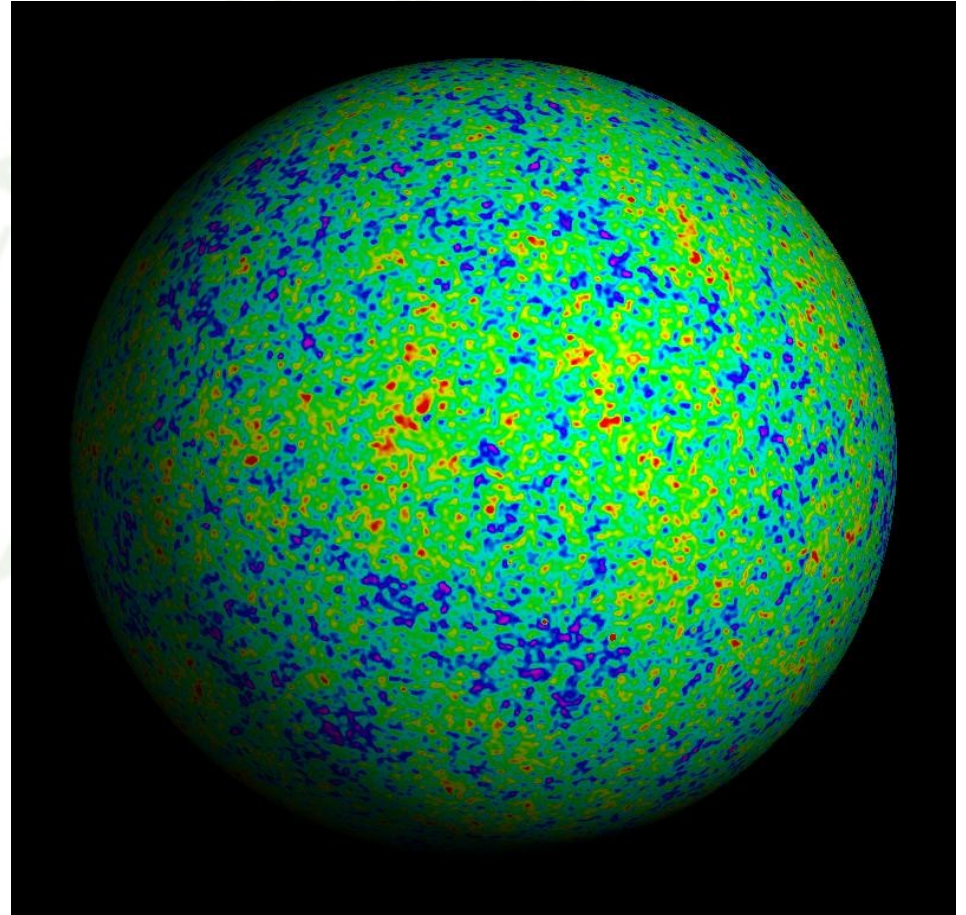


HOVO cursus Kosmologie

Voorjaar 2011

prof.dr. Paul Groot
dr. Gijs Nelemans

Afdeling Sterrenkunde,
Radboud Universiteit Nijmegen



HOVO cursus Kosmologie

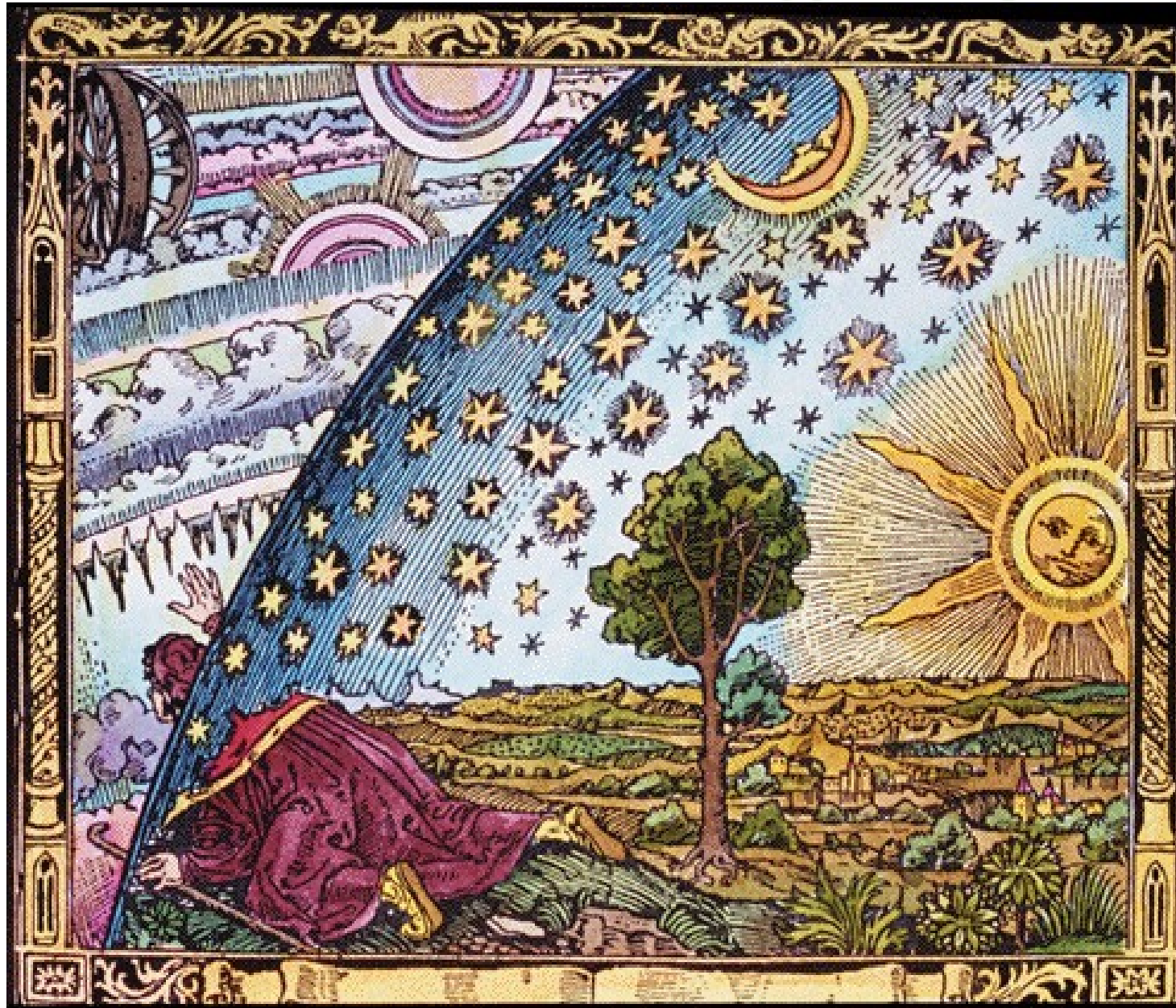
Overzicht van de cursus:

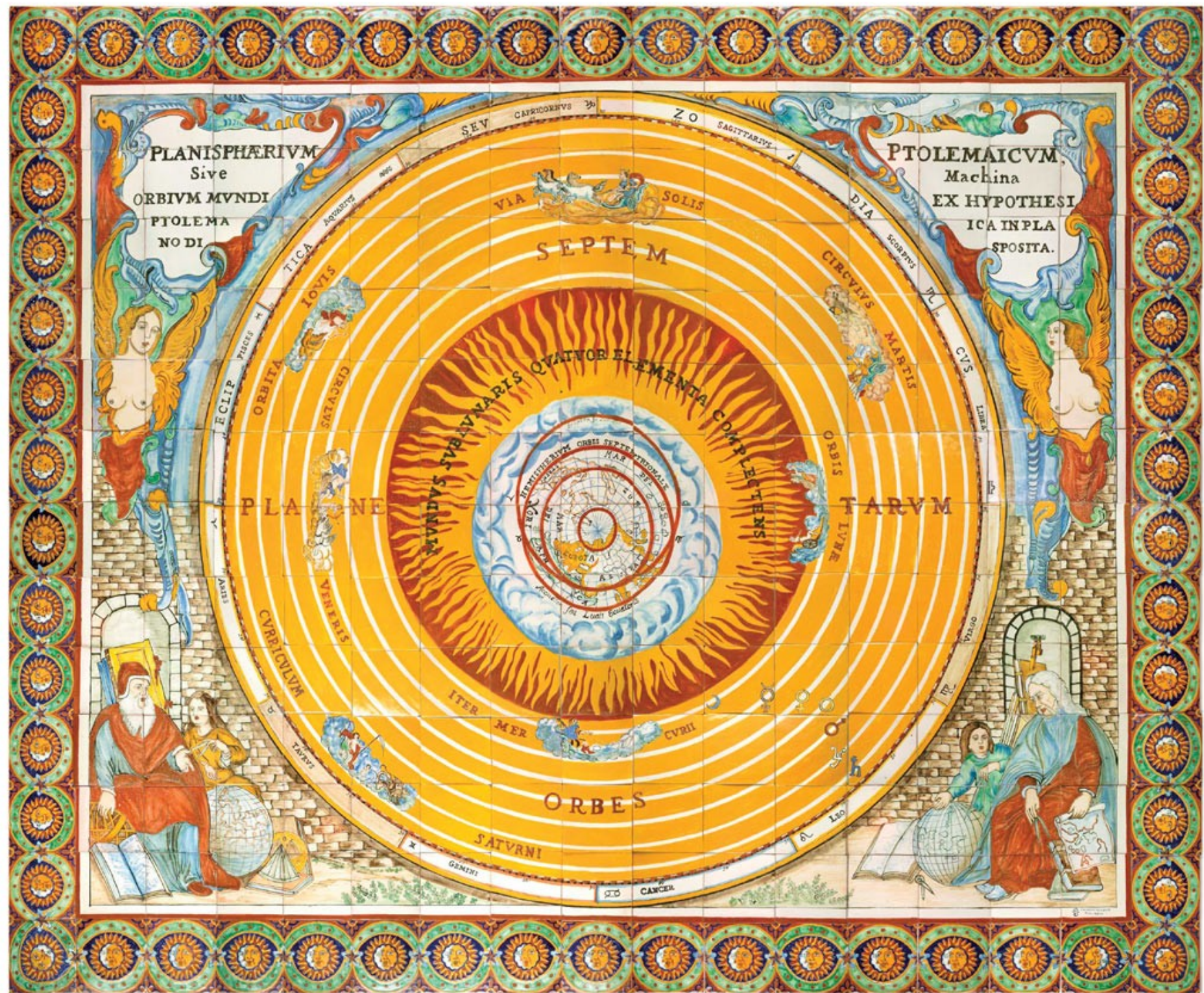
- 17/1 Groot Historische inleiding + afstandsladder
- 24/1 Groot Observationele kosmologie
- 31/1 Nelemans Friedmann vgl., Nucleosynthese
- 7/2 Nelemans Donkere materie en Structuurvorming
- 14/2 Nelemans Supernovae, donkere energie
- 21/2 Groot Weak lensing, EUCLID, toekomst

Kosmologie: wat is dat?

