Magyar fizikatanárok a CERN-ben

2010. augusztus 13-19.

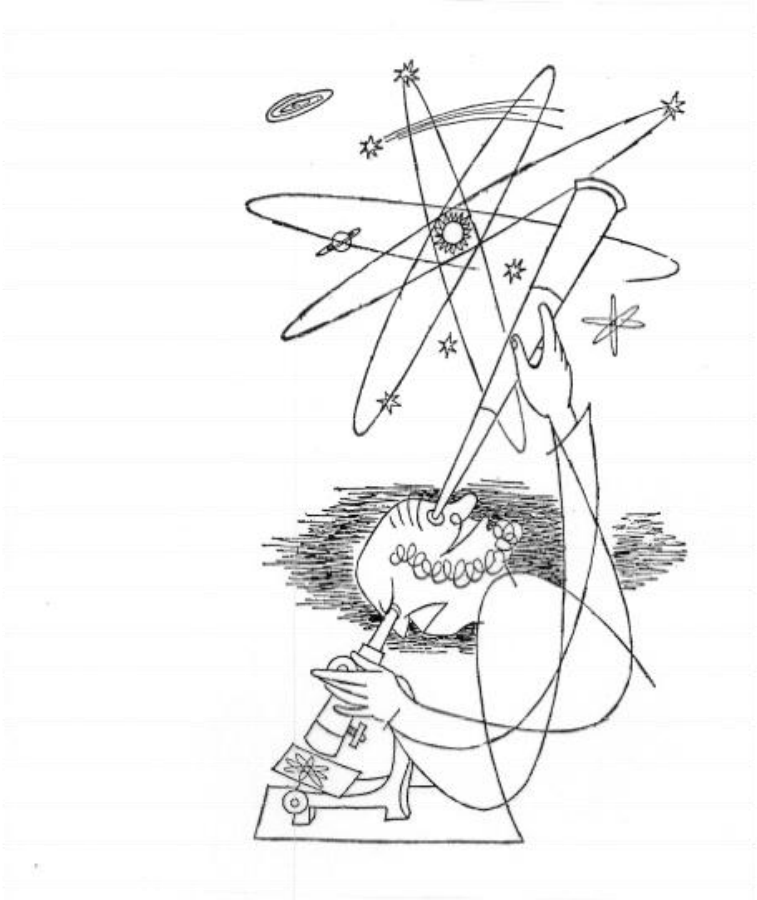
Trócsányi Zoltán

Kozmológia alapfokon

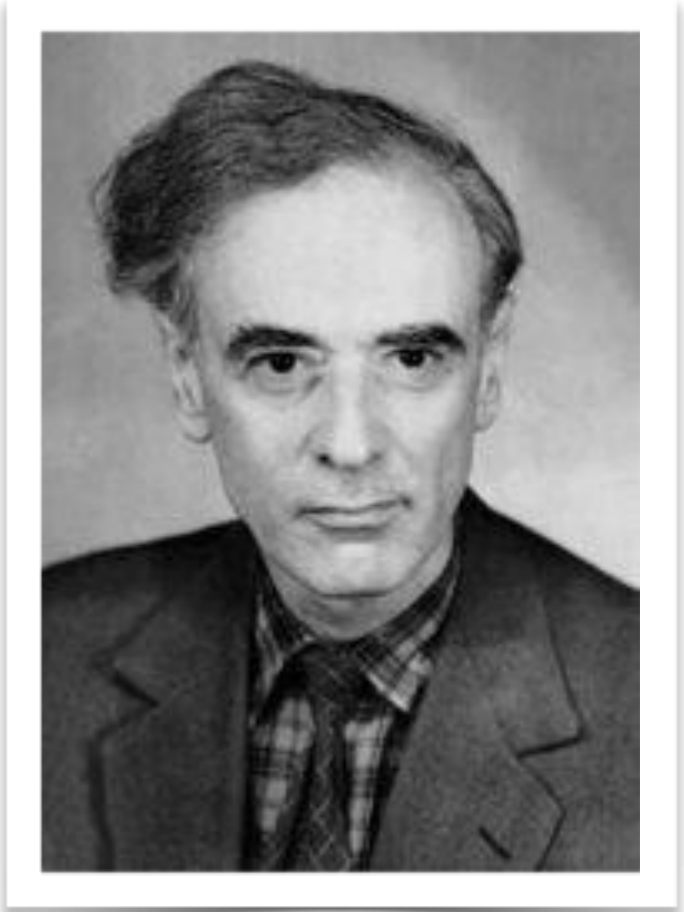
Részecskefizikai vonatkozásokkal

Hogy kerül a csizma az asztalra?

Az elmúlt negyedszázad a mikro- és makrokozmosz fizikájának összefonódását hozta



Landau a kozmológusokról:



