

Magyar fizikatanárok a CERN-ben
2013. augusztus 12-17.

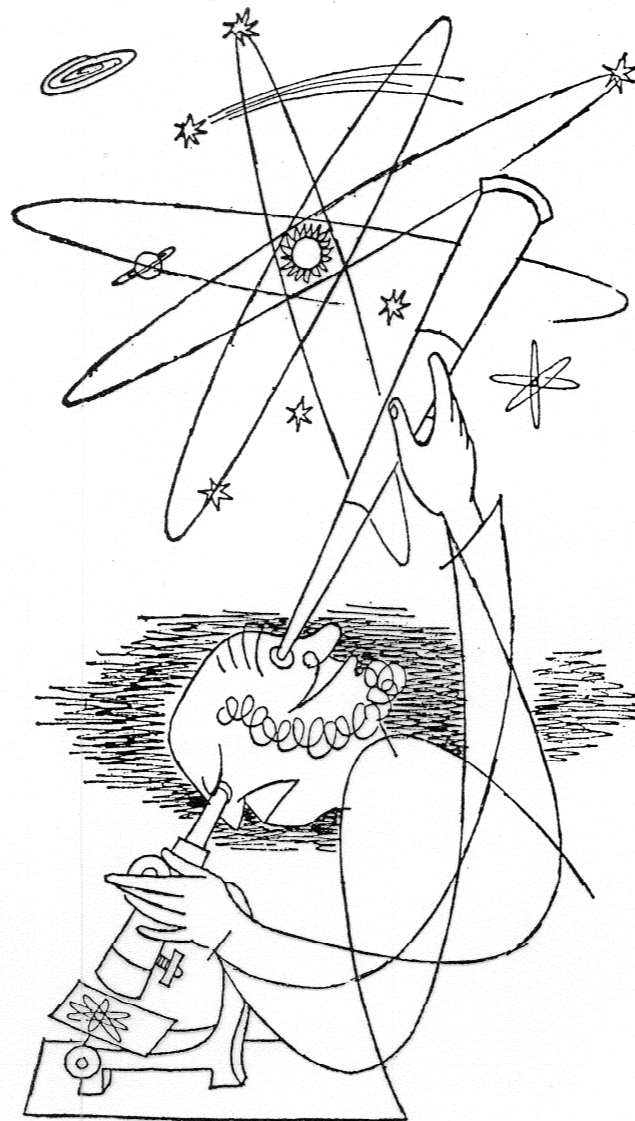
Trócsányi Zoltán

Kozmológia alapfokon

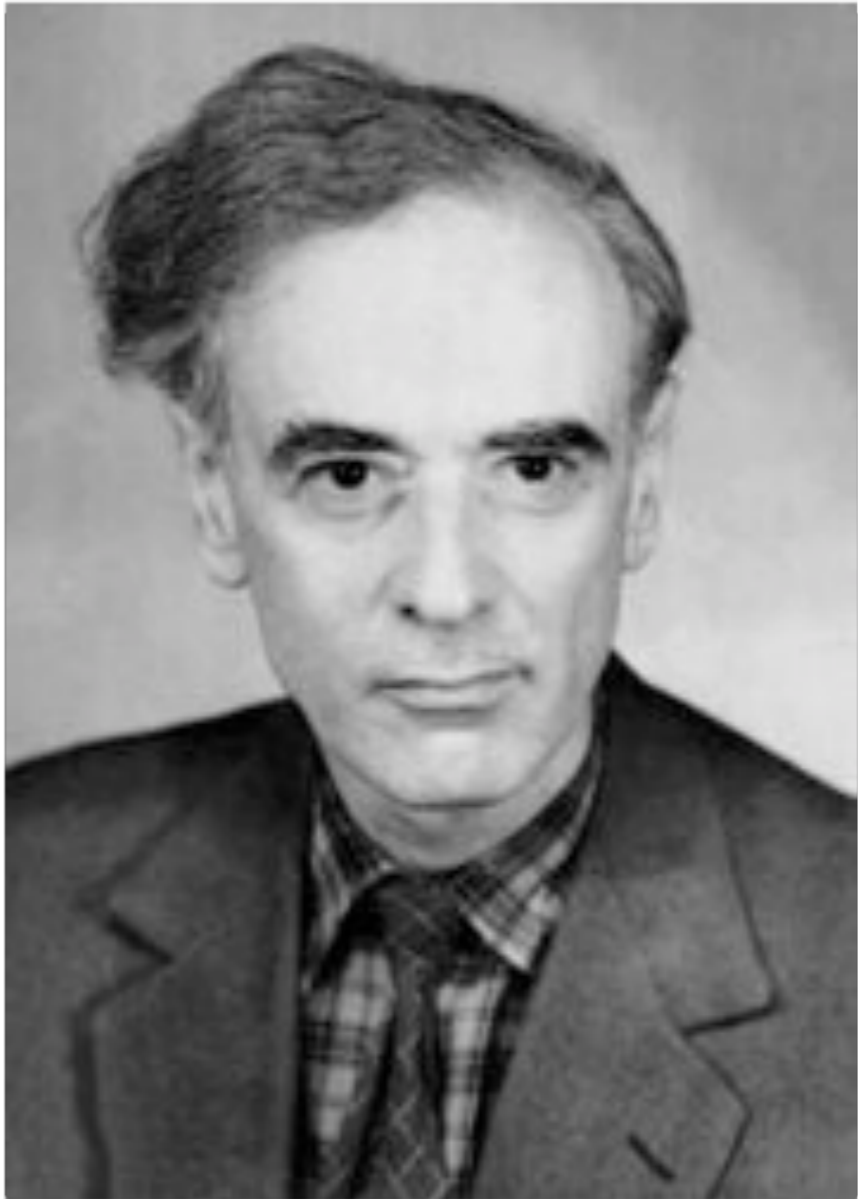
Részecskefizikai vonatkozásokkal

Hogy kerül a csizma az asztalra?

Az elmúlt negyedszázad a kozmológia forradalmát, valamint mikro- és makrokozmosz fizikájának összefonódását hozta



Landau a kozmológusokról:



Gyakran hibáznak,
de ~~sosem kételkednek~~

TZ:

nagyon szép képeik vannak

A kvantumvilág nyitott kérdései

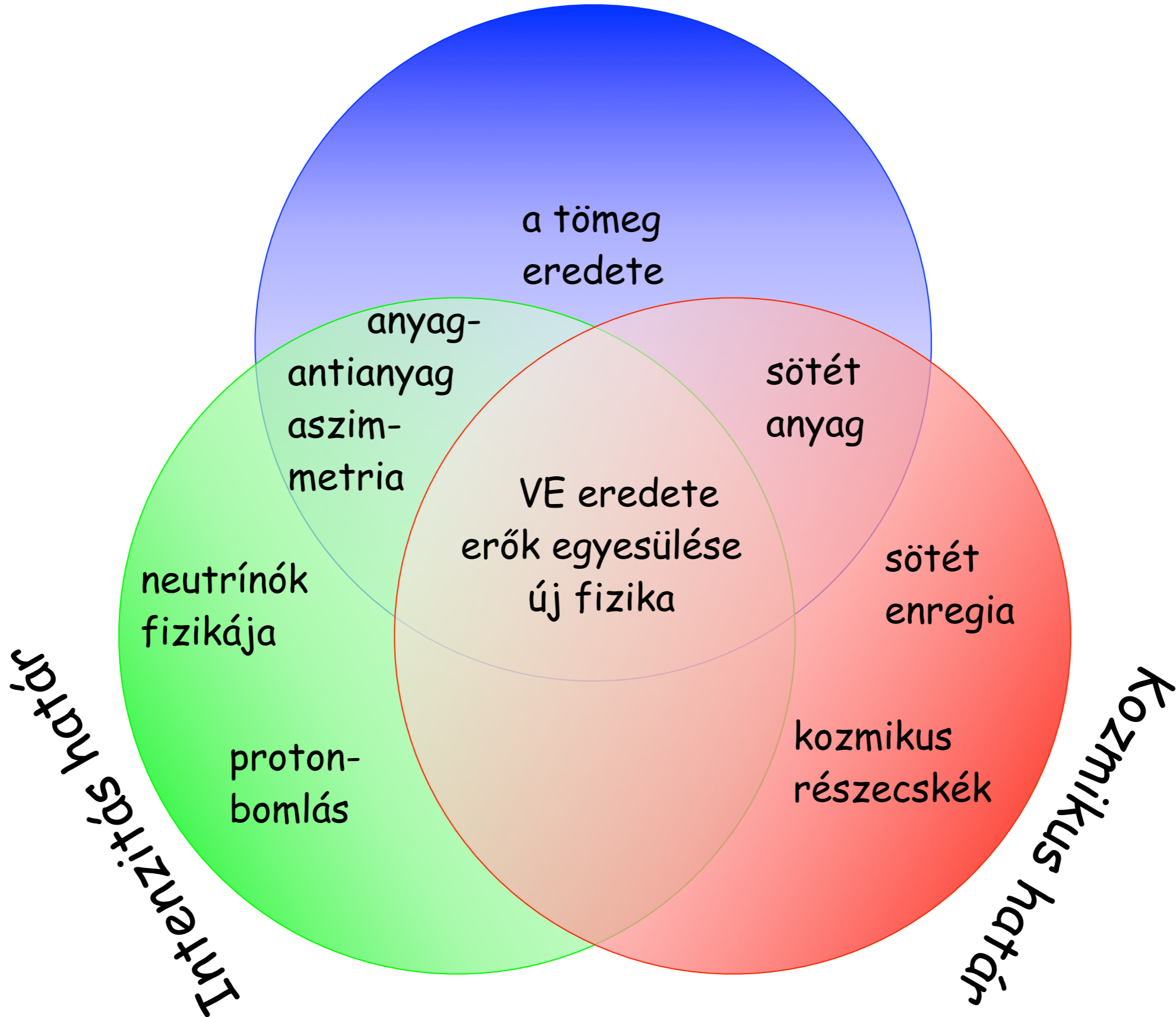
<http://www.interactions.org/quantumuniverse/qu/index.html>

- Vannak-e eddig fel nem fedezett természeti törvények?
- Hogyan érthetjük meg a sötét energia rejtélyét?
- Létezik-e több mint három tér-dimenzió?
- Egyesülnek-e az alapvető kölcsönhatások?
- Miért van oly sokfajta elemi részecske? Van-e esetleg több?
- Mi a sötét anyag?
- Elő tudjuk-e állítani laboratóriumban a sötét anyagot?
- Hogyan keletkezett a Világegyetem?
- Hová tűnt az antianyag?

