Kozmológia

Bevezetés a csillagászatba 10.

Muraközy Judit

Debreceni Egyetem, TTK

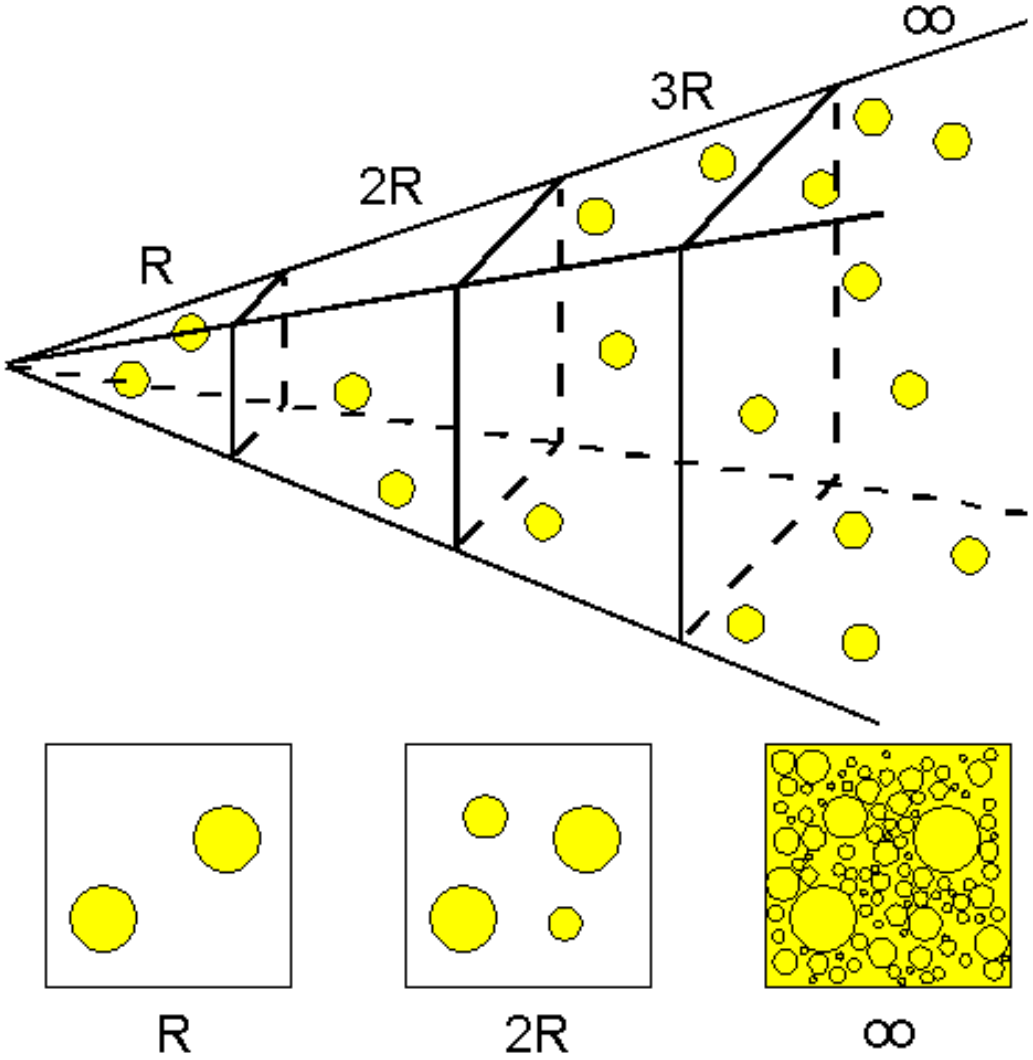
2023. 11. 30.

Miért van éjszaka sötét?

Wilhelm Olbers, 1826

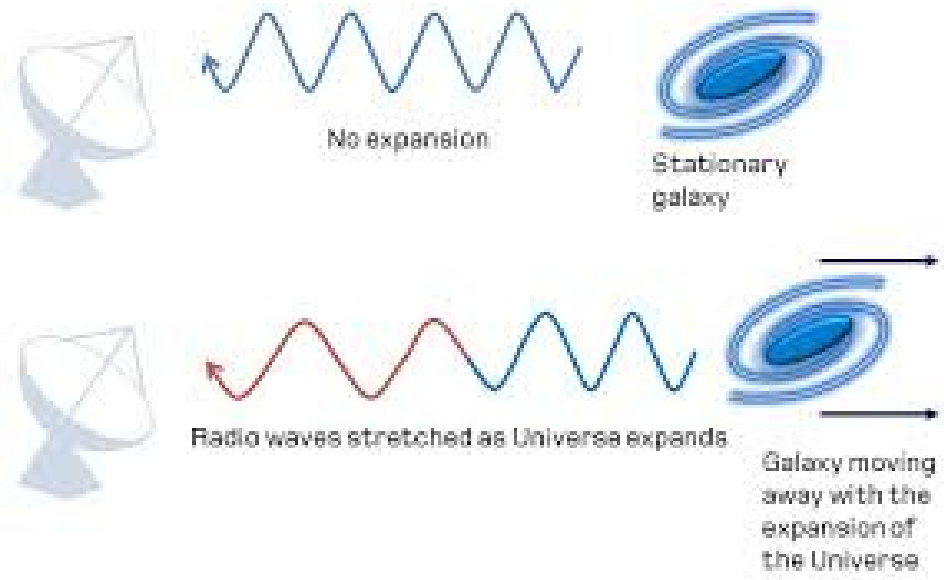
Olbers-paradoxon

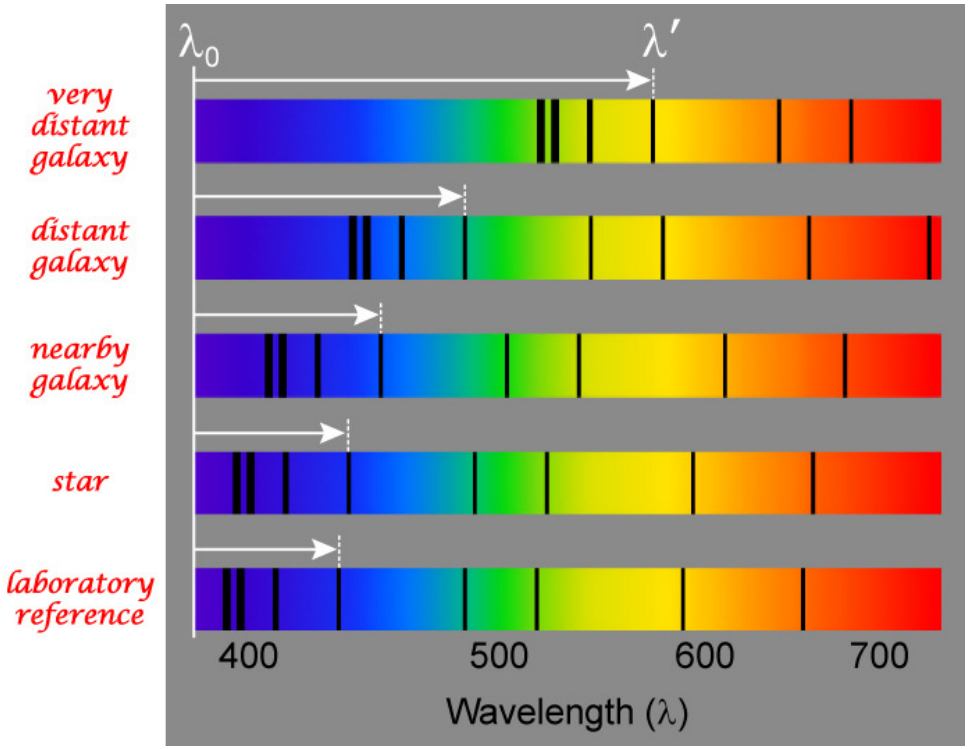
Wilhelm Olbers, 1826



- Végtelen VE
- Végtelen számú, egyenletes eloszlású csillagok
- Az éjszakai égboltnak fényesnek kellene lennie.

Vöröseltolódás





$$Z = \frac{\lambda_{mf.} - \lambda_{val.}}{\lambda_{val.}}$$

Edwin Hubble (1929)

