

Magyar fizikatanárok a CERN-ben
2006. augusztus 20-26.

Trócsányi Zoltán

Kozmológia alapfokon

Részecskefizikai vonatkozásokkal

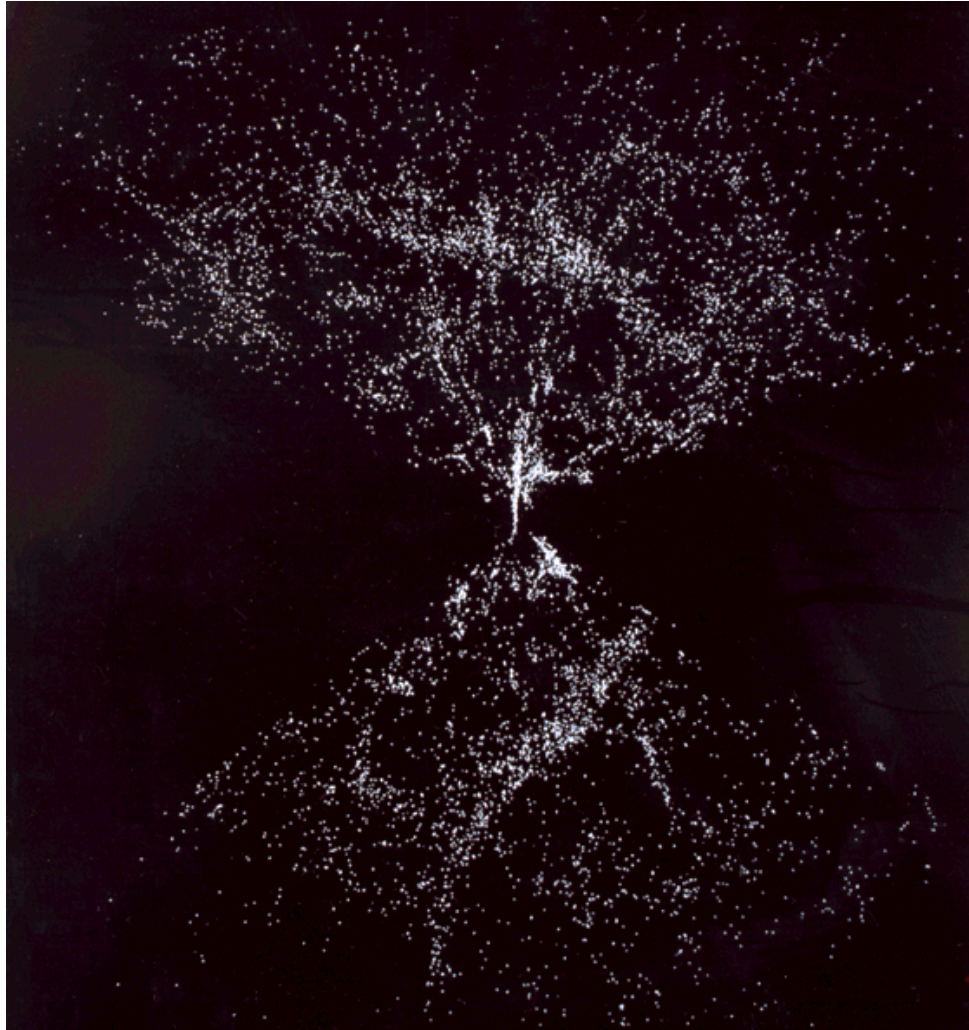
Az elmúlt negyedszázad a
mikro- és makrokozmosz
fizikájának összefonódását hozta

A Világegyetem szerkezete



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

A Világegyetem szerkezete



10^{11} db galaxist látunk

Nagy skálán homogén és izotróp,
Kis skálán szerkezete van:

Galaxisban
(0,1Mfényév)

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

Galaxishalmazokban
(3 Mfényév)

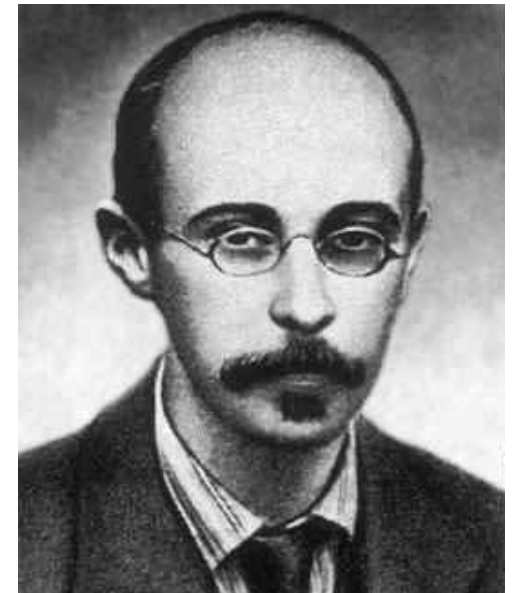
$$\Delta\rho/\rho = 1000$$

Szuperhalmazokban
(100 Mfényév)

$$\Delta\rho/\rho = 10$$

Teljes kozmológiai elv: homogén, izotróp és stacionárius Világegyetem?

