

# Bevezetés a kozmológiába

## 1. A világegyetem tágulása

*HUTP-2023, CERN, 2023. augusztus 22.*

**Horváth Dezső**

horvath.dezso@wigner.hu

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Debreceni Egyetem, Fizikai Intézet

és Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

# Vázlat

- A világegyetem szerkezete.
- Hubble-teleszkóp és korai galaxisok.
- Távolságmérés.
- Táguló világegyetem.
- Friedmann-törvény.
- Sötét anyag és sötét energia.

# Mi a kozmológia?

A világegyetem egészével foglalkozik.

- Statikus vagy táguló?
- Lapos, nyitott vagy zárt?
- Anyaga, összetétele?
- Hogyan jött létre?
- Múltja, jövője?

# Rejtély: Miért van éjjel sötét?

(Heinrich Wilhelm Matthias) Olbers paradoxonja, 1823

Korábban: Cosmas Indicopleustes (550), Thomas Digges (1576),  
Johannes Kepler (1610), Edmond Halley (1721), ...

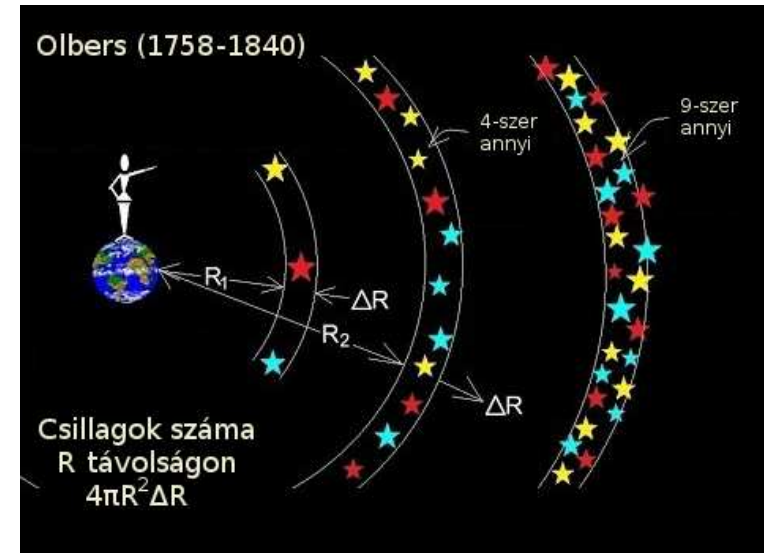
Végtelen kiterjedésű és örökké létező világegyetem végtelen sok csillaggal  $\Rightarrow$  egyenletesen fényes égbolt éjjel-nappal, mert minden pontban csillagra nézünk

Fényesség  $\sim 1/r^2$ , sűrűség  $\sim r^2$ , por is izzana

Fő magyarázat: Sötét éjszaka  $\Rightarrow$  véges méretű és/vagy korú világegyetem.

Alternatív (de el nem fogadott) magyarázatok:

- Véges élettartamú, pusztuló csillagok;
- távolodás miatt láthatatlanba növvő hullámhossz.



„A paradoxon mindössze ellentmondás a valóság és aközött, amilyenek szerintünk a valóságnak lennie kellene” (R. Feynman)

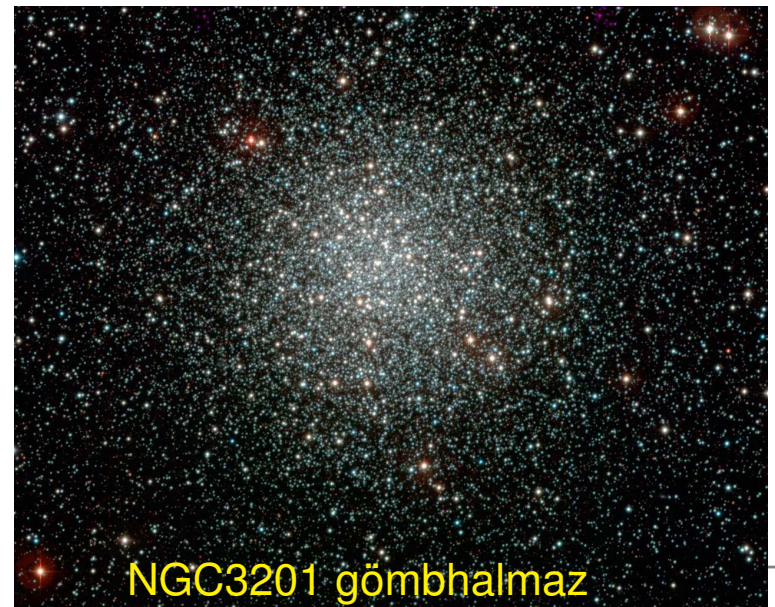
# A világegyetem szerkezete

Nagy skálán  
homogén és izotróp

Kis (?) skálán látunk:  
 $\sim 10^{11}$  galaxist  
és galaxisonként  $\sim 10^{11}$  csillagot

