

Bevezetés a kozmológiába 1: a Világegyetem tágulása

HTP-2011, CERN, 2011 augusztus 17.

Horváth Dezső

horvath@rmki.kfki.hu

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, 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.

Előszó

A fizika egzakt tudomány (*képletgyűjtemény!*)

- A fizika univerzális nyelve a matematika, pontos matematikai formalizmuson alapszik.
- Egy elmélet érvényes, ha kiszámítható mennyiségeket ad, és a számítások eredménye egyezik a kísérleti tapasztalattal.
- Az igazi fogalmak mérhető mennyiségek, a szavak csak mankók.

Szavak mögött pontos matematika és kísérleti tapasztalat

Alapkérdés: milyen pontossággal adja vissza az elméleti számítás a mérések eredményét?

Számítás nélkül nincs fizika, csak spekuláció....
és a fizika kísérleti tudomány!

Mi a kozmológia?

A Világegyetem egészével foglalkozik.

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

Rejtély: Miért van éjjel sötét?

Olbers paradoxonja, 1823

(Előtte Kepler, 1610; Halley, 1721 és Cheseaux, 1744)

Végtelen kiterjedésű és örökké létező Világegyetem
végtelen sok csillaggal



egyenletesen fényes égbolt éjjel-nappal, mert minden
pontban csillagra nézünk

(fényesség $\sim 1/r^2$, sűrűség $\sim r^2$, por melegszik)

Sötét éjszaka \Rightarrow véges méretű és/vagy korú Világegyetem.

A Világegyetem véges!

A Világegyetem szerkezete

Nagy skálán
homogén és izotróp

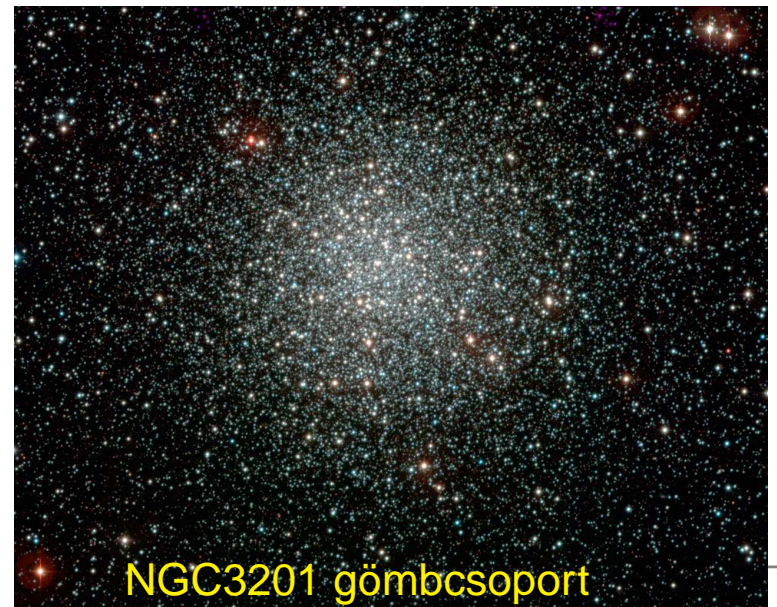
Kis (?) skálán látunk:

$\sim 10^{11}$ galaxist

galaxisonként $\sim 10^{11}$ csillagot

A Vela galaxis NGC3201
gömbcsoportja ~ 10000
csillaggal

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



A Hubble-teleszkóp

Felőve: 1990.04.24

Tömeg: 11110 kg

Közel körpálya,
magassága: 559 km

Keringés: 96–97 perc

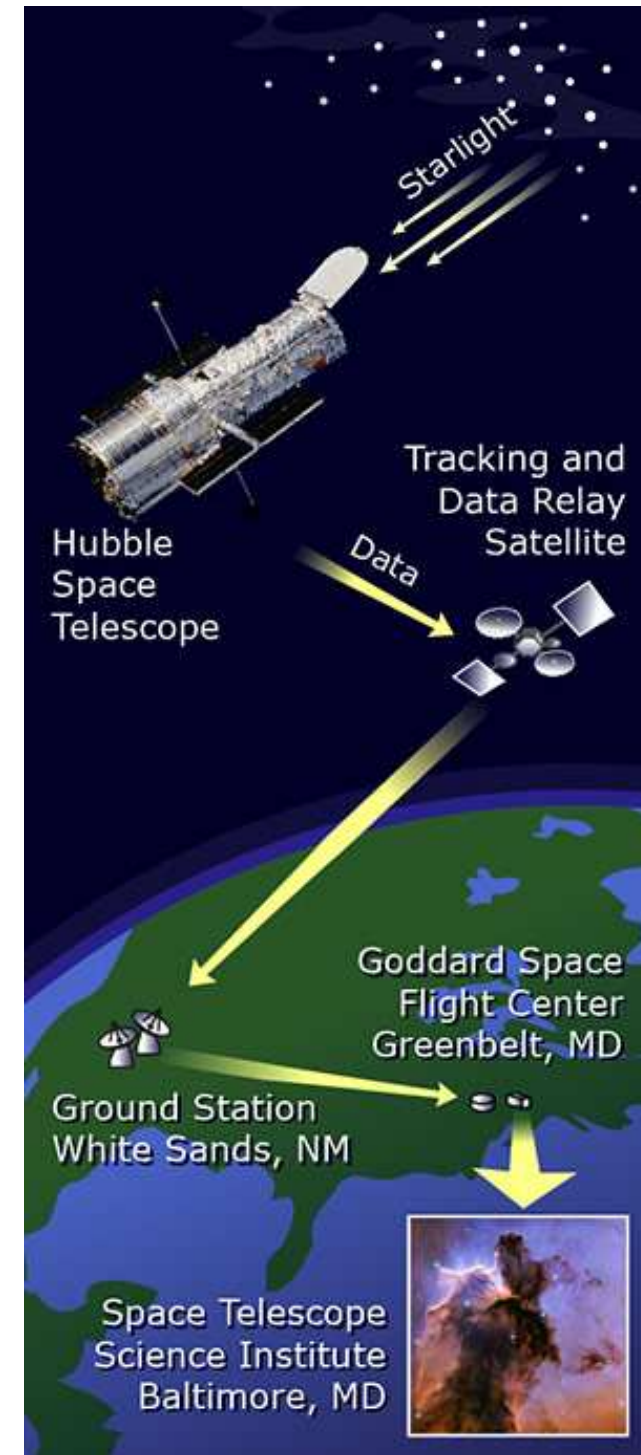
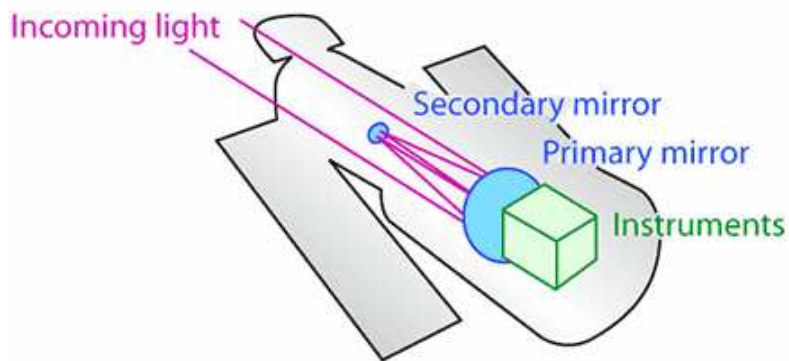
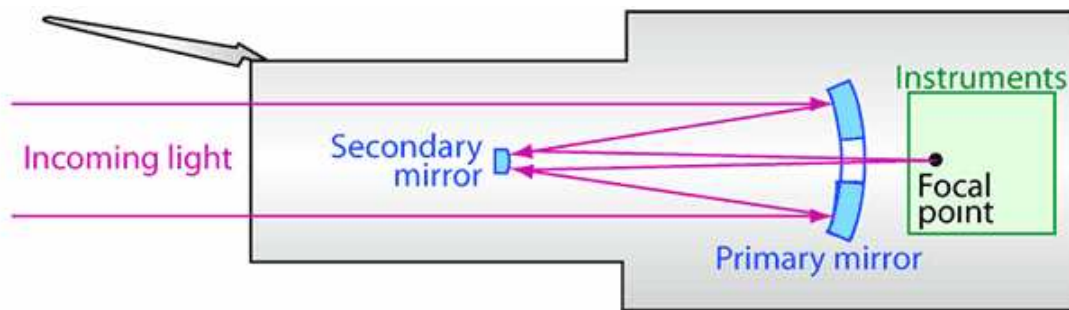
Átmérő: 2,4 m