- Kozmológiai elv:
 - A Világegyetem bárhol tartózkodó megfigyelője minden irányban ugyanolyan szerkezetű.
- A Világegyetem látszólag időben is állandó
- Az időbeli állandóság nem lehetséges
 - Newton: a gravitáció végtelen hatótávolságú => véges kiterjedésű Világegyetemnek össze kell omlani. Ha végtelen:
 - Olbers paradoxon: az éjszakai égboltnak is fényesnek kellene lenni, mert akármerre nézünk, előbb-utóbb az adott irányban fényes csillagnak kell lennie
 - Einstein gravitációelméletének nincs homogén, izotróp, stacionárius megoldása
 - A. Friedman (1922): talált homogén, izotróp, de nem stacionárius megoldást

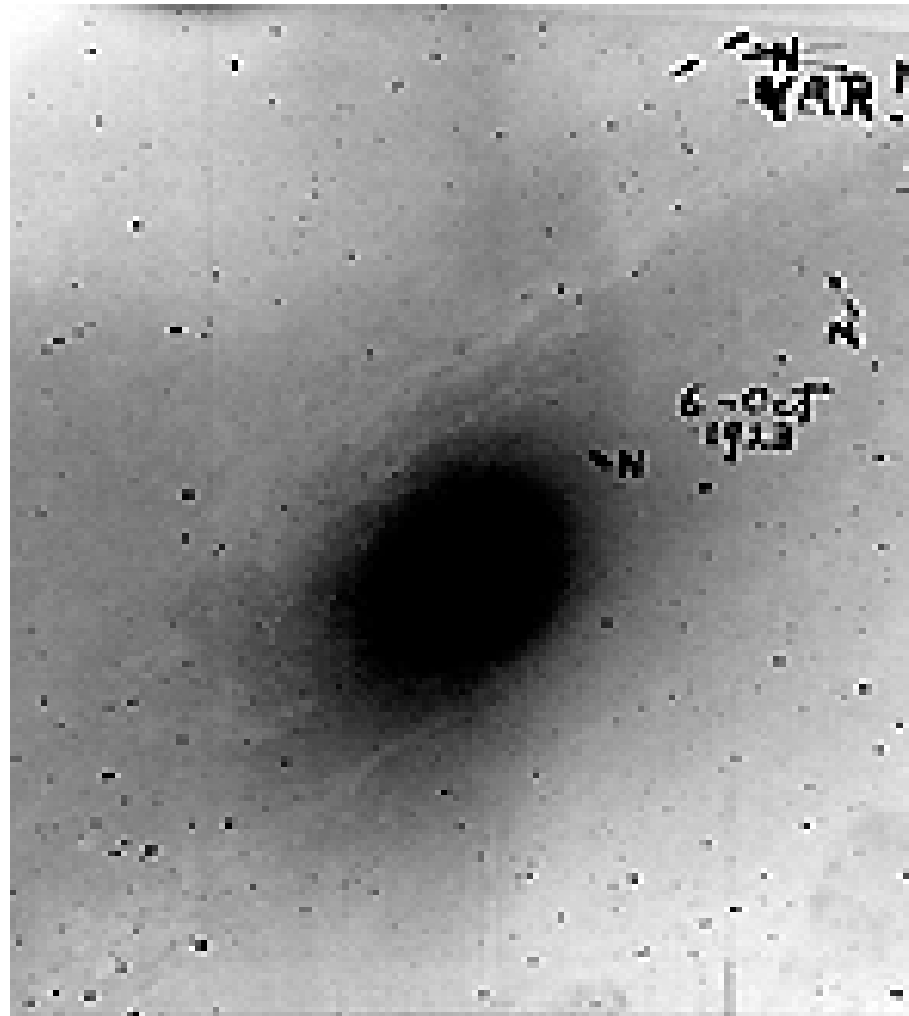


A modern kozmológia kezdete: Hubble forradalma



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

Cefeida az Andromédában

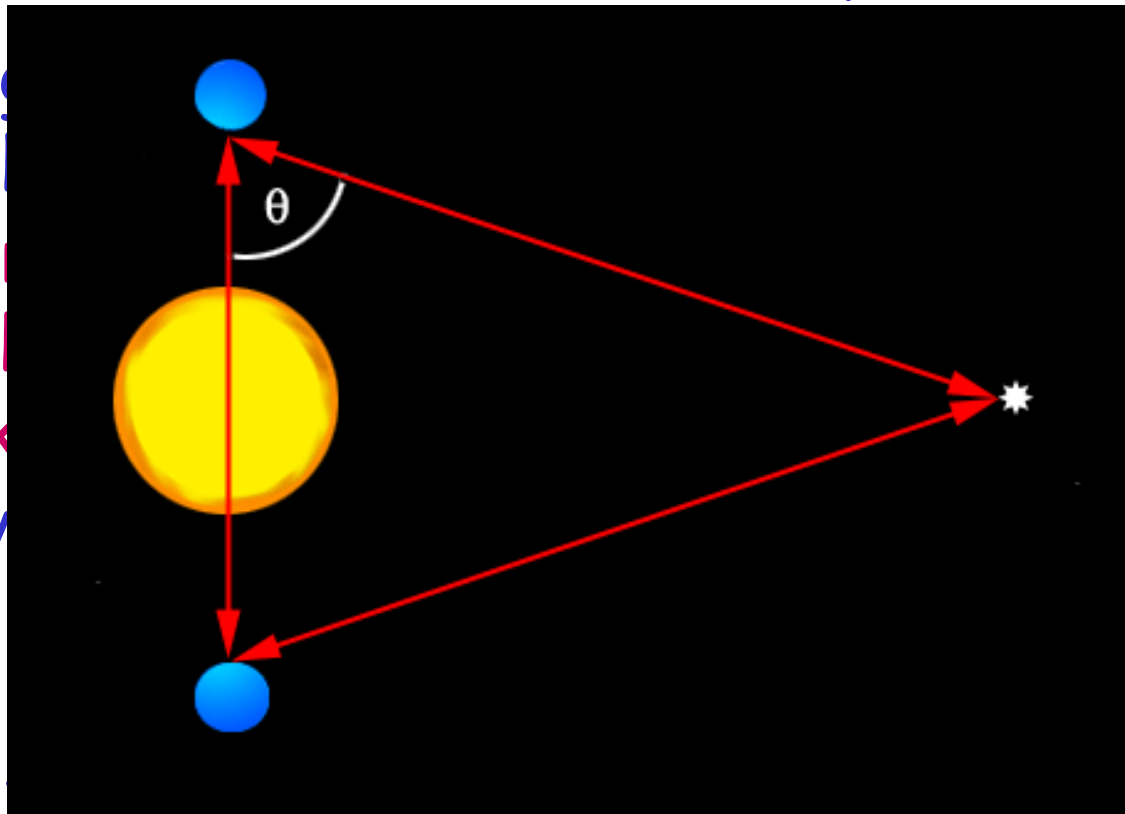


Miért érdekes ez?

