

Magyar fizikatanárok a CERN-ben
2009. augusztus 17-23.

Trócsányi Zoltán

Kozmológia alapfokon

Részecskefizikai vonatkozásokkal

Az elmúlt negyedszázad a
mikro- és makrokozmosz
fizikájának összefonódását hozta

1. Rész

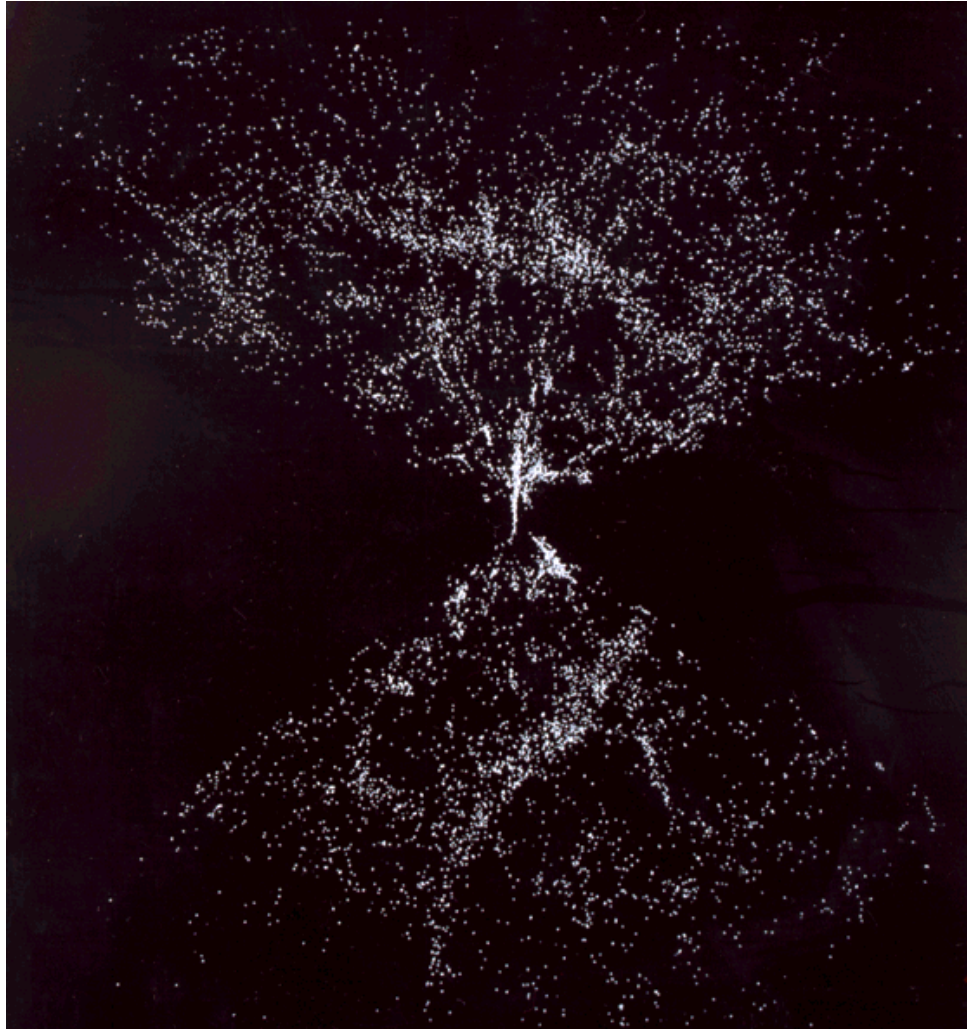
A táguló Világegyetem

A Világegyetem szerkezete



Egy-egy galaxisban 10^{11} db csillagot látunk

A Világegyetem szerkezete



10^{11} db galaxist látunk

Nagy skálán homogén és izotróp, (1. kérdés: honnan tudjuk, ha kis skálán szerkezete van?)

Galaxisban

(0,1Mfényév)

$\Delta\rho/\rho = 1000\ 000$

Galaxishalmazokban

(3 Mfényév)

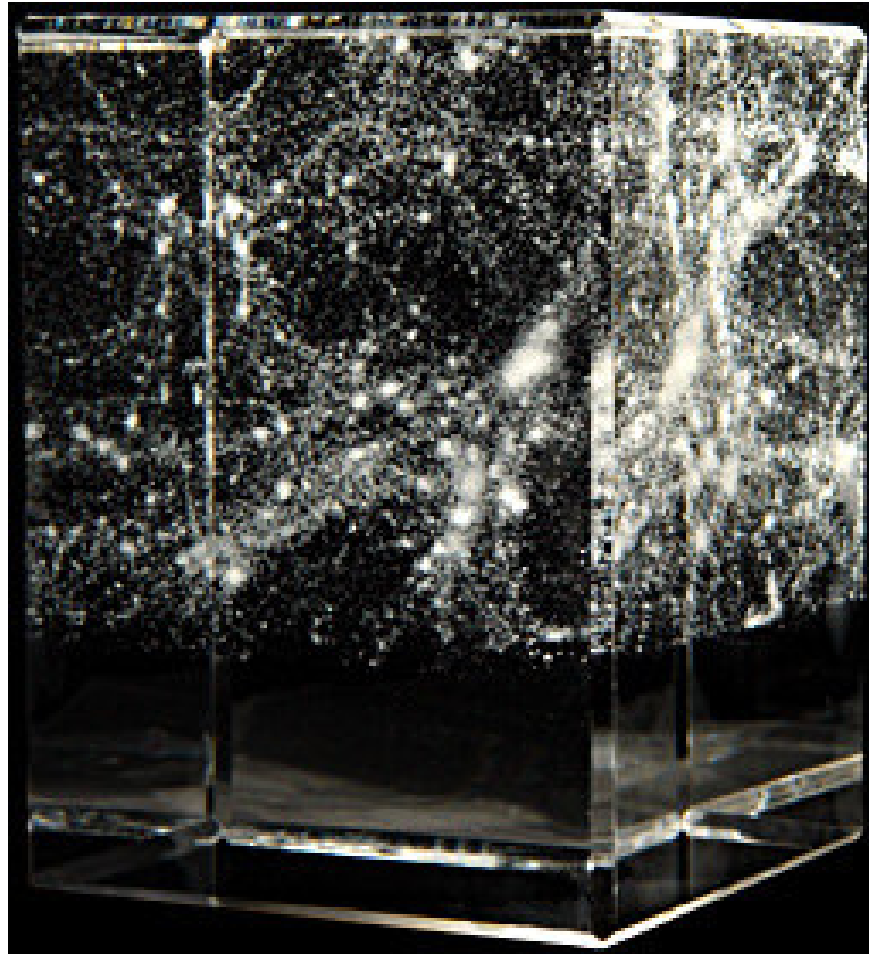
$\Delta\rho/\rho = 1000$

Szuperhalmazokban

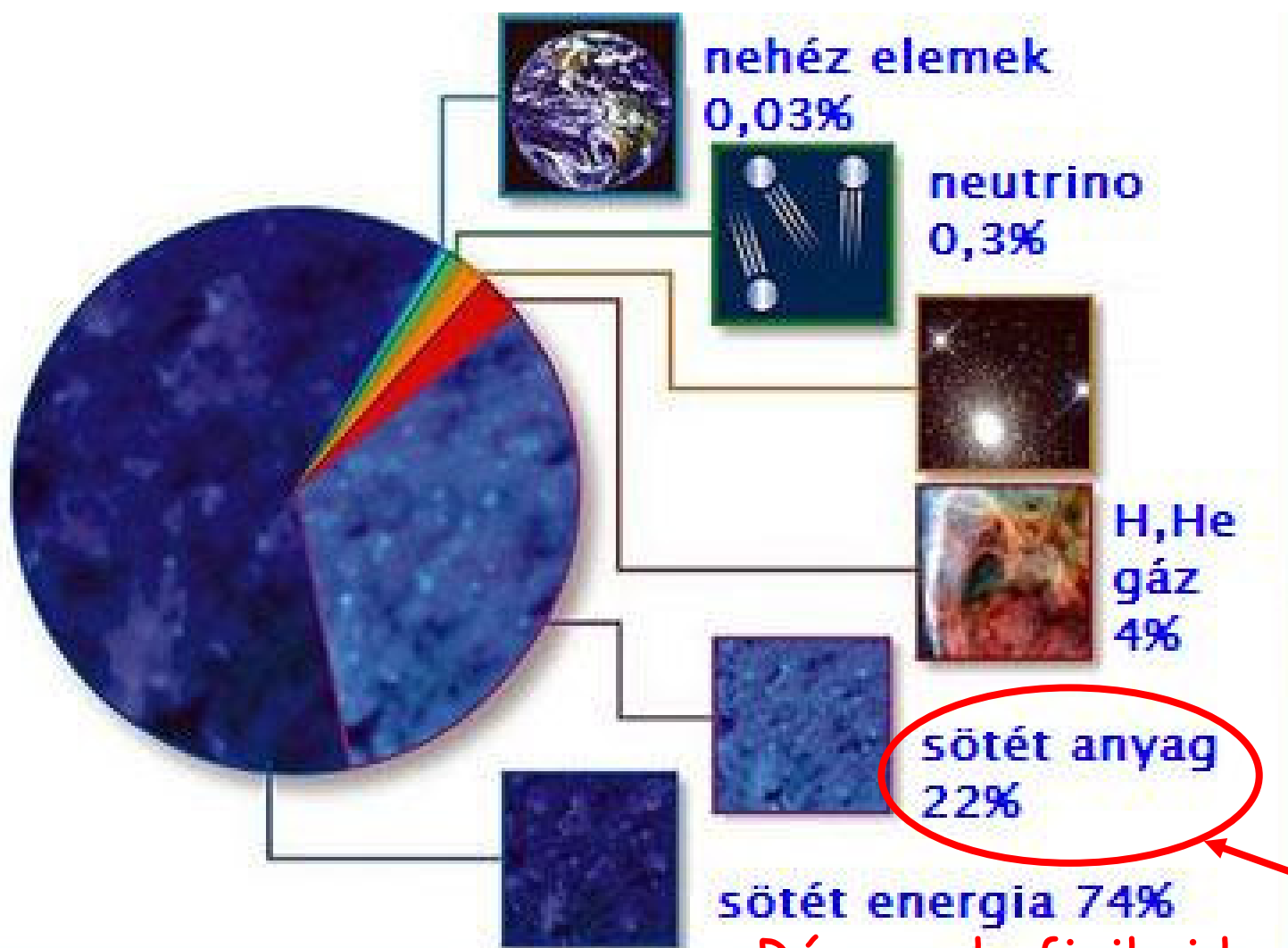
(100 Mfényév)

