

# 19 Sterrenkunde

vwo

## 19.0 Inleiding

Al heel lang houden mensen zich met astronomie bezig. De oudste aanwijzingen hiervan zijn prehistorische grottekeningen met stippen en patronen die mogelijk sterrenbeelden voorstellen of een andere astronomische betekenis hebben. Stonehenge in Engeland is 3000 jaar v. Chr. gebouwd, waarschijnlijk met als doel om zonnewendes (het begin van de zomer en de winter) vast te stellen. Rond 2500 jaar v. Chr. worden in **Egypte** de eerste tempels en piramides gebouwd. In het oude Egypte is zonnegod Ra is de machtigste en meest vereerde god, waarop hun kalender met 365 dagen is gebaseerd. Om de jaarlijkse overstroming van de Nijl te voorspellen kijken ze naar de ster Sirius die elk jaar half juni voor het eerst aan de hemel verschijnt. Voor de Egyptenaren is de verschijning van Sirius en de daarmee gepaard gaande overstroming van de Nijl het begin van aan nieuw jaar.

Aan de andere kant van de oceaan in Midden-Amerika wonen de **Maya's** die zich al heel lang met astronomie bezighouden. Het Maya-volk bestaat al vanaf 2000 jaar v. Chr. en is er nog steeds. Miljoenen mensen spreken vandaag nog Maya-talen en houden eeuwenoude tradities in ere. In de Mayacultuur is astronomie een fundamenteel onderdeel van het dagelijks leven. Religie, architectuur en landbouw is volledig afgestemd op de hemellichamen die zij als goden zien.

Voor de Maya's is de hemel een goddelijk boodschapper waaruit ze hun lot kunnen aflezen. Ze gebruiken een zonnekalender van 365 dagen voor seizoensplanning en landbouw en een kalender van 260 dagen voor religieuze ceremonies. Samen vormden ze het heilige kalenderwiel met een cyclus van 52 jaar. Behalve de sterren hebben ook de planeten Venus, Mercurius, Mars, Jupiter en Saturnus een bijzondere betekenis. Maans- en zonsverduisteringen zien ze als voortekens van natuurrampen en oorlog.



Kalenderwiel van de Maya's.

In het huidige Irak, tussen de rivieren Eufraat en Tigris, lag tussen de 18<sup>e</sup> en 6<sup>e</sup> eeuw v. Chr. het koninkrijk **Babylonië**. Ook de Babyloniërs hebben grote belangstelling in de sterrenhemel. Net als de Maya's geloofden ze dat de goden via de sterren en planeten boodschappen doorgeven. Ze doen dan ook veel moeite om deze boodschappen te duiden, omdat je daarmee natuurrampen, oorlog en hongersnood kunt voorspellen. Bij het nemen van besluiten laten koningen en priesters zich beïnvloeden door de stand van de sterren en planeten.

De Babyloniërs houden astronomische waarnemingen nauwkeurig bij op kleitabletten. Ze merken dat hemelse gebeurtenissen zich herhalen en denken daarom dat je door de hemel te bestuderen de toekomst kunt voorspellen. Ze gebruiken hierbij geometrie en wiskunde om de beweging van planeten, zoals Jupiter, uit te rekenen, iets wat pas 1500 jaar later in Europa wordt ontdekt.



Babylonisch astronomisch dagboek in spijkerschrift

De **oude Grieken** hebben een enorme invloed op de ontwikkeling van de astronomie. Ze combineren observatie met wiskunde en filosofie om het universum te begrijpen. Voor de Grieken zijn de hemellichamen geen goden die boodschappen doorgeven. Astronomie gebruiken ze niet om de toekomst te voorspellen maar zien ze als intellectuele uitdaging. Ze zijn nieuwgierig en willen begrijpen wat er aan de hand is.

**Aristoteles** (384–322 v. Chr.) ontwerpt een **geocentrisch** wereldbeeld waarin alles een doel heeft. De aarde staat in het midden van het universum. Daaromheen zijn schillen van water, lucht en vuur. Dan komt er een schil waarin zich de maan, de zon en de planeten bevinden en helemaal aan de buitenkant is een schil met de sterren. Waar die buitenste schillen uit bestaan is voor hem niet duidelijk. Aristoteles is ervan overtuigd dat ieder hemellichaam in een perfecte cirkelbaan om de aarde draait.



Het universum volgens Aristoteles

De Grieken hebben grote belangstelling in wiskunde. **Euclides** woont in Alexandrië (Egypte) en schrijft in 300 v. Chr. zijn beroemde boek *Elementen*, waarin hij de wiskundige kennis uit zijn tijd systematisch ordent. Hij laat zien dat je de volledige wiskunde uit een klein aantal uitgangspunten kunt afleiden door zuiver logisch nadenken. Meer dan 2000 jaar is zijn werk het standaard leerboek voor wiskunde en ook nu nog wordt zijn manier van werken nagevolgd. Ook **Claudius Ptolemaeus** komt uit Alexandrië en schrijft 150 jaar na Christus een boek waarin hij laat zien hoe je met het wereldbeeld van Aristoteles de beweging van de sterren en de planeten kunt uitrekenen. Arabische geleerden hebben dit boek de naam *Almagest* gegeven.

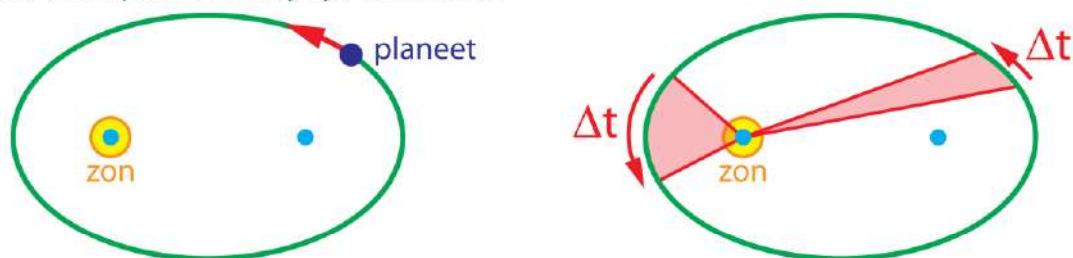
Als je ervan uitgaat dat alle hemellichamen in perfecte cirkels bewegen met de aarde als middelpunt heb je een ingewikkelde constructie nodig waarin cirkelbewegingen bij elkaar moeten worden opgeteld. Om een planeetbaan te beschrijven moet je 2 of 3 cirkels optellen en voor alle 5 bekende planeten (Mercurius, Venus, Mars, Jupiter en Saturnus) heb je dan meer dan 12 cirkelbewegingen nodig. Ptolemaeus begrijpt dat zijn model een kunstmatige constructie is waarmee je de planeetbewegingen kunt uitrekenen maar waarmee je niet de ware structuur van het universum kunt begrijpen. Het is veel eenvoudiger om niet de aarde maar de zon als middelpunt van het universum te nemen. Het wereldbeeld wordt dan **heliocentrisch**. **Aristarchus van Samos** (310–230 v. Chr.) heeft dit al in de gaten, maar niemand gelooft hem omdat Aristoteles veel beroemder is dan hij.

Bijna 2000 jaar heeft het geduurd voordat het heliocentrisch wereldbeeld weer tevoorschijn komt. **Nicolaas Copernicus** (1473–1543) verdedigt dit wereldbeeld in zijn boek

*Revolutionibus Orbium Coelestium* (over de omwentelingen van de hemellichamen) maar hij is er niet gerust op dat het wordt geaccepteerd omdat het ingaat tegen de leer van de katholieke kerk. Copernicus durft zijn boek pas vlak voor zijn dood te publiceren omdat hij bang is om door de kerk vervolgt te worden.

**Galileo Galilei** (1564–1642) is niet bang en is ervan overtuigd dat Copernicus gelijk heeft. Om dit te bewijzen kijkt hij als eerste met een telescoop naar Jupiter en ziet dat er manen om Jupiter draaien. Dit toont aan dat niet elk hemellichaam om de aarde draait en dat het geocentrische wereldbeeld van Aristoteles niet klopt. Dit brengt hem in conflict met de katholieke kerk die hem in 1633 veroordeelt tot huisarrest wegen ketterij. Deze veroordeling wordt door de katholieke kerk pas 360 jaar later in 1992 officieel herroepen.

**Johannes Kepler** (1571–1630) is een tijdgenoot van Galilei en publiceert in 1609 het boek *Astronomia Nova seu Physica Coelestis* (nieuwe astronomie van de hemelse fysica). In dit boek bewijst hij met zijn eerste en tweede wet dat de planeten in ellipsvormige banen om de zon bewegen en dat de snelheid toeneemt als de afstand tot de zon kleiner is. Tien jaar later, in 1619, publiceert hij zijn derde wet.



De eerste en tweede wet van Kepler. Links Kepler 1: planeten bewegen in ellipsbanen om de zon. Rechts Kepler 2: Hoe dichter een planeet bij de zon is hoe groter zijn snelheid is. In tijd  $\Delta t$  legt een planeet een afstand af zodat de rood gemaakte oppervlakken aan elkaar gelijk zijn.

**Isaac Newton** (1642–1727) is goed op de hoogte van het werk van Galilei en Kepler en gaat verder op de door hen ingeslagen weg. Newton is bijzonder goed in wiskunde waardoor het hem lukt om wetten op te stellen waarmee je alle bewegingen, ook die van de planeten, exact kunt uitrekenen. In zijn boek *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (filosofie van de natuur op wiskundige grondslag) uit 1687 publiceert hij deze wetten die ook nu nog de basis zijn van de klassieke mechanica. De wetten van Newton kun je zien als de vervulling van de eeuwenoude wens om gebeurtenissen in het universum exact te kunnen voorspellen. Zo kun je uitrekenen dat op 7 oktober 2135 tussen 12:29 en 12:33 uur in Groningen de zon volledig wordt bedekt door de maan. Best jammer dat we dit niet gaan meemaken maar wel bijzonder dat deze totale zonsverduistering op de minuut nauwkeurig kan worden voorspeld.



Van links naar rechts: Nicolaas Copernicus, Galileo Galilei, Johannes Kepler en Isaac Newton.

Toch is het werk van Newton niet het einde van het verhaal. Want in 1915 publiceert **Albert Einstein** (1879–1955) zijn inzicht dat de wetten van Newton niet exact kloppen. Het is allemaal een stuk ingewikkelder, maar het verschil tussen de voorspellingen volgens Newton en die volgens Einstein is voor normale gebeurtenissen bijzonder klein. Alleen als je een grote snelheid hebt of als je in de buurt van een grote massa komt merk je het verschil. De planeet Mercurius staat dicht bij de zon en gedraagt zich net een beetje anders dan wat je verwacht met de wetten van Newton. Als je in de buurt van een zwart gat komt heb je de formule van Einstein nodig om juiste voorspellingen te kunnen doen. De formule van Einstein is het beste wat we nu hebben. Maar het kan natuurlijk zo zijn dat er in de toekomst een nieuw inzicht komt waardoor ons wereldbeeld een nieuwe wending gaat nemen. De natuurkunde en de sterrenkunde zijn volop in beweging en waar dit toe gaat leiden valt niet te voorspellen.

# Inhoud

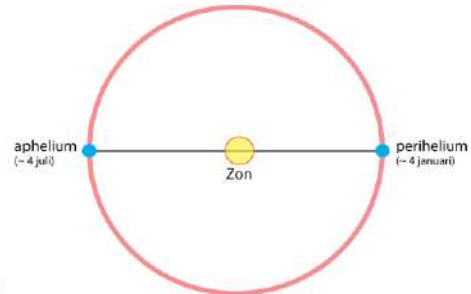
<b>19.1</b>	<b>Het zonnestelsel</b>	<b>7</b>
	– De aarde	7
	– De maan	7
	– Synchrone rotatie van de maan	8
	– Eb en vloed	9
	– De planeten	9
	– Planetoïdegordel, Kuipergordel en Oortwolk	10
	– Kometen	10
	– Meteorieten	10
	– De zon	11
	– Zonnewind en poollicht	11
<b>19.2</b>	<b>Sterren en sterrenstelsels</b>	<b>13</b>
	– Sterren in de buurt van de zon	13
	– Exoplaneten	13
	– De Melkweg	14
	– Sterrenstelsels	15
	– Het heelal	16
<b>19.3</b>	<b>Cirkelbeweging</b>	<b>17</b>
	– Eenparige cirkelbeweging	17
	– Middelpuntzoekende kracht	17
<b>19.4</b>	<b>Gravitatie</b>	<b>19</b>
	– De gravitatiewet van Newton	19
	– Gravitatiekracht en zwaartekracht	19
	– Ellipsvormige banen	19
	– Gravitatiekracht gericht op het middelpunt van de aarde	20
	– Geostationaire satellieten	22
	– Satellieten op lage hoogte	23
	– Satellieten met polaire banen	23
	– Gravitatie-energie	23
	– Ontsnappingsnelheid	25
<b>19.5</b>	<b>Informatie uit de ruimte</b>	<b>26</b>
	– Kijken met een telescoop	26
	– Radio-astronomie	26
	– Ruimtetelescopen	28
	– Afstanden bepalen met de parallax-methode	28
	– Afstanden bepalen met de Cepheïden-methode	29
	– Het continu spectrum van sterren	30
	– De intensiteit van licht	31
	– De temperatuur van een planeet	32
	– Spectroscopie	33

– Atoomspectroscopie	34
– Chemische samenstelling van sterren en nevels	35
– Snelheid bepalen uit de dopplerverschuiving	37
<b>19.6 De levensloop van sterren</b>	<b>39</b>
– Het ontstaan van nieuwe sterren	39
– De vorming van een protoster	39
– De proton-proton kernfusiereactie	40
– Energieproductie in een ster	41
– Energietransport in een ster	41
– Stabiliteit van een ster	41
– Rode reuzen	42
– Witte dwergen	43
– Neutronensterren	43
– Pulsars	43
– Zwarte gaten	44
– Nova en Supernova	45
– De vorming van zware elementen	46
– Hertzsprung-Russell-diagram	46
<b>19.7 Het heelal</b>	<b>47</b>
– De oerknal	47
– Het uitdijend heelal	47
– De waarnemingshorizon	48
– Achtergrondstraling	48
– Gekromde ruimtetijd	49
– Gravitatiegolven	50
– Donkere massa en donkere energie	51

# 19.1 Het zonnestelsel

## De aarde

De aarde draait in 365,256 dagen om de zon en in één dag om haar as. Eén dag is verdeeld in 24 uren, één uur in 60 minuten en één minuut is 60 seconden. De afstand van de aarde tot de zon is gemiddeld 149,6 miljoen km. De aardbaan is bijna cirkelvormig. Het verschil tussen de grootste en de kleinste afstand is maar 3,4%. De snelheid waarmee de aarde haar baan doorloopt is gemiddeld 29783 m/s (107.219 km/h). Zie figuur 1.



**Figuur 1** De baan van de aarde.

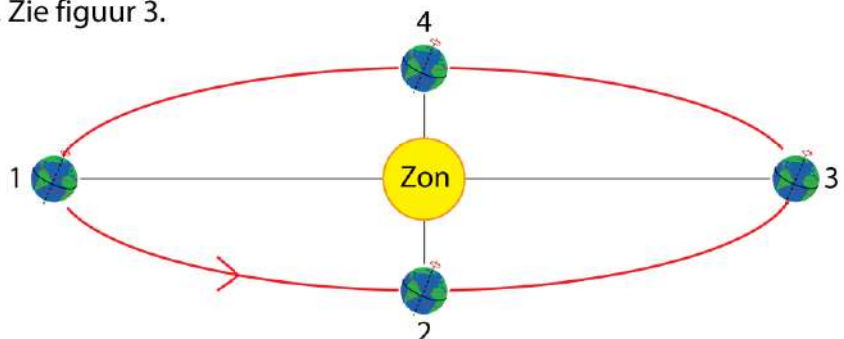
De rotatie-as van de aarde heeft een hoek van 23,439 graden ten opzichte van de rotatie-as van de aardbaan om de zon. Zie figuur 2. Door deze zogenaamde **inclinatie** verandert de hoek waarmee de zon de aarde gedurende een jaar bestraalt. De inclinatie veroorzaakt samen met de beweging van de aarde om de zon de seizoenen. Is de Noordpool van de aarde naar de zon gekanteld, dan komt de zon op het noordelijk halfrond hoger aan de hemel waardoor het daar warmer wordt. Op het noordelijk halfrond is het dan zomer en op het zuidelijk halfrond winter. Een half jaar later is het Zuidelijk halfrond naar de zon gekanteld.

**Figuur 2** Het ontstaan van de seizoenen door de inclinatie van de aardas.



Op het noordelijk halfrond begint de **zomer** als de noordpool naar de zon is gericht. Zie figuur 2, links. Drie maanden later staat de zon boven de evenaar en begint de **herfst**. Na drie maanden is de zuidpool naar de zon gericht en begint op het noordelijk halfrond de **winter**. Zie figuur 2, rechts. Weer drie maanden later staat de zon opnieuw boven de evenaar en begint de **lente**. Zie figuur 3.

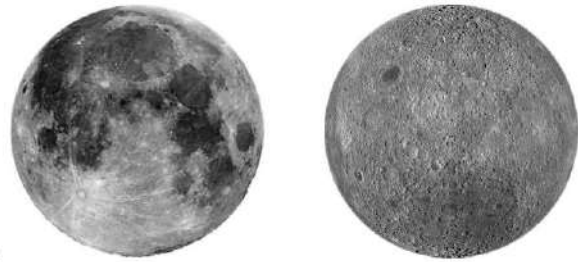
**Figuur 3** De seizoenen op het noordelijk halfrond.  
1: begin van de zomer  
2: begin van de herfst  
3: begin van de winter  
4: begin van de lente



## De maan

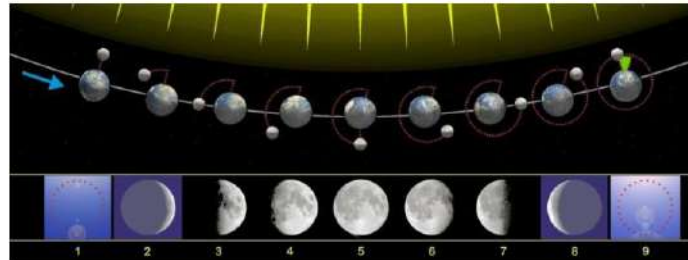
Op een afstand van gemiddeld 384.450 km van de aarde bevindt zich de maan. De straal van de maan is 3,7 keer kleiner dan de straal van de aarde en de massa van de maan is 81 keer kleiner dan de massa van de aarde. Zie figuur 4.

Hoewel de maan een stuk kleiner is dan de aarde is het verschil niet uitzonderlijk groot. De manen van alle andere planeten zijn naar verhouding een stuk kleiner. De invloed van de maan is op aarde goed te merken. Eb en vloed worden veroorzaakt doordat de maan een aantrekkende kracht op de aarde uitoefent.



**Figuur 4** De maan. Links de voorkant die vanaf de aarde is te zien. Rechts de achterkant.

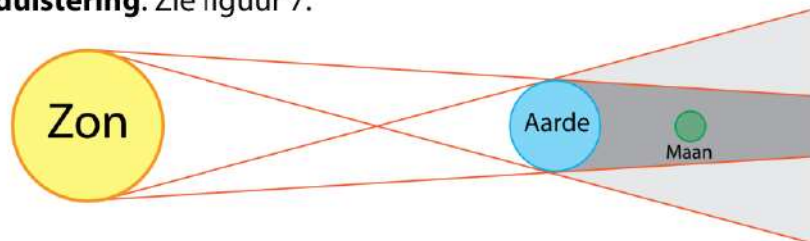
Kijk je vanaf de aarde naar de maan dan zie je alleen het deel dat door de zon wordt belicht. De maan geeft zelf geen licht maar weerkaatst het licht van de zon. Wat je ziet zijn de **schijngestalten**. Zie figuur 5.



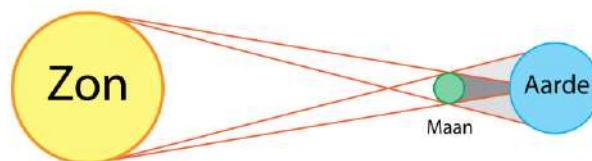
**Figuur 5** De schijngestalten van de maan.  
1 nieuwe maan | 5 volle maan

De maan draait in 27,32 dagen om de aarde. Het vlak waarin de maan om de aarde draait is vrijwel gelijk aan het vlak waarin de aarde om de zon draait. Vandaar dat de maan soms tussen de aarde en de zon in staat (nieuwe maan) en soms achter de aarde staat (volle maan). Tijdens volle maan staat de aarde tussen de zon en de maan in. Als zon, aarde en maan precies op één lijn staan is er een **maansverduistering**. Zie figuur 6. Tijdens nieuwe maan staat de maan tussen de zon en de aarde in. Staan zon, maan en aarde precies op één lijn dan is er een **zonsverduistering**. Zie figuur 7.

