

NS-156B

*Inleiding in de Bouw en
Ontwikkeling van Sterren
en de Kosmologie*

Docenten : Anton van de Ven (HC)
Filipe Freire (WC)

A.E.M.vandeVen@uu.nl
University College, Newton-JJ

Praktische Zaken

Voorkennis: Infi & Mechanics

Boek (verplicht): Ryden & Peterson,

Foundations of Astrophysics

HC in MIN-211, din 9-10:45 + don 15:15-17:00

WC in , din 11-15:00 + don 13:15-15:00

O.l.v. Filipe Freire (*English*) en assistenten:

Leon Oostrum, Geert Raaijmakers

Tentamen

Don. 18 april, 14:00-17:00, BBL 161, 165, 169

Minimum cijfer = 6

Herkansing: Din. 2 juli, 9:00-12:00, BBL 169

Niet hier op 18 april? Neem nu contact op!

Schema

Vandaag

1. *Early Astronomy*
2. *Emergence of Modern Astronomy*

Donderdag

3. *Orbital Mechanics*
4. *The Earth-Moon System*

STERRENKUNDE

ASTRONOMIE ἄστρον (ster) + νόμος (wet)

Doel Observatie en studie van 't buitenaardse
.... dus bijna alles!

Verleden astronoom $\approx$ astroloog. Oudste beroep?

Beweging Maan, Zon, planeten, aan hemel

Nu Sterrenwichelarij is 'n pseudowetenschap

Kepler (1571-1630) was ook astroloog

Newton (1642-1727) *geen* astroloog
wel alchemist

DEELGEBIEDEN

ASTROFYSICA : sterren op basis van fysica

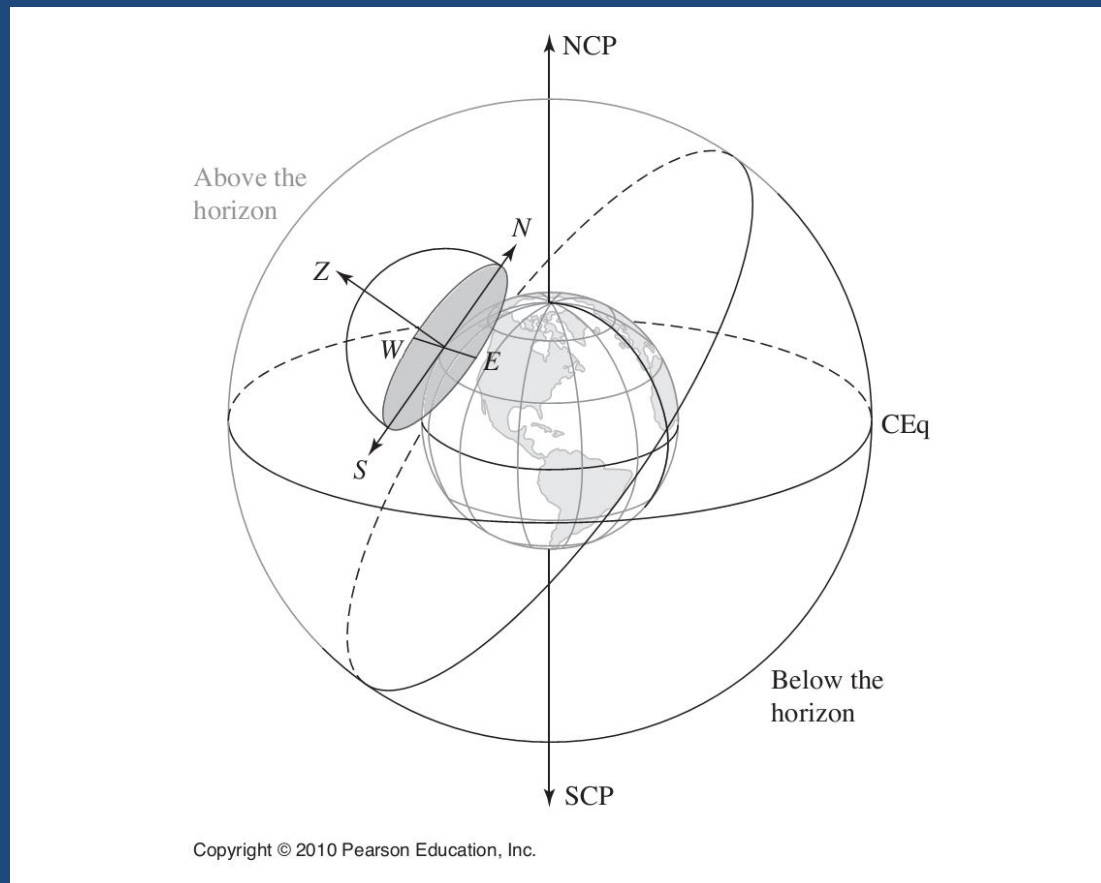
KOSMOLOGIE : structuur & evolutie v. heelal

ASTROMETRIE : posities & afstanden v. sterren

NS-156B gaat over deze onderwerpen
vooral fysica, maar ook observaties

HEMELBOL (*Celestial Sphere*)

‘Bol’ met Aarde als centrum >>> Aarde



HEMELBOL (2)

Projecteer sterren op deze bol en meet
hoekafstanden (*angular distances*) in
graden (*degrees*), minuten, seconden

$1^{\circ} = 60'$ en $1' = 60''$ Babylonische notatie!

Echte afstanden zijn veel moeilijker te bepalen!

Je ziet vaak 1 **arcsec** , 1 **asec** , 1 **as** voor $1''$

HEMELBOL (3)

Zon, Maan $\sim 0.5^\circ = 30'$. Sterren *lijken* $\sim 1'$

Decimale notatie voor hoeken $< 1''$:

mas = *milliarcsec* , **μas** = *microarcsec*

Horizon : Grootcirkel waar *jouw* raakvlak
met Aarde de hemelbol snijdt

Hangt af van waarnemer & plaats!

Twee halfronden: Zichtbaar is de 'hemelkoepel'

HEMELBOL (4)

Zenit/toppunt : Punt (richting) recht boven je

Nadir/voetpunt: Punt (richting) recht onder je

's Nachts kun je ~ 3000 sterren zien

Mensen 'zien' patronen →

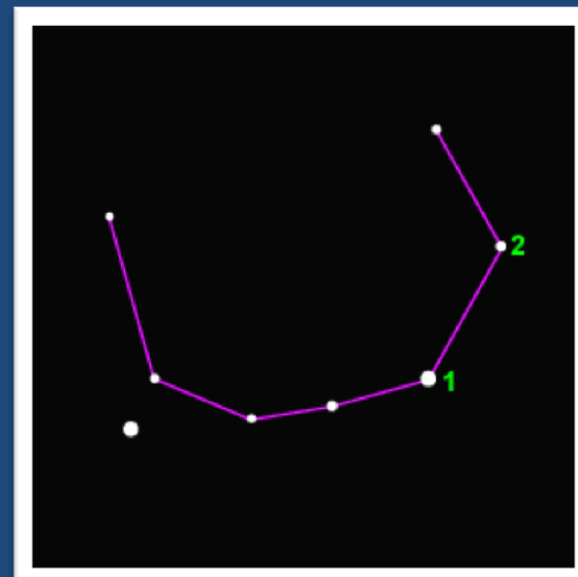
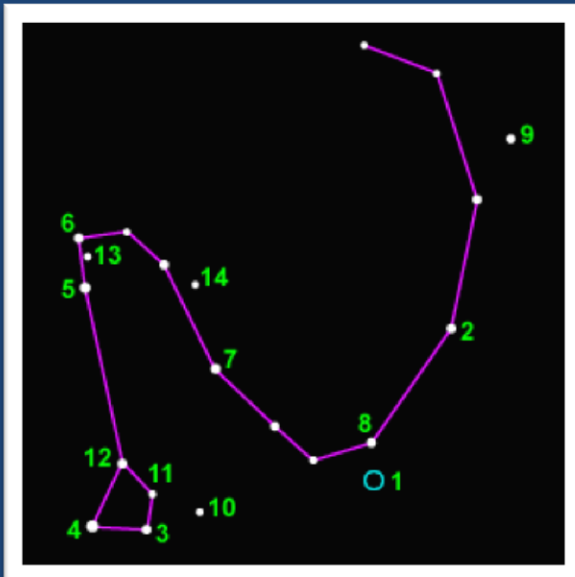
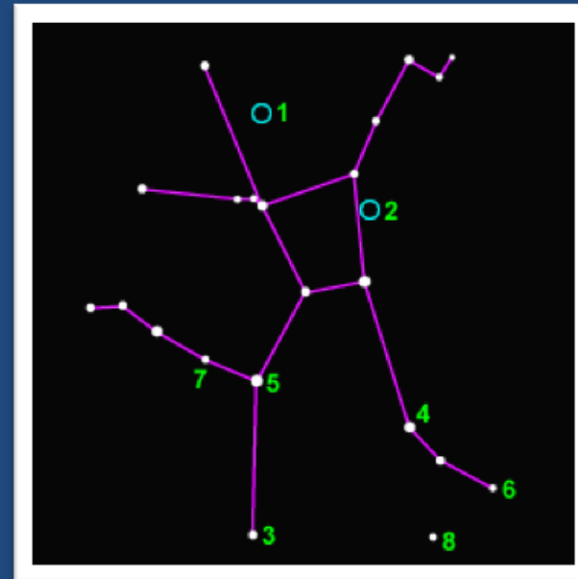
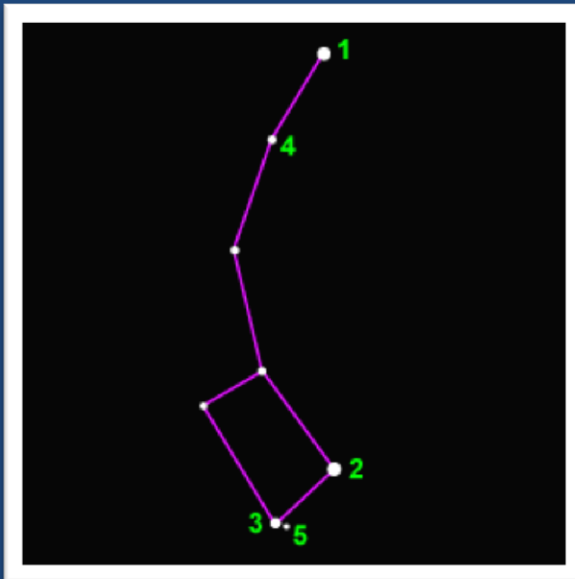
Sterrenbeelden (*constellations*)

