

12 Sterrenkunde

havo

12.0 Inhoud

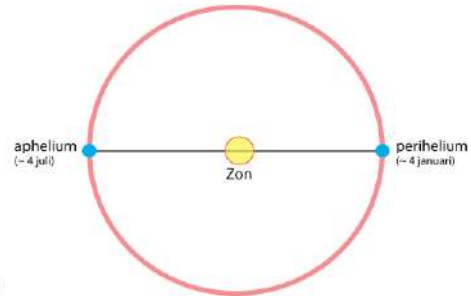
12.1	Het zonnestelsel	3
	– De aarde	3
	– De maan	3
	– Synchrone rotatie van de maan	4
	– Eb en vloed	5
	– De planeten	5
	– Planetoïdegordel, Kuipergordel en Oortwolk	6
	– Kometen	6
	– Meteorieten	6
	– De zon	7
	– Zonnewind en poollicht	7
12.2	Sterren en sterrenstelsels	9
	– Sterren in de buurt van de zon	9
	– Exoplaneten	9
	– De Melkweg	10
	– Sterrenstelsels	11
	– Het heelal	12
12.3	Cirkelbeweging	13
	– Eenparige cirkelbeweging	13
	– Middelpuntzoekende kracht	13
12.4	Gravitatie	15
	– De gravitatiewet van Newton	15
	– Gravitatiekracht en zwaartekracht	15
	– Cirkelvormige banen	15
	– Geostationaire satellieten	16
	– Satellieten op lage hoogte	17
	– Satellieten met polaire banen	18
12.5	Informatie uit de ruimte	19
	– Kijken met een telescoop	19
	– Radio-astronomie	19
	– Ruimtetelescopen	21
	– Afstanden bepalen met de parallax-methode	21

– Het continu spectrum van sterren	22
– De intensiteit van licht	23
– De temperatuur van een planeet	24
– Spectroscopie	24
– Atoomspectroscopie	25
– Chemische samenstelling van sterren en nevels	26
– Snelheid bepalen uit de dopplerverschuiving	27
12.6 De levensloop van sterren	28
– Het ontstaan van nieuwe sterren	28
– De vorming van een protoster	28
– De proton-proton kernfusiereactie	29
– Energieproductie in een ster	30
– Energietransport in een ster	30
– Stabiliteit van een ster	30
– Rode reuzen	31
– Witte dwergen	32
– Neutronensterren	32
– Pulsars	32
– Zwarte gaten	33
– Nova en Supernova	33
– De vorming van zware elementen	34
– Hertzsprung-Russell-diagram	35
12.7 Het heelal	36
– De oerknal	36
– Het uitdijend heelal	36
– De waarnemingshorizon	36
– Achtergrondstraling	37
– Gekromde ruimtetijd	38
– Gravitatiegolven	39
– Donkere massa en donkere energie	39

12.1 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.

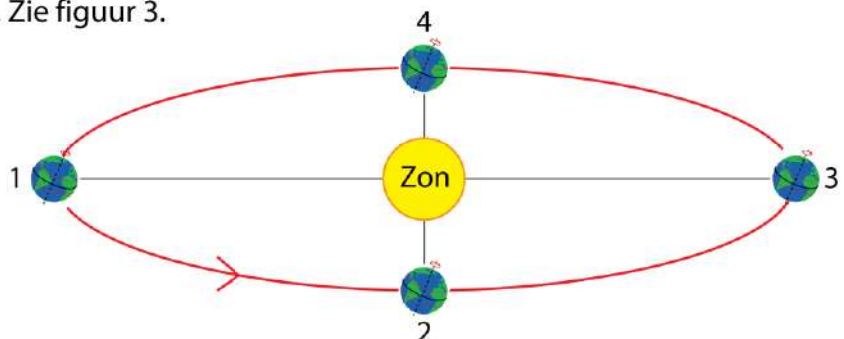
De rotatie-as van de aarde heeft een hoek van 23,439 graden ten opzichte van de rotatie-as van de aardbaan om de zon. Zie figuur 2. Door deze zogenaamde **inclinatie** verandert de hoek waarmee de zon de aarde gedurende een jaar bestraalt. De inclinatie veroorzaakt samen met de beweging van de aarde 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.

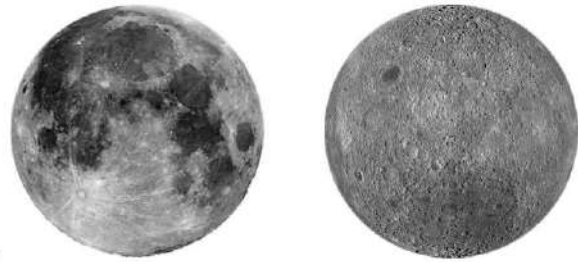
Figuur 3 De seizoenen op het noordelijk halfrond.
1: begin van de zomer
2: begin van de herfst
3: begin van de winter
4: begin van de lente



De maan

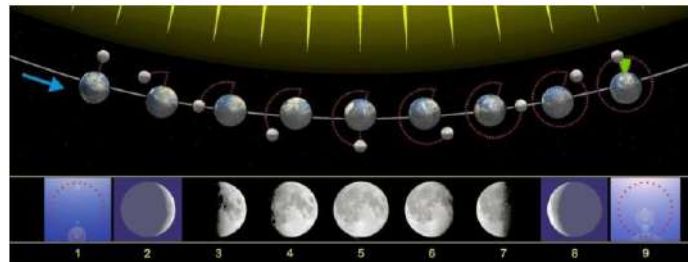
Op een afstand van gemiddeld 384.450 km van de aarde bevindt zich de maan. De straal van de maan is 3,7 keer kleiner dan de straal van de aarde en de massa van de maan is 81 keer kleiner dan de massa van de aarde. Zie figuur 4.

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.

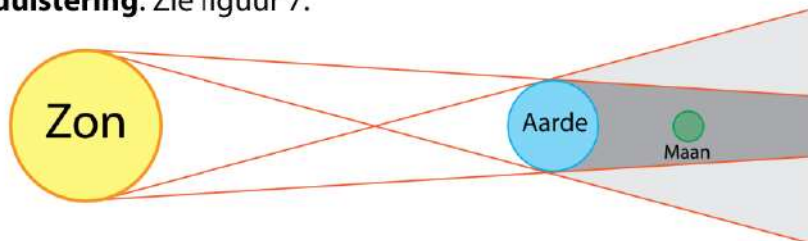
Kijk je vanaf de aarde naar de maan dan zie je alleen het deel dat door de zon wordt belicht. De maan geeft zelf geen licht maar weerkaatst het licht van de zon. Wat je ziet zijn de **schijngestalten**. Zie figuur 5.



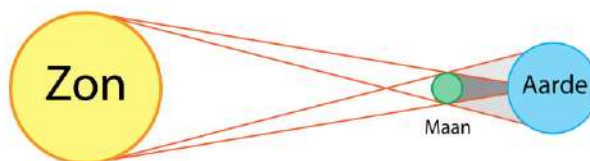
Figuur 5 De schijngestalten van de maan.
1 nieuwe maan | 5 volle maan | 9 nieuwe maan

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.



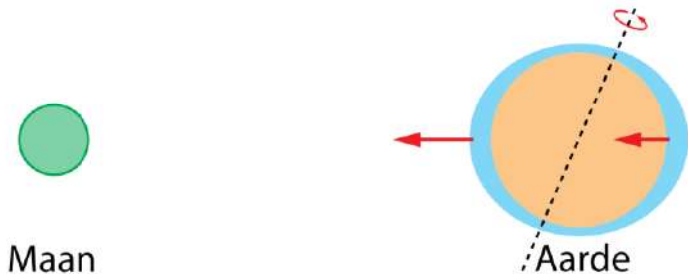
Synchrone rotatie van de maan

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 aantrekkingskracht 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. Vanaf de aarde zien we de **voorkant**. De **achterkant** van de maan is vanaf de aarde onzichtbaar. Door de aantrekkingskracht van de maan wordt de rotatie van de aarde ook langzamer. 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. De vervorming is maar enkele meters en is dus ten opzichte van de straal van de aarde klein. Zie figuur 8.