**Figuur 6** Maansverduistering.



**Figuur 7** Zonsverduistering.



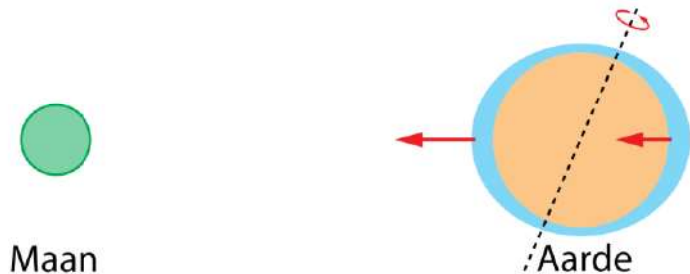
### Synchrone rotatie van de maan

Net als de aarde draait ook de maan om haar eigen as. Deze omwenteling duurt even lang als de omlooptijd van de maan om de aarde: 27,32 dagen. Dit noem je **synchrone rotatie**. Lang geleden was de omwentelingstijd van de maan om haar as veel korter dan nu, maar door de kracht van de aarde is de rotatie van de maan langzamer geworden. Het gevolg hiervan is dat de maan steeds met dezelfde kant naar de aarde is gericht. De maan heeft een **voorkant**, die van de aarde is te zien, en een **achterkant**, die vanaf de aarde onzichtbaar is. Op dezelfde manier oefent de maan ook een remmende werking uit op de omwenteling van de aarde. De dagen worden steeds langer. Na een jaar is de duur van een dag met 15 miljoenste seconde toegenomen.

## Eb en vloed

De meest zichtbare invloed van de maan op de aarde zijn de getijden eb en vloed. De maan oefent een aantrekkende kracht uit op de aarde. De kant van de aarde die het dichtst bij de maan is ondervindt een grotere kracht dan de kant van de aarde op grotere afstand. Door de verplaatsing van water verliest de aarde haar bolvorm en krijgt ze de vorm van een rugbybal. De vervorming is maar enkele meters en is dus ten opzichte van de straal van de aarde klein. Zie figuur 8.

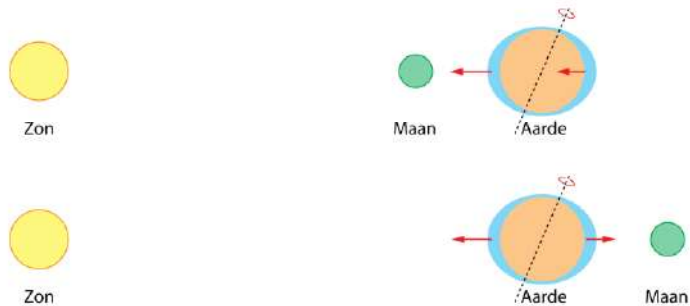
De aarde draait in 24 uur om haar as en een punt op aarde bevindt zich daarom twee keer per dag aan de afgeplatte kant en twee keer per dag aan de verlengde kant. Daarom wordt het twee keer per dag eb en twee keer per dag vloed.



**Figuur 8** Eb en vloed.

Ook de zon oefent een aantrekkende kracht op de aarde uit, maar omdat de zon op veel grotere afstand staat is de kracht op de voorkant van de aarde vrijwel gelijk aan die op de achterkant. De waterverplaatsing die door de zon wordt veroorzaakt is ongeveer de helft van waterverplaatsing door de maan. De invloed van de zon is daarom goed te merken.

Bij nieuwe maan en bij volle maan staan de zon, de maan en de aarde op een rechte lijn. De verplaatsing van water is dan extra groot. Hierdoor wordt het getijdeverschil groter dan normaal. Het getijde dat optreedt bij nieuwe maan en bij volle maan heet **springtij** en komt twee keer per maand voor.



**Figuur 9** Springtij bij nieuwe maan (boven) en bij volle maan (onder).

## De planeten

De aarde met haar maan is maar één van de planeten die om de zon bewegen. De zon met zijn planeten en hun manen noemen we het **zonnestelsel**.

**Figuur 10** Het zonnestelsel. De afstanden zijn niet op schaal getekend.

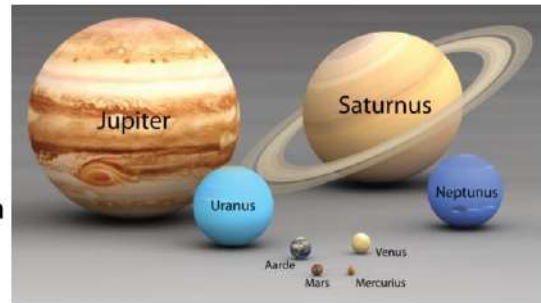


Gerekend vanaf de zon is de volgorde van de planeten:

**Mercurius – Venus – Aarde – Mars – Jupiter – Saturnus – Uranus – Neptunus**

De vier binnenste planeten, Mercurius – Venus – Aarde – Mars, zijn klein ten opzichte van de vier buitenste planeten, Jupiter – Saturnus – Uranus – Neptunus. In figuur 11 zie je de planeten op schaal, waarbij het verschil in afmetingen onmiddellijk opvalt.

De binnenste vier planeten hebben een dichtheid van ongeveer  $5,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  en hebben een vast oppervlak. Ze worden ook wel "steenplaneten" genoemd. De buitenste vier planeten hebben een dichtheid van ongeveer  $1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  en hebben geen vast oppervlak. Het zijn gasballen en worden daarom "gasplaneten" genoemd.



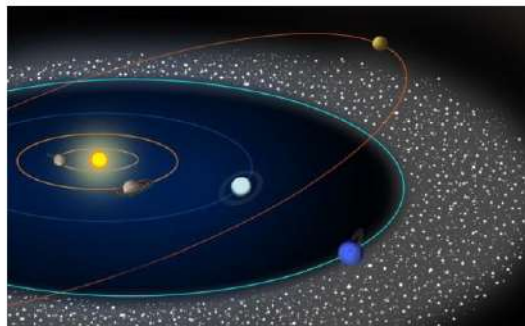
**Figuur 11** Relatieve groottes van de planeten.

## Planetoïdegordel, Kuipergordel en Oortwolk

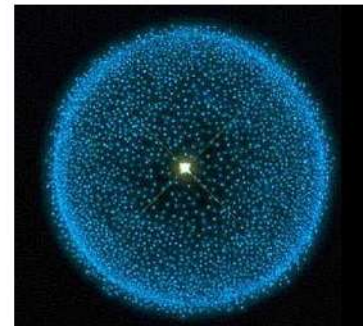
Tussen Mars en Jupiter bevindt zich de **planetoïdegordel**. Dit is een ring met kiezels en rotsblokken. Het grootste object in deze gordel is de **dwerfplaneet Ceres**, met een straal van 476 km. Voorbij Neptunus bevindt zich nóg zo'n gordel, de **Kuipergordel** (genoemd naar de Nederlandse astronoom Gerard Kuiper). In deze gordel bevindt zich dwerfplaneet **Pluto**, met een straal van 1150 km.

De **Oortwolk** (genoemd naar de Nederlandse astronoom Jan Oort) is een bolvormig gebied met brokstukken op een afstand van 10.000 tot 100.000 astronomische eenheden (AE) van de zon. Eén astronomische eenheid (AE) is gelijk aan de afstand tussen de aarde en de zon.

**Figuur 12** Links:  
De Kuipergordel.



**Figuur 13** Rechts:  
De Oortwolk.



## Kometen

Een komeet is een brokstuk met een elliptische baan om de zon. Met regelmatige tussenpozen komen ze voorbij. Een komeet met een omlooptijd korter dan 20 jaar is meestal afkomstig uit de planetoïdegordel. Een komeet met een omlooptijd tussen 20 en 200 jaar is afkomstig uit de Kuipergordel. Er zijn ook kometen met een omlooptijd van meer dan 200 jaar. Deze zijn afkomstig uit de Oortwolk.

Een bekende komeet is genoemd naar Edmond Halley (Engeland, 1656–1742). De komeet van Halley komt iedere 76 jaar voorbij en is dan met het blote oog zichtbaar. In 2061 komt de komeet van Halley weer voorbij.



**Figuur 14** De komeet van Halley in 1986.

## Meteorieten

De aarde komt regelmatig in aanraking met brokstukken uit de ruimte. Deze brokstukken heten **meteoroiden** en kunnen afkomstig zijn van de Maan, van Mars, van (uiteen gevallen) kometen of van de planetoïdegordel. Met hoge snelheid bewegen ze door de atmos-

feer, waarbij ze vanwege de luchtweerstand sterk worden verhit. Meestal verbrandt de meteoroïde hierbij volledig. Het licht dat ontstaat bij het verbranden van een meteoroïde is zichtbaar als **meteoor**, ook wel "vallende ster" genoemd. Een vallende ster is dus verbrandend ruimtepuin en is helemaal geen ster. Wordt de meteoroïde niet helemaal verbrand dan slaat het restant in op de aarde. We spreken nu van een **meteoriet**. De meeste meteorieten bestaan uit ijzer, uit steen of uit een combinatie van deze twee.

**Figuur 15** Links:  
Meteoor (vallende ster).



**Figuur 16** Rechts:  
Een meteoriet van ijzer.



Het gebeurt zelden dat er een grote meteoriet op aarde valt. Een bekende inslagkrater op aarde is van een meteoriet die ongeveer 50.000 jaar geleden in Arizona, Verenigde Staten, is ingeslagen. Zie figuur 17.

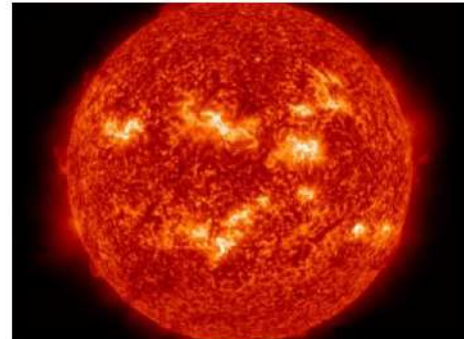
**Figuur 17** Inslagkrater in Arizona, Verenigde Staten.



## De zon

In het centrum van het zonnestelsel bevindt zich de zon. De zon is een ster, wat wil zeggen dat er in het binnenste van de zon kernfusiereacties plaatsvinden, waarbij energie vrijkomt.

**Figuur 18** De zon.

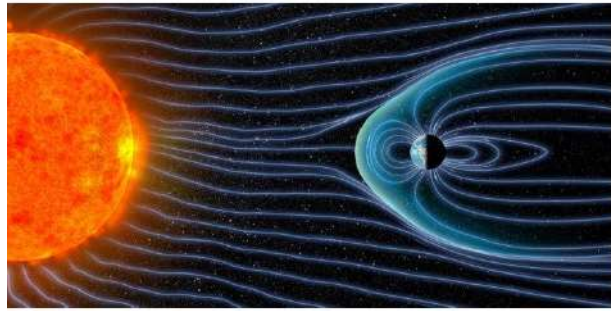


Het oppervlak van de zon heeft niet overal dezelfde temperatuur. Er zijn gebieden die een lagere temperatuur hebben. Vanaf de aarde zijn deze gebieden zichtbaar als donkere vlekken. Deze vlekken worden **zonnevlekken** genoemd. Een zonnevlek ontstaat op een plaats waar de warmteaanvoer vanuit het binnenste van de zon tijdelijk is verminderd. Na enige tijd verdwijnt een zonnevlek en ontstaat er ergens anders een nieuwe. Gemiddeld is de temperatuur van het oppervlak van de zon 5780 K. Bij een zonnevlek is de temperatuur 3000 – 4500 K.

## Zonnewind en poollicht

Zonnewind is een stroom van geladen deeltjes die vrijkomen uit de buitenste laag van de zon. Vooral elektronen, protonen, heliumkernen ( $\alpha$ -deeltjes) en ionen worden door de zon met hoge snelheid de ruimte in geschoten.

We maken onderscheid tussen langzame en snelle zonnwind. Langzame en snelle zonnwind zijn anders van samenstelling. **Langzame zonnwind** ontstaat aan de evenaar van de zon en bevat deeltjes met een snelheid van 300–400 km/s. **Snelle zonnwind** ontstaat op enige afstand van de evenaar en bevat deeltjes met een snelheid van zo'n 700 km/s.



**Figuur 19** Zonnwind valt op de aarde.

De geladen deeltjes worden door het magnetisch veld van de aarde afgebogen. Hierdoor kan deze gevaarlijke ioniserende straling het aardoppervlak niet bereiken. De zonnwinddeeltjes worden naar de Noordpool en de Zuidpool gebracht waar ze tegen  $N_2$  en  $O_2$  moleculen in de atmosfeer botsen. Hierdoor ontstaat een lichtgevend plasma dat bekend staat als **poollicht** of **aurora**.



**Figuur 20** Poollicht.

## 19.2 Sterren en sterrenstelsels

### Sterren in de buurt van de zon

De dubbelster Alpha Centauri vormt samen met de veel zwakkere Proxima Centauri een drievoudig stelsel, dat zich van alle sterren het dichtst bij ons zonnestelsel bevindt. Van deze drie sterren staat de in 1915 ontdekte Proxima Centauri (de dichtbij-zijnde in het sterrenbeeld Centaur) het dichtstbij op een afstand van  $4,0 \cdot 10^{16}$  m. Het licht heeft 4,22 jaar nodig om van Proxima Centauri naar de aarde te reizen. Andere sterren in de buurt van de zon zijn:

Barnard	op $5,6 \cdot 10^{16}$ m	(5,9 lichtjaar)	
Wolf 359	op $7,4 \cdot 10^{16}$ m	(7,8 lichtjaar)	in sterrenbeeld Leeuw
Sirius A en B	op $8,2 \cdot 10^{16}$ m	(8,7 lichtjaar)	in sterrenbeeld Grote Hond

Sirius A vormt samen met Sirius B een dubbelster. Dat zijn twee sterren die om elkaar heen draaien. Sirius A is de helderste ster aan de hemel en bevindt zich in het sterrenbeeld Grote Hond. Sirius A heeft een straal die 1,7 keer groter is dan die van de zon, heeft twee keer zoveel massa, en straalt per seconde 26 keer meer energie uit dan de zon.

Sterren staan op zeer grote afstand van elkaar. Het is daarom handig om deze afstanden niet in meter maar in **lichtjaar** uit te drukken. Een lichtjaar is de afstand die licht in één juliaans jaar aflegt. Een juliaans jaar heeft 365,25 dagen en een dag heeft 86400 seconden. De lichtsnelheid is  $2,99792458 \cdot 10^8$  m/s. In een jaar legt licht  **$9,46073047 \cdot 10^{15}$  m** af.

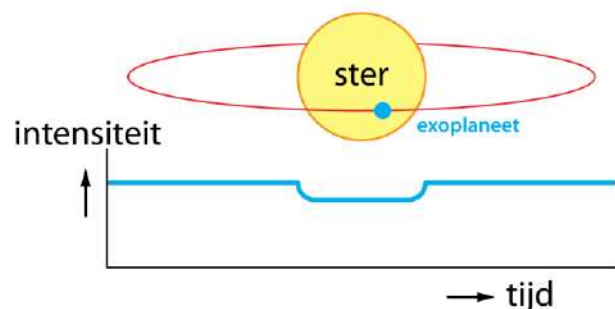
**Een lichtjaar is de afstand die licht in één jaar aflegt:  $9,46073047 \cdot 10^{15}$  m.**

### Exoplaneten

Net als de zon hebben de meeste sterren planeten om zich heen. Planeten om andere sterren dan de zon zijn **exoplaneten**. Een planeet is geen lichtbron maar weerkaats alleen het licht van de ster, wat veel minder is dan het sterlicht zelf. Planeten zijn ook veel kleiner dan sterren en staan dichtbij de ster waar ze omheen draaien. Als je met een telescoop naar een ster kijkt zie je daarom alleen het sterrenlicht en niet het weerkaatste licht van de planeet. Een exoplaneet kan daarom alleen indirect worden waargenomen.

#### – transitmethode –

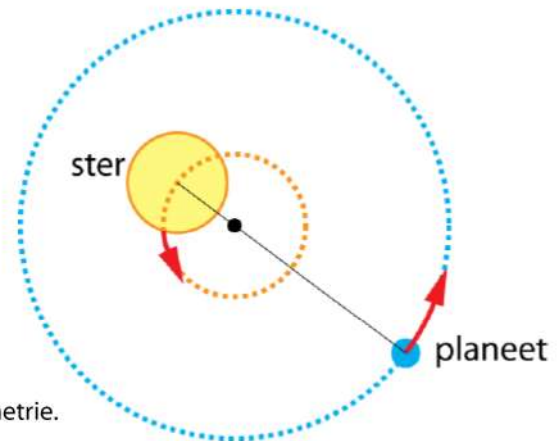
Als een exoplaneet in zijn omloopbaan tussen de ster en de aarde komt wordt een klein deel van de ster periodiek afgedekt, waardoor het waargenomen sterlicht tijdelijk afneemt. Zo'n overgang (transit) gebeurt ook als de planeet Venus tussen de zon en de aarde staat en wordt een **Venusovergang** genoemd. Zie figuur 21.



**Figuur 21** Transitmethode.

### – astrometrie –

Als een exoplaneet om een ster draait zal de ster ook een beetje bewegen. Ster en planeet draaien om een gemeenschappelijk punt. Zie figuur 22. Dit wiebelen van een ster kan alleen in uitzonderlijke gevallen rechtstreeks worden waargenomen door een ruimtetelescoop. De ster moet dan zeer dichtbij staan en een grote exoplaneet hebben.



**Figuur 22** Astrometrie.

Beter lukt het door de dopplerverschuiving van het sterlicht te meten. Als de ster naar ons toe beweegt wordt het licht iets blauwer en als hij van ons af beweegt iets roder. Door deze kleurverschuivingen heel nauwkeurig te meten kun je de snelheid waarmee de ster beweegt uitrekenen. Net als bij de transitmethode kan dit alleen als de exoplaneet in zijn omloopbaan tussen de ster en de aarde komt.

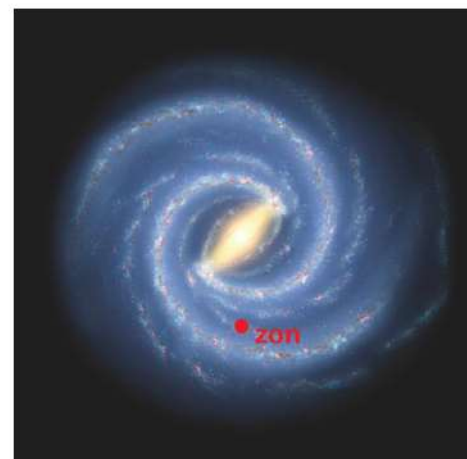
Met deze en andere technieken zijn tot op heden ongeveer 6000 exoplaneten waargenomen. Het opsporen van exoplaneten is een belangrijk doel van de sterrenkunde, want exoplaneten kunnen leven bevatten en de ontdekking van buitenaards leven spreekt tot ieders verbeelding. In 2016 is ontdekt dat Proxima Centauri een exoplaneet heeft waarop vloeibaar water kan bestaan en waarop leven mogelijk is. Deze planeet Proxima b heeft 1,3 keer zoveel massa als de aarde en heeft een omlooptijd 11,2 dagen.

## De Melkweg

Ons zonnestelsel maakt deel uit van de **Melkweg**, dit is een groep van 100 – 400 miljard sterren. Zo'n groep van sterren wordt een **sterrenstelsel** genoemd (Engels: galaxy). Figuur 23 is een illustratie van de Melkweg. Omdat we er middenin zitten kan de Melkweg niet op afstand worden waargenomen. Kijk je op een heldere nacht naar de hemel, dan zie je een witte band. Dit zijn de sterren die de Melkweg vormen. De sterren van de Melkweg liggen in een plat vlak en omdat de zon ook in dit vlak ligt zie je een smalle band.

De Melkweg is een spiraalvormig sterrenstelsel. De sterren van de Melkweg draaien rond het **zwart gat** Sagittarius A dat zich in het centrum bevindt en een massa van 4,3 miljoen keer die van de zon heeft. De zon bevindt zich aan de buitenkant van de Melkweg en heeft een omlooptijd van 225 miljoen jaar en een snelheid van 828 duizend kilometer per uur. Zie figuur 23.

