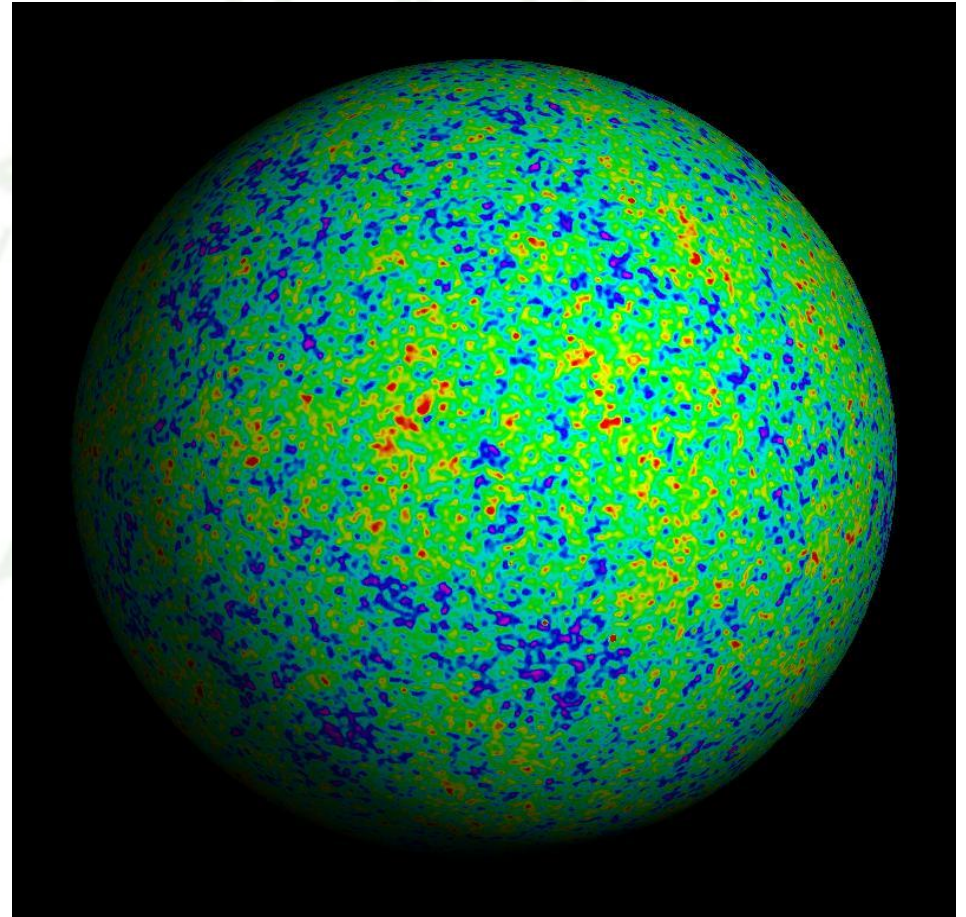


HOVO cursus Kosmologie

Voorjaar 2011

prof.dr. Paul Groot
dr. Gijs Nelemans

Afdeling Sterrenkunde,
Radboud Universiteit Nijmegen

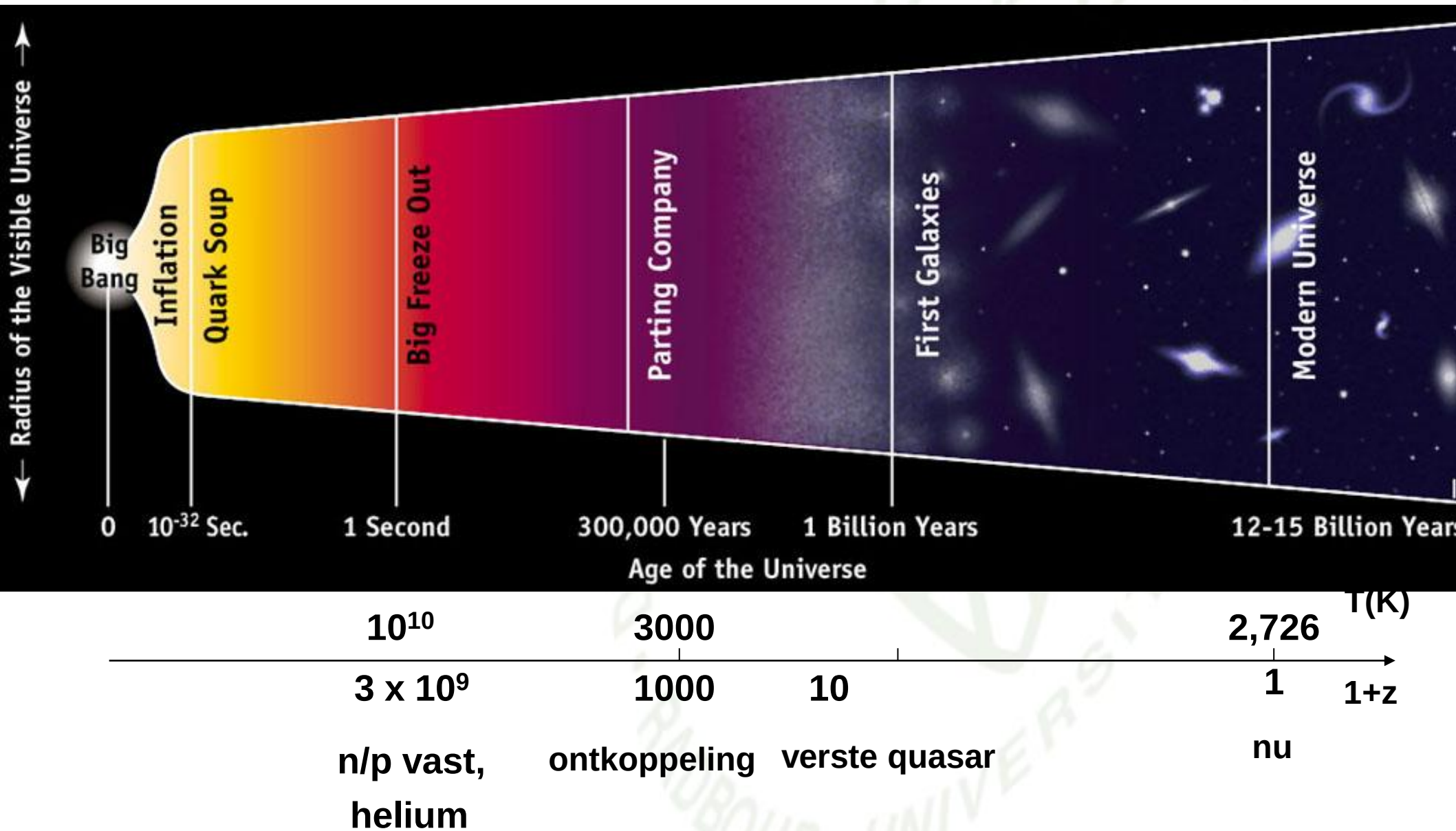


HOVO cursus Kosmologie

Overzicht van de cursus:

- | | | |
|--------|-----------------|--|
| • 17/1 | Groot | Historische inleiding + afstandsladder |
| • 24/1 | Nelemans | Observationele kosmologie, CMB |
| • 31/1 | Nelemans | Friedmann vgl., Nucleosynthese |
| • 7/2 | Nelemans | Donkere materie en Structuurvorming |
| • 14/2 | <i>Nelemans</i> | <i>Supernovae, donkere energie, Inflatie</i> |
| • 21/2 | Groot | Weak lensing, EUCLID, toekomst |

Geschiedenis van het Heelal



$$\left(\frac{v}{R}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{k}{R^2}$$

