Sztenderd kozmológia sötét energia nélkül

AvERA: Average Expansion Rate Approximation

Rácz Gábor, Dobos László, Beck Róbert,
Szapudi István és Csabai István

2017. február 23.

Az Einstein-egyenletek megoldása az egész univerzumra

Einstein-egyenletek (1915)

$$R_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Viszont Einstein szerint így a gravitáció összerántaná az egész Univerzumot...

Kozmológiai állandó (1917)

$$R_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

... hogy „ellent tartson a gravitációnak”

Az Einstein-egyenletek megoldása az egész univerzumra

Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker-metrika

$$-c^2 \mathrm{d}\tau^2 = -c^2 \mathrm{d}t^2 + a(t)^2 \left[\frac{\mathrm{d}r^2}{1 - kr^2} + r^2 \left(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2 \theta \, \mathrm{d}\phi^2 \right) \right]$$

Friedmann-egyenletek (1922)

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

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

A táguló Univerzum első megfigyelése

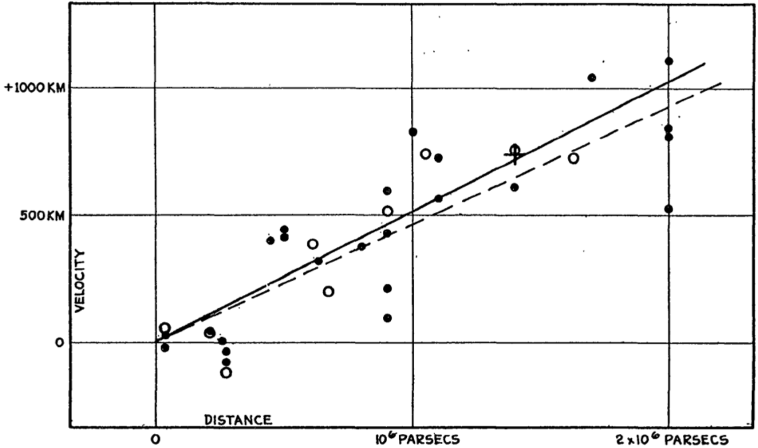


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

A táguló Univerzum első megfigyelése

Hubble-törvény (1929)

$$v = H_0 \cdot D_L$$

Hubble-paraméter és Hubble-állandó:

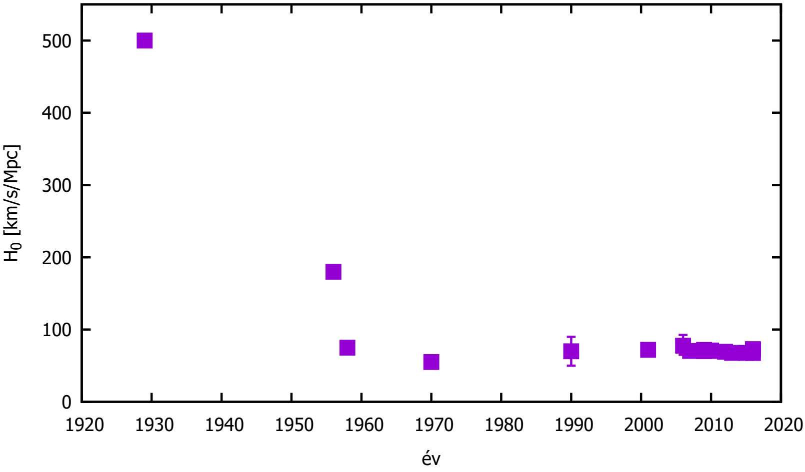
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2$$

$$H_0 = H(t = t_{\mathrm{ma}})$$

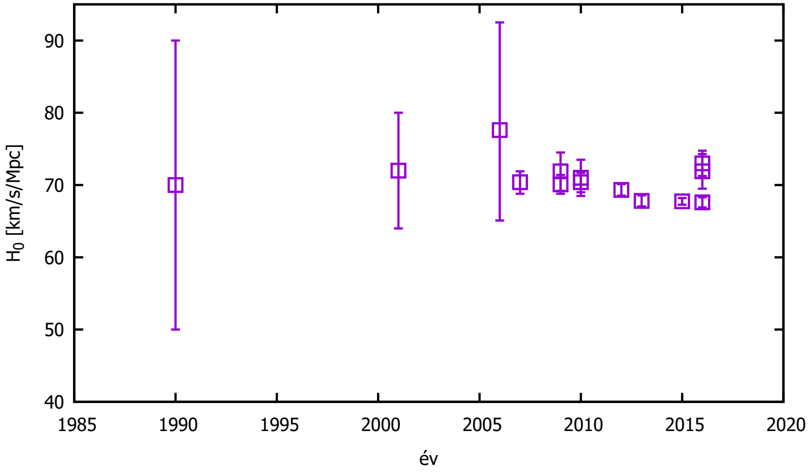
Einstein pedig tévedett:

