

Frank Verbunt

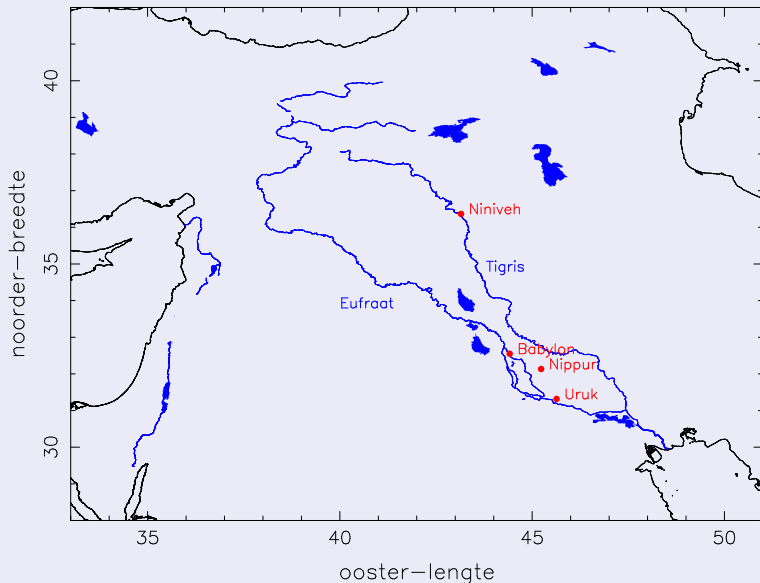
De evolutie van het wereldbeeld  
structuur van de wereld  
structuur van materie

Amersfoort, 8 mei 2024

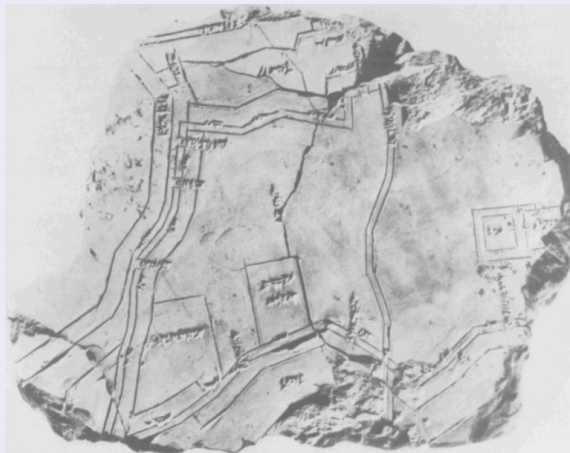
## Overzicht

- lokale en wereldkaarten
- het begrensd heelal
- bolvorm van de aarde
- het heelal volgens Ptolemaios
- Copernicus, Brahe, Kepler
- Newton
- een nieuwe planeet!
- afstand sterren
- sterstelsels, uitdijing heelal
- materie is leeg !
- de Oerknal
- donkere materie
- donkere energie

# Mesopotamië: het land tussen de rivieren



## Plattegrond Nippur



- lijsten met plaatsnamen (vanaf 2200 vC, handelsverbindingen)
- routebeschrijving bv. langs Eufraat
- afstanden in dubbeluren ( $\pm 10$  km)
- plattegronden, bv. Nippur 1500 vC
- 'wereldkaart' BM92687, 600 vC
- beperkt door kleitablet-formaat?

# Vroeg-mesopotamische geografie: 'wereldkaart'

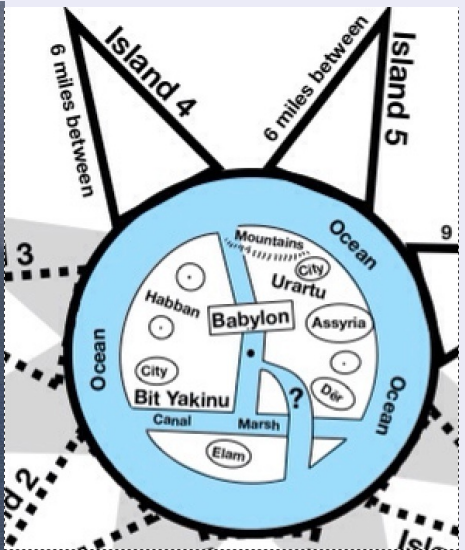


foto en schets van website British Museum over BM92687



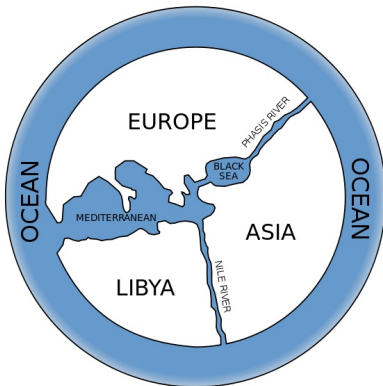
# Eerste wereldkaarten (gereconstrueerd uit beschrijving)

Er is uit de Griekse oudheid geen enkele geografische kaart of hemelkaart bewaard gebleven.