Hubble felfedezésének jelentősége

- A Világegyetemben léteznek csillagrendszerek
- Távolságmérésre használható
- Parallaxis módszer: 10^6 év távolságig

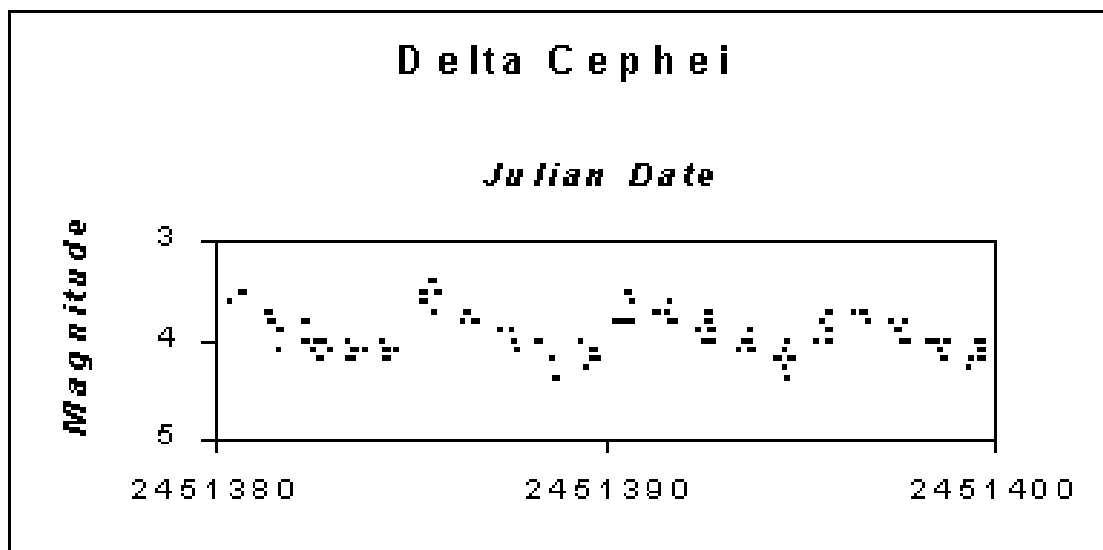
Nagy
• Csillago
He
csi
sék
tov



mér-

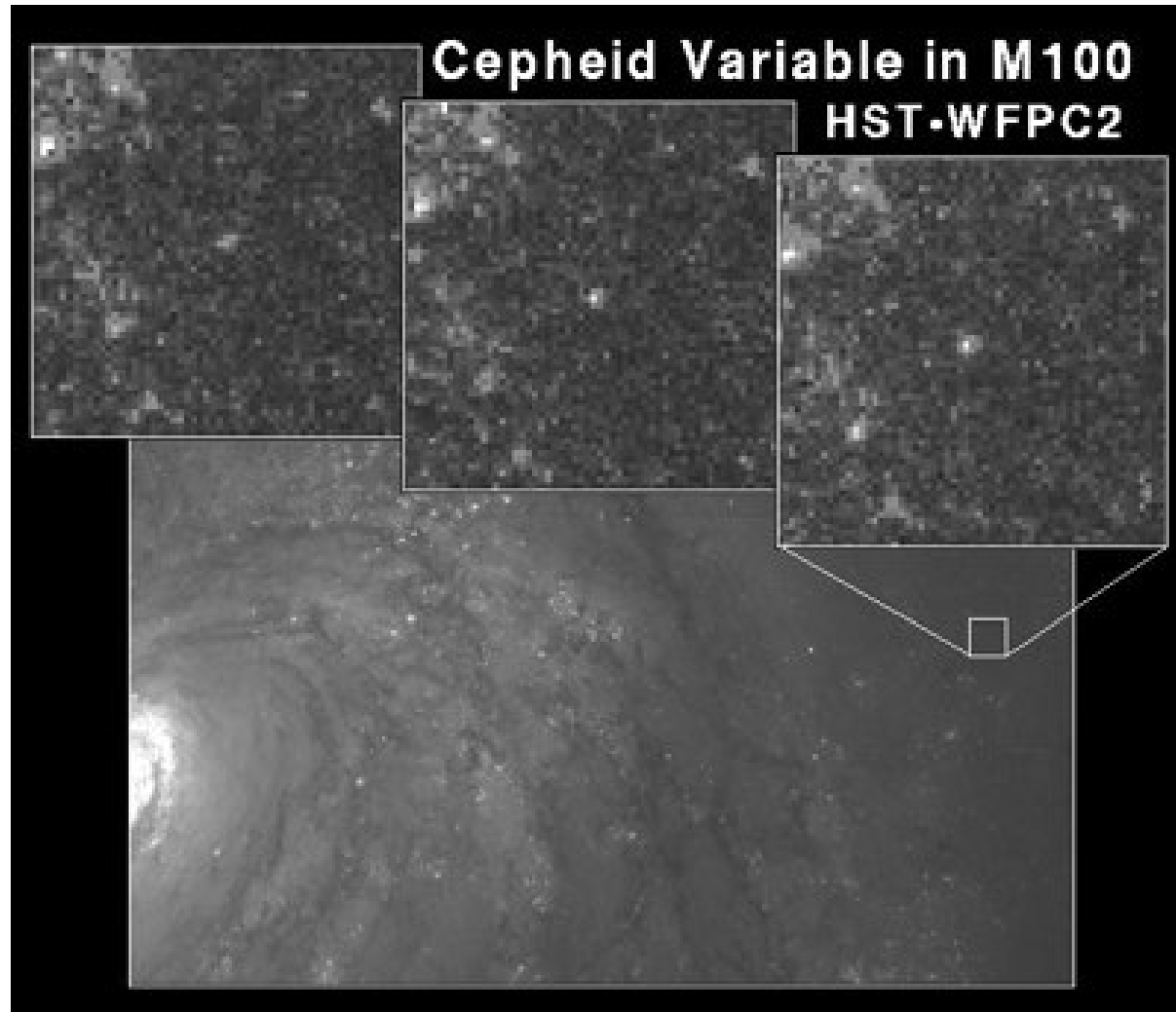
• δ Cefeid

Henrietta S. Leavitt