**Figuur 23** Illustratie van de Melkweg van boven gezien. De rode stip geeft de plaats van de zon aan.



Behalve sterren bevat de Melkweg ook veel **stofwolken** en **gasnevels**, zie figuur 24. Deze wolken en nevels absorberen en weerkaatsen het zichtbare licht van de sterren.



**Figuur 24** Nevels in de Melkweg.

Linksboven: Krabnevel  
Rechtsboven: Paardekopnevel  
Linksonder: Orionnevel  
Rechtsonder: Helixnevel



## Sterrenstelsels

Behalve de Melkweg zijn er nog veel meer sterrenstelsels in het heelal. Het dichtst bij de Melkweg bevindt zich het **Andromeda** sterrenstelsel. De afstand tussen het Andromeda-stelsel en de Melkweg is  $2,40 \cdot 10^{22}$  m (2,54 miljoen lichtjaar). Het uitgestraalde licht van Andromeda heeft dus 2,54 miljoen jaar nodig om de aarde te bereiken. Het Andromeda-stelsel kan onder gunstige omstandigheden met het blote oog worden gezien. Met een verrekijker of kleine telescoop is Andromeda goed te zien als een vlek met sterren. De diameter van deze vlek is groter dan de volle maan.

Ook het Andromeda-stelsel is spiraalvormig. De diameter van Andromeda is ongeveer 1,6 keer groter dan die van de Melkweg. Andromeda bevat  $16 \cdot 10^{11}$  zonnemassa's en de Melkweg  $12 \cdot 10^{11}$  zonnemassa's.



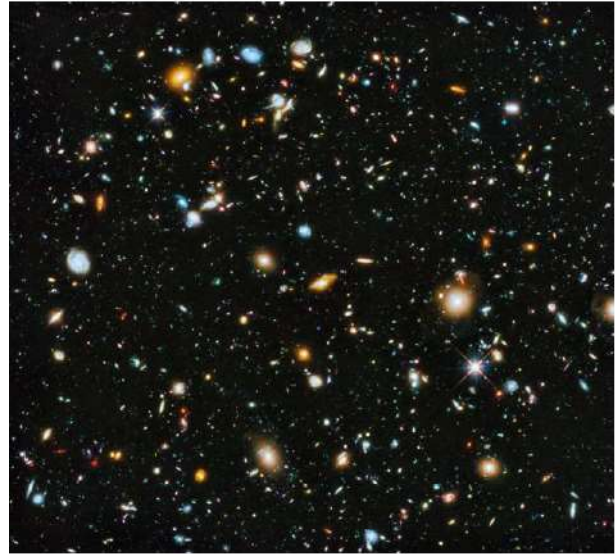
**Figuur 25** Het Andromeda sterrenstelsel.

Het Andromeda-stelsel en de Melkweg bewegen naar elkaar toe met een snelheid van 100 km/s. Over ongeveer 8 miljard jaar is er een kans van 50% dat Andromeda en de Melkweg op elkaar botsen. Omdat een sterrenstelsel voornamelijk uit lege ruimte bestaat zullen er maar weinig directe botsingen tussen sterren plaatsvinden.

De Melkweg en Andromeda zijn de twee grootste sterrenstelsels van de **Lokale Groep**. Het op twee na grootste stelsel in de groep is de **Driehoeksnevel**. De Lokale Groep bevat meer dan 40 sterrenstelsels en heeft een diameter van 10 miljoen lichtjaar. De Lokale Groep is onderdeel van de **Canes Venaticiwolk**. Dit is een cluster van sterrenstelsels met een doorsnede van 50 miljoen lichtjaar. De Canes Venaticiwolk maakt deel uit van het **Virgo-supercluster** dat meer dan 100 duizend sterrenstelsels bevat en een diameter heeft van 110 miljoen lichtjaar.

## Het heelal

Het waarneembare heelal bevat ongeveer 2000 miljard sterrenstelsels en heeft een straal van ongeveer 46 miljard lichtjaar. Het totale heelal is nog veel groter maar niemand weet hoe groot. Het heelal is 13,8 miljard jaar geleden ontstaan uit de oerknal. Nemen we een sterrenstelsel waar aan de rand van het waarneembare heelal dan heeft het licht 13,8 miljard jaar nodig gehad om de aarde te bereiken. We zien dit sterrenstelsel dus 13,8 miljard jaar terug in de tijd. In deze 13,8 miljard jaar zijn het sterrenstelsel en de aarde verder van elkaar verwijderd, zodat de huidige afstand geschat wordt op op 46 miljard lichtjaar.



**Figuur 26** Sterrenstelsels diep in de ruimte.

## 19.3 Cirkelbeweging

### Eenparige cirkelbeweging

Bij een **eenparige cirkelbeweging** doorloopt een voorwerp met een constante snelheid een cirkelbaan. De tijd die nodig is om één complete cirkelbaan af te leggen is de **omlooptijd**. De **omloopfrequentie** is het aantal omlopen per seconde. Er geldt:

$$f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow T = \frac{1}{f}$$

- $T$  is de omlooptijd in seconde (s)
- $f$  is de frequentie in hertz (Hz)

De snelheid waarmee een cirkelbaan wordt doorlopen is de **baansnelheid**. Bij een eenparige cirkelbeweging verandert alleen de **richting** van de snelheid, de **grootte** verandert niet.

**De baansnelheid is de snelheid waarmee de cirkelbaan wordt doorlopen.**

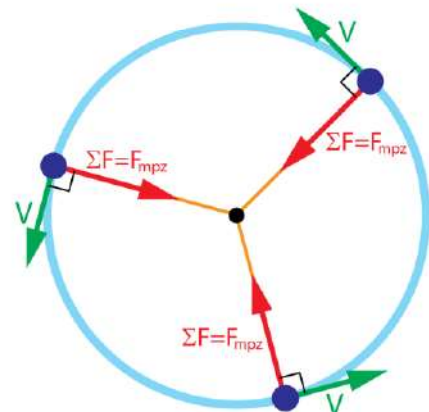
Als je een cirkel één keer doorloopt heb je één keer de omtrek  $2\pi \cdot r$  afgelegd. De tijd voor één cirkel is de omlooptijd  $T$ . Hieruit volgt voor de baansnelheid:

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

- $v$  is de baansnelheid in meter per seconde (m/s)
- $r$  is de straal van de cirkel in meter (m)
- $T$  is de omlooptijd in seconde (s)

### Middelpuntzoekende kracht

Om de richting van de snelheid te veranderen is een kracht nodig. Als een cirkelbaan wordt doorlopen is deze kracht steeds gericht naar het middelpunt van de cirkel. De kracht die nodig is om een cirkelbeweging te kunnen maken heet de middelpuntzoekende kracht,  $F_{mpz}$ . Zie figuur 27.



**Figuur 27** Eenparige cirkelbeweging.

Bij een eenparige cirkelbeweging is de resulterende kracht gelijk aan  $F_{\text{mpz}}$  en geldt:

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

- $F_{\text{mpz}}$  is de middelpuntzoekende kracht in newton (N)
- $m$  is de massa in kilogram (kg)
- $v$  is de baansnelheid in meter per seconde (m/s)
- $r$  is de straal van de cirkel in meter (m)

#### VOORBEELD de maan

De maan heeft een cirkelvormige baan om de aarde met een straal van  $384,4 \cdot 10^3$  km.

#### Bereken de baansnelheid van de maan.

- $T = 27,32$  dagen  $\rightarrow T = 27,32 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 2,360448 \cdot 10^6$  s
- $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow v = \frac{2\pi \cdot 384,4 \cdot 10^6}{2,360448 \cdot 10^6} = 1023,22 = 1023$  m/s (3684 km/h)

#### Bereken de middelpuntzoekende kracht op de maan.

- $m_{\text{maan}} = 0,0735 \cdot 10^{24}$  kg |  $v = 1023,22$  m/s |  $r = 384,4 \cdot 10^6$  m
- $F_{\text{mpz}} = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow F_{\text{mpz}} = \frac{0,0735 \cdot 10^{24} \cdot 1023,22^2}{384,4 \cdot 10^6} = 2,001896 \cdot 10^{20} = 2,00 \cdot 10^{20}$  N

#### Waar komt deze middelpuntzoekende kracht vandaan?

- $F_{\text{mpz}}$  is de aantrekkingskracht die de aarde op de maan uitoefent

---

## 19.4 Gravitatie

### De gravitatiewet van Newton

Volgens Newton trekken twee massa's elkaar altijd aan. De aantrekkende kracht is de **gravitatiekracht** waarvoor geldt:

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

- $F_G$  is de gravitatiekracht in newton (N)
- $G$  is de gravitatieconstante:  $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- $m$  is de massa van voorwerp 1 in kilogram (kg)
- $M$  is de massa van voorwerp 2 in kilogram (kg)
- $r$  is de afstand tussen de zwaartepunten van beide voorwerpen in meter (m)

### Gravitatiekracht en zwaartekracht

De kracht die we tot nu toe leerden kennen als de zwaartekracht komt voort uit de gravitatiewet van Newton. Passen we de gravitatiewet toe op een massa  $m$  op het oppervlak van de aarde dan vinden we:

$$F_G = m \cdot \left( G \cdot \frac{M_{\text{aarde}}}{r_{\text{aarde}}^2} \right)$$

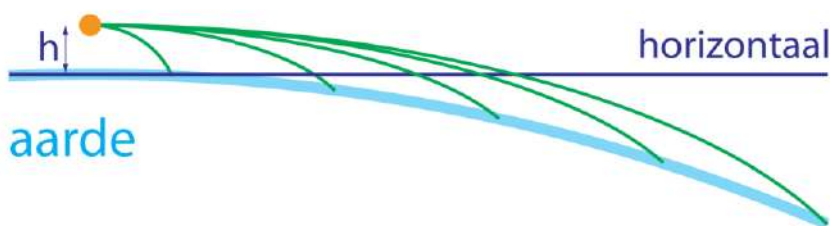
De zwaartekracht is:  $F_z = m \cdot g$  en als je deze formule vergelijkt met de gravitatiewet van Newton vind je een uitdrukking voor de **gravitatieversnelling**. Vul je de waarden voor  $M_{\text{aarde}}$  en  $r_{\text{aarde}}$  in dan vind je  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Met deze formule kun je voor ieder hemellichaam de gravitatieversnelling aan het oppervlak berekenen.

$$g = \left( G \cdot \frac{M}{r^2} \right)$$

- $g$  is de gravitatieversnelling op het oppervlak van een hemellichaam ( $\text{m s}^{-2}$ )
- $G$  is de gravitatieconstante:  $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- $m$  is de massa van het hemellichaam in kilogram (kg)
- $r$  is de straal van het hemellichaam in meter (m)

### Ellipsvormige banen

Schiet je op aarde met grote snelheid een kogel weg dan heeft de kogel een baan zoals getekend in figuur 28. Vanwege de kromming van het aardoppervlak verdwijnt de kogel achter de horizon. De straal van de aarde is 6378 km. Hieruit kun je berekenen dat na 8,0 km het oppervlak van de aarde 5,0 m onder de horizon ligt. Zie figuur 29 (niet op schaal).



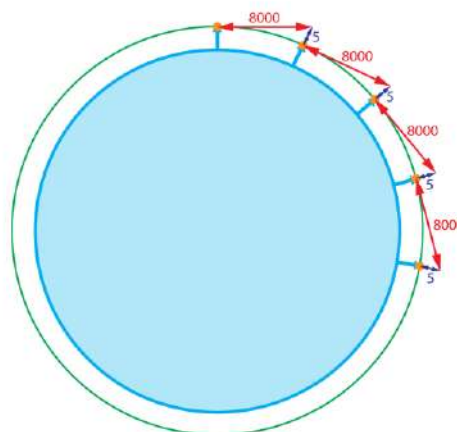
**Figuur 28** Kromming van de aarde.



**Figuur 29** Na 8,0 km is het aardoppervlak 5,0 m afgebogen.

We doen nu het volgende gedachtenexperiment. We schieten een kogel van een 10 meter hoge toren horizontaal weg met een snelheid van 8,0 km/s. Uiteraard zal de luchtweerstand bij zo'n hoge snelheid groot zijn, maar in onze redenering houden we daar geen rekening mee. We doen alsof de aarde geen dampkring heeft. Zie figuur 30.

Bij een horizontale snelheid van 8,0 km/s heeft de kogel in één seconde horizontaal 8000 m afgelegd en is hij 5 meter gevallen naar het middelpunt van de aarde. Maar na 8000 meter ligt het aardoppervlak 5 meter onder de horizon, zodat de kogel na één seconde nog steeds 10 meter boven het oppervlak is. In de volgende seconde herhaalt dit zich, met als resultaat dat de kogel het aardoppervlak nooit zal bereiken. Zie figuur 30.

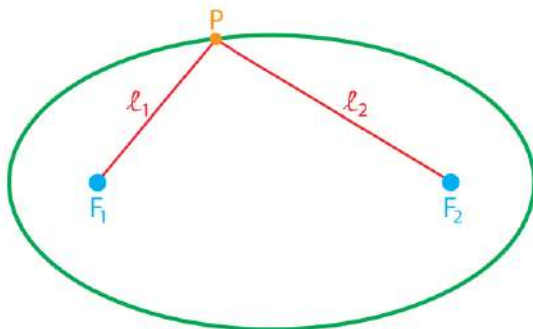


**Figuur 30** Met 8 km/s horizontaal weggeschoten projectiel.

Dit inzicht bracht Newton ertoe de baan van de maan om de aarde op te vatten als het vallen van de maan naar de aarde, zonder ooit het aardoppervlak te bereiken. Ter hoogte van de maan is er geen luchtweerstand. De maan zal dus altijd om de aarde blijven draaien en dit is niets anders dan de valbeweging van ons gedachtenexperiment.

### Gravitatiekracht gericht op het middelpunt van de aarde

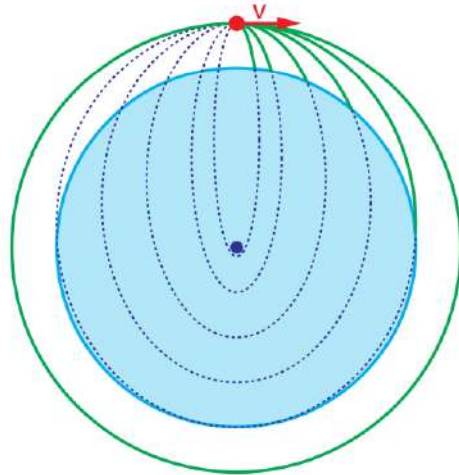
De gravitatiekracht is gericht naar het middelpunt van de aarde. Schiet je een kogel weg dan krijgt de kogel een ellipsvormige baan. Een ellips heeft twee brandpunten  $F_1$  en  $F_2$ . Voor ieder punt  $P$  op de ellips heeft  $l_1 + l_2$  een vaste waarde:  $l_1 + l_2 = \text{constant}$ .



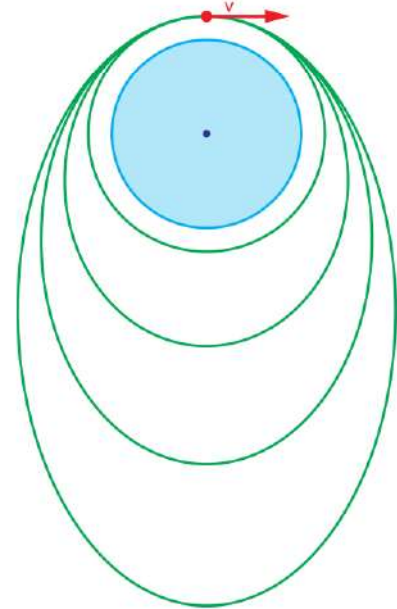
**Figuur 31** Een ellips.

In de figuren 32 en 33 zie je de baan van een horizontaal weggeschoten projectiel. We maken de horizontale snelheid steeds groter. In figuur 32 is de beginsnelheid kleiner dan 8,0 km/s, zodat het projectiel met een elliptische baan op aarde valt. De groen lijnen zijn de banen tot aan het aardoppervlak. De paars gestreepte lijnen zijn de denkbeeldige banen als het projectiel dwars door de aarde zou kunnen bewegen. In figuur 33 is de beginsnelheid groter dan 8,0 km/s. Zonder luchtweerstand zou het projectiel een satelliet van de aarde worden met een elliptische baan om de aarde.

**Figuur 32** Horizontaal weggeschoten projectiel met  $v_{\text{begin}} < 8,0 \text{ km/s}$ .



**Figuur 33** Horizontaal weggeschoten projectiel met  $v_{\text{begin}} > 8,0 \text{ km/s}$ .



Hoewel gravitatiekracht een ellipsvormige baan geeft, houden we daar in onze berekeningen geen rekening mee. We gaan uit van cirkelvormige banen en gebruiken de formule voor de middelpuntzoekende kracht. Omdat massa  $m$  veel kleiner is dan massa  $M$  voert het voorwerp met massa  $m$  een cirkelvormige baan uit om het voorwerp met massa  $M$ . In de ruimte werkt alleen de gravitatiekracht zodat geldt:

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

- $F_G$  is de gravitatiekracht in newton (N)
- $G$  is de gravitatieconstante:  $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- $m$  is de massa van het lichte voorwerp dat om het zware voorwerp draait (kg)
- $M$  is de massa van het zware voorwerp in kilogram (kg)
- $r$  is de afstand tussen de zwaartepunten van beide voorwerpen in meter (m)
- $v$  is de baansnelheid van het lichte voorwerp in meter per seconde (m/s)

Hieruit kun je eenvoudig de formule voor de **baansnelheid** afleiden  $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$

Als je bovenstaande formule combineren met  $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$  dan vind je de **derde wet van**

**Kepler:**

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

## BEWIJS

- $F_G = F_{\text{mpz}} \rightarrow G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow G \cdot \frac{M}{r} = v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$
- $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow v^2 = \frac{4\pi^2 \cdot r^2}{T^2}$
- $G \cdot \frac{M}{r} = \frac{4\pi^2 \cdot r^2}{T^2} \rightarrow \frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot M}{4\pi^2}$

## VOORBEELD de massa van de zon

De afstand van de aarde tot het middelpunt van de zon is  $1,496 \cdot 10^{11}$  m. De omlooptijd van de aarde om de zon is 365,256 dagen.

### Bereken de massa van de zon.

- $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow v = \frac{2\pi \cdot 1,496 \cdot 10^{11}}{365,256 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} = 2,97852 \cdot 10^4 \text{ m/s}$
- $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}} \rightarrow 2,97852 \cdot 10^4 = \sqrt{\frac{6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot M}{1,496 \cdot 10^{11}}} \rightarrow M = 1,9885 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

## Geostationaire satellieten

Een geostationaire satelliet heeft een vaste plaats ten opzichte van het aardoppervlak. Omdat de aarde in 24 uur om haar as draait moet zo'n satelliet ook in 24 uur een volledige baan om de aarde afleggen. Verder moet een geostationaire satelliet boven de evenaar staan, zodat het vlak waarin de satelliet beweegt gelijk is aan het vlak loodrecht op de draaias van de aarde. De straal van de baan van een geostationaire satelliet kun je met de 3<sup>e</sup> wet van Kepler berekenen.

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot M_{\text{aarde}}}{4\pi^2} \quad \text{met } T = 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} \rightarrow r = 4,2241 \cdot 10^7 \text{ m}$$

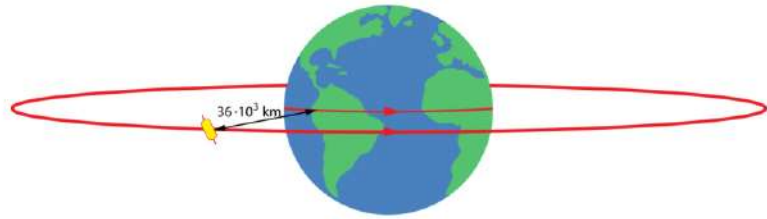
Voor de hoogte van een geostationaire satelliet boven het aardoppervlak moet de straal van de aarde (6378 km) van  $r$  worden afgetrokken.

$$h_{\text{geostationair}} = 4,2241 \cdot 10^7 - 6,378 \cdot 10^6 = 3,5863 \cdot 10^7 \text{ m} \quad (35.863 \text{ km})$$

Bij de berekening hebben we een **synodische dag** gebruikt van 24 uur. Dit is de tijd waarin de aarde om haar as draait gezien vanaf de zon. In werkelijkheid moet je de **siderische dag** gebruiken. Dit is de tijd waarin de aarde om haar as draait gezien vanaf de sterren. Een siderische dag duurt 23 uren, 56 minuten en 4 seconden.