$\Delta\rho/\rho = 10$

A VE nagyléptékű szerkezete



A VE összetétele



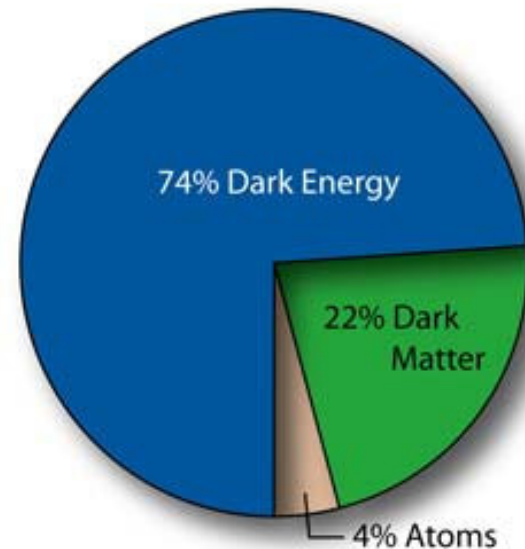
Részecskefizikai kapcsolat

Hogyan látjuk ma a világot?

- A VE születése után 0,02 mp-cel, 13,7 milliárd ($\pm 1\%$) évvel ezelőtt igen nagy sűrűségű és hőmérsékletű elektromágneses plazmával (elektronok, pozitronok, fotonok, kevéske proton és neutron) volt kitöltve
- A VE tágult és hűlt. A harmadik perc végén hőmérséklete 900 millió K alá süllyedt. Ekkor kialakultak a könnyű elemek (H, He, Li, Be, B)
- 379 ezer évvel később hőmérséklete 3000 K alá süllyedt. Ekkor kialakultak a semleges atomok, így a sugárzás és anyag közötti kölcsönhatás megszűnt. Ettől kezdve a sugárzás szabadon tágult a VE-mel és hűlt a ma mérhető 2,73 K-es értékre.
- Az első csillagok 200 millió évvel később gyulladtak ki. (film)

Hogyan látjuk ma a világot?

- A VE tágulását meghatározó Hubble-állandó értéke $71 \text{ (km/s)/Mpc } (\pm 5\%)$
- Az adatok jelenlegi értelmezése szerint a VE örökké tágulni fog, ...
- A VE tömegének **4%-a** a bennünket is felépítő **atomokból áll. 22%-a** olyan hideg „**sötét anyag**”, amelyet laboratóriumban nem sikerült előállítani. **74%-a ismeretlen eredetű „sötét energia”.**
Mindez csak 100 Mpc léptékben, nem a Földön!
- Az első 0,02 másodperc történéseire is lehet következtetni a WMAP adataiból (felfúvódás?) és **részecskefizikai kísérletekből** (film)



Honnan tudjuk mindezt?

A 20. sz. a kozmológiai megfigyelések
forradalmi fejlődését hozta

Előbb egy alapfeltevés: a VE homogén és izotróp

- Kozmológiai elv: Hit, hogy a Világegyetemet bárhol tartózkodó megfigyelő minden irányban ugyanolyan szerkezetűnek látja.
- Teljes kozmológiai elv: homogén, izotróp és időben is állandó a Világegyetem?
- Az időbeli állandóság nem lehetséges
- (2. kérdés: miért nem?)
- Einstein gravitációelméletének nincs homogén, izotróp, stacionárius megoldása
- A. Friedman (1922): talált homogén, izotróp, de nem stacionárius megoldást

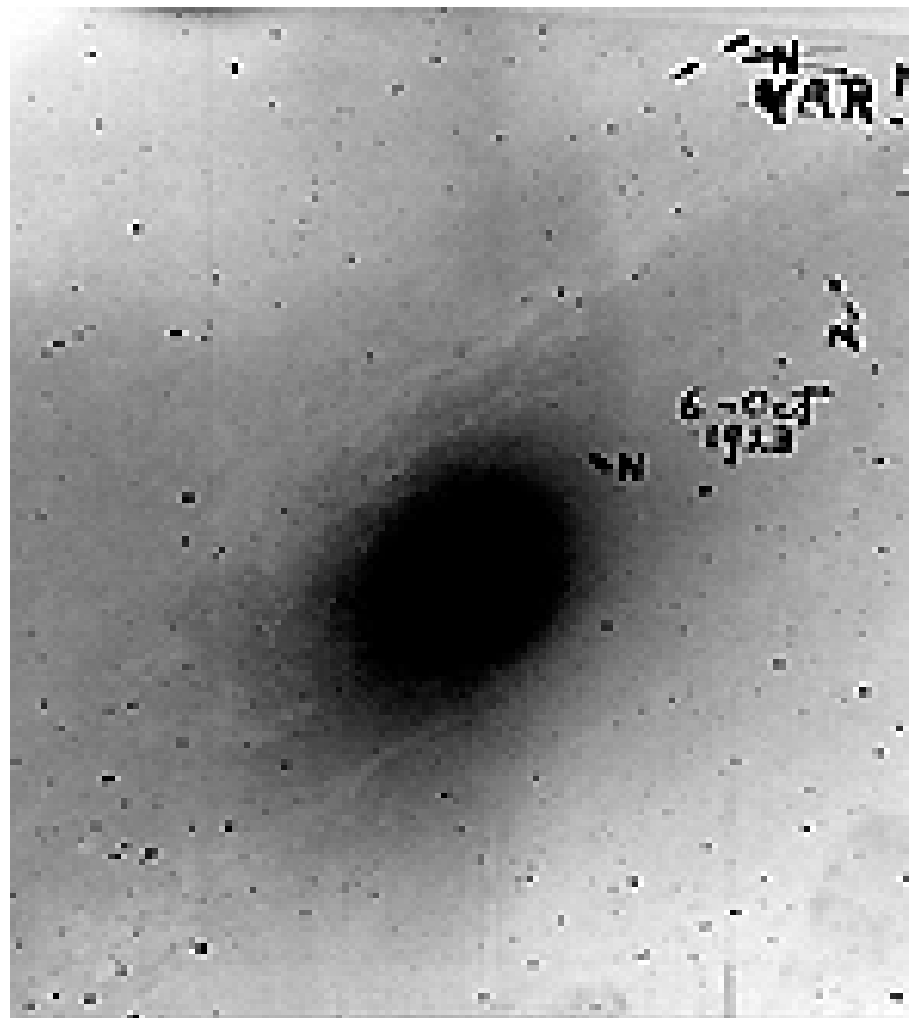


A modern kozmológia kezdete: Hubble forradalma



- 1920-29: Edwin Hubble a minden korábbinál jobb felbontású, Palomar-hegyi új távcsővel
 - Változócsillagot (Cefeidát) fedez fel az Andromédában

Cefeida az Andromédában



Miért érdekes ez?