Értjük-e ezeket a kérdéseket?

- Vannak-e eddig fel nem fedezett természeti törvények?
- Hogyan érthetjük meg a sötét energia rejtélyét?
- Létezik-e több mint három tér-dimenzió?
- Egyesülnek-e az alapvető kölcsönhatások?
- Miért van oly sokfajta elemi részecske? Van-e esetleg több?
- Mi a sötét anyag?
- Elő tudjuk-e állítani laboratóriumban a sötét anyagot?
- Hogyan keletkezett a Világegyetem?
- Hová tűnt az antianyag?

Energia határ



1. Rész

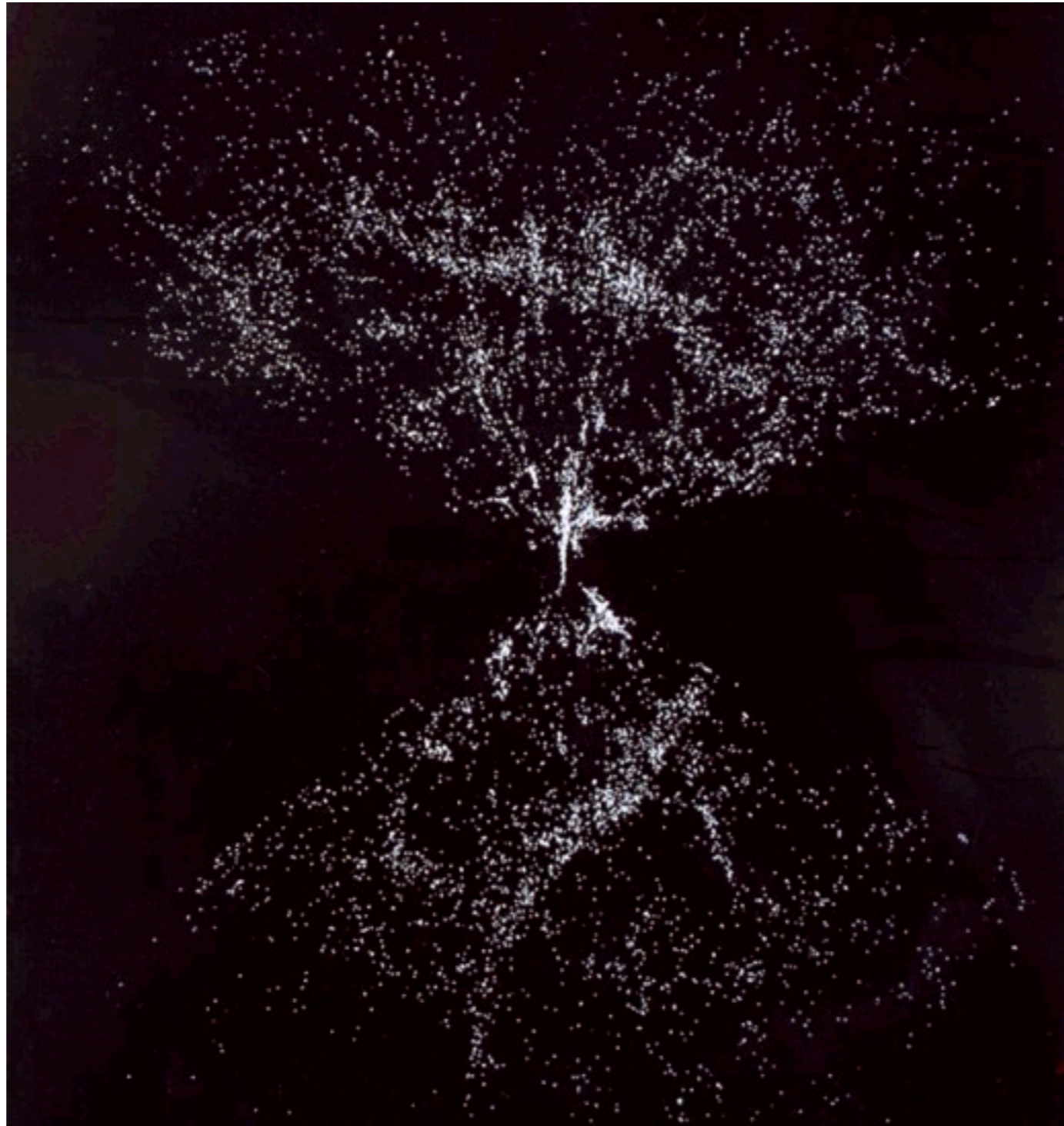
A táguló Világegyetem

A Világegyetem szerkezete