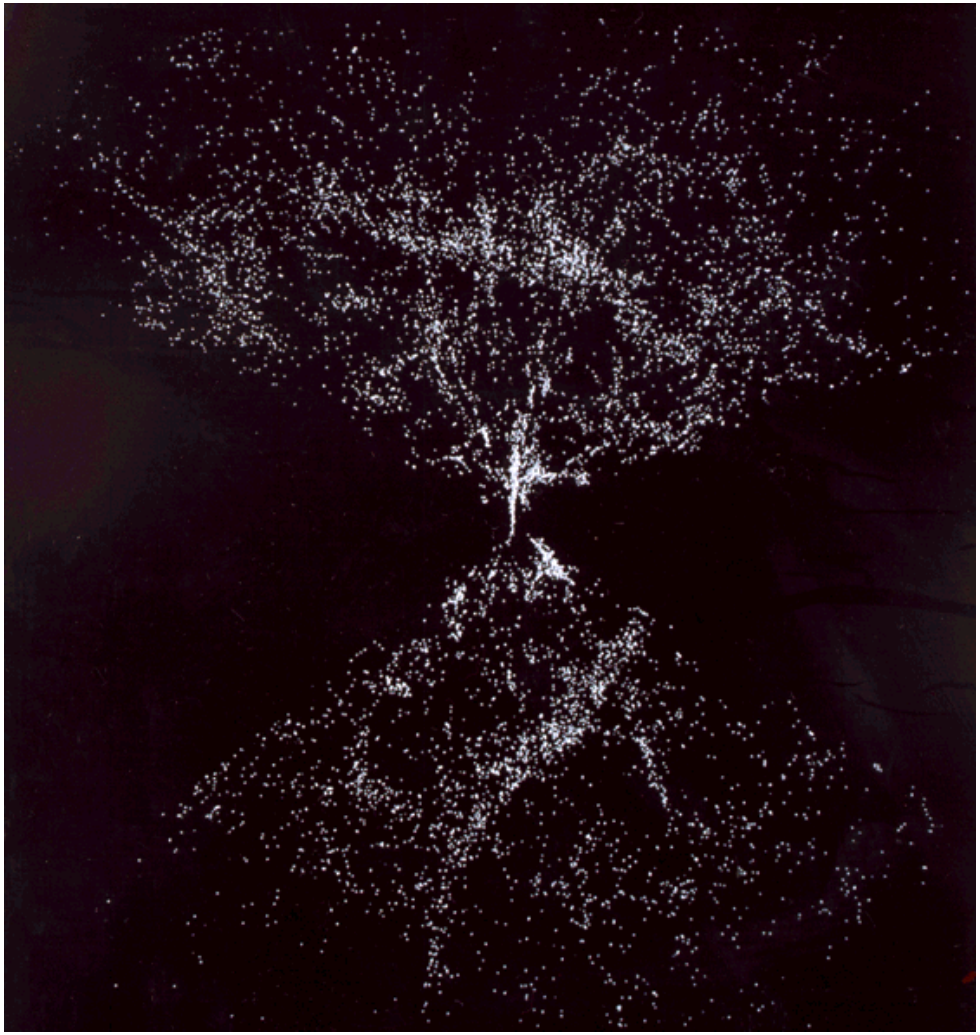
Gyakran hibáznak,
de sosem kételkednek

1. Rész
A táguló Világegyetem

A Világegyetem szerkezete

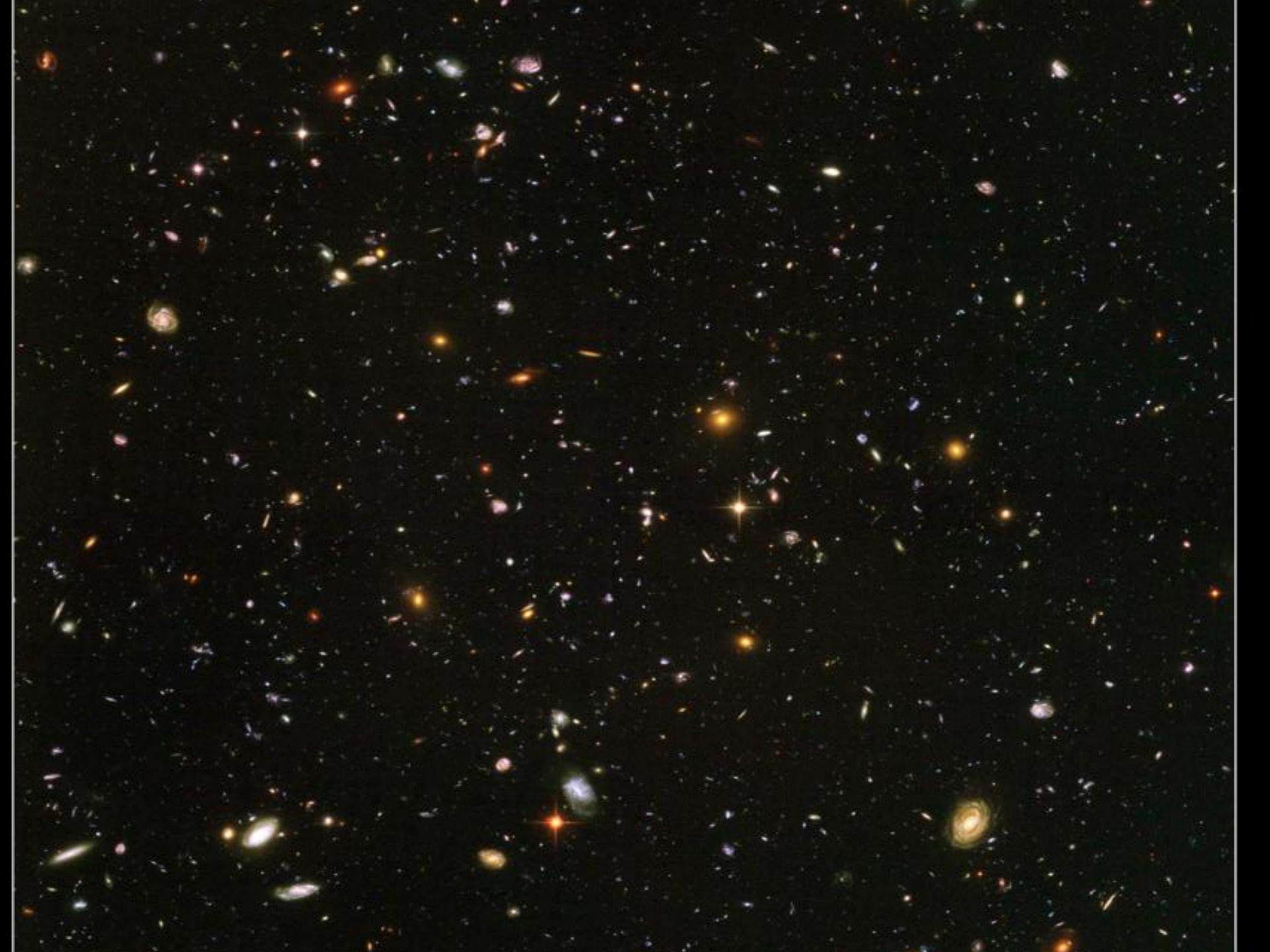
Egy-egy galaxisban 10^{11} db csillagot látunk

A Világegyetem szerkezete

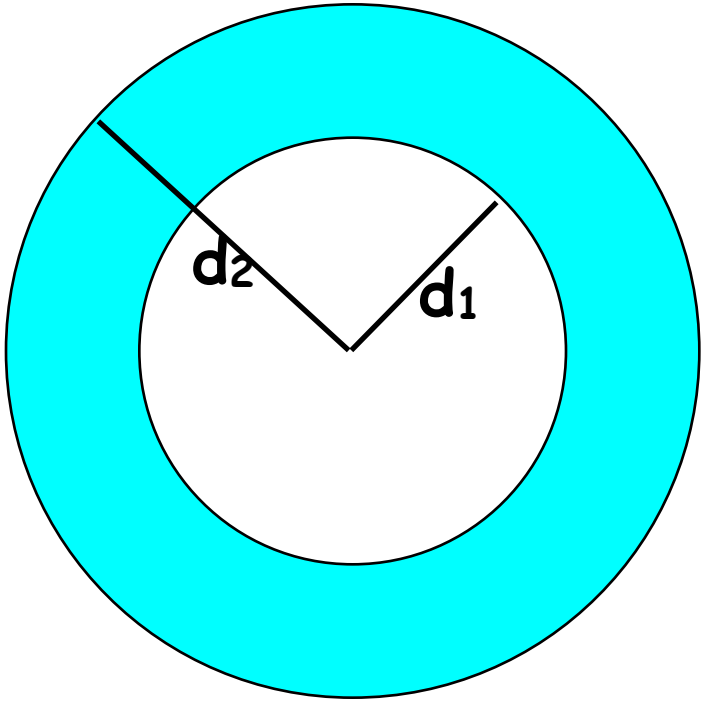


10^{11} db galaxist látunk

Hubble űrtávcső

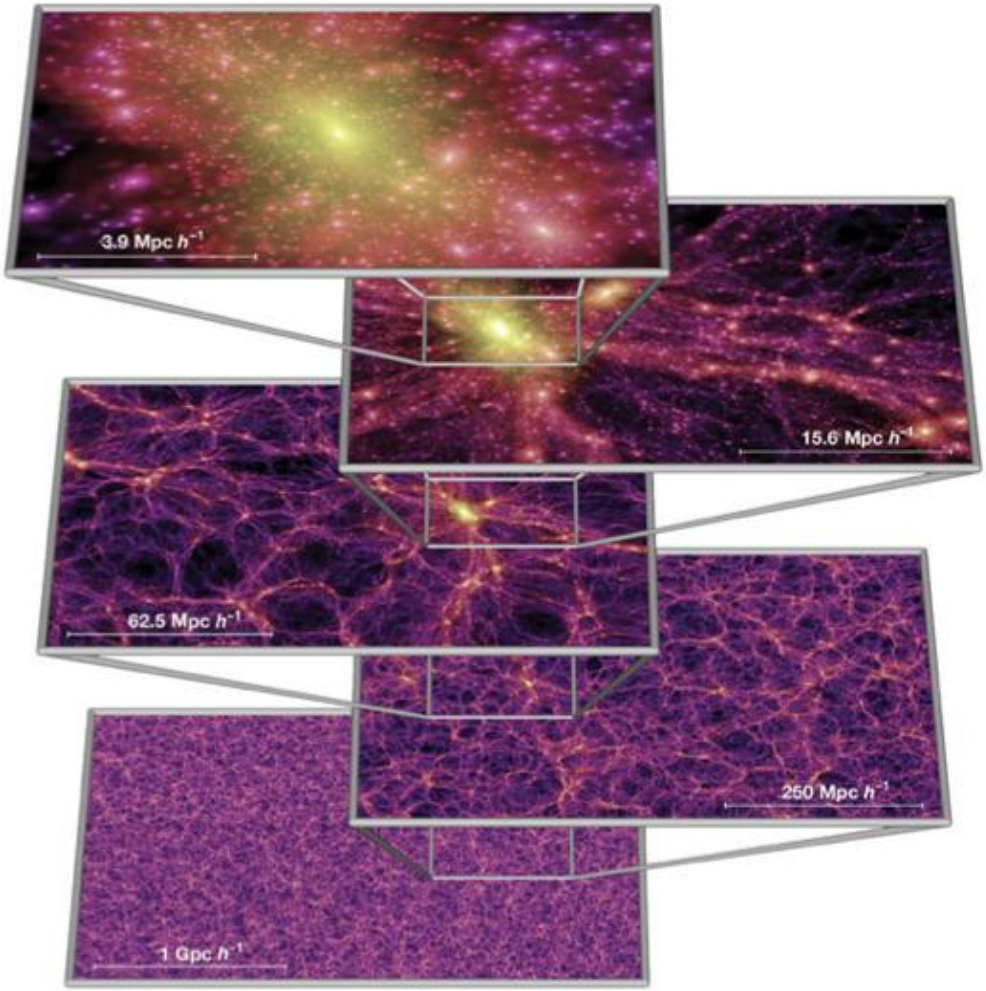


Minél messzebb nézünk, annál korábbra látunk



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

A Világegyetem szerkezete



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

Galaxisban (0,1Mfényév)