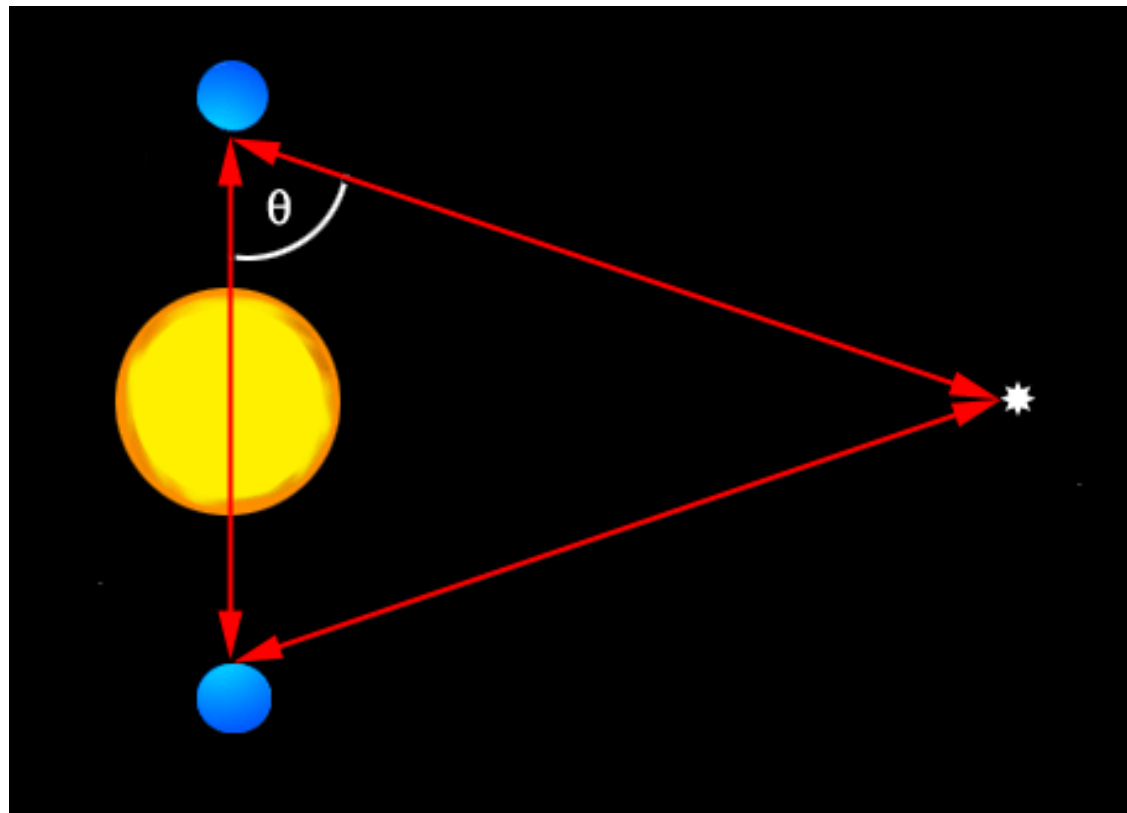
Hubble felfedezésének jelentősége

- A Világegyetemben léteznek csillagrendszerek



Hubble felfedezésének jelentősége

- A Világegyetemben léteznek csillagrendszerek
- Távolságmérésre használható
- Parallaxis módszer: $\pi/2 - \theta = (d/2)/h$



$$\Rightarrow 1\text{pc} = 1\text{AU}/1''$$

3. kérdés: Honnan ismerjük d-t (1AU)?

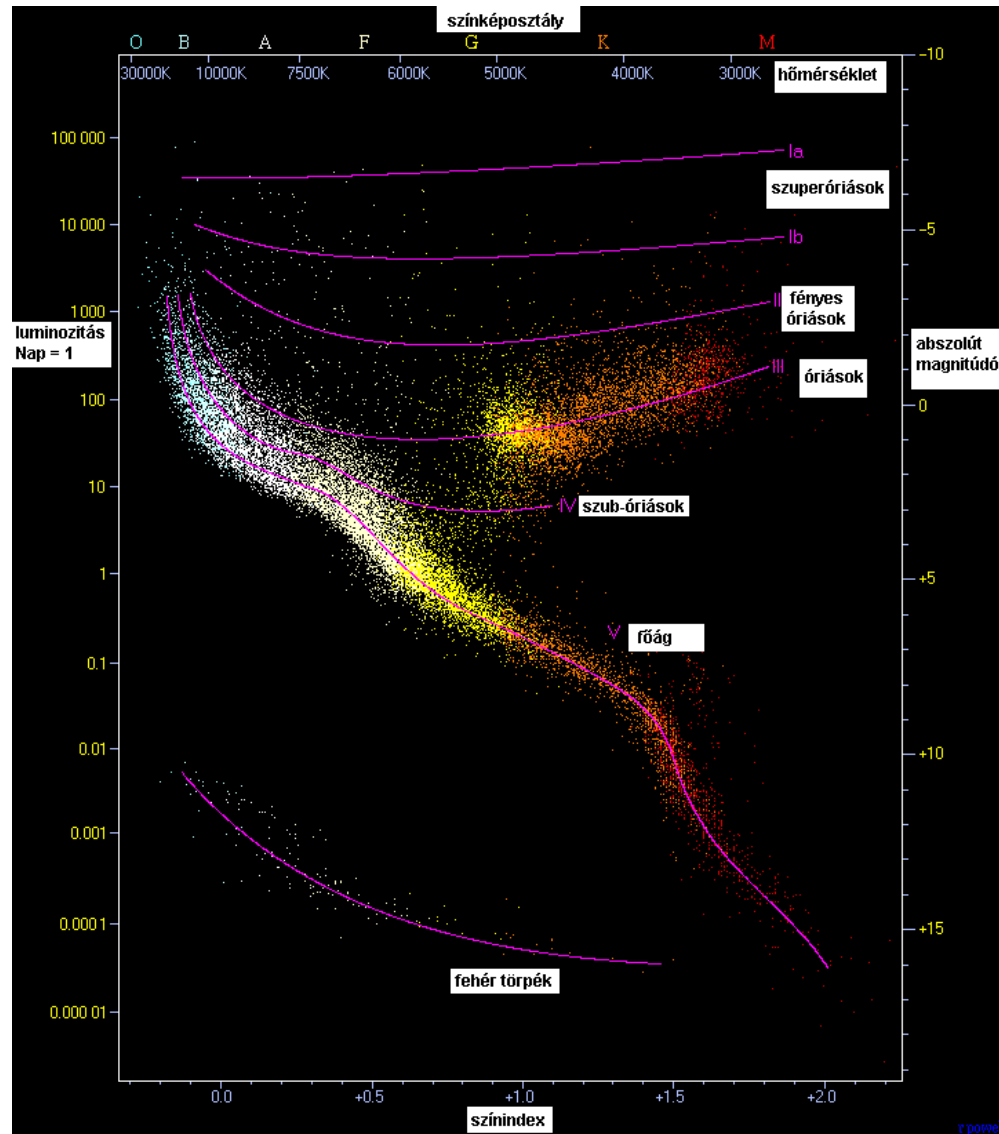
Hubble felfedezésének jelentősége

- A Világegyetemben léteznek csillagrendszerek
- Távolságmérésre használható
- Parallaxis módszer: 100 pc távolságig

Nagyobb távolságra: távolságlétra

- Csillagok fényessége alapján 50 kpc-ig
- Herzsprung-Russel diagram:

Herzsprung-Russel diagram



Hubble felfedezésének jelentősége

- A Világegyetemben léteznek csillagrendszerek
- Távolságmérésre használható
- Parallaxis módszer: 100 pc távolságig

Nagyobb távolságra: távolságlétra

- Csillagok fényessége alapján 50 kpc-ig

Herzsprung-Russel diagram:

csillagok abszolút fényessége és hőmérséklete közötti összefüggés

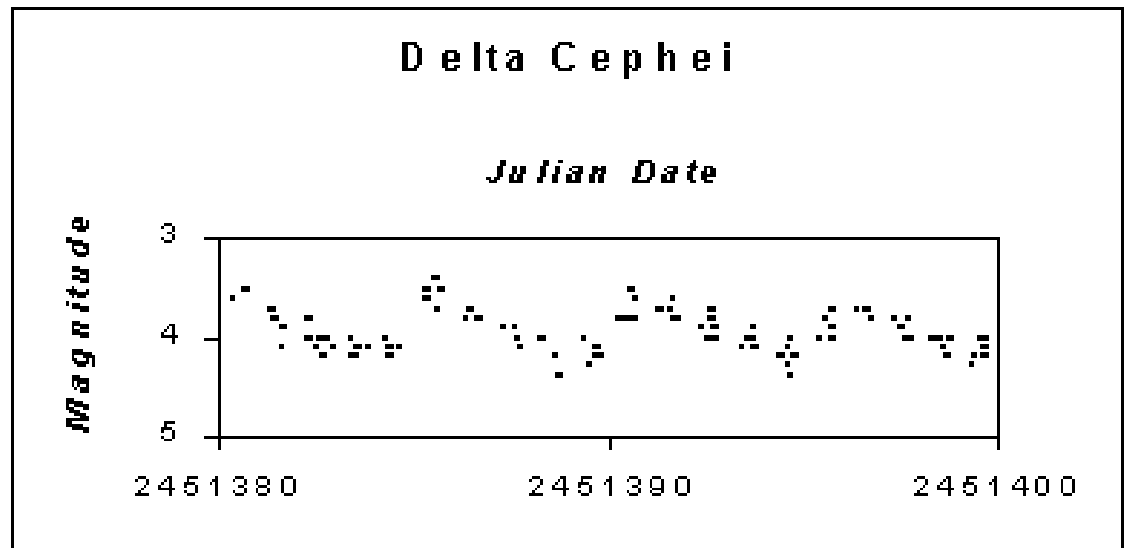
továbbá

$$M - m = 5 - 5 \lg (h/\text{pc})$$

4. kérdés: Honnan ismerjük a csillagok hőmérsékletét?

