

Sterrenkunde Hoofdstuk 0:

Afstanden meten in het heelal

Marc van der Sluys

Universiteit Utrecht, Nikhef



**Universiteit
Utrecht**

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

sluys@nikhef.nl

Nikhef

Afstanden meten in het heelal

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte geschiedenis

- 1 De kosmische afstandsladder
- 2 Afstanden in het zonnestelsel
- 3 De Zon

- 4 Afstanden tot sterren
- 5 Afstanden tot sterrenstelsels
- 6 Structuur en evolutie van het heelal

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

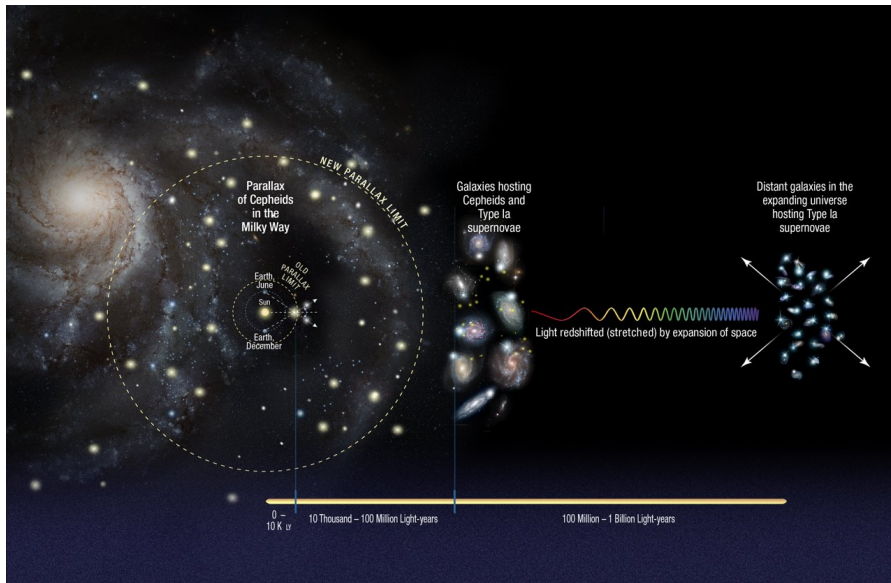
Parallax
Dubbelsterren
Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNIae
SMBHs en LISA
De Hubble flow
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal
 Λ CDM-model
Een korte geschiedenis



De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNlae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

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

Afstanden meten in het heelal

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis

1 De kosmische afstandsladder

2 Afstanden in het zonnestelsel

- Eratosthenes
- De wet van Kepler
- De afstand tot de Zon

3 De Zon

4 Afstanden tot sterren

5 Afstanden tot sterrenstelsels

6 Structuur en evolutie van het heelal

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNlae

SMBHs en LISA

De Hubble flow

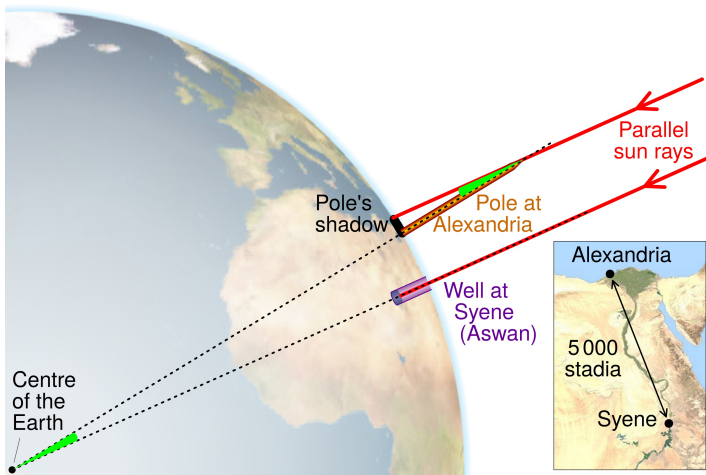
De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis



Bron: Wikipedia, users cmglee, D. Monniaux, jimht

- verschil in hoek: $\sim 7^\circ$ (maar we weten niet precies *waartussen*...)
- afstand noord-zuid: ~ 5000 stadia (maar we weten niet *welke* stadia...)
- $\sim 10\%$ nauwkeurig

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNlae

SMBHs en LISA

De Hubble flow

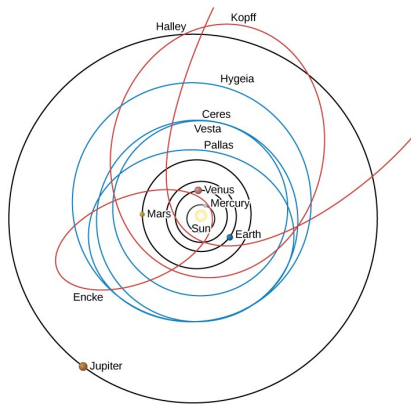
De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