IAU (Intern. Astronomical Union) erkent er 88

Ken je deze? (next slide)

Sterrenbeelden

(Niet nodig dat je sterrenbeelden kent - wel leuk)



COORDINATENSYSTEMEN

Evenaar deelt Aarde in N- en Z-halfrond

Geografische coördinaten : TWEE data

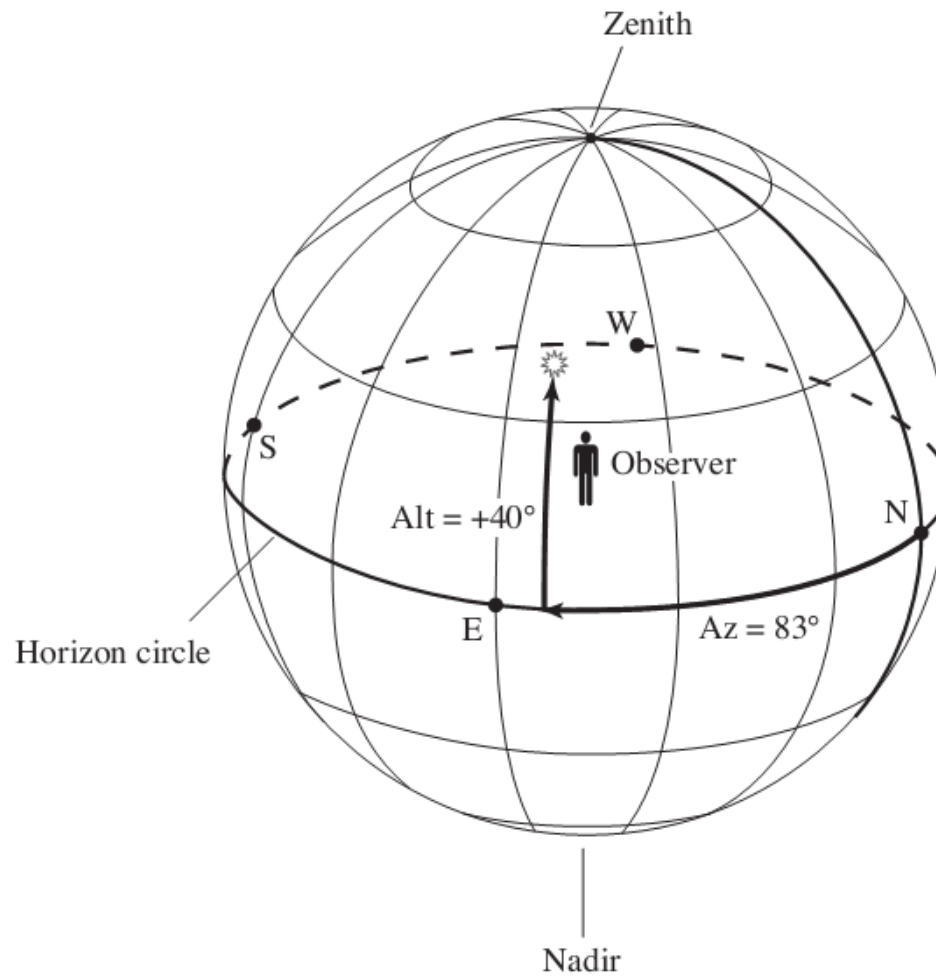
Lengte (*longitude*) λ = hoek vanaf Greenwich
nulmeridiaan (*prime meridian*)

Breedte (*latitude*) φ = hoek vanaf equator

Boek: ℓ i.p.v φ Utrecht : 5° OL , 52° NB

Meridianen & parallelen (of breedtecirkels)

Horizon-CS - voor 'jou'



Horizon-CS (2)

Coördinatensysteem voor *jou*

Azimut A = hoek langs horizon ($N \rightarrow E \rightarrow Z \dots$)

Hoogte (*altitude*) h = hoek horizon en 'ster'

Hemelmeridiaan: Halve grootcirkel door
zenit, N, en nadir

$$0^\circ \leq A \leq 360^\circ, 0^\circ \leq h \leq 90^\circ$$

Nadelen van horizon-CS?

Equatoriaal CS - voor 'allen'

Zie Fig. 1.1 ←

Hemelnoordpool NP (*north celestial pole*)

Projectie van N-pool, // aardas, op hemelbol

Ben je op 't N-halfrond dan heeft NP

$(A, h) = (0, \varphi)$ met φ jou geo-breedte

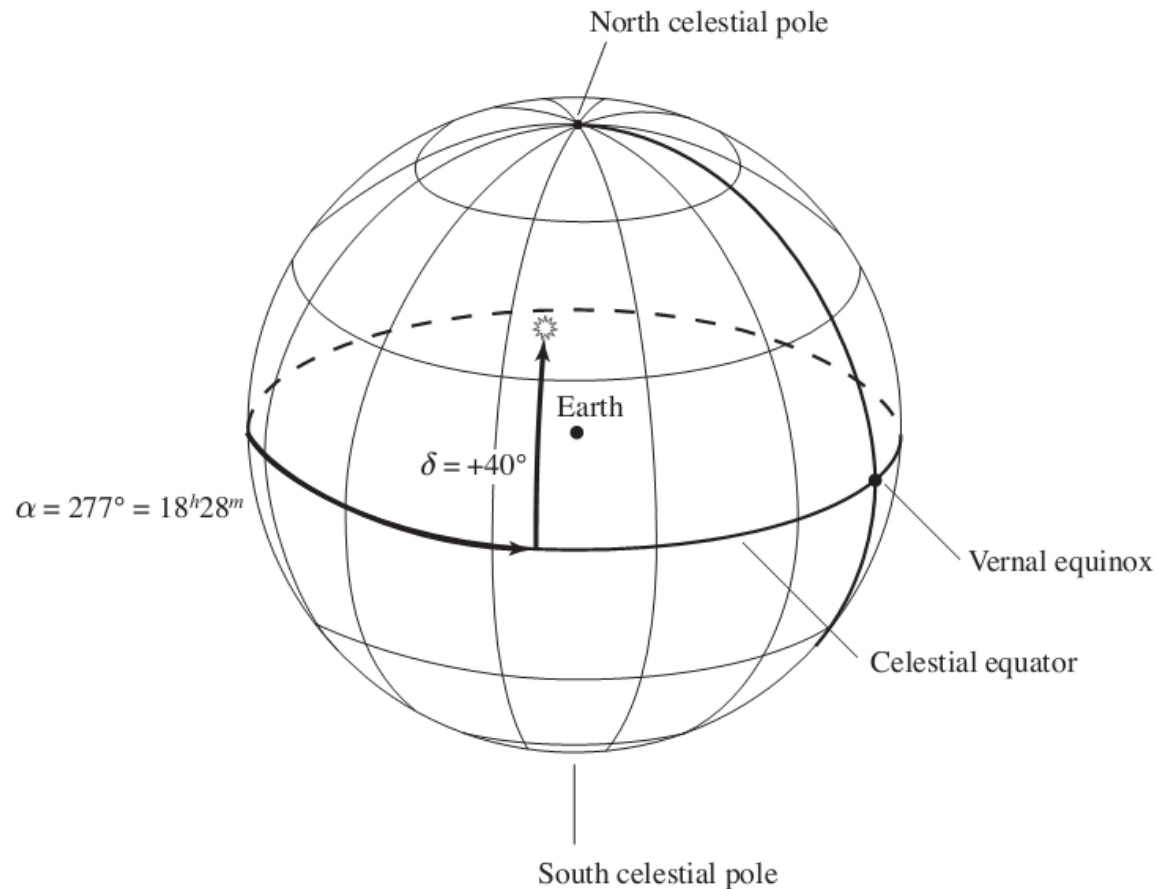
Hemelzuidpool (*south celestial pole*)

Hemelevenaar (*celestial equator*)

Projectie van evenaar op hemelbol

Equatoriaal CS (2)

Draait *niet* met de aarde mee
Sterren hebben 'constante' coördinaten



Equatoriaal CS (3)

Rechte Klimming α of RK (*right ascension*) =
Hoek langs evenaar O-waarts van **lentepunt** γ
(*vernal equinox*) $\rightarrow$ §1.3

α in graden of uren $0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$, $15^\circ = 1^h$

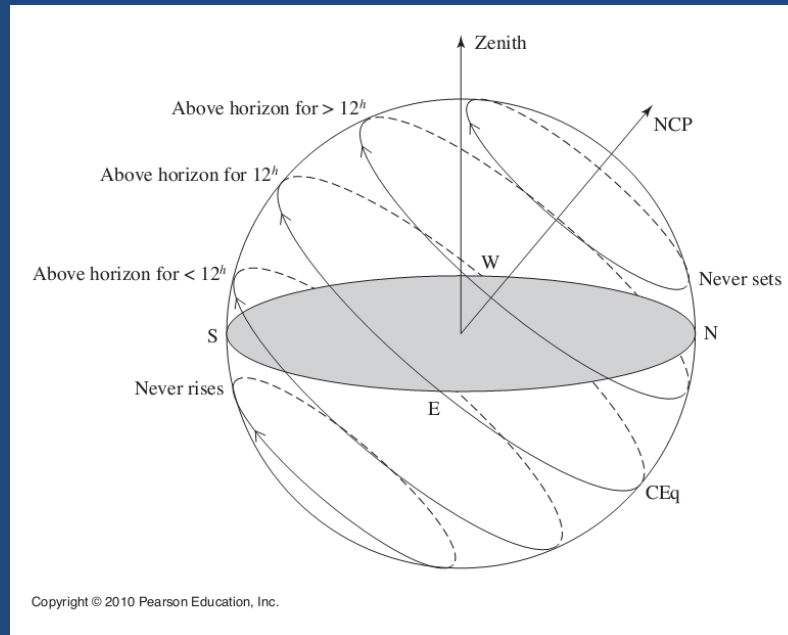
Declinatie δ = Hoek tussen evenaar en 'ster'
 $-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$

Zenitmeridiaan: Grootcirkel door NP, zenit en ZP

Uurhoek H (*hour angle*) = Hoek W-waarts vanaf
jou z-meridiaan. H verandert steeds! Later : $LST = H + \alpha$

Bewegingen van Sterren

Sterren lijken te draaien (van O naar W)
maar hun relatieve posities veranderen niet



Horizon deelt CEq in tweeën dus een ster op
Ceq blijft 12^h boven en 12^h onder horizon

Bewegingen van Sterren (2)

Op 't N-halfrond (breedte φ) zie je sterren met

$\delta > 90 - \varphi$ **steeds** $\rightarrow$ **circumpolair**

$\varphi - 90 < \delta < 90 - \varphi$ **soms** $\rightarrow$ gaan op & onder

$\varphi - 90 > \delta$ **nooit**

Opgave: Hoe is dit op 't Z-halfrond?