$$a(t) = \frac{r(t)}{r_0}$$

$$r(t) = a(t) \cdot r_0$$

$$dr(t) = \frac{da(t)}{dt} r_0$$

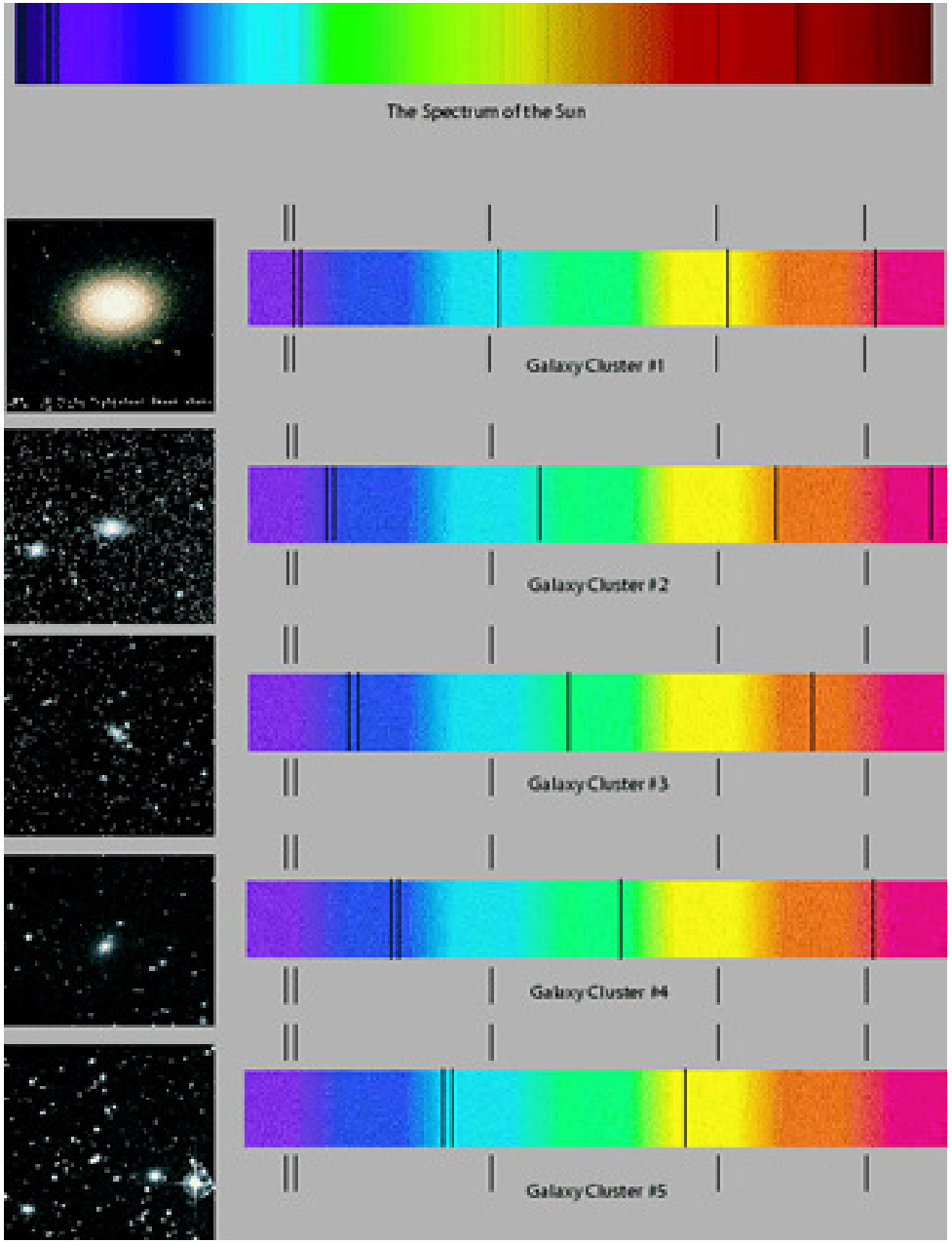
$$v(t) = \dot{a} \cdot r_0 = \frac{\dot{a}}{a} r(t)$$

$$H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$$

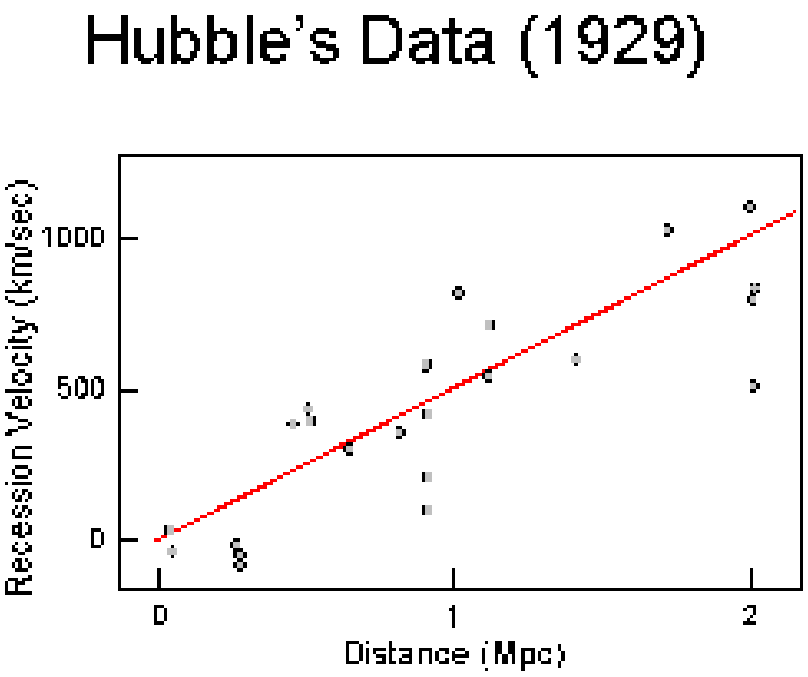
$$H(t) = \frac{v(t)}{r(t)}$$

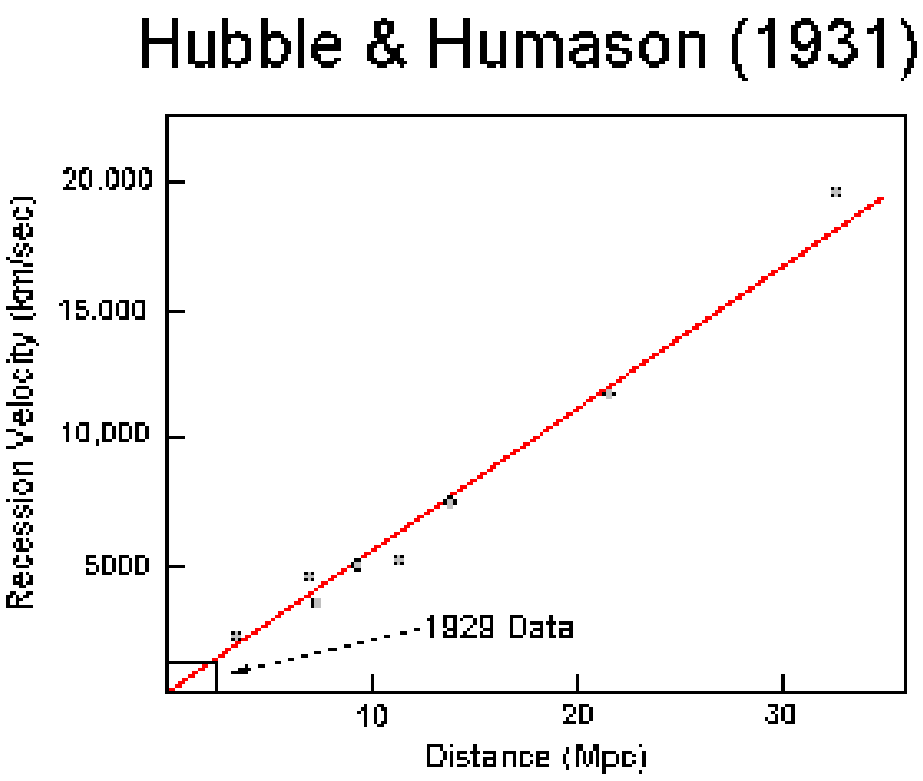
- Galaxisok spektroszkópiai vöröseltolódása és távolsága közötti kapcsolat keresése
- A távolság és a távolodás gyorsasága között lineáris kapcsolat
- Hubble idő: H reciproka, az Univerzum kora

Edwin Hubble (1929)