A Vela galaxis NGC3201  
gömbhalmaz  $\sim 10000$   
csillaggal

<http://www.eso.org/public/images/>



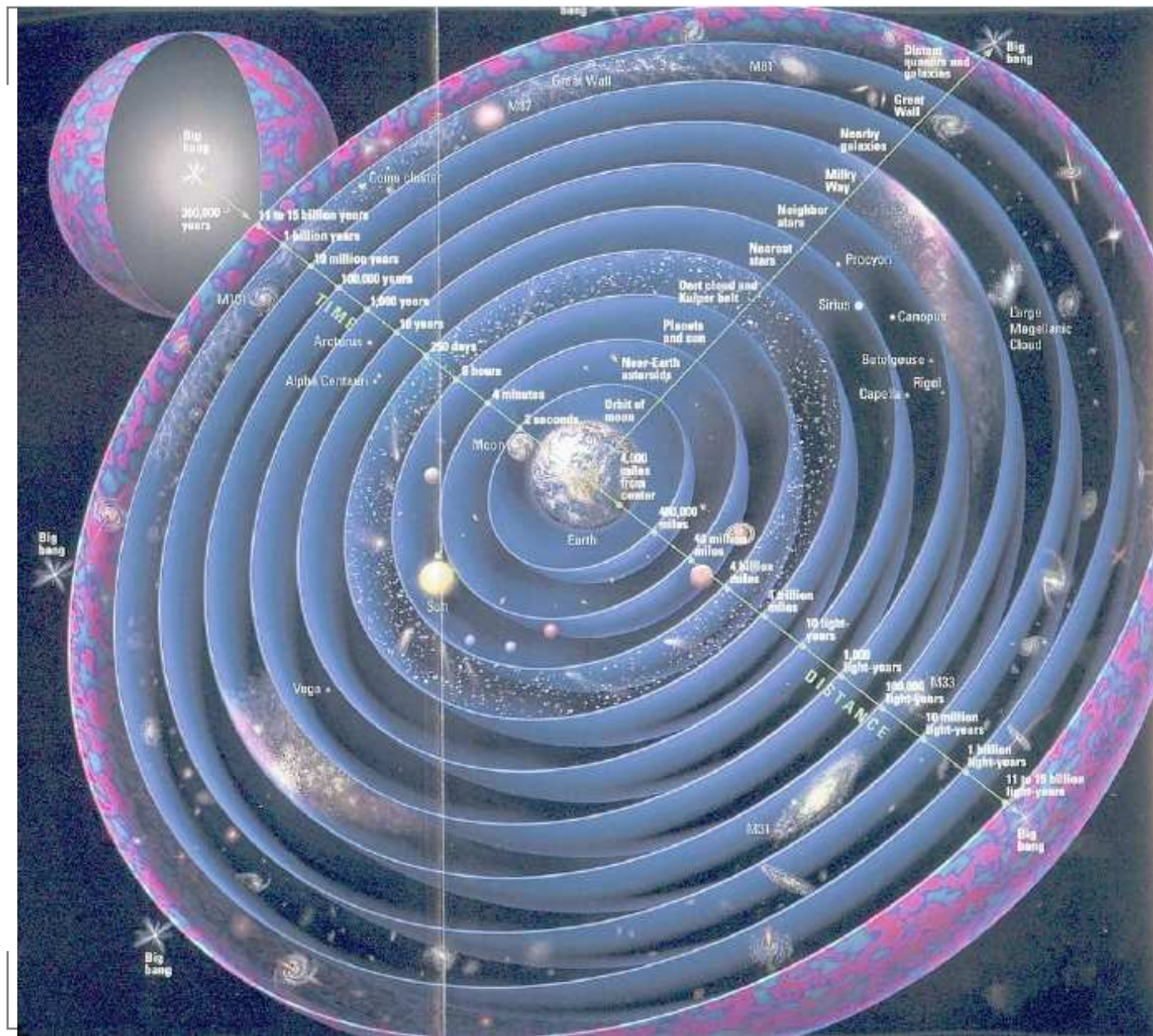


# Messzebbre nézünk, korábbra látunk

*Annál mi van,  
a semmi ősebb*

(Kosztolányi  
Dezső:  
*Ének a semmiről*)

Az ősrobbanás  
volt tér és idő  
kezdete. Amerre  
nézünk,  
mindenütt az  
határol.



# A Hubble-teleszkóp

Felőve: 1990.04.24

Tömeg: 11110 kg

Közel körpálya,  
magassága: 559 km

Keringés: 96–97 perc

Átmérő: 2,4 m

Fókusztaáv: 57,6 m

Érzékeny hullámhosszak:

Közeli infravörös

optikai (látható)

ultraibolya



Ötször kellett felmenni hozzá javítani, minden lényeges alkatrészt legalább egyszer cseréltek és újakat szereltek fel.

Az első javítás 1993-ban: tükrök, optika, 5 giroszkóp.


Az utolsó 2009-ben: adatkezelés, új műszerek, 6 giroszkóp.

**Kérdés: Minek a giroszkóp?**



# A Hubble-teleszkóp felvételei



The Sombrero Galaxy — M104  HUBBLESITE.org



Sombrero-galaxis,  
28 millió fényév



NGC2207 és IC2163 cs-köd, 114m fév



# Hubble-teleszkóp: a világegyetem mélye



1 millió mp megfigyelés egy *sötét* ponton  $\Rightarrow$   
> 10000 tízmilliárd évnél *régebbi* galaxis

# Hubble-teleszkóp: eredmények

- A galaxisok kialakulása már az Ősrobbanás után 200-400 millió évvel megkezdődött
- Korai galaxisok kisebbek és kevésbé szimmetrikusak  $\Rightarrow$  gyorsabb formálódás
- A galaxisok centrumában általában fekete lyuk van
- A legtávolabbi felvételeken nyomon követhető csillagok képződése



Az ultramély felvétel kis része kinagyítva  $10^9$  évnél fiatalabb galaxisok

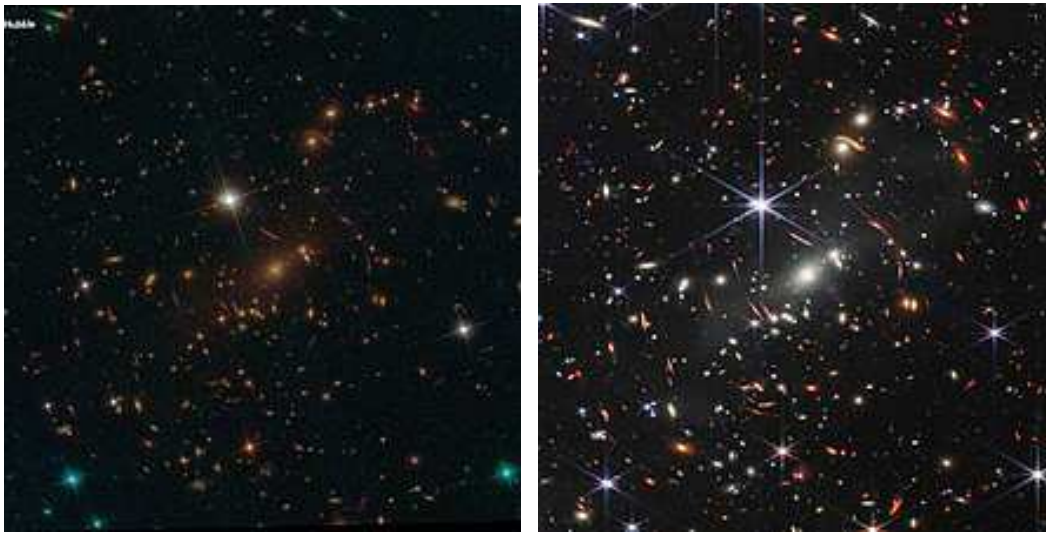
# James Webb űrteleszkóp (JWST)

$L_2$  Lagrange-pont közelében (állandó Nap-Föld-Hold irány)

Földtől  $1,5 \cdot 10^6$  km, nem javítható

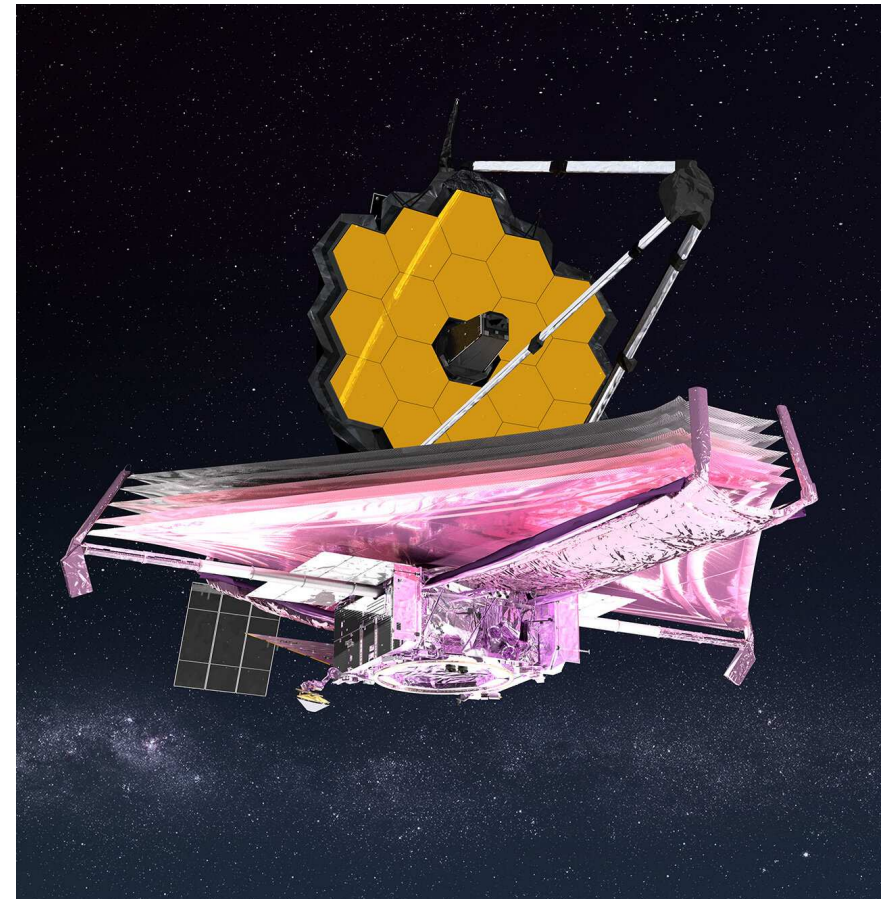
Korai galaxisok, infravörös csillagászat (Nap, Föld sugárzása árnyékolva)