De oudste manuscripten dateren van na 800 AD

Anaximander

Milete ±610 - 546



De Aarde is een platte schijf

Hecataeus

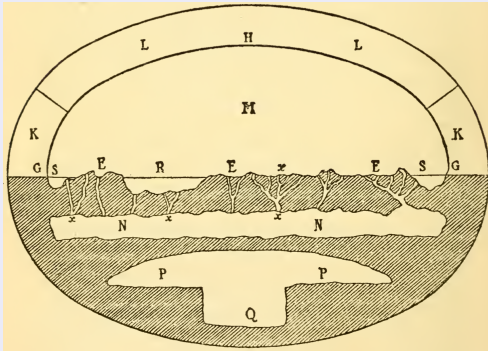
Milete ±550 - 476



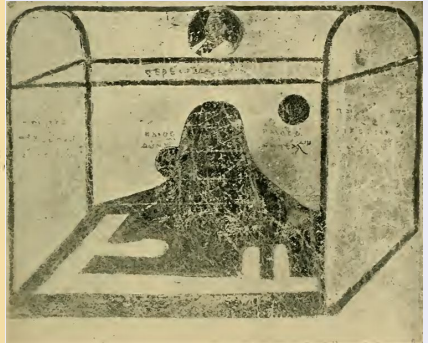
reconstructies van website British Museum

# Ontstaan van de wereld: scheiden van hemel en aarde

links: bijbels wereldbeeld



rechts: alternatief model



Babylonische scheppingsmythe: De god Marduk doodt de godin van het water Tiamat, en splitst haar lichaam in hemel en aarde

Hesiodos Theogonie: Eerst was er chaos

# Ontstaan van de wereld: scheiden van hemel en aarde

De aarde is plat; de hemel gekromd

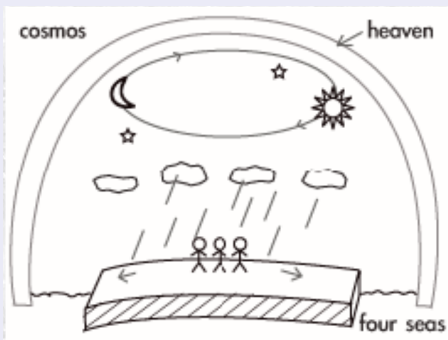
Egypte



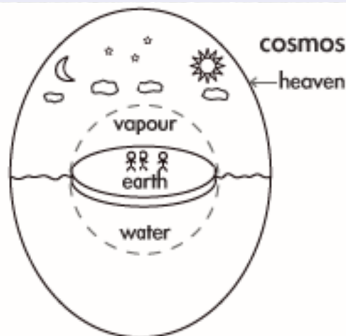
# Ontstaan van de wereld: scheiden van hemel en aarde

De aarde is plat; de hemel ook, of gekromd

China



*The Gai Tian Model*  
(Hemispherical Dome)

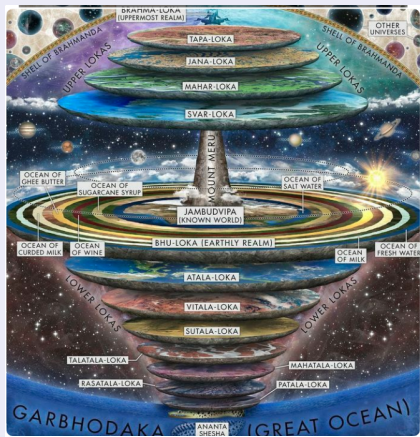


*Hun Tian Model (Celestial Sphere)*

tekeningen: Universiteit van Hong Kong

# Alternatief model: wereld-ei (India, China)

## Hindu model



één van vele werldeien

## Atharva-veda

1000 vC

- oer-materie vormt ei
- binnen het ei ontstaat Purusja, ook Brahma genoemd
- die splitst het ei: hemel boven, aarde in het midden
- hemel wordt hoog gehouden door berg Meru
- aarde = 7 concentrische eilanden
- 5 elementen (één voor elk zintuig): aarde, water, wind, vuur, aether

## Pythagoras

Samos 572 - Metapontum 500

Over Pythagoras is vrijwel niets bekend; onze informatie komt van zijn omgeving: Pythagoreërs

- de Aarde is bolvormig
- Avondster = Ochtendster

Argumenten bolvorm gegeven bij Aristoteles:

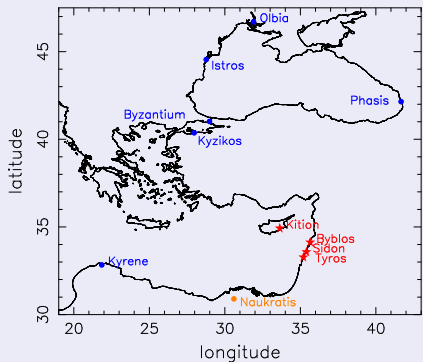
- schaduw Aarde bij eclips
- poolhoogte en zichtbaarheid sterren veranderen naar noorden / zuiden