Alles draait om de **Poolster** (*Polaris*)

in de Kleine Beer (*Ursa Minor*)

Eenvoudige uitleg in geocentrisch wereldbeeld

Dagelijkse Cirkels (*Diurnal Circles*)

Wat was sluitertijd? In welke richting draait de 'klok'? Wat valt je verder op?



Bewegingen van Hemellichamen (4)

Zon, Maan, .. ook in 24^h rond en bovendien

Zon beweegt $\sim 1^\circ/\text{d}$ Owaarts t.o.v. sterren of:
t.o.v. Zon gaan sterren per dag 4 min eerder op

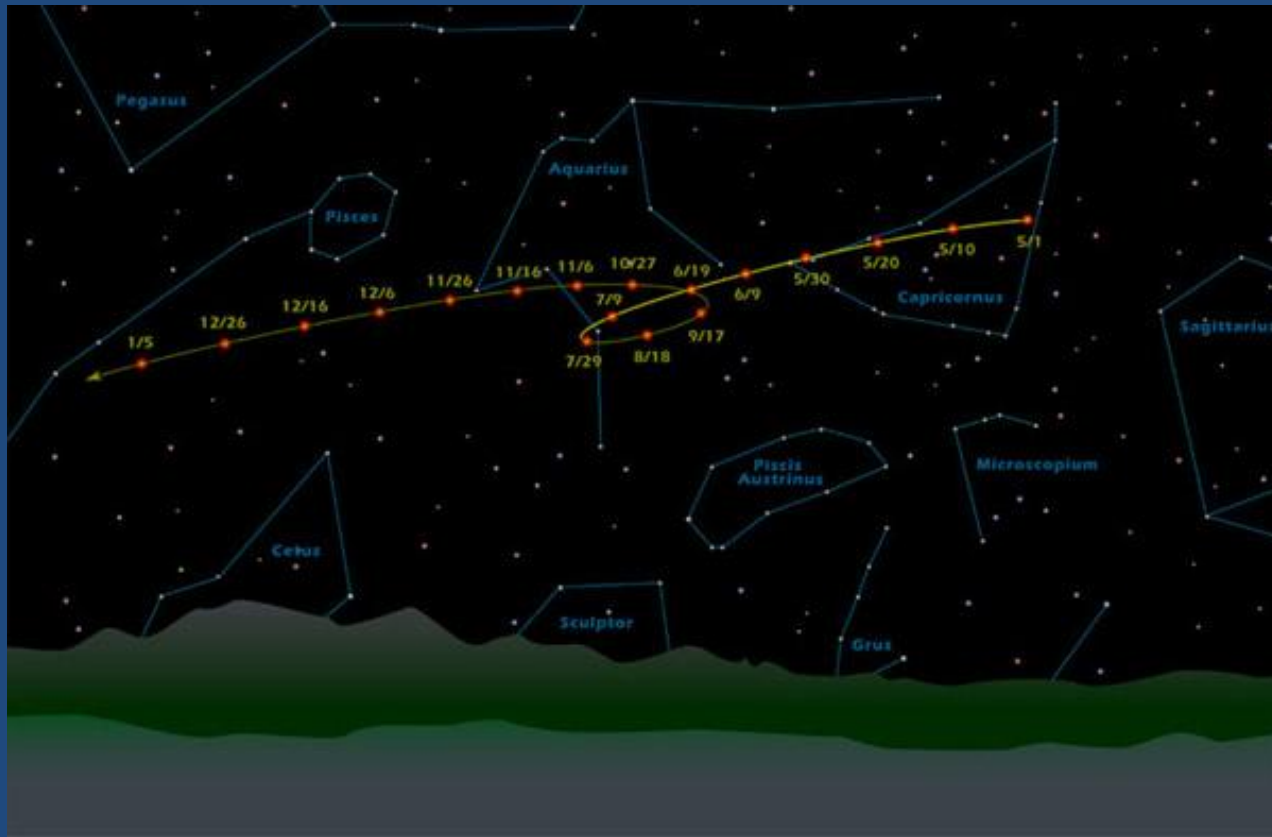
Maan beweegt $\sim 13^\circ/\text{d}$ Owaarts tov sterren of:
t.o.v. Zon gaat Maan elke dag 50 min later op

Maan heeft $\sim 30 \text{ d}$ nodig om Zon 'in te halen'

Ook dit valt nog uit te leggen in een
geocentrisch w-beeld

Bewegingen van Hemellichamen (5)

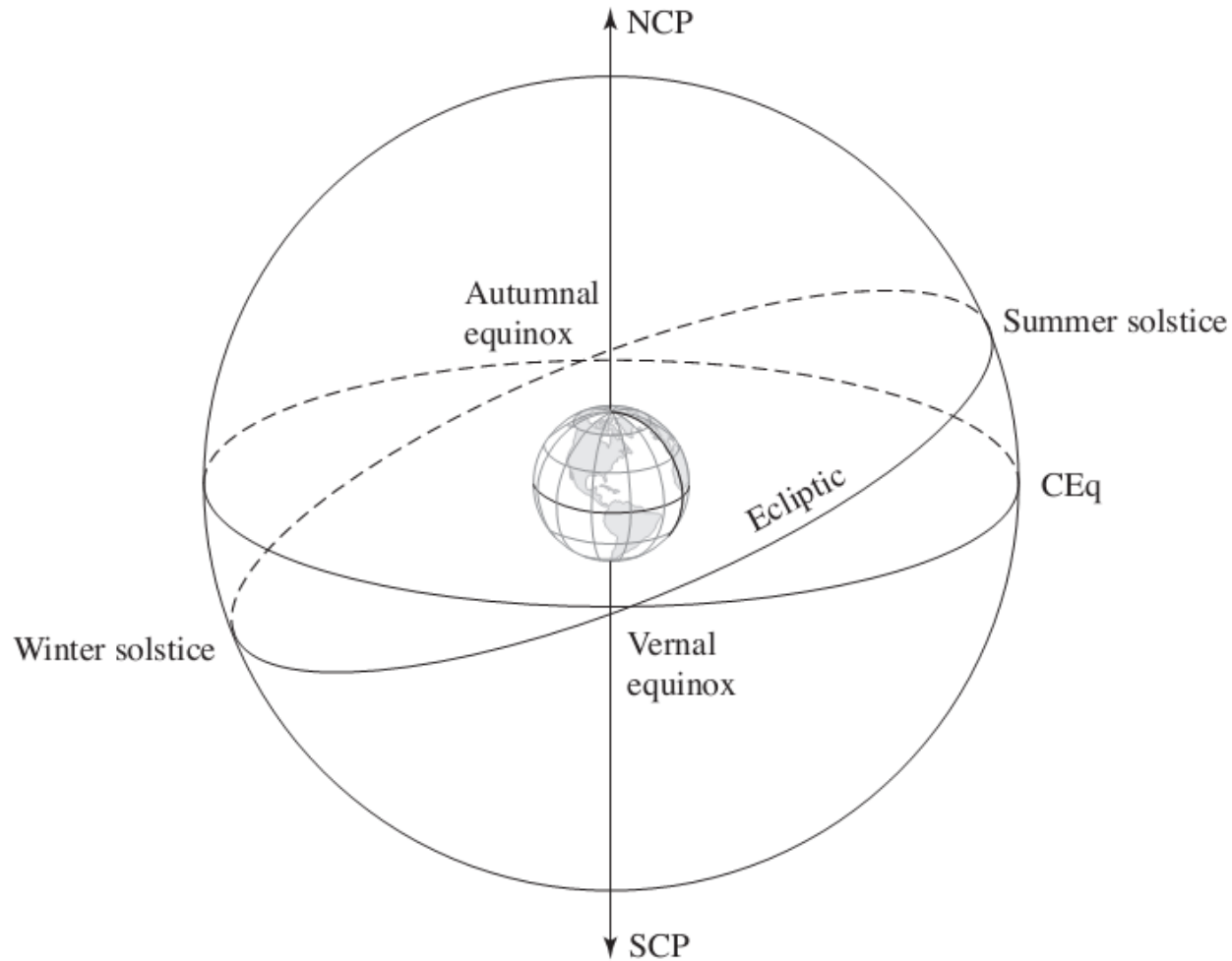
Ook planeten bewegen O-waarts t.o.v. sterren
maar soms 'n poos **W-waarts** (retrograde)!



Moeilijk te begrijpen in geocentrisch w-beeld

Bewegingen van Hemellichamen (6)

Ecliptica : Schijnbare zonneweg aan de hemel



Bewegingen van Hemellichamen (7)

Helling Aardas = 23.5° = Hoek ecliptica & equator

Equinoxen: Snijpunten van equator en ecliptica, nl

Lentepunt (*vernal equinox*) ← Nulpunt van Eq-CS

Herfstpunt (*autumnal equinox*)

Zonnewenden: Hoogste/laagste punt op ecliptica

Zomerwende (*summer solstice*)

Winterwende (*winter solstice*)

[Deze benamingen relevant voor 't **N**-halfrond!]

Zonnewendes waren (zijn) belangrijk v.d. mens

Dagduur (*length of day*)

Speciale breedtecirkels

Poolcirkels (*Arctic, Antarctic Circle*) 66.5° NB, ZB

Kreefts- & Steenbokskeerkring

(*Tropic of Cancer, Capricorn*) 23.5° NB, ZB

Ecliptisch CS - voor Zonnestelsel

Ecl. lengte λ langs ecliptica O-waarts van Υ in $^\circ$

Ecl. breedte β tussen ecliptica en ster in $^\circ$

Precessie: Tolbeweging Aardas met $P \approx 26$ kyr

NP en ZP bewegen langs cirkels met $\emptyset = 47^\circ$

Υ schuift 1° W-waarts in ~ 72 yr (Hipparchus)

(α, δ) veranderen langzaam $\sim 1'/\text{yr}$

Epoche staat in steratlas. 50 yr update: Nu J2000
of 'equinox 2000', na 2025 : 'equinox 2050'

Epoche in archeo-astro! Pyramide v. Gizeh

Galactisch CS - voor Melkweg

MW-centrum $C : (\alpha, \delta) = (12^h 24^m, 27^\circ 24')$

Gal. lengte ℓ langs MW-vlak O-waarts van C in $^\circ$

Gal. breedte b tussen MW-vlak en object in $^\circ$

De relatie tussen coördinatensystemen:

$$(A, h) \leftrightarrow (\alpha, \delta) \leftrightarrow (\lambda, \beta) \leftrightarrow (\ell, b)$$

vereist i.h.a bolmeetkunde (niet in dit HC)

Tijdrekening (*timekeeping*)

Astronomie: 'klok', landbouw, astrologie, navigatie

Sumerieërs + Babylonieërs: Sexagesimale systeem

Dag *gebaseerd* op rotatieperiode van de Aarde

Uur/Minuut/Sec. en ontwikkeling van klokken

Fr. Revolutie : 1 maand = 3 'decaden', 1 dag = 10 'uren', ...