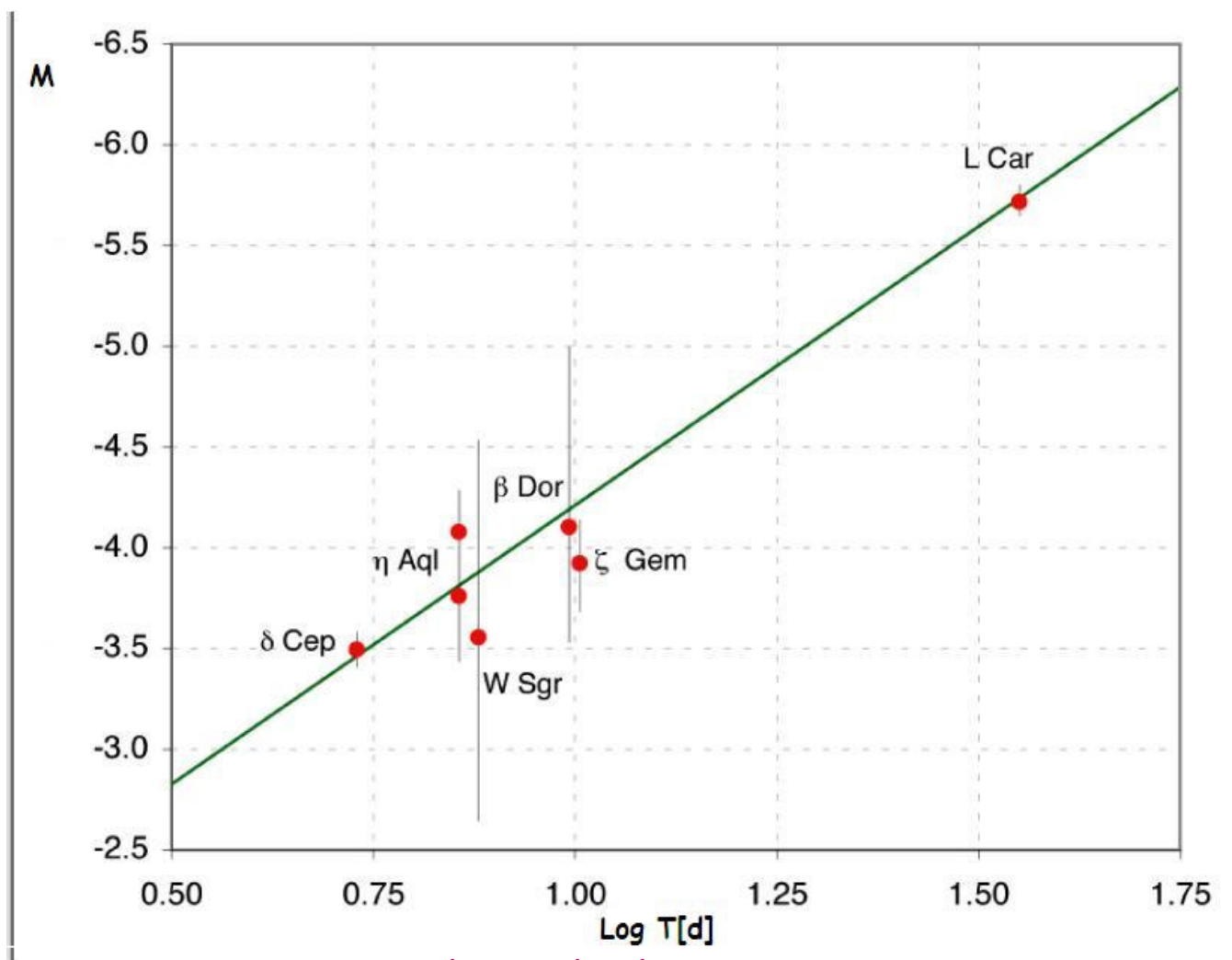
- δ Cefeí változócsillagok 4 Mpc-ig

Henrietta S. Leavitt



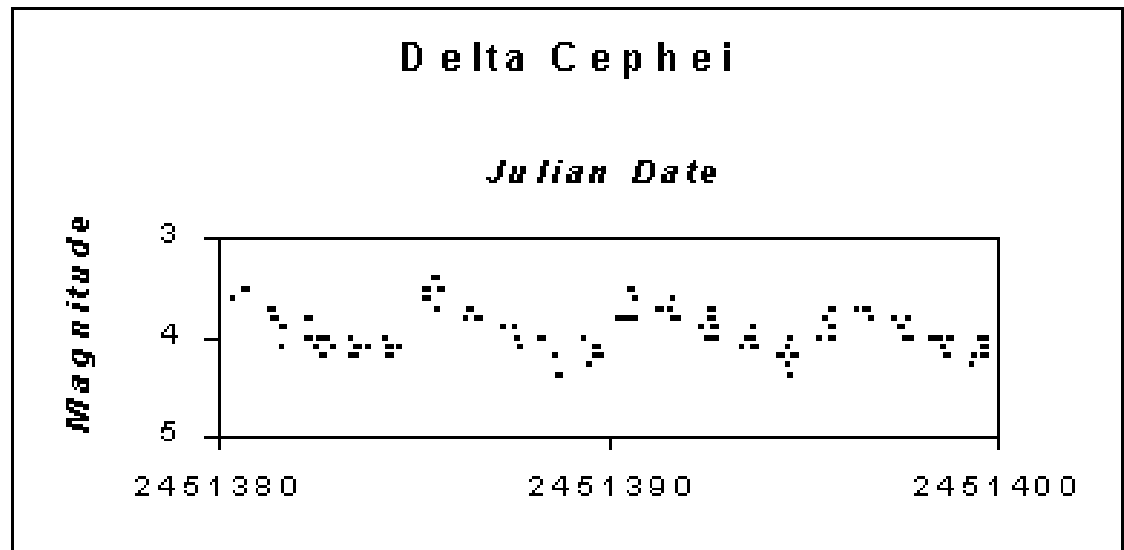
Változócsillagok a Kis Magellánfelhőben

Változócsillagok abszolút fényesség-időperiódus összefüggése (HST mérés)



