

Zonnestelsel en Heelal



KLAS 4 HAVO

ZONNESTELSEL EN HEELAL

Over deze lessenserie

De lessenserie *Zonnestelsel en Heelal* voor klas 4 havo gaat over de bouw van het zonnestelsel, over de bewegingen van de planeten en andere hemelobjecten in dat zonnestelsel en over het ontstaan, de ontwikkeling en de toekomst van het heelal. Daarbij is ook aandacht voor de manier waarop de ideeën over het zonnestelsel en het heelal tot stand zijn gekomen. Dus: de manier waarop wetenschap werkt.

Colofon

Project	Nieuwe Natuurkunde
Auteurs	Kees Hooyman, Koos Kortland, Theo van Welie
Bijdragen	Loran de Vries, Chris van Weert, Harm Meek
Vormgeving	Koos Kortland
Redactie	Ed van den Berg (tot 1-8-2008), Harrie Eijkelhof, Koos Kortland (sinds 1-10-2008), Guus Mulder (sinds 1-9-2008), Maarten Pieters, Chris van Weert, Theo van Welie (tot 1-4-2008), Fleur Zeldenrust
Versie	september 2009

Copyright

© Stichting natuurkunde.nl, Enschede 2008

Alle rechten voorbehouden. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins al of niet commercieel hergebruik. Als uitzondering hierop is beperkte openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan mits uitsluitend bedoeld voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen onder vermelding van de bron.

Voor deze module is gebruik gemaakt van materiaal uit de ANW-methode Scala. Uitgeverij Malmberg heeft hiervoor collegiale toestemming gegeven, uitsluitend voor gebruik in de pilot van het project Nieuwe Natuurkunde, op de scholen die daaraan deelnemen.

Voor zover wij gebruikmaken van extern materiaal proberen wij toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen: info@nieuwenatuurkunde.nl

INHOUDSOPGAVE

1	Het zonnestelsel	10
1.1	Zon, maan en sterren	12
1.2	Het zonnestelsel	16
1.3	De aardachtige planeten	19
1.4	De reuzenplaneten	23
	Opgaven	26
2	Zes reuzen in 2000 jaar	30
2.1	Sterrenkunde in het oude Griekenland	31
2.2	Naar een heliocentrisch wereldbeeld	34
	Opgaven	37
3	Bewegingen in het zonnestelsel	41
3.1	De beweging van planeten	42
3.2	De gravitatiewet van Newton	47
	Opgaven	53
4	Het heelal	56
4.1	Een heelal vol sterrenstelsels	57
4.2	De evolutie van het heelal	63
	Opgaven	68
5	Satellieten	73
5.1	Soorten satellieten	74
5.2	Satellietbanen	79
	Opgaven	82

Globale opbouw van het lesmateriaal

Het lesmateriaal begint met de startpagina. Hierop staan de benodigde **voorkennis** en de **inleiding** van de lessenserie.

ZONNESTELSEL EN MELAL

Kennt van de bewegingen en de kant om deze te voorspellen, stond vele eeuwen geleden in het oude Babylonië en Griekenland al in loom. Daarna kwam eerst tegenover het antoon van belemmingen bij belangrijke gebeurtenissen. Zo stond de astrologie aan de wieg van de sterrenkunde of astronomie.

Het zonnestelsel en het heelal spelen nog steeds tot de voorstelling. Al een, lopen mensen rond met vragen als: "Wat zou er daarboven allemaal zijn?" "Hoe is de beweging van de planeten te verklaren?" "Hoe groot is het heelal eigenlijk?" en "Zou er ergens anders in het heelal ook leven zijn bestaan?" In deze lesmodule gaan we op specifiek in het zonnestelsel en het heelal. Maar eerst kijken we naar wat je allemaal al weet en wat je graag zou willen weten.

Voorkennis

Je kent:

- de begrippen massa, volume, golfteget, frequentie, lichtstraalend, elektrostatieel spectrum, verpogen, absolute temperatuur, atoom, atoomkern, proton, neutron en elektron
- de formule voor de dichtheid van een stof: $\rho = m/V$
- de formule voor het verband tussen golfteget en frequentie van elektrostatieel straling: $f = c/\lambda$
- de formule voor de snelheid: $v = \Delta s/\Delta t$
- de tweede wet van Newton: $F = m \cdot a$
- de formule voor de zwaartekracht op aarde: $F_z = m \cdot g$

4. Kennistest

Herleed staat een aantal stellingen over het zonnestelsel en heelal. Geef bij elke stelling aan of de stelling juist of onjuist is. Elk goed antwoord levert een punt op. Bovendien heb je twee vragen, die je ditzij een vraag kunt stellen. Een goed antwoord levert dan twee punten op.

A. De zon draait in 24 uur rond de aarde.	☐	ja nee
B. De aarde is de enige planeet met een maan.	☐	ja nee
C. Het heelal is ongeveer 5 miljard jaar oud.	☐	ja nee
D. Bij een zwaartekracht staat de aarde in de schaduw van de maan.	☐	ja nee
E. Bij een zwaartekracht staat de maan achter de zon.	☐	ja nee
F. Bij een zwaartekracht staat de maan achter de zon.	☐	ja nee
G. De zon is ongeveer 5 miljard jaar oud.	☐	ja nee
H. De maan draait in iets meer dan 24 uur rond de aarde.	☐	ja nee

Voorkennis

Je kent:

- de begrippen massa, volume, golfteget, frequentie, lichtstraalend, elektrostatieel spectrum, verpogen, absolute temperatuur, atoom, atoomkern, proton, neutron en elektron
- de formule voor de dichtheid van een stof: $\rho = m/V$
- de formule voor het verband tussen golfteget en frequentie van elektrostatieel straling: $f = c/\lambda$
- de formule voor de snelheid: $v = \Delta s/\Delta t$
- de tweede wet van Newton: $F = m \cdot a$
- de formule voor de zwaartekracht op aarde: $F_z = m \cdot g$

4. Kennistest

Herleed staat een aantal stellingen over het zonnestelsel en heelal. Geef bij elke stelling aan of de stelling juist of onjuist is. Elk goed antwoord levert een punt op. Bovendien heb je twee vragen, die je ditzij een vraag kunt stellen. Een goed antwoord levert dan twee punten op.

A. De zon draait in 24 uur rond de aarde.	☐	ja nee
B. De aarde is de enige planeet met een maan.	☐	ja nee
C. Het heelal is ongeveer 5 miljard jaar oud.	☐	ja nee
D. Bij een zwaartekracht staat de aarde in de schaduw van de maan.	☐	ja nee
E. Bij een zwaartekracht staat de maan achter de zon.	☐	ja nee
F. Bij een zwaartekracht staat de maan achter de zon.	☐	ja nee
G. De zon is ongeveer 5 miljard jaar oud.	☐	ja nee
H. De maan draait in iets meer dan 24 uur rond de aarde.	☐	ja nee

Voorkennis

Je kent:

- de begrippen massa, volume, golfteget, frequentie, lichtstraalend, elektrostatieel spectrum, verpogen, absolute temperatuur, atoom, atoomkern, proton, neutron en elektron
- de formule voor de dichtheid van een stof: $\rho = m/V$
- de formule voor het verband tussen golfteget en frequentie van elektrostatieel straling: $f = c/\lambda$
- de formule voor de snelheid: $v = \Delta s/\Delta t$
- de tweede wet van Newton: $F = m \cdot a$
- de formule voor de zwaartekracht op aarde: $F_z = m \cdot g$

4. Kennistest

Herleed staat een aantal stellingen over het zonnestelsel en heelal. Geef bij elke stelling aan of de stelling juist of onjuist is. Elk goed antwoord levert een punt op. Bovendien heb je twee vragen, die je ditzij een vraag kunt stellen. Een goed antwoord levert dan twee punten op.

A. De zon draait in 24 uur rond de aarde.	☐	ja nee
B. De aarde is de enige planeet met een maan.	☐	ja nee
C. Het heelal is ongeveer 5 miljard jaar oud.	☐	ja nee
D. Bij een zwaartekracht staat de aarde in de schaduw van de maan.	☐	ja nee
E. Bij een zwaartekracht staat de maan achter de zon.	☐	ja nee
F. Bij een zwaartekracht staat de maan achter de zon.	☐	ja nee
G. De zon is ongeveer 5 miljard jaar oud.	☐	ja nee
H. De maan draait in iets meer dan 24 uur rond de aarde.	☐	ja nee

Voorkennis

Je kent:

- de begrippen massa, volume, golfteget, frequentie, lichtstraalend, elektrostatieel spectrum, verpogen, absolute temperatuur, atoom, atoomkern, proton, neutron en elektron
- de formule voor de dichtheid van een stof: $\rho = m/V$
- de formule voor het verband tussen golfteget en frequentie van elektrostatieel straling: $f = c/\lambda$
- de formule voor de snelheid: $v = \Delta s/\Delta t$
- de tweede wet van Newton: $F = m \cdot a$
- de formule voor de zwaartekracht op aarde: $F_z = m \cdot g$

4. Kennistest

Herleed staat een aantal stellingen over het zonnestelsel en heelal. Geef bij elke stelling aan of de stelling juist of onjuist is. Elk goed antwoord levert een punt op. Bovendien heb je twee vragen, die je ditzij een vraag kunt stellen. Een goed antwoord levert dan twee punten op.

A. De zon draait in 24 uur rond de aarde.	☐	ja nee
B. De aarde is de enige planeet met een maan.	☐	ja nee
C. Het heelal is ongeveer 5 miljard jaar oud.	☐	ja nee
D. Bij een zwaartekracht staat de aarde in de schaduw van de maan.	☐	ja nee
E. Bij een zwaartekracht staat de maan achter de zon.	☐	ja nee
F. Bij een zwaartekracht staat de maan achter de zon.	☐	ja nee
G. De zon is ongeveer 5 miljard jaar oud.	☐	ja nee
H. De maan draait in iets meer dan 24 uur rond de aarde.	☐	ja nee

Na de startpagina volgen de hoofdstukken en paragrafen met leerstof. Ieder hoofdstuk begint met de onderstaande pagina. Hierop staan de **hoofdstukvraag**, een **inleiding** en een **oriëntatieopdracht**.

[illegible]

GLOBALE OPBOUW VAN EEN PARAGRAAF

3.2 De gravitatiewet van Newton

Paragraafvraag	Hoe is met de gravitatiekracht van Newton de beweging van planeten en manen in het zonstelsel te verklaren?
----------------	---

De gravitatiewet

Planeten (en in goede benadering een enorme reeks kleinere objecten) bewegen zich in cirkels rond de zon. Dit kan worden verklaard door de gravitatiekracht van Newton. Volgens Newton is dat de gravitatiekracht.

De gravitatiekracht van Newton stelt dat alle voorwerpen met massa in het heelal elkaar aantrekken. Deze kracht die voorwerpen met massa op elkaar uitoefent, is de gravitatiekracht. Op aarde kennen we deze kracht als de zwaartekracht. Voor de grootte van de gravitatiekracht geldt:

- Hoe verder de voorwerpen van elkaar vervreemd zijn, des te kleiner is de gravitatiekracht.
- Hoe groter de massa's van de voorwerpen zijn, des te groter is de gravitatiekracht.

Deze eigenschappen van de gravitatiekracht kunnen in een formule worden vastgelegd.

Formules – Gravitatiekracht

De grootte van de gravitatiekracht die twee voorwerpen op elkaar uitoefenen wordt gegeven door:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Symbool: In deze formule is F_g de gravitatiekracht (in N), m_1 en m_2 zijn de massa's (in kg) van de twee voorwerpen en r is de afstand (in m) tussen de massapunten van de twee voorwerpen. De constante G is de gravitatieconstante met een waarde van $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$.

De **paragraafvraag** vormt het uitgangspunt van de daarop volgende tekst. De vraag wordt in de tekst beantwoord.

In de box **Rekenvoorbeeld** staan uitgewerkte berekeningen met behandelde formules.

In de box **Formules** staan de formules die je geacht wordt te beheersen.

Rekenvoorbeeld

Voor de zwaartekracht F_z op een voorwerp dat zich bij het aardoppervlakte bevindt geldt:

$$F_z = m \cdot g$$

In deze formule is m de massa van het voorwerp en g de valversnelling. De zwaartekracht op een voorwerp met een massa van 1,00 kg is dus:

$$F_z = m \cdot g = 1,00 \cdot 9,80 = 9,80 \text{ N}$$

Voor de gravitatiekracht $F_{g, \text{aard}}$ geldt in het algemeen:

$$F_{g, \text{aard}} = G \frac{m \cdot M_{\text{aard}}}{r^2}$$

In het geval van een voorwerp met een massa m bij het aardoppervlakte is in deze formule M de massa van de aarde ($M_{\text{aard}} = 5,95 \times 10^{24} \text{ kg}$) en r de afstand tussen het voorwerp en het midden van de aarde. Voor een voorwerp bij het aardoppervlakte is deze afstand r gelijk aan de straal R van de aarde ($R_{\text{aard}} = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$).

De gravitatiekracht op een voorwerp met een massa van 1,00 kg bij het aardoppervlakte is dus:

$$F_{g, \text{aard}} = G \frac{m \cdot M_{\text{aard}}}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{1,00 \cdot 5,95 \cdot 10^{24}}{(6,37 \cdot 10^6)^2} = 9,80 \text{ N}$$

De berekening van de zwaartekracht en de gravitatiekracht op een voorwerp bij het aardoppervlakte levert dus = zoals verwacht = dezelfde waarde op.

Valkuil

Let op het verschil tussen de gravitatiekracht (F_g) en de valversnelling g .

- g is de valversnelling op aarde.
- g is de gravitatieversnelling die geldt voor de zwaartekracht van de aarde.

In de box **Valkuil** staat een belangrijke misvatting die bestaat over het behandelde onderwerp.

Opgaven

3.4 De beweging van planeten

3e Derde wet van Kepler

Volgens de derde wet van Kepler wordt het verband tussen de baanstraal r en de omlooptijd T van de planeten in ons zonstelsel gegeven door:

$$\frac{r^3}{T^2} = K$$

a. De omlooptijd van de aarde rond de zon en de afstand zon-aarde zijn bekend (zie Binas). Laat met een berekening met deze gegevens zien dat voor de constante K in de derde wet van Kepler geldt: $K = 3,98 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$.

b. De omlooptijd van de planeet Mars rond de zon is 687 dagen. Bereken met de derde wet van Kepler de baanstraal van Mars. Controleer je antwoord met Binas.

c. De baanstraal van de planeet Neptunus is $4,5 \times 10^9 \text{ km}$. Bereken met de derde wet van Kepler de omlooptijd van Neptunus om de zon. Controleer je antwoord met Binas.

De **Opgaven** staan bij elkaar aan het einde van een hoofdstuk. De opgaven zijn gegroepeerd per paragraaf.

De maan



Figuur 3.1 - De maan

De maan is de satelliet van de aarde. De maan beweegt zich in een cirkel rond de aarde. De maan heeft een diameter van 3474 km. De afstand tussen de aarde en de maan is 384 400 km. De maan heeft een massa van 7,35 × 10²² kg. De maan heeft een omlooptijd van 27,3 dagen. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km. De maan heeft een baanstraal van 384 400 km.

In de box **Samenvatting** staat de minimale kennis die je paraat moet hebben of waarmee je moet kunnen werken.

In de box **Extra** staat informatie die niet tot de leerstof behoort.

In de box **Begrippen** staan belangrijke termen uit de tekst.

ZONNESTELSEL EN HEELAL

Kennis van de hemelbewegingen en de kunst om deze te voorspellen, stond vele eeuwen geleden in het oude Babylon en Griekenland al in hoog aanzien. Deze kennis werd ingezet voor het nemen van beslissingen bij belangrijke gebeurtenissen. Zo stond de astrologie aan de wieg van de sterrenkunde of *astronomie*.

Het zonnestelsel en het heelal spreken nog steeds tot de verbeelding. Al eeuwen lopen mensen rond met vragen als: 'Wat zou er daarboven allemaal zijn?', 'Hoe is de beweging van de planeten te verklaren?', 'Hoe groot is het heelal eigenlijk?' en 'Zou er ergens anders in het heelal ook leven zijn ontstaan?'. In deze lessenserie gaan we op speurtocht in het zonnestelsel en het heelal. Maar eerst kijken we naar wat je allemaal al weet en wat je graag zou willen weten.

Voorkennis

Je kent:

- De begrippen massa, volume, golflengte, frequentie, lichtsnelheid, elektromagnetisch spectrum, vermogen, absolute temperatuur, atoom, atoomkern, proton, neutron en elektron
- De formule voor de dichtheid van een stof: $\rho = m/V$
- De formule voor het verband tussen golflengte en frequentie van elektromagnetische straling: $f = c/\lambda$
- De formule voor de snelheid: $v = \Delta s/\Delta t$
- De tweede wet van Newton: $F = m \cdot a$
- De formule voor de zwaartekracht op aarde: $F_z = m \cdot g$

1 Kennistest

Hieronder staat een aantal stellingen over het zonnestelsel en heelal. Geef bij elke stelling aan of die stelling juist of onjuist is. Elk goed antwoord levert één punt op. Bovendien heb je twee jokers, die je elk bij één vraag kunt inzetten. Een goed antwoord levert dan drie punten op.

- | | | | |
|---|---|-----------------------------|------------------------------|
| A | De zon draait in 24 uur rond de aarde. | ☐ ja | ☐ nee |
| B | De aarde is de enige planeet met een maan. | ☐ ja | ☐ nee |
| C | Het heelal is ongeveer 5 miljoen jaar oud. | ☐ ja | ☐ nee |
| D | Bij een zonsverduistering staat de aarde in de schaduw van de maan. | ☐ ja | ☐ nee |
| E | Bij een maansverduistering staat de maan achter de zon. | ☐ ja | ☐ nee |
| F | Buiten de dampkring is er geen aantrekkingskracht van de aarde. | ☐ ja | ☐ nee |
| G | De zon is eigenlijk een doodgewone ster. | ☐ ja | ☐ nee |
| H | De maan draait in iets meer dan 24 uur rond de aarde. | ☐ ja | ☐ nee |

- | | | | |
|---|---|-----------------------------|------------------------------|
| I | 'Vallende sterren' zijn meteorieten die in de dampkring van de aarde verbranden. | ☐ ja | ☐ nee |
| J | Rond de zon draaien negen planeten. | ☐ ja | ☐ nee |
| K | De planeten bewegen rond de zon onder invloed van de gravitatiekracht van de zon. | ☐ ja | ☐ nee |
| L | Het zonnestelsel is een onderdeel van het Melkwegstelsel. | ☐ ja | ☐ nee |
| M | Een deel van de sterren die we aan de hemel zien zijn eigenlijk complete sterrenstelsels. | ☐ ja | ☐ nee |
| N | Een satelliet in een geostationaire baan staat stil. | ☐ ja | ☐ nee |

2 Vragen

Noteer minstens twee vragen over het zonnestelsel en heelal waarop je zelf graag een antwoord zou willen krijgen.

Hemelobjecten

De opdrachten 3 en 4 vormen een eerste kennismaking met een aantal hemelobjecten. Het is geen probleem als je het antwoord op de vragen niet of niet zeker weet.

3 Het zonnestelsel

De zon is een heel gewone ster die licht uitzendt doordat er in het binnenste van de zon kernfusie plaatsvindt. Het licht van de zon doet er 8 minuten over om de aarde te bereiken.

a Hoe komt het dat de zon in de zomer hoger aan de hemel staat?

De maan staat veel dichterbij de aarde en lijkt (toevallig) even groot als de zon. Het licht van de maan is al na 1,3 s op aarde. Op de foto's van figuur 2 zie je dat een deel van de maan donker is. Dat noemen we de schijngestalten van de maan.



Figuur 1 – De zon.



Figuur 3 – De planeet Saturnus.



Figuur 4 – De komeet Hyakutaki.



Figuur 2 – De schijngestalten van de maan.

b Hoe komt het dat de maan schijngestalten heeft?

Er zijn in totaal acht planeten, waarvan je er vijf – de aarde niet meegerekend – met het blote oog kunt zien: Mercurius, Venus, Mars, Jupiter en Saturnus. Omdat de planeten ook rond de zon bewegen, staan ze elke avond op een iets andere plaats aan de hemel. Daardoor werden ze vroeger ook wel 'dwaalsterren' genoemd.

c Welke planeten kun je niet met het blote oog zien?

d Welke planeten lijken het meest op de aarde?

Soms is er aan de hemel een komeet te zien. Zo'n komeet herken je aan zijn staart.

e Hoe bewegen kometen door ons zonnestelsel?

Soms zie je een kortstondig lichtspoor aan de hemel. Veel mensen noemen dat een 'vallende ster'.

f Hoe ontstaat het lichtspoor van zo'n 'vallende ster'?



Figuur 5 – Het sterrenstelsel Andromeda.

4 Het heelal

Alle sterren die je aan de hemel ziet, maken deel uit van het Melkwegstelsel. De dichtstbijzijnde ster staat op een afstand van 4,3 lichtjaar: de ster staat zo ver weg dat het licht er 4,3 jaar over doet om van de ster naar de aarde te komen. Andere sterren staan op een afstand van enkele honderden lichtjaar.

a Uit hoeveel sterren (ongeveer) bestaat het Melkwegstelsel?

Eén lichtpuntje aan de hemel kan ook een sterrenstelsel zijn. Het meest bekende sterrenstelsel is Andromeda. Een sterrenstelsel is – net als het Melkwegstelsel – een enorme verzameling sterren. Andromeda staat op een afstand van 2,2 miljoen lichtjaar, maar dat is vergeleken met de rest van het heelal dichtbij.

b Hoeveel sterrenstelsels (ongeveer) zijn er in het heelal?

Internetsites

Op internet is veel informatie te vinden over de sterrenkunde. Hieronder staat een aantal websites om je op weg te helpen.

sterrenkunde.startkabel.nl/
www.lnqs.com/ruimtevaart/

Twee goede startpunten voor het zoeken naar sterrenkundige informatie.

www.astronomie.nl/

Het actuele nieuws uit de Nederlandse sterrenkunde. Op de website staan een encyclopedie, een beeldbank en aparte pagina's voor scholieren en docenten.

allesoversterrenkunde.nl/

Nieuws en achtergrondinformatie over sterrenkunde en ruimteonderzoek. De rubriek 'hemelverschijnselen' geeft een lijst van opzienbarende objecten die op dat moment met het blote oog zichtbaar zijn. De rubriek 'sterrenhemel' toont de sterrenhemel van dat moment boven Nederland.

www.kennislink.nl/web/show?id=100549

Een van de meest bezochte populair-wetenschappelijke websites in het Nederlandse taalgebied. Deze sectie is gewijd aan de sterrenkunde.

www.spacepage.be/

Goede informatieve sterrenkundige artikelen.

www.sterrenkunde.nl/index/

Informatie over de sterren, de planeten en de rest van het heelal, opgezet door de JongerenWerkGroep (JWG) voor Sterrenkunde. Er is een encyclopedie en een lijst van alle publiekssterrenwachten in Nederland, voor het geval je er eens een wilt bezoeken.

www.nasa.gov/

De website van de NASA, de Amerikaanse ruimtevaartorganisatie. Vooral solarsystem.nasa.gov/index.cfm over het zonnestelsel is voor deze lessenserie interessant.

www.astro.uu.nl/~strous/AA/nl/antwoorden/

Alles over het onderwerp kalenders (klik aan de linkerkant van het scherm op 'kalenders').

antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html

Astronomical Picture of the Day (APOD): een website van de NASA, waarop iedere dag een foto met toelichting verschijnt. Er is een archief met de eerdere foto's en een woordenlijst.

www.apod.nl/about_apod_nl.html

De Nederlandse verse van APOD.

www.spacetelescope.org/

Informatie over foto's van de Hubble ruimtetelescoop.

1 Het zonnestelsel

Hoofdstukvraag

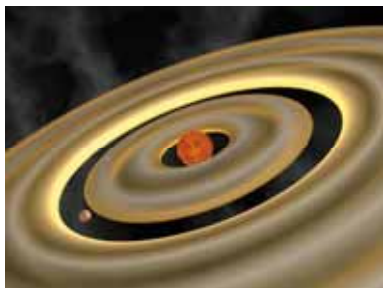
Hoe is ons zonnestelsel opgebouwd, en welke eigenschappen hebben de zon en haar planeten?

Gravitatiekracht

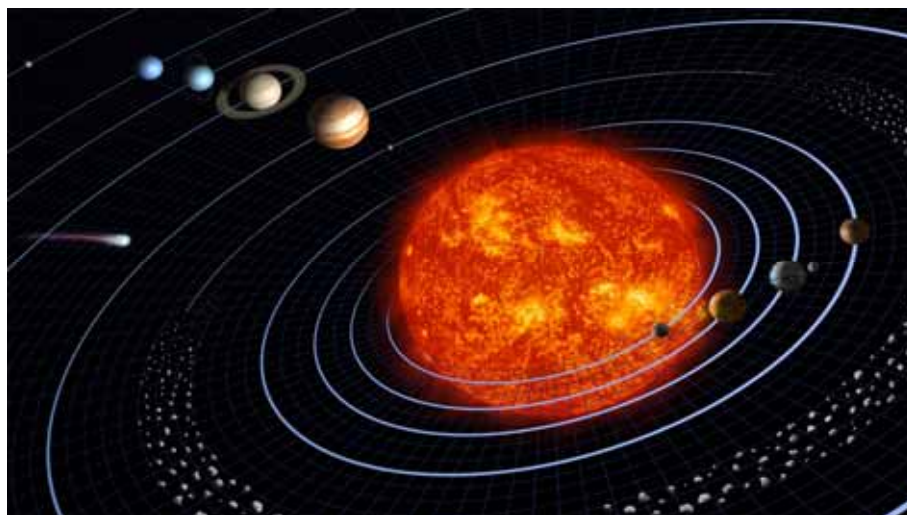
De *gravitatiekracht* is de aantrekkende kracht die twee massa's (grote massa's zoals hemellichamen, maar ook kleine massa's zoals moleculen en stofdeeltjes) op elkaar uitoefenen. Deze kracht kennen we op aarde als de zwaartekracht. De gravitatiekracht komt aan de orde in hoofdstuk 3.

Ons zonnestelsel is 4,5 miljard jaar geleden ongeveer op de volgende wijze ontstaan. Het begon met een grote gaswolk die onder invloed van de gravitatiekracht in het centrum samengedrukt werd. Dit proces duurde ongeveer 100 duizend jaar. In dat centrum vormde zich geleidelijk een ster: onze zon. Een groot deel van het gas kwam op de jonge ster terecht, het restant bleef in een soort schijf rond de ster draaien. Deze schijf straalde energie uit en koelde af. De stofdeeltjes botsten met elkaar en vormden geleidelijk een grotere massa. In de loop van de tijd groeiden ze steeds verder aan. De steeds groter wordende brokstukken verwierven zo voldoende aantrekkingskracht om alle kleine deeltjes in hun omgeving naar zich toe te trekken: er ontstond een planeet. Als de jonge planeet groot genoeg was, kon zij het nabije gas opnemen en werd ze een grote gasplaneet. De kleinere jonge planeten bleven een steen- of ijslichaam. Na 100 miljoen jaar vormden er zich acht planeten in stabiele omloopbanen. Ons zonnestelsel was geboren.

Op <http://nl.youtube.com> met zoekterm 'How our solar system was formed 5 billion years ago' staat een animatie van de vorming van ons zonnestelsel.



Figuur 6 – De vorming van ons zonnestelsel. In het midden de jonge ster, met daar omheen de schijf met gas. In die schijf heeft zich een planeet gevormd die al het gas in zijn baan heeft opgeslorpt.



Figuur 7 – Het zonnestelsel zoals we dat nu kennen.

5 Het zonnestelsel

In Binas tabel 31 en 33b staan gegevens over de planeten van ons zonnestelsel en over de zon. In die tabellen staan onder andere de afstand r van de planeten tot de zon en de straal R van de zon en de planeten.

Maak met behulp van deze gegevens een tekening op schaal van ons zonnestelsel. Kies de schaal van je tekening zodanig dat het zonnestelsel op een

blad A4 past. Je kunt voor de afstand en de straal verschillende schalen kiezen, als de tekening daardoor duidelijker wordt.

6 De planeten van het zonnestelsel

In Binas tabel 31 staan gegevens over de planeten van ons zonnestelsel. In die tabel staan onder andere de massa m , de straal R en de dichtheid ρ van de planeten.

a Zoek in Binas de massa en de straal van de planeet aarde op. Bereken daarmee de dichtheid van de aarde. Controleer je antwoord met de waarde van de dichtheid in Binas. Aanwijzing – Voor het volume V van de aarde (een bol) geldt: $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3$.

b Zoek in Binas de dichtheid van de acht planeten op, en noteer de waarden in een tabel.

c Je kunt de acht planeten op grond van hun dichtheid in twee groepen verdelen. Welke twee groepen zijn dat?

d Hoe is het verschil in dichtheid tussen die twee groepen planeten te verklaren?

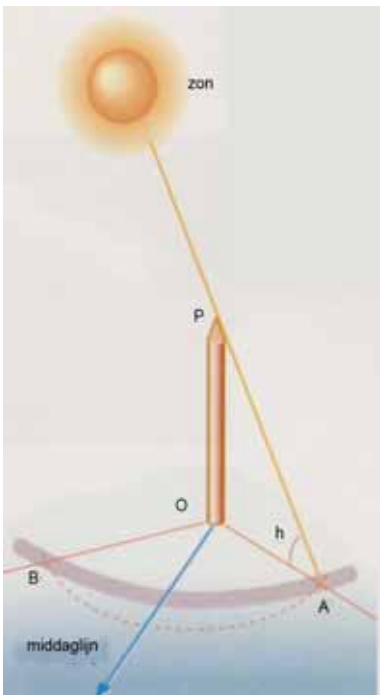
1.1 Zon, maan en sterren

Paragraafvraag	Hoe ziet de dagelijkse beweging van de zon, de maan en de sterren eruit?
----------------	--

De zon



Figuur 8 – Sierzonnewijzer.



Figuur 9 – Primitieve zonnewijzer. De driehoek BAO ligt op het aardoppervlak.

De zon komt 's morgens in het oosten op, klimt schuin omhoog tot hij in het zuiden de hoogste stand bereikt, daalt daarna en gaat in het westen onder.

Dit komt omdat de aarde in 24 uur om zijn as draait. We spreken dan ook van de *schijnbare beweging* van de zon. Schijnbaar dus, omdat de zon niet zelf verantwoordelijk is voor de beweging die wij waarnemen. Dit lijkt alleen maar zo.

Het oudste instrument dat wij kennen om de hoogte van de zon te bepalen is de zonnewijzer. Dat is in zijn eenvoudigste vorm niets anders dan een verticaal opgestelde stok (zie figuur 9). Als de zon klimt, wordt de schaduw korter. Vanaf het ogenblik dat hij zijn hoogste punt is gepasseerd, wordt de schaduw weer langer.

Hoe hoog de zon staat, drukken we uit in de *zonshoogte* (de hoek h in figuur 9). De zon staat in het zuiden als de zonshoogte maximaal is. De maximale zonshoogte verandert in de loop van het jaar. Dit is een direct gevolg van de schuine stand van de aardas, ten opzichte van het vlak waarin de aarde om de zon draait. In de zomer staat de zon hierdoor 's middags hoog aan de hemel en in de winter laag. In ons land varieert de maximale zonshoogte van $14,5^\circ$ op 21 december tot $61,5^\circ$ op 21 juni. Dit geldt niet overal op aarde: ga je in de richting van de noordpool, dan worden deze waarden kleiner. Boven de noordelijke poolcirkel gaat de zon op 21 juni niet onder: de minimale zonshoogte ligt daar boven de horizon.



Figuur 10 – Midzomernacht in Loppa, Noorwegen. Vanaf 21 juni 19.00 uur tot en met 22 juni 18.00 uur is er elk heel uur een foto van de zon gemaakt. De 24 foto's zijn aan elkaar geplakt. Je zien dat de zon in Loppa die dag niet onder gaat.

De sterrenhemel

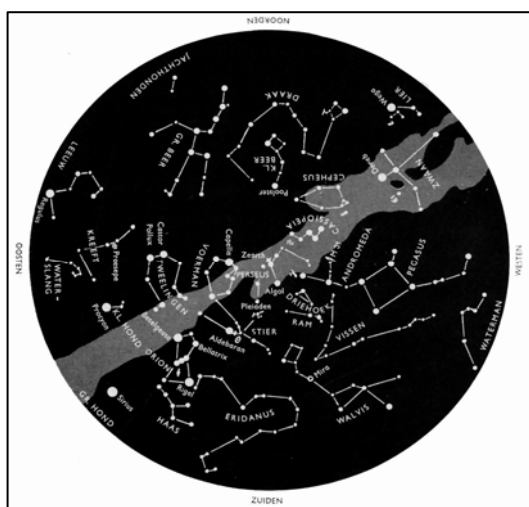


Figuur 13 – De Poolster kun je als volgt vinden. Zoek het sterrenbeeld Grote Beer en verleng het uiteinde vijf keer. Je komt dan bij de Poolster, aan het puntje van de staart van het sterrenbeeld Kleine Beer.

De nacht wordt beheerst door het licht van de maan en de sterren. Ook overdag staan er sterren aan de hemel; we kunnen ze alleen niet zien. Dit komt doordat het licht van de zon zoveel sterker is dan dat van de andere sterren. Onze zon is ook een ster, en niet eens een hele grote. Het is een middelgrote ster met een levensduur van ongeveer 10 miljard jaar. Onze zon lijkt voor ons zo helder omdat zij zo dichtbij staat, en dus niet omdat zij zoveel meer licht uitstraalt in vergelijking met de andere sterren aan de hemel.