Geostationaire satellieten worden toegepast voor het uitzenden van televisie en radio signalen. De Europese ASTRA satellieten zenden 2400 digitale televisie en radiosignalen uit die je met een schotelantenne kunt ontvangen. Momenteel zijn er 17 ASTRA satellieten actief. Ook voor satelliettelefoon worden soms geostationaire satellieten gebruikt.

**Figuur 34** Een geostationaire satelliet staat op een vast punt boven de evenaar op een hoogte van 36 duizend kilometer.



### Satellieten op lage hoogte

Een satelliet kan ook net buiten de dampkring op lage hoogte rondjes om de aarde draaien. Bijna alle lucht bevindt zich in de onderste 50 km en op 200 km hoogte is er daarom vrijwel geen luchtweerstand. Omdat 200 km klein is ten opzichte van de straal van de aarde, kunnen we voor de straal van de satellietbaan bij benadering de straal van de aarde invullen.

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot M_{\text{aarde}}}{4\pi^2} \quad \text{met } r = 6,378 \cdot 10^6 \text{ m} \rightarrow T = 5066 \text{ s}$$

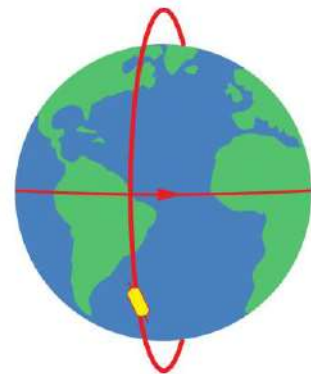
$$\text{Voor de snelheid vind je dan: } v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow v = \frac{2\pi \cdot 6,378 \cdot 10^6}{5066} \rightarrow v = 7,91 \cdot 10^3 \text{ m/s.}$$

Dit is de 8,0 km/s zijn we eerder tegengekomen toen we de kromming van het aardoppervlak in rekening brachten bij een horizontaal weggeschoten projectiel.

### Satellieten met polaire banen

Satellieten met polaire banen draaien om de Noordpool en de Zuidpool. Ze staan niet op een vaste plaats boven het aardoppervlak maar hebben een lage baan van bijvoorbeeld 500 km hoogte. Deze satellieten worden gebruikt om het aardoppervlak te observeren. Weersatellieten en spionagesatellieten horen tot deze categorie.

De baansnelheid van een polaire satelliet is hoog en zijn omlooptijd is klein. Ze draaien rondjes om de aarde in iets meer dan 1,5 uur en terwijl ze dat doen draait de aarde onder hen door. In een dag beweegt de satelliet 16 keer om de aarde, waarbij de aarde steeds  $360/16 = 22,5$  graden om haar as is gedraaid. Zie figuur 35.

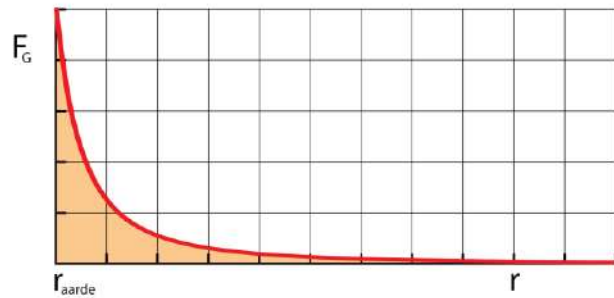


**Figuur 35** Een polaire satelliet.

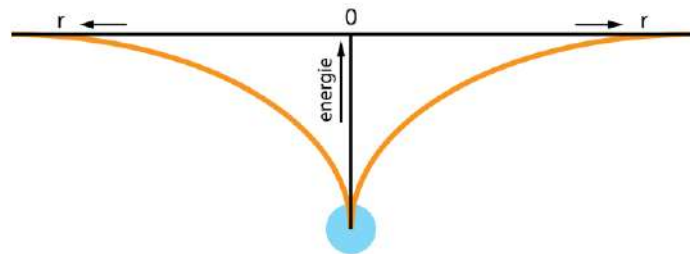
### Gravitatie-energie

In een eerder hoofdstuk ben je de de formule voor de zwaarte energie tegengekomen:  $E_z = m \cdot g \cdot h$ . Deze formule geldt alleen bij het oppervlak van de aarde. Op grote hoogte is de valversnelling kleiner dan  $9,81 \text{ m/s}^2$  en mag je deze formule niet meer gebruiken. In plaats van de zwaarte energie gebruik je de **gravitatie-energie**, die gebaseerd is op de gravitatiewet van Newton en daarom altijd mag worden gebruikt. De gravitatie-energie is gelijk aan de arbeid die nodig is om een voorwerp vanaf het aardoppervlak naar hoogte  $h$  te brengen. Voor deze arbeid geldt:  $W = F_G \cdot s$ . De gravitatiekracht wordt kleiner als  $s$  toeneemt. Om de arbeid te berekenen moet je daarom de oppervlakte berekenen onder een  $(F_G, r)$ -grafiek, waarbij  $r$  de afstand is tot het middelpunt van de aarde. Zie figuur 36.

**Figuur 36** Gravitiesticht als functie van de afstand. De gravitatie-energie is het oppervlak onder de grafiek (oranje).



Bij berekeningen met zwaarte-energie stellen we meestal de hoogte  $h$  gelijk aan nul op het oppervlak van de aarde. De zwaarte-energie is dan nul op het aardoppervlak en wordt groter als  $h$  toeneemt. Bij berekeningen met gravitatie-energie is het gebruikelijk om de situatie te beschrijven vanuit de ruimte op zeer grote afstand van de aarde. De gravitatie-energie op oneindig grote afstand van de aarde stel je op nul. Een voorwerp op het oppervlak van de aarde bevindt zich dan in een energieput met negatieve energie. Zie figuur 37.



**Figuur 37** De gravitatie-energie.

Met deze afspraak voor het nulpunt geldt voor de **gravitatie-energie**:

$$E_G = -G \cdot \frac{m \cdot M}{r}$$

- $E_G$  is de gravitatie-energie in joule (J)
- $G$  is de gravitatieconstante:  $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- $m$  is de massa van voorwerp 1 in kilogram (kg)
- $M$  is de massa van voorwerp 2 in kilogram (kg)
- $r$  is de afstand tussen de zwaartepunten van beide voorwerpen in meter (m)

### BEWIJS

- bereken de integraal  $W = \int_r^\infty F_G \, dr$
- $W = \int_r^\infty G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \, dr \rightarrow W = G \cdot m \cdot M \cdot \int_r^\infty \frac{1}{r^2} \, dr$
- de primitieve van  $\frac{1}{x^2}$  is  $\frac{-1}{x}$
- $W = G \cdot m \cdot M \cdot \left[ \frac{-1}{r} \right]_r^\infty \rightarrow W = G \cdot m \cdot M \cdot \left( 0 - \frac{-1}{r} \right) \rightarrow W = G \cdot \frac{m \cdot M}{r}$
- $W = E_{G\text{eind}} - E_{G\text{begin}} \rightarrow G \cdot \frac{m \cdot M}{r} = 0 - E_{G\text{begin}} \rightarrow E_{G\text{begin}} = -G \cdot \frac{m \cdot M}{r}$

### VOORBEELD geostationaire satelliet

Een geostationaire satelliet moet vanaf de oppervlakte van de aarde in een geostationaire baan op een hoogte van 35.863 km worden gebracht. De raket wordt gelanceerd vanaf de evenaar en de satelliet heeft een massa van 1000 kg.

#### Bereken hoeveel energie hiervoor nodig is.

- BEGIN satelliet op het oppervlak van de aarde bij de evenaar
- $m = 1000 \text{ kg}$  |  $M = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$  |  $r = 6,378 \cdot 10^6 \text{ m}$  |  $E_G = \dots \text{ J}$
- $E_G = -G \cdot \frac{m \cdot M}{r} \rightarrow E_G = -6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1000 \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}{6,378 \cdot 10^6} = -6,24944 \cdot 10^{10} \text{ J}$
- EIND satelliet op 35.863 km boven de evenaar
- $r = 6,378 \cdot 10^6 + 3,5863 \cdot 10^7 \text{ m} = 4,2241 \cdot 10^7 \text{ m}$
- $E_G = -6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1000 \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}{4,2241 \cdot 10^7} = -9,43607 \cdot 10^9 \text{ J}$
- $E_{G\text{eind}} - E_{G\text{begin}} = -9,43607 \cdot 10^9 - (-6,24944 \cdot 10^{10}) = 5,30583 \cdot 10^{10} = 5,306 \cdot 10^{10} \text{ J}$

### Ontsnappingsnelheid

Stel we schieten een projectiel vanaf de oppervlakte van de aarde in de ruimte. Zoals we hebben gezien is er een snelheid van 8,0 km/s nodig om het projectiel in een baan om de aarde te brengen. Bij een snelheid groter dan 8,0 km/s wordt de ellipsvormige baan steeds langwerpiger. Er is een snelheid waarbij een projectiel niet meer terugkeert naar de aarde. Deze snelheid is de **ontsnappingsnelheid**. Als de beginsnelheid groter is dan deze snelheid raakt het los van de aarde en komt het niet meer terug.

Om de ontsnappingsnelheid te vinden bereken we de arbeid die nodig is om een voorwerp met massa  $m$  vanaf het oppervlak van de aarde oneindig ver in de ruimte te brengen. We gebruiken de formule voor de gravitatie-energie. In het begin bevindt het voorwerp zich op het oppervlak van de aarde:

$$E_{G\text{begin}} = -G \cdot \frac{m \cdot M_{\text{aarde}}}{r_{\text{aarde}}} \quad | \quad E_{G\text{eind}} = 0 \quad \rightarrow \quad E_{G\text{eind}} - E_{G\text{begin}} = G \cdot \frac{m \cdot M_{\text{aarde}}}{r_{\text{aarde}}}$$

De kinetische energie waarmee het projectiel wordt weggeschoten moet minimaal gelijk zijn aan dit verschil in energie:

$$E_K \geq E_{G\text{eind}} - E_{G\text{begin}} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2} m \cdot v^2 \geq G \cdot \frac{m \cdot M_{\text{aarde}}}{r_{\text{aarde}}}$$

De minimaal benodigde energie is de ontsnappingsnelheid waarvoor geldt:

$$\frac{1}{2} m \cdot v_{\text{ontsnap}}^2 = G \cdot \frac{m \cdot M_{\text{aarde}}}{r_{\text{aarde}}} \quad \rightarrow \quad v_{\text{ontsnap}}^2 = \frac{2 \cdot G \cdot M_{\text{aarde}}}{r_{\text{aarde}}}. \quad \text{Hieruit volgt: } v_{\text{ontsnap}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{r}}$$

Vullen we alle gegevens in dan vinden we voor de aarde:  $v_{\text{ontsnap}} = 11,182 \text{ km/s}$  (ongeveer 40000 km/h).

---

## 19.5 Informatie uit de ruimte

### Kijken met een telescoop

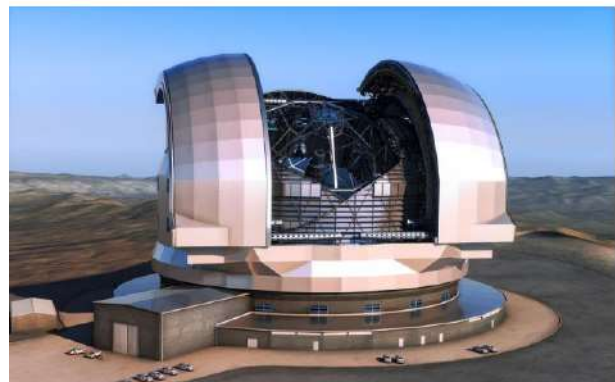
Sterrenwachten met optische telescopen werden vroeger gebruikt in Europese steden, zoals in Leiden. Maar deze oude sterrenwachten zijn niet meer in gebruik, vanwege de storende lichtvervuiling in bewoond gebied. Een aantal Europese landen, waaronder Nederland, hebben de **European Southern Observatory** (ESO) opgericht. De belangrijkste sterrenwachten van deze organisatie bevinden zich in de Atacama woestijn in het noorden van Chili. Sinds 2007 is de door ESO vervaardigde **Very Large Telescope** (VLT) in bedrijf. Dit is momenteel het meest geavanceerde optische instrument ter wereld. Het bestaat uit vier afzonderlijke telescopen die ieder een hoofdspiegel hebben met een diameter van 8,2 meter en vier verplaatsbare 1,8 meter hulptelescopen. Met een 8,2 meter telescoop kunnen objecten in de ruimte worden waargenomen die vier miljard keer zwakker zijn dan de zwakste objecten die met het blote oog zijn te zien.

De lichtbundels van de acht telescopen kunnen met een stelsel van spiegels worden gecombineerd, waarbij gebruik wordt gemaakt van interferentie. Hierdoor neemt de resolutie toe tot 0,002 boogseconde. Dat is minder dan de miljoenste van een graad. Met deze resolutie zou je vanaf de aarde een muntstuk op de maan moeten kunnen zien liggen.



**Figuur 38** De Very Large Telescope in Chili.

Op dit moment werkt ESO aan de **Extremely Large Telescope** (ELT). Deze telescoop krijgt een spiegel met een diameter van 39,3 meter. De spiegel bestaat uit 798 hexagonale segmenten van elk 1,4 m breed en 5 cm dik. Om de spiegel bevindt zich een koepel met een diameter van 100 m en een hoogte van 80 m. De ELT komt op ongeveer 20 km van de VLT en wordt naar verwachting in 2029 in gebruik genomen.



**Figuur 39** Illustratie van de Extremely Large Telescope.

### Radio-astronomie

Niet alleen zichtbaar licht bereikt de aarde, ook radiogolven zijn op aarde waarneembaar. Radiogolven hebben een golflengte tussen 10 meter (frequentie 30 MHz) en 0,4 mm (frequentie 700 GHz). Karl Jansky (Amerika, 1905–1950) ontdekt in 1930 bij toeval dat er door het centrum van de Melkweg radiostralen worden uitgezonden. Deze ontdekking is het begin van de radio-astronomie.

Bij Westerbork in Drenthe staat de **Westerbork Synthese Radio Telescoop** (WSRT). Deze telescoop bestaat uit 14 losse parabolische antennes, elk met een diameter van 25 meter, opgesteld in oost-west richting over een lengte van 2,7 km. Tien antennes staan vast en vier zijn over spoor verplaatsbaar. Door gedurende 24 uur waarnemingen te doen kan een telescoop met een diameter van 2,7 km worden nabootst. De antennes zijn gevoelig voor radiogolven tussen 3,6 cm (8,3 GHz) en 92 cm (350 MHz).



**Figuur 40** Radiotelescoop in Westerbork, Drenthe.

Een vergelijkbare radiotelescoop bevindt zich in New Mexico, Verenigde Staten. De **Very Large Array** (VLA) radiotelescoop bestaat uit 27 antennes van 25 meter diameter verplaatsbaar opgesteld op een 21 km lang spoor in Y-vorm. De VLA telescoop heeft een golflengte bereik van 0,6 cm tot 410 cm.



**Figuur 41** Very Large Array (VLA) radiotelescoop in New Mexico, Verenigde Staten.

In de Atacama woestijn in Chili bevindt zich de ALMA microgolven telescoop. Het is een samenwerking tussen Europa, Noord Amerika, Oost Azië en Chili. De ALMA telescoop bestaat uit 66 antennes van 7 en 12 meter diameter die verplaatsbaar zijn over 150 m tot 16 km. De ALMA telescoop heeft een golflengte bereik van 0,3 mm tot 8,5 mm.



**Figuur 42** Microgolven-telescoop ALMA in Chili.

## Ruimtetelescopen

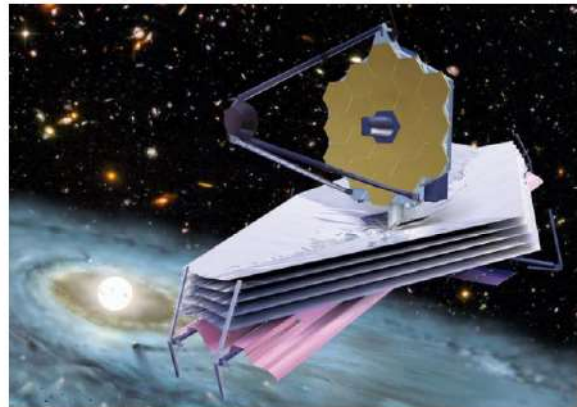
Om de storende invloed van de atmosfeer volledig uit te schakelen zijn er meer dan 25 telescopen in de ruimte gebracht. Deze telescopen bestrijken een groot deel van het elektromagnetisch spectrum.

De **Hubble ruimtetelescoop** is sinds 1990 operationeel en is bekend vanwege de vele haarscherpe foto's die hij sindsdien heeft gemaakt. De Hubble telescoop werkt in het golflengtegebied tussen  $0,1 \mu\text{m}$  en  $1,0 \mu\text{m}$  en kan hiermee ultraviolet licht, zichtbaar licht en nabij infrarood licht waarnemen. Het einde van de Hubble telescoop komt in zicht en over enkele jaren zal de Hubble uit bedrijf worden genomen.

De Hubble telescoop is opgevolgd door de **James Webb ruimtetelescoop** (JWST) die sinds 2022 in bedrijf is. Het is een samenwerkingsproject van NASA en ESA. De JWST werkt in het infrarode gebied met golflengtes tussen  $0,6 \mu\text{m}$  en  $28,5 \mu\text{m}$ . De JWST heeft een spiegel met een diameter van 6,5 meter en draait niet om de aarde maar om de zon op een afstand van 1,5 miljoen km van de aarde. De gezamenlijke aantrekkingskracht van de zon en van de aarde maakt dat de JWST op een vaste afstand van de aarde blijft.



**Figuur 43** Hubble ruimtetelescoop.

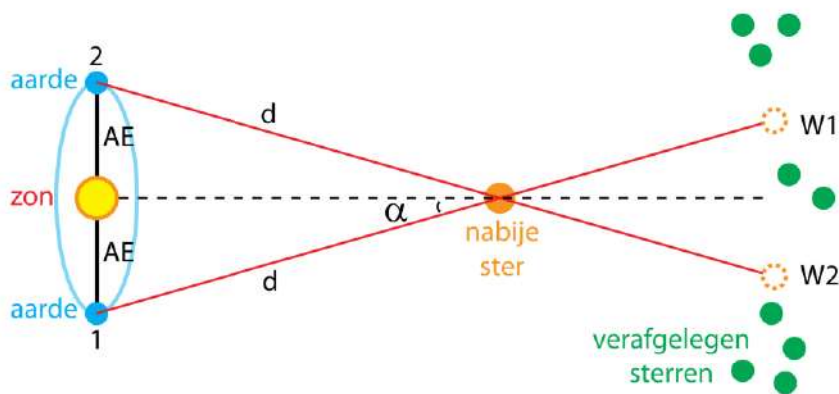


**Figuur 44** De James Webb ruimtetelescoop.

## Afstanden bepalen met de parallax-methode

Telescopen worden onder andere gebruikt om afstanden in de ruimte te meten. Voor objecten die niet al te ver van de aarde staan kun je gebruik maken van **parallax**. Parallax ontstaat als je een voorwerp onder twee verschillende hoeken waarneemt. Kijk je met beide ogen naar een voorwerp dan ziet ieder oog het voorwerp onder een andere hoek. Je hersenen zijn in staat om uit het verschil in hoek de afstand van het voorwerp te schatten.

Met parallax kun je de afstand van sterren in de Melkweg bepalen. Dit gaat als volgt. Met een telescoop neem je de positie waar van een nabije ster tegen de achtergrond van verafgelegen sterren. Dat doe je twee keer, met een tussenpose van zes maanden, zie W1 en W2 in figuur 45. In deze tussenpose heeft de aarde een halve baan om de zon afgelegd. Tegen de achtergrond van verafgelegen sterren zie je dat de plaats van de nabije ster is verschoven. Deze verschuivingshoek  $\alpha$  meet je met een nauwkeurige telescoop. Hieruit kun je de afstand van de nabije ster berekenen.