## Aardschaduw

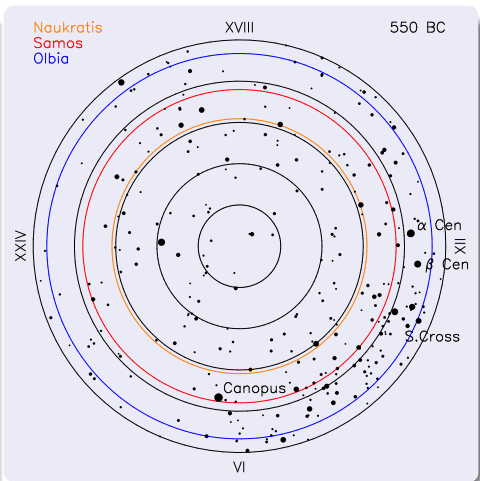


de schaduw van de Aarde is ruim twee keer de diameter van de Maan

# Oudste sterrenkunde: Pythagoras / Pythagoreërs



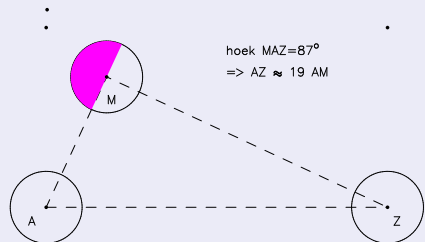
Grieken reizen: minder sterren in Olbia, meer sterren in Egypte



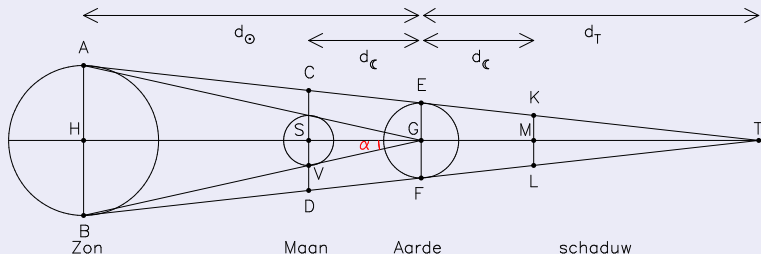
# Wiskunde (geometrie) en afstanden Maan en Zon

Aristarchos

Samos 310-230

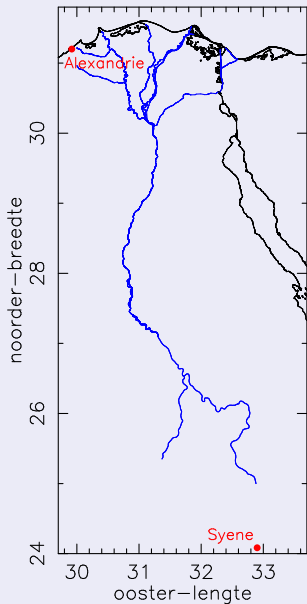


- helft Maan belicht als hoek Aarde-Maan-Zon 87° is
- zon 19 keer zo ver als Maan
- Maan bedekt Zon precies
- schaduw Maan 1/3 schaduw Aarde
- afstand Zon = 490 aardstralen





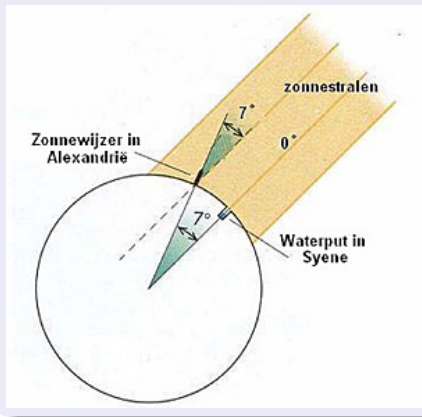
# Wiskunde (geometrie): grootte Aarde



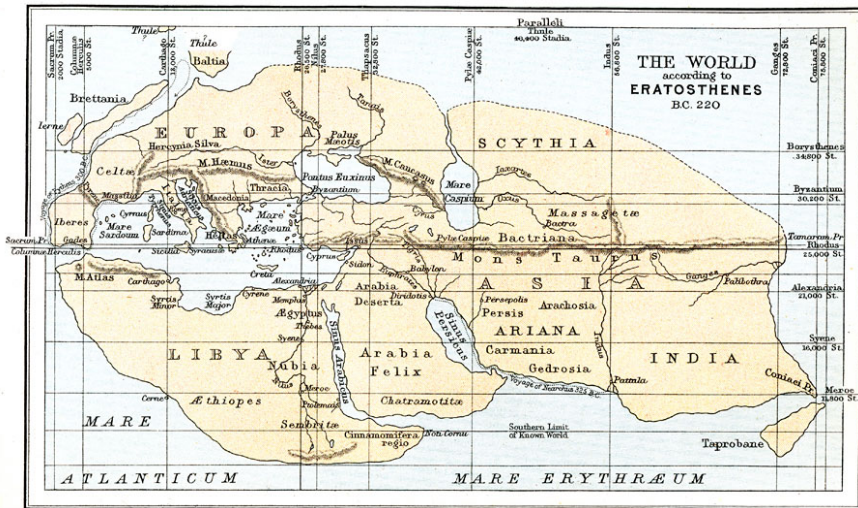
## Eratosthenes

Cyrene 275 -Alexandrië 194

- omtrek Aarde =  $50 \times$  Alexandrie-Syene



# Wereldkaart Eratosthenes (reconstructie)

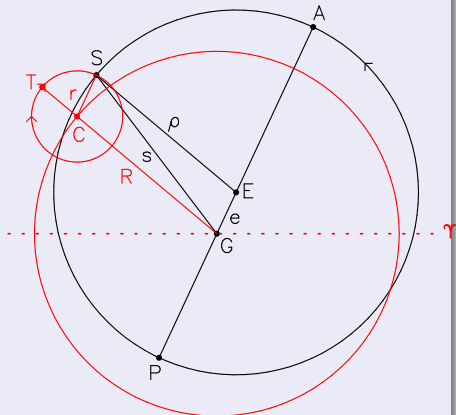
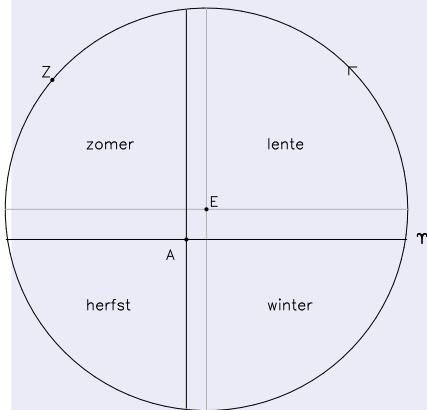