- A Cefeida időperiódusából következtetni lehet az abszolút fényességére, abból pedig a távolságára
$$M - m = 5 - 5 \log (r/\text{pc})$$

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, galaxishalmazok,
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

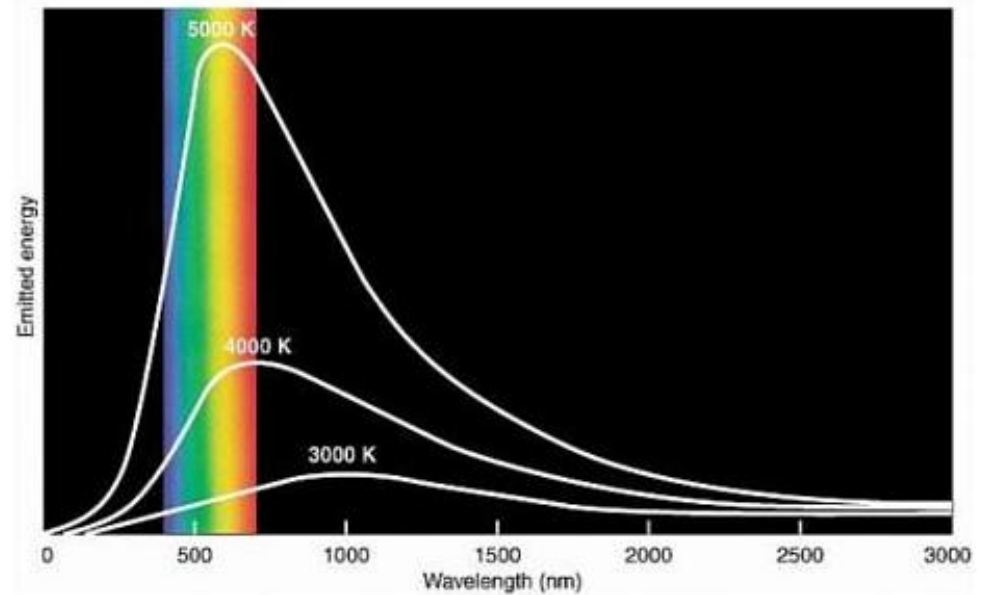
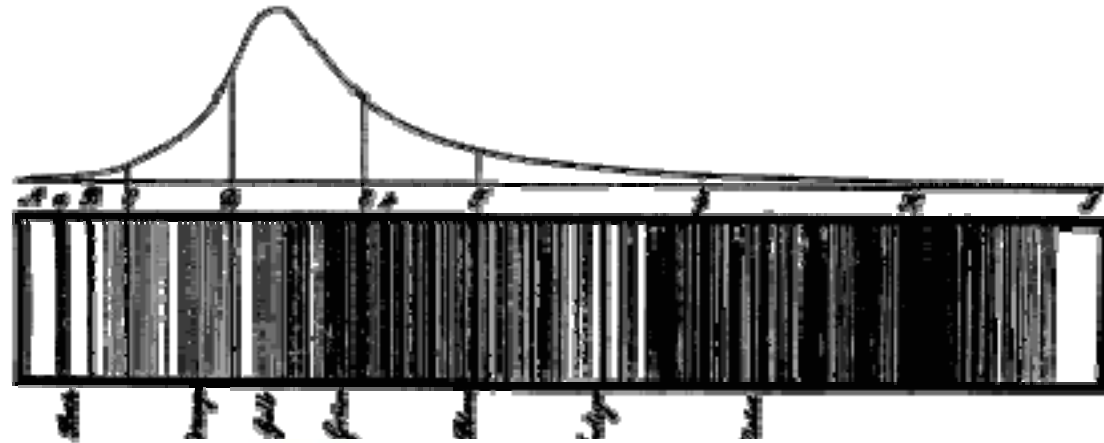
De honnan tudhatjuk a galaxis sebességét?