De mens heeft in de loop van de eeuwen orde proberen te brengen in de miljoenen sterren die zich aan de hemel bevinden. Als je naar de sterrenhemel kijkt, dan lijkt het net alsof de sterren in groepjes in een koepel boven de aarde zitten. Al in de oudheid meende men in deze groepjes allerlei vormen en figuren te herkennen. We noemen dit *sterrenbeelden*. De bekendste sterrenbeelden zijn weergegeven in figuur 11.

Net als de zon voeren ook de sterren door de rotatie van de aarde een schijnbare beweging uit. Er zijn sterren die net zoals de zon op- en ondergaan, maar sommige blijven altijd boven de horizon. In figuur 12 zie je een tijdopname van de sterrenhemel in noordelijke richting. Daaruit blijkt dat alle sterren tijdens het nemen van de foto in een cirkel bewegen. In het midden van de foto staat een ster die stilstaat. Dit is de Poolster. Deze ster staat stil omdat hij precies in het verlengde van de rotatie-as van de aarde staat. Met de sterrenbeelden Grote Beer en Kleine Beer kun je de Poolster vinden. Je weet dan precies waar het noorden is (zie figuur 13).



Figuur 11 – Sterrenhemel van het noordelijk halfrond in januari rond 21.00 uur.

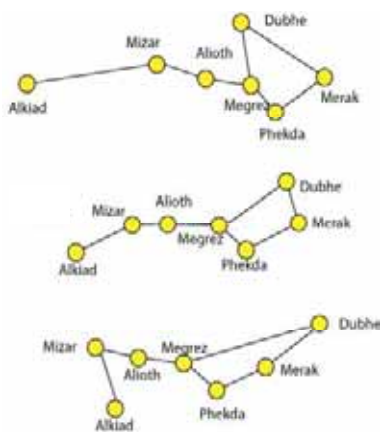


Figuur 12 – Tijdopname van de sterrenhemel rond de Poolster. Je ziet dat de Poolster stilstaat.

Eigenbewegingen en afstanden van sterren

De sterrenbeelden vertonen van jaar tot jaar geen waarneembare verandering; de hedendaagse sterrenbeelden zijn gelijk aan die van bijvoorbeeld tweeduizend jaar geleden.

Toch nemen sterren geen vaste plaats in de ruimte in, maar bewegen zij met grote snelheden. Die beweging noemen we de *eigenbeweging*. De eigenbeweging van een ster wordt veroorzaakt doordat de ster en de zon ten opzichte van elkaar bewegen. De eigenbewegingen van de sterren zijn te traag om met het oog waar te nemen. Maar als je de posities met tussenpozen van vele duizenden jaren vergelijkt, dan zie je het effect wel. Dit werd voor het eerst aangetoond in de zeventiende eeuw door Edmond Halley, die de posities van drie heldere sterren (Sirius, Procyon en Arcturus) vergeleek met de gegevens



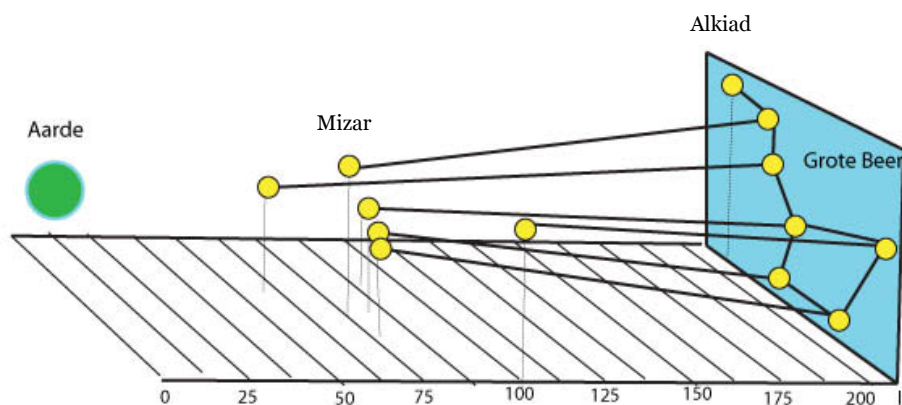
Figuur 14 – Van de zeven heldere sterren in het sterrenbeeld Grote Beer vertonen er vijf een beweging in dezelfde richting, terwijl de overige twee – Alkiad en Dubhe – in een andere richting bewegen.

uit de oude sterrencatalogi. Hij concludeerde hieruit dat hun onderlinge stand een verandering had ondergaan.

In de drie tekeningen van het sterrenbeeld Grote Beer in figuur 14 zijn de gevolgen van eigenbewegingen over langere termijn in beeld gebracht. De bovenste tekening geeft het sterrenbeeld van 100 duizend jaar geleden. In de middelste tekening zie je het huidige patroon. In de onderste tekening zie je hoe het er over 100 duizend jaar zal uitzien.

In figuur 15 zijn de zeven heldere sterren van het sterrenbeeld Grote Beer in beeld gebracht, waarbij de afstanden tot de aarde op dezelfde schaal zijn weergegeven.

Van de zeven sterren staat Alkiad op verreweg de grootste afstand: 210 lichtjaar. Aan de hemelbol lijkt die ster naast Mizar te staan, maar de afstand van de aarde tot Mizar is slechts 88 lichtjaar.



Figuur 15 – De sterren van het sterrenbeeld Grote Beer hebben verschillende afstanden tot de aarde.

Afstandsmaten

Binas

Afstanden

1 km = 1000 m
1 AE (Astronomische Eenheid) =
 $1,50 \cdot 10^{11}$ m
1 ly (lichtjaar) = $9,46 \cdot 10^{15}$ m

Tijd

1 h (uur) = 3600 s
1 d (dag) = 24 h
1 y (jaar) = 365,2345 d

In de astronomie worden afstanden vaak uitgedrukt in *lichtjaar* (Engels: light year, afgekort als ly). Een lichtjaar is geen eenheid van tijd. Een lichtjaar is een lengtemaat die we gebruiken om de afstand tot sterren, sterrenstelsels en andere objecten in het heelal aan te geven. Het is de afstand die licht aflegt in één jaar: ongeveer $9,46 \cdot 10^{15}$ m (9,46 biljard m). Daarnaast hebben we de *astronomische eenheid* (afgekort: AE). Dit is de afstand van het middelpunt van de zon tot die van de aarde. Deze bedraagt gemiddeld $1,50 \cdot 10^{11}$ m (150 miljard m). We noemen dat 1 AE.

Hoewel binnen de natuurkunde afgesproken is om afstanden uit te drukken in meter, heeft men in de sterrenkunde een uitzondering gemaakt omdat daar de afstanden zo groot zijn. Je zult daarom onder andere de AE en de lichtjaar tegenkomen in de verdere tekst en opgaven. Zie het kader 'Binas'.

Extra

We rekenen in de sterrenkunde met andere eenheden uit praktische overwegingen. Op het moment dat je besluit andere standaard eenheden te gebruiken (de streepjes op jouw liniaal te veranderen), verandert de fysische grootte niet. De afstanden zelf blijven gelijk, in welke eenheden je ook rekent.

Rekenvoorbeeld

De afstand van het middelpunt van de zon tot dat van de aarde is gemiddeld $1,50 \cdot 10^{11}$ m. We noemen dat 1 AE.

De planeet Neptunus staat op een afstand van $4,5 \cdot 10^{12}$ m tot de zon. Dat is dus een afstand van $4,5 \cdot 10^{12} / 1,50 \cdot 10^{11} = 30$ AE.

De afstand die het licht in 1 jaar aflegt is $9,46 \cdot 10^{15}$ m. We noemen dat 1 ly.

De dichtstbijzijnde ster staat op een afstand van 4,3 ly. Dat is dus een afstand van $4,3 \cdot 9,46 \cdot 10^{15} = 4,1 \cdot 10^{16}$ m.

Je ziet in beide gevallen dat het veranderen van de eenheid een praktisch voordeel van kleinere getallen oplevert. Bovendien geeft de AE direct de verhouding met de afstand zon-aarde.

De maan



Figuur 16 – De maan.

Extra

Het is geen toeval dat de maan er even lang over doet om rondom de aarde te draaien als om haar eigen as te wentelen. Dat deze perioden gelijk zijn, heeft te maken met getijdenkrachten. Net zoals de maan verantwoordelijk is voor eb en vloed op aarde, veroorzaakt de aarde eenzelfde effect op de maan, maar dan door vervorming van het maanoppervlak. Deze vervorming gaat niet gemakkelijk en er ontstaat een soort ‘wrijving’. De situatie is het meest stabiel als de maan van een planeet altijd gericht is naar de moederplaneet. Dit zien we ook bij andere planeten in ons zonnestelsel, hoewel het evenwicht zich bij veel manen nog moet instellen.

Begrippen

Zon
Schijnbare beweging
Zonshoogte
Sterrenbeelden
Eigenbeweging
Astronomische Eenheid
Lichtjaar
Maan
Maanfasen

De maan is de satelliet van de aarde. De maan moet al heel vroeg na het ontstaan van de aarde gevormd zijn. Als je een idee wilt krijgen van de klappen die de aarde de afgelopen 4,5 miljard jaar heeft moeten verduren, kun je het beste even een blik op de maan werpen. Zelfs met het blote oog kun je twee soorten terrein ontdekken: het relatief heldere hoogland en de donkere vlaktes. Vanaf het midden van de zeventiende eeuw hebben astronomen het oppervlak nauwgezet in kaart gebracht met steeds betere telescopen. Het maanoppervlak bestaat bijna geheel uit kraters, die elkaar hier en daar overlappen.

De maan staat op een afstand van ongeveer 384 duizend km van de aarde en heeft een middellijn van 3,4 duizend km. Doordat de maan er even lang over doet om rondom de aarde te draaien als om haar eigen as te wentelen (namelijk 27 dagen 7 uur en 43 minuten), zien we vanaf de aarde altijd dezelfde kant van de maan.

Net als de zon voert de maan een dagelijkse schijnbare beweging uit, veroorzaakt door de rotatie van de aarde. Het was al in de oudheid bekend dat de maan in een baan om de aarde draait. Deze draaiing is verantwoordelijk voor het optreden van de zogenaamde *schijngestalten* van de maan of de *maanfasen*.



Figuur 17 – De schijngestalten van de maan of de maanfasen.

Samenvatting

Doordat de aarde om haar as draait, voeren de zon, de maan en de sterren een *schijnbare beweging* uit. Naast de schijnbare beweging, bewegen de sterren ook ten opzichte van elkaar: hun *eigenbeweging*.

De vorm waarin je de maan aan de hemel ziet staan noemen we de schijn-gestalten van de maan of de *maanfasen*.

In de sterrenkunde gebruiken we voor het opgeven van afstanden speciale eenheden als het *lichtjaar* (ly) en de *Astronomische Eenheid* (AE).

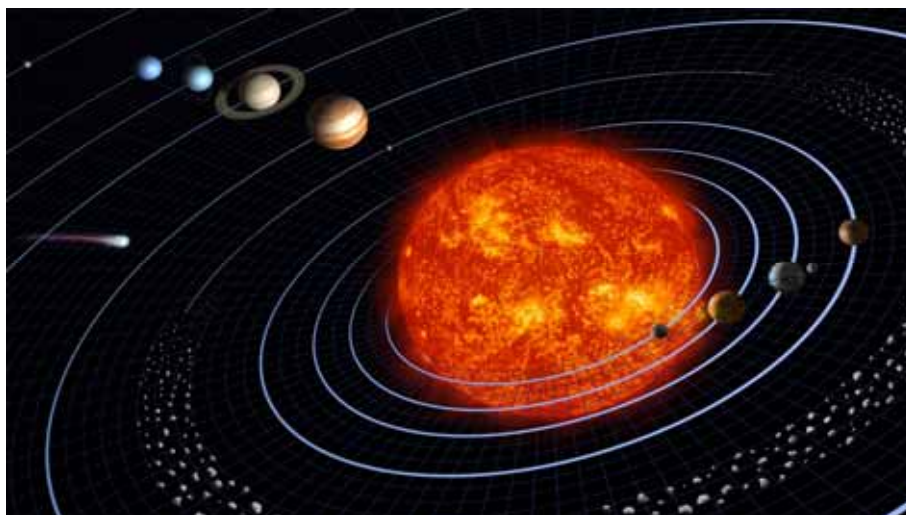
1.2 Het zonnestelsel

Paragraafvraag	Hoe ziet het zonnestelsel er uit?
----------------	-----------------------------------

Ons zonnestelsel

De zon is een ster op een afstand van $1,59 \cdot 10^5$ ly van de aarde, ofwel ruim acht lichtminuten. Dit is dus de afstand die het licht in acht minuten aflegt. Om de zon draaien de *planeten* en allerlei andere vaste hemellichamen, die we samen het *zonnestelsel* noemen. De straal van het zonnestelsel is een kwart lichtdag. Voor zover bekend staat de dichtstbijzijnde volgende ster, Proxima Centauri, op een afstand van 4,3 ly. De afstanden binnen het zonnestelsel zijn dus veel kleiner dan die tussen het zonnestelsel en de dichtstbijzijnde ster.

In figuur 18 zie je een schematische weergave van het zonnestelsel. In het midden staat de zon. De planeten Mercurius, Venus, Aarde, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus draaien in banen om de zon. Verschillende planeten hebben een of meer manen. Daarnaast bevat het zonnestelsel ook kometen, meteoroiden en planetoïden.

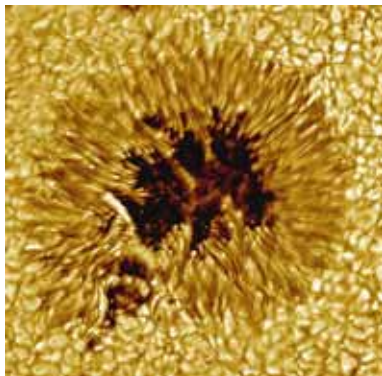


Figuur 18 – Een schematische doorsnede van het zonnestelsel. We zien vanaf de zon: Mercurius, Venus, Aarde, Mars, de planetoïdengordel, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus en Pluto.

In deze paragraaf bekijken we de zon en zeggen we kort iets over kometen en meteoroiden. In paragraaf 1.3 en 1.4 komen achtereenvolgens de acht planeten van ons zonnestelsel aan bod.

Onze ster: de zon

De zon is het grootste hemellichaam in het zonnestelsel en bevat ongeveer 98% van alle massa van het hele zonnestelsel. De zon is een bolvormige ster.



Figuur 19 – Een zonnevlek op het oppervlak van de zon.

De afstand tot de aarde bedraagt ongeveer 150 miljoen km en ze heeft een middellijn van 1,4 miljoen km. Dit zijn voor aardse begrippen gigantisch grote afstanden. Om een idee te krijgen van de geweldige omvang van de zon: er passen ongeveer 1,3 miljoen aardes in de zon.

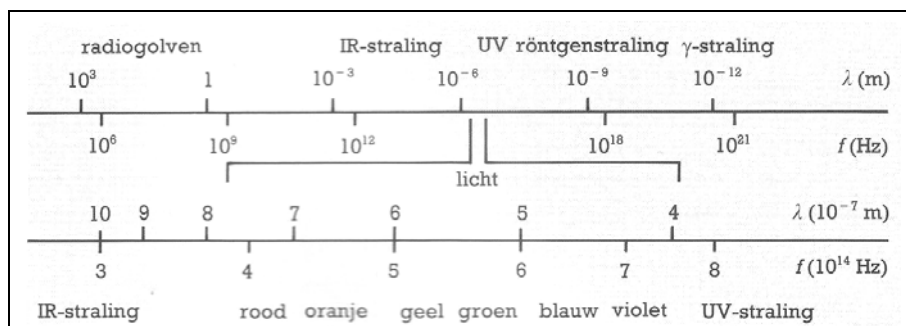
De buitenste, zichtbare laag van de zon heet de *fotosfeer* en heeft een temperatuur van ongeveer 6000 K. Deze fotosfeer vertoont vlekken. Zo'n *zonnevlek* bestaat uit een centraal donker gebied (*umbra*), omgeven door een iets lichter gestreepte band (*penumbra*). Een zonnevlek is niets anders dan een deuk in het zonnepoppervlak. Het oppervlak van een zonnevlek ligt enkele honderden kilometer lager dan dat van de rest van de zon. Bovendien is de temperatuur in het centrum aanzienlijk lager dan in de rest van de fotosfeer (ca. 4000 K). Het aantal zonnevlekken varieert nogal en kent een cyclus die ongeveer elf jaar duurt. Het eerstvolgende zonnevlekken-maximum wordt in 2012 verwacht. De oppervlaktetemperatuur van de zon is nog laag vergeleken bij de temperatuur die in de kern heerst: 15 miljoen K.

De zon schijnt nu al ongeveer 4,6 miljard jaar en beschikt over voldoende brandstof om nog ongeveer 5 miljard jaar door te gaan.

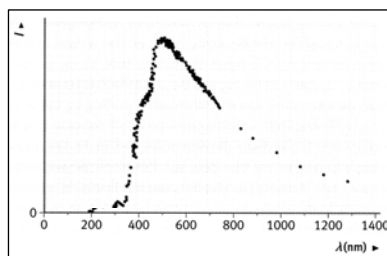
Stralingsspectrum

Het leven op aarde is mogelijk doordat de zon dagelijks een grote hoeveelheid energie uitstraalt. Deze energie bereikt de aarde als *elektromagnetische straling* van verschillende golflengten, voornamelijk tussen de 300 en 3000 nanometer (1 nanometer = 1 nm = 10^{-9} m). In het elektromagnetisch spectrum van figuur 20 is te zien dat de golflengtes van het zichtbare *licht* tussen ongeveer 400 nm (violet) en 800 nm (rood) liggen. Straling met golflengtes kleiner dan 400 nm noemen we *ultravioletstraling*. Bij straling met golflengtes groter dan 800 nm is sprake van *infraroodstraling* (of *warmtestraling*).

De verschillende soorten straling in het elektromagnetisch spectrum onderscheiden zich door hun golflengte of hun frequentie. Het verband tussen de golflengte λ (in m) en de frequentie f (in Hz) van elektromagnetische straling wordt gegeven door de formule $f = c/\lambda$. In deze formule is c de lichtsnelheid: $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s.



Figuur 20 – Het elektromagnetisch spectrum. Naast zichtbaar licht, ultravioletstraling en infraroodstraling bestaat dit spectrum ook uit radiogolven, microgolven, röntgenstraling en gammastraling.



Figuur 21 – Het stralingsspectrum van de zon geeft de intensiteit als functie van de golflengte van de uitgezonden straling.

De atmosfeer en het magnetisch veld van de aarde beschermen het leven op aarde tegen het grootste deel van de schadelijke ultravioletstraling die de zon naast licht en warmte uitstraalt.

In figuur 21 zie je het *stralingsspectrum* van de zon: de intensiteit als functie van de golflengte van de uitgezonden straling. De piek van dit spectrum ligt bij een golflengte van ongeveer 500 nm. Deze golflengte ligt in het zichtbare gebied van het elektromagnetisch spectrum, overeenkomend met een geel-

groene kleur. Omdat dit de overheersende kleur is in het zonlicht, hebben onze ogen zich daarop aangepast en zijn het meest gevoelig voor licht in dit golflengtegebied.

De combinatie van alle bijdragen van de verschillende kleuren in het spectrum van de zon geeft de indruk van geel-wit licht.

Kometen



Figuur 22 – De komeet Halley.

De *kometen* zijn kleine hemellichamen tussen de 1 en 50 km in doorsnede, die in banen rond de zon draaien. Ze bestaan uit ijs, gas en stof en worden daarom vaak ‘vuile sneeuwballen’ genoemd. Wanneer een komeet dicht genoeg bij de zon komt en warm wordt, smelt een deel van de materie waaruit ze bestaat en wordt de karakteristieke komeetstaart gevormd. De komeetstaart is altijd van de zon af gericht. Men neemt aan dat kometen restanten zijn uit de tijd waarin ons zonnestelsel werd gevormd.

De beroemdste komeet is de komeet van Halley (zie figuur 22). De Engelse astronoom Halley had ontdekt dat elke 76 jaar dezelfde komeet werd gezien. Hij voorspelde dat men een komeet zou zien in 1759. Halley heeft het bewijs van zijn gelijk helaas niet mogen meemaken. In 1986 heeft men de komeet voor het laatst gezien.

Meteoroiden



Figuur 23 – Meteorenzwerm (de Leoniden) gezien vanuit de ruimte.

Door ons zonnestelsel suist veel stof in banen rondom onze zon. Dit stof is meestal afkomstig van kometen. We noemen dit *meteoroiden*. Deze brokstukken zijn niet veel groter dan 30 cm en soms is het alleen maar gruis. Op het moment dat een meteoroïde onze atmosfeer binnendringt, noemen we dit verschijnsel een *meteoor*. Door wrijving met de atmosfeer neemt de temperatuur van een meteoor snel toe. Meteoren verbranden daardoor geheel of gedeeltelijk in onze atmosfeer. Je ziet dan heldere strepen aan de hemel, die in de volksmond ‘vallende sterren’ worden genoemd. Bij een heldere hemel kun je er gemiddeld wel een paar per uur zien. Tijdens een meteorenregen zie je er soms wel honderd per uur. Dit gebeurt jaarlijks op 12-14 augustus.

De meeste meteoren verbranden volledig en bereiken de aarde niet. Meteoren die groot genoeg zijn om het aardoppervlak bereiken, noemen we *meteorieten*.

Begrippen

Zonnestelsel
Planeet
Komeet
Meteoroïde
Meteoriet
Fotosfeer
Zonnevlek
Elektromagnetische straling
Golflengte
Frequentie
Stralingsspectrum
Licht
Ultravioletstraling
Infraroodstraling
Oppervlaktetemperatuur

Samenvatting

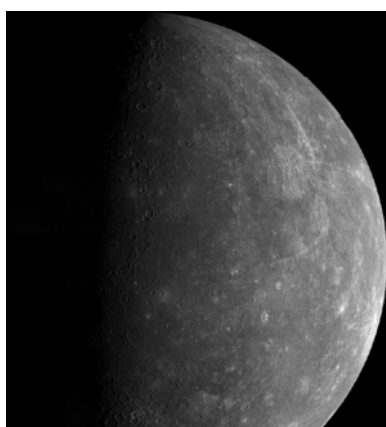
Het *zonnestelsel* wordt gevormd door onze zon en alle objecten in haar (gravitationele) invloedssfeer: de planeten en hun manen, planetoïden, kometen en meteoroiden.

De zon straalt energie uit in de vorm van *elektromagnetische straling*, waaronder *ultravioletstraling*, *licht* en *infraroodstraling*. De intensiteit van de uitgezonden straling hangt af van de *golflengte* of de *frequentie*. Voor de zon met een oppervlaktetemperatuur van ongeveer 6000 K heeft de piek in het stralingsspectrum een golflengte van ongeveer 500 nm. Dit is de golflengte van geel-groen licht. Het stralingsspectrum als geheel geeft de indruk van geel-wit licht.

1.3 De aardachtige planeten

Paragraafvraag	Wat zijn de kenmerken van de vier kleinste planeten?
----------------	--

Mercurius



Figuur 24 – Mercurius.

Mercurius is de binnenste planeet van ons zonnestelsel en draait in slechts 88 dagen rond de zon. Een jaar duurt er dus maar 88 dagen. Vanwege deze snelheid is hij genoemd naar Mercurius, de snelle bode van de Romeinse goden. Mercurius draait om zijn as in 59 dagen. Een dag duurt er dus ongeveer tweederde van een jaar.

Op het moment dat de Amerikaanse ruimtesonde Mariner 10 in 1974 passeerde, kwamen er foto's van het oppervlak beschikbaar. Het bleek dat Mercurius veel overeenkomsten vertoont met onze maan. Aan het oppervlak van Mercurius zien we een groot aantal inslagkraters en bergen. De oppervlaktetemperatuur van Mercurius varieert enorm. Doordat deze planeet zo dicht bij de zon staat, loopt de temperatuur overdag op tot boven de 400 °C. 's Nachts daalt de temperatuur tot beneden -180 °C, omdat er geen atmosfeer is die de warmte kan vasthouden. Mercurius is vanaf de aarde moeilijk te zien. Dit komt omdat hij vanaf de aarde gezien altijd dicht bij de zon staat. Vandaar dat Mercurius alleen 's avonds vlak na zonsondergang of 's ochtends vlak voor zonsopgang te zien is.

Venus



Figuur 25 – Venus.

Venus is de tweede planeet vanaf de zon. De planeet is vernoemd naar de godin van schoonheid en liefde. Venus draait in 225 dagen om de zon en rooteert in 243 dagen om haar as. Wat dat betreft is Venus dus uniek: een dag duurt er nog langer dan een jaar. Verder valt op dat Venus achterwaarts om haar as draait.

Deze planeet vertoont op het eerste gezicht de meeste overeenkomsten met de aarde. Beide hebben ongeveer dezelfde afmeting, massa en dichtheid. Maar Venus blijkt toch sterk van de aarde te verschillen. In 1962 toonde de ruimtesonde Mariner 2 aan dat het er zeer heet is en dat er van oceanen geen sprake kan zijn. De oppervlaktetemperatuur op Venus is de hoogste in het zonnestelsel: 480 °C. Dit wordt veroorzaakt door een op hol geslagen broeikaseffect in de zeer dikke atmosfeer. Aan het oppervlak van Venus is de druk van de atmosfeer 92 keer zo groot als die op zeeniveau op aarde. De planeetverkenner Venera 9 en Venera 10 maakten een zachte landing op Venus, maar bezweken door de hoge druk nadat ze niet meer dan één foto naar de aarde hadden kunnen sturen. De Venera 14 deed het beter: hij bezweek pas na een uur en gaf tientallen foto's door. Uit de foto's bleek dat het oppervlak bezaaid is met basaltachtig materiaal: gestolde lava of magma uit een vulkaan. De mooiste beelden zijn afkomstig van de ruimtesonde Magellan, die in 1994 vanuit zijn baan om deze planeet met radargolven bijna het hele oppervlak van Venus in kaart heeft gebracht.

Vanaf de aarde is Venus met het blote oog beter zichtbaar dan welke ster

ook: in de winter vlak voor zonsopkomst aan de oostelijke hemel, en in de zomer na zonsondergang aan de westelijke hemel. Als je weet waar je moet kijken, is Venus soms zelfs overdag zichtbaar. Dit komt omdat het dikke wolkendeck de meeste zonnestraling terugkaatst, wat zorgt voor een grote helderheid.



Figuur 26 – Opname van het oppervlak van Venus, gemaakt door de Venera 14. De bodem is bezaaid met stenen.

Aarde



Figuur 27 – De nachtzijde van de planeet Aarde. De 'lichtvervuiling' waarvan we in de steden bij het sterrenkijken last hebben is duidelijk zichtbaar.

De aarde is de derde planeet vanaf de zon, draait in 365 dagen rond de zon en in 1 dag om zijn as. De planeet is uniek in ons zonnestelsel, omdat het de enige planeet is waarop vloeibaar water voorkomt (70% van de planeet is bedekt met water) en omdat de aarde een zuurstofrijke atmosfeer heeft. Dit zijn de twee factoren die nodig zijn voor leven zoals wij dat kennen.

Geologisch gezien is de aarde zeer actief: er is sprake van vulkaanuitbarstingen, aardbevingen en gebergtevorming. Dit komt doordat de aardkorst verdeeld is in platen die op een gloeiend hete steenmassa – de *aardmantel* – drijven. De aardmantel is zo heet dat het gesteente zich gedraagt als een dikke vloeibare pap. Hierop drijven dus de platen, die tegen elkaar botsen, langs elkaar schuiven en van elkaar af bewegen. Dit proces van *platentectoniek* veroorzaakt vulkaanuitbarstingen, aardbevingen en gebergtevorming.

Op aarde bestaat een uniek kringloopsysteem van water. Water verdampt, valt elders neer als neerslag, stroomt naar zee en de kringloop begint opnieuw. Hierdoor wordt de hele aarde voorzien van water, noodzakelijk om het leven in stand te houden.

Tegenwoordig onderzoekt men de aarde vooral vanuit kunstmatige satellieten, die in een baan om de aarde gebracht worden. Hiermee heeft men bijvoorbeeld ontdekt dat er ook op de aarde kraters zijn: littekens van inslagen van planetoïden, kometen of soortgelijke objecten. De meeste van deze kraters zijn echter door toedoen van weer en wind verdwenen. Dit wordt erosie genoemd.

De aarde heeft, naast vele kunstmatige satellieten, een natuurlijke begeleider: de maan.

Mars



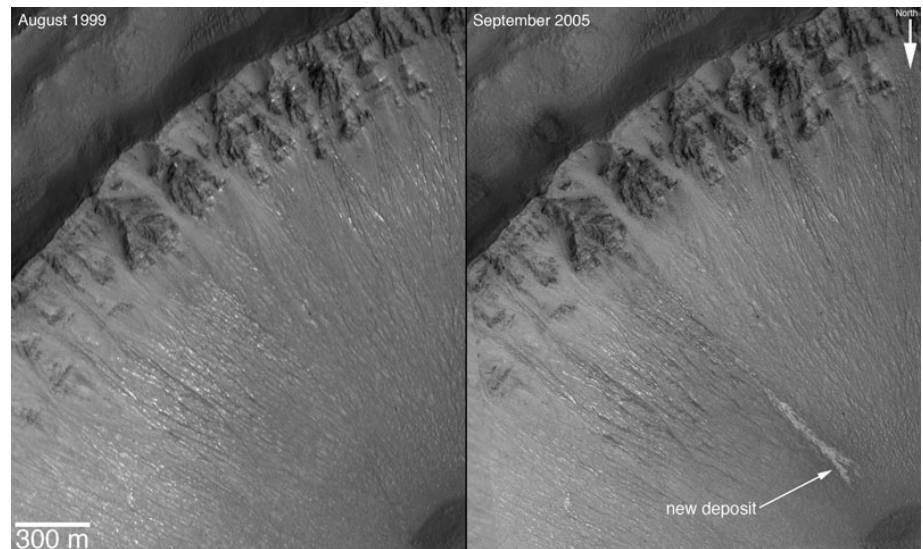
Figuur 28 – Mars.

Mars is de vierde planeet vanaf de zon. De planeet is vernoemd naar de Romeinse god van de oorlog. Dit vanwege zijn bloedrode kleur, die wordt veroorzaakt door roest. Mars wordt dan ook wel de 'rode planeet' genoemd.

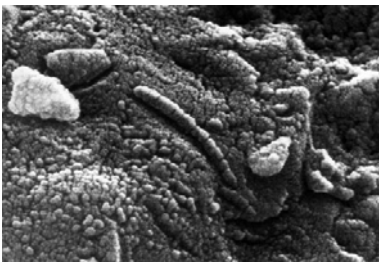
Eigenlijk heeft Mars meer met de aarde gemeen dan Venus: de dagen duren ongeveer even lang (op Mars ongeveer 41 minuten langer), er is een atmosfeer en er zijn vulkanen, bergen en ravijnen. Mars heeft ook een scheve draaias, waardoor er net als op aarde seizoenen zijn. De seizoenen duren op Mars wel bijna twee keer zo lang, omdat de planeet in 687 dagen rond de zon draait. Mars heeft poolkappen die met de seizoenen groeien of krimpen, en drooggevalle rivierbeddingen.

Mars is bezaaid met inslagkraters. De atmosferische druk is erg laag (ongeveer 0,7% van die op aarde) en de atmosfeer bestaat voor het grootste deel uit koolstofdioxide.

Mars heeft twee kleine manen: Phobos en Deimos.



Figuur 29 – In 2006 maakte de NASA bekend dat er stromend water op Mars gevonden was. De Mars Global Surveyor nam in een periode van zes jaar twee foto's van dezelfde plaats. Op de foto rechts is een geul te zien waar water zou stromen. Sommige wetenschappers zijn sceptisch en zeggen dat ook zand of stof kan stromen als een vloeistof en zo een geul kan uitslijten.

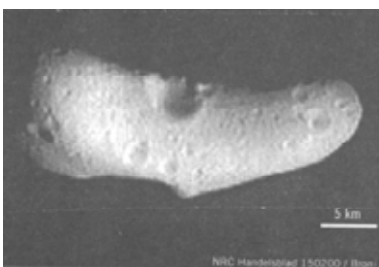


Figuur 30 – Mogelijke sporen van microben op een Marsmeteoriet.

Lange tijd heeft men gedacht dat er een vorm van leven zou kunnen bestaan op Mars. Dat is echter niet gevonden. De discussie over het bestaan van micro-organismen op Mars is daarentegen nog niet afgelopen. Deze discussie wordt gevoed door het onderzoek rond extremofielen: organismen die onder zeer extreme omstandigheden kunnen leven. Daarnaast claimden wetenschappers in 1996 dat zij op een Marsmeteoriet sporen van microben hadden gevonden (zie figuur 30). Andere wetenschappers verklaarden deze sporen op basis van chemische processen. Beide stellingen gelden als omstreden.

Er zijn een twintigtal succesvolle missies naar Mars uitgevoerd. In 1997 (de Mars Pathfinder) en 2004 (de Opportunity en de Spirit) hebben we zelfs op afstand bestuurbare karretjes op Mars laten rijden. Vele missies zullen ongetwijfeld nog volgen. Deze missies zouden antwoord kunnen geven op de vraag of Mars een leefomgeving voor organismen zou kunnen vormen.

De planetoïdengordel



Figuur 31 – De planetoïde Eros.

Als we van Mars in de richting van de grote planeten gaan, dan komen we onderweg de zogenaamde *planetoïdengordel* tegen. Planetoïden zijn kleine planeten, die alle in een baan met bijna dezelfde straal om de zon draaien. De grootste is Ceres met een diameter van circa 300 km en de kleinsten zijn niet groter dan een kiezelsteen. Planetoïden vormen het materiaal dat bij de vorming van het zonnestelsel is overgebleven.

Samenvatting

De aardachtige planeten zijn Mercurius, Venus, Aarde en Mars. Zij bevinden zich relatief dicht bij de zon, hebben allemaal een vast oppervlak met kraters en zijn relatief klein. De aarde is uniek vanwege de aanwezigheid van vloeibaar water en een zuurstofrijke atmosfeer.

De planeten Aarde en Mars hebben begeleiders in de vorm van manen.

De omlooptijd van deze planeten in hun banen rond de zon neemt toe naarmate hun afstand tot de zon groter is. De scheve draaias van de planeten Aarde en Mars veroorzaakt seizoenen.

1.4 De reuzenplaneten

Paragraafvraag	Wat zijn de kenmerken van de vier reuzenplaneten?
----------------	---

Jupiter



Figuur 32 – Jupiter met zijn rode vlek (linksonder). In juli 1994 sloegen brokstukken van de komeet Shoemaker-Levy 9, die door de zwaartekracht van Jupiter uit elkaar was getrokken, op de planeet in. De inslag veroorzaakte enorme littekens in de bewolking van Jupiter (rechtsonder).

Al in de oudheid – voor het begin van onze jaartelling – kenden astronomen de planeet Jupiter: de vijfde planeet vanaf de zon, en de grootste. De massa van Jupiter is 2,5 keer zo groot als die van alle andere planeten samen. Jupiter is zelfs zo groot dat we hem met het blote oog als een heldere ‘ster’ kunnen zien. Deze planeet is dan ook vernoemd naar de Romeinse oppergod.

Jupiter is een enorme gasreus die in 12 jaar rond de zon draait. De planeet heeft een kleine stenen kern (die overigens al twee keer zo groot is als de aarde), omgeven door een enorm dikke gaslaag. De zwaartekracht van Jupiter is zo groot dat de gaslaag wordt samengeperst tot vast en vloeibaar metallisch materiaal dat op aarde alleen in laboratoria kan worden gemaakt.

Jupiter roteert in nog geen 10 uur om zijn as. Dat is zo snel dat de planeet bij de polen duidelijk is afgeplat en bij de evenaar uitstulpt. Op Jupiter zijn kleurrijke zones en banden te zien, die een enorm windsysteem vormen. De heldere zones bestaan uit opstijgend warm gas, terwijl de donkere banden uit dalend koeler gas bestaan. Deze hoge- en lagedrukgebieden veroorzaken enorme stormen. Op Jupiter is ook een grote rode vlek zichtbaar (zie figuur 32). Dit is een enorme wervelstorm, die al meer dan 300 jaar woedt. Hij is zo groot dat er twee aardes in zouden passen.

Toen Galilei in 1610 voor het eerst zijn zelfgebouwde telescoop op Jupiter richtte, ontdekte hij vier lichtpuntjes. Nader onderzoek wees uit dat hij vier grote manen van Jupiter had ontdekt: Io, Ganymedes, Callisto en Europa. Inmiddels zijn er nog veel meer manen van Jupiter ontdekt, maar de grootste vier worden nog steeds de Galileïsche manen genoemd. Ze draaien met enorme snelheden rond Jupiter.

Eén van de verrassingen van het bezoek van de ruimtesondes Voyager 1 en 2 in 1978 en 1979 was dat ook Jupiter een ringensysteem blijkt te hebben, net als de planeet Saturnus. De ringen zijn echter te zwak om vanaf de aarde waar te nemen.

Saturnus



Figuur 33 – Saturnus.

Ook Saturnus – de zesde planeet vanaf de zon – kende men al in de oudheid. Het is na Jupiter de grootste planeet van ons zonnestelsel, en de laatste planeet die vanaf de aarde nog goed met het blote oog te zien is. De planeet is vernoemd naar de Romeinse god van de landbouw en de oogst.

Saturnus is bekend om zijn ringensysteem. De ringen werden voor het eerst waargenomen door Galilei in 1610. Eerst dacht Galilei dat hij manen had ontdekt. De Nederlandse astronoom Huygens ontdekte later, met zijn betere telescoop, dat het ringen waren rond de planeet.

Door de opnames van de Voyager ruimtesondes in 1980 en 1981 is duidelijk geworden dat er niet één ring is, maar dat deze bestaat uit honderden concentrische ringen. De ringen bleken zeer dun te zijn, nog geen kilometer dik.

Ze bestaan uit stukken ijs en steen die als kleine manen in hun baan rond Saturnus draaien.

Saturnus heeft, net als de aarde, een gekantelde draaias, waardoor de aanblik van de planeet verandert in de 29 jaar waarin hij om de zon draait. Enkele jaren lang zijn de ringen majestueus uitgespreid en eenmaal per 14 jaar zien we ze bijna niet.

Saturnus is, net als Jupiter, een gasreus. Er zijn zones en banden te zien, en er woeden stormen met windsnelheden tot zo'n 1000 km/h. De planeet draait, net als Jupiter, zo snel dat ze afgeplat is bij de polen en uitstulpt bij de evenaar.

Saturnus heeft op dit moment zestig manen. Het exacte aantal manen van Saturnus zal nooit vastgesteld kunnen worden, omdat elk brokstuk van de ringen zich in een baan rond de planeet beweegt en technisch gezien ook als een maan beschouwd kan worden. Het is moeilijk om een onderscheid te maken tussen een kleine maan en een groot brok van de ringen. De grootste maan is Titan, die in het bezit is van een atmosfeer. Deze atmosfeer is onderzocht door de ruimtesonde Huygens, die in 2005 op Titan is geland. De buitenste maan Phoebe beweegt de andere kant op als alle andere manen van Saturnus.

Uranus

Op Uranus – de zevende planeet vanaf de zon – kunnen vanaf de aarde niet veel details worden gezien. Slechts een paar wolken zijn zichtbaar in de methaانبlauwe atmosfeer. Uranus is vernoemd naar de Romeinse god van de hemel.

Uranus is de derde gasreus in ons zonnestelsel, met een omlooptijd van 84 jaar. De planeet is kleiner dan Saturnus, maar wel veel groter dan de aarde. De planeet beschikt over een vaag ringensysteem, dat vanaf de aarde niet goed zichtbaar is. Uranus werd in 1781 bij toeval door de astronoom William Herschel ontdekt. Het ringensysteem van Uranus werd pas in 1977 ontdekt, toen een ster die achter Uranus langs ging vlak voordat hij achter de planeet verdween begon te knipperen. Het licht van de ster werd door het ringensysteem tegengehouden.

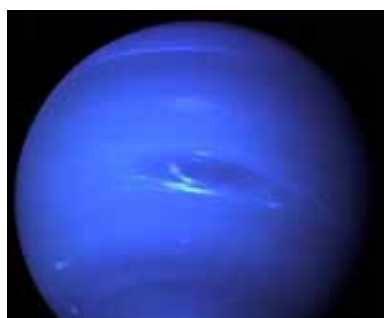
Met Uranus is iets bijzonders aan de hand. De planeet ligt namelijk op zijn zij: de draaias is ongeveer 90° gekanteld. Hierdoor staat de planeet met haar polen naar de zon toegekeerd, en is het er op de polen nog warmer dan op de evenaar.

William Herschel ontdekte ook twee manen bij deze planeet. Sinds de passage van de Voyager 2 in 1986 weten we dat het er minstens vijftien zijn. Dit zijn ijsachtige, met kraters bedekte manen.



Figuur 34 – Uranus.

Neptunus



Figuur 35 – Neptunus.

Neptunus is de achtste planeet vanaf de zon en de vierde gasreus in ons zonnestelsel. De planeet ziet er blauwachtig uit. Neptunus is vernoemd naar de Romeinse god van de zee.

Neptunus werd in 1846 ontdekt door de Duitse astronomen Johann Galle en Heinrich d'Arrest, op aanwijzing van de Engelsman John C. Adams en de Fransman Urbain LeVerrier – meer daarover in hoofdstuk 3.

Neptunus heeft een omlooptijd van 165 jaar. De planeet roteert, net als de andere gasreuzen, zeer snel. In ruim 19 uur draait de planeet om zijn as. Toen de ruimtesonde Voyager 2 in 1989 langs de planeet ging, bleek dat de planeet veel actiever was dan Uranus. Er woeden stormen, waarvan de grootste bekend staat als de 'grote donkere vlek' (zie figuur 35) – vergelijkbaar met de grote rode vlek op Jupiter. Er worden windsnelheden bereikt

Extra

Misschien heb je bij dit overzicht van de planeten gedacht: 'Het waren er toch negen?' Waar is Pluto?

Pluto heeft in augustus 2006 de naam planeet verloren, door een aanscherping van de definitie 'planeet'. Pluto bevindt zich in een baan om de zon, heeft voldoende massa om in een bolvorm te zijn geperst door zijn eigen zwaartekracht, maar heeft zijn omgeving niet schoongeveegd van andere objecten. Dit is een voorwaarde om een planeet genoemd te worden. Pluto heeft de naam planeet dus verloren en wordt nu als een 'bruine dwerg' aangeduid.

van maar liefst 2000 km/h. Verder ontdekte de Voyager 2 dat de planeet een bescheiden ringenstelsel heeft.

Neptunus heeft acht bij ons bekende manen. De grootste maan van Neptunus is Triton. Op deze maan zijn nog werkende geisers, die stikstof hoog de lucht in spuiten. Verder zijn er polen van stikstofijs. De temperatuur op Triton is laag: ongeveer -235°C . Op Triton zijn dan ook ijsvlakten en ijsgebergten.

Samenvatting

De reuzenplaneten zijn Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus. Deze gasreuzen verschillen sterk van de aardachtige planeten. Ze bevinden zich verder van de zon, zijn behoorlijk groter van formaat en hebben geen vast oppervlak. Ze bestaan uit gas dat door de grote zwaartekracht van deze planeten voor een groot deel is samengeperst tot vast en vloeibaar materiaal. Aan het gasvormige oppervlak woeden zware stormen.

Elk van de vier gasreuzen heeft manen en een ringenstelsel. Het ringenstelsel van Saturnus is het duidelijkst te zien.

De omlooptijd van deze planeten in hun banen rond de zon neemt toe naarmate hun afstand tot de zon groter is.

Opgaven

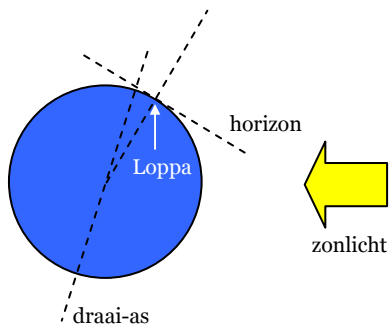
1.1 Zon, maan en sterren

7 Schijnbare beweging

Waarom noemen we de beweging van de zon ‘schijnbaar’?

8 Daglengte in Loppa

In figuur 10 zie je dat de zon op 21 juni in de stad Loppa niet ondergaat. In figuur 36 zie je een schets van de aarde op die dag met daarop de positie van Loppa.



Figuur 36

a Leg met behulp van figuur 36 uit dat de zon op 21 juni in Loppa niet ondergaat.

b Maak een schets van de aarde met daarop de positie van Loppa een half jaar later. Dus: op 21 december. Aanwijzing – Bedenk bij het maken van de schets dat de stand van de draai-as van de aarde in de loop van een jaar niet verandert.

c Is de zon vanuit Loppa op 21 december te zien? Leg uit waarom wel of niet.

9 Tijdopname

In figuur 12 zie je een tijdopname van de sterrenhemel vanaf de aarde. Bereken hoe lang de lens van de camera bij het maken van deze tijdopname open heeft gestaan.

10 Afstanden in het zonnestelsel

Afstanden in het heelal worden vaak in lichtjaren gemeten. Voor afstanden binnen het zonnestelsel rekenen we in lichtminuten of zelfs lichtseconden.

a Laat met een berekening zien dat het licht van de zon er ongeveer 8 minuten over doet om de aarde te bereiken. Gebruik Binas voor de benodigde gegevens.

b De afstand zon-aarde is dus 8 lichtminuut. Bereken op dezelfde manier de afstanden aarde-maan, zon-Jupiter en zon-Pluto. Kies daarbij de eenheid die het meest toepasselijk is: lichtseconde, lichtminuut, lichtuur, lichtdag of lichtjaar.

11 Eigenbeweging

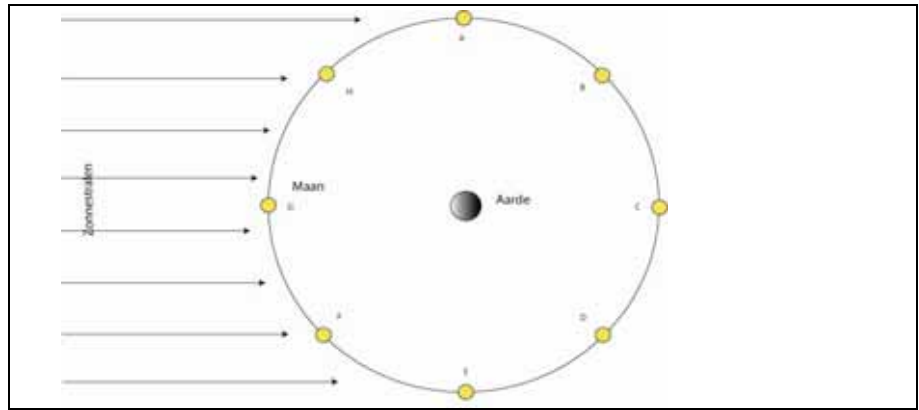
Wat verstaan we onder de *eigenbeweging* van sterren?

12 Maanfasen

In figuur 37 zie je de maanfasen. In figuur 38 zie je schematisch de baan van de maan rond de aarde met de richting waaruit het zonlicht komt. De tekening is ongeveer op schaal.



Figuur 37 – De maanfasen.



Figuur 38 – Een schematische weergave van de baan van de maan rond de aarde met de richting waaruit het zonlicht komt.

- Teken elk van de maanfasen bij de letters A tot en met H in figuur 38.
- Als de maan in positie C staat, lijkt de maan in de schaduw van de aarde te liggen. Toch kun je de maan dan zien. Leg uit waarom.

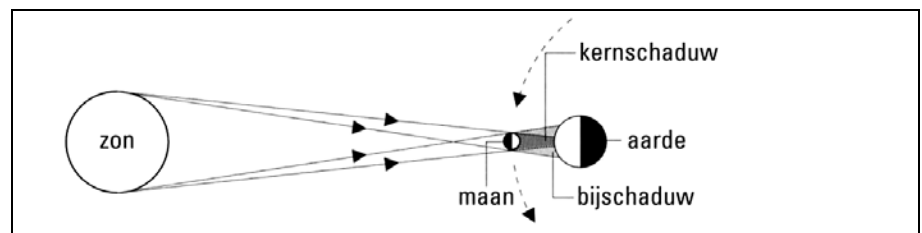
1.2 Het zonnestelsel

13 Zonsverduistering

Soms wordt de zon of de maan verduisterd, terwijl ze eigenlijk normaal had moeten schijnen. Een zonsverduistering ontstaat als de zon, de maan en de aarde op één lijn staan, zoals in figuur 40.



Figuur 39 – Zonsverduistering.



Figuur 40 – De positie van de zon, de maan en de aarde bij een zonsverduistering.

In figuur 40 zijn twee gebieden aangegeven: de *kernschaduw* en de *bijschaduw*.

- Vanuit welk van deze twee gebieden op aarde is de zon helemaal niet te zien? En hoe zie je de zon vanuit het andere gebied?

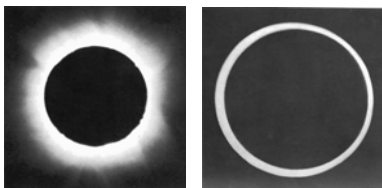
In figuur 41 zie je twee zonsverduisteringen: een volledige en een ringvormige zonsverduistering.

- Betekent dit dat de zon en de maan (ongeveer) even groot zijn? Leg uit waarom wel of niet.
- Hoe kan het dat bij de ene zonsverduistering nog een ring van de zon te zien is en dat bij de andere zonsverduistering de hele zon bedekt wordt?

14 Maansverduistering

In figuur 43 zie je de positie van de zon, de maan en de aarde bij een maansverduistering. Bij een maansverduistering beweegt de maan door de kernschaduw van de aarde.

- Leg met behulp van figuur 43 uit dat een maansverduistering voor een groot deel van de wereldbevolking te zien is.
- De maan draait in een maand rond de aarde. Dan zou je verwachten dat er elke maand een maansverduistering te zien is. Leg uit waarom dat niet het

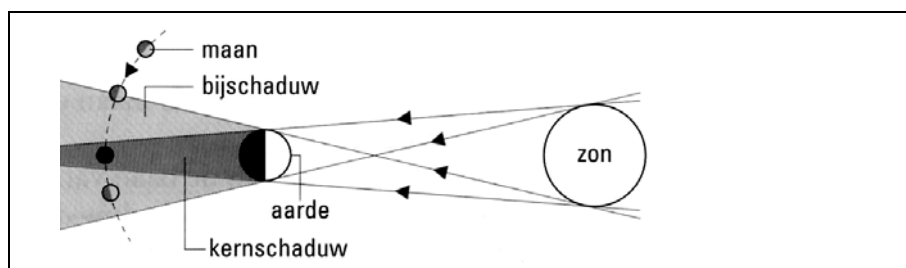


Figuur 41 – Een volledige zonsverduistering (links) en een ringvormige zonsverduistering (rechts).



Figuur 42 – De maan tijdens een maansverduistering. Bij volledige verduistering heeft de maan nog een rode gloed.

geval is.



Figuur 43 – De positie van de zon, de maan en de aarde bij een maansverduistering.



Figuur 44

15 Vliegtuig voor de ondergaande zon

In figuur 44 kruist een DC10 de ondergaande zon. De lengte van het vliegtuig bedraagt ongeveer 55 m.

Hoe ver (ongeveer) is het vliegtuig van je weg? Aanwijzing – Gebruik de middellijn van de zon en de afstand zon-aarde (zie Binas).

1.3 De aardachtige planeten

1.4 De reuzenplaneten

16 Radar

Radargolven kunnen ook door de mist heen dringen. Een schip met een radarinstallatie beschikt over een zender en een ontvanger. Als het schip een radarbundel in de richting van de wal uitzendt, dan wordt een deel van die bundel teruggekaatst. De teruggekaatste bundel wordt door de ontvanger opgevangen en verwerkt.

- Hoe kan de apparatuur nu de afstand tot de wal bepalen?
- Leg uit hoe de ruimtesonde Magellan het reliëf van Venus in kaart heeft gebracht (dus: hoogteverschillen op het oppervlak van Venus heeft gemeten).

17 Kraters

Leg uit waarom er op aarde zo weinig inslagkraters zijn in vergelijking met de andere planeten in het zonnestelsel. Gebruik zo nodig het internet.

18 Planeten

De planeten van ons zonnestelsel zijn in twee groepen te verdelen: de *aardachtige planeten* en de *reuzenplaneten*.

- Welke planeten zijn de aardachtige planeten? Waarom noemen we ze zo?
- Welke planeten zijn de reuzenplaneten? Waarom noemen we ze zo?
- Wat zijn de belangrijkste verschillen tussen deze twee groepen planeten?
- Vergelijk je antwoorden op deze drie vragen met je antwoorden bij oriëntatieopdracht 6.

Practicum

19 Een radarkaart maken

De planeet Venus is door een aantal ruimtesondes bezocht. De laatste was de ruimtesonde Magellan, die van 1990 tot 1994 in een baan rond Venus draaide en meer dan 98 % van het oppervlak van Venus in kaart heeft gebracht. Dat deed hij door in een vast patroon van meetpunten de afstand tussen de sonde zelf en het Venusoppervlak te meten met behulp van radargolven. In dit experiment gaan we de opnametechniek van de ruimtesonde nabootsen. Niet met radar, maar met ijzerdraadjes.

Doel van het experiment: ervaring opdoen met het in kaart brengen van een golvend landschap dat niet zichtbaar is.

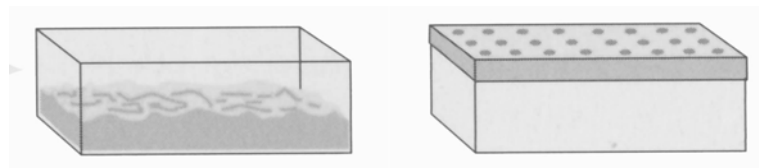
Benodigdheden: een schoenendoos, boetseerklei, millimeterpapier en een stukje ijzerdraad.

Uitvoering – Maak met de boetseerklei een mooi golvend landschap in de schoenendoos en plak de doos dicht met millimeterpapier.

Prik op een aantal plaatsen het ijzerdraad door het millimeterpapier en meet hoe diep het landschap onder het millimeterpapier ligt. Noteer je meetresultaten zo overzichtelijk mogelijk: steeds de plaats op het millimeterpapier, en de diepte van het kleioppervlak.

Uitwerking – Noteer de gemeten diepte per prikpunt op een nieuw blad millimeterpapier, steeds op dezelfde plaats als waar je geprikt hebt. Teken een aantal hoogtelijnen.

Komt jouw resultaat overeen met de werkelijkheid? Waar zitten afwijkingen?



Figuur 45 – Een schoenendoos met een landschap van boetseerklei (links). Op het deksel plak je millimeterpapier (rechts).

Groepsopdrachten

20 Kalenders

Ga naar de kalendersite (zie de internetsites op bladzijde 8). Kies een kalender en geef antwoord op de volgende vragen.

a Op de bewegingen van welke hemellichamen is jouw kalender gebaseerd?

b Hoe bepalen de kalendermakers op welke datum bepaalde feesten (zoals Ramadan, Pasen, Loofhuttenfeest) vallen?

21 Hemelobjecten

Maak een ‘portret’ van een object uit het zonnestelsel. Daarbij kun je denken aan de zon, één van de planeten, de maan of manen van een planeet, de ringen van een planeet, de planetoïdengordel, een komeet, meteoroiden enzovoort.

Zo’n portret bestaat uit ongeveer vijf foto’s met bij elke foto een bijschrift. De bijschriften moeten duidelijk aangeven wat er op de foto te zien is en wat daaraan bijzonder is.

Gebruik bij deze opdracht bijvoorbeeld de website van Astronomical Picture of the Day (zie de lijst met internetsites op bladzijde 8).

2 Zes reuzen in 2000 jaar

Hoofdstukvraag	Hoe is ons huidige beeld van het zonnestelsel tot stand gekomen?
----------------	--

Ons huidige beeld van het zonnestelsel heeft zich in ruim tweeduizend jaar ontwikkeld. In dit hoofdstuk wordt deze ontwikkeling toegelicht aan de hand van de bijdragen van zes bijzondere astronomen uit de westerse geschiedenis: Aristarchos van Samos (ca. 300 v Chr.), Claudius Ptolemaeus (ca. 120-180 na Chr.), Nicolaus Copernicus (1473-1543), Tycho Brahe (1546-1601), Johannes Kepler (1571-1630) en Galileo Galilei (1564-1642).

In hoofdstuk 3 bespreken we het werk van Isaac Newton (1643-1726), die met zijn gravitatiewet een verklaring kon geven voor de bewegingen in ons zonnestelsel.



Figuur 46 – Geocentrisch model van de kosmos uit Peter Apians Cosmographia uit 1539.

22 Van geocentrisch naar heliocentrisch wereldbeeld

In figuur 46 is het *geocentrisch wereldbeeld* weergegeven. In dat wereldbeeld staat de aarde in het centrum. Buiten de aarde draaien de hemellichamen die vastzitten aan kristallen schillen. De maan draait het dichtst om de aarde heen, daarna volgen Mercurius, Venus, de zon, Mars, Jupiter en Saturnus. Deze hemellichamen zijn perfect rond en glad en bewegen in perfecte cirkels. De buitenrand wordt gevormd door een schil waarin zich de sterren bevinden.

Dit geocentrisch wereldbeeld heeft eeuwenlang stand gehouden. Nicolaus Copernicus was de eerste die het geocentrische wereldbeeld ter discussie stelde en met een alternatief kwam: het *heliocentrisch wereldbeeld*, met de zon in het centrum en de planeten – waaronder de aarde – die daarom heen bewegen.

a Wat zijn de sterke en de zwakke punten van het geocentrisch wereldbeeld?

b Wat zijn de sterke en de zwakke punten van het heliocentrisch wereldbeeld?

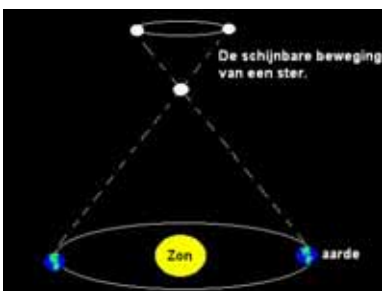
2.1 Sterrenkunde in het oude Griekenland

Paragraafvraag	Hoe keken de Grieken uit de Oudheid tegen de hemel aan?
----------------	---

Sterrenkunde in de oudheid



Figuur 47 – Eratosthenes (ca. 275- 195 v Chr.) was hoofdbibliothecaris van de beroemde bibliotheek in Alexandrië. De collectie van deze bibliotheek is helaas verloren gegaan.



Figuur 48 – Als we met een telescoop naar een ster kijken en we doen dat een half jaar later nog eens, dan lijkt de ster een heel klein beetje verschoven. We noemen dit *parallax*.

In de periode van 400 tot 200 jaar voor het begin van onze jaartelling kwamen in het oude Griekenland de wetenschappen tot ontwikkeling. De meeste sterrenkundigen in de Oudheid hielden zich bezig met het precies waarnemen van de positie van hemellichamen. Griekse sterrenkundigen vermoedden al dat de aarde een bol was. Zij zagen dat de schaduw van de aarde tijdens een maansverduistering altijd een cirkel was. Zij zagen dat de poolster hoger kwam te staan als je naar het noorden reisde. En ze namen waar dat als een schip naar zee ging eerst het schip verdween, daarna de zeilen en ten slotte de mast.

De Grieken waren zeer behendig met de toepassing van meetkunde. Zo kon Eratosthenes van Cyrene rond 250 v Chr. de omtrek van de aarde bepalen. Hij kwam uit op een omtrek van 40 duizend km. En dat ligt heel dicht bij de waarde zoals we die nu kennen.

Volgens Aristarchos van Samos (300 v Chr.) bestond de wereld uit een stelsel waarin de aarde om de zon draait. We noemen dit een *heliocentrisch wereldbeeld*. Helios is het Griekse woord voor zon. De geschriften van Aristarchos zijn verloren gegaan. We kennen zijn werk alleen via de werken van anderen die over hem schreven.

Toch waren de meeste mensen er in die tijd van overtuigd dat de aarde het middelpunt van het heelal was. De zon, de maan, de vijf toen bekende planeten en de sterren zouden allemaal in cirkels om de aarde draaien (zie figuur 49). We noemen dit een *geocentrisch wereldbeeld*. Geo is afgeleid van het Griekse woord geos, dat aarde betekent.

Het geocentrisch wereldbeeld had zijn sterke kanten. Allereerst lijkt het aannemelijk dat de aarde onbewegelijk in het midden van het heelal staat. Want als we de schijnbare bewegingen van de zon en de planeten bekijken, lijkt het of ze allemaal om ons heen draaien. Ten tweede zetten de Griekse denkers de volgende redenering op. Als de aarde om de zon zou draaien, dan zou dat de aarde in haar gang om de zon afwisselend dichterbij en verder weg van een 'onbeweeglijke ster' brengen. Als gevolg hiervan zouden we de sterren moeten zien bewegen (zie figuur 48). De Grieken zagen deze beweging niet. Ze trokken daaruit de conclusie dat het geocentrische model juist moest zijn. Het fenomeen van de schijnbare beweging van de sterren in de jaarlijkse gang van de aarde om de zon vindt echter wel degelijk plaats. Dat noemen we *parallax*. De beweging is echter zo minimaal dat de Grieken deze met het blote oog niet konden zien.

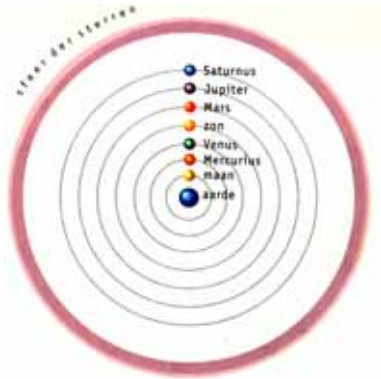
Het geocentrisch wereldbeeld bood geen verklaring voor de observatie dat de maan, de zon en de planeten soms verder weg leken te staan en soms weer

dichterbij. Dit werd echter geaccepteerd, en in de volgende eeuwen hield het geocentrisch wereldbeeld stand.

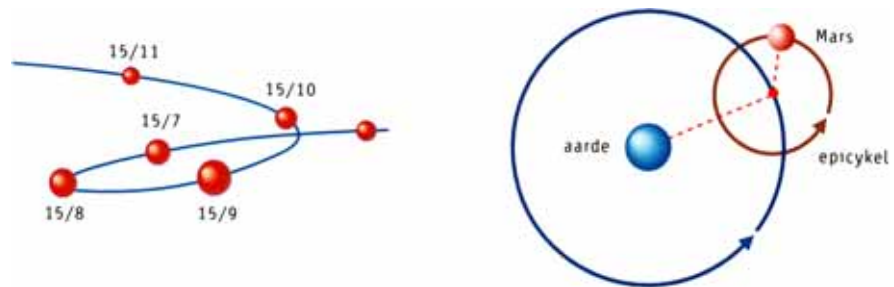
Ptolemaeus

Het geocentrisch wereldbeeld werd door de astronoom Ptolemaeus uitgewerkt in zijn boek *De Almagest*. Daarin vormde de cirkelbeweging het uitgangspunt. Volgens de Griekse filosoof Plato waren cirkels de ideale (vaak goddelijke) vormen. Vooral hemellichamen golden als volmaakt: ze kunnen geen gebreken vertonen, en bewegen eenparig (dus met constante snelheid) in volmaakte cirkels.

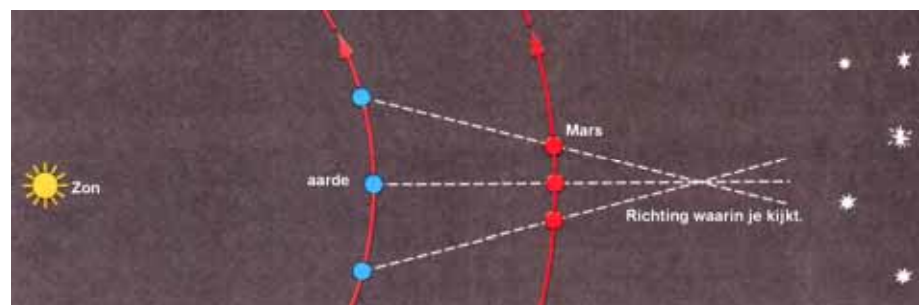
Ptolemaeus moest een verklaring bieden voor de observatie dat de maan, de zon en de planeten soms verder weg lijken te staan en soms weer dichterbij. Er werd nog een andere observatie gedaan: Mars voert af en toe een lusbeweging uit (zie figuur 50 en 51). Dat wil zeggen dat deze planeet ineens een stukje achteruit gaat en daarna weer vooruit. Om deze observaties te verklaren nam Ptolemaeus aan dat de planeten niet in een cirkelbaan om de aarde draaien, maar in zogenaamde epicykels: cirkels op cirkels. De planeten zouden naast hun ideale cirkelbeweging om de aarde nog een tweede cirkelbeweging uitvoeren (zie figuur 50).



Figuur 49 – Het wereldbeeld van Ptolemaeus.



Figuur 50 – De lusbeweging van Mars (links) werd door Ptolemaeus verklaard met een epicykel (rechts).



Figuur 51 – De verklaring voor de lusbeweging van Mars met het heliocentrisch wereldbeeld. Als de aarde de langzamer bewegende planeet Mars inhaalt bij haar gang rond de zon, lijkt het alsof Mars terugbeweegt. Dit is te zien op de fotoserie van Mars (links), opgenomen met tussenpozen van steeds een week.

Het stelsel van Ptolemaeus kon de hemelverschijnselen redelijk nauwkeurig beschrijven en voorspellen. Het sloot ook goed aan bij het wereldbeeld van het christendom, met de aarde als het middelpunt van alles. Op den duur kwam men echter steeds meer problemen tegen die met het stelsel van Ptolemaeus niet verklaard konden worden. Men hield er echter op bijbelse gronden toch aan vast. Kritiek op het geocentrisch wereldbeeld stond gelijk aan kritiek op de bijbel. Die kritiek was volgens de kerk niet geoorloofd. Daarom kon het wereldbeeld van Ptolemaeus zo'n 1500 jaar lang overeind blijven. Daarna was het Copernicus die de discussie over het geocentrische en het heliocentrische wereldbeeld weer nieuw leven inblies.

<i>Begrippen</i>	<i>Samenvatting</i>
Heliocentrisch wereldbeeld Geocentrisch wereldbeeld Parallax	Het <i>geocentrisch wereldbeeld</i> gaat uit van een stelsel met de aarde als middelpunt voor de beschrijving van hemelverschijnselen. Het <i>heliocentrisch wereldbeeld</i> gaat uit van een zonnestelsel met de zon in het middelpunt.

2.2 Naar een heliocentrisch wereldbeeld

Paragraafvraag	Hoe kwam er verandering in het geocentrische wereldbeeld?
----------------	---

Renaissance

Voor de mens in de Middeleeuwen was godsdienst heel belangrijk. Omdat het leven op aarde voor verreweg de meeste mensen armoedig was, keken ze uit naar het leven in de hemel. De kerk bepaalde aan welke voorwaarden je gedrag moest voldoen om in de hemel te komen. Hierdoor kon zij een grote macht uitoefenen op de mensen. Docenten aan de universiteiten moesten uitgaan van wat de kerk voorschreef. Wie dat niet deed, kon problemen krijgen.