ΛCDM-model

Een korte
geschiedenis



Bron: OpenStax CNX

$$\frac{GM}{a^3} = \left(\frac{2\pi}{P}\right)^2$$

$$\left(\frac{a}{\text{A.U.}}\right)^3 = \left(\frac{P}{\text{jaar}}\right)^2$$

Astronomische eenheid (*astronomical unit*):

1 A.U. ≈ 150 miljoen km

(uit radar, baanperiodes en Kepler)

- 1 Kepler geeft de **verhoudingen** binnen het Zonnestelsel
- 2 radarmetingen geven de **absolute schaal**

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

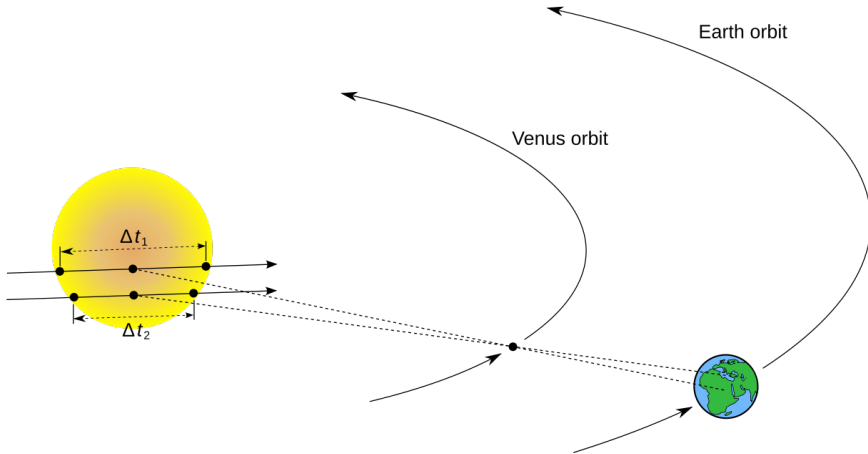
De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis



Bron: Wikipedia, users Vermeer, Duckysmokton, Ilia

- 1672: Richer en Cassini bepalen **afstand tot Mars** vanuit Frans Guyana en Parijs
- Methode: **parallax**; input: diameter van de Aarde

Afstanden meten in het heelal

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte geschiedenis

- 1 De kosmische afstandsladder
- 2 Afstanden in het zonnestelsel
- 3 De Zon

- 4 Afstanden tot sterren
- 5 Afstanden tot sterrenstelsels
- 6 Structuur en evolutie van het heelal

Afstanden meten in het heelal

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNlae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

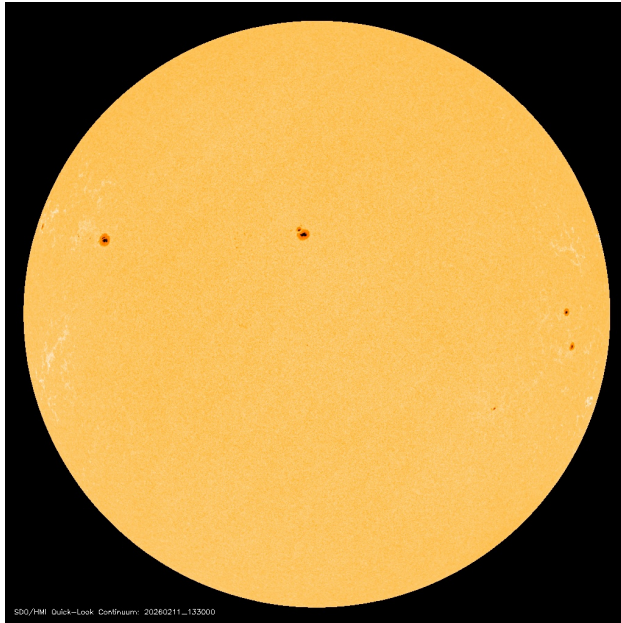
De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis



- 1 A.U. $\approx$ 150 miljoen km ($\approx$ 8.3 lichtminuten)
- Schijnbare straal: $r_{\odot} \sim 16' = 16/60^{\circ} \rightarrow$
 $R_{\odot} = 1 \text{ A.U.} \cdot \tan r_{\odot} \approx 696.000 \text{ km} \approx 109 R_{\oplus}$
- Zonneconstante (loodrechte flux aan top van de atmosfeer): $f_{\odot} \approx 1370 \text{ W/m}^2$
 - wat we hier **flux** noemen heet in de optica **intensiteit** (en officieel *irradiantie*)
- $L = 4\pi d^2 f \rightarrow L_{\odot} = 4\pi (1 \text{ A.U.})^2 f_{\odot} \approx 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$
- $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 F_{\odot}; \quad F_{\odot} = \sigma T_{\text{eff}}^4 \rightarrow T_{\text{eff}} \approx 5780 \text{ K} \quad (\text{Stefan-Boltzmann})$
- $M_{\odot} \approx \left(\frac{2\pi}{1 \text{ jaar}} \right)^2 \frac{(1 \text{ A.U.})^3}{G} \approx 1.99 \times 10^{30} \text{ kg} \approx 333.000 M_{\oplus}$
- Leeftijd: $\approx 4.5 \text{ Gyr}$ (uit meteorieten! — zie H 2.3)
- Energiebron: Chemisch? $\rightarrow$ Nucleair: H-fusie: $E \approx 0.0072 M_{\odot} c^2 \rightarrow \sim 107 \text{ Gyr}$
 - 10% van de Zon dicht genoeg, 70% waterstof $\rightarrow E \sim 0.7 \cdot 0.1 M_{\odot} c^2 \rightarrow \sim 7.5 \text{ Gyr}$