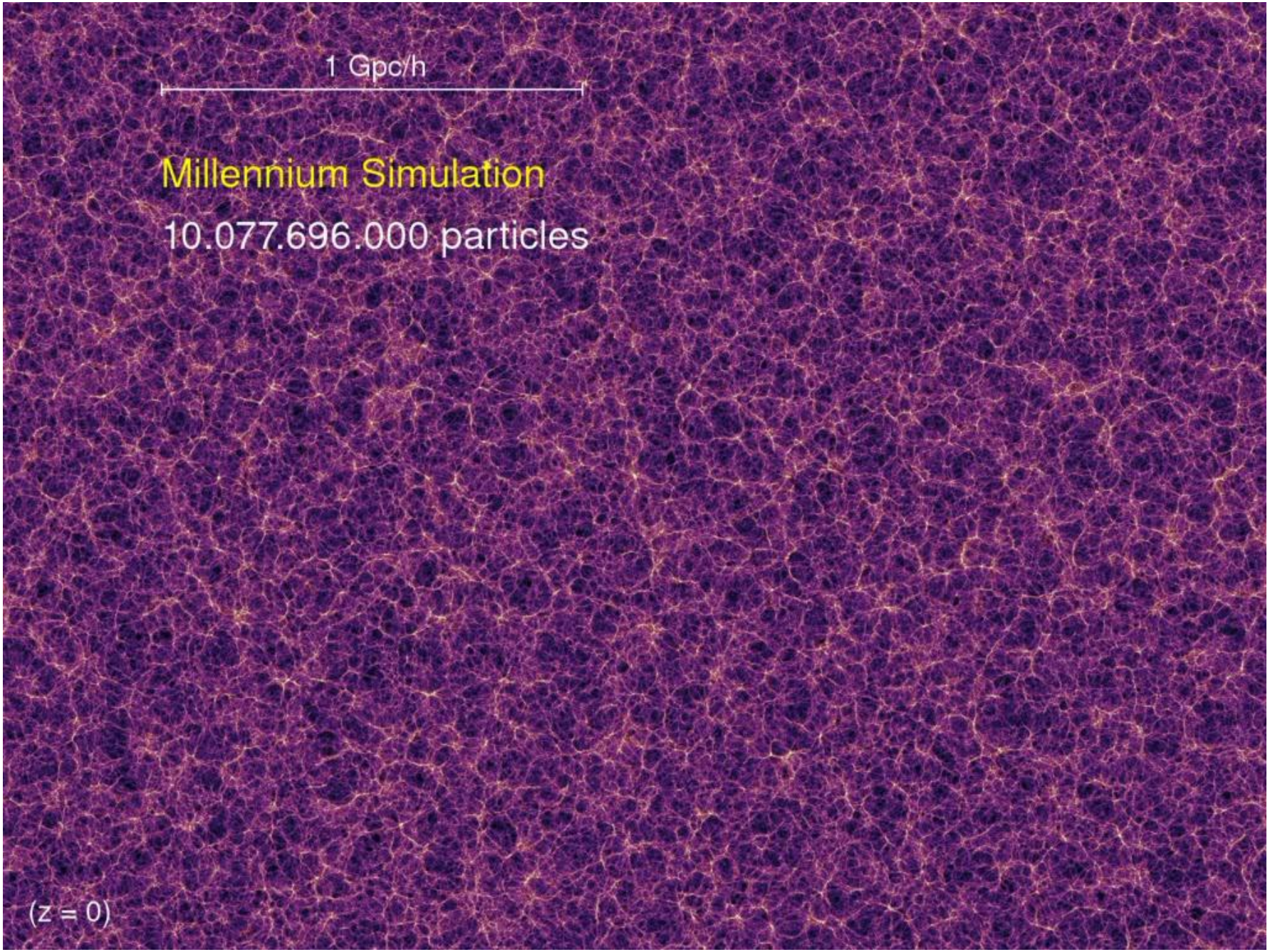
$\Delta\rho/\rho$ = 1000 000

Galaxishalmazokban (3 Mfényév)

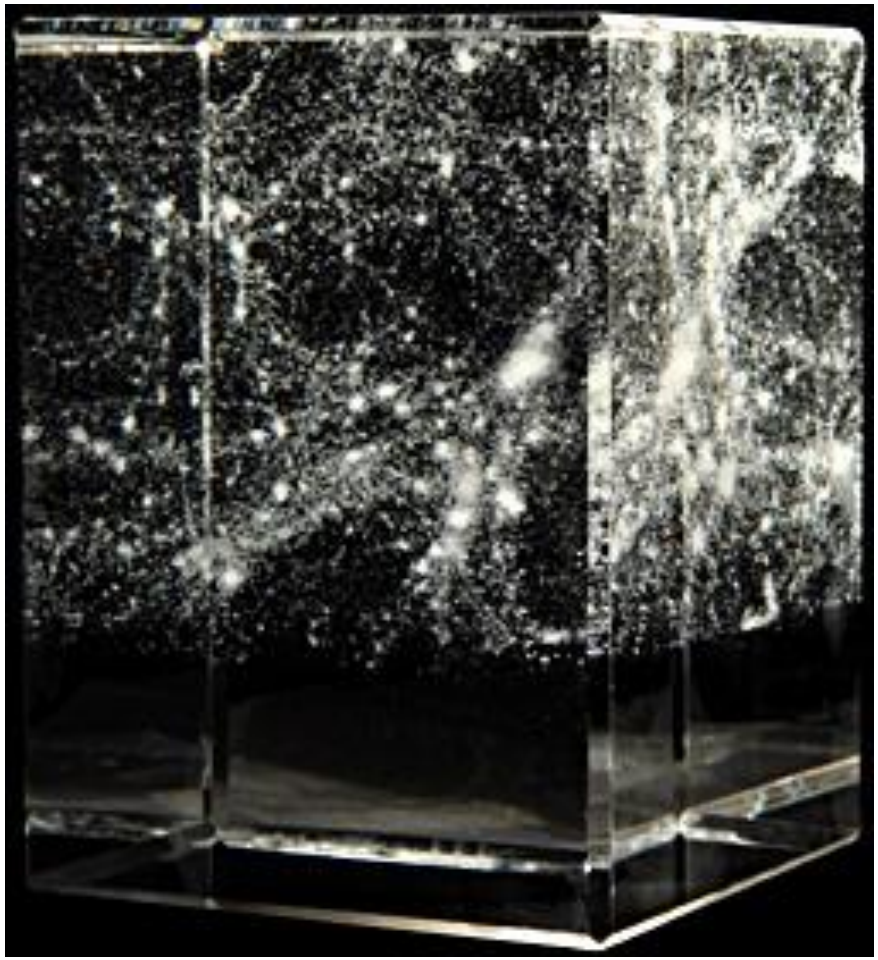
$\Delta\rho/\rho$ = 1000

Szuperhalmazokban (100 Mfényév)

$\Delta\rho/\rho$ = 10


1 Gpc/h
Millennium Simulation
10.077.696.000 particles
(z = 0)

A VE nagyléptékű szerkezete



A VE összetétele

Részecskefizikai kapcsolat

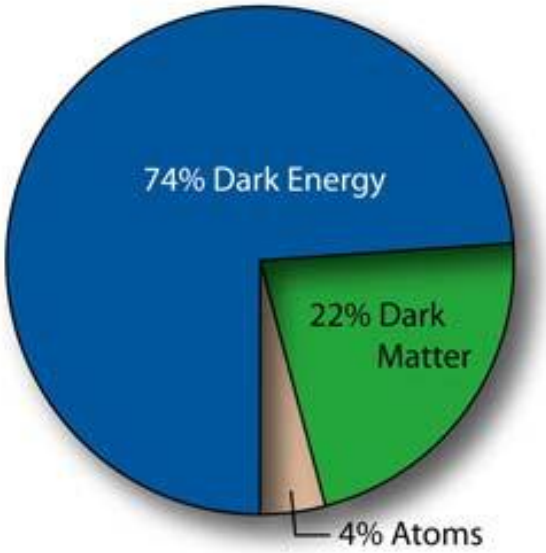
Hogyan látjuk ma a világot?

