

Bevezetés a kozmológiába 1: a Világegyetem tágulása

HTP-2019, CERN, 2019 augusztus 20.

Horváth Dezső

horvath.dezso@wigner.mta.hu

MTA KFKI Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
és MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

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), ...

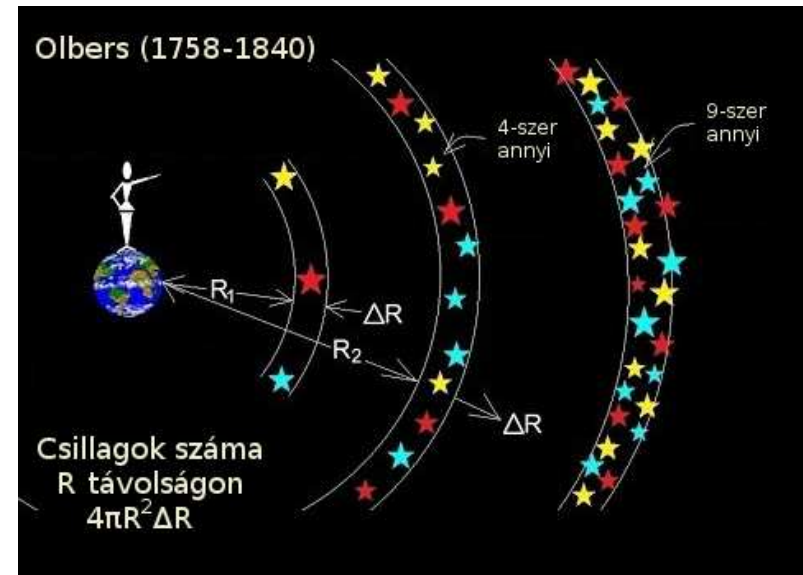
Végtelen kiterjedésű és örökké létező Világegyetem végtelen sok csillaggal \Rightarrow egyenletesen fényes égbolt éjjel-nappal, mert minden pontban csillagra nézünk

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 Világegyetem szerkezete

Nagy skálán
homogén és izotróp

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

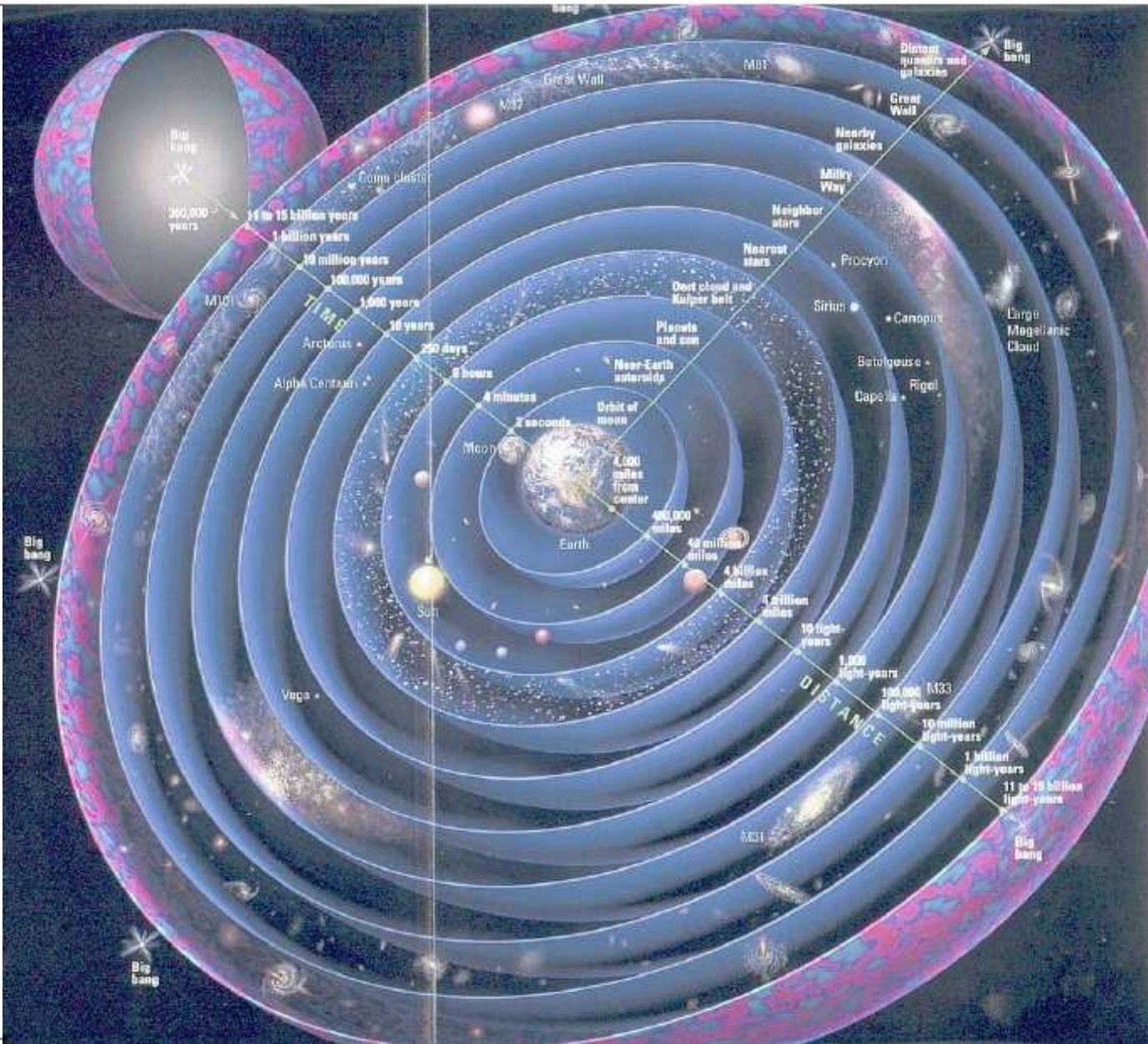
A Vela galaxis NGC3201
gömbhalmaz ~ 10000
csillaggal