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

A Világegyetem szerkezete



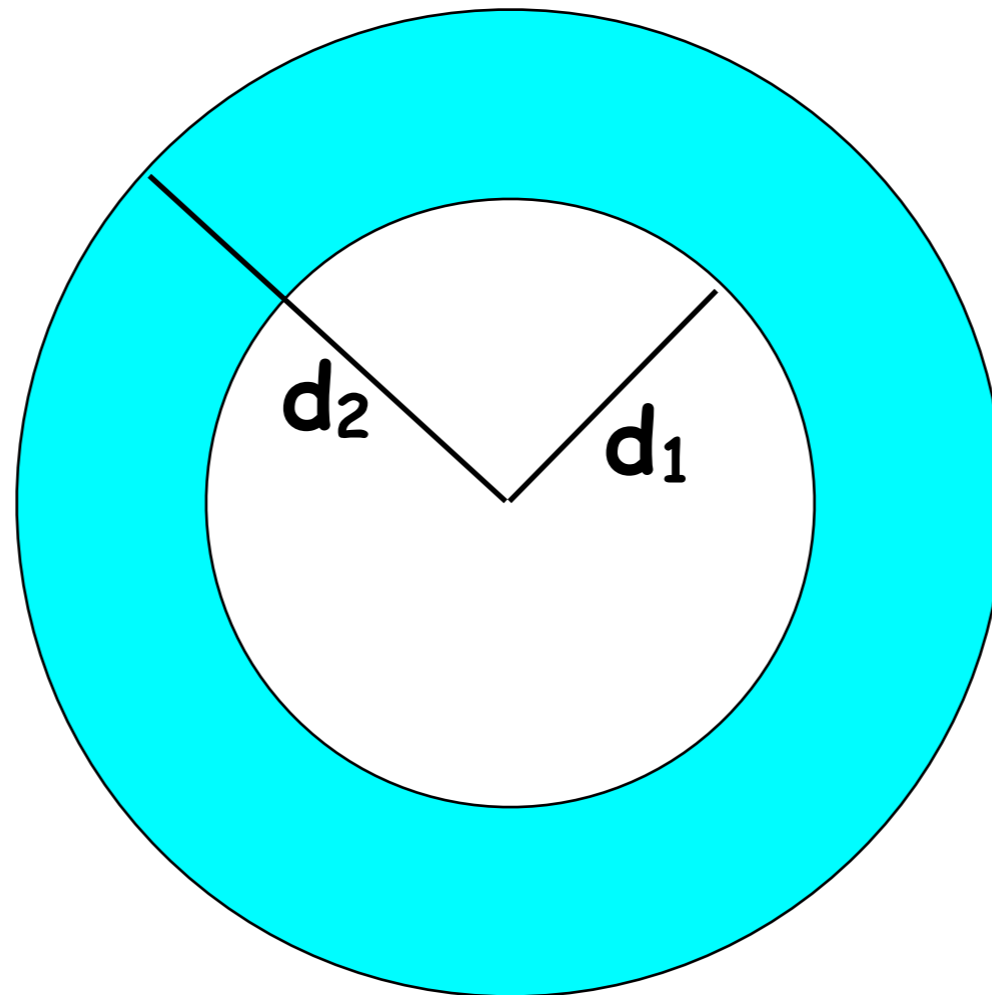
10^{11} db galaxist látunk

Hubble űrtávcső



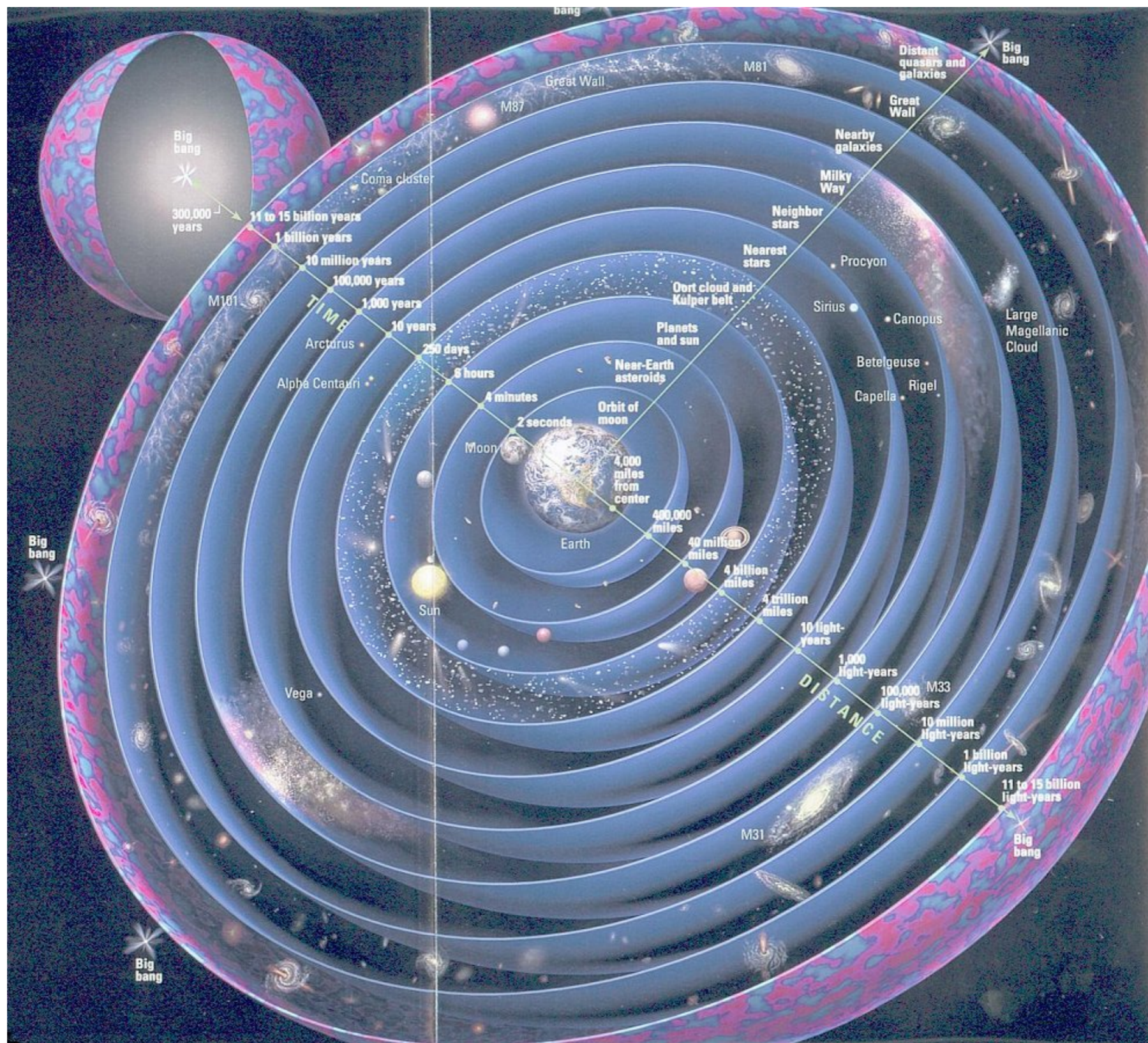


Minél messzebb nézünk,
annál korábban látunk



$$\Delta t = (d_2 - d_1) / c$$

Minél messzebb nézünk, annál korábban látunk



A Világegyetem szerkezete

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

Galaxisban (0,1Mfényév)

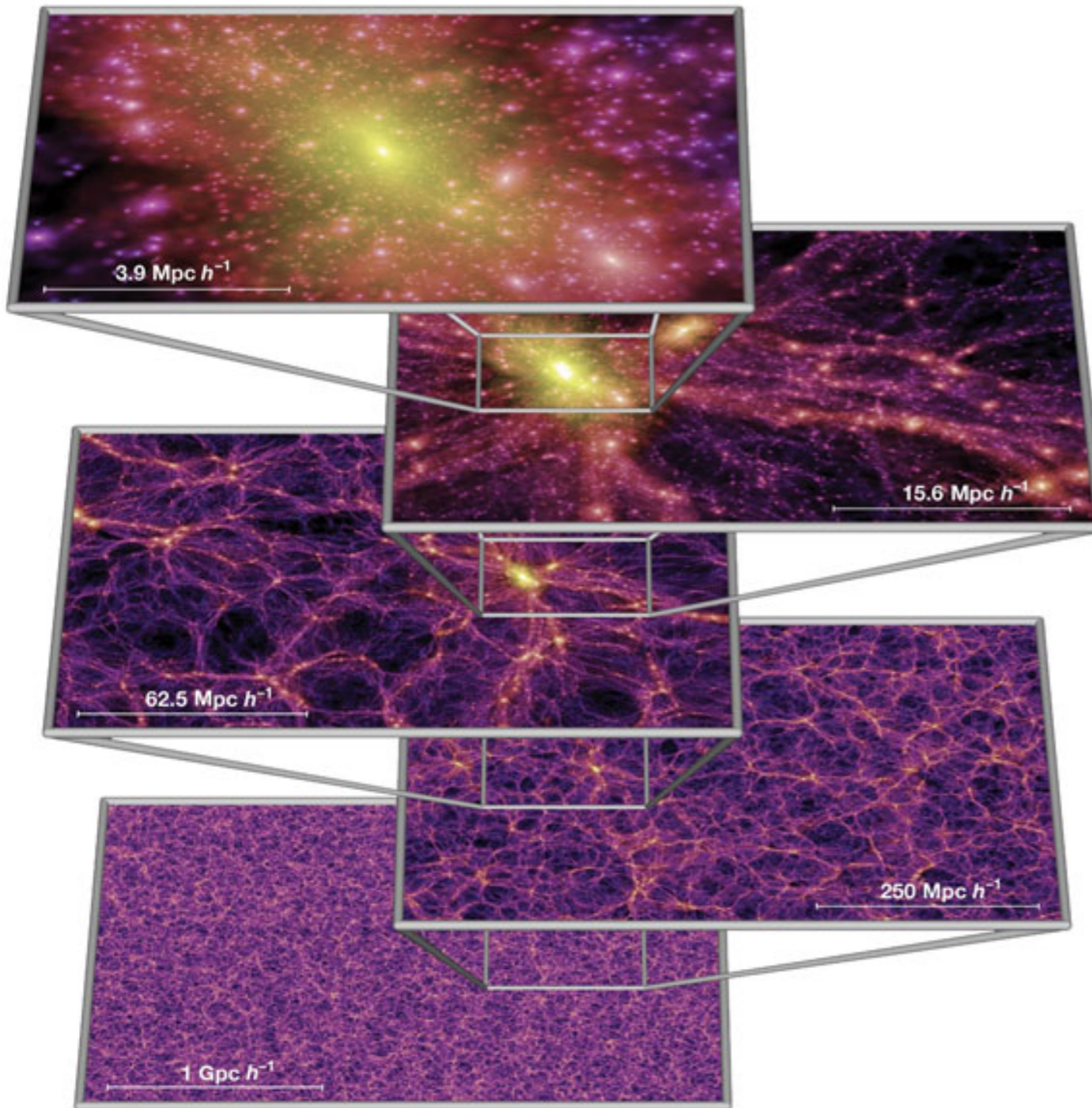
$$\Delta\rho/\rho = 1000\ 000$$

Galaxishalmazokban (3 Mfényév)