klimaatzones: koud (noorden), gematigd, tropisch (evenaar)  
symmetrie: ook in zuiden gematigd, koud; 'tegenvoeters'

# Ongelijke seizoenen: aarde excentrisch óf epicykel

Apollonios

262-190 v.C.



	tijd	lente	zomer	herfst	winter
Euktemon	±430 vC	93	90	90	92
Kallippos	330 vC	94	92	89	90
Hipparchos	150 vC	94.5	92.5	$88\frac{1}{8}$	$90\frac{1}{8}$

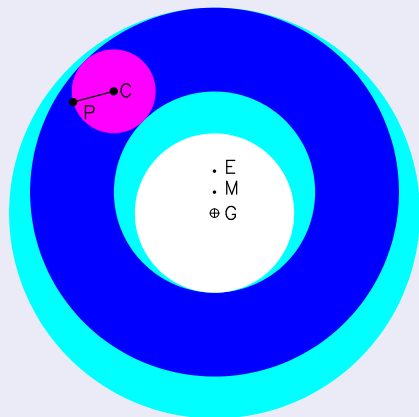
# Ptolemaios: deferent en epicykels

## Aantal deferenten + epicykels

planeet	♃	♄	♅	♆	♇	♈	♉	totaal
Aristoteles	5	9	9	9	9	7	7	55
Ptolemaios	3	2	3	2	2	2	2	16

- in de Almagest zijn cirkels puur wiskundig
- in later boek zijn bollen fysiek
- geen koppeling tussen planeten
- daardoor klein aantal epicykels
- vieze truuk: equant
- Aristoteles koppelt planeten: eerste beweging aan buitenkant
- daardoor 55 fysieke bollen (waarvan 5 overbodig!)

## Planetaire Hypothesen



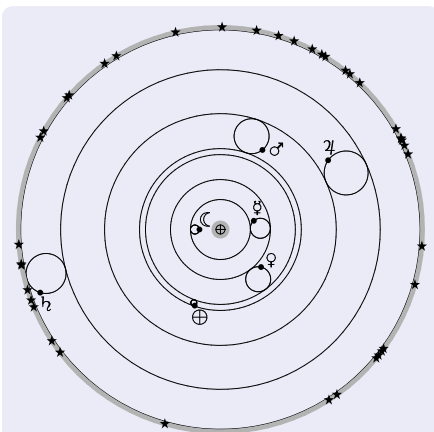
natuurkunde: materiële bollen en bolschillen, doorzichtig

# Het wereldbeeld van Ptolemaios

## Grootte van de bollen

	Perigeum	Apogeum
	in aard-stralen	
Maan	33	64
Mercurius	64	166
Venus	166	1 079
Zon	1 160	1 260
Mars	1 260	8 820
Jupiter	8 820	14 187
Saturnus	14 187	19 865
Sterren	20 000	

De grootte van de epicykel volgt uit de grootste afwijking van de gemiddelde beweging



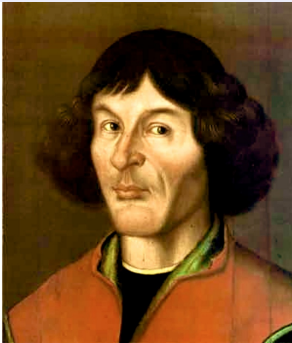
Elke bolschil sluit nauw aan op die van de planeten erbinnen en erbuiten: **de Aarde is piepklein!**

# 1453: de Copernicaanse revolutie

## Drie bewegingen van de Aarde

- rotatie om eigen as in 1 dag
- revolutie om de Zon in 1 jaar
- rotatie van Aardas in 1 jaar

Nicolaus Copernicus



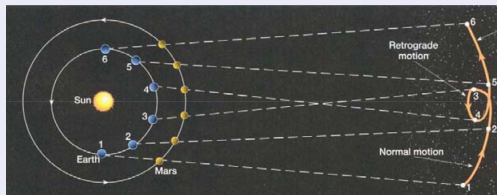
## De Revolutionibus Manuscript



# 1453: de Copernicaanse revolutie

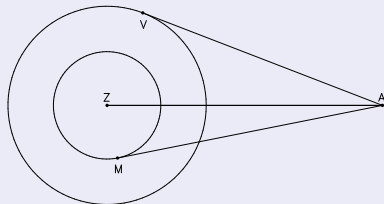
## Alle planeren draaien om Zon

- volgorde planeten uniek bepaald
- maximale hoek tussen binnenplaneten en Zon verklaard
- teruglopende beweging buitenplaneten verklaard
- relatieve grootten van planeetbanen ruw bekend (= relative grootten epicykels!)