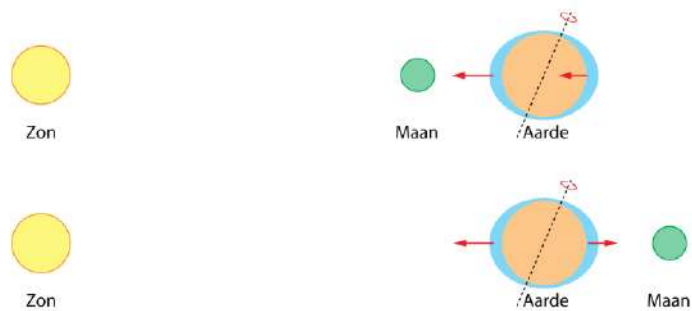
De aarde draait in 24 uur om haar as en een punt op aarde bevindt zich daarom twee keer per dag aan de afgeplatte kant en twee keer per dag aan de verlengde kant. Daarom wordt het twee keer per dag eb en twee keer per dag vloed.



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.

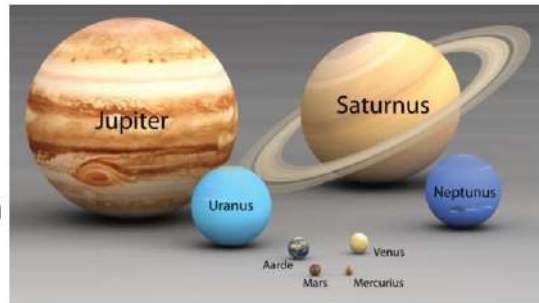


Gerekend vanaf de zon is de volgorde van de planeten:

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.



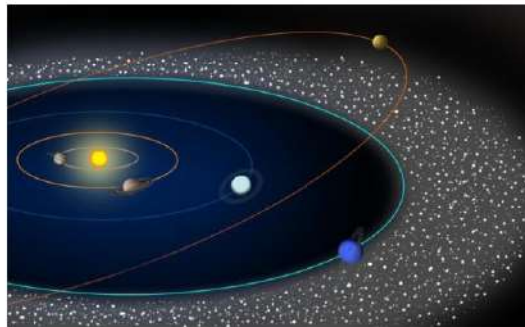
Figuur 11 Relatieve groottes van de planeten.

Planetoïdegordel, Kuipergordel en Oortwolk

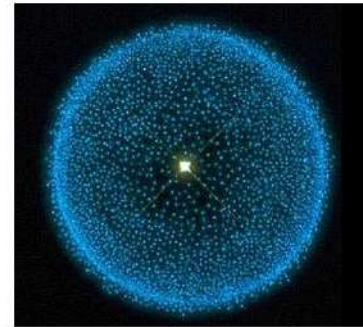
Tussen Mars en Jupiter bevindt zich de **planetoïdegordel**. Dit is een ring met kiezels en rotsblokken. Het grootste object in deze gordel is de **dwerfplaneet Ceres**, met een straal van 476 km. Voorbij Neptunus bevindt zich nóg zo'n gordel, de **Kuipergordel** (genoemd naar de Nederlandse astronoom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

Als een brokstuk uit de ruimte in de atmosfeer van de aarde komt noemen we dit een **meteoroïde**. Deze kunnen afkomstig zijn van de Maan, van Mars, van (uiteengevallen) kometen of van de planetoïdegordel. Met hoge snelheid bewegen ze door de atmosfeer,

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.

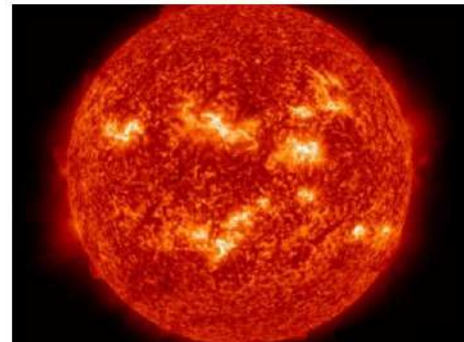
Figuur 17 Inslagkrater in Arizona, Verenigde Staten die is ontstaan door de inslag van een meteoriet met een diameter van 50 meter. De krater heeft een diameter van 1200 m.



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.

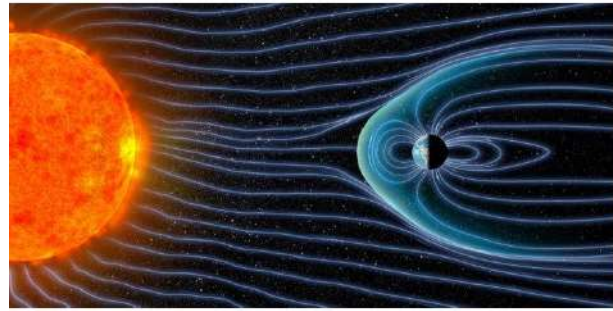


Het oppervlak van de zon heeft niet overal dezelfde temperatuur. Er zijn gebieden die een lagere temperatuur hebben. Vanaf de aarde zijn deze gebieden zichtbaar als donkere vlekken. Deze vlekken worden **zonnevlekken** genoemd. Een zonnevlek ontstaat op een plaats waar de warmteaanvoer vanuit het binnenste 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 (α -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.

12.2 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 jaar aflegt. De lichtsnelheid is $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s en in één jaar legt licht **$9,46073 \cdot 10^{15}$ m** af.

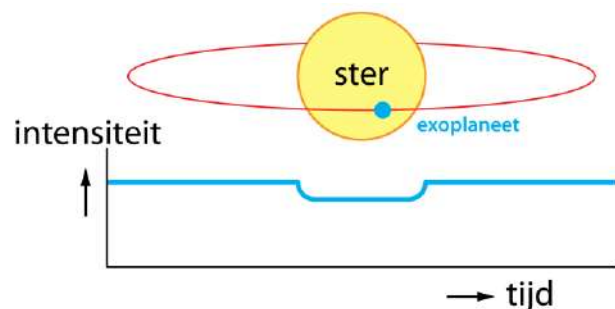
Een lichtjaar is de afstand die licht in één jaar aflegt: $9,46073 \cdot 10^{15}$ m.

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 meestal alleen indirect worden waargenomen.

– transitmethode –

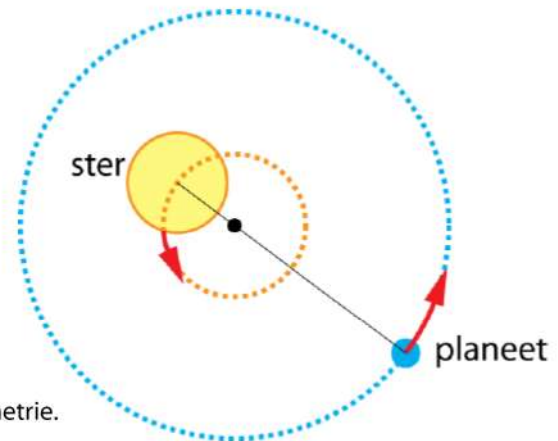
Als een exoplaneet in zijn omloopbaan tussen de ster en de aarde komt wordt een klein deel van de ster periodiek afgedekt, waardoor het waargenomen sterlicht tijdelijk afneemt. Zie figuur 21. Zo'n overgang (transit) gebeurt ook als Venus tussen de zon en de aarde staat en wordt een **Venusovergang**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



Figuur 21 Transitmethode.

– astrometrie –

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

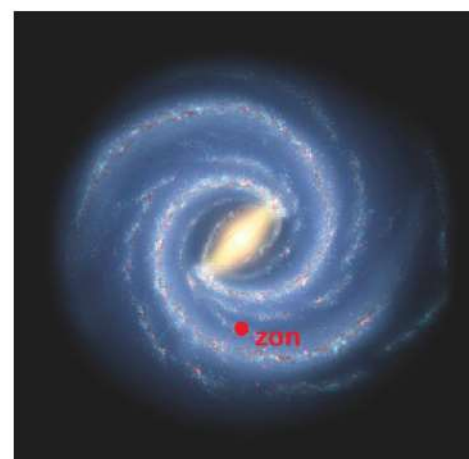
Met deze en andere technieken zijn tot op heden ongeveer 6000 exoplaneten waargenomen. Het opsporen van exoplaneten is een belangrijk doel van de sterrenkunde, want exoplaneten kunnen leven bevatten en de ontdekking van buitenaards leven spreekt tot ieders verbeelding. In 2016 is ontdekt dat Proxima 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.