**Figuur 45** De afstand van een nabije ster meten met behulp van parallax.

De gemiddelde afstand van de aarde tot de zon wordt de **astronomische eenheid AE** genoemd. **De astronomische eenheid is  $1,4959787 \cdot 10^{11}$  meter.**

Stel je meet met de parallaxmethode een hoek  $\alpha$  van één boogseconde. Dat is  $1/3600$  deel van één graad. De afstand die daarbij hoort kun je als volgt berekenen:

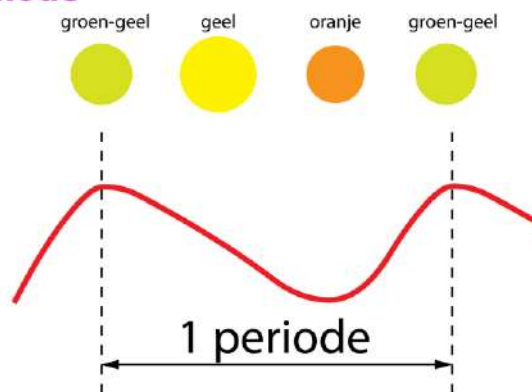
$$\sin \alpha = \frac{AE}{d} \rightarrow d = \frac{1,4959787 \cdot 10^{11}}{\sin(1/3600)} \rightarrow d = 3,08568 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

De afstand die een parallaxhoek van één boogseconde geeft bij een meetafstand van één astronomische eenheid wordt een **parsec** genoemd. **Eén parsec is  $3,08568 \cdot 10^{16}$  m.**

Een moderne telescoop op aarde heeft een nauwkeurigheid van ongeveer 0,01 boogseconde waarmee je afstanden tot 100 parsec (326 lichtjaar) kunt meten. De gemiddelde afstand tussen de sterren is ongeveer 3 lichtjaar, zodat in een bol met een straal van 326 lichtjaar ongeveer een miljoen sterren zijn. Van al deze sterren kan de afstand tot de aarde redelijk nauwkeurig worden bepaald. Ruimtetelescopen hebben geen last van fluctuaties in de atmosfeer en kunnen een nauwkeurigheid van 0,001 boogseconde halen. Ruimtetelescoop GAIA is speciaal ontwikkeld voor het meten van afstanden en heeft een nauwkeurigheid van 10 miljoenste boogseconde. Met GAIA kan de afstand van een miljard sterren in de Melkweg nauwkeurig worden bepaald.

### Afstand bepalen met de Cepheïden-methode

Voor sterren die ver weg staan kan de parallaxmethode niet worden gebruikt en is een andere methode nodig. Bij de Cepheïdenmethode wordt gebruik gemaakt van een speciale klasse van sterren, de Cepheïden. Bij deze sterren verandert periodiek de intensiteit en de kleur van het uitgestraalde licht. Ze pulseren langzaam met een periode die meestal tussen 1 en 80 dagen ligt. Er is een verband tussen de periode en het uitgestraalde vermogen waarmee je de afstand van de ster kunt berekenen.



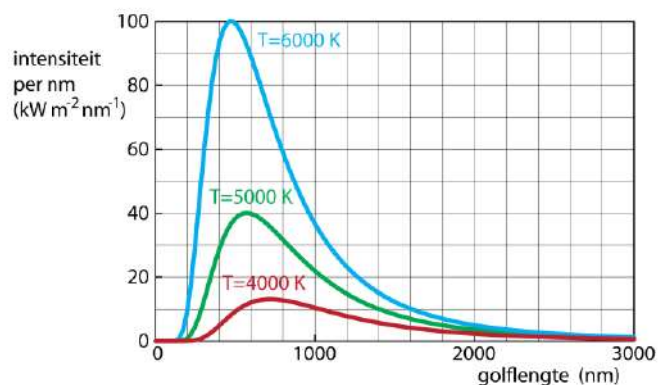
**Figuur 46** Periodieke variatie in lichtsterkte en kleur van een Cepheïde ster.

De grote kracht van de Cepheïde-methode is dat Cepheïde-sterren zeer helder zijn en dus over grote afstanden kunnen worden waargenomen. Zo kon Edwin Hubble in 1923 voor het eerst Cepheïden identificeren in het Andromeda sterrenstelsel. Hierdoor weten we dat dit sterrenstelsel op 2,54 miljoen lichtjaar van de aarde staat. Inmiddels zijn Cepheïden ontdekt in sterrenstelsels die tot de Virgocluster behoren, op een afstand van 60 miljoen lichtjaar.

## Het continu spectrum van sterren

Vanwege de hoge temperatuur van het oppervlak stralen alle sterren licht uit. Hoe hoger de temperatuur van het oppervlak is hoe meer energie een ster per seconde per vierkante meter uitstraalt. De energie wordt uitgestraald als elektromagnetische straling met een bepaalde verdeling van golflengtes.

Bij een lage temperatuur wordt er veel infrarode straling uitgezonden. Als de temperatuur hoger wordt verschuift het uitgestraalde spectrum naar kortere golflengtes met een blauwe kleur. In figuur 47 zie je de uitgestraalde spectra bij verschillende temperaturen.



**Figuur 47** Elektromagnetische straling.

De golflengte van de straling die per nanometer het meest wordt uitgezonden verschuift naar een kleinere waarde (hoge energie) als de temperatuur toeneemt. De **wet van Wien** geeft het verband aan tussen dit maximum en de temperatuur.

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

- $\lambda_{\max}$  is de golflengte waarbij de intensiteit per nanometer van de uitgezonden straling maximaal is in meter (m)
- $k_W$  is de constante van Wien:  $2,897772 \cdot 10^{-3}$  m K
- $T$  is de temperatuur in kelvin (K)

Voor de hoeveelheid uitgestraalde energie per seconde geldt de **wet van Stefan-Boltzmann**:

$$P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

- $P_{\text{bron}}$  is de uitgestraalde energie per seconde (het vermogen) in watt (W)
- $A$  is de oppervlakte van de bron in vierkante meter (m<sup>2</sup>)
- $\sigma$  is de constante van Stefan-Boltzmann:  $5,670374 \cdot 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>
- $T$  is de temperatuur in kelvin (K)

Omdat sterren bolvormig zijn geldt:

$$A = 4\pi \cdot r_{\text{ster}}^2$$

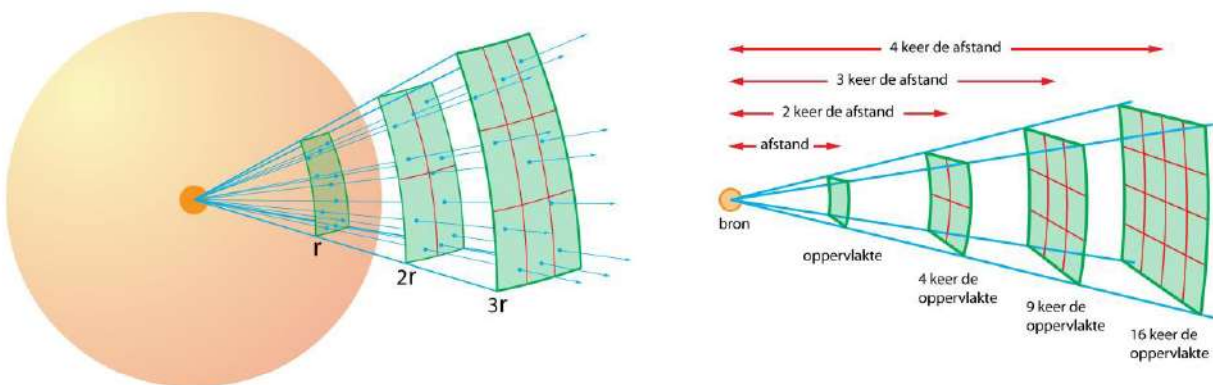
- A is de oppervlakte in vierkante meter (m<sup>2</sup>)
- r<sub>ster</sub> is de straal van de ster in meter (m)

Uit de golflengte waarbij de lichtintensiteit per nanometer maximaal is kan je met de wet van Wien de oppervlaktetemperatuur van een ster berekenen. Zijn deze temperatuur én de straal van de ster bekend dan kan je met de wet van Stefan-Boltzmann het stralingsvermogen van de ster berekenen.

### De intensiteit van licht

De helderheid waarmee je een ster aan de hemel ziet hangt af het uitgestraalde vermogen én van de afstand van de ster. Een ster straalt aan alle kanten evenveel licht uit, waardoor er een **bolvormige golf** ontstaat. Tijdens de verspreiding van het licht wordt de straal van deze bol en daarmee de oppervlakte groter. De energie wordt hierdoor over een steeds groter oppervlak verdeeld. In plaats van over helderheid is het beter om te spreken over de **intensiteit**. Hiermee bedoel je de hoeveelheid ontvangen lichtenergie per seconde per vierkante meter.

**Lichtintensiteit is de hoeveelheid ontvangen lichtenergie per seconde per vierkante meter en wordt uitgedrukt in watt per vierkante meter (W / m<sup>2</sup>).**



**Figuur 48** Bij een bolvormige golf wordt de energie over een steeds groter oppervlak verdeeld. De intensiteit neemt af met het kwadraat van de afstand.

Voor de intensiteit van een bolvormige golf vinden we:

$$I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi \cdot r^2}$$

- $I$  is de intensiteit in watt per vierkante meter ( $\text{W m}^{-2}$ )
- $P_{\text{bron}}$  is het vermogen van de bron in watt (W)
- $r$  is de afstand tot de bron in meter (m)

Als je de straal, de temperatuur en de afstand van een ster weet kun je de waargenomen intensiteit berekenen. Dat gaat als volgt:

- $P_{\text{ster}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$  en  $A = 4\pi \cdot r_{\text{ster}}^2 \rightarrow P_{\text{ster}} = \sigma \cdot 4\pi \cdot r_{\text{ster}}^2 \cdot T^4$
- $I = \frac{\sigma \cdot 4\pi \cdot r_{\text{ster}}^2 \cdot T^4}{4\pi \cdot r^2} \rightarrow I = \sigma \cdot T^4 \cdot \frac{r_{\text{ster}}^2}{r^2}$

De aarde ontvangt  $1361 \text{ W/m}^2$  zonlicht. Dit noemen we de **zonneconstante**. Hoe verder een planeet van de zon afstaat, hoe kleiner zijn zonneconstante is. In het voorbeeld hieronder zie je hoe je uit waarnemingen op aarde het vermogen en de straal van een ster kunt berekenen. We nemen als voorbeeld de zon.

#### VOORBEELD **het vermogen en de straal van de zon**

De afstand tussen de aarde en de zon is  $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ . De ontvangen lichtintensiteit op aarde is  $1361 \text{ W m}^{-2}$ . Het licht heeft een maximale intensiteit per nm bij 501 nm.

##### **Bereken het stralingsvermogen van de zon.**

- $A$  is de oppervlakte van de denkbeeldige bol om de zon met een straal van  $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- $A = 4\pi \cdot r^2 \rightarrow A = 4\pi \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^2 = 2,81237 \cdot 10^{23} \text{ m}^2$
- door iedere  $\text{m}^2$  gaat een vermogen van 1361 watt
- het stralingsvermogen van de zon is  $1361 \cdot 2,81237 \cdot 10^{23} = 3,828 \cdot 10^{26} \text{ W}$

##### **Bereken de straal van de zon.**

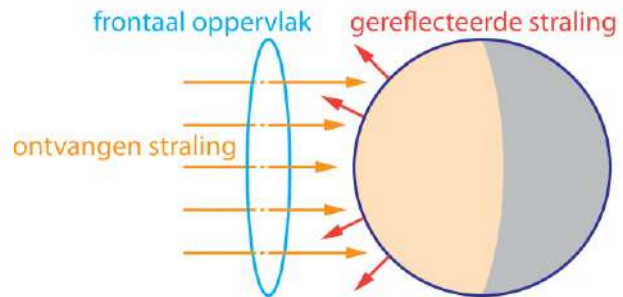
- $\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_{\text{W}} \rightarrow 501 \cdot 10^{-9} \cdot T = 2,897772 \cdot 10^{-3} \rightarrow T = 5,783976 \cdot 10^3 \text{ K}$
- $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \rightarrow 3,828 \cdot 10^{26} = 5,670374 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot (5,783976 \cdot 10^3)^4$
- $A = 6,031938 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$
- $A = 4\pi \cdot r^2 \rightarrow 6,031938 \cdot 10^{18} = 4\pi \cdot r^2 \rightarrow r = 6,928 \cdot 10^8 \text{ m}$

## **De temperatuur van een planeet**

Een planeet wordt verwarmd door het absorberen van stralingsenergie van een ster. De temperatuur van de planeet maakt dat de planeet zelf ook elektromagnetische straling uitzendt. Als de planeet minder straling uitzendt dan hij ontvangt warmt hij op. Op dit moment is dat voor de aarde het geval. De temperatuur van een planeet verandert niet als de geabsorbeerde stralingsenergie gelijk is aan de uitgezonden stralingsenergie. Als je het vermogen van de ster en de afstand van de planeet tot deze ster weet kun je de temperatuur van de planeet uitrekenen. Bij het zoeken naar buitenaards leven is dit belangrijk, want waarschijnlijk is voor het ontstaan van leven vloeibaar water nodig.

Om de temperatuur van een planeet te berekenen moet je rekening houden met het reflecteren van licht. Niet al het licht dat op een planeet valt wordt geabsorbeerd. Het percentage gereflecteerd licht is de **albedo** van de planeet. Zo heeft de aarde een albedo van 0,30. Dit betekent dat 30% van het zonlicht wordt gereflecteerd.

Om te berekenen hoeveel licht een planeet absorbeert moet je eerst de intensiteit van het licht uitrekenen en dit daarna vermenigvuldigen met de **frontale oppervlakte** van de planeet. De frontale oppervlakte van een bol met straal  $r$  is gelijk aan de oppervlakte van een cirkel met dezelfde straal:  $A = \pi \cdot r^2$ . Zie figuur 49.



**Figuur 49** Frontaal oppervlak.

In het voorbeeld hieronder gaan we de temperatuur van de aarde uitrekenen. De berekende temperatuur is de temperatuur van de buitenkant van de aarde, dus van de atmosfeer. Het vaste land heeft een hogere temperatuur.

**VOORBEELD** de temperatuur van de atmosfeer van de aarde

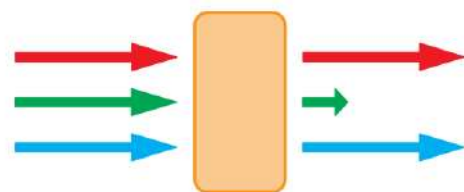
De aarde ontvangt per vierkante meter 1361 W stralingsenergie van de zon. Van deze energie wordt 70% geabsorbeerd. Deze geabsorbeerde energie wordt door de aarde uitgezonden in de ruimte, zodat de temperatuur van de aarde constant is.

**Bereken de temperatuur van de aarde.**

- 70% van 1361 W/m<sup>2</sup> wordt geabsorbeerd →  $0,7 \cdot 1361 = 952,7 \text{ W/m}^2$
- frontaal oppervlak  $A = \pi \cdot r^2$  →  $A = \pi \cdot (6,371 \cdot 10^6)^2 = 1,27516 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$
- geabsorbeerd vermogen  $P = 952,7 \cdot 1,27516 \cdot 10^{14} = 1,21485 \cdot 10^{17} \text{ W}$
- uitgestraald vermogen  $P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$  met  $A = 4\pi \cdot r_{\text{aarde}}^2$
- $A = 4\pi \cdot (6,371 \cdot 10^6)^2 = 5,100645 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$
- geabsorbeerd vermogen = uitgestraald vermogen
- $1,21485 \cdot 10^{17} = 5,670374 \cdot 10^{-8} \cdot 5,100645 \cdot 10^{14} \cdot T^4$  →  $T = 254,6 \text{ K}$

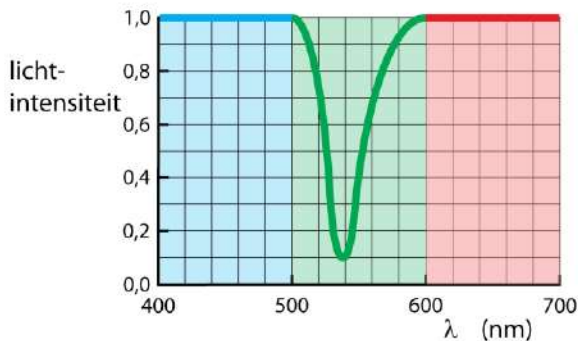
**Spectroscopie**

Het **absorptiespectrum** is de verzameling van opgenomen golflengtes. Om dit spectrum te verkrijgen bestraal je een stof met wit licht, waarin alle golflengtes aanwezig zijn. De stof neemt fotonen met bepaalde golflengtes op, de andere fotonen worden doorgelaten. Kijk je achter de stof dan zie je dat er golflengtes ontbreken. Zie figuur 50 en 51.

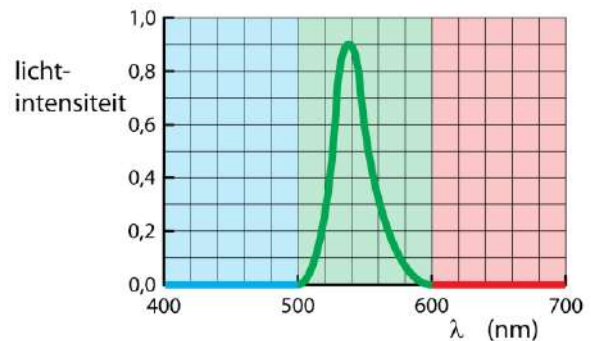


**Figuur 50** Absorptie van licht.

Het **emissiespectrum** is de verzameling van golflengtes die worden uitgezonden. Om dit spectrum te verkrijgen moet je eerst energie aan een stof toevoegen om het in een hoge-energietoestand te brengen. Vervolgens verliest de stof deze energie door het uitzenden van fotonen. Zie figuur 52.



**Figuur 51** Absorptiespectrum.  
Groen licht wordt geabsorbeerd.  
Blauw en rood licht worden doorgelaten.



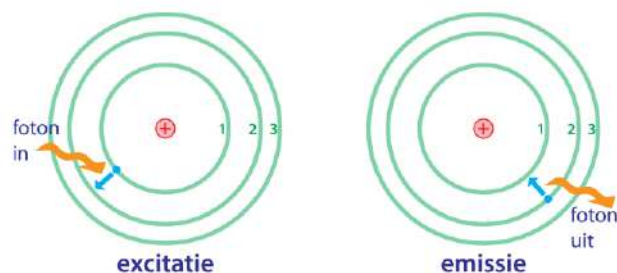
**Figuur 52** Emissiespectrum.  
Groen licht wordt uitgestraald.  
Blauw en rood licht worden niet uitgestraald.

## Atoomspectroscopie

Atomen in de gasfase bij lage druk zijn vrije atomen, want ze worden niet beïnvloed door andere atomen in hun omgeving. Vrije atomen absorberen maar enkele golflengtes en dit geeft een absorptiespectrum met scherpe lijnen. Een atoom kan alleen fotonen opnemen met een bepaalde hoeveelheid energie. Heeft een foton te weinig of te veel energie, dan wordt het niet opgenomen. Fotonen die worden opgenomen kunnen ook weer worden uitgezonden. Het emissiespectrum van vrije atomen heeft daarom ook scherpe lijnen waarvan de golflengtes precies gelijk zijn aan die van het absorptiespectrum

### – waterstof –

Als voorbeeld bekijken we het spectrum van waterstof. Dit spectrum is het meest bestudeerd omdat waterstofatoom het eenvoudigste atoom is. Waterstof heeft een atoomkern met één proton en daaromheen één elektron. Zie figuur 53. In figuur 53 wordt een elektron van de 1<sup>e</sup> naar de 2<sup>e</sup> schil gebracht.