$$R_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}}$$

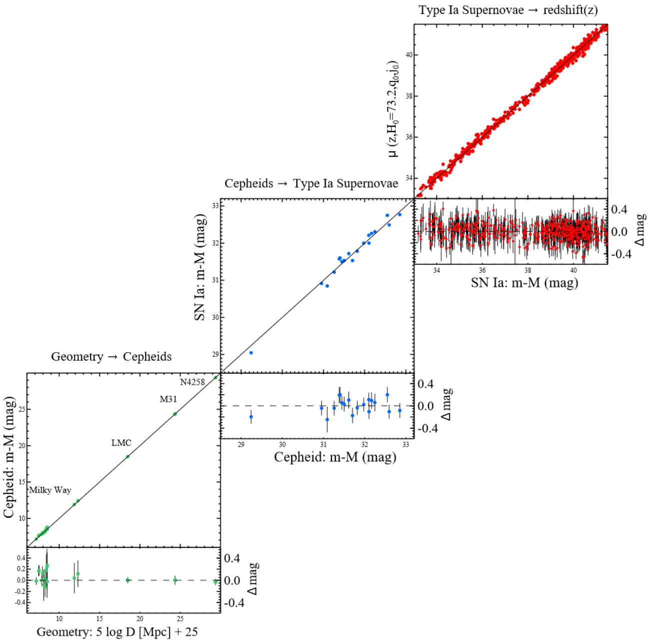
Korábbi becslések a Hubble-állandóra



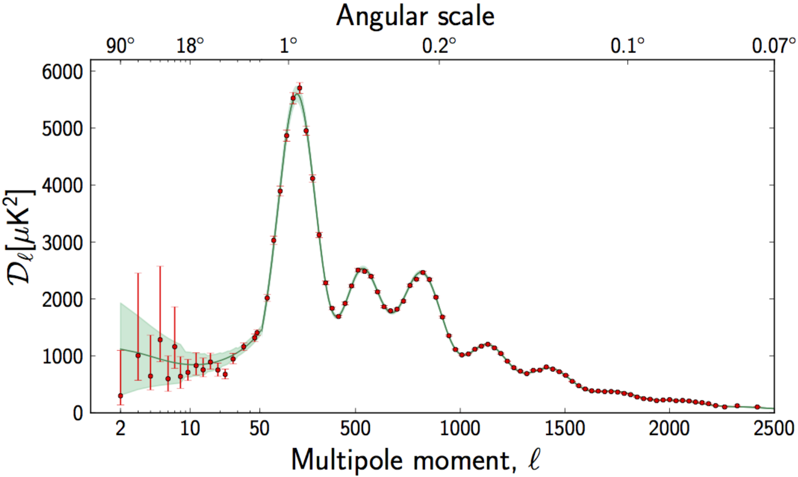
A Hubble-állandó precíziós mérései



$H_0 = 73.24 \pm 1.74$ km s^{-1} Mpc^{-1} (2.4% hiba)



$H_0 = 67.74 \pm 0.46$ km s^{-1} Mpc^{-1} (0.6% hiba)



A kozmológiai luminozitástávolság

Fluxusmérésből számolunk távolságot:

$$F = \frac{L}{4\pi D_L^2}$$

Kozmológiai vöröseltolódás:

$$1 + z = \frac{a_{\text{megfigyeléskor}}}{a_{\text{kibocsátáskor}}}$$

Táguló (sík) téridőben viszont:

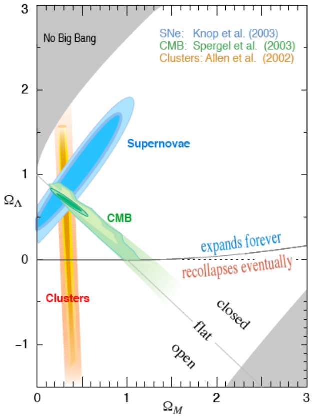
$$D_{\mathrm{L}}(d) = (1+z) \cdot D_H \int_0^z \frac{H(z=0)}{H(z')}\, \mathrm{d}z'$$

