Magyar fizikatanárok a CERN-ben

2008. augusztus 17-23.

Trócsányi Zoltán

Kozmológia alapfokon

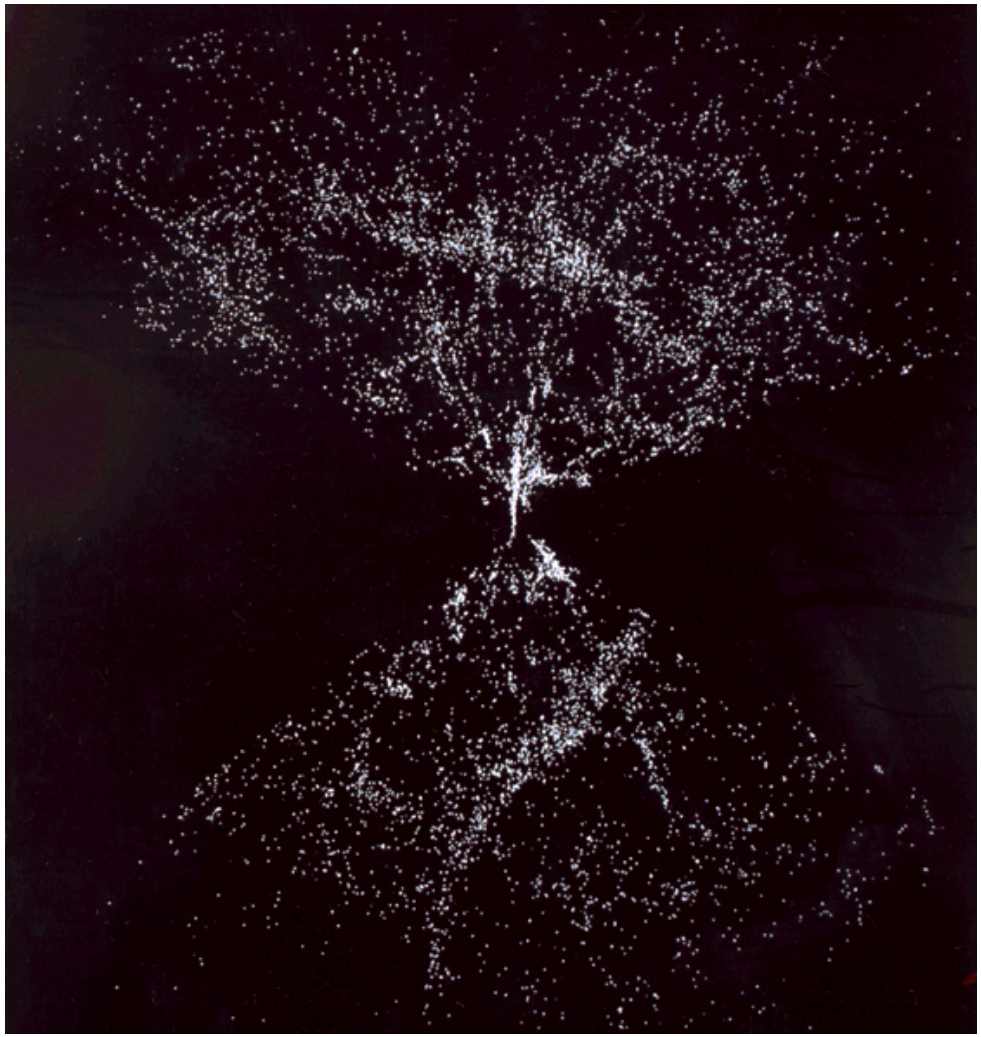
Részecskefizikai vonatkozásokkal

Az elmúlt negyedszázad a
mikro- és makrokozmosz
fizikájának összefonódását hozta

A Világegyetem szerkezete

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

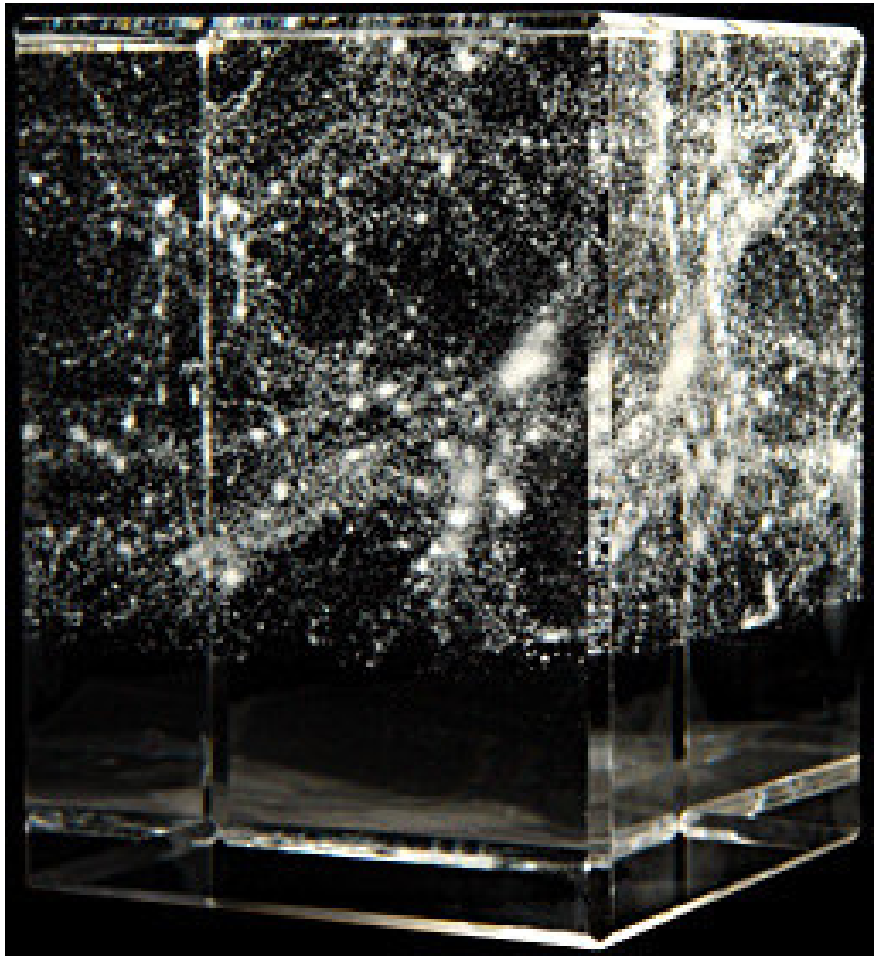
A Világegyetem szerkezete



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

A VE nagyléptékű szerkezete



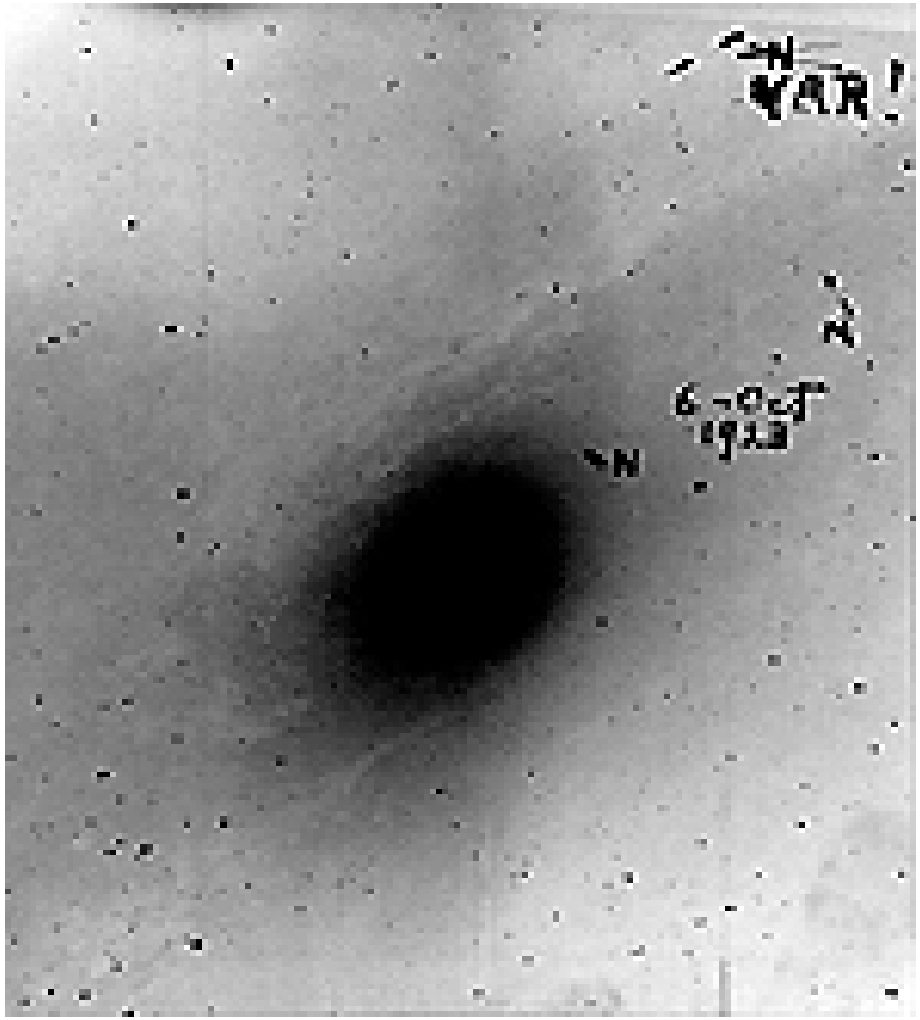
Teljes kozmológiai elv: homogén, izotróp és stacionárius Világegyetem?

- Kozmológiai elv: Hit, hogy a Világegyetemet bárhol tartózkodó megfigyelő minden irányban ugyanolyan szerkezetűnek látja.
- 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 fénylő 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



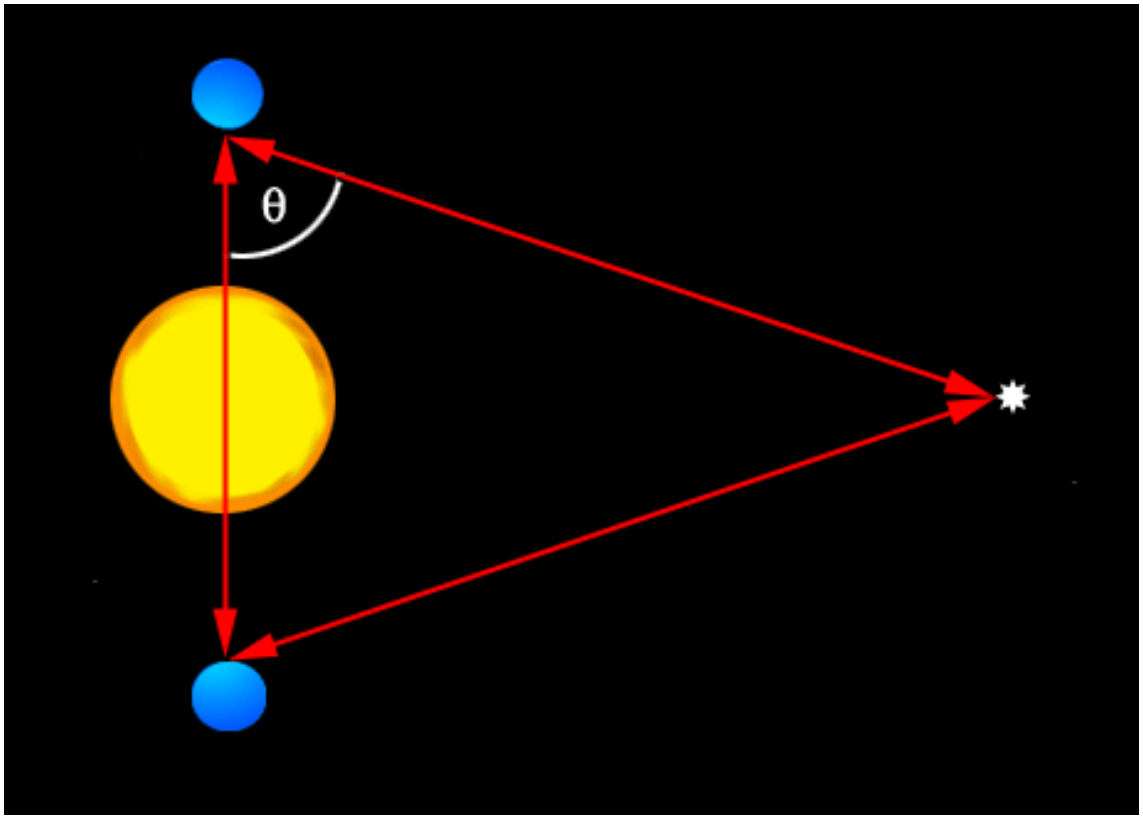
Miért érdekes ez?

Hubble felfedezésének jelentősége

- A Világegyetemben léteznek csillagrendszerek

Hubble felfedezésének jelentősége

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



$\Longrightarrow$

1pc = 1AU/1"

Rejtvény: Honnan ismerjük d-t (1AU)?

Hubble felfedezésének jelentősége

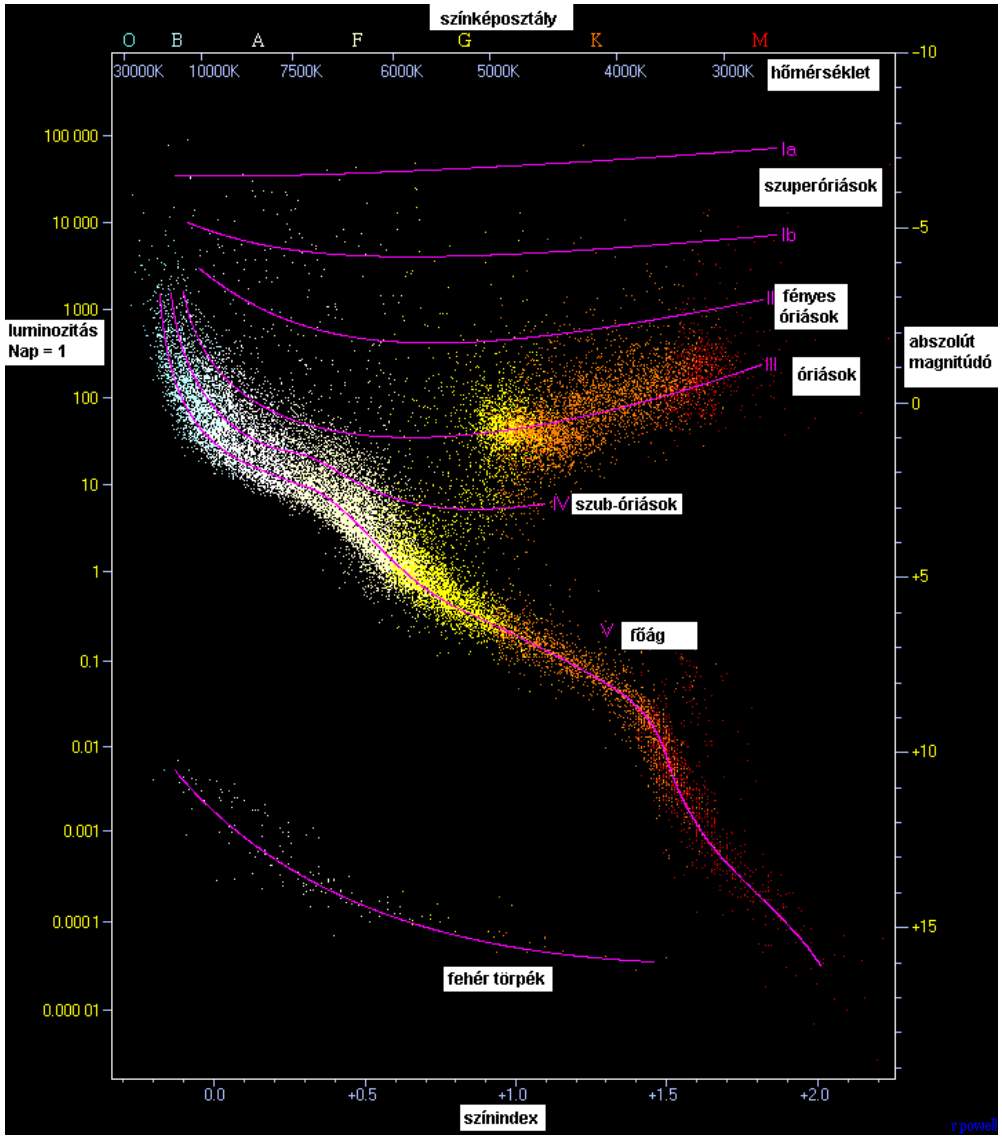
- A Világegyetemben léteznek csillagrendszerek
- Távolságmérésre használható
- Parallaxis módszer: 100 pc távolságig

Nagyobb távolságra: távolságlétra

- Csillagok fényessége alapján 50 kpc-ig

Herztsprung-Russel diagram:

Herztsprung-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

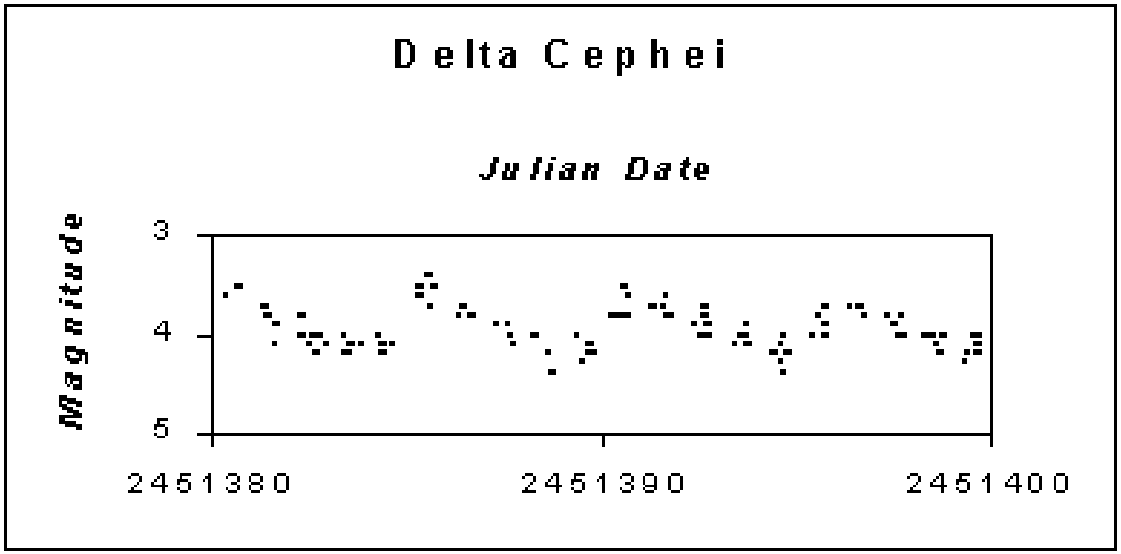
Herztsprung-Russel diagram:
csillagok abszolút fényessége és hőmérséklete közötti összefüggés
továbbá

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

Rejtvény: Honnan ismerjük a csillagok hőmérsékletét?

- δ Cefei változócsillagok 4 Mpc-ig

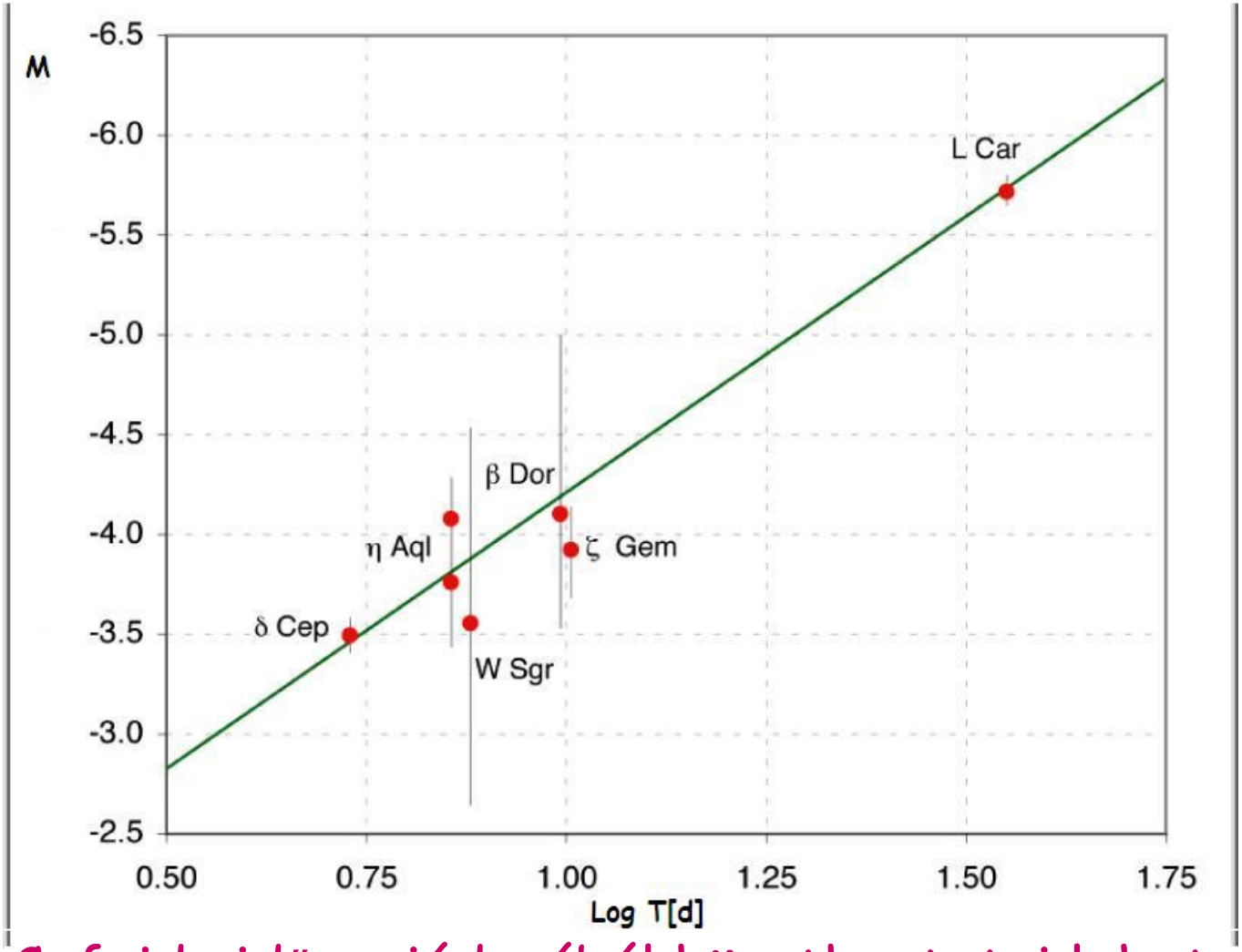
Henrietta S. Leavitt



Változócsillagok a Kis Magellánfelhőben

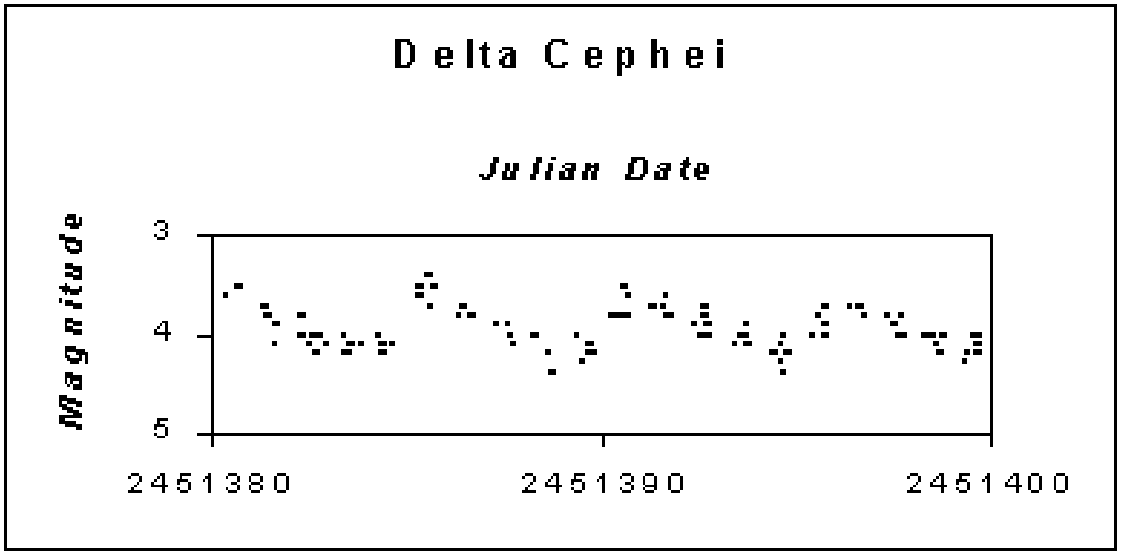
$$h = 10^{(m-M+5)/5}\,\mathrm{pc}$$

Változócsillagok abszolút fényesség-időperiódus összefüggése (HST mérés)



- A Cefeida időperiódusából következtetni lehet az abszolút fényességére

Henrietta S. Leavitt

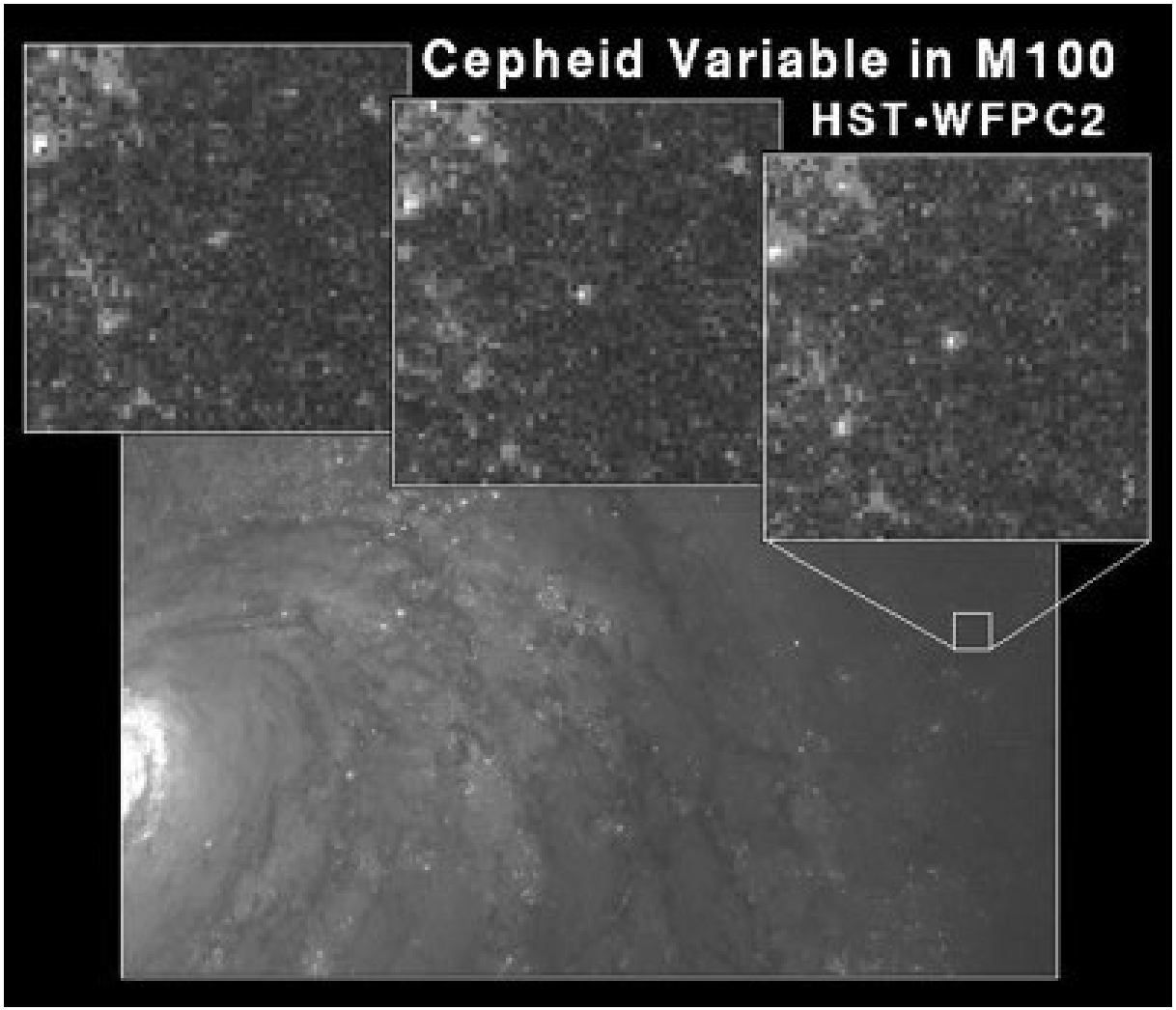


Változócsillagok a Kis Magellánfelhőben

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

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

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 Cefei változócsillagok 4 Mpc-ig
- Standard gyertyák:

  Gömbhalmazok, galaxisok, galaxishalamzok, nóvák, szupernóvák…,

Hubble forradalma

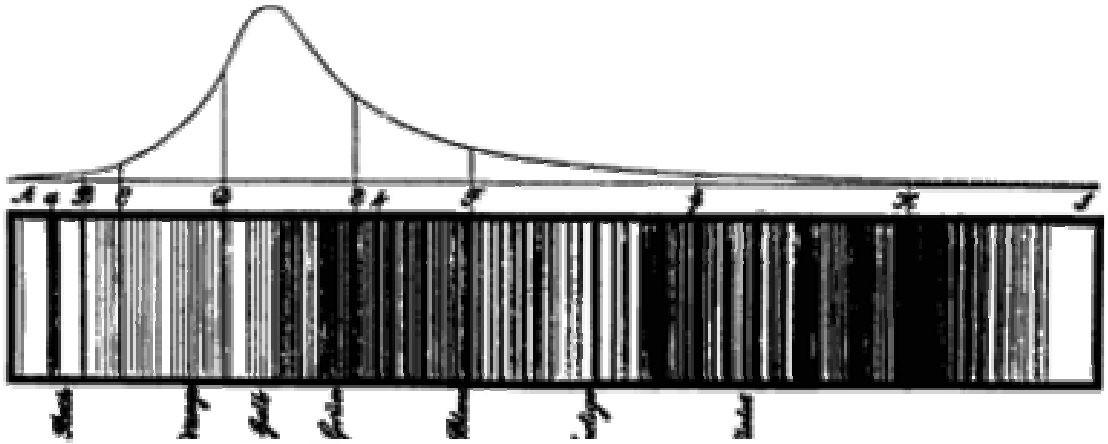
- 1920-29: Edwin Hubble a minden korábbinál jobb felbontású, Palomar-hegyi új távcsővel
  - Változócsillagot (Cefeidát) fedez fel az Andromédában
  - Megméri az Andromeda és 17 másik galaxis távolságát és sebességét

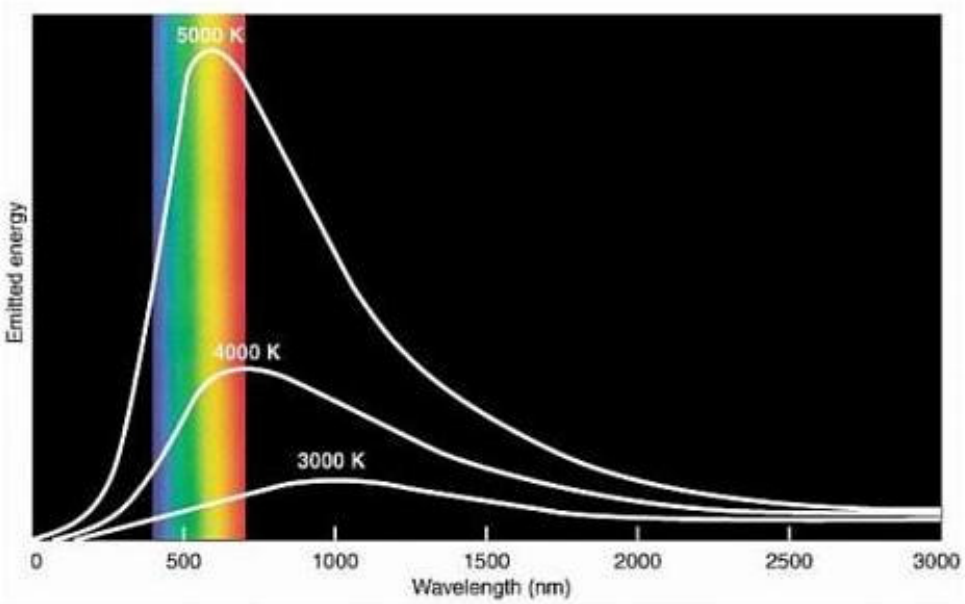
De honnan tudhatjuk a galaxis sebességét?

A Nap színképe

- 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 => a $\lambda = cT$ hosszúságú hullám

$$\lambda' = cT + vT$$

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

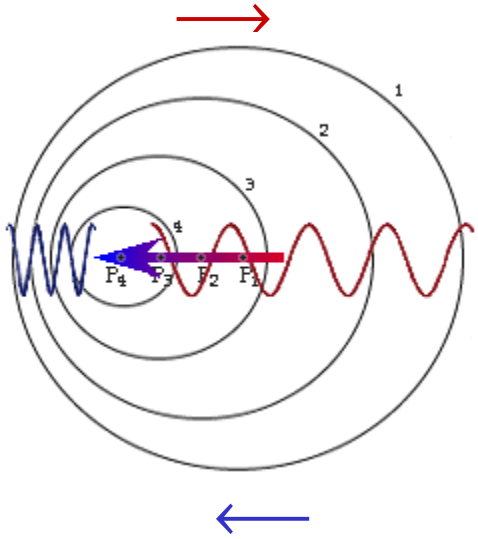
$$v = c\,z\,,\ z = (\lambda' - \lambda)/\lambda$$

Lényegében helyes eredmény hibás levezetésből!

