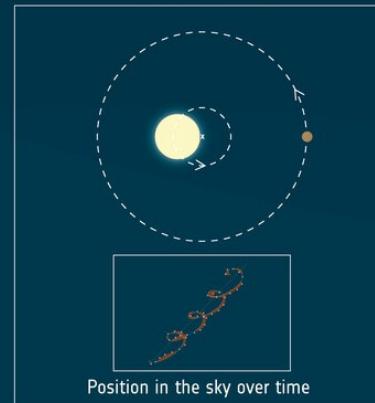
Radial velocity



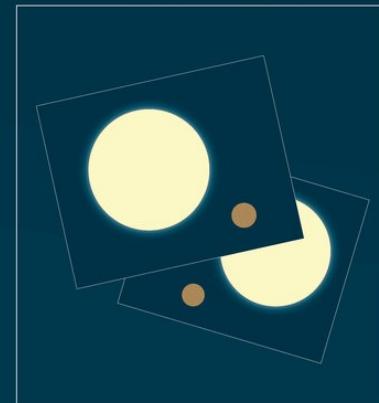
Microlensing



Astrometry



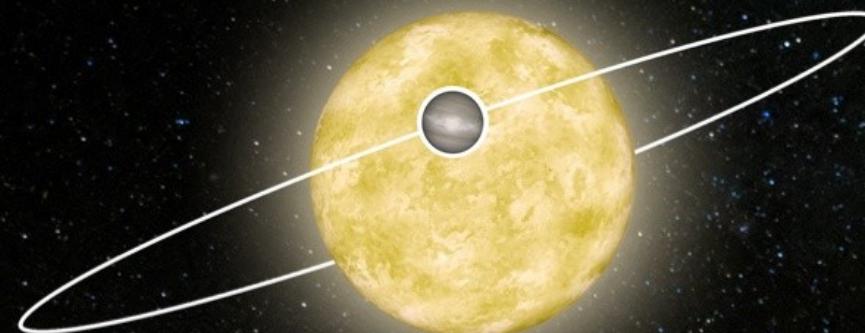
Direct imaging



**VIEW FROM ABOVE**



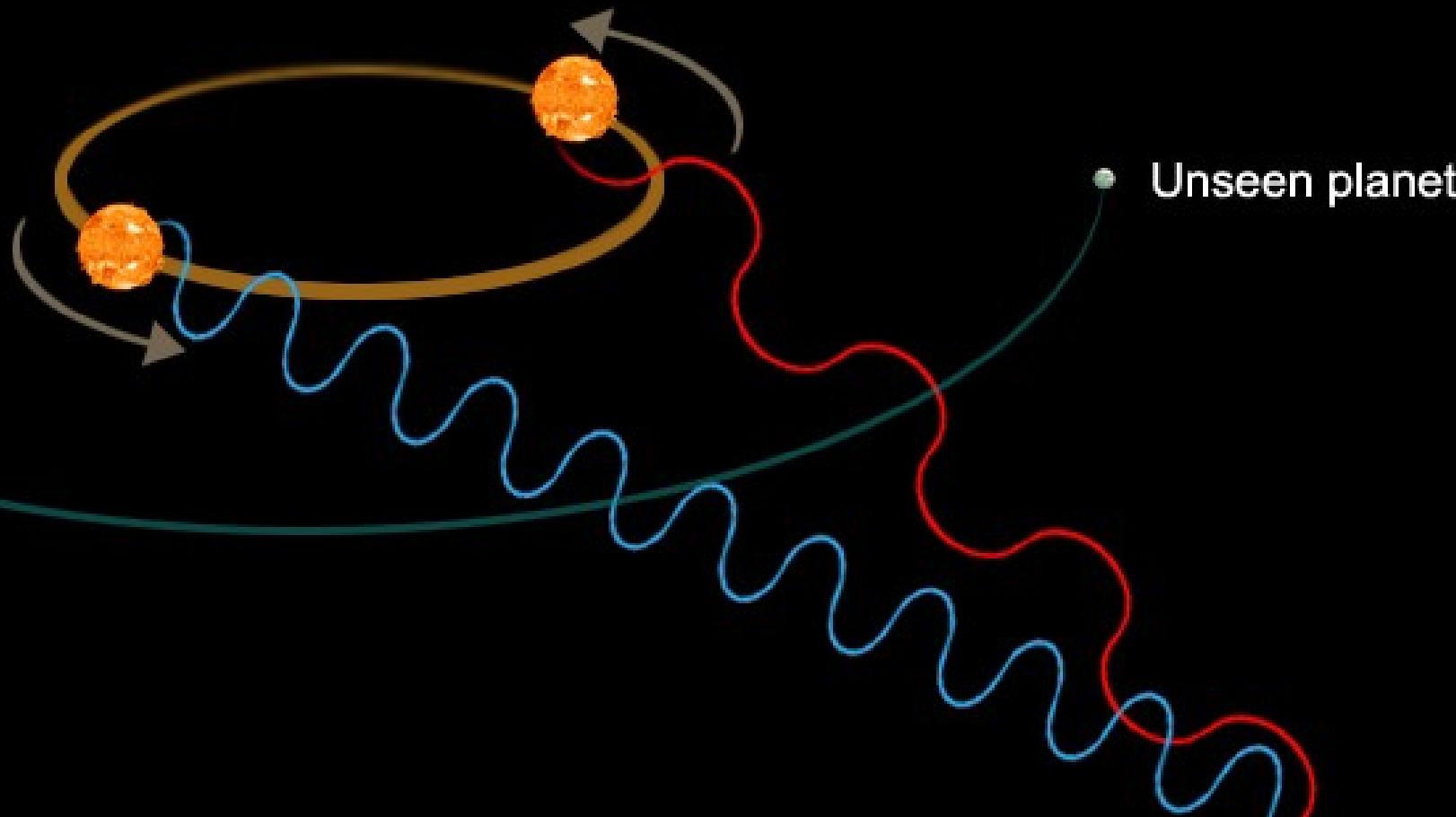