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIa

SMBHs en LISA

De Hubble flow

De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNlae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis

1 De kosmische afstandsladder

2 Afstanden in het zonnestelsel

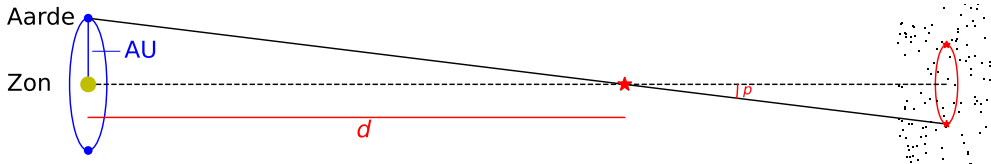
3 De Zon

4 Afstanden tot sterren

- Parallax
- Dubbelsterren
- Cepheïden

5 Afstanden tot sterrenstelsels

6 Structuur en evolutie van het heelal



- $\tan p = \frac{1 \text{ A.U.}}{d}$
- een **parallax** van $1''$ komt *per definitie* overeen met een afstand van **1 parsec (pc)**:
 - $\frac{1 \text{ A.U.}}{1 \text{ pc}} \equiv \tan 1'' \sim 1'' \rightarrow$
 - $1 \text{ pc} = \frac{1'' \times 3600''/^{\circ} \times 360^{\circ}}{2\pi} \text{ A.U.} \simeq 3.086 \times 10^{16} \text{ m} \sim 3.26 \text{ lichtjaar}$
- richting pool: $\sim$ cirkelvormig; lagere breedte: plattere ellips; bij ecliptica: recht lijntje
- Hipparcos (1989–1993): $\sim 118\text{k}$ sterren: $0.001''$ + 2.5M sterren “lagere precisie”
- Gaia (2013–2025): $\sim 1.8 \times 10^9$ objecten, met $20 \mu\text{as}$, $\Delta p \lesssim 10\%$ tot $d \sim 5 \text{ kpc}$

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax
Dubbelsterren
Cepheiden

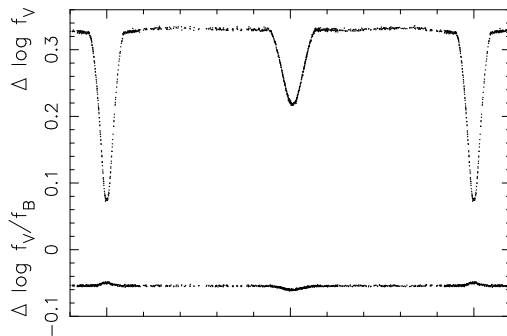
Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNIae
SMBHs en LISA
De Hubble flow
De wet van Hubble

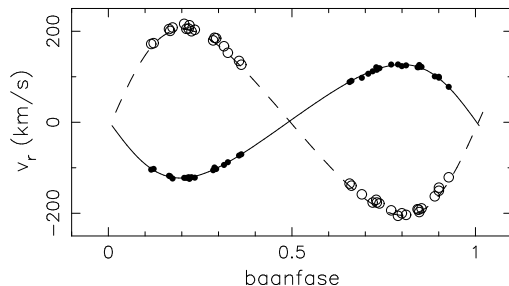
Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal
ΛCDM-model
Een korte
geschiedenis