- A VE születése után 0,02 mp-cel, 13,7 milliárd (±1%) évvel ezelőtt nagy sűrűségű és hőmérsékletű elektromágneses plazmával (elektron, pozitron, foton, 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-re süllyedt. Ekkor kialakultak a semleges atomok, így a sugárzás és anyag közötti kölcsönhatás megszünt. Ettől kezdve a sugárzás szabadon tágult a VE-mel és hűlt a ma mérhető 2,73 K-es értékre.
- Első csillagok 200 millió évvel később gyulladtak ki.

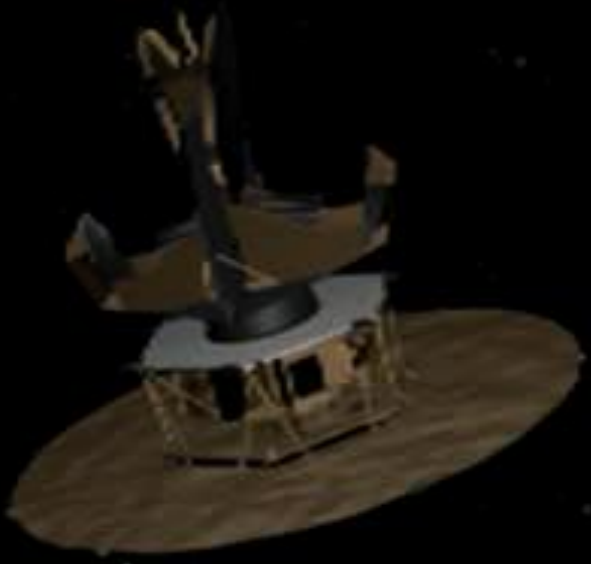
Hogyan látjuk ma a világot?

- A VE tágulását meghatározó Hubble-állandó értéke 71 (km/s)/Mpc (±5%)
- Az adatok jelenlegi értelmezése szerint a VE örökké tágulni fog, …

- A VE tömegének 4%-a a bennünket is felépítő atomokból áll. 23%-a olyan hideg „sötét anyag”, amelyet laboratóriumban nem sikerült előállítani. 73%-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



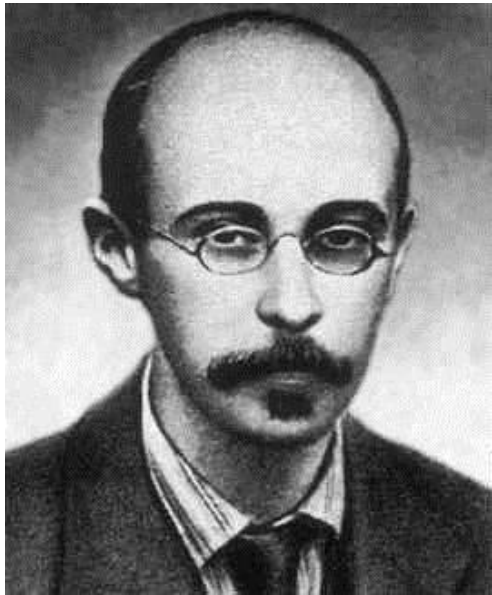
Honnan tudjuk mindezt?

A 20. sz. a kozmológiai megfigyelések forradalmi fejlődését hozta

...de nincs időnk mindet áttekinteni

Előbb egy alapfeltevés:
a VE homogén és izotróp

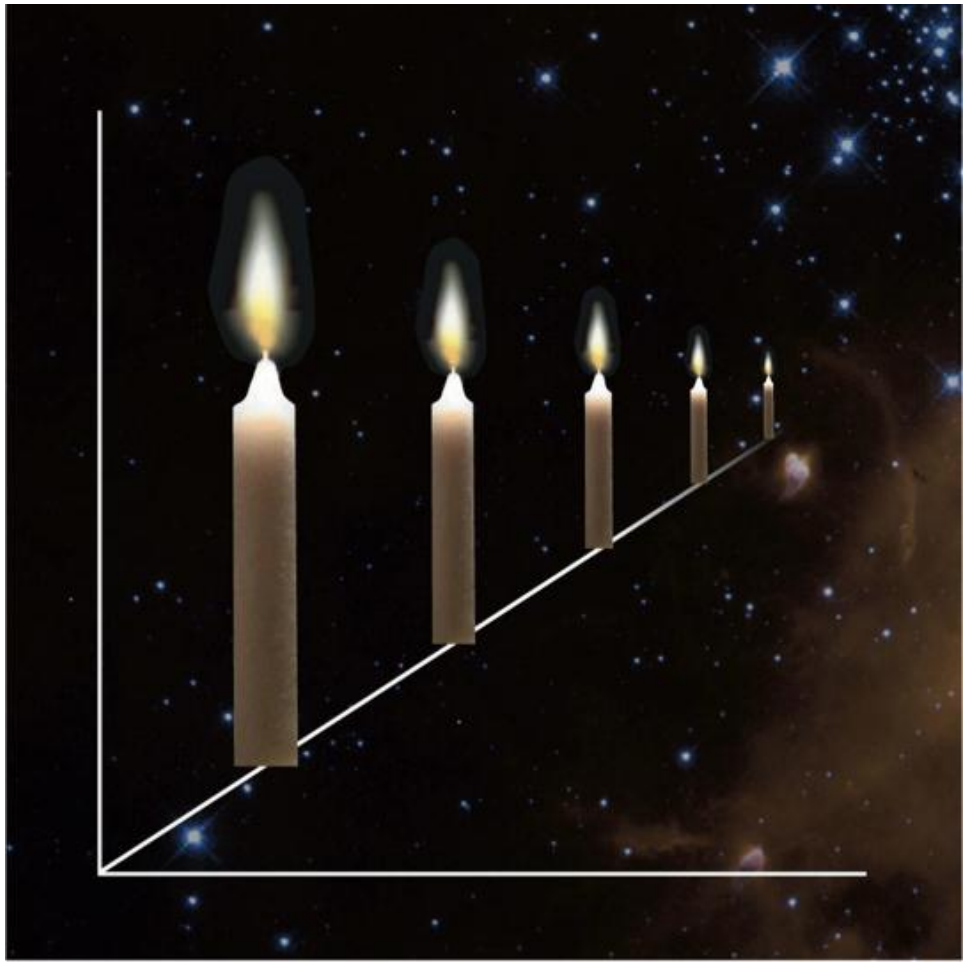
- Kozmológiai elv: Hit, hogy a Világegyetemet bárhol tartózkodó megfigyelő minden irányban ugyanolyan szerkezetűnek látja.
- Teljes kozmológiai elv: homogén, izotróp és időben is állandó a Világegyetem?
- Az időbeli állandóság nem lehetséges
- (2. kérdés: miért nem?)
- Einstein gravitációelméletének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

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

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?

Sebességmérés színképelemzés alapján

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

$$\lambda' = cT + vT$$

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

$$v = c\,z\,,\ z = (\lambda' - \lambda)/\lambda\,,\ \lambda'/\lambda = z + 1$$

Vöröseltolódás

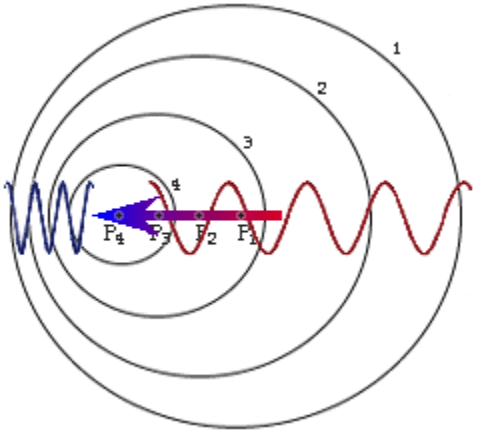
→

Kis távolságra érvényes levezetés -

de véletlenül nagy távolság esetén is helyes,

Általában v helyett z-t használják!