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



NGC3201 gömbhalmaz

Messzebbre nézünk, korábbra látunk



*Annál mi van,
a semmi ősebb*

(Kosztolányi
Dezső:
Ének a semmiről)

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



A Hubble-teleszkóp felvételei



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 500-800 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

Távolodó galaxisok

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

λ_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

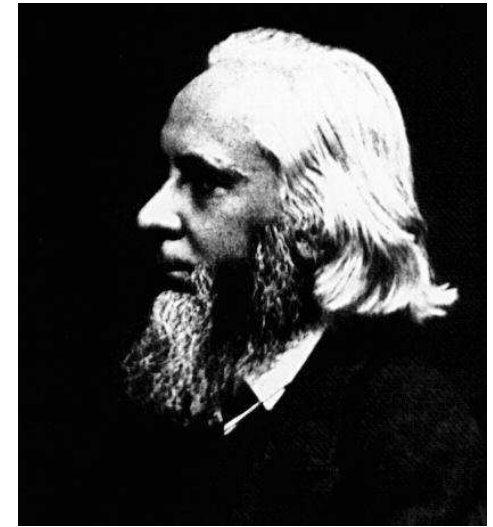
Henrietta Swan Leavitt, 1912:

Változócsillagok (cefeidák):

Kicsi \rightarrow duzzad, nagyra nőtt \rightarrow zsugorodik

periódus \sim abszolút fényesség

észlelt fényesség \Rightarrow távolság!



Változócsillagok (cefeidák)