- A Cefeida időperiódusából következtetni lehet az abszolút fényességére

Henrietta S. Leavitt

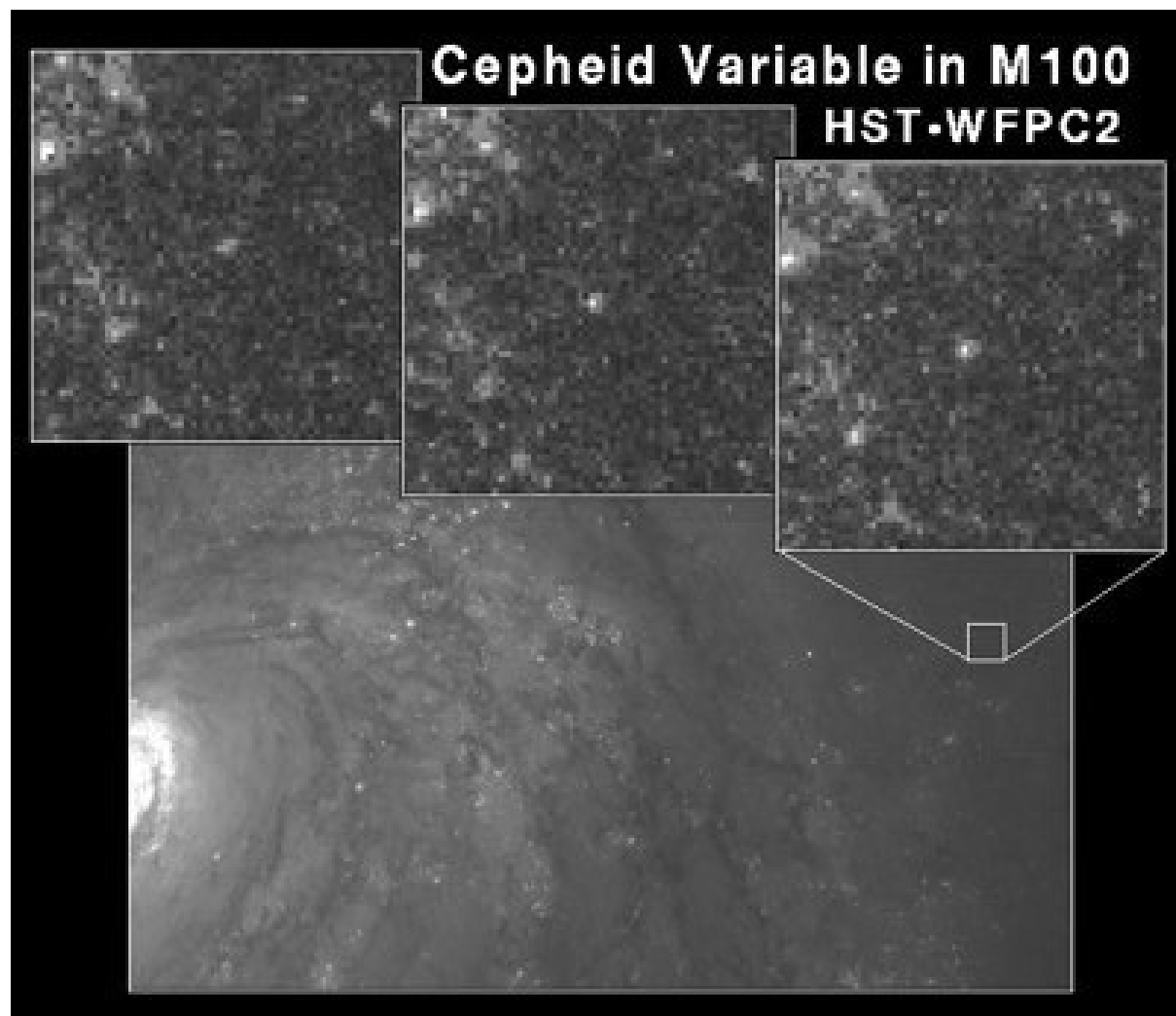


Változócsillagok a Kis Magellánfelhőben

- A Cefeida időperiódusából következtetni lehet az abszolút fényességére, abból pedig a távolságára

$$h = 10^{(m-M+5)/5} \text{ pc}$$

Cefeida az M100-ban



Hubble felfedezésének jelentősége

- A Világegyetemben léteznek csillagrendszerek
- Távolságmérésre használható
- Parallaxis módszer: 100 pc távolságig

Nagyobb távolságra: távolságlétra

- Csillagok fényessége alapján 50 kpc-ig
- δ Cefeï változócsillagok 4 Mpc-ig
- Standard gyertyák:
Gömbhalmazok, galaxisok, galaxishalamzok,
nóvák, szupernóvák...

Hubble forradalma



- 1920-29: Edwin Hubble a minden korábbinál jobb felbontású, Palomar-hegyi új távcsővel
 - Változócsillagot (Cefeidát) fedez fel az Andromédában
 - Megméri az Androméda és 17 másik galaxis távolságát és sebességét

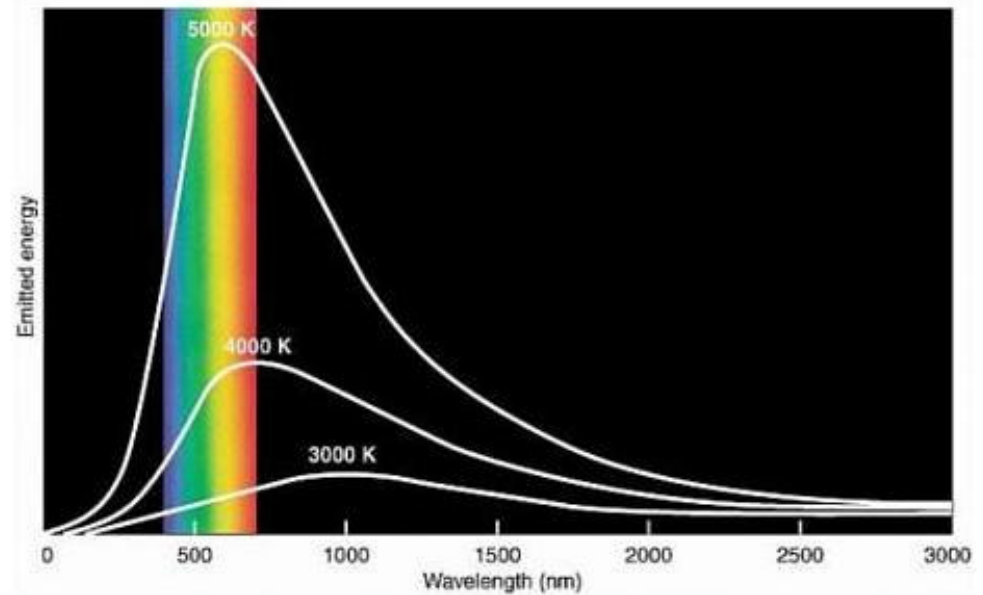
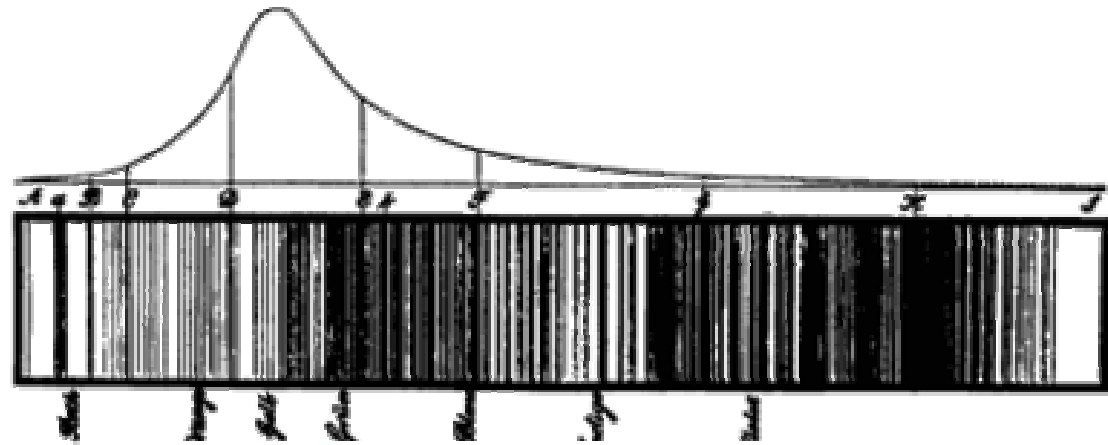
De honnan tudhatjuk a galaxis sebességét?

A Nap színeképe

- Hőmérsékleti sugárzás: $T > 0$ hőmérsékletű testek sugároznak



J. Fraunhofer
(1787-1826)



Sebességmérés a Doppler hatás alapján

A hullámforrás v sebességgel távolodik, egy teljes hullám kibocsátásának ideje T , a hullámfront c sebességgel halad $\Rightarrow$ a $\lambda = cT$ hosszúságú hullám

$$\lambda' = cT + vT$$

hosszúságúra nyúlik, $\lambda' / \lambda = 1 + v/c$,

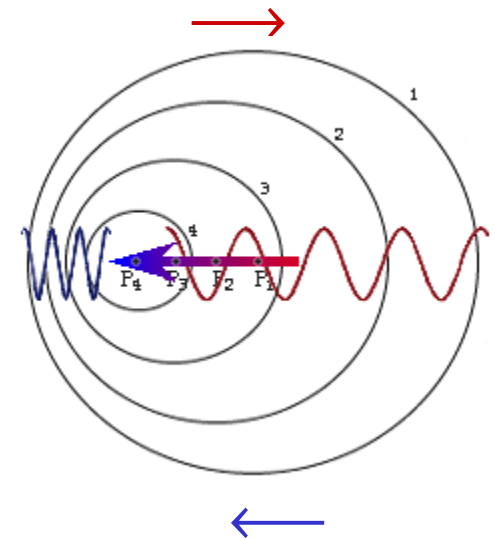
$$v = cz, \quad z = (\lambda' - \lambda) / \lambda$$

Lényegében helyes eredmény hibás
levezetésből!