A Nap színeke

- 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 közeledik \Rightarrow a $\lambda = cT$ hosszúságú hullám

$$\lambda' = cT + vT$$

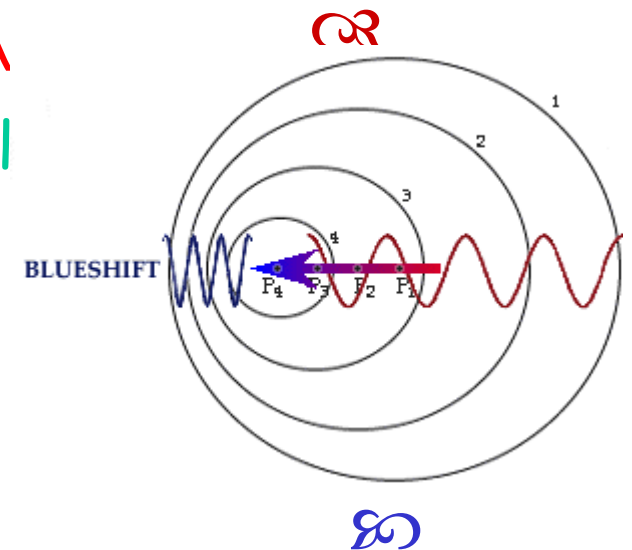
hosszúságúra nyúlik, $\lambda' / \lambda = 1 + c/v$,

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

Helyes eredmény hibás levezetésből

Hullámhosszeltolódás igen pontosan mérhető színeképelemzéssel

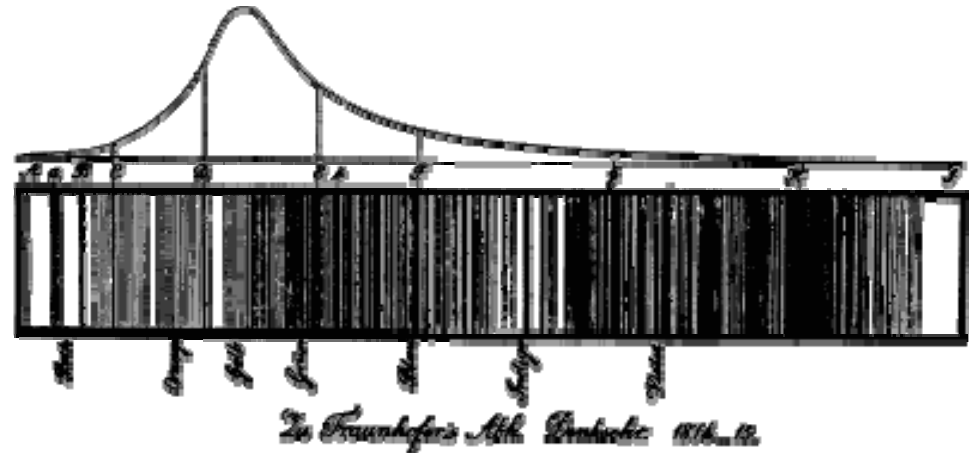
Vörösetolódás



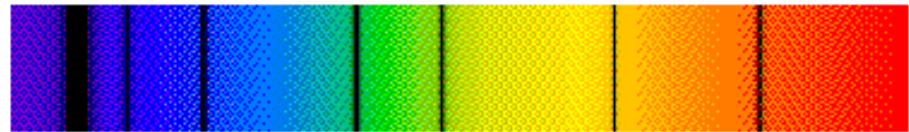
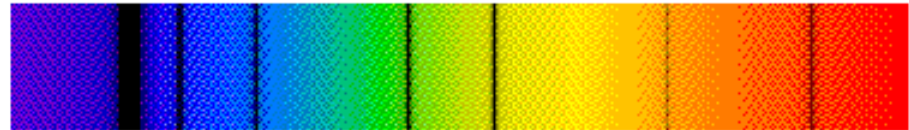
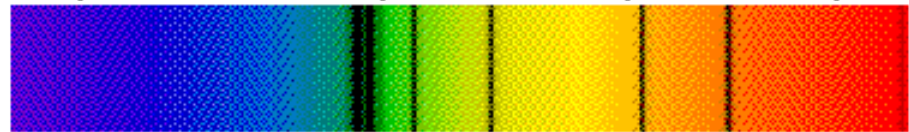
kéketolódás