Hubble törvény

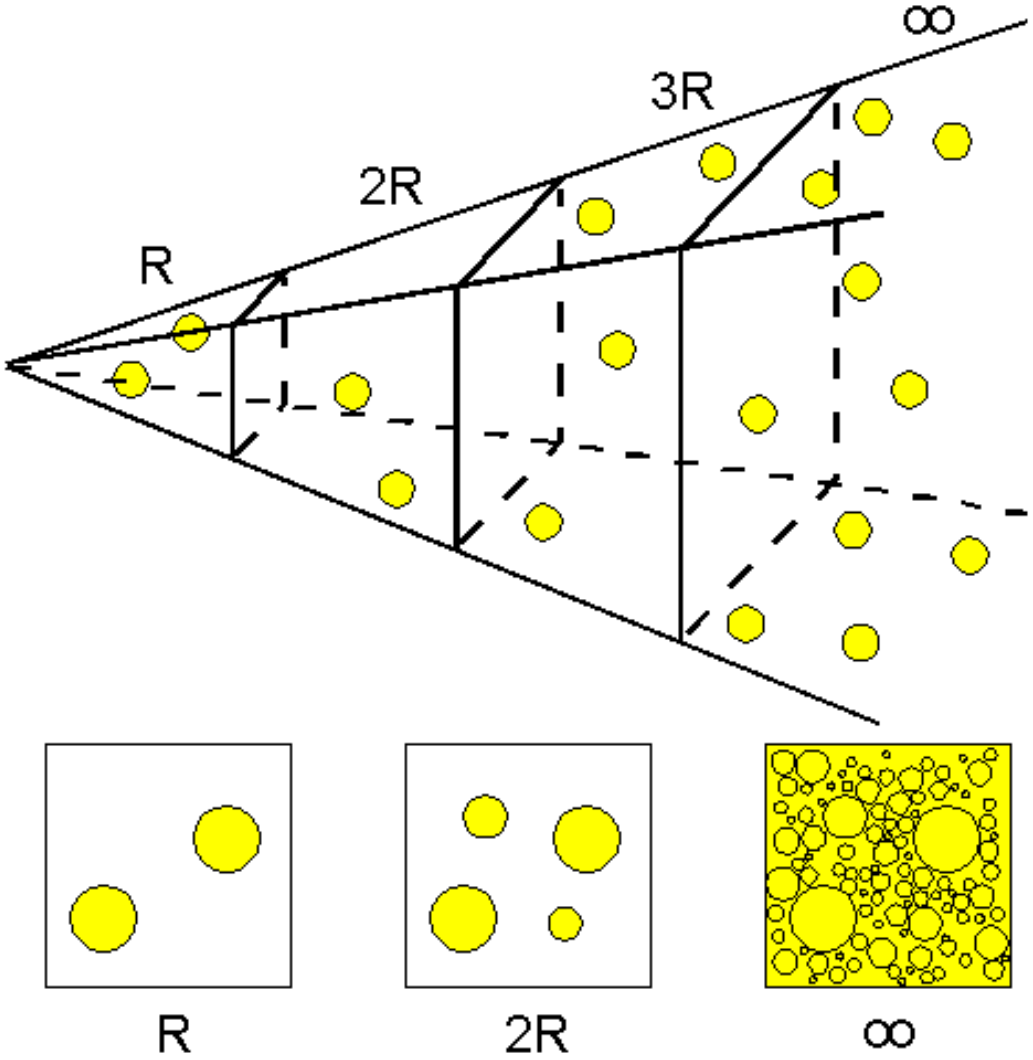




$$v = H_0 \cdot d$$

Olbers-paradoxon

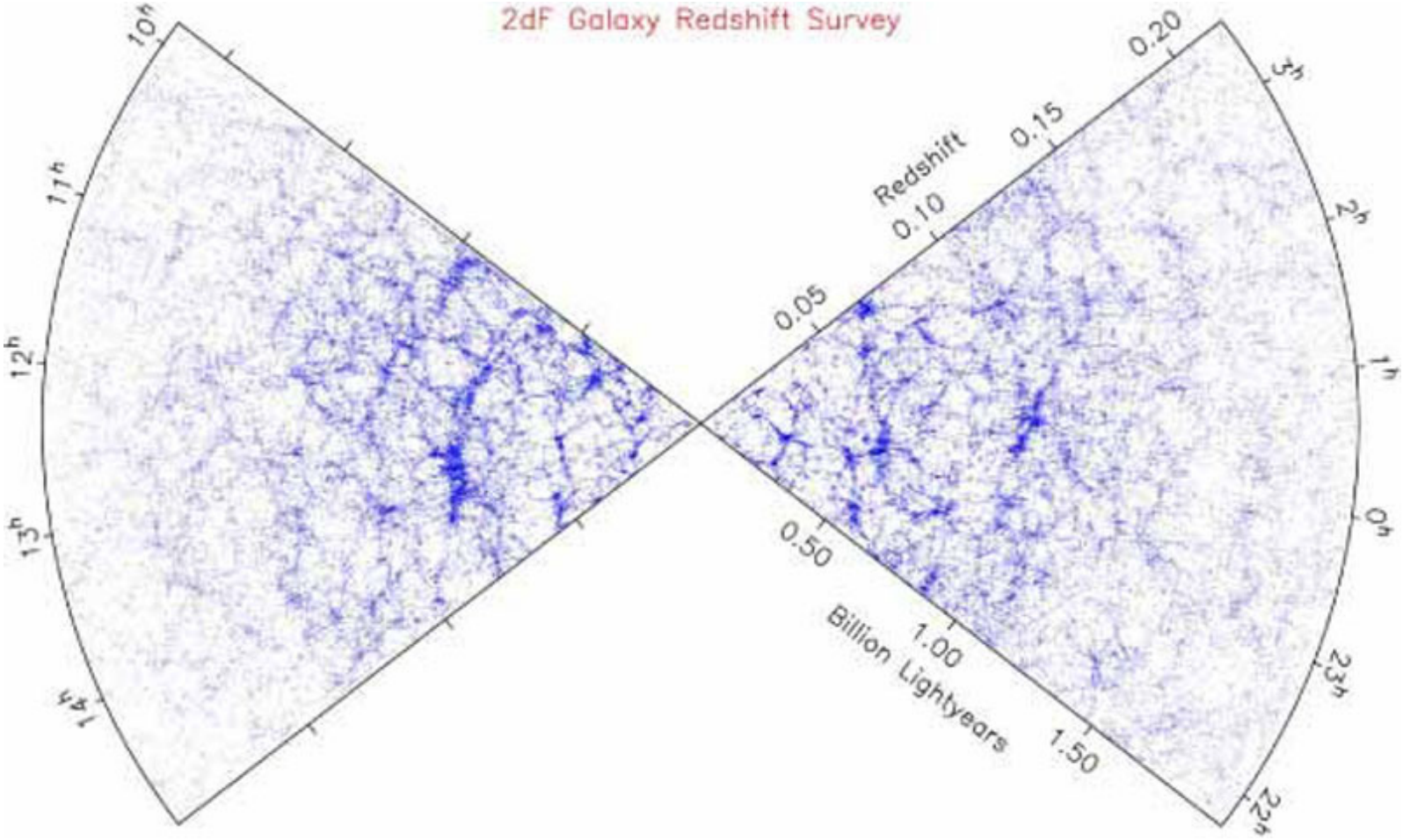
Wilhelm Olbers, 1826



- Végtelen VE
- Végtelen számú, egyenletes eloszlású csillagok
- Az éjszakai égboltnak fényesnek kellene lennie.

- De nem az, mert a galaxisok távolodnak, így a fényük gyengül, fotonjaik energiája csökken.

Kozmológiai elv



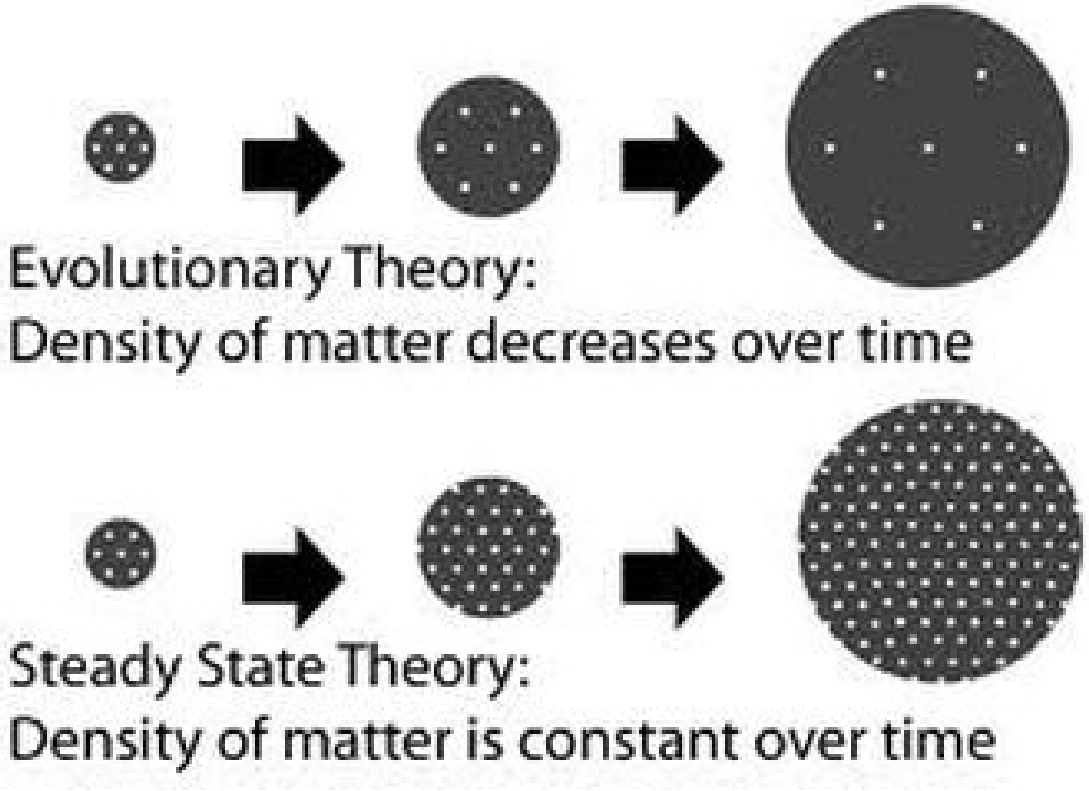
Az Univerzum uniform

- A VE izotróp (nincs kitüntetett irány, rotációval szemben invariáns)
- A VE homogén (minden távolságban egyforma, transzlációval szemben invariáns)
- A fizikai törvények univerzálisak.

Kiinduló empírikus tények

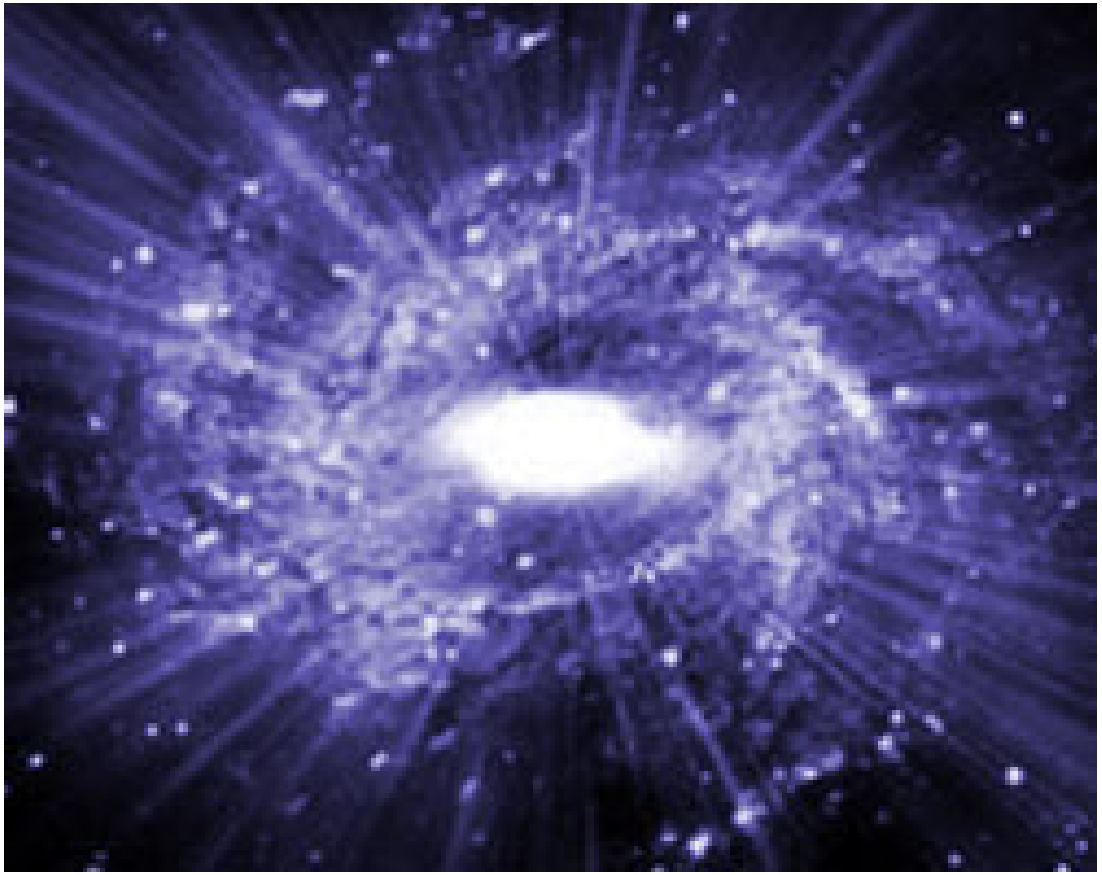
- Az Univerzum fejlődik.
- Az Univerzum részei csoportokat alkotnak.
- Az Univerzum tágul.