In Italië hadden zich belangrijke steden ontwikkeld. In de vijftiende eeuw ontstond daar een beweging van geleerden, kunstenaars en rijke lieden met een interesse in kunst en wetenschap. Later voegden zich ook edellieden en vorsten bij deze beweging. Omdat er in hun land zoveel restanten waren van de cultuur van de oude Grieken en Romeinen, namen zij deze als voorbeeld voor een andere manier van denken. Oude geschriften werden opnieuw bestudeerd. Zo ontstond de *renaissance*: de wedergeboorte van de klassieke cultuur.

De wetenschappelijke revolutie

Deze beweging zou zich in de loop van de vijftiende en zestiende eeuw over heel Europa uitbreiden. Maar de natuurwetenschap van de klassieke oudheid stond in de Middeleeuwen op een dood spoor. Aan het begin van de Renaissance moest de natuurwetenschap zich dan ook opnieuw ontwikkelen. Deze ontwikkeling heet de *wetenschappelijke revolutie*.

Een belangrijk kenmerk van deze wetenschappelijke revolutie was een nieuwe manier van onderzoeken van de natuur. Daarin waren de volgende elementen belangrijk: *observeren* (waarnemen, kijken wat er gebeurt), *experimenteren* (proeven doen) en *redeneren* (nadenken over wat er is gebeurd, conclusies trekken uit observaties en experimenten).

Deze nieuwe manier van onderzoeken van de natuur leidde tot een sterke toename van kennis en tot technische toepassingen van die kennis.



Het wereldbeeld van Copernicus

Figuur 52 – Het wereldbeeld van Copernicus.

In 1543 verscheen het boek *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (in het Nederlands: *Betreffende de Omwentelingen van de Hemellichamen*) van de Poolse geestelijke Nicolaus Copernicus. In dat boek beschrijft Copernicus een wereldbeeld waarbij de zon in het midden van het heelal staat en waarin de planeten Mercurius, Venus, Aarde, Mars, Jupiter en Saturnus om de zon draaien. De maan vormt een uitzondering: deze draait om de aarde.

Copernicus was zich ervan bewust dat zijn model niet goed zou vallen bij de

kerk. Hij riskeerde een aanklacht wegens ketterij. Daarom stelde hij de publicatie van zijn boek uit tot aan het eind van zijn leven.

Copernicus was geen waarnemer, maar wel een goed wiskundige. Hij zag in dat men, door de zon een centrale plaats toe te kennen, het banenstelsel van de planeten aanzienlijk overzichtelijker en eenvoudiger kon maken. Doordat hij echter niet afstapte van het uitgangspunt van 'volmaakte' cirkelbanen, bleven epicykels een onmisbaar onderdeel van zijn stelsel.

De waarnemingen van Tycho Brahe

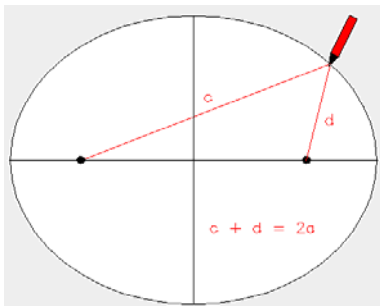


Figuur 53 – Het observatorium van Brahe.

De Deense edelman Tycho Brahe was een fel bestrijder van de denkbeelden van Copernicus. Omdat echter duidelijk was dat het oude stelsel van Ptolemaeus zwakheden vertoonde, verving hij dit door een eigen stelsel. Dat stelsel was een soort compromis tussen de twee theorieën van zijn grote voorgangers. Zijn belangrijkste bijdrage lag echter op het gebied van de waarnemingen.

Tycho Brahe ging bij zijn waarnemingen zeer wetenschappelijk en nauwkeurig te werk. In de periode van 1575 tot 1595 stelde hij een sterrencatalogus op die alle voorgaande in nauwkeurigheid overtrof. Bovendien voerde hij een groot aantal exacte plaatsbepalingen uit van de verschillende planeten. Na zijn overlijden kwamen deze gegevens in handen van zijn laatste assistent: Johannes Kepler.

De wetten van Kepler

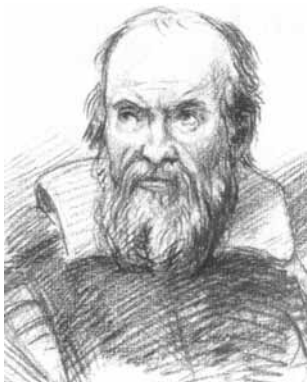


Figuur 54 – Een ellips maak je door op twee punten een touw vast te maken en met een pen in het touw een rondje te draaien.

Johannes Kepler vertrouwde volledig op de waarnemingen van Tycho Brahe. Met die waarnemingen liet hij zien dat de schijnbare baan van Mars niet in overeenstemming kon worden gebracht met een cirkelvormige baan in de ruimte, of men nu de aarde of de zon als middelpunt koos. Na lang zoeken vond hij in 1609 de oplossing van het probleem: de planeten beschrijven banen om de zon die niet cirkelvormig zijn maar elliptisch. Een *ellips* is een gerekte cirkel, ongeveer zoals de doorsnede van een ei. Zo'n ellips is wiskundig exact te beschrijven (zie figuur 54).

Aan de hand van de waarnemingen van Tycho Brahe kwam Kepler ten slotte tot de drie beroemde wetten van de planetenbeweging welke zijn naam dragen. De eerste wet van Kepler zegt dat alle planeten zich rond de zon bewegen in elliptische banen. Dit geldt ook voor alle andere objecten, zoals planeetoiden, kometen en meteoroiden die een baan volgen in het zonnestelsel. De andere twee wetten van Kepler komen aan de orde in hoofdstuk 3.

Galilei en de manen van Jupiter



Figuur 55 – Galileo Galilei (1564-1642).

Veertig jaar na het verschijnen van het boek *De Revolutionibus Orbium Coelestium* was Galileo Galilei net twintig. Hij was helemaal in de ban van de ideeën van Copernicus.

Galilei was in de eerste plaats wiskundige en natuurkundige, werkzaam aan de universiteiten van Padua en Pisa. Op die gebieden heeft hij veel baanbrekend werk verricht. Dat Galilei ook een grote rol heeft gespeeld in de historie van de sterrenkunde, had te maken met zijn nieuwsgierigheid naar natuurverschijnselen en met het nieuwe instrument dat hij zelf bouwde: de sterrenkijker. Daarnaast was Galilei gewend openlijk voor zijn mening uit te komen en ging hij een conflict met de gevestigde opvattingen niet uit de weg.

In 1609 hoorde Galilei dat een Hollander, Hans Lippershey uit Middelburg, een verrekijker had geconstrueerd. Aan de hand van de vage beschrijving van dit apparaat was hij in staat er zelf een te bouwen. Op 7 januari 1610 zag hij daarmee drie kleine heldere sterren in de buurt van de planeet Jupiter en



Figuur 56 – De eerste telescopen waarmee Galilei zijn waarnemingen deed.

Extra

De ontdekkingen van Galilei zijn van essentiële waarde voor de natuurwetenschap gebleken. Hij was de eerste natuurfilosoof die werkte vanuit veronderstellingen die hij vervolgens door waarnemingen en eigen experimenten probeerde te onderbouwen. Hij ontwierp instrumenten zoals de sterrenkijker en bouwde die in zijn eigen werkplaats. Galilei legde daarmee de grondslag voor de experimentele natuurkunde.

Begrippen

Wetenschappelijke revolutie

noteerde deze waarneming in zijn dagboek. Hij dacht dat het vaste sterren waren, maar de volgende avond zag hij dat ze zich verplaatst hadden. Zijn nieuwsgierigheid was gewekt en ongeduldig wachtte hij op de volgende nacht. Maar hij had pech, want het was bewolkt. De daaropvolgende avond zag hij slechts twee sterren. En dan, op 13 januari, zag hij voor de eerste keer vier sterren bij Jupiter.

Op grond van vele nachtelijke waarnemingen trok Galilei de conclusie dat de sterren in feite manen rond Jupiter waren. Hij was ervan overtuigd dat de vier manen van Jupiter een antwoord waren op de kritiek die men had op het wereldbeeld van Copernicus, namelijk dat het onmogelijk was dat de maan rond de aarde draait en tegelijk ook met de aarde in een baan om de zon beweegt. Hier waren vier manen die om Jupiter cirkelden, terwijl Jupiter zelf om de zon draaide.

De aanhangers van Ptolemaeus op de verschillende universiteiten verzetten zich echter hevig tegen zijn ideeën, niet in de laatste plaats omdat deze een bedreiging vormden voor hun reputatie. Galilei beschikte over een grote spreek- en schrijfvaardigheid en hij gebruikte deze zijn hele leven om zijn tegenstanders te bespotten. Dat deed hij zelfs als zijn eigen argumenten onjuist waren. Zo maakte hij vele vijanden.

Uiteindelijk lukte het zijn tegenstanders om de kerk op hun hand te krijgen. Galilei kreeg de vermaning zich voortaan van dergelijke ketterijen te onthouden. In 1623 werd zijn boek *Il Saggiatore* (in het Nederlands: *de Onderzoeker*) uitgegeven, waarin hij opnieuw de juistheid van het Copernicaanse stelsel verdedigde – niet als veronderstelling maar als vaststaand feit, hoewel hij hiervoor eigenlijk geen degelijk bewijs kon tonen. Hierop reageerde de kerk aanvankelijk niet.

Negen jaar later, toen zijn *Dialogo over de twee grote Wereldstelsels van Ptolemaeus en Copernicus* verscheen, brak het conflict opnieuw uit. Een proces kon niet uitblijven en in 1633 werd Galilei veroordeeld tot levenslang huisarrest. Hij moest al zijn theorieën over een bewegende aarde afzweren. Dat deed hij officieel. Het verhaal gaat dat hij daarna zachtjes heeft gezegd: ‘eppur si muove’ (in het Nederlands: ‘en toch beweegt ze’). Dat is waarschijnlijk niet waar, maar hij was er ongetwijfeld van overtuigd dat de aarde in beweging was, en dat zijn vonnis daar niets aan kon veranderen.

Samenvatting

De *wetenschappelijke revolutie* betekent een omwenteling in het denken over de natuur om ons heen. Ideeën worden niet meer aanvaard op grond van het geloof in een autoriteit (de kerk), maar worden pas geaccepteerd na het uitvoerig beproeven van deze ideeën door waarnemingen en experimenten. Een voorbeeld is de worsteling van Johannes Kepler om het heliocentrische wereldbeeld in overeenstemming te brengen met de waarnemingen van Tycho Brahe.

In deze wetenschappelijke revolutie speelde ook de techniek een belangrijke rol. Voorbeelden zijn de instrumenten waarmee Tycho Brahe de posities van sterren en planeten nauwkeurig kon bepalen, en de sterrenkijker waarmee Galileo Galilei nieuwe verschijnselen zoals de manen van Jupiter kon waarnemen.

Opgaven

2.1 Sterrenkunde in het oude Griekenland

23 De omtrek van de aarde

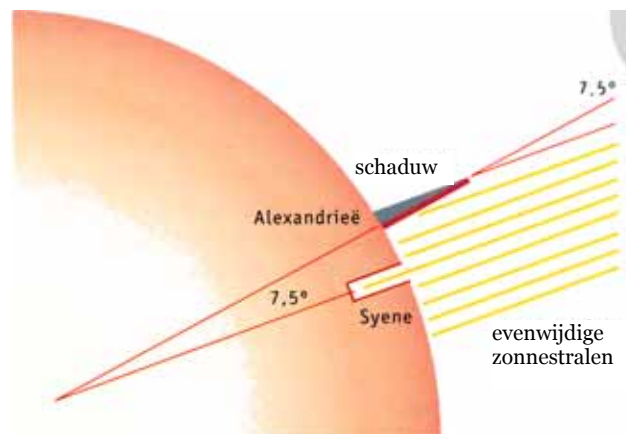
De Griekse wetenschapper Erathostenes uit Cyrene bepaalde de omtrek van de aarde. Hij deed daarvoor de volgende aannames: de aarde heeft een bolvorm, en de zon is zo ver weg dat alle stralen evenwijdig op de aarde vallen. In deze opgave volgen we zijn redenering.

In Syene (nu Aswan in Egypte) staat de zon op 21 juni op zijn hoogste punt recht boven je hoofd, zodat de lichtstralen loodrecht invallen (zie figuur 57). Er is in Syene dan geen schaduw. Tegelijkertijd is in Alexandrië dan wel een schaduw te zien. Syene en Alexandrië liggen op dezelfde lengtegraad (noord-zuid lijn).

- a De lichtstralen van de zon vallen bij Alexandrië in onder een hoek van $7,2^\circ$. Laat zien dat deze hoek $1/50$ deel van een cirkel is.
- b Hoeveel keer de afstand Alexandrië-Syene is dan de omtrek van de aarde?

De afstand Alexandrië-Syene schatte Erathostenes aan de hand van de reistijd van kamelen op 800 km.

- c Hoe groot is dan volgens Erathostenes de omtrek van de aarde?
- d Vergelijk de waarde volgens Erathostenes met de nu bekende omtrek van de aarde.



Figuur 57 – De methode van Erathostenes om de omtrek van de aarde te bepalen.

24 De bolvorm van de aarde

Omdat mensen de kromming van de aarde niet zomaar kunnen zien, werd lange tijd gedacht dat de aarde plat was. In de loop van de eeuwen vond men steeds meer argumenten voor het feit dat de aarde een bol is. Hieronder staan vijf van die argumenten. Bespreek elk argument afzonderlijk en geef aan of dit inderdaad aantoont dat de aarde niet plat is.

A Een zeilschip dat uit de haven vertrekt, zakt langzaam onder de horizon. Eerst is het schip niet meer zichtbaar en de mast verdwijnt als laatste. Dat is niet zo als de aarde plat is.

B In sommige landen is het dag, terwijl het op hetzelfde tijdstip in andere landen nacht is. Als de aarde plat was, dan was het in alle landen tegelijkertijd dag (of nacht).

- C Soms verdwijnt de maan in de schaduw van de aarde. Tijdens de maansverduistering zien we dat de schaduw van de aarde op de maanschijf gekromd is. Dus moet de aarde een bol zijn.
- D Ontdekkingsreizigers ontdekten dat ze rond de aarde konden varen zonder de randen te zien.
- E Foto's gemaakt vanuit de ruimte laten zien dat de aarde een bol is.

25 De dagelijkse beweging van de zon

Zowel het geocentrisch als het heliocentrisch wereldbeeld geven een verklaring voor de dagelijkse beweging van de zon. Welke verklaringen zijn dat?

26 Heliocentrisch wereldbeeld

Hieronder staan drie argumenten tegen een aarde die in een heliocentrisch wereldbeeld rond de zon beweegt en om zijn as draait. Weerleg elk van deze argumenten.

- A Je voelt dat de aarde vast staat en niet door de ruimte gaat of om zijn as draait.
- B Als de aarde in een dag om zijn as draait, dan wil dat zeggen dat het oppervlak met hoge snelheid ronddraait. Waarom voelen we dan geen sterke wind?
- C Als we een voorwerp recht omhoog gooien, dan komt het weer in je hand terug. Maar als je met grote snelheid ronddraait, dan zou het een stuk achter ons landen, want we zijn een stuk verder gegaan toen dat voorwerp in de lucht was.

2.2 Naar een heliocentrisch wereldbeeld



Figuur 58 – Tekeningen van de maan door Galilei.

27 Kraters op de maan

Een van de eerste waarnemingen die Galilei met zijn telescoop deed waren de kraters op de maan. De tekeningen in figuur 58 zijn door Galilei gemaakt. Hij heeft de schaduwgebieden op de rand van licht en donker wat vergroot getekend.

- a Leg uit hoe je uit deze schaduwen kunt afleiden dat er kraters op de maan zijn.
- b Waarom was de ontdekking van de kraters op de maan in strijd met het geocentrisch wereldbeeld?

28 De manen van Jupiter

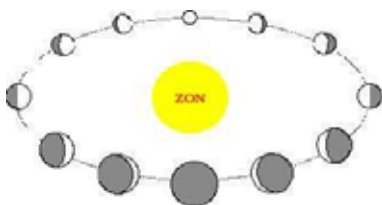
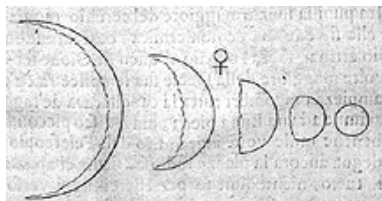
Toen Galilei zijn telescoop op Jupiter richtte, ontdekte hij vier heel kleine lichtpuntjes. Hij besloot deze lichtpuntjes een aantal weken te observeren. In zijn logboek schreef hij onder andere de volgende waarnemingen:



Figuur 59 – De waarnemingen van Galilei aan de lichtpuntjes bij Jupiter.

De lichtpuntjes verplaatsen zich en komen na een bepaalde periode weer op dezelfde plaats terug en dat patroon herhaalt zich. [...] Soms zie ik vier lichtpuntjes, het andere moment maar twee of drie. Heel vreemd... [...] De lichtpuntjes lijken zich allemaal op één horizontale lijn te bewegen.

- a Wat waren dat voor lichtpuntjes die zich rond de planeet Jupiter bevonden?
- b Waardoor zag Galilei de ene keer vier lichtpuntjes en het andere moment maar twee of drie?
- c Waardoor liggen de lichtpuntjes steeds op één lijn?
- d Waarom was deze ontdekking in strijd met het geocentrisch wereldbeeld?



Figuur 60 – Waarnemingen van Galilei aan Venus (boven) en zijn verklaring van de schijngestalten van deze planeet (onder).

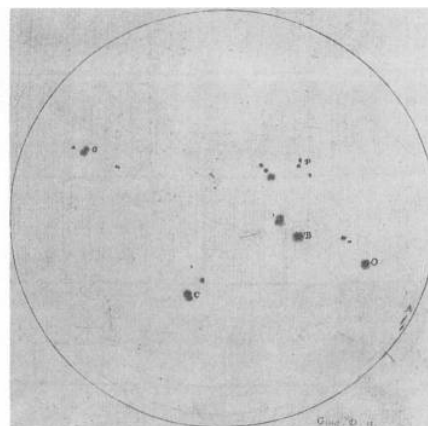
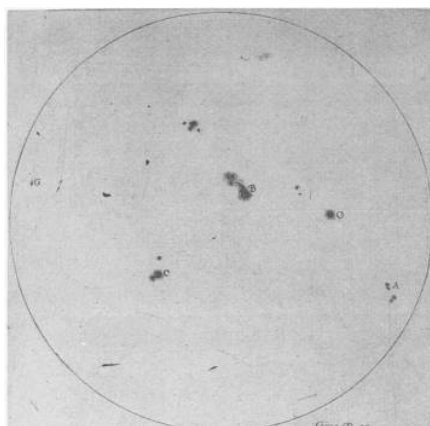
29 De schijngestalten van Venus

Bij het bekijken van Venus merkte Galilei op dat deze planeet net als de maan schijngestalten had. Merkwaardig was vooral dat de grootte van Venus steeds veranderde (zie figuur 60). Naarmate de schijngestalte 'voller' is, wordt Venus kleiner. Galilei kan die waarnemingen maar op één manier verklaren (zie figuur 60).

- Leg aan de hand van figuur 60 uit waardoor het sikkeltje van Venus veel groter is dan de 'volle' Venus.
- Kun je nu ook beredeneren of Venus dicht bij de zon staat dan de aarde, of juist verder weg? Zo ja: hoe?
- Waarom was deze ontdekking in strijd met het geocentrisch wereldbeeld?

30 Vlekken op de zon

Galilei deed ook waarnemingen aan de zon. Hij keek natuurlijk niet door een telescoop rechtstreeks naar de zon, maar hij gebruikte de telescoop om een projectie van de zon op een stuk papier te maken. Op die manier zag hij donkere vlekken, maar hij wist niet zeker of de vlekken op de zon zaten of dat het donkere voorwerpen of bijvoorbeeld wolken waren die tussen de aarde en de zon bewogen.



Figuur 61 – Waarnemingen van Galilei aan de zon.

De door Galilei waargenomen donkere vlekken hebben de volgende eigenschappen:

- De vlekken bewegen zich van oost naar west over de zonneschijf.
 - Aan de rand van de zon bewegen de vlekken langzamer dan in het midden.
 - De vlekken die ter hoogte van de zonne-equator liggen, bewegen in ongeveer 25 dagen eenmaal om de zon.
 - De vlekken hebben geen constant patroon. De vlekken verdwijnen soms of komen spontaan op.
- Probeer aan de hand van de waarnemingen af te leiden dat de vlekken die Galilei zag op de zon moeten zitten.
 - Waarom was deze ontdekking in strijd met het geocentrisch wereldbeeld?

31 Geocentrisch wereldbeeld

- Welke verschijnselen in het zonnestelsel zijn in strijd met het geocentrisch wereldbeeld?
- Wat zijn de sterke punten van het heliocentrisch wereldbeeld?
- Vergelijk je antwoorden op deze twee vragen met je antwoorden bij oriëntatieopdracht 22.

- d Waardoor heeft het geocentrisch wereldbeeld zo lang stand gehouden?

Practicum

32 Jacobsstaf

Zoek op wat een Jacobsstaf is en bouw er zelf een. Meet daarmee de hoek tussen verschillende sterren aan de hemel. Bepaal ook hoeveel keer groter de maan aan de horizon is dan wanneer deze hoog aan de hemel staat.

33 Telescoop

Bouw zelf een telescoop.

Benodigheden: twee kartonnen kokers met verschillende diameter, een bolle lens (diameter 50 mm en brandpuntsafstand 40 cm of sterkte +2,5D) en een plat-bolle lens (diameter 25 mm en brandpuntsafstand 5 cm of sterkte +20 D). Het is geen probleem als je lenzen van enigszins afwijkende sterkte gebruikt.

Uitvoering – Bevestig de bolle lens aan een uiteinde van de breedste koker. Gebruik plakband of punaises. Let er op dat de lens recht voor de opening zit. Snij de koker af, zodat zijn lengte 30 cm is.

Bevestig de plat-bolle lens aan een uiteinde van de smalste koker, met de bolle kant naar buiten. Snij de koker af op 25 cm lengte.

Schuif de smalle koker in de brede, zodat de afstand tussen beide lenzen 45 cm is.

Dicht de opening tussen de kokers af met isolatieschuim, zodat je ze in en uit kunt schuiven om je kijker scherp te stellen.

Uitwerking – Test je telescoop door hem overdag als verrekijker te gebruiken.

Kijk nooit rechtstreeks naar de zon, ook niet door je kijker. Het zonlicht is zo fel dat je schade aan je oog kunt oplopen.

Gebruik je telescoop om waarnemingen te doen aan de sterrenhemel. Bedenk eerst een aantal interessante plekken aan de hemel om te bekijken. Gebruik daarvoor zo nodig de lijst met internetsites (zie bladzijde 8).

Groepsopdracht

34 Biografie

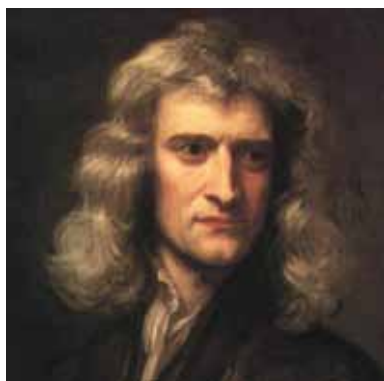
De grondleggers van het heliocentrisch wereldbeeld waren Nicolaus Copernicus, Tycho Brahe, Johannes Kepler en Isaac Newton.

Schrijf een korte biografie van één van deze wetenschappers naar keuze. 'Kort' betekent: maximaal 500 woorden. Ga in deze biografie zo mogelijk in op onder andere de volgende punten: nationaliteit, studie (wat en waar), belangrijke publicaties (boeken) en betekenis voor de ontwikkeling van de sterrenkunde.

3 Bewegingen in het zonnestelsel

Hoofdstukvraag

Wat is de gravitatiewet van Newton, en hoe zijn daarmee bewegingen in ons zonnestelsel te verklaren?



Figuur 62 – Isaac Newton (1643-1726).

Isaac Newton heeft met zijn theorie over de beweging van voorwerpen onder invloed van krachten (de mechanica) en zijn gravitatiewet – of de wet van de universele zwaartekracht – de basis gelegd voor ons huidige beeld van het zonnestelsel. Met deze theorie was Newton in staat de bewegingen van de hemellichamen (de planeten, manen en kometen) in ons zonnestelsel te verklaren en voorspellen.

Hoewel Newton al in 1666 de grondslag had gelegd voor zijn theorie van de mechanische beweging en de universele zwaartekracht, duurde de publicatie hiervan tot 1687. In dat jaar verscheen zijn beroemde werk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (in het Nederlands: *De Wiskundige Beginselfen van de Natuurfilosofie*). Door onder andere deze publicatie werd Newton de leidinggevende natuurfilosoof van de zeventiende eeuw.

35 De beweging van de planeten

In Binas tabel 31 staan gegevens over de planeten van ons zonnestelsel. In die tabel staan onder andere de afstand r tot de zon en de omlooptijd T rond de zon.

a Zet in een diagram de omlooptijd T (verticaal) uit tegen de afstand r (horizontaal) van de verschillende planeten. Teken in dit diagram met een kromme lijn het verband tussen T en r .

De afstand r tot de zon is de straal van de (cirkel)baan van een planeet rond de zon. De snelheid v van een planeet in zijn baan rond de zon is dan te berekenen uit de omtrek van de (cirkel)baan en de omlooptijd:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

b Bereken de snelheid v waarmee elk van de planeten in zijn baan rond de zon beweegt. Zet in een diagram deze snelheid v (verticaal) uit tegen de afstand r (horizontaal) van de verschillende planeten. Teken in dit diagram met een kromme lijn het verband tussen v en r .

c Geef in woorden zo goed mogelijk weer wat het verband is tussen T en r (vraag a) en tussen v en r (vraag b).

d De verbanden tussen T en r en tussen v en r in de twee getekende diagrammen zien er – ondanks de kromme lijnen – vrij regelmatig uit. Zou dit toeval zijn, of zou er een verklaring voor die regelmaat moeten zijn?

3.1 De beweging van planeten

Paragraafvraag	Volgens welke wetten bewegen de planeten?
----------------	---

De *Principia* van Newton

Extra

De theorieën van Newton hebben tot 1905 ongewijzigd stand gehouden. Op dat moment publiceerde Albert Einstein zijn relativiteitstheorie, die de werkelijkheid beter weergeeft dan de mechanica van Newton. Het werk van Newton bleek echter binnen de relativiteitstheorie een heel goede benadering, waarmee veel gebeurtenissen uit het dagelijks leven goed beschreven kunnen worden.

Newtons belangrijkste werk is de *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, meestal kortweg de *Principia* genoemd. Dit boek heeft een grote invloed gehad op de ontwikkeling van de natuurkunde en de sterrenkunde.

De *Principia* bestaat in feite uit drie boeken, die zeer systematisch zijn opgebouwd. In de eerste twee boeken worden alle wetten en regels van de mechanica behandeld.

Het eerste boek begint met de drie bekende wetten van Newton. Deze wetten, en veel van wat daarna volgt, zijn niet allemaal door hem zelf ontdekt. Newton stond, zoals hij zelf zegt, 'op de schouders van reuzen.' De eerste twee wetten van Newton zijn voornamelijk gebaseerd op het werk van Galilei. Hij formuleert ze echter op een scherpere en betere manier. Alleen zijn derde wet is zo goed als zeker door Newton zelf bedacht. De gravitatiewet wordt in het laatste boek behandeld.

In het derde boek van de *Principia* paste Newton zijn theorieën en wetten die gelden voor aardse voorwerpen ook toe op de beweging van de maan, planeten en sterren. Dat was in zijn tijd een revolutionaire stap, omdat het gebruikelijke idee was dat voorwerpen op aarde aan totaal andere wetten onderworpen zijn dan de hemelse lichamen.

De wetten van Kepler

Satellitum tempore periodica,
 1d. 18h. 28¹/₂. 3d. 13h. 17¹/₂. 7d. 3h. 59¹/₂. 16d. 18h. 5¹/₂.
Differtia Satellitum à centro Jovis.

Ex Observatibus	1.	2.	3.	4.
Cassini	5.	8.	13.	23.
Borelli	5 ¹ / ₂ .	8 ¹ / ₂ .	14.	24 ¹ / ₂ .
Tooniet per Micromet.	5,51.	8,78.	13,47.	24,78.
Flamsteed per Micromet.	5,51.	8,85.	13,498.	24,113.
Flamsteed per Eclyp. Satell.	5,572.	8,816.	14,159.	24,802.
Ex temporibus periodicis.	5,572.	8,818.	14,168.	24,808.

Hypoth. VI. Planetas quatuor primarios Mercurium, Venerem, Martem, Jovem & Saturnum Orbibus suis Solem cingere.
 Mercurium & Venerem circa Solem revolvit ex eorum phasibus lunariis demonstratur. Plena facie lucentes ultra Solem fini sunt, dimidiata è regione Solis, falcata cis Solem; per dicum ejus ad modum macularum nonnunquam transeunt. Ex Martis quoque plena facie prope Solem conjunctionem, & gibbosa in quadraturis, certum est quod is Solem ambiat. De Jove etiam & Saturno idem ex eorum phasibus semper plenis demonstratur.
Hypoth. VII. Planetarum quatuor primarios, & (vel Solis circa Terram vel) Terrae circa Solem tempora periodica esse in ratione sesquialtera mediocrium distantiarum à Sole.

Figuur 63 – Een pagina uit de *Principia* over de beweging van planeten. De vertaling staat in de tekst hiernaast.

In figuur 63 staat een pagina uit de *Principia*. De vertaling van de laatste paragraaf op die pagina luidt als volgt:

Hypothese VII: Dat de eerste vijf planeten en de aarde [...] om de zon bewegen met een periode die zich verhoudt tot hun gemiddelde afstand tot de macht $3/2$.

Deze evenredigheid, door Kepler ontdekt, is nu bij alle astronomen bekend; want de periodes zijn hetzelfde en de afmetingen ook, of de zon nu om de aarde draait of de aarde om de zon. Wat betreft de meetresultaten van de omlooptijden, zijn alle astronomen het met elkaar eens. Maar de afmetingen van de banen zijn het nauwkeurigst bepaald door Kepler en Boulliau. De gemiddelde afstanden, die men kan berekenen uit de omlooptijden, verschillen nauwelijks van de waargenomen waarden.

In de bovenstaande hypothese uit de *Principia* noemt Newton een evenredigheid die ontdekt is door Kepler en die daarom tegenwoordig de *derde wet van Kepler* wordt genoemd. Hij merkt op dat deze evenredigheid geldt voor alle systemen in het zonnestelsel: Jupiter en zijn manen, Saturnus en zijn manen, de zon en zijn planeten, en de aarde en zijn maan.

Formules – Derde wet van Kepler

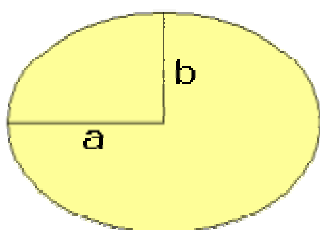
Volgens de *derde wet van Kepler* geldt voor de planeten die rond de zon draaien het volgende verband tussen hun baanstraal en omlooptijd:

$$\frac{r^3}{T^2} = K$$

Symbolen: In deze formule is r de gemiddelde baanstraal (in m) en T de omlooptijd (in s). De evenredigheidsconstante K heeft voor alle planeten die rond de zon draaien dezelfde waarde: $K = 3,36 \cdot 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$.

Geldigheid: Deze formule geldt niet alleen voor de planeten die rond de zon draaien, maar voor alle situaties waarin satellieten rond een grote massa draaien (zoals de manen rond Jupiter). In dat geval heeft de constante K echter een andere waarde.

Extra



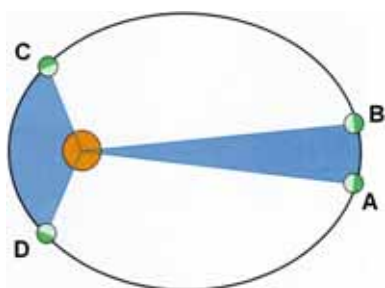
Een ellips lijkt op een doorsnede van een ei. De excentriciteit e van een ellips is:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Bij een cirkelbaan zijn a en b gelijk en is de excentriciteit dus nul. Als de baan bijna een cirkel is, zullen a en b weinig verschillen. De excentriciteit is dan klein.

Kepler heeft zijn 'derde wet' gevonden door te zoeken naar regelmatigheden in de waarnemingen van de planeetbanen. Newton laat in de *Principia* zien dat deze wet (ook) is af te leiden uit zijn bewegingswetten en zijn gravitatie-wet (zie paragraaf 3.2). Om Newton daarin te kunnen volgen, zullen we eerst de werkelijke beweging van een planeet vereenvoudigen tot een eenparige cirkelbeweging en daarna de eigenschappen en oorzaak van die beweging vaststellen.

De baan van planeten en andere objecten in het zonnestelsel is in het algemeen een ellips (zie paragraaf 2.2). De mate van gerektheid wordt de *excentriciteit* genoemd: hoe meer de baan is uitgerekt, des te groter is de excentriciteit. Voor de meeste planeetbanen is deze excentriciteit klein. Ter vereenvoudiging zullen we daarom in het vervolg steeds aannemen dat deze ellips-vormige banen in goede benadering als een cirkel kunnen worden voorgesteld.



Figuur 64 – De tweede wet van Kepler. Omdat de planeet dicht bij de zon sneller beweegt, bestrijkt de baanstraal even grote oppervlakken in even grote tijdsintervallen.

Extra – De wetten van Kepler

Voor de volledigheid volgen hier de drie wetten van Kepler:

- Eerste wet van Kepler: de planeten bewegen in ellipsvormige banen rond de zon.
- Tweede wet van Kepler: planeten bewegen sneller als ze zich dicht bij de zon bevinden. Een andere formulering van deze wet gaat aan de hand van figuur 64: als een planeet in dezelfde tijd van A naar B en van C naar D gaat, zijn de gearceerde oppervlakken even groot.
- Derde wet van Kepler: de derde macht van de gemiddelde baanstraal van een planeet is evenredig met het kwadraat van zijn omlooptijd rond de zon.