Fellőve 2021 karácsonyán, már működik, gyönyörű képek



Hubble-2017  $\Leftrightarrow$  JWST-2022

A SMACS J0723.3-7327 galaxiscsoport



# Távolodó galaxisok

Doppler-hatás:  $z = (\lambda_v - \lambda_0) / \lambda_0$

$\lambda_v$ : hullámhossz  $v$  sebességnél

Közeledő motor hangja magasabb, távolodóé mélyebb

William Huggins, 1868:

csillagok szinképében

$z > 0$ : vöröseltolódás

Tőlünk távolodó objektum fényhullámhossza nő  $\Rightarrow$   
vörösebb

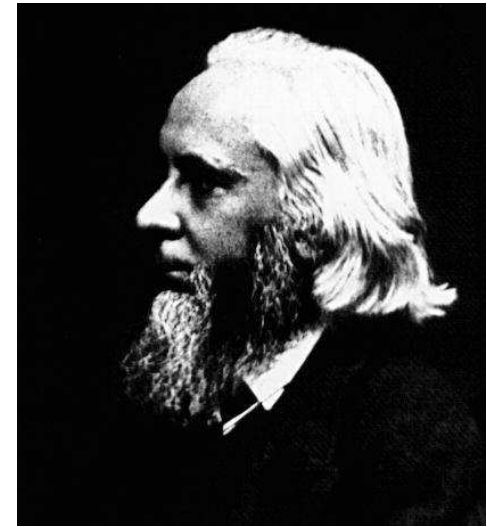
Henrietta Swan Leavitt, 1912:

Változócsillagok (cefeidák):

Kicsi  $\rightarrow$  duzzad, nagyra nőtt  $\rightarrow$  zsugorodik

periódus  $\sim$  abszolút fényesség

észlelt fényesség  $\Rightarrow$  távolság!





# Változócsillagok (cefeidák)

Csillag lélegzik, mérettől függő  
frekvenciával

$\text{He}^+$  átlátszóbb, mint  $\text{He}^{++}$

Sugárzás elnyelődik, ionizálja a gázt,  
több  $\text{He}^{++}$ , felforrósodik, kitágul,  
lehül, kevesebb  $\text{He}^{++}$ , átlátszóbb  
lesz, berogyik, sűrűbb He  
ionizálódik, gáz felforrósodik, ...

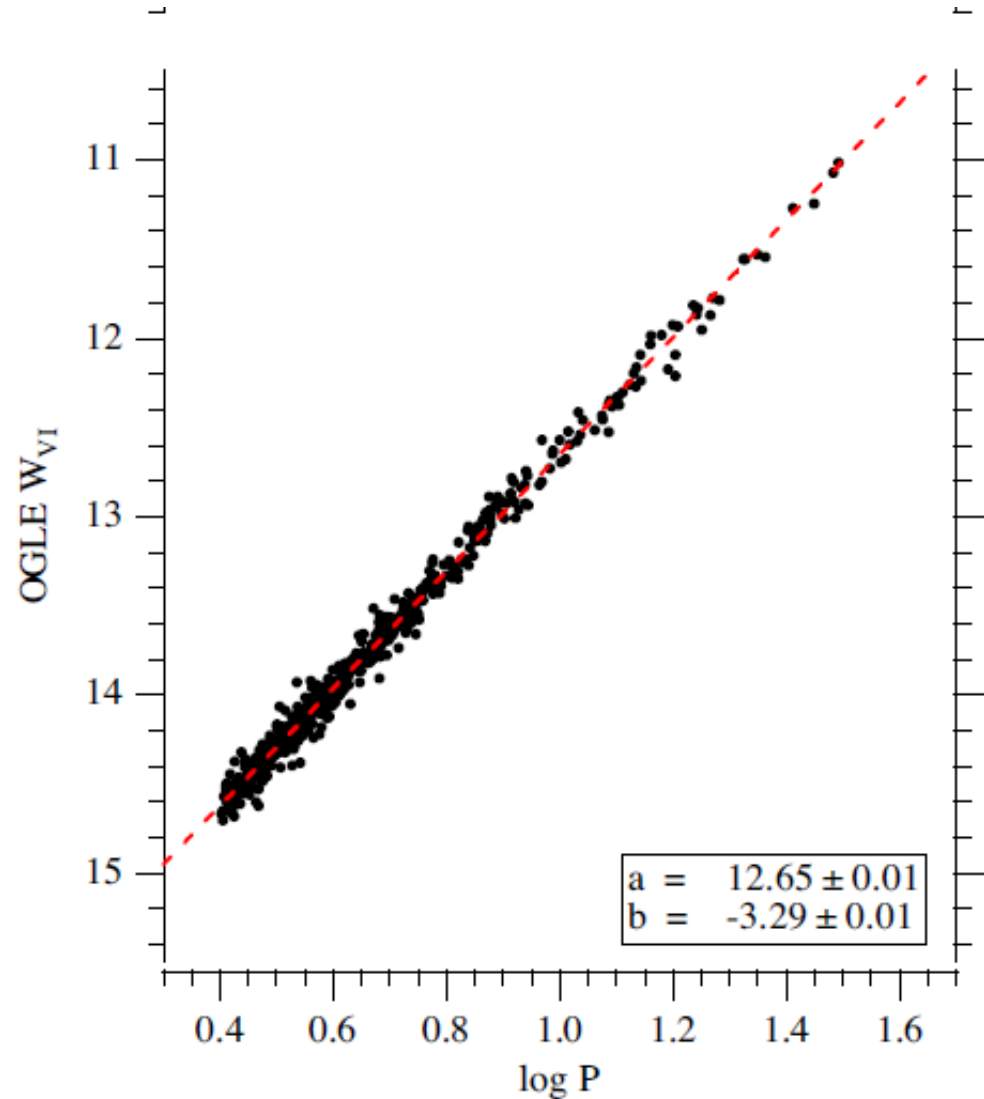
Nagyobb, fényesebb csillag,  
hosszabb periódus

periódus  $\sim$  abszolút fényesség

(3 nap  $\sim$  800\**Nap*,

30 nap  $\sim$  10000\**Nap*)

Mikrofizika  $\Leftrightarrow$  csillagászat



Absz. fényesség  $\leftrightarrow$  periódusidő

# Standard gyertyák

A galaktikus távolság ( $D$ ) mérése  
relatív ( $m$ ) és abszolút ( $M$ ) fényesség összehasonlításával:

$$5 \log_{10} D[\text{kpc}] = m - M - 5$$

1 pc (parsec): távolság, ahonnan a Nap-Föld távolság  
1 szögmp alatt látszik  
(1 Mpc  $\approx 3 \times 10^{22}$  m  $\approx 3 \times 10^6$  fényév)