- Het meten en achterhalen van de vorm en geschiedenis van het Heelal als geheel
- Uitgangspunt: Het Kosmologisch principe:
“ Op grote schaal is het heelal uniform en homogeen, en de mens neemt geen speciale plaats hierin in”

Historische introductie





Historische introductie



Aristoteles
(384-322 BC)

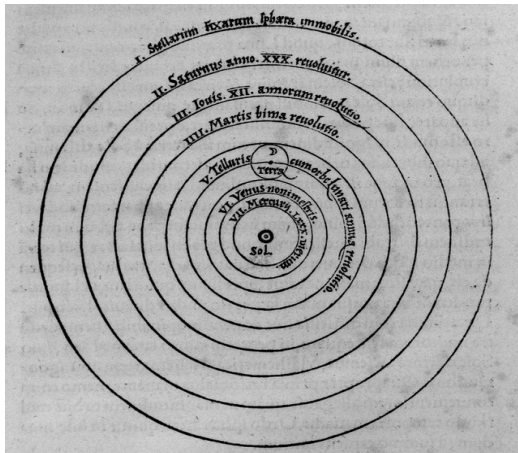
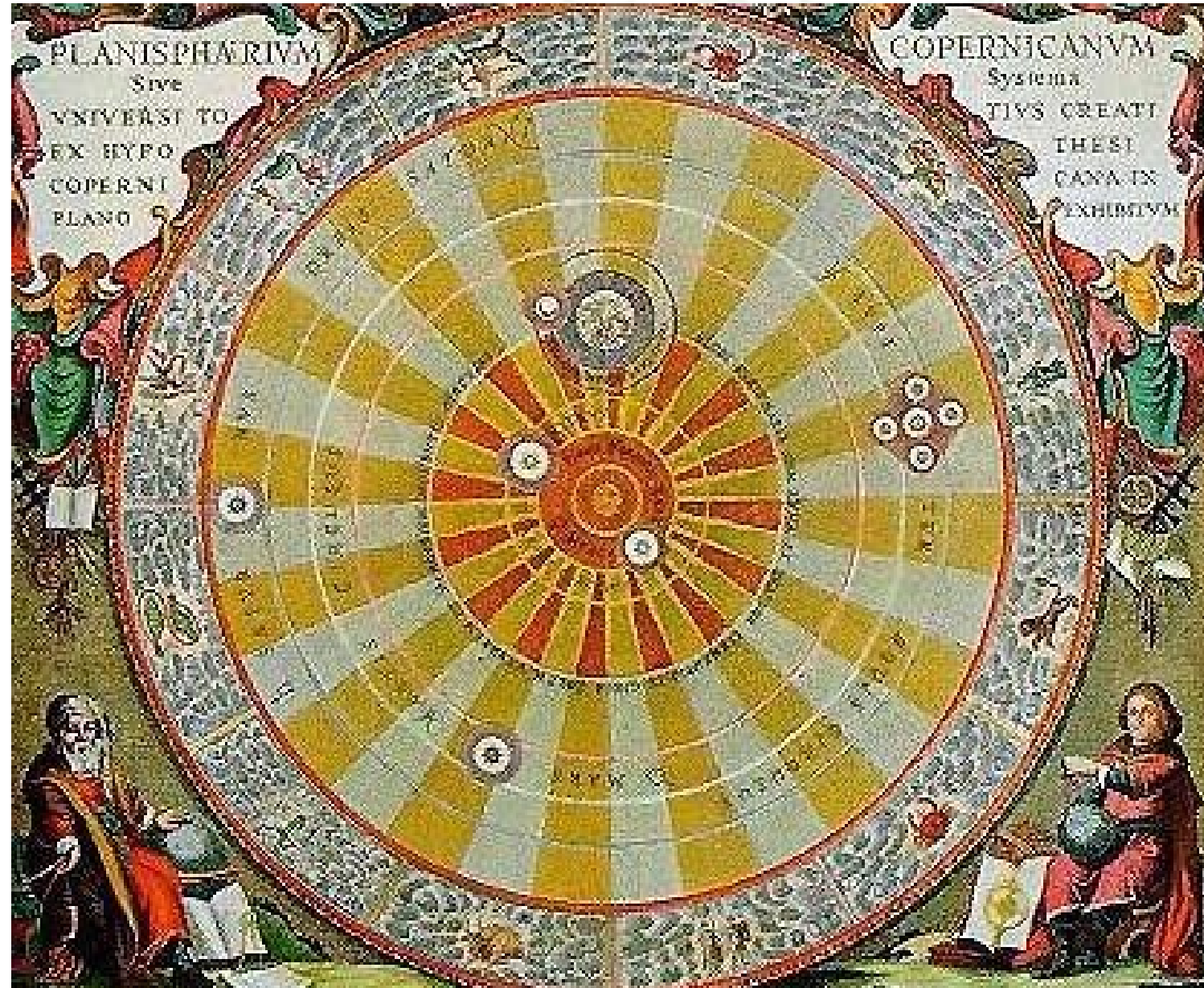


Ptolomeus
(90 – 168 AD)

Aristarchus (310-230 AD):
heliocentrisch!



Heliocentrisch wereldbeeld van Copernicus (*"De revolutionibus orbium coelestium"* 1543)

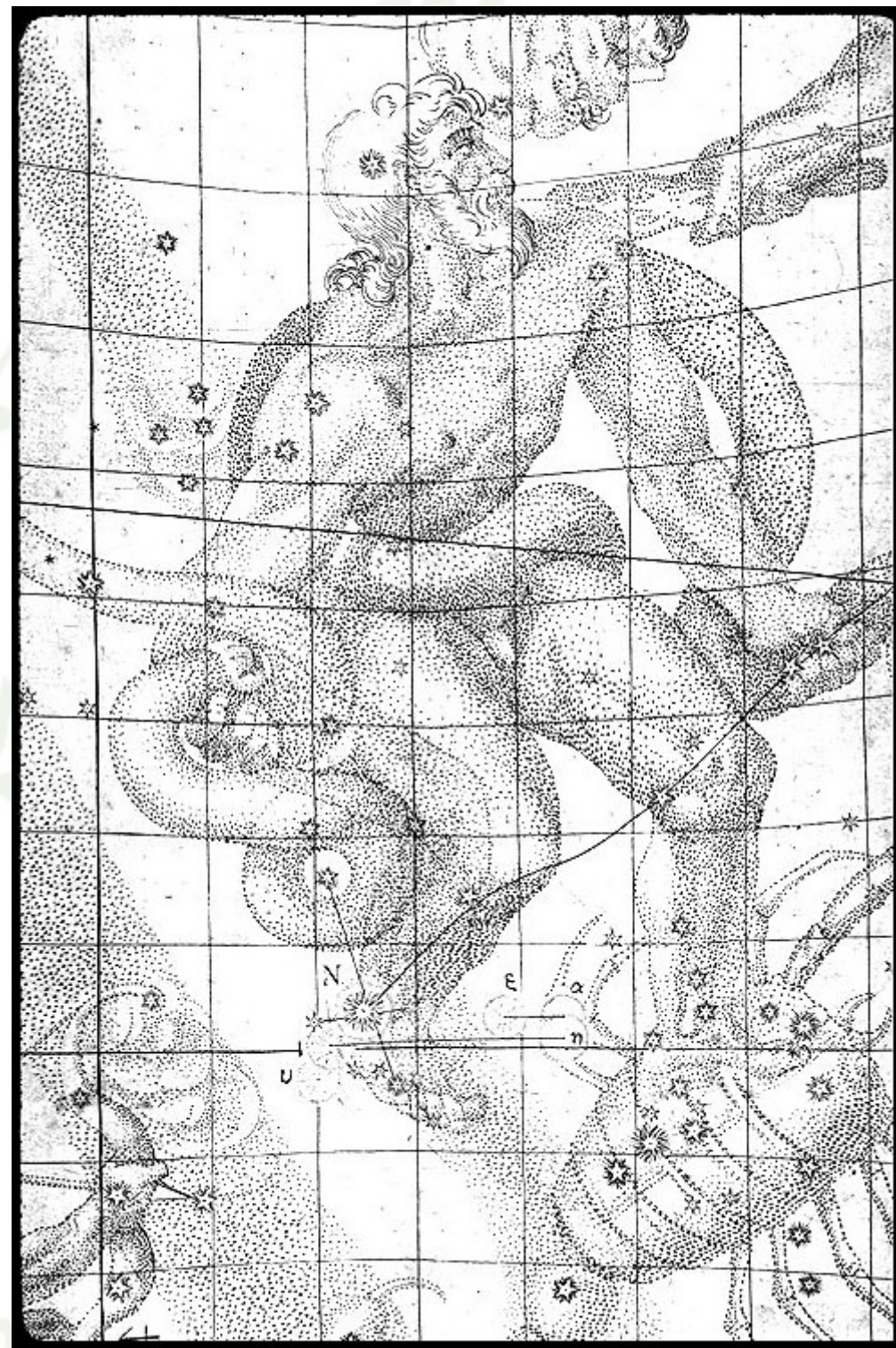


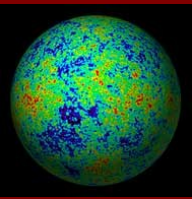
Het grotere wereldbeeld:

Heelal is oneindig en statisch

Statisch: niet houdbaar

Supernovae verschenen
Regelmatig rond 1600





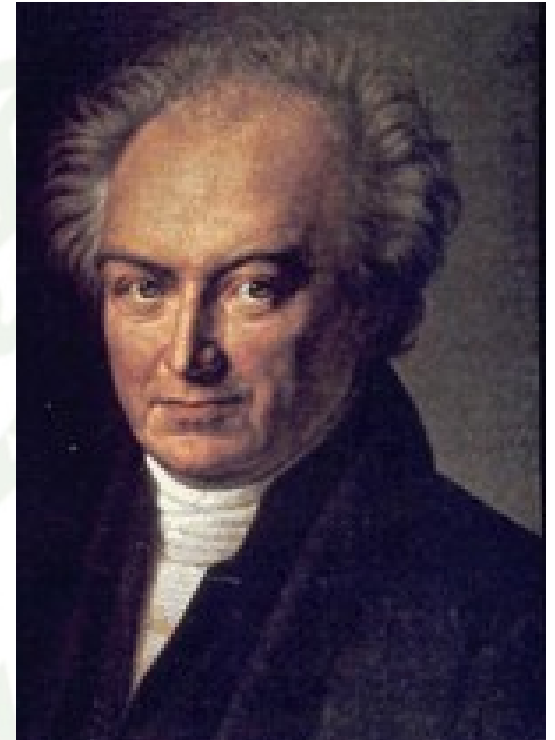
Ontwikkeling ideeën

Tot jaren '20 vorige eeuw:

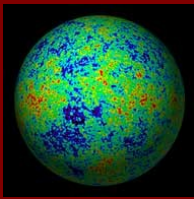
Heelal is statisch en oneindig.

Maar al door Olbers opgemerkt:

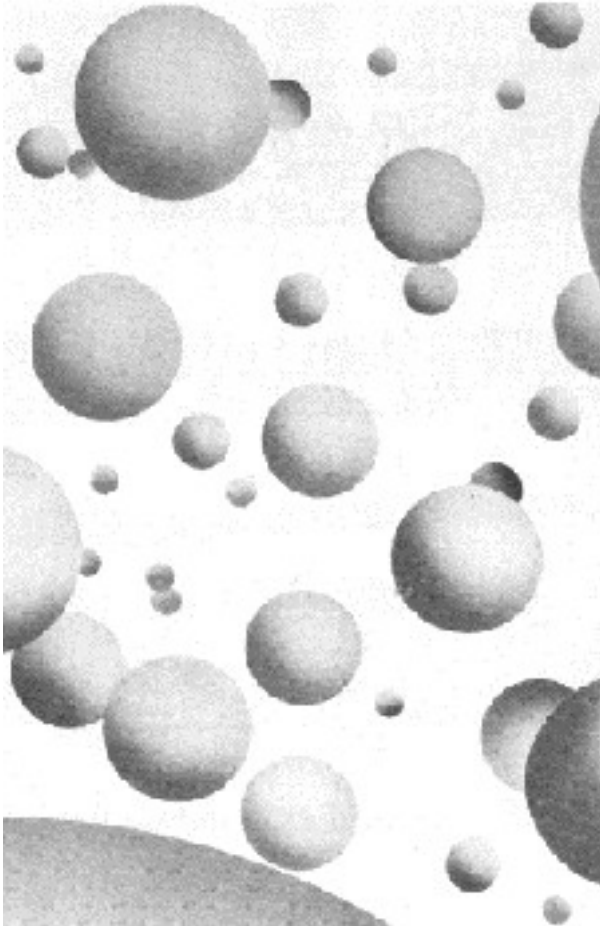
Moeilijke paradox als dat het geval is!



Paradox van Olbers

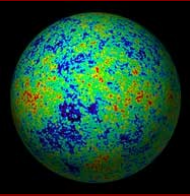


Paradox van Olbers

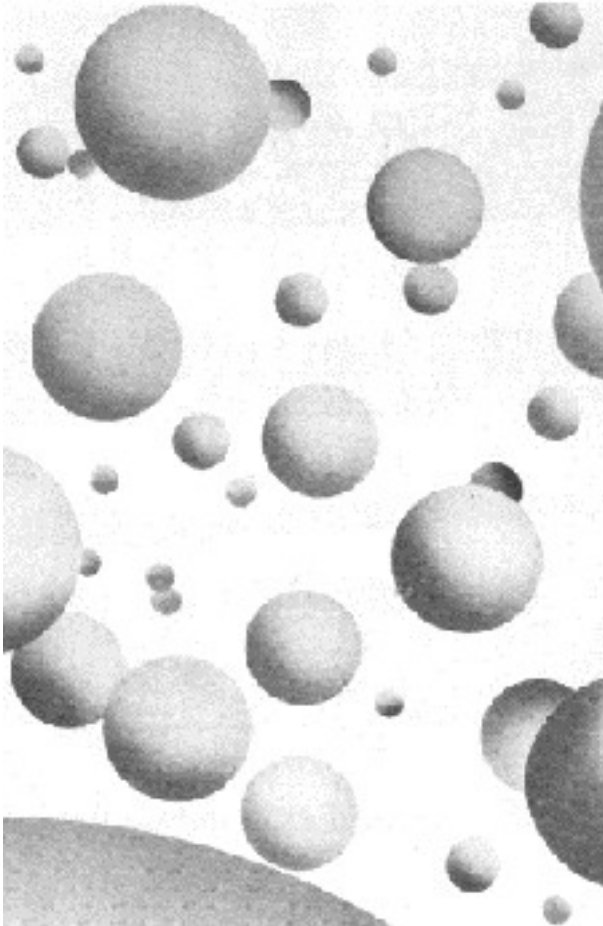


Als het heelal oneindig en statisch is:
dan moet onze gezichtslijn altijd
op een ster eindigen. M.a.w: de hele
hemel zou zo helder moeten zijn als
het oppervlakte van de Zon.

Hoe hier aan te ontkomen?



Oplossing voor paradox



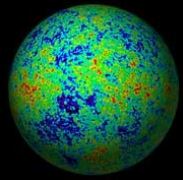
1: Het heelal is niet oneindig groot

2: Het heelal is niet oneindig oud

3: Sterren nemen een beperkt volume in

Alle drie niet in overeenstemming met toenmalige zienswijze.

Bedenk ook, in die tijd: De Melkweg = het Heelal



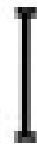
Grootte van het Heelal



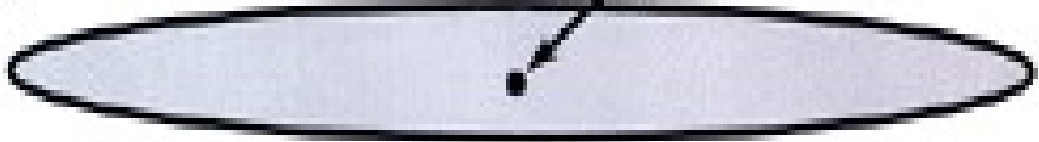
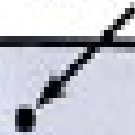
Kapteyn (1922)

Kapteyn Universe (circa 1899)

6,500
light years

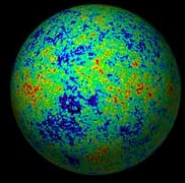


solar system



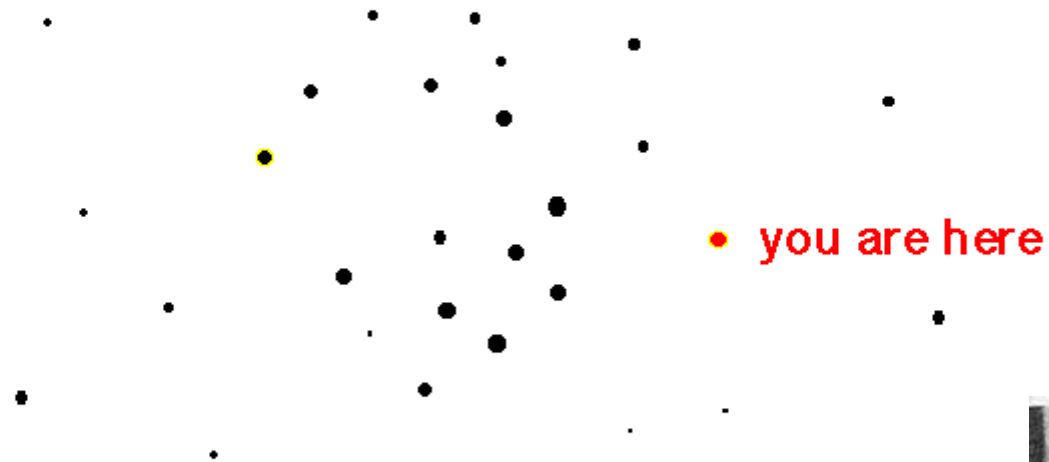
30,000 light years





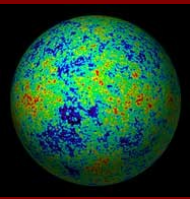
Bolhopen van Shapley

Distribution of Globular Clusters

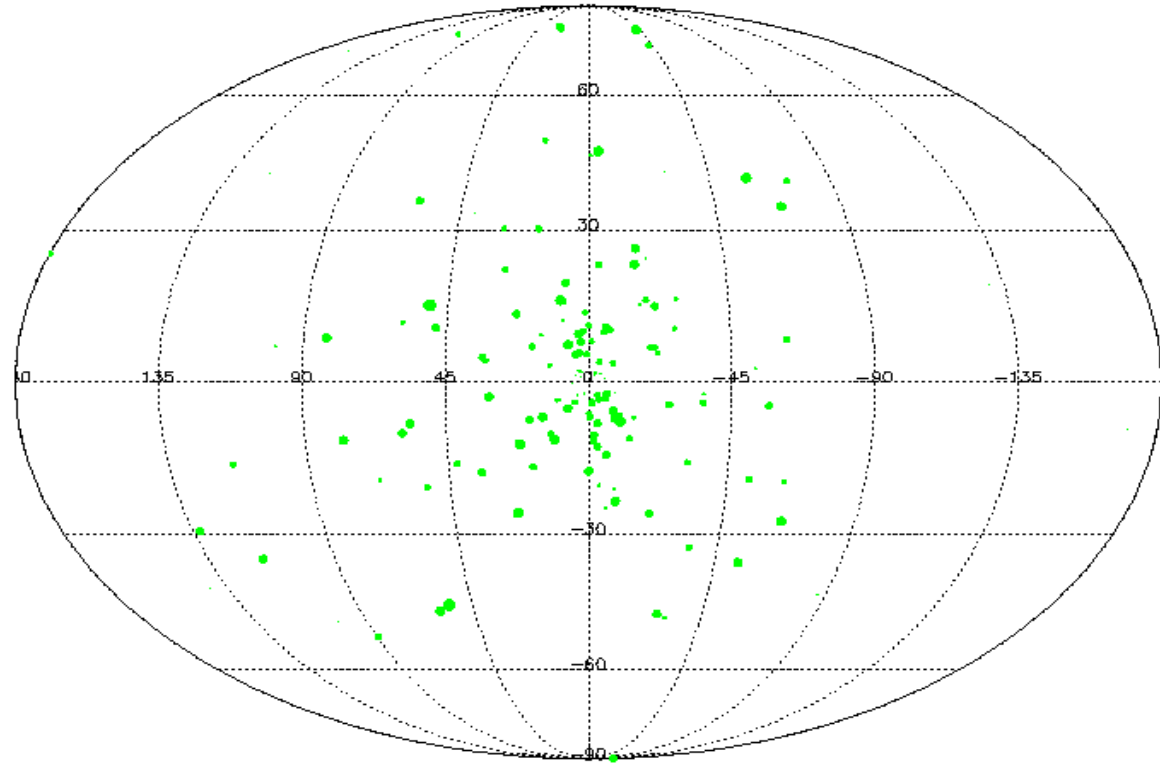
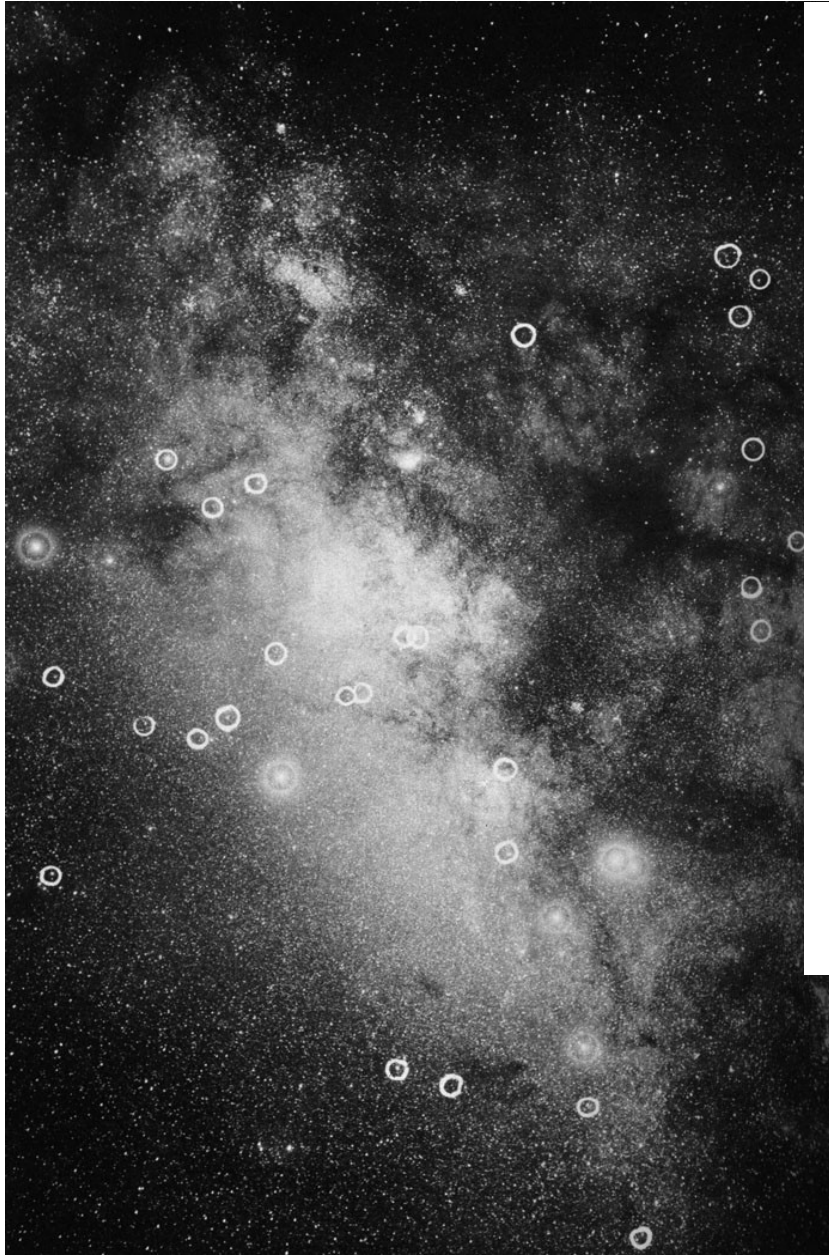


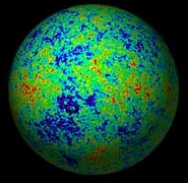
- Shapley's result





Bolhopen van Shapley

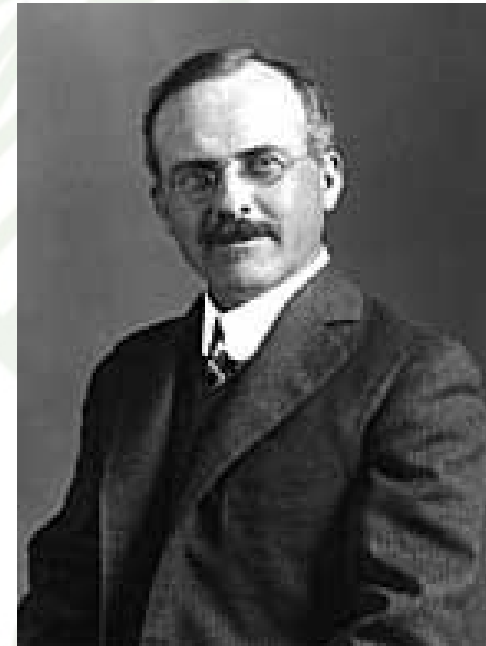


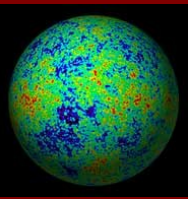


Great Debate

Shapley vs. Curtis,
over de grootte van het Heelal en de 'nevels'

26 April 1920



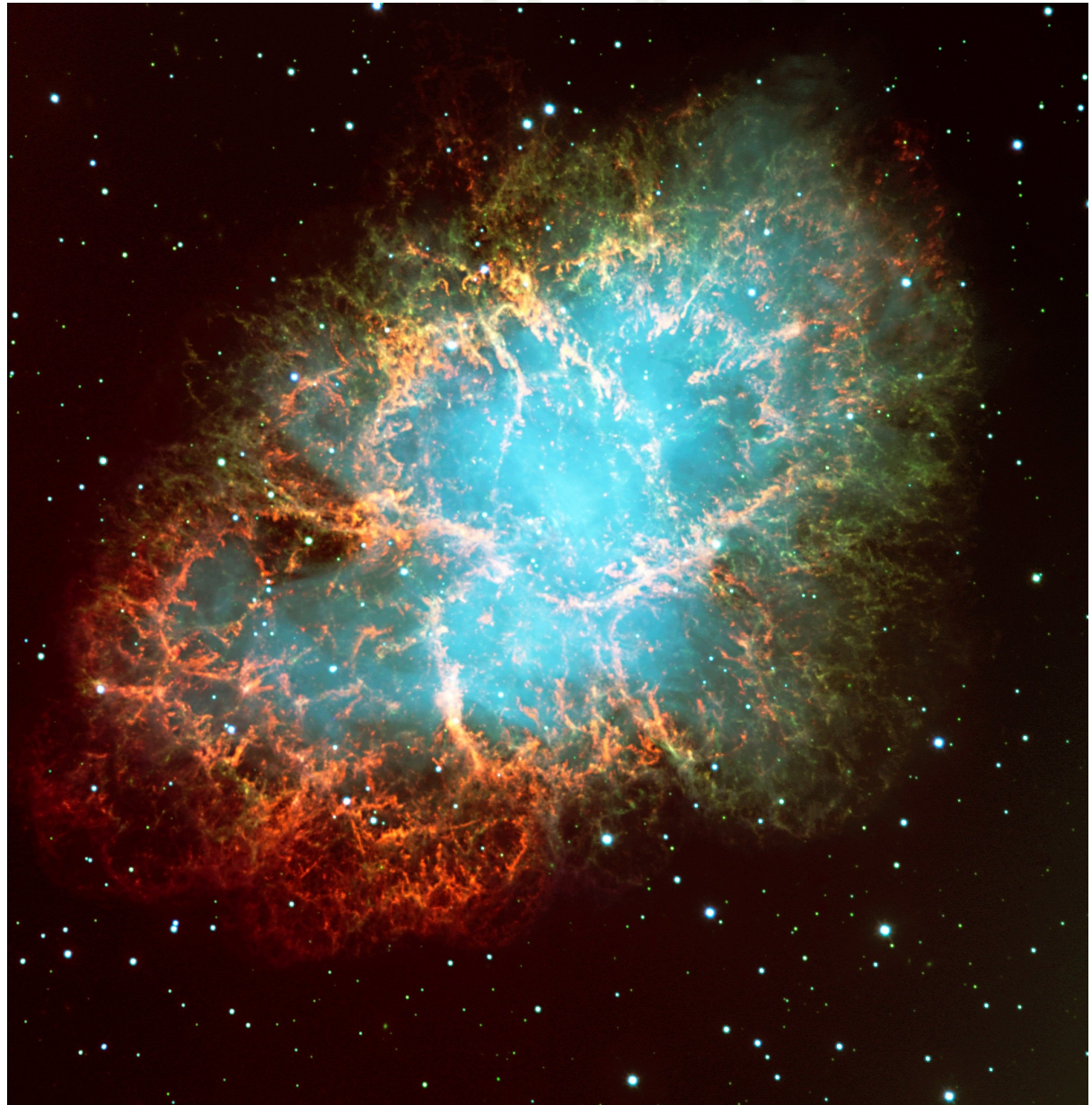


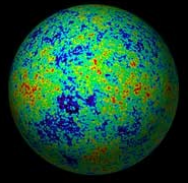
Nevels van Messier



Charles Messier

M1





Nevels van Messier



Charles Messier

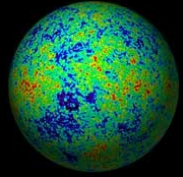
M13



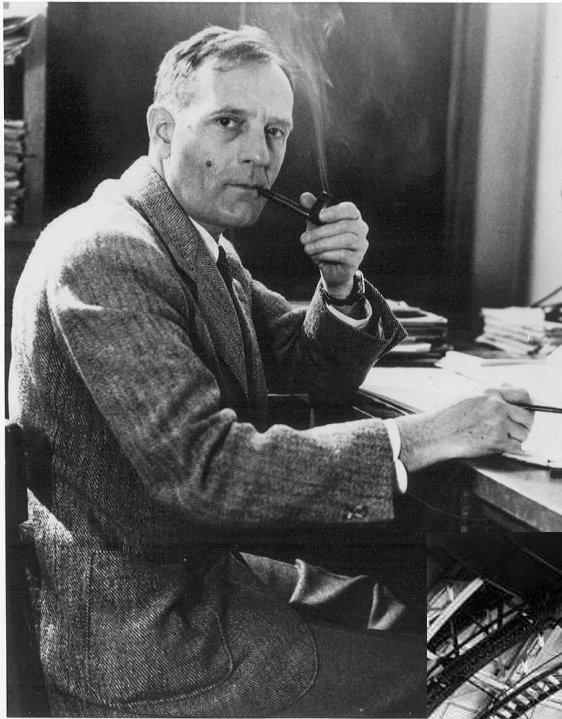






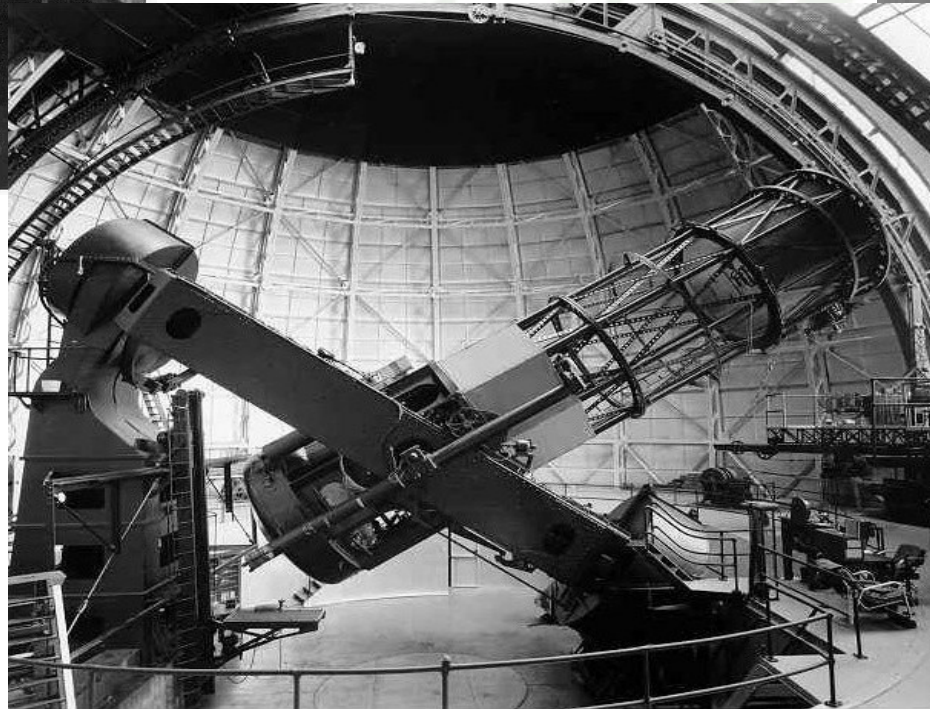
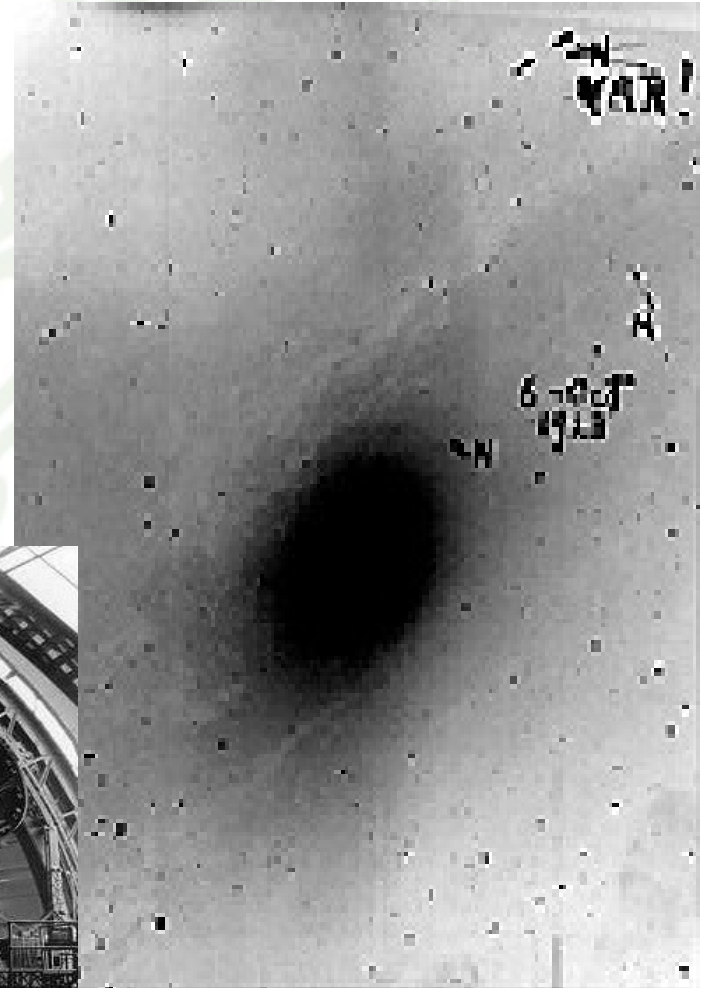


Cepheiden van Hubble

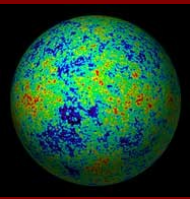


Edwin Hubble

M31



Hooker telescope



Cepheiden van Hubble

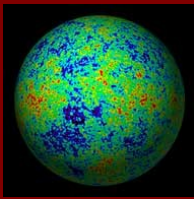
Cepheiden: pulserende sterren

Bekend uit eigen Melkweg en bolhopen (Shapley!)

Gebruikt als standaard kaarsen (zie volgend uur)

Conclusie:

- M31 is 'eiland universum', net als Melkweg
- Afstand tot M31 is 2 miljoen lichtjaar!



De wet van Hubble

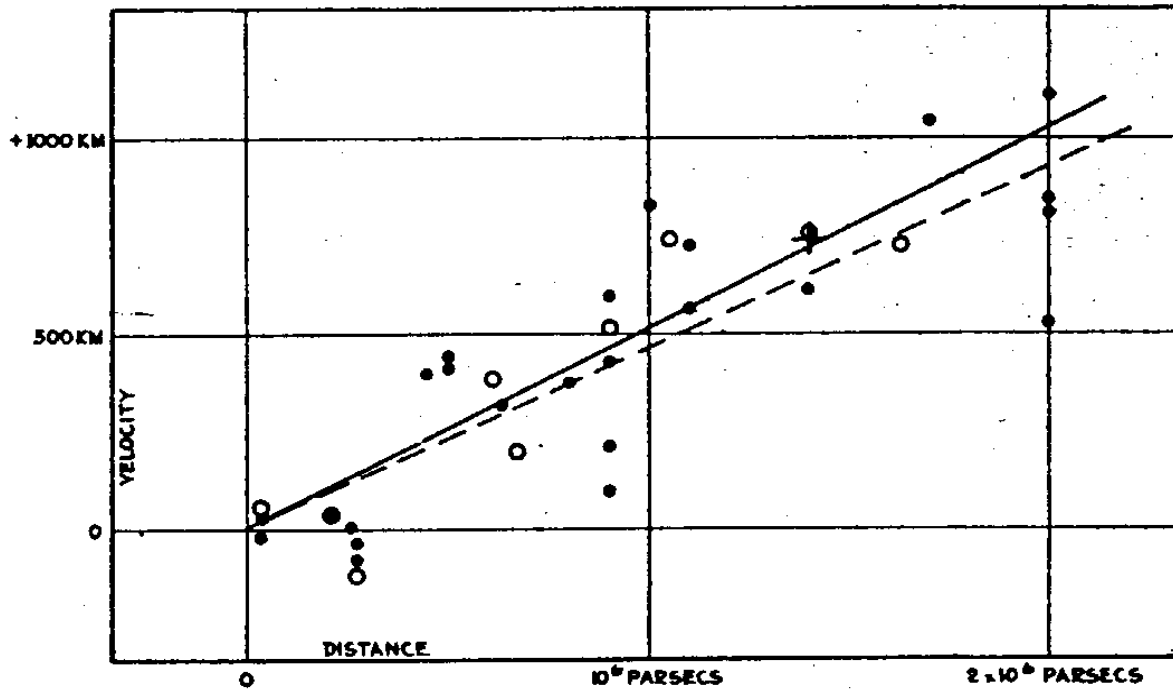
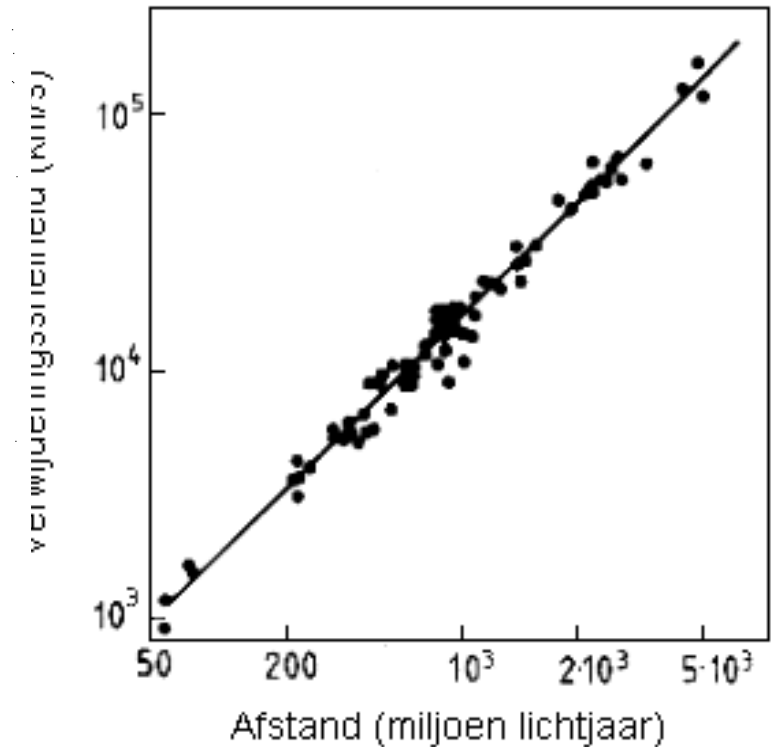


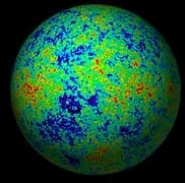
FIGURE 1



De wet van Hubble $v = H_0 d$

Doppler effect: $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$





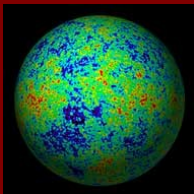
Het expanderende Heelal

Conclusie: Het Heelal expandeert!

Consequenties:

- Afstanden worden groter!
- Vroeger was de schaal kleiner!
- Het heelal koelt af!
- Vroeger was het kleiner!

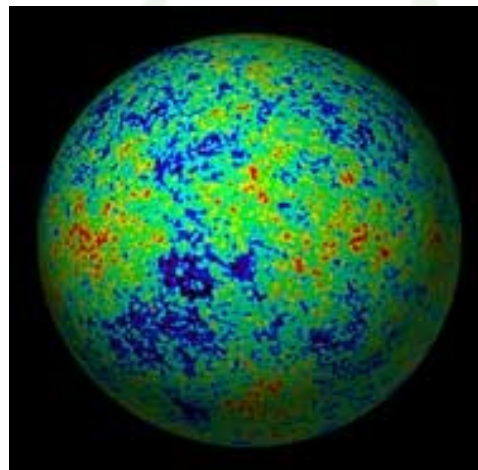
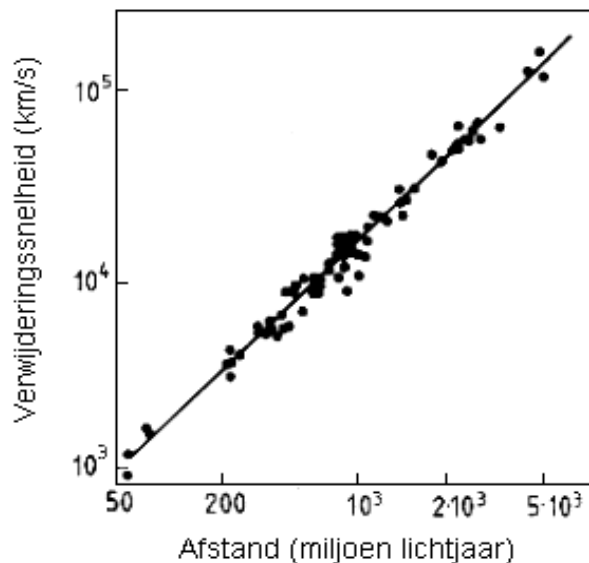
Het heelal is begonnen in een hete Oerknal!



De hete Oerknal

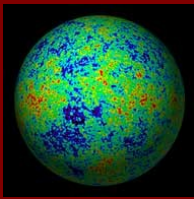
Hete Oerknal model spectaculair bevestigd:

- De expansie van Hubble
- De microgolfachtergrond straling
- Nucleosynthese van de elementen



The Astronomer's Periodic Table
(Ben McCall)

H		He	
C	N	O	Ne
Mg	Si	S	Ar
Fe			



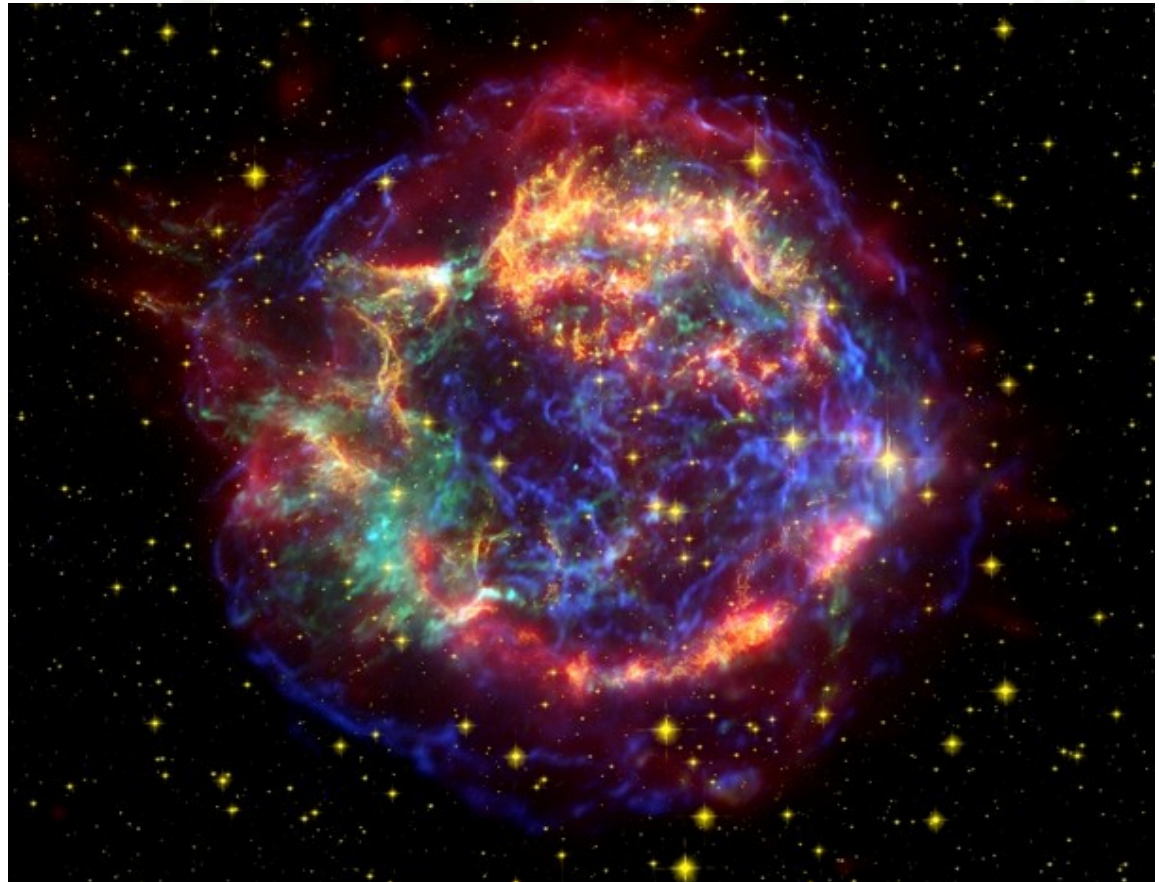
Oerknal voorstellingen

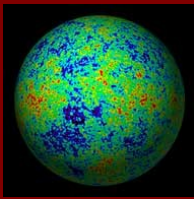
Eigenlijk is de term 'oerknal' misleidend.

Het was geen 'knal' = kinetische energie aan fragmenten.

Supernova = knal

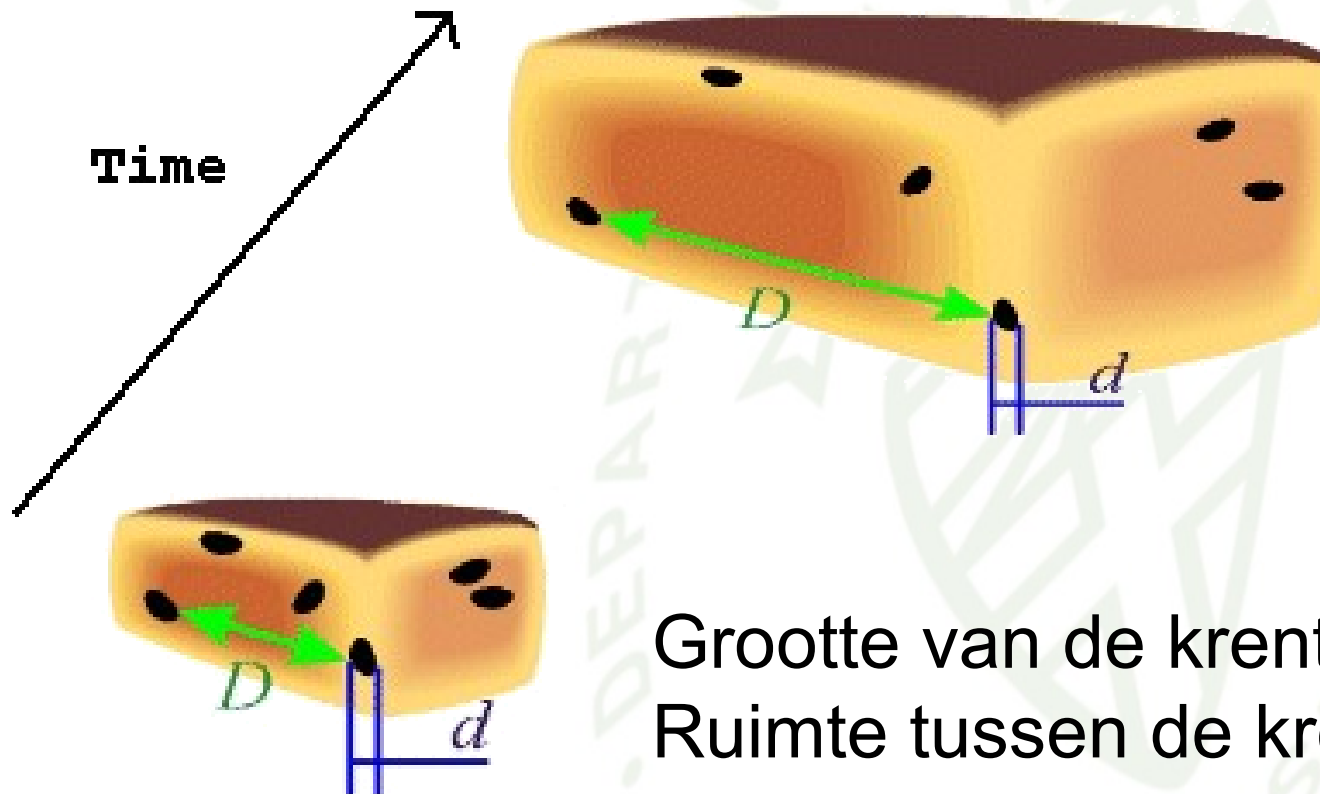
Oerknal = expansie



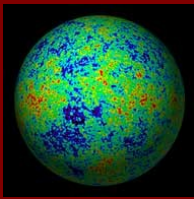


Oerknal voorstellingen

Het rijzende krentenbrood.