## Fouten en nadelen

- aardas roteert niet jaarlijks
- Copernicus neemt niet Zon, maar centrum aardbaan als centrum
- groot aantal epicykels (afwijzing equant)
- geen beweging sterren?



## Drie revoluties

Copernicus: sociale revolutie

- Aarde is niet centrum van heelal
- mens is niet belangrijkste wezen in heelal

Brahe: technische revolutie

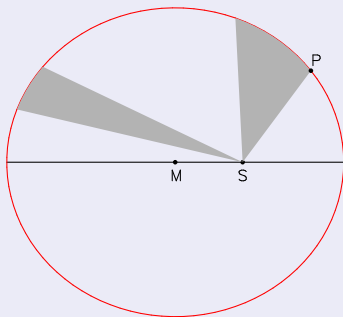
- zo nauwkeurig meten als mogelijk

Kepler: theoretische revolutie

- theorie zo nauwkeurig als waarnemingen eisen
- relatieve afstanden nauwkeurig bekend

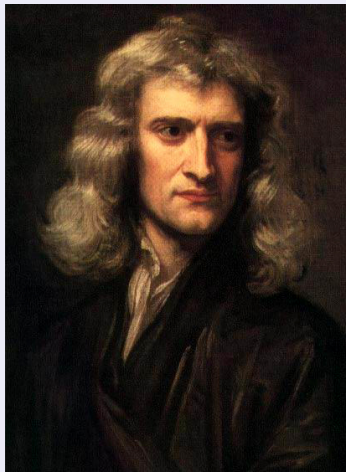
## De wetten van Kepler

- planeet beweegt in ellips met Zon in brandpunt
- straal bestrijkt gelijke oppervlakken in gelijke tijd
- $P^2(\text{jr}) = a^3(\text{AE})$





## Newton in 1689



## Drie weten beweging

- verandering van beweging van een lichaam vereist een kracht
- de verandering is evenredig met en in de richting van de kracht
- onderlinge krachten tussen twee lichamen zijn even groot, en in tegenovergestelde richting

Wet zwaartekracht:

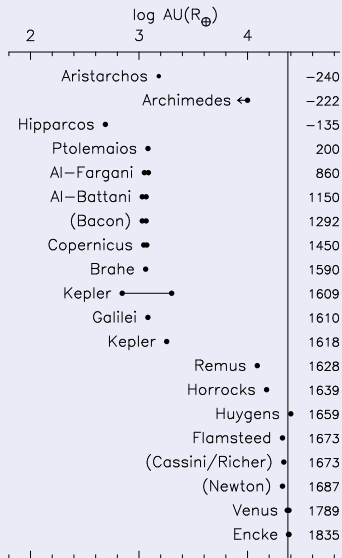
Zwaartekracht is evenredig met product massa's en omgekeerd evenredig met kwadraat van de afstand.

Hieruit volgen de wetten van Kepler.

**ik verzin geen hypotheses**

## Het zonnestelsel na Newton

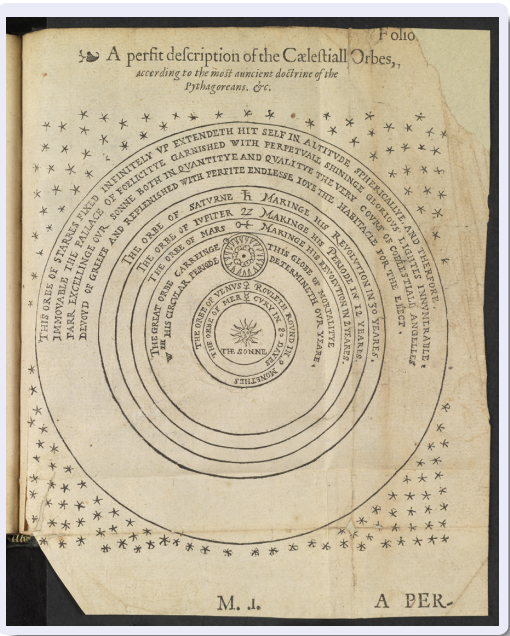
- volgorde planeten bekend
- grote leegte tussen planeten: vacuum (?)
- absolute afstanden onbekend, relatieve afstanden nauwkeurig
- Jupiter en Saturnus hebben manen
- kometen bewegen om Zon
- de Zon roteert en heeft (zonne)vlekken



# Het heelal na Newton

## De sterren

- afstand totaal onbekend
- vast op bolschil? nee
- variabele sterren, bv. Mira (Fabricius)
- nieuwe sterren: novae
- de Melkweg bestaat uit sterren (Galileo)
- dubbelsterren: niet alle sterren zijn even helder (Halley)
- groepen van sterren: Pleiaden (Digges)