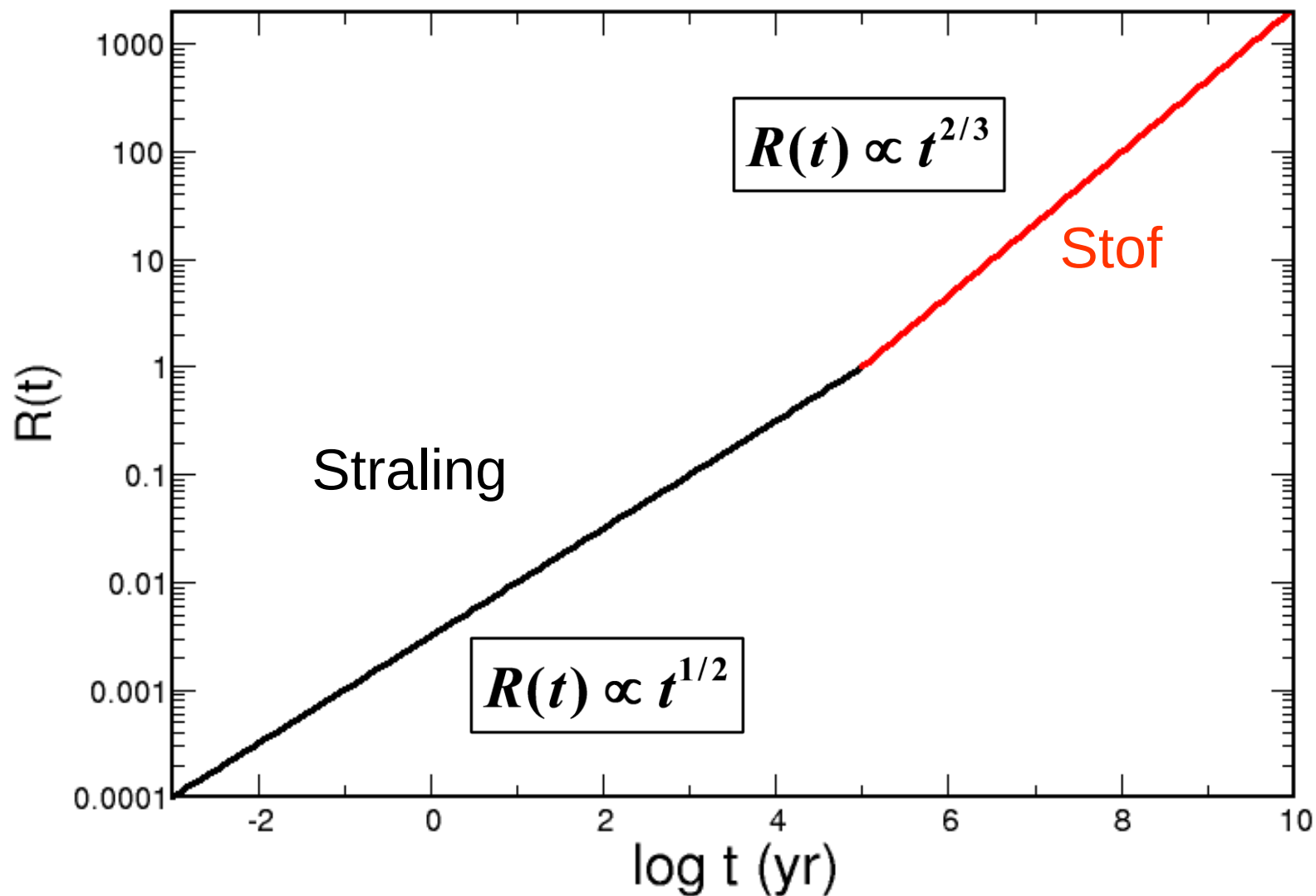
“Constante” van Hubble $H \equiv \frac{v}{R}$

Som geschreven in termen kritische dichtheid

$$1 - \frac{\rho}{\rho_c} = -\frac{k}{H^2 R^2}$$

$$1 - \Omega_M = -\frac{k}{H^2 R^2}$$

Evolutie van dit heelal

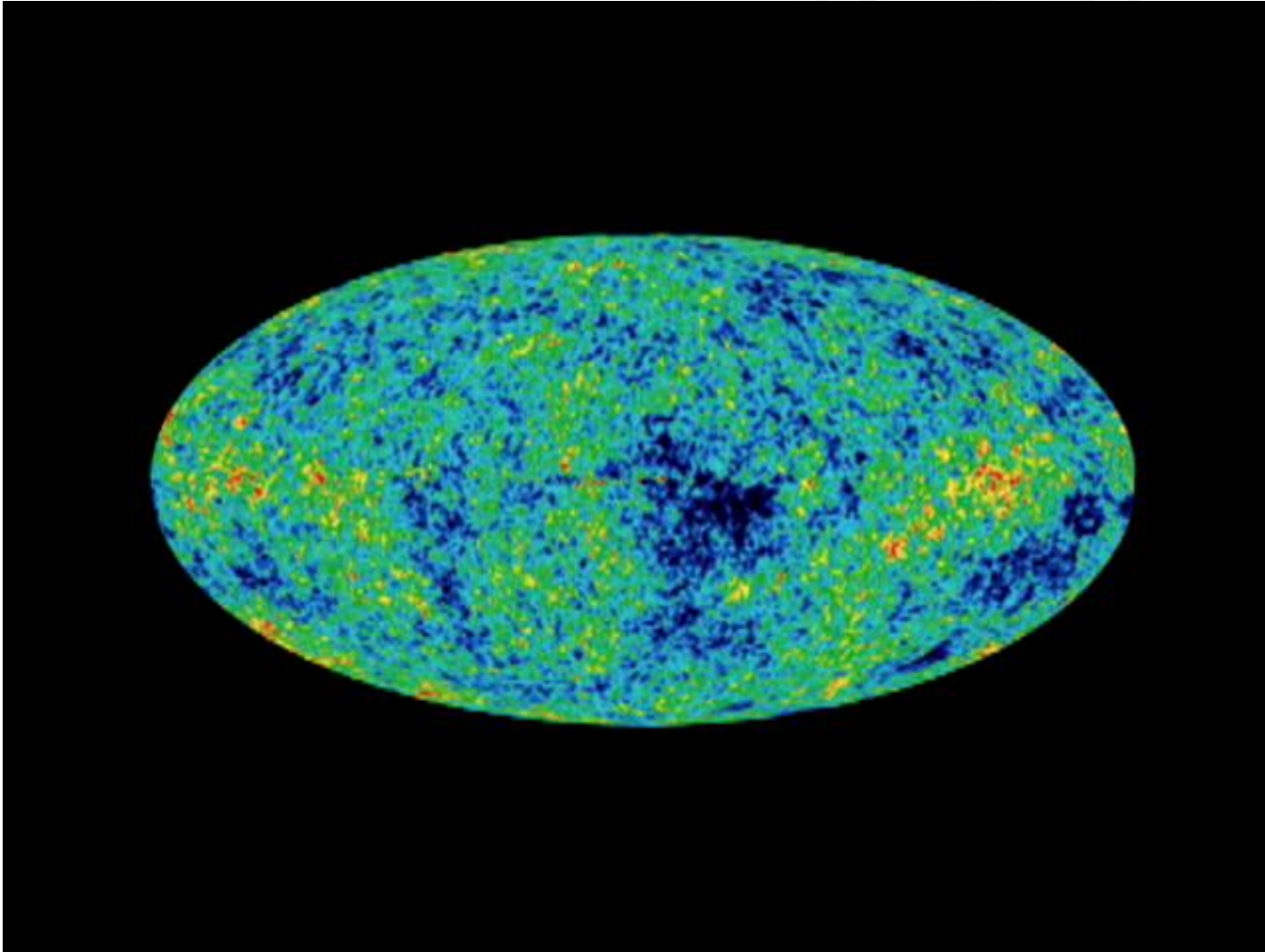


De problemen van ons model

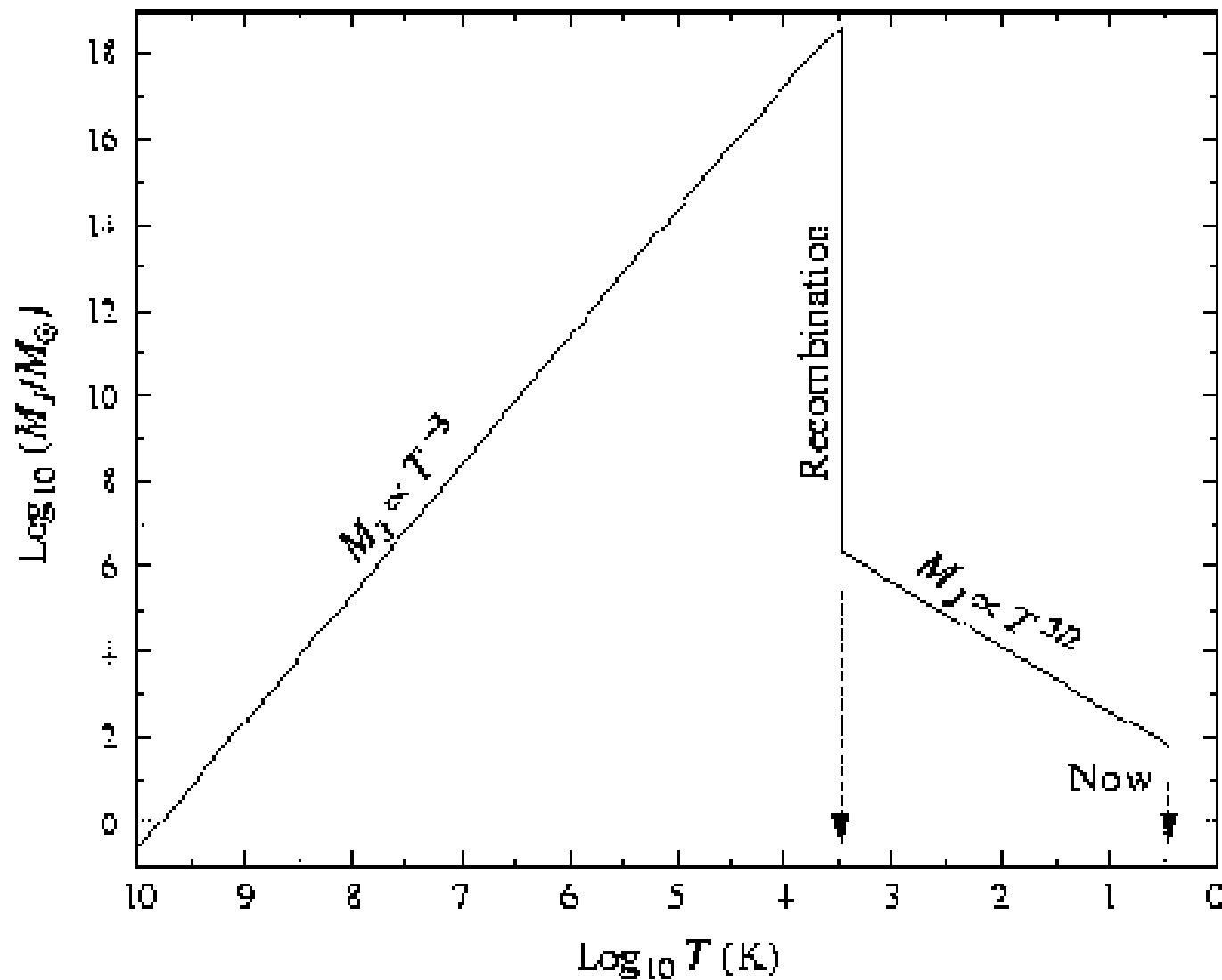
(mogelijke oplossing: volgende week)

- Vlakheidsprobleem
 - Waarom leven we in een heelal met $k = 0$?
- Horizonprobleem
 - Heelal is niet oneindig oud $\rightarrow$ gebied dat we kunnen zien is eindig (horizon)
 - Heelal wordt steeds groter, maar horizon groeit sneller
 - Gebieden die we nu te zien krijgen (CMB) kunnen elkaar (nog) niet zien (en konden dat nooit!) maar zijn wel vrijwel identiek!
- Leeftijdsprobleem
 - Hoe kunnen oudste sterren ouder zijn dan heelal?

Structuurvorming

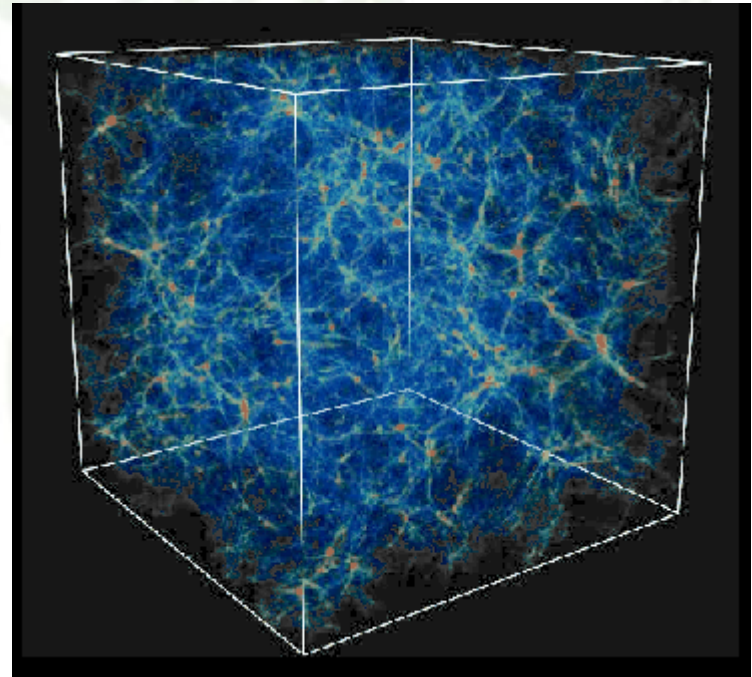


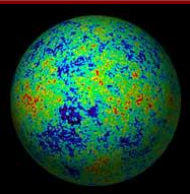
Jeans Mass



Structuurvorming met donkere materie

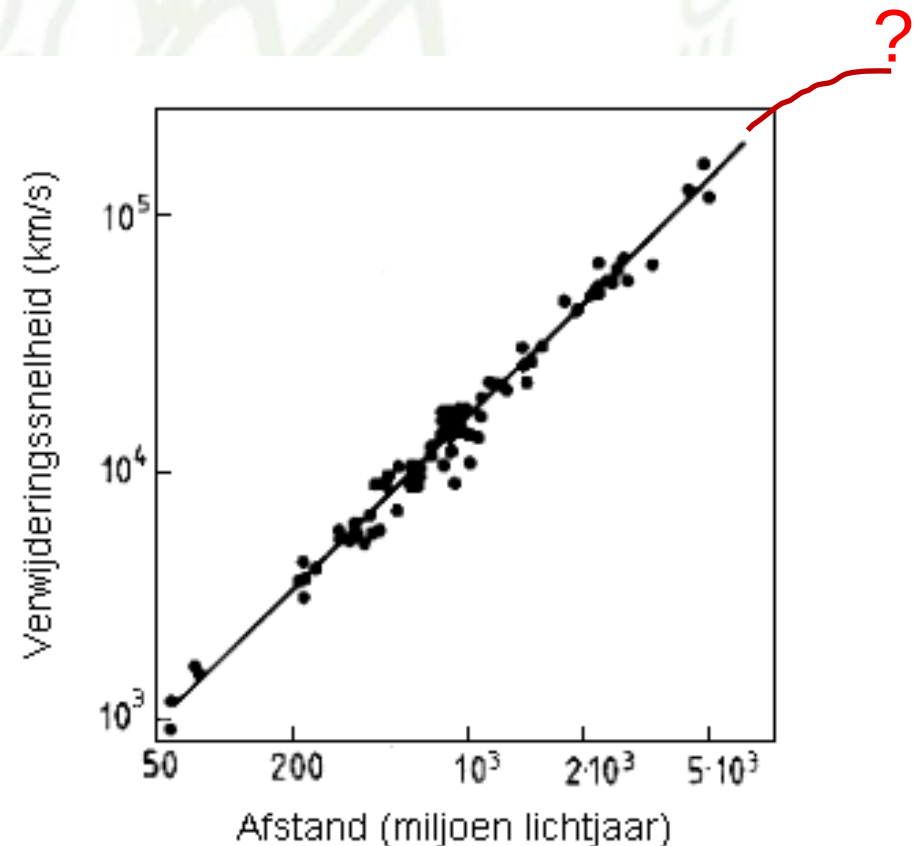
- Donkere materie domineert gravitatie (dus structuurvorming)
- DM ontkoppelt eerder van “straling” in het vroege heelal
- DM kan dus op moment CMB al meer structuur hebben!
- Probleem snelle structuurvorming opgelost

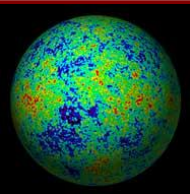




Testen van het model

- Volgens ons model geldt nu: $R(t) \sim t^{2/3}$
- H verandert in de tijd
- Hubble diagram niet helemaal rechte lijn
- Specifieke voorspelling
 - $k = 0$
 - $\Omega \ll 1$ (uit meting materie)
 - Kan niet allebei!



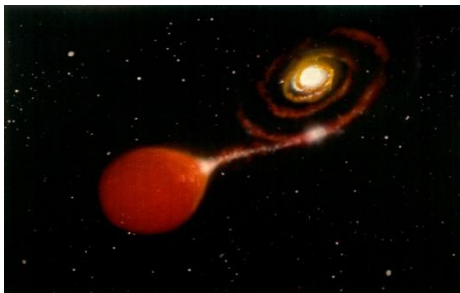


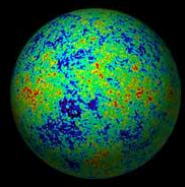
Type Ia Supernovae

Ontbranding van
koolstof in witte dwerg
onder gedegenereerde
omstandigheden

Relatie tussen
helderheidsverloop en
helderheid!