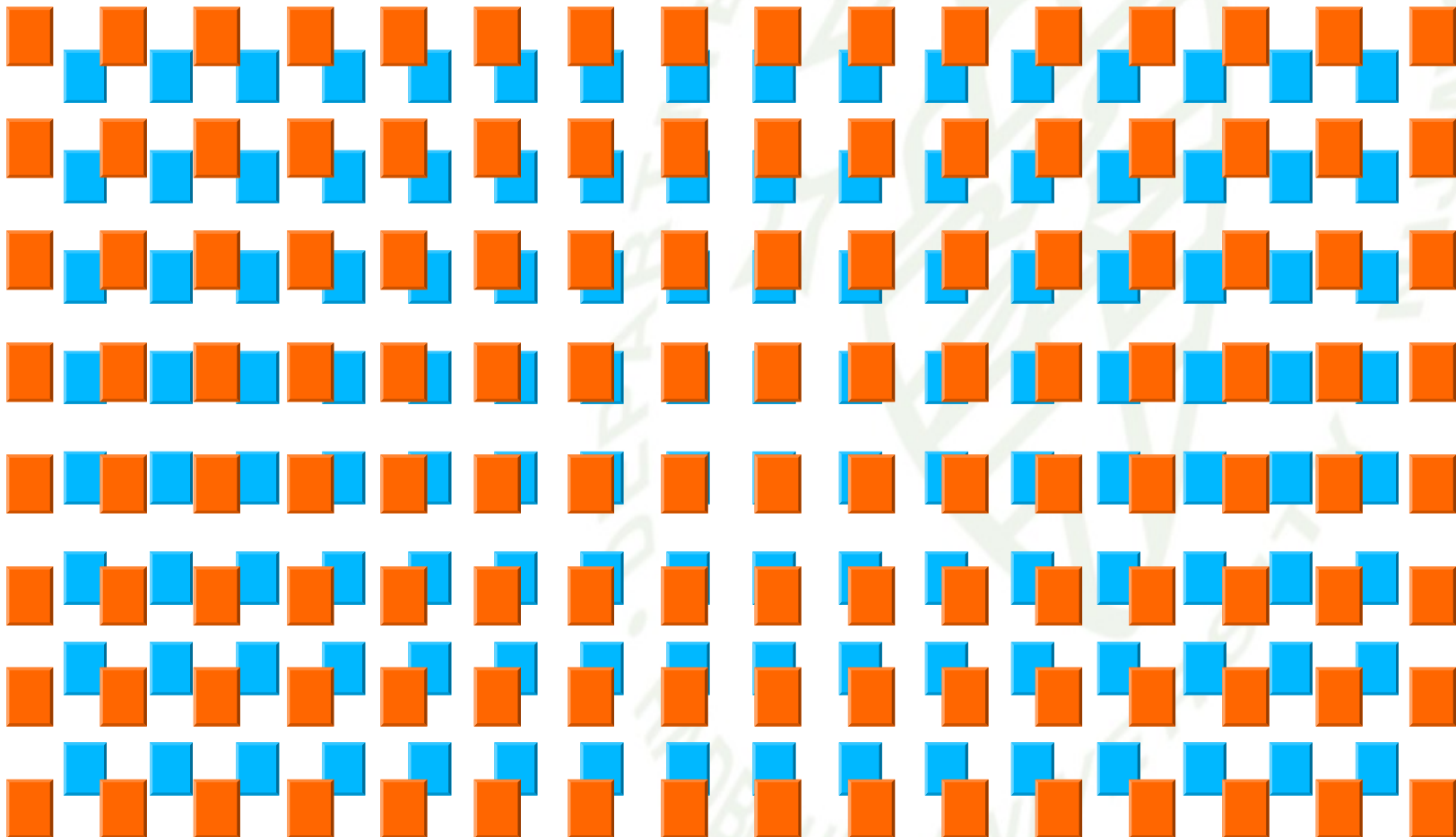
Grootte van de krenten blijft gelijk
Ruimte tussen de krenten neemt toe

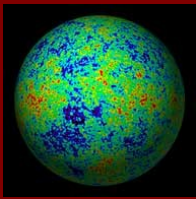


Oerknal 'centrum'

Het heelal heeft **geen** centrum. Denk aan krentenbrood, maar dan oneindig groot.

Een tijdstap Δt verder!

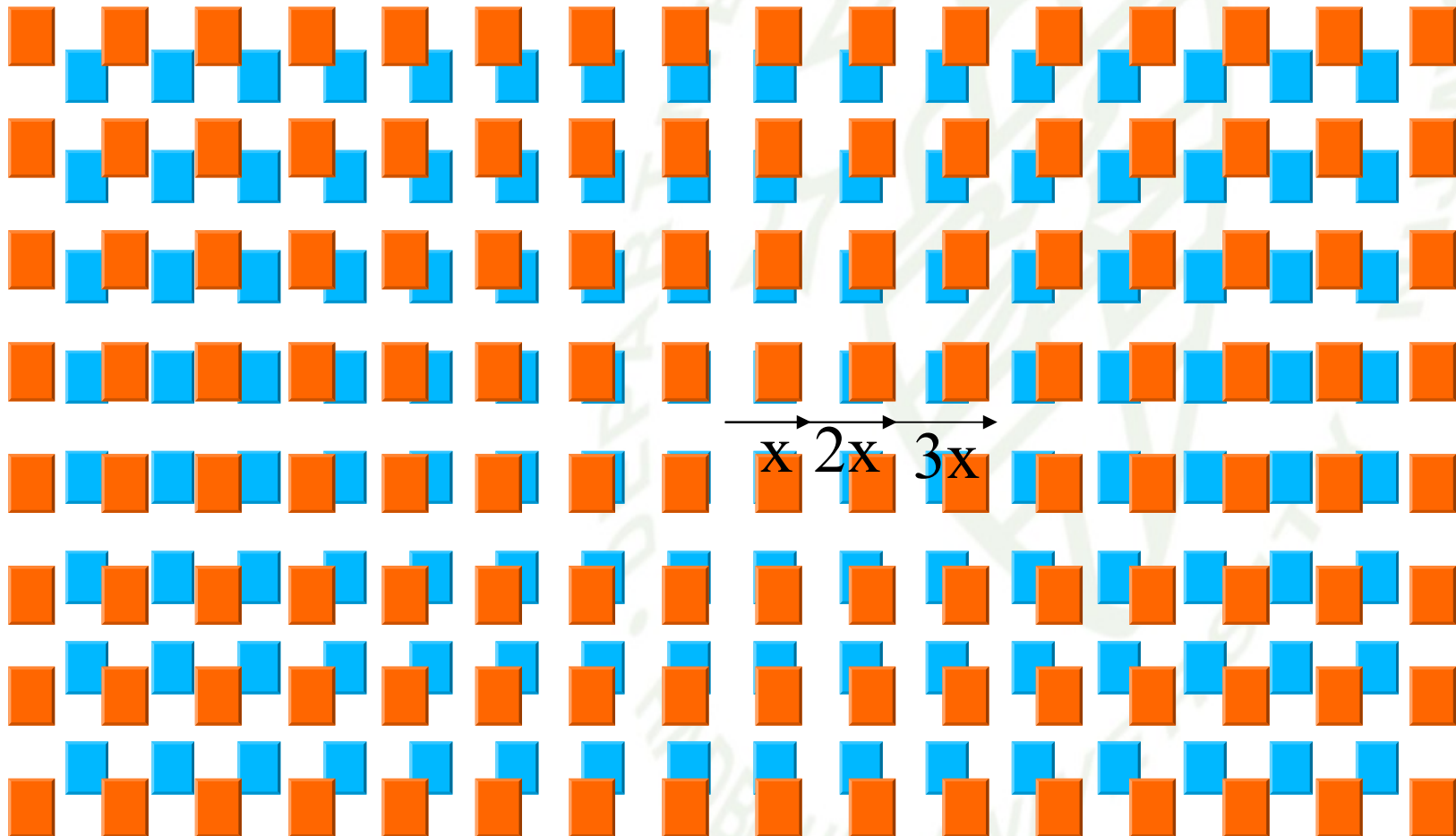


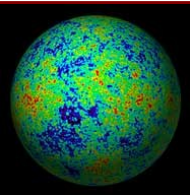


Oerknal 'centrum'

Elke waarnemer ziet zichzelf in het centrum
Hoe verder een object hoe harder het lijkt te
bewegen!

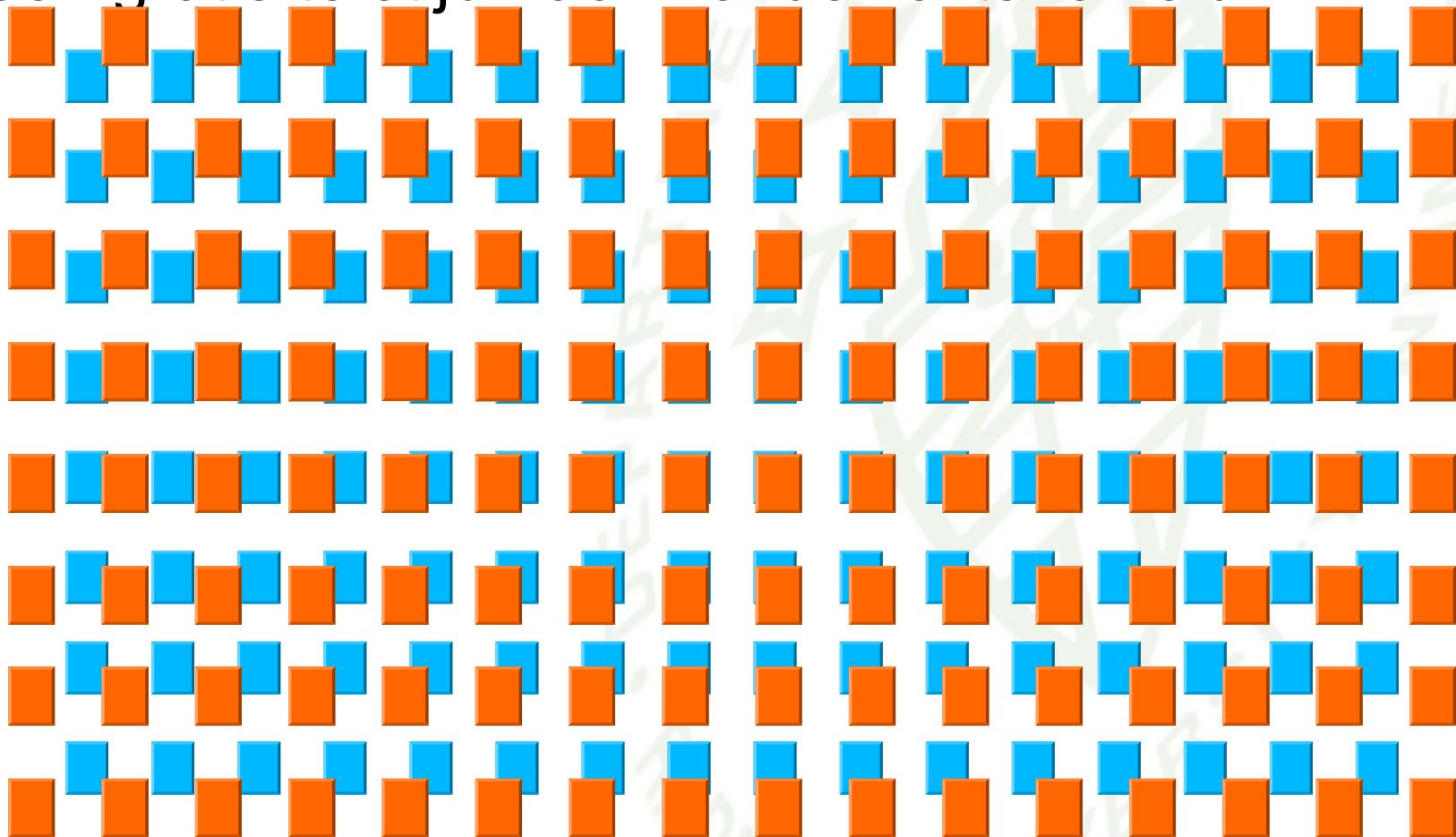
De wet van Hubble!