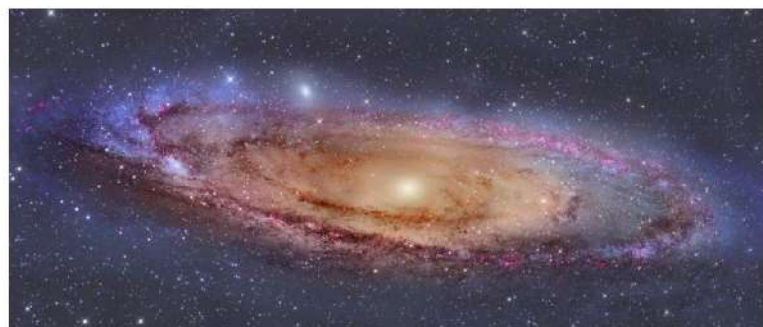
Figuur 24 Nevels in de Melkweg.

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.



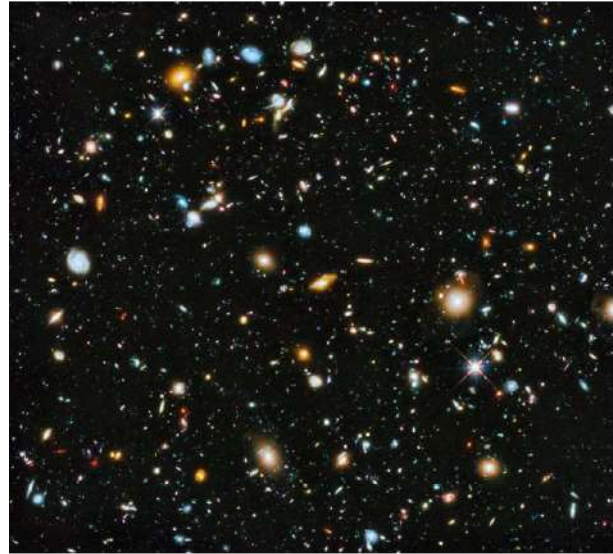
Figuur 25 Het Andromeda sterrenstelsel.

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. De afstand van de verst waarneembare stelsels is 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. Als we een sterrenstelsel zien 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 46 miljard lichtjaar.



Figuur 26 Sterrenstelsels diep in de ruimte.

12.3 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.

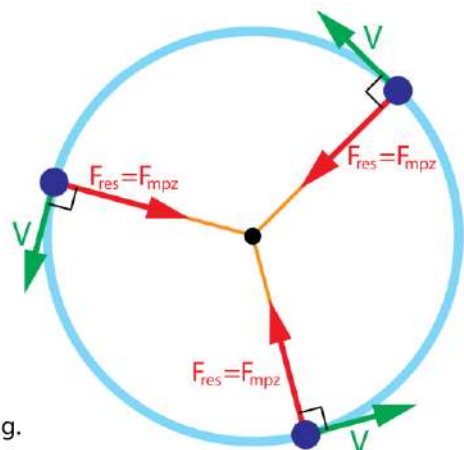
Als je een cirkel één keer doorloopt heb je één keer de omtrek $2\pi \cdot r$ afgelegd. De tijd voor één cirkel is de omlooptijd T . Hieruit volgt voor de baansnelheid:

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

- 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_{mpz} en geldt:

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

- F_{res} is de resulterende kracht in newton (N)
- F_{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 Trein maakt een bocht

Een trein met een massa van 500 ton rijdt met een snelheid van 144 km/h door een bocht met een straal van 200 m.



Bereken de middelpuntzoekende kracht op de trein.

- $m = 500 \text{ ton} = 5,00 \cdot 10^5 \text{ kg}$
- $v = 144 \text{ km/h} = 40 \text{ m/s}$
- $F_{\text{mpz}} = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow F_{\text{mpz}} = \frac{5,0 \cdot 10^5 \cdot 40^2}{200} = 4,0 \cdot 10^6 \text{ N}$

Waarom is er een middelpuntzoekende kracht?

- doordat de rails een zijwaartse kracht op de wielen uitoefenen loodrecht op de bewegingsrichting van de trein

VOORBEELD de maan

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

Bereken de baansnelheid van de maan.

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

Bereken de middelpuntzoekende kracht op de maan.

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

Waarom is er een middelpuntzoekende kracht?

- doordat de aarde een aantrekkende kracht op de maan uitoefent die loodrecht staat op de bewegingsrichting van de maan

12.4 Gravitatie

De gravitatiewet van Newton

Volgens Newton is er interactie tussen twee massa's waarbij ze elkaar altijd aantrekken. De aantrekkende kracht is een wisselwerking, waarbij op iedere massa evenveel kracht wordt uitgeoefend. De aantrekkende kracht tussen twee massa's 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_{aarde} en r_{aarde} in dan vind je $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Met deze formule kun je voor ieder hemellichaam de gravitatieversnelling (de valversnelling) aan het oppervlak berekenen.

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

- g is de gravitatieversnelling op het oppervlak van een hemellichaam (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)

Cirkelvormige banen

Hoewel hemellichamen door de gravitatiekracht een ellipsvormige baan krijgen, 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:

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

- 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 $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$

BEWIJS

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

VOORBEELD de massa van de zon

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

Bereken de massa van de zon.

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

$$\bullet v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow v = \frac{2\pi \cdot 1,496 \cdot 10^{11}}{365,256 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} = 2,97852 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

$$\bullet v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}} \rightarrow 2,97852 \cdot 10^4 = \sqrt{\frac{6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot M}{1,496 \cdot 10^{11}}} \rightarrow M = 1,9885 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

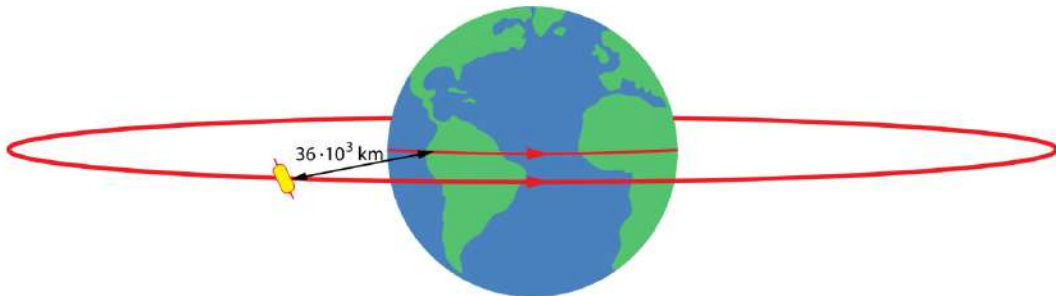
Geostationaire satellieten

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. Om dit te bereiken moet een geostationaire satelliet 35.863 km boven het aardoppervlak staan. 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. Zie figuur 28.

BEWIJS

- $r_{\text{geostationair}} = 3,5863 \cdot 10^7 + 6,378 \cdot 10^6 = 4,2241 \cdot 10^7 \text{ m}$
- $F_G = F_{\text{mpz}} \rightarrow G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow G \cdot \frac{M}{r} = v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$
- $v = \sqrt{\frac{6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}{4,2241 \cdot 10^7}} \rightarrow v = 3,07182 \cdot 10^3 \text{ m/s}$
- $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow 3,07182 \cdot 10^3 = \frac{2\pi \cdot 4,2241 \cdot 10^7}{T} \rightarrow T = 86401 \text{ s} = 24 \text{ uur}$

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 28 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.

VOORBEELD satelliet op lage hoogte

Een satelliet staat 500 km boven het oppervlak van de aarde.

Bereken de snelheid van deze satelliet.