Steady State Model



- Fred Hoyle
- Állandó állapotú VE
- Változatlan sűrűség
- Milliárd évente 1 db H atom keletkezése / 1 liter a sűrűség állandó marad a megfigyelt távolodás ellenére is
- QSO-k csak nagy távolságokban
- CMB spektrumában nincs irányfüggés
- H értéke szerint T=2 milliárd év, mely ellentmond a csillagok korára kapott értéknek
- H értékének is állandónak kell lennie, tehát v-nek nőnie kell a d-vel. Gyorsító hatás?

Big Bang, avagy a Nagy Bumm

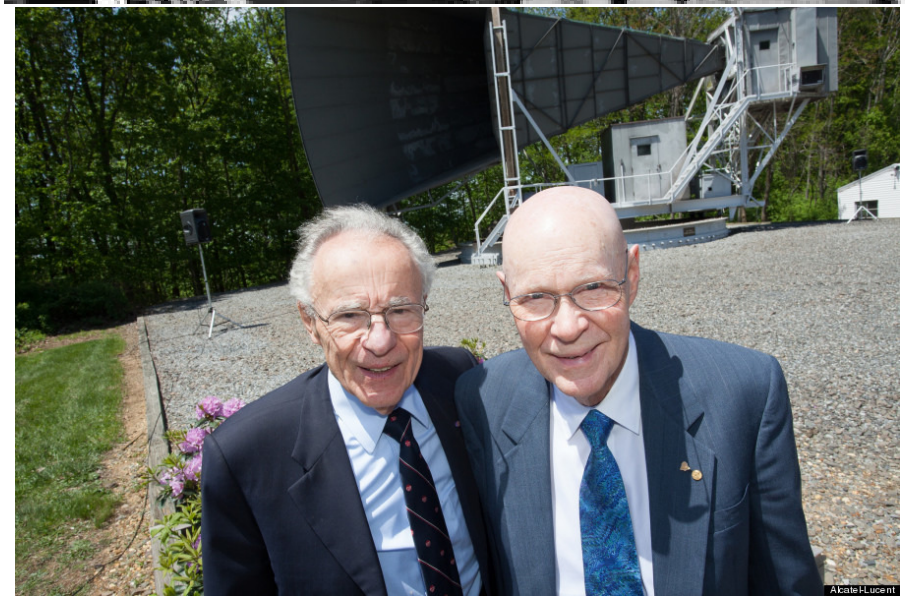


- Kezdeti állapot: óriási sűrűség, nagy hőmérséklet, kvarkok, a fotonok szabad úthossza igen kicsi
- Az energiasűrűség véges idővel ezelőtt végtelen volt = szingularitás, ősrobbanás
- Az Univerzum saját sugárzása számára is átlátszatlan volt
- Gyakorlatilag ideális feketetest állapotban volt

Big Bang, avagy a Nagy Bumm

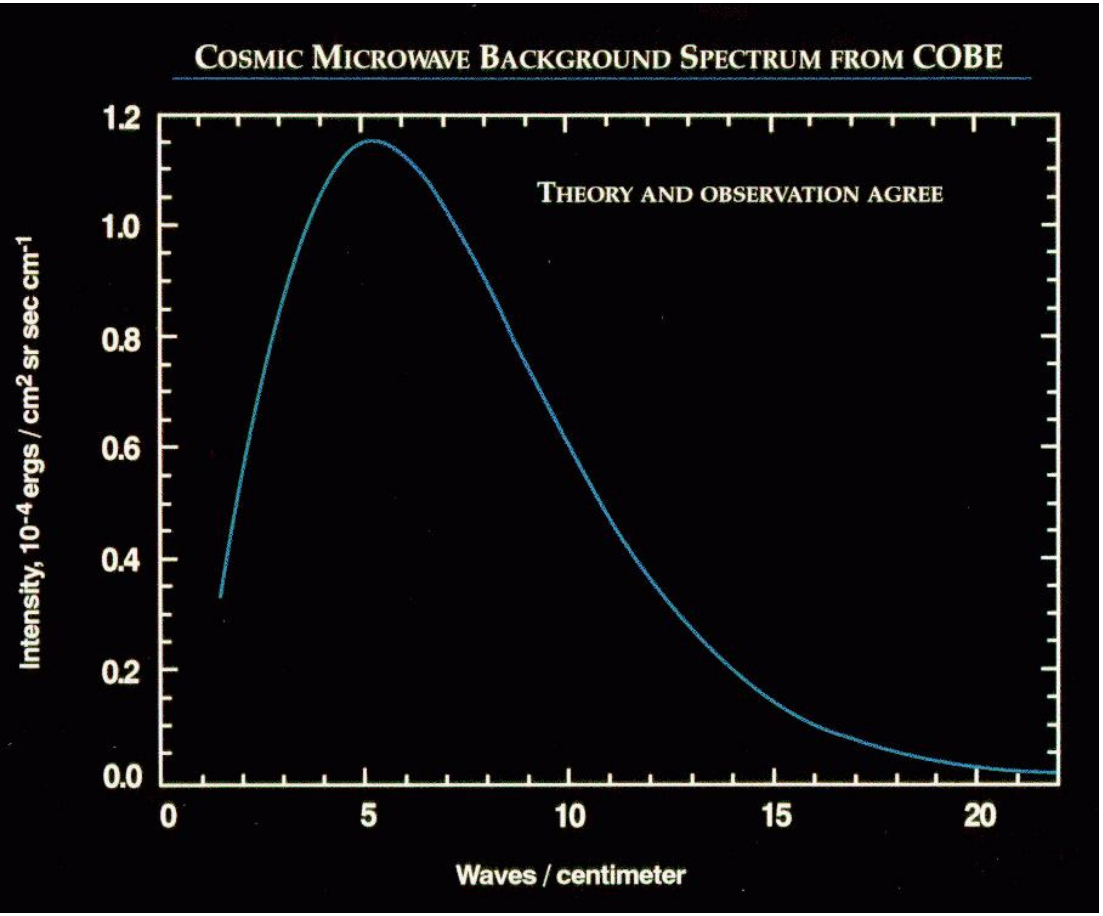
- Ha van kezdeti állapot, akkor az eredeti hőmérsékleti sugárzás ma is jelen lehet nagyobb hullámhosszon (G. Gamow)
- Lehet, hogy nem lehet kimutatni ...

Big Bang, avagy a Nagy Bumm



- Arno Penzias és Robert Wilson (1965) rádiómérnökök
- Egy antenna zajának kiküszöbölése
- Ehelyett "zaj", mely galaktikus eredetű
- Kezdeti hőmérsékleti sugárzás megtalálva!

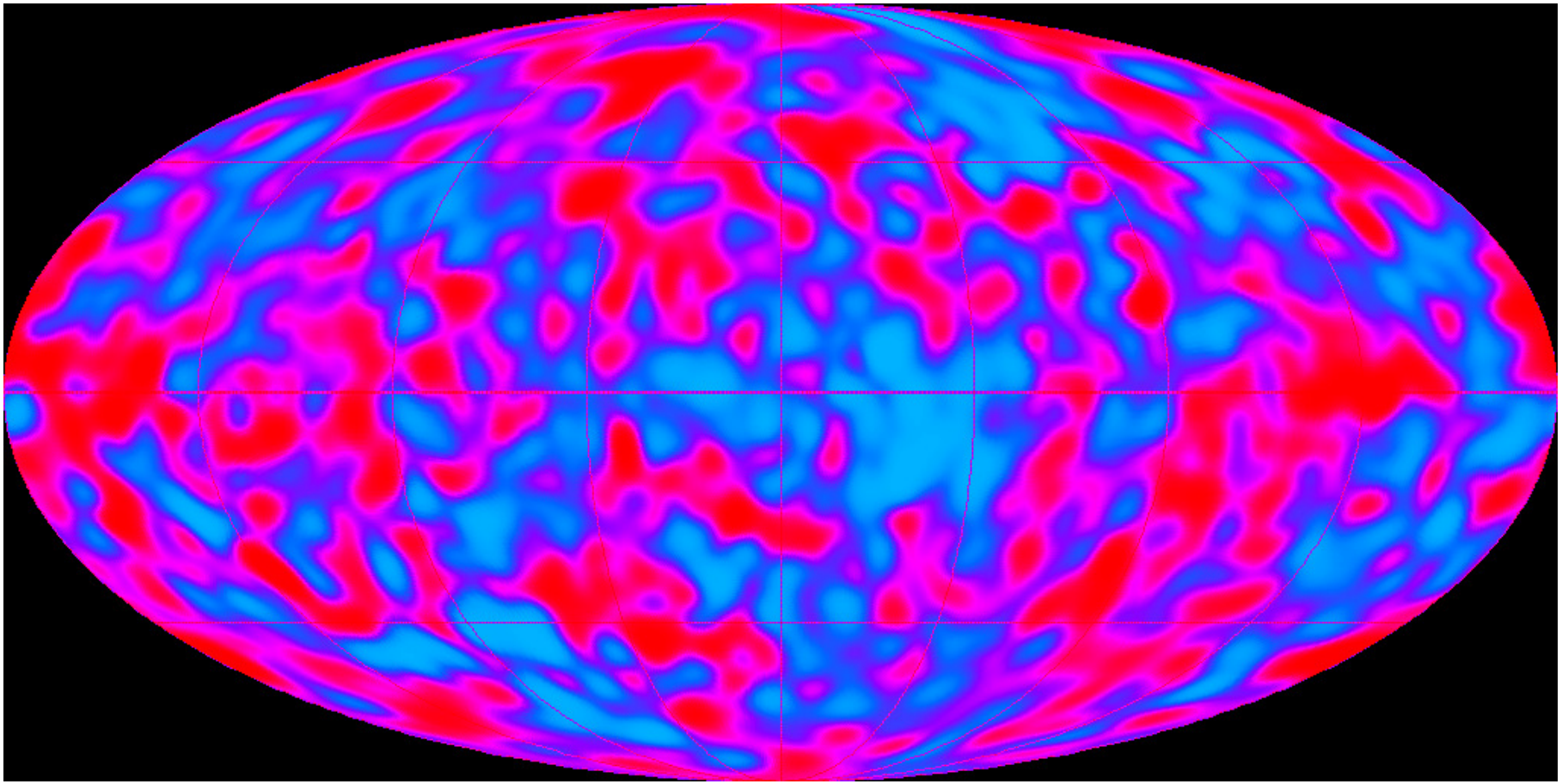
Kozmikus háttérsugárzás (CMB)



- Földi, majd űreszközökkel
- Izotróp sugárzás
- Galaxisok léte?
- **CO**smic **B**ackground **E**xplorer (NASA)
- FIRAS adatok tökéletes illeszkedése az elméleti görbére
- Maximum: 2.73 K fekete test
- Az Univerzum sugárzásának 99.9 %-a a Big Bang utáni első évből származik

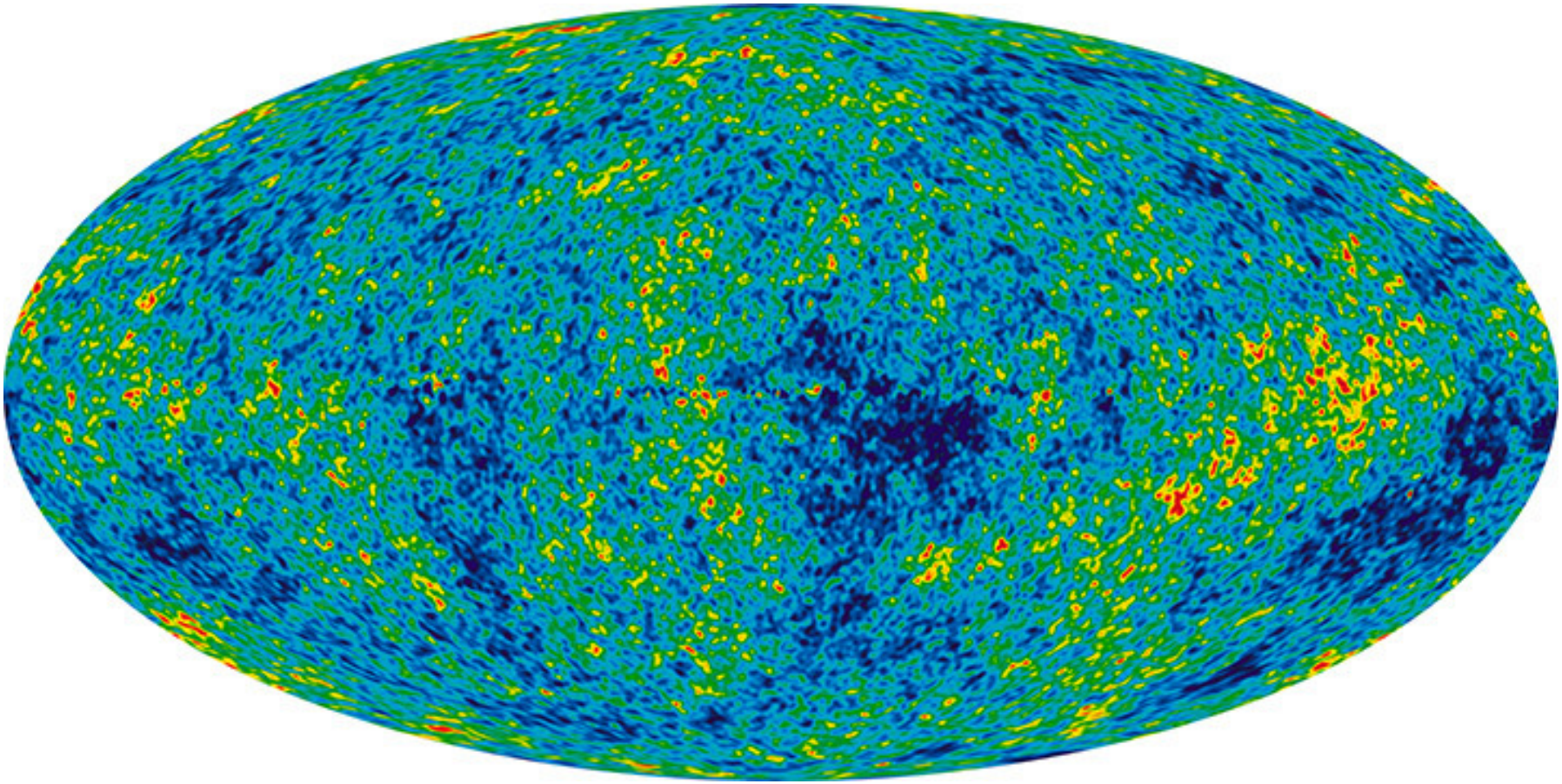
Kozmikus háttérsugárzás (CMB)

- COBE **D**ifferential **M**icrowave **R**adiometer adatok alapján
- A sugárzás anizotróp
- Feltételek teljesülése a galaxisok keletkezéséhez



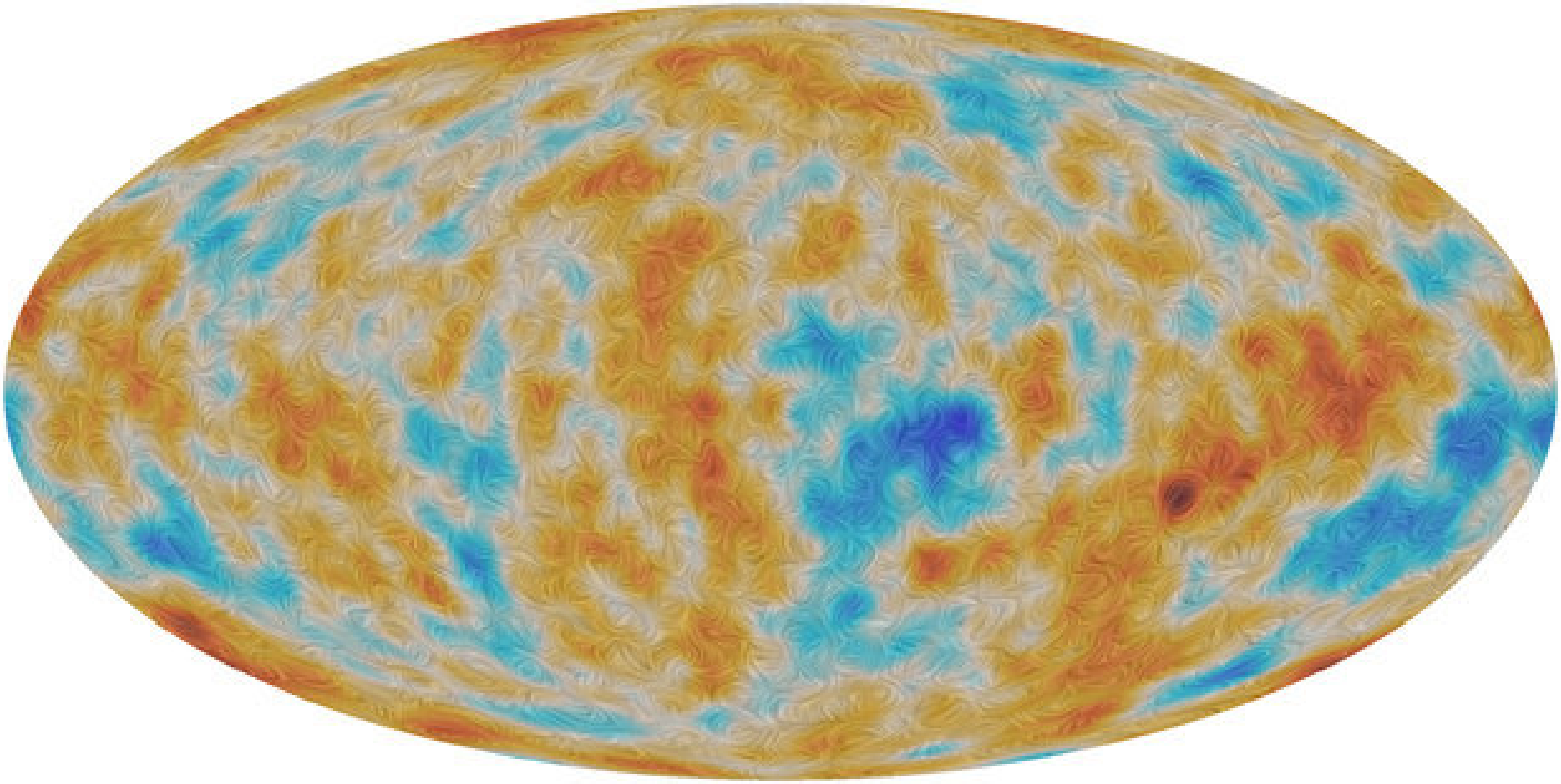
Kozmikus háttérsugárzás (CMB)

- **W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe
- Nagyobb felbontású, mint a COBE, 9 év adatai összegezve