Csillag lélegzik, mérettől függő
frekvenciával

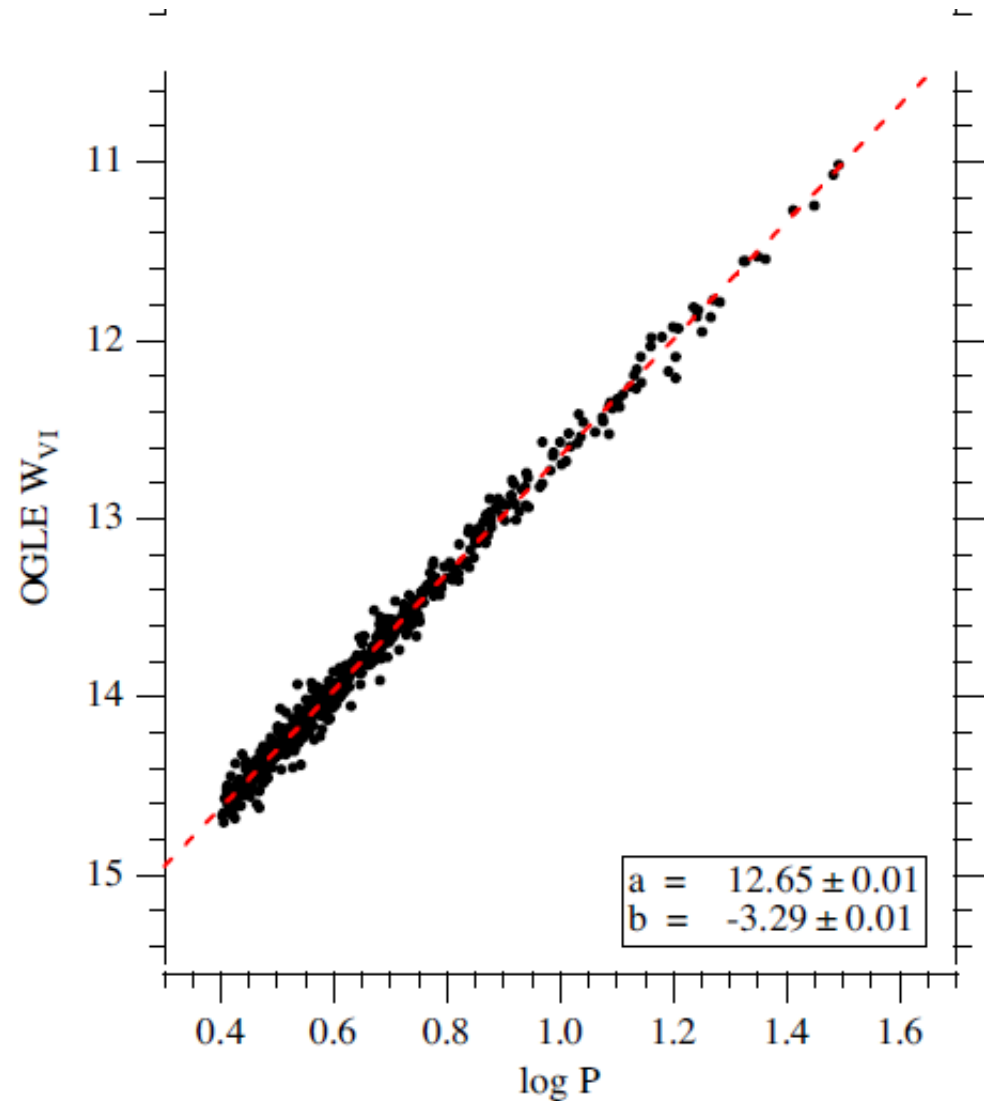
He^+ átlátszóbb, mint He^{++}

Sugárzás elnyelődik, ionizálja a gázt,
több He^{++} , felforrósodik, kitágul,
lehül, kevesebb 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:

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

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'