- $r = 500 \cdot 10^3 + 6,371 \cdot 10^6 = 6,871 \cdot 10^6 \text{ m}$
- $F_G = F_{\text{mpz}} \rightarrow G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow G \cdot \frac{M}{r} = v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$
- $v = \sqrt{\frac{6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}{6,871 \cdot 10^6}} \rightarrow v = 7,61645 \cdot 10^3 \text{ m/s}$

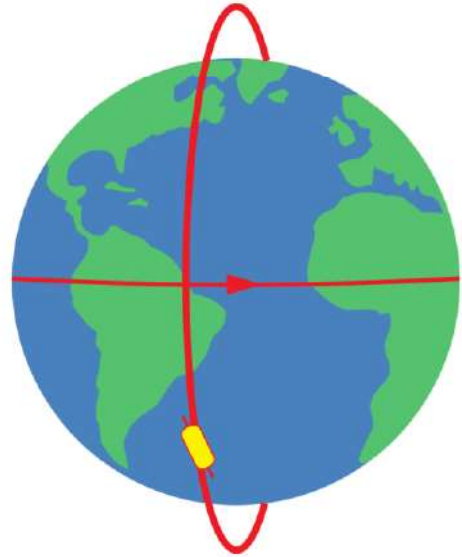
Bereken de omlooptijd van deze satelliet.

- $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow 7,61645 \cdot 10^3 = \frac{2\pi \cdot 6,871 \cdot 10^6}{T} \rightarrow T = 5,66822 \cdot 10^3 \text{ s} = 1,57 \text{ uur}$

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 29.



Figuur 29 Een polaire satelliet.

12.5 Informatie uit de ruimte

Kijken met een telescoop

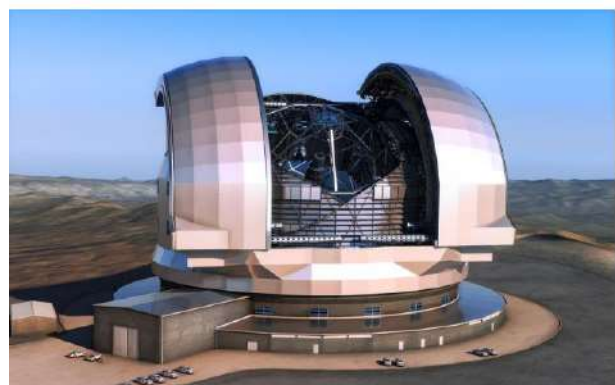
Sterrenwachten met optische telescopen werden vroeger gebruikt in Europese steden, zoals in Leiden. Maar deze oude sterrenwachten zijn niet meer in gebruik, vanwege de storende lichtvervuiling in bewoond gebied. Een aantal Europese landen, waaronder Nederland, hebben de **European Southern Observatory** (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 30 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 31 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 32 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 33 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 34 Microgolven-telescoop ALMA in Chili.

Ruimtetelescopen

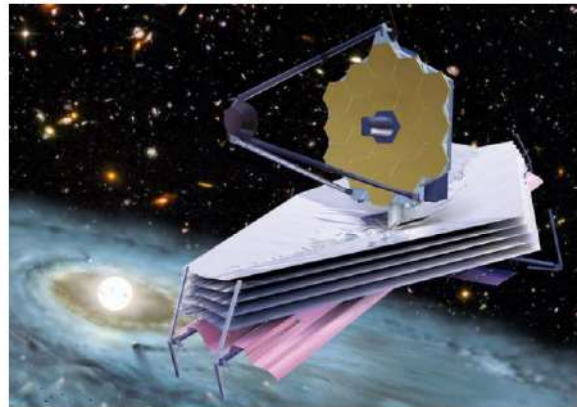
Om de storende invloed van de atmosfeer volledig uit te schakelen zijn er meer dan 25 telescopen in de ruimte gebracht. Deze telescopen bestrijken een groot deel van het elektromagnetisch spectrum.

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 35 Hubble ruimtetelescoop.

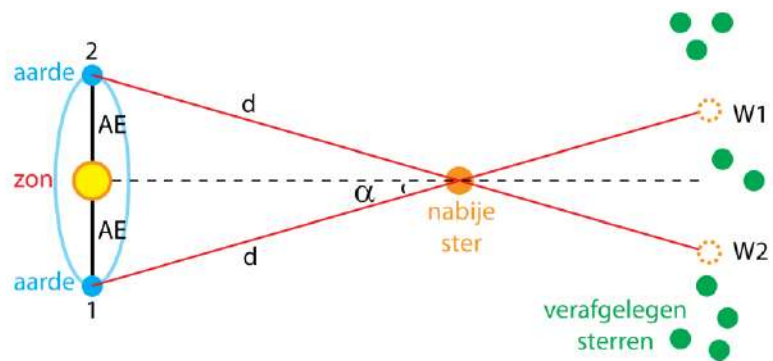


Figuur 36 De James Webb ruimtetelescoop.

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 37. 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 α meet je met een nauwkeurige telescoop. Hieruit kun je de afstand van de nabije ster berekenen.



Figuur 37 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 α van één boogseconde. Dat is $1/3600$ deel van één graad. De afstand die daarbij hoort kun je als volgt berekenen:

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

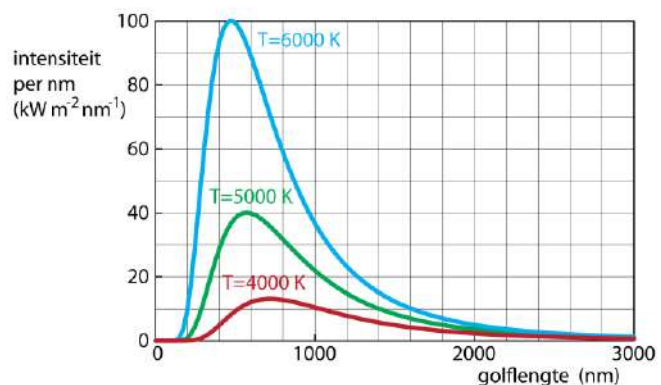
De afstand die een parallaxhoek van één boogseconde geeft bij een meetafstand van één astronomische eenheid wordt een **parsec** genoemd. **Eén parsec is $3,08568 \cdot 10^{16}$ m.**

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.

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 38 zie je de uitgestraalde spectra bij verschillende temperaturen.



Figuur 38 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.

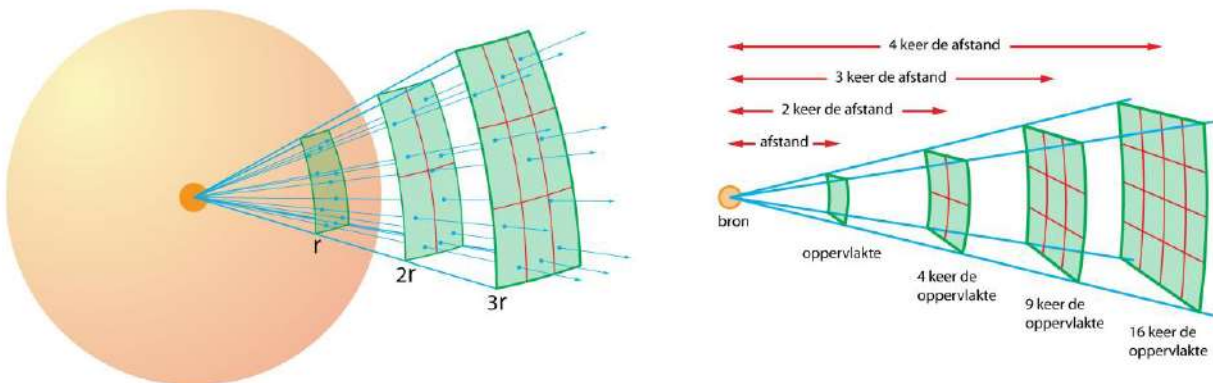
$$\lambda_{\max} \cdot T = k_W$$

- λ_{\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: $2,897772 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$
- T is de temperatuur in kelvin (K) $T_{\text{celsius}} = T_{\text{kelvin}} - 273,15$

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^2).



Figuur 39 Bij een bolvormige golf neemt de intensiteit af met het kwadraat van de afstand.