(Slechts één dag in tien was vrij...)

Jaar/Maand *gebaseerd* op baanper. **Zon/Maan**

Tijdrekening (2)

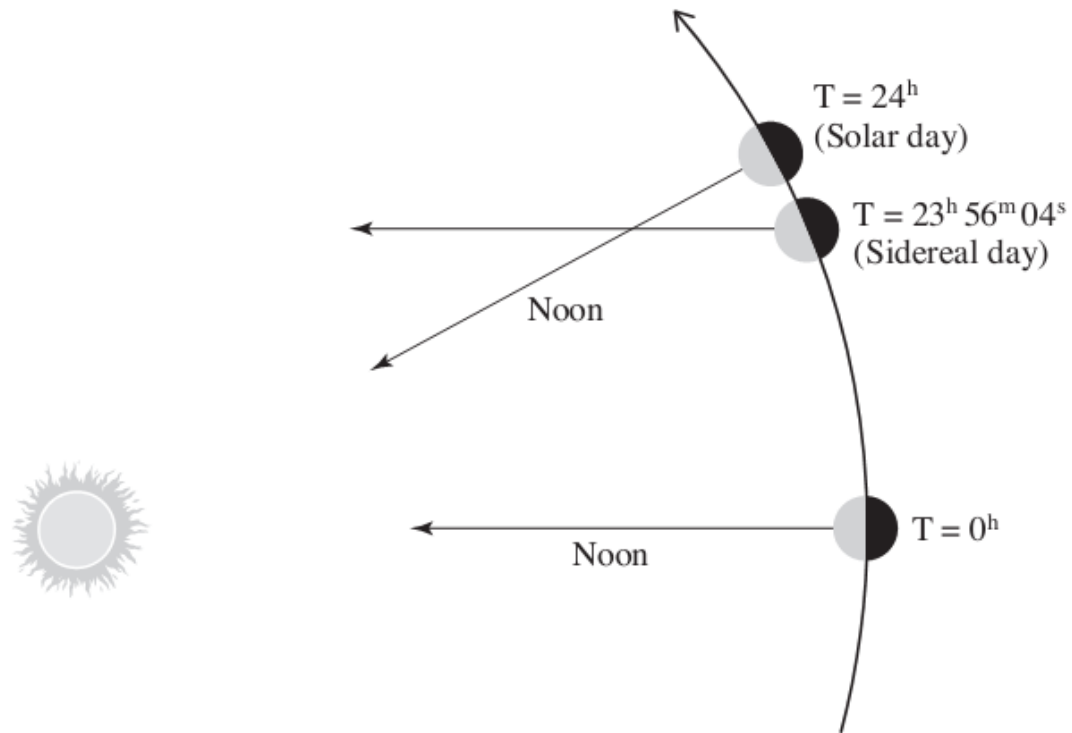
Siderische dag of **sterrendag*** (*sidereal day*):

Periode waarin Aarde één volledige rotatie maakt t.o.v. de **sterren** = Interval tussen twee meridiaandoorgangen (*upper transits*) van een vaste ster = 23^h56^m

Synodische dag of **zonnedag** (*solar day*): Dito maar nu t.o.v. de **Zon** = Interval tussen twee meridiaandoorgangen van Zon = 24^h

* Eigenlijk: Periode waarin Aarde om as draait t.o.v. **lentepunt**.

Tijdrekening (3)



Relatie $P_{\text{sid}} \leftrightarrow P_{\text{sol}}$ §1.5

Als as $\perp$ baanvlak en rotaties in dezelfde zin dan mag je de **hoeksnelheden** optellen :

$$\omega_{\text{sid}} = \omega_{\text{sol}} + \omega \quad , \quad \omega \text{ voor } \textit{baanbeweging},$$
$$\omega_{\text{sid/sol}} \text{ voor } \textit{asrotatie t.o.v. sterren/Zon}$$

Als ω 's constant in tijd, dan is $\omega = 2\pi / P \rightarrow$

$$P_{\text{sid}} = P_{\text{sol}} / (1 + p) \quad , \quad p \equiv P_{\text{sol}} / P$$

Aarde: $P \approx 365 \text{ d} \gg P_{\text{sol}} \approx 1 \text{ d}$ dus $p \ll 1$ en

$$P_{\text{sol}} - P_{\text{sid}} \approx p P_{\text{sol}} \approx 4 \text{ min.} \quad \text{Correct!}$$

Relatie $P_{\text{sid}} \leftrightarrow P_{\text{sol}}$ (2)

Opg.: **Mercurius** : $P = 88 \text{ d}$, $P_{\text{sid}} = 2/3 P$.

Hoe langt duurt één zonnedag daar?

Opg: **Venus** heeft retrograde asrotatie.

Wat is de relatie tussen ω_{sid} , ω_{sol} en ω ?

Ware & Middelbare Zonnetijd

Duur v.d. **zonnedag** varieert door 't jaar want Aardbaan is 'n **ellips** + Aardas staat **schuin**

Ware zonnetijd (*apparent solar time*)

Tijd die 'n zonnewijzer (*sundial*) aangeeft

Om te vermijden dat klokken & Zon uit pas lopen

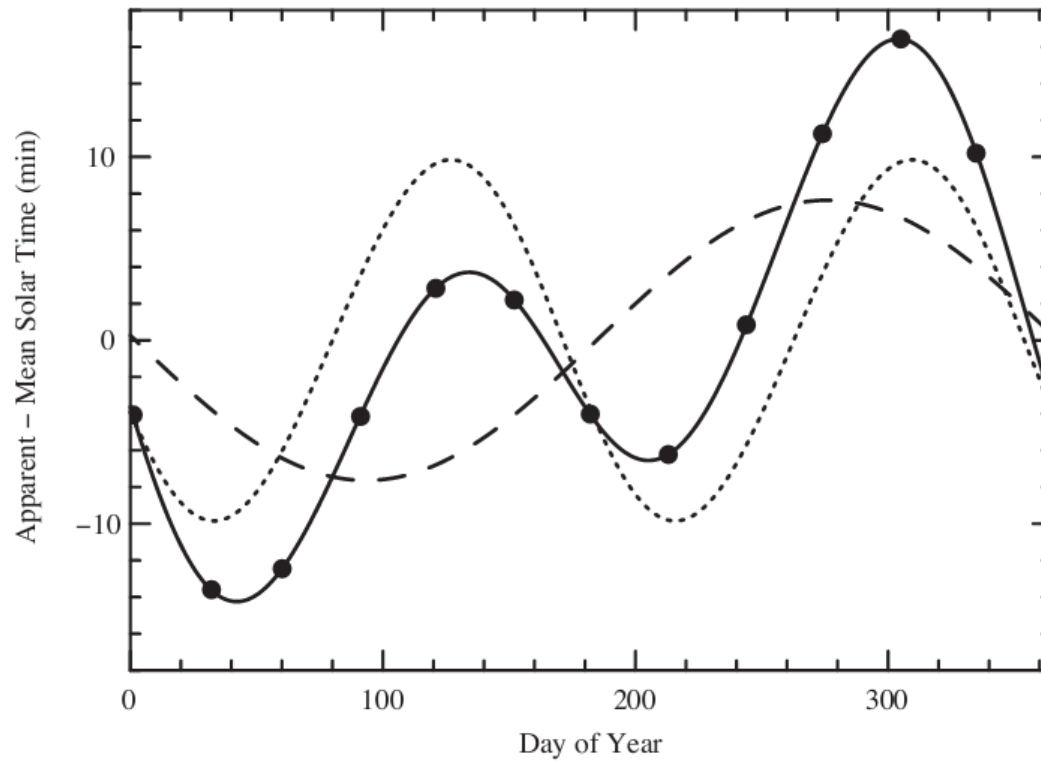
Middelbare zonnetijd (*mean solar time*)

Tijd van nepzon die met const. snelheid langs *evenaar* (niet ecliptica) loopt = 'kloktijd'

Tijdsvereffening (*Equation of Time*)

= Ware Zonnetijd – Middelbare Zonnetijd

(Streeplijn ~ eccentriciteit - Puntlijn ~ schuine stand ecliptica – Getrokken lijn ~ Totaal)



Tijdsvereffening (2)

Verschil kan tot 1 kwartier bedragen!

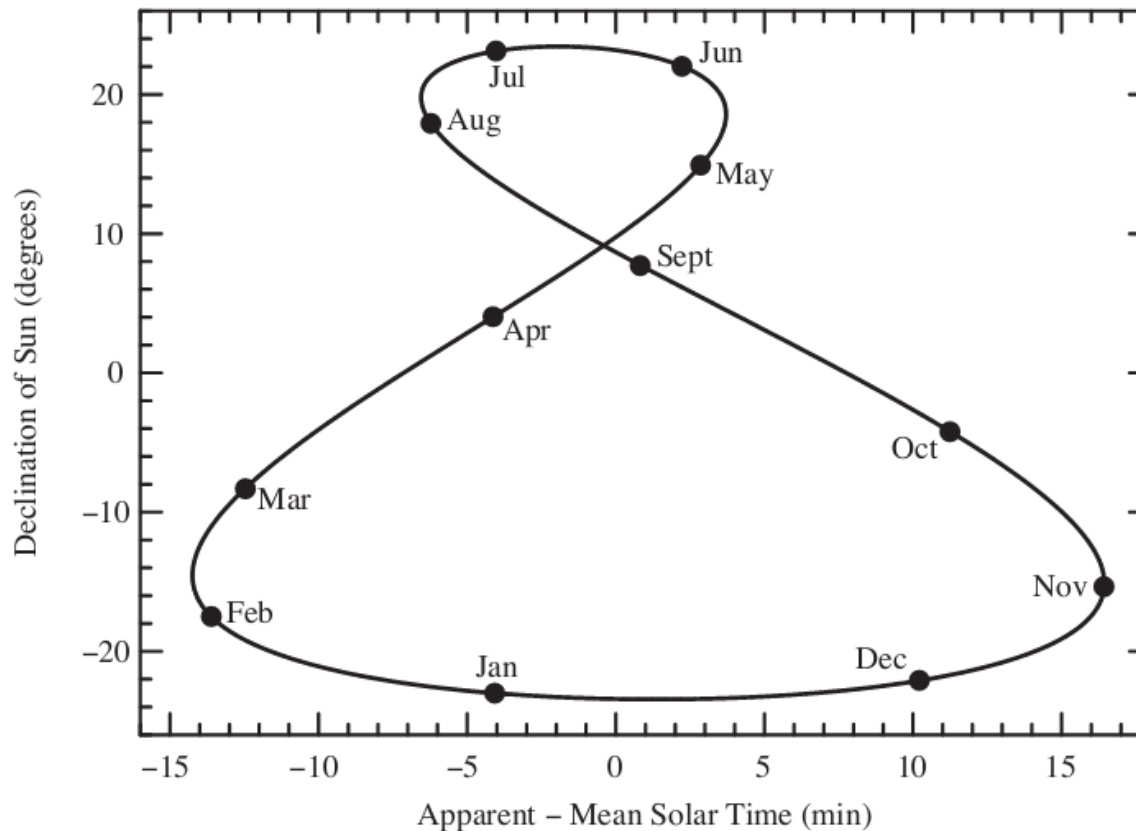
Eerste correcte tabel:

Christiaan Huygens, *Kort Onderwys aengaende
het gebruyck der Horologien tot het vinden
der Lenghten van Oost en West* (1665)

Waarom in het Nederlands?