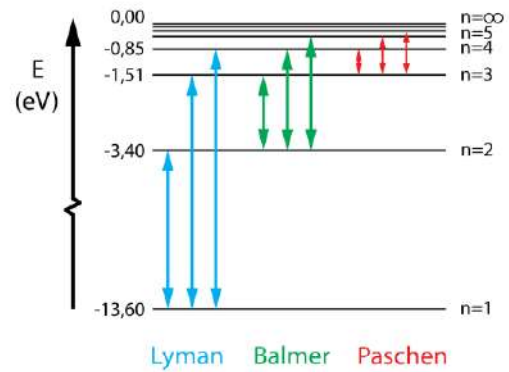


**Figuur 53** H-atoom

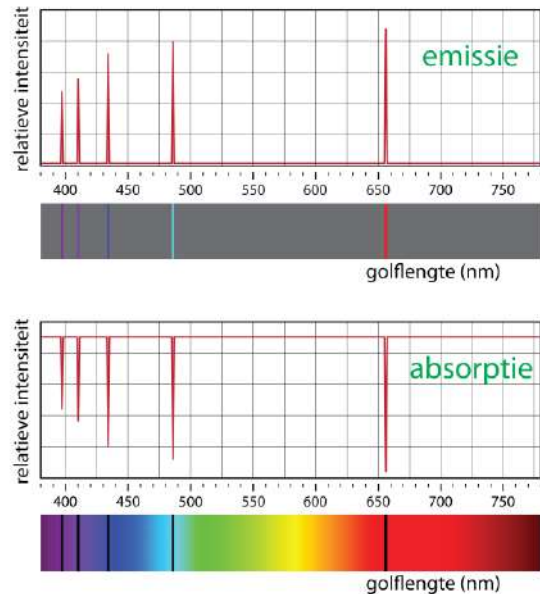
Een elektron kan ook van de 1<sup>e</sup> naar de 3<sup>e</sup> of 4<sup>e</sup> schil worden gebracht. Deze overgangen geven een reeks energieën die de **Lyman** reeks wordt genoemd. Als een elektron in de 2<sup>e</sup> schil zit kan het een sprong maken naar de 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup>, 5<sup>e</sup>, . . . schil en deze reeks heet de **Balmer** reeks. Tenslotte is er ook de **Paschen** reeks, waarbij een elektron van de 3<sup>e</sup> schil naar een hoger gelegen schil wordt gebracht. De energie die nodig is om een elektron naar een hogere schil te brengen komt vrij als het elektron een sprong omlaag maakt. De volledige hoeveelheid energie komt in één foton terecht. Daarom is de energie van de uitgezonden fotonen precies gelijk aan de energie van de opgenomen fotonen.

Een gas van waterstofatomen bij lage druk heeft een spectrum met scherpe lijnen bij 397, 410, 434, 486, en 656 nm. Deze lijnen horen tot de Balmer reeks. Zie figuur 54 en 55.

**Figuur 54** Vereenvoudigd energieniveauschema voor waterstof.



Figuur 55 is het emissie- en absorptiespectrum van H-atomen in het zichtbare deel van het spectrum (de Balmer reeks). Zoals je kunt zien bestaat het spectrum uit scherpe lijnen. Het bovenste spectrum is het uitgestraalde licht (emissie) en het onderste het opgenomen licht (absorptie).

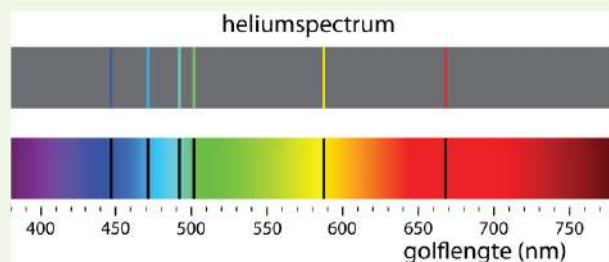


**Figuur 55** Emissiespectrum (boven) en absorptiespectrum (onder) van waterstof.

**VOORBEELD** heliumatomen

Een gas van heliumatomen bij lage druk heeft een spectrum met scherpe lijnen bij 447, 471, 492, 502, 588 en 668 nm. Zie figuur 56. Dit spectrum is als eerste waargenomen bij zonlicht en vandaar dat helium genoemd is naar de zon: Helios. Ook op aarde komt helium voor.

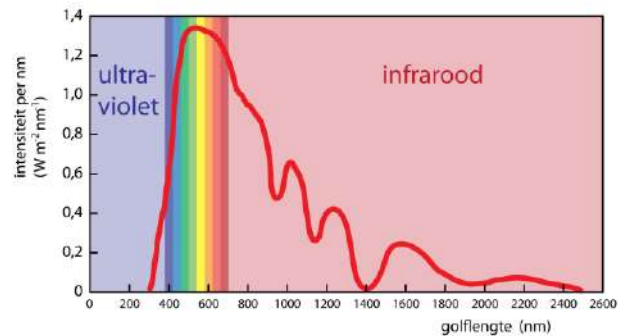
**Figuur 56** Emissiespectrum (boven) en absorptiespectrum (onder) van helium.



**De chemische samenstelling van sterren en nevels**

Door het emissiespectrum van een ster te meten kun je achterhalen welke elementen er aanwezig zijn. Op deze manier kan de chemische samenstelling van een ster nauwkeurig worden vastgesteld. Het beste kan dit gebeuren met spectrometers in de ruimte, omdat lichtabsorptie door waterdamp, CO<sub>2</sub>, ozon en andere gassen in de atmosfeer van de aarde de metingen van de emissiespectra verstoren.

In figuur 57 zie je het spectrum van het zonlicht dat op de aarde wordt ontvangen. Dit spectrum is niet gelijk aan het spectrum dat door de zon wordt uitgestraald, omdat zowel de zon als de aarde een gasvormige atmosfeer hebben die een deel van het zonlicht absorbeert.



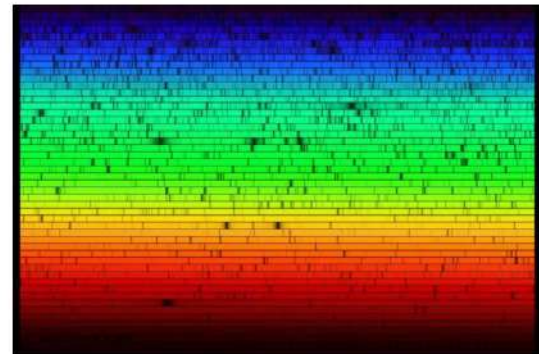
**Figuur 57** Spectrum van zonlicht op het oppervlak van de aarde.

De gaswolk om de zon heet de **corona** die je alleen tijdens een totale zonsverduistering kunt zien. De door de corona geabsorbeerde golflengtes heet het **Fraunhofer spectrum**, genoemd Joseph von Fraunhofer (Duitsland, 1787–1826).



**Figuur 58** De corona.

Met ruimtetelescopen kan het lijnenspectrum van de zon zeer gedetailleerd worden bepaald. In figuur 59 zie je het resultaat. De horizontale banen moet je achter elkaar leggen om een uitgerekt spectrum met duizenden zwarte absorptielijnen te krijgen. De samenstelling van de zon staat in tabel 3. In totaal zijn er ongeveer 67 verschillende elementen ontdekt op de zon.



**Figuur 59** Spectrum van zonlicht.

**Tabel 1** Samenstelling van de zon.

Element	Symbool	Percentage van aantal atomen (%)	Percentage van de massa (%)
waterstof	H	91,2	71,0
helium	He	8,7	27,1
zuurstof	N	0,078	0,97
koolstof	C	0,043	0,40
stikstof	N	0,0088	0,096
silicium	Si	0,0045	0,099
magnesium	Mg	0,0038	0,076
neon	Ne	0,0035	0,058
ijzer	Fe	0,0030	0,14
zwavel	S	0,0015	0,040

Ook van andere sterren en van gasnevels is de chemische samenstelling bepaald. De chemische elementen zoals wij op aarde kennen komen overal in de ruimte voor. Gasnevels, sterren en planeten zijn gemaakt van atomen die ook op aarde voorkomen.

## Snelheid bepalen uit de dopplerverschuiving

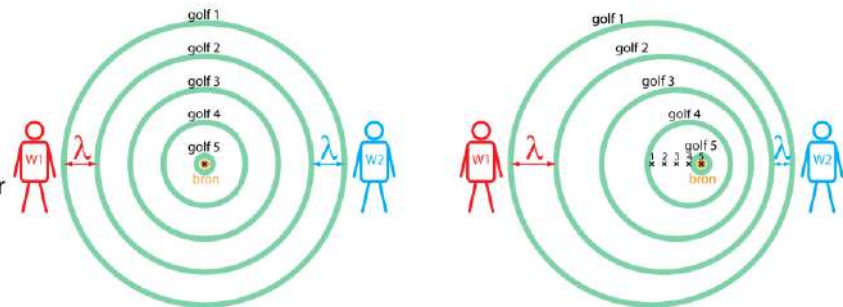
Het dopplereffect is een verschijnsel dat bij golven hoort en dus ook bij elektromagnetische golven. Als de afstand tussen de lichtbron en de waarnemer niet verandert geldt voor een elektromagnetische golf:

$$\lambda = c \cdot T$$

- $\lambda$  is de golflengte in meter (m)
- $c$  is de lichtsnelheid in meter per seconde (m/s)
- $T$  is de trillingstijd (periode) in seconde (s)

Maar als de bron ten opzichte van de waarnemer beweegt wordt het anders. In figuur 60 zie je links een stilstaande bron en rechts een bron die beweegt ten opzichte van waarnemer W1 (links van de bron) en W2 (rechts van de bron). De bron beweegt van links naar rechts. Door het bewegen van de bron worden de golven gezien door waarnemer W1 uitgerekt en gezien door waarnemer W2 in elkaar gedrukt. Waarnemer W1 meet een grotere golflengte dan bij een stilstaande bron en waarnemer W2 meet een kleinere golflengte. Voor W1 neemt de golflengte toe en wordt het licht roder. Voor W2 neemt de golflengte af en wordt het licht blauwer.

**Figuur 60** Het dopplereffect. Links staat de bron stil. Rechts beweegt de bron van waarnemer W1 vandaan en naar waarnemer W2 toe.



Als de snelheid  $v_{\text{bron}}$  veel kleiner is dan de lichtsnelheid kun je met de volgende formule de verandering van de golflengte  $\Delta\lambda$  uitrekenen uit de snelheid van de bron.

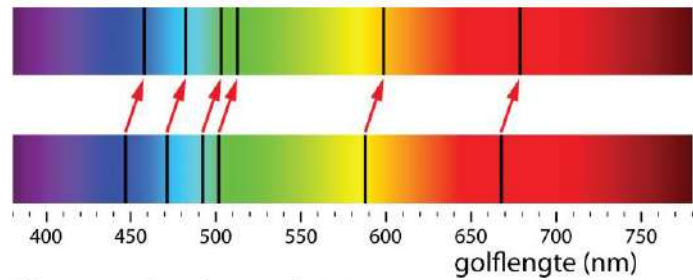
$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

**afstand tot de bron wordt groter** →  $v_{\text{bron}}$  is positief →  $\lambda_w > \lambda_0$   
**afstand tot de bron wordt kleiner** →  $v_{\text{bron}}$  is negatief →  $\lambda_w < \lambda_0$

- $v$  is de snelheid van de lichtbron in meter per seconde (m/s)
- $\Delta\lambda$  is de verandering van de golflengte in meter (m)  $\Delta\lambda = \lambda_w - \lambda_0$
- $\lambda_0$  is de golflengte bij een stilstaande lichtbron in meter (m)
- $c$  is de lichtsnelheid in meter per seconde (m/s)

Beweegt de bron van je vandaan dan zie je een grotere golflengte. Er treedt dan **roodverschuiving** op. Beweegt de bron naar je toe dan zie je een kleinere golflengte. Er treedt dan **blauwverschuiving** op.

In figuur 61 zie je het spectrum van helium. Het onderste spectrum is op aarde gemeten (de bron staat stil). Het bovenste spectrum is gemeten bij een ster. De absorptielijnen van helium zijn naar het rood verschoven. Hieruit kun je de snelheid berekenen waarmee de ster beweegt.



**Figuur 61** Dopplerverschuiving.

### VOORBEELD dopplerverschuiving

Van een sterrenstelsel wordt het spectrum waargenomen. De absorptielijnen zijn naar het rood verschoven. De lijn bij 501,6 nm ligt nu bij 509,1 nm.

**Bereken de snelheid waarmee het stelsel beweegt ten opzichte van de aarde.**

- verschuiving naar het rood → het sterrenstelsel beweegt van de aarde vandaan

$$\bullet \quad v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c \rightarrow v = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot c$$

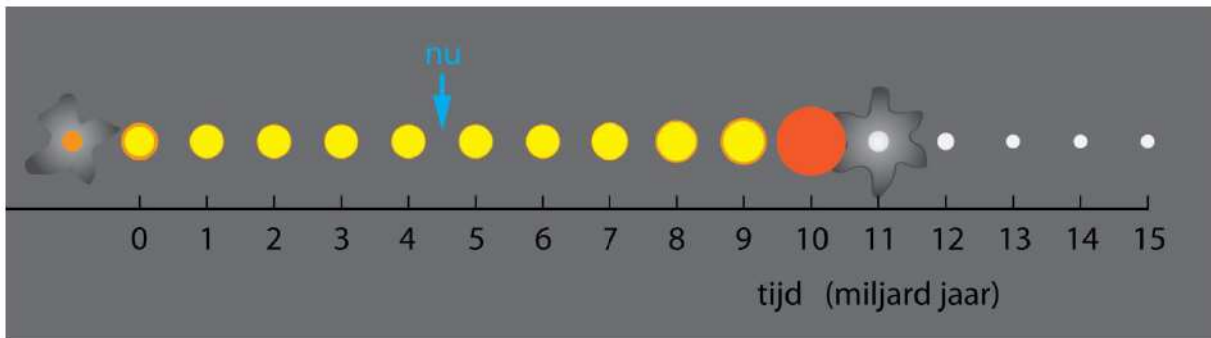
$$\bullet \quad v = \frac{509,1 - 501,6}{501,6} \cdot c \rightarrow v = \frac{7,5}{501,6} \cdot c$$

$$\bullet \quad v = 0,015 \cdot c \rightarrow v = 4,482543 \cdot 10^6 = 4,5 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

## 19.6 De levensloop van sterren

### Het ontstaan van nieuwe sterren

Heel lang leeft de gedachte dat de sterrenhemel nooit verandert. Maar dat is niet zo, een ster ontstaat, straalt gedurende lange tijd licht uit, en dooft daarna. Omdat onze zon een gewone ster is gaan we het leven van sterren zoals de zon bekijken. In figuur 62 zie je een overzicht van de gebeurtenissen die in het verleden hebben plaatsgevonden en die de zon nog te wachten staan.



**Figuur 62** De levensloop van de zon.

Ongeveer 4,6 miljard jaar geleden is de zon ontstaan uit een nevel van gas en stof. De Taurusnevel, is zo'n nevel in de Melkweg, waarin sterren zoals de zon worden gevormd. Omdat de Taurusnevel vrij dichtbij staat kan het stervormingsproces in deze nevel worden bestudeerd.

**Figuur 63** Stervormende nevels.  
Links: de Eagle nevel  
Rechts: de Carina nevel.



### De vorming van een protoster

Het stervormingsproces begint in een moleculaire wolk die voornamelijk uit waterstofmoleculen ( $H_2$ -moleculen) bestaat. We stellen ons een wolk voor met een massa van 3000 keer de massa van de zon en een doorsnede van 40 lichtjaar. Per kubieke meter zijn er 100 miljoen  $H_2$ -moleculen. De temperatuur van de gaswolk is tussen 10 en 50 kelvin. De  $H_2$ -moleculen bewegen met grote snelheid kriskras door elkaar. Hoe groter de snelheid is hoe hoger de temperatuur. Het bewegen van de moleculen levert een naar buiten gerichte kracht op die de **thermische kracht** wordt genoemd. Als er verder geen krachten werken gaan de moleculen steeds verder uit elkaar en wordt de gaswolk steeds groter. Dit gebeurt niet omdat de  $H_2$ -moleculen elkaar vanwege de **gravitatiekracht** aantrekken. Gravitatie levert een naar binnen gerichte kracht op die de gaswolk bij elkaar houdt.

De gaswolk is in evenwicht als de naar buiten gerichte thermische kracht gelijk is aan de naar binnen gerichte gravitatiekracht. Om stervorming te krijgen moet het gas eerst door een externe kracht worden samengeperst. Zo'n externe kracht kan worden geleverd door een zeer hete ster die zich in de gaswolk bevindt. De fotonen die de ster uitstraalt kunnen het gas lokaal samenpersen. Ook een sterexplosie in de buurt van de gaswolk kan ervoor zorgen dat de gaswolk wordt samengeperst.

Het samengeperste gas heeft nu een dichtheid die tot 100 keer groter is dan die van de oorspronkelijke moleculaire wolk. Hierdoor wint de gravitatiekracht het van de thermische kracht en gaat de gaswolk samentrekken. Hierbij loopt de temperatuur op. Er ontstaat een gasbol, waarin de thermische- en de gravitatiekracht met elkaar wedijveren. Zo'n bol van voornamelijk waterstofgas wordt een **protoster** genoemd. Protosterren zenden vanwege hun hoge temperatuur infrarood licht uit en zijn vanaf de aarde zichtbaar.

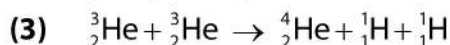
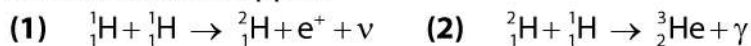


**Figuur 64** Een protoster (illustratie).

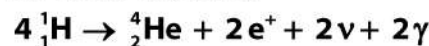
In een protoster is de gravitatiekracht sterker dan de thermische kracht, zodat de protoster zich blijft samentrekken. De temperatuur in het centrum loopt hierdoor op. Het proces van samentrekken duurt bij een protoster met de massa van de zon ongeveer 100 miljoen jaar. Uiteindelijk loopt de temperatuur op tot 10 miljoen kelvin en wordt de dichtheid 100 gram per kubieke centimeter (ongeveer tien keer de dichtheid van lood). Bij deze temperatuur en dichtheid botsen de H-atomen vaak en met grote snelheid op elkaar. Op zeker moment zijn de botsingen zo krachtig dat twee H-atomen met elkaar samensmelten (fuseren). Dit levert veel energie op, waardoor het nog heter wordt en er meer H-atomen met elkaar gaan fuseren. Een kettingreactie van fuserende H-atomen is nu in gang gezet en de protoster wordt hiermee een echte ster.

## De proton-proton kernfusiereactie

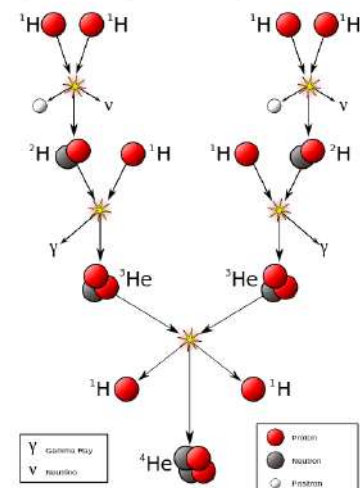
De belangrijkste energiebron van een ster is de proton-proton cyclus. Per reactie-cyclus komt er  $3,954 \cdot 10^{-12}$  J energie vrij. Deze energie zorgt ervoor dat de oppervlakte van de ster een hoge temperatuur krijgt en daardoor licht gaat uitstralen. De proton-proton cyclus bestaat uit drie stappen:



De netto-reactie is:



- ${}^1_1\text{H}$  is een proton
- ${}^2_1\text{H}$  is een proton plus een neutron (deuterium)
- $e^+$  is een positron (anti-elektron)
- $\nu$  is een neutrino
- ${}^3_2\text{He}$  is een heliumkern met één neutron
- $\gamma$  is een gamma foton
- ${}^4_2\text{He}$  is een heliumkern met twee neutronen



**Figuur 65** De proton-proton cyclus.

## Energieproductie in een ster

De fusiereacties in een ster leveren veel energie op. Onze zon zendt iedere seconde  $3,85 \cdot 10^{26}$  J energie uit. Deze energie ontstaat doordat er massa verdwijnt. In 1905 heeft Einstein aangetoond dat massa en energie in elkaar kunnen overgaan. De formule die het verband tussen energie en massa legt is:

$$E = m \cdot c^2$$

- E is de energie in joule (J)
- m is de massa in kilogram (kg)
- c is de lichtsnelheid:  $2,99792 \cdot 10^8$  m/s

Pas je deze formule toe op de zon dan kun je uitrekenen dat iedere seconde  $4,28 \cdot 10^9$  kg wordt omgezet in energie. In de 4,5 miljard jaar dat de zon heeft geschiedenis is er  $6,08 \cdot 10^{26}$  kg massa omgezet. Bij de proton-proton cyclus wordt 0,717% van de protonmassa in energie omgezet en om  $6,08 \cdot 10^{26}$  kg om te zetten is daarom  $8,48 \cdot 10^{28}$  kg protonen nodig. De massa van de zon is  $m_{\text{zon}} = 1,9884 \cdot 10^{30}$  kg. Omdat de zon grotendeels uit waterstof bestaat heeft de zon sinds haar geboorte nu 4,26% van het waterstof verbruikt. Omdat de fusiereacties alleen in het centrum van de zon plaatsvinden is niet al het waterstof beschikbaar. Over ongeveer 4,5 miljard jaar heeft de zon 10% van al het waterstof verbruikt en is het waterstof in het centrum op. De zon nadert dan het einde van haar bestaan.