Ster	p ($''$)	d (pc)	μ ($''/jr$)	$\log f_V$ (W/m ² /nm)	$\log L_V$ ($L_{V\odot}$)	$\log f_V/f_B$	SpT	straal ($R_\odot$)
Zon				0.30	$\equiv 0$	0.004	G2V	$\equiv 1$
Proxima Cen	0.7716	1.296	3.853	−14.81	−4.26	0.46	M5Ve	0.146(11)
α^2 Centauri	0.7424	1.347	3.724	−10.95	−0.36	0.10	K1V	0.865(5)
α^1 Centauri	0.7424	1.347	3.710	−10.40	0.19	0.02	G2V	1.224(3)
Barnards ster	0.5482	1.824	10.359	−14.22	−3.37	0.36	sdM4	
CN Leonis	0.4255	2.35	4.696	−15.82	−4.75	0.54	M5.5	
Lalande 21185	0.3926	2.547	4.801	−13.40	−2.26	0.34	M2V	
UV Ceti	0.3817	2.62	3.328	−15.42	−4.25	0.48	M5.5e	
Sirius	0.3792	2.637	1.339	−9.83	1.34	−0.26	A0m...	1.703(9)
Ross 154	0.3367	2.970	0.665	−14.56	−3.28	0.34	M3.5Ve	
HH And	0.3155	3.17	1.588	−15.32	−3.99	0.50	M5	
ϵ Eridani	0.3109	3.216	0.975	−11.90	−0.55	0.09	K2V	0.744(11)
1HD 217987	0.3053	3.276	6.897	−13.35	−1.98	0.33	M2V	
EZ Aquarii	0.3003	3.33	3.254	−15.28	−3.90	0.52	M5.5	
FI Virginis	0.2981	3.355	1.361	−14.86	−3.48	0.43	M4.5V	
161 Cygni A	0.2868	3.487	5.297	−12.49	−1.07	0.16	K5V	
Procyon	0.2846	3.514	1.259	−10.57	0.85	−0.09	F5IV-V	2.060(20)



GG Lup: lichtkromme (B7V+B9V)



GG Lup: radiële snelheden

Bron: Verbunt: Het leven van sterren, Epsilon uitgave 59

- 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

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNlae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

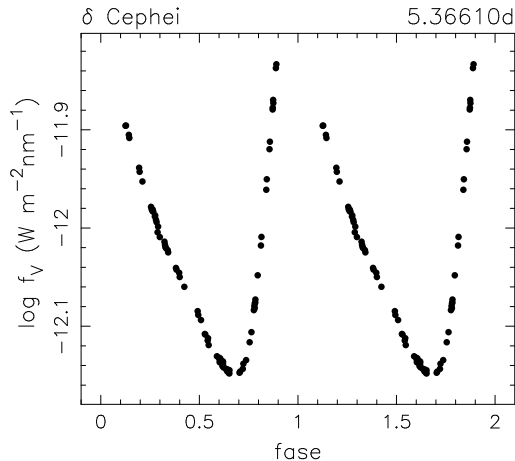
De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

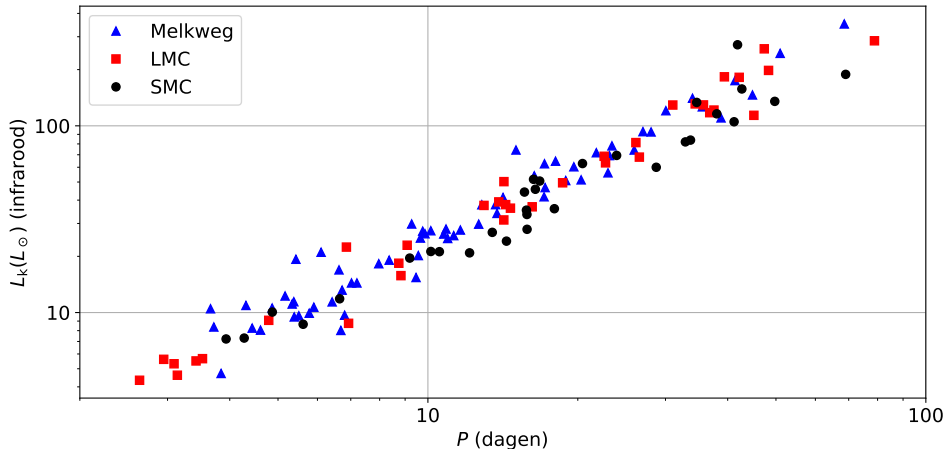
Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis



Bron: [Verbunt: Het leven van sterren, Epsilon uitgave 59](#)



Bron: Gieren et al. (2018)

- Relatie tussen periode en lichtkracht (in de V-band):

$$L_V \approx 41.72 L_{\odot} \left(\frac{P}{\text{day}} \right)^{1.104} \quad (\text{Freedman et al. 2001})$$

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis

1 De kosmische afstandsladder

2 Afstanden in het zonnestelsel

3 De Zon

4 Afstanden tot sterren

5 Afstanden tot sterrenstelsels

- Tully-Fisher
- SNIae
- SMBHs en LISA
- De *Hubble flow*
- De wet van Hubble

6 Structuur en evolutie van het heelal

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNlae

SMBHs en LISA

De Hubble flow

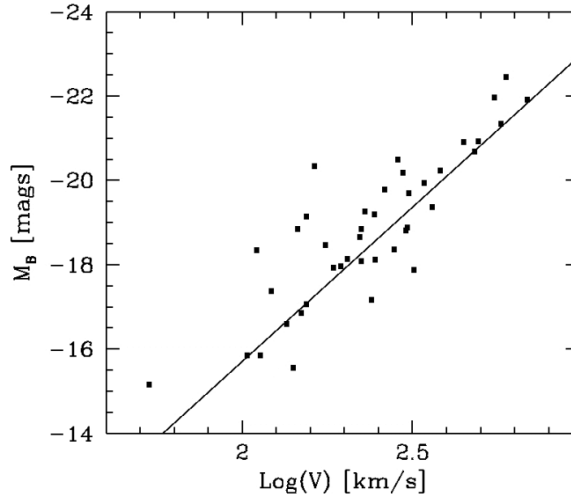
De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis



Bron: Scarpa (2006)

- Relatie tussen maximale rotatiesnelheid en de helderheid van sterrenstelsels

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

Parallax
Dubbelsterren
Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNlae
SMBHs en LISA
De Hubble flow
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal
 Λ CDM-model
Een korte
geschiedenis



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

- Ontploffende witte dwergen

Afstanden meten in het heelal

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De Hubble flow

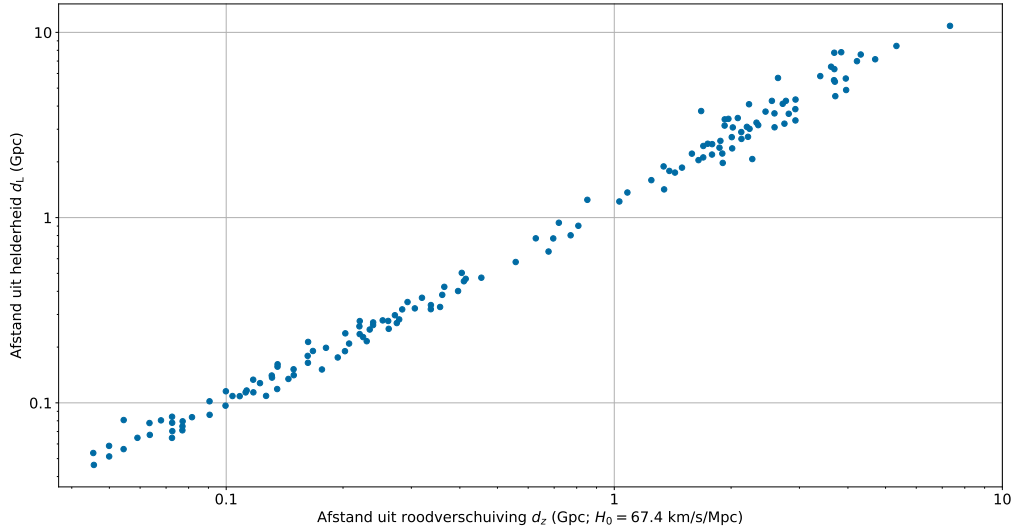
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte geschiedenis



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

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

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

Afstanden meten in het heelal

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De Hubble flow

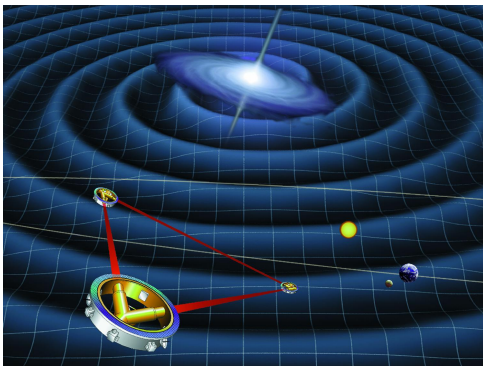
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte geschiedenis



Bron: lisamission.org

- Supermassieve zwarte gaten (SMBHs) in botsende sterrenstelsels
- Massa's van SMBHs ($10^4 - 10^7 M_{\odot}$): tot $\sim 0.1 - 10\%$
- Directe afstandmeting: $\sim 1 - 10\%$
- “Standaardsirenen”



Bron: [Hubble NASA/ESA](#)

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax
Dubbelsterren
Cepheïden

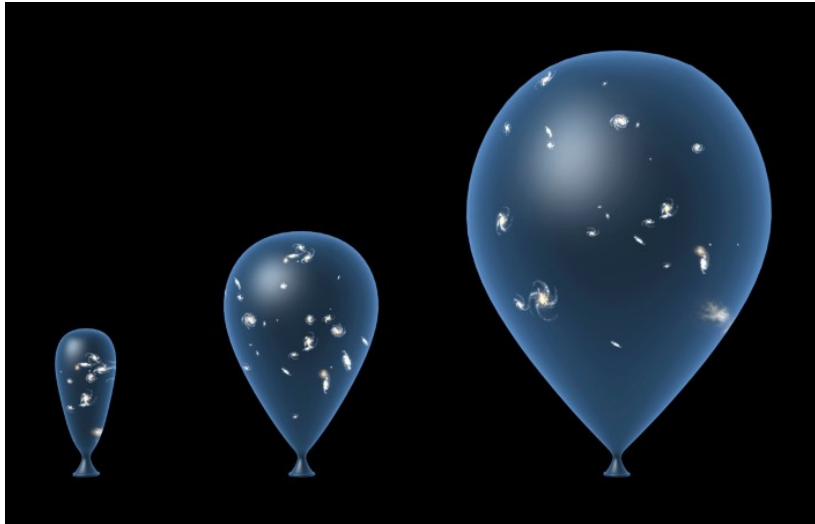
Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNIae
SMBHs en LISA