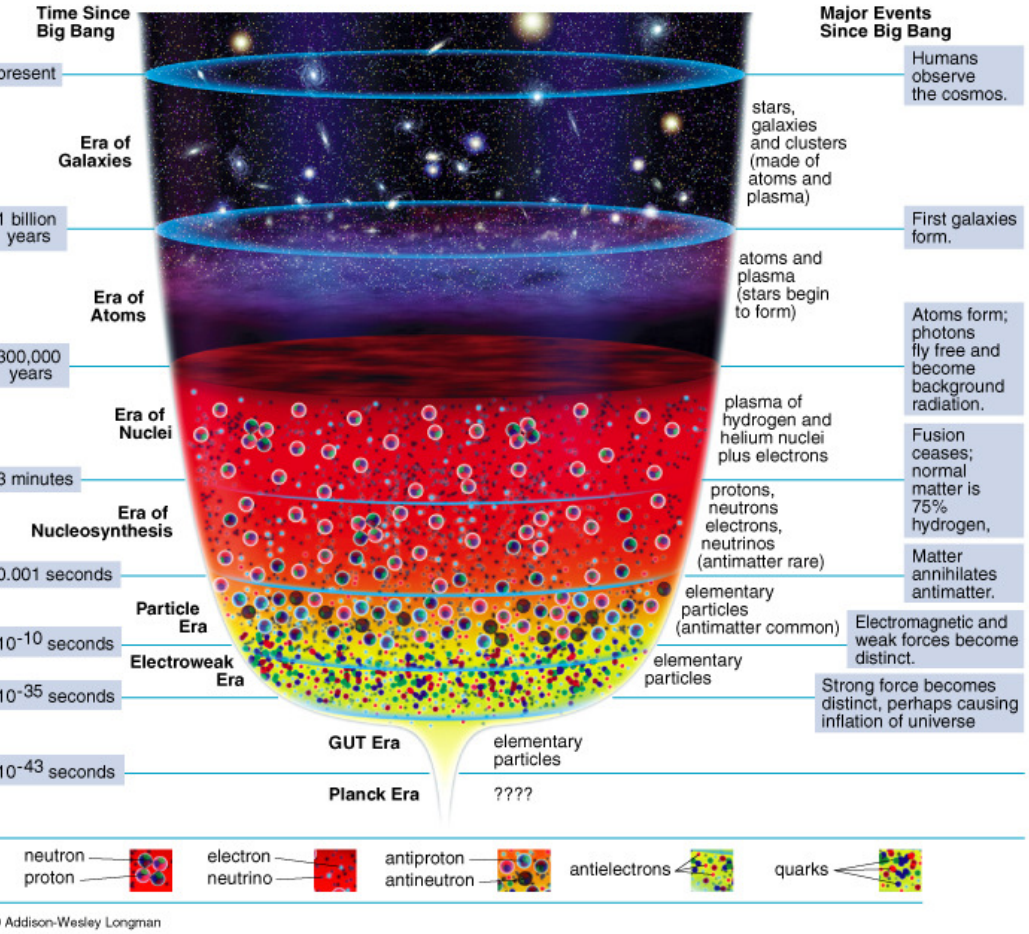


Kozmikus háttérsugárzás (CMB)

- Planck Mission (ESA)
- 2009–2013 között, még nagyobb pontosság



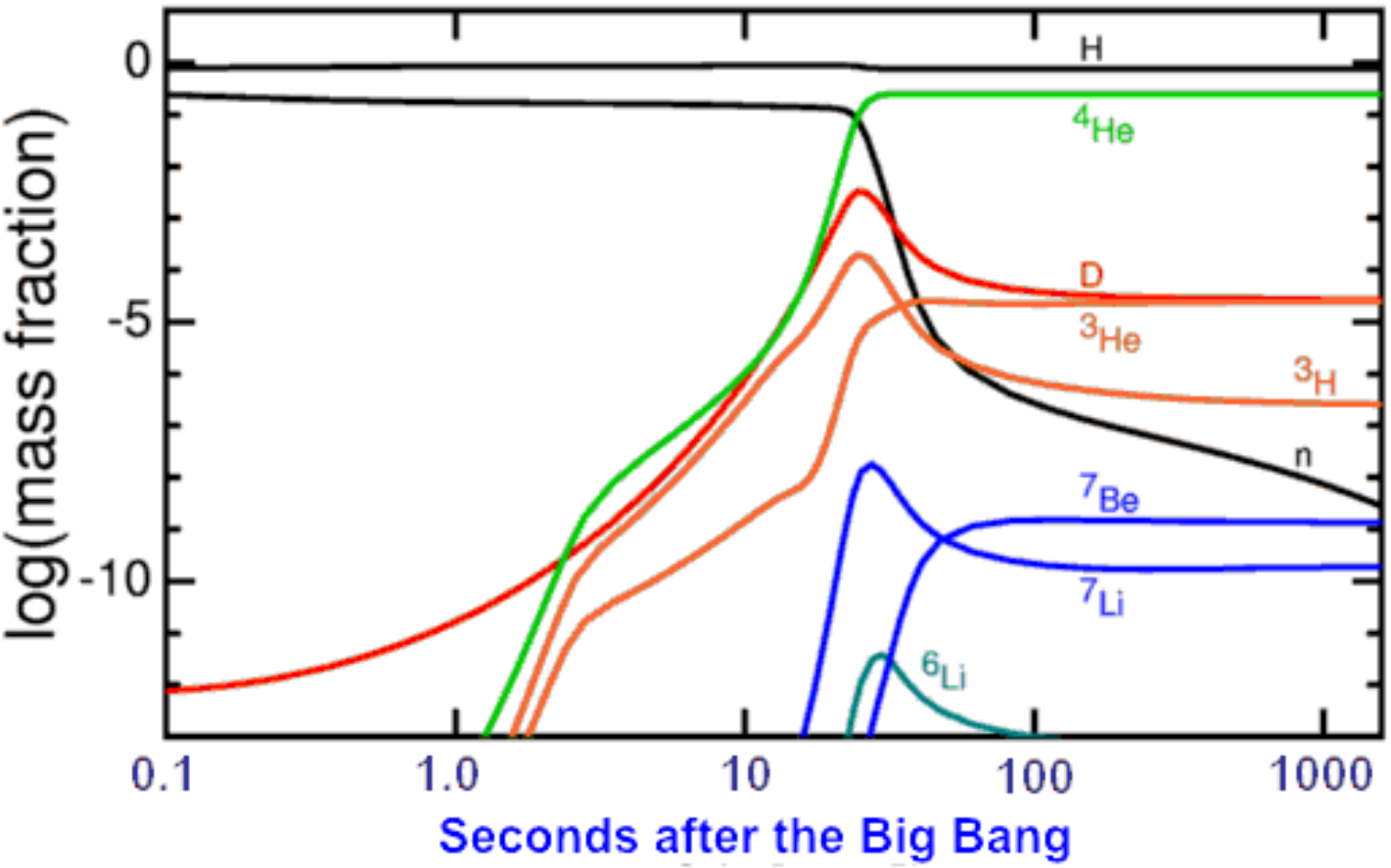
A Big Bang után



- Óriási sugárzási energia és hőmérséklet
- Hűlés ...
- Párkeltés során anyag-antianyag
- Anyag-antianyagból annihiláció útján fotonok
- Protonok keletkezése az első 10^{-6} s alatt ($T > 10^{13}$ K)
- $6 \cdot 10^9$ K$< T < 10^{13}$ K $e^- - e^+$ annihiláció

- $T >> 3$ min. T 10^9 K alá csökken, beindul a p-n fúzió, majd He atommag keletkezik és ^{7}Li
- 15 min. után nincs további nukleoszintézis (T alacsony)

A Big Bang után



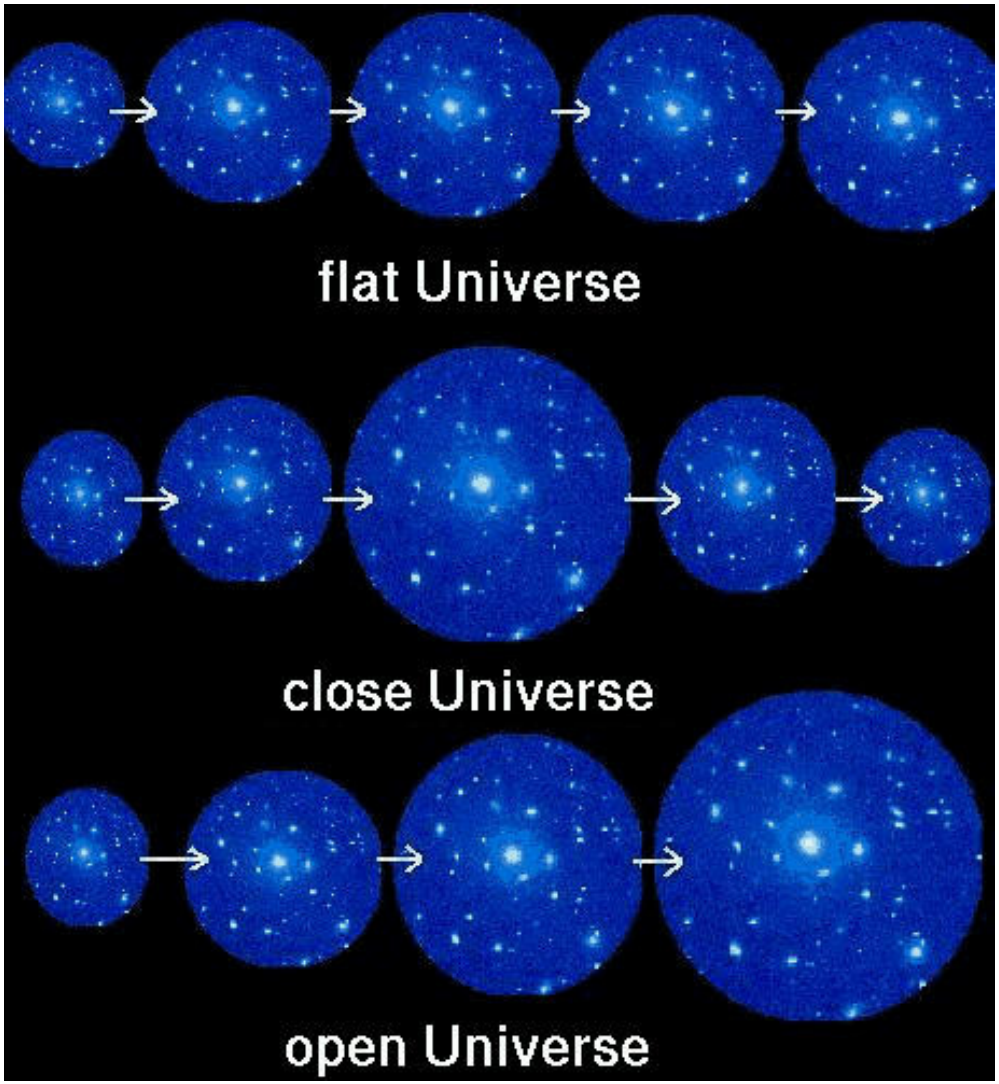
- ^{7}Li utáni elemek csillagok belsejéből
- 90 % H, 10% He, Li elenyésző mennyiségben
- Primordiális deutérium a kezdeti sűrűséget jellemzi