Eenparige cirkelbeweging

De cirkelbeweging kennen we ook op aarde. Alle bewegingen rond een vast middelpunt zijn cirkelbewegingen, bijvoorbeeld: een voorwerp dat aan een touw wordt rondgeslingerd, de wielen van een fiets, een draaimolen enzovoort. Een belangrijk kenmerk van de cirkelbeweging is dat de snelheid eenparig is. Dat betekent: in gelijke tijden legt het een voorwerp gelijke afstan-

den af. We kunnen ook zeggen dat de snelheid constant is, maar dat kan alleen als we kijken naar de grootte van de snelheid. De richting van de snelheid wordt gegeven door de raaklijn aan de cirkel (zie figuur 66 en 69). Deze richting verandert voortdurend. De richting van de snelheid is dus niet constant. Dit zal hieronder belangrijk blijken. We spreken samenvattend over de *eenparige cirkelbeweging*.

De tijd die een voorwerp (een planeet of bijvoorbeeld de wijzer van een klok) nodig heeft om een volledige omwenteling te maken, noemen we de *omlooptijd* of *periode*. De omlooptijd is bij een eenparige cirkelbeweging constant. Dit is logisch, want de grootte van de snelheid is constant. In de omlooptijd wordt een afstand afgelegd die gelijk is aan de omtrek van de cirkelbaan. De snelheid bij een eenparige cirkelbeweging is daarom gelijk aan omtrek van de cirkelbaan gedeeld door de omlooptijd. Deze snelheid noemen we de *baansnelheid*.

Formules – Baansnelheid

Voor de baansnelheid van een voorwerp dat een eenparige cirkelbeweging uitvoert geldt:

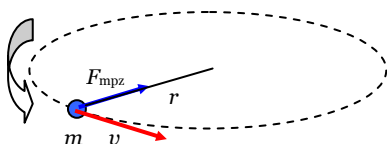
$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

Symbolen: In deze formule is v de baansnelheid (in m/s), r de straal van de doorlopen cirkelbaan ofwel de baanstraal (in m) en T de omlooptijd (in s).

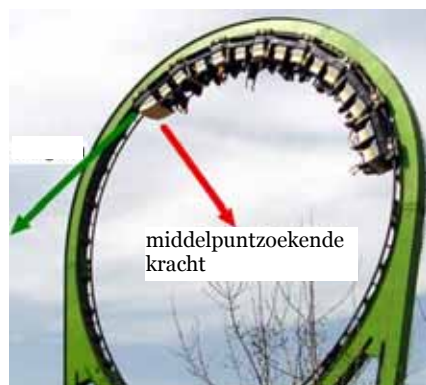
Middelpuntzoekende kracht



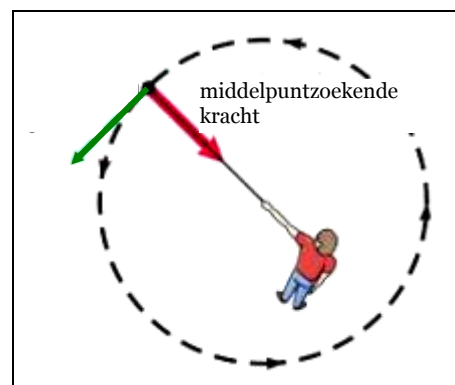
Figuur 65 – Een paard dat in een cirkel loopt, wordt altijd naar het midden getrokken. We noemen dat de middelpuntzoekende kracht.



Figuur 66 – Eenparige cirkelbeweging.



Figuur 67 – Cirkelbeweging in een achtbaan: terwijl de karretjes een looping maken, oefent de achtbaan een middelpuntzoekende kracht uit.

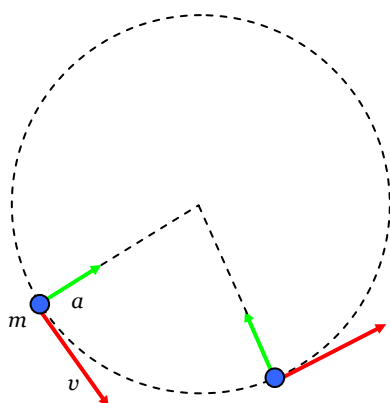


Figuur 68 – Als je een steen aan een touw rondslingert, oefen je een middelpuntzoekende kracht uit. Als je het touw loslaat, zal de steen in een rechte lijn verder bewegen.

Met de tweede wet van Newton kunnen we de middelpuntzoekende kracht beter begrijpen. Bij een eenparige cirkelbeweging is de grootte van de snelheid constant, maar de richting niet. Er is dus sprake van een snelheidsverandering. De tweede wet van Newton zegt in zo'n geval dat er sprake is van een versnelling, en dus van een kracht als oorzaak van die versnelling. Om een cirkelbaan te doorlopen is dus een resulterende kracht nodig, waarbij die kracht steeds wijst naar het middelpunt van de baan. Deze middelpuntzoekende kracht is nodig voor alle voorwerpen die een cirkelbeweging uitvoeren. De middelpuntzoekende kracht is goed te voelen als we een steen of ander zwaar voorwerp rondslingeren aan een touw. Op deze manier kom je erachter dat de kracht die uitgeoefend moet worden:

- groter is naarmate de baansnelheid groter is
- kleiner is naarmate de straal van de cirkelbaan groter is
- gericht is naar het middelpunt van de cirkel.

Deze eigenschappen van de middelpuntzoekende kracht staan samengevat in de volgende formule.



Figuur 69 – Een voorwerp dat een eenparige cirkelbeweging uitvoert, ondervindt een kracht en dus een versnelling in de richting van het middelpunt van de cirkel. De raaklijn aan de cirkelbaan geeft de richting van de snelheid.

Formules – Middelpuntzoekende kracht

De middelpuntzoekende kracht is gelijk aan de massa maal de versnelling die het gevolg is van de richtingsverandering van de snelheid. Newton liet zien dat deze versnelling gelijk is aan het kwadraat van de snelheid, gedeeld door de straal. Dan geldt dus voor de middelpuntzoekende kracht de volgende formule:

$$F_{\text{mpz}} = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Symbolen: In deze formule is F_{mpz} de middelpuntzoekende kracht (in N), m de massa (in kg) van het voorwerp, v de baansnelheid (in m/s) en r de straal (in m) van de doorlopen cirkelbaan.

De middelpuntzoekende kracht verandert alleen de richting en niet de grootte van de snelheid, omdat deze kracht loodrecht staat op de gevolgde baan.

De middelpuntzoekende kracht is niet een nieuw soort kracht naast de andere krachten op een voorwerp. De middelpuntzoekende kracht is de resulterende kracht op een voorwerp dat in een cirkelbaan beweegt.

De middelpuntzoekende kracht wordt bij de achtbaan (zie figuur 67) geleverd door het baanspoor, bij een steen aan een touw (zie figuur 68) door de spankracht in het touw en bij de draaiing van de aarde om de zon door de zwaartekracht van de zon. Over deze kracht meer in paragraaf 3.2.

Begrippen

Derde wet van Kepler
Eenparige cirkelbeweging
Middelpuntzoekende kracht
Omlooptijd
Baansnelheid
Baanstraal

Samenvatting

Voor de omlooptijd T van satellieten die in een cirkelbaan met een straal r rond een object met een grote massa bewegen geldt de derde wet van Kepler:

$$\frac{r^3}{T^2} = K$$

De baansnelheid v bij een eenparige cirkelbeweging met baanstraal r en omlooptijd T wordt gegeven door:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

Een eenparige cirkelbeweging vindt plaats onder invloed van een middelpuntzoekende kracht F_{mpz} . Deze kracht is gericht naar het middelpunt van de cirkelbaan, en staat dus loodrecht op de baansnelheid. De grootte van de middelpuntzoekende kracht hangt af van de massa m , de baansnelheid v en de baanstraal r :

$$F_{\text{mpz}} = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

De middelpuntzoekende kracht is de resultante van de krachten op het in een cirkelbaan bewegende voorwerp.

3.2 De gravitatiewet van Newton

Paragraafvraag	Hoe is met de gravitatiekracht van Newton de beweging van planeten en manen in het zonnestelsel te verklaren?
----------------	---

De gravitatiewet

Planeten voeren (in goede benadering) een eenparige cirkelbeweging uit. Er moet dus sprake zijn van een middelpuntzoekende kracht die ervoor zorgt dat de planeten in hun baan blijven. Volgens Newton is dat de *gravitatiekracht*.

De *gravitatiewet van Newton* stelt dat alle voorwerpen met massa in het heelal elkaar aantrekken. Deze kracht, die voorwerpen met massa op elkaar uitoefenen, is de gravitatiekracht. Op aarde kennen we deze kracht als de *zwaartekracht*. Voor de grootte van de gravitatiekracht geldt:

- Hoe verder de voorwerpen van elkaar verwijderd zijn, des te kleiner is de gravitatiekracht.
- Hoe groter de massa's van de voorwerpen zijn, des te groter is de gravitatiekracht.

Deze eigenschappen van de gravitatiekracht kunnen in een formule worden samengevat.

Formules – Gravitatiekracht

De grootte van de gravitatiekracht die twee voorwerpen op elkaar uitoefenen wordt gegeven door:

$$F_{\text{grav}} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Symbolen: In deze formule is F_{grav} de gravitatiekracht (in N), m en M zijn de massa's (in kg) van de twee voorwerpen en r is de afstand (in m) tussen de zwaartepunten van de twee voorwerpen. De constante G is de *gravitatieconstante* met een waarde van $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Voor de gravitatiekracht die twee bolvormige voorwerpen op elkaar uitoefenen geldt verder dat de richting van deze kracht samenvalt met de verbindinglijn tussen de twee middelpunten van de voorwerpen. Voor niet-bolvormige voorwerpen is dat de verbindinglijn tussen de twee zwaartepunten.

De *gravitatieconstante* kun je opvatten als de kracht waarmee twee massa's van elk 1 kg op een afstand van 1 m elkaar aantrekken. Uit de gegeven waarde van de gravitatieconstante zie je dat die kracht zeer klein is. Omdat de gravitatiekracht evenredig is met de massa, wordt deze kracht groot als ten minste één van de massa's groot is. Dus: als het gaat om de gravitatiekracht

tussen de zon en een planeet, of om de gravitatiekracht tussen de aarde en een voorwerp bij het aardoppervlak.

De gravitatiekracht tussen de aarde en een voorwerp bij het aardoppervlak kennen we als de zwaartekracht. In het rekenvoorbeeld zie je dat deze zwaartekracht en gravitatiekracht inderdaad dezelfde waarde hebben.

Valkuil

Let op het verschil tussen de gravitatieconstante G en de valversnelling g :

- G is de universele constante voor de sterkte van de zwaartekracht
- g is de gemeten versnelling als gevolg van de zwaartekracht van de aarde.

Rekenvoorbeeld

Voor de zwaartekracht F_z op een voorwerp dat zich bij het aardoppervlak bevindt geldt:

$$F_z = m \cdot g$$

In deze formule is m de massa van het voorwerp en g de valversnelling.

De zwaartekracht op een voorwerp met een massa van 1,00 kg is dus:

$$F_z = m \cdot g = 1,00 \cdot 9,80 = 9,80 \text{ N}$$

Voor de gravitatiekracht F_{grav} geldt in het algemeen:

$$F_{\text{grav}} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

In het geval van een voorwerp met een massa m bij het aardoppervlak is in deze formule M de massa van de aarde ($M_{\text{aarde}} = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) en r de afstand tussen het voorwerp en het midden van de aarde. Voor een voorwerp bij het aardoppervlak is deze afstand r gelijk aan de straal R van de aarde ($R_{\text{aarde}} = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$).

De gravitatiekracht op een voorwerp met een massa van 1,00 kg bij het aardoppervlak is dus:

$$F_{\text{grav}} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} = G \cdot \frac{m \cdot M_{\text{aarde}}}{R_{\text{aarde}}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1,00 \cdot 5,98 \cdot 10^{24}}{(6,38 \cdot 10^6)^2} = 9,80 \text{ N}$$

De berekening van de zwaartekracht en de gravitatiekracht op een voorwerp bij het aardoppervlak levert dus – zoals verwacht – dezelfde waarde op.

De valversnelling

De zwaartekracht en de gravitatiekracht op een voorwerp zijn dus dezelfde kracht. Als we de formules voor deze twee krachten aan elkaar gelijk stellen, vinden we een formule voor de valversnelling:

$$F_z = F_{\text{grav}} \rightarrow m \cdot g = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \rightarrow g = G \cdot \frac{M}{r^2}$$

Met deze formule is bijvoorbeeld de valversnelling bij het aardoppervlak te berekenen. In het rekenvoorbeeld zie je dat deze formule de bekende waarde van de valversnelling oplevert: $g = 9,80 \text{ m/s}^2$.

Rekenvoorbeeld

Voor de valversnelling g geldt in het algemeen:

$$g = G \cdot \frac{M}{r^2}$$

In het geval van de valversnelling van een voorwerp bij het aardoppervlak is in deze formule M de massa van de aarde ($M_{\text{aarde}} = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) en r de afstand tussen het voorwerp en het midden van de aarde. Voor een voorwerp bij het aardoppervlak is deze afstand r gelijk aan de straal R van de aarde ($R_{\text{aarde}} = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$).

De valversnelling van een voorwerp bij het aardoppervlak is dus:

$$g = G \cdot \frac{M}{r^2} = G \cdot \frac{M_{\text{aarde}}}{R_{\text{aarde}}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \cdot 10^{24}}{(6,38 \cdot 10^6)^2} = 9,80 \text{ m/s}^2$$

Dit is – zoals verwacht – de waarde voor de valversnelling die ook in Binas staat.

De gravitatiewet van Newton levert dus een valversnelling bij het aardoppervlak die in overeenstemming is met de gemeten waarde. Maar Newtons formule geeft ook de valversnelling op toenemende afstand van het aardoppervlak: hoe groter de afstand r is (dus: hoe verder weg van het aardoppervlak), des te kleiner is de valversnelling g .

Uit Newtons formule blijkt ook dat de valversnelling onafhankelijk is van de massa m van het voorwerp, zoals Galilei al had opgemerkt in zijn experimenten met vallende voorwerpen. Dit principe werd nog eens getest op de maan. Op <http://nl.youtube.com> met de zoekterm ‘Galileo experiment’ zie je hoe een hamer en een vogelveertje in het vacuüm bij het maanoppervlak losgelaten worden en precies op hetzelfde moment neerkomen.

Newtons formule voor de valversnelling geldt niet alleen voor de aarde, maar ook voor bijvoorbeeld de zon en de andere planeten in ons zonnestelsel. Je kunt er dus mee uitrekenen hoe klein of hoe groot je gewicht is op een ander hemellichaam dan de aarde (bijvoorbeeld op de maan, Mars of Jupiter). De gegevens die je daarvoor nodig hebt zijn de massa en de straal van dat hemellichaam. Volgens Newtons formule voor de valversnelling geldt: hoe groter de massa M en/of hoe kleiner de straal R van het hemellichaam is, des te groter is de valversnelling g aan het oppervlak – en des te groter is je gewicht.

De banen van planeten

De gravitatiekracht zorgt er niet alleen voor dat wij naar het aardoppervlak worden getrokken, maar diezelfde kracht houdt ook de maan en de planeten in hun baan. De maan draait in een cirkelbaan rond de aarde. En de planeten draaien in een cirkelbaan rond de zon. We weten al dat er een middelpuntzoekende kracht nodig is om een voorwerp in een cirkelbaan te laten bewegen. Die middelpuntzoekende kracht is de gravitatiekracht. Als we de formules voor deze twee krachten aan elkaar gelijk stellen, vinden we een formule voor de baansnelheid v van een hemellichaam met een massa m in een cirkelbaan met een straal r rond een ander hemellichaam met een massa M :

$$F_{\text{mpz}} = F_{\text{grav}} \rightarrow m \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \rightarrow v^2 = G \cdot \frac{M}{r}$$

Volgens deze formule geldt: hoe groter de massa M en/of hoe kleiner de baanstraal r is, des te groter is de baansnelheid v van het rondcirkelende hemellichaam. De formule geldt onder andere voor het aarde-maan systeem. In dat geval is M de massa van de aarde en r de afstand tussen (de middelpunten van) de aarde en de maan. De formule geldt ook voor een zon-planeet systeem. In dat geval is M de massa van de zon en r de afstand tussen (de middelpunten van) de zon en de planeet.

Met deze formule heeft Newton het verband tussen de baansnelheid v en de baanstraal r van de planeten in ons zonnestelsel verklaard (zie oriëntatieopdracht 35 vraag b): hoe groter de baanstraal van een planeet is, des te kleiner is zijn baansnelheid.

Omdat het verband tussen de baansnelheid v en de omlooptijd T bij een cirkelbeweging bekend is (zie paragraaf 3.1), kunnen we ook de omlooptijd uitrekenen. In het rekenvoorbeeld zie je dat de omlooptijd van de aarde rond de zon uitkomt op de bekende waarde van 1 jaar.

Rekenvoorbeeld

Voor de baansnelheid v geldt in het algemeen:

$$v^2 = G \cdot \frac{M}{r}$$

In het geval van het zon-aarde systeem is in deze formule M de massa van de zon ($M_{\text{zon}} = 1,99 \cdot 10^{30}$ kg) en r de afstand tussen de zon en de aarde ($r_{\text{za}} = 0,15 \cdot 10^{12}$ m).

De baansnelheid v van de aarde in haar cirkelbaan rond de zon is dus:

$$v^2 = G \cdot \frac{M}{r} = G \cdot \frac{M_{\text{zon}}}{r_{\text{za}}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1,99 \cdot 10^{30}}{0,15 \cdot 10^{12}} = 8,85 \cdot 10^8 \rightarrow$$

$$v = 2,97 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

De omlooptijd T van de aarde in haar cirkelbaan rond de zon is dus:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,15 \cdot 10^{12}}{2,97 \cdot 10^4} = 3,17 \cdot 10^7 \text{ s} = \frac{3,17 \cdot 10^7}{365 \cdot 24 \cdot 3600} = 1,0 \text{ jaar}$$

En dat is inderdaad de bekende waarde van de omlooptijd van de aarde.

Het aan elkaar gelijk stellen van de formules voor de middelpuntzoekende kracht en de gravitatiekracht levert een formule voor de baansnelheid v :

$$v^2 = G \cdot \frac{M}{r}$$

Er is echter ook een verband tussen de baansnelheid v en de omlooptijd T :

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

Als we deze twee formules combineren (de tweede formule invullen in de eerste) vinden we een verband tussen de baanstraal r en de omlooptijd T :

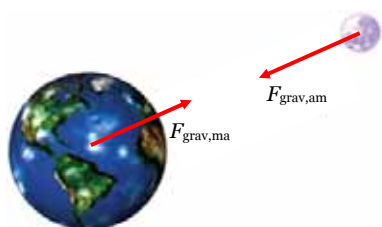
$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

Met deze formule heeft Newton het verband tussen de baanstraal r en de omlooptijd T van de planeten in ons zonnestelsel verklaard (zie oriëntatieopdracht 35 vraag a): hoe groter de baanstraal van een planeet is, des te groter is zijn omlooptijd. Sterker nog: met deze formule heeft Newton de derde wet van Kepler ($r^3/T^2 = K$) verklaard en de evenredigheidsconstante K in verband gebracht met de gravitatieconstante G en de massa M van de zon:

$$\frac{r^3}{T^2} = K = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

Nu is ook duidelijk waarom de evenredigheidsconstante K in de derde wet van Kepler voor de zon en haar planeten een andere waarde heeft dan voor het systeem van Jupiter en zijn manen. In dat laatste geval is M namelijk de massa van Jupiter, met een andere waarde dan de massa van de zon.

Gravitatiewisselwerking



Figuur 70 – De gravitatiekracht van de aarde op de maan en de gravitatiekracht van de maan op de aarde zijn volgens de derde wet van Newton even groot en tegengesteld gericht.

De gravitatiekracht is de aantrekkende kracht die twee voorwerpen op elkaar uitoefenen. Voor het aarde-maan systeem betekent dat: de aarde oefent een gravitatiekracht $F_{\text{grav,am}}$ uit op de maan, maar tegelijkertijd oefent de maan een even grote (maar natuurlijk tegengesteld gerichte) gravitatiekracht $F_{\text{grav,ma}}$ uit op de aarde (zie figuur 70). Op aarde merken we dat aan het verschijnsel van eb en vloed.

Dit geldt overigens niet alleen voor de gravitatiekracht, maar voor alle krachten: krachten komen altijd met zijn tweeën voor, en die twee krachten zijn even groot en tegengesteld gericht. Twee voorwerpen oefenen een tegengestelde kracht op elkaar uit, zodat er geen resulterende kracht is op het systeem als geheel. Deze regel is in het hele heelal geldig voor elk tweetal voorwerpen: voor de aantrekkingskracht tussen de planeet Jupiter en de zon, maar ook voor die tussen een appel en de aarde. Deze regel wordt de *derde wet van Newton* genoemd. Laten we Newtons eigen woorden uit de *Principia* er nog even bijhalen:

Voor elke actie, is er altijd een tegengestelde en gelijke reactie; met andere woorden, de actie die twee lichamen op elkaar uitoefenen zijn altijd gelijk en hebben een altijd tegengestelde richting: wat er drukt of trekt aan iets anders, wordt evenveel gedrukt en getrokken door dat andere. Als iemand een steen indrukt met zijn vinger, wordt zijn vinger ook ingedrukt door de steen. Als een paard een steen aan een touw voorttrekt, zal het paard (om het zo te zeggen) ook evenveel worden teruggetrokken door de steen. Het touw, helemaal uitgestrekt, zal het paard naar de steen sturen en de steen naar het paard sturen, [...] [Het touw] zal de voorwaartse beweging verhinderen van de een, evenveel als het de voorwaartse beweging van de ander zal bevorderen.

De derde wet van Newton zegt dat twee hemellichamen een tegengestelde gravitatiekracht op elkaar uitoefenen. We spraken daarom tegenwoordig over *gravitatiewisselwerking*.

Planeetbanen voorspellen

Het grote succes van Newton is dat voor de gravitatiekracht zo'n eenvoudige formule opgeschreven kan worden en dat deze zo'n algemene geldigheid heeft. Met de gravitatiewet van Newton is te berekenen met welke versnelling voorwerpen op aarde en op andere hemellichamen vallen, en hoe planeten en andere hemellichamen bewegen.

Met de gravitatiewet van Newton is dus ook de beweging van hemellichamen te *voorspellen*. Een voorbeeld daarvan is de ontdekking van de achtste planeet van ons zonnestelsel: Neptunus. De eerste waarneming van Neptunus werd in januari 1613 verricht door Galileo Galilei, toen de planeet vlak naast Jupiter verscheen. Omdat hij ervan uitging dat het een ster was, staat de ontdekking niet op zijn naam. In 1821 publiceerde Alexis Bouvard tabellen van de baan van Uranus, waarbij hij afwijkingen opmerkte ten opzichte van de voorspelde baan. Die afwijkingen zouden door een andere, nog niet ontdekte planeet veroorzaakt kunnen worden. In 1843 berekenden John C. Adams en Urbain LeVerrier onafhankelijk van elkaar de baan van deze hypothetische planeet. Het waren Johann Galle en Heinrich d'Arrest die de planeet op 23 september 1846 voor het eerst waarnamen, slechts 1° vanaf de plaats waar Adams en LeVerrier deze hadden voorspeld.

Begrippen

Gravitatiekracht (zwaartekracht)
Gravitatieconstante
Valversnelling
Derde wet van Newton

Formules

De formules voor de valversnelling, de baansnelheid en de derde wet van Kepler hoef je niet te kennen, maar je moet ze wel in opgaven kunnen gebruiken.

Samenvatting

Voor de gravitatiekracht F_{grav} waarmee twee massa's m en M op een onderlinge afstand r elkaar aantrekken geldt:

$$F_{\text{grav}} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

In deze formule is G de gravitatieconstante. Volgens de *derde wet van Newton* is dit de gravitatiekracht die de twee massa's *op elkaar* uitoefenen.

Uit de formule $F_z = m \cdot g$ voor de zwaartekracht en de formule voor de gravitatiekracht volgt een formule voor de valversnelling g van een voorwerp op een afstand r van het midden van een hemellichaam met een massa M :

$$F_z = F_{\text{grav}} \rightarrow g = G \cdot \frac{M}{r^2}$$

Uit de formule $F_{\text{mpz}} = m \cdot v^2 / r$ voor de middelpuntzoekende kracht en de formule voor de gravitatiekracht volgt een formule voor de baansnelheid v van een hemellichaam in een cirkelbaan met een straal r rond een ander hemellichaam met een massa M :

$$F_{\text{mpz}} = F_{\text{grav}} \rightarrow v^2 = G \cdot \frac{M}{r}$$

Met de baansnelheid v is de omlooptijd T van het hemellichaam te berekenen:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v}$$

Door de laatste twee formules met elkaar te combineren, vinden we de derde wet van Kepler:

$$\frac{r^3}{T^2} = K = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

Opgaven

3.1 De beweging van planeten

36 Derde wet van Kepler

Volgens de derde wet van Kepler wordt het verband tussen de baanstraal r en de omlooptijd T van de planeten in ons zonnestelsel gegeven door:

$$\frac{r^3}{T^2} = K$$

- a De omlooptijd van de aarde rond de zon en de afstand zon-aarde zijn bekend (zie Binas). Laat met een berekening met deze gegevens zien dat voor de constante K in de derde wet van Kepler geldt: $K = 3,36 \cdot 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$.
- b De omlooptijd van de planeet Mars rond de zon is 687 dagen. Bereken met de derde wet van Kepler de baanstraal van Mars. Controleer je antwoord met Binas.
- c De baanstraal van de planeet Neptunus is $4,5 \cdot 10^9 \text{ km}$. Bereken met de derde wet van Kepler de omlooptijd van Neptunus om de zon. Controleer je antwoord met Binas.

37 Omlooptijden

De planeten Jupiter en Saturnus hebben een omlooptijd die veel groter is dan een jaar. Verklaar dit met de derde wet van Kepler.

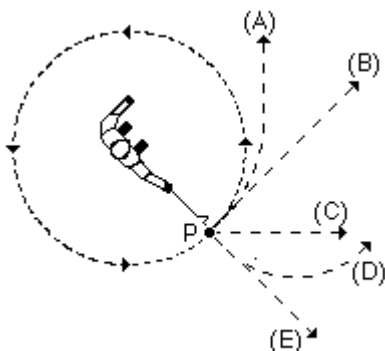
38 De manen van Jupiter

Geldt de derde wet van Kepler ook voor de vier manen van Jupiter? Leg uit waarom wel of niet.

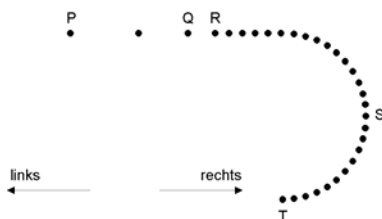
39 Eenparige cirkelbeweging

Een stalen kogel is vastgemaakt aan het uiteinde van een touw. Alice gaat met het touw in de rondte slingeren zoals weergegeven in figuur 71. Het touw oefent een middelpuntzoekende kracht uit op de kogel.

- a Hoeveel keer zo groot wordt deze middelpuntzoekende kracht als Alice de kogel met een tweemaal zo grote snelheid in dezelfde cirkelbaan gaat rondslingeren?
- b Hoeveel keer zo groot wordt deze middelpuntzoekende kracht als Alice de kogel met dezelfde snelheid in een cirkelbaan met een tweemaal zo grote straal gaat rondslingeren?
- c Op het punt P geeft breekt plotseling het touw, heel dicht bij de bal. Als dit van bovenaf bekeken wordt, zoals in figuur 71, welk baan zal de bal dan gaan volgen vanaf het moment dat het touw breekt?



Figuur 71 – Kogelslingeren (bovenaan-zicht).



Figuur 72

40 Bewegend voorwerp

In figuur 72 geven de stippen telkens de plaats aan van een voorwerp dat van P via Q, R en S naar T beweegt. De tijdsduur waarin het voorwerp van de ene stip naar de volgende stip beweegt is constant.

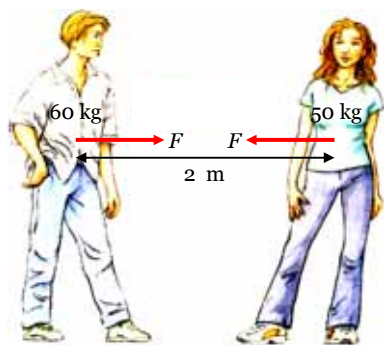
Op het voorwerp werkt bij Q slechts één kracht: F_Q . In S werkt er op het voorwerp ook slechts één kracht: F_S . Welke richtingen hebben de krachten F_Q en F_S ?

41 Middelpuntzoekende kracht op de aarde

De aarde beweegt in een cirkelbaan rond de zon. Daarvoor is een middelpuntzoekende kracht op de aarde nodig.

- a Bereken de grootte van deze middelpuntzoekende kracht. Aanwijzing – Gebruik Binas voor de benodigde gegevens.
- b Welke kracht levert deze middelpuntzoekende kracht?

3.2 De gravitatiewet van Newton



Figuur 73

42 Aantrekkingskracht

In figuur 73 staan twee personen met massa's van 50 en 60 kg op een afstand van 2,0 m.

- a Bereken de gravitatiekracht die deze twee personen op elkaar uitoefenen.
- b Vergelijk deze gravitatiekracht met de zwaartekracht op één van de twee personen. Hoeveel keer zo groot is die zwaartekracht?
- c Leg uit waardoor die zwaartekracht zoveel groter is dan de gravitatiekracht die de twee personen op elkaar uitoefenen.

43 Gravitatiekracht op de aarde

De zon en de aarde oefenen een gravitatiekracht op elkaar uit.

- a Bereken de gravitatiekracht van de zon op de aarde. Aanwijzing – Gebruik Binas voor de benodigde gegevens.
- b Vergelijk deze gravitatiekracht met de middelpuntzoekende kracht die nodig is om de aarde rond de zon te laten bewegen (opgave 41).
- c Welke kracht levert de middelpuntzoekende kracht die nodig is om de aarde rond de zon te laten bewegen?

44 De omlooptijd van de maan

De massa van de aarde en de afstand aarde-maan zijn bekend (zie Binas).

- a Bereken met deze gegevens de baansnelheid van de maan in haar baan rond de aarde. Aanwijzing – Stel de formules voor de middelpuntzoekende kracht en de gravitatiekracht aan elkaar gelijk.
- b Bereken met behulp van deze baansnelheid de omlooptijd van de maan rond de aarde. Controleer je antwoord met Binas.

45 De massa van de zon

De omlooptijd van de aarde rond de zon en de afstand aarde-zon zijn bekend (zie Binas).

- a Bereken met deze gegevens de baansnelheid van de aarde.
- b Bereken met behulp van deze baansnelheid de massa van de zon. Controleer je antwoord met Binas. Aanwijzing – Stel de formules voor de middelpuntzoekende kracht en de gravitatiekracht aan elkaar gelijk.
- c Is de massa van de zon op deze manier ook te bepalen uit de baangegevens van de andere planeten in ons zonnestelsel? Leg uit waarom wel of niet.

46 De massa van Jupiter

De baangegevens (omlooptijd en afstand) van de vier manen van Jupiter zijn bekend (zie Binas).

- a Bereken met deze gegevens de massa van Jupiter. Controleer je antwoord met Binas. Aanwijzing – Ga op dezelfde manier te werk als in opgave 45.
- b Van welke andere hemellichamen in ons zonnestelsel is op deze manier de massa te bepalen? Leg uit hoe.

47 De 'weging' van de aarde

Zo'n tweehonderd jaar geleden (in 1798) woog de Engelse natuur- en scheikundige Henry Cavendish als eerste de aarde. Hij deed dat door met een torsiebalans de gravitatiekracht te meten tussen twee loden bollen met bekende

massa op een bekende afstand. Uit die metingen kon hij de gravitatieconstante G berekenen: $G = 6,754 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. In die tijd waren de waarden van de valversnelling g bij het aardoppervlak en de straal R van de aarde al bekend: $g = 9,80 \text{ m/s}^2$ en $R = 6,38 \cdot 10^3 \text{ km}$. Met behulp van deze gegevens kon Cavendish de massa en de dichtheid van de aarde bepalen.

- a Leg uit hoe Cavendish de gravitatieconstante G uit zijn metingen kon berekenen.
- b Hoe groot was volgens Cavendish de massa van de aarde? Aanwijzing – Stel de formules voor de zwaartekracht en de gravitatiekracht aan elkaar gelijk.
- c Hoe groot was volgens Cavendish de dichtheid van de aarde?
- d Hoeveel procent wijken deze waarden af van de op dit moment bekende waarden van de massa en dichtheid van de aarde?

48 Valversnelling

Voor de valversnelling g bij het aardoppervlak geldt: $g = 9,80 \text{ m/s}^2$. Die valversnelling wordt volgens de gravitatiewet van Newton bepaald door de massa M en de straal R van de aarde:

$$g = G \cdot \frac{M}{R^2}$$

- a Geef de afleiding van deze formule voor de valversnelling bij het aardoppervlak.
Deze formule geldt ook voor de valversnelling op de maan en op andere planeten.
- b Bereken de valversnelling bij het oppervlak van de maan en bij het oppervlak van Jupiter. Zie Binas voor de benodigde gegevens.

49 De derde wet van Kepler

In deze opgave ga je de derde wet van Kepler afleiden uit de gravitatiewet van Newton.

- a Voor een planeet in een cirkelbaan rond de zon moet de middelpuntzoekende kracht gelijk zijn aan de gravitatiekracht van de zon op de planeet. Leg uit waarom.
- b Stel de formules voor de middelpuntzoekende kracht en de gravitatiekracht aan elkaar gelijk, en geef de afleiding van de volgende formule:

$$v^2 = \frac{G \cdot M}{r}$$

In deze formule is M de massa van de zon en r de afstand zon-planeet.

