

Sterrenkunde Hoofdstuk 7:

Kosmologie

Marc van der Sluys

Universiteit Utrecht, Nikhef



**Universiteit
Utrecht**

<https://www.nikhef.nl/~sluys/>

sluys@nikhef.nl

Nikhef

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis

1 Kosmische afstandsladder

- Dubbelsterren
- Cepheïden
- Tully-Fisher
- SNIae
- *Hubble flow*

2 De wet van Hubble-Lemaître

3 Newtoniaanse kosmologie

4 Een heelal met straling

5 Λ CDM-model

6 Geschiedenis

Kosmische
afstandscladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal

 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

Methode

Maximale afstand

Radar, telemetrie

 ~ 10 AU

Parallax

5 kpc

Eclipserende dubbelsterren

3 Mpc

Cepheïden

30 Mpc

Tully-Fisherrelatie

 > 100 Mpc

Type-Ia-supernovae

 > 1 Gpc

SMBH mergers

 > 10 Gpc

Hubble flow

 > 10 Gpc

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling

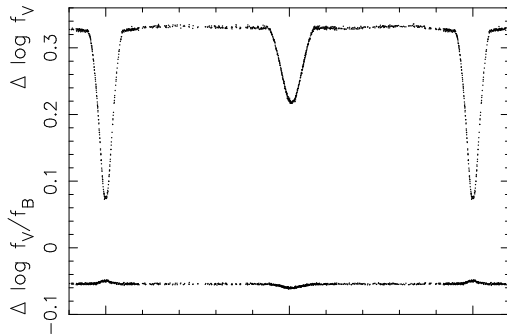
Heelal met straling

 Λ CDM-model

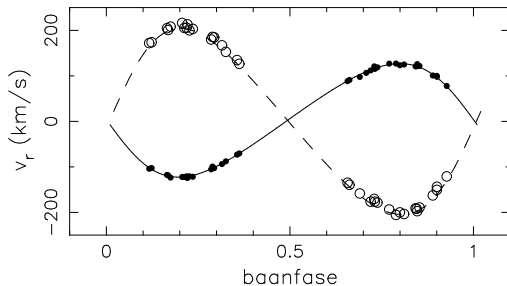
Grote schaal

 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

GG Lup: lichtkromme (B7V+B9V)

Bron: Verbunt, F., *Het leven van sterren*, Epsilon uitgave 59 (2019)

GG Lup: radiële snelheden

- Ideaal geval: eclipsen **en** spectra!
- **Volledige 3D baan** in km/A.U./ $R_{\odot}$
- Gedetailleerd model: stralen + temperaturen $\rightarrow$ lichtkrachten $\rightarrow$ afstand!
- Tot ~ 30 Mpc

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van

Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

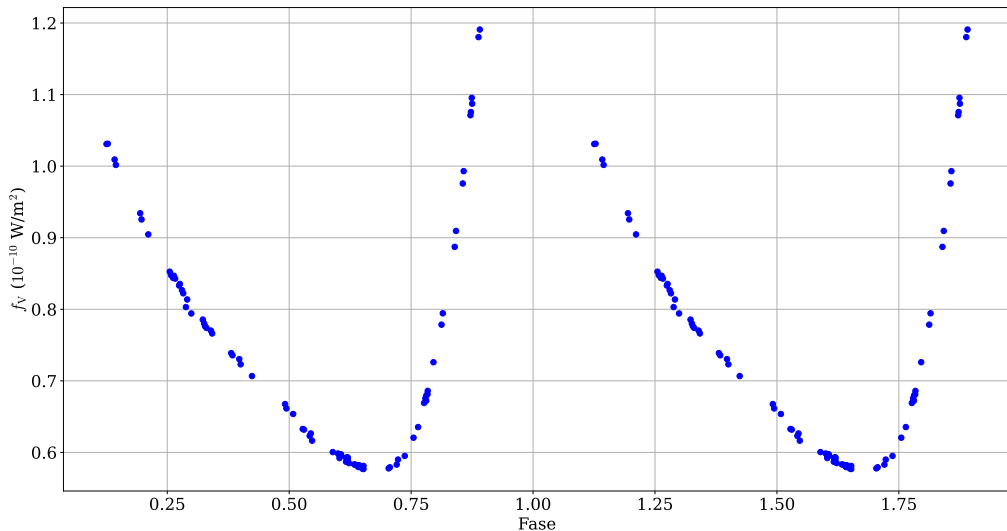
Λ CDM-model

Grote schaal

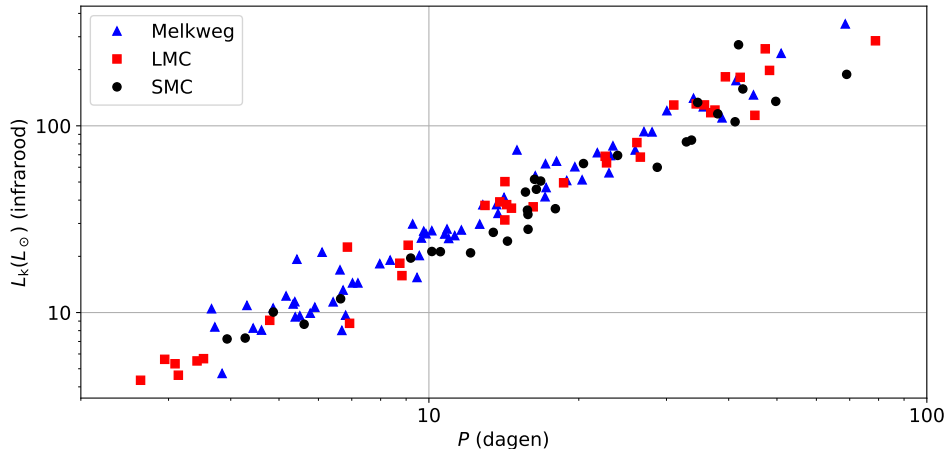
Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis



Cepheïden zijn sterren met radiële pulsaties $\rightarrow$ variatie in R , L



Bron data: [Gieren et al. \(2018\)](#)

- Relatie tussen **periode** en **intrinsieke lichtkracht**:

$$L_V \approx 50.2 L_{\odot} \left(\frac{P}{\text{day}} \right)^{0.972}$$

(Bron: [Benedict et al. 2007](#), voor de V-band)

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

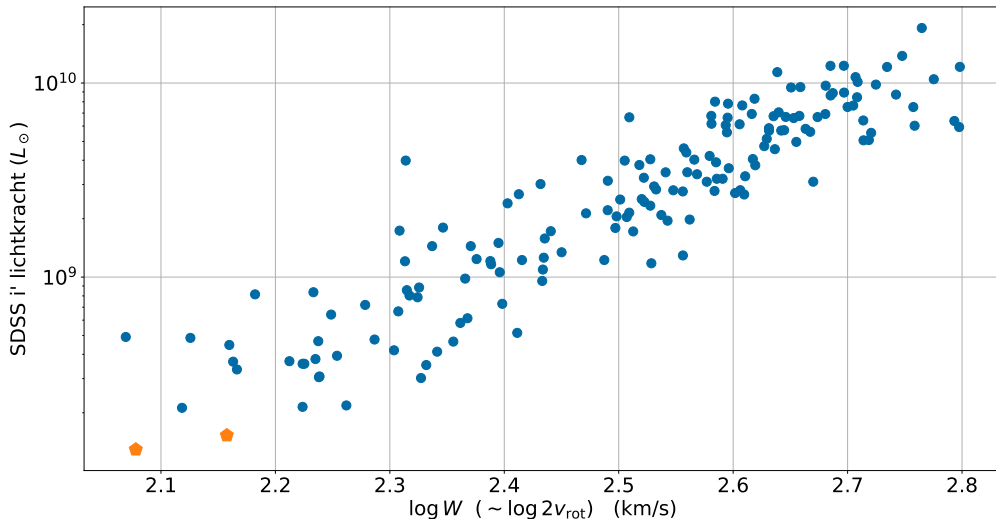
Λ CDM-model

Grote schaal

Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis



Bron data: [Corbelli & Salucci MNRAS 311, 441 \(2000\)](#)

● Relatie tussen **maximale rotatiesnelheid** en de **helderheid** van sterrenstelsels

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNI_{ae}

Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal

Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis



Bron: [Hubble](#), [NASA/ESA](#)

- Ontploffende witte dwergen

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling

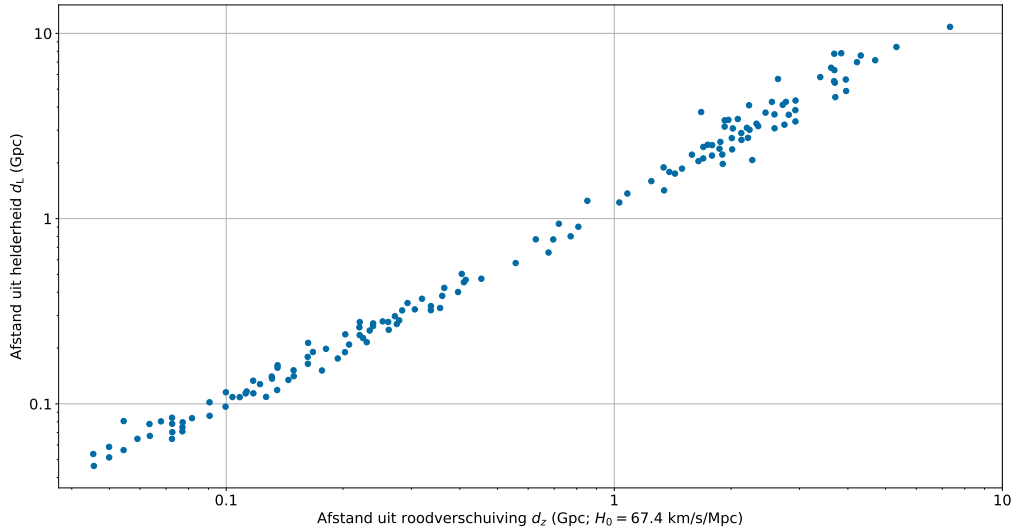
Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal

 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenisBron: [Kirshner \(2003\)](#)

● “Standaardkaarsen” → bepaal afstand uit schijnbare helderheid en duur

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae

Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

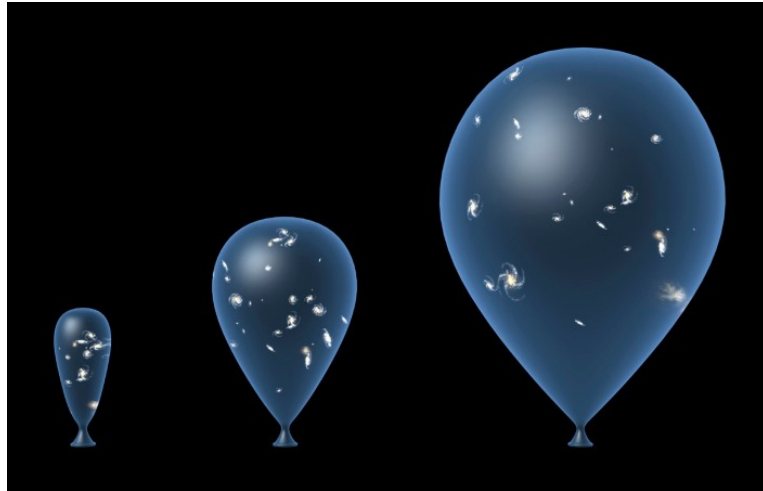
Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis



Bron: TAKE 27 LTD/SPL (via Nature.com)

- Relatie tussen roodverschuiving en afstand van sterrenstelsels
- Sterrenstelsels (en clusters) worden *niet* groter!

Kosmische afstandscladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

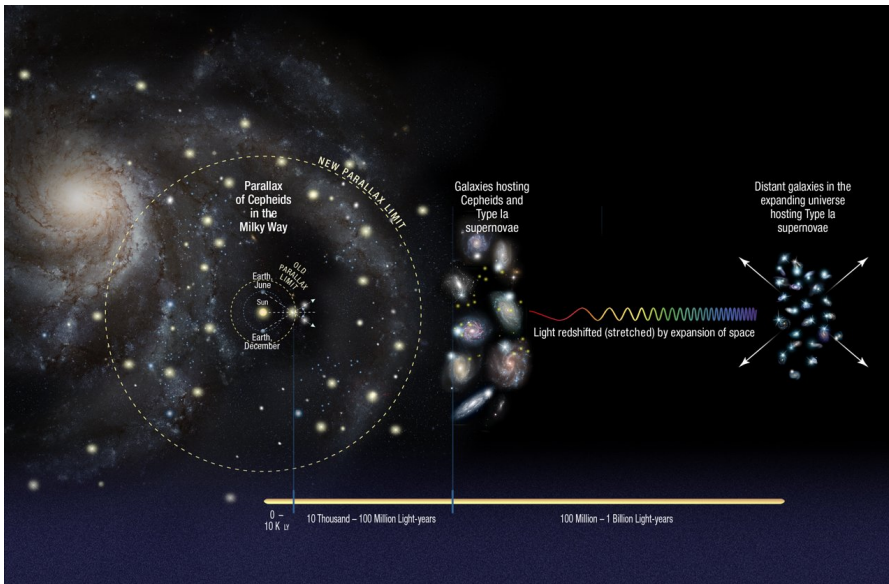
Λ CDM-model

Grote schaal

Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis



Kosmologie

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

*Hubble*diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

- 1 Kosmische afstandsladder
- 2 De wet van Hubble-Lemaître
 - *Hubble*diagram
 - De wet van Hubble

- 3 Newtoniaanse kosmologie
- 4 Een heelal met straling
- 5 Λ CDM-model
- 6 Geschiedenis

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble*diagram*
De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met
straling

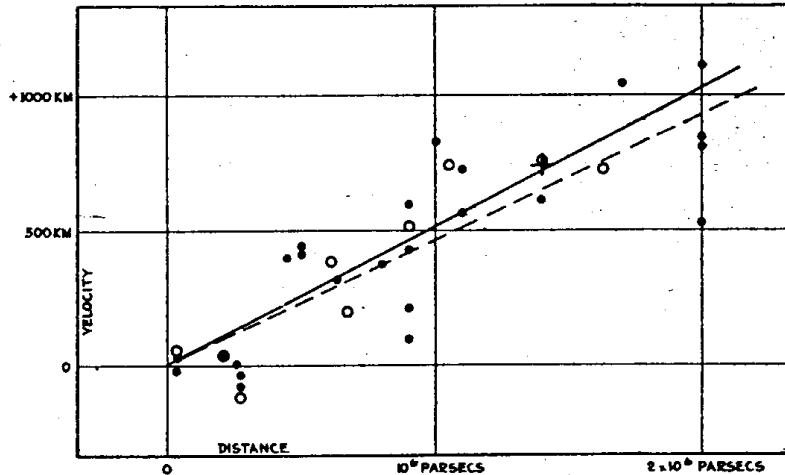
Achtergrondstraling
Heelal met straling

 Λ CDM-model

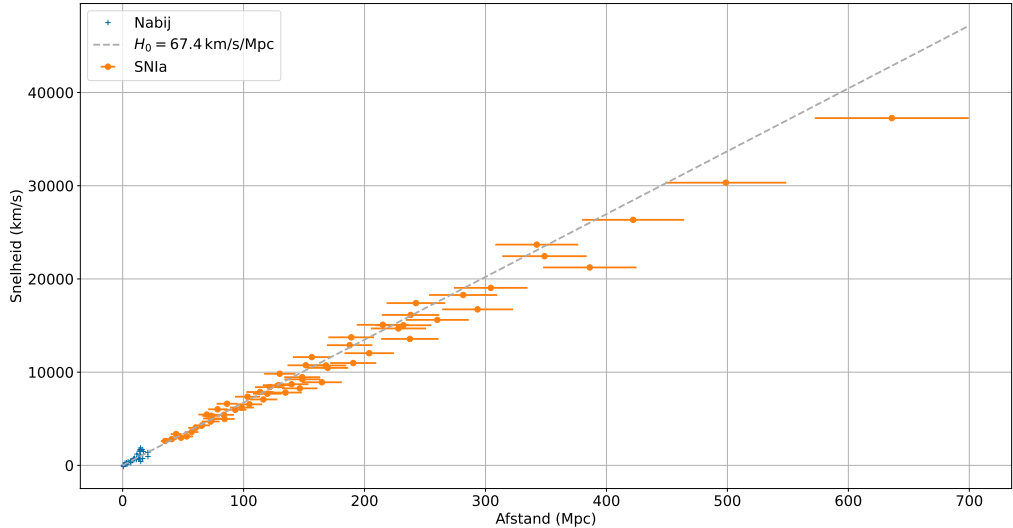
Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis



- Het originele **Hubble**diagram Bron: [Hubble \(1929\)](#)

Bron: [Kirschner \(2003\)](#)

Kosmische afstandsladder

- Dubbelsterren
- Cepheïden
- Tully-Fisher
- SNIae
- Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