Fókuszta: 57,6 m

Érzékeny
hullámhosszak:
Közeli infravörös
optikai (látható)
ultraibolya



A Hubble-teleszkóp működése

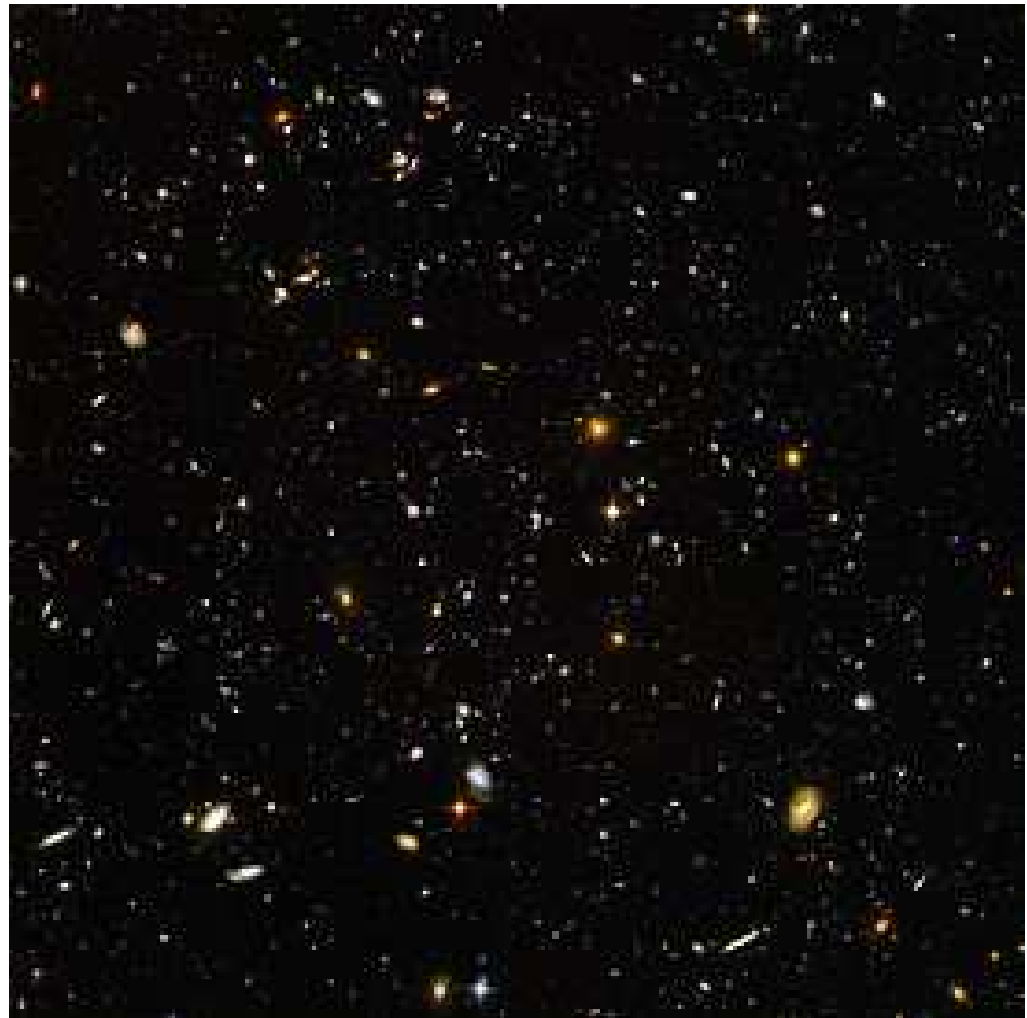


A Hubble-teleszkóp javítása az űrben



1993 óta több javítási akció:
tükörkorrekció, giroszkópcseré (6!), műszerek cseréje

Hubble-teleszkóp: a Világegyetem mélye



250 nap 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^{10} évvel fiatalabb galaxisok

Távolodó galaxisok

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

λ_v : hullámhossz v sebességnél

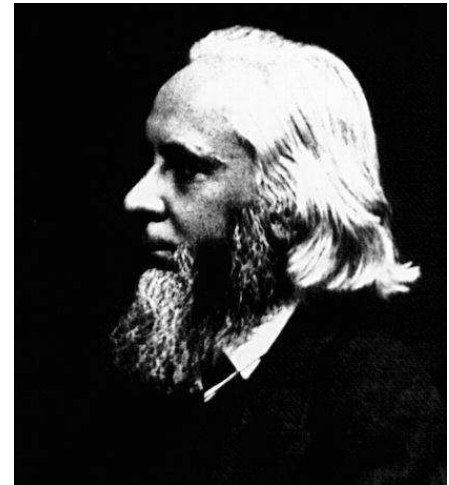
Közeledő motor hangja magasabb, távolodóé mélyebb

William Huggins, 1868:

csillagok szinképében

$z > 0$: vörösetolódás

Tőlünk távolodó objektum
fényhullámhossza nő \Rightarrow vörösebb



Henrietta S. Leavitt, 1920:

Változócsillagok (cefeidák)
periódusa \sim abszolút fényessége
észlelt fényesség \Rightarrow távolság!



Változócsillagok (cefeidák)