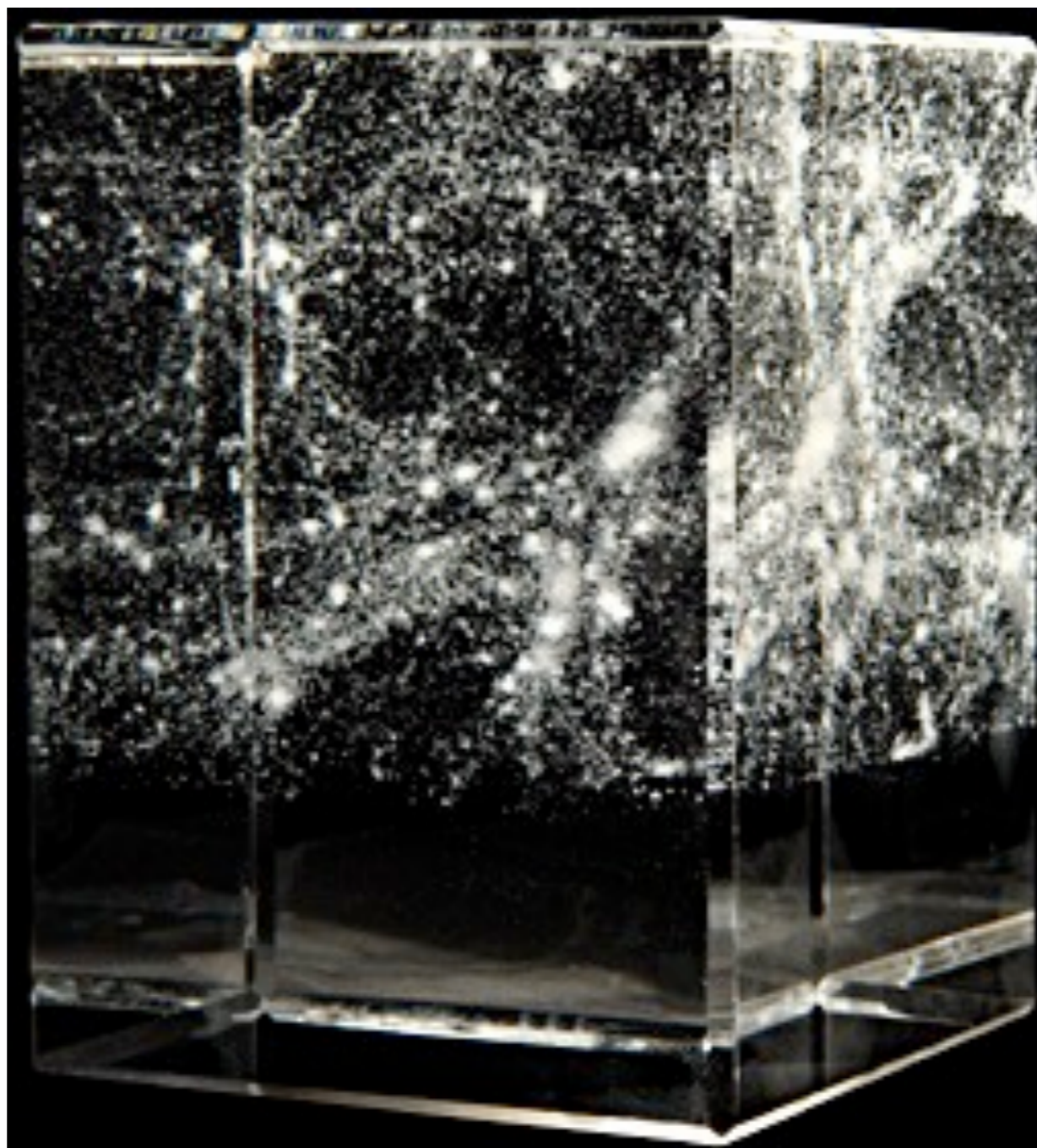
$$\Delta\rho/\rho = 1000$$

Szuperhalmazokban (100 Mfényév)

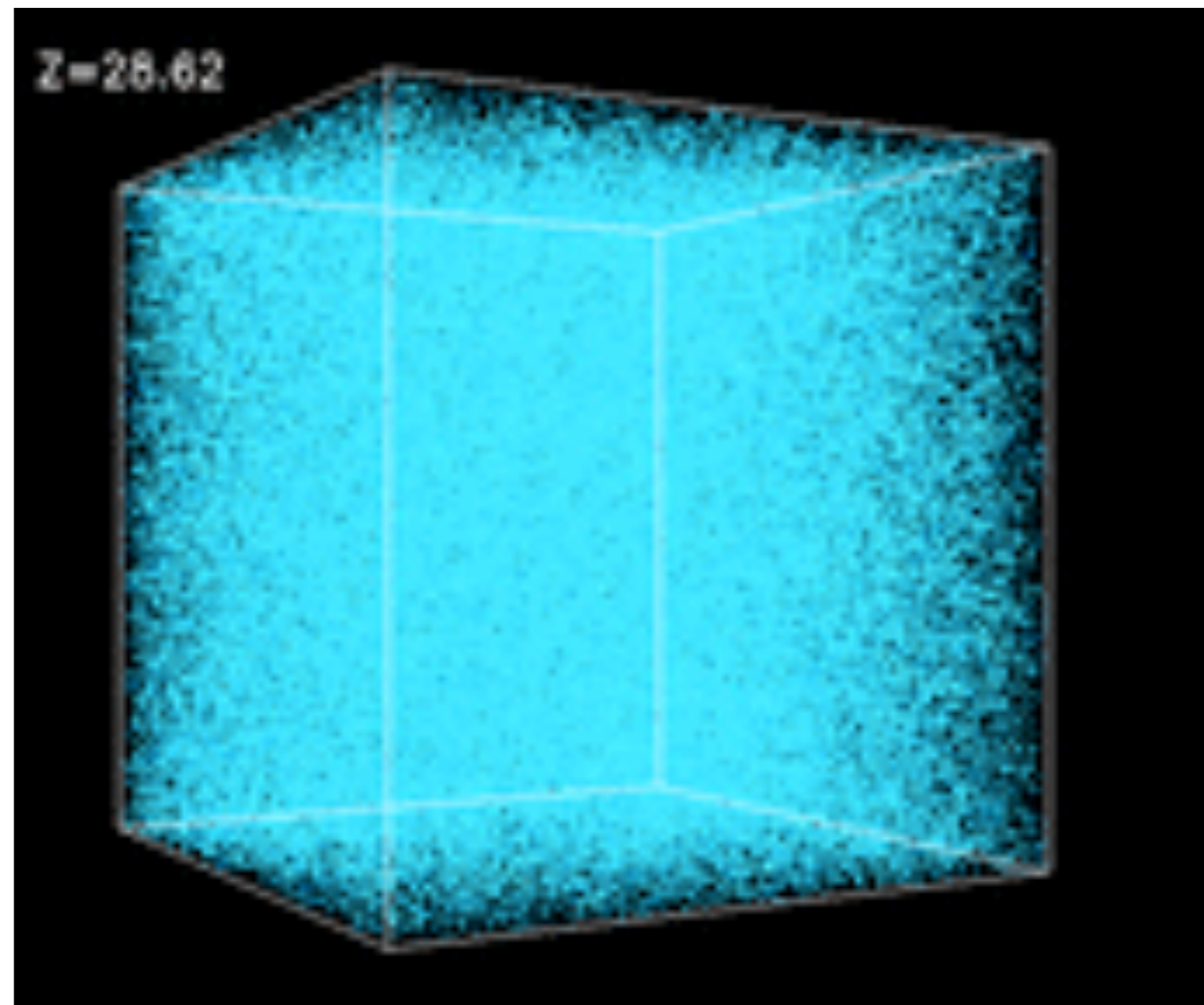
$$\Delta\rho/\rho = 10$$



A VE nagyléptékű szerkezete



A VE nagyléptékű szerkezete



A VE összetétele





Honnan tudjuk mindezt?

Sok-sok kozmológiai megfigyelésből...

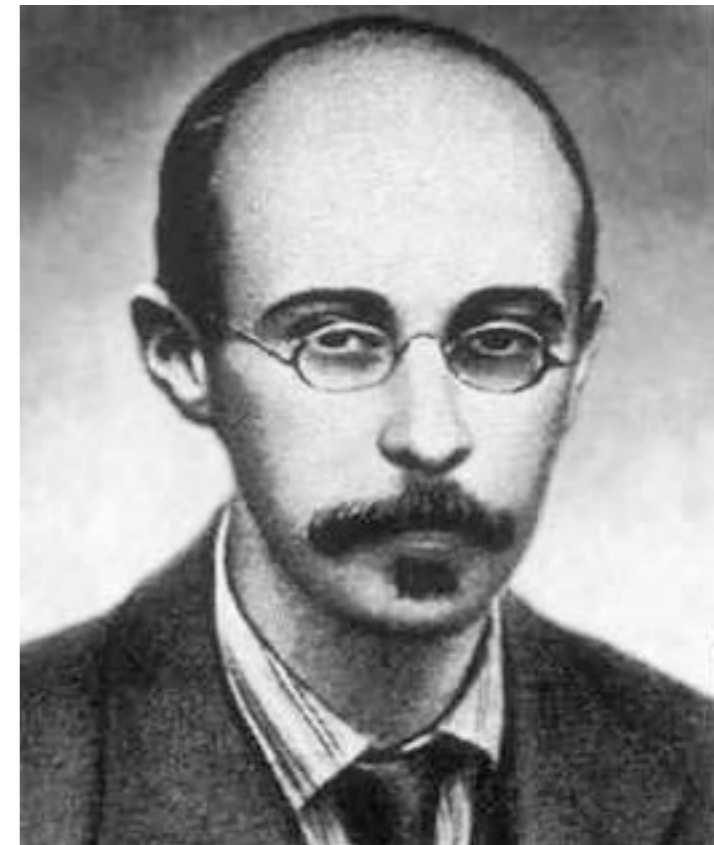
...de nincs időnk mind áttekinteni

Csak az elmúlt 2 évtizedre összpontosítunk



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

Távolságmérés **standard** gyertyákkal (pl. Cefeida)



luminozitás-távolság:

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

m : látszó

M : abszolút

fényesség

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 (sugárirányú) sebességét
3. kérdés: Honnan tudjuk a galaxis sebességét?