## Energietransport in een ster

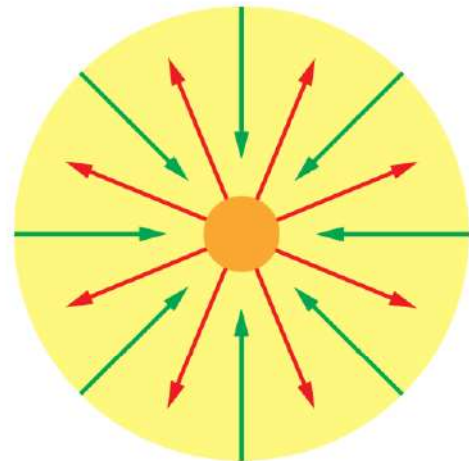
Fotonen die in de kern van een ster ontstaan, moeten zich een weg naar buiten banen. Ze worden daarbij voortdurend geabsorbeerd en weer uitgezonden, meestal in een andere richting dan de oorspronkelijke. Tussen twee opeenvolgende absorpties legt een foton in een ster ongeveer 1 cm af. Dit wordt de **vrije weglengte** genoemd. Om van het centrum naar de buitenkant van de zon te komen moet een foton ongeveer  $5 \cdot 10^{21}$  keer botsen en dat kost ongeveer 5000 jaar. Om vervolgens van het oppervlak van de zon naar de aarde te reizen heeft het licht 8,3 minuten nodig. Mochten de fusiereacties in het centrum van de zon vandaag stoppen dan hebben we nog 5000 jaar licht. Voor de neutrino's die vrijkomen is het een ander verhaal. Omdat ze nagenoeg geen interactie met atomen hebben gaan ze met bijna de lichtsnelheid in 8,3 minuten van het centrum van de zon naar de aarde.

## Stabiliteit van een ster

Doordat de kernfusieprocessen sterk afhankelijk zijn van de temperatuur en de druk, kan een ster heel stabiel zijn. De gravitatiekracht oefent voortdurend een naar binnen gerichte druk uit. Fotonen worden gevormd in de kern en banen zich een weg naar buiten. Samen met de hoge temperatuur levert dit een thermische tegendruk op.

Stel dat de ster een beetje samentrekt, dan stijgt hierdoor de druk en de temperatuur in het centrum van de ster. Bij deze hogere temperatuur produceren de fusiereacties meer energie, zodat er een grotere thermische tegendruk ontstaat die het samentrekken stopt of zelfs omkeert. Als de ster wat opzwelt, daalt de temperatuur en de druk in de kern, met als gevolg minder energieproductie en dus minder thermische tegendruk.

Bij een ster als de zon zijn de naar binnen gerichte gravitatie­druk en de naar buiten gerichte thermische druk met elkaar in evenwicht. De zon produceert daarom voortdurend evenveel energie. Voor het leven op aarde is een constante energieproductie in de zon noodzakelijk.

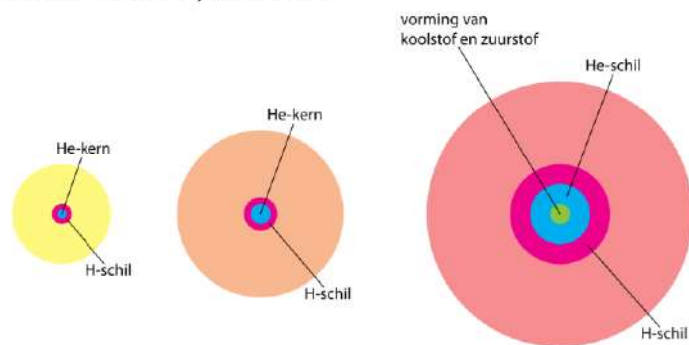


**Figuur 66** Evenwicht in een ster. De groene pijlen geven de druk aan die door de gravitatiekracht wordt veroorzaakt. De rode pijlen geven de thermische druk weer.

## Rode reuzen

De zon heeft in 9 miljard jaar het waterstof in het centrum verbruikt. Het centrum van de zon bestaat vanaf dan uit helium, met daaromheen een schil van waterstof waarin de fusiereacties doorgaan. De temperatuur in het centrum loopt op, zodat de fusiereacties sneller gaan verlopen. De zon gaat feller branden waardoor de temperatuur op aarde oploopt en al het leven ophoudt te bestaan. Als de temperatuur meer dan 100 miljoen graden is gaan heliumatomen fuseren en ontstaan er koolstofatomen (atoomnummer 6). Daarna fuseren helium en koolstof waaruit zuurstof (atoomnummer 8) ontstaat.

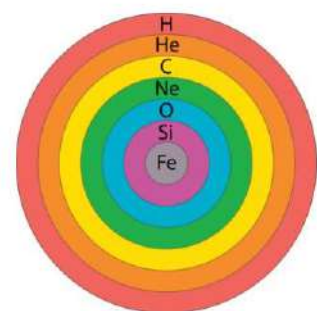
Bij een ster zo groot als de zon bereikt de temperatuur niet de 600 miljoen graden die nodig is voor het fuseren van koolstof. Het fusieproces stopt. Door de verandering van de samenstelling van de buitenste laag zwelt de zon op en wordt steeds groter. De zon wordt een **rode reus**.



**Figuur 67** De zon wordt een rode reus.

Uiteindelijk wordt de straal van de zon 250 keer groter dan de huidige straal, ongeveer gelijk aan de afstand tussen de aarde en de zon. Gezien vanaf de aarde vult de zon dan het grootste deel van de hemel. Hoewel elementen zwaarder dan zuurstof niet ontstaan door kernfusie zijn ze toch aanwezig in een rode reus. Dit komt omdat bij sommige fusiereacties neutronen vrijkomen. Als neutronen worden opgenomen door atoomkernen en er daarna bètaverval plaatsvindt ontstaan er ook zwaardere elementen, zoals silicium en ijzer. Dit proces heet **neutronenvangst**.

Vanwege het stoppen van de fusiereacties daalt de temperatuur, waardoor het evenwicht tussen gravitatie­druk en thermische druk wordt verstoord. Met een enorme kracht werpt de rode reus zijn buitenste lagen af. Wat overblijft is een kern van de zwaardere elementen die bij het fusieproces zijn gevormd. Deze kern heeft een zeer hoge temperatuur en wordt een **witte dwerg** genoemd.



**Figuur 68** Samenstelling van een rode reus vlak voordat ze een witte dwerg wordt.

## Witte dwergen

Een witte dwerg is wat overblijft nadat bij een ster zoals de zon de fusiereacties zijn gestopt. Vanwege de hoge temperatuur straalt een witte dwerg nog steeds licht uit. Omdat er veel ultraviolet licht wordt uitgezonden ziet een witte dwerg er wit uit. In een witte dwerg wordt geen energie meer geproduceerd, waardoor de thermische tegendruk wegvalt. Door de gravitatiekracht worden de atomen op elkaar geperst. De druk loopt hierbij zo hoog op dat de elektronen los worden gerukt uit hun schillen en kriskras tussen de atoomkernen door gaan bewegen.

In normale materie bevinden de elektronen zich in schillen om de atoomkernen, maar in een witte dwerg is dit niet het geval. De elektronenschillen worden gekraakt. We spreken van **ontaarde** of **gedegenererde materie**. In ontaarde materie is de afstand tussen twee atoomkernen 10 keer kleiner dan normaal. De dichtheid van ontaarde materie is daarom 1000 keer groter dan in gewone materie. In een witte dwerg wordt gravitatiedruk tegen- gewerkt door de druk van het elektronengas. In miljarden jaren koelt een witte dwerg langzaam af en wordt uiteindelijk een **zwarte dwerg**.

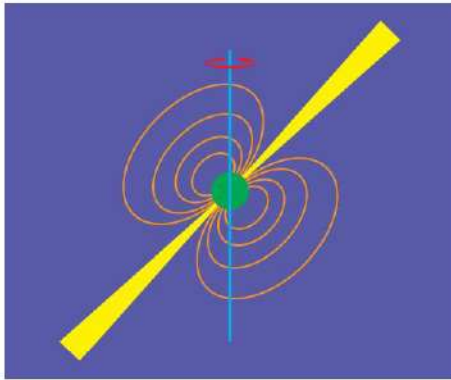
## Neutronensterren

Een ster met tussen 8 en 25 zonmassa's wordt geen witte dwerg maar een **neutronenster**. Zo'n ster doorloopt vanaf de geboorte dezelfde fasen als de zon. Als het waterstof in de kern is verbruikt stoppen de fusieprocessen en wordt de buitenste laag afgestoten. Dit gebeurt met een **supernova**, een van de meest spectaculaire gebeurtenissen in het heelal. De kern die na een supernova overblijft heeft zoveel massa dat het elektronengas niet genoeg tegendruk kan geven. De gravitatiekracht perst de elektronen in de atoomkernen, waarbij protonen worden omgezet in neutronen. Een neutronenster is een bal met alleen neutronen, waarin de oorspronkelijke lege ruimte tussen de atoomkernen is opgevuld. De elementen uit het periodieke systeem bestaan in een neutronenster niet meer.

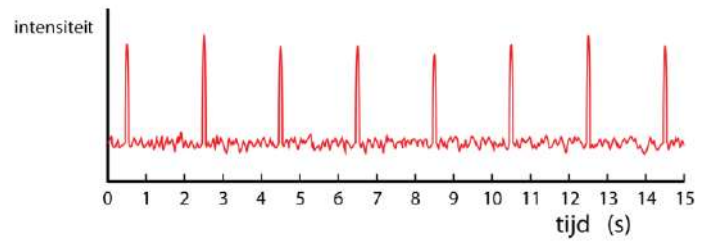
Een waterstofatoom heeft een kern (een proton) met een straal van ongeveer  $10^{-15}$  meter en een elektronenschil met een straal van  $10^{-10}$  meter. Als het elektron in het proton wordt geperst wordt de straal  $10^5$  keer kleiner. De dichtheid van een neutronenster is  $(10^5)^3 = 10^{15}$  keer groter dan de dichtheid van gewone materie. De zon heeft een straal van  $6,957 \cdot 10^8$  m. Stel dat je de zon samengeperst tot neutronenster dan blijft er een bal neutronen met een straal van 7 kilometer over.

## Pulsars

Pulsars zijn neutronensterren met een sterk magneetveld die snel om hun as draaien. Ze zenden daardoor elektromagnetische straling uit die de pulsar verlaat in twee bundels bij de magnetische noord- en zuidpool. Zie figuur 69. Omdat, net als bij de aarde, de rotatie-as van een pulsar meestal niet samenvalt met de magnetische-as gedraagt een pulsar zich als vuurtoren. Soms bevindt de aarde zich precies in het verlengde van zo'n bundel. Je meet dan stralingspulsen die zich met een vast ritme herhalen, zie figuur 70. De eerste pulsar is in 1967 ontdekt door de Jocelyn Bell Burnell. Een bekende pulsar bevindt zich in het centrum van de Krabnevel. Deze pulsar heeft een periode van 0,030 seconden en draait dus 2000 keer per minuut om zijn as.



**Figuur 69** Een pulsar.



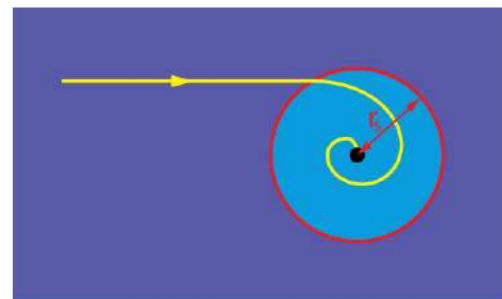
**Figuur 70** Pieken elektromagnetische straling afkomstig van een pulsar.

## Zwarte gaten

Sterren met meer dan 25 keer de zonmassa eindigen met een gigantische supernova. In de kern die overblijft is de gravitatiekracht sterk genoeg om een neutron te kraken. Wat voor soort materie er dan overblijft is onbekend, omdat we geen enkele kracht kennen die tegenwicht kan bieden aan de gravitatiekracht. De wetenschap staat voor een raadsel. Het object dat overblijft wordt een **zwart gat** genoemd. Deze naam wijst op het feit dat de gravitatiekracht bij een zwart gat zo sterk is dat ook elektromagnetische straling niet kan ontsnappen. Om te berekenen wanneer dit gebeurt gebruiken we de ontsnappingsnelheid die je eerder bent tegengekomen.

$$v_{\text{ontsnap}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot m}{r}}$$

Voor een zwart gat is de ontsnappingsnelheid groter dan de lichtsnelheid. Bij een zwart gat is er een straal  $r_s$  waarbij de ontsnappingsnelheid gelijk is aan de lichtsnelheid. Deze straal heet de **schwarzschildstraal**. Alles wat dichterbij komt dan de schwarzschildstraal wordt door het zwart gat zo sterk aangetrokken dat ontsnappen niet meer mogelijk is. Ook licht wordt aangetrokken en verdwijnt in het zwarte gat. Zie figuur 71.



**Figuur 71** Een zwart gat.

Er is geen informatie beschikbaar over wat zich binnen de schwarzschildstraal van een zwart gat afspeelt. Sommige mensen speculeren over de aanwezigheid van **wormgaten**, waarmee je een korte route kunt nemen naar een andere ruimte en tijd. Maar of dat zo is weet niemand. Misschien komt er ooit een antwoord op deze vraag, maar tot die tijd valt er niets zinnigs over te zeggen. De schwarzschildstraal van een zwart gat bereken je met:

$$r_s = \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2}$$

- $r_s$  is de schwarzschildstraal in meter (m)
- $G$  is de gravitatieconstante:  $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- $m$  is de massa van het zwarte gat in kilogram (kg)
- $c$  is de lichtsnelheid:  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

### VOORBEELD de zon als zwart gat

**Bereken de Schwarzschildstraal van het zwarte gat dat ontstaat als de zon wordt samengeperst tot een punt.**

- $r_s = \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2}$  met  $m_{\text{zon}} = 1,9884 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- $r_s = \frac{2 \cdot 6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot 1,9884 \cdot 10^{30}}{(3,00 \cdot 10^8)^2} \rightarrow r_s = 2,95 \cdot 10^3 \text{ m} \text{ (2,95 km)}$

## Nova en Supernova

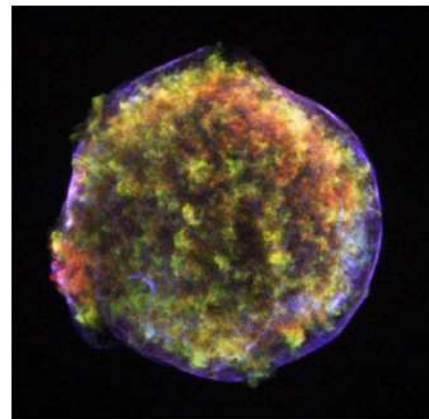
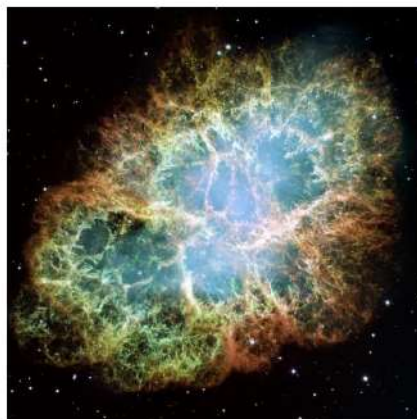
Sterren die hun waterstof hebben verbruikt stoten aan het einde van hun bestaan hun buitenste schil af. Zo'n gebeurtenis heet een **nova** of een **supernova**. De naam "nova" (nieuw) suggereert dat er een nieuwe ster is ontstaan. Maar dat is dus niet zo. Vaak staat de rode reus ver weg en is hij met het blote oog niet te zien. Tijdens de explosie wordt er ineens veel meer licht uitgestraald, zodat de ster zichtbaar wordt.

Bij een **nova** wordt de buitenste schil weggeschoten met een snelheid van 1000 km/s en neemt de helderheid met een factor tienduizend toe. Bij een **supernova** wordt de schil weggeschoten met een snelheid van 10.000 km/s en kan de helderheid miljarden keer groter worden. Tijdens een supernova straalt de ster soms meer licht uit dan het complete sterrenstelsel waarvan ze deel uitmaakt. Sommige supernova's zijn zo helder dat ze overdag met het blote oog zichtbaar zijn. De laatste keer dat dit gebeurde was in 1604.

In de Melkweg vindt ongeveer iedere 50 jaar een supernova plaats. Vanwege de vele stofwolken zijn lang niet alle supernova's vanaf de aarde zichtbaar. Een bekende supernova gebeurde in het sterrenbeeld Stier op 4 juli 1054. Ook deze supernova was zo sterk dat ze overdag duidelijk zichtbaar bleef. In oude Chinese kronieken is deze gebeurtenis nauwkeurig opgeschreven, zodat de plaats van deze supernova goed bekend is. Kijken we nu naar deze plaats dan vinden we daar de Krabnevel. Met zekerheid kan worden gesteld dat de Krabnevel het restant is van de supernova uit 1054. In het centrum van de Krabnevel bevindt zich de Krabpulsar, een zeer jonge neutronenster die bijzonder snel roteert en veel elektromagnetische straling uitzendt. De gebeurtenis uit 1054 heeft ons een unieke kijk gegeven op het leven van een ster.

**Figuur 72**

Links: de Krabnevel, het restant van een supernova in 1054. Rechts: het restant van een supernova in 1572.



## De vorming van zware elementen

Zoals we eerder hebben gezien stopt de vorming van elementen bij ijzer, met 26 protonen in de kern. Toch komen er op aarde elementen voor met meer dan 26 protonen. Al deze elementen worden gevormd tijdens een supernova. De totale hoeveelheid energie die bij een supernova vrijkomt is  $10^{44}$  joule, wat ongeveer evenveel is als de zon in haar hele leven (9 miljard jaar) produceert. Bedenk daarbij dat de supernova explosie maar een paar seconden duurt. Een supernova is enkele weken zichtbaar aan de hemel.

Tijdens een supernova loopt de temperatuur op tot 100 miljard kelvin en onder deze extreme omstandigheid is er zoveel energie beschikbaar dat elementen met atoomnummers groter dan 26 worden gevormd. Dit kost veel energie, maar tijdens een supernova is er ruim voldoende energie beschikbaar. Met grote snelheid worden deze atomen in de interstellaire ruimte geschoten en vormen een nevel, zoals de Krabnevel.

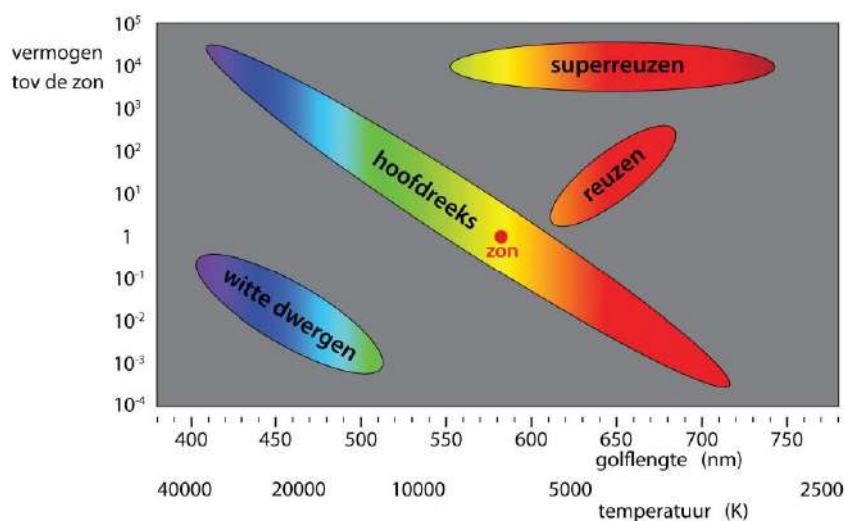
De zon is met haar planeten 4,5 miljard jaar geleden uit zo'n nevel ontstaan. Behalve de elementen tot atoomnummer 26 bevonden zich in deze nevel ook zware elementen, die zijn gevormd tijdens een supernova. Het is bijzonder als je je realiseert dat gewone stoffen, zoals nikkel, koper, zink, zilver, tin, platina, goud, kwik en lood in een paar seconden zijn ontstaan tijdens een supernova. Een aantal van deze elementen is onontbeerlijk voor het leven op aarde. Al het aardse leven, ook dat van ons zelf, is te danken aan de spectaculaire dood van een onbekende ster.