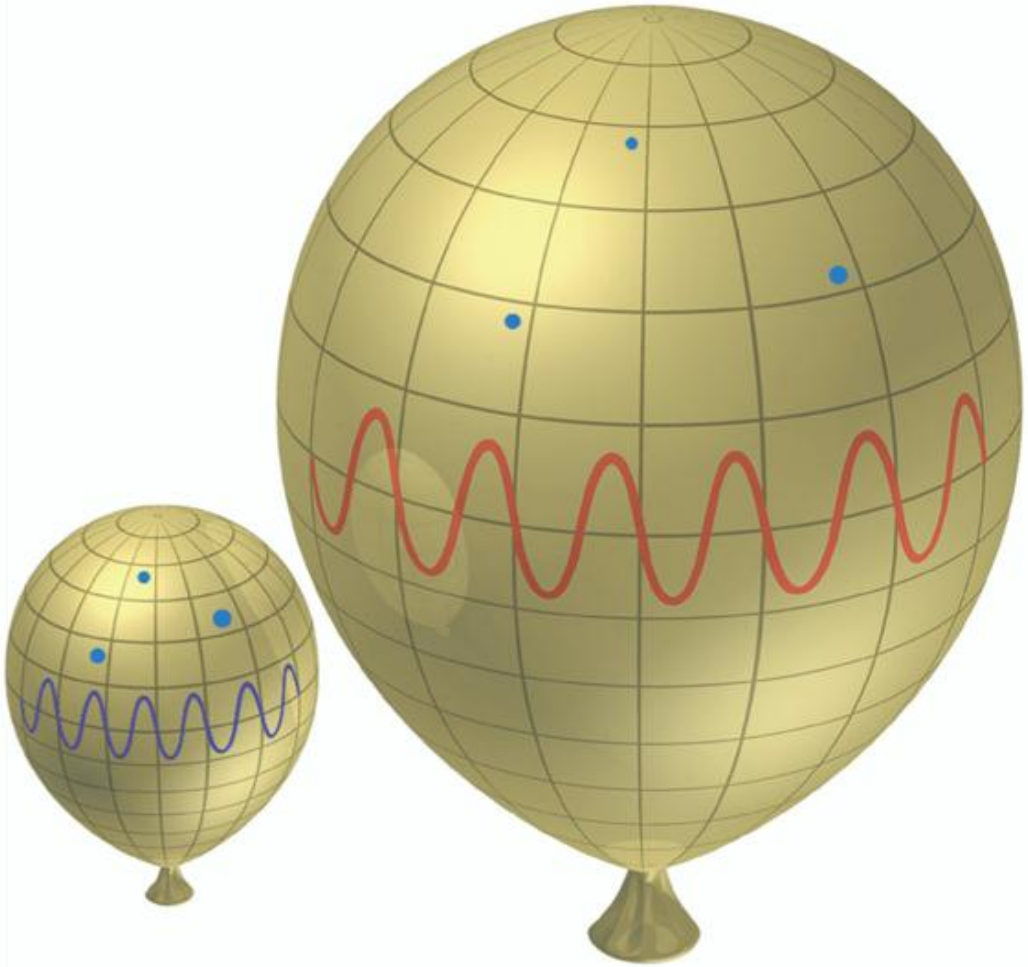
Hullámhosszeltolódás igen pontosan mérhető színképelemzéssel



←

kékeltolódás

Sebességmérés vöröseltolódás alapján



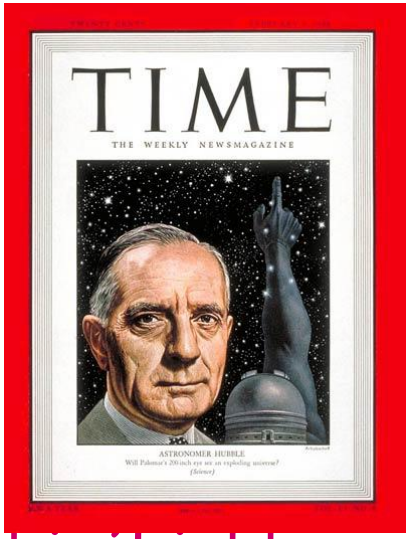
A hullámhosszak hányadosa (z)
a skálafaktorral arányos

3. kérdés:

Tudunk-e még ilyen történelemformáló szerencsés tévedésről?

súgó: részecskefizika hőskorában kell keresni

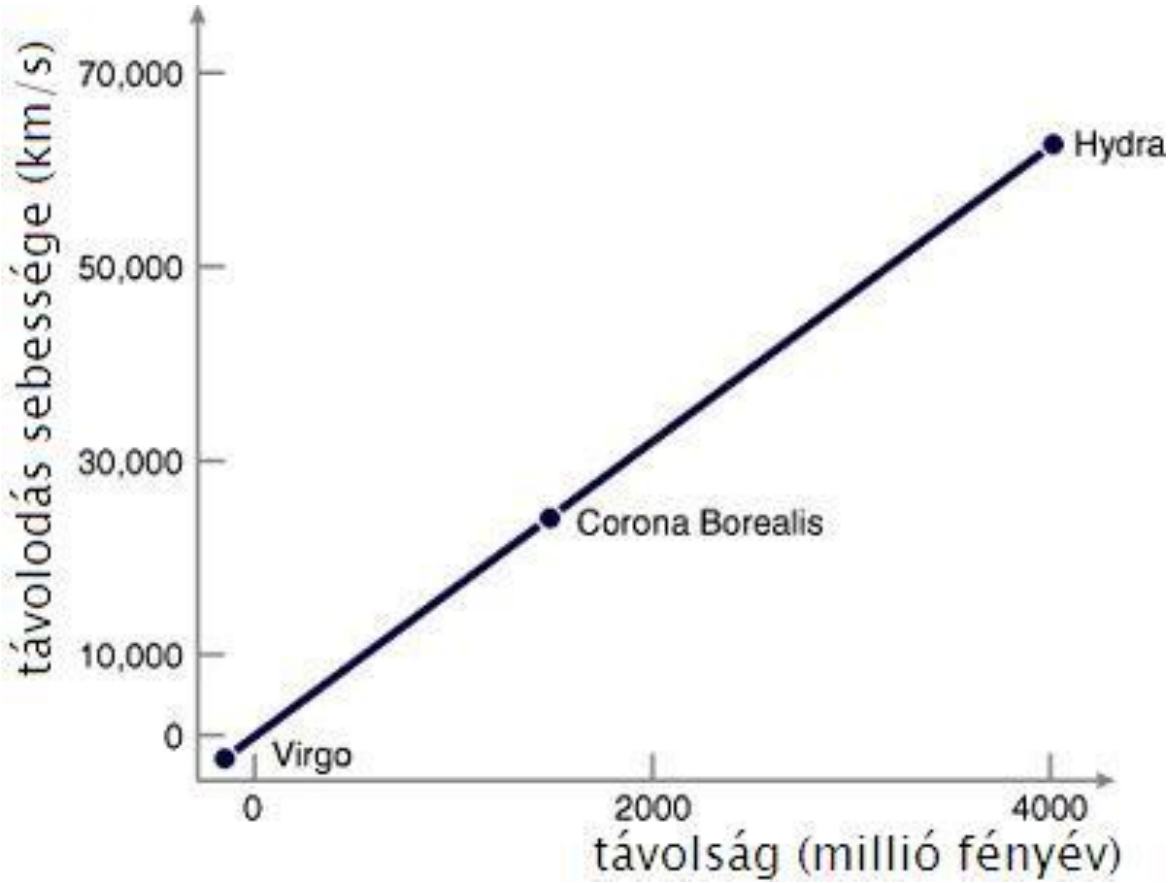
Hubble forradalma



- 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



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

4. kérdés: mit ad meg H_0 reciproka?

Hubble eredeti mérése

távolodás sebessége

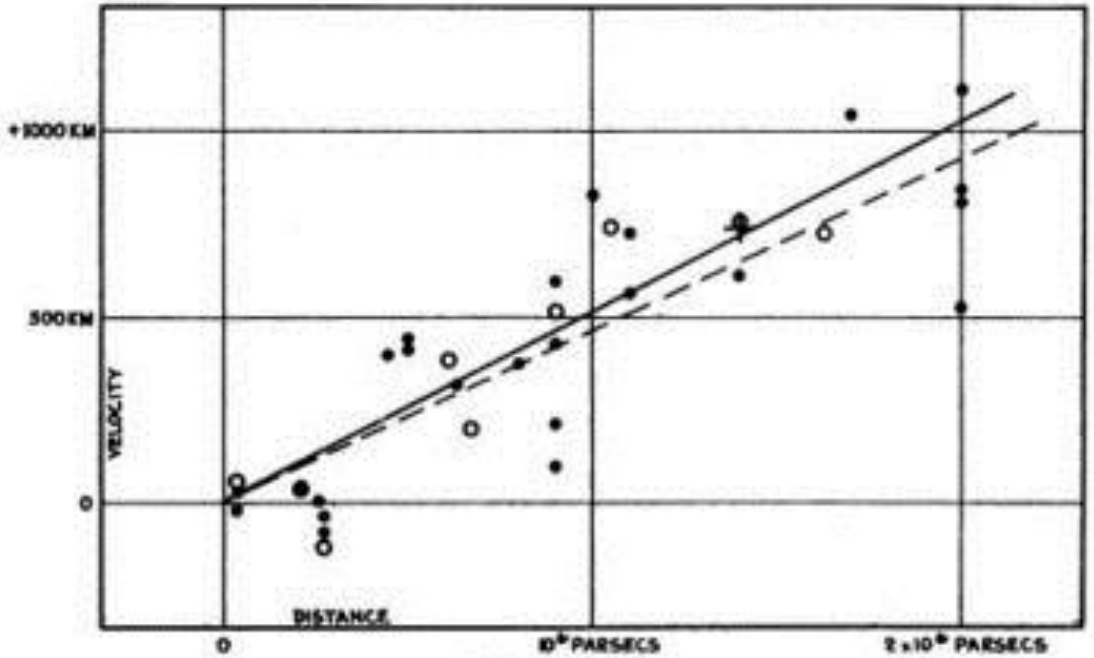


FIGURE 1

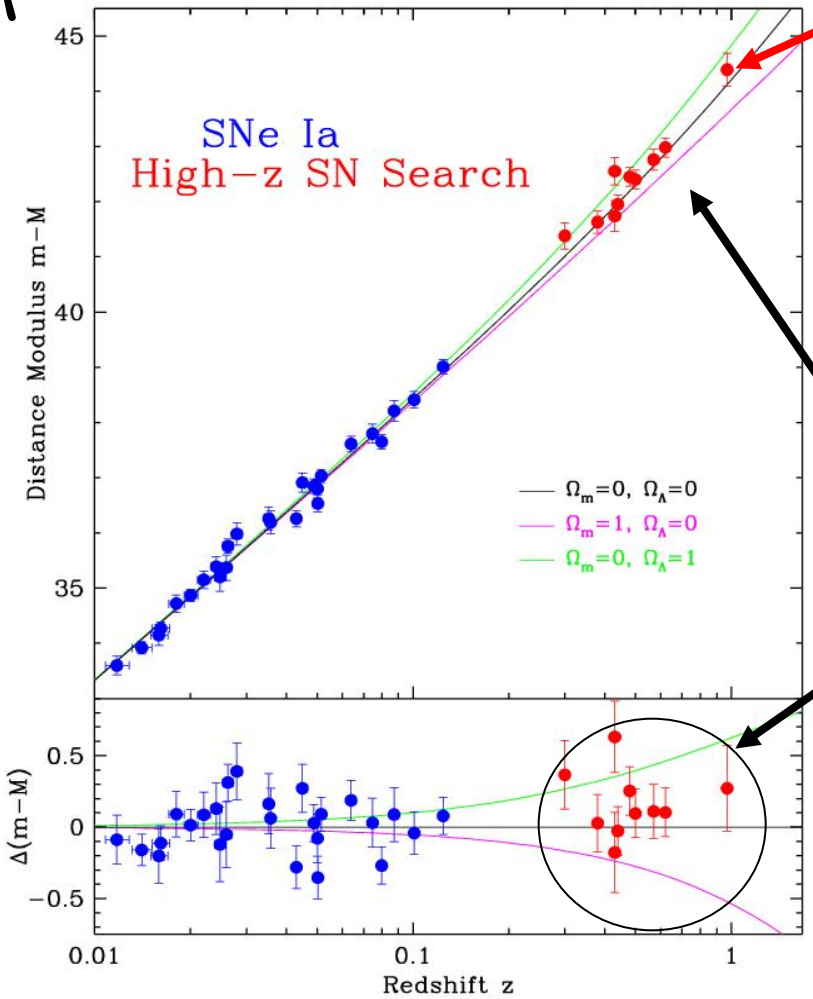
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

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



5. kérdés:
Milyen messze van ez a SN?

Gyorsuló tágulás!

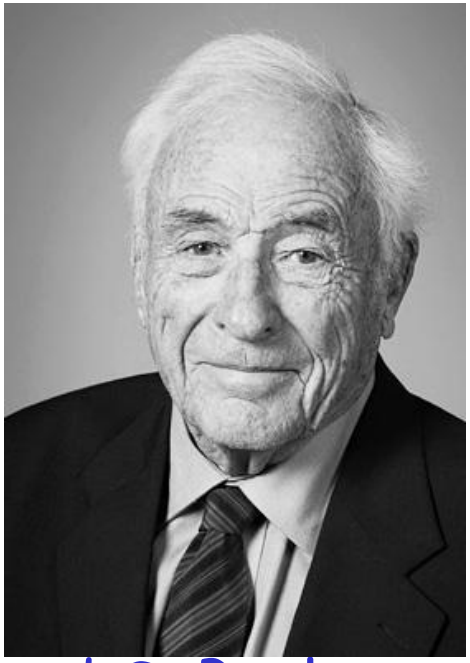
vöröseltolódás

Fizikai Nobel-díj 2011

Saul Perlmutter	Brian P. Schmidt	Adam G. Riess
Lawrence Berkeley Nemzeti Labor, USA	Ausztrál Nemzeti Egyetem, AUS	Johns Hopkins 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
- A vöröseltolódás a térrel együtt táguló fényhullám hullámhossznövekedésének az eredménye (nem Doppler-hatás)
- 7. 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

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2\,,\ v = \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}$$

A teljes mechanikai energia állandó:

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

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

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

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

A szokásos egység

A tömegsűrűséget ρ_c egységben szokás mérni:

$\Omega = \Omega_x + \Omega_y + \ldots$ 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

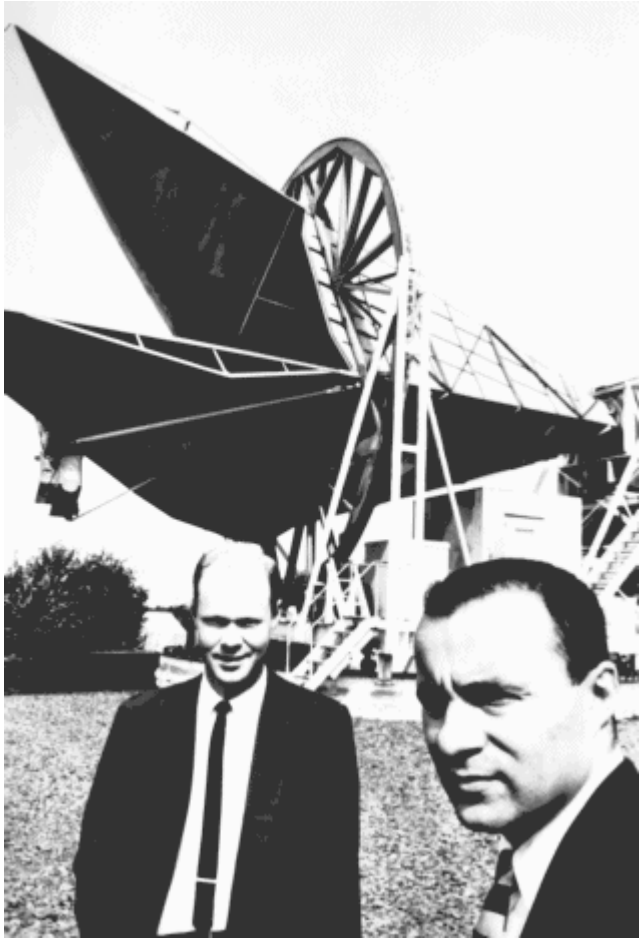
- A hőmérséklet a mérettel fordítottan arányos

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

kozmikus 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, évszaktól

  független 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, évszaktól

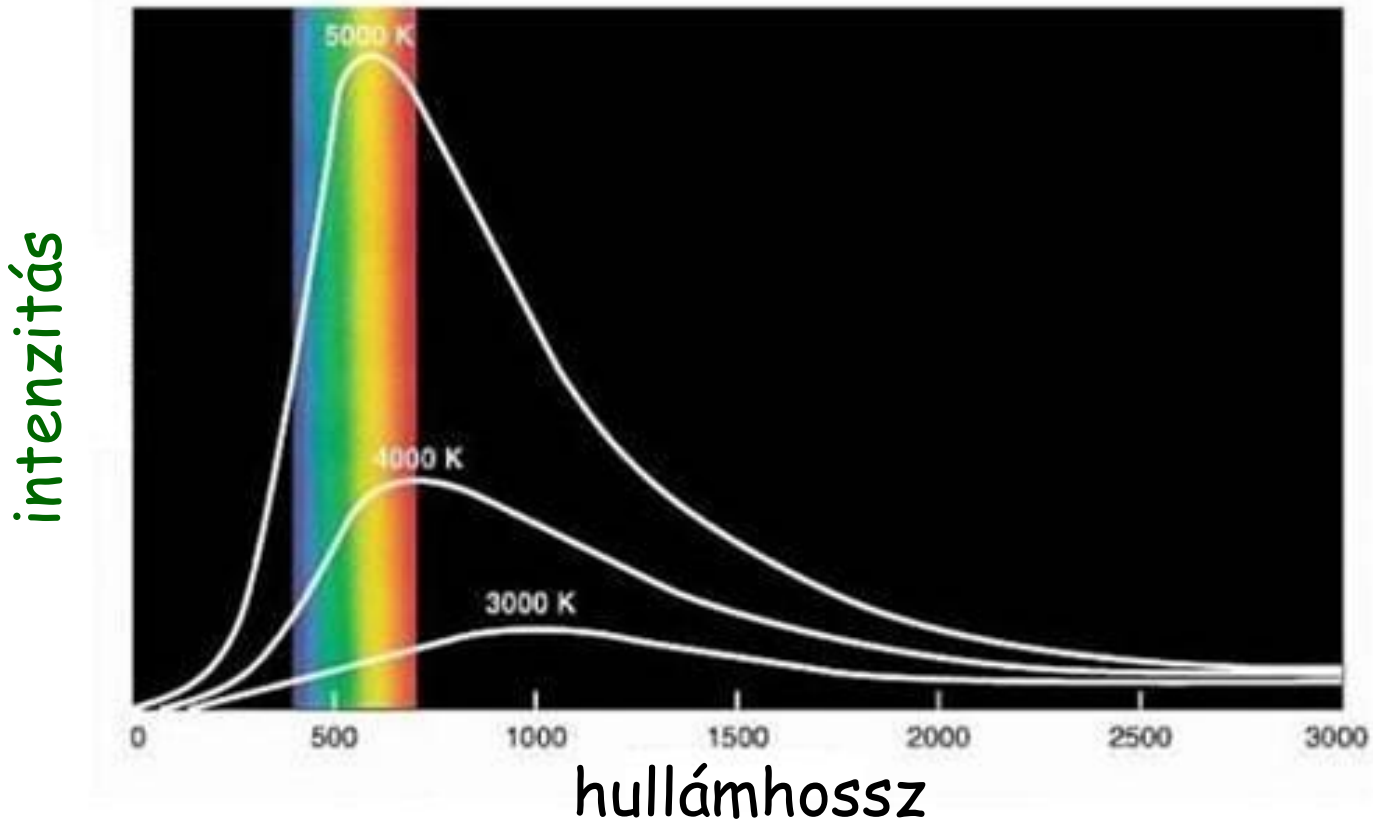
  független elektromágneses sugárzást észleltek
- Az antenna hibáját kizárták

  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 (9. kérdés: Mit jelent ez?)

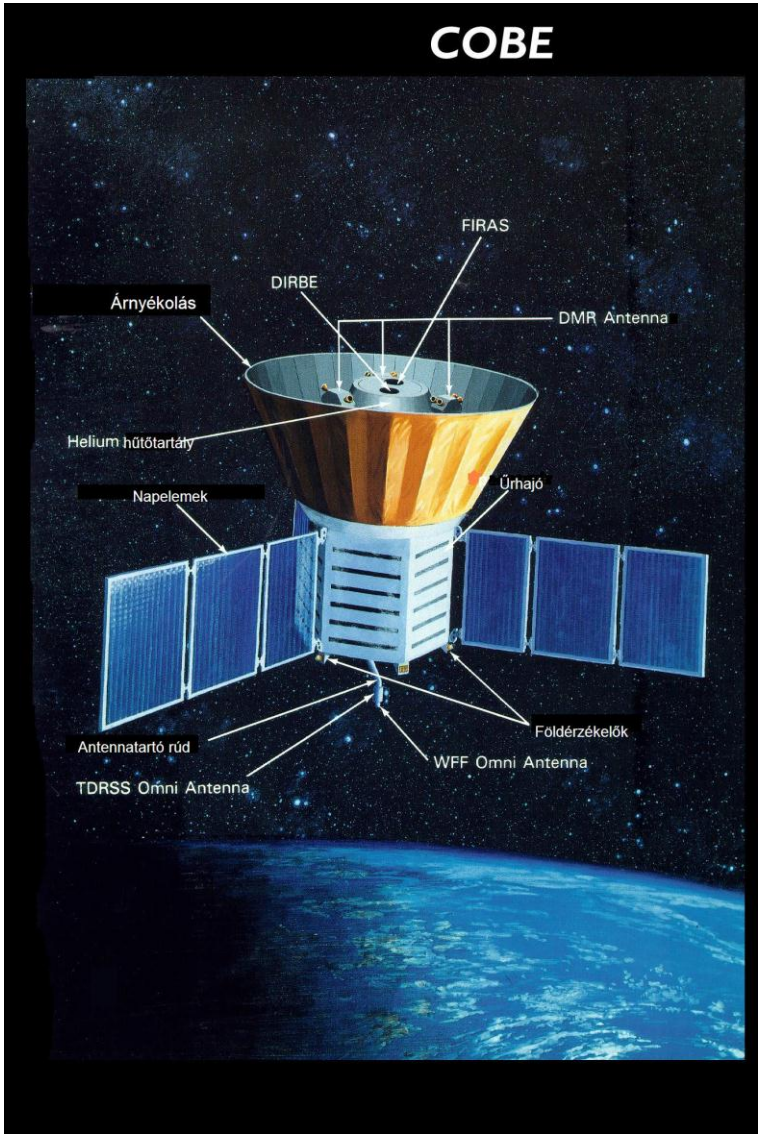
A hőmérsékleti sugárzás intenzitásának hullámhosszfüggése



~10cm alatt a légkör átlátszatlan⇒

Fölről csak az eloszlás maximumától jobbra eső rész mérhető

Irány a világűr:
A Cosmic Background Explorer űrszonda

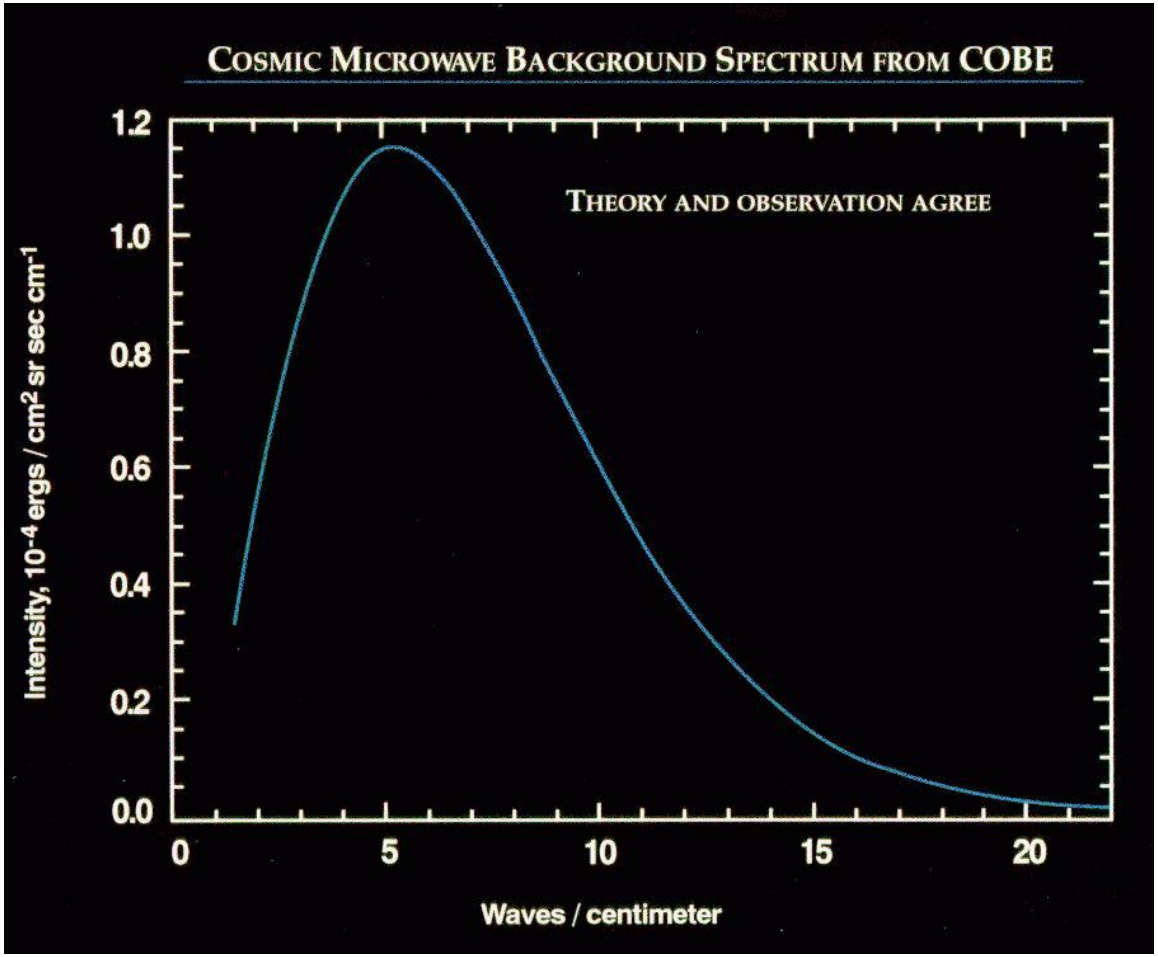


FIRAS = Far Infrared Absolute Spectrophotometer

DMR = Differential Microwave Radiometer

DIRBE = Diffuse Infrared Background Experiment

A FIRAS spektrum

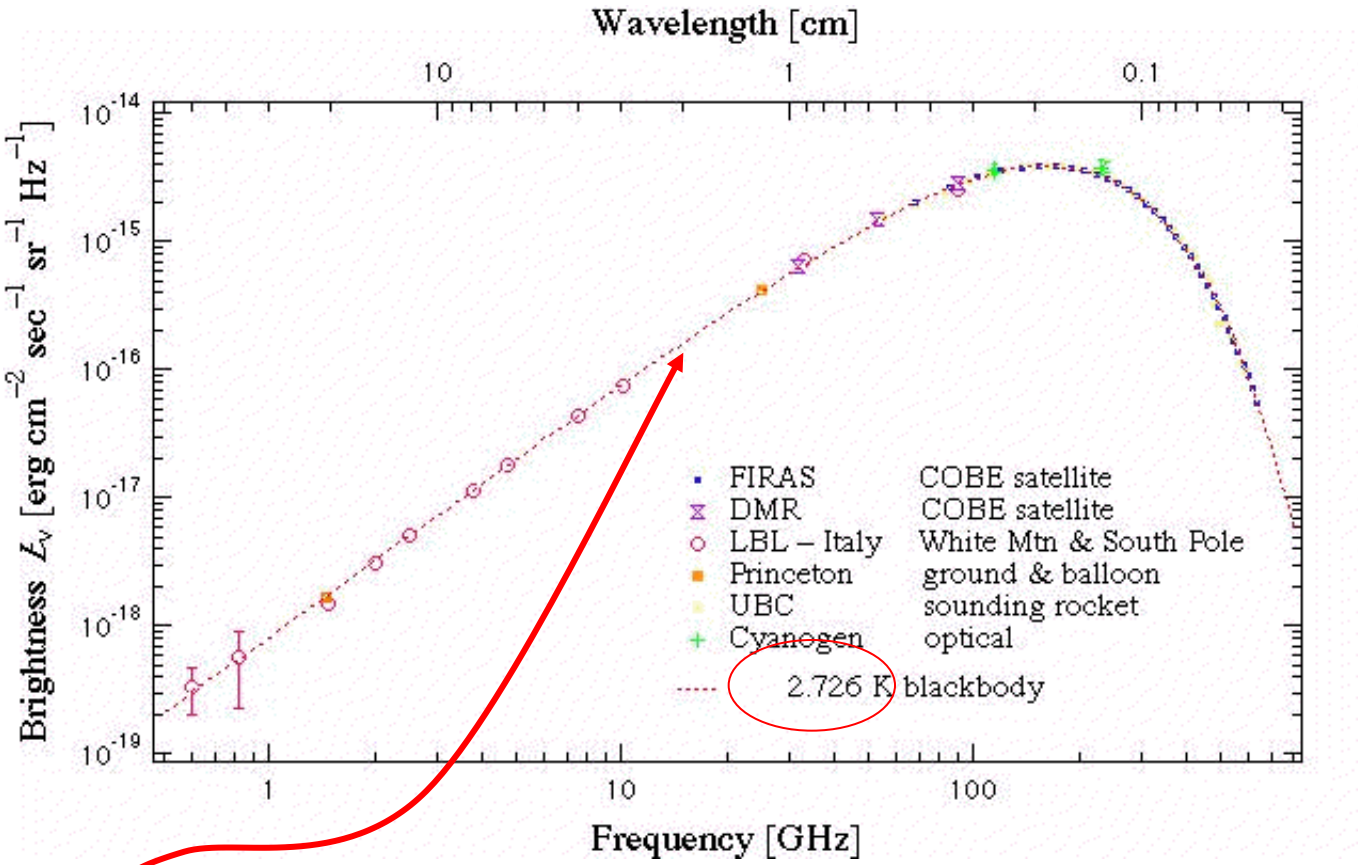


Valaha látott legtökéletesebb hőmérsékleti sugárzási spektrum

A CoBE által mért sugárzási görbe

hullámhossz

sugárzás intenzitása



Planck-görbe

frekvencia

Fizikai Nobel-díj fele 2006

John C. Mather
(NASA Goddard Űrközpont)

„a kozmikus háttérsugárzás Planck-formájának felfedezéséért”

A FIRAS spektrum

A hőmérsékleti sugárzás spektrumát a Planck-féle eloszlás írja le

$$\mathrm{d}\varepsilon(\nu, T) = 8\pi \frac{(kT)^4}{(hc)^3} \frac{x^3 \mathrm{d}x}{\mathrm{e}^x - 1} \qquad x = \frac{h\nu}{kT}$$

$$\varepsilon_\gamma(T) = \int_0^\infty \mathrm{d}\varepsilon(\nu, T) = cT^4$$ Stefan-Boltzman

$$E_\gamma = \frac{h}{\lambda} \;\&\; \forall\lambda \propto R \quad \Rightarrow \quad kT = \langle E_\gamma \rangle \propto \frac{1}{R}$$

$$\rho c^2 = \varepsilon \propto \frac{1}{R^n}$$

sugárzás: n = 4
anyag: n = 3
kozmológiai állandó: n = 0

A FIRAS spektrum

A hőmérsékleti sugárzás spektrumát a Planck-féle eloszlás írja le

$$\mathrm{d}\varepsilon(\nu, T) = 8\pi \frac{(kT)^4}{(hc)^3} \frac{x^3 \mathrm{d}x}{\mathrm{e}^x - 1} \qquad x = \frac{h\nu}{kT}$$

$$n_\gamma(T) = \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}\varepsilon(\nu, T)}{h\nu} = 8\pi \frac{(kT)^3}{(hc)^3} \int_0^\infty \frac{x^2 \mathrm{d}x}{\mathrm{e}^x - 1} \simeq 413 \cdot 10^6 \frac{\gamma}{\mathrm{m}^3}$$

$$\rho_c \simeq 5 \frac{\mathrm{H\ atom}}{\mathrm{m}^3}$$

A nukleáris részecske/foton arány $\eta = 10^{-9\pm1}$

(a számokat jegyezzük meg!)