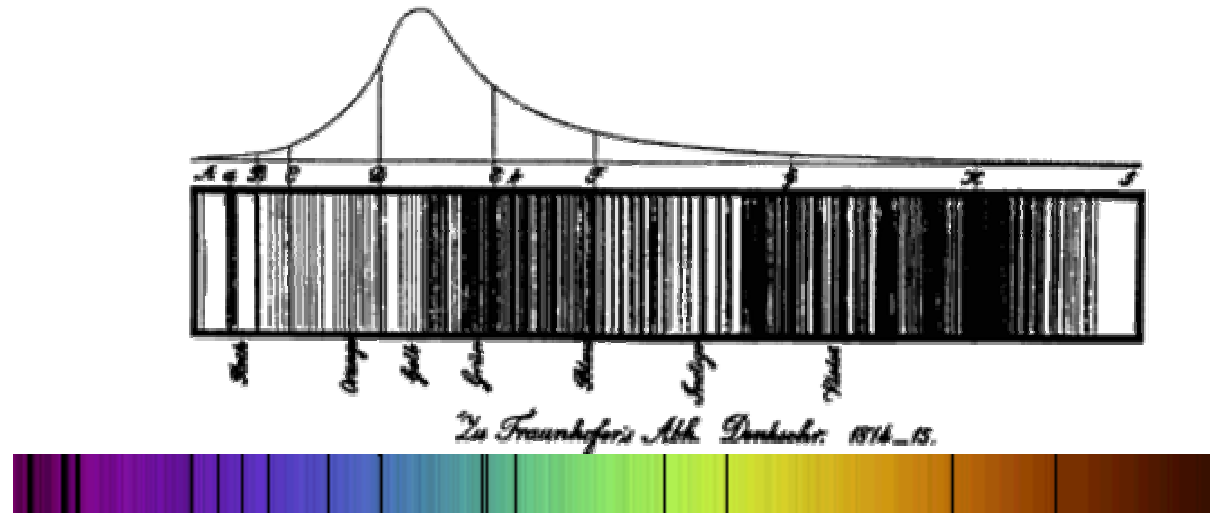
(Minden problémának van egyszerű, szép és
hibás megoldása – H.L. Mencken)

Hullámhosszeltolódás igen pontosan
mérhető színeképelemzéssel

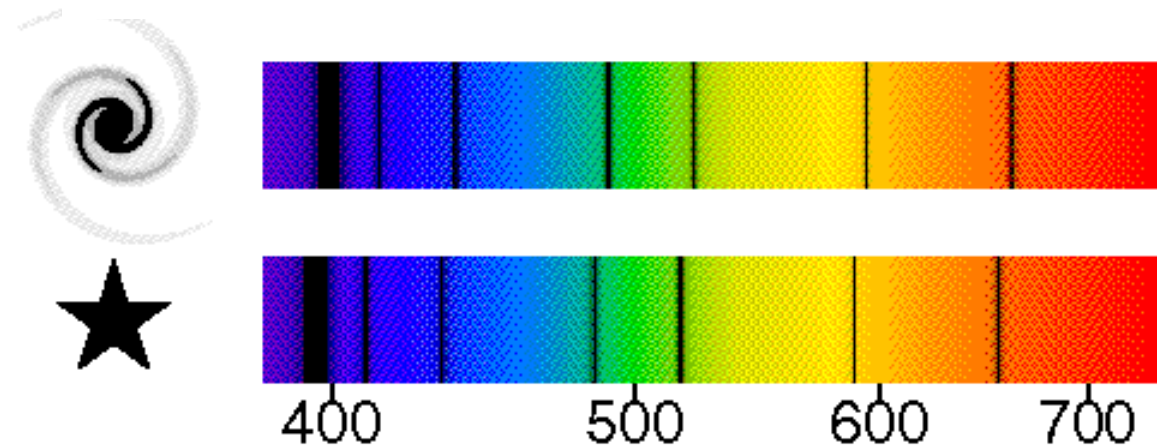
Vöröseltolódás



kékeltolódás

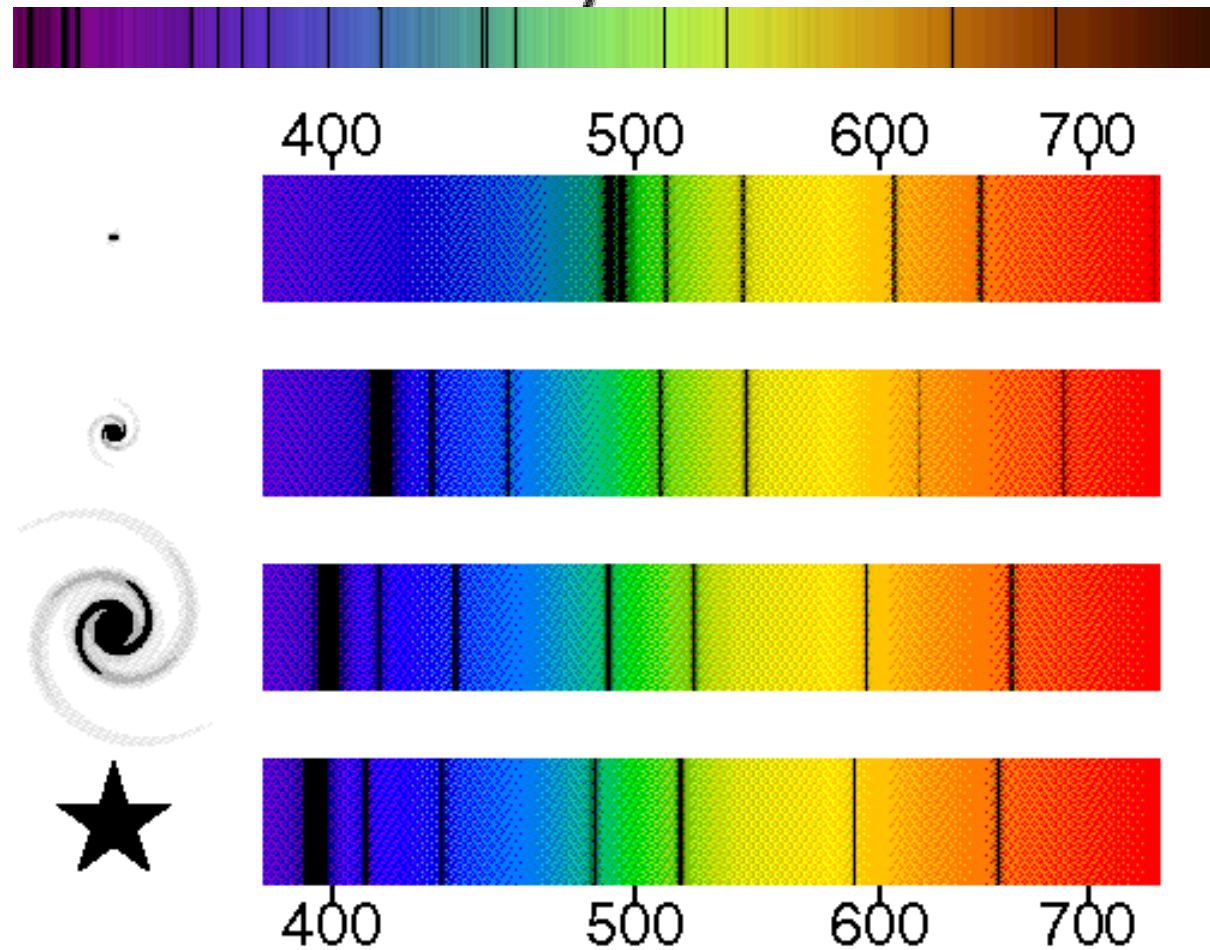
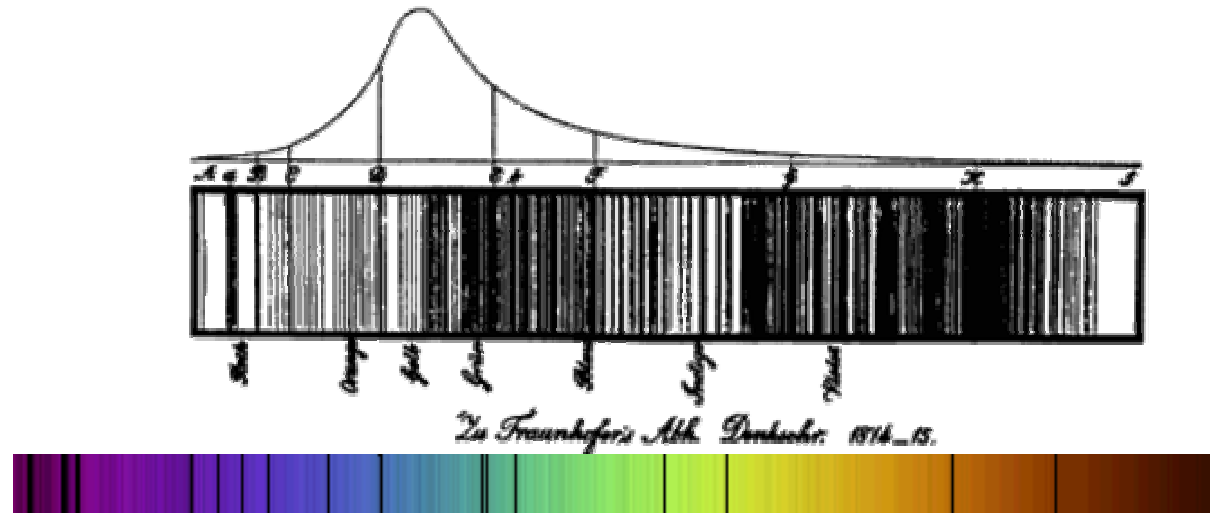