J. Fraunhofer



400 500 600 700



400 500 600 700



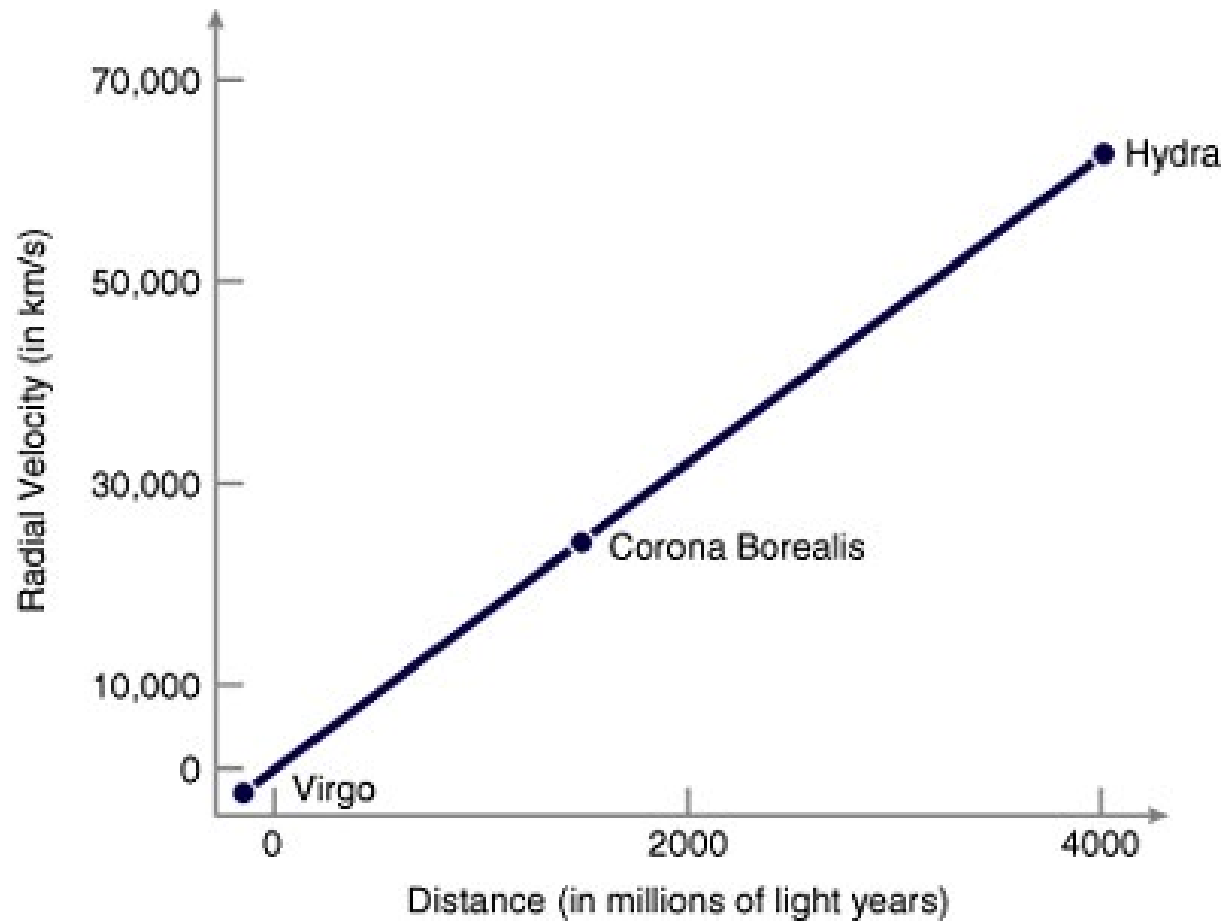
Hubble forradalma



- 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



$$v = H_0 r$$

$$H_0 = 100 h \text{ (km/s) Mpc} = 9,78 h / \text{Gév}$$

$$h = 0,7$$

Hubble eredeti mérése

távolodás
sebessége

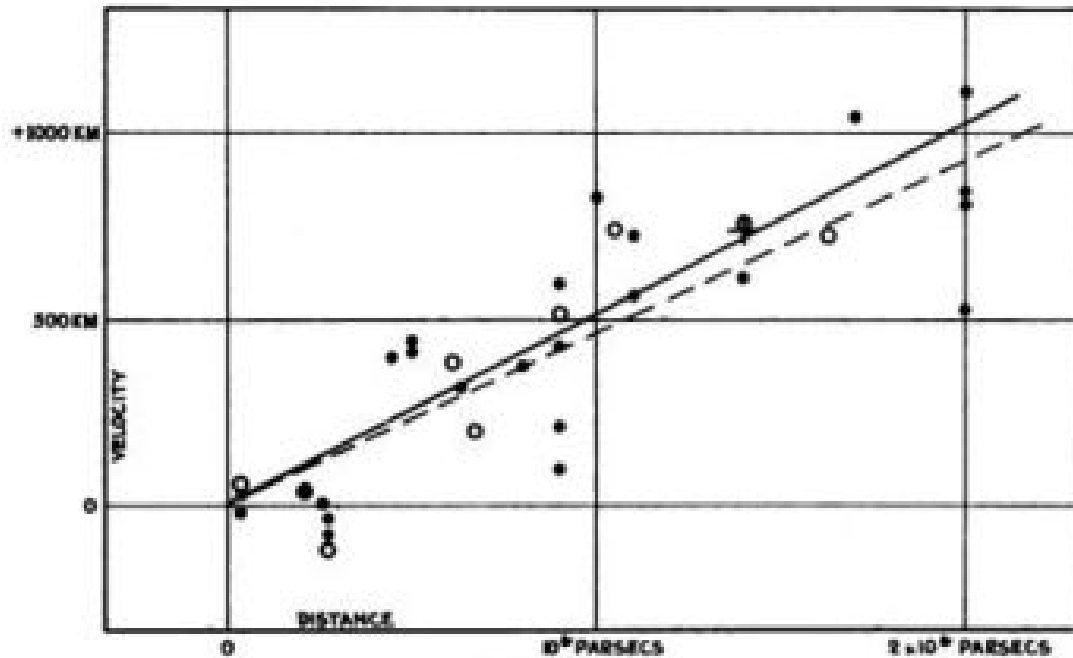


FIGURE 1

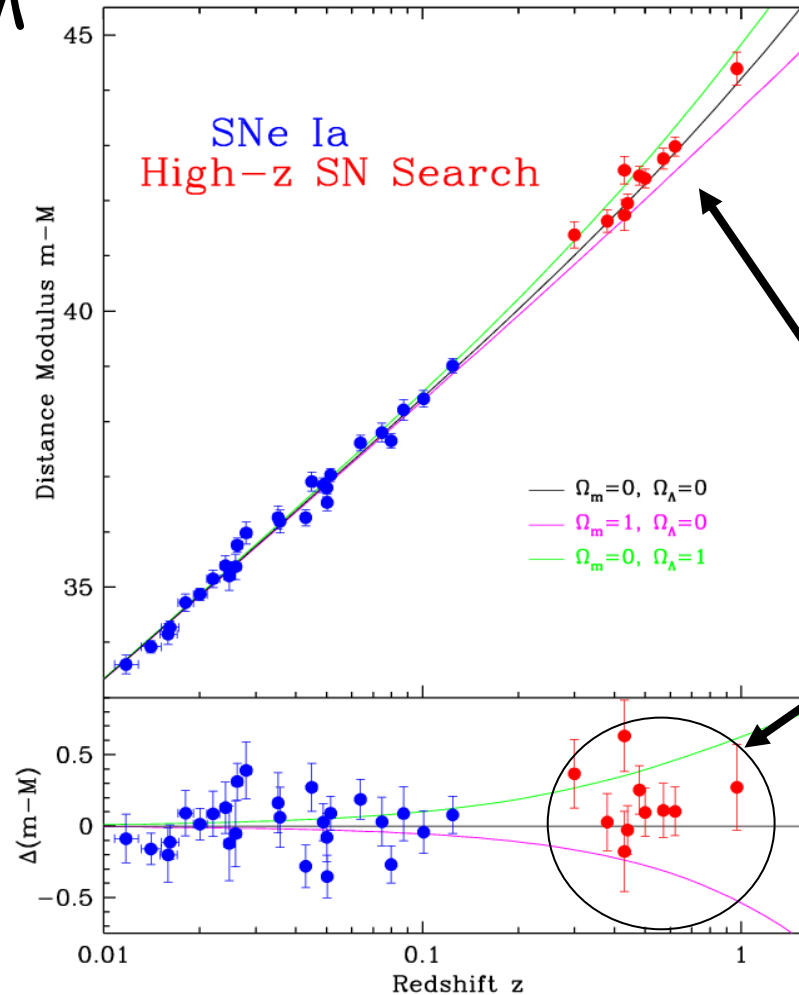
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

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

$m-M$



Sötét energia?

vöröseltolódás

A táguló Világegyetem

- A távoli galaxisok fényében vöröseltolódást észlelünk
- A hatás a távolsággal arányos (alátámasztja a kozmológiai elv helyességét)
- A teljes kozmológiai elv nem teljesülhet ⑨
- A vöröseltolódás térrel együtt táguló fényhullám hullámhossznövekedésének az eredménye (nem Doppler hatás) \propto film

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