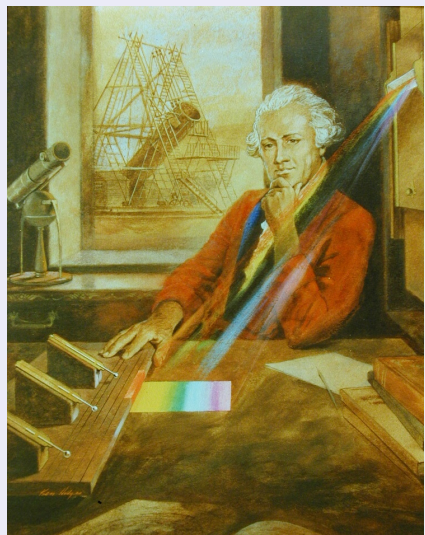


# William Herschel: brilliant amateur

## Ontwikkeling

- beroep: kapelmeester
- autodidact: kijkt gewoon wat rond aan hemel
- bouwt eigen telescoop: beter dan beroeps!
- 1781 ontdekt nieuwe planeet, afstand meer dan dubbele van Saturnus
- 1800 ontdekt infrarood licht
- maakt catalogus van nevels, met zus Caroline

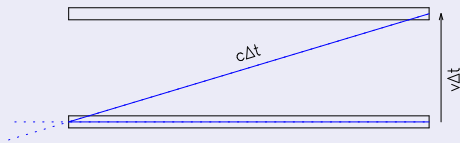
Na 1800: ontdekking planetoïden door Piazzi, Olbers, Harding



# Afstanden in zonnestelsel en tot een ster

## Afstand tot de planeten

- Venus-overgangen 1671, 1679: veel beter, maar minder nauwkeurig dan gehoopt: 23 230 á 24 120 aardstralen
- 1863: Foucault; later Michelson & Newcomb, meten lichtsnelheid: met aberratie nauwkeurige afstand.



## Friedrich Wilhelm Bessel

Fundamenta astronomiae (1818)  
*Elk instrument wordt twee keer gemaakt: eerst in de werkplaats, dan door de sterrenkundige op papier*

- Wiskundige beschrijving telescoop, instrument en meetfouten
- zeer nauwkeurige metingen
- eerste betrouwbare afstand ster: 61 Cyg op  $10^{12}$  km (10 lichtjaar)

# Nevels tussen de sterren

Orion: gas en stof



M51: sterren



# Nevels tussen de sterren: M31 en M101



# Vesto Slipher: spiraallevels bewegen van ons af

TABLE I.  
RADIAL VELOCITIES OF TWENTY-FIVE SPIRAL NEBULÆ.

Nebula.	Vel.	Nebula.	Vel.
N.G.C. 221	- 300 km.	N.G.C. 4526	+ 580 km.
224	- 300	4565	+ 1100
598	- 260	4594	+ 1100
1023	+ 300	4649	+ 1090
1068	+ 1100	4736	+ 290
2683	+ 400	4826	+ 150
3031	- 30	5005	+ 900
3115	+ 600	5055	+ 450
3379	+ 780	5194	+ 270
3521	+ 730	5236	+ 500
3623	+ 800	5866	+ 650
3627	+ 650	7331	+ 500
4258	+ 500		

1912: Andromeda nevel beweegt naar on toe met  $v_r = -300$  km/s. Meeste andere sterstesels van ons af: V.M. Slipher, 1917



## Einstein & Lemaître ± 1933



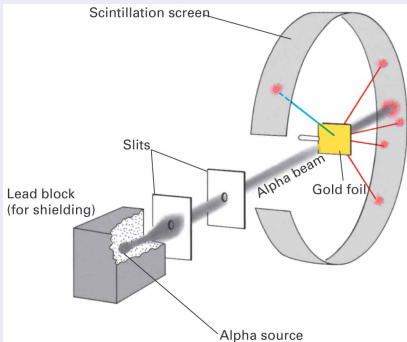
## Lemaître

- 1925 Einstein's heelal statisch maar niet stabiel
- 1927 artikel in Franstalig tijdschrift Brussel: het heelal dijt uit
- volgt uit Algemene Relativiteitstheorie
- en is gemeten door Slipher
- snelheid evenredig met afstand

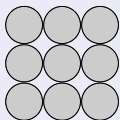
Hubble doet dit in 1929 over

# De ontdekking van het atoom: Rutherford 1911

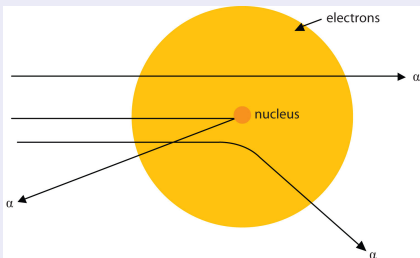
## $\alpha$ -deeltjes en goudfolie



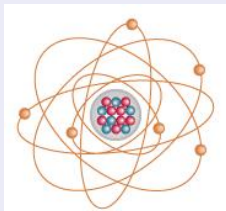
© 2004 Thomson Brooks Cole



## 'Een vlieg in de kathedraal'



## atoom = kern + elektronen



# De ontdekking van het atoom

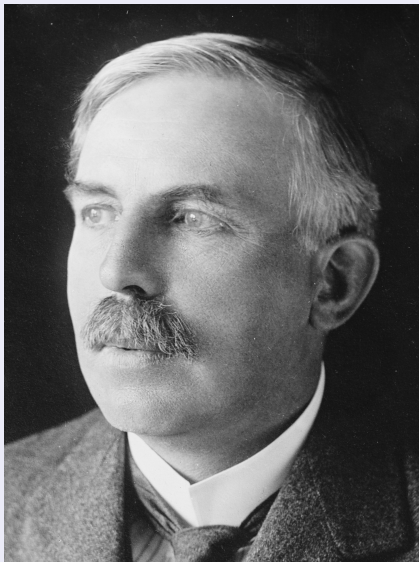
## a-deeltjes en goudfolie 1911

- $\alpha$ -deeltjes zijn heliumkernen
- schiet op goudfolie
- meeste vliegen rechtdoor
- héél enkele wordt **sterk** afgebogen

Het atoom heeft een zeer kleine kern: 'het atoom is leeg'; 'een vlieg in de kathedraal', maar alle massa in de vlieg!