## Távolságlétra:

- Gömbhalmazváltozók (Tejútrendszeren belül)
- Kettős csillagok ( $D < 3$  Mpc)
- Cefeidák ( $D < 30$  Mpc)
- 1a-típusú szupernovák  
(H nincs, Si van  $\Rightarrow$  nagy távolságokhoz)

# Szupernovák

Szupernova = csillaghalál

Oka: Hidrogén elfogy, gravitációs összeomlás  
vagy egyesülés külső anyaggal és fúzió felgyorsulása

⇒ **Robbanás, nehéz elemek szétszóródása**

Marad fekete lyuk vagy neutroncsillag

Megfigyelés: évente több száz (2007: 572)

## SN 1987A

Nagy Magellán-felhőben, 168000 fényévre

**Neutrínóészlelés 1987 febr. 23., 7h 35'**

$\sim 10^{58}$   $\nu$ , fele első 1–2 s, többi 10–100 s alatt

**Neutroncsillag kötési energiája: 99% neutrínóban távozik**

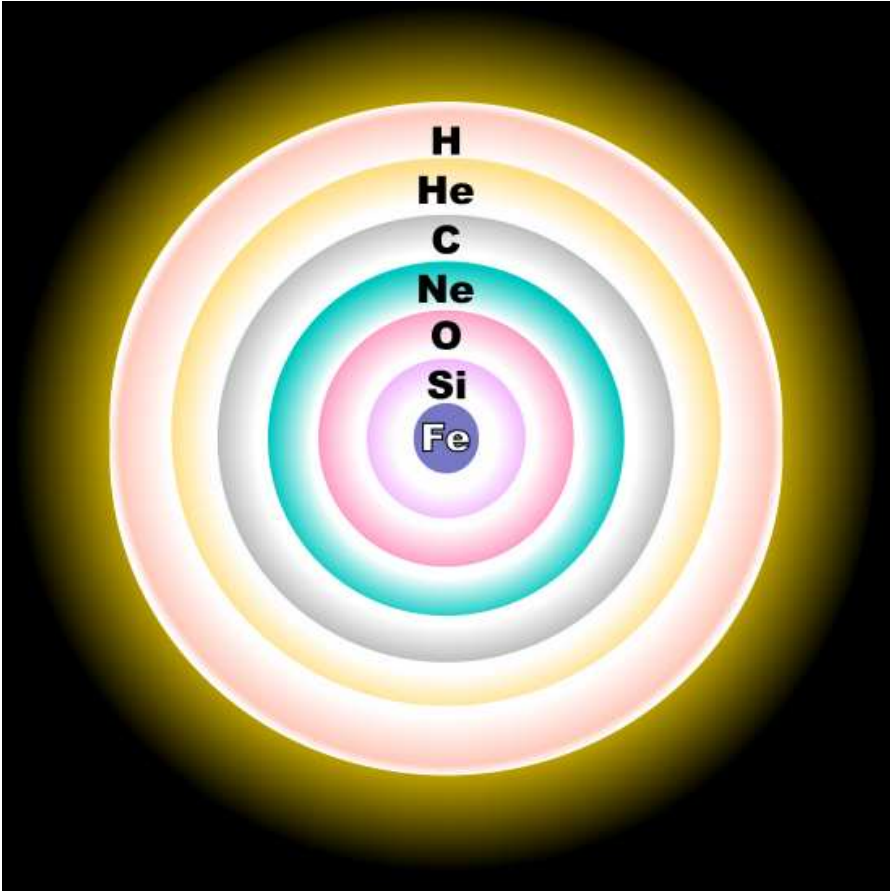
10h40': Fényjel fényképen megjelenik

Világított 1988 szeptemberéig

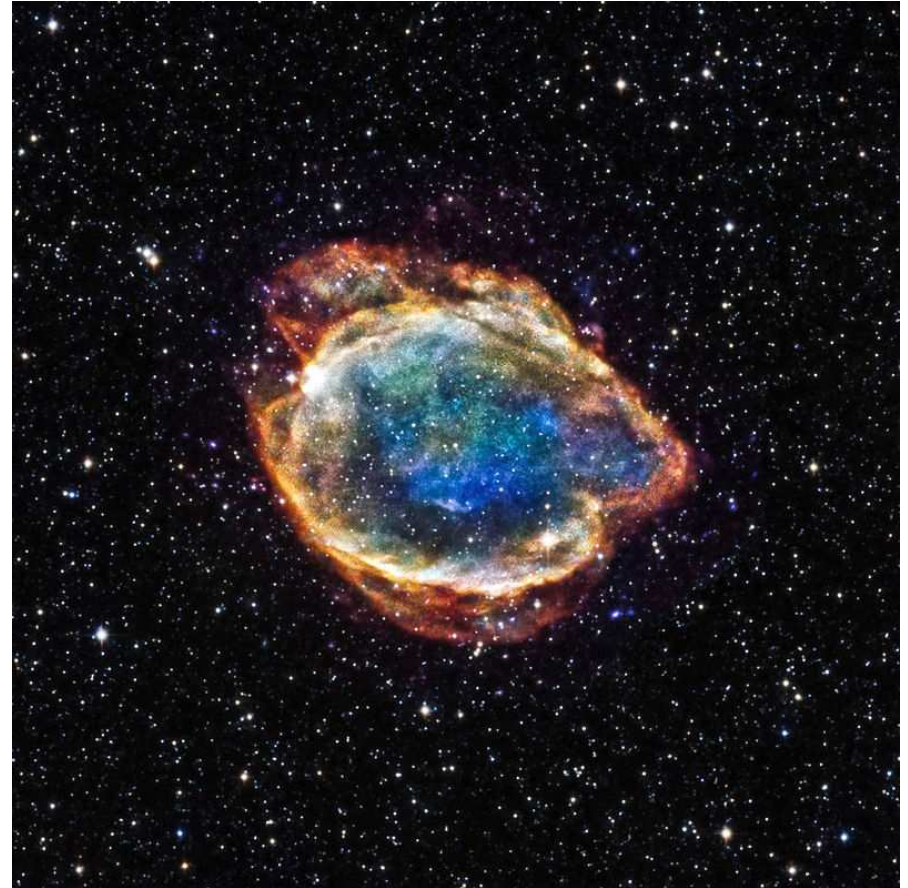


SN1987A a Tarantula-köd szélén

# Csillagok fejlődése és halála



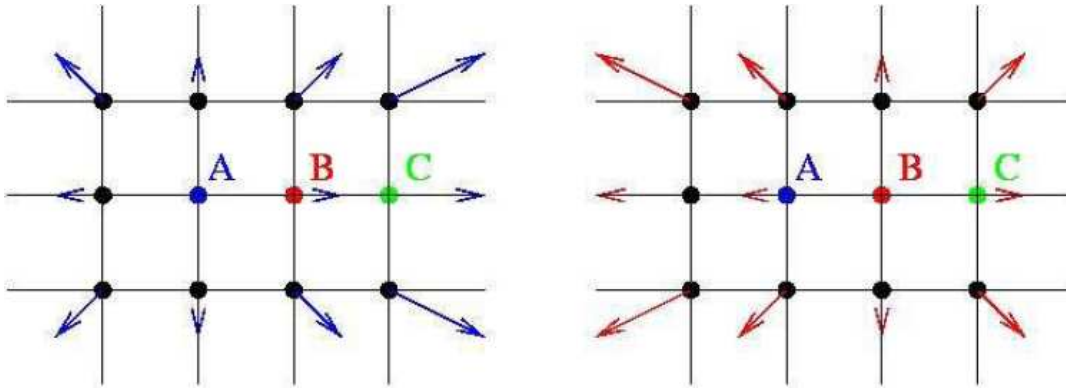
A csillagfejlődés rétegei  
(nem méretarányos!)