Hubble eredeti mérése

távolodás
sebessége

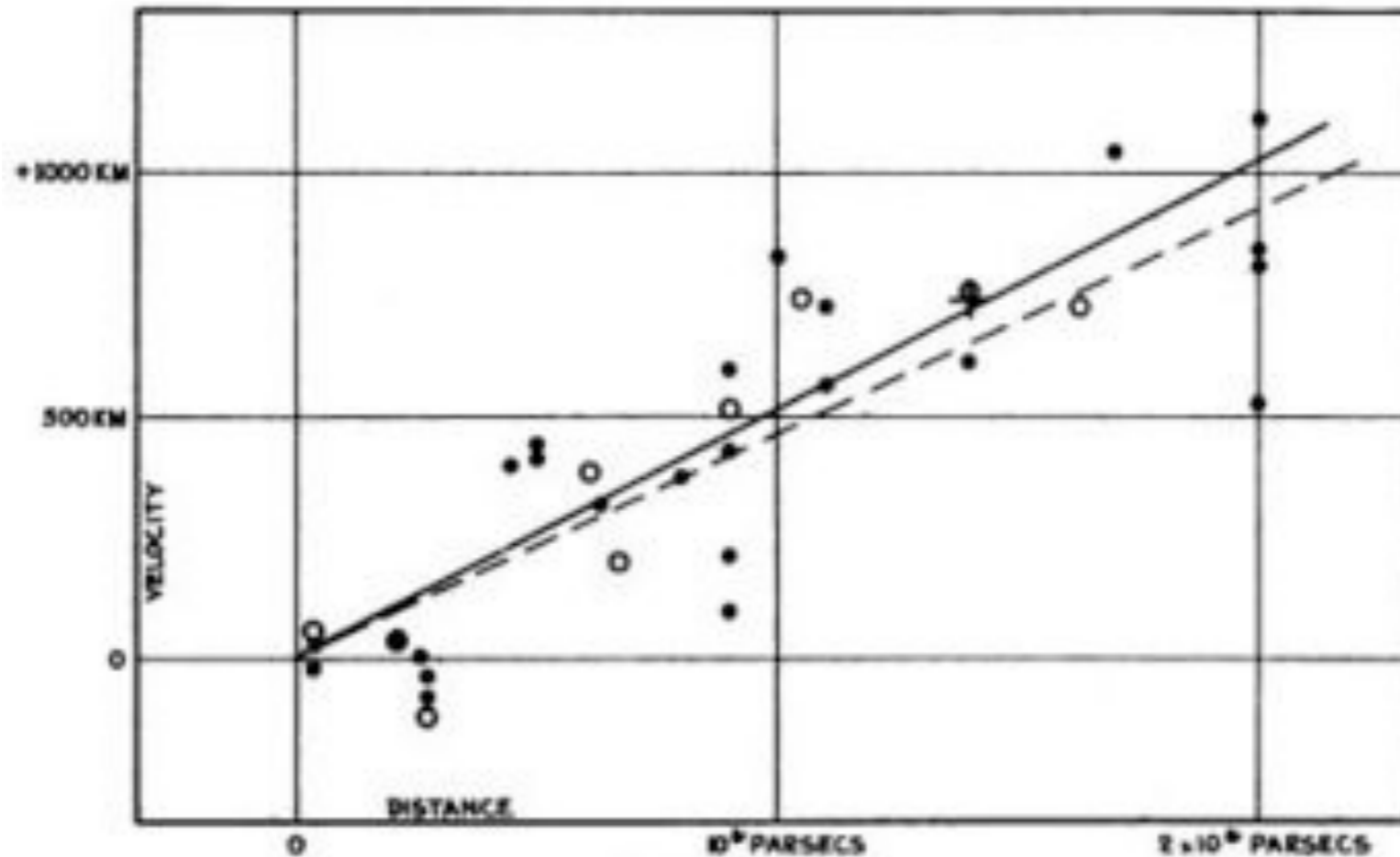


FIGURE 1

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

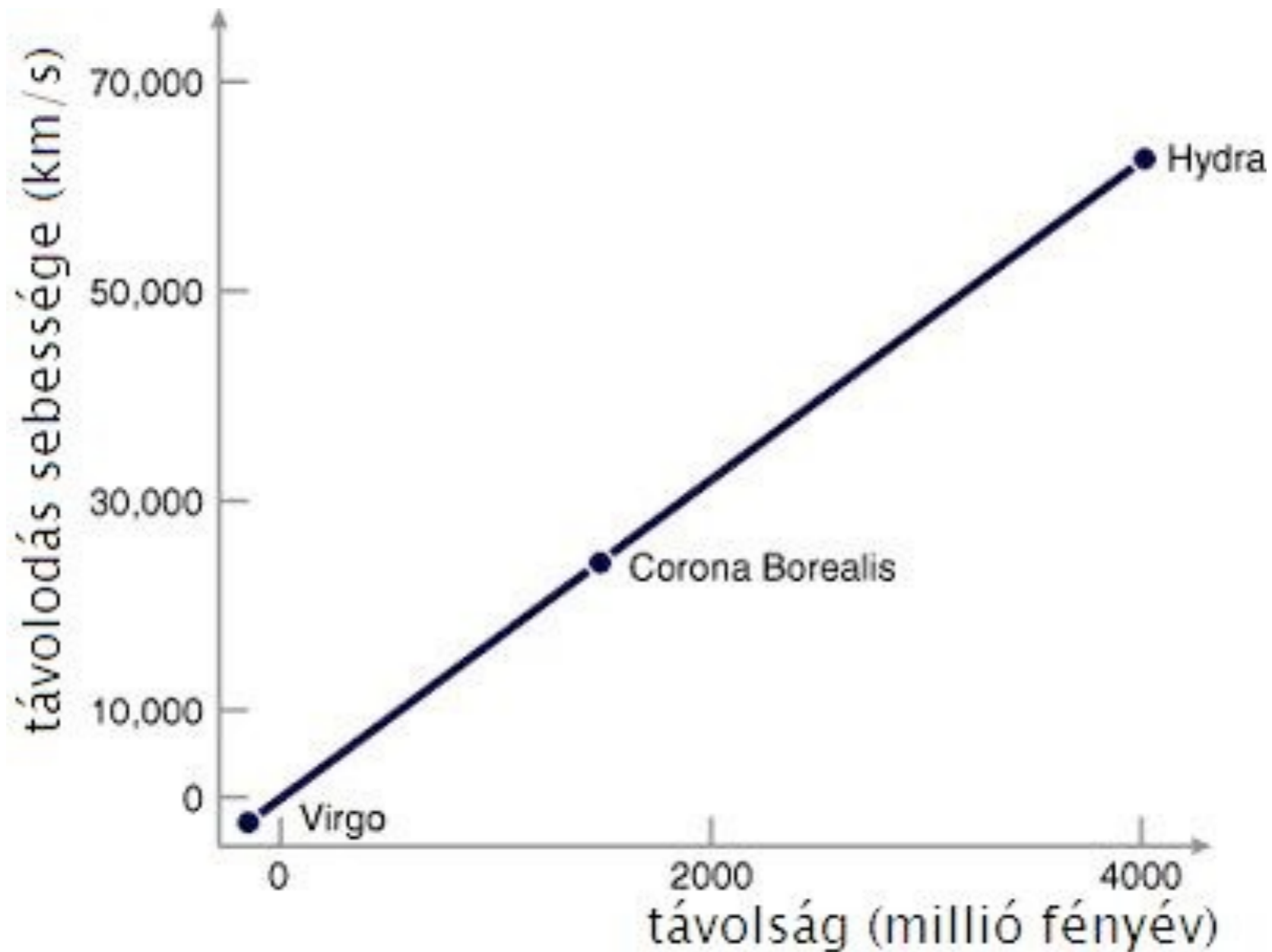
Hubble forradalma



- 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

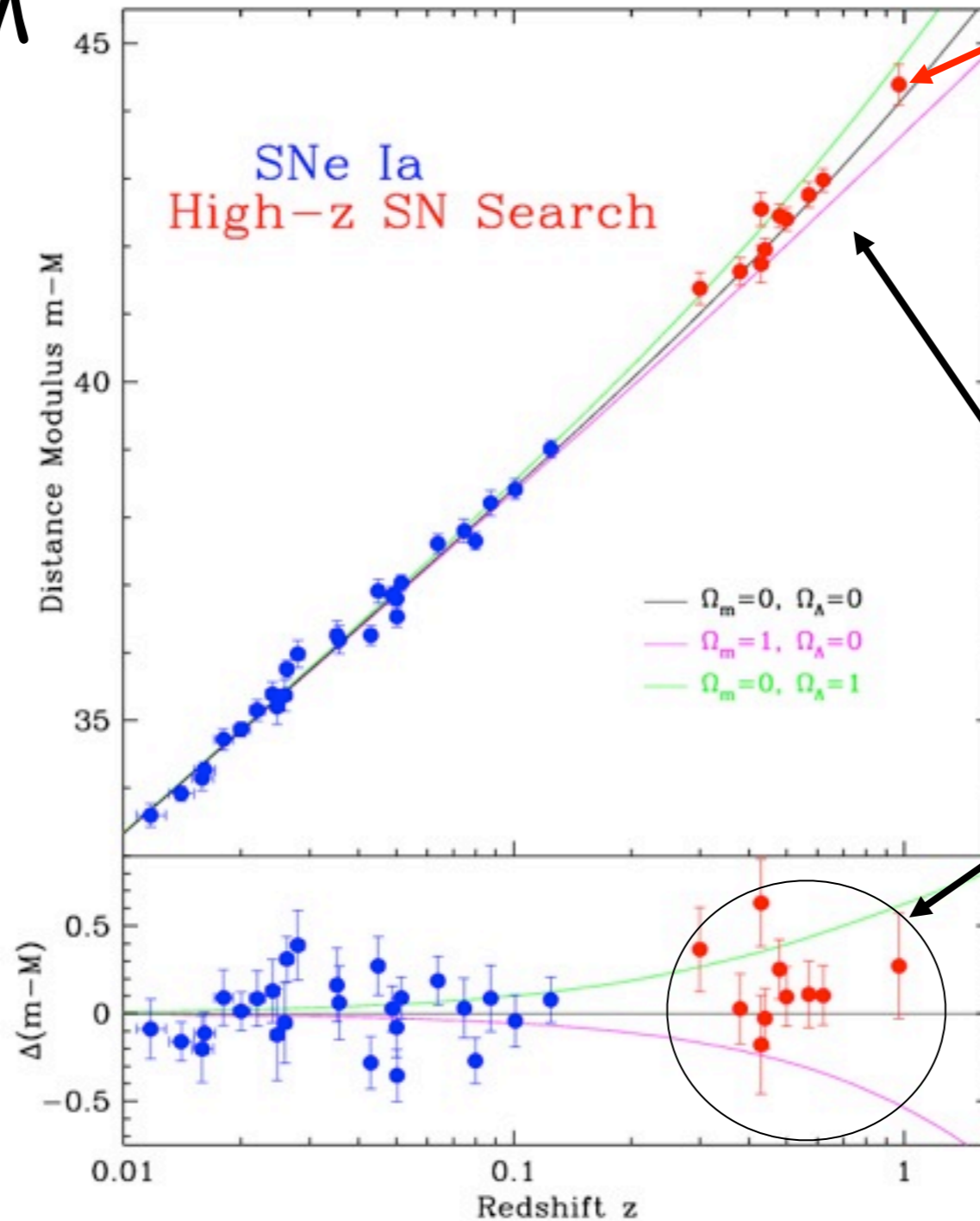


$$v = H_0 r, H_0 = 100 h \text{ (km/s) / Mpc} = h / (9,78 \cdot 10^9 \text{ év}), h=0,7$$

4. kérdés: mit ad meg H_0 reciproka?

Hubble törvény kísérleti ellenőrzése

$m-M$



5. kérdés:
Milyen messze
van ez a SN?

Gyorsuló
tágulás!

vöröseltolódás = $\lambda'/\lambda - 1$

Fizikai Nobel-díj 2011



Saul Perlmutter

Brian P. Schmidt

Adam G. Riess

Lawrence Berkeley

Ausztrál Nemzeti

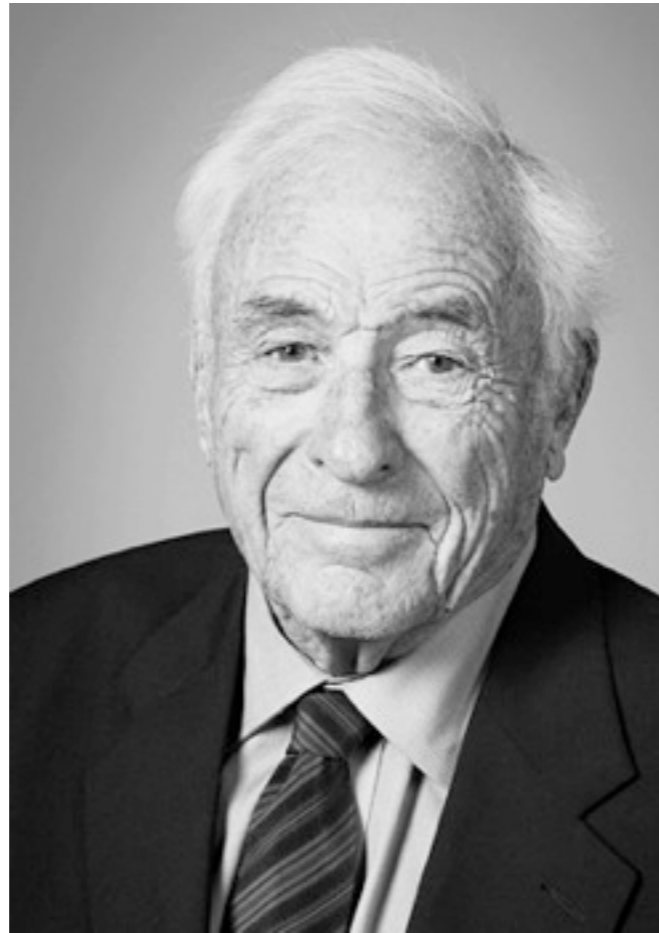
Johns Hopkins

Nemzeti Labor, USA Egyetem, AUS

Egyetem, USA

„a Világegyetem gyorsuló tágulásának felfedezéséért
távoli szupernóvák megfigyelése révén”

Elengedhetetlen volt hozzá: Fizikai Nobel-díj 2009



Willard S. Boyle

Bell Laboratórium, USA



George E. Smith

Bell Laboratórium, USA

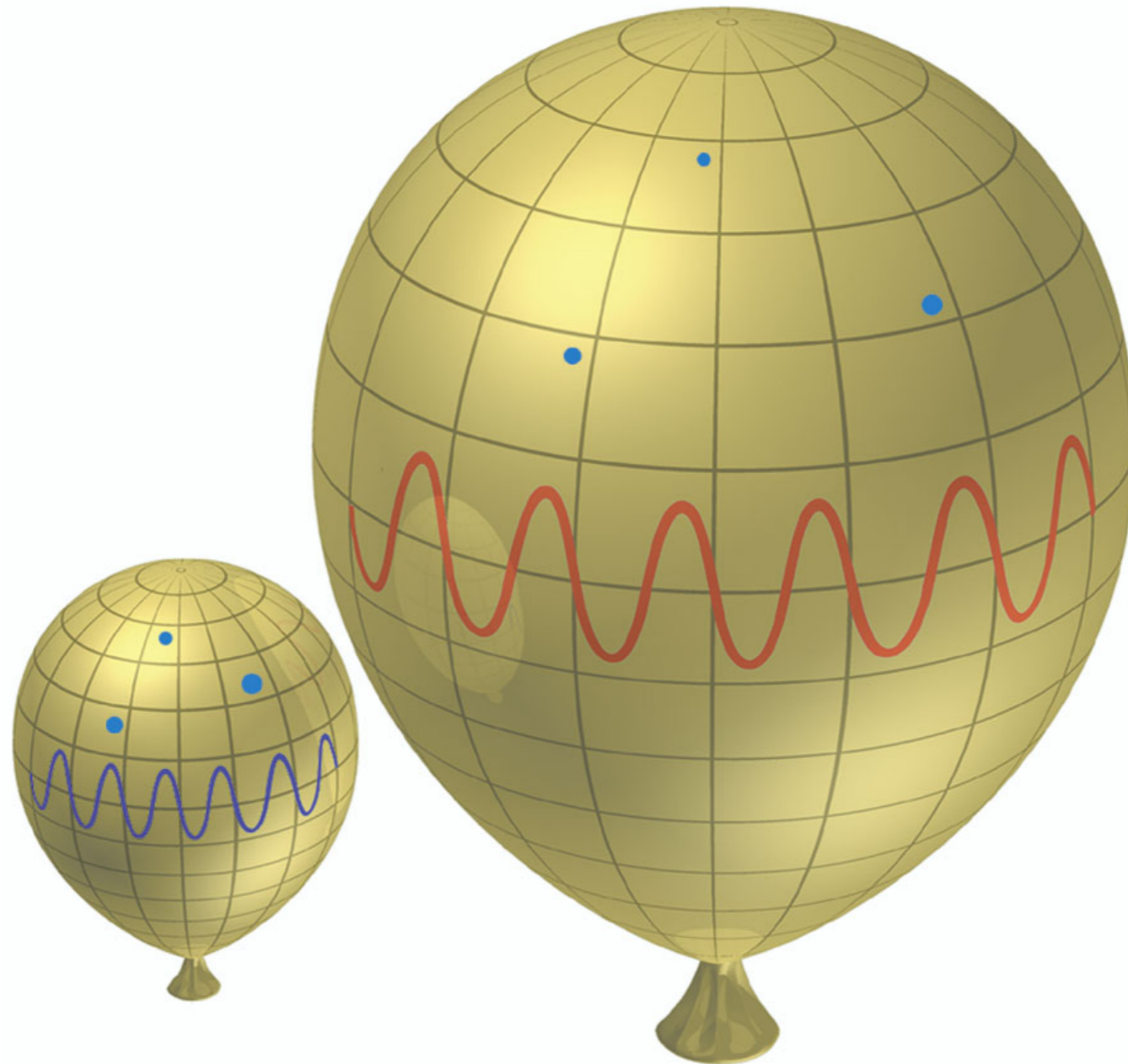
„a CCD félvezető képalkotó eszköz feltalálásáért”

A táguló Világegyetem

- A távoli galaxisok fényében vöröseltolódást észlelünk
- A hatás a távolsággal arányos (alátámasztja a kozmológiai elv helyességét) - 6. kérdés: **Miért?**
- A teljes kozmológiai elv nem teljesülhet
- Nagy skálán a vöröseltolódás a térrel együtt táguló fényhullám hullámhossznövekedésének az **eredménye** (csak kis távolság esetén magyarázható Doppler-hatással)

Egyetemes tágulás:

λ'/λ a skálafaktorról arányos ($z = (\lambda' - \lambda)/\lambda = \lambda'/\lambda - 1$)



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

A gömb felszínén található m tömegű galaxis
potenciális energiája

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

mozgási energiája

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

A teljes mechanikai energia állandó:

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

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

$$0 = \frac{1}{2} \cancel{m} \left(\cancel{H} \cancel{R} \right)^2 - G \cancel{m} \frac{4}{3} \cancel{R}^2 \pi \rho_c \Rightarrow \rho_c = \frac{3H^2}{8G\pi}$$

7. kérdés: Hány H atomot jelent ρ_c m³-ként?