- Hubble diagram
- De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

- Heelal met massa
- Een gesloten, open of vlak heelal
- Roodverschuiving

Een heelal met straling

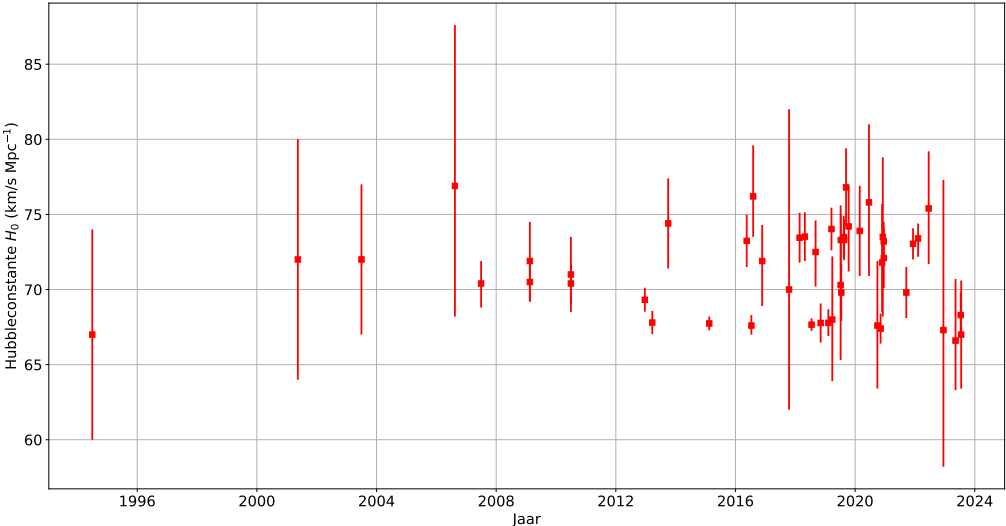
- Achtergrondstraling
- Heelal met straling

Λ CDM-model

- Grote schaal
- Λ CDM-model

Geschiedenis

- Een korte geschiedenis



Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal

 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

- $v = H_0 \cdot d$
 - H_0 : **Hubbleconstante** ≈ 67.4 km/s/Mpc
 - **Let op: snelheid** is geen correcte interpretatie van **roodverschuiving**!
- **Kosmologisch principe:** heelal is op grote schaal **homogeen** en **isotroop**
→ expansie overal hetzelfde
- $r(t) = r_s a(t) \quad \rightarrow \quad v(t) = r_s \dot{a}(t)$
 - $r(t)$: afstand
 - r_s : coördinaat ("label")
 - $a(t)$: **schaalfactor** van het heelal:
 - nu: $a(t_0) \equiv 1$
 - vroeger: $a(t) < 1$
- $H(t) = \frac{v(t)}{r(t)} = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$

Kosmologie

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIa's
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis

- 1 Kosmische afstandsladder
- 2 De wet van Hubble-Lemaître
- 3 Newtoniaanse kosmologie
 - Heelal met massa

- Een gesloten, open of vlak heelal
 - Roodverschuiving
- 4 Een heelal met straling
 - 5 Λ CDM-model
 - 6 Geschiedenis

Beschouw een uitdijend heelal, homogeen gevuld met stofdeeltjes met ρ . Een schil in dat heelal heeft straal r en massa m . De energie in de schil is dan

- $E \equiv E_{\text{kin}} + E_{\text{gr}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM(r)m}{r} \equiv -\frac{1}{2}mkc^2r_s^2 \quad [k] = \text{m}^{-2}$
 - r_s is een **label** voor deze schil in **meebewegende** coördinaten
 - $M(r) = \frac{4\pi}{3}r^3\rho$ is **constant**, ook in een uitdijend heelal
 - $a(t)$: **schaalfactor**; Tegenwoordig: $a(t_0) = 1$, vroeger: $a < 1$

We kunnen dan de **Friedmannvergelijking** opschrijven:

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

Tegenwoordig ($t = t_0 \rightarrow a(t_0) = 1$) geldt

$$H_0^2 - \frac{8\pi G}{3}\rho_0 = -kc^2$$

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubblediagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal

 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

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

We onderscheiden drie gevallen:

- 1 $k > 0$; $E < 0$; $v < v_{\text{esc}}$; $\Omega_0 > 1$: het heelal is **gesloten** en **begrensd**: de uitdijning zal ooit **stoppen en omkeren**
- 2 $k < 0$; $E > 0$; $v > v_{\text{esc}}$; $\Omega_0 < 1$: het heelal is **open** en **onbegrensd**: de uitdijning **gaat altijd door**
- 3 $k = 0$; $E = 0$; $v = v_{\text{esc}}$; $\Omega_0 = 1$: het heelal is **vlak** en **onbegrensd**: de uitdijning **remt asymptotisch af**: $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = 0$

Voor een **vlak heelal** ($k = 0$) beweegt iedere schil met de **ontsnappingsnelheid** en is de dichtheid **kritisch**:

$$H^2 - \frac{8\pi G}{3}\rho = 0 \quad \rightarrow \quad \rho_{\text{crit}}(t) = \frac{3H(t)^2}{8\pi G}$$

We definiëren de **dichtheidparameter** Ω als de fractie van de kritische dichtheid:

$$\Omega(t) \equiv \frac{\rho(t)}{\rho_{\text{crit}}(t)}; \quad \Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{\text{crit},0}}; \quad \Omega_{b,0} \approx 0.049 \left(\frac{H_0}{67.4 \text{ km/s/Mpc}} \right)^2$$