- c Geef de formule voor het verband tussen de baansnelheid v en de omlooptijd T bij een cirkelbeweging.
- d Combineer de twee formules en geef daarmee de afleiding van de derde wet van Kepler. Aanwijzing – Je kunt de twee formules combineren door de formule voor de baansnelheid (vraag c) in te vullen in de andere formule (vraag b).
- e De constante K in de derde wet van Kepler hangt af van de gravitatieconstante G en de massa M van de zon. Geef een formule voor de constante K .
- f Laat met een berekening zien dat voor de planeten die rond de zon draaien geldt: $K = 3,36 \cdot 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$.
- g De derde wet van Kepler geldt onder andere ook voor de manen van Jupiter, maar dan heeft de constante K een andere waarde. Bereken de constante K voor de manen die rond Jupiter draaien.

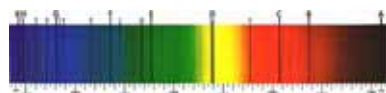
4 Het heelal

Hoofdstukvraag

Hoe is het heelal opgebouwd, en wat is daarin de plaats van ons zonnestelsel?



Figuur 74 – Telescoop.



Figuur 75 – Sterspectrum.

De gravitatiewet van Newton geldt niet alleen in ons zonnestelsel, maar overal in het heelal. Zo heeft de gravitatietheorie van Newton, samen met de relativiteitstheorie van Albert Einstein, de basis gelegd voor ons huidige beeld van het heelal. Door steeds betere waarnemingstechnieken en de vooruitgang in onze natuurkundekennis, weten we nu dat we leven in een ruimte van onvoorstelbare omvang, bijeengehouden door de aantrekking van de gravitatiekracht.

Een groot deel van onze kennis over de sterren is afkomstig van waarnemingen met meetinstrumenten op aarde en in satellieten in een baan rond de aarde. Met een telescoop is de door een ster uitgezonden straling te bundelen. Met een prisma of tralie is die straling uiteen te rafelen tot een spectrum. En met detectoren is de intensiteit van de uitgezonden straling te meten, zowel voor het spectrum als geheel als voor de afzonderlijke golflengten. Met die meetinstrumenten kunnen we de eigenschappen en afstanden van sterren en sterrenstelsels in het heelal bepalen.

50 Het heelal

Maak net als in hoofdstuk 1 een schaalmodel, maar nu van het gehele heelal. Kies de schaal zo dat het heelal op een blad A4 past. Op <http://nl.youtube.com> met de zoekterm 'Powers of Ten (Dutch)' staat een animatie van een reis door het heelal. Gebruik de gegevens uit deze animatie voor het maken van het schaalmodel. En gebruik de afstandstabel hieronder voor aanvullende gegevens. Realiseer je daarbij wel dat er grote onzekerheden zitten in de gegeven afstanden.

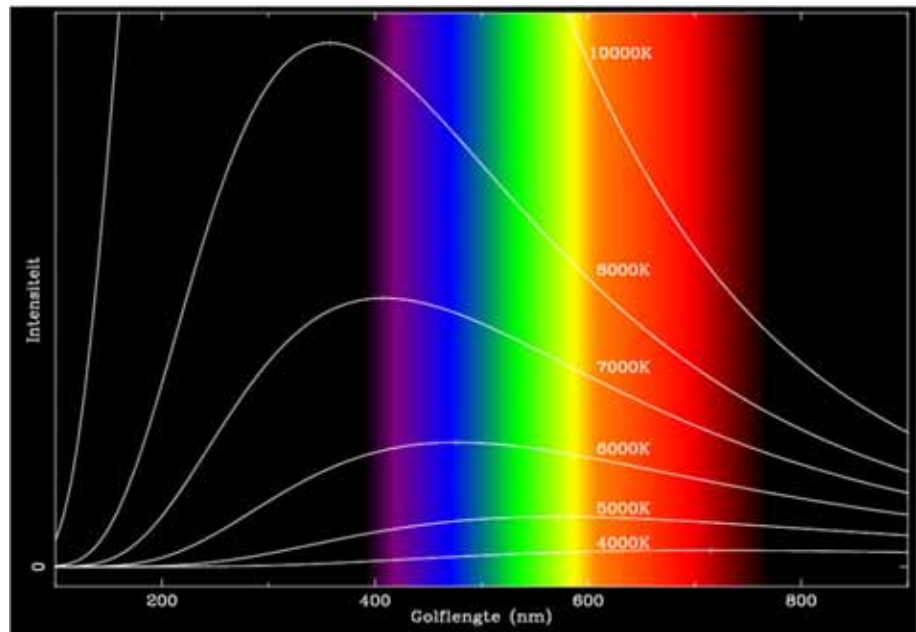
Object	Afstand (m)
Zon	$1,5 \cdot 10^{11}$
Pluto	$5,8 \cdot 10^{12}$
Proxima Centauri (dichtstbijzijnde ster)	$4,1 \cdot 10^{16}$
Lokale bel (opening in het interstellair gas, waarin ons zonnestelsel zich bevindt)	$8,5 \cdot 10^{17}$
Rigel (ster in het sterrenbeeld Orion)	$9,0 \cdot 10^{18}$
Middelpunt van ons Melkwegstelsel	$2,5 \cdot 10^{20}$
Magelhaense wolk (een dwergstelsel dat om ons Melkwegstelsel draait)	$1,6 \cdot 10^{21}$
Andromedanevel (dichtstbijzijnde sterrenstelsel, onderdeel van de 'Lokale groep' van sterrenstelsels waartoe ook ons Melkwegstelsel behoort)	$2,2 \cdot 10^{22}$
Canes Venaticiwolk (cluster van sterrenstelsels, waartoe ook de 'Lokale Groep' behoort)	$1,2 \cdot 10^{23}$
Rand van het Lokale of Virgo Supercluster (waartoe ook de Canes Venaticiwolk behoort)	$6,2 \cdot 10^{23}$
Grote Muur (een aaneenrijging van superclusters, onder andere het Virgo Supercluster)	$9,5 \cdot 10^{24}$
Zichtbare heelal	$1,3 \cdot 10^{26}$

4.1 Een heelal vol sterrenstelsels

Paragraafvraag	Hoe ziet het heelal er buiten het zonnestelsel uit?
----------------	---

Het stralingsspectrum van sterren

In figuur 76 zie je het *stralingsspectrum* van sterren: de intensiteit als functie van de golflengte van de uitgezonden straling. Hoe het stralingsspectrum van een ster eruit ziet, hangt voornamelijk af van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur is, des te kleiner is de golflengte waarbij de intensiteit in het stralingsspectrum maximaal is.



Figuur 76 – Het stralingsspectrum geeft de intensiteit als functie van de golflengte van de uitgezonden straling. De vorm van het stralingsspectrum hangt af van de absolute temperatuur van een ster.

Zelfs met het blote oog is te zien dat sterren aan de hemel verschillende kleuren hebben: sommigen zijn blauwachtig, anderen zijn meer rood van kleur. Dat is te verklaren met het stralingsspectrum van sterren in figuur 76. Afhankelijk van de massa en de leeftijd van een ster, is de oppervlaktetemperatuur en dus ook het spectrum van de uitgezonden straling verschillend.

De zon heeft een oppervlaktetemperatuur van ongeveer 6000 K. In figuur 76 is te zien dat de piek van het spectrum dan bij een golflengte van ongeveer 500 nm ligt. Dat is de golflengte van geel-groen licht. De combinatie van alle bijdragen van de verschillende kleuren in het spectrum van de zon geeft de indruk van geel-wit licht.

Koele sterren hebben een oppervlaktetemperatuur van 4000 K of minder. In figuur 76 is te zien dat de piek van het spectrum bij een temperatuur van

4000 K bij een golflengte van ongeveer 800 nm ligt: de golflengte van rood licht. Koele sterren zijn daardoor roodachtig van kleur.

De allerheetste sterren hebben een blauwachtige glans. In figuur 76 zie je dat de piek van het spectrum bij een temperatuur van 8000 K – en dat is voor een hete ster nog niet eens zo’n hoge oppervlaktetemperatuur – bij een golflengte van ongeveer 350 nm ligt. De piek van het spectrum ligt dus in het gebied van de ultravioletstraling. In het zichtbare deel van het spectrum is de intensiteit van het blauwe licht veel groter dan die van het rode licht. Hete sterren zijn daardoor blauwachtig van kleur.

Dit is vergelijkbaar met de kleur van een staaf ijzer die wordt verhit. In het begin wordt het ijzer alleen maar heet en geeft geen licht. Je voelt alleen de infraroodstraling (of warmtestraling). Als je echter goed kijkt, zul je zien dat het ijzer een donkerrode gloed krijgt. Als je het ijzer verder gaat verhitten, wordt de gloed duidelijker en zal de staaf helder rood licht gaan uitstralen. Verhitten we nog verder dan wordt het licht alsmaar feller, en de kleur verandert van rood naar oranje, geel, en ten slotte wit. Heet ijzer noemen we “roodgloeiend”, heel heet ijzer is “witheet”. Voor sterren geldt ruwweg hetzelfde.

Het verband tussen de golflengte van de piek in het stralingsspectrum en de oppervlaktetemperatuur wordt beschreven door de *wet van Wien*. Deze wet is in 1893 opgesteld door de Duitse natuurkundige Wilhelm Wien. De *wet van Wien* zegt dat deze golflengte $\lambda_{\max}$ omgekeerd evenredig is met de absolute temperatuur T in kelvin (K). Dat betekent bijvoorbeeld: als de temperatuur tweemaal zo hoog is, is de golflengte van de piek in het stralingsspectrum tweemaal zo klein.

Formules – Wet van Wien

Volgens de *wet van Wien* is de golflengte van de piek in het stralingsspectrum omgekeerd evenredig met de absolute temperatuur:

$$\lambda_{\max} = \frac{k_W}{T}$$

Symbolen: In deze formule is $\lambda_{\max}$ de golflengte (in m) van de pieken in de stralingsspectra van figuur 76 en T de absolute temperatuur (in K). Metingen aan stralingsspectra leveren de waarde van de constante van Wien: $k_W = 2,9 \cdot 10^{-3}$ mK (meter Kelvin).

Rekenvoorbeeld

De zon heeft een oppervlaktetemperatuur van 5800 K. De piek van het stralingsspectrum van de zon ligt dus bij de volgende golflengte:

$$\lambda_{\max} = \frac{k_W}{T} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5800} = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

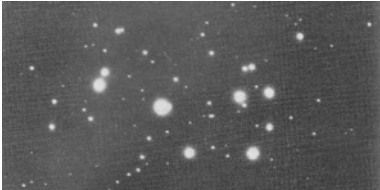
Deze golflengte ligt in het zichtbare gebied van het elektromagnetisch spectrum, overeenkomend met een geel-groene kleur.

De wet van Wien maakt het mogelijk om de oppervlaktetemperatuur van sterren te bepalen. Van de door een ster uitgezonden straling wordt met een telescoop en een prisma of tralie een spectrum gemaakt. Een detector meet

de intensiteit van de straling bij de verschillende golflengtes. Uit die metingen is de golflengte $\lambda_{\max}$ van de piek in het stralingsspectrum te bepalen. En met de wet van Wien is dan de oppervlaktetemperatuur van de ster te berekenen: $T = k_W/\lambda_{\max}$.

Hieronder zal blijken dat meting van de oppervlaktetemperatuur van sterren het mogelijk maakt hun afstand te bepalen.

De afstand van sterren



Figuur 77 – Sterren verschillen in waargenomen helderheid.

Extra

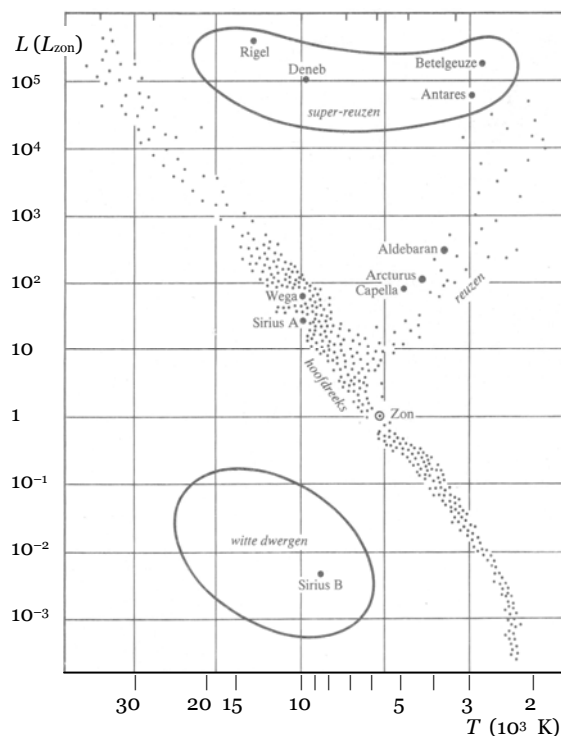
Achteraf is gebleken dat het Hertzsprung-Russell diagram de levensloop van een ster weergeeft. Een ster begint zijn bestaan aan de rechterkant van het diagram als een gigantisch grote gaswolk van lage temperatuur. Daarna gaat de ster, als hij samentrekt onder invloed van de gravitatiekracht en daarbij in temperatuur en lichtsterkte toeneemt, naar de hoofdreeks. Ten slotte koelt de ster af en bereikt het stadium van rode reus. Wat er daarna gebeurt hangt af van de massa van de ster. Sterren met een kleine massa eindigen als witte dwerg. Sterren met een grote massa blazen zich op in een supernova-explosie en eindigen als neutronenster of zwart gat.

Een blik op de sterrenhemel maakt duidelijk dat sterren verschillen in helderheid. Die verschillen in helderheid worden veroorzaakt door verschillen in grootte, oppervlaktetemperatuur en afstand. Hoe groter de afmeting en hoe hoger de oppervlaktetemperatuur van een ster zijn, des te groter is het uitgezonden stralingsvermogen. Dit stralingsvermogen noemen we de lichtsterkte L van een ster.

Op aarde kunnen we de stralingsintensiteit I van een ster meten: het waargenomen stralingsvermogen per vierkante meter. Als we ook de afstand r tot de ster weten, is de lichtsterkte van een ster te berekenen met de gemeten stralingsintensiteit en de afstand.

Voor relatief dichtbij geleiden sterren is de afstand te bepalen uit de *parallax* van deze sterren over een periode van zes maanden. Dat is de beweging die een ster lijkt te maken door de beweging van de aarde om de zon (zie paragraaf 2.1). Hoe kleiner deze beweging is, des te verder weg staat de ster.

In het begin van de vorige eeuw combineerden E. Hertzsprung en H.N. Russell de kennis over alle sterren waarvan de stralingsintensiteit en de afstand – en dus de lichtsterkte – bekend was in het diagram van figuur 78. Dit is het *Hertzsprung-Russell diagram*. Langs de verticale as staat de lichtsterkte, langs de horizontale as de oppervlaktetemperatuur van de sterren. Uit dit diagram blijkt dat de meeste sterren (waaronder de zon) zich op de zogenaamde *hoofdreeks* bevinden: de strook van rechtsonder naar linksboven. Een kleiner aantal sterren wijkt van die regelmaat af: de *reuzen*, de *superreuzen* en de *witte dwergen*.



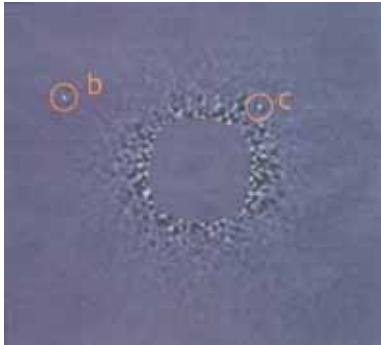
Figuur 78 – Het Hertzsprung-Russell diagram. Langs de verticale as staat de lichtsterkte L , uitgedrukt in de bekende lichtsterkte van de zon (L_{zon}). Langs de horizontale as staat de oppervlaktetemperatuur T van een ster.

Beide schaalverdelingen zijn niet lineair. Dat maakt het aflezen van waarden in het diagram wat lastig. Bovendien is de schaalverdeling langs de horizontale as wat ongebruikelijk: langs de as neemt de temperatuur van links naar rechts af.

De Europese satelliet Hipparcos (High Precision PARallax Collecting Satellite), gelanceerd in 1989, heeft met de parallaxmethode de posities van meer dan 100 duizend sterren nauwkeurig in kaart gebracht.

Voor sterren die ver weg liggen is een afstandsbeoordeling met de parallaxmethode niet mogelijk: de parallax is zo klein dat die niet is waar te nemen. Maar in dat geval is die afstand met het Hertzsprung-Russell diagram te bepalen. Uit het waargenomen sterspectrum volgt met de wet van Wien de oppervlaktetemperatuur T . Uit het Hertzsprung-Russell diagram is dan de lichtsterkte L van die ster af te lezen. De aanname daarbij is dat de ster op de hoofdreeks ligt. Astronomen kunnen uit de eigenschappen van het sterspectrum opmaken of dat het geval is. Uit de zo bepaalde lichtsterkte L en de op aarde waargenomen stralingsintensiteit I van de ster is dan de afstand r te berekenen. Want: als het – zoals eerder gezegd – mogelijk is om uit I en r de lichtsterkte L te berekenen, dan is het ook mogelijk om uit L en I de afstand r te berekenen.

Op deze manier kunnen we dus een beeld krijgen van de lichtsterkte, de oppervlaktetemperatuur en de afstand van de sterren die we aan de hemel zien. Astronomen kunnen daaruit bovendien de grootte en de massa van sterren afleiden.



Figuur 79 – De ster HR8799 met zijn planetenstelsel. De ster staat op een afstand van 128 ly. Op de foto zijn twee van de drie reuzenplaneten te zien, met omlooptijden van 100, 190 en 460 jaar. Bij het maken van de foto is het licht van de ster zelf afgeschermd, omdat de planeten anders niet zichtbaar zouden zijn.



Figuur 80 – Impressie van de drie exoplaneten in hun baan rond de ster HR8799.

Extra - Exoplaneten

De zon heeft een stelsel van planeten om zich heen. Men heeft zich lang afgevraagd of de zon de enige ster is met zo'n planetenstelsel. De zoektocht naar planeten bij andere sterren heeft inmiddels zo'n 300 zogenaamde *exoplaneten* opgeleverd. Aanwijzingen voor de aanwezigheid van een exoplaneet bij een ster zijn heel kleine variaties in de snelheid en lichtsterkte van die ster. De snelheidsvariaties zijn alleen goed te meten bij zware exoplaneten die met grote snelheid in een kleine baan rondom de ster draaien. En om de lichtsterktevariaties te kunnen meten, moeten we vanaf de aarde tegen de zijkant van het stelsel aankijken, zodat de exoplaneet voor de ster langs beweegt.

In 2008 zijn de eerste exoplaneten ook echt op telescoopbeelden te zien (zie figuur 79).

Ons Melkwegstelsel

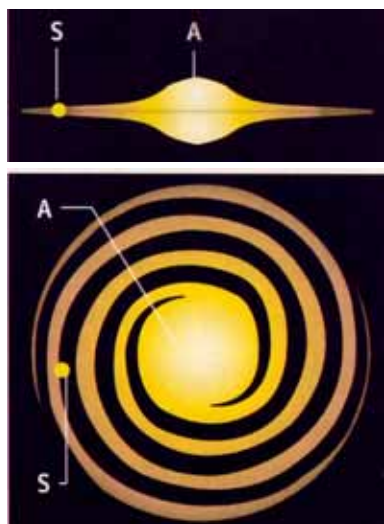


Figuur 81 – De avondhemel in januari op het noordelijk halfrond. De Melkweg is de lichtblauwe band die van links onder naar rechtsboven loopt.

Als je 's nachts als het goed donker is naar de sterrenhemel kijkt, zie je niet alleen talloze lichtpuntjes maar ook een zwak oplichtende band. Deze band loopt ruwweg vanaf de noordpool naar de horizon. Deze band noemen we de *Melkweg*. Het is een gebied waarin miljarden sterren dicht bij elkaar staan.

De zon is een van die sterren. De zon, met al haar planeten en bijbehorende manen, maakt deel uit van een heel *sterrenstelsel*. Dat sterrenstelsel noemen we het *Melkwegstelsel*. Het blijkt ook dat veel van de lichtpuntjes aan de sterrenhemel geen afzonderlijke sterren zijn, maar hele sterrenstelsels die er allemaal min of meer zo uitzien als ons Melkwegstelsel.

Het is voor astronomen niet gemakkelijk geweest om zich een beeld te vormen van de structuur van het Melkwegstelsel, want we zitten er middenin. Ook wordt ons zicht op grote delen ervan verhinderd door stofwolken tussen de sterren. Na veel onderzoek in de vorige eeuw, waaraan de Nederlandse astronomen Jacob Kapteyn en Jan Hendrik Oort een belangrijke bijdrage hebben geleverd, is men er uiteindelijk toch in geslaagd zich een redelijk nauwkeurig beeld te vormen van deze structuur.



Figuur 82 – Het Melkwegstelsel in zijaanzicht (boven) en in bovenaanzicht (onder). S is de positie van de zon en A is het middelpunt van het Melkwegstelsel.

Het Melkwegstelsel bestaat uit zo'n 200 tot 400 miljard sterren in een discusvormige schijf (zie figuur 82). De bovenste tekening van figuur 82 geeft het zijaanzicht van ons Melkwegstelsel. De centrale verdikking is waarschijnlijk balkvormig. Hij heeft een afmeting van ongeveer 20 duizend lichtjaar, een dikte van ongeveer 6 duizend lichtjaar en bevat naar schatting 50 miljard sterren in een dichte concentratie. De onderste tekening van figuur 82 geeft een bovenaanzicht, waaruit blijkt dat rest van de sterren in zogenaamde *spiraalarmen* gerangschikt zijn. De zon (S in figuur 82) is een van die sterren. Ons zonnestelsel maakt dus deel uit van het Melkwegstelsel. De middellijn van het Melkwegstelsel is ongeveer 100 duizend lichtjaar.

Het Melkwegstelsel wordt bijeen gehouden door de gravitatiekracht en rooteert om zijn middelpunt (A in figuur 82). De zon, met al haar planeten en bijbehorende manen, draait net als al die andere sterren om het middelpunt van het Melkwegstelsel. Aan de hand van de relatieve bewegingen van een groot aantal sterren wordt geschat dat de zon een omlooptijd heeft van 225 miljoen jaar en op een afstand staat van 32 duizend lichtjaar van het middelpunt van het Melkwegstelsel. Met de gravitatiewet van Newton heeft men berekend dat de massa in het centrum van het Melkwegstelsel ongeveer 100 miljard zonsmassa's bedraagt. De totale massa van het Melkwegstelsel is nog veel groter.

Sterrenstelsels

De plaats van het Melkwegstelsel in het heelal is lange tijd onduidelijk geweest. In de vorige eeuw was een deel van de astronomen van mening dat het Melkwegstelsel het enige sterrenstelsel is in een lege, oneindig grote ruimte. Met telescopen zag men wel verafstaande lichtvlekken, maar die werden beschouwd als gaswolken: de zogenaamde *nevels*. Eén van die nevels is de Andromedanevel (zie figuur 83) die tijdens een donkere nacht met het blote oog als een zwakke langwerpige lichtvlek te zien is in het sterrenbeeld Andromeda. Een ander deel van de astronomen had het idee dat ons Melkwegstelsel slechts een van de vele sterrenstelsels is in het heelal. De waarnemingstechnieken maakten het echter niet mogelijk om de details van de lichtvlekken te zien.



Figuur 83 – De Andromedanevel is een sterrenstelsel, vergelijkbaar met ons Melkwegstelsel.

Deze discussie werd vruchteloos gevoerd tot in 1925 de Amerikaanse astronoom Edwin Hubble in staat was de afstand tot de Andromedanevel te bepalen. Hij vond een afstand die veel groter was dan de afmetingen van het Melkwegstelsel. En dus kon deze nevel niet tot het Melkwegstelsel behoren. In latere metingen is vastgesteld dat de Andromedanevel zelf een sterrenstelsel is, met een structuur en afmetingen die sterk op ons eigen Melkwegstelsel lijken. De Andromedanevel staat op 2,2 miljoen lichtjaar van de aarde, bevat 200 miljard sterren en is voor ons het dichtstbijzijnde sterrenstelsel in het heelal.

Door het beschikbaar komen van nieuwe waarnemingstechnieken en instrumenten is in minder dan honderd jaar ons beeld van het heelal sterk veranderd. We weten nu dat we leven in een heelal waarin het Melkwegstelsel slechts één van de ongeveer miljard sterrenstelsels is – voor zover we die kunnen zien.

Afstanden van sterrenstelsels

Het op een betrouwbare manier bepalen van de afstanden van sterrenstelsels in het heelal is een probleem. De parallax van sterrenstelsels is zo klein, dat deze niet is waar te nemen. Om de afstand te schatten gebruikt men dan vaak de waargenomen stralingsintensiteit van een speciaal soort sterren: de Cepheïden. Dit zijn veranderlijke sterren die genoemd zijn naar hun prototype: de ster Delta Cephei. De lichtsterkte van deze sterren wordt met een vaste periode groter en weer kleiner. In het begin van de twintigste eeuw ontdekte

de astronome Henrietta Leavitt dat er voor deze sterren in het Melkwegstelsel een relatie bestaat tussen de periode (of frequentie) van de lichtsterkteverandering en de lichtsterkte. Uit een meting van deze periode volgt dus de lichtsterkte. Op dezelfde manier als bij sterren die ver weg liggen, is dan uit de lichtsterkte L en de op aarde gemeten stralingsintensiteit I de afstand r van de Cepheïde te berekenen. Omdat Cepheïden ook in andere sterrenstelsels voorkomen, kunnen ze voor afstandsbepalingen worden gebruikt. Deze methode werd door Hubble gebruikt om de afstand tot de Andromedanevel te bepalen.

Het meten van de grootste afstanden blijft echter lastig, en verschillende meetmethoden leveren vaak verschillende resultaten. Dit levert veel discussie op, en schattingen voor de afstanden in het heelal zijn dus nogal eens herzien. Pas vrij recent is er een betere overeenstemming gevonden tussen de verschillende methoden. Dit is belangrijk omdat de afstanden van de verste objecten ook de leeftijd van het heelal bepalen, zoals we zullen zien in paragraaf 4.2.

Begrippen

Stralingsspectrum
Absolute temperatuur
Wet van Wien
Lichtsterkte
Stralingsintensiteit
Hertzsprung-Russel diagram
Exoplaneet
Melkwegstelsel
Sterrenstelsel

Formules

De formule voor de wet van Wien hoeft je niet te kennen, maar je moet hem in opgaven wel kunnen gebruiken.

Samenvatting

Het heelal is onvoorstelbaar groot, met daarin meer dan een miljard *sterrenstelsels*. Eén van die sterrenstelsels is het Melkwegstelsel, waarvan ons zonnestelsel een klein onderdeel is.

Een ster straalt energie uit in de vorm van *elektromagnetische straling*. De intensiteit van de uitgezonden straling hangt af van de *golflengte*. De golflengte waarbij de intensiteit van de uitgezonden straling maximaal is, wordt bepaald door de *oppervlaktetemperatuur* van de ster. Hoe hoger deze oppervlaktetemperatuur T is, des te kleiner is de golflengte $\lambda_{\max}$ van de piek in het *stralingsspectrum* (*wet van Wien*):

$$\lambda_{\max} = \frac{k_W}{T}$$

Voor afstandsbepalingen in het heelal bestaan verschillende methoden. Voor sterren op relatief kleine afstand is de parallaxmethode bruikbaar. Voor sterren die verder weg staan volgt de oppervlaktetemperatuur met de wet van Wien uit het stralingsspectrum. Uit het Hertzsprung-Russelldiagram is dan de lichtsterkte af te lezen. Vergelijking van de lichtsterkte met de op aarde waargenomen stralingsintensiteit levert ten slotte de afstand.

Voor sterrenstelsels op zeer grote afstand gebruikt men de Cepheïdenmethode. Van deze veranderlijke sterren is de lichtsterkte te bepalen door meting van de periode waarmee hun lichtsterkte varieert. Vergelijking van deze lichtsterkte met de op aarde waargenomen stralingsintensiteit levert dan weer de afstand.

4.2 De evolutie van het heelal

Paragraafvraag	Hoe is het heelal ontstaan, hoe heeft het heelal zich ontwikkeld en hoe ziet de toekomst van het heelal eruit?
----------------	--

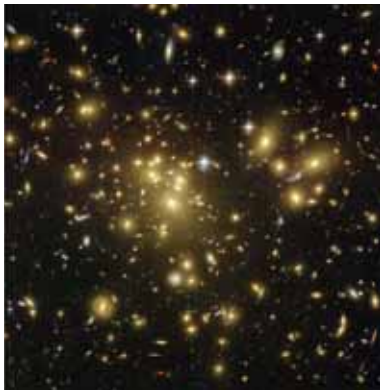
Kosmologie

De studie naar het ontstaan en de structuur van het heelal is het terrein van de *kosmologie*. De kosmologie bestudeert het heelal in zijn totaliteit: niet alleen haar geschiedenis, maar ook alles wat er in het heelal wordt waargenomen.

Kosmologen nemen onder de natuurwetenschappers een bijzondere positie in. Er is voor hen slechts één studieobject: het heelal waarin we zelf leven. Kosmologen kunnen geen ander heelal nemen en kijken wat daar gebeurt. Ze kunnen het niet vergelijken met iets anders, zoals andere astronomen dat doen met planeten, sterren en sterrenstelsels. Kosmologen kunnen ook geen experimenten uitvoeren met het heelal: ze kunnen alleen modellen maken en nagaan of deze modellen overeenstemmen met de waarnemingen die gedaan worden met telescopen en satellieten.

Kosmologen gaan er op grond van waarnemingen vanuit dat het heelal in alle richtingen en overal op dezelfde manier is opgebouwd. Men zegt daarom dat het heelal *homogeen* (van dezelfde aard of samenstelling) en *isotroop* (in alle richtingen dezelfde eigenschappen) is. Omdat het heelal zo opvallend uniform (eenvormig) is, kunnen we het als een geheel bestuderen. Kosmologen gaan er ook vanuit dat dezelfde natuurwetten – onder andere die van gravitatie, beweging, elektriciteit en magnetisme – altijd en overal geldig zijn. Dit wordt door waarnemingen bevestigd. Als deze wetten ook maar een kleine afwijking zouden vertonen op grote afstanden, dan zouden ver verwijderde sterren niet meer stralen en sterrenstelsels uit hun baan raken, en zou licht er anders uitzien. Hiervan is allemaal geen sprake.

Gewapend met deze veronderstellingen, waarnemingen en wetten, proberen kosmologen een theorie over de evolutie van het heelal op te stellen: hoe is het heelal ontstaan, hoe heeft het heelal zich ontwikkeld en hoe ziet de toekomst van het heelal eruit?



Figuur 84 – Deze opname van de Hubble ruimtetelescoop laat een heelal vol sterrenstelsels zien.

De oerknaltheorie

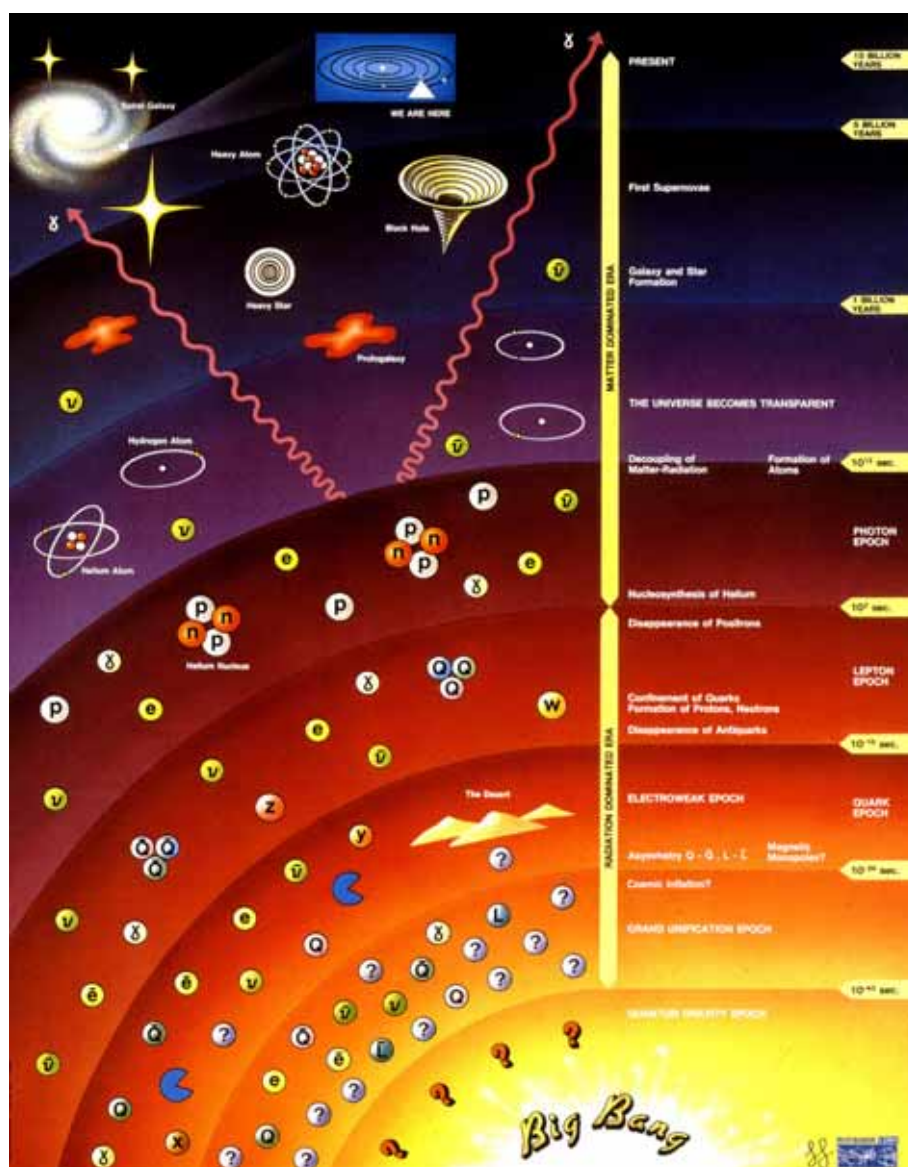
In de vorige eeuw zijn er verschillende theorieën opgesteld over het ontstaan en de ontwikkeling van het heelal. De bekendste is de *oerknaltheorie*, ook wel de *Big Bang-theorie* genoemd.