**VIEW FROM TELESCOPE**



**LIGHT CURVE**



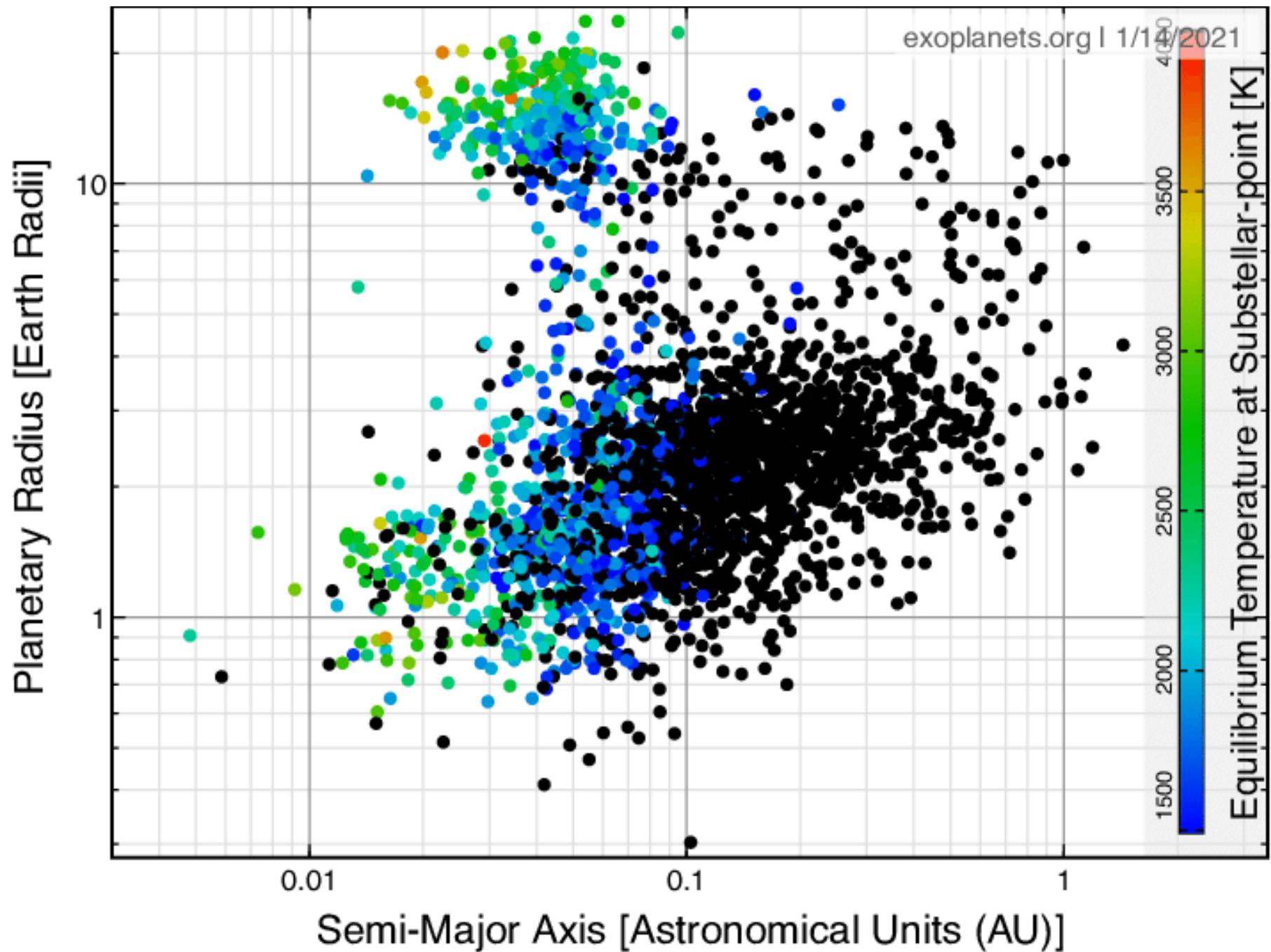
*Artist conception, not to scale*



Doppler Shift  
due to Stellar Wobble

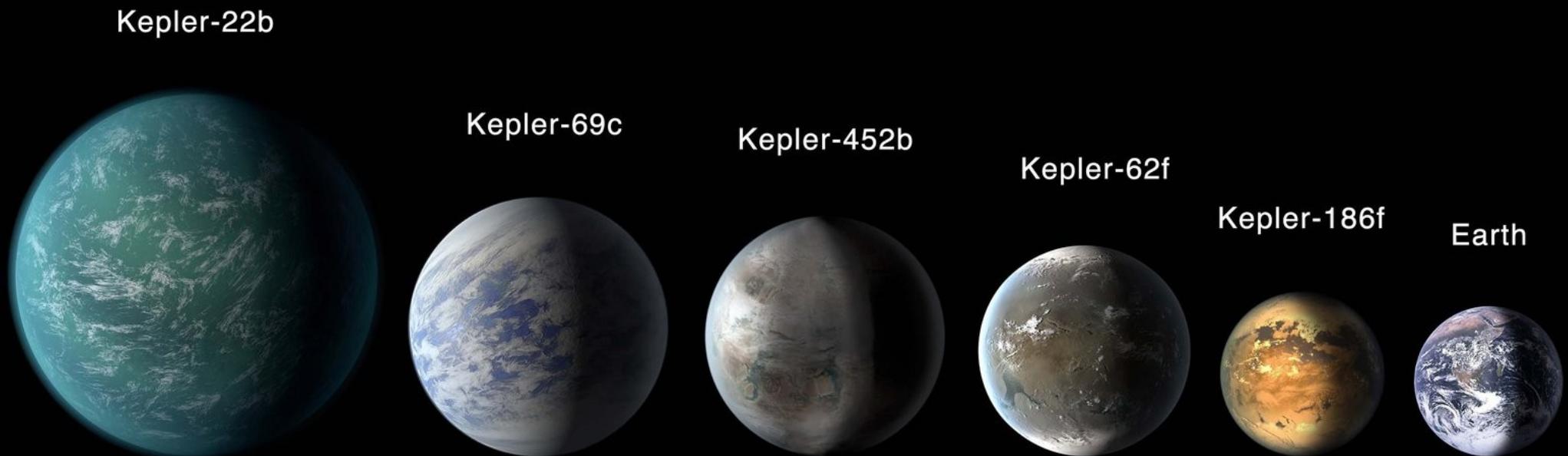


# Raspodela do sada otkrivenih ekstrasolarnih planeta

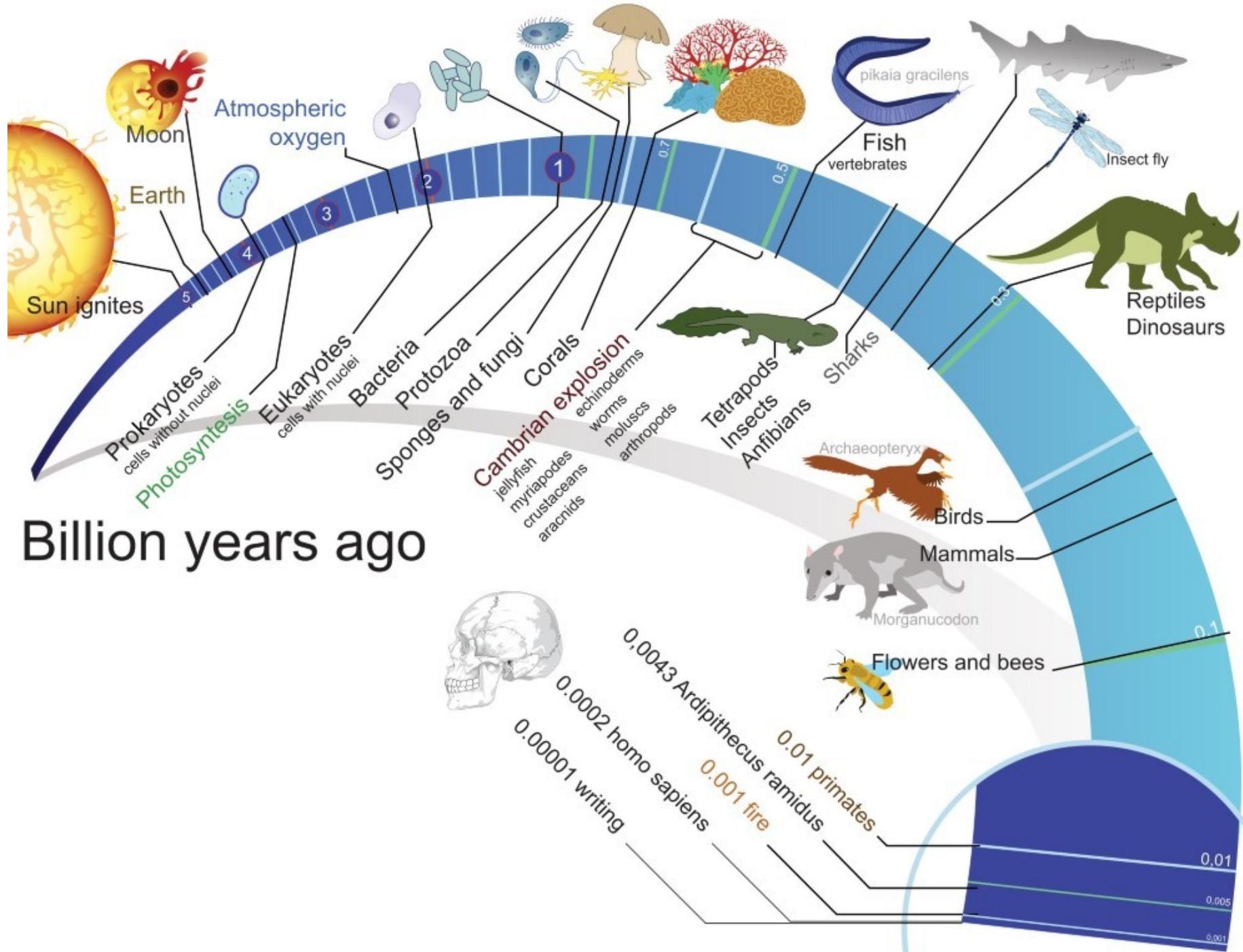


# Problemi sa detekcijom

- Naši teleskopi su i dalje ograničeni, a u poređenju sa rastojanjima – planete su majušne
- Jedino možemo da vidimo velike planete koje su blizu zvezda zato što ih tako više perturbuju
- Da živimo oko neke druge zvezde, bilo bi nam nemoguće da detektujemo Zemlju



# Život – postoji skoro koliko i naša planeta



# Život na drugim planetama

- Trenutno, jedan od velikih zadataka astrofizike je potraga za takozvanim **biomarkerima** – signalima u spektrima planeta oko drugih zvezda koji bi mogli da nam signalizuju prisustvo života – npr. Ugljen-dioksid