Az Univerzum topológiája

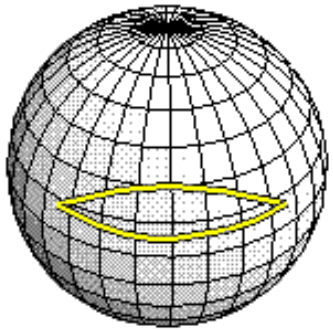
- Zárt, vagy nyitott az Univerzum?
- Egyenletes tágulás esetén

$$\rho_{krit} = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

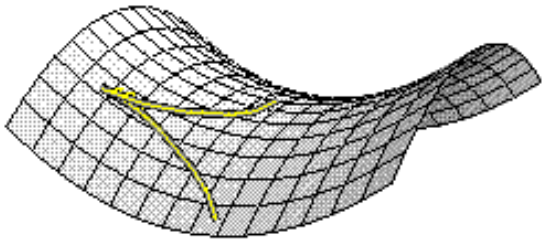
- jelenlegi értéke: $1.06 \cdot 10^{-29}$ g/cm^3 (köbméterenként 6 H atom)
- $$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{krit}.}$$
- Egyenletes tágulás esetén egységnyi, most az értéke: 0.4 ± 0.1



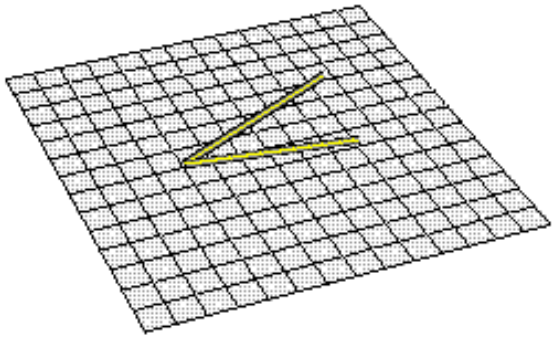
Az Univerzum topológiája



A *closed* universe curves "back on itself". Lines that were diverging apart come back together. Density > critical density.



An *open* universe curves "away from itself". Diverging lines curve at increasing angles away from each other. Density < critical density.



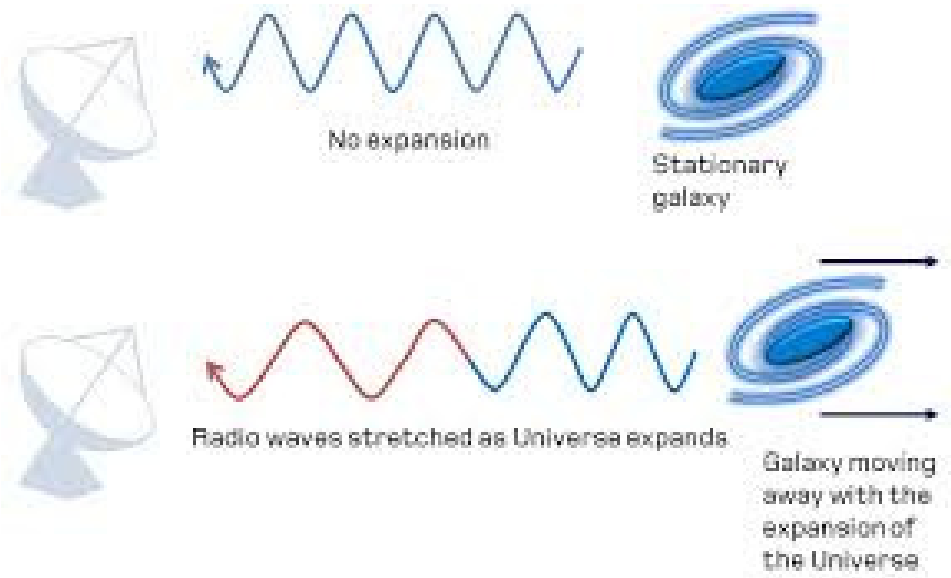
A *flat* universe has no curvature. Diverging lines remain at a constant angle with respect to each other. Density = critical density.

A tágulás időfüggése

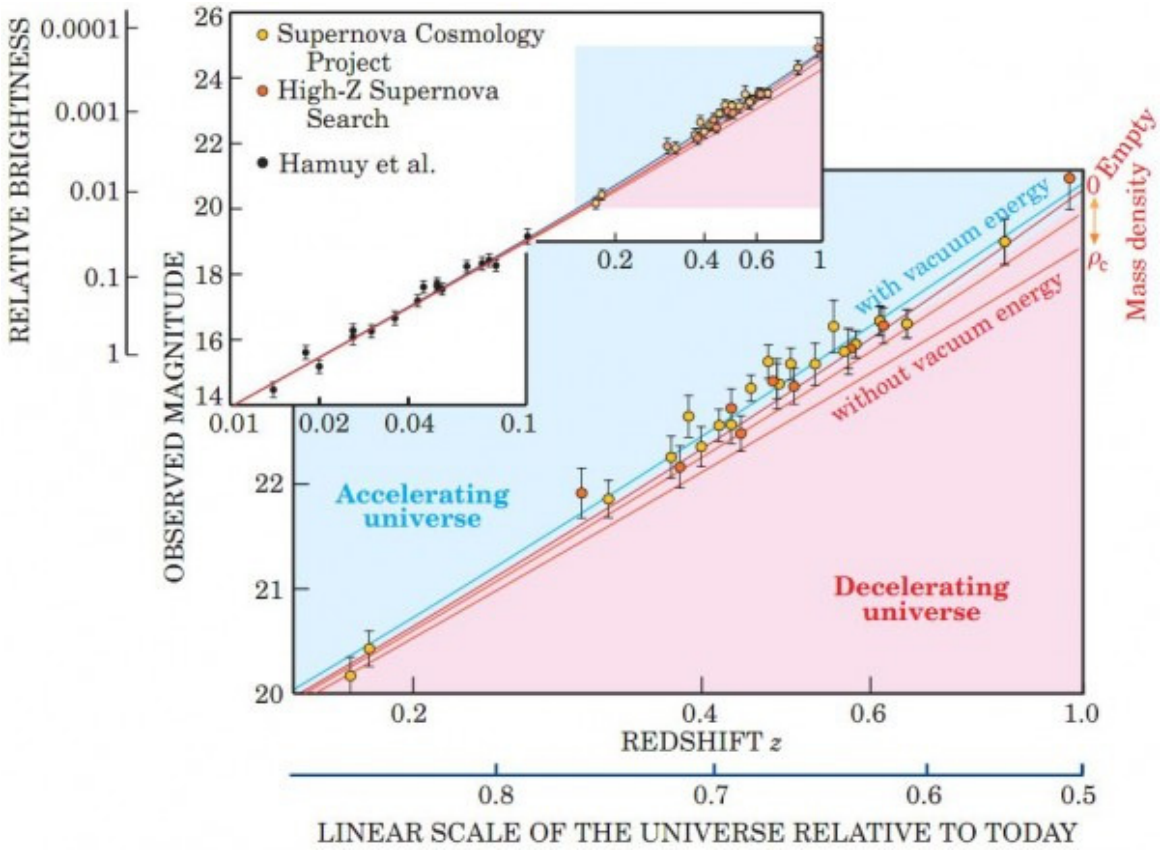
- szupernóva kereső projektek (High-Z supernova)
- Vöröseltolódás: Z

$$Z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e}$$

- Galaxisokban ezer évente 2–3 esemény
- Sötét éjszakákon 3 hetente felvételek galaxisokban gazdag területekről
- Szupernóvák = nagy távolságok jelzőfényei