Mi kell ehhez? $a(t) \quad \longrightarrow \quad a(z) \quad \longrightarrow \quad H(z)$

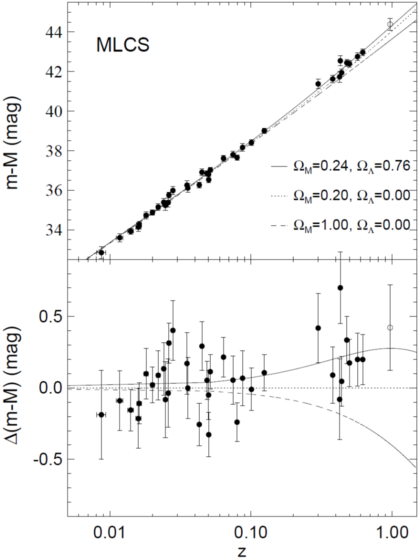
Sztenderd kozmológiai paraméterek

A dimenziótlanított Ω mennyiségekkel:

$$D_\mathrm{L}(z) = (1+z)\cdot D_H \int_0^z \frac{\mathrm{d}z'}{\sqrt{\Omega_\mathrm{M}(z'+1)^3 + \Omega_k(1+z')^2 + \Omega_\Lambda}}$$



Ia típusú szupernóvák



Riess et al. (1998)

Einstein újfent tévedett:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

Homogén és izotróp univerzum?

Mindenki tévedett?

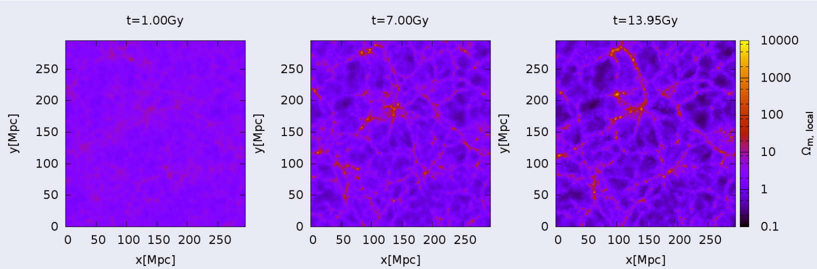
- A struktúrák hatását ált. rel.-ből nem tudjuk kiszámítani
- A korai univerzum még perturbatív, de hamar nem lineárissá válik
- A későbbi korokban akár 10^6-os sűrűségkontraszt
- A galaxishalmazok nem tágulnak, gravitációsan kötöttek
- A hatalmas üregekben kisebb a sűrűség az átlagosnál
- A sötét energia és a térelméletek vákuumenergiája között legalább 10^{100}-os faktor