Szupernova (i.e. 2500, 16000 fényév)  
maradványa többféle spektroszkópiával



# Táguló világegyetem



Kozmológiai elv: Ha a tágulás lineáris

$$v(B/A) = v(C/B) \Rightarrow v(C/A) = 2v(B/A)$$

homogén világegyetem, nincs kitüntetett pont

Alexander Friedmann, 1922 és Georges Lemaître, 1927  
matematikailag Einstein elméletéből

A világegyetem tágulása a téré, táguló koordináták

Vöröseltolódás hullámhossz-növekedés,

nem Doppler-hatás???

A tér növekszik, a méterrúd nem.

Senki nem hitte el, legkevésbé Einstein



A. Friedmann



G. Lemaître

# A Hubble-állandó



Edwin Hubble, 1929:

Galaxisok távolodnak *tőlünk*

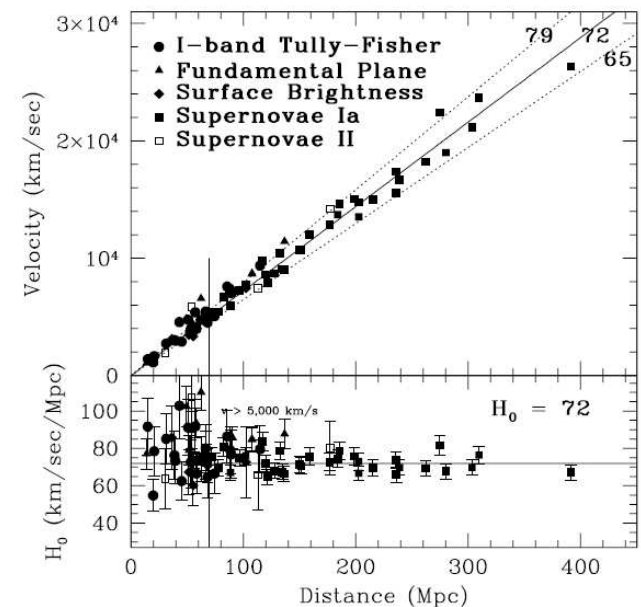
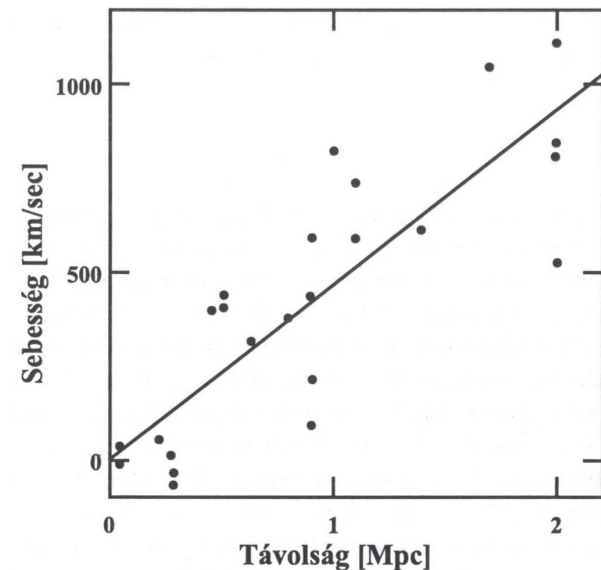
$v = Hr$  sebességgel

$H = 70$  km/s/Mpc (1 Mpc  $\approx 3 \times 10^6$  fényév)

A világegyetem kora:

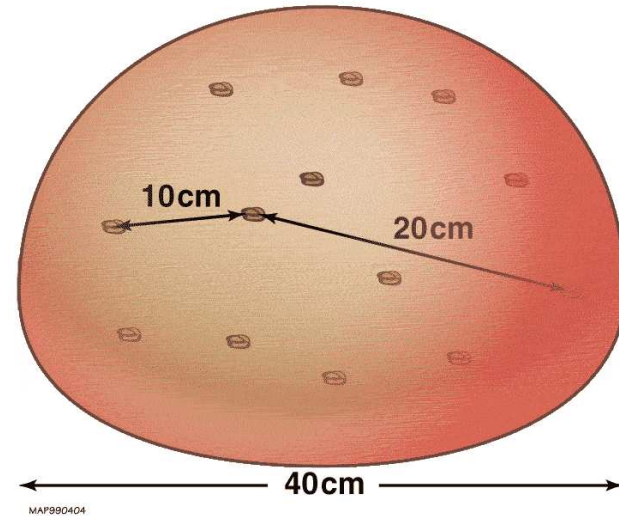
$t_0 = r/v = H^{-1} \sim 14 \times 10^9$  év

(Pedig ő sem hitt a tértágulásban!)



# Táguló világegyetem

- **Ptolemaiosz:**  
A Föld középpont
- **Kopernikusz:**  
A Nap középpont
- **Kozmológiai elv:**  
Nincs középpont



Demo: dagadó mazsolás kalács

A kelő tészta dagad, a mazsolák nem,  
bár egyre messzebbre kerülnek egymástól.

Morzsák a felfújódó lufin.

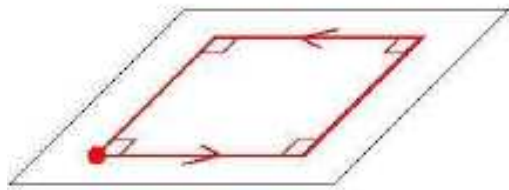
# Távolságskála görbült téridőben

Együttlmozgó polárkoordináták:  $(t, r, \Theta, \Phi)$

Euklideszi távolság:  $dl^2 = dr^2 + r^2(d\Theta^2 + \sin^2 \Theta d\Phi^2)$

Görbült térben:  $dl^2 = a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\Theta^2 + \sin^2 \Theta d\Phi^2) \right]$

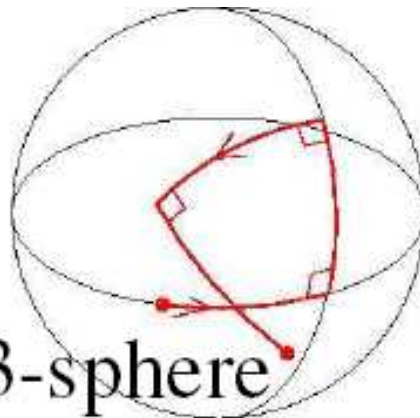
$a(t)$ : 2D téridő-görbület  $k$ : 3D térgörbület



3-plane

$$k = 0$$

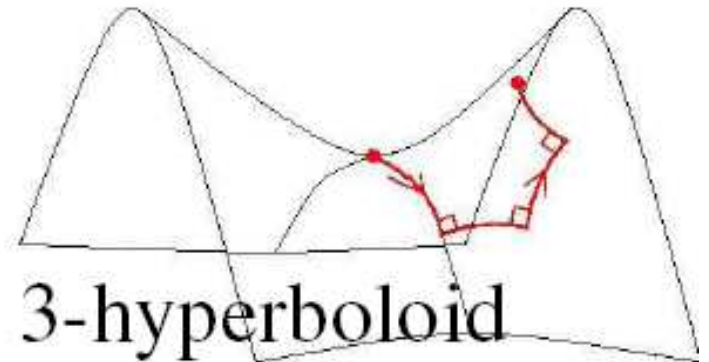
lapos univerzum



3-sphere

$$k > 0$$

zárt univerzum



3-hyperboloid

$$k < 0$$

nyílt univerzum

Kérdés: Hogyan állapítható meg, milyen görbületűben élünk?