Csillag lélegzik, mérettől függő
frekvenciával

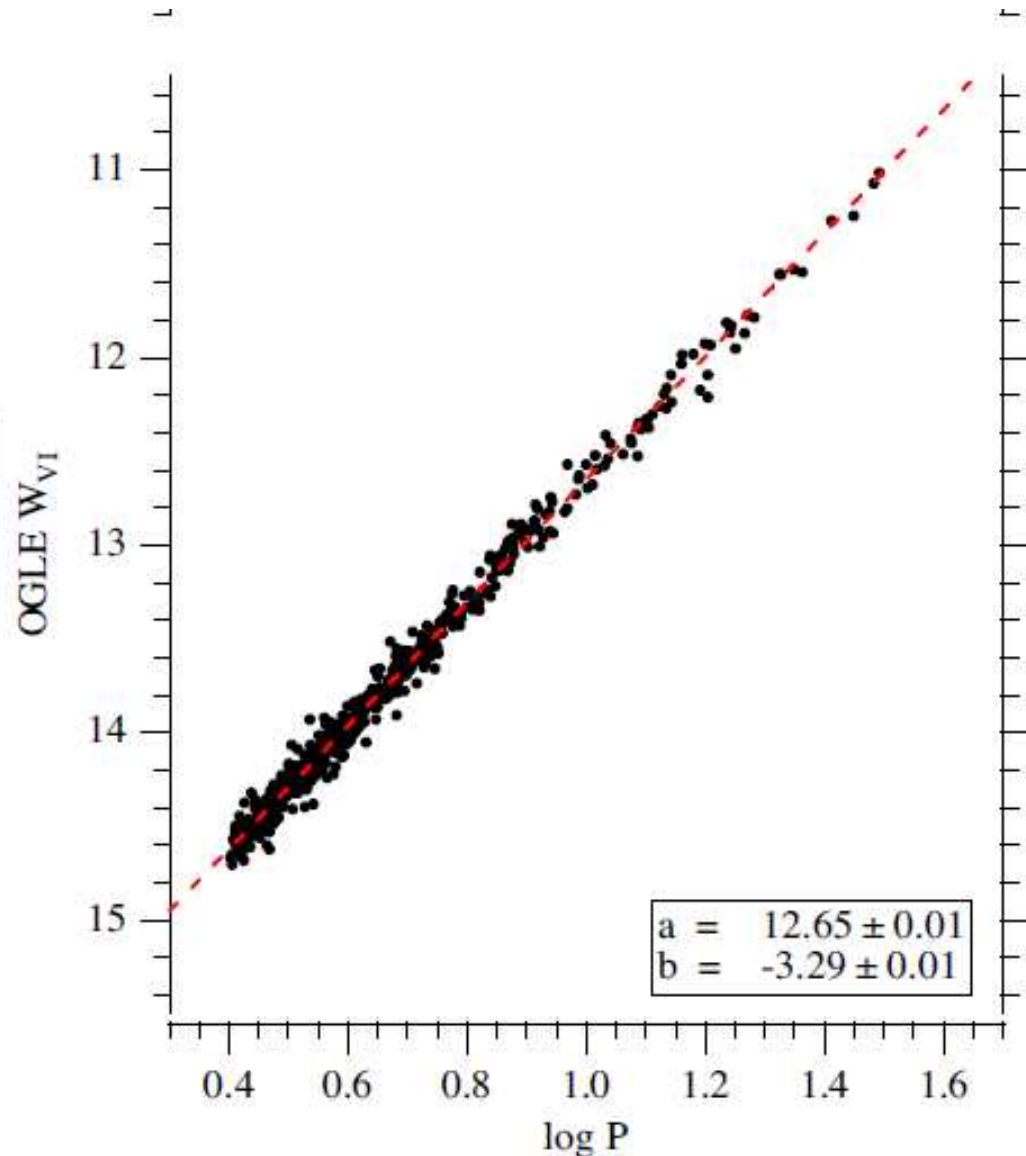
He^+ átlátszóbb, mint He^{++}

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

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)

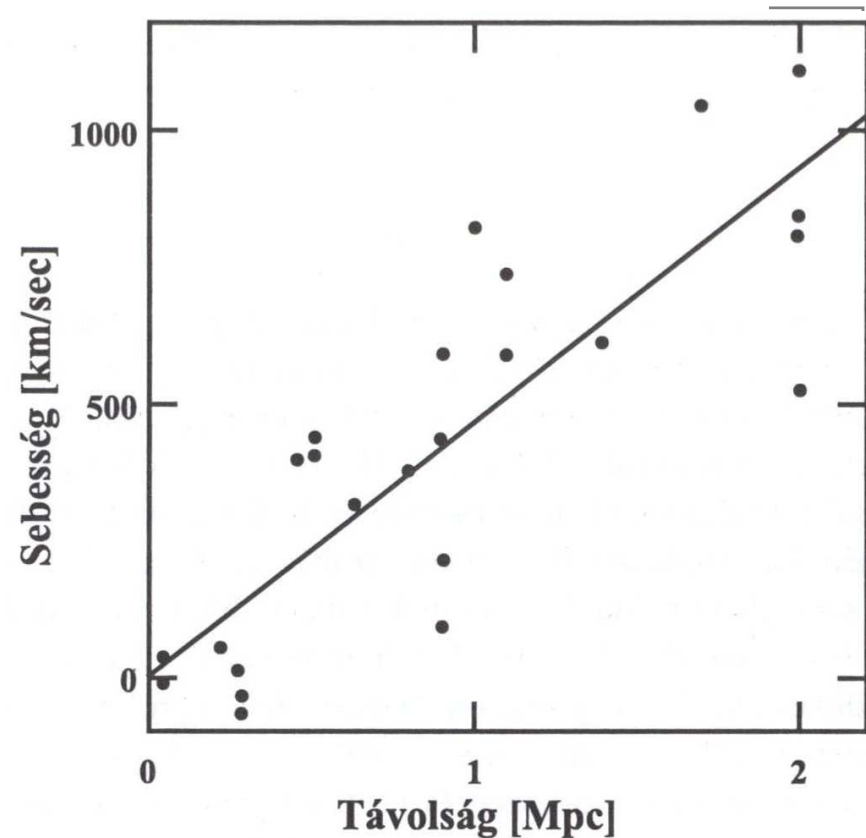
Távolságlétra:

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

A Hubble-állandó



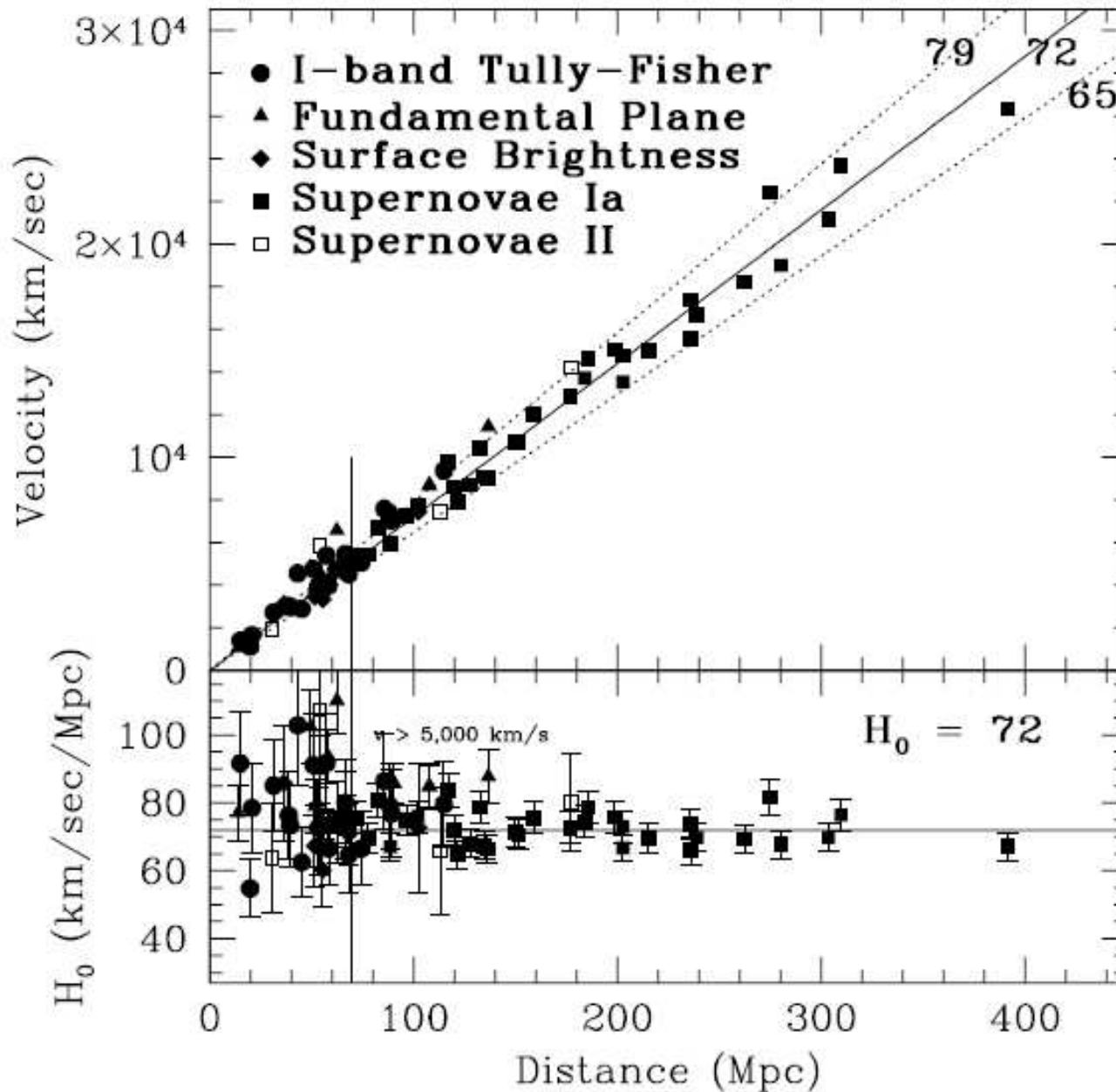
Edwin Hubble, 1929:
Galaxisok távolodnak *tőlünk*
 $v = Hr$ sebességgel



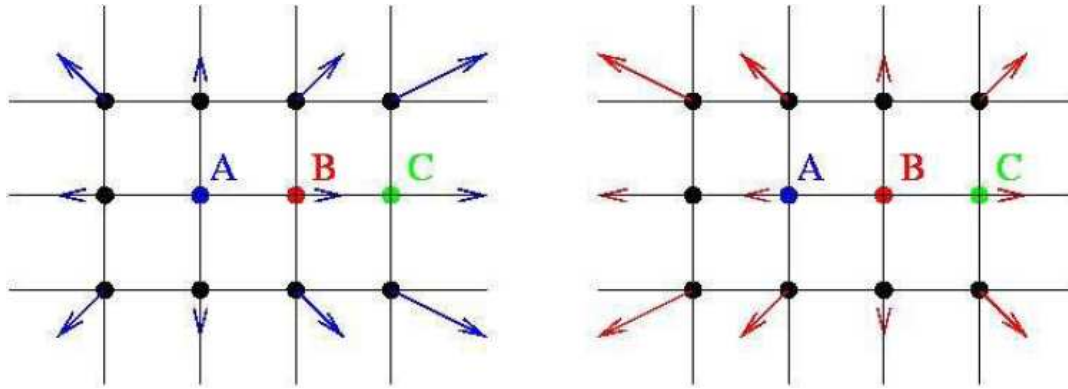
$H = 70 \text{ km/s/Mpc}$ (1 Mpc $\approx 3 \times 10^{22} \text{ m} \approx 3 \times 10^6$ fényév)
1 pc (parsec): távolság, ahonnan a Nap-Föld távolság
1 szögmp alatt látszik)