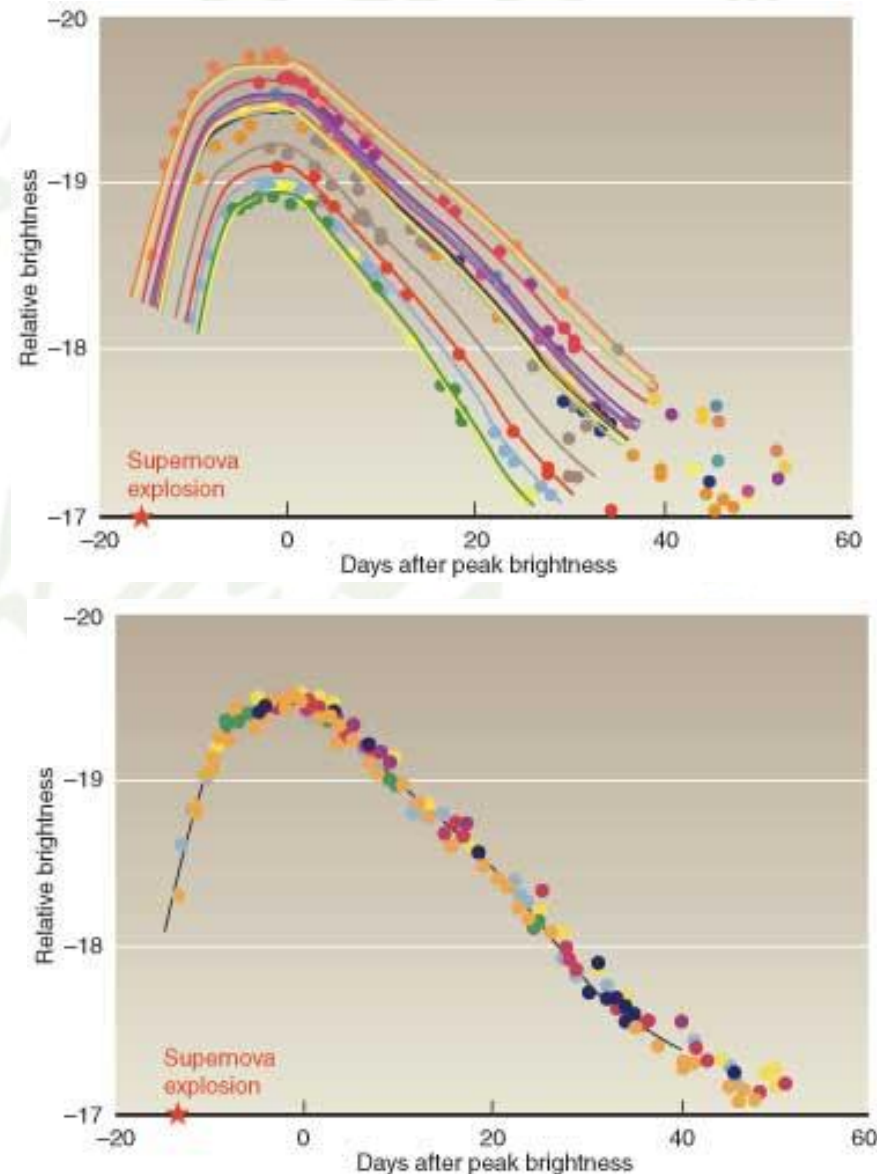
→ afstand

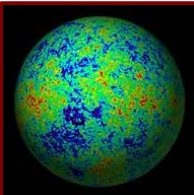




Type Ia Supernovae

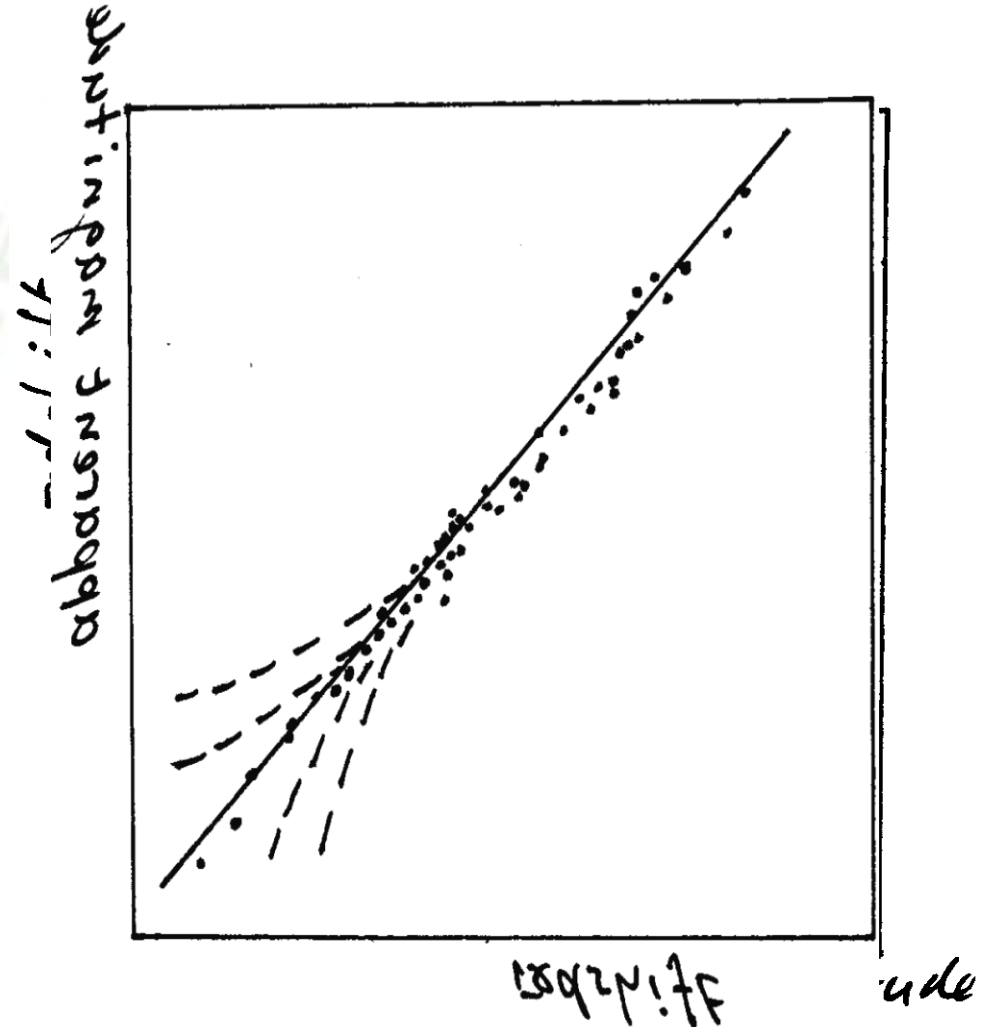
- Begin jaren '90
 - Relatie tussen *vorm* lichtkromme en *absolute helderheid*
 - Kunnen uit *vorm* lichtkromme van alle SNIa bepalen wat hun absolute helderheid is → afstand
 - Kunnen ook roodverschuiving meten
 - Sterrenkundige maat absolute helderheid: absolute magnitude ($-2.5 \log L + \text{Const}$)

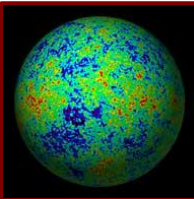




Hubble-diagram

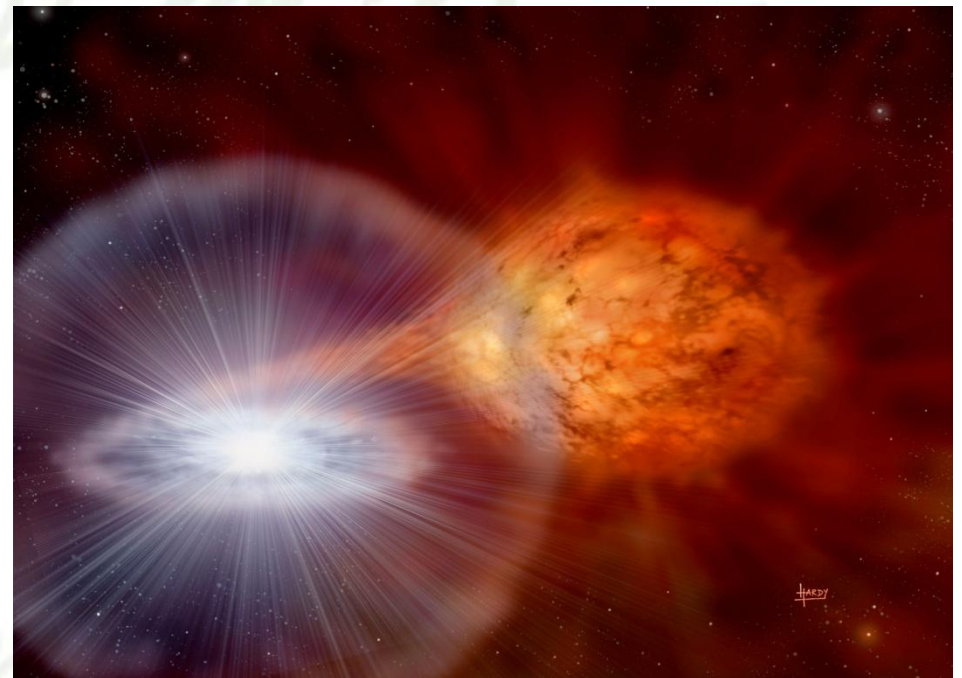
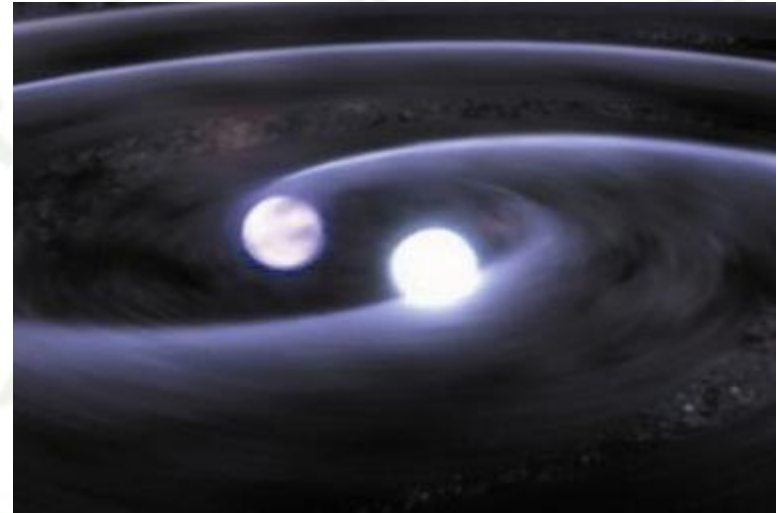
- Meer direct: voor identieke absolute helderheid is *schijnbare helderheid* maat voor de afstand
- Voor verschillende absolute magnitudes: afstandsmodulus $m - M$
- Traditioneel z op x-as, $m - M$ op y-as





Type Ia Supernovae

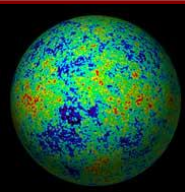
- Hoe ontstaan SNIa?
- Twee modellen
 - Samensmelten van 2 witte dwergen
 - Witte dwerg die massa opneemt van begeleider
- Probleem is dat ijking van absolute magnitude in lokaal heelal is gebeurd
- Systematisch effect in verre heelal?



Dubbele witte dwerg

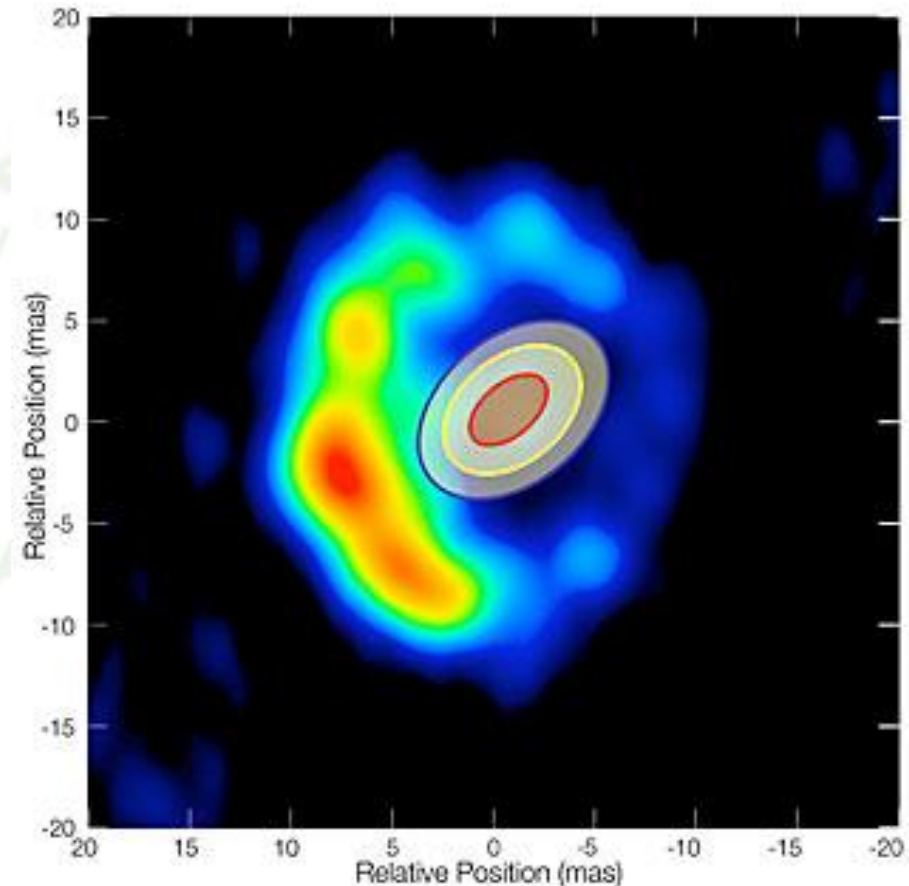


Gravitatiestraling → Samensmelten: mogelijk type Ia supernova



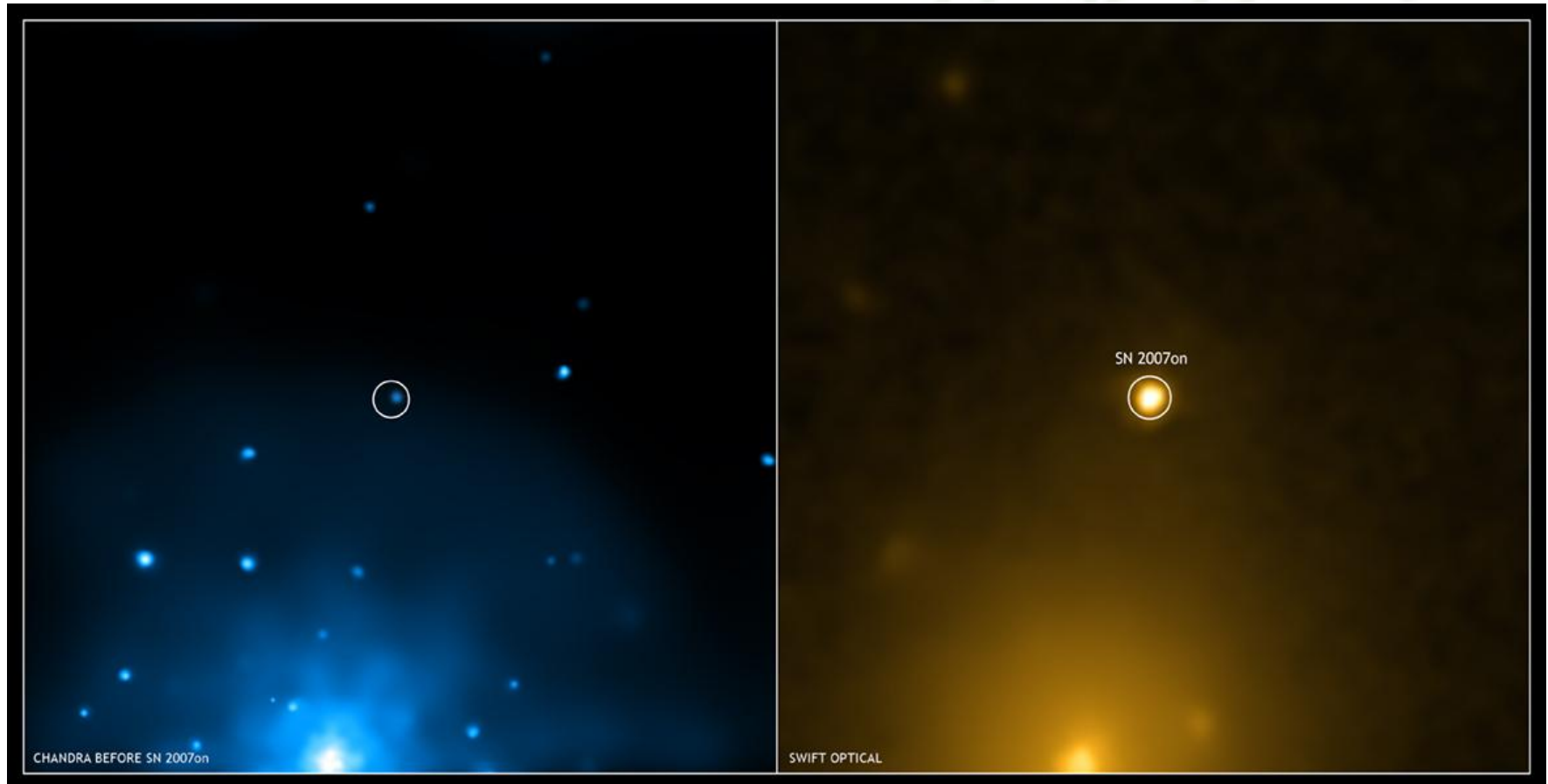
Ons onderzoek aan SNIa

- Wat zijn de voorlopers?
 - Directe waarneming
 - Waarnemingen en modellen van mogelijke voorlopers in onze eigen Melkweg
 - Modelleren van populaties van voorlopers in andere melkwegstelsels
 - Vergelijken met waargenomen SN frequenties