Galaxisok távolsága  $\sim a(t) \Rightarrow$  tágulás



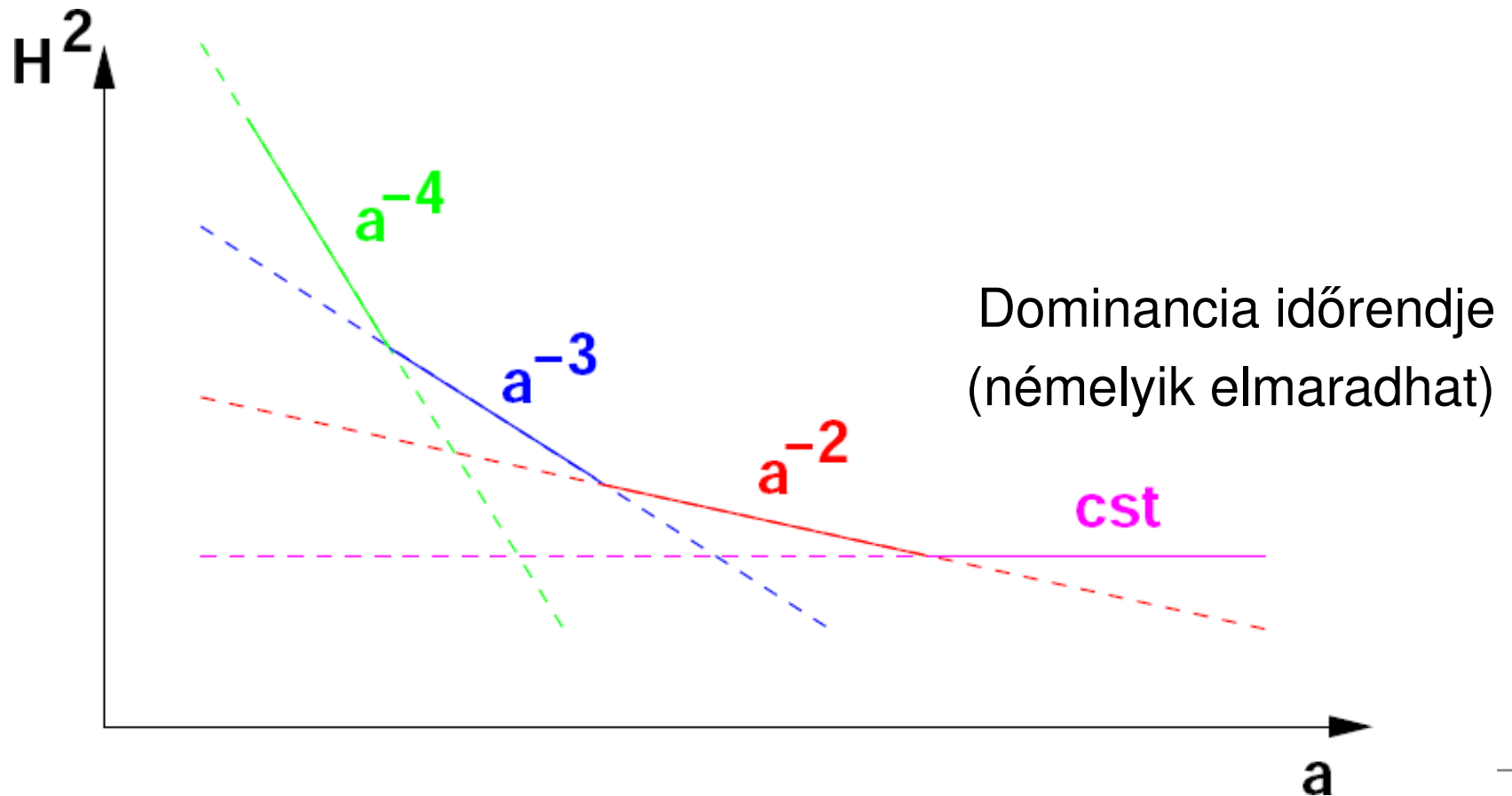
# A Friedmann-törvény

Skála-  
tényező  
változása:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \equiv H^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho_R + \frac{8\pi G}{3c^2} \rho_M - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

$\sim a^{-4}$                        $\sim a^{-3}$                        $\sim a^{-2}$                        $\sim a^0$

Sugárzás                      anyag                      görbület                      vákuum



# Sötét anyag

Spirálgalaxisok  
forgási sebessége  
kifelé nem csökken,

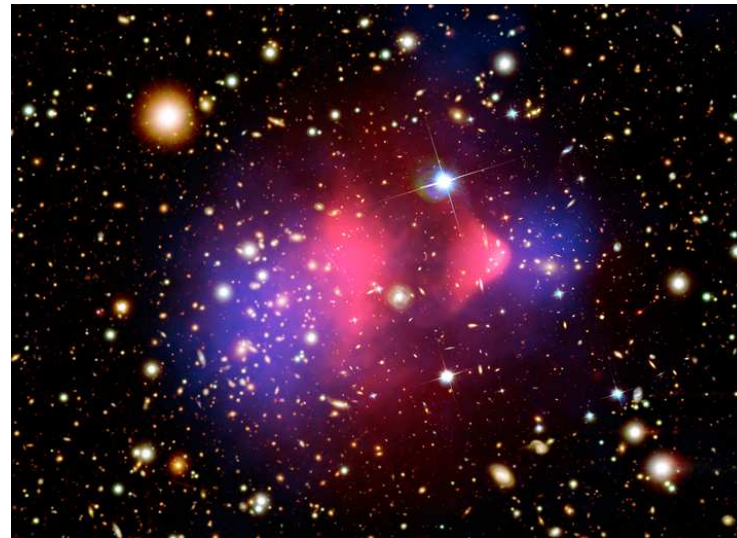
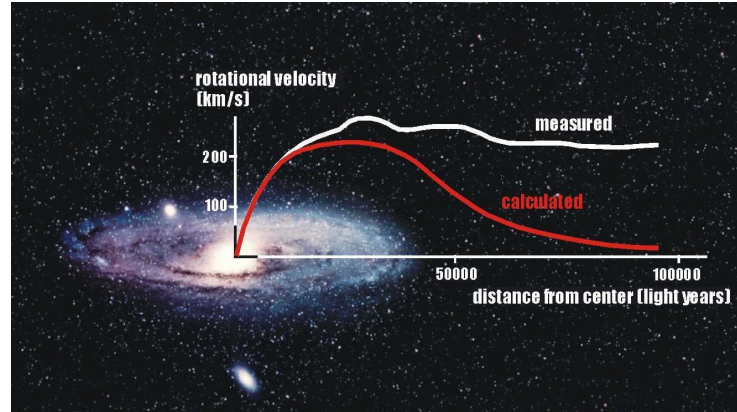
pedig Kepler II:

$$v = \frac{GM(r)}{r}$$

Sokkal több gravitáló  
anyag, mint látható  
és nem kis  
térfogatban

Sok bizonyíték

Micsoda? WIMP...



Látható  
tömegsűrűség  $\sim$   
luminozitás:

$$\rho_{\text{lum}}(r) \sim I(r)$$

DE:

$$\rho_M(r) \neq \rho_{\text{lum}}(r)!$$

Galaxisütközés:

normál anyag  
sötét anyag

(Jan Oort, 1932; Fritz Zwicky, 1933; Vera Rubin, 1966)

# Mi a sötét anyag?

A fizika egyik legnagyobb rejtélye.