- Vlak $\rightarrow k = 0$ in Friedmannvergelijking
- Massabehoud: $a(t)^3 \rho(t) = \text{constant} = a(t_0)^3 \rho(t_0) \equiv a_0 \rho_0 \equiv \rho_0$
- $H^2 = H_0^2 / a^3 \rightarrow \dot{a} \sqrt{a} = H_0 \rightarrow$

$$a(t) = \left(\frac{3}{2} H_0 t \right)^{2/3} \equiv \left(\frac{3}{2} \frac{t}{t_H} \right)^{2/3}$$

- de huidige leeftijd van het heelal: $t_0 = \frac{2}{3} t_H$
- $H_0 \approx 67.4 \text{ km/s/Mpc} \rightarrow t_H \approx 14.5 \text{ Gyr} \rightarrow t_0 \approx 9.7 \text{ Gyr}$
 - **jonger dan de oudste sterren!**
 - $\rightarrow$ modelletje *kwalitatief* OK, maar laat *kwantitatief* te wensen over

- Planckmissie: $t_0 \approx 13.787 \text{ Gyr}$
- Simpel modelletje met juiste waarde van t_0 werkt vrij aardig!
- Uitdrukkingen voor open en gesloten heelal iets complexer

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

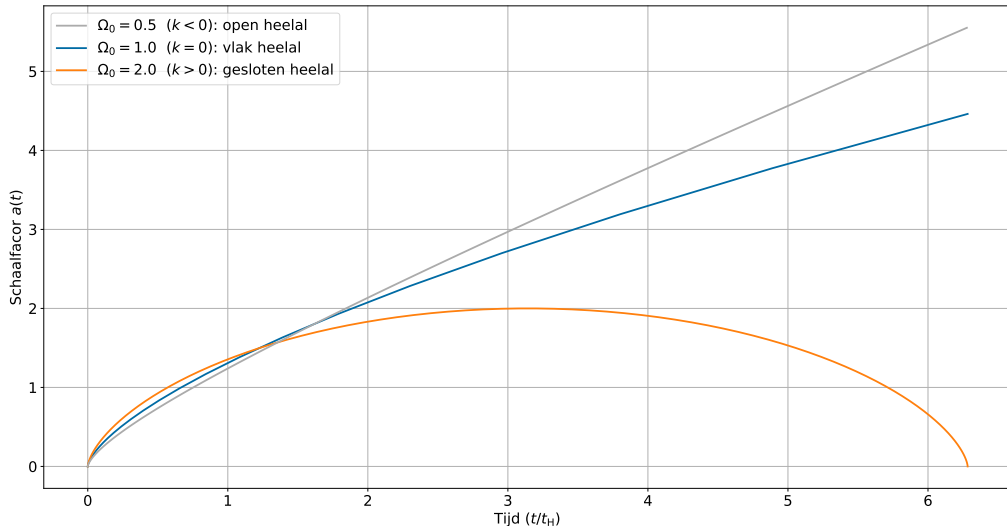
Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis



Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis

- $\lambda \propto a \rightarrow z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{bron}}}{\lambda_{\text{bron}}} = \frac{a_{\text{obs}} - a_{\text{bron}}}{a_{\text{bron}}} \equiv \frac{a(t_0)}{a_{\text{bron}}} - 1 \equiv \frac{1}{a_{\text{bron}}} - 1$

$$\neq z_{\text{Doppler}}(!) \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{bron}}}{\lambda_{\text{bron}}} = \sqrt{\frac{1 + v_{\text{rad}}/c}{1 - v_{\text{rad}}/c}} - 1 \approx \frac{v_{\text{rad}}}{c}$$
 - correcte Wet van Hubble-Lemaître voor $z \ll 1$: $d \approx \frac{cz}{H_0}$

- $$1 + z = \frac{1}{a(z)}$$
 z vertelt ons direct de schaafactor van het heelal bij uitzenden!

- $$t(z) \equiv t_0 \frac{1}{(1+z)^{3/2}}$$
 leeftijd van het heelal op moment van uitzenden

- $t_0 \approx 13.787 \text{ Gyr}$: absolute leeftijd van het heelal (Planck)

- $t_L \equiv t_0 (1 - t_{\text{rel}}(z))$: **terugkijktijd**

- $d_L = c \cdot t_L = ct_0 \left(1 - \frac{1}{(1+z)^{3/2}} \right)$: **lichtafstand**

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal

 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis

Kosmische afstandscladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

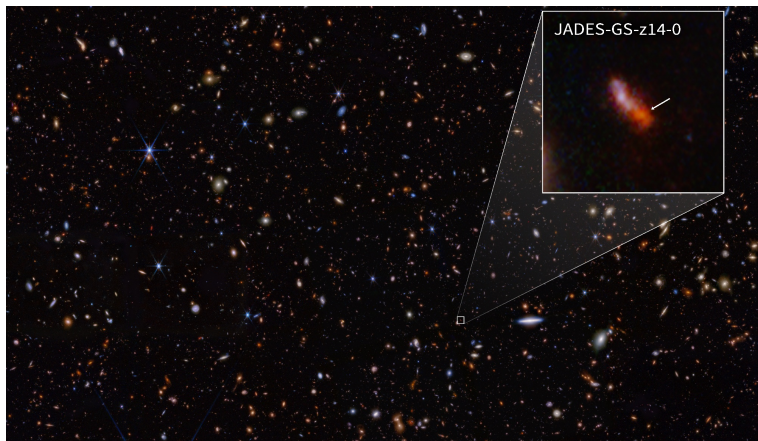
Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis



Bron: NASA, ESA, CSA, STScI

Voorbeeld: verste sterrenstelsel JADES-GS-z14-0: $z = 14.3$ (2024):

- $t_{\text{rel}} = t(z)/t_0 \sim 0.017 \rightarrow t_L/t_0 \approx 0.983$ (relatief)
- $t(z) \approx 230 \text{ Myr} \rightarrow t_L \sim 13.56 \text{ Gyr}$ (absoluut)
- $d_L \approx 4.16 \text{ Gpc}; \quad a(z) \sim 0.065$