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

Neutroncsillag kötési energiája: 99% neutrínóban távozik

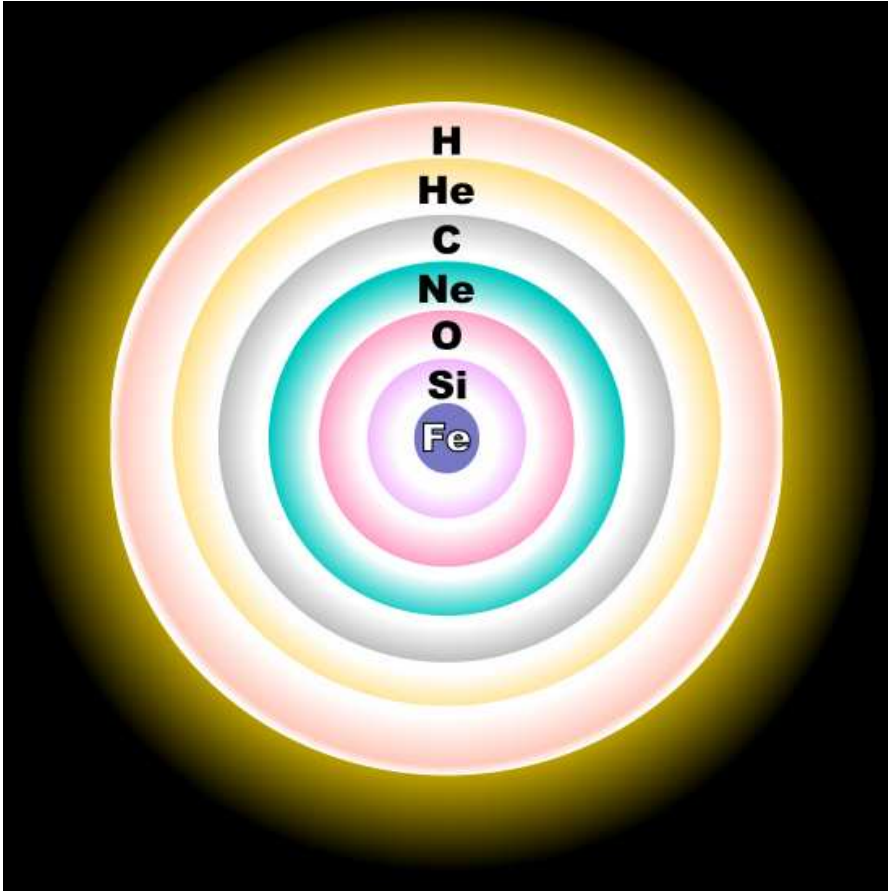
10h40': Fényjel fényképen megjelenik

Világított 1988 szeptemberéig



SN1987A a Tarantula-köd szélén

Csillagok fejlődése és halála

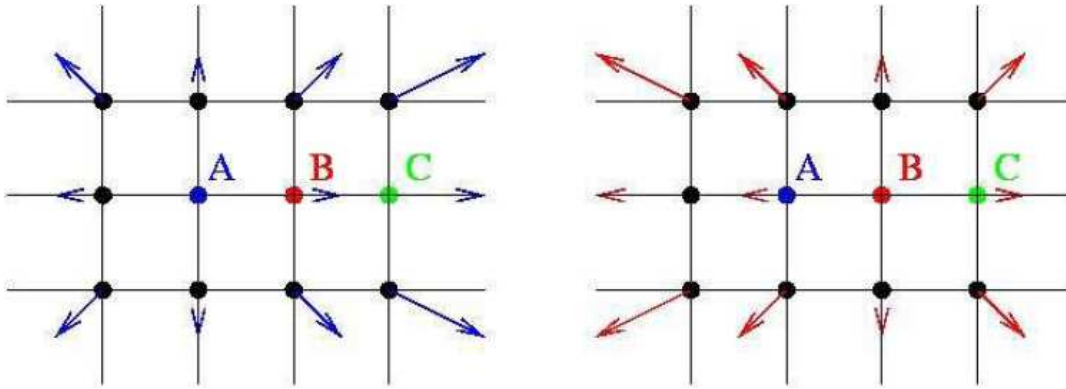


A csillagfejlődés rétegei
(nem méretarányos!)