Legnépszerűbb hipotézis: szuperszimmetria (SUSY)

Fermionok és bozonok párban, csak spinjük különbözik:  $(S - \frac{1}{2})$

$$Q|F\rangle = |B\rangle; \quad Q|B\rangle = |F\rangle \quad m_B = m_F$$

Kis energián sérül, partnereket nem látjuk: nagyobb tömeg?

Királis multiplettek		mérték-multiplettek	
S=1/2	S=0	S=1	S=1/2
kvarok: $q_L, q_R$	skvarok: $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$	foton: $\gamma$	fotíno: $\tilde{\gamma}$
lepton: $\ell_L, \ell_R$	slepton: $\tilde{\ell}_1, \tilde{\ell}_2$	gyenge $W^\pm$ bozonok $Z$	wino: $\tilde{W}^\pm$ zino: $\tilde{Z}$
higgszínó: $\tilde{\Phi}, \tilde{\Phi}'$	Higgs: $\Phi, \Phi'$	gluon: $g$	gluínó: $\tilde{g}$

Remek jelölt: legkönnyebb, stabil, semleges SUSY-részecske

# A SUSY sötét anyagának kérdései

Remek jelölt: legkönnyebb, stabil, semleges SUSY-fermion

Semleges mértékbozonok (Z,  $\gamma$ , 2 Higgs) SUSY-partnerei  
4 neutralínóvá keverednek, a legkönnyebb közülük  $\chi_1^0$

Kérdéseim a hallgatósághoz (válaszokat várok pénteken):

- Miért várjuk a  $\chi_1^0$ -at Majorana-részecskének (önmaga antirészecskéjének)?
- Miért terjed szét a galaxisok mögött, miért nem alkot maga is sötét galaxisokat, esetleg fekete lyukakat?
- Miért lehetséges mégis megfigyelnünk, ha nem lehet észlelni?



# Sötét energia??

Kozmológiai állandó:  $\Lambda > 0$

Einstein *legnagyobb tévedése*, mégis létezik

Vákuum gravitáló energiája, összes tömeg 70%-a!

Ősrobbanáskor nagy, korai univerzumban sokkal kisebb,  
térrel nő (Itt nincs energiamegmaradás!)

Ma dominál. Igazából micsoda?

Nem vákuum-energia:  $10^{-120}$ -szor kisebb  
(Elmélet és kísérlet eltérésére világrekord 😊)

Nem is energia, állandó egy egyenletben??

Rengeteg modell, spekuláció: inflaton, kvintesszencia...

# Anyagállapot (WMAP, 2010; PLANCK, 2015)

Friedmann-egyenletből relatív gravitáló energiasűrűségek

$$\Omega_R + \Omega_M - \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$$

Sugárzás + anyag - görbület + kozm-para = 1

Univerzum lapos, ha  $\Omega_0 = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$

Jelenleg: lapos, ( $\Omega_k \approx 0$ ),

anyag-dominálta ( $\Omega_M \gg \Omega_R$ ) világegyetem

Kozmológiai paraméterek:  $\Omega_R, \Omega_M = \Omega_B + \Omega_{\text{CDM}}, \Omega_\Lambda, H_0$

Barionos anyag (csillagok, fekete lyukak, por, gáz):

$$\Omega_B \sim 4.9\%$$

Csomósodó, nem-barionos, hideg sötét anyag:

$$\Omega_{\text{CDM}} \sim 26.8\%$$

Gyorsuló tágulás: sötét energia  $\Omega_\Lambda \sim 68.3\%$

A világegyetem kora:  $13.798 \pm 0.021$  milliárd év

# Az ősatom hipotézise

Monsignor Georges Henri Joseph  
Edouard Lemaître (1894 – 1966)  
Belga katolikus pap és fizikus  
(Leuveni Katolikus Egyetem)



G. Lemaître:

*A Világ kezdete a kvantumelmélet szempontjából,*

Nature 127 (1931) 706.

A kozmikus tojás felrobbanása a Teremtés pillanatában  
*(Tegnap nélküli nap)*

Fred Hoyle (BBC, 1949), a stabil Univerzum híve,  
szarkasztikusan: a *Big Bang (Nagy Bumm)* elmélete

# Az ősrobbanás Nobel díja, 2019

## Phillip James Edwin Peebles (Princeton Egyetem)

James Peebles hatása a fizikai kozmológiára az egész tudományos területet gazdagította és megalapozta a kozmológia átalakítását az utóbbi 50 évben spekulációból tudományba. Az elméleti keret, amelyet a hatvanas évek közepe óta fejlesztett, szolgált alapul a világegyetemről alkotott jelenlegi képünknek.



(Nobel-bizottság: indoklás)

*„Szerencsétlen dolog a kezdeteken tűnődni, amikor nincs semmiféle jó elméletünk olyasmire, hogy kezdet”*



# The Big Bang Theory (Agymenők)



The Big Bang Theory (Agymenők) fizikusa David Saltzberg (UCLA–CMS):

<https://thebigblogtheory.wordpress.com/>

# Lemaître és Einstein

Einstein 1927-ben, Lemaître levezetésére,  
hogy az általános relativitáselmélet táguló

Világegyetemet ad:

*Az Ön matematikája precíz, de a fizikája  
förtelmes*

Einstein, 1933-ban, miután Lemaître előadta  
ősatom-elméletét (habár nem hitte el):

*Ez a legszebb és legkielégítőbb  
teremtés-magyarázat, amelyet valaha  
hallottam*



Lemaître és Einstein, 1933

Fokozatosan gyűlő elméleti és kísérleti tapasztalat 30 évig

**Végső bizonyíték:** Kozmikus háttérsugárzás, 1964

# Kozmikus háttérsugárzás

Arno Penzias és Robert Wilson, 1964  
(Nobel-díj, 1978)

Különlegesen érzékeny mikrohullámú  
antennában **kiszűrhetetlen zaj**

Öncélú pontosság??

Mindig érdemes növelni a mérés  
pontosságát!

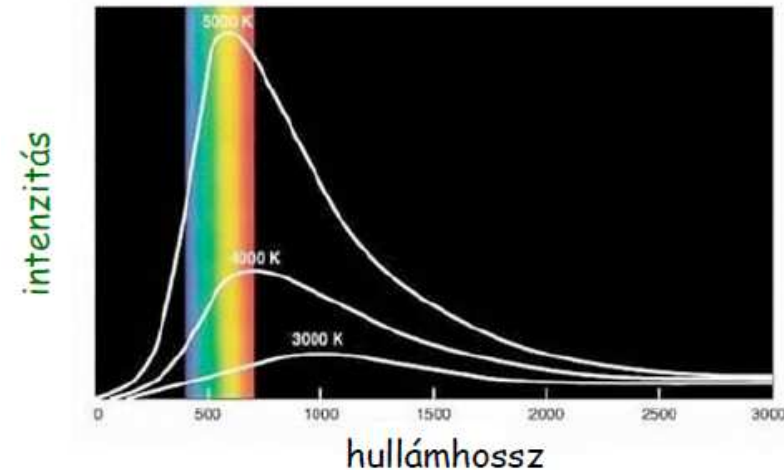
Hőmérsékleti jellegű eloszlás

Modell:  $T=3$  K kozmikus sugárzás  
Cosmic Microwave Background (CMB)