In Figuur 39 zie je dat als de afstand 2 keer zo groot wordt het licht wordt verdeeld over een 4 keer groter oppervlak. De intensiteit wordt dan 4 keer kleiner. Als de afstand 3 keer zo groot wordt neemt de intensiteit 9 keer af. De **(omgekeerde) kwadratenwet** geeft het verband tussen de afstand en de intensiteit:

De intensiteit neemt af met het kwadraat van de afstand.

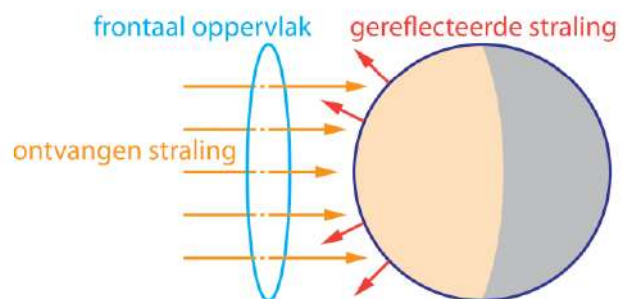
De aarde ontvangt 1361 W/m^2 zonlicht. Dit noemen we de **zonneconstante**. Hoe verder een planeet van de zon afstaat, hoe kleiner zijn zonneconstante is. De afstand tussen de zon en Mars is 1,524 keer zo groot als de afstand tussen de zon en de aarde. De intensiteit van het zonlicht is op Mars daarom $1,524^2 = 2,323$ keer zo klein als op aarde.

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.

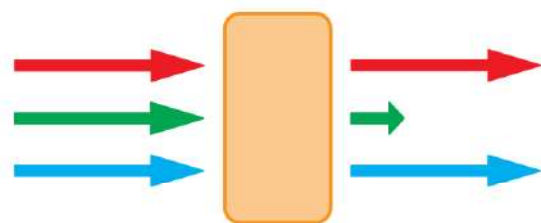
Om te berekenen hoeveel licht een planeet absorbeert moet je eerst de intensiteit van het licht uitrekenen en dit daarna vermenigvuldigen met de **frontale oppervlakte** van de planeet. De frontale oppervlakte van een bol met straal r is gelijk aan de oppervlakte van een cirkel met dezelfde straal: $A = \pi \cdot r^2$. Zie figuur 40.



Figuur 40 Frontaal oppervlak.

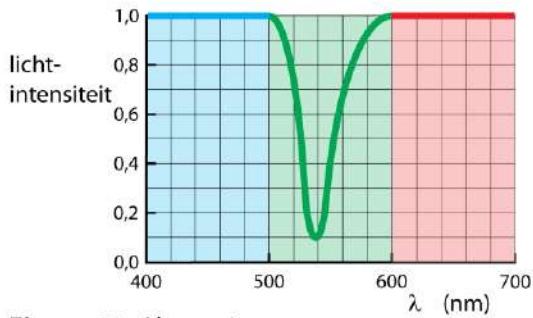
Spectroscopie

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 41 en 42.

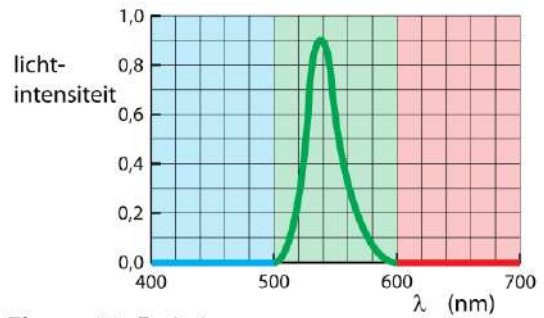


Figuur 41 Absorptie van licht.

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 43.



Figuur 42 Absorptiespectrum.
Groen licht wordt geabsorbeerd.
Blauw en rood licht worden doorgelaten.



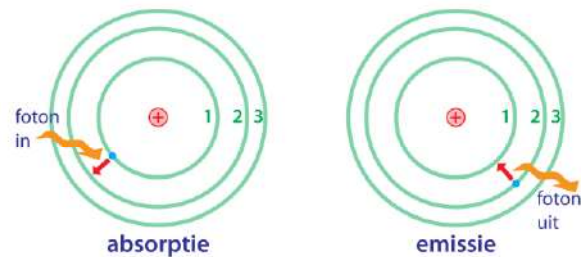
Figuur 43 Emissiespectrum.
Groen licht wordt uitgestraald.
Blauw en rood licht worden niet uitgestraald.

Atoomspectroscopie

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 atomen heeft daarom ook scherpe lijnen waarvan de golflengtes precies gelijk zijn aan die van het absorptiespectrum

– waterstof –

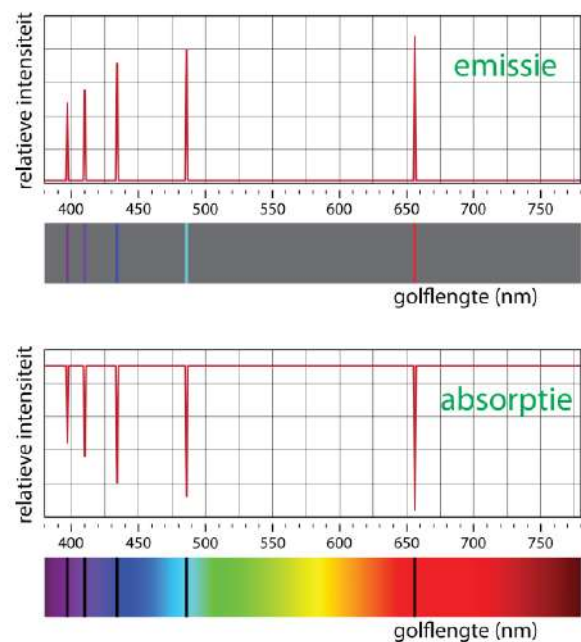
Als voorbeeld bekijken we het spectrum van waterstof. Dit spectrum is het meest bestudeerd omdat waterstofatoom het eenvoudigste atoom is. Waterstof heeft een atoomkern met één proton en daaromheen één elektron. Zie figuur 44. In figuur 44 wordt een elektron van de 1^e naar de 2^e schil gebracht.



Figuur 44 H-atoom

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.

Figuur 45 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).

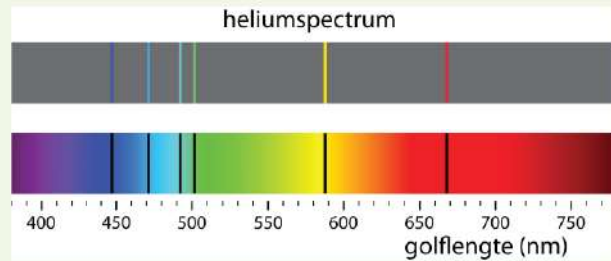


Figuur 45 Emissiespectrum (boven) en absorptiespectrum (onder) van waterstof.

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 46. Dit spectrum is als eerste waargenomen bij zonlicht en vandaar dat helium genoemd is naar de zon: Helios. Ook op aarde komt helium voor.

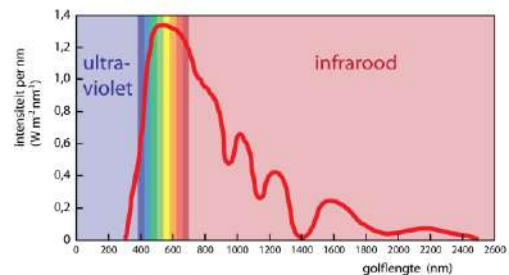
Figuur 46 Emissiespectrum (boven) en absorptiespectrum (onder) van helium.



De chemische samenstelling van sterren en nevels

Door het emissiespectrum van een ster te meten kun je achterhalen welke elementen aanwezig zijn. Op deze manier kan de chemische samenstelling van een ster vaststellen. Het beste kan dit met spectrometers in de ruimte, omdat lichtabsorptie door waterdamp, CO₂, ozon en andere gassen in de atmosfeer van de aarde de metingen verstoren.

In figuur 47 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.