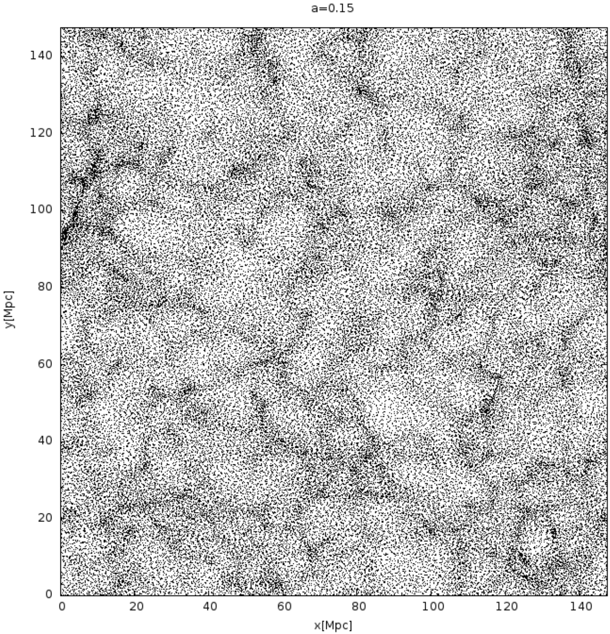
Mégis (majdnem) mindenki esküszik, hogy

- a homogén és izotróp közelítés jó

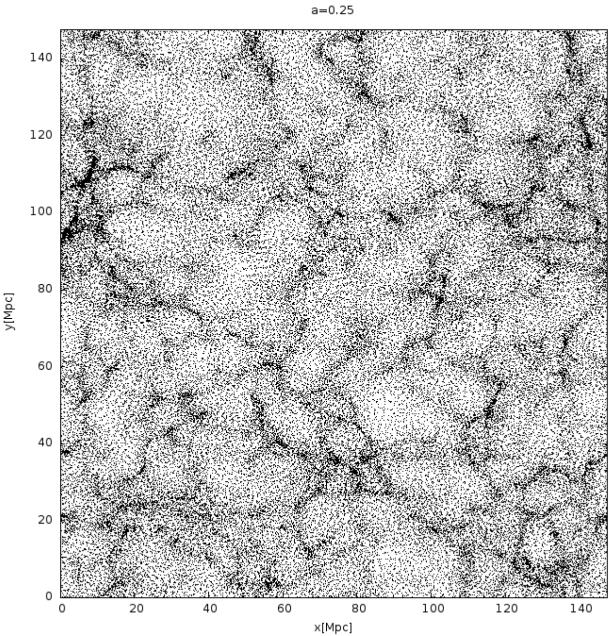
Sötétanyag-szimulációk

- csak gravitáció: n-body kód
- a tér tágulását „kívülről” kell biztosítani

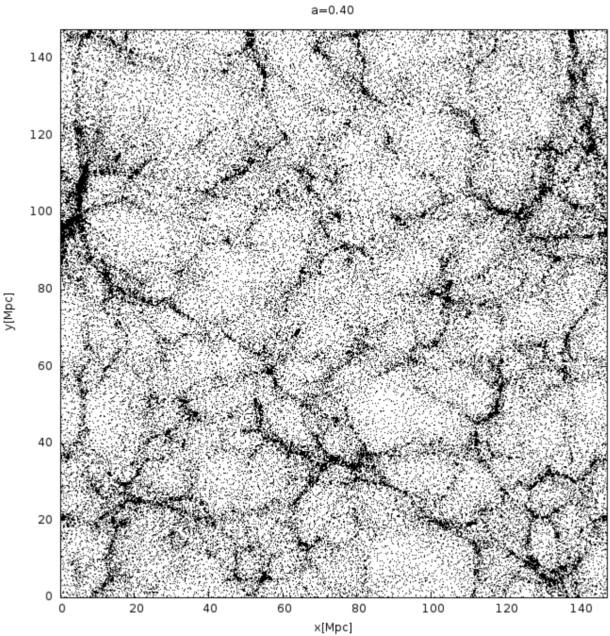


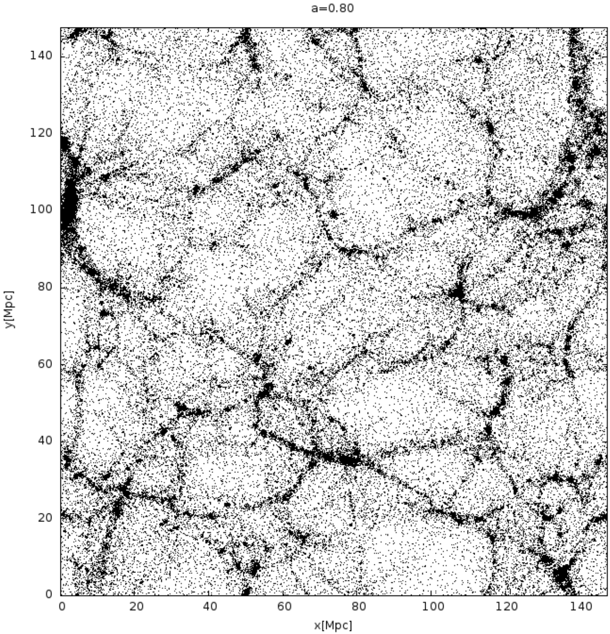


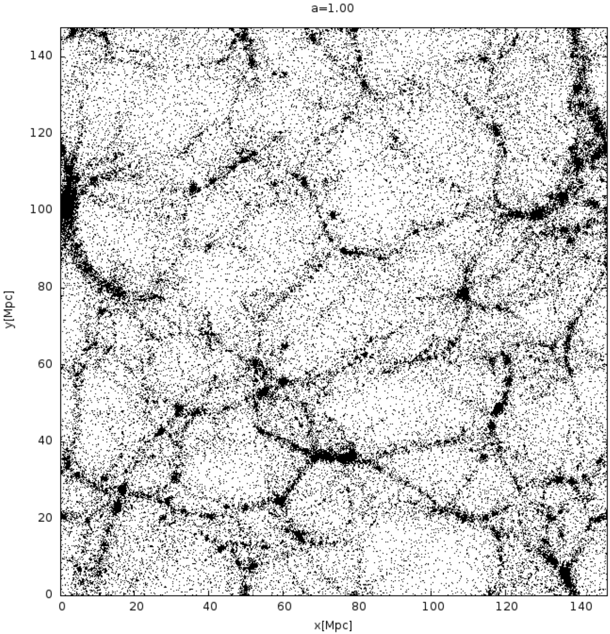
a=0.15
y[Mpc]
x[Mpc]
0
20
40
60
80
100
120
140