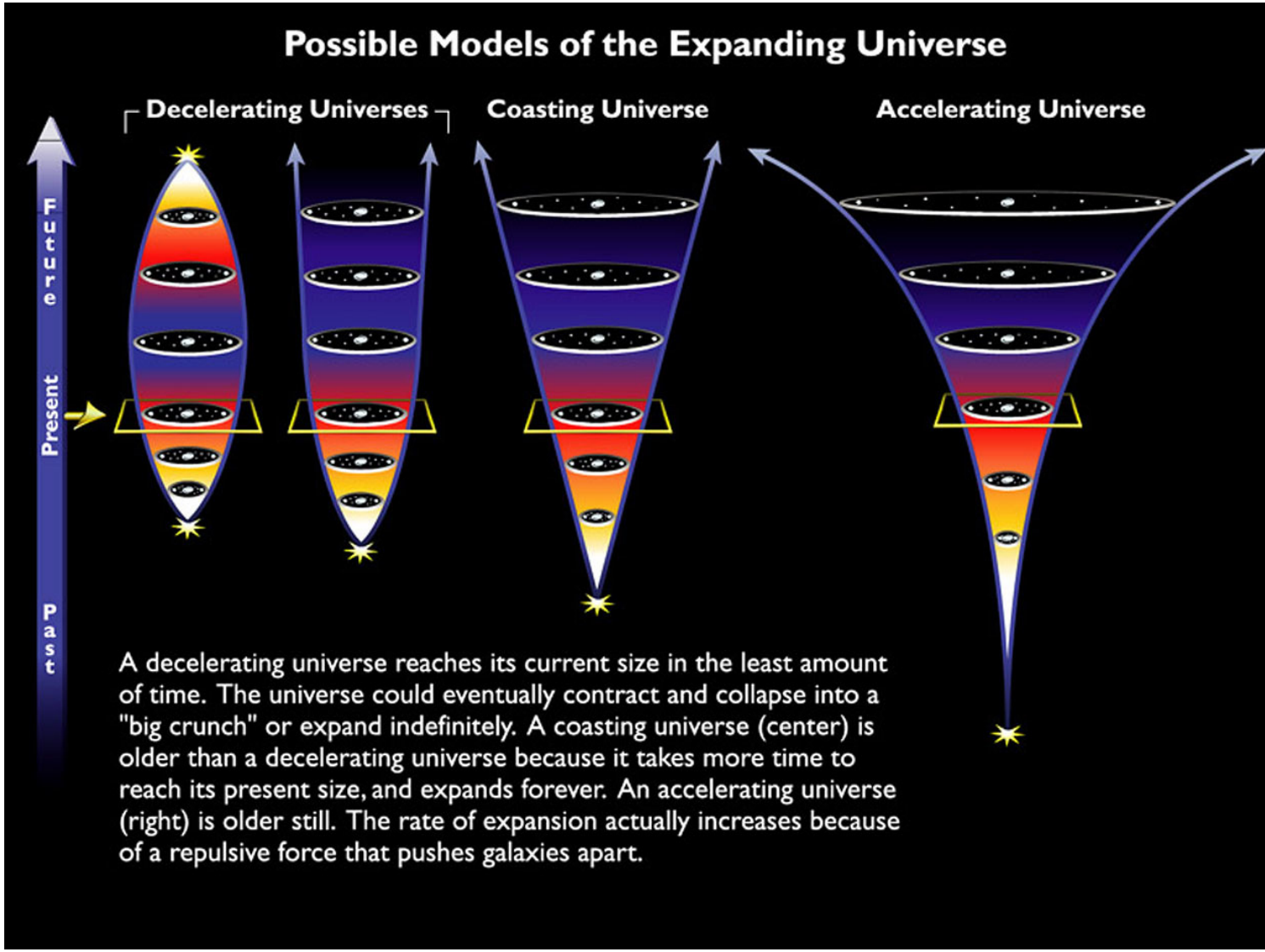
A tágulás időfüggése



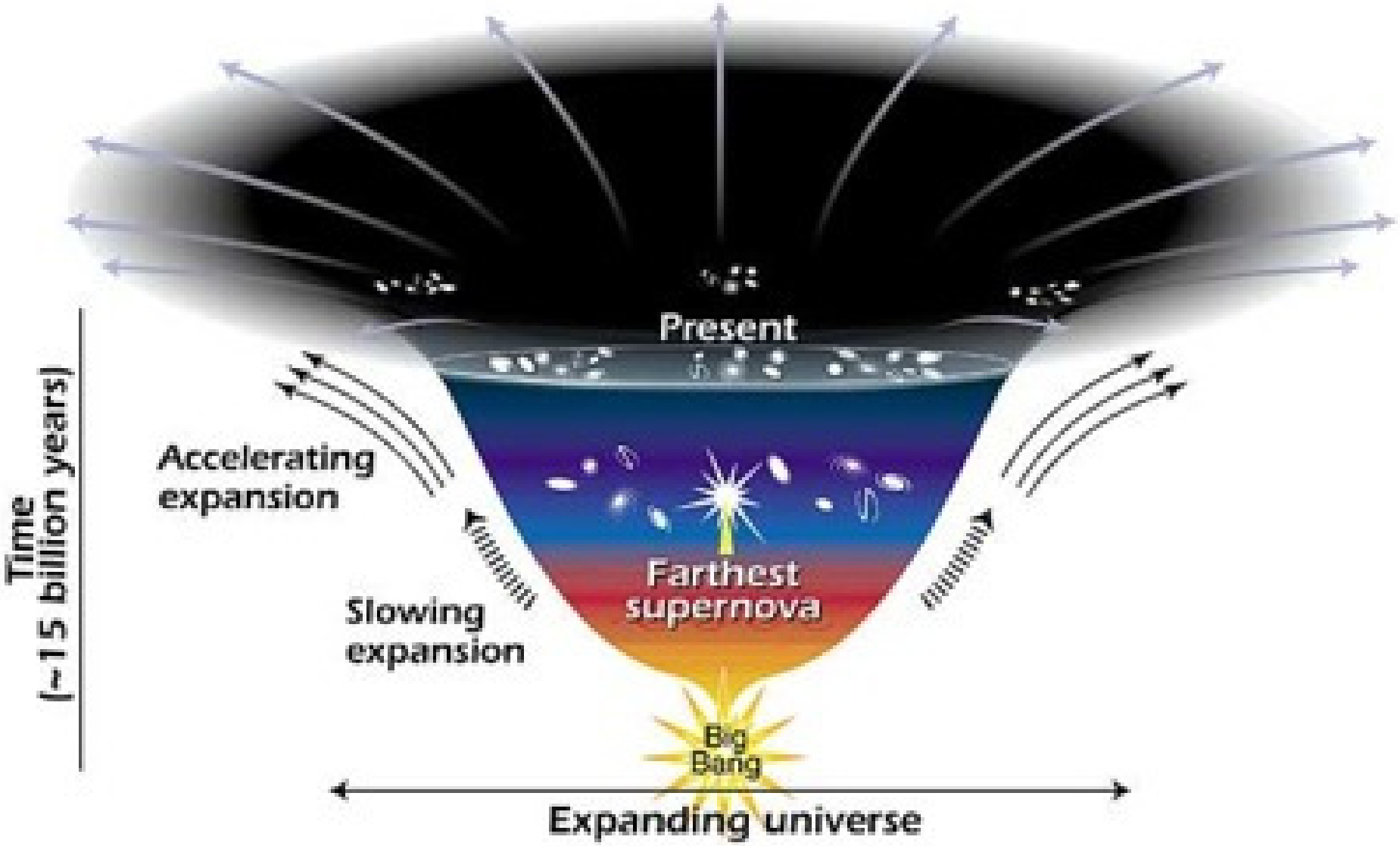
- Halványabb eseményeknél kisebb Z-k (amikor a fényük elindult, sebességük a stacionárius értéknél még kisebb volt)
- Esemény, melynek pontja 1-nél nagyobb értéknél az egyenes alá esik, azaz nagyobb fényességű (amikor a fénye elindult, közelebb volt hozzánk, tehát lassulási szakasz után következett be a gyosulás)

A tágulás időfüggése

- Lassuló tágulás
- Egyenletes tágulás
- Gyorsuló tágulás



A tágulás időfüggése



Inflációs elmélet

Ha Ω értéke > 1: az Univerzum összeomlott volna, < 1: szétesett volna.

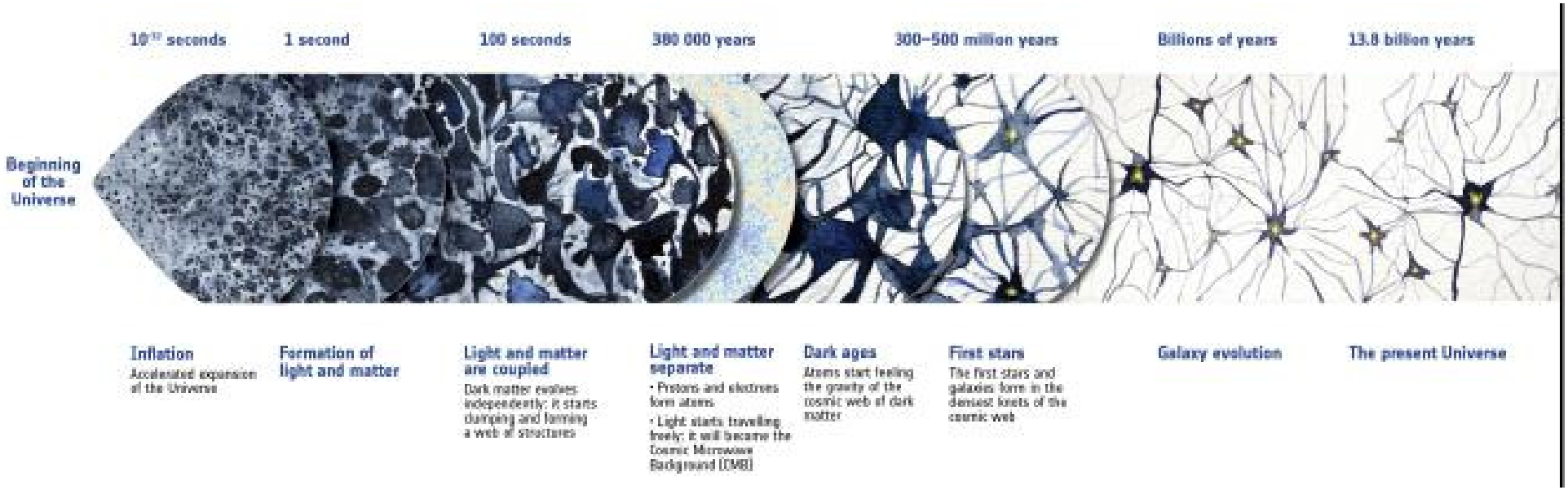
Ellentétes irányokba nézve ugyanolyan távolodás tapasztalható.

- 10^{-38} – 10^{-36} s között hatalmas felfúvódás, mialatt 10^{50}-szeresére nőtt az Univerzum
- Nagy görbület eltűnése; sík geometria
- Kezdeti kis kvantumfluktuációk megnőttek (későbbi galaxisok forrásai)
- Felfúvódás előtti kis anyag túlsúly megőrzése
- Az infláció kimentette az Univerzumot az ősrobbanás utáni tömeges annihiláció állapotából
- WMAP és Planck mérések által igazolva (háttérsugárzás egyenetlenségei, hőmérséklet különbségek)
- H_0=67.8 $\pm$ 0.77 km/s/Mpc

Sötét energia

- Az Univerzum tágulásának lassulása: a gravitáció mellett ellentétes hatásnak is léteznie kellett
- 7.5 milliárd év után gyorsuló tágulás (sötét energia)
- Az Univerzum összetétele: 68.5 % sötét energia, 26.6% sötét anyag, 4.9% barionikus anyag

BBN (Big Bang Nucleosynthesis)



- Planck kor: 10^{-43} s-ig, T > 10^{32} K
- Kvark kor: kvarkok, e^+-ok és antirészecskék
- Hadron kor: 10^{-32} s-tól, p és n kialakulása
- Lepton kor: kb. 1 s-ig, stabil elektronok
- Sugárzás dominálta kor: 1 millió évig, H–He fúzió, CMB
- Anyag korszak: csillagok és galaxisok kialakulása