Spectraallijnen corresponderen met springen electronen naar andere baan (Niels Bohr)

## Ernest Rutherford 1871-1937



## INTRODUCTION

I HAVE settled down to the task of writing these lectures and have drawn up my chairs to my two tables. Two tables! Yes; there are duplicates of every object about me—two tables, two chairs, two pens.

This is not a very profound beginning to a course which ought to reach transcendent levels of scientific philosophy. But we cannot touch bedrock immediately; we must scratch a bit at the surface of things first. And whenever I begin to scratch the first thing I strike is—my two tables.

One of them has been familiar to me from earliest years. It is a commonplace object of that environment which I call the world. How shall I describe it? It has extension; it is comparatively permanent; it is coloured; above all it is *substantial*. By substantial I do not merely mean that it does not collapse when I lean upon it; I mean that it is constituted of 'substance' and by that word I am trying to convey to you some conception of its intrinsic nature. It is a *thing*; not like space, which is a mere negation; nor like time, which is—Heaven knows what! But that will not help you to my meaning because it is the distinctive characteristic of a 'thing' to have this substantiality, and I do not think substantiality can be described better than by saying that it is the kind of nature exemplified by an ordinary table. And so we go round in circles. After all if you are a plain common-sense man, not too much worried with scientific scruples, you will be confident that you understand the nature of an ordinary table. I have even heard of plain men who had the idea that

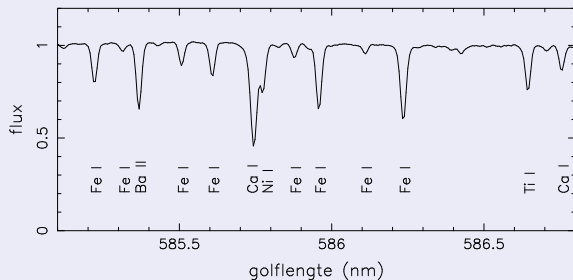
they could better understand the mystery of their own nature if scientists would discover a way of explaining it in terms of the easily comprehensible nature of a table.

Table No. 2 is my scientific table. It is a more recent acquaintance and I do not feel so familiar with it. It does not belong to the world previously mentioned—that world which spontaneously appears around me when I open my eyes, though how much of it is objective and how much subjective I do not here consider. It is part of a world which in more devious ways has forced itself on my attention. My scientific table is mostly emptiness. Sparsely scattered in that emptiness are numerous electric charges rushing about with great speed; but their combined bulk amounts to less than a billionth of the bulk of the table itself. Notwithstanding its strange construction it turns out to be an entirely efficient table. It supports my writing paper as satisfactorily as table No. 1; for when I lay the paper on it the little electric particles with their headlong speed keep on hitting the underside, so that the paper is maintained in shuttlecock fashion at a nearly steady level. If I lean upon this table I shall not go through; or, to be strictly accurate, the chance of my scientific elbow going through my scientific table is so excessively small that it can be neglected in practical life. Reviewing their properties one by one, there seems to be nothing to choose between the two tables for ordinary purposes; but when abnormal circumstances befall, then my scientific table shows to advantage. If the house catches fire my scientific table will dissolve quite naturally into scientific smoke, whereas my familiar table undergoes a metamorphosis of its substantial nature which I can only regard as miraculous.

There is nothing *substantial* about my second table. It is nearly all empty space—space pervaded, it is true, by fields of force, but these are assigned to the category of 'influences,' not of 'things.' Even in the minute

# Cecilia Payne 1925: het begrijpen van ster-spectra

‘Het brilliantste proefschrift uit de geschiedenis van de sterrenkunde’



- in sterspectra zien we vooral lijnen van ‘metalen’
- hangt van temperatuur af
- Payne berekent dit: sterren bestaan voornamelijk uit waterstof en helium

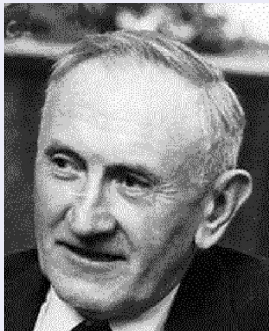
Cecilia Payne



# Donkere materie in clusters van sterstelsels

## Zwicky 1933/37: Coma cluster

- snelheden  $v \approx 700$  km/s
- grootte  $R = 0.8$  Mpc
- massa in sterstelsels veel te klein om cluster bijeen te houden: veel onzichtbare massa



## Coma cluster van sterstelsels



## Terugrekenen volgens Gamow

- een uitdijend gas koelt af
- het heelal was vroeger dichter en heter
- dus: kernfusie: alle elementen in vroegste heelal gemaakt (nl: in eerste 3 minuten)
- Alpher, Bethe, Gamow 1948
- bij uitdijend gas worden electronen ingevangen door protonen: heelal doorzichtig (nl: na 300 000 jaar)
- straling en materie koelen onafhankelijk
- straling nu 5 á 50 K (nl: 3 K)