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

Hubble-teleszkóp: v vs. r



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



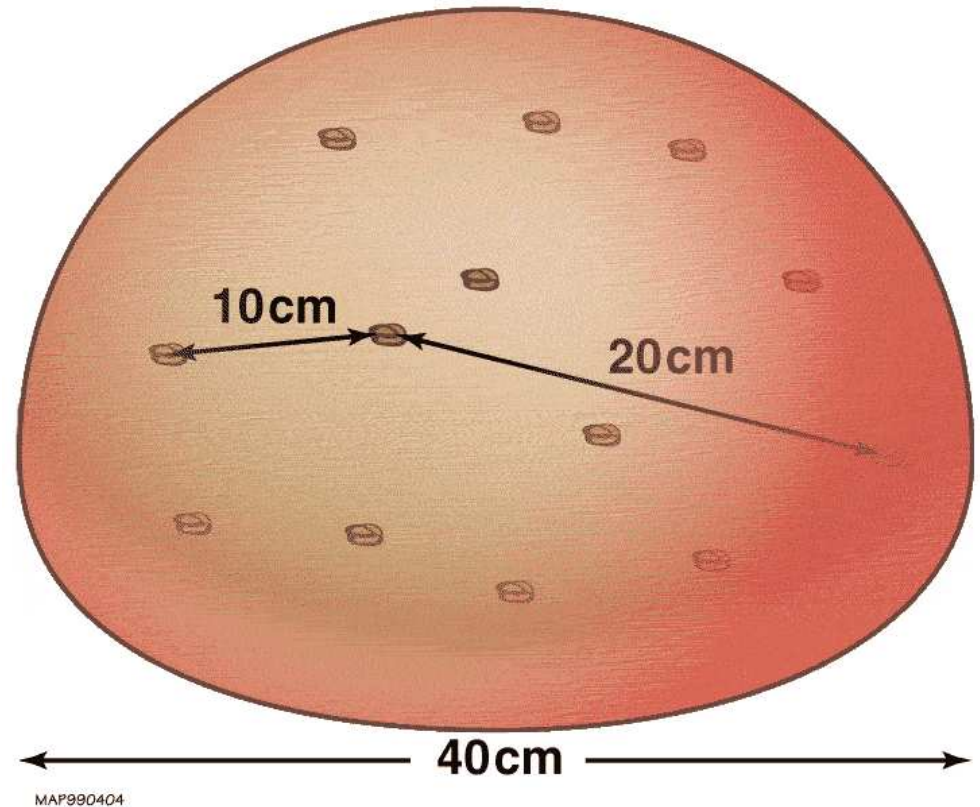
A. Friedmann



G. Lemaître

Táguló világegyetem

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



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

Távolságskála görbült téridőben

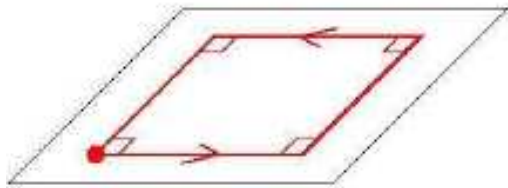
Együttlmozgó koordináták: (t, r, Θ, Φ)

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

Görbült térben:

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

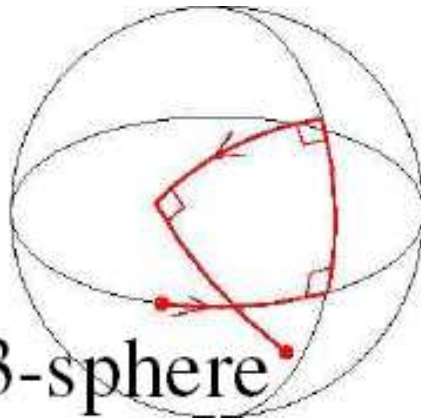
$a(t)$: 2D téridő-görbület k : 3D térgörbület



3-plane

$$k = 0$$

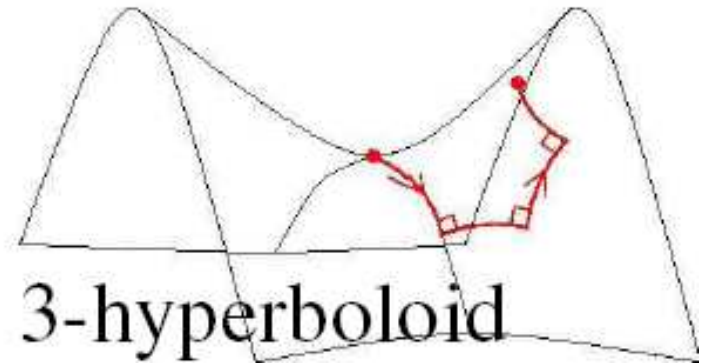
lapos univerzum



3-sphere

$$k > 0$$

zárt univerzum



3-hyperboloid

$$k < 0$$

nyílt univerzum

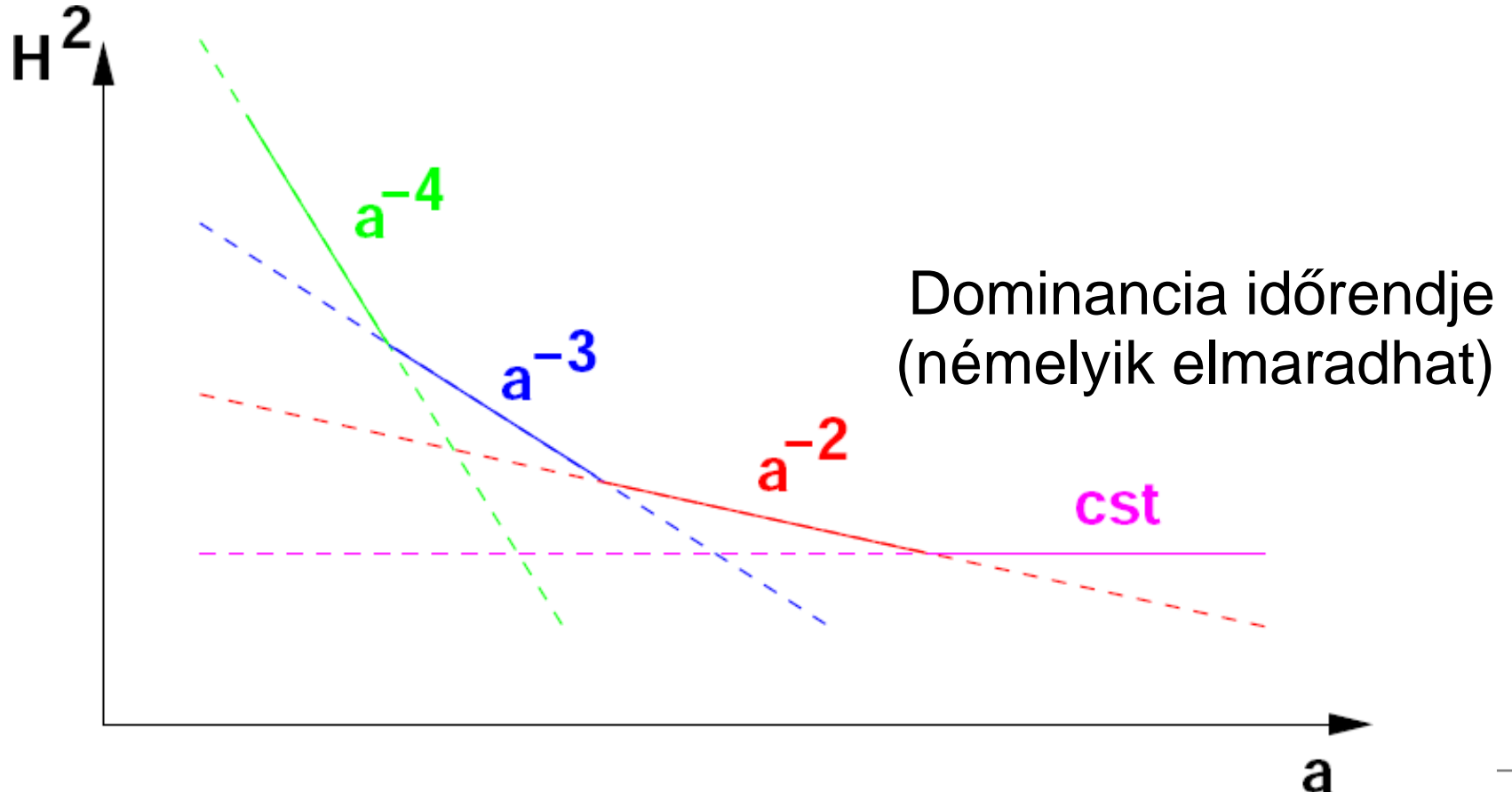
Galaxisok távolsága $\sim a(t) \Rightarrow$ tágulás