RS Oph

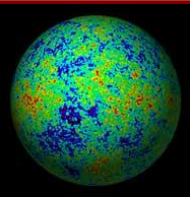
Directe waarneming



Roentgenbron
4 jaar eerder

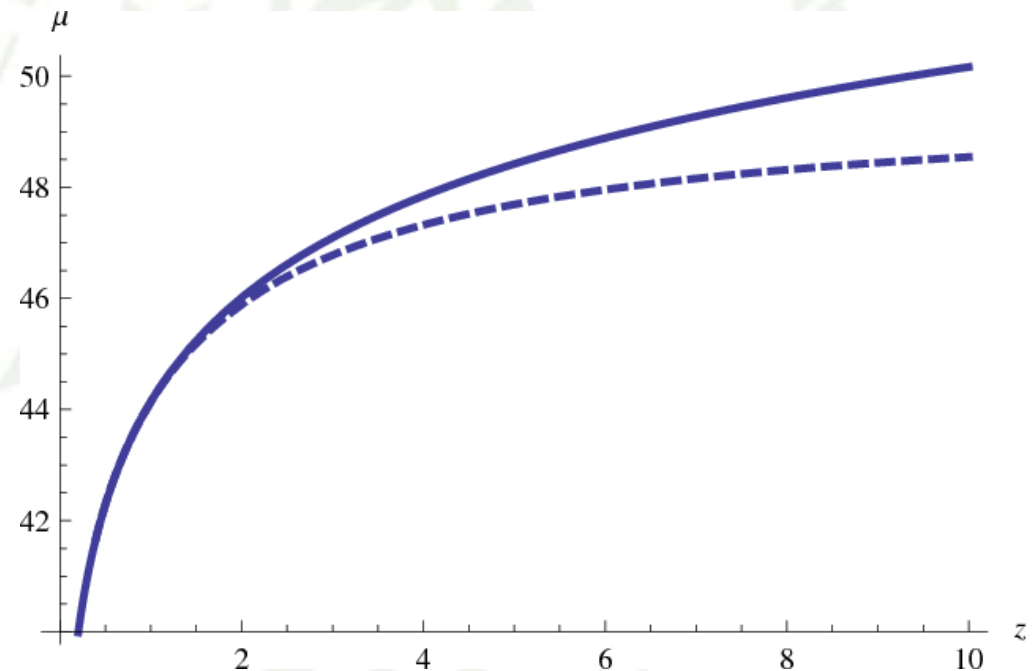
SN 2007on
november
2007
(optisch)

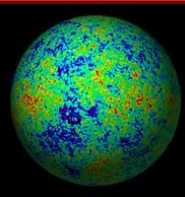
Voss & Nelemans, 2008, Nature



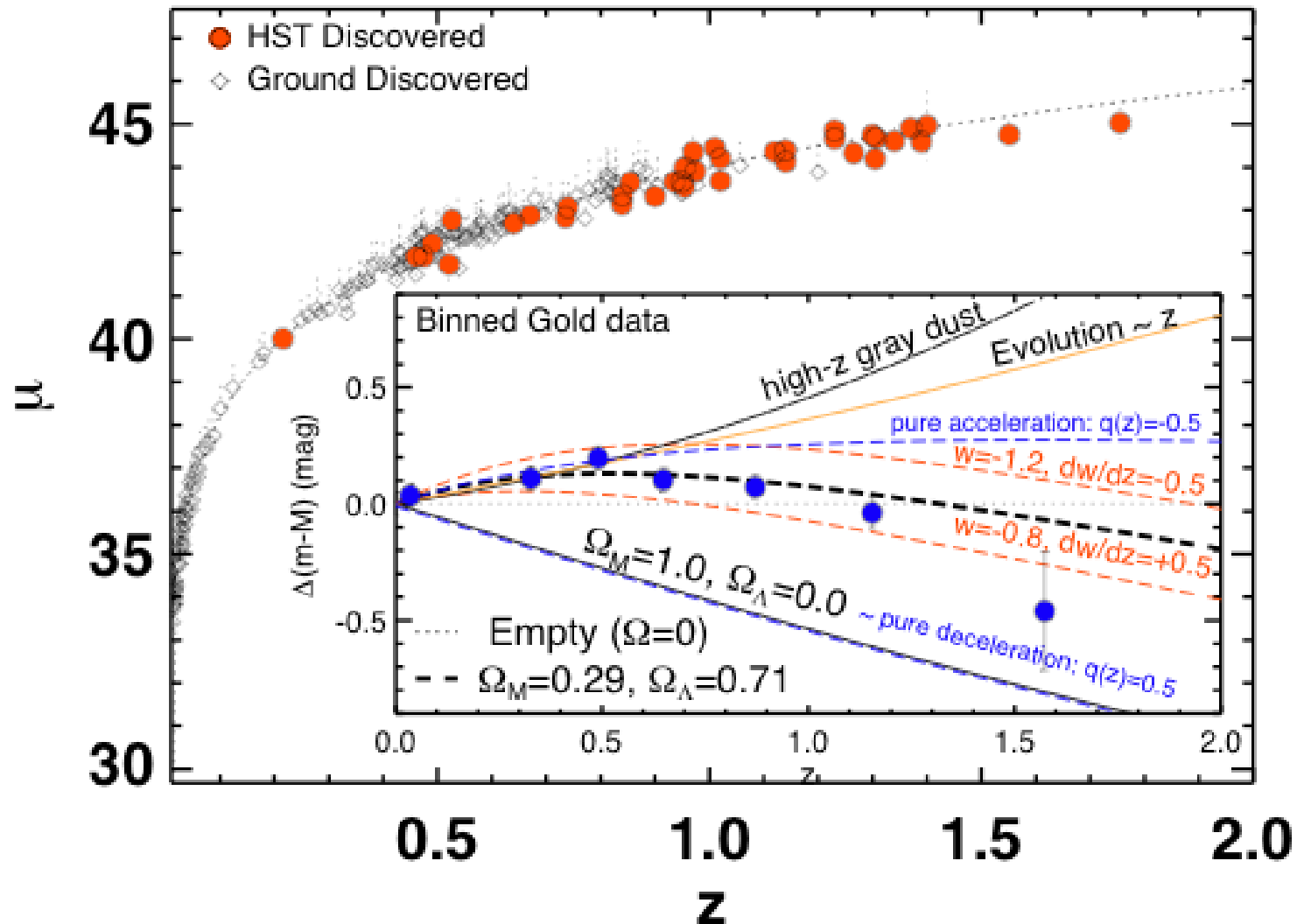
Testen van het model

- Verzameling SNIa met roodverschuiving en afstandsmodulus (μ)
- Vergelijken met modellen
- Vraag: wat klopt er
 - $k = 0$ of
 - $\Omega \ll 1$?
 - Allebei!

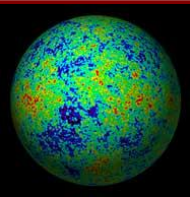




Testen van het model



Uijtdijing van het Heelal versnelt!

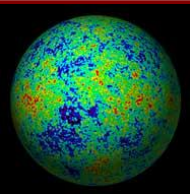


Terug naar Friedmann

Toevoegen: cosmologische constante (Λ)

$$\left(\frac{v}{R}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{\Lambda}{3} = -\frac{k}{R^2}$$

Λ niet afhankelijk van R !

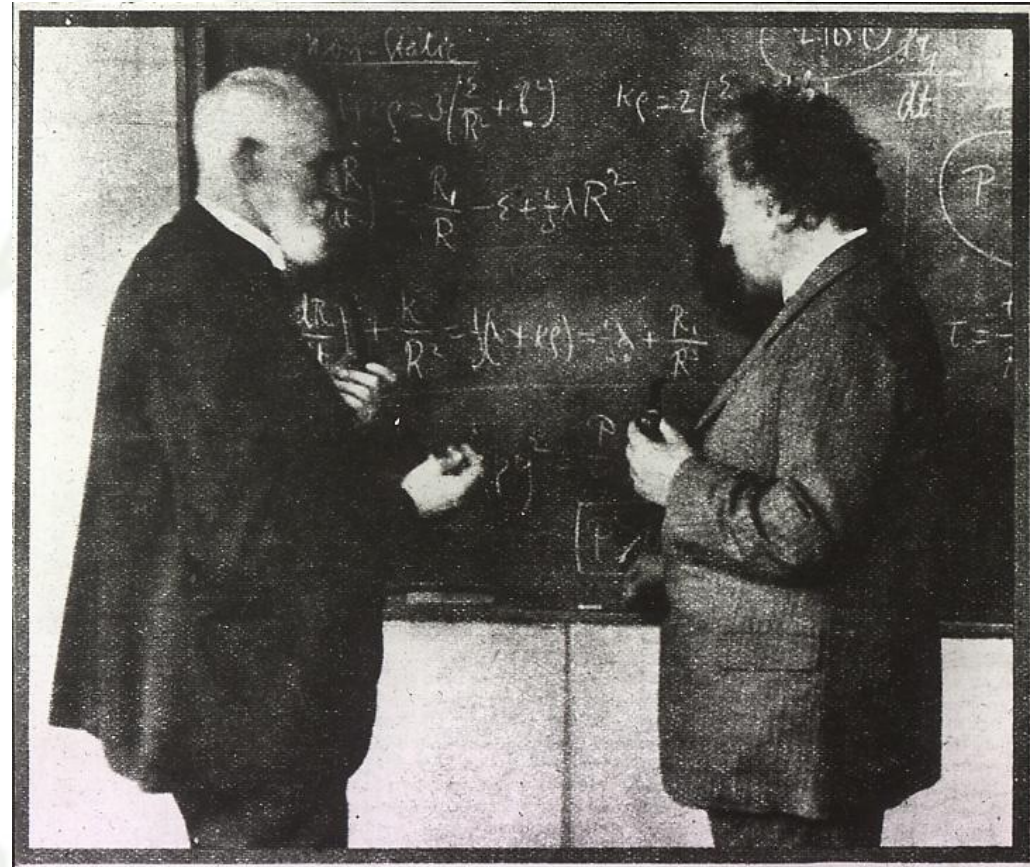


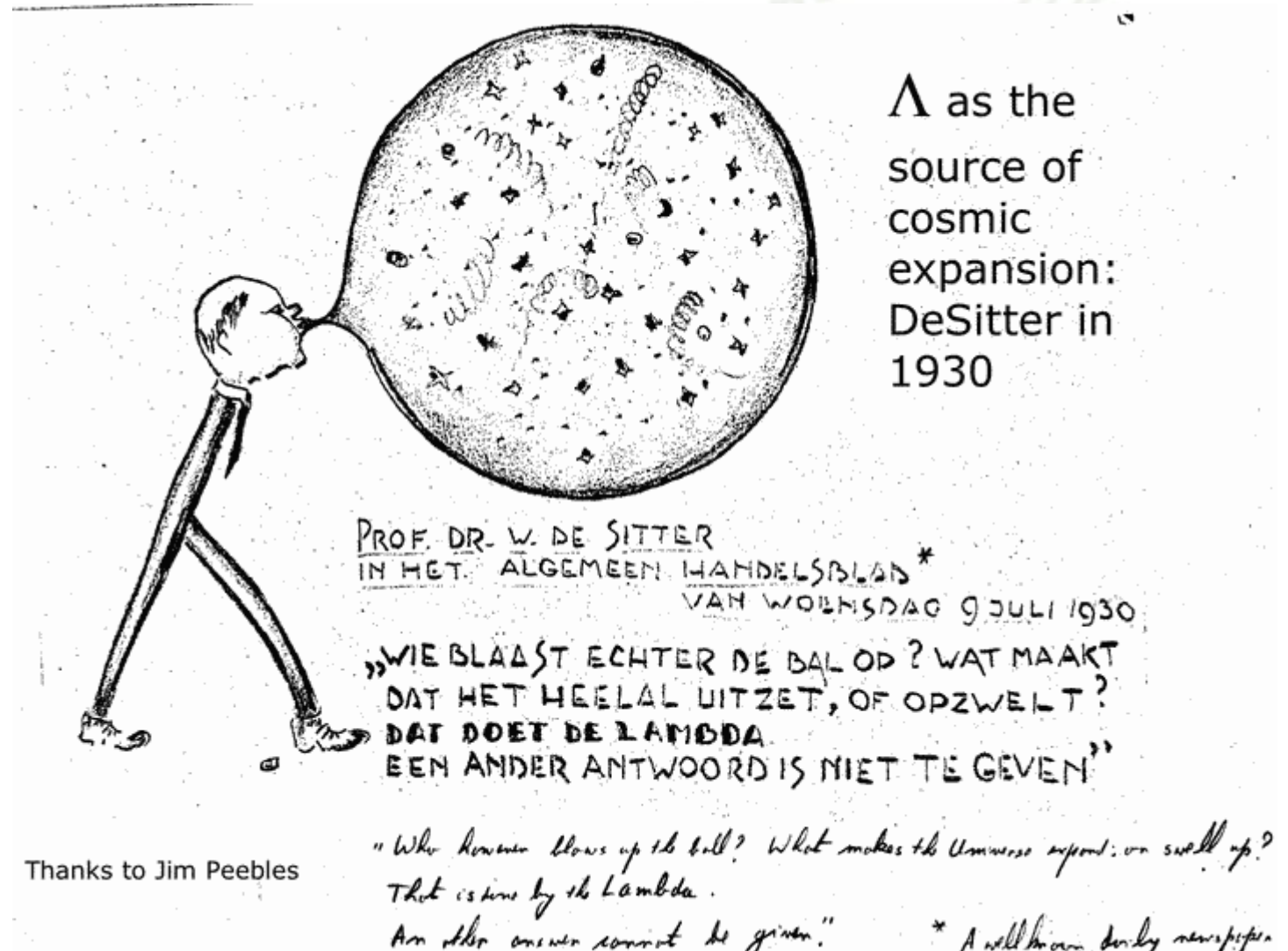
Alleen Λ , $k=0$

$$\left(\frac{v}{R}\right)^2 - \frac{\Lambda}{3} = 0 \rightarrow R \propto e^{\sqrt{\Lambda/3}t}$$

Versnelde uitdijing!

Oplossing van de Sitter





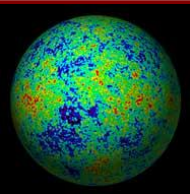
Slide van Bob Kirshner



Vrijdag 1 juli 2011 IMAPP symposium

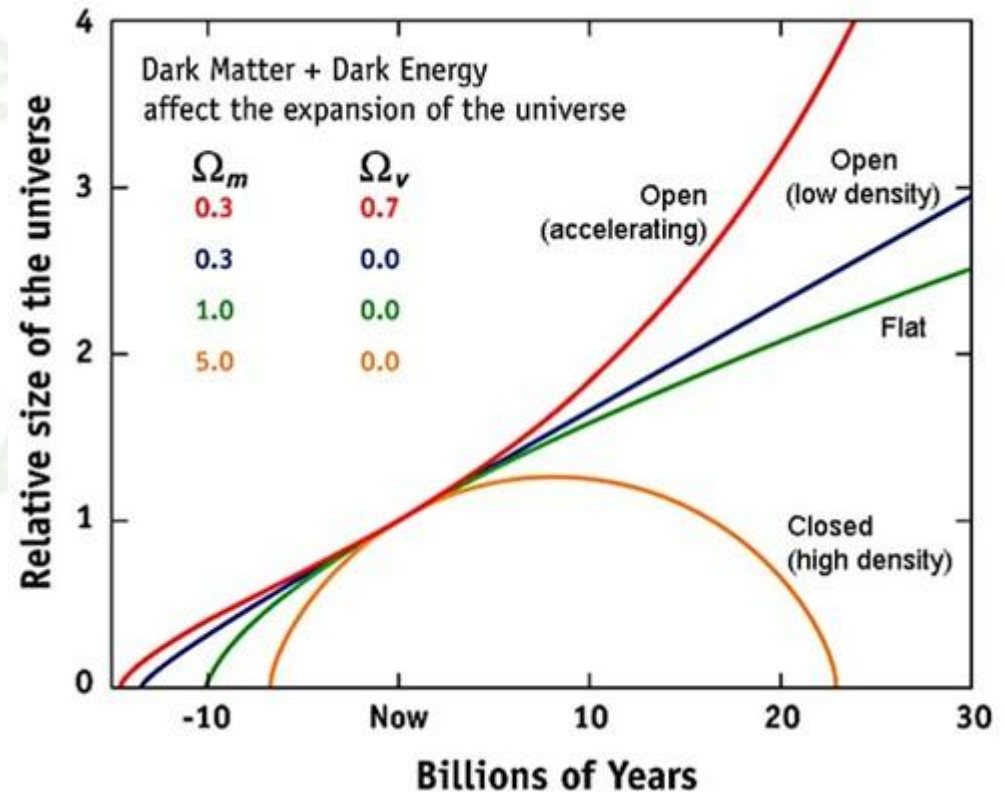
Sprekers o.m. Bob Kirshner!

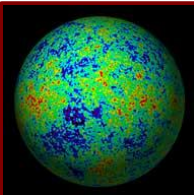
Zie (tzt) www.ru.nl/imapp



Materie en Λ

- Ingewikkelder
- Maar
 - Als R klein $\rightarrow$ materiedichtheid groot (dus dominant) $\rightarrow R \sim t^{2/3}$
 - Als R groot $\rightarrow$ materiedichtheid klein (dus Λ dominant) $\rightarrow R \sim e^{Ht}$
 - Overgang heel recent!
- Lost ook probleem leeftijd heelal op!





Wat is Λ ?

- Cosmologische constante
- Wordt nu over het algemeen “donkere energie” genoemd
- Reden: niet zeker dat het een constante is!
- Energiedichtheid die met de ruimte samenhangt

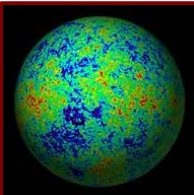
- Algemeen:

$$\rho \propto a^{-3(1+w)}.$$

Materie: $w = 0$

Λ : $w = -1$

Misschien donkere energie
niet precies $w = -1$?



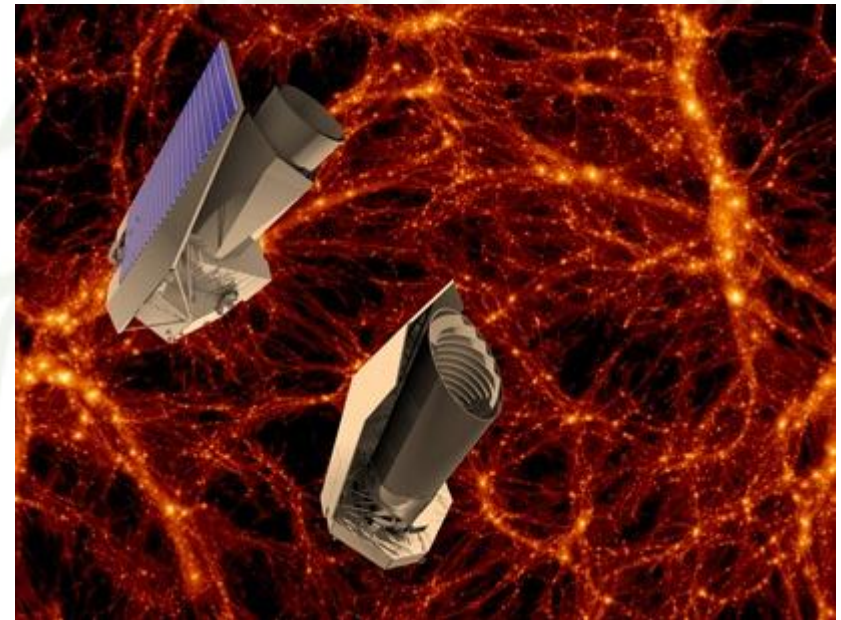
Hoe nu verder

Men neemt aan

$$w = w_0 + w_1(1+z)$$

Meten w_0 en w_1

- Supernovae (probleem met systematische fout)
- Gravitatielenzing (volgende week)
- Baryon Acoustic Oscillations

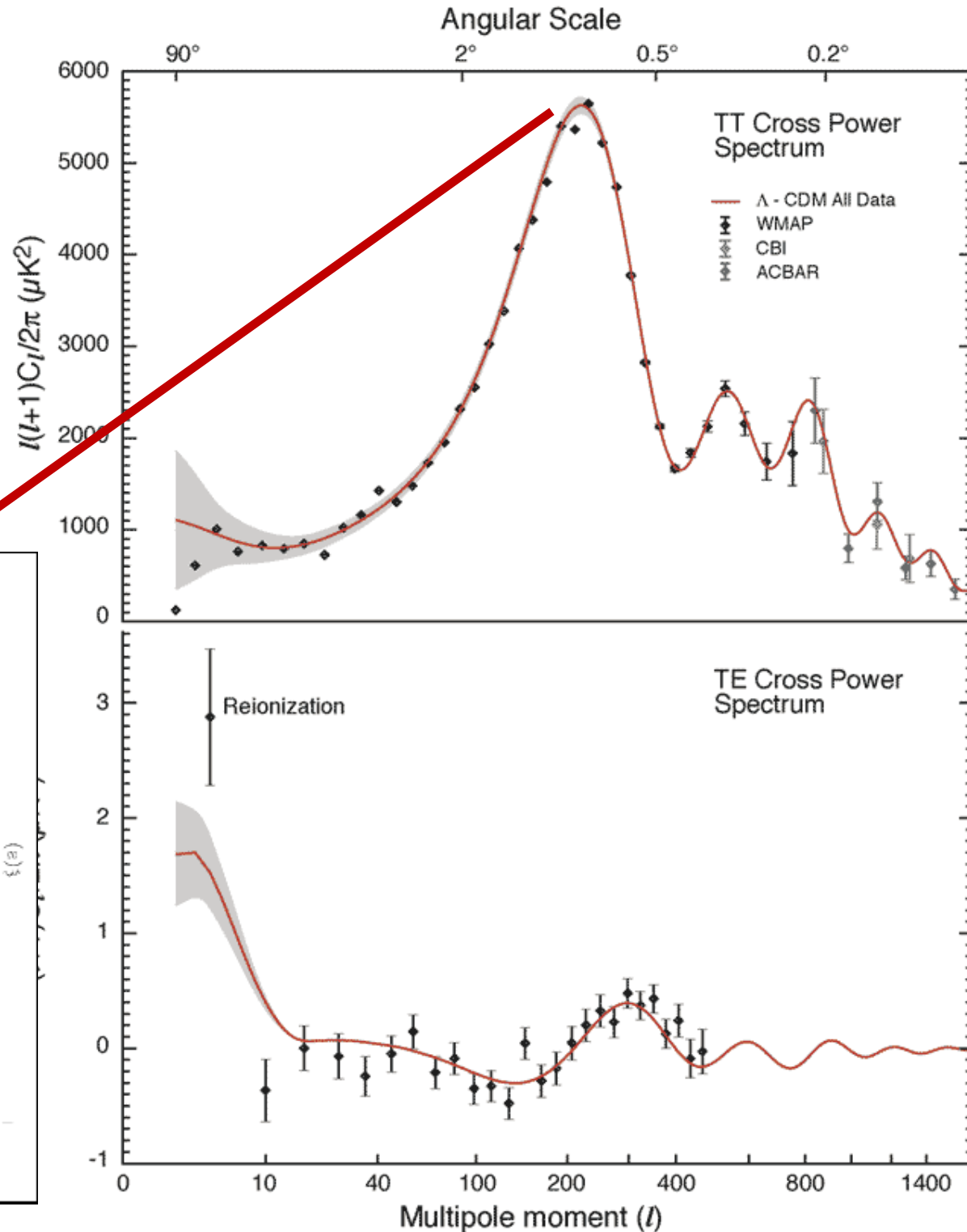
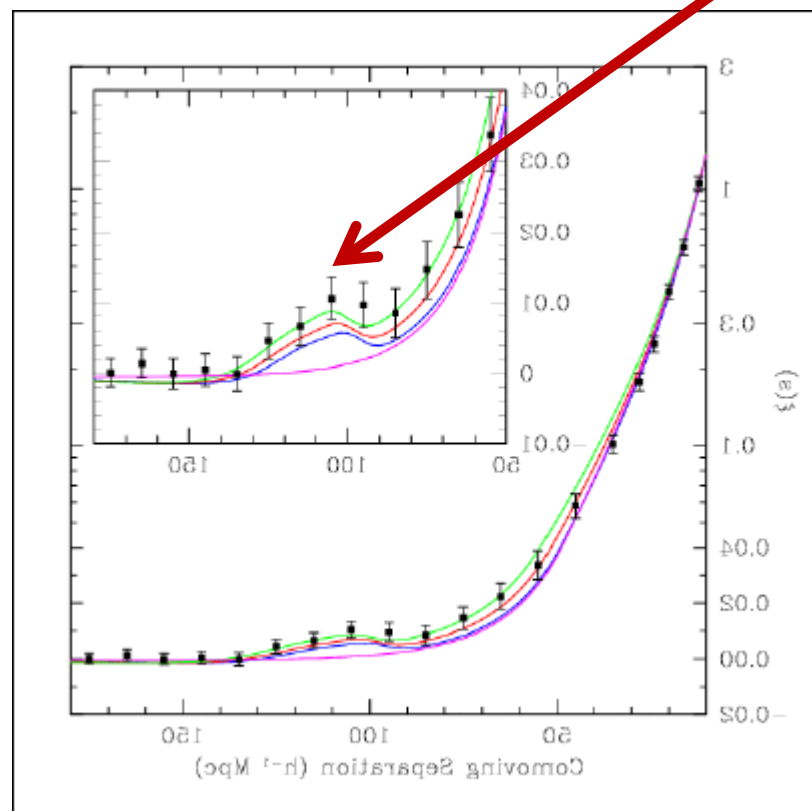


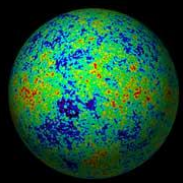
EUCLID

WMAP

structuurvorming uit
fluctuaties

Ook: meting uitdijing!
(laatste college)





Ons nieuwe model