## George Gamow 1904-1968

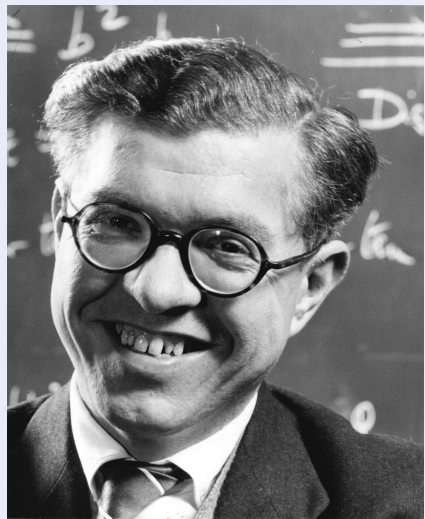


## Wat een onzin...

- Fred Hoyle vindt het onzin
- geeft model spotnaam: Big Bang
- wordt geuzen-naam...
- Burbidge, Burbidge, Hoyle, Fowler 1957: alle elementen in sterren gemaakt

Uiteindelijk hadden Gamow en Hoyle beiden deels gelijk, deels ongelijk: meeste He gemaakt in eerste 3 minuten, CNO etc. in sterren

## Fred Hoyle 1915-2001

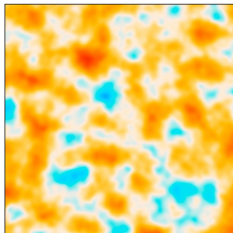
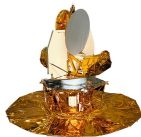




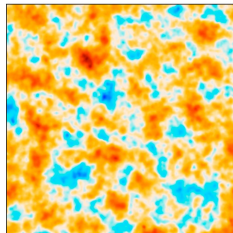
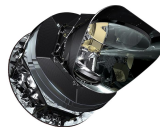
## 3 K achtergrond straling: 3 satellieten



COBE

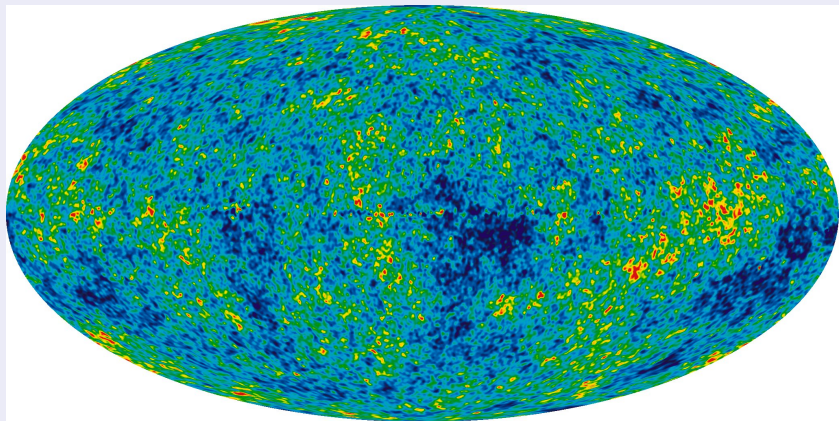


WMAP



Planck

### 3 K achtergrond straling: fluctuaties: 9 yr WMAP



- variatie over hemel zeer klein:  $\Delta T \sim 10^{-5} T$ .  
Hoe kan condensatie in sterstelsels snel genoeg verlopen?

# Niet alleen donkere materie: ook donkere energie!

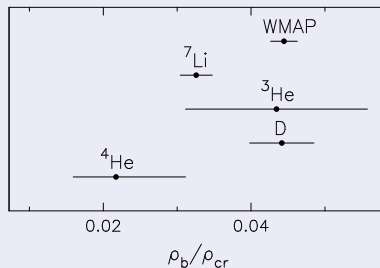
## Uitdijings-snelheid

- zwaartekracht werkt uitdijing tegen
- hoe meer materie: hoe langzamer de uitdijing
- te weinig lichtende materie
- donkere materie nodig
- is niet baryonisch

Op de grootste gemeten afstanden

- dijt het heelal sneller uit dan zou moeten
- donkere energie nodig
- aard volkomen onbekend
- metingen erg moeilijk: hoe betrouwbaar?

Baryon-dichtheid  $\rho_b$ , in verhouding tot de kritische dichtheid  $\rho_c$ , die kloppen met de gemeten hoeveelheden H, He en Li



(volgens Steigman 2005)

### grootte van het heelal in de tijd

jaar	sterrenkundige	afstand tot:	$d$ (lichtjaar)
-222	Archimedes	sfeer der sterren	0,1
150	Ptolemaios	sfeer der sterren	0,000 01
1600	Brahe	sfeer der sterren	0,000 01
1840	Bessell	nabije ster	4
1920	Kapteyn	centrum Melkweg	10 000
1918	Shapley	centrum Melkweg	50 000
1950	Zwicky	Virgo clus	60 000 000
1963	Schmidt	3C273	1 600 000 000

### ontdekking van massa-energie in het heelal

sterren/planeten/gas	–	5 %
donkere materie	1935	26 %
donkere energie	2000	68 %