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

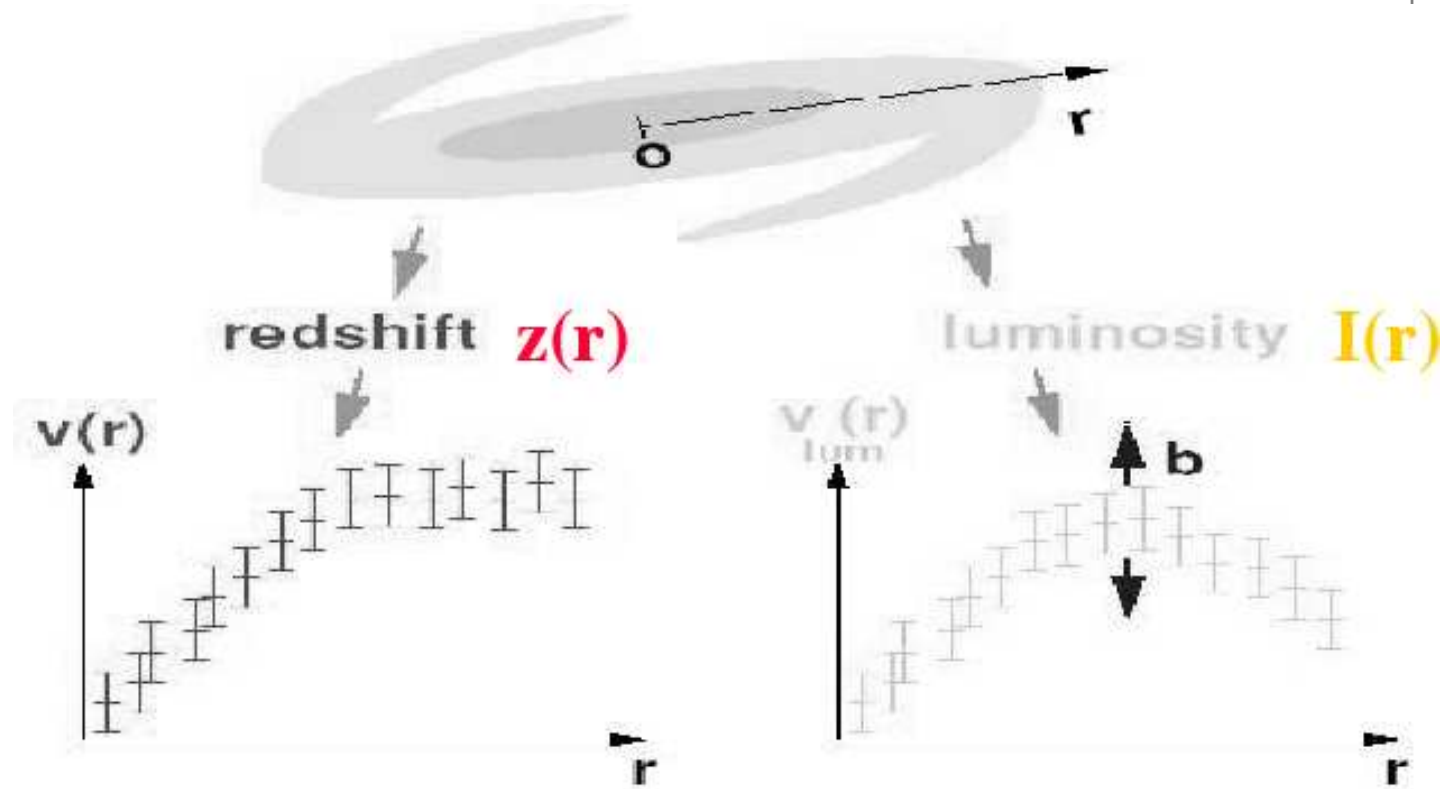
Spirálgalaxisok
forgási
sebessége kifelé
nem csökken,

pedig Kepler II:

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

Sokkal több
gravitáló anyag,
mint látható
és nem kis
térfogatban

Micsoda?
WIMP...