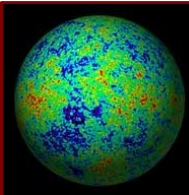


Constance constant?

Wij zien *nu* dat de schaalfactor lineair toeneemt, maar is dat altijd zo geweest? We hebben immers een gratis teletijdmachine: de lichtsnelheid!

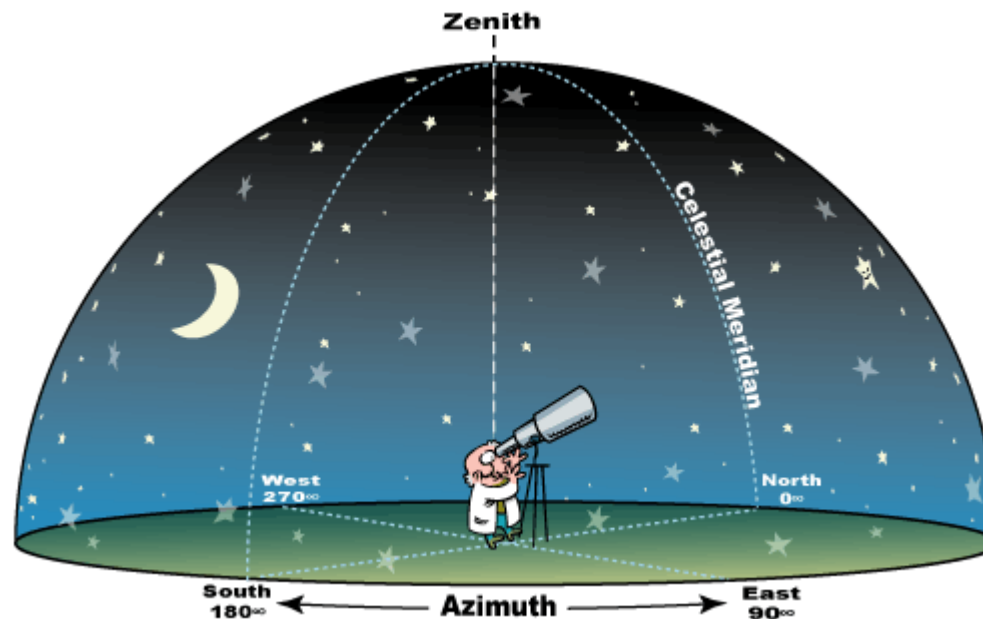


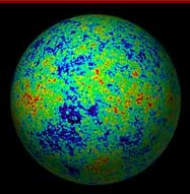
Let op! Blokjes horen even groot te blijven



De Afstandsladder

Kosmologie hangt helemaal samen met afstanden meten in het Heelal



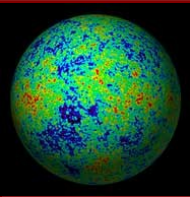


De Afstandsladder

Aaneenschakeling van methodes:

- Radar ranging
- Parallax
- Variabele sterren (RR Lyrae & Cepheiden)
- Maser afstanden
- Supernovae
- Tully-Fisher & Fundamental Plane
- Hubble expansie

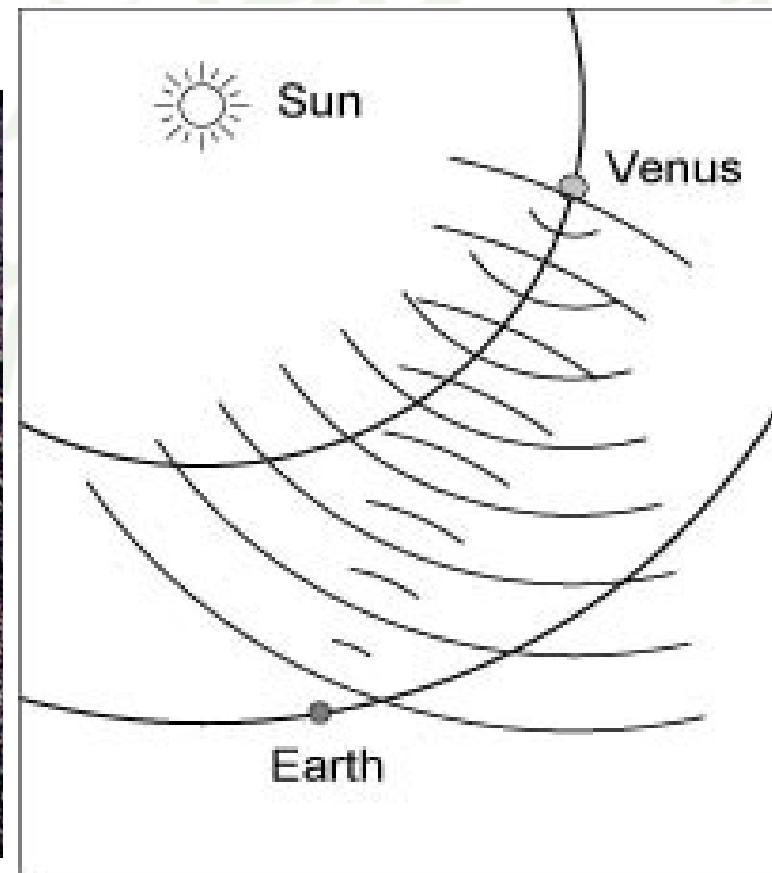
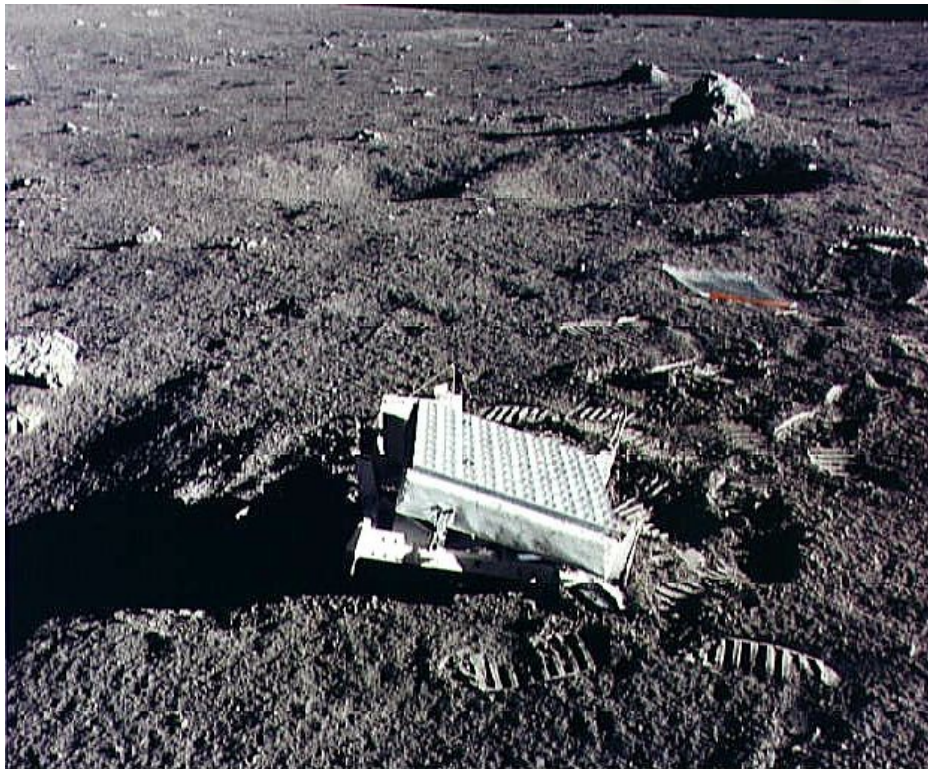




Radar/Laser Ranging

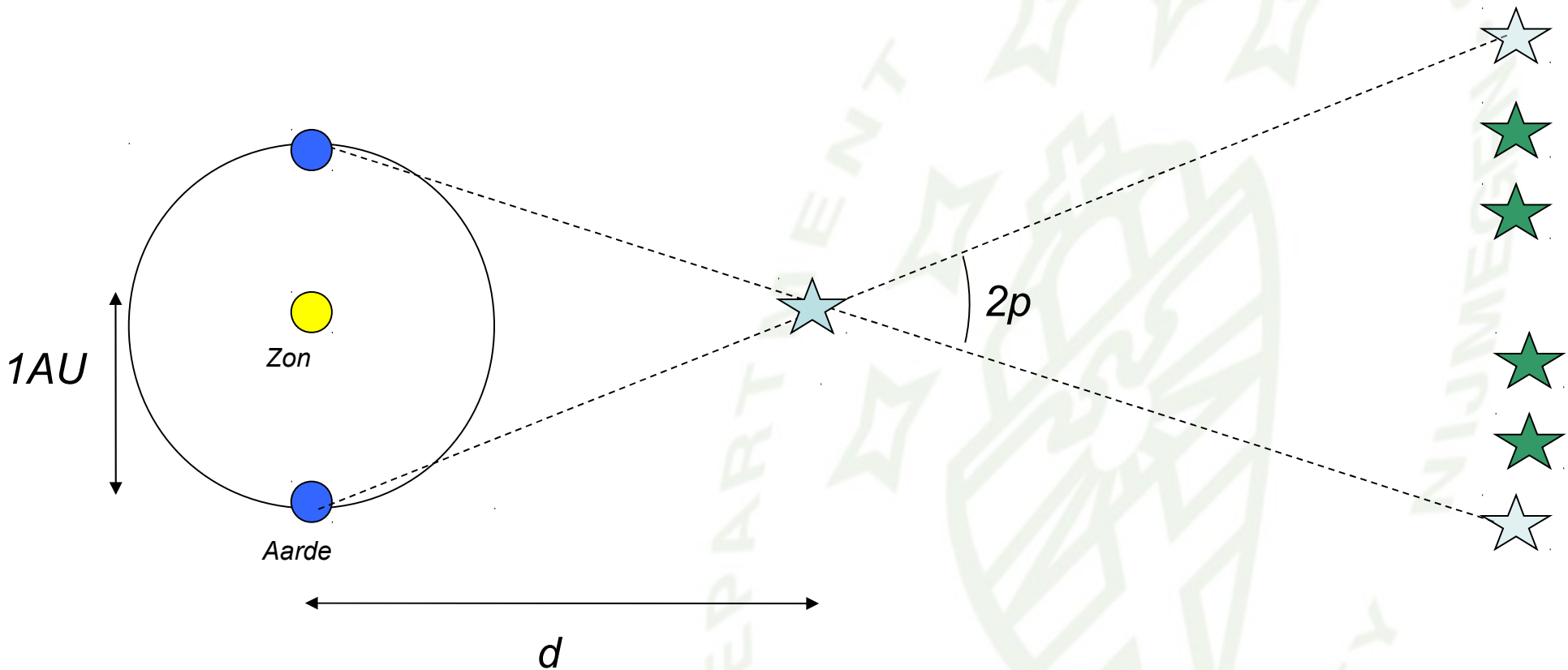
Uitgangspunt: *lichtsnelheid is constant*

Bereik: Zonnestelsel



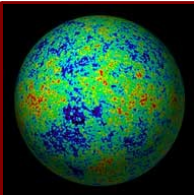


De parallax meting



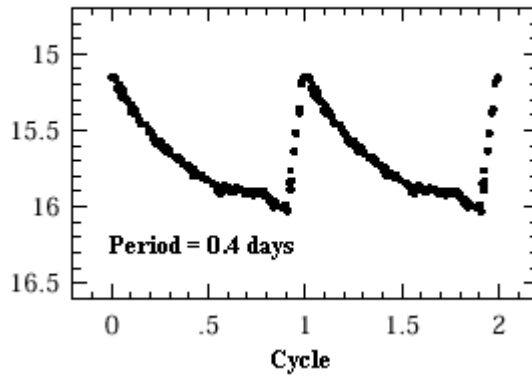
De afstand van de ster: $\tan p = d / 1 \text{ AU} \approx p$

Dit is de definitie van de afstandsmaat 'parsec': een ster staat op 1 parsec afstand als hij een parallax vertoont van 1 boogseconde.