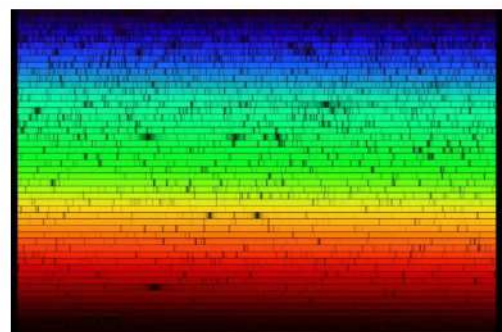
Figuur 47 Spectrum van zonlicht op het oppervlak van de aarde.

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 48 De corona.

Met ruimtetelescopen kan het lijnenspectrum van de zon zeer gedetailleerd worden bepaald. In figuur 49 zie je het resultaat. De horizontale banen moet je achter elkaar leggen om een uitgerekt spectrum met duizenden zwarte absorptielijnen te krijgen. In totaal zijn er ongeveer 67 verschillende elementen ontdekt op de zon.



Figuur 49 Spectrum van zonlicht.

Snelheid bepalen uit de dopplerverschuiving

De snelheid waarmee een ster van ons vandaan of naar ons toe beweegt kun je bepalen door de verandering in het lijnenspectrum te meten. Als een ster van de aarde vandaan beweegt krijgen alle lijnen een grotere golflengte. Het sterlicht wordt een beetje roder en vandaar de naam **roodverschuiving**. Als een ster naar de aarde toe beweegt gebeurt het omgekeerde en krijgen alle lijnen een kleinere golflengte. Het licht wordt een beetje blauwer en dat geeft **blauwverschuiving**. Dit heet het **dopplereffect** waarvoor geldt:

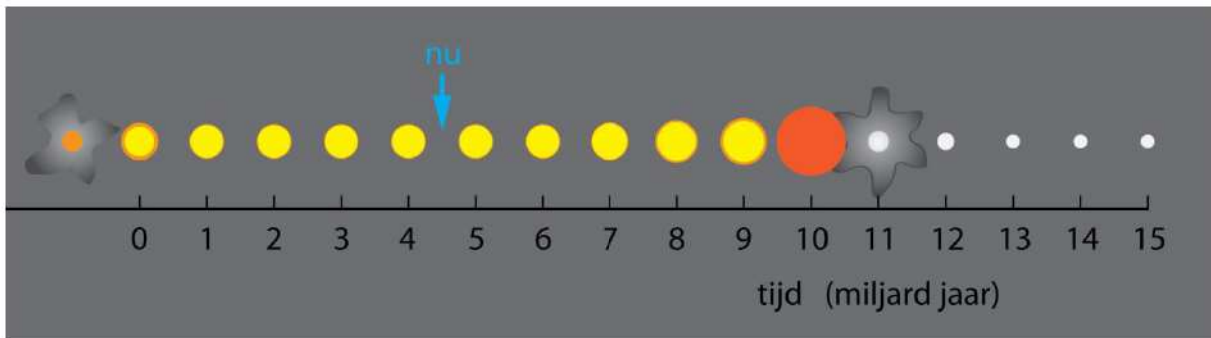
$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

- v is de snelheid van de ster van de aarde vandaan of naar de aarde toe (m/s)
- $\Delta\lambda$ de verandering van de golflengte van een lijn in het lijnenspectrum (m)
- λ_0 is de golflengte van dezelfde lijn als de ster niet beweegt (m)
- c is de lichtsnelheid: $2,99792 \cdot 10^8$ m/s

12.6 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 50 zie je een overzicht van de gebeurtenissen die in het verleden hebben plaatsgevonden en die de zon nog te wachten staan.



Figuur 50 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 51 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.

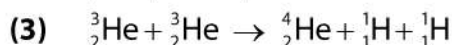
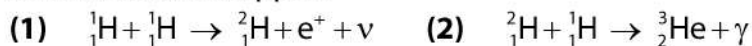


Figuur 52 Een protoster (illustratie).

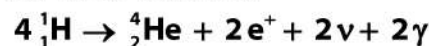
In een protoster is de gravitatiekracht sterker dan de thermische kracht, zodat de protoster zich blijft samentrekken. De temperatuur in het centrum loopt hierdoor op. Het proces van samentrekken duurt bij een protoster met de massa van de zon ongeveer 100 miljoen jaar. Uiteindelijk loopt de temperatuur 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

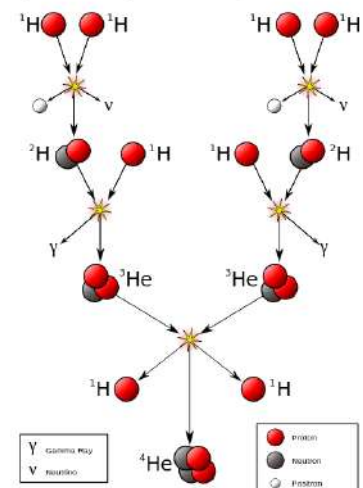
De belangrijkste energiebron van een ster is de proton-proton cyclus. Per reactie-cyclus komt er $3,954 \cdot 10^{-12}$ J energie vrij. Deze energie zorgt ervoor dat de oppervlakte van de ster een hoge temperatuur krijgt en daardoor licht gaat uitstralen. De proton-proton cyclus bestaat uit drie stappen:



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)
- ν is een neutrino
- ${}^3_2\text{He}$ is een heliumkern met één neutron
- γ is een gamma foton
- ${}^4_2\text{He}$ is een heliumkern met twee neutronen



Figuur 53 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

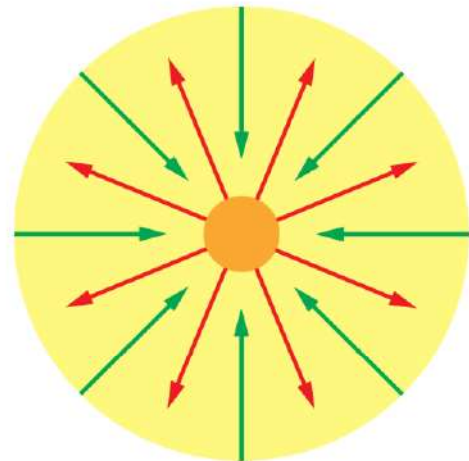
Fotonen die in de kern van een ster ontstaan, moeten zich een weg naar buiten banen. Ze worden daarbij voortdurend geabsorbeerd en weer uitgezonden, meestal in een andere richting dan de oorspronkelijke. Tussen twee opeenvolgende absorpties legt een foton in een ster ongeveer 1 cm af. Dit wordt de **vrije 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 opzwellt, 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.

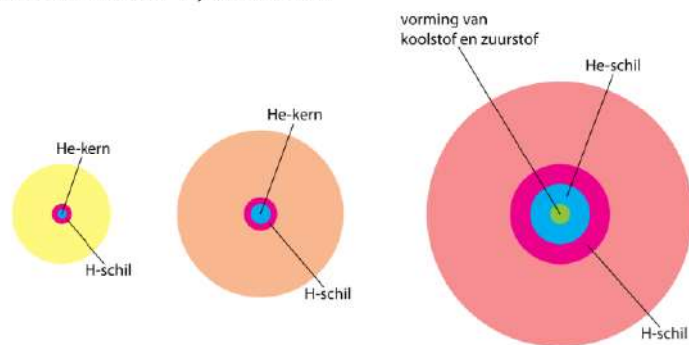


Figuur 54 Evenwicht in een ster. De groene pijlen geven de druk aan die door de gravitatiekracht wordt veroorzaakt. De rode pijlen geven de thermische druk weer.

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.

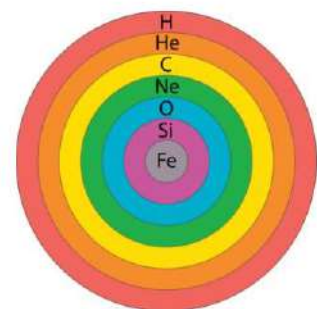
Bij een ster zo groot als de zon bereikt de temperatuur niet de 600 miljoen graden die nodig is voor het fuseren van koolstof. Het fusie­proces stopt. Door de verandering van de samen­stelling van de buitenste laag zwelt de zon op en wordt steeds groter. De zon wordt een **rode reus**.



Figuur 55 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 56 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**.