## Hertzsprung-Russell-diagram

Zoals je hebt gezien zijn er verschillende soorten sterren. De meeste sterren zijn zoals de zon, waarbij constant waterstof wordt omgezet in helium. Maar er zijn ook witte dwergen, rode reuzen en rode superreuzen. Kijk je naar de hemel met een telescoop dan zie je ze staan. Om de sterren te onderscheiden kun je een diagram maken met op de verticale as het uitgestraalde vermogen en op de horizontale as de effectieve temperatuur. Zo'n diagram is een **Hertzsprung-Russell-diagram**. Zie figuur 73.

Het is handig om alle sterren met de zon te vergelijken en daarom staat verticaal de verhouding tussen het vermogen van een ster en het vermogen van de zon.

**Figuur 73** Hertzsprung-Russell diagram.



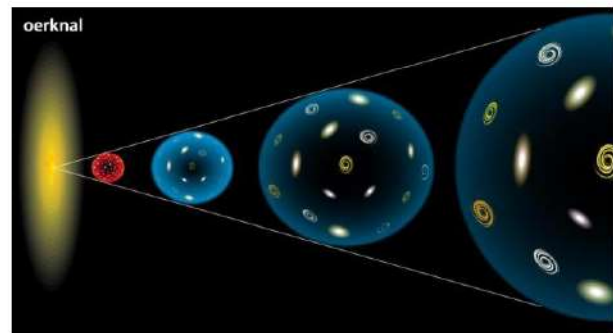
## 19.7 Het heelal

In deze laatste paragraaf richten we onze aandacht op het heelal als geheel. Het vakgebied dat zich hiermee bezighoudt heet **kosmologie**. Vooral in de afgelopen dertig jaar is er veel informatie over het heelal verzameld. Door de komst van snelle elektronica zijn de meetinstrumenten enorm verbeterd. We kunnen nu verder kijken en met grotere nauwkeurigheid dan ooit tevoren. Ook de komst van ruimtetelescopen heeft veel nieuwe gegevens opgeleverd. Dit heeft onze kijk op het heelal ingrijpend veranderd. Nieuwe theorieën zijn bedacht om alles een plaats te geven. Vaak zijn deze theorieën nog onzeker. Soms is de informatie te beperkt en soms zijn er tegenstrijdigheden. De kosmologie is volop in beweging.

### De oerknal

Het idee dat er ooit een oerknal is geweest waaruit het heelal is ontstaan is in 1927 voor het eerst geopperd door de Georges Lemaitre. Deze Belgische wetenschapper, die ook priester was, komt tot dit idee omdat uit waarnemingen blijkt dat het heelal steeds groter wordt. Sterren en sterrenstelsels bewegen bijna altijd van elkaar vandaan. En als je dan terugrekent kom je tot de conclusie dat alles ooit is begonnen vanuit één punt.

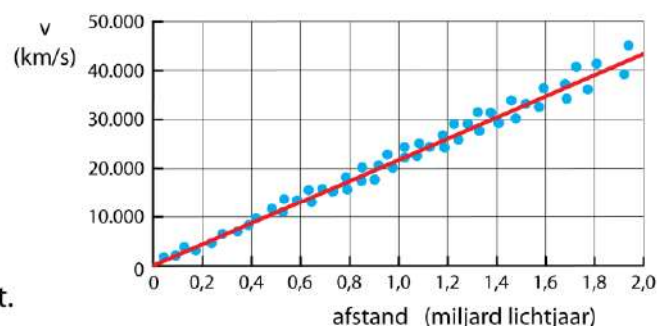
Op dit moment zijn er zoveel aanwijzingen die erop duiden dat het heelal in één punt is begonnen dat de meeste astronomen de oerknaltheorie aanhangen. De oerknal gebeurde 13,8 miljard jaar geleden en de gevolgen van deze knal zijn nog steeds te merken.



**Figuur 74** Oerknal.

### Het uitdijend heelal

De belangrijkste ondersteuning voor de oerknaltheorie is het feit dat het heelal uitdijt. De meeste sterrenstelsels bewegen van elkaar vandaan. Edwin Hubble ontdekt in 1929 dat er een lineair verband is tussen de afstand van het sterrenstelsel en de snelheid waarmee het stelsel van de aarde vandaan beweegt. Zie figuur 75.



**Figuur 75** Hubble diagram.

Voor het lineaire verband van Hubble geldt:

$$v = H_0 \cdot r$$

- $v$  is de snelheid waarmee het stelsel van de aarde vandaan beweegt (m/s)
- $H_0$  is de Hubbleconstante,  $H_0 = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ m s}^{-1} \text{ m}^{-1}$  m/s per meter
- $r$  is de afstand tussen de aarde en het sterrenstelsel in meter (m)

#### VOORBEELD de snelheid van een sterrenstelsel

Een sterrenstelsel staat op 50 miljoen lichtjaar afstand van de aarde.

#### Bereken de snelheid waarmee dit stelsel van de aarde vandaan beweegt.

- $H_0 = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ m s}^{-1} \text{ m}^{-1}$  |  $r = 50 \cdot 10^6$  lichtjaar |  $v = \dots \text{ m/s}$
- $r = 50 \cdot 10^6 \cdot 9,461 \cdot 10^{15} = 4,73 \cdot 10^{23} \text{ m}$
- $v = H_0 \cdot r \rightarrow v = 2,3 \cdot 10^{-18} \cdot 4,73 \cdot 10^{23} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ m/s}$

### De waarnemingshorizon

In 13,8 miljard jaar legt het licht 13,8 miljard lichtjaar af. Eén lichtjaar is  $9,461 \cdot 10^{15} \text{ m}$  en het zichtbare heelal is dus  $13,8 \cdot 9,461 \cdot 10^{15} = 1,30562 \cdot 10^{26} \text{ m}$  groot. Met de Hubble-relatie kun je de snelheid van een sterrenstelsel aan de rand van het waarneembare heelal uitrekenen:  $v = H_0 \cdot r \rightarrow v = 2,3 \cdot 10^{-18} \cdot 1,30562 \cdot 10^{26} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ . Sterrenstelsels aan de rand van het waarneembare heelal lijken dus met de lichtsnelheid van ons vandaan te bewegen. Dit lijkt toeval maar dat is het niet. Het is niet zo dat de sterrenstelsels bewegen door de lege ruimte. Het is de ruimte zelf die uitzet. De lichtsnelheid is de limiet voor objecten die door de ruimte reizen. Maar de ruimte zelf kan sneller dan het licht uitzetten. Hoe verder je weg bent hoe sneller de ruimte uitzet. Op een bepaalde afstand zet de ruimte uit met de lichtsnelheid en deze afstand is de **waarnemingshorizon**. Want het licht van objecten die verder weg staan dan de waarnemingshorizon kan ons nooit bereiken.

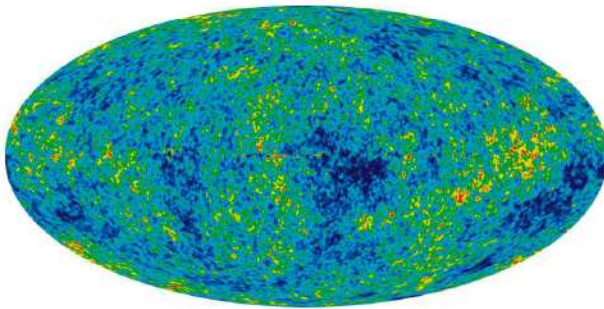
### Achtergrondstraling

Er is veel onderzoek gedaan om meer te weten te komen over de oerknal. Enkel het feit dat de kleur van de meeste sterrenstelsels naar het rood is verschoven is niet genoeg bewijs dat er ook echt een oerknal is geweest. Meer direct bewijs is nodig. Bij een explosie als de oerknal wordt enorm veel straling uitgezonden dat zich gelijkmatig over de ruimte verspreidt. Als er een oerknal is geweest moet de hele ruimte gevuld zijn met straling en als we deze straling kunnen waarnemen is dat een stevig bewijs voor de oerknaltheorie.

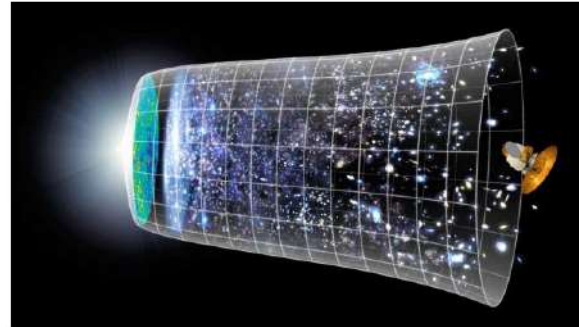
Met meer geluk dan wijsheid is in 1965 deze straling waargenomen. Bij communicatie met satellieten is er altijd een zwakke storing op de achtergrond. Deze achtergrondstraling komt niet vanaf een bepaalde plaats maar is overal in de ruimte aanwezig. In 1989 is de satelliet COBE (Cosmic Background Explorer) gelanceerd om deze achtergrondstraling in kaart te brengen. De achtergrondstraling correspondeert met een gemiddelde temperatuur van het heelal van 3 kelvin.

Met de Amerikaanse WMAP satelliet (2001–2010) en de Europese Planck satelliet (2010–2013) is bekend geworden dat de achtergrondstraling niet overal dezelfde temperatuur heeft. De verschillen in temperatuur zijn klein, minder dan een duizendste graad. Maar door deze temperatuurverschillen te meten kun je reconstrueren hoe de stralingsenergie

375.000 jaar na de oerknal in de ruimte is verdeeld. Het is de eerste babyfoto van het heelal. Op sommige plaatsen is net wat meer materie en energie aanwezig dan op andere plaatsen. Op de plaatsen waar de dichtheid relatief groot is ontstaan de eerste sterrenstelsels. En van daaruit start de evolutie van het heelal zoals we die nu kennen. In figuur 76 zie je hoe de energie is verdeeld vlak na de oerknal. Bij de rode gebieden is de temperatuur 0,0005 graden hoger dan in de donkerblauwe gebieden. In figuur 77 zie je hoe het heelal zich daarna heeft ontwikkeld.



**Figuur 76** De achtergrondstraling.

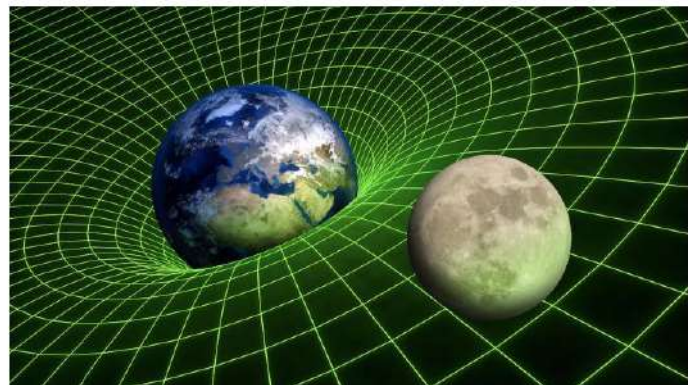


**Figuur 77** Evolutie van het heelal.

### Gekromde ruimtetijd

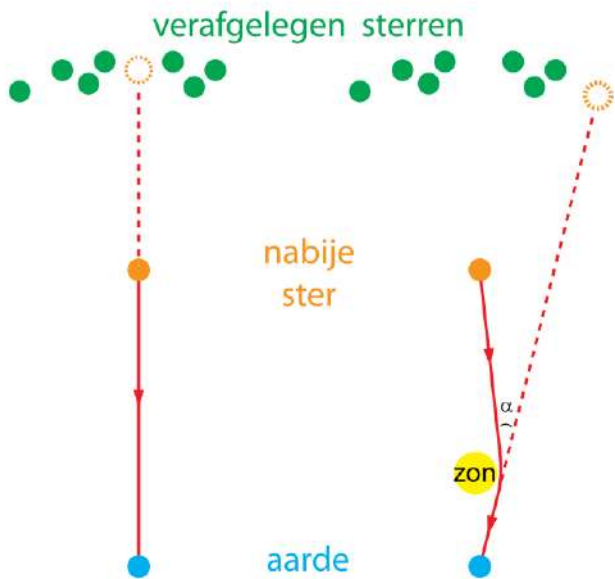
Met de ontwikkeling van de relativiteitstheorie heeft Albert Einstein een nieuwe kijk gegeven op ruimte en tijd. Vóór de ontdekkingen van Einstein werden ruimte en tijd opgevat als iets bestaands waarin de gebeurtenissen zich afspelen. Maar vanaf 1916 wordt daar heel anders over gedacht. Ruimte en tijd zijn met elkaar verweven tot **ruimtetijd**. Ruimtetijd is niet star maar wordt vervormd door de aanwezigheid van materie. Zo vervormt de aarde de ruimte om haar heen. Zie figuur 78.

De maan draait om de aarde, maar niet vanwege zwaartekracht maar omdat de ruimte bij de aarde krom is. De maan beweegt in een rechte lijn in gekromde ruimtetijd.



**Figuur 78** Vervorming van de ruimtetijd door de aarde.

Om de algemene relativiteitstheorie te begrijpen heb je veel wiskunde nodig. Einstein heeft er tien jaar over gedaan om uiteindelijk de juiste formule te vinden. Een gevolg van de relativiteitstheorie is dat licht om een ster heen buigt. Kijk je met een telescoop naar een nabije ster, dan verandert zijn plaats als zich tussen deze ster en de telescoop een andere ster, zoals de zon, bevindt. Zie figuren 79 en 80. Einstein voorspelt in 1916 dat de verplaatsing van een nabije ster 1,7 boogseconde is. Hoewel dit maar een kleine hoek is kan het worden gemeten. Toen zijn voorspelling in 1919 bleek te kloppen werd Einstein op slag wereldberoemd.

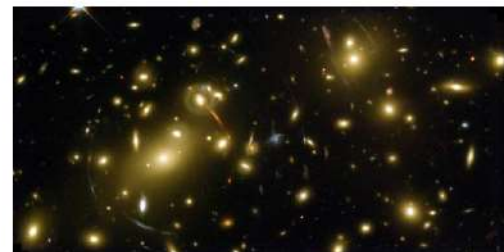
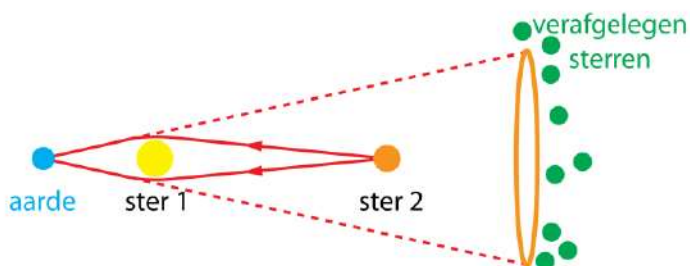


**Figuur 79** Afbuiging van licht door de zon.  
Links: de ruimte is recht.  
Rechts: de ruimte bij de zon is krom.



**Figuur 80** Bij een zonsverduistering zie de sterren die achter de zon staan op een andere plaats.

Het effect dat de ruimte wordt vervormd door de aanwezigheid van materie is op dit moment een belangrijk onderzoeksthema. Materie kan, net als een lens, lichtstralen die van elkaar vandaan bewegen (divergeren) naar elkaar toebrengen (convergeren). Men spreekt daarom van **gravitatielenzen**. Het resultaat is dat een ster die pal achter een andere ster staat zichtbaar kan worden als cirkel van licht. Zie de figuur 81.



**Figuur 81** Doordat licht om een ster buigt zie je een ster die pal achter een andere ster staat als cirkel aan de hemel.

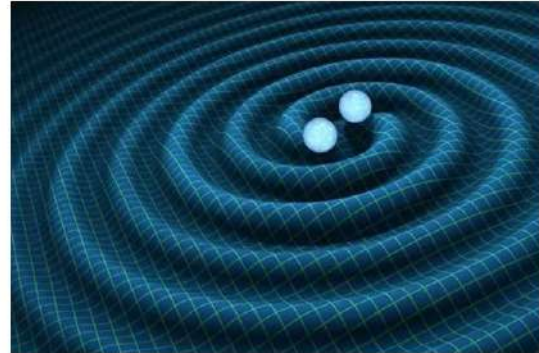
Met ruimtetelescopen is de kromming van de ruimte van een groot deel van het heelal in kaart gebracht. Hieruit volgt dat dat er veel meer materie is dan we zien. Tel je de massa van alles wat je ziet bij elkaar op dan is dat maar 15% van de massa die de ruimte kromt. De overige 85% wordt **donkere materie** genoemd. Licht wordt door donkere materie niet geabsorbeerd of uitgezonden. Het is dus geen gewone materie. Niemand weet wat er aan de hand is. Misschien bestaat er een onbekende vorm van materie, misschien ook niet.

## Gravitatiegolven

Gravitatiegolven zijn golven in de ruimtetijd. Als een gravitatiegolf voorbijkomt trilt de ruimtetijd heel even. Tijdens een trilling van de ruimtetijd wordt de ruimte een heel klein beetje uitgerekt en ingedrukt. In 2015 is een gravitatiegolf voor het eerst waargenomen in

America. In het LIGO-observatorium zijn twee buizen van 4 km lang die loodrecht op elkaar staan. Door een gravitatiegolf wordt de lengte van één van deze buizen een beetje kleiner of groter. De meting is zo gevoelig dat een lengteverandering van  $10^{-18}$  meter kan worden waargenomen. Dit is een duizendste van de diameter van een proton.

Een gravitatiegolf ontstaat als twee zwarte gaten op elkaar botsen. Vlak voor de botsing draaien de zwarte gaten om elkaar heen waardoor er golven ontstaan in de ruimtetijd. Zie figuur 82.

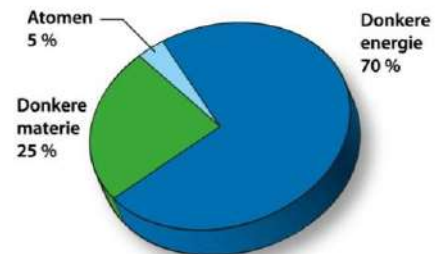


**Figuur 82** Gravitatiegolven.

### Donkere massa en donkere energie

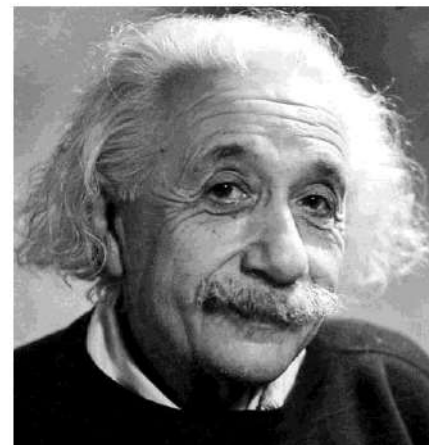
Een andere bijzondere waarneming die de sterrenkunde door elkaar heeft geschud is de versnelde uitdijing van het heelal. Dat het heelal steeds groter wordt is al sinds 1929 bekend. Maar metingen hebben in 1998 aangetoond dat de uitdijing van het heelal steeds sneller gaat. Zie figuur 77. Net als bij een ster geldt ook voor de ruimte als geheel dat er twee tegengestelde krachten zijn. Gravitatie wil materie bij elkaar brengen en oefent een naar binnen gerichte kracht uit. Energie die vrijkomt zoekt een weg naar buiten en veroorzaakt een naar buiten gerichte kracht. Er is veel meer materie dan we zien maar het heelal dijt toch versneld uit. Dat kan alleen als er ook veel meer energie is dan we zien. Deze onbekende energie wordt **donkere energie** genoemd.

Donkere energie is nog veel raadselachtiger dan donkere materie. Zoals het er nu uitziet bestaat de massa in de ruimte maar voor 5% uit atomen zoals we ze kennen. De overige 95% bestaat uit massa en energie in een onbekende vorm.



**Figuur 83** Massa en energie in het heelal.

Misschien gaat Einstein ons na zijn dood helpen om dit raadsel op te lossen. De versnelde uitdijing kun je begrijpen als je aan de vergelijkingen van Einstein een **kosmologische constante** toevoegt, net zoals Einstein in 1917 om de verkeerde reden heeft gedaan. Hij zag dit als zijn grootste blunder ooit, maar nu zou dit zomaar een stap in de goede richting kunnen zijn. De grootste wetenschappers maken soms de grootste blunders. Maar of iets een blunder is of een geniale ingeving kan alleen de toekomst uitwijzen.



**Figuur 84** Albert Einstein.