J. Fraunhofer

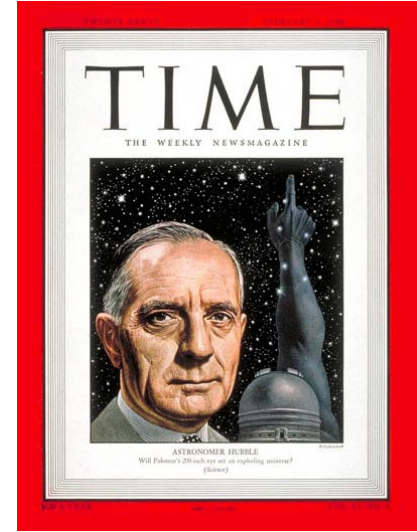




J. Fraunhofer



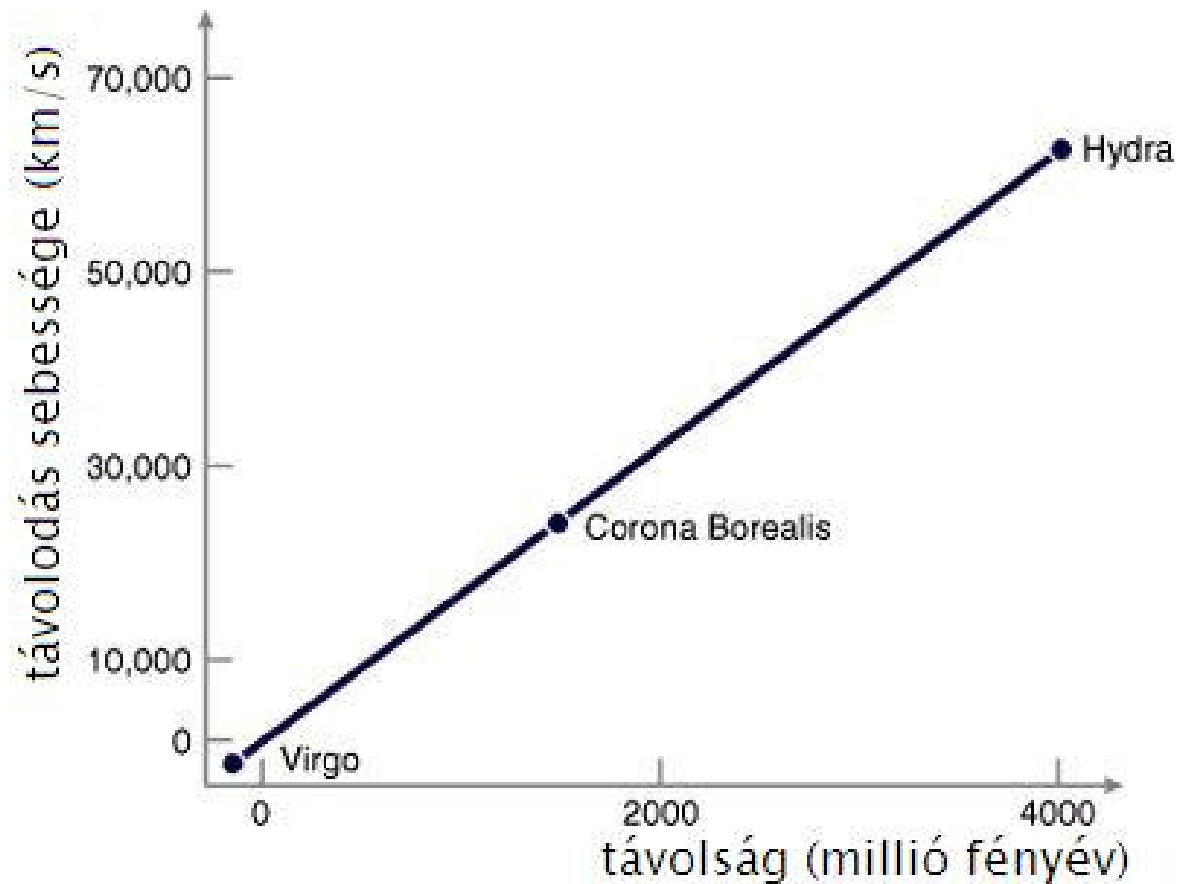
Hubble forradalma



- 1920-29: Edwin Hubble a minden korábbinál jobb felbontású, Palomar-hegyi új távcsővel
 - Változócsillagot (Cefeidát) fedez fel az Andromédában
 - Megméri az Androméda és 17 másik galaxis távolságát és sebességét

Felfedezi a Hubble-törvényt és megalkotja a táguló Világegyetem képét

A Hubble-törvény



$$v = H_0 r \quad H_0 = 100 h \text{ (km/s) / Mpc} = 9,78 h / 10^9 \text{ év} \quad h = 0,7$$

5. kérdés: mit ad meg H_0 reciproka?

Hubble eredeti mérése

távolodás
sebessége

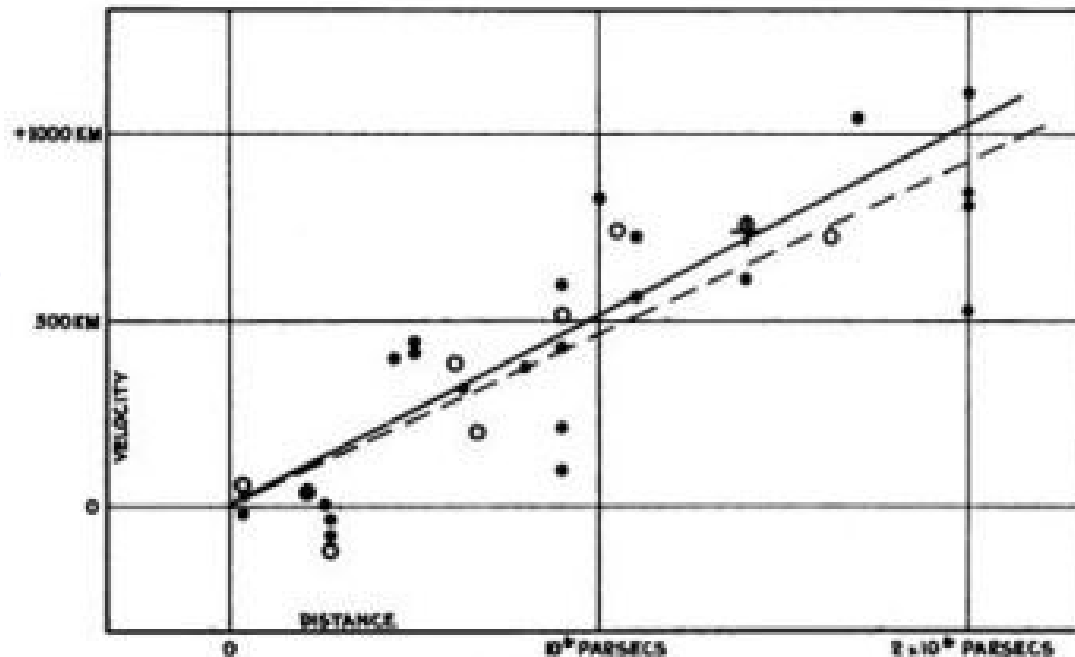


FIGURE 1

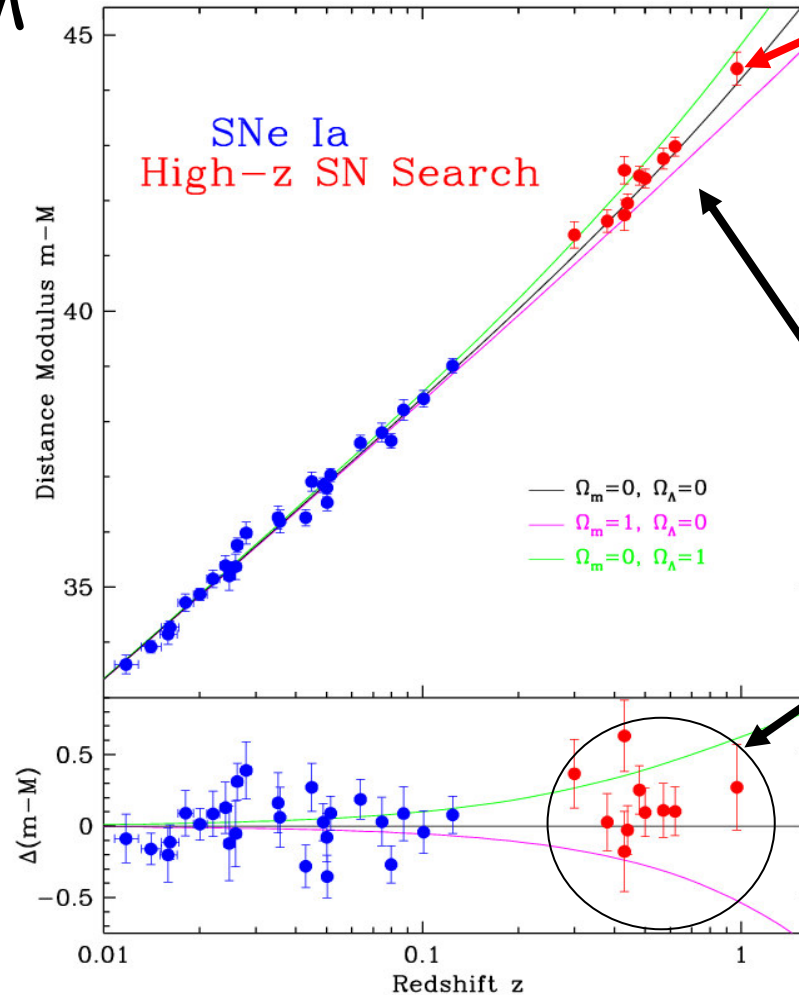
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