**Maradék sugárzás**

Légkör elnyel  $\lambda = 10$  cm alatt

**Irány az Űr!**



# A COBE kísérlet, 1992

COsmic Background Experiment

John C. Mather és George F. Smoot

Nobel-díj, 2006

$T = 2,728$  K, pontos (legpontosabb!)  
hőmérsékleti görbén  
eredetileg 3000 K-es fotonok lehülése  
(1000-szeres!) táguláskor

Helyi irány-anizotrópia:

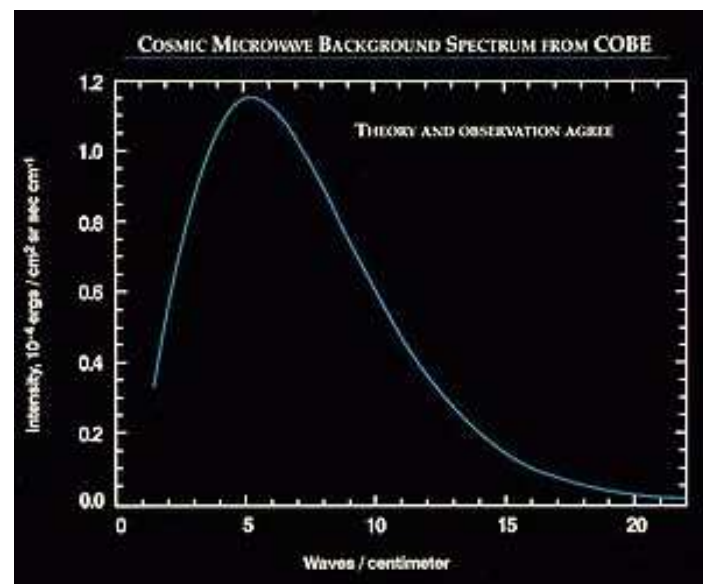
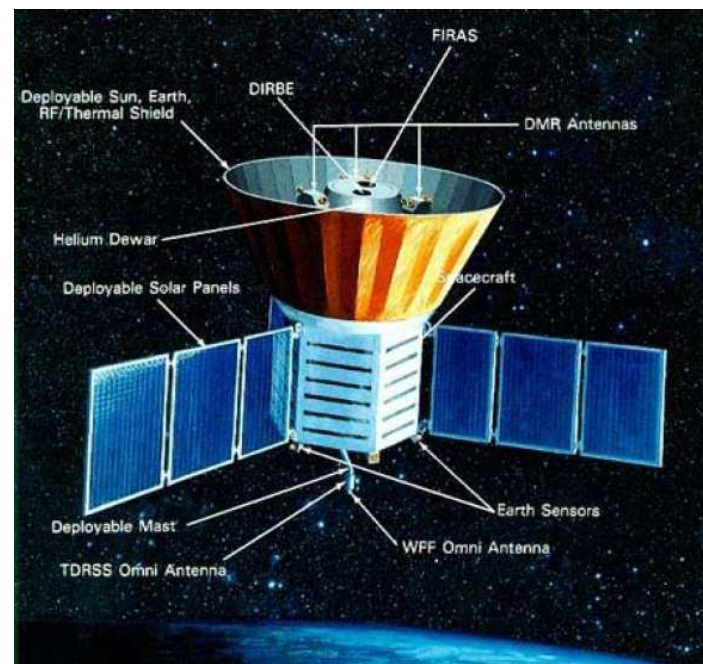
magok galaxisok kialakulásához

(Felfúvódás előtti sűrűségfluktuációk?)

Megerősítés, sokkal pontosabban:

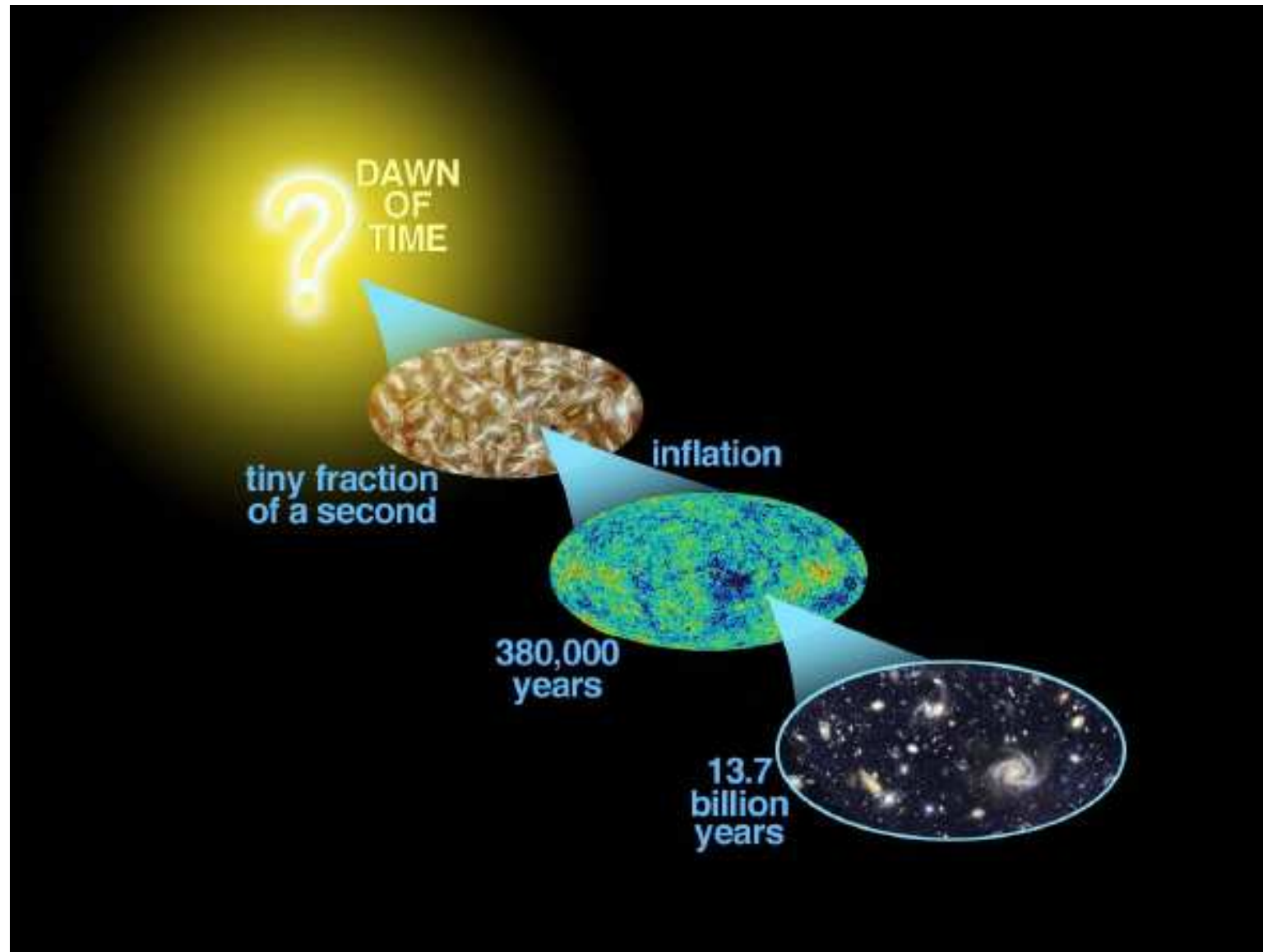
WMAP (Wilkinson Microwave  
Anisotropy Probe): 2001–2010

Planck: 2009–2013





# Ősrobbanás, felfúvódás, sugárzás



A kozmológia jelenleg elfogadott modellje