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*

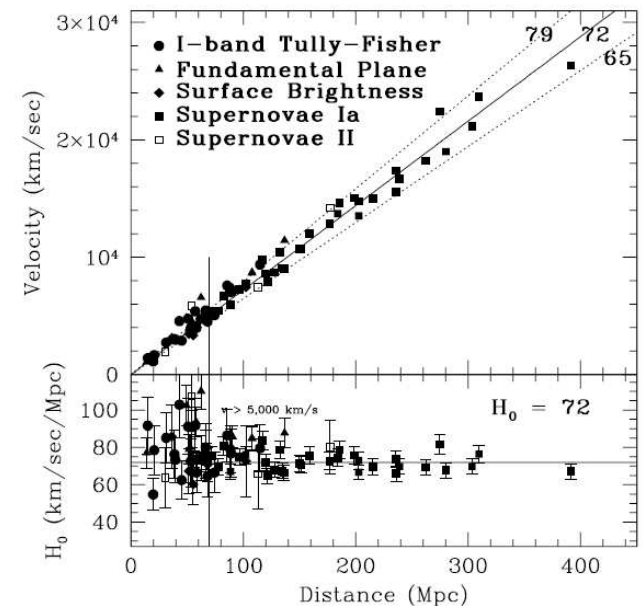
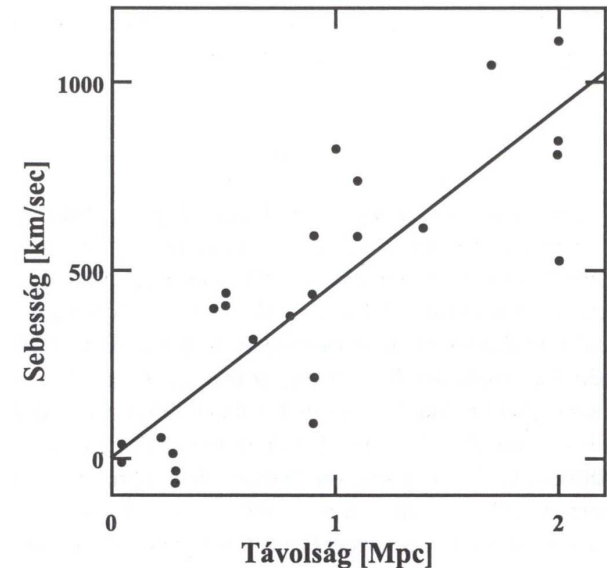
$v = Hr$ sebességgel

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

A Világegyetem kora:

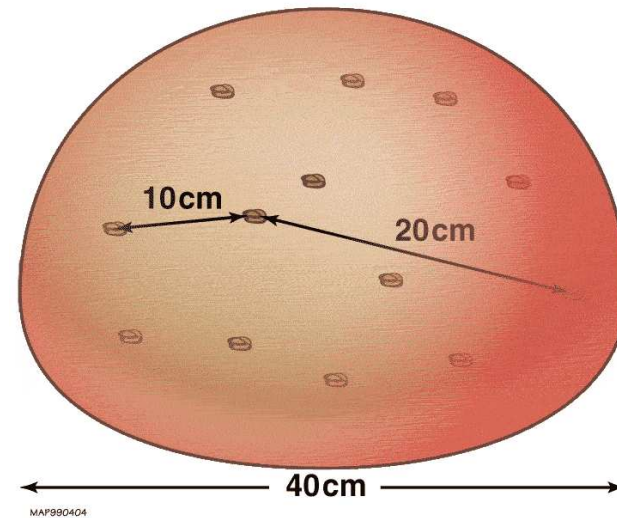
$t_0 = r/v = H^{-1} \sim 14 \times 10^9$ év

(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.

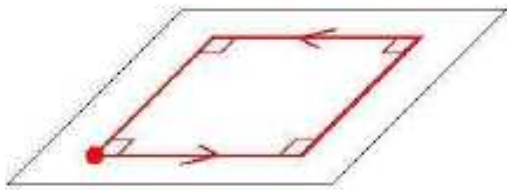
Távolságskála görbült téridőben

Együttlmozgó polárkoordináták: (t, r, Θ, Φ)

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

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

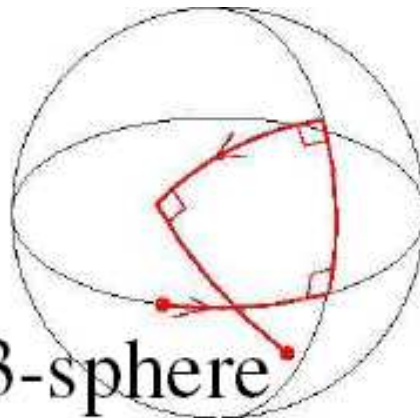
$a(t)$: 2D téridő-görbület k : 3D térgörbület



3-plane

$$k = 0$$

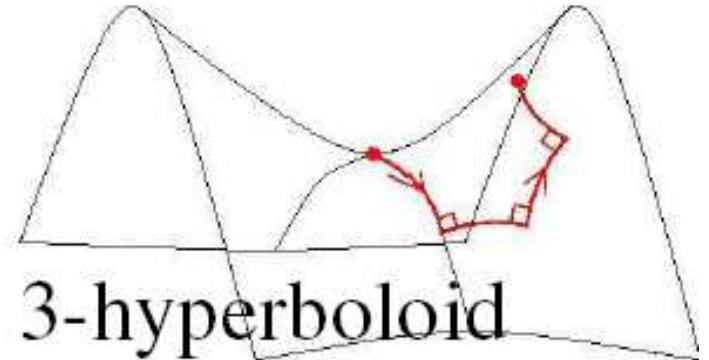
lapos univerzum



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

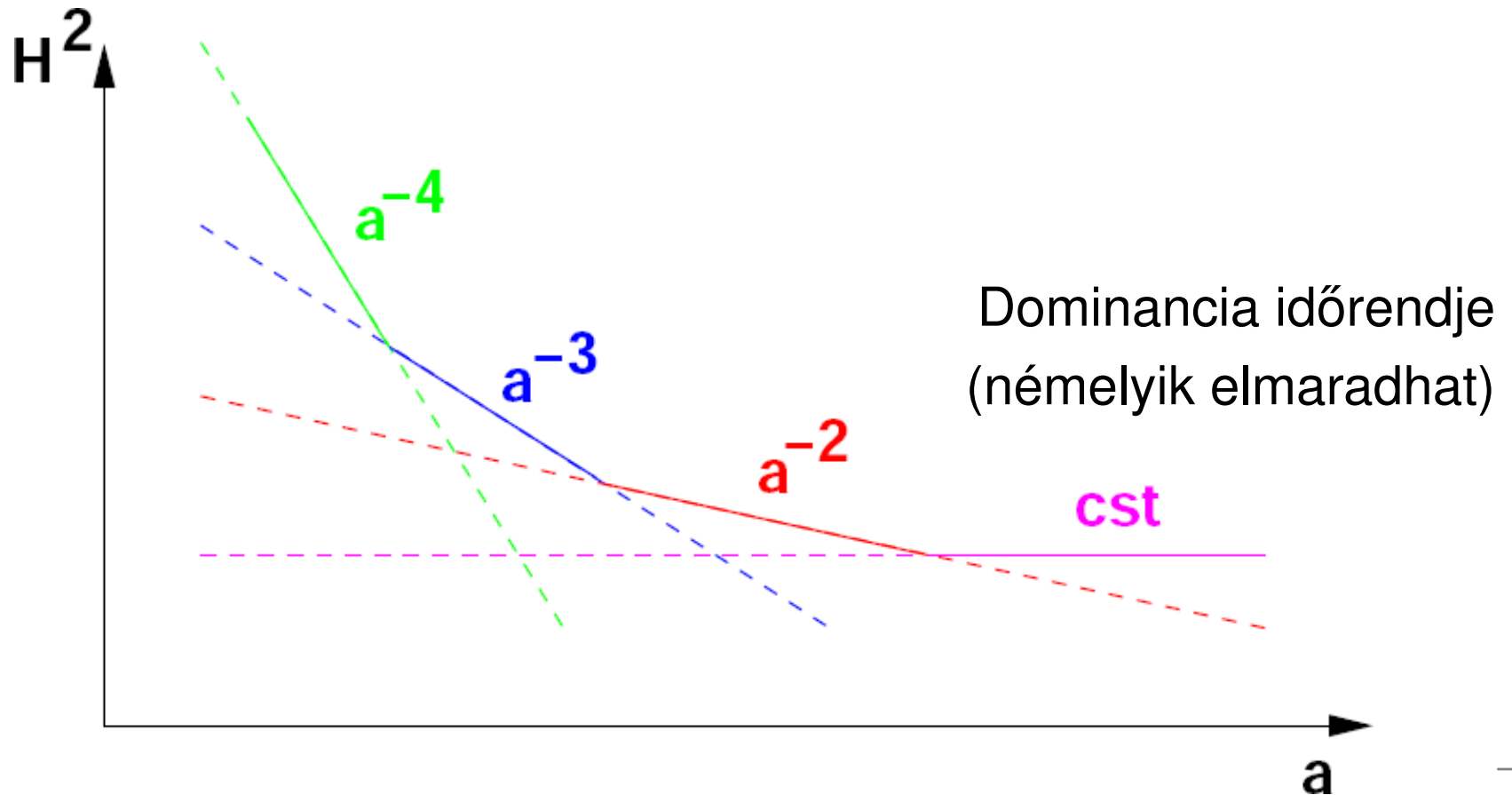
A Friedmann-törvény

Skála-
tényező
változása:

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

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

Sugárzás anyag görbület vákuum



Sötét anyag

Spirálgalaxisok
forgási sebessége
kifelé nem csökken,

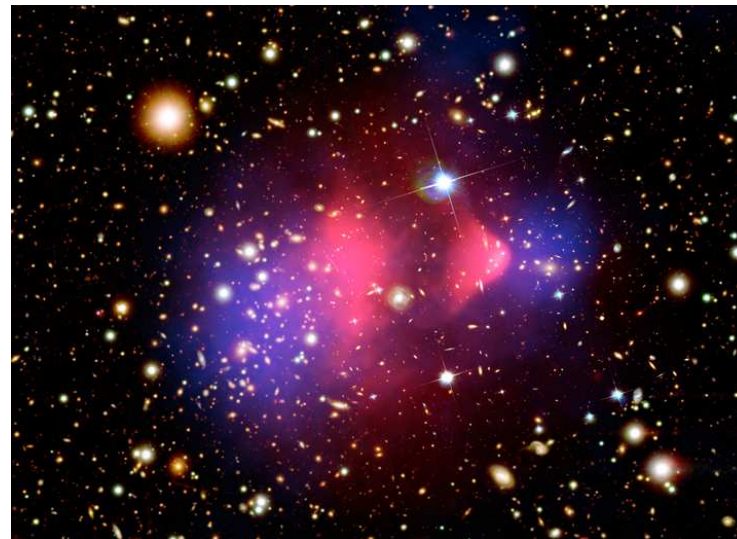