Kosmologie

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis

- 1 Kosmische afstandsladder
- 2 De wet van Hubble-Lemaître
- 3 Newtoniaanse kosmologie

- 4 Een heelal met straling
 - Achtergrondstraling
 - Heelal met straling
- 5 Λ CDM-model
- 6 Geschiedenis

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

1931: Lemaître: **straling als overblijfsel** van het vroege heelal

1934: Tolman: **Planckspectrum blijft behouden** in uitdijend heelal, met
roodverschuiving

1948: Alpher en Herman: **microgolfstraling** met $T_{\text{eff}} \sim 5 \text{ K}$

1965: Penzias en Wilson ontdekken bij toeval **kosmische
achtergrondstraling** (*cosmic microwave background*; **CMB: 2.7 K**)

1978: Nobelprijs

1989–1993: COBE-missie → **werkcollege**

2001–2010: WMAP-missie

2009–2013: Planckmissie

399/400 fotonen in het heelal zijn CMB!

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met
straling

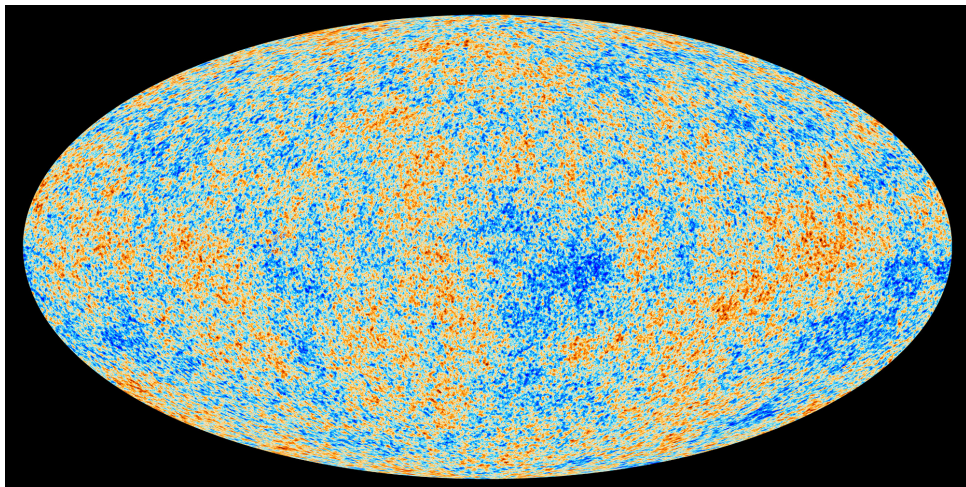
Achtergrondstraling
Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis



Bron: ESA/Planck

- $T_{\text{eff}} = 2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$
- $\Delta T/T \sim 10^{-5} (!)$

- structuur vastgelegd: $t = 377.7 \pm 3.2 \text{ kyr}$
- structuur ontstaan: $t \sim 10^{-30} \text{ s}$

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met
straling

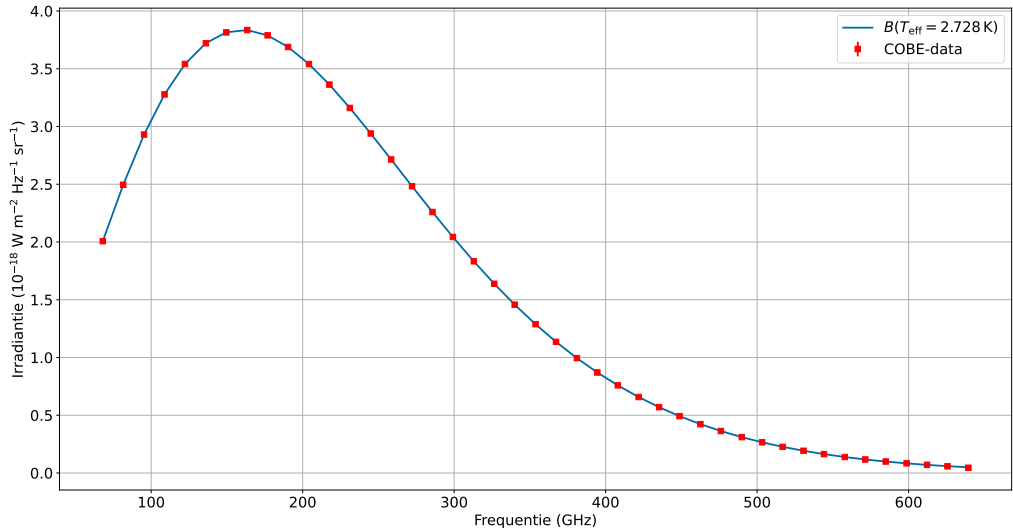
Achtergrondstraling
Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis



Bron: COBE

→ werkcollege

- **Stralingsenergiedichtheid:** $u = \frac{4}{c} B(T) = \frac{4\sigma T^4}{c}$ (H2)
 - $(d)\lambda$ schaalt met a : $\lambda(a) = a \cdot \lambda_0$; $d\lambda(a) = a \cdot d\lambda_0$
 - u schaalt met a^{-4} : a^{-3} voor n_{foton} ; a^{-1} voor $\lambda_{\text{foton}} \rightarrow \epsilon_{\text{foton}}$: $u_0 = a^4 u(a)$

$$u_0(T_0, \lambda_0) d\lambda_0 = \frac{8\pi hc}{\lambda_0^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda_0 k T_0} - 1} d\lambda_0$$

$$= a^4 u(T(a), \lambda(a)) d\lambda(a) = \frac{8\pi hc}{\lambda_0^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda_0 k (T(a)a)} - 1} d\lambda_0$$

- $T(a) = \frac{T_0}{a}$; $T_0 = 2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$