A szokásos egység

A tömegsűrűséget ρ_c egységben szokás mérni:

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

$$\rho_x = \Omega_x \rho_c$$

- **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

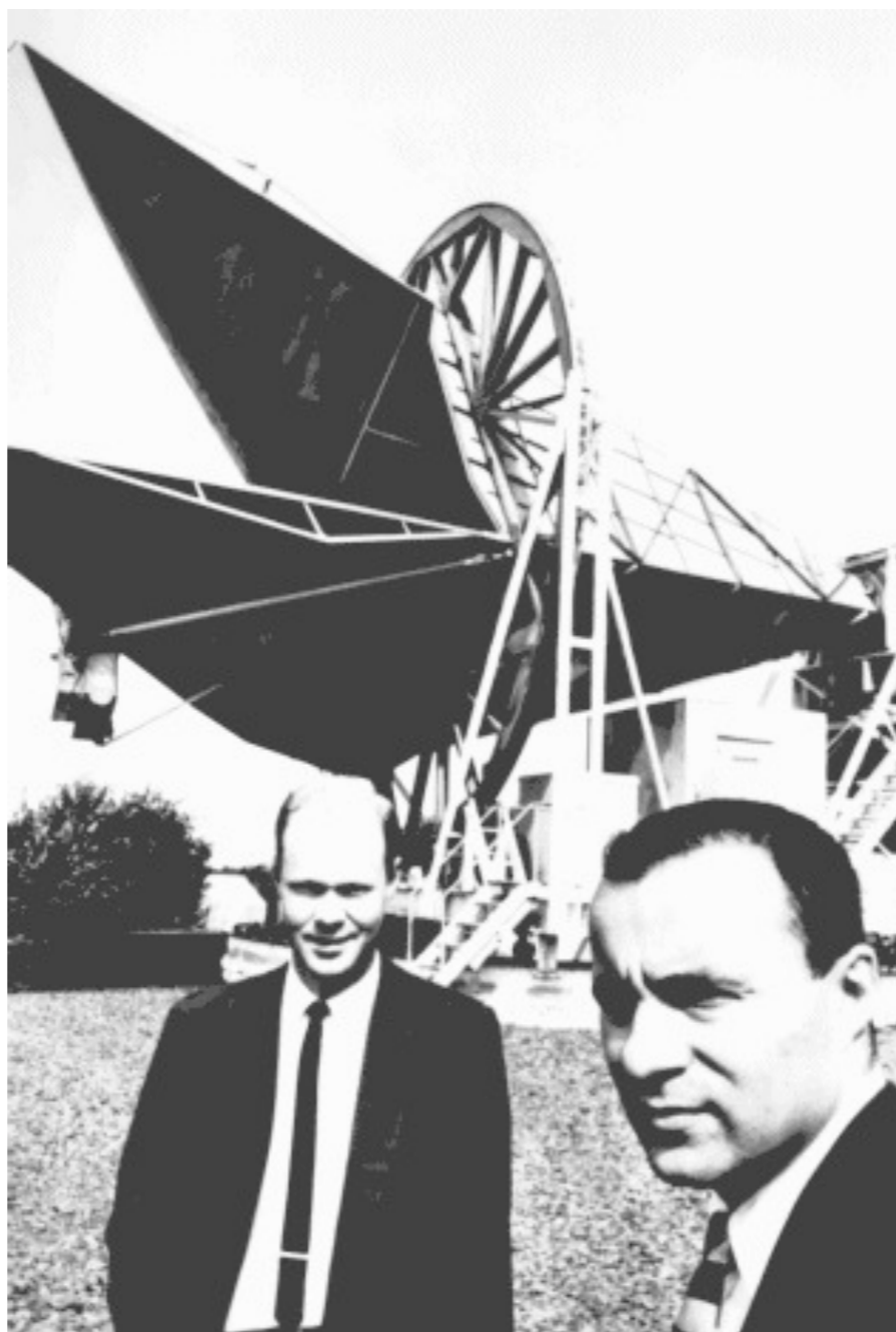
Ha a Világegyetem valóban tágul, akkor régen „kisebb”,
ezért melegebb volt

- 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

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 antennát készített, amellyel...
 - iránytól
 - napszaktól, évszaktólfüggetlen elektromágneses sugárzást észleltek
- Az antenna hibáját kizárták
(Még a véletlen felfedezéshez is elengedhetetlen a pontosság!)

Mi lehet a titokzatos sugárzás forrása?

A kozmikus sugárzás

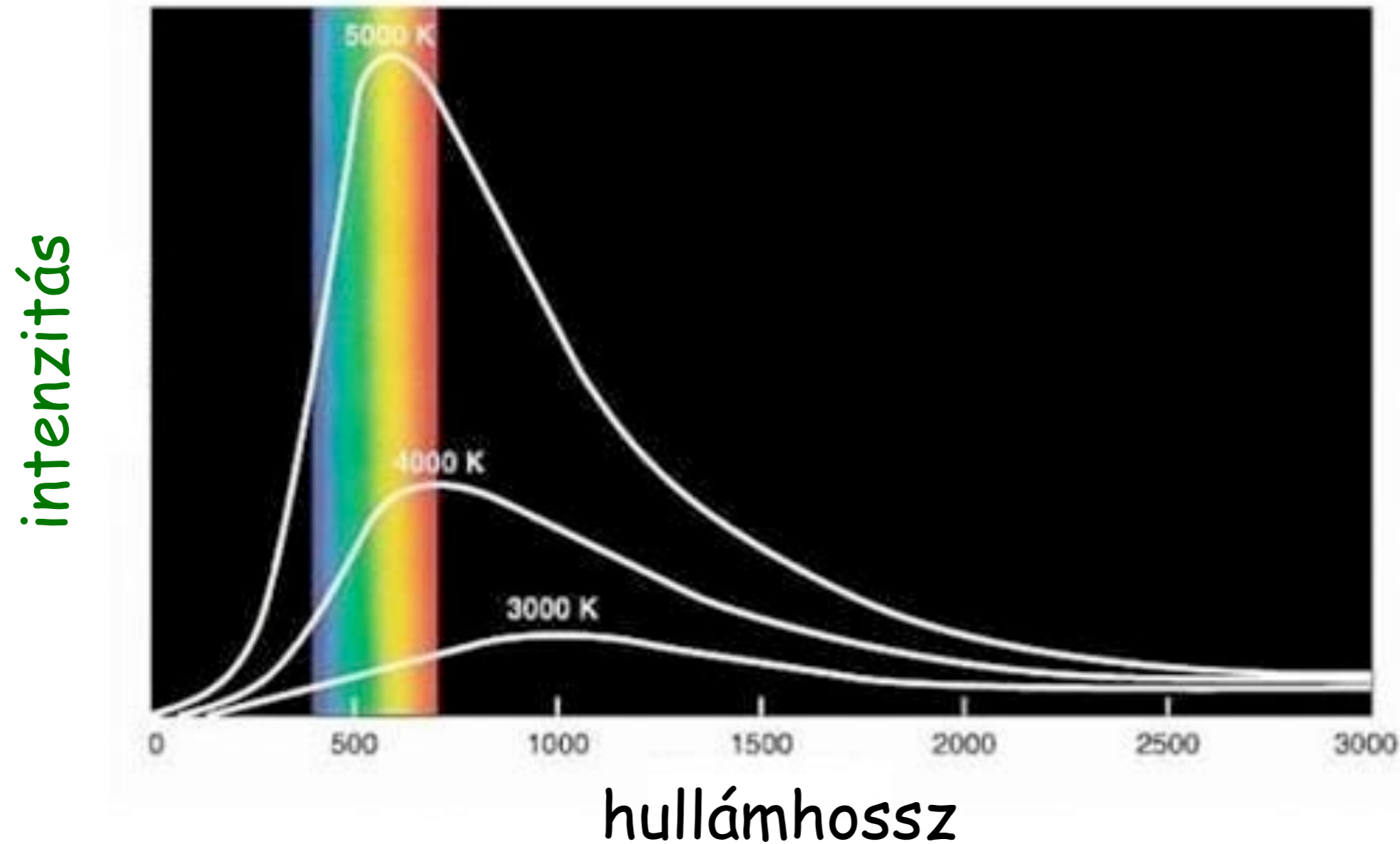
- 1965: A. Penzias és R. Wilson érzékeny mikrohullámú antennája
 - iránytól
 - napszaktól, évszaktólfüggetlen elektromágneses sugárzást észleltek
- Az antenna hibáját kizárták

Mi lehet a titokzatos sugárzás forrása?