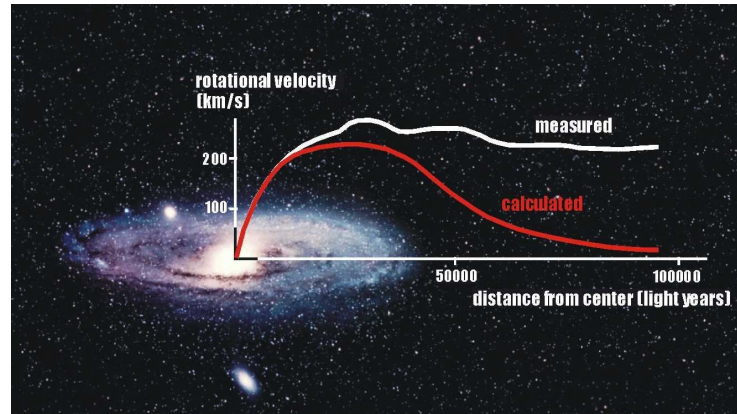
pedig Kepler II:

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

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: γ	fotíno: $\tilde{\gamma}$
lepton: ℓ_L, ℓ_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: Φ, Φ'	gluon: g	gluínó: \tilde{g}

Remek jelölt: legkönnyebb, stabil, semleges SUSY-részecske

A SUSY sötét anyagának kérdései

Remek jelölt: legkönnyebb, stabil, semleges
SUSY-részecske: **Neutralínó, χ_1^0**