Analemma

Plot declinatie δ van Zon tegen tijdsvereffening τ



Analemma (2)

Belicht film 3 x per maand op dezelfde (klok)tijd



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

2. Geschiedenis van de Astronomie

Astronomie heeft lange geschiedenis ...

Babylon → Egypte → Grieken →

Hellenisten → Arabieren →

Copernicus, Galileo,

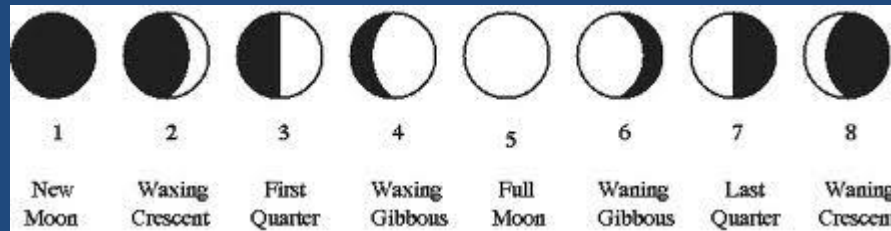
Brahe, Kepler, Newton, ...

(zeer onvolledig)

Hellenistische Astronomie

Hemel heeft 'diepte' / is 3D ! Dit verklaart

Schijngestalten v.d. Maan (*Lunar phases*) in 29½ d



Nieuw → Wassend → 1^e kwartier (half) → Wassend
→ Vol → Afnemend → Laatste kwartier → **Asgrauw**

'Wassen' = groeien (gewas, volwassen, wassend water)

Vgl. met Duits: *wachsen*, Engels: *to wax*

Ezelsbruggetje? Werkt 't overal? 'Fout' pakpapier

Hellenistische Astronomie (2)

Verduisteringen (*eclipses*) :

Maansverduistering (*lunar eclipse*)

Maan gaat door aardschaduw

[Totaal in NL op 28-09-2015]

Zonsverduistering (*solar eclipse*)

Aarde gaat door maanschaduw

Eigenlijk: Gedeeltelijke **aardverduistering**

[Totaal in VS op 21-08-2017]

Hellenisten: Zon verder weg dan Maan!

Griekse Astronomen

Aristoteles (384-322) *Περὶ οὐρανοῦ* (Lat. *De Caelo*)

Geocentrisch Model

Aarde is 'n bal in centrum van bolvormige kosmos

Maan, Zon, vijf planeten op concentrische bollen

'Ondermaanse' bestaat uit aarde, vuur, lucht, water

'Bovenmaanse' bestaat uit αἰθήρ (*aether*)

De hemel is onveranderlijk / regelmatig

De vaste sterren staan op de buitenste bol

Griekse Astronomen (2)

Aristarchus (ca. 310-230) *Περὶ μεγεθῶν καὶ ...*

‘Over afmetingen & afstanden v. Zon & Maan’

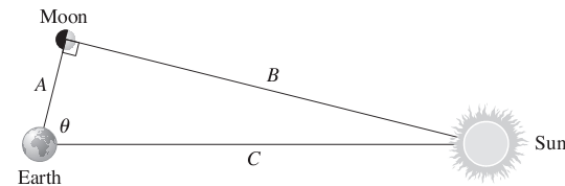
Heliocentrisch model!

i) Verhouding van afstanden (meetkunde)

$$C : A \approx 19$$

M & Z *lijken* even groot

→ $\emptyset$ Zon : $\emptyset$ Maan ≈ 19



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

Griekse Astronomen (3)

Aristarchus (cont.)

Aardschaduw op Maan $\rightarrow \emptyset A : \emptyset M \approx 3$

Conclusie $\emptyset M : \emptyset A : \emptyset Z \approx 1 : 3 : 19$ (nu $1 : 4 : 390$)

Zijn ideeën werden genegeerd (tot Copernicus)

Griekse Astronomen (4)

Eratosthenes (276-195) *Περὶ τῆς ἀναμετρήσεως τῆς γῆς* 'Over de Afmeting van de Aarde' (verloren)

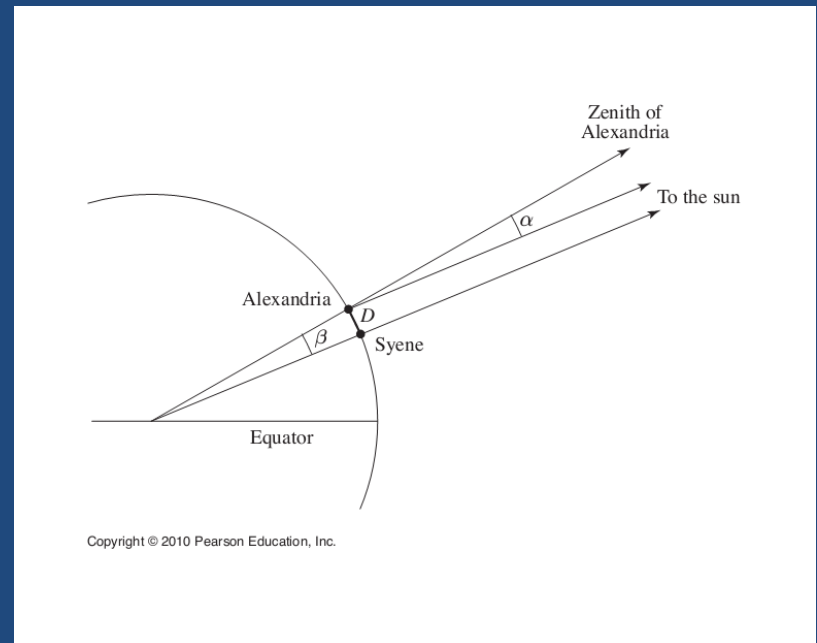
Omtrek C van Aarde!

Zomerwende: Zon staat in Syene (Aswan) in zenit,
maar in Alexandrië staat ze dan $\alpha = 7^\circ$ uit zenit

Stel: Aarde is een **bol** en
Zon **ver** weg, dan $\beta = \alpha$

Met afstand Syene-Alexa.

→ $C \approx 46\,000\text{ km}$!



Griekse Astronomen (5)

Hipparchus (ca. 190-120)

Eerste sterrencatalogus

Precessie van de equinoxen!

Magnitudeschaal (1 - 6)

Afstand Aarde-Maan $\approx 70 R_A$

Duur van tropische jaar tot op 7 min

ESA astrometrische satelliet : **HIPPARCOS**

Griekse Astronomen (6)

Ptolemaeus (ca 90-168) (*Ptolemy*) §2.2

Μαθηματικὴ Σύνταξις , 'Wiskundige Ordening'
alias *Almagest*

Astronomisch standaardwerk tot ~1550!

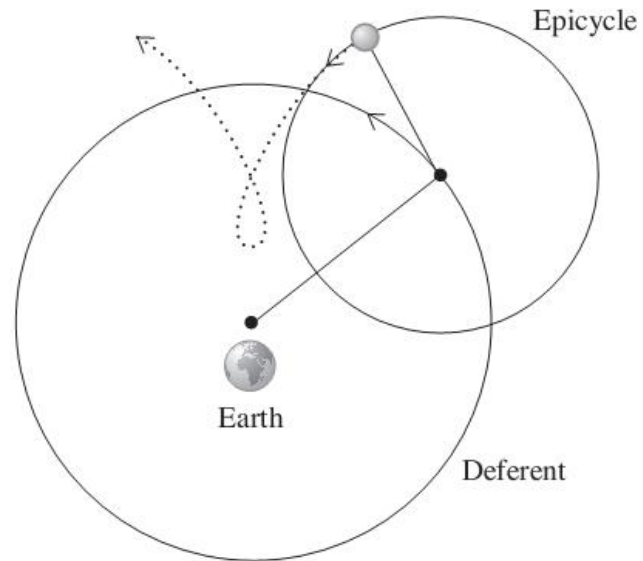
Geocentrisch , uniforme rotatie op cirkels

Werkt voor sterren, niet voor Zon, Maan, enz.

Nam ideeën van Apollonius, etc, over, nl.

epicykel (*epicycle*), **excenter** (*eccentric*)

Griekse Astronomen (7)



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

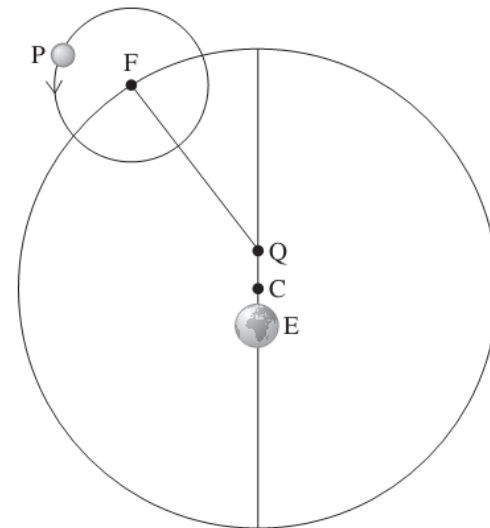
<http://astro.unl.edu/naap/ssm/animations/ptolemaic.swf>

Griekse Astronomen (8)

Planeet P beweegt op epicykel met centrum F,
die beweegt op de deferent met centrum C.
Aarde in excenter E.

F draait met const.
hoeksnelheid om
vereffeningspunt Q
(*equant*), $QC = CE$.

Geen schoonheidsprijs...



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

Westeuropese Astronomen

Nicolaus Copernicus (1473-1543)

Pools? Naam was Koppernik & brieven in Duits

Heliocentrisch model (maar nog steeds epicykels)

De Revolutionibus Orbium Coelestium

‘Over de omwentelingen der hemellichamen’

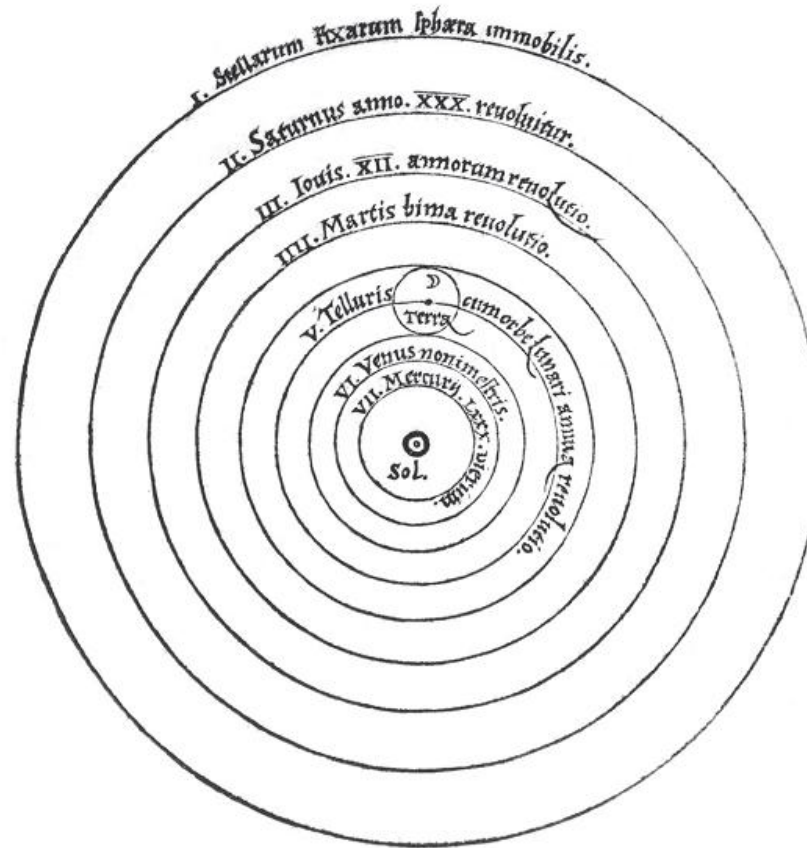
[1^e editie (1543) in de Librije in Zutphen]

Koestler “The book that nobody read [..] was and is
an all-time worst-seller”

O. Gingerich, *The Book Nobody Read*, 2004

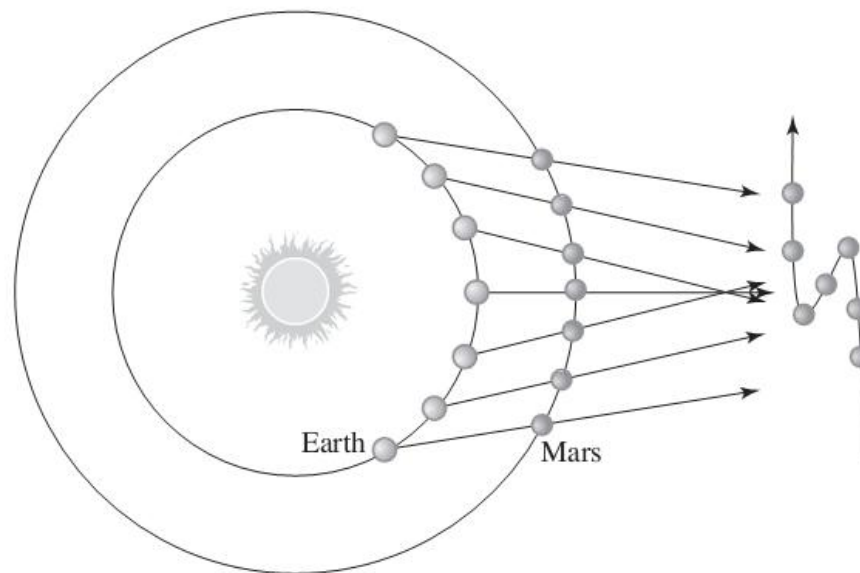
Westeuropese Astronomen (2)

Sol in het centrum. *Terra* draait om as en om *Sol*



Westeuropese Astronomen (3)

Retrograde beweging eenvoudig verklaard :



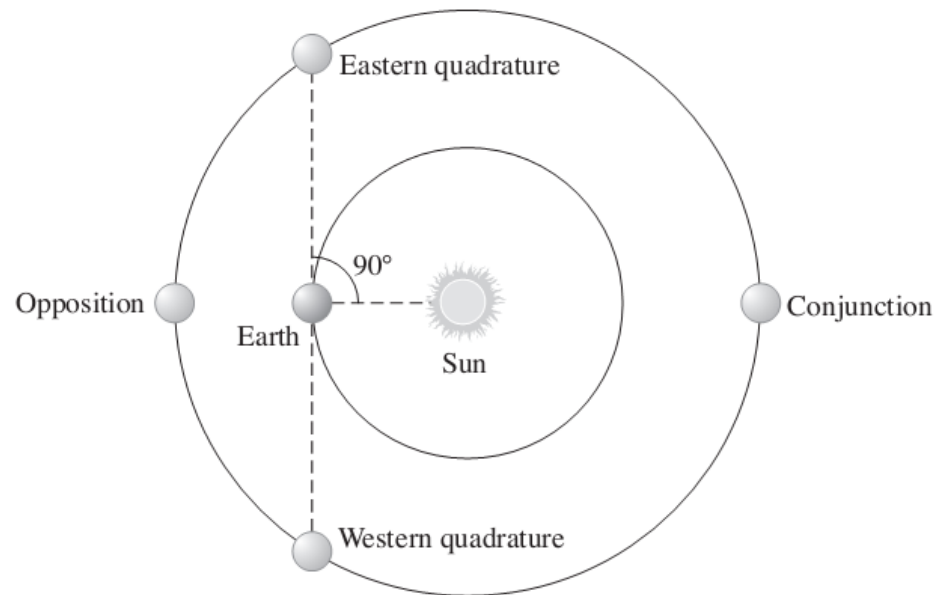
Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

Westeuropese Astronomen (4)

Buitenplaneten (*superior planets*) speciale posities:

- Conjunctie
- Oppositie
- Quadratuur

Elongatie $\theta = 90^\circ$



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

Copernicus

Binnenplaneten (*inferior planets*) speciale posities:

Benedenconjunctie

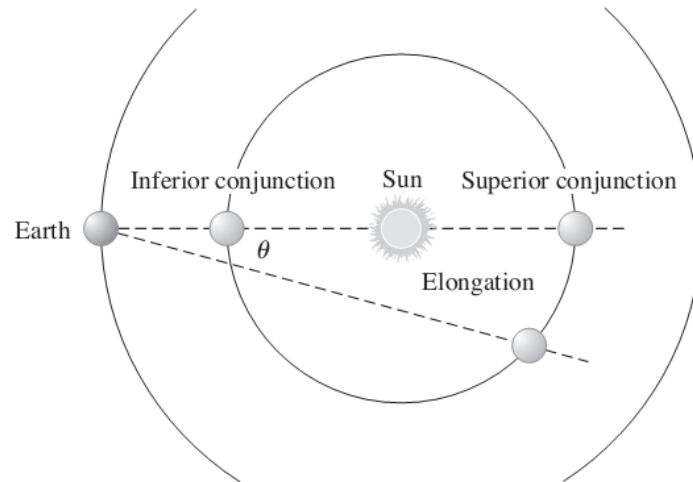
(*inferior c.*)

Bovenconjunctie

(*superior c.*)

Max. elongatie $\theta_{\max}$

NB: Zelfde θ voor
twee posities!



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

Copernicus

Synodische / siderische periode v. planeet

= Periode t.o.v. **Aarde / sterren**

[Vgl : synodische & siderische *dag*]

Binnenplaneet : $1/P_{\text{sid}} = 1/P_A + 1/P_{\text{syn}}$

Buitenplaneet : $1/P_{\text{sid}} = 1/P_A - 1/P_{\text{syn}}$

Venus

♀ 'herhaalt' na $P_{\text{syn}} \approx 584 \text{ d}$ dus $P_{\text{sid}} \approx 225 \text{ d}$

Waarom is P_{syn} zoveel groter dan P_{sid} ?

Copernicus: Relatieve baanafmetingen

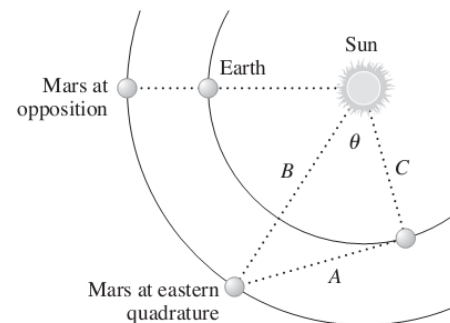
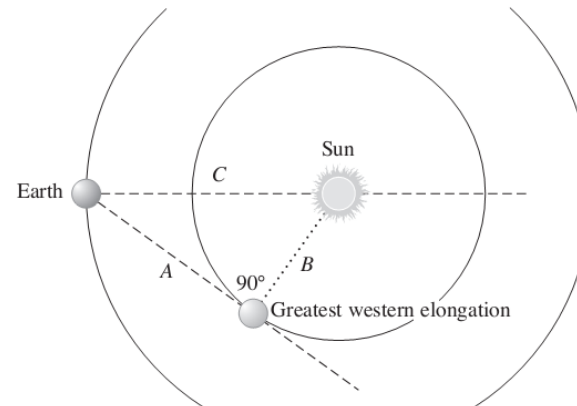
Binnenplaneet:

$$R_p / R_A = \sin \theta_{\max}$$

Buitenplaneet :

$$R_A / R_p = \cos \theta_{\text{qua}}$$

← vanaf de Zon!



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

Tycho Brahe (1546-1601)

Mat posities tot 1'
zonder telescoop!
Had eigen model,
Eland als huisdier,
koperen neus, ...
en een assistent
(J. Kepler)



Standbeeld in Praag



Galileo Galilei (1564-1642)

Sidereus Nuncius 'Boodschapper v.d Sterren'

Ziet **fantastische dingen** met zijn telescoopje

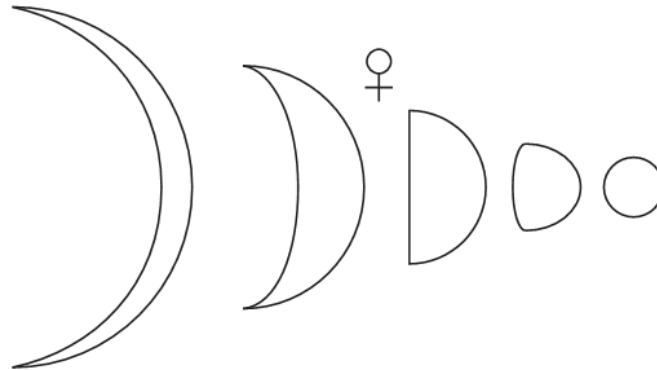
- **Maanbergen** (7 km) – Maan lijkt op Aarde!
- **Veel sterren**, meer dan met 't blote oog
- Ontelbare sterren in de **Melkweg**
- **Planetenschijfjes** + fasen – Net als Aarde!
- Vier **Jupitermanen** die eromheen 'dansen'

Galileo : Manen van Jupiter

Observations Jupiter 1610				
2. J. Jovis. marc H. 12	O	*	*	
30. marc	*	*	O	*
2. Jovis.	O	*	*	*
3. marc	O	*	*	
3. Ho. 5.	*	O		*
4. marc.	*	O		**
6. marc	*	*	O	*
8. marc H. 13.	*	*	*	O
10. marc.	*	*	*	O *
11.	*	*	O	*
12. H. 4 wey.	*		O	*
13. marc	*	*	O	*
14. Casse.	*	*	*	O *

Galileo : Schijngestalten van Venus

Il Saggiatore - 'De Keurmeester' (1623)



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

(Ook: foute hypothese over kometen)

Galileo over Wiskunde

“Filosofie [G. bedoelt: fysica] is geschreven in dit grote boek dat steeds voor onze ogen open ligt -ik bedoel het universum- maar het kan niet worden begrepen tenzij we eerst hebben geleerd de taal te begrijpen en de letters te herkennen waarin het geschreven is. Het is geschreven in de taal van de **wiskunde**, en de letters zijn driehoeken, cirkels, en andere meetkundige figuren. Zonder zulke middelen is het voor ons mensen onmogelijk om er één woord van te begrijpen, en zonder deze zoeken we tevergeefs een weg in een duister labrynt.”

Galileo

Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo
(1632) – recent in het Nederlands verschenen

Geniale gesprekken tussen *Salviati*, *Simplicio* & *Sagrado* (geo- versus helio-centrisch model)

Relativiteitsprincipe (Galileo had dit goed)

Getijdentheorie (G. had dit fout) – later meer

Johannes Kepler (1564-1642)

Assistent v. Brahe†1601
Kepler kreeg zijn data!
Na vergeefse pogingen
en vele dwaalwegen :

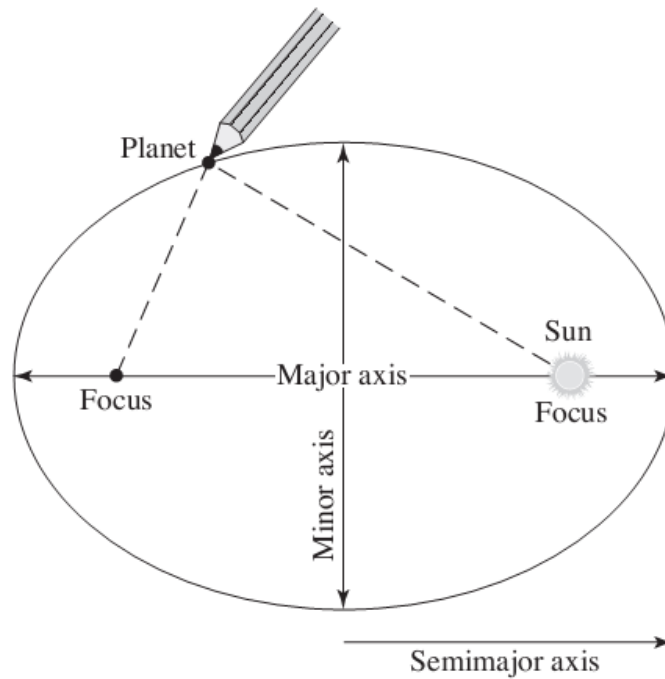
WETTEN van KEPLER

Boek over Johannes Kepler:
Koestler, *The Sleep-walkers*



Eerste Wet van Kepler

K1 Planeten bewegen op ellipsen met de Zon in een brandpunt (*focus*, mv. *foci*)



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

Ellips *versus* Cirkel

(Halve) lange as (*semimajor axis*) a

(Halve) korte as (*semiminor axis*) b

Eccentriciteit $e = (\text{afstand tussen foci}) / 2a$

Kegelsneden (*conical sections*)

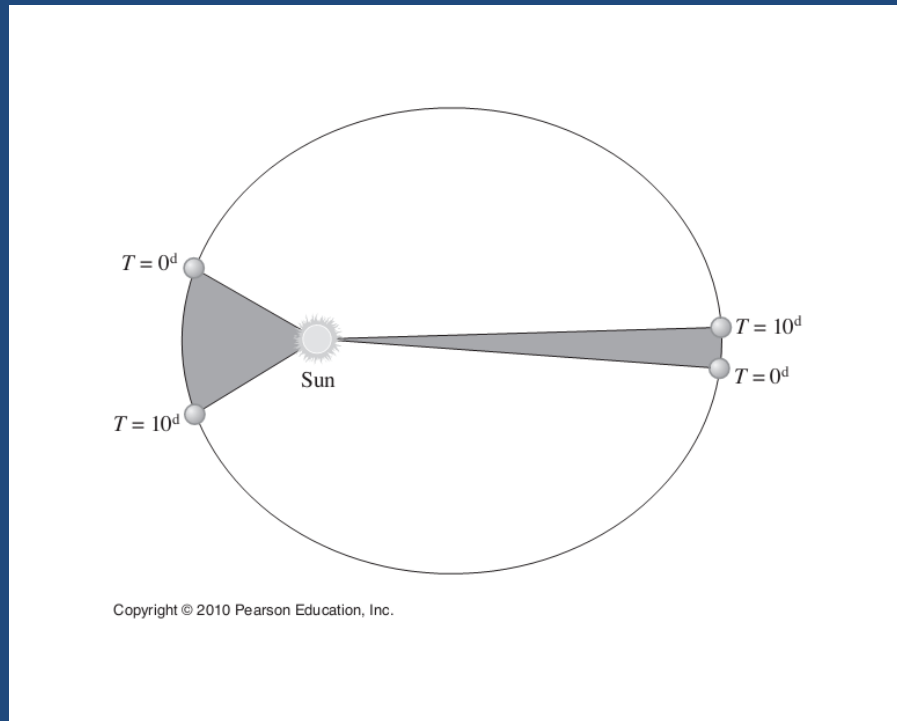
al bekend bij Euclides!

Toch domineerde het vooroordeel van de
'perfecte cirkel' 2 millenia, totdat Brahe's **data**

Kepler ertoe **dwongen** dit op te geven

Tweede Wet van Kepler

K2 In gelijke tijden bestrijkt de **voerstraal** gelijke oppervlakken. Ook : 'perkenwet'
Baansnelheid varieert en is dus niet uniform!



Later: K2 volgt uit Wet v. Behoud v. Impulsmoment

Kepler (3)

K3 Het kwadraat van de siderische baanperiode P is evenredig met de derde macht van de halve lange as a

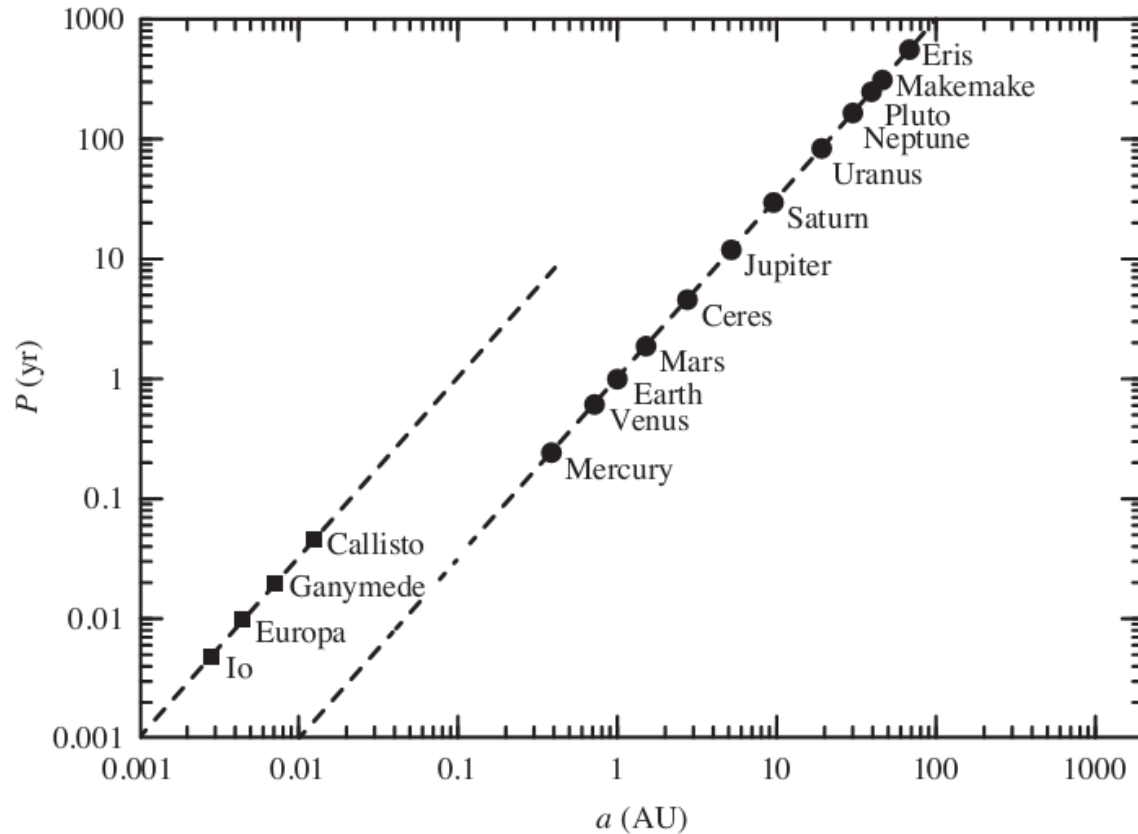
$$P^2 = K a^3 \quad , \quad K=1 \quad \text{als } P \text{ in jaren, } a \text{ in } \mathbf{AU}$$

AU (*astronomical unit*): gem. afstand Aarde-Zon
 ≈ 150 miljoen km

IAU (2012): $1 \text{ AU} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$

Laat zien dat $1 \text{ AU} \approx 500$ lichtsec.

K3 voor Zonnestelsel en Jupiter



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

Wat is het hellinggetal ? En hoe lees je K af ?

Bewijs voor Beweging van Aarde

Ockhams scheermes (*Ockham's Razor*)

Heliocentrisch model eenvoudiger, 'elegantier'

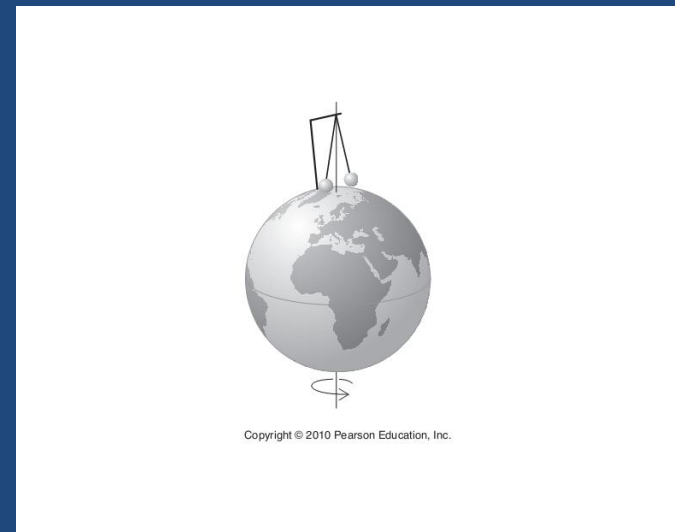
Dit model heeft (nu) 'dus' de voorkeur

Maar er is ook **experimenteel** bewijs:

Aswenteling blijkt uit **Coriolis effect** en i.h.b.

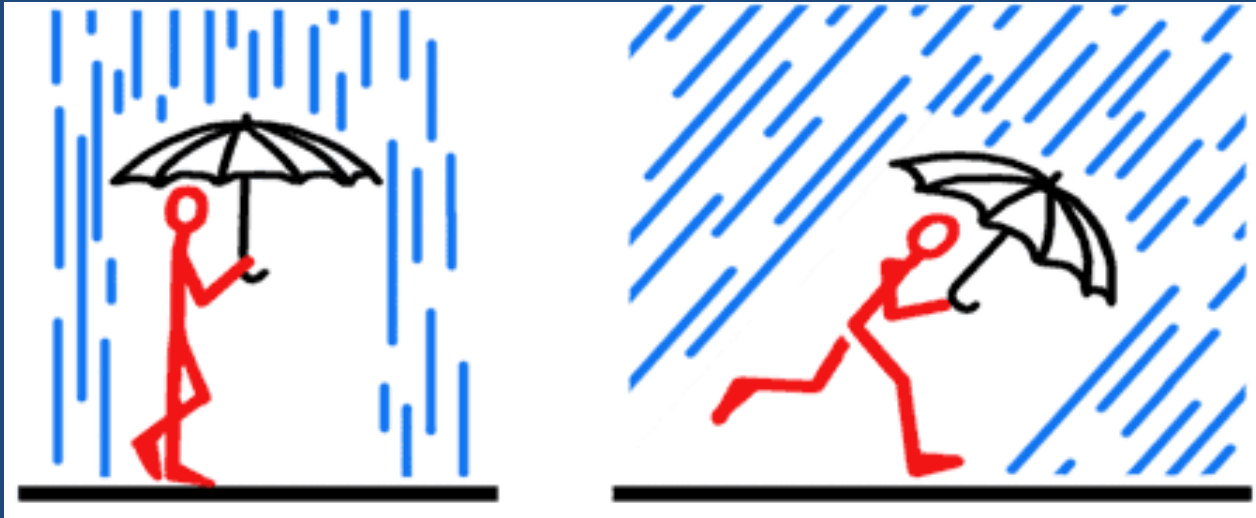
Slinger van Foucault

(Je mag vgl. 2.20 overslaan)



Aberratie (*stellar aberration*)

Lopen met een paraplu in de regen



Regen valt met snelheid c t.o.v. Aarde

Jij loopt met snelheid u t.o.v. Aarde

Regen lijkt van voren te komen: $\tan \theta = u / c$

Aberratie

Paraplu → **Telescoop** , Regen → **Licht**

Baan: $v \approx 30 \text{ km/s}$, Licht: $c \approx 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$

$$\tan \theta = v / c \approx 10^{-4} \rightarrow \theta \approx 10^{-4} \text{ rad} \approx 20''$$

In 1 jaar lijkt ster op ellipsje te bewegen met

$$a = 20'' , b = 20'' \sin \beta \leftarrow \text{eclip. breedte}$$

(Ook *dagelijkse* aberratie maar die is $< 0.32''$)

J. Bradley (1725) mat γ **Drac.** en vond zo **c**

Aberratie was onverwacht! Men zocht naar:

Parallax

‘Verplaatsing’ van nabij object vergeleken
met de verre achtergrond

Vb. 1: Je reist en ‘alles’ blijft achter,
maar de Maan reist mee!

Vb. 2: Strek een arm uit. Bekijk je duim
met L- en dan met R-oog.

Hoeveel graden verspringt het beeld?

De oude Grieken wisten dit al!

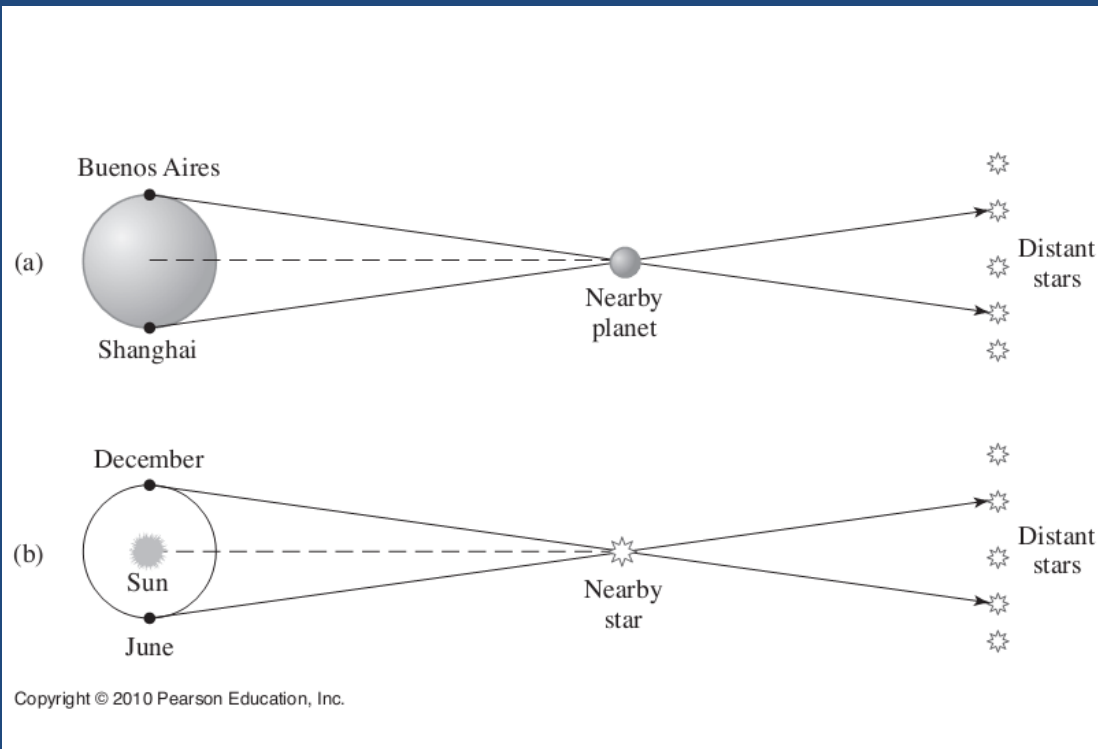
Geo- en Heliocentrische Parallax

Geocentrische (of dagelijkse) parallax

Positie v.d. Maan verschilt tot 2° (antipoden)

Heliocentrische (of jaarlijkse) parallax p

‘Hoekverplaatsing’ door 1 AU-verplaatsing



Parallax

$$\tan p = (1 \text{ AU}) / (d \text{ in AU})$$

Als $p \ll 1 \text{ rad} \rightarrow p \approx \tan p = 1 / d \rightarrow d \approx 1 / p$

maar astronomen meten p in " en definiëren

1 parsec = 1 pc = afstand tot ster met $p = 1''$

Opg: 1 parsec = 206 265 AU $\approx 31 \times 10^{12}$ km

$$p'' \rightarrow d \approx 1 / p'' \text{ pc}$$

(Ryden notatie: π'' ☹ voor parallax in "))

Cosmic Distance Ladder

Pas 1838 kon Bessel een parallax meten:

61 Cygni : $p = 0.32'' \rightarrow d = 3.2 \text{ pc}$

Alle sterren hebben $p < 1''$. Of toch niet?

Proxima Centauri : $p = 0.76'' \rightarrow d \approx 1.3 \text{ pc}$

Men verwarde aberratie en parallax

Aberratie (tot $20''$) $\gg$ **Parallax** (tot $1''$)

Aberratie hangt af van u , niet van d

Parallax hangt af van d , niet van u

Astrometrische Satellieten

Hipparcos (High Precision Parallax Collecting Satellite)

ESA: 1989-93. In foute baan ... toch geweldig succes

Hipparcos Cat (10^5 sterren): Positie + Eigenbeweging +
Parallax met precisie $< 1 \text{ mas}$ → afstanden

Tycho-2 Cat (2.5×10^6 st): Fotometrische data mag < 11

NL: TNO-TPD Delft: refocusing assembly mechanism,

SRON: image dissector tube + photomultiplier detectors,

Fokker Space: Solar cells + Thermal control system,

A. Blaauw (1914- 2010) *chair* observatieprogramma

Astrometrische Satellieten: GAIA

Global Astrometric Interferometer for Astrophysics

ESA: okt. 2013 - 2019. Gigantische taak!

Astrometrische data $\sim 10^9$ sterren $\approx 1\%$ v. Melkweg

Parallax met precisie $< 20 \mu as$ en tot magnitude 15

Detecteer $\sim 10^4$ planetenstelsels en $\sim 10^6$ quasars