- $\rho_{\text{rad}} = \frac{u}{c^2} = \frac{4\sigma}{c^3} T(a)^4 = \frac{4\sigma T_0^4}{c^3 a^4} = \frac{\rho_{0,\text{rad}}}{a^4}$ (equivalente massadichtheid)

- Overgang straling $\rightarrow$ massa:

$$\bullet \rho_{\text{rad}} = \rho_{\text{mass}} \rightarrow \frac{4\sigma T_0^4}{c^3 a^4} = \frac{\rho_0}{a^3} \rightarrow a = \frac{4\sigma T_0^4}{c^3 \rho_0} = \frac{32\pi G \sigma T_0^4}{3c^3 H_0^2} \sim 5 \times 10^{-5}$$

$$\bullet a \sim 5 \times 10^{-5} \rightarrow z \sim 2 \times 10^4; \quad T \sim 5 \times 10^4 \text{ K}$$

$$\bullet t_{\text{rel}} = t(z)/t_0 \sim 4 \times 10^{-7} \rightarrow t \sim 6 \text{ kyr (nauwkeuriger: } t \approx 47 \text{ kyr)}$$

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

ΛCDM-model

Grote schaal
ΛCDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

- Uit de Friedmannvergelijking, met $k = 0$ en $\rho = \rho_{\text{rad}}$: $\frac{\dot{a}}{a} = \left(\frac{32\pi G}{3c^3} \sigma T^4 \right)^{1/2}$
- $\frac{\dot{a}}{a} = -\frac{\dot{T}}{T} \rightarrow -\frac{\dot{T}}{T} = \left(\frac{32\pi G \sigma}{3c^3} \right)^{1/2} T^2 \rightarrow \int_{\infty}^T \frac{-1}{T'^3} dT' = \int_0^t \left(\frac{32\pi G \sigma}{3c^3} \right)^{1/2} dt$

- $$T(t) = \left(\frac{3c^3}{128\pi G \sigma} \right)^{1/4} t^{-1/2}$$

- $$a(t) = \left(\frac{128\pi G}{3c^3} \sigma T_0^4 \right)^{1/4} t^{1/2}$$

- **Voorwereldlijke kernfusie** ($^1\text{H} \rightarrow 4\text{He} + \text{beetje } ^2\text{H}, ^3\text{He} + \text{heel klein beetje } ^7\text{Li}$):
 - $T \sim 10^9 \text{ K} \rightarrow t \sim 230 \text{ s}, z \sim 3 \times 10^8, a \sim 3 \times 10^{-9}$
- **“Recombinatie”/ontkoppeling** (kernen + elektronen $\rightarrow$ atomen):
 - $T \sim 3000 \text{ K} \rightarrow t \sim 378 \text{ kyr}, z \sim 1100, a \sim 9 \times 10^{-4}$

Ergo:

- Straling: $a \propto t^{1/2}$
- Materie: $a \propto t^{2/3}$

Kosmologie

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIa
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

- 1 Kosmische afstandsladder
- 2 De wet van Hubble-Lemaître
- 3 Newtoniaanse kosmologie

- 4 Een heelal met straling
- 5 Λ CDM-model
 - Grote schaal
 - Λ CDM-model
- 6 Geschiedenis

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met
straling

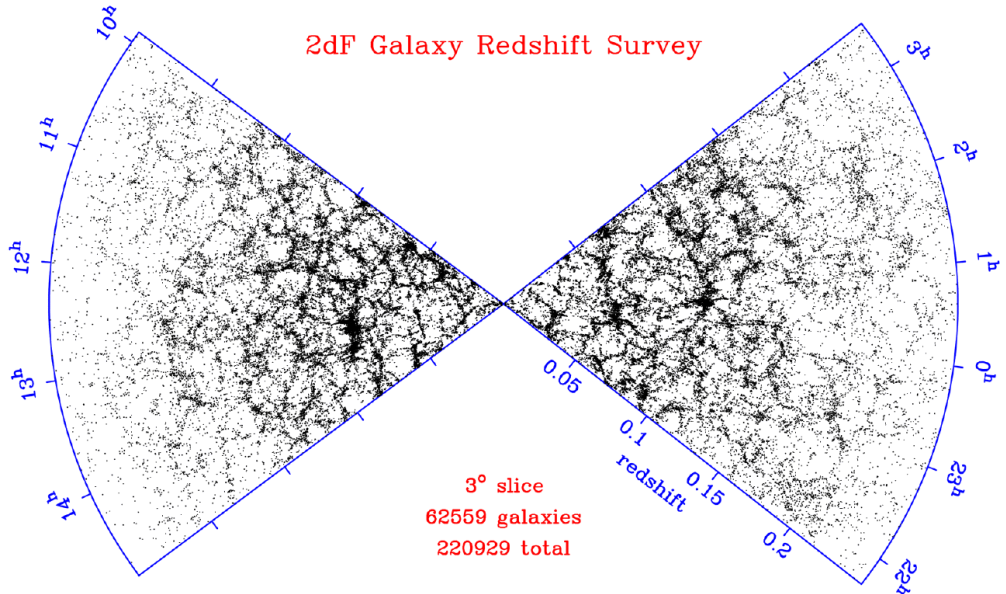
Achtergrondstraling
Heelal met straling

 Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis



Het huidige standaardmodel van de Big Bang:

- 1 Λ : de **kosmologische constante** $\rightarrow$ **donkere energie**
- 2 **CDM: cold dark matter**
- 3 “gewone” **baryonische materie**
- 4 **Algemene Relativiteitstheorie** $\rightarrow$ “zwaartekracht” (kromming)

Resultaten Planckmissie:

- | | |
|----------------------------|---|
| • leeftijd van het heelal: | $t_0 = 13.787 \pm 0.020 \text{ Gyr}$ |
| • Hubbleconstante: | $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km/s/Mpc}$ |
| • baryonische materie: | $\Omega_b = 0.0486 \pm 0.0010$ |
| • donkere materie: | $\Omega_{\text{CDM}} = 0.2589 \pm 0.0057$ |
| • donkere energie: | $\Omega_\Lambda = 0.6911 \pm 0.0062$ |

Verklaring voor:

- 1 het bestaan en de structuur van de **kosmische achtergrondstraling**
- 2 de structuur van clusters van sterrenstelsels in het **heelal op grote schaal**
- 3 de waargenomen abundanties van **waterstof, helium en lithium**
- 4 de **versnelde uitdijing** van het heelal

Kosmische
afstandsladder

Dubbelsterren

Cepheïden

Tully-Fisher

SNIae

Hubble flow

De wet van
Hubble-Lemaître

Hubble-diagram

De wet van Hubble

Newtoniaanse
kosmologie

Heelal met massa

Een gesloten, open
of vlak heelal

Roodverschuiving

Een heelal met
straling

Achtergrondstraling

Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal

Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

Kosmologie

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

*Hubble*diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open
of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte
geschiedenis

- 1 Kosmische afstandsladder
- 2 De wet van Hubble-Lemaître
- 3 Newtoniaanse kosmologie

- 4 Een heelal met straling
- 5 Λ CDM-model
- 6 Geschiedenis
 - Een korte geschiedenis

Kosmische afstandsladder

Dubbelsterren
Cepheïden
Tully-Fisher
SNIae
Hubble flow

De wet van Hubble-Lemaître

Hubble diagram
De wet van Hubble

Newtoniaanse kosmologie

Heelal met massa
Een gesloten, open of vlak heelal
Roodverschuiving

Een heelal met straling

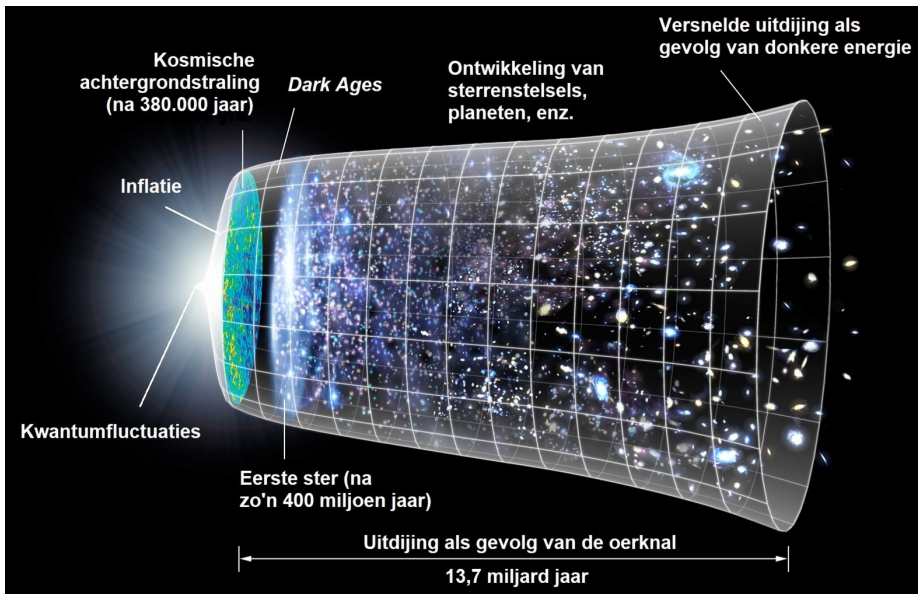
Achtergrondstraling
Heelal met straling

Λ CDM-model

Grote schaal
 Λ CDM-model

Geschiedenis

Een korte geschiedenis



- $t < 10^{-43}$ s: < **Plancktijd**; wetten van de fysica ongeldig?
- $t \sim 10^{-36}$ – 10^{-32} s: **inflatie**: het heelal expandeert exponentieel met factor $\sim 10^{26}$
- $t \sim 10^{-12}$ – 10^{-5} s: **quarks** worden gevormd
- $t \sim 10^{-5}$ – 1 s: **protonen** en **neutronen** ontstaan
- $t \sim 10$ – 10^3 s: voorwereldlijke **nucleosynthese**: $^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}, ^2\text{D}, ^3\text{He}, ^7\text{Li}$
- $t \sim 10$ s–370 kyr: **ondoorzichtig plasma** van atoomkernen, elektronen en fotonen
- $t \sim 47$ kyr: overgang van **straling-gedomineerd** naar **materie-gedomineerd**
- $t \sim 18$ – 370 kyr: “**recombinatie**” en **ontkoppeling**: atomen vangen elektronen $\rightarrow$ heelal **transparant** $\rightarrow$ **CMB**
- $t \sim 370$ kyr–150 Myr (~ 1 Gyr): de **dark ages**: geen recombinatie, geen sterren $\rightarrow$ geen lichtbronnen. Na 3 Myr: CMB $\rightarrow$ IR $\rightarrow$ optisch **donker**
- $t \sim 300$?–400 Myr: de eerste **sterren** en **sterrenstelsels**, in clusters
- $t \sim 200$ Myr–1 Gyr: **re-ionisatie**: UV van sterren ioniseert gaswolken; verst waargenomen objecten
- $t \sim 1$ Gyr: het heelal ziet er al aardig uit zoals tegenwoordig, alleen wat kleiner
- $t \sim 9.219$ Gyr: het **zonnestelsel** ontstaat
- $t \sim 9.8$ Gyr: het heelal **begint versneld uit te dijen**; overgang van **materie-gedomineerd** naar **Λ -gedomineerd**
- $t \sim 13.787$ Gyr: Tentamen sterrenkunde