De Hubble flow
De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal
 Λ CDM-model
Een korte
geschiedenis



Bron: [TAKE 27 LTD/SPL \(via Nature.com\)](#)

- Relatie tussen roodverschuiving en afstand van sterrenstelsels

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax
Dubbelsterren
Cepheïden

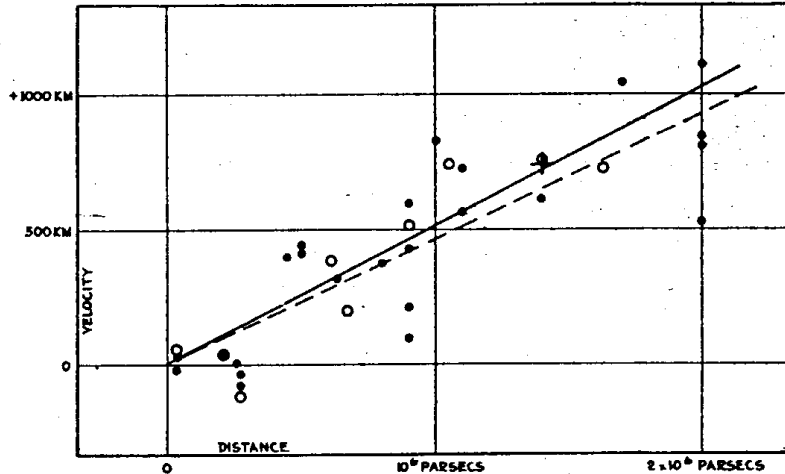
Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNIae
SMBHs en LISA

De *Hubble flow*
De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal
ΛCDM-model
Een korte
geschiedenis



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

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

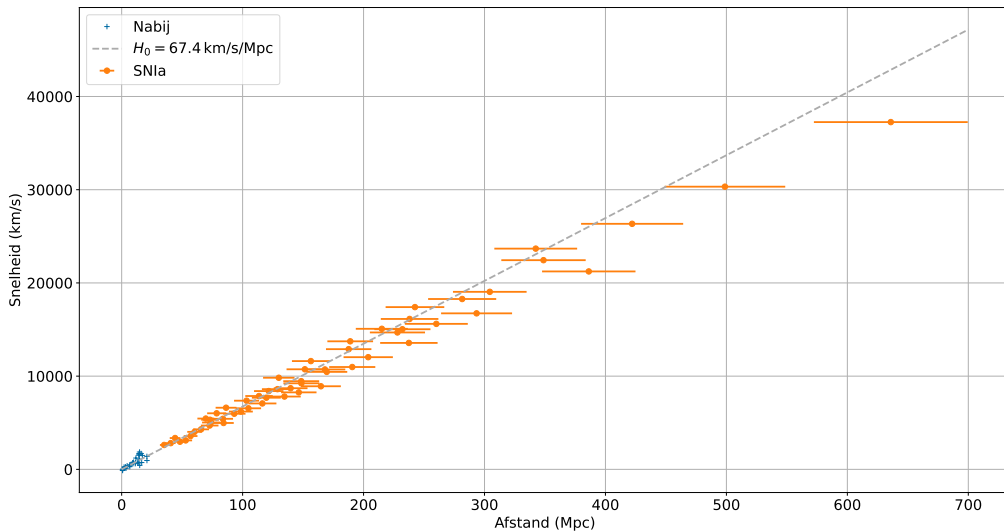
Parallax
Dubbelsterren
Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNIae
SMBHs en LISA
De *Hubble flow*
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal
 Λ CDM-model
Een korte
geschiedenis



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

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

- $$1 + z = \frac{1}{a(z)}$$
 $a(z)$: lineaire **schaalfactor** van het heelal

- $$t_{\text{rel}}(z) \equiv \frac{1}{(1+z)^{3/2}}$$
 relatieve leeftijd van het heelal

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

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

- **Voorbeeld:** Quasar UHZ1: $z = 10.1$:

- $t_{\text{rel}} \sim 0.027 \rightarrow t_L/t_0 \approx 0.973$

- $t \approx 400$ Myr $\rightarrow t_L \sim 13.4$ Gyr

- $a(z) \sim 0.090$

Afstanden meten in het heelal

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

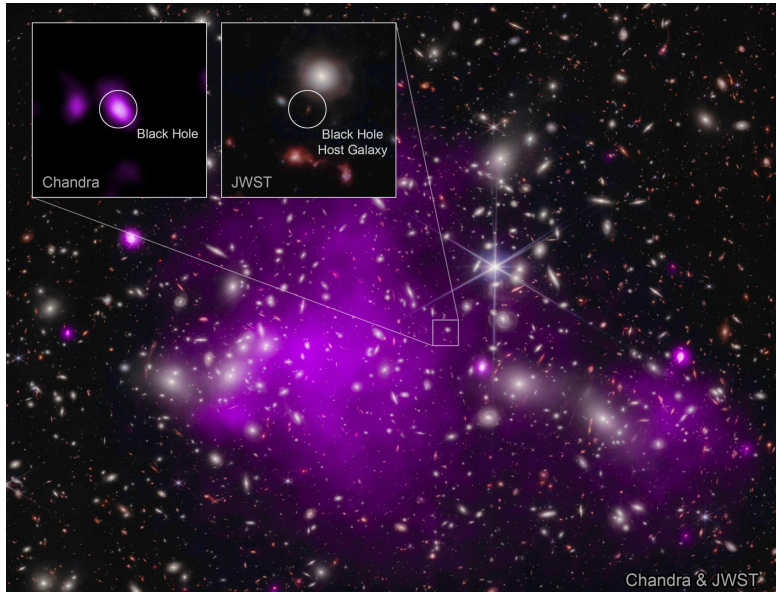
Parallax
Dubbelsterren
Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNIae
SMBHs en LISA
De *Hubble flow*
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal
 Λ CDM-model
Een korte geschiedenis



Afstanden meten in het heelal

JADES GS z14-0

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

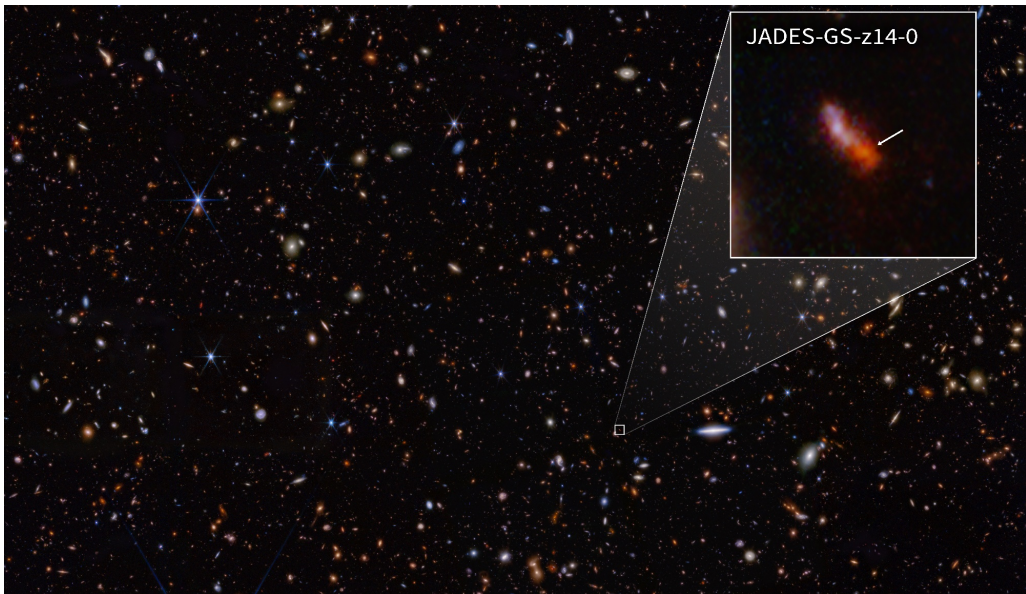
Parallax
Dubbelsterren
Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNIae
SMBHs en LISA
De Hubble flow
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal
 Λ CDM-model
Een korte geschiedenis



Afstanden meten in het heelal

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNlae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte geschiedenis

1 De kosmische afstandsladder

2 Afstanden in het zonnestelsel

3 De Zon

4 Afstanden tot sterren

5 Afstanden tot sterrenstelsels

6 Structuur en evolutie van het heelal

- Grote schaal
- Λ CDM-model
- Een korte geschiedenis

2dF Galaxy Redshift Survey

3° slice
62559 galaxies
220929 total

redshift

0.05 0.1 0.15 0.2

0h 1h 2h 3h

10h 11h 12h 13h 14h

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: $t_0 = 13.787 \pm 0.020$ Gyr
- Hubbleconstante: $H_0 = 67.4 \pm 0.5$ 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

De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheiden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis

Een korte geschiedenis van het heelal

Afstanden meten in het heelal

De kosmische afstandsladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De Hubble flow