távolság

Hubble törvény kísérleti ellenőrzése

$m-M$



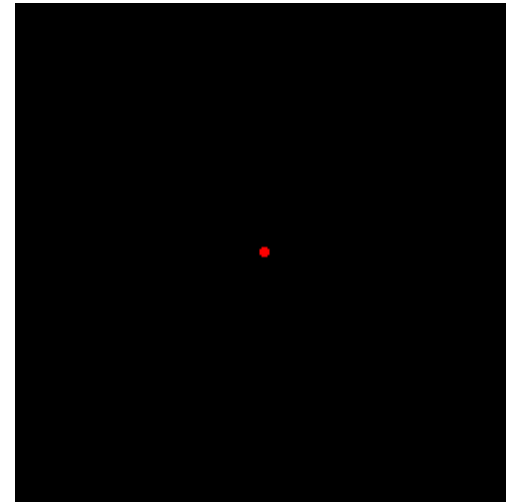
6. kérdés:
Milyen messze
van ez a SN?

Sötét
energia?

vöröseltolódás

A táguló Világegyetem

- A távoli galaxisok fényében vöröseltolódást észlelünk
- A hatás a távolsággal arányos (alátámasztja a kozmológiai elv helyességét) – 7. kérdés: **Miért?**
- A teljes kozmológiai elv nem teljesülhet $\Rightarrow$
- A vöröseltolódás a térrel együtt táguló fényhullám hullámhossznövekedésének az eredménye (nem Doppler hatás)
- 8. kérdés:
Miért nem tágul a méterrúd?



A feldobott kő

- Átlagos galaxis úgy mozog, mint a feldobott kő:
 - Ha elegendő az energiája a végtelenbe távozik,
 - Ha nem, akkor emelkedik, megáll, visszaesik
- Ezért nincs statikus megoldása a gravitációnak
 - Ha lenne statikus VE, olyan lenne, mint a lebegő kő...

Mohamed koporsója

Az energiaegyenlet

R sugarú gömb tömege

$$M = \frac{4R^3\pi}{3}\rho$$

A gömb felszínén található m tömegű galaxis
potenciális energiája

$$E_p = -G \frac{Mm}{R} = -G \frac{4R^2\pi\rho m}{3}$$

mozgási energiája

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2, \quad v = \frac{dR}{dt} = HR$$

A teljes mechanikai energia állandó:

$$E_m + E_p = \frac{1}{2}m \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - G \frac{4R^2\pi}{3}\rho m = E$$

A kritikus sűrűség

E előjele határozza meg a VE sorsát:

$E > 0$: a VE örökké tágul

$E < 0$: a VE tágul, majd összeomlik

$E = 0$: a VE kritikus állapotban van,
az ehhez tartozó tömegsűrűség: ρ_c

$$0 = \frac{1}{2} \cancel{m} (\cancel{H} \cancel{R})^2 - G \frac{4 \cancel{R}^2 \pi}{3} \rho_c \cancel{m}$$

9. kérdés: Hány H atomot jelent ρ_c m^3 -ként?

A szokásos egység

A tömegsűrűséget ρ_c egységben szokás mérni:

$$\Omega = \Omega_x + \Omega_y + \dots \quad \text{pl. } \Omega_L = 3\%$$

$$\rho = \Omega \rho_c$$

•Friedman megoldások három osztálya:

- $\Omega < 1$: a VE örökké tágul
- $\Omega > 1$: a VE tágul, majd összeomlik
- $\Omega = 1$: a VE kritikus állapotban van

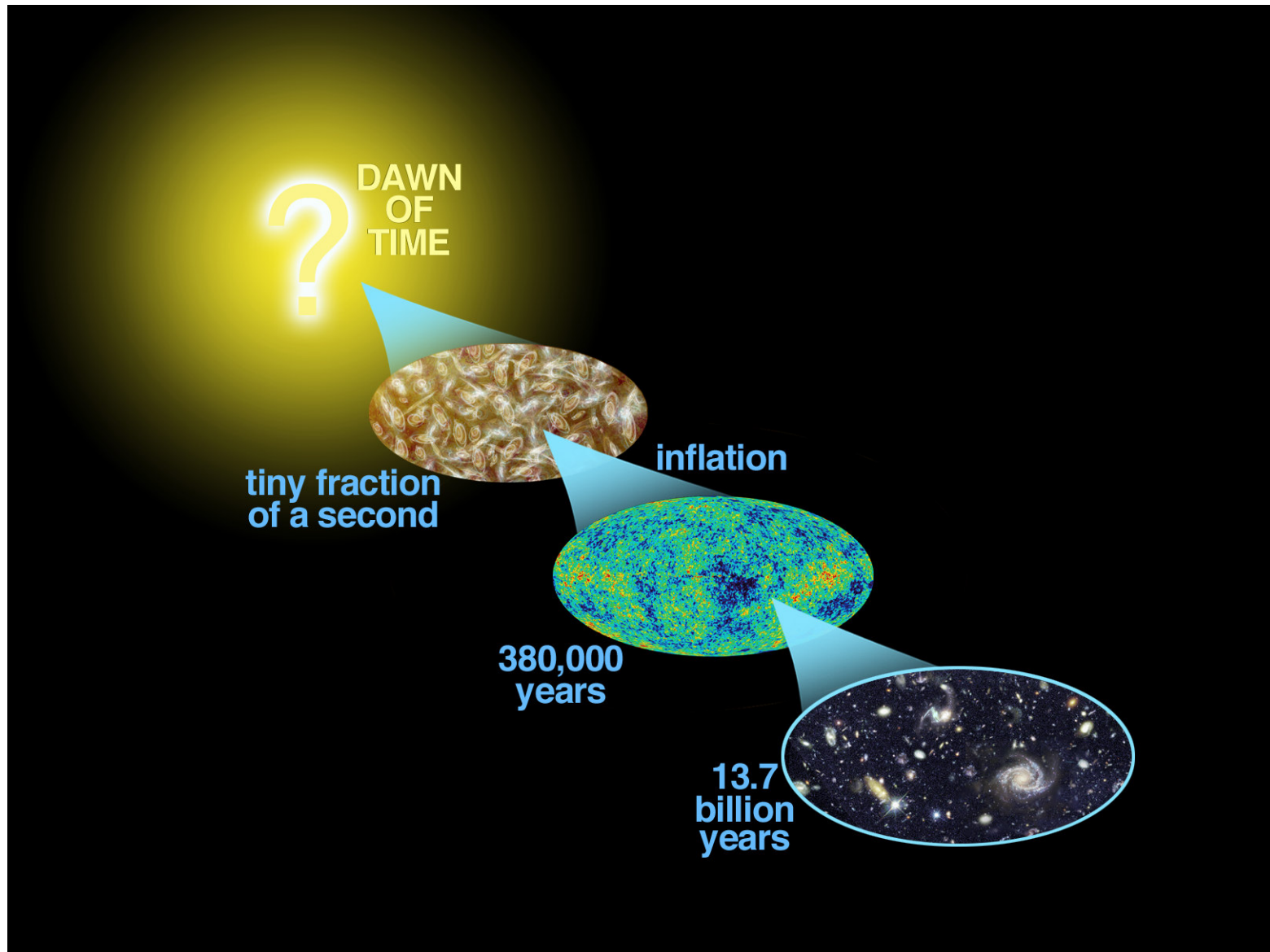
A táguló Világegyetem

Ha a Világegyetem valóban tágul, akkor régen „kisebb”,
ezért melegebb volt

- A hőmérséklet a mérettel fordítottan arányos
⇒ az elegendően forró VE-t elektromágneses
plazma töltötte ki, amelynek hűlése során kialakultak
az atomok és a mindent kitöltő

kozmikus elektromágneses háttérsugárzás

Az ősrobbanás modell jóslata a sugárzásra



Vajon valóban létezik kozmikus
háttérsugárzás?

Válasz csüörtökön