Volgens de oerknaltheorie zoals die vanaf de jaren twintig van de vorige eeuw door kosmologen is ontwikkeld, is het heelal ontstaan vanuit een zeer compacte en zeer hete begintoestand. Men spreekt van de oerknal, maar het was geen explosie in een verder leeg heelal. Men denkt eerder dat het heelal met alles daarin aanvankelijk uiterst klein van afmeting was. En ‘alles’ betekent ook letterlijk alles: alle materie, straling en energie die we nu waarneemen. De temperatuur was op dat moment oneindig hoog. Het heelal zette in zijn geheel heel snel uit en de inhoud verspreide zich in alle richtingen over steeds grotere afstanden: vandaar de vergelijking met een explosie.

De oerknaltheorie voorspelt niet hoeveel materie het heelal bevat en in welke vorm. Deze theorie laat verschillende scenario's toe, die de ontwikkeling en bouw van het heelal beschrijven. Daardoor laat deze theorie ook nog vele mogelijkheden open voor de toekomst van het heelal. Afhankelijk van de hoeveelheid materie in het heelal, kan het blijven expanderen, heel langzaam tot stilstand komen of uiteindelijk weer samentrekken onder invloed van de gravitatiekracht.

De evolutie van het heelal

Volgens de oerknaltheorie is de ontwikkeling van het heelal ongeveer als volgt verlopen (zie ook figuur 85).



Figuur 85 – Schematische weergave van de oerknaltheorie.

Aanvankelijk was er een hete en zeer dichte oersoep van de meest elementaire deeltjes die men kent: quarks. Er waren nog geen atoomkernen, zelfs nog niet de bouwstenen daarvan (de protonen en neutronen).

Na ongeveer een milliseconde had het heelal ongeveer de omvang van het zonnestelsel. Door de dalende temperatuur konden de quarks zich verbinden

tot protonen en neutronen.

Na ongeveer 100 seconden werden de atoomkernen van de lichtste elementen gevormd, eerst waterstof en na verdere afkoeling ook helium (twee protonen en twee neutronen) en lithium (drie protonen en drie neutronen).

Na zo'n 300 duizend jaar was het heelal zó ver afgekoeld, dat de elektronen en atoomkernen in atomen werden gebonden. Omdat licht nu niet voortdurend botst met elektronen, kan het ongehinderd door het heelal bewegen en wordt het heelal doorzichtig.

Na ruim 1 miljard jaar klonterde materie onder invloed van de gravitatiekracht samen tot de eerste sterren en sterrenstelsels.

We leven nu zo'n 13,7 miljard jaar na de oerknal, maar deze leeftijd van het heelal is omstreden. Er is een langlopende discussie over hoe oud het heelal nu eigenlijk is. Schattingen lopen uiteen van 10 tot 20 miljard jaar.

De vorming van de zwaardere elementen

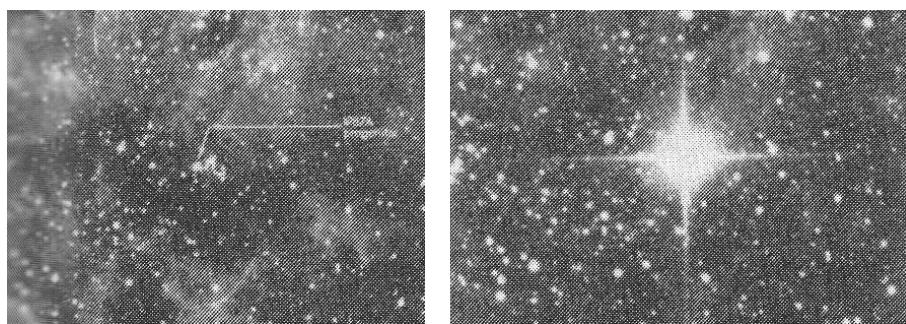
De eerste sterren en sterrenstelsels werden gevormd uit de producten van de oerknal: de lichte elementen waterstof, helium en lithium. De andere, zwaardere elementen – zoals de koolstof waaruit ons lichaam voor een groot deel bestaat, of de zuurstof die we inademen – bestonden toen nog niet. Deze zwaardere elementen – van beryllium tot uranium – werden pas later door kernfusieprocessen binnenin sterren gevormd. Bij kernfusie verbinden lichte elementen zich tot zwaardere elementen. Daarbij komt relatief veel energie vrij. De sterren stralen die energie uit, onder andere in de vorm van licht.

In het binnenste van een ster fuseren waterstofkernen eerst tot heliumkernen, fuseren heliumkernen tot koolstofkernen en zo verder tot de vorming van ijzerkernen. Daarna leveren kernfusieprocessen geen energie meer op. Nog zwaardere kernen kunnen dan nog wel gevormd worden door het invangen van neutronen.

Door het optreden van kernfusie en neutronenvangst doet het binnenste van een ster dienst als broedplaats van nieuwe elementen. Aan het eind van zijn leven – als de ster zijn 'brandstof' heeft opgebruikt – stort een ster in en blaast zichzelf daarna op. Er is dan sprake van een *supernova-explosie*.



Figuur 87 – DeKrabnevel is het restant van een supernovaexplosie in 1054, zoals blijkt uit de beschrijving door Chinese astronomen uit die tijd.



Figuur 86 – De supernova SN 1987 A (rechts). Een paar dagen voor deze sterexplosie is op die plaats niet meer dan een gewone ster zichtbaar (links).

Bij deze explosie wordt een groot deel van de sterre massa het heelal in geslingerd. Op deze manier worden de gevormde elementen over het heelal verspreid. In een later stadium kunnen deze elementen weer bijdragen aan de vorming van nieuwe sterren en planeten. De aarde – en al het leven dat zich daarop bevindt, inclusief ons eigen lichaam – bestaat uit atomen van elementen die ooit door kernfusie en neutronenvangst in het binnenste van oude sterren zijn ontstaan.

Bewijs voor de oerknaltheorie

Om de theorie van de oerknal te weerleggen, moet men één of ander verschijnsel waarnemen dat in strijd is met de uitgangspunten van deze theorie. We zouden een ster kunnen waarnemen die ouder is dan volgens de oerknaltheorie mogelijk is. Of we zouden een waarneming kunnen doen waaruit blijkt dat de verdeling van de sterrenstelsels over het heelal niet homogeen is. Tot nu toe is dit echter niet het geval: de aanwijzingen dat de oerknaltheorie op hoofdlijnen juist is, worden alsmaar sterker. Hieronder bespreken we enkele van deze aanwijzingen: de waargenomen *uitdijning van het heelal* en het bestaan van de *kosmische achtergrondstraling*.

Tegelijkertijd komen er echter ook steeds meer vragen over hoe ons heelal precies in elkaar zit. Zo blijkt uit waarnemingen van sterbewegingen dat er veel meer materie in het heelal moet zijn dan er zichtbaar is met telescopen en satellieten. Deze zogenaamde *donkere materie* zien de astronomen door het effect van de gravitatiekracht van deze materie op de zichtbare sterren. De schatting is dat ongeveer 90% van ons heelal uit donkere materie bestaat. De aard van donkere materie is echter op dit moment nog onbekend.

De wet van Hubble

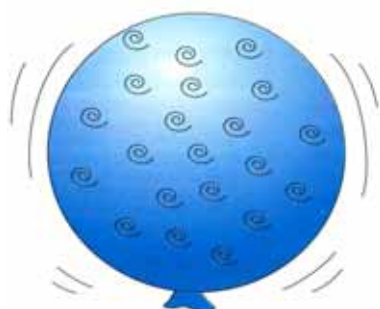
Een belangrijke voorspelling van de oerknaltheorie is de *uitdijning van het heelal*. In 1929 nam de al vaker genoemde astronoom Edwin Hubble de uitdijning van het heelal daadwerkelijk waar. Aan de hand van zijn metingen stelde hij vast dat alle sterrenstelsels zich van elkaar af bewegen. Bovendien bleek te gelden: hoe verder ze van ons verwijderd zijn, des te groter is hun snelheid. Zijn resultaten vatte hij samen in een formule die we nu de *wet van Hubble* noemen.

Formules – Wet van Hubble

Volgens de *wet van Hubble* bewegen sterrenstelsel zich van ons af met een snelheid die recht evenredig is met hun afstand:

$$v = H \cdot d$$

Symbolen: In deze formule is v de snelheid (in m/s) van een sterrenstelsel en is d de afstand (in m) van dat sterrenstelsel tot de aarde. De evenredigheidsconstante H is de *constante van Hubble* met een huidige waarde van $2,31 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$. De waarde van de Hubble-constante is onderwerp van discussie. Dit komt doordat afstandsbepaling in het heelal moeilijk is.

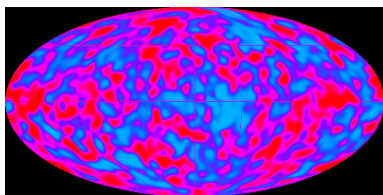


Figuur 88 – Als we een ballon met daarop een aantal stippen opblazen, zullen de stippen zich steeds verder van elkaar verwijderen. Dat gebeurt ook met de sterrenstelsels in een uitdijend heelal.

Met de wet van Hubble is de leeftijd van het heelal te bepalen. Vanwege de onzekerheid in de waarde van de Hubble-constante levert dat echter niet meer dan een ruwe schatting.

Dat alle sterrenstelsels zich van ons af bewegen wil overigens niet zeggen dat ons Melkwegstelsel zich in het centrum van het heelal bevindt. De uitdijning van het heelal ziet er namelijk vanaf elk punt hetzelfde uit. Stel je het heelal maar eens voor zoals de ballon van figuur 88. De stippen op die ballon stellen sterrenstelsels voor. Als we de ballon opblazen, dijt het gehele heelal (het ballonoppervlak) uit en 'ziet' elke stip de andere stippen van zich af bewegen. Vanuit elk punt lijkt het dus alsof je in het middelpunt van het heelal staat.

Kosmische achtergrondstraling



Figuur 89 – De kosmische achtergrondstraling zoals waargenomen door de Cobe satelliet.

Begrippen

Kosmologie
Oerknaltheorie
Wet van Hubble
Uitdijning van het heelal
Kosmische achtergrondstraling

Formules

De formule voor de wet van Hubble hoeft je niet te kennen, maar je moet hem in opgaven wel kunnen gebruiken.

Het zou natuurlijk mooi zijn, als we terug in de tijd naar de oerknal konden kijken. In feite kijken we met een telescoop altijd terug in de tijd omdat het licht een eindige snelheid heeft. We zien elk voorwerp in het heelal zoals het was op het tijdstip dat het zijn licht uitzond. We zien de maan zoals die er een seconde geleden uitzag, we zien de zon van acht minuten geleden en bij het Andromedastelsel (op een afstand van 2,2 miljoen lichtjaar) kijken we zelfs 2,2 miljoen jaar terug in de tijd.

Terugkijken naar de oerknal kan niet. Maar de oerknaltheorie voorspelt wel dat er straling uit de begintijd van het heelal meetbaar moet zijn. We noemen dat de *kosmische achtergrondstraling*. Deze microgolfstraling werd inderdaad in 1965 door Arno Penzias en Robert Wilson ontdekt. Met de satelliet Cobe (COsmic Background Explorer) werd in 1992 de kosmische achtergrondstraling nauwkeurig in kaart gebracht. Deze straling bleek – zoals voorspeld door de oerknaltheorie – heel gelijkmatig te zijn, met slechts minimale variaties.

Samenvatting

Kosmologen proberen de vraag te beantwoorden hoe het heelal is ontstaan, hoe het heelal zich heeft ontwikkeld en hoe de toekomst van het heelal eruit ziet.

Volgens de moderne inzichten ontstond het heelal ongeveer 13,7 miljard jaar geleden met de *oerknal*. Hiervoor is een aantal aanwijzingen, waaronder de waargenomen *uitdijning van het heelal* (volgens de *wet van Hubble*) en het bestaan van de *kosmische achtergrondstraling*.

De wet van Hubble geeft het verband tussen de vluchtsnelheid v en de afstand d van sterrenstelsels:

$$v = H \cdot d$$

In een relatief korte periode na de oerknal konden quarks zich verbinden tot protonen en neutronen, gevolgd door de vorming van eerst de atoomkernen en later de atomen van de lichtste elementen. Ruwweg 1 miljard jaar na de oerknal klonterde deze materie onder invloed van de gravitatiekracht samen tot de eerste sterren en sterrenstelsels. De atomen van de zwaardere elementen zijn later door kernfusieprocessen in de sterren ontstaan en bij supernova-explosies door het heelal verspreid.

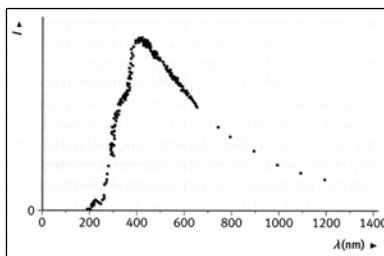
Het licht van een ster of sterrenstelsel heeft tijd nodig om de afstand naar de aarde te overbruggen. Wanneer wij dat licht waarnemen, kijken we dus naar het verleden.

Opgaven

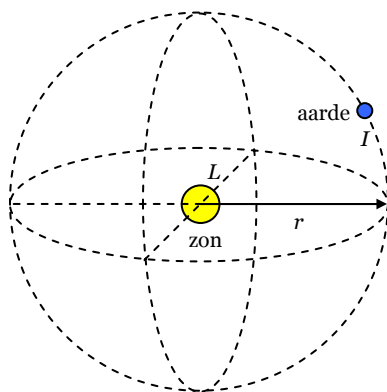
4.1 Een heelal vol sterrenstelsels



Figuur 90



Figuur 91 – Het stralingsspectrum van een ster.



Figuur 92

51 Orion

Figuur 90 laat het sterrenbeeld Orion zien met de heldere sterren Betelgeuze en Rigel. Betelgeuze is roodachtig van kleur en Rigel blauwachtig.

Van welke ster is de oppervlaktetemperatuur het hoogst? Leg uit waarom.

52 Warmtestraling

Alle voorwerpen in je omgeving stralen – net als een ster – energie uit.

a Waarom kun je deze voorwerpen dan in het donker niet zien?

b Bereken de golflengte van de piek in het stralingsspectrum van deze voorwerpen. In welk gebied van het elektromagnetisch spectrum ligt deze straling?

53 Oppervlaktetemperatuur van een ster

Figuur 91 geeft het stralingsspectrum van een ster. Bepaal de oppervlaktetemperatuur van deze ster.

54 Zwakke en heldere sterren

Een ster met een grote lichtsterkte kan voor ons op aarde zwakker zijn dan een ster met een kleine lichtsterkte. Verklaar dit.

55 Lichtsterkte van de zon

De stralingsintensiteit I van de zon hier op aarde is $1,40 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$. We noemen dit de *zonneconstante*. Met dit gegeven is de lichtsterkte of het stralingsvermogen van de zon te berekenen.

Het door de zon uitgezonden stralingsvermogen L_{zon} verspreidt zich in alle richtingen over een boloppervlak in de ruimte (zie figuur 92). Ter plaatse van de aarde is dat het oppervlak van een bol met een straal r die gelijk is aan de afstand zon-aarde. En op dat boloppervlak is de stralingsintensiteit I van de zon bekend: de zonneconstante.

a Bereken het oppervlak van de bol om de zon waarop de aarde ligt. Aanwijzing – Het oppervlak A van een bol met straal r wordt gegeven door $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$.

b Bereken met dat boloppervlak en de zonneconstante het door de zon uitgestraalde vermogen L_{zon} . Controleer je antwoord met Binas.

c Laat zien dat je de lichtsterkte L_{zon} bepaald hebt met de volgende formule:

$$L_{\text{zon}} = I_{\text{zon}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_{\text{za}}^2$$

In deze formule is I_{zon} de zonneconstante (de stralingsintensiteit van de zon op aarde) en r_{za} de afstand zon-aarde.

56 Lichtsterkte van de ster Sirius

Op aarde is de stralingsintensiteit van de ster Sirius $1,33 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$. De afstand van de aarde tot Sirius is bekend: $8,1 \cdot 10^{16} \text{ m}$.

a Bereken de lichtsterkte van de ster Sirius. Aanwijzing – Ga op dezelfde manier te werk als in opgave 55.

- b** Hoeveel keer zo groot is de lichtsterkte van de ster Sirius, vergeleken met de lichtsterkte van de zon?

57 Het Hertzsprung-Russel diagram

In het Hertzsprung-Russel diagram van figuur 78 staan de sterren waarvan de lichtsterkte L en de oppervlaktetemperatuur T bekend is.

- a** Welke gegevens van een ster hebben we nodig om de lichtsterkte van die ster te kunnen bepalen? En hoe bepalen we dan die lichtsterkte?
- b** Welke gegevens van een ster hebben we nodig om de oppervlaktetemperatuur van die ster te kunnen bepalen? En hoe bepalen we dan die oppervlaktetemperatuur?

58 Afstandbepaling met het Hertzsprung-Russel diagram

Met behulp van het Hertzsprung-Russel diagram van figuur 78 is de afstand van een ster te bepalen als die ster te ver weg ligt voor het gebruik van de parallaxmethode. De aanname hierbij is dat de ster op de zogenaamde hoofdreeks ligt.

- a** Leg uit waarom dit een redelijke aanname is.
Voor deze manier van afstandbepaling moet het stralingsspectrum van de ster worden gemeten.
- b** De piek van het stralingsspectrum van deze ster ligt bij een golflengte van 290 nm. Bereken de oppervlaktetemperatuur van deze ster.
- c** Bepaal met deze oppervlaktetemperatuur en het Hertzsprung-Russel diagram van figuur 78 de lichtsterkte van deze ster.
- d** De stralingsintensiteit van deze ster is op aarde $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2$. Bereken de afstand van deze ster. Aanwijzing – Ga op dezelfde manier te werk als in opgave 55, maar dan in omgekeerde volgorde: je weet nu de lichtsterkte L en de stralingsintensiteit I van de ster, maar niet de afstand r .

59 Exoplaneet

Lees eerst het onderstaande deel van een krantenartikel over de speurtocht naar *exoplaneten*: planeten bij andere sterren dan de zon.

Planeet in zicht

Over het bestaan van planeten bij andere sterren (exoplaneten) wordt al eeuwenlang gespeculeerd. Christiaan Huygens rekende al voor dat je ze met een telescoop nooit kunt zien: een planeet weerkaatst maar een heel klein beetje licht van zijn moederster, en zo'n zwak lichtstipje wordt volledig door de ster overstraald. Toch zijn er sinds 1995 ruim honderd exoplaneten gevonden.

Hun bestaan is afgeleid uit kleine, periodieke snelheidsvariëaties van de ster waar ze omheen draaien: de ster schommelt een beetje door de geringe zwaartekracht van de planeet.

Op die manier worden vooral zware planeten in kleine omloopbanen gevonden – die veroorzaken de grootste snelheidsvariëaties.

Bron: *de Volkskrant*, 9 augustus 2003.

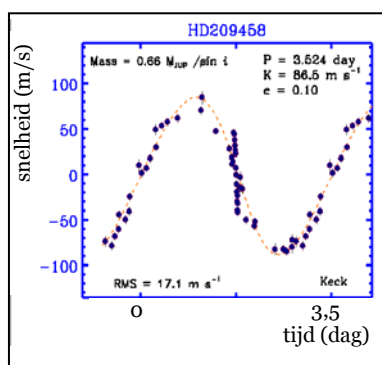
In deze opgave ga je na hoe astronomen de massa en de baanstraal van zo'n exoplaneet bepalen.

Een voorbeeld van een exoplaneet is die bij de ster HD 209458. Van deze ster is de massa M bekend: $M = 2,1 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

Uit het spectrum van deze ster blijkt dat deze afwisselend naar ons toe en van ons af beweegt. Die beweging wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een exoplaneet. Planeten draaien namelijk niet in (ruwweg) een cirkelbaan rond een ster, maar zowel de planeet als de ster draaien beide in een cirkelbaan rond hun gemeenschappelijk zwaartepunt Z. Dat is in bovenaanzicht – en nogal overdreven – weergegeven in figuur 93. Als we aannemen dat de aarde zich in hetzelfde vlak bevindt als het baanvlak van de exoplaneet, zal de ster zich regelmatig in zijn baan rond het punt Z naar de aarde toe en van de aarde af bewegen.

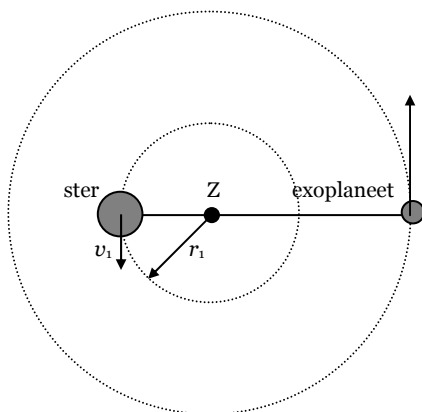
Extra

Het *dopplereffect* ken je bij geluid: de toonhoogte van het geluid van een naderende ambulance verandert bij het passeren van hoger naar lager dan normaal. Of, met andere woorden: de waargenomen golflengte van het geluid verandert van kleiner naar groter dan normaal. Zo'n dopplereffect treedt ook op bij licht. De golflengteverschuiving in het spectrum van een bewegende ster is te meten. En uit die gemeten golflengteverschuiving is de snelheid van de ster te berekenen.

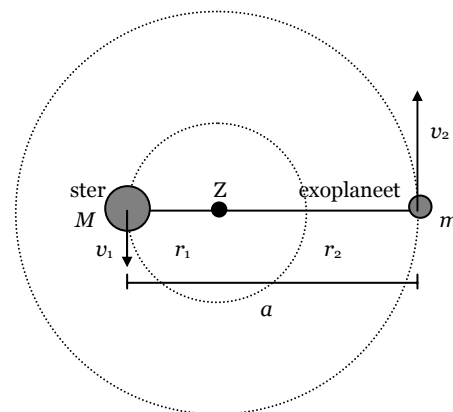


Figuur 94 – De snelheid v van de ster HD 209458 ten opzichte van de aarde in de loop van de tijd t .

Uit het spectrum van de ster is met de theorie van het dopplereffect de snelheid van de ster te berekenen. Het resultaat staat in figuur 94.



Figuur 93 – De ster HD 209458 en zijn exoplaneet draaien in cirkelbanen rond hun gemeenschappelijk zwaartepunt Z.



Figuur 95 – De ster HD 209458 en zijn exoplaneet draaien in cirkelbanen met stralen r_1 en r_2 rond hun gemeenschappelijk zwaartepunt Z. De afstand a tussen ster en exoplaneet is de som van de twee baanstralen.

a Bepaal uit het diagram van figuur 94 de baansnelheid v_1 en de omlooptijd T van de ster.

b Bereken met behulp van de baansnelheid v_1 en de omlooptijd T de straal r_1 van de cirkelbaan van de ster rond het gemeenschappelijk zwaartepunt Z.

Met behulp van de bekende gegevens van de ster zijn nu de massa m en de baanstraal r_2 van de exoplaneet te bepalen.

In figuur 95 zijn nogmaals de banen van de ster en de exoplaneet weergegeven. Beide massa's beschrijven in dezelfde omlooptijd T cirkelbanen rond hun gemeenschappelijk zwaartepunt Z. De relatie tussen de onderlinge afstand a en de omlooptijd T van de planeet rond de ster wordt gegeven door de derde wet van Kepler:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

c Bereken met de derde wet van Kepler de onderlinge afstand a tussen de ster en de exoplaneet. Aanwijzing – De massa M van de ster is bekend: zie het begin van deze opgave.

d Bereken nu met a en r_1 de baanstraal r_2 van de exoplaneet.

Voor de massa's van de ster en de exoplaneet geldt de volgende formule:

$$\frac{M}{m} = \frac{r_2}{r_1}$$

e Bereken met deze formule de massa m van de exoplaneet.

f Vergelijk de baanstraal van de exoplaneet met die van de aarde: staat de exoplaneet dichter bij zijn ster dan de aarde bij de zon?

g Vergelijk de massa van de exoplaneet met die van de aarde: hoeveel keer groter is de massa van de exoplaneet? Op welke planeet uit ons zonnestelsel lijkt de exoplaneet waarschijnlijk het meest?

4.2 De evolutie van het heelal

60 Oerknal

In figuur 85 staat een schematische weergave van de oerknaltheorie.

a Wat houdt de oerknaltheorie in?

b Maak een tijdlijn van de geschiedenis van het heelal vanaf de oerknal tot nu. Geef op die tijdlijn de volgende gebeurtenissen aan: de vorming van protonen en neutronen, de vorming van atomen, de vorming van sterren en sterrenstelsels en de eerste supernova-explosies.

61 Vluchtende sterrenstelsels

In 1912 onderzoekt C. Slipher het spectrum van een groot aantal sterrenstelsels. Uit zo'n spectrum is met behulp van de theorie van het dopplereffect de snelheid van een sterrenstelsel te bepalen. Uit Slipher's metingen blijkt dat alle sterrenstelsels zich van ons Melkwegstelsel verwijderen. En dat de grootste snelheden optreden bij zeer lichtzwakke sterrenstelsels.

a Op welk (kwalitatief) verband tussen de vluchtsnelheid en de afstand van de onderzochte sterrenstelsels wijst dit?

In 1936 gebruikt Edwin Hubble de door hem gemeten afstand van een aantal sterrenstelsels om de relatie tussen vluchtsnelheid en afstand in een formule vast te leggen. Zijn metingen staan in de tabel van figuur 96.

b Zet in een diagram de vluchtsnelheid (verticaal) uit tegen de afstand (horizontaal) voor minstens vijf sterrenstelsels uit de tabel.

Het verband tussen vluchtsnelheid en afstand blijkt recht evenredig te zijn, en kan dus worden uitgedrukt in de volgende formule:

$$v = H \cdot d$$

In deze formule is v de vluchtsnelheid (in m/s) van een sterrenstelsel en d de afstand (in m) tot ons Melkwegstelsel. De evenredigheidsconstante H noemen we de *constante van Hubble*.

c Bepaal uit het getekende diagram de waarde van de Hubble-constante.

d De huidige waarde van de Hubble-constante H is $2,31 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$. Verklaar het verschil met de waarde waarop Hubble zelf uitkwam (vraag c).

Sterrenstelsel	Snelheid (10^3 km/s)	Afstand (10^8 ly)
Virgo	1,2	0,07
Coma	6,7	0,41
U Ma I	15,0	0,92
Leo	19,5	1,20
Cr B	21,5	1,32
Gem	23,4	1,44
Boo I	39,3	2,42
U Ma II	40,0	2,46
Hydra	60,9	3,75

Figuur 96 – Vluchtsnelheid en afstand van een aantal sterrenstelsels volgens Hubble in 1936.

62 Bewegend sterrenstelsel

Een sterrenstelsel beweegt met de helft van de lichtsnelheid van ons af. Hoe ver weg staat dit sterrenstelsel?

63 Ouderdom van het heelal

De schatting van de ouderdom van het heelal berust op de veronderstelling dat de vluchtsnelheid van een sterrenstelsel steeds constant is geweest.

a Een sterrenstelsel bevindt zich op een afstand van $2,0 \cdot 10^{25} \text{ m}$ van het Melkwegstelsel. Bereken de vluchtsnelheid van dit sterrenstelsel met de formule van Hubble.

b Bereken de tijd die dit sterrenstelsel nodig heeft gehad om deze afstand met constante snelheid af te leggen.

c Hoe groot is dan naar schatting de ouderdom (in jaren) van het heelal?

d Laat met een berekening of een redenering zien dat de ouderdom van het heelal gelijk is aan het omgekeerde van de Hubble-constante.

64 Achtergrondstraling

De kosmische achtergrondstraling is te vergelijken met die van een stralend object met een temperatuur van 2,73 K.

- Bij welke golflengte ligt de piek in het spectrum van de kosmische achtergrondstraling?
- In welk gebied van het elektromagnetisch spectrum ligt deze piek?

Groepsopdrachten

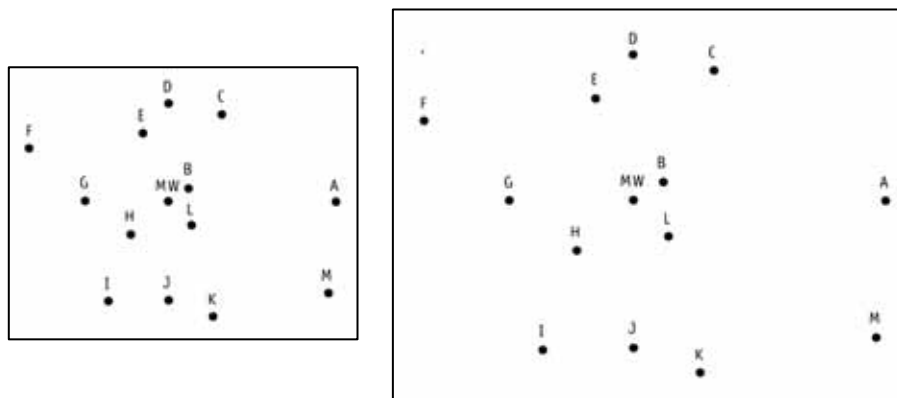
65 Sterrenstelsels in soorten

Een sterrenstelsel kan de vorm hebben van een spiraal, zoals het Melkwegstelsel en het Andromedastelsel. Deze soort sterrenstelsels noemen we *spiraalstelsels*. Maar er zijn ook sterrenstelsels met andere vormen.

Ga naar de website van Astronomical Picture of the Day (zie de lijst met internetsites op bladzijde 8). Zoek minstens drie sterrenstelsels met duidelijk van elkaar verschillende vormen en beschrijf elk van die vormen.

66 Uitdijend heelal

Op de twee kaarten van figuur 97 zie je het Melkwegstelsel (MW) en enkele relatief dichtbij gelegen sterrenstelsels. Links is de huidige situatie getekend, rechts de situatie over 6 miljard jaar.



Figuur 97 – Sterrenstelsels in de buurt van ons Melkwegstelsel (MW).

- Welke twee gegevens over de sterrenstelsels zijn gebruikt om de twee kaarten te maken?

Maak een kopie van de rechterkaart op een vel doorzichtig plastic (bijvoorbeeld een transparant voor de overheadprojector).

- Leg de kopie over de linkerkaart en laat het Melkwegstelsel op beide kaarten samenvallen. Beschrijf hoe vanuit het Melkwegstelsel gezien het heelal uitdijt.

- Kies een willekeurig ander sterrenstelsel en laat dat sterrenstelsel op de twee kaarten samenvallen. Beschrijf hoe vanuit dit sterrenstelsel gezien het heelal uitdijt.

- Kun je nu ook zeggen in welk punt de Big Bang is begonnen? Leg uit waarom wel of niet.

5 Satellieten

Hoofdstukvraag	Waarvoor gebruiken we satellieten in een baan rond de aarde, en in welke banen bewegen ze?
----------------	--



Figuur 98 – Satellieten kunnen zichzelf tientallen jaren van energie voorzien met zonnepanelen.

De eerste kunstmaan *Spoetnik* werd in 1957 door de Sovjet-Unie in een baan rond de aarde gebracht. In 1958 volgden de Amerikanen met de *Explorer I*. Er bevinden zich nu in totaal zo'n vijfduizend satellieten in een baan rond de aarde. De meeste werken niet meer: ze zijn verouderd of het zijn restanten van mislukte experimenten.

In dit hoofdstuk bespreken we verschillende soorten satellieten en de banen waarin ze bewegen.

67 Satellieten

Satellieten in banen rond de aarde worden voor verschillende doeleinden gebruikt. Ze bewegen ook in verschillende banen. De meeste satellieten bewegen in een geostationaire baan of in een polaire baan.

- Waarvoor worden satellieten in een baan rond de aarde gebruikt?
- Wat is een geostationaire baan? En wat is een polaire baan?
- Is er een verband tussen de functie van een satelliet en het soort baan waarin deze beweegt? Leg uit waarom wel of niet.

5.1 Soorten satellieten

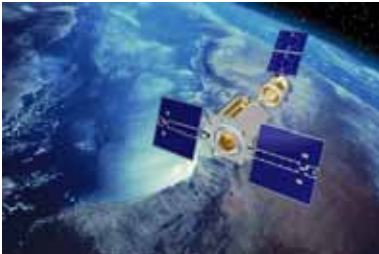
Paragraafvraag	Waarvoor gebruiken we satellieten?
----------------	------------------------------------

Satellieten

Een satelliet is een voorwerp dat om de aarde, om een andere planeet of om de zon draait. De eerste bekende satelliet was de maan. Maar ook de manen van andere planeten zijn satellieten. Zoals de maan om de aarde draait en daardoor een satelliet van de aarde is, zo is de aarde een satelliet van de zon. Het hangt er maar van af hoe je het bekijkt.

Rondom de aarde zweeft een groot aantal door de mens gemaakte satellieten. Deze satellieten zijn op verschillende manieren in te delen. Een eerste indeling is naar hun functie:

- *Communicatiesatellieten* voor het doorgeven van telefoongesprekken en tv-programma's.
- *GPS-satellieten* voor plaatsbepaling op aarde (Global Positioning System).
- *Astronomische satellieten* voor onderzoek van het heelal.
- *Aardobservatiesatellieten* voor hulp bij het maken van weersverwachtingen en voor onderzoek van de aarde.



Figuur 99 – De ASTRA communicatiesatellieten staan op $19,2^\circ$ OL (oosterlengte, dus $19,2^\circ$ ten oosten van de Greenwich meridiaan).

Een andere indeling berust op de soort baan van de satelliet: geostationair of polair.

- *Geostationaire satellieten* draaien rondom de aarde in een baan boven de evenaar op een hoogte van bijna 36 duizend km boven het aardoppervlak. Een satelliet in deze *geostationaire baan* heeft een omlooptijd van 24 uur en staat dus stil ten opzichte van een punt op de ronddraaiende aarde.
- *Polaire satellieten* draaien rondom de aarde in een baan die over de polen loopt. Omdat de aarde onder de baan doordraait, komt elke 24 uur iedere locatie op het aardoppervlak in zicht van een satelliet in zo'n *polaire baan*. De meeste polaire satellieten bevinden zich op een hoogte van 700 tot 1000 km boven het aardoppervlak en hebben een omlooptijd van ongeveer 1,5 uur.

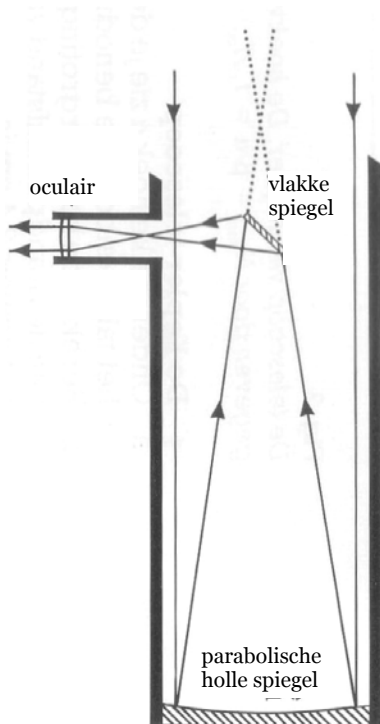
Communicatiesatellieten

Communicatiesatellieten gebruiken we voor radio, tv en het telefoonverkeer. Ze worden boven een bepaald punt op de evenaar geplaatst en zijn dus geostationair. In de geostationaire baan bevindt zich een groot aantal internationale satellieten. Elke communicatiesatelliet heeft zijn eigen plaats aan de hemel. Deze plek wordt aangegeven met de geografische lengte. De bekende paraboolschotels kunnen dus gewoon op een vaste plaats gericht worden waar de satelliet altijd te vinden is.

De omlooptijd van een satelliet wordt bepaald door de straal van de baan (zie paragraaf 5.2). Geostationaire satellieten staan op een hoogte van 36 duizend

km boven het aardoppervlak. Daar is de omlooptijd 24 uur, hetzelfde als de tijd waarin de aarde om zijn as draait.

Astronomische satellieten



Figuur 100 – Optische telescoop.

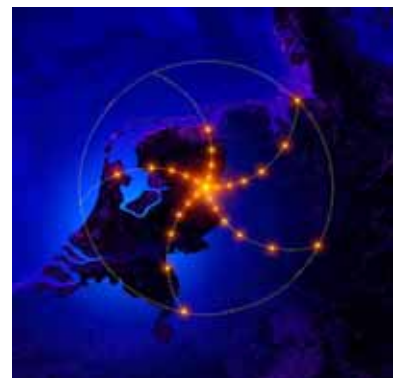


Figuur 101 – Radiotelescoop.

Met een *optische telescoop* (zie figuur 100) kunnen we vanaf de aarde waarnemingen doen in het golflengtegebied van het zichtbare licht. Zo'n telescoop bestaat uit een grote parabolische spiegel die het invallende licht concentreert. Met één of meer lenzen wordt daarna het beeld gevormd.

Het zichtbare licht is maar een klein deel van de elektromagnetische straling die sterren en andere hemellichamen uitzenden. Met *radiotelescopen* kunnen we ook golflengten in het radiogebied waarnemen. Dat heeft bijvoorbeeld geleid tot de ontdekking van nieuwe soort ster: de *pulsar*. Dit soort sterren geeft een uiterst regelmatig radiosignaal af. Toen dit signaal ontdekt werd door Jocelyn Bell Burnell en Anthony Hewish was even de gedachte dat dit misschien een teken van een buitenaardse beschaving was. Maar al snel bleek dat een pulsar een zeer snel roterende *neutronenster* is – een ster die vrijwel geheel bestaat uit neutronen – waarvan de straling aan de magnetische polen in bundels wordt uitgezonden. Dit is een voorbeeld van het feit dat nieuwe waarnemingstechnieken in de sterrenkunde bijna altijd tot nieuwe ontdekkingen leiden.

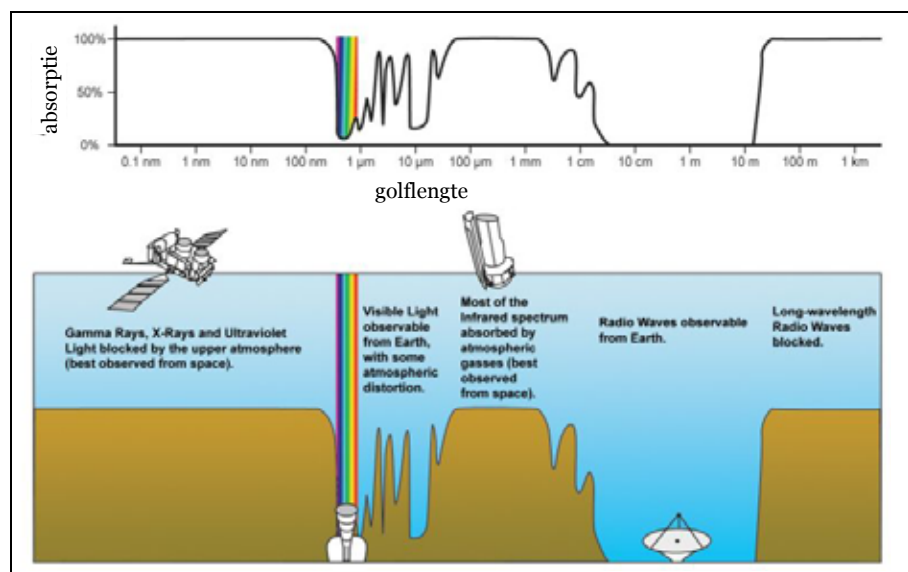
Een radiotelescoop is een antenne voor radiogolven. Omdat de golflengte van radiogolven veel groter is dan de golflengte van zichtbaar licht, moet de parabolische reflector van een radiotelescoop veel groter zijn dan die van een optische telescoop. Radiotelescopen worden vaak opgesteld in groepen, waarbij de metingen van de verschillende telescopen gecombineerd kunnen worden. In Nederland staat bijvoorbeeld bij Westerbork de WRST, een rij van veertien radiotelescopen. Op dit moment wordt de LOFAR radiotelescoop (LOW Frequency ARray) gebouwd in de noordelijke provincies van ons land. LOFAR is opgebouwd uit 25 duizend eenvoudige antennes, verspreid over een groot gebied en met elkaar verbonden door een supersnel glasvezelnetwerk. Zo ontstaat een radiotelescoop met een diameter van 350 km. Hoe groter de diameter van zo'n radiotelescoop is, des te meer details zijn er op de 'beelden' van het heelal te zien. Eén van de belangrijkste functies van de LOFAR radiotelescoop is het meten van signalen van neutraal waterstof uit het vroege heelal. Astronomen verwachten hiermee het moment te zien waarop de eerste sterrenstelsels zich vormden.



Figuur 102 – De LOFAR radiotelescoop bestaat uit een groot aantal relatief eenvoudige antennes die bijvoorbeeld in een weiland geplaatst kunnen worden (links). De LOFAR-antennes komen in een zeer groot gebied te staan (rechts).

Voor de sterrenkunde zijn alle soorten elektromagnetische straling uit het heelal van belang. De atmosfeer van de aarde laat echter delen van het elektromagnetisch spectrum niet door, zoals röntgenstraling, ultravioletstraling en gedeelten van de infraroodstraling (zie figuur 103). Metingen van dat

soort straling moeten daarom worden uitgevoerd door een satelliet in de ruimte. De Nederlandse ruimtevaart speelt daarin een belangrijke rol. Nederland neemt onder andere deel in de ESA (European Space Agency). Verreweg de grootste vestiging van ESA is het centrum voor ruimteonderzoek en technologie ESTEC in Noordwijk.

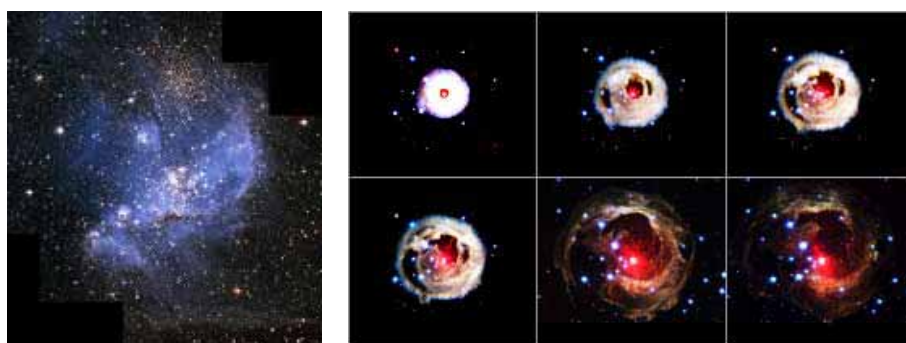


Figuur 103 – Absorptie van straling in de atmosfeer van de aarde. De atmosfeer is alleen 'doorzichtig' voor zichtbaar licht, een deel van de infraroodstraling en een deel van de radiogolven uit het heelal.

Geavanceerde astronomische satellieten zijn zeer kostbaar en alleen te realiseren in een Europees of nog groter samenwerkingsverband. De bekende *Hubble ruimtetelescoop* is tot stand gekomen door een samenwerking tussen de NASA en de ESA. Deze ruimtetelescoop bestaat uit een aantal precisie-instrumenten voor astronomische waarnemingen, en draait sinds de lancering in 1990 rond de aarde. De Hubble ruimtetelescoop wordt vooral gebruikt voor optische waarnemingen, maar bezit ook een infraroodcamera. Deze telescoop levert momenteel de scherpst mogelijke beelden van het heelal, ondanks het feit dat de spiegel veel kleiner is dan die van veel telescopen op het aardoppervlak. Dat komt omdat hij zich boven de turbulente en verstorende atmosfeer van de aarde bevindt.



Figuur 104 – De Hubble ruimtetelescoop.



Figuur 105 – Beelden van de Hubble ruimtetelescoop: jonge sterren in het Melkwegstelsel (links) en de explosie van een rode reus (rechts).

Satellieten worden ook gebruikt voor het waarnemen van ultraviolet- en röntgenstraling. Een voorbeeld is de *Chandra X-ray Observatory* die waarnemingen doet in het röntgengebied van het elektromagnetisch spectrum. Deze satelliet is in 1999 door de Space Shuttle Columbia in een elliptische baan om de aarde geplaatst. De meest nabije afstand tot de aarde bedraagt 16

duizend km, de verste afstand is 133 duizend km. De baan is elliptisch, omdat de satelliet alleen kan waarnemen boven de Van Allen-gordels.

Aardobservatiesatellieten

De meest bekende aardobservatiesatellieten zijn de *weersatellieten*. In de meteorologie gaat het altijd om hetzelfde: voorspel zo nauwkeurig mogelijk het weer in de (nabije) toekomst. Tot de opkomst van de natuurwetenschap en de ruimtetechnologie berustte de weersvoorspelling op volksgezegden en bijgeloof. Vanaf de negentiende eeuw werd in veel landen een net van weerstations opgezet. Toen de telefoon en telegraaf in gebruik kwamen, kon men de resultaten gemakkelijk aan elkaar doorgeven. De kwaliteit van de weersverwachting werd daar aanmerkelijk beter door. Maar het aantal weerstations bleef beperkt. De komst van satellieten bood een oplossing. Met weersatellieten is onder andere de bewolking, de temperatuur van het aardoppervlak en de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer waar te nemen.

Wolkenfoto's worden door een satelliet gemaakt met behulp van zichtbaar licht. De wolken kaatsen veel meer licht terug dan de atmosfeer, zodat duidelijk is welk deel van de aarde met wolken bedekt is. Door achter elkaar wolkenfoto's te maken, kan men de beweging van de wolken volgen.

De temperatuur van het aardoppervlak is met de wet van Wien te bepalen uit de uitgezonden infraroodstraling met een golflengte van 10 tot 12 mm: hoe hoger de temperatuur is, des te kleiner is de golflengte waarbij de intensiteit van de uitgezonden infraroodstraling maximaal is. Infraroodstraling wordt door de atmosfeer slechts een klein beetje verzwakt en een weersatelliet kan deze dus waarnemen.

Om te kunnen schatten of zich bewolking gaat vormen is het van belang te weten hoeveel waterdamp zich in de lucht bevindt. Waterdamp absorbeert straling met een golflengte tussen 5,7 en 7,1 mm. Uit de signaalsterkte van de teruggekaatste straling kan de satelliet de concentratie van waterdamp in de atmosfeer schatten.



Figuur 106 – Opname van de weersatelliet Meteosat.



Figuur 108 – False color-opname van de overstromingen in het Gelderse rivierengebied in 1995 door de satellieten ERS-1 en ERS-2.



Figuur 107 – Landsat-opname van een deel van Nederland.

Andere aardobservatiesatellieten worden onder andere gebruikt voor vegetatieonderzoek, cartografie, archeologisch onderzoek, oceanografisch onderzoek en opsporing van grondstof- en watervoorraden. Zo hebben satellieten de afgelopen twintig jaar de aarde nauwkeuriger dan ooit in kaart gebracht.

De belangrijkste aardobservatiesatellieten zijn de Amerikaanse *Landsat* en de Franse *SPOT*. Deze satellieten cirkelen in een polaire baan om de aarde en verzamelen geheel automatisch gegevens over de aarde. De satelliet *Landsat*

6 bijvoorbeeld heeft een periode van 99 minuten en heeft na 233 omlopen het gehele aardoppervlak gescand.

Aardobservatiesatellieten nemen straling waar. Daarbij kan het gaan om zonlicht dat door het aardoppervlak wordt teruggekaatst. Maar het kan ook gaan om infraroodstraling die door het aardoppervlak zelf is uitgezonden. Beelden in het infrarood worden meestal weergegeven als zogenaamde *false color*-opnamen (zie figuur 108). Infraroodstraling heeft geen kleur, maar bestaat uit een groot aantal verschillende golflengtes. De computer kan deze golflengtes vertalen naar kleurpatronen.

Ten slotte kan een aardobservatiesatelliet ook zelf straling uitzenden, die na terugkaatsing door het aardoppervlak weer door de satelliet wordt waargenomen. Het gaat dan meestal om radargolven die gemakkelijk door de bewolking heen dringen.

Begrippen

Geostationaire satelliet
Polaire satelliet
Optische telescoop
Radiotelescoop

Samenvatting

Geostationaire satellieten (zoals communicatiesatellieten) staan op een vast punt boven de evenaar. Polaire satellieten (zoals aardobservatiesatellieten) draaien rond de aarde in een baan over de polen, terwijl de aarde onder de satelliet doordraait. Deze satellieten kunnen dus het volledige aardoppervlak scannen.

Vanaf het aardoppervlak is het heelal waar te nemen met optische telescopen en radiotelescopen. De turbulente atmosfeer van de aarde zorgt echter voor verstoring van de beelden. Bovendien laat de atmosfeer grote delen van het elektromagnetisch spectrum niet door. Daarom worden satellieten gebruikt voor astronomische waarnemingen in het zichtbare licht en een groot aantal andere gebieden van het elektromagnetisch spectrum.

5.2 Satellietbanen

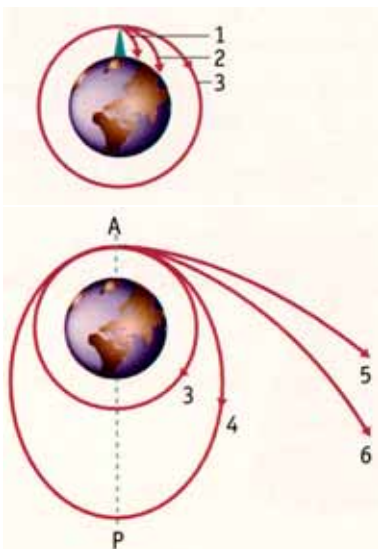
Paragraafvraag	In welke banen bewegen satellieten?
----------------	-------------------------------------

Gedachte-experiment van Newton

De beweging van satellieten werd voor het eerst door Newton verklaard. Hij maakte gebruik van het volgende gedachte-experiment: als een voorwerp met een flinke snelheid over een gladde tafel schuift, dan vliegt het met een horizontale snelheid over de rand en komt een stuk verder op de grond. Hoe groter de snelheid van het voorwerp is, des te verder het komt.

Newton gebruikte in zijn gedachte-experiment een hoge berg als tafel. Vanaf de top van de berg wordt een voorwerp horizontaal weggeschoten en valt een stuk verder op de aarde neer. Hoe groter de snelheid is waarmee het voorwerp wordt weggeschoten, des te verder komt het op het aardoppervlak neer (zie figuur 109, baan 1 en 2). Bij een bepaalde snelheid is de kromming van de baan van het voorwerp even groot als de kromming van het aardoppervlak (zie figuur 109, baan 3). Dan draait het voorwerp dus om de aarde: het is een satelliet geworden.

Maken we de beginsnelheid vervolgens nog groter, dan wordt de baan een ellips (zie figuur 109, baan 4). Het is zelfs mogelijk de beginsnelheid zover op te voeren dat het voorwerp zich steeds verder van de aarde verwijdt (zie figuur 109, baan 5 en 6). We zeggen dan dat het voorwerp ontsnapt aan de zwaartekracht van de aarde. Dat is bijvoorbeeld het geval met raketten die richting de maan of de planeten gaan. Een dergelijke satelliet moet bij de start minimaal een snelheid van 11 km/s meekrijgen.



Figuur 109 – Gedachte-experiment van Newton: als je maar hard genoeg gooit, komt een voorwerp in een baan rond de aarde.

De conclusie is dat satellieten rond de aarde of rond een ander hemellichaam een ellipsbaan volgen, net zoals de planeten rond de zon. Met de gravitatie-wet van Newton (zie hoofdstuk 3) zijn deze banen precies te beschrijven en te berekenen. We zullen ook nu weer voor het gemak aannemen dat deze banen in goede benadering cirkelbanen zijn.

Geostationaire satellietbaan

Communicatiesatellieten bewegen in een *geostationaire baan*. ‘Geostationair’ betekent: stilstaand vanuit de aarde gezien. Deze satellieten draaien dus rond met dezelfde snelheid als waarmee de aarde om haar as draait.

De straal van de cirkelbaan van een geostationaire satelliet is te berekenen met de formules uit hoofdstuk 3.

Rekenvoorbeeld

De baanstraal r van een satelliet met een bekende omlooptijd T is het makkelijkst uit te rekenen met de derde wet van Kepler volgens Newton:

$$\frac{r^3}{T^2} = K = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

Voor een satelliet in een baan rond de aarde is M de massa van de aarde. De waarde van de evenredigheidsconstante K is dan:

$$K = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,98 \cdot 10^{24}}{4 \cdot \pi^2} = 1,01 \cdot 10^{13} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

Voor een satelliet in een geostationaire baan is de omlooptijd T bekend: 24 h = $8,64 \cdot 10^4$ s. Voor de baanstraal r van de satelliet vinden we dan:

$$\frac{r^3}{T^2} = K \rightarrow r^3 = K \cdot T^2 = 1,01 \cdot 10^{13} \cdot (8,64 \cdot 10^4)^2 = 7,54 \cdot 10^{22} \rightarrow$$

$$r = 4,2 \cdot 10^7 \text{ m}$$

Dit is de baanstraal van een geostationaire baan, onafhankelijk van de massa van de satelliet.

De hoogte h van de geostationaire baan boven het aardoppervlak is het verschil tussen de baanstraal r en de straal R van de aarde:

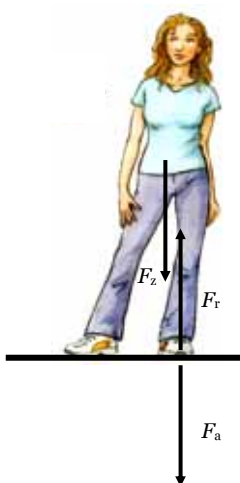
$$h = r - R = 4,2 \cdot 10^7 - 6,38 \cdot 10^6 = 3,6 \cdot 10^7 \text{ m} = 36 \cdot 10^3 \text{ km}$$

Een satelliet in een geostationaire baan bevindt zich dus op een hoogte van 36 duizend km boven het aardoppervlak.

Op dezelfde manier is de baanstraal van polaire satellieten te berekenen uit hun omlooptijd, of volgt – omgekeerd – hun omlooptijd uit de baanstraal. De baanstraal van een polaire baan is kleiner dan de baanstraal van een geostationaire baan. Daardoor is de omlooptijd van polaire satellieten kleiner dan 24 uur.

Satellieten worden met een raket in de juiste baan rond de aarde gebracht, met precies de snelheid die hoort bij de baanstraal. Een deel van de satellieten wordt vanuit de Amerikaanse *Space Shuttle* in de ruimte gezet. Een robotarm tilt de satelliet uit het laadruim. Vervolgens wordt de satelliet met kleine stuurraketten in de juiste baan gemanoeuvreed.

Gewichtloosheid



Figuur 110 – Zwaartekracht F_z , actiekracht F_a (gewicht) en reactiekracht F_r .

Een astronaut die in of buiten de Space Shuttle of het ISS (International Space Station) in een cirkelbaan rond de aarde draait is *gewichtloos*.

Op aarde is het *gewicht* van je lichaam – of een ander voorwerp – de kracht (in N) waarmee je lichaam tegen het aardoppervlak duwt. De oorzaak daarvan is de zwaartekracht van de aarde op je lichaam. Als je lichaam stil staat, trekt de zwaartekracht F_z je lichaam tegen het aardoppervlak aan. Daardoor oefent je lichaam een kracht F_a omlaag uit op het aardoppervlak. Deze kracht is je gewicht. Maar dan oefent het aardoppervlak volgens de derde wet van Newton een even grote (reactie)kracht F_r omhoog uit op je lichaam (zie figuur 110). De krachten F_z en F_r op je lichaam zijn even groot, want je staat stil. Ook de krachten F_a en F_r zijn volgens de derde wet van Newton even groot. Dus is je gewicht F_a even groot als de zwaartekracht F_z op je lichaam, waarbij de zwaartekracht gegeven wordt door $F_z = m \cdot g$. Dat geldt niet alleen op de aarde, maar bijvoorbeeld ook op de maan. Alleen is de valversnelling g bij het maanoppervlak ongeveer zesmaal zo klein als op aarde, zodat daar ook de zwaartekracht en dus je gewicht zesmaal zo klein is.

In een ruimteschip in een cirkelbaan rond de aarde ligt dat anders. Dan voert het lichaam van een astronaut onder invloed van de gravitatiekracht (of zwaartekracht) dezelfde cirkelbeweging uit als het ruimteschip. Want: voor het onder invloed van alleen de gravitatiekracht uitvoeren van een cirkelbe-



Figuur 111 – Gewichtloosheid in het ISS.

Valkuil

Gewichtloosheid betekent niet dat je geen massa meer zou hebben, zoals wel eens wordt gedacht.

Begrippen

Geostationaire baan
Polaire baan
Gewichtloosheid

weging rond de aarde spelen de massa van de astronaut en de massa van het ruimteschip geen rol. De astronaut zweeft dus ten opzichte van het ruimteschip: ze voeren beide een voortdurende *vrije val* rond de aarde uit. De astronaut wordt dus niet tegen de 'vloer' van het ruimteschip getrokken, en heeft dus geen gewicht. Met andere woorden: de astronaut is *gewichtloos*.

In een toestand van gewichtloosheid heeft het lichaam van de astronaut – of een ander voorwerp in het ruimteschip – nog wel *massa*. De massa (in kg) is de eigenschap van materie om zich te 'verzetten' tegen een versnelling. Deze eigenschap van materie noemen we *traagheid*. Vanwege deze eigenschap van materie is er een kracht nodig om de snelheid van een voorwerp te veranderen. En volgens de tweede wet van Newton ($F = m \cdot a$) geldt: hoe groter de massa m van het voorwerp is, des te groter is de kracht F die nodig is om het voorwerp eenzelfde versnelling a te geven.

In een ruimteschip als de Space Shuttle of het ISS betekent dit: er is een kracht nodig om de snelheid van het lichaam van de astronaut ten opzichte van het ruimteschip te veranderen. Om in het ruimteschip in beweging te komen of af te remmen, moet de astronaut zich dus tegen de wanden van het ruimteschip afzetten. Zoiets geldt ook voor alle andere voorwerpen in het ruimteschip. Een rondzwevend voorwerp is gewichtloos, maar heeft nog steeds dezelfde massa als op aarde. Dat betekent: als een astronaut in het ruimteschip zo'n voorwerp tegen zijn of haar hoofd krijgt, is er – net als op aarde – een kracht nodig om dat voorwerp af te remmen. En het effect daarvan op het hoofd van de astronaut is hetzelfde als op aarde.

Samenvatting

Satellieten draaien om de aarde met een omlooptijd die afhankelijk is van de baanstraal. Hoe groter de baanstraal is, des te langer is de omlooptijd – net als bij de planeten in het zonnestelsel. Geostationaire satellieten hebben een omlooptijd van 24 uur in een baan op 36 duizend km boven het aardoppervlak. De baanstraal en omlooptijd van polaire satellieten zijn kleiner dan die van geostationaire satellieten.

Je bent *gewichtloos* wanneer je geen kracht uitoefent op een ondergrond. Dit is bijvoorbeeld het geval in een ruimteschip in een baan rond de aarde. Zowel het ruimtestation als je lichaam zijn dan voortdurend in een vrije val onder invloed van alleen de gravitatiekracht.

Bij gewichtloosheid hebben voorwerpen nog steeds hun massa. Er is dan ook nog steeds een kracht nodig om de snelheid van die voorwerpen te veranderen.

Opgaven

5.1 Soorten satellieten

68 Geostationaire baan

Communicatiesatellieten draaien rond de aarde in een geostationaire baan.

- Wat is een geostationaire baan?
- Waarom zetten we geen geostationaire satelliet boven de lijn parallel aan de evenaar boven Nederland? Daar hebben we toch veel meer aan dan aan een satelliet die boven de evenaar staat?

69 Schotelantenne

De ASTRA communicatiesatellieten geven tv-zenders door. Voor het ontvangen van deze signalen is een schotelantenne nodig. Hoe kun je het punt aan de hemel vinden waar zich deze satellieten bevinden, zodat je de schotelantenne goed kunt richten?

70 Pentagon en het GPS

Lees eerst het onderstaande artikel over het GPS.

Is het GPS beter dan het Pentagon toegeeft?

Burgers die gebruikmaken van het militaire Global Positioning System GPS, konden in april 1997 een dag lang kennis maken met alle mogelijkheden die dit systeem biedt. Op 20 april zocht de Amerikaanse luchtmacht naar het wrak van een A-10-raket, die in de Rocky Mountains vermist werd. Het satellietstelsel GPS werd plotseling veel nauwkeuriger dan het volgens het Pentagon kan zijn.

Een GPS-satelliet zendt twee signalen uit. Het ene signaal kan iedereen gebruiken, terwijl het andere zo gecodeerd is, dat alleen het leger het kan gebruiken. Door het tijdsverschil tussen de signalen van de verschillende satellieten te meten, kunnen burgers de plaats van voorwerpen en posities op aarde tot op ongeveer honderd meter nauwkeurig bepalen.

Via eenzelfde signaal afkomstig van een zender op aarde, kan men het GPS ook voor burgergebruik veel nauwkeuriger maken: wel tot op een paar meter. Volgens het Pentagon komen de ontvangers van het leger niet verder dan een nauwkeurigheid van ongeveer twintig meter.

Stan Huntting echter, de auteur van het programma SA-watch dat de afwijkingen in

GPS-signalen bepaalt, vertelt dat op 20 april 1997 burgerinstallaties plotseling de plaats van voorwerpen op aarde konden bepalen met een nauwkeurigheid van minder dan twee meter, zonder gebruik te maken van een hulpzender.

Het ruimtevaartcommando van de Amerikaanse luchtmacht, dat de GPS-satellieten in beheer heeft, bevestigt dat de gebruikelijke onnauwkeurigheid, die in het signaal voor de burgers is ingebouwd, op 20 april werd uitgeschakeld. Maar luitenant-kolonel Don Miles, woordvoerder van het ruimtevaartcommando, weigert te vertellen waarom.

Een mogelijke oorzaak is dat de GPS-satellieten gebruikt werden bij het opsporen van het wrak van de A-10-raket, die tijdens een trainingsvlucht een paar weken eerder verdween. Zowel burgervliegtuigen als militaire vliegtuigen doorzochten een bergachtige streek in Colorado naar het wrak. En het Pentagon stelde alle vliegtuigen, die bij het zoeken betrokken waren, het veel nauwkeuriger GPS-signaal ter beschikking.

Huntting constateert dat enkele dagen later het GPS weer met de gebruikelijke nauwkeurigheid is uitgezonden, nadat bekend is gemaakt dat het wrak inderdaad gevonden is.

Bron: *New Scientist*, 17 mei 1997.

- Wat is het Pentagon? Waarom heet het zo?
- Waarom stelt het Amerikaanse leger niet voor iedereen GPS met grote nauwkeurigheid ter beschikking?
- Welke voordelen heeft een nauwkeurig GPS?
- Hoe nauwkeurig moet GPS ongeveer zijn voor koerscontrole van een auto? En voor gebruik door een blinde? Is een nauwkeurigheid van 'minder dan

twee meter' dan voldoende?

71 Hubble ruimtetelescoop

De Hubble ruimtetelescoop kijkt het heelal in het zichtbare en het infrarode deel van het elektromagnetisch spectrum.

- a Noem minstens twee voordelen van een telescoop in de ruimte, vergeleken met een telescoop op aarde.
- b Zijn er ook nadelen? Zo ja: welke?

72 Ozonlaag

Satellieten bewaken allerlei aspecten van de aarde. Waarom is het zo belangrijk om de dikte van de ozonlaag in de gaten te houden?

5.2 Satellietbanen

73 Krachten op satellieten

Satellieten bewegen in een cirkelbaan rond de aarde.

- a Zonder krachten gaat een satelliet rechtdoor. Welke kracht zorgt ervoor dat een satelliet netjes rond de aarde draait?
- b Men zegt wel eens dat een satelliet voortdurend valt. Is dit juist?

74 Geostationaire satelliet

Een geostationaire satelliet draait rond de aarde op een hoogte van $36 \cdot 10^3$ km boven het aardoppervlak. Hoe groot is de baansnelheid van zo'n satelliet?

75 International Space Station

Het International Space Station (ISS) in een baan rond de aarde heeft een omlooptijd van 1,5 uur.

- a Bereken de hoogte van het ISS boven het aardoppervlak.
- b Bereken de baansnelheid van het ISS.

76 Gewichtloosheid

De bemanning van het ISS in zijn baan rond de aarde is gewichtloos.

- a Op het ruimtestation en zijn bemanning werkt de zwaartekracht. Hoe kunnen de astronauten dan toch gewichtloos zijn?
- b Betekent gewichtloosheid dat een astronaut geen massa meer heeft? Leg uit waarom wel of niet.

77 Landsat

De aardobservatiesatelliet Landsat beweegt in een polaire baan. In één dag (24 h) draait deze satelliet 14 keer rond de aarde.

- a Bereken de hoogte van Landsat boven het aardoppervlak.
- b Bereken de baansnelheid van Landsat.

78 Satellietbanen

Welk verband is er tussen de functie van een satelliet en het soort baan (geostationair of polair) waarin deze beweegt? Vergelijk je antwoord op deze vraag met je antwoord bij oriëntatieopdracht 67 (vraag c).



Figuur 112 – Het International Space Station in een baan rond de aarde.

Groepsopdrachten

79 Global Positioning System

Op Internet is veel informatie te vinden over GPS. Zoek met een zoekmachine naar Nederlandse documenten over GPS.

Maak een kort werkstuk (maximaal 500 woorden) over één van de volgende aspecten van GPS:

- de manier waarop GPS werkt
- de maatschappelijke doelstellingen
- de militaire doelstellingen
- het aantal GPS-satellieten en de banen waarin ze rond de aarde draaien.

80 Meteosat

Via internet kun je weerbeelden van Meteosat ontvangen. Elk kwartier komt er een nieuwe opname.

Print de foto's van de afgelopen twee uur uit en beschrijf aan de hand daarvan de beweging van het wolkendek. Probeer ook de bewolkingssituatie twee uur (of langer) vooruit te voorspellen (en controleer of je voorspelling klopt).

81 Astronomische satellieten

Maak een 'portret' van een astronomische satelliet. Daarbij kun je denken aan satellieten die in verschillende delen van het elektromagnetisch spectrum waarnemen.

Zo'n portret bestaat uit een korte tekst (maximaal 250 woorden) over het doel van de satelliet: wat neemt deze satelliet waar, en waarom is dat belangrijk. Daarnaast bevat het portret minstens twee foto's: één van de satelliet zelf en minstens één van de beelden die deze satelliet levert. Het bijschrift bij de satellietbeelden moet duidelijk aangeven wat er op de foto te zien is en wat daaraan bijzonder is.

Een beschrijving van een groot aantal astronomische satellieten is te vinden op Wikipedia bij het onderwerp 'ruimteonderzoek'.

