

12 Sterrenkunde

havo

12.0 Overzicht

12.1 Het zonnestelsel

- Hoe beweegt de aarde om de zon?
- Waarom heeft de aarde seizoenen: zomer, herfst, winter en lente?
- Hoe ontstaan de schijngestalten van de maan?
- Wat veroorzaakt een maansverduistering en wat een zonsverduistering?
- Waarom zien we vanaf de aarde altijd dezelfde kant van de maan?
- Hoe ontstaan eb en vloed?
- Wanneer is er sprake van springtij?
- Hoe heten de planeten van de zon en welke volgorde hebben ze?
- Waar bevinden zich de planetoïdegordel, de Kuipergordel en de Oortwolk?
- Wat is een komeet en waar komen ze vandaan?
- Wat is een meteor en wat is een meteoriet?
- Wat zijn zonnevlekken?
- Waaruit bestaat zonnewind?
- Hoe ontstaat het poollicht?

12.2 Sterren en sterrenstelsels

- Wat is een lichtjaar en hoe bereken je hoeveel meter dit is?
- Wat zijn exoplaneten?
- Hoe ziet de Melkweg eruit en hoeveel sterren bevat de Melkweg ongeveer?
- Wat vind je nog meer in de Melkweg behalve sterren en planeten?
- Welk sterrenstelsel ligt het dichtst bij de Melkweg?
- Hoeveel sterren bevat een sterrenstelsel ongeveer?
- Hoeveel sterrenstelsels bevat het waarneembare heelal ongeveer?

12.3 Cirkelbeweging

- Wat is de omlooptijd en wat is de omloofrequentie bij een cirkelbeweging?
- Hoe bereken je de (omloop) frequentie uit de (omloop) tijd en omgekeerd?
- Wat is de baansnelheid en hoe bereken je die?
- Wanneer is een cirkelbeweging eenparig?
- Waarom is voor een cirkelbeweging een middelpuntzoekende kracht nodig?
- Wat is de middelpuntzoekende kracht en hoe bereken je die?

12.4 Gravitatie

- Hoe luidt de gravitatiewet van Newton?
- Hoe bereken je de valversnelling op aarde uit de gravitatiewet?
- Waarom is het bewegen van de maan om de aarde natuurkundig gezien hetzelfde als het vallen van een appel?
- Wat is een ellips?

- Hoe volgt de 3^e wet van Kepler uit de formules voor F_G en F_{mpz} ?
- Wat is een geostationaire satelliet en waarvoor worden ze gebruikt?
- Hoe bereken je de hