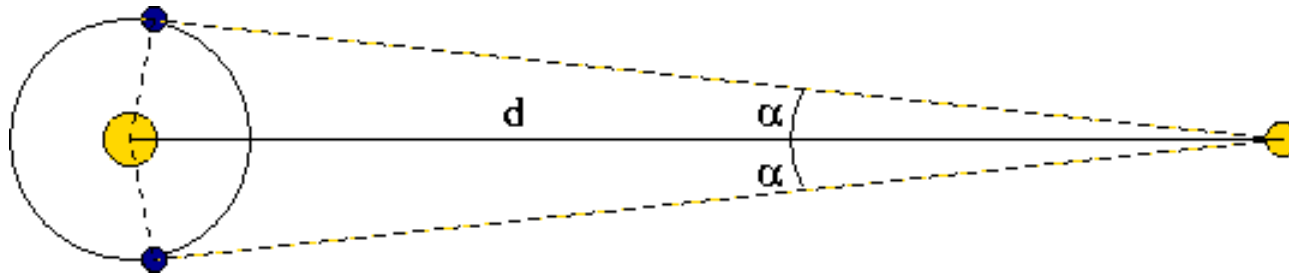


Afstandsbepaling in het heelal

i. Parallax methode



Definitie: $d = 1$ parsec als $\alpha = 1''$

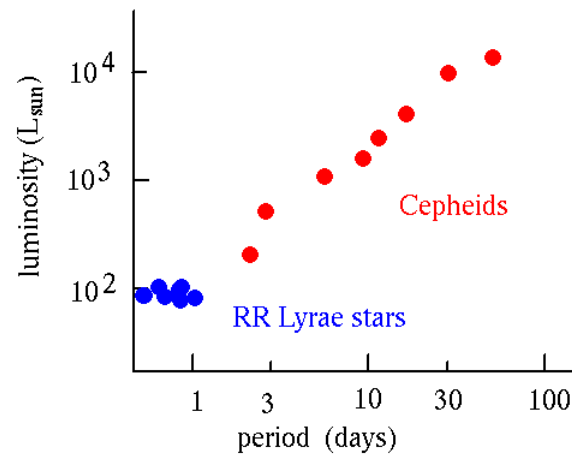
→ 1 parsec = 3.26 lichtjaar = 3.09×10^{13} km

ii. Variabele sterren

A. Cepheiden:

- sterk statistisch verband tussen maximale helderheid en periode (Henriette Leavitt, 1912)
- groot aantal waarvan parallaxafstand en helderheid bekend zijn

→ helderheidsperiode = maat voor afstand



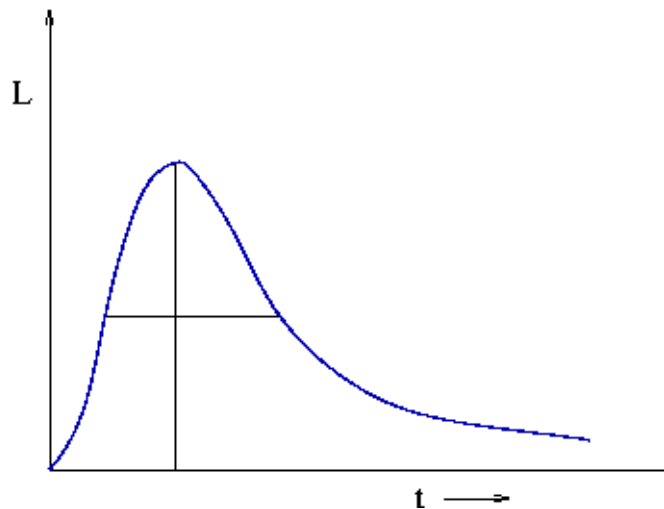


1923: Hubble ontdekt Cepheiden in de Andromeda nevel
→ melkwegstelsels buiten het onze aangetoond



B. Supernovae

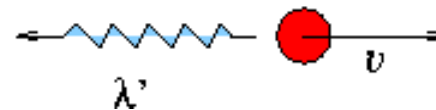
thermo-nucleaire explosie/implosie van ster



Supernova-type 1A: sterk verband maximale helderheid - duur
(NGC4526, High-z Supernova Search Team, HST, NASA)

iii. Roodverschuiving

Doppler effect:



Definitie van z :

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = 1 + z \approx 1 + \frac{v}{c}$$

Hubble: de roodverschuiving van melkwegstelsels is evenredig met hun afstand

$$z = \frac{H_0 d}{c} \quad \Leftrightarrow \quad v = H_0 d$$

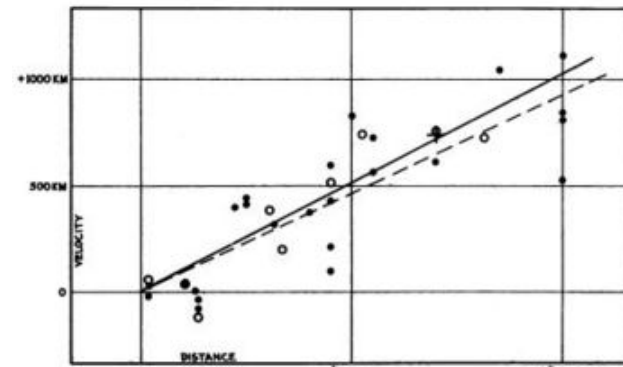
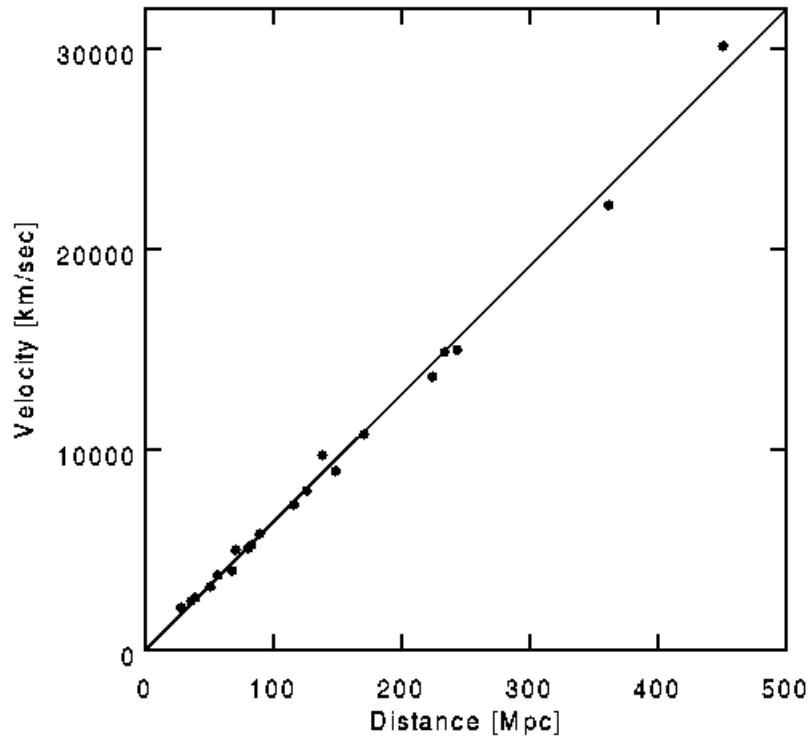


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

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.

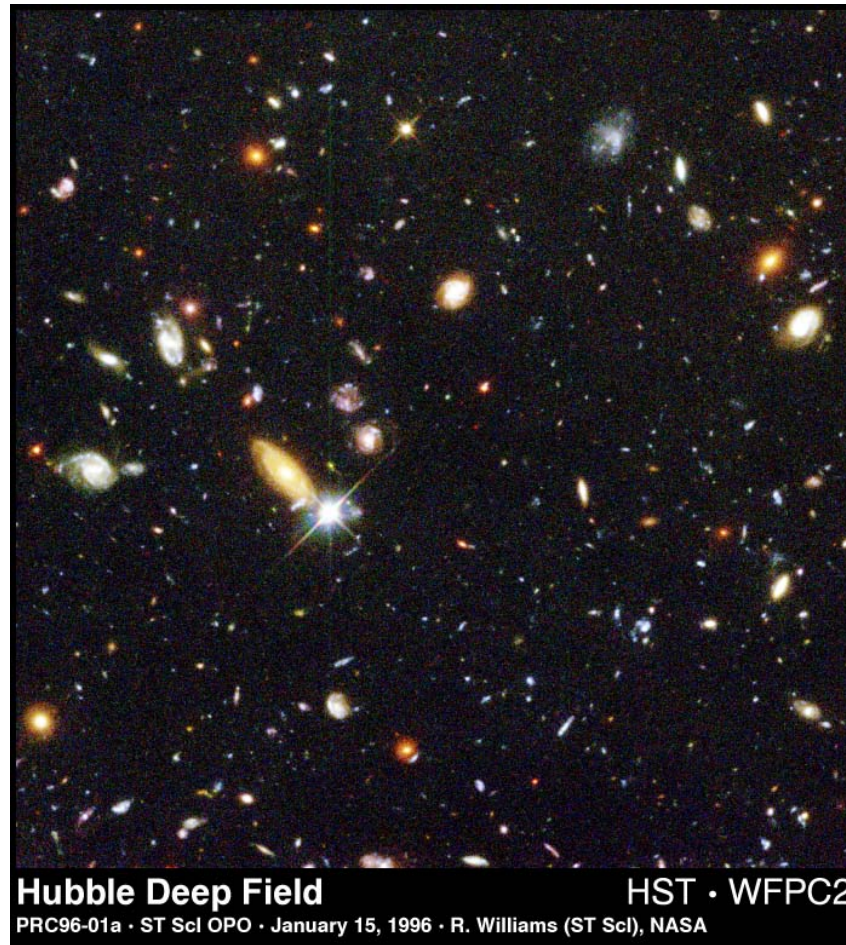
Links: Supernova metingen tot $z \approx 0.3$

Rechts: Hubble's metingen

$$H_0 = 73 \pm 3 \text{ km/sec/Mpc}$$

J.W. van Holten

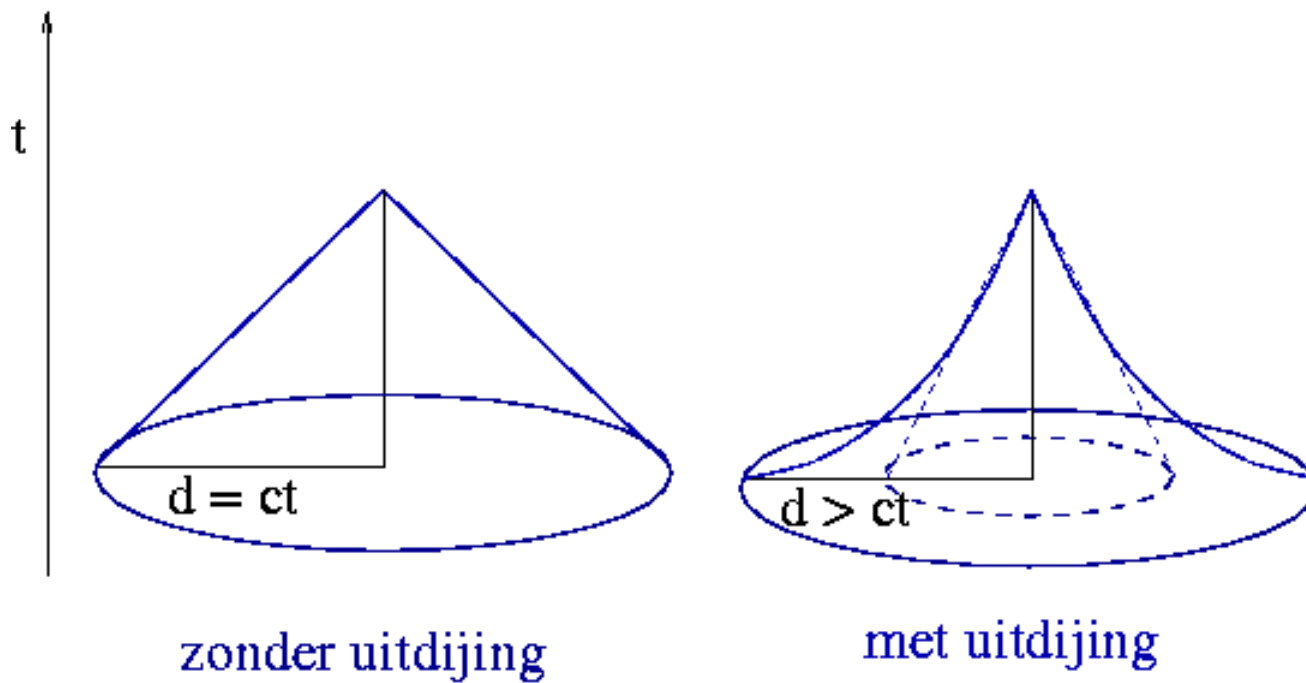
21-03-07

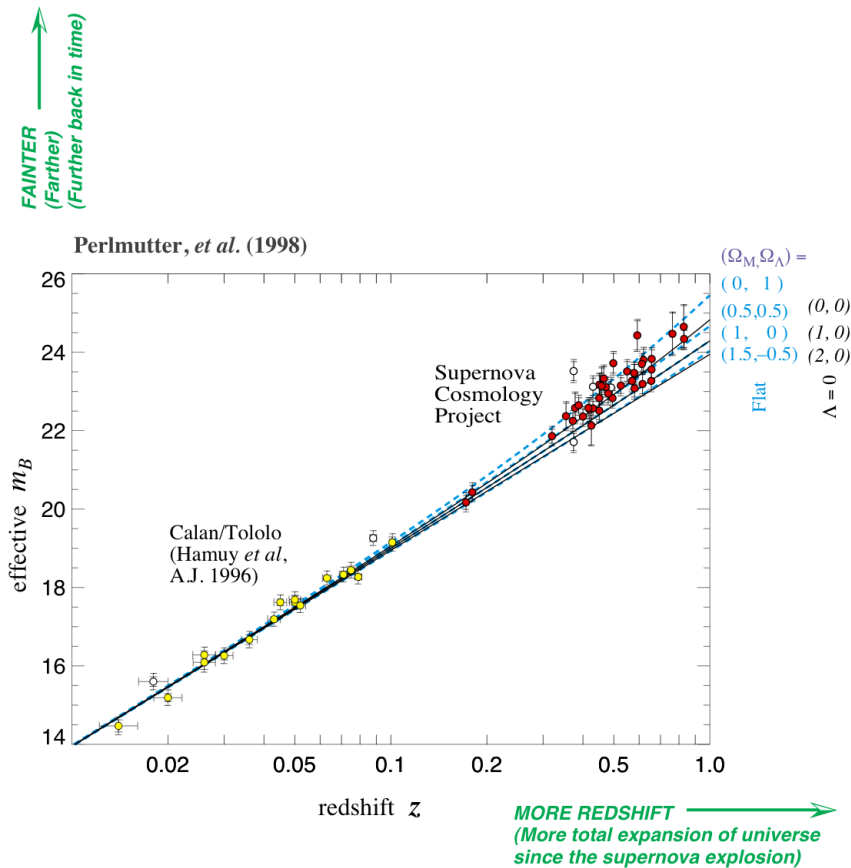


Verste waargenomen melkwegstelsels: $z \sim 6 - 7$

Eindige lichtsnelheid: $c = 300.000 \text{ km/sec}$

→ verre objecten zien we ver in het verleden





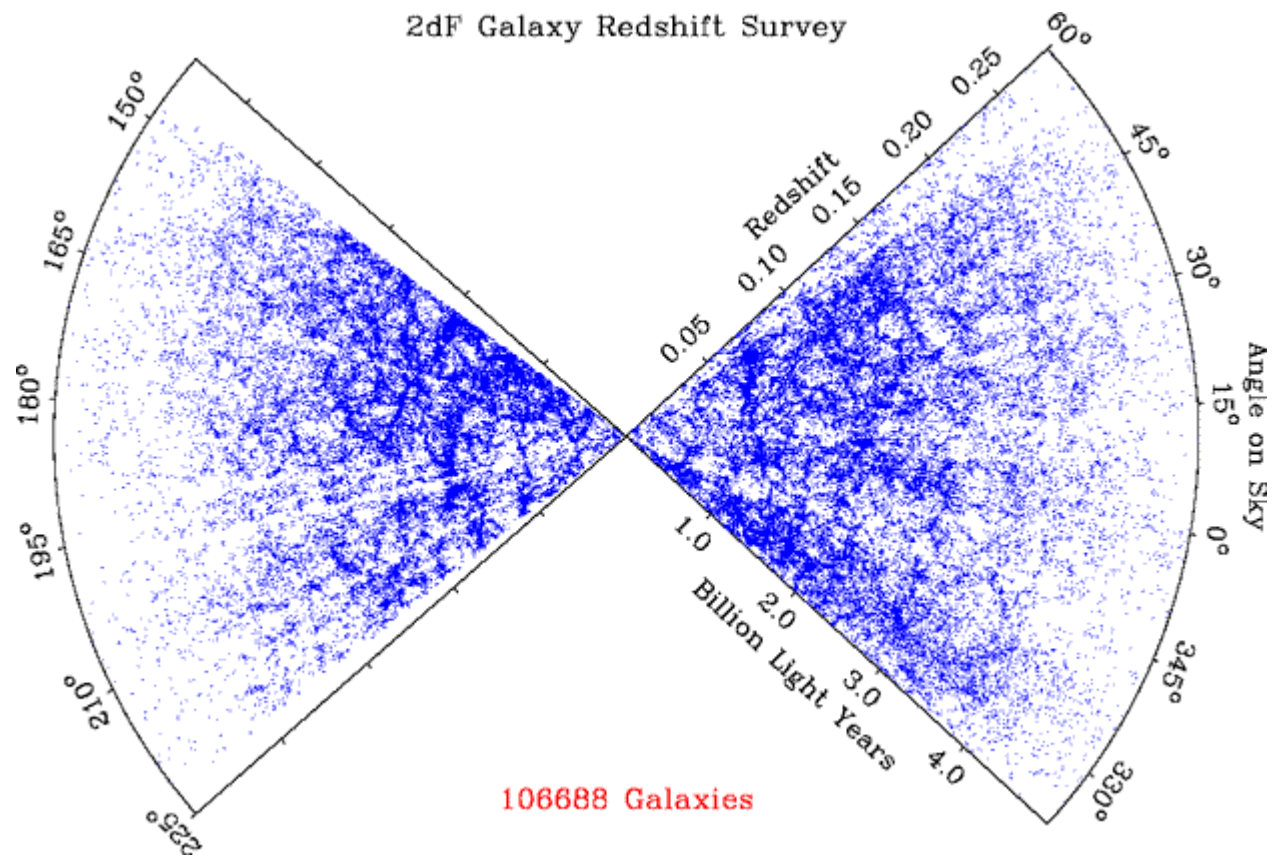
In flat universe: $\Omega_M = 0.28 [\pm 0.085 \text{ statistical}] [\pm 0.05 \text{ systematic}]$

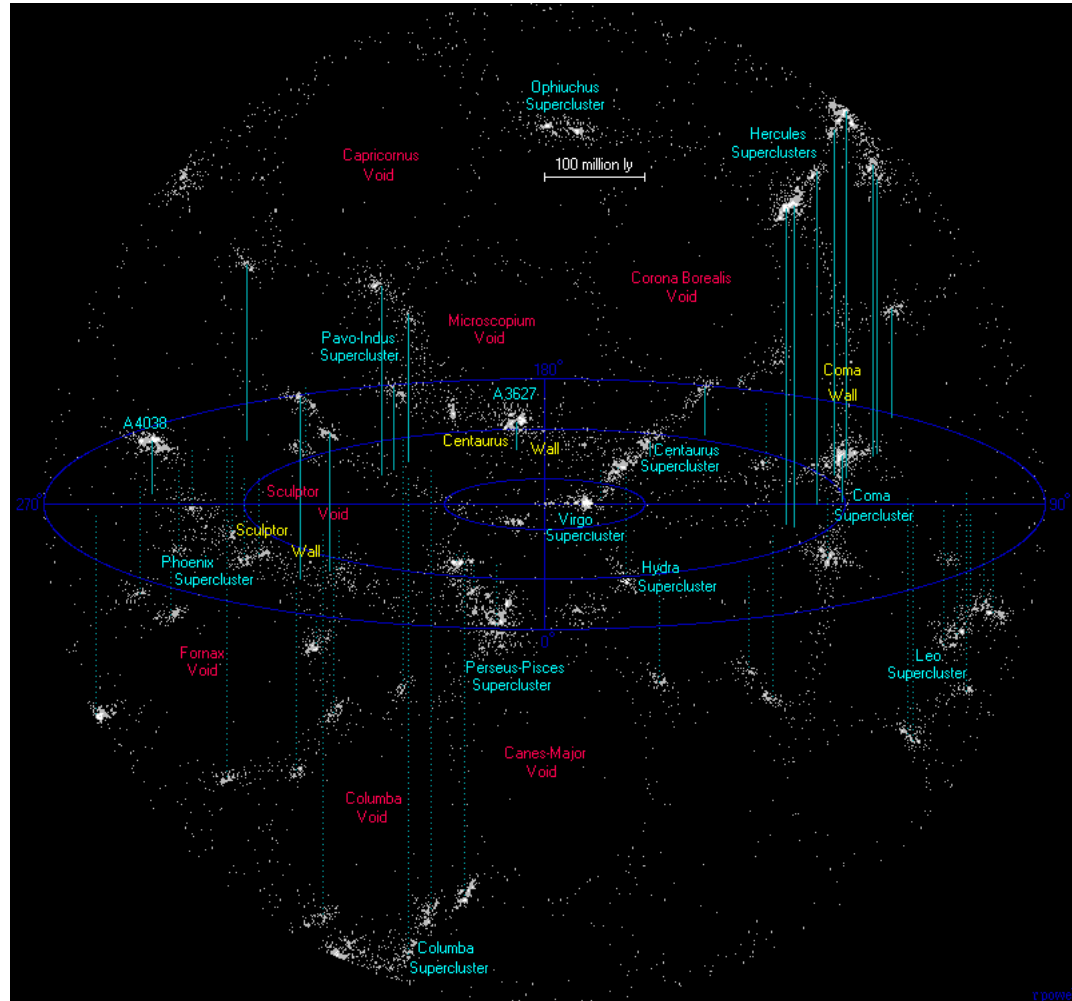
Prob. of fit to $\Lambda = 0$ universe: 1%

hoge- z supernovae

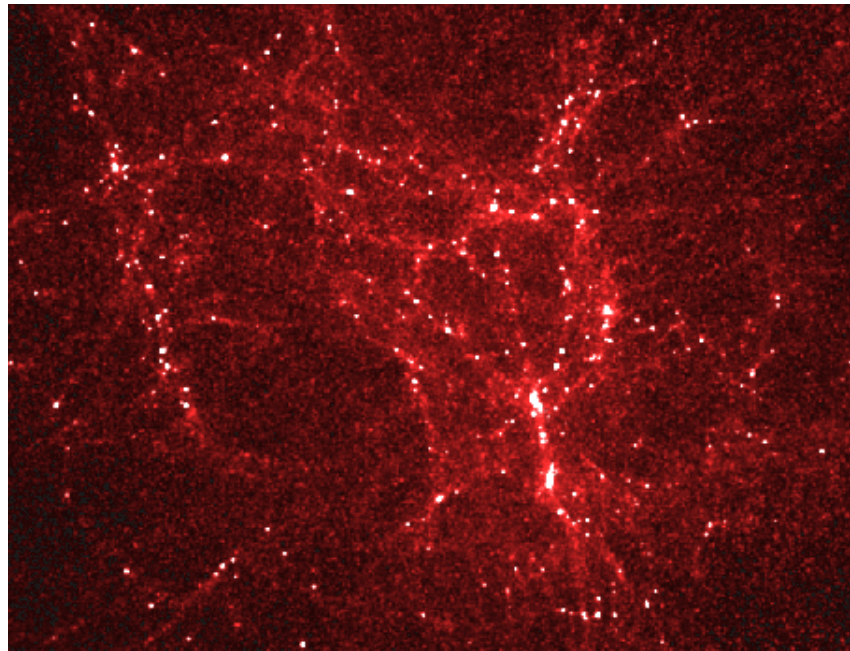
versnelde expansie van het heelal

Verdeling van melkwegstelsels



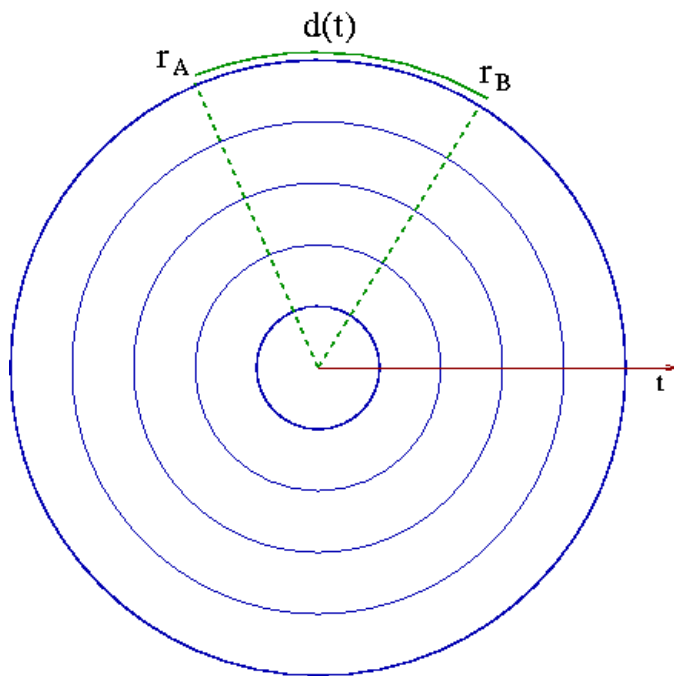


Melkwegstelsels hopen zich op in clusters langs filamenten;
daartussen grotendeels lege ruimte (voids)



Aantal melkwegstelsels per $(100 \text{ Mpc})^3$ overal ongeveer gelijk

De schaalfactor $a(t)$



Afstand tussen A en B:

$$d(t) = a(t)(r_A - r_B)$$

Geldt ook voor licht:

$$\frac{a_0}{a(t)} = \frac{\lambda_0}{\lambda(t)} = 1 + z(t)$$

Hubble parameter:

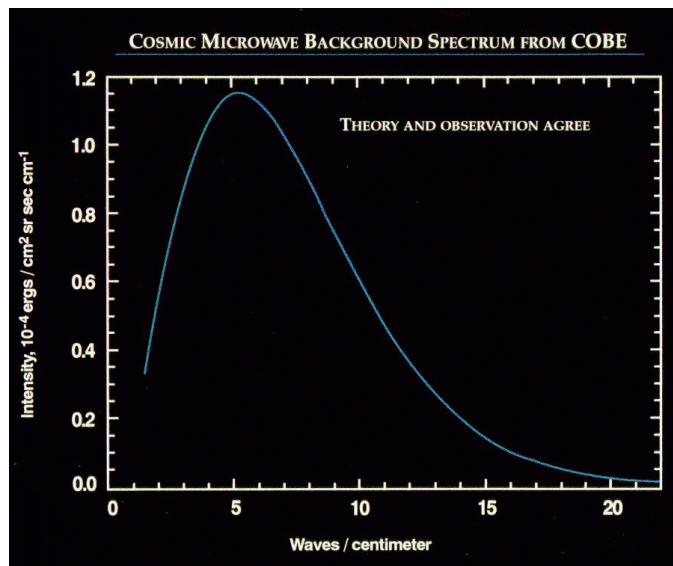
$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} = Hd \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\Delta a}{\Delta t} (r_A - r_B) = Ha (r_A - r_B)$$

Hieruit volgt

$$H = \frac{1}{a} \frac{\Delta a}{\Delta t}$$

→ uit metingen van $H(t)$ kan $a(t)$ bepaald worden

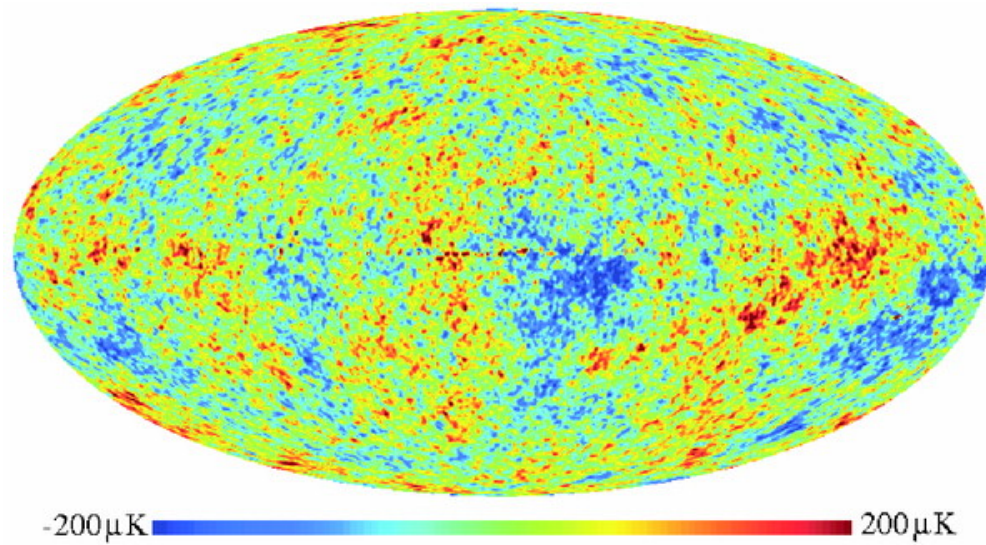
Kosmische achtergrondstraling (CMB)



thermisch spectrum: $T = 2.725$ K, $\Delta T/T \leq 10^{-4}$

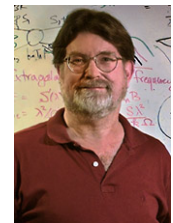
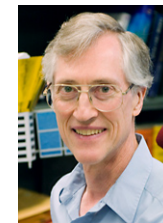
(Penzias en Wilson, Nobelprijs 1978)

Temperatuur variaties (COBE, WMAP)



$z = 1100$

(Mather en Smoot, Nobelprijs 2006)

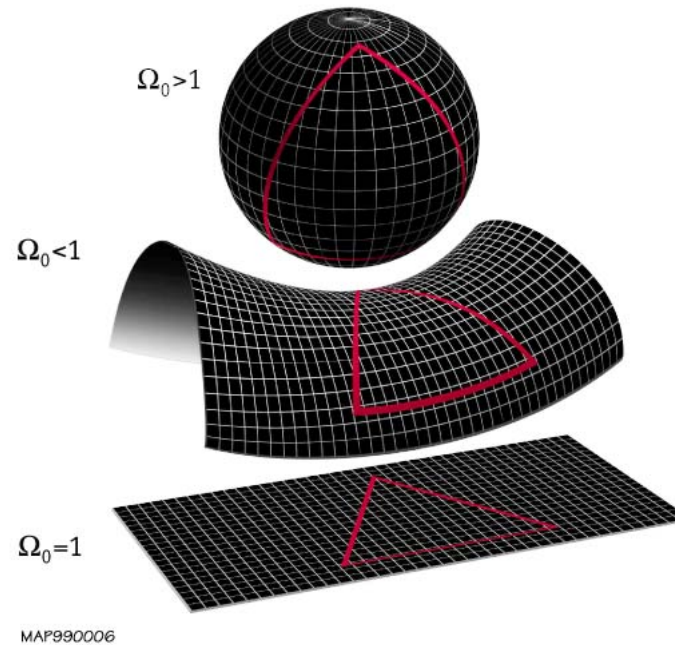


Kosmologisch principe (Einstein):

op grote schaal ($d > 100$ Mpc) is het heelal homogeen en isotroop (nog meer in het verleden)



- het heelal wordt gekarakteriseerd door
- $a(t), k$ (meetkunde van ruimte en tijd)
 - $\varepsilon(t), p(t), T(t)$ (thermodynamische toestand van materie, straling en energie)



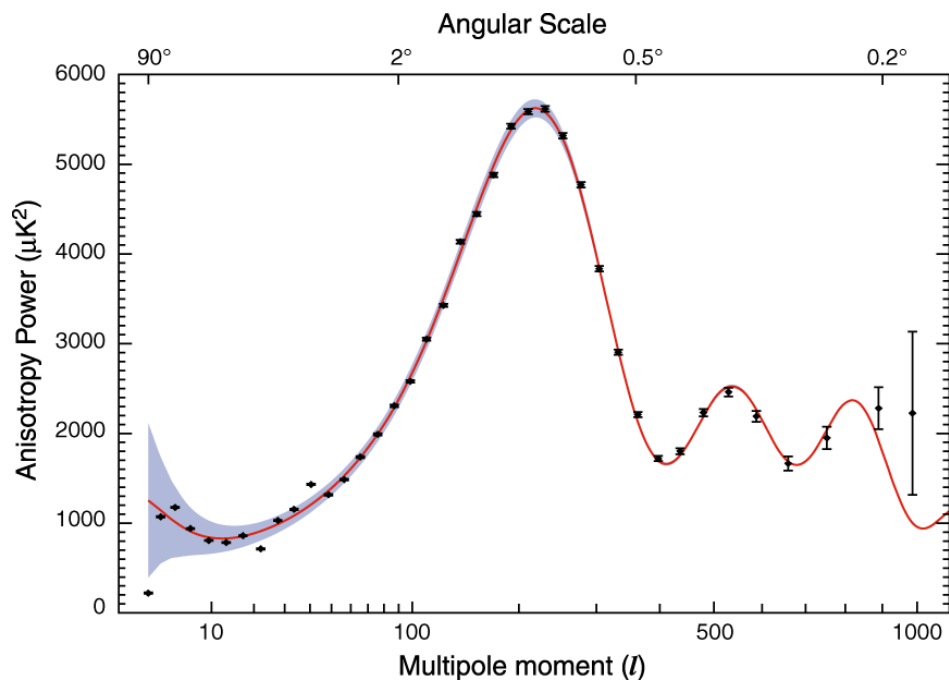
Homogeniteit:

heelal heeft overal dezelfde kromming; $k = (+1, 0, -1)$

Uit de kosmische achtergrondstraling vinden we $k = 0$

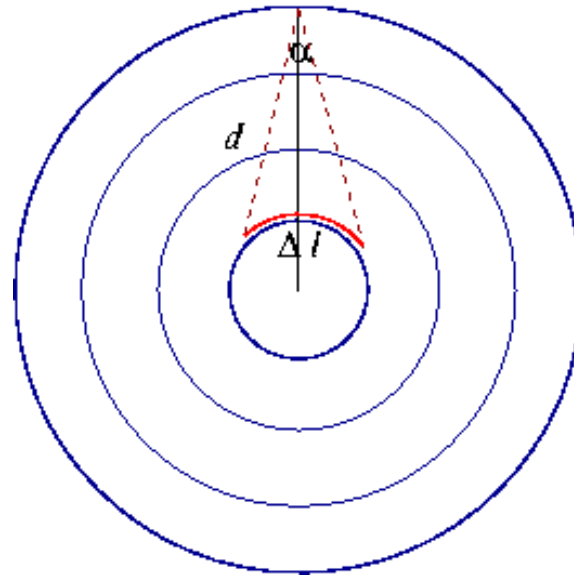
Vraag:

Als we de hemel in 2^ℓ gelijke stukjes verdelen, welke ℓ geeft dan de beste overeenkomst met de grootte van de temperatuurgebiedjes in de CMB?



(WMAP)

Driehoeksmeting:



Δl = golflengte van drukgolven in plasma → bekend

d = afstand tot laatste verstrooiingsoppervlak → bekend

Resultaat:

gemeten hoekgrootte = verwachte hoekgrootte in vlakke ruimte

Kritische dichtheid

De ART geeft een verband tussen totale energiedichtheid, kromming en uitdijingsnelheid van de ruimte:

$$\varepsilon = \frac{3c^2}{8\pi G} \left(H^2 + \frac{kc^2}{a^2} \right)$$

Met $k = 0$

⇒ totale energiedichtheid = kritische energiedichtheid

$$\varepsilon_c = \frac{3c^2 H^2}{8\pi G} \approx 5.2 \text{ GeV/m}^3$$

De energiedichtheid van de CMB bij $T = 2.725$ K is

$$\Omega_{cmb} = \frac{\varepsilon_{cmb}}{\varepsilon_c} = 0.0005$$

De energiedichtheid van chemische materie (baryonen en elektronen) is

$$\Omega_{bar} = \frac{\varepsilon_{bar}}{\varepsilon_c} = 0.04$$

Waar is de rest?

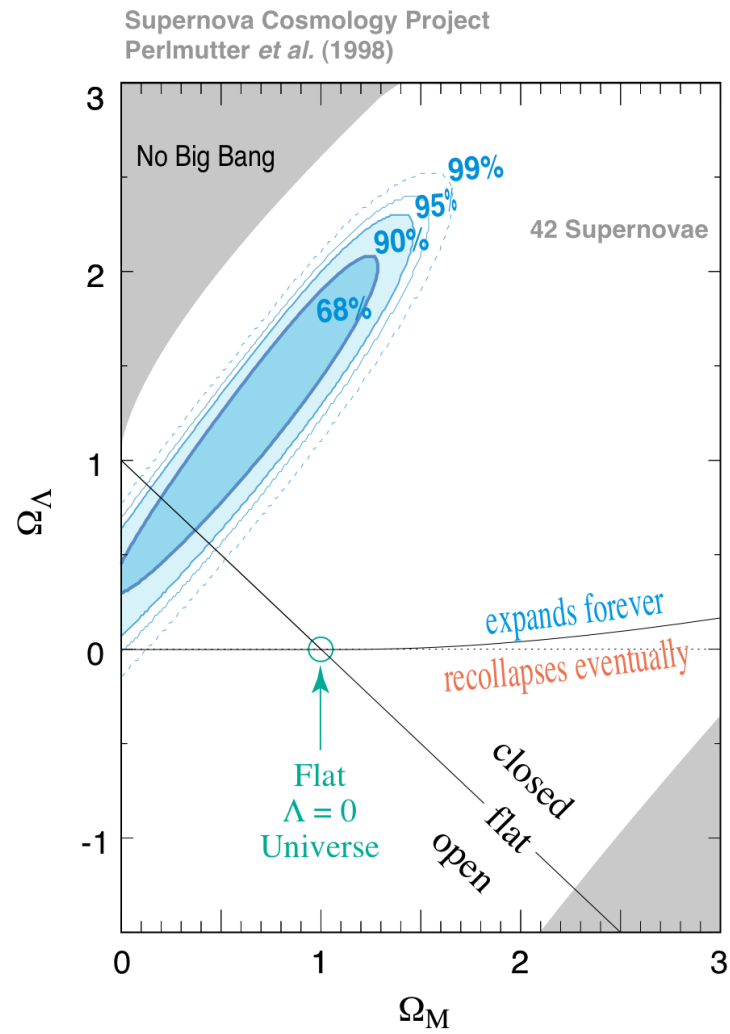
Vacuum energy

Onder gravitatiekrachten heeft iedere normale materievorm de neiging samen te trekken; om een stabiel statisch heelal te krijgen voerde Einstein in 1917 een vorm van energie van de lege ruimte in, met een constante dichtheid in ruimte en tijd en een *negatieve* bijdrage aan de druk: de *kosmologische constante*.

Dezelfde vacuumenergie kan het heelal ook laten *uitdijen*.

De juiste mix van uitdijng en aantrekking in overeenstemming met de type 1A supernova gegevens en de CMB bepaalt de relatieve bijdrage van materie (M) en vacuum energie (Λ):

$$\Omega_M = \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_c} = 0.24, \quad \Omega_\Lambda = \frac{\varepsilon_\Lambda}{\varepsilon_c} = 0.76$$

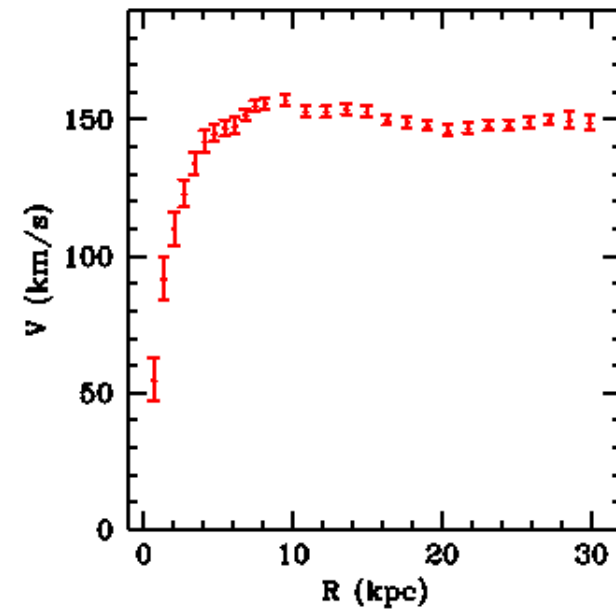


Niet-baryonische materie:

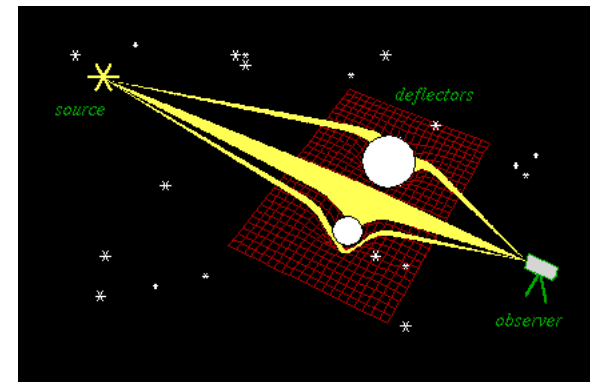
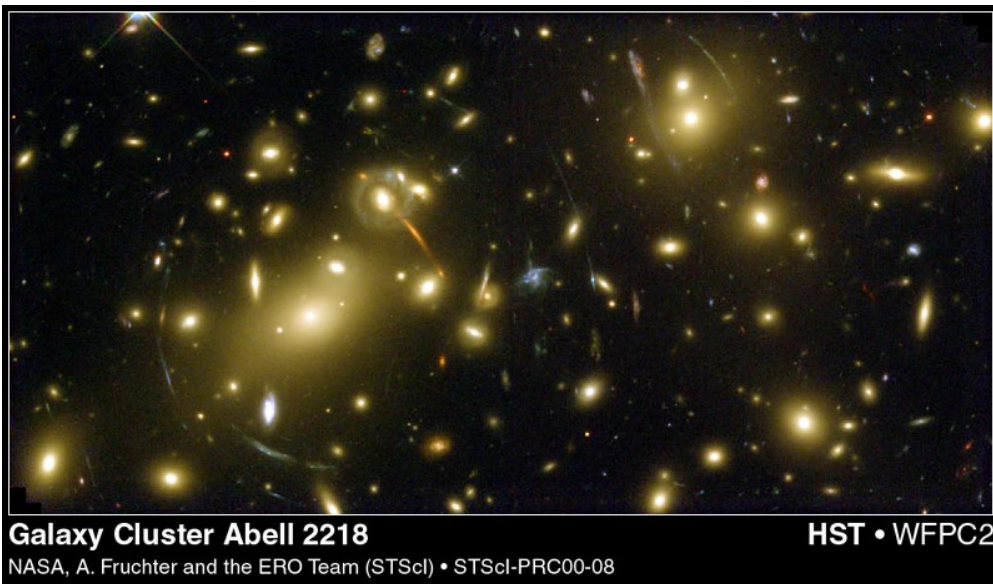
$$\Omega_{non-bar} = 0.20$$

Donkere materie! Waar is het? Wat is het?

Omloopsnelheid van sterren in melkwegstelsels

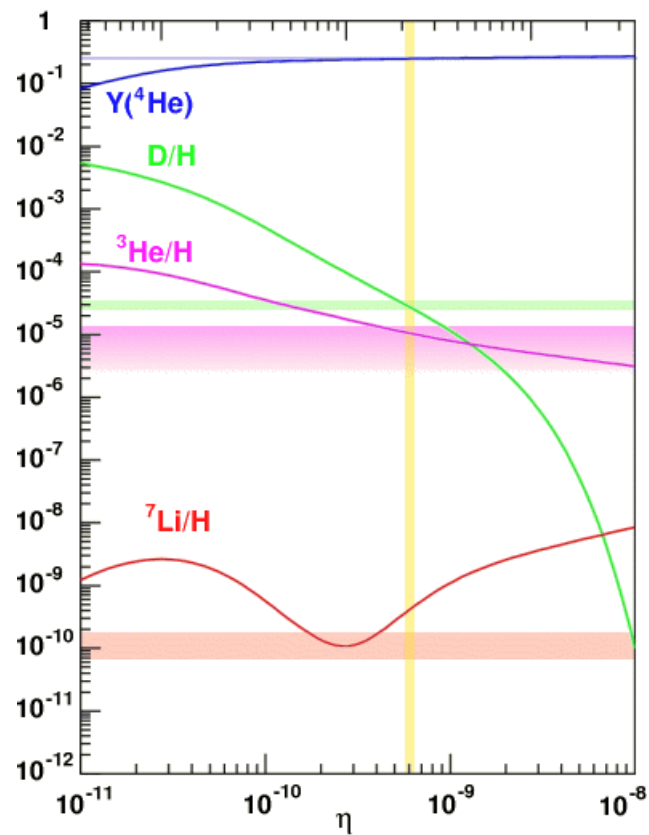


Gravitielens-effect

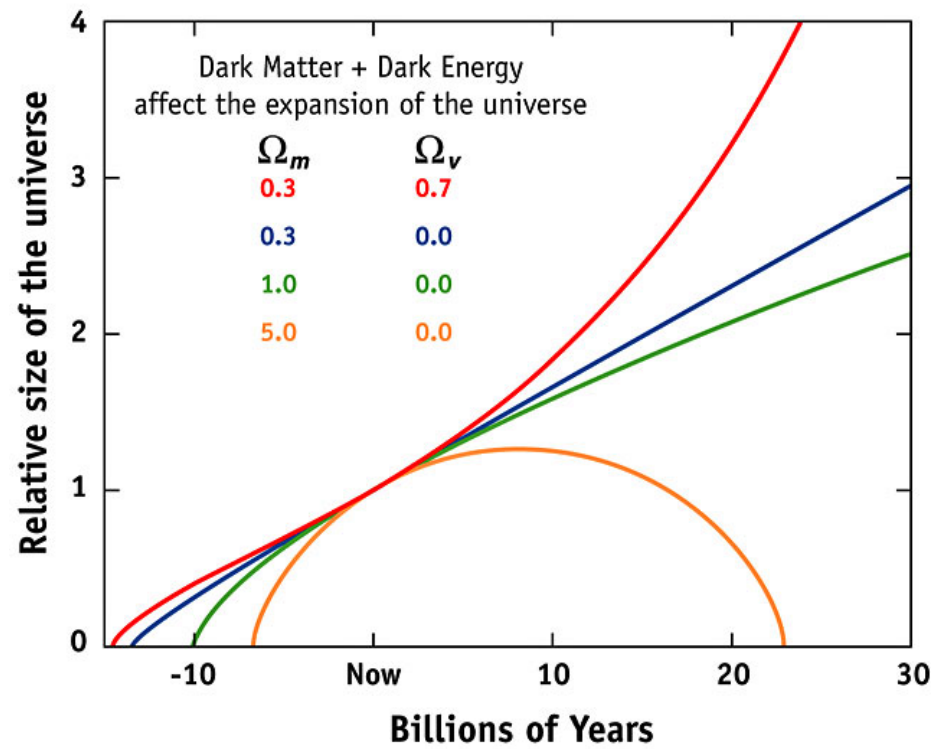


Waarom kan het geen gewone (baryonische) materie zijn?

Nucleosynthese:



EXPANSION OF THE UNIVERSE



Leeftijd van het heelal: 13.7 ± 0.2 miljard jaar

Waarom is het heelal zo homogeen en isotroop?

Inflatie:

exponentiëel versnelde uitdijing t.g.v. dominante vacuum energie

Probleem:

hoe inflatie te stoppen?

→ condensatie van materie uit vacuum energie

Test in fluctuaties in kosmische achtergrondstraling

Literatuur

1. S. Weinberg, *De eerste drie minuten*
(Natuur en Techniek, 1983)
2. G. Schilling, *De salon van God*
(Wereldbibliotheek, 1993)
3. J. Hartle, *Gravity*
(Addison Wesley, 2003)