A kritikus sűrűség

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

$$E_m = \frac{1}{2} m v^2, \quad v = H_0 R$$

A galaxis a végtelenbe távozik, ha teljes
mechanikai energiája

$$E_m + E_p = \frac{1}{2} m H_0^2 R^2 - G \frac{4R^2 \pi}{3} \rho m \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \rho_c = \frac{3H_0^2}{8G\pi}$$

A feldobott kő

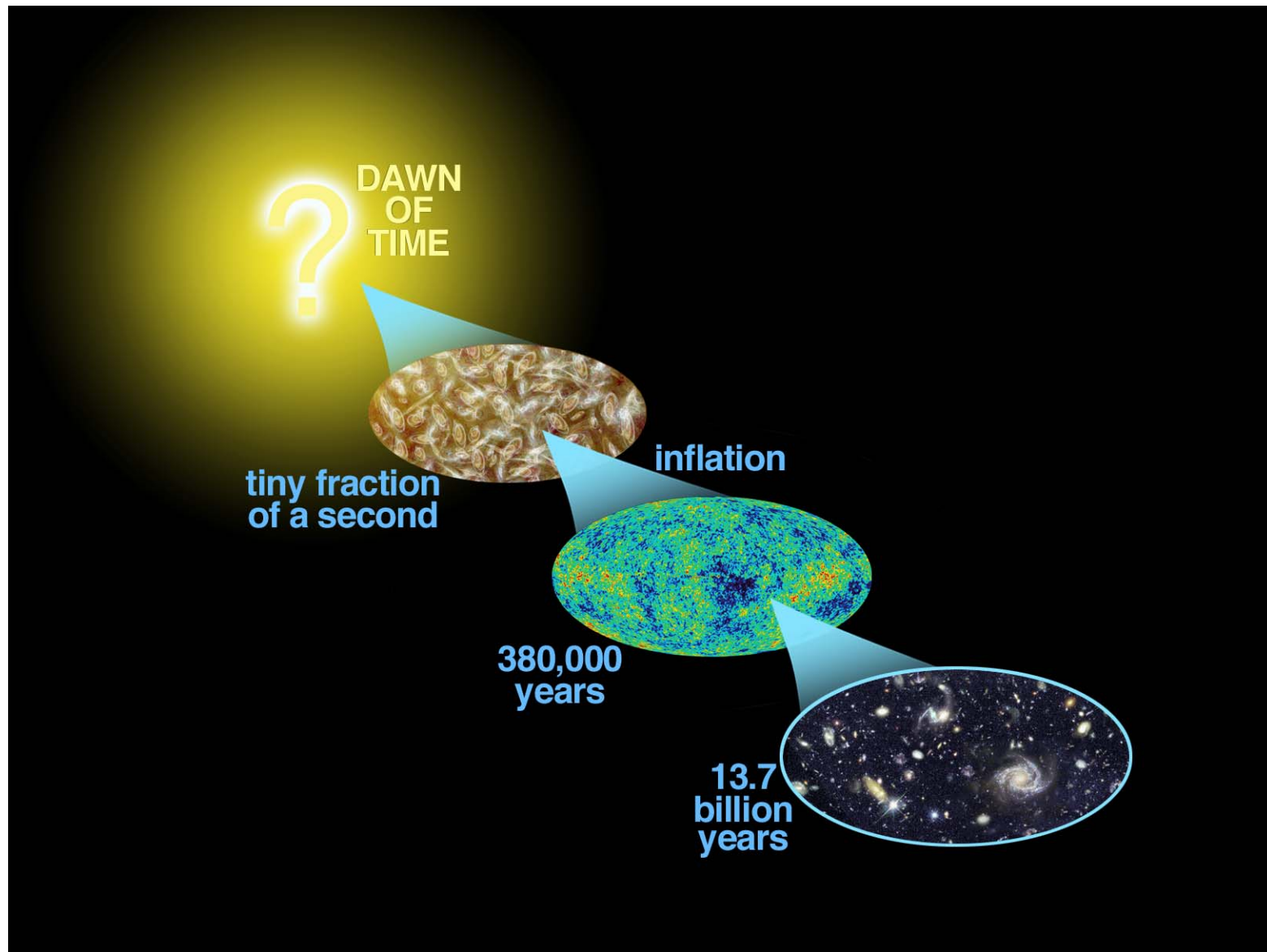
- **Átlagos galaxis úgy mozog, mint a feldobott kő:**
 - Ha elegendő az energiája a végtelenbe távozik,
 - Ha nem, akkor emelkedik, megáll, visszaesik
- **Ezért nincs statikus megoldása a gravitációnak**
 - Ha lenne statikus VE, olyan lenne, mint a lebegő kő
- **Friedman megoldások három osztálya:**
 - $\rho > \rho_c$, VE végtelen és örökké tágul
 - $\rho < \rho_c$, VE véges, összeomlik
 - $\rho = \rho_c$, VE kritikus
 - $\Omega = \rho / \rho_c \Rightarrow \Omega_c = 1, \Omega <, >, = 1$