a=0.25
y[Mpc]
x[Mpc]
0
20
40
60
80
100
120
140


a=0.40
y[Mpc]
x[Mpc]
0
20
40
60
80
100
120
140
0
20
40
60
80
100
120
140


a=0.80
y[Mpc]
x[Mpc]
0
20
40
60
80
100
120
140



a=1.00
y[Mpc]
x[Mpc]
0
20
40
60
80
100
120
140

Az AvERA-trükk

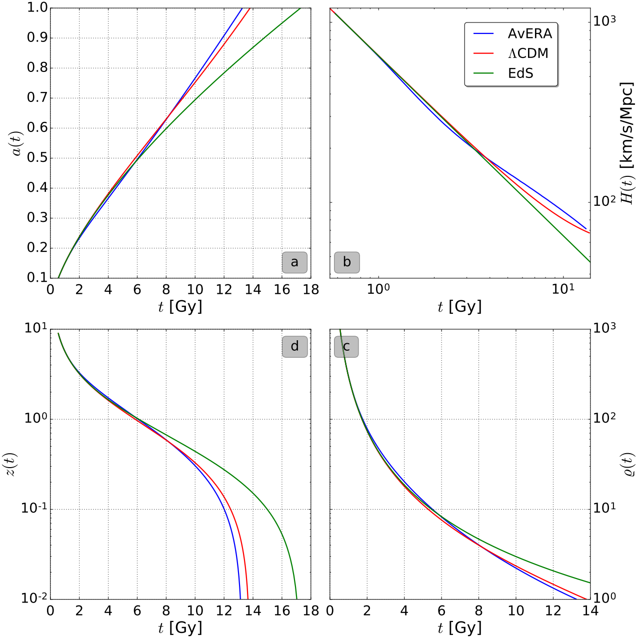
Az önállóuniverzum-sejtés:

- Az U egyes térrészei úgy tágulnak, mint önálló univerzumok
- A tágulás rátáját a lokális sűrűség szabja meg

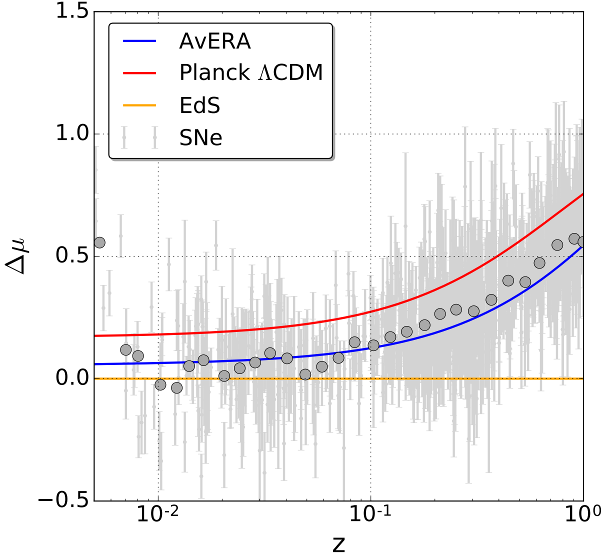
$$\left\langle \begin{array}{l} \Omega_{m,1} \\ \Omega_{m,2} \\ \dots \\ \Omega_{m,N} \end{array} \right\rangle \Rightarrow \boxed{\text{Friedmann eq.}} \Rightarrow \ \Delta V \ \Rightarrow a(t+\delta t)$$

$$\begin{array}{l} \Omega_{m,1} \\ \Omega_{m,2} \\ \dots \\ \Omega_{m,N} \end{array} \Rightarrow \boxed{\text{Friedmann eq.}} \Rightarrow \left\langle \begin{array}{l} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \dots \\ \Delta V_N \end{array} \right\rangle \Rightarrow a(t+\delta t)$$

A skálafaktor időfejlődése



Nem kell újrakalibrálni a szupernóvák fényességét



A távoli és közeli H_0 mérések is konzisztensé tehetők