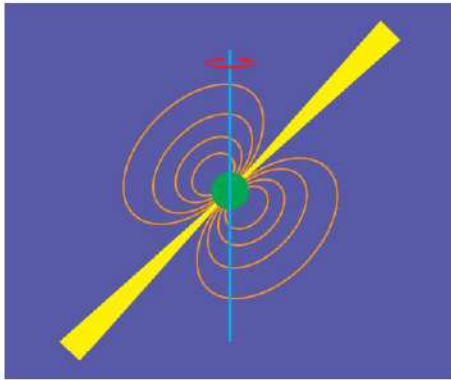
Neutronensterren

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.

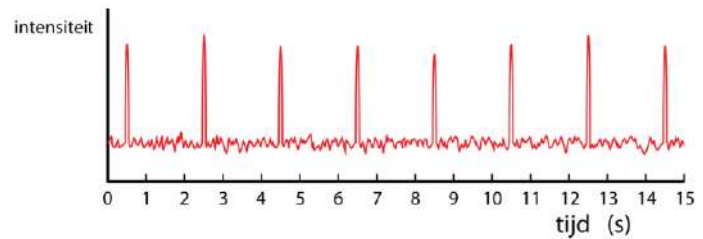
Een waterstofatoom heeft een kern (een proton) met een straal van ongeveer 10^{-15} meter en een elektronenschil met een straal van 10^{-10} meter. Als het elektron in het proton wordt geperst wordt de straal 10^5 keer kleiner. De dichtheid van een neutronenster is $(10^5)^3 = 10^{15}$ keer groter dan 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 57. 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 58. 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 57 Een pulsar.



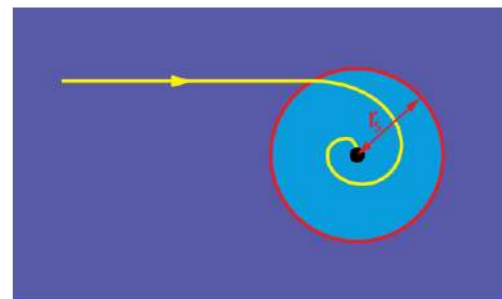
Figuur 58 Pieken elektromagnetische straling afkomstig van een pulsar.

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 gebruik je de ontsnappingsnelheid:

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

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 59.



Figuur 59 Een zwart gat.

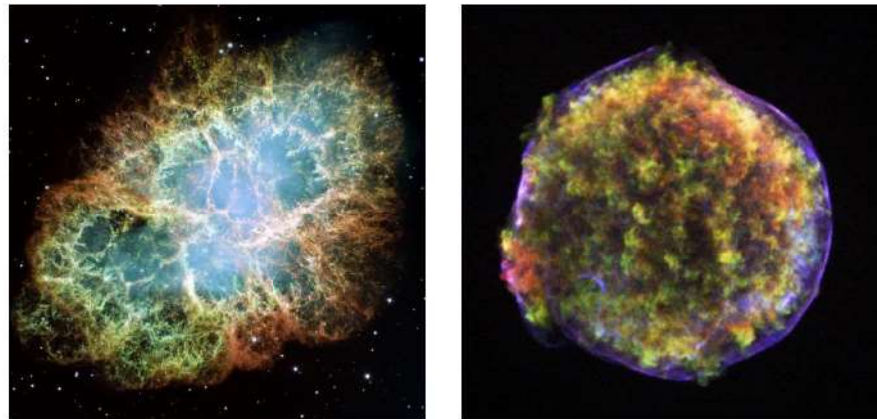
Er is geen informatie beschikbaar over wat zich binnen de schwarzschildstraal van een zwart gat afspeelt. Sommige mensen speculeren over de aanwezigheid van **wormgaten**, waarmee je een korte route kunt nemen naar een andere ruimte en tijd. Maar of dat zo is weet niemand. Misschien komt er ooit een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

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 60
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,

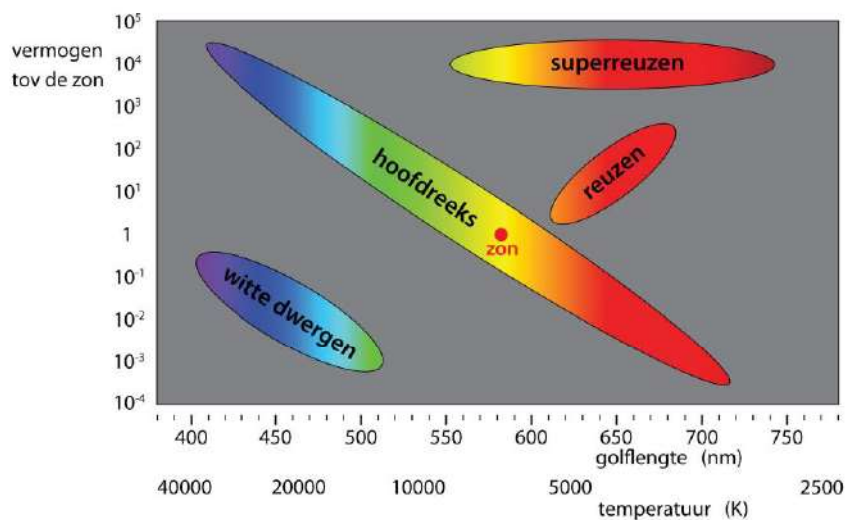
zoals nikkel, koper, zink, zilver, tin, platina, goud, kwik en lood in een paar seconden zijn ontstaan tijdens een supernova. Een aantal van deze elementen is onontbeerlijk voor het leven op aarde. Al het aardse leven, ook dat van ons zelf, is te danken aan de spectaculaire dood van een onbekende ster.

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 61.

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 61 Hertzsprung-Russell diagram.



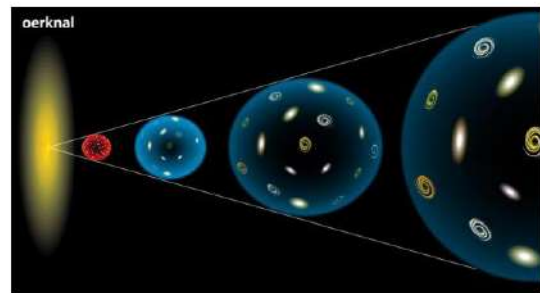
12.7 Het heelal

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 deze conclusie omdat het lijnspectrum van bijna alle sterren en sterrenstelsels naar het rood is verschoven. Deze **roodverschuiving** geeft aan dat sterren en sterrenstelsels van de aarde vandaan bewegen. Het heelal wordt dus steeds groter 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.

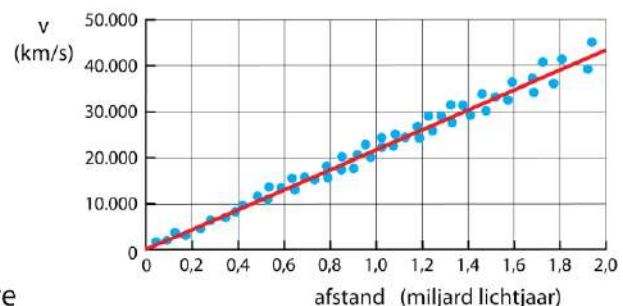


Figuur 62 Oerknal.

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 63. Voor het lineaire verband van Hubble geldt:

$$v = H_0 \cdot r \quad \text{met} \quad H_0 = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ m/s per meter}$$



Figuur 63 Hubble diagram.