A táguló Világegyetem

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

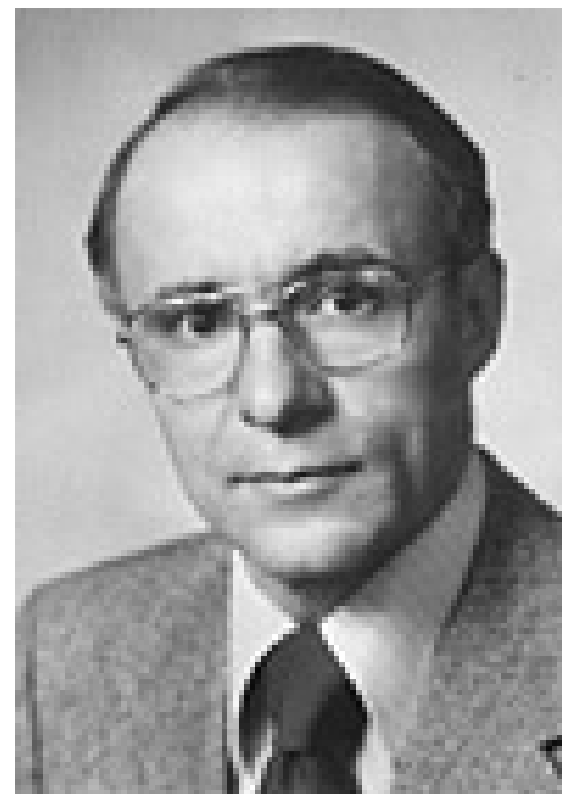
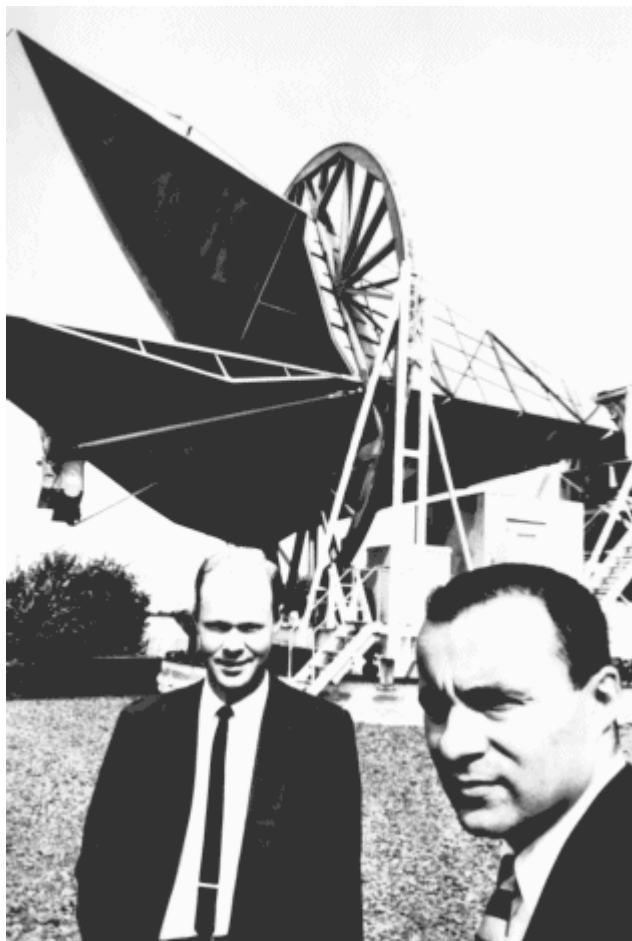
- A kisebb VE melegebb, a hőmérséklet a mérettel fordítottan arányos
 - ⊙ az elegendően kicsi VE-t elektromágneses plazma töltötte ki, amelynek hűlése során kialakultak az atomok és a mindent kitöltő kozmikus elektromágneses háttérsugárzás

Az ősrobbanás modell jóslata a sugárzásra



A kozmikus sugárzás felfedezése

- 1965: A. Penzias és R. Wilson (Bell Lab) érzékeny mikrohullámú antennája



A kozmikus sugárzás

- 1965: A. Penzias és R. Wilson érzékeny mikrohullámú antennája

- iránytől
- napszaktól, évszaktól

független elektromágneses sugárzást észleltek

- Az antenna hibáját kizárták

Mi lehet a titokzatos sugárzás forrása?