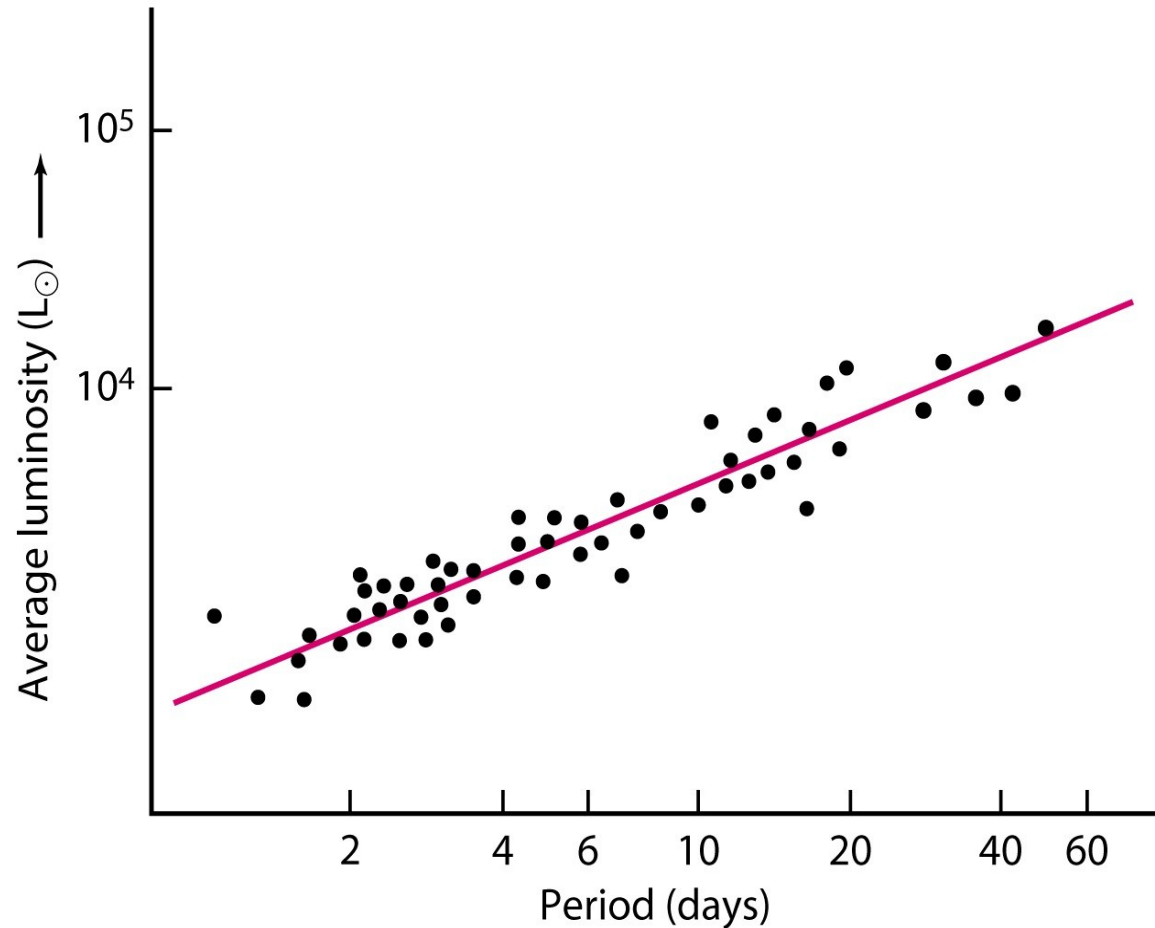
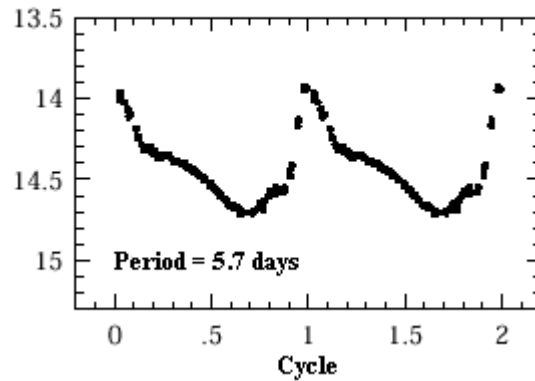


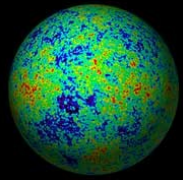
Variabele Sterren

RR Lyrae Light Variation

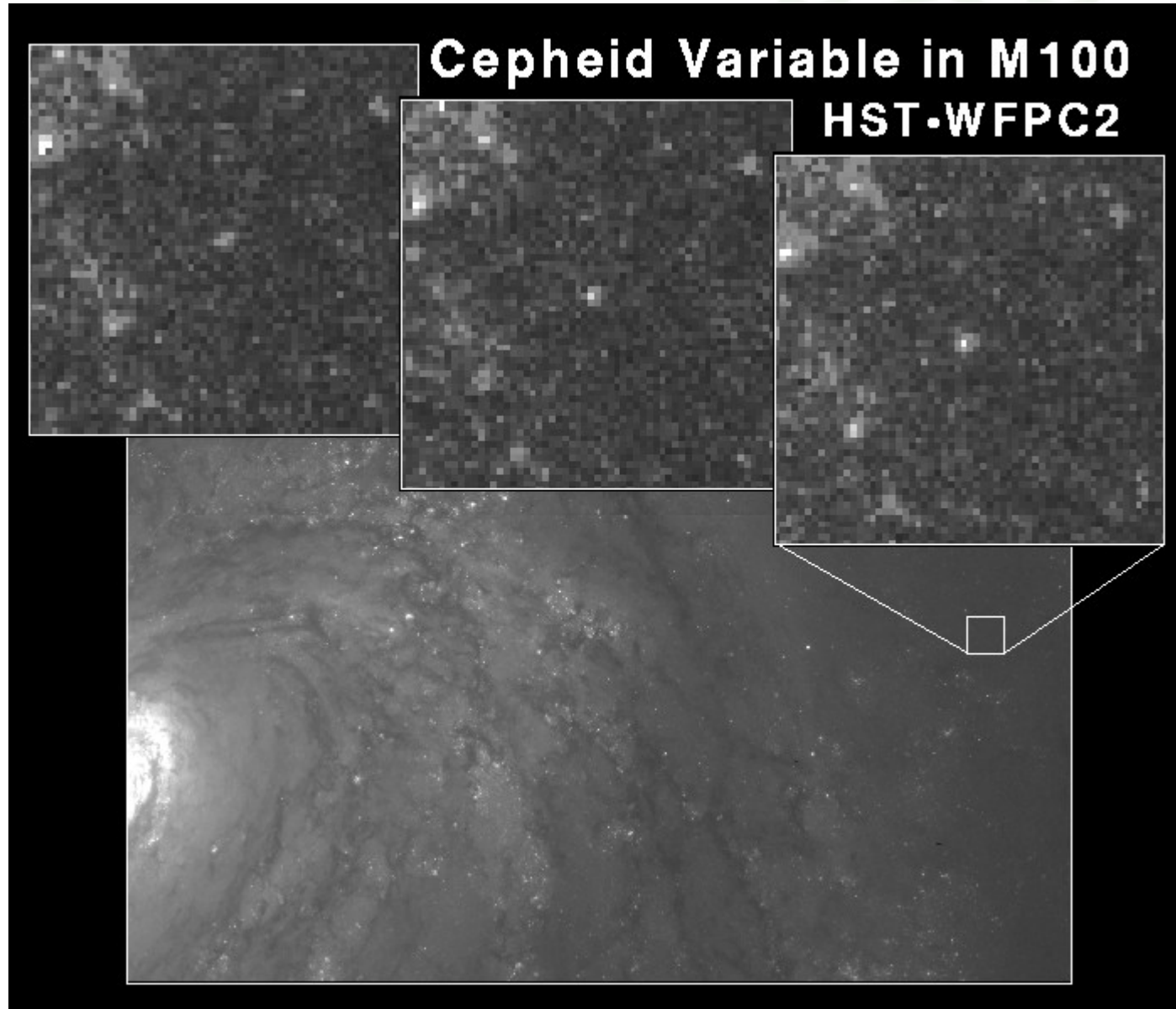


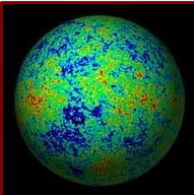
Cepheid Light Variation





Variabele Sterren



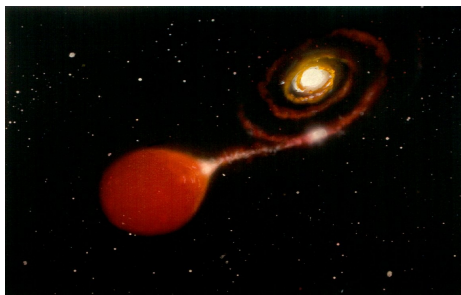


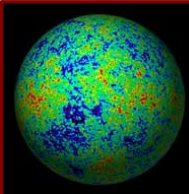
Supernovae Type Ia

Ontbranding van
koolstof in witte dwerg
onder gedegenereerde
omstandigheden

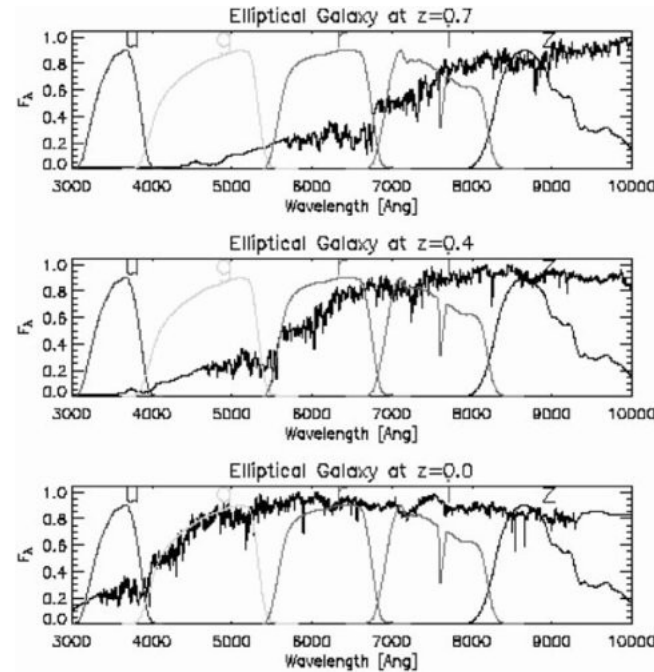
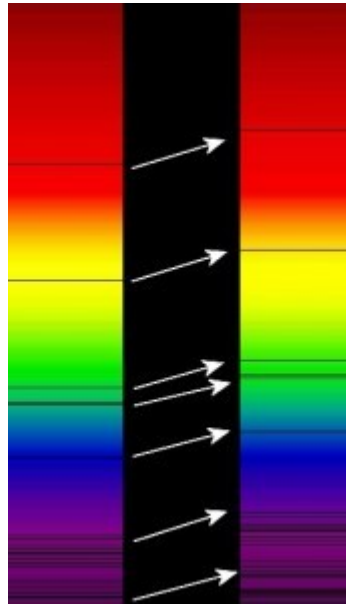
$$M_{\text{wd}} \sim 1.4 M_{\text{zon}}:$$

Standaard lichtkracht!





Wet van Hubble



$$z = 1 + \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Roodverschuiving

$z+1$ = 'terug-kijktijd' = $a(t)/a(t_0)$

Fractionele grootte van het Heelal, i.e. op $z = 5$: grootte heelal $1/6$ van nu, etc.