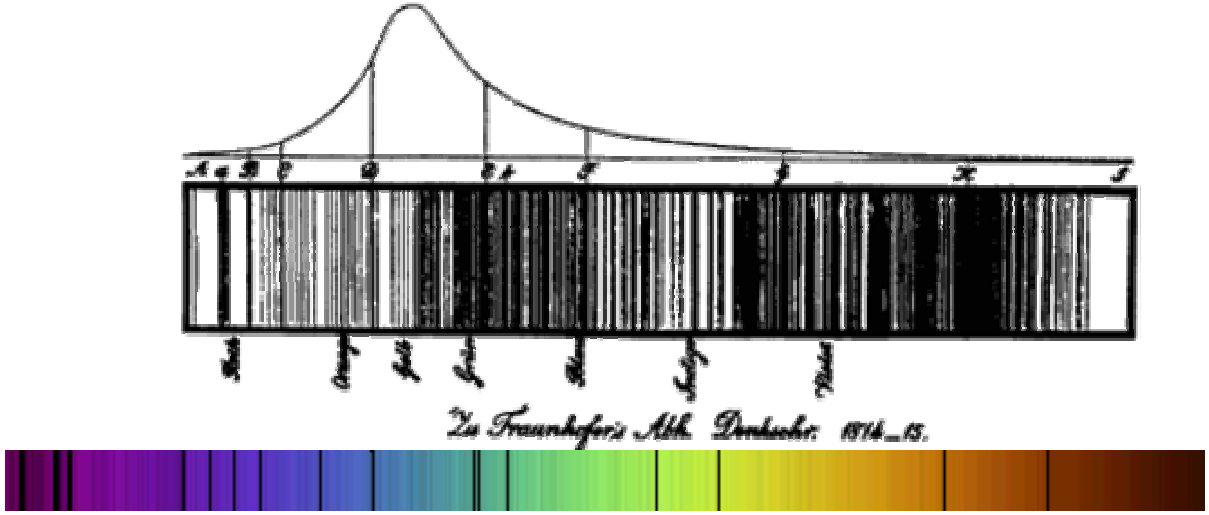
(Minden problémának van egyszerű, szép és hibás megoldása – H.L. Mencken)

Hullámhosszeltolódás igen pontosan mérhető színképelemzéssel

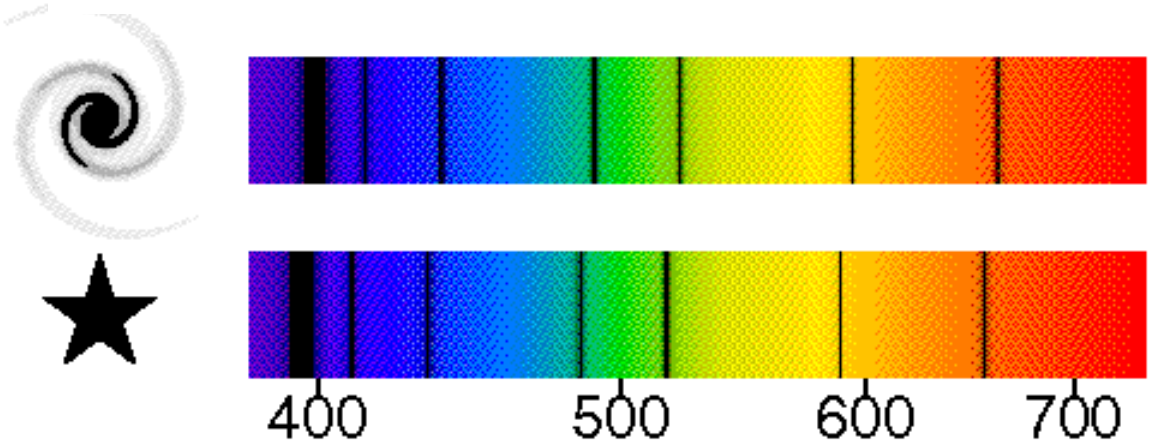
Vöröseltolódás



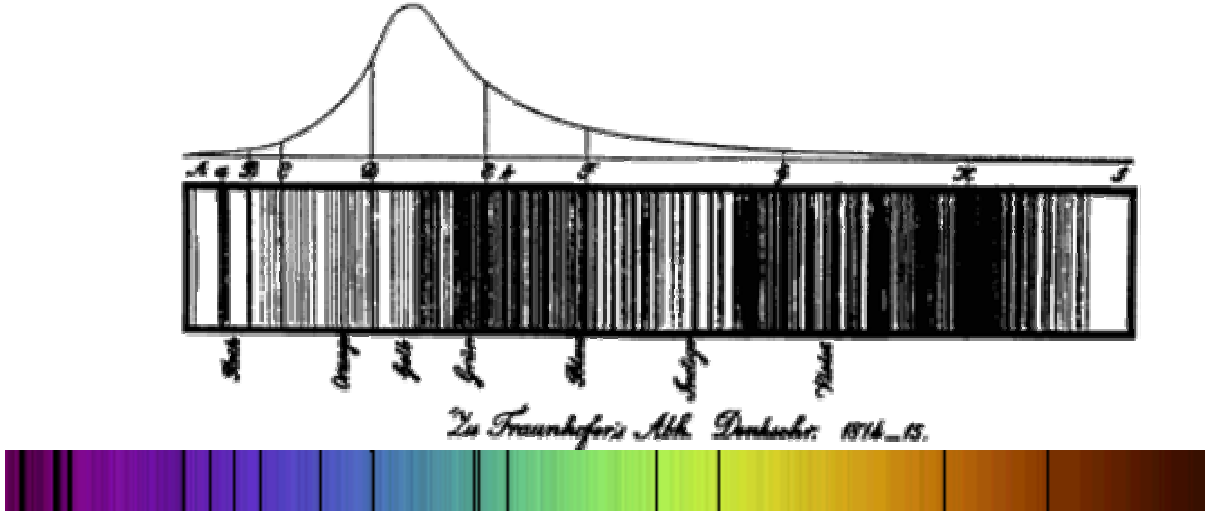
kékeltolódás

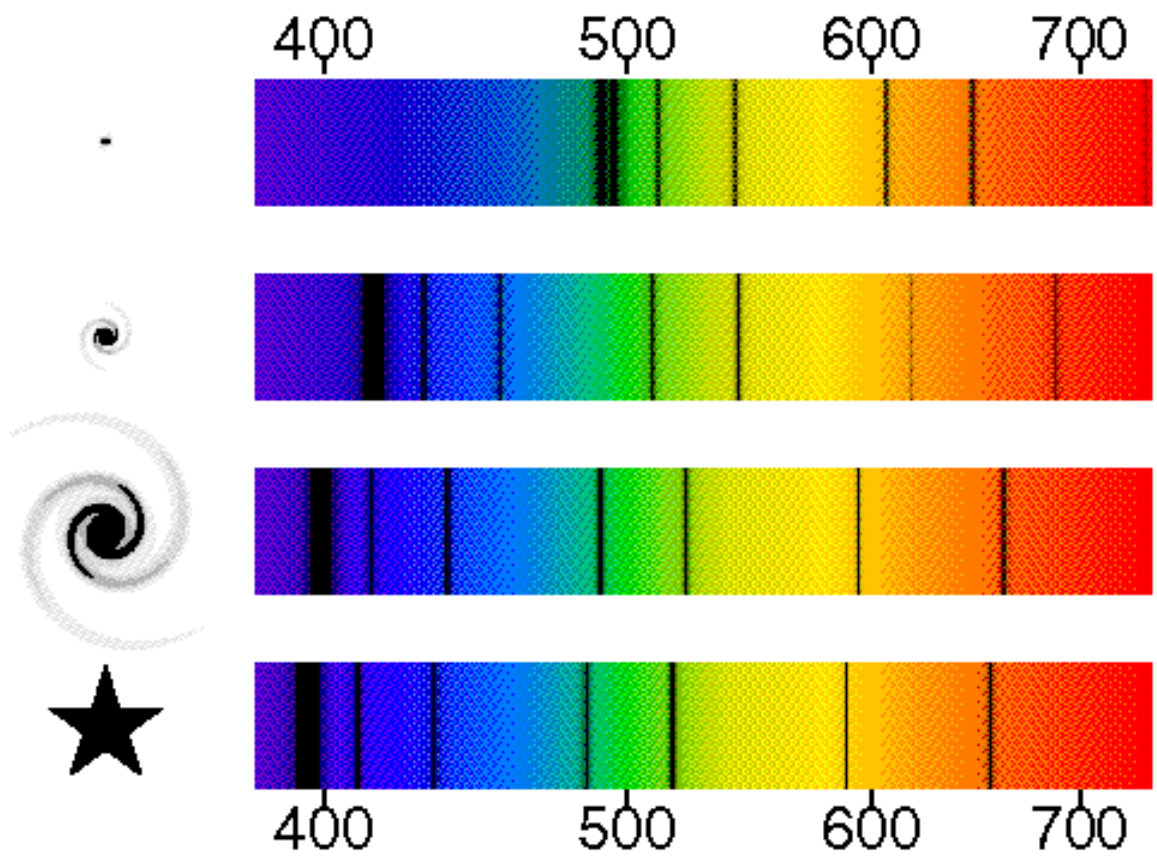


J. Fraunhofer

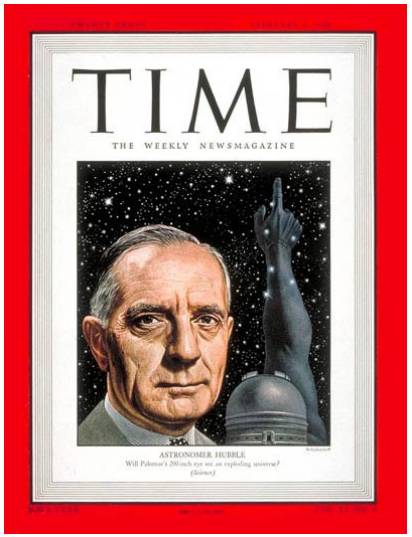


J. Fraunhofer





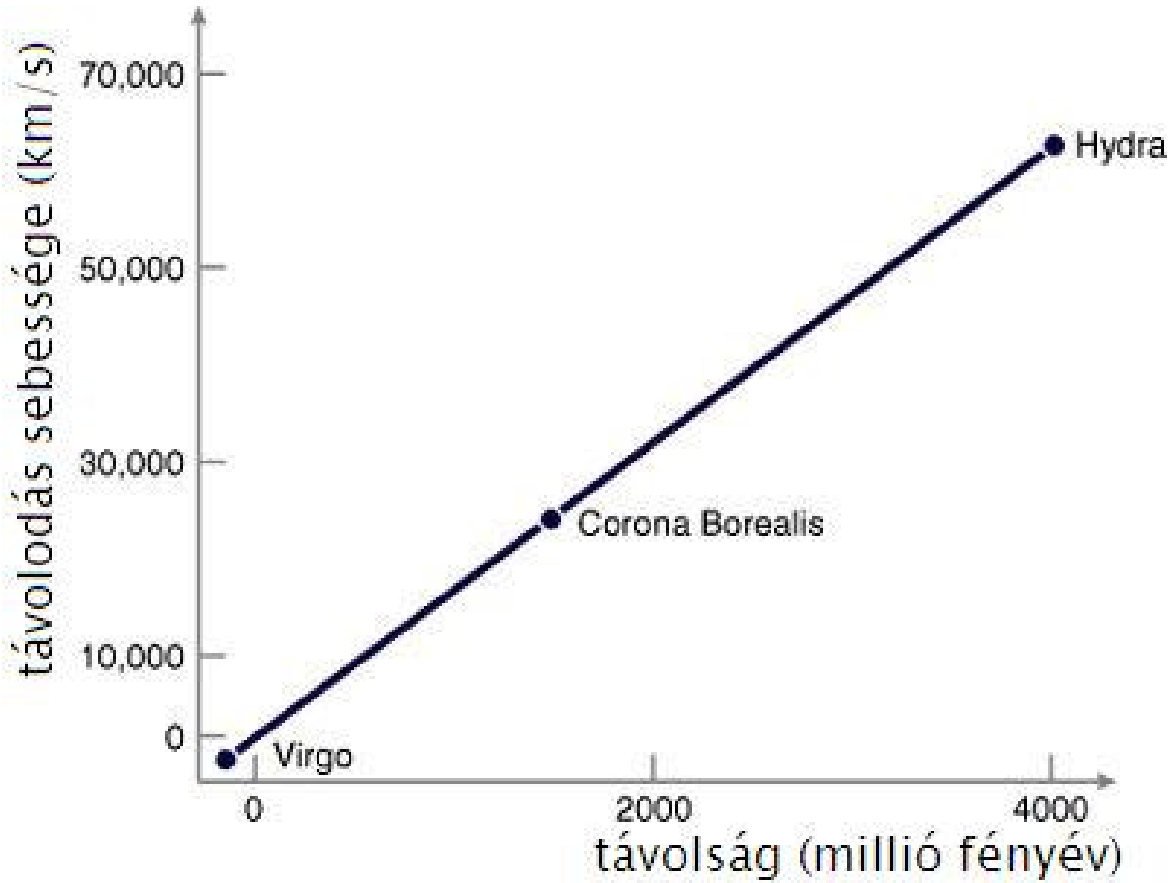
Hubble forradalma



- 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



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

Rejtvény: mit ad meg H_0 reciproka?

Hubble eredeti mérése

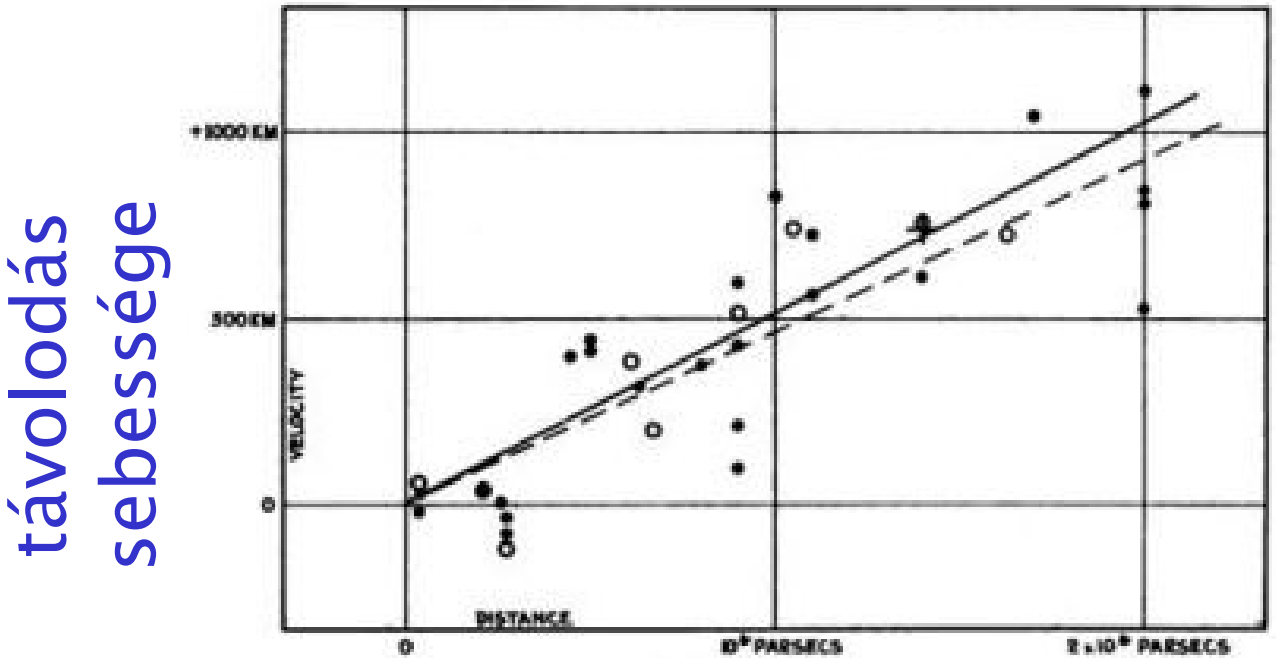


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

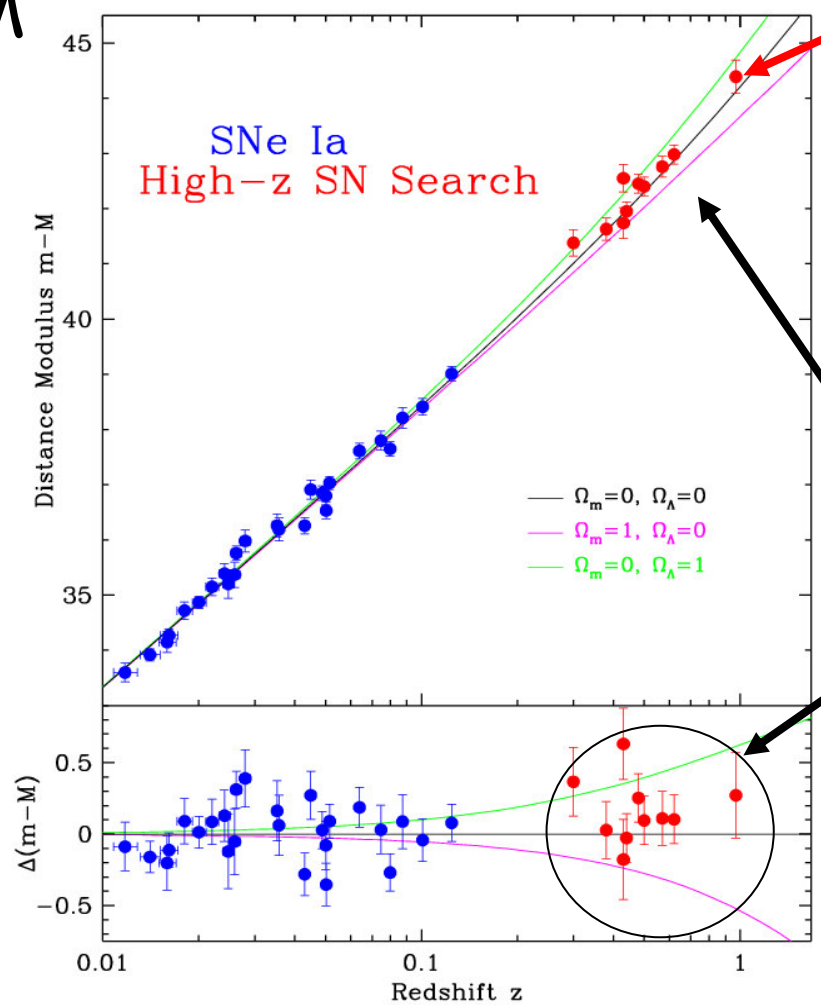
Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution 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.

távolodás sebessége

távolság

Hubble törvény kísérleti ellenőrzése

m-M



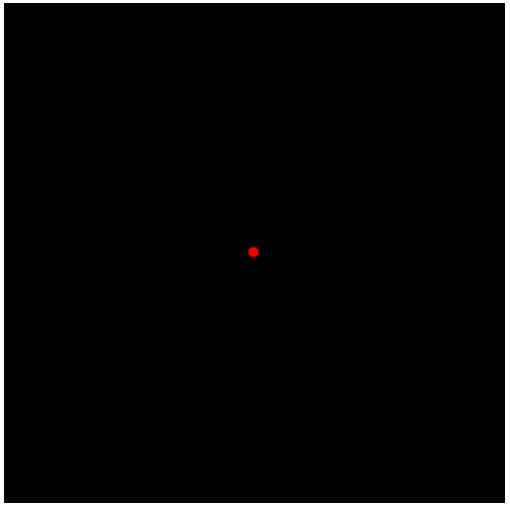
Milyen messze van ez a SN?

Sötét energia?

vöröseltolódás

A táguló Világegyetem

- A távoli galaxisok fényében vöröseltolódást észlelünk
- A hatás a távolsággal arányos (alátámasztja a kozmológiai elv helyességét) – Miért is?
- A teljes kozmológiai elv nem teljesülhet $\Longrightarrow$
- A vöröseltolódás a térrel együtt táguló fényhullám hullámhossznövekedésének az eredménye (nem Doppler hatás)



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 helyzeti energiája

$$E_{\mathrm{p}} = -G\frac{Mm}{r} = -G\frac{4r^2\pi\rho m}{3}$$

mozgási energiája

$$E_{\mathrm{m}} = \frac{1}{2}mv^2, \qquad v = H_0 r$$

A galaxis a végtelenbe távozik, ha teljes mechanikai energiája

$$E_m + E_p = \frac{1}{2}mH_0^2r^2 - G\frac{4r^2\pi}{3}\rho m \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \rho_c = \frac{3H_0^2}{8G\pi}$$

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

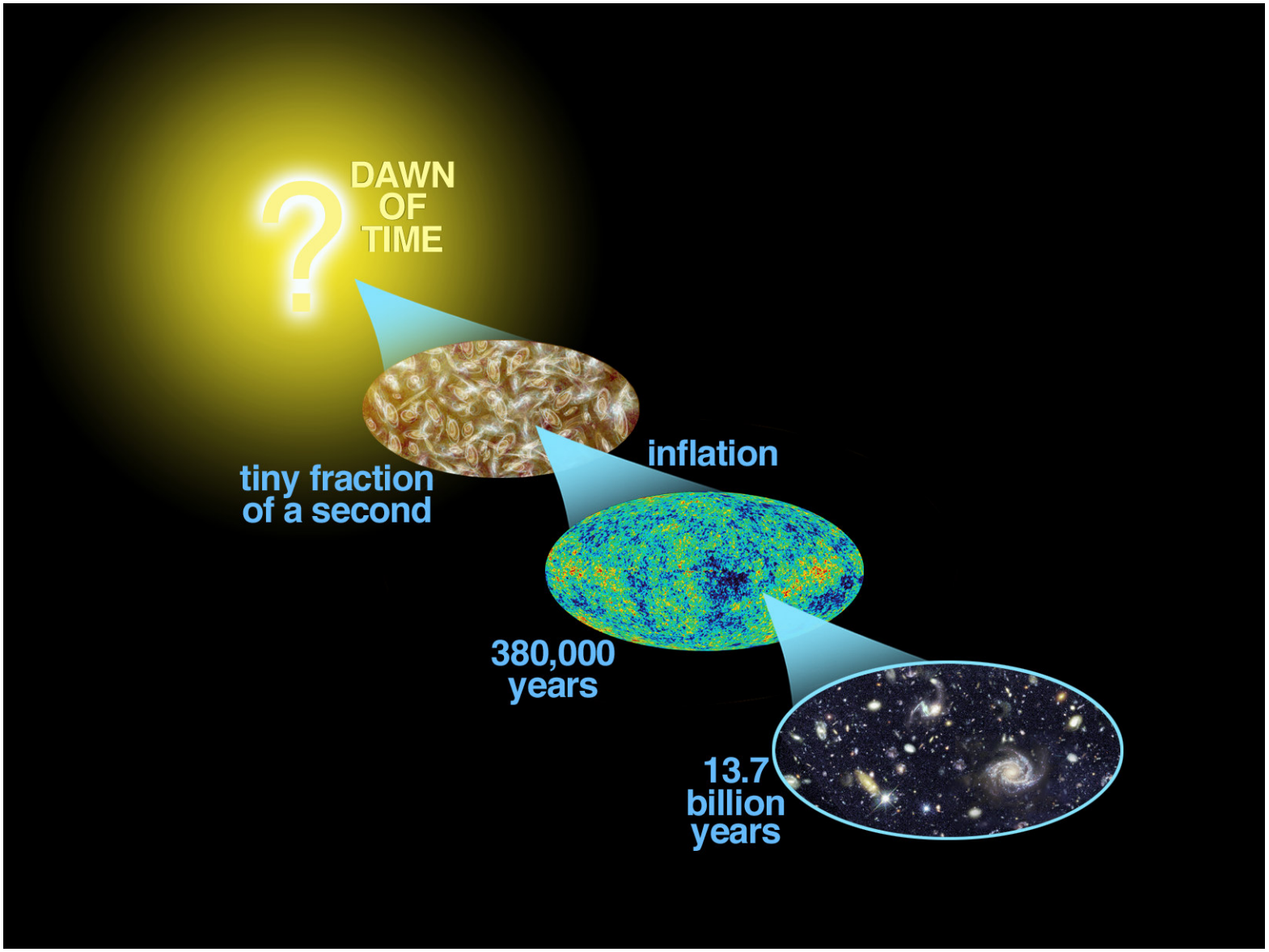
Ha a Világegyetem valóban tágul, akkor régen „kisebb", ezért melegebb volt

- A hőmérséklet a mérettel fordítottan arányos

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

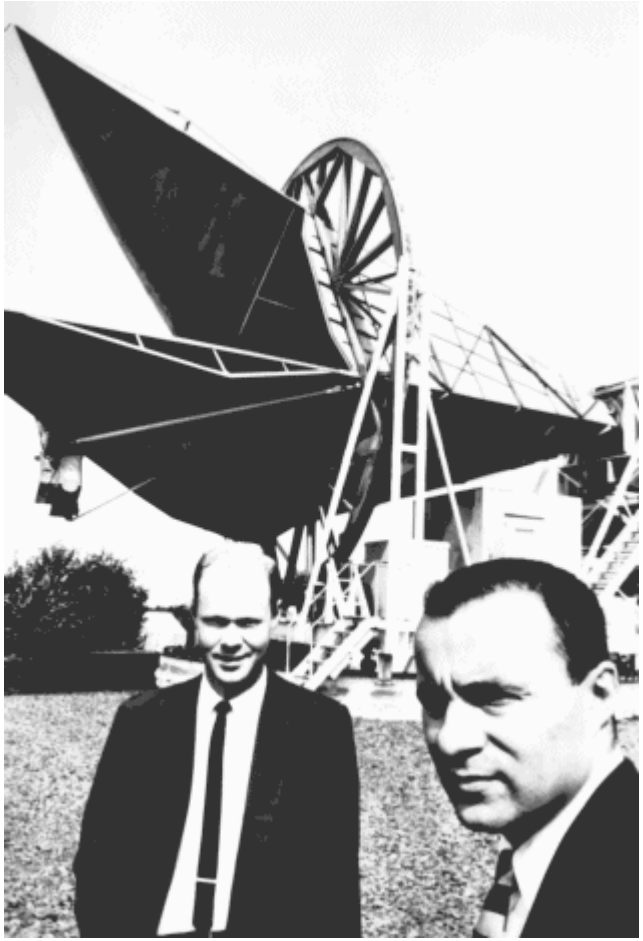
  kozmikus elektromágneses háttérsugárzás

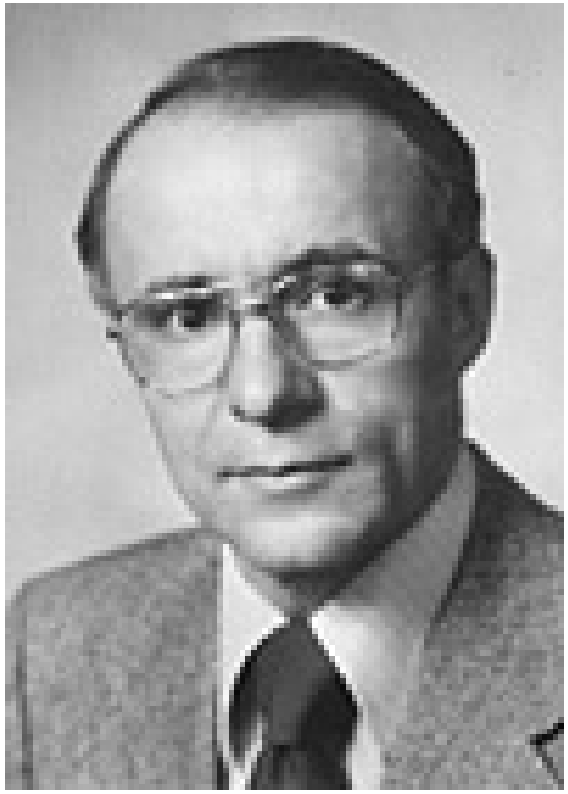
Az ősrobbanás modell jóslata a sugárzásra



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?

  Penzias és Wilson mérése szerint a sugárzás hőmérséklete 3,5 K (Kérdés: Mit jelent ez?)
- Mi már sejtjük, nekik P.J.E. Peebles sugallta a választ:

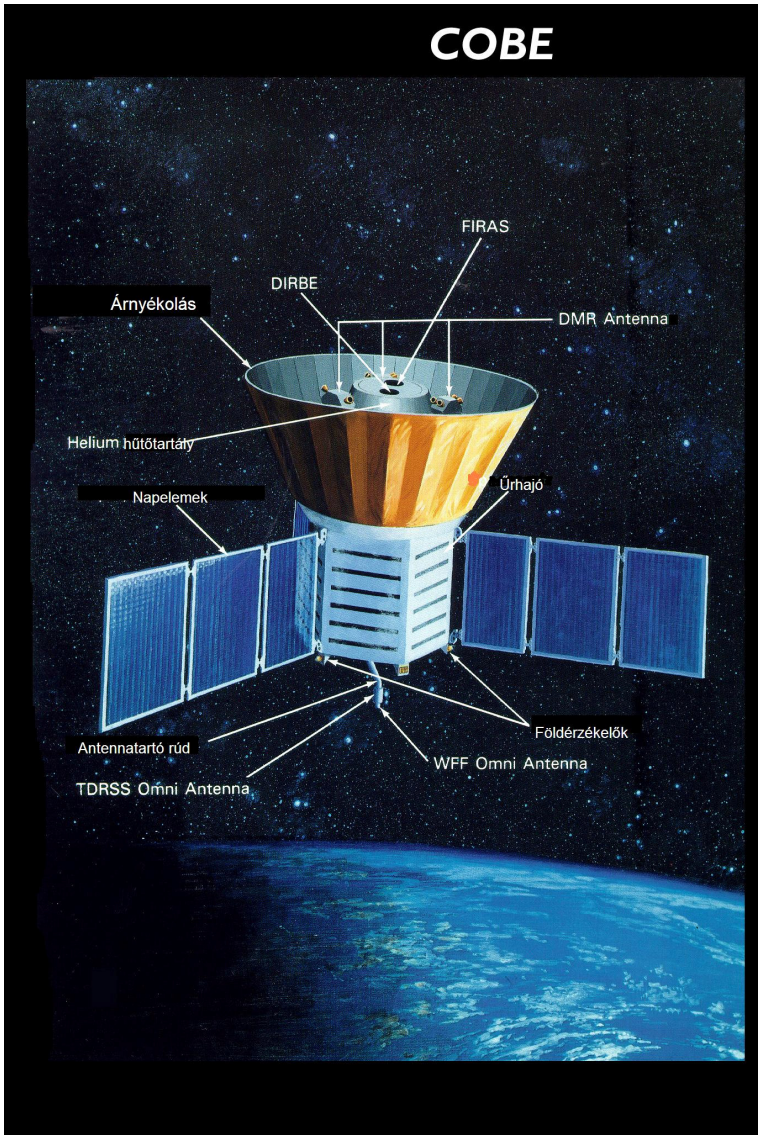
  A VE-t az első perceiben elektromágneses sugárzás töltötte ki, ami azóta is ott van, csak hullámhossza a tágulás arányában megnőtt

  a sugárzás hőmérséklete (?) 10K

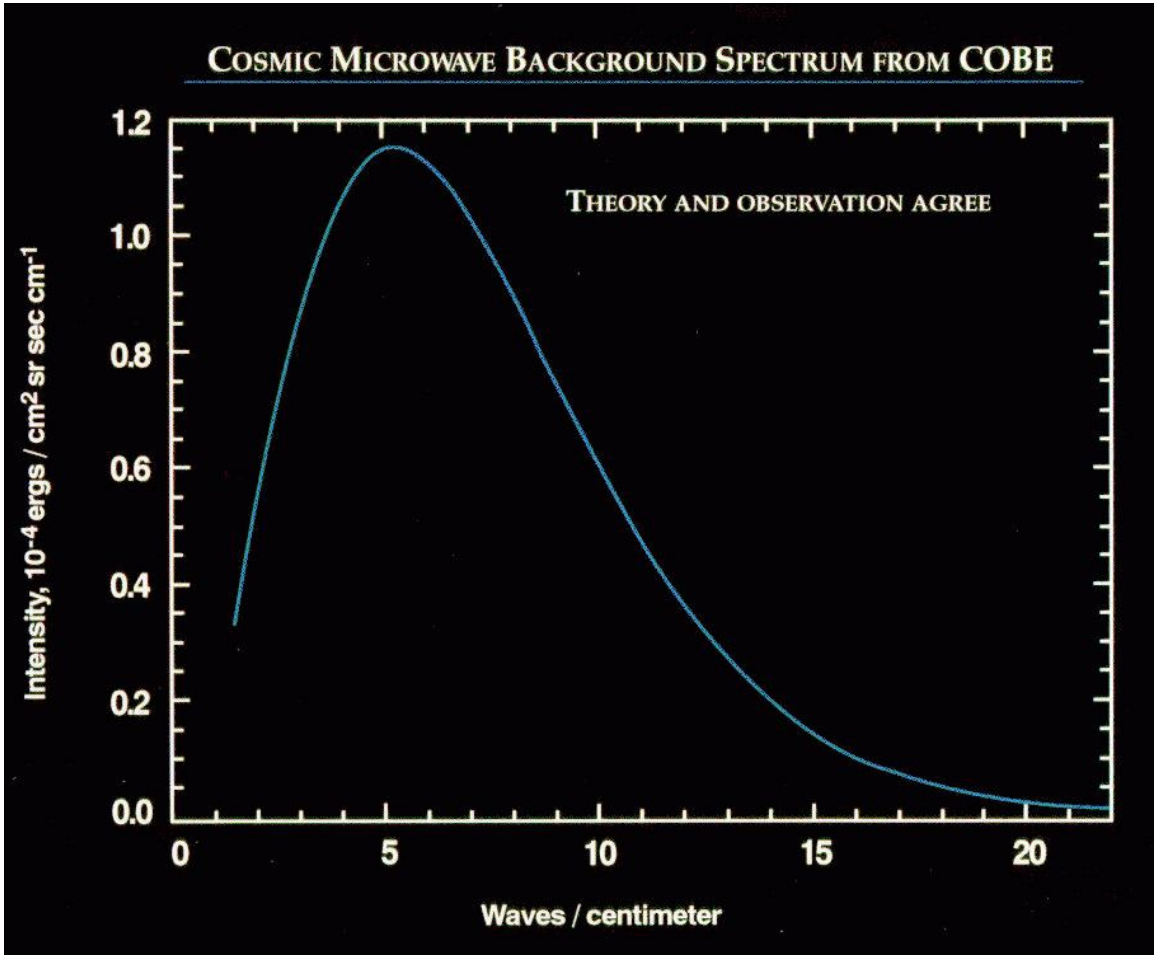
Vajon valóban kozmikus háttérsugárzást észlelt Penzias és Wilson?