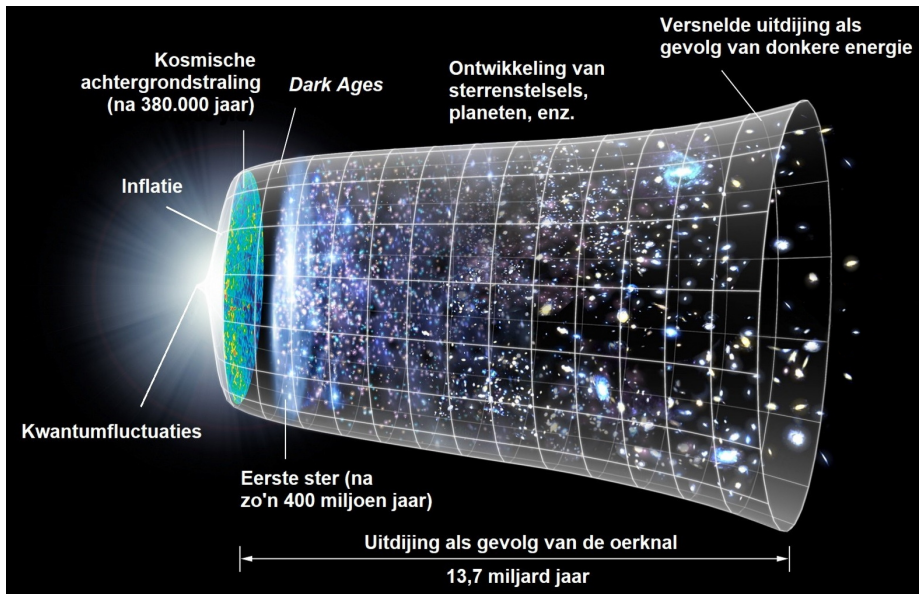
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte geschiedenis



De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheiden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De Hubble flow

De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

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: **Pink Floyd** brengt *Dark side of the Moon* uit

De kosmische afstandscladder

Afstanden in het zonnestelsel

Eratosthenes
De wet van Kepler
De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot sterren

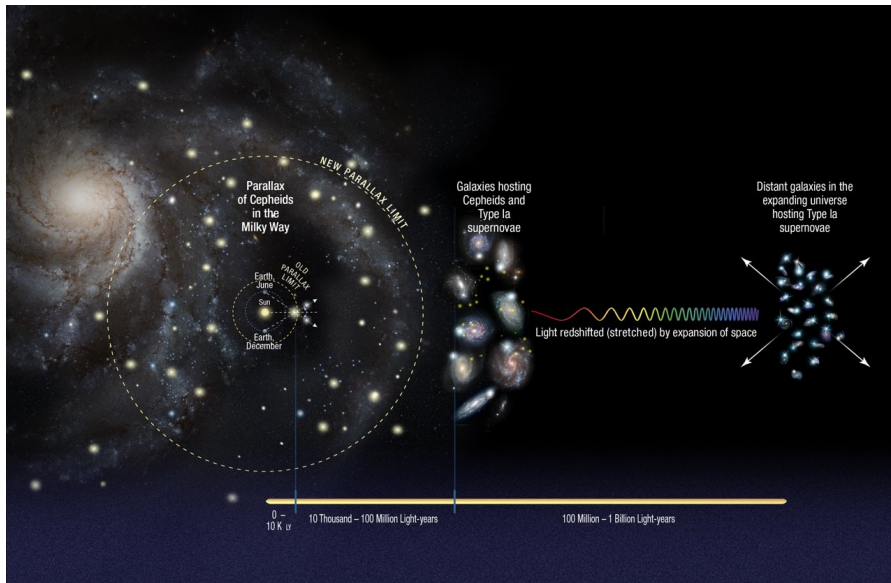
Parallax
Dubbelsterren
Cepheïden

Afstanden tot sterrenstelsels

Tully-Fisher
SNIae
SMBHs en LISA
De *Hubble flow*
De wet van Hubble

Structuur en evolutie van het heelal

Grote schaal
 Λ CDM-model
Een korte
geschiedenis



De kosmische
afstandsladder

Afstanden in het
zonnestelsel

Eratosthenes

De wet van Kepler

De afstand tot de
Zon

De Zon

Afstanden tot
sterren

Parallax

Dubbelsterren

Cepheïden

Afstanden tot
sterrenstelsels

Tully-Fisher

SNIae

SMBHs en LISA

De *Hubble flow*

De wet van Hubble

Structuur en
evolutie van het
heelal

Grote schaal

Λ CDM-model

Een korte
geschiedenis

Sterrenkunde: het grootste natuurkundelaboratorium ter ... heelal!

Bachelor

- 1e jaar: zwarte gaten
- 1e jaar: inleiding in de sterrenkunde (verplicht)
- 2e jaar: sterevolutie
- 3e jaar: zwaartekrachtgolven
- 3e jaar: kosmologie en sterrenstelsels

Temporary page!

$\text{\LaTeX}$ was unable to guess the total number of pages correctly. As there was some unprocessed data that should have been added to the final page this extra page has been added to receive it.

If you rerun the document (without altering it) this surplus page will go away, because $\text{\LaTeX}$ now knows how many pages to expect for this document.