De waarnemingshorizon

In 13,8 miljard jaar legt het licht 13,8 miljard lichtjaar af. Eén lichtjaar is $9,461 \cdot 10^{15}$ m en het zichtbare heelal is dus $13,8 \cdot 9,461 \cdot 10^{15} = 1,30562 \cdot 10^{15}$ m groot. Met de Hubble-relatie kun je

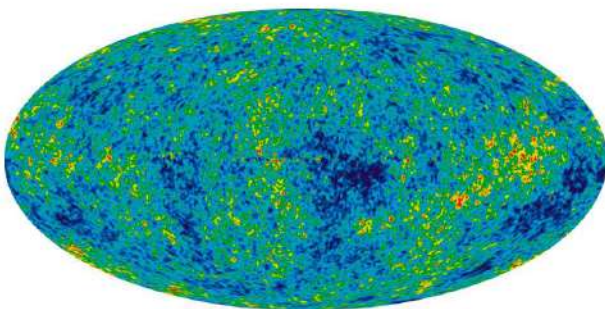
de snelheid van een sterrenstelsel aan de rand van het waarneembare heelal uitrekenen en dan vind je een snelheid van $3,0 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Sterrenstelsels aan de rand van het waarneembare heelal lijken dus met de lichtsnelheid van ons vandaan te bewegen. Dit lijkt toeval maar dat is het 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

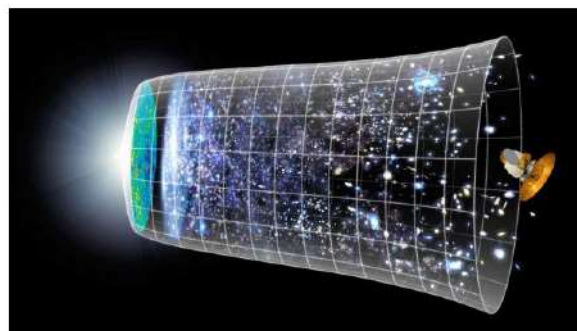
Er is veel onderzoek gedaan om meer te weten te komen over de oerknal. Enkel het feit dat de kleur van de meeste sterrenstelsels naar het rood is verschoven is niet genoeg bewijs dat er ook echt een oerknal is geweest. Meer direct bewijs is nodig. Bij een explosie als de oerknal wordt enorm veel straling 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 plaatsten 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 64 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 65 zie je hoe het heelal zich daarna heeft ontwikkeld.



Figuur 64 De achtergrondstraling.

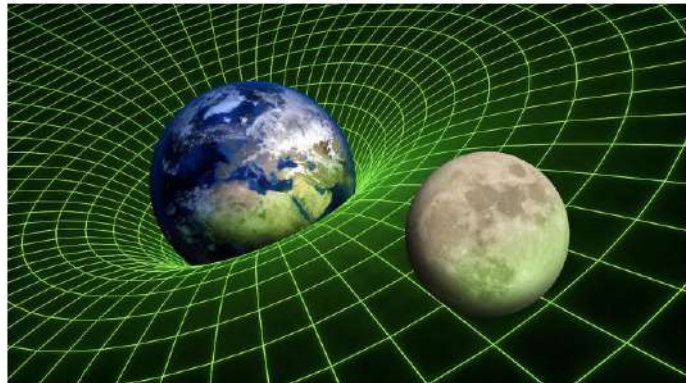


Figuur 65 Evolutie van het heelal.

Gekromde ruimtetijd

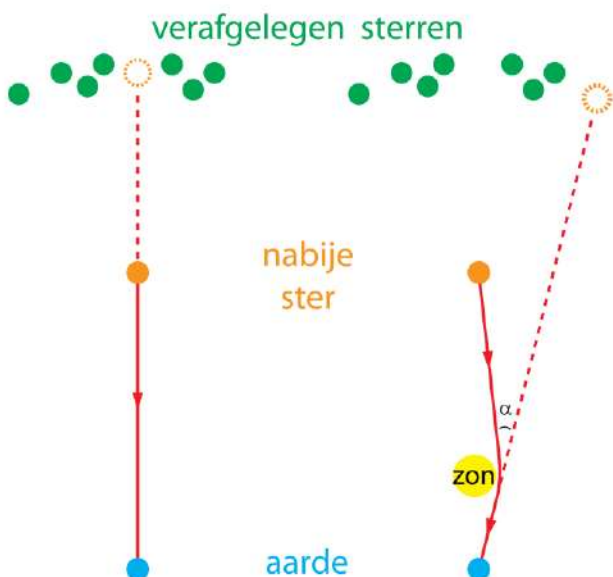
Met de ontwikkeling van de relativiteitstheorie heeft Albert Einstein een nieuwe kijk gegeven op ruimte en tijd. Vóór de ontdekkingen van Einstein werden ruimte en tijd opgevat als iets bestaands waarin de gebeurtenissen zich afspelen. Maar vanaf 1916 wordt daar heel anders over gedacht. Ruimte en tijd 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 66.

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 66 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 67 en 68. 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.

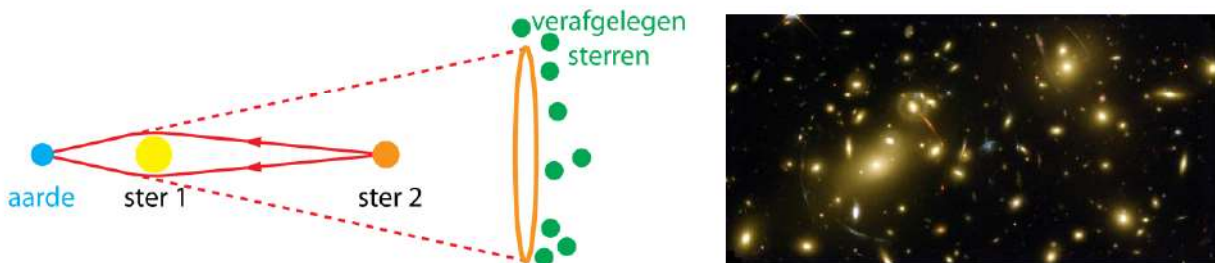


Figuur 67 Afbuiging van licht door de zon. Links: de ruimte is recht. Rechts: de ruimte bij de zon is krom.



Figuur 68 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 69.



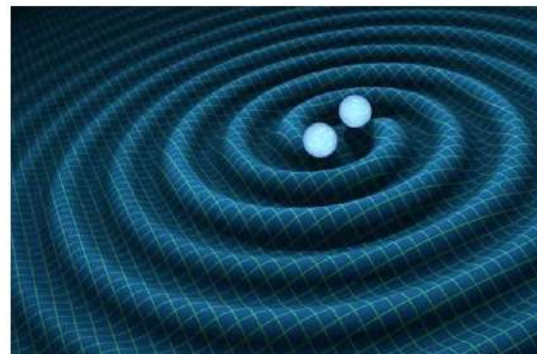
Figuur 69 Doordat licht om een ster buigt zie je een ster die pal achter een andere ster staat als cirkel aan de hemel.

Met ruimtetelescopen is de kromming van de ruimte van een groot deel van het heelal in kaart gebracht. Hieruit volgt dat 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.

Gravitiiegolven

Gravitiiegolven zijn golven in de ruimtetijd. Als een gravitiiegolf 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 gravitiiegolf voor het eerst waargenomen in America. In het LIGO-observatorium zijn twee buizen van 4 km lang die loodrecht op elkaar staan. Door een gravitiiegolf 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 gravitiiegolf 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 70.



Figuur 70 Gravitiiegolven.

Donkere massa en donkere energie

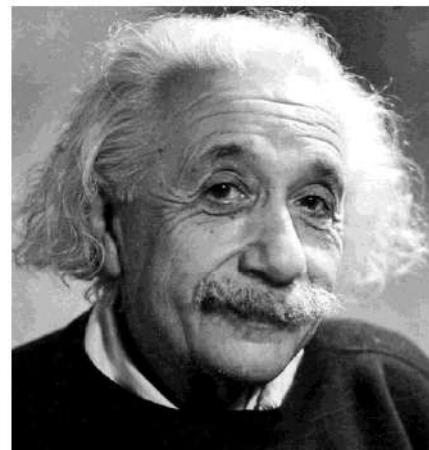
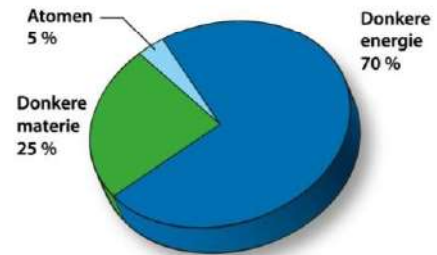
Een andere bijzondere waarneming die de sterrenkunde door elkaar heeft geschud is de versnelde uitdijning van het heelal. Dat het heelal steeds groter wordt is al sinds 1929

bekend. Maar metingen hebben in 1998 aangetoond dat de uitdijing van het heelal steeds sneller gaat. Zie figuur 65. 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 71 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 72 Albert Einstein.