Válasz holnap

A Cosmic Background Explorer űrszonda



A FIRAS (spektrofotométer a CoBE-n) spektrum

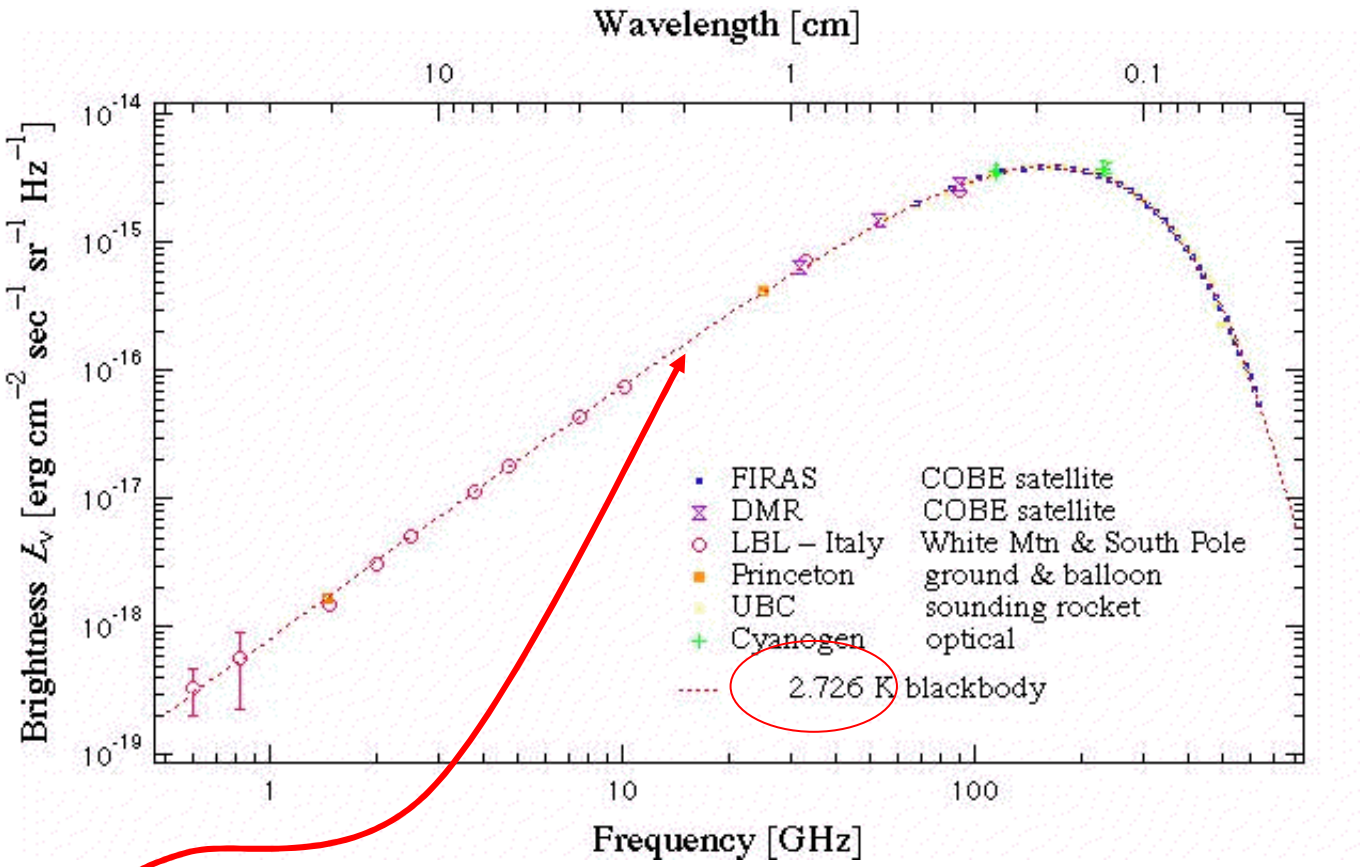


A valaha látott legtökéletesebb hőmérsékleti sugárzási spektrum

A CoBE által mért sugárzási görbe

hullámhossz

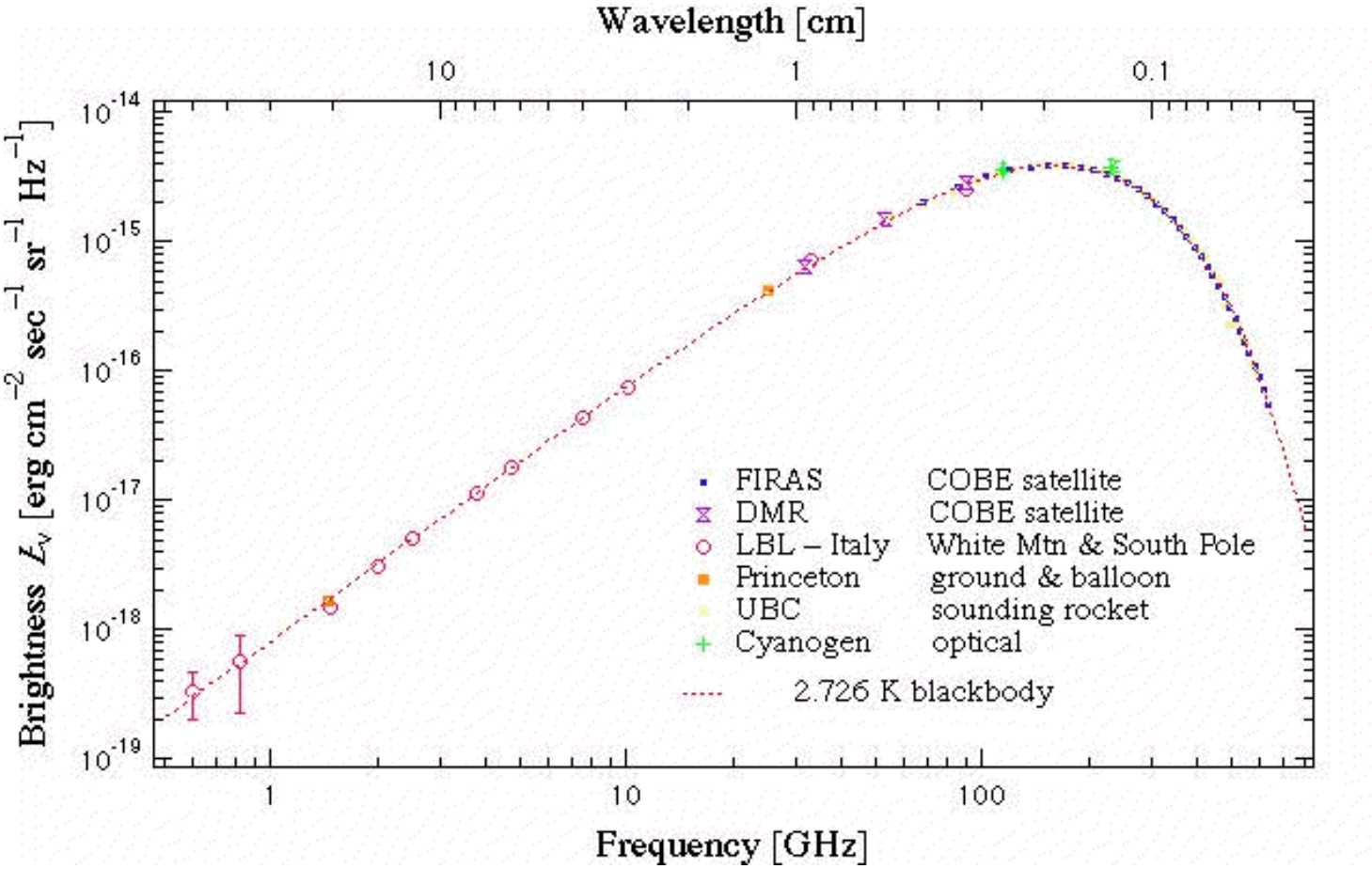
sugárzás intenzitása



Planck-görbe

frekvencia

A CMB spektrum



A valaha látott legtökéletesebb hőmérsékleti sugárzási spektrum

A FIRAS (spektrofotométer a CoBE-n) spektrum

A hőmérsékleti sugárzás spektrumát a Planck-féle eloszlás írja le

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

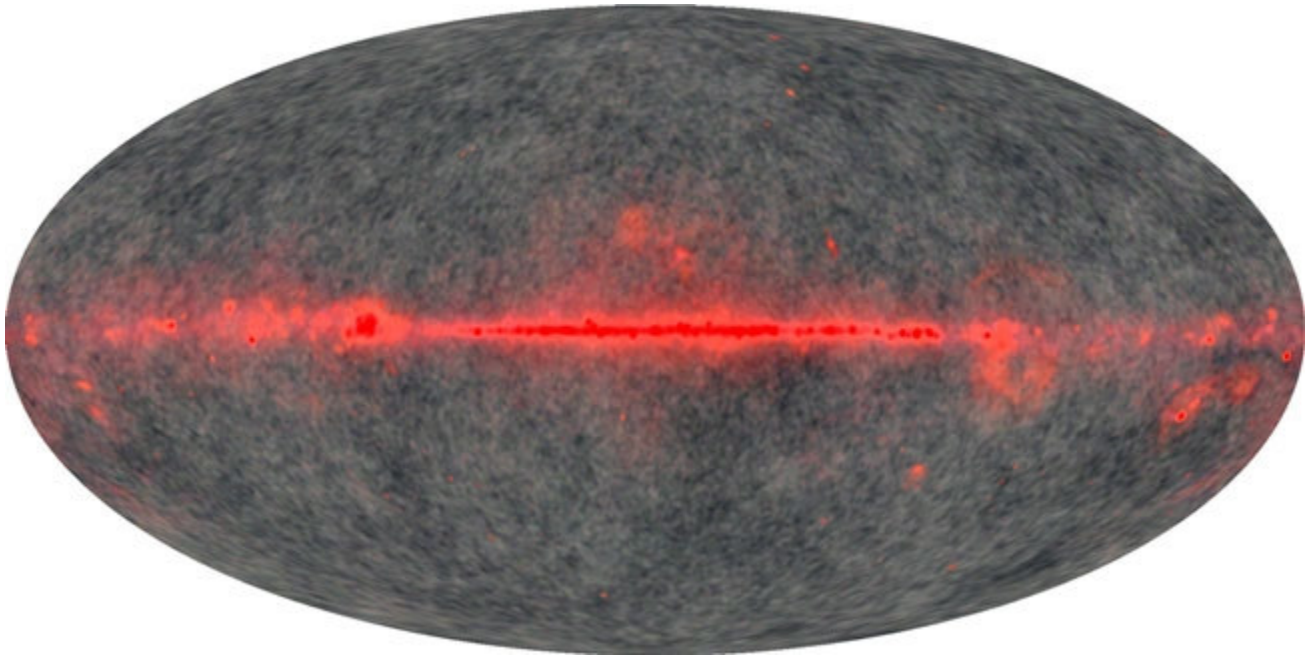
$$n_\gamma = \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}\varepsilon(\nu)}{h\nu} = 8\pi \frac{(kT)^3}{(ch)^3} \int_0^\infty \frac{x^2 \mathrm{d}x}{\mathrm{e}^x - 1} = 413 \cdot 10^6 \frac{\gamma}{\mathrm{m}^3}$$

$$\rho_\mathrm{c} \approx 5 \frac{\mathrm{H\ atom}}{\mathrm{m}^3}$$

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

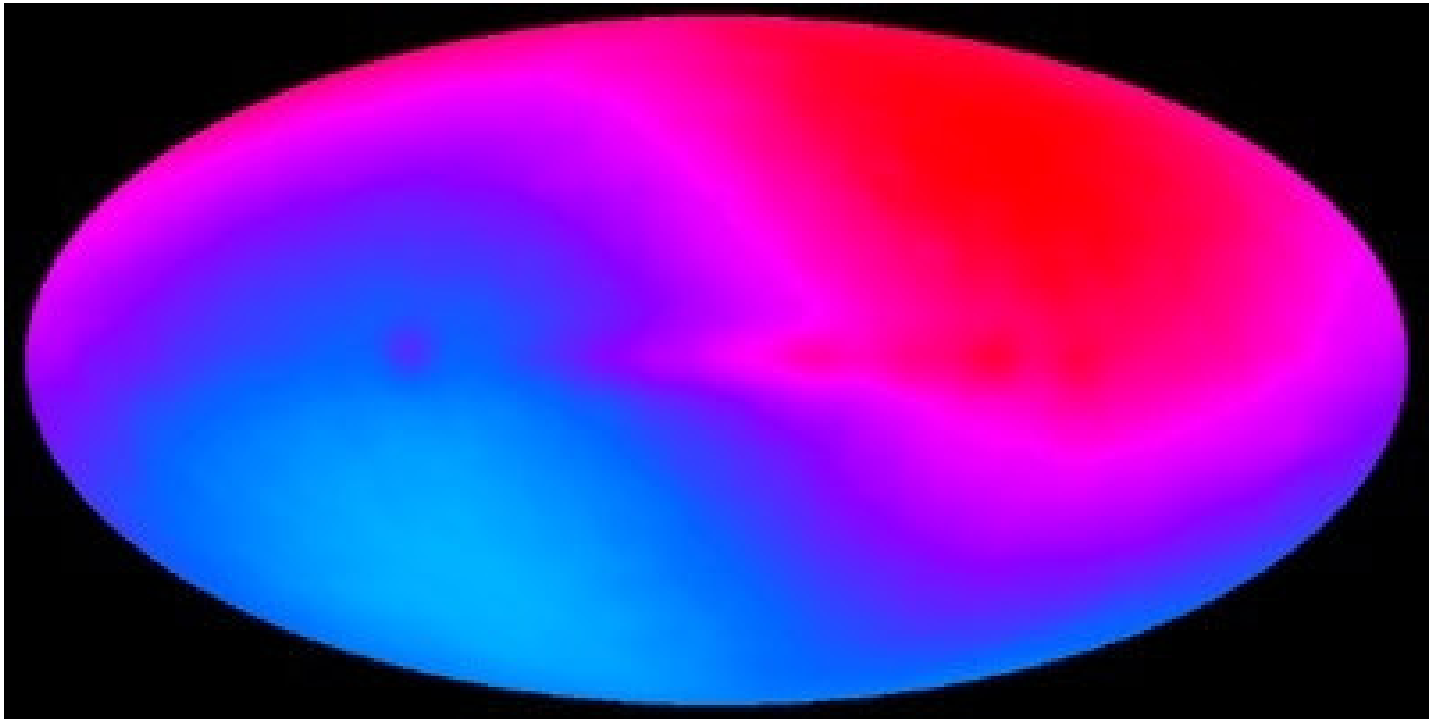
(jegyezzük meg!)

Izotrópnak látta-e a COBE VE-t?



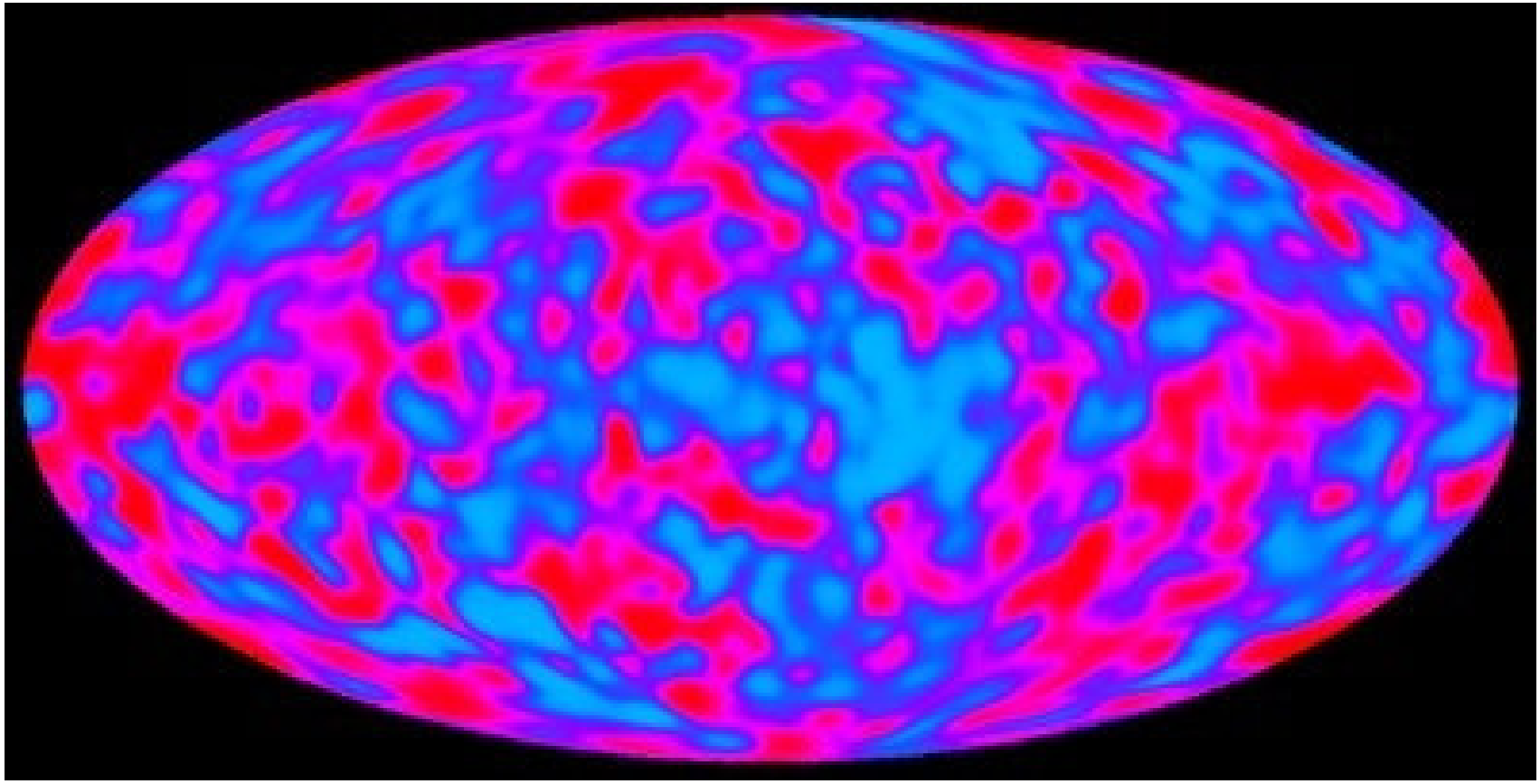
A Tejút hatását le kell vonni

Izotrópnak látta-e a COBE VE-t?



A dipólus anizotrópia a Föld mozgásának következménye (szintén le kell vonni)

A COBE felfedezése



A piros és kék tartományok hőmérséklet különbsége 10^{-5}K
(0,01mm-es hullámok az uszodában)

Nobel-díj átadás 2006. december 10.

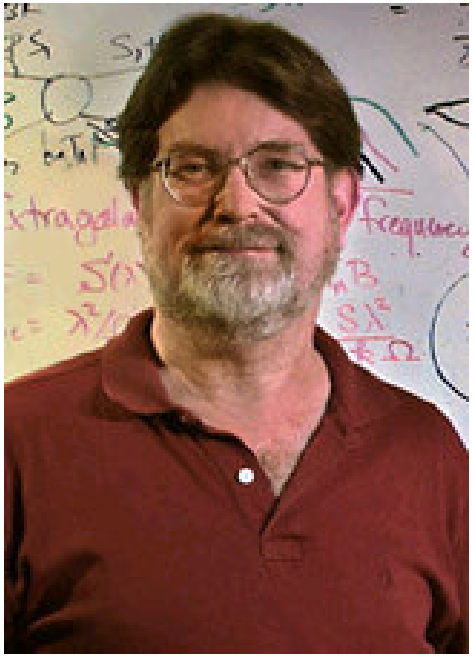
A Fizikai Nobel-díj érme:

„Inventas vitam juvat excoluisse per artes"

Kik felfedezéseikkel jobbítják a világot

Fizikai Nobel-díj 2006

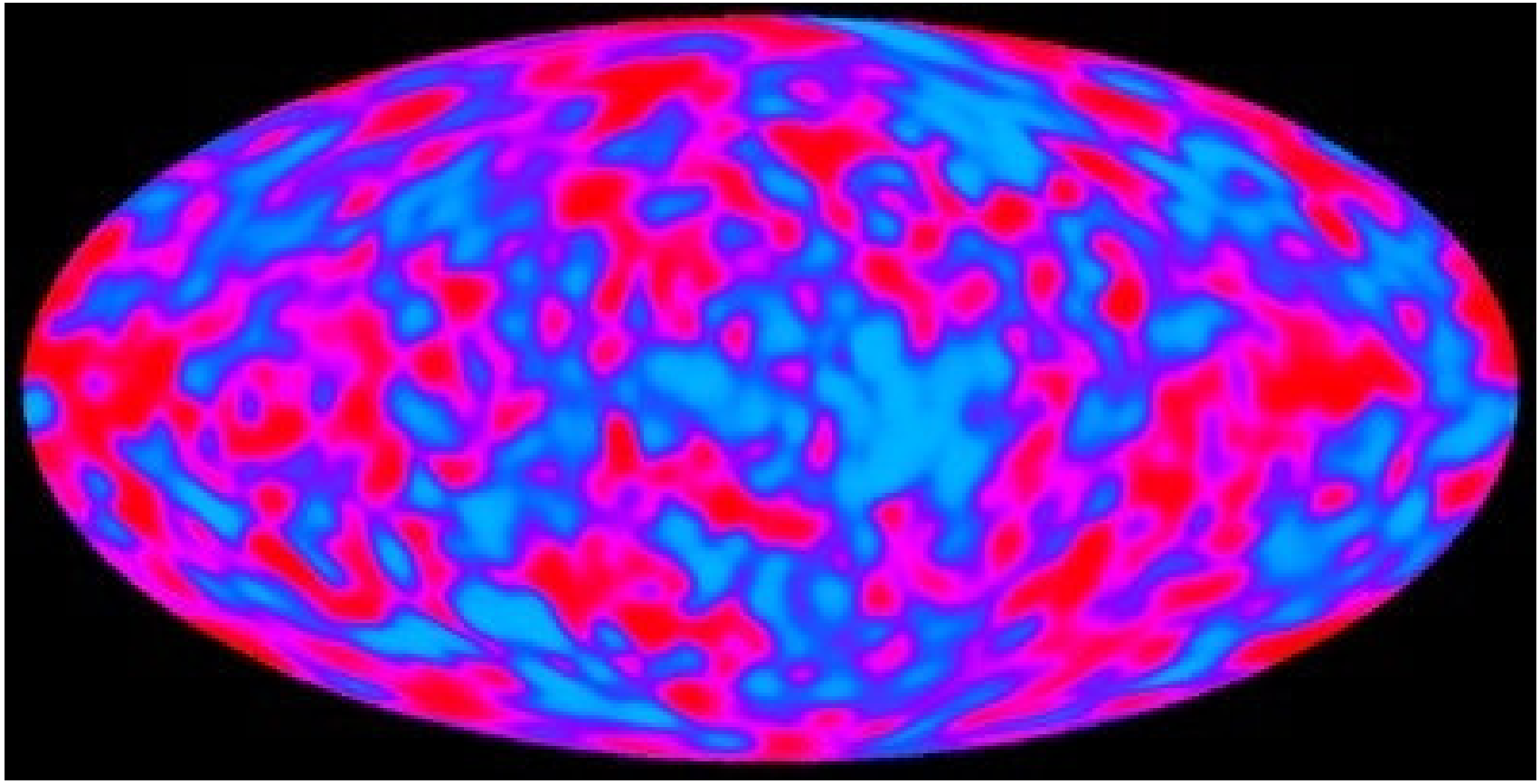
John C. Mather
(NASA Goddard Űrközpont)



George F. Smoot
(Californiai Egyetem, Berkeley)

„a kozmikus háttérsugárzás Planck-formájának és irányfüggésének felfedezéséért”

A COBE felfedezése



Hogyan lehet ezt a képet mennyiségileg megragadni?

Előbb azonban…

Az EM plazma hasonlóan átlátszatlan, mint a felhő, amely szétszórja a Nap fényét

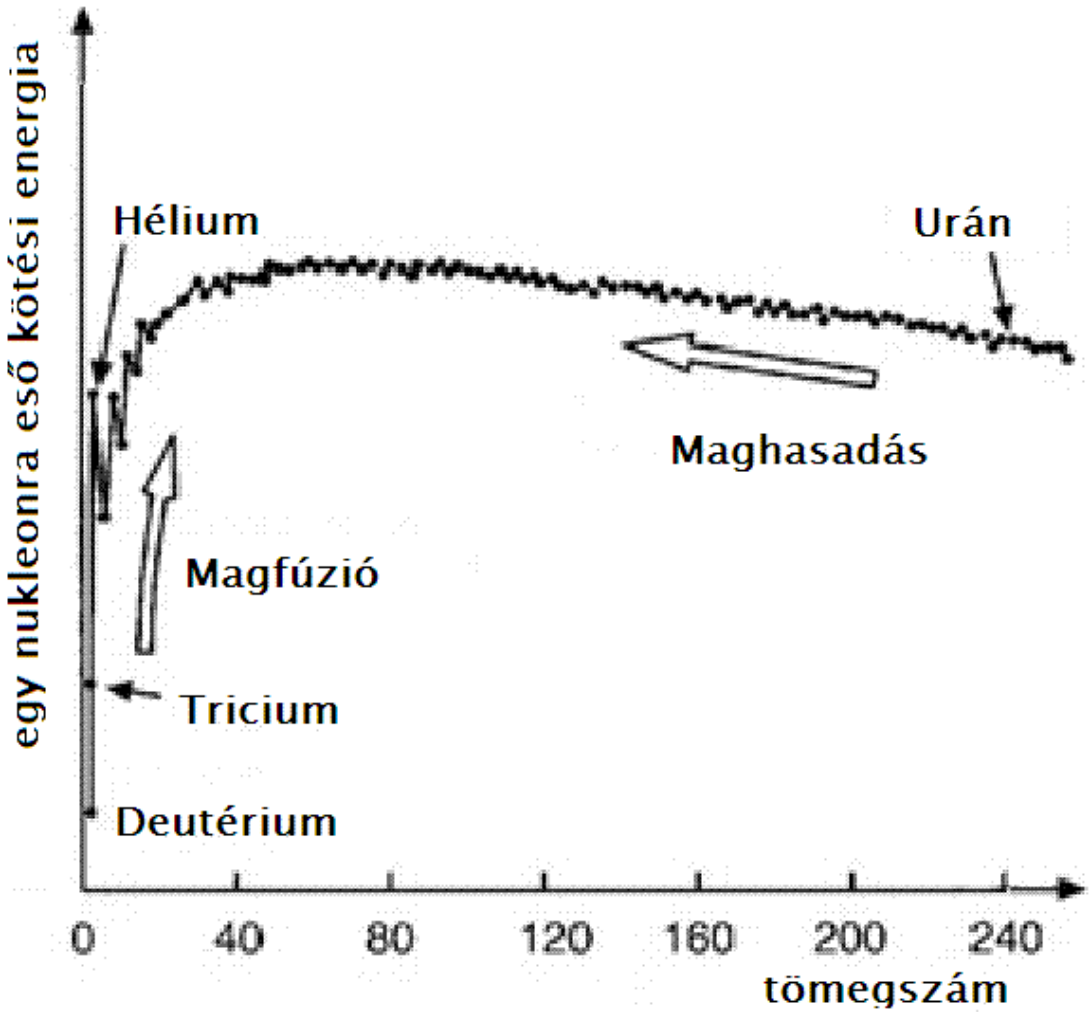
Hogyan ,,láthatnánk" az EM plazma mögé?

Modellt alkotunk, amelynek a mai VE-re vonatkozó jóslatait össze kell vetni a valósággal (igy következtetett Peebles arra, hogy a VE-t EM sugárzás töltötte ki) – ez az Ősrobbanás modellje

A VE „végtelen" sűrű, forró anyaggal kitöltött „kicsi térben" született, és a kezdőpillanat óta tágul. Kevéssel a születése után voltak kezdeti pillanatok, amikor a VE milliárdszor forróbb volt, mint most - ekkor még az atommagok sem lehettek stabil képződmények

A korai VE-ben lejátszódó folyamatokat az elemi részecskék fizikája írja le!

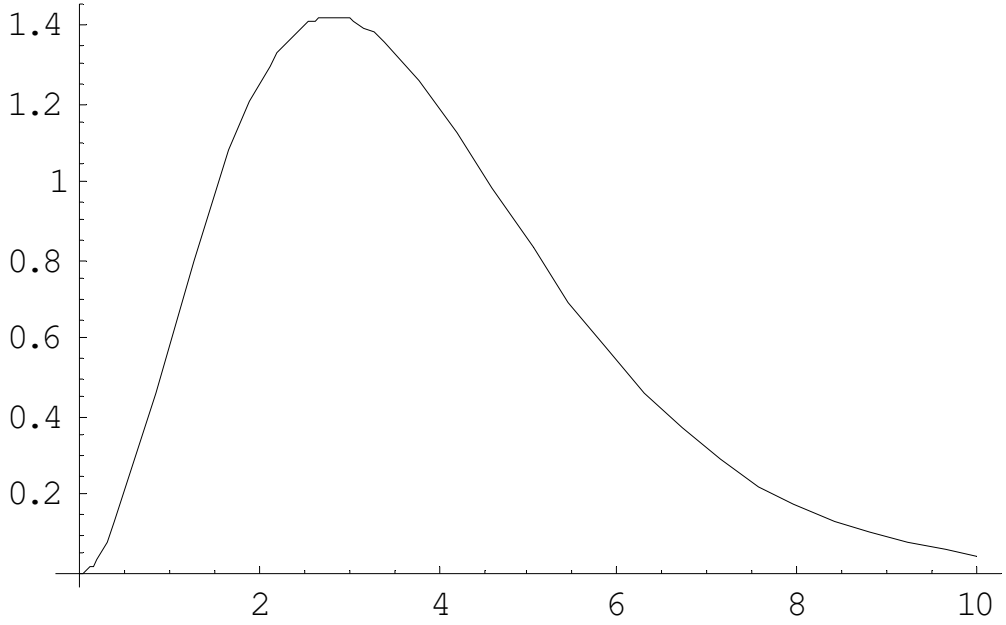
Mikor keletkeznek az atommagok?



Rejtvény: Miért vasból van a Föld magja?

Könnyű elemek atommagjainak keletkezése

- Z < 6 rendszámú elemek: H [p, d=(pn), t=(pnn)], He [(ppn), (ppnn)],Li, Be, B akkor keletkeznek, amikor az EM plazmában található legnagyobb energiájú fotonok $h\nu$ energiája kisebb, mint a keletkező deuteronok kötési energiája – ekkor T = 900 MK; az érték η-tól függ



Rejtvény:
Hol kezdődik a Planck-görbe farka, amely alatti terület 10^{-9}-része a teljes görbe alatti területnek?

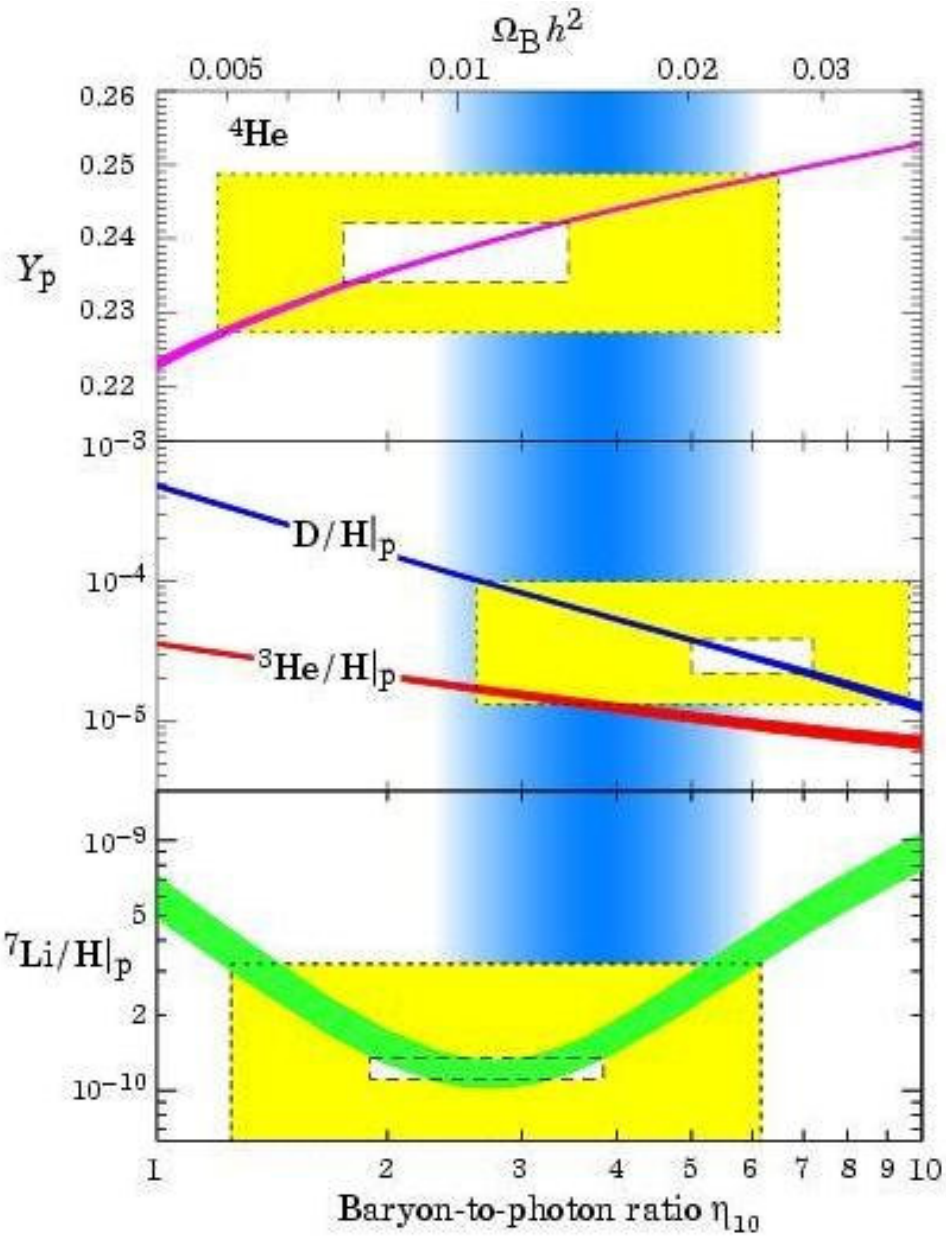
Könnyű elemek atommagjainak keletkezése

- Z < 6 rendszámú elemek: H [p, d=(pn), t=(pnn)], He [(ppn), (ppnn)],Li, Be, B akkor keletkeznek, amikor az EM plazmában található legnagyobb energiájú fotonok $h\nu$ energiája kisebb, mint a keletkező deuteronok kötési energiája – ekkor T = 900 MK; az érték η-tól függ
- A hőmérséklet megszabja a protonok és neutronok egymáshoz viszonyított arányát (keletkezéskor közel azonos, de a n bomlik)

Rejtvény: Miért a semleges n bomlik töltött p-ba?

- Ősi *d*, He, Li atommagok hidrogénhez viszonyított tömegaránya egyetlen η értékkel megmagyarázható

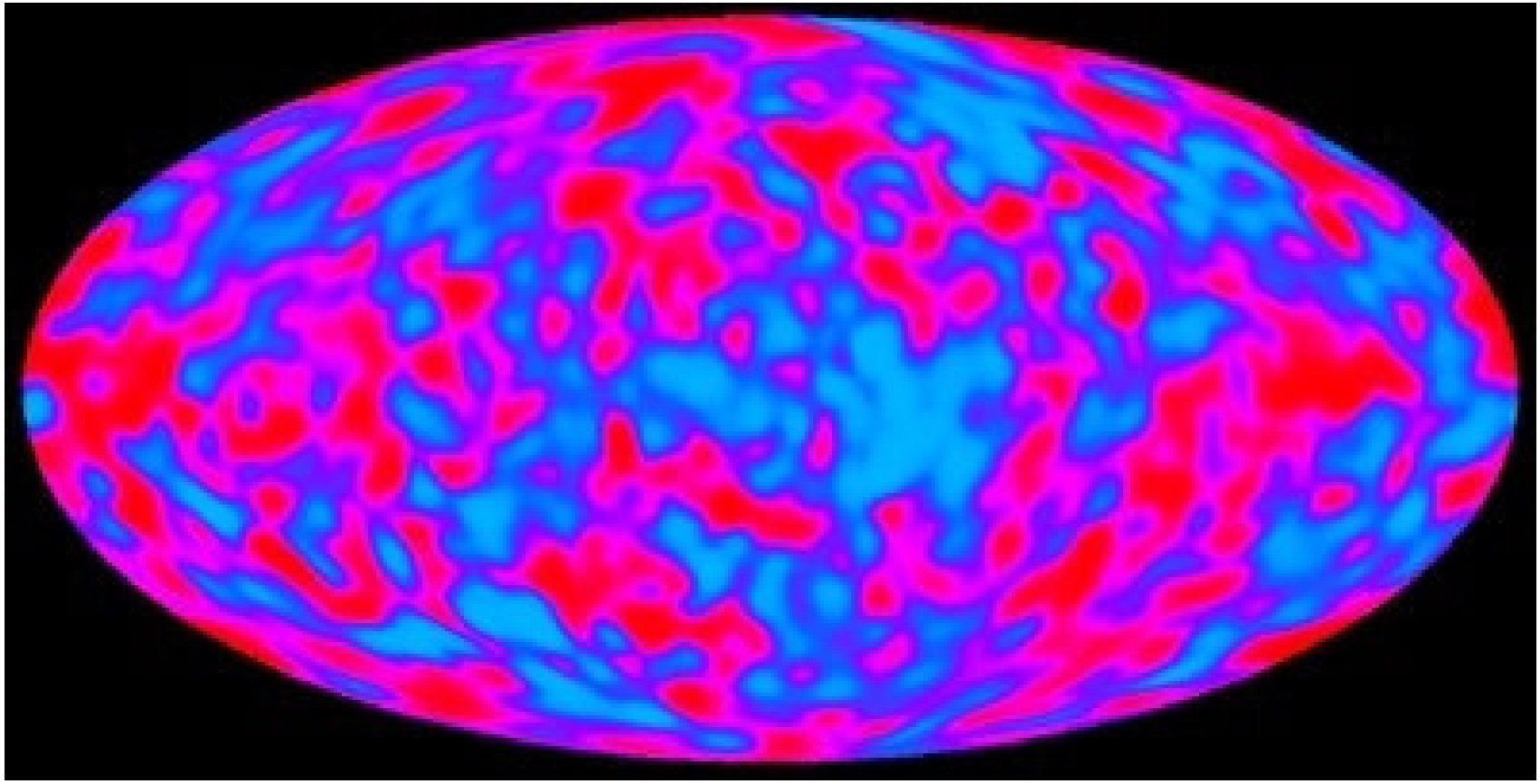
A könnyű elemek előfordulási gyakorisága



... a pontosság nem nagyon meggyőző - lehet-e pontosabb mérési eredmény?

$\eta = \eta_{10} 10^{-10}$

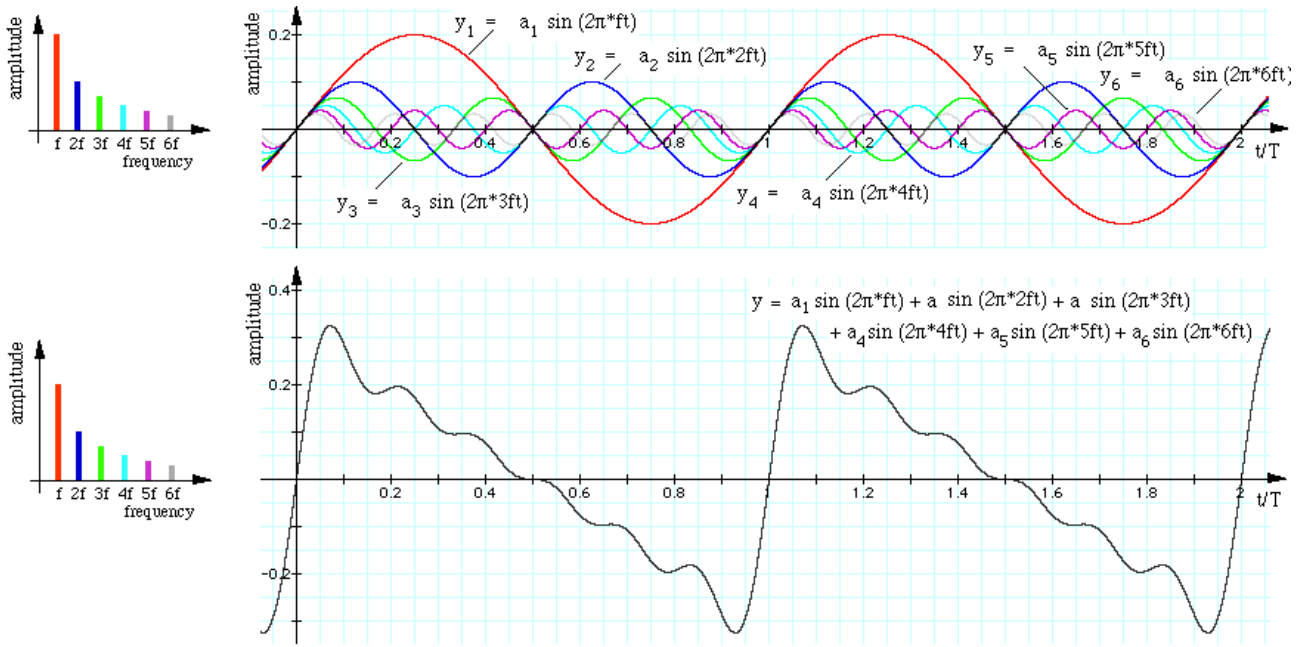
A választ a COBE felfedezése adja



Hogyan lehet ezt a képet mennyiségileg megragadni?

Egy kis hangtan

- A hangokat három fizikai tulajdonsággal jellemezzük:
  - hangerősség → hangrezgések amplitudója
  - hangmagasság → hangrezgések frekvenciája
  - hangszín → spektrum (az előző kettő) →



Egy kis hangtan

- A hangokat három fizikai tulajdonsággal jellemezzük:
  - hangerősség → hangrezgések amplitudója
  - hangmagasság → hangrezgések frekvenciája
  - hangszín → spektrum (az előző kettő)
- A COBE mérései nem elegendően pontosak →

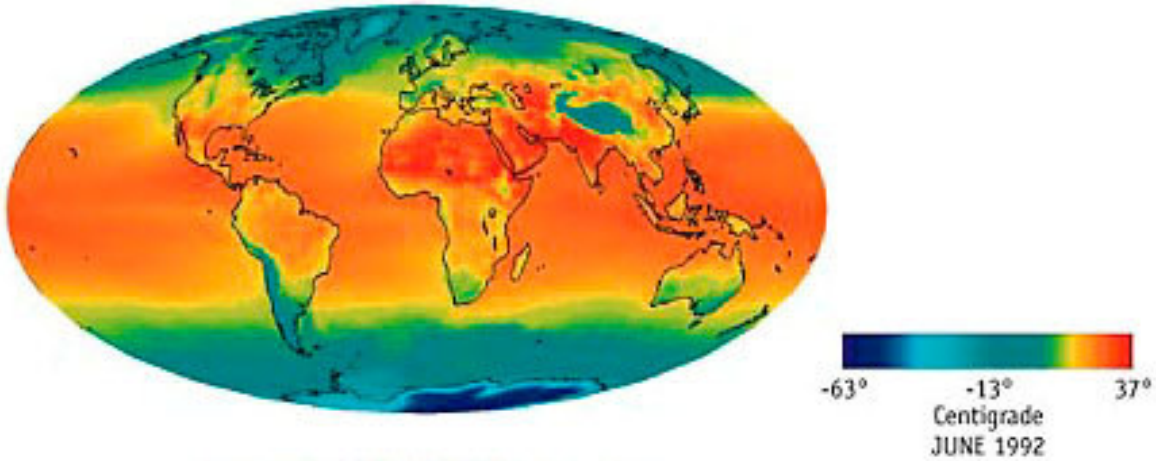
  Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Ch. Bennet

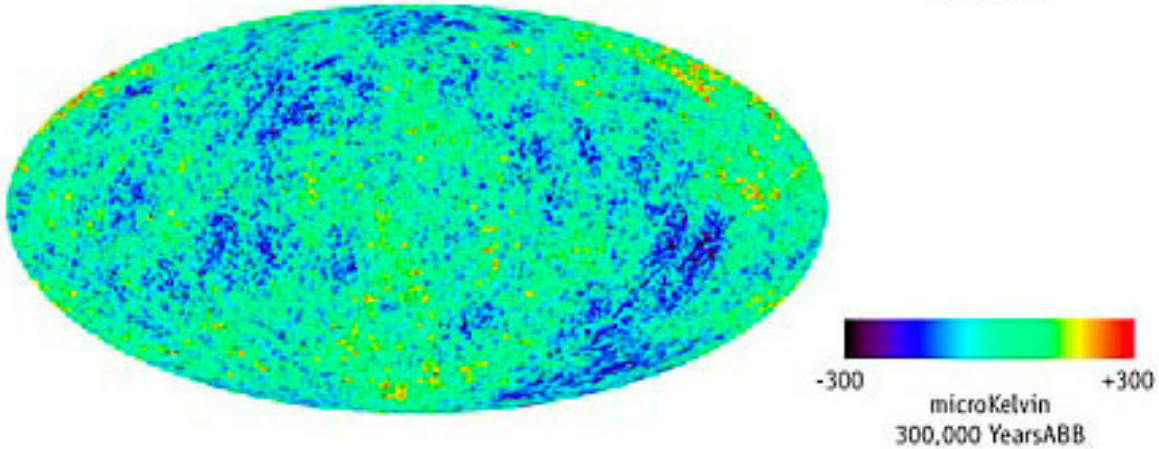
June 30, 2001

A WMAP hőmérsékleti térképe

Föld

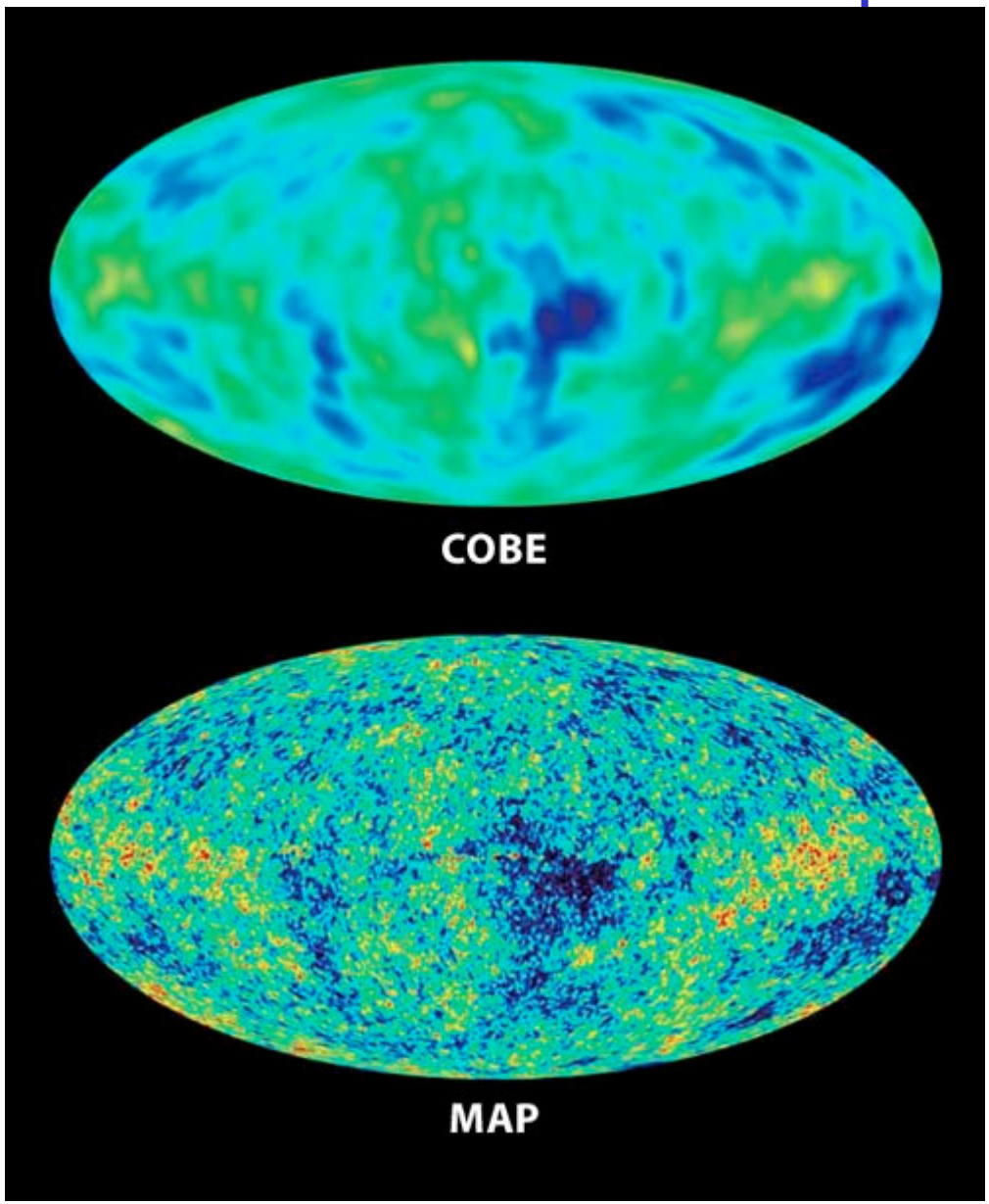


Világ-
egyetem



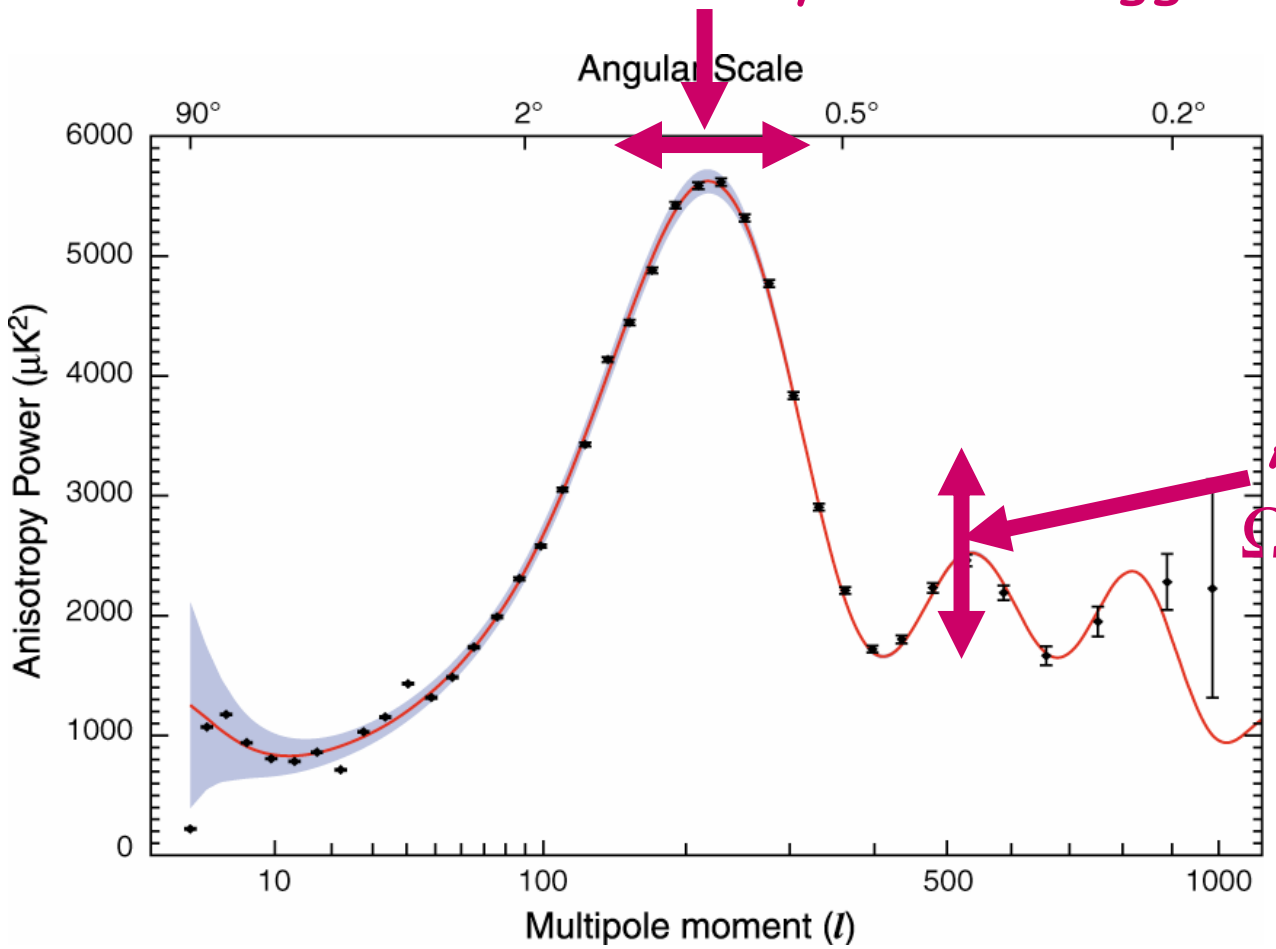
13 milliárd éve kezdte az útját a maradványsugárzás. Útja alatt a Világegyetem tágult, a hullámhosszak növekedtek, jelenleg a mikrohullámnál (~1mm) van a maximum.

A COBE és a WMAP térképe



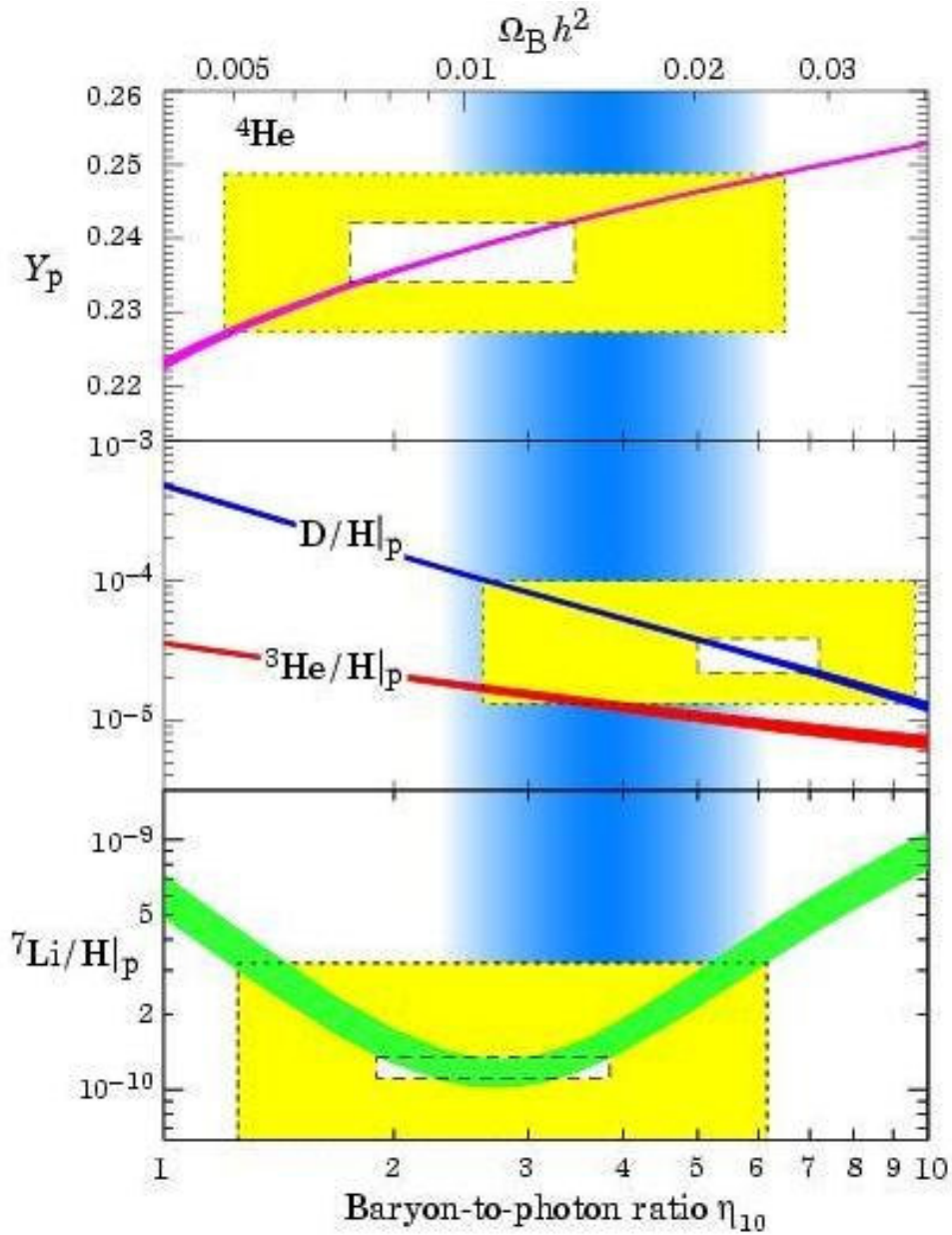
A kozmikus zene „hangszíne"
(a háttérsugárzás hatványspektruma)

Az első csúcs helye Ω-tól függ

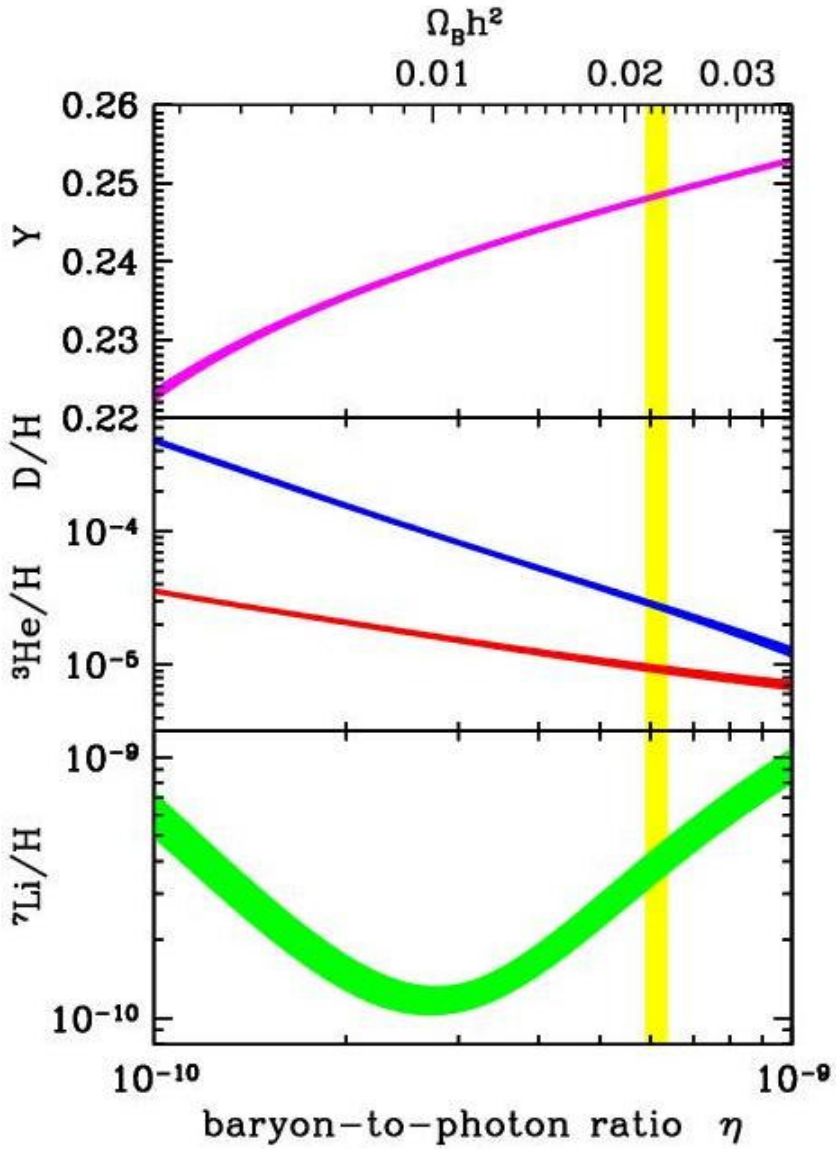


A magasság Ω_B függvénye

BBN jóslatok és a mérések: WMAP előtt



BBN jóslatok és a WMAP jóslat



$$\eta_{10} = 6{,}14 \pm 0{,}25$$

$$\Omega_B = 0{,}0432 \pm 0{,}0018$$

$$\Omega_{lum} = 0{,}0033$$

$$\Omega_m = 0{,}25$$

$$\Omega = 1$$

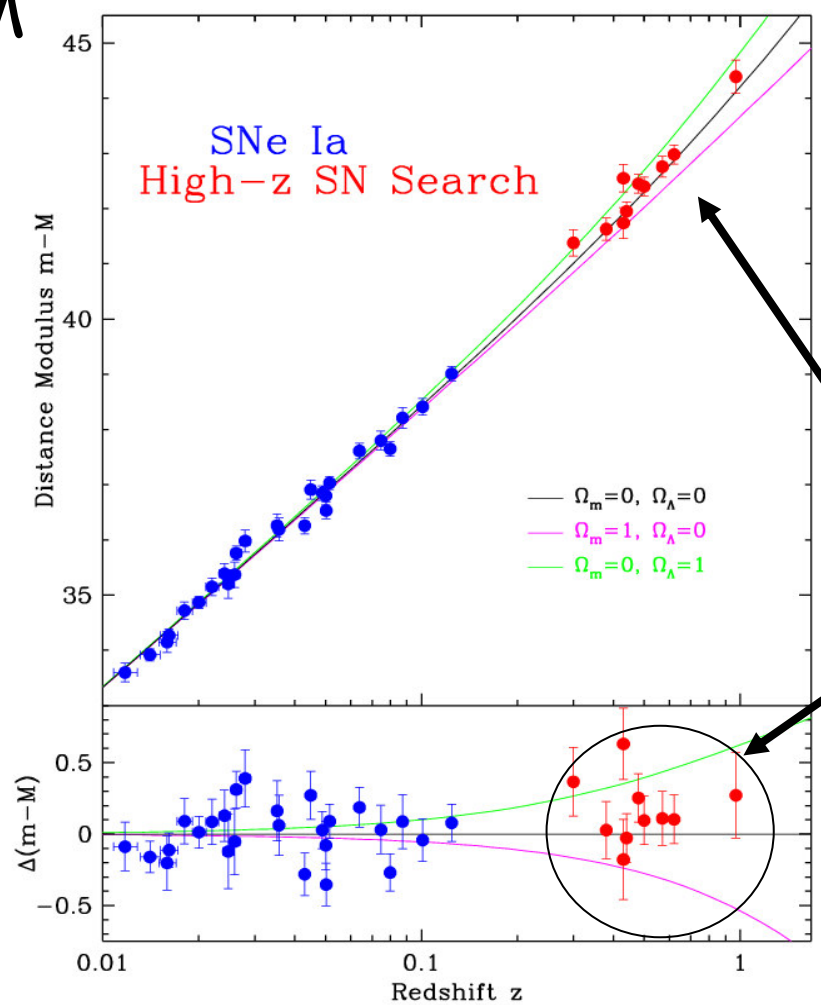
⇒ Sötét anyag,

⇒ Sötét energia

is létezik!

Hubble törvény kísérleti ellenőrzése

m-M



Sötét energia?

vöröseltolódás

Megválaszolatlan kozmológiai kérdések

… amelyekre a részecskefizika adhat választ

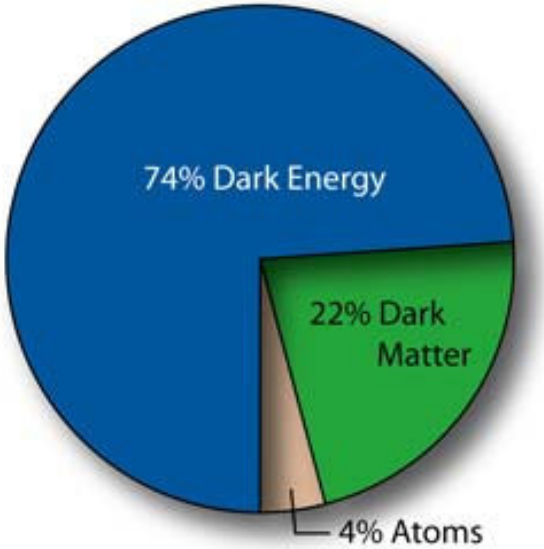
- Miért kritikus a sűrűség?
- Honnan származik az anyag?
  - Kezdetben anyag és antianyag feltehetően ugyanannyi volt. Valami miatt ez a szimmetria megsérült. A VE tágulásával az anyag és antianyag EM sugárzássá alakult át, és visszamaradt egy kevés anyag (kb. egymilliárd fotonra jut egy proton)
- Mi a VE finomszerkezetének forrása?
- Mi a sötét anyag?

Hogyan látjuk ma a világot?

- A VE születése után 0,02 mp-cel, 13,7 milliárd (±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 megszünt. 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?

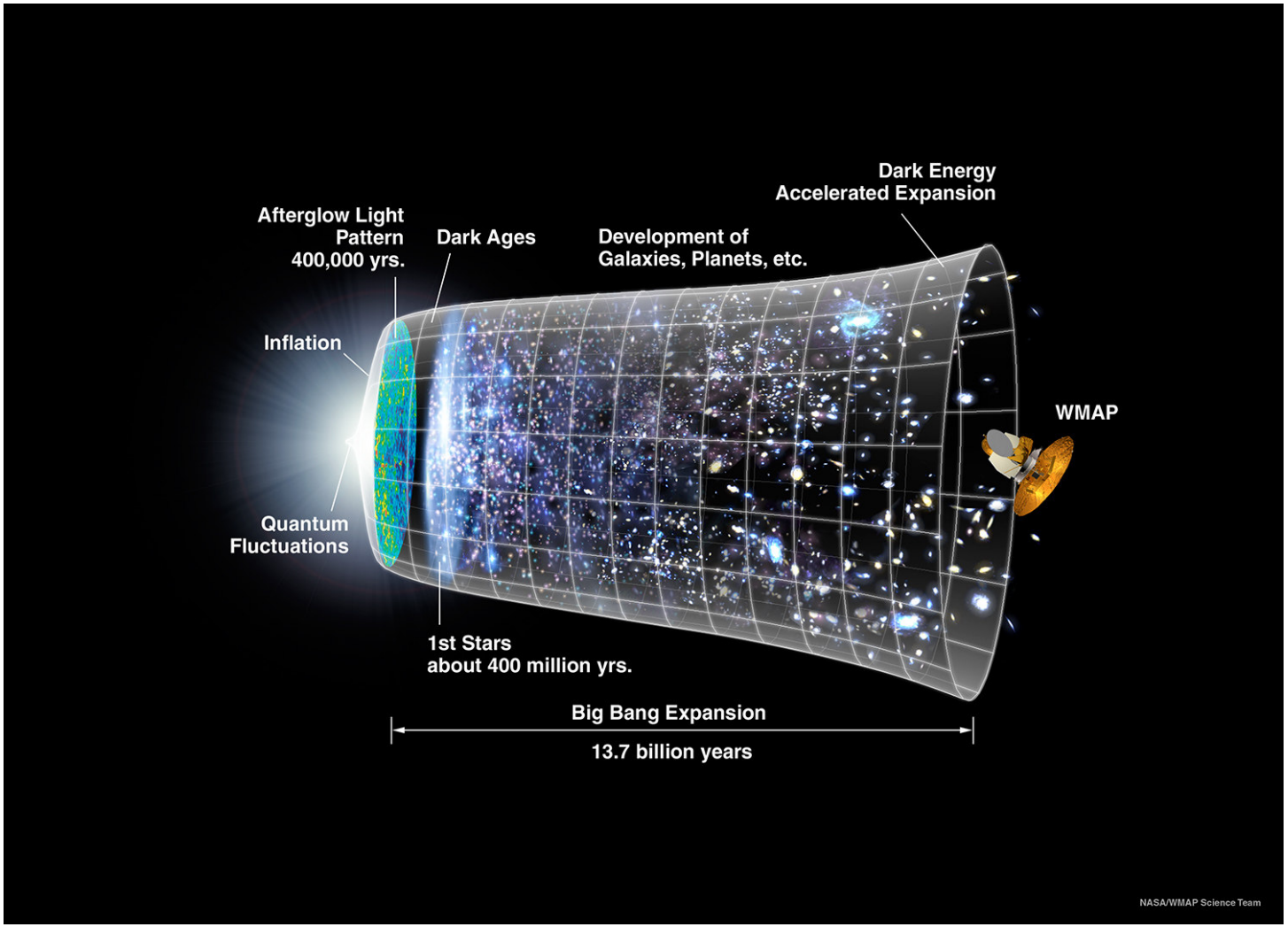
- A VE tágulását meghatározó Hubble-állandó értéke 71 (km/s)/Mpc (±5%)
- Az adatok jelenlegi értelmezése szerint a VE örökké tágulni fog, …
- A VE tömegének 4%-a a bennünket is felépítő atomokból áll. 22%-a olyan hideg „sötét anyag", amelyet laboratóriumban nem sikerült előállítani. 74%-a ismeretlen 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)

Köszönöm a figyelmet!

Magyar nyelvű letölthető irodalom (képek nélkül):
http://kisfiz.phys.klte.hu/kisfiz/Trocsanyi/astro/univerzum.pdf

Az előadás pdf anyaga megtalálható az Indicon.

Hogyan látjuk ma a világot?