- Mi már sejtjük:
A VE-t az első perceiben elektromágneses sugárzás töltötte ki, ami azóta is ott van, csak hullámhossza a tágulás arányában megnőtt

Penzias és Wilson mérése szerint a sugárzás hőmérséklete 3,5 K (8. kérdés: Mit jelent ez?)

A hőmérsékleti sugárzás intenzitásának hullámhosszfüggése



~10cm alatt a légkör átlátszatlan ⇒

Földről csak az eloszlás maximumától jobbra eső rész mérhető

Irány a világűr: A **C**osmic **B**ackground **E**xplorer űrszonda

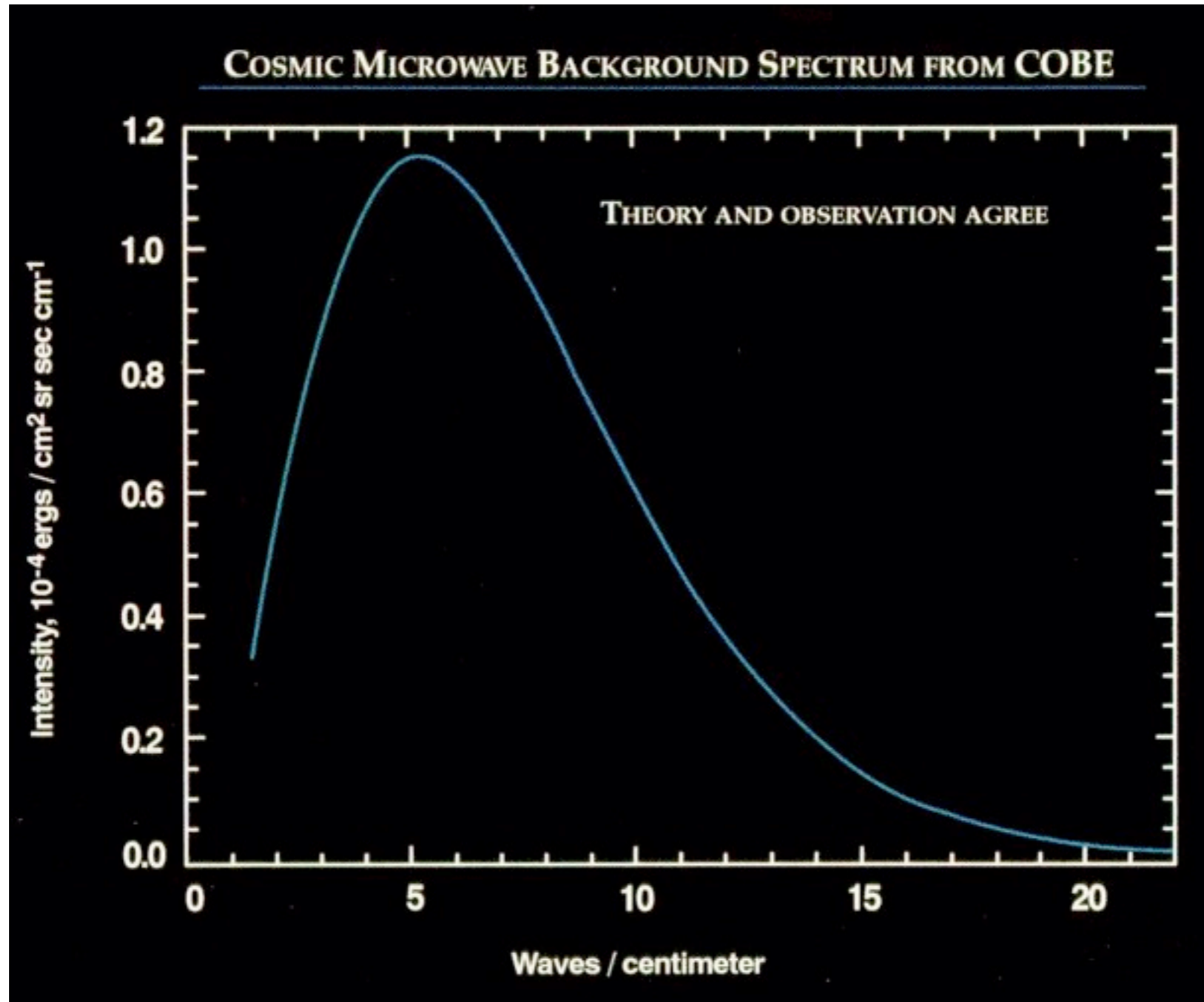


FIRAS = Far Infrared Absolute Spectrophotometer

DMR = Differential Microwave Radiometer

DIRBE = Diffuse Infrared Background Experiment

A FIRAS spektrum

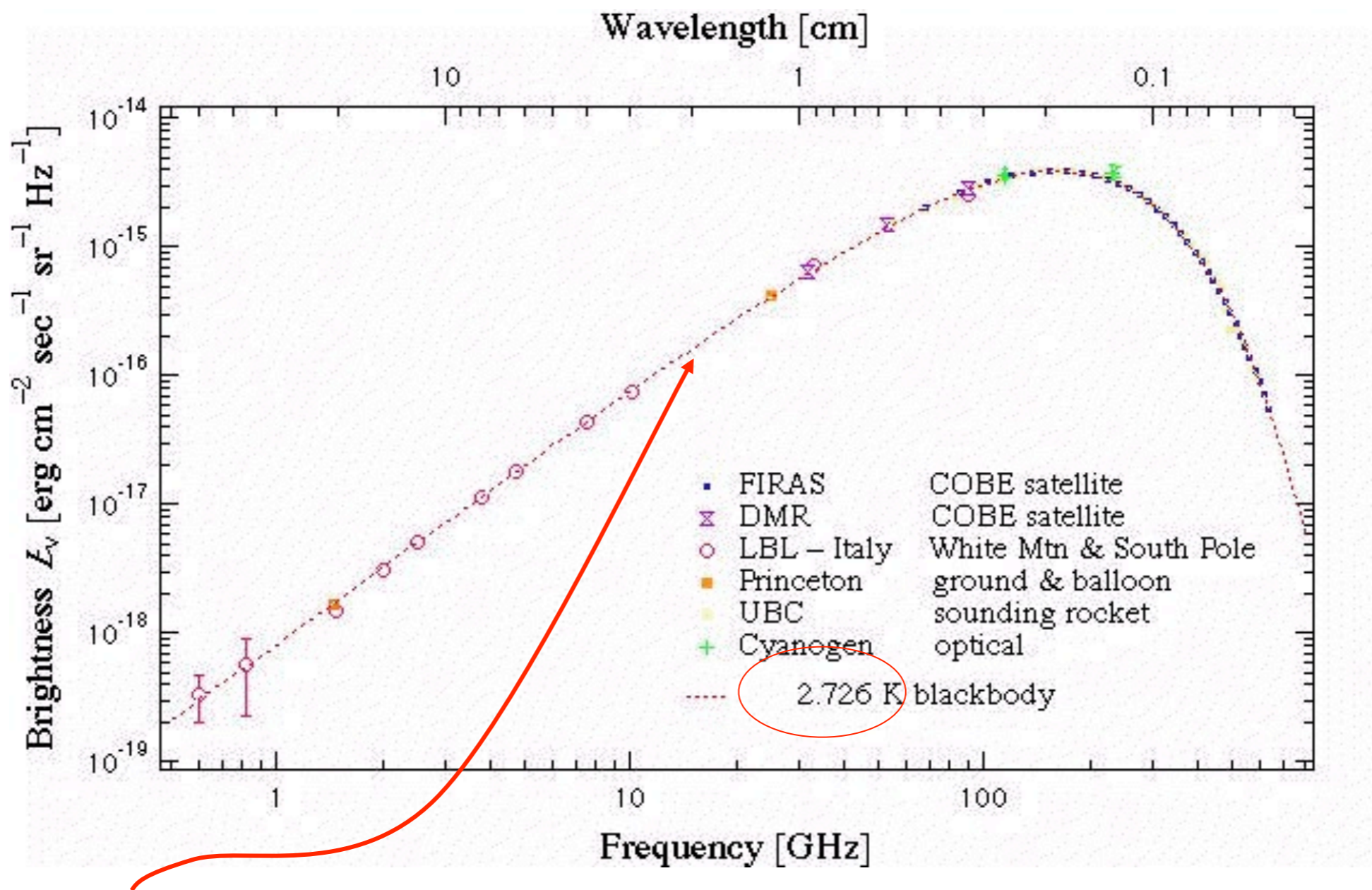


Valaha látott legtökéletesebb hőmérsékleti sugárzási spektrum

A CoBE által mért sugárzási görbe

hullámhossz

sugárzás intenzitása



Planck-görbe

frekvencia

Miért érdekes a kozmikus háttérsugárzás?

Válasz holnap