- Miért várjuk Majorana-részecskének (önmaga antirészecskéjének)?
- Miért terjed szét a galaxisok mögött, miért nem alkot maga is sötét galaxisokat, esetleg fekete lyukakat?
- Miért várjuk, hogy megleljük, 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):

$$\Omega_B \sim 4.9\%$$

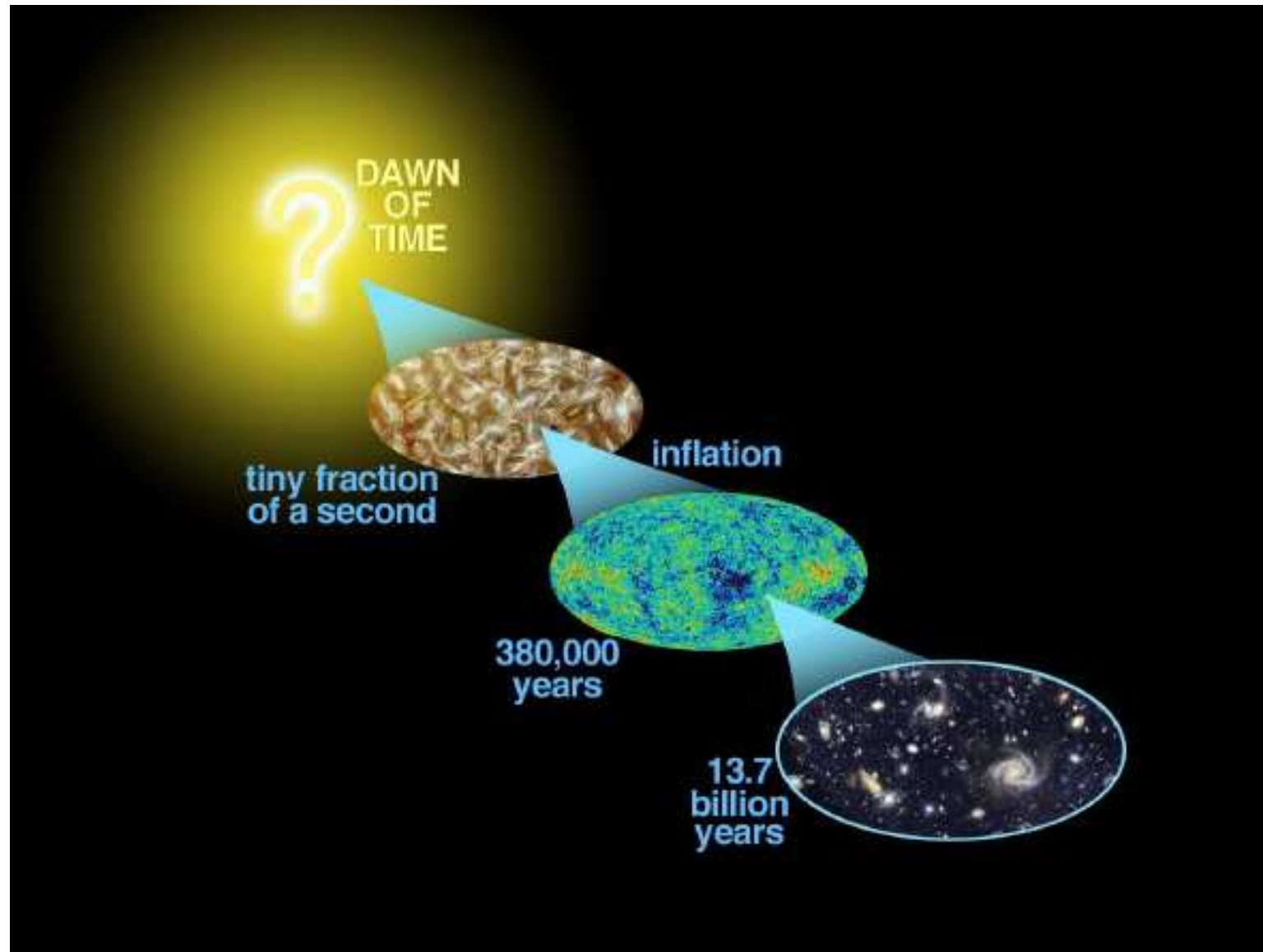
Csomósodó, nem-barionos, hideg sötét anyag:

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

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

A Világegyetem kora: 13.798 ± 0.021 milliárd év

Ősrobbanás, felfúvódás, sugárzás



A következő előadásban...