Látható tömegsűrűség \sim luminozitás:

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

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

Sötét energia??

Kozmológiai állandó: $\Lambda > 0$

Einstein *legnagyobb tévedése*, mégis létezik

Vákuum gravitáló energiája, összes tömeg 70%-a!

Ősrobbanás után nagy, korai univerzumban sokkal kisebb, térrel nő

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...



Anyagegyensúly ma

Friedmann-egyenletből (X_0 : mai érték, $/H_0^2$)

$$\frac{8\pi G}{3H_0^2 c^2} (\rho_{R0} + \rho_{M0}) - \frac{kc^2}{a_0^2 H_0^2} + \frac{\Lambda}{3H_0^2} \equiv$$
$$\Omega_R + \Omega_M - \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$$

Relatív gravitáló energiasűrűségek

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

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

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

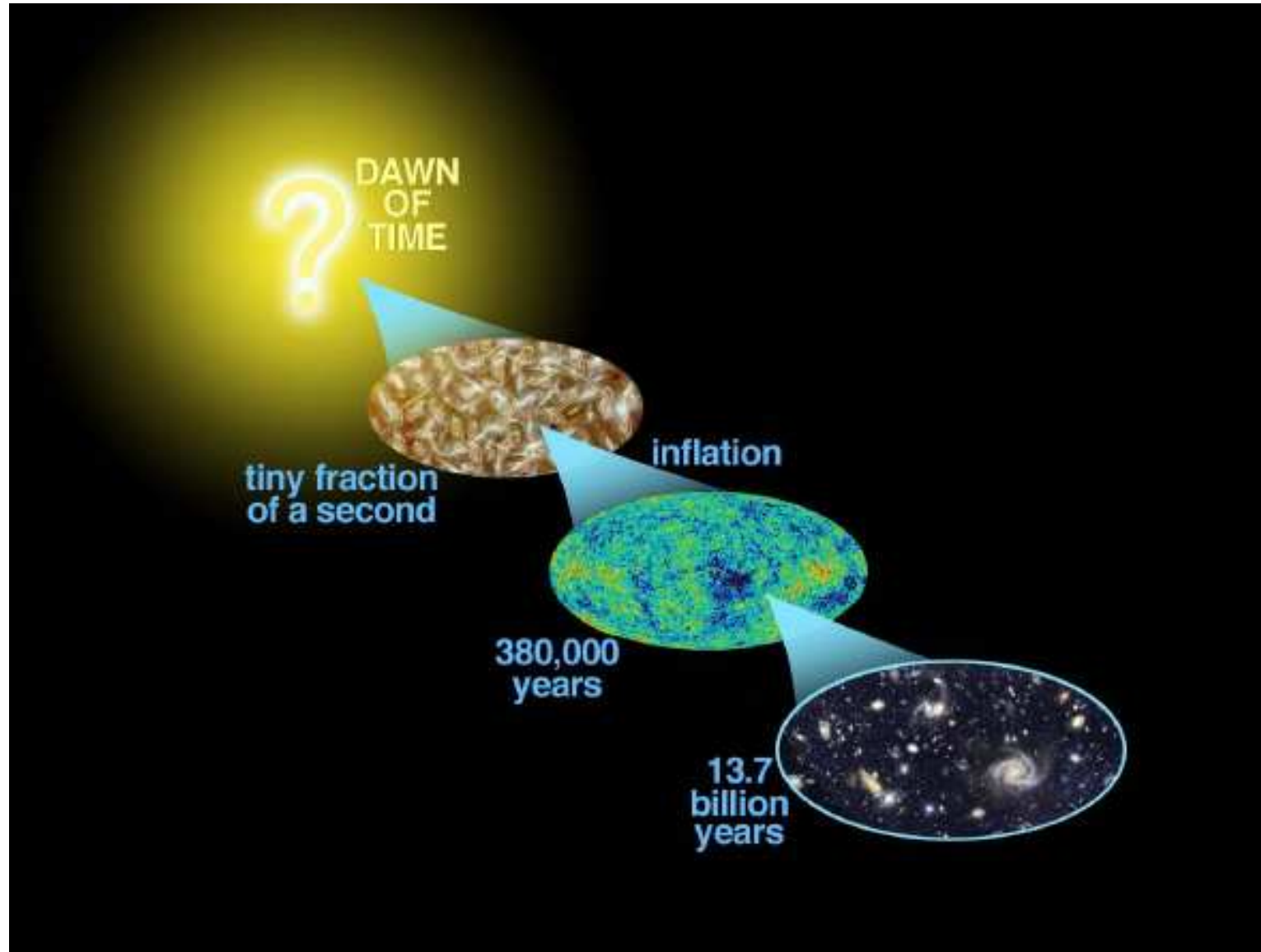
$$\Omega_B \sim 4\%$$

Csomósodó, nem-barionos, hideg sötét anyag:

$$\Omega_{\text{CDM}} \sim 26\%$$

Gyorsuló tágulás: sötét energia $\Omega_\Lambda \sim 70\%$

Ősrobbanás, felfúvódás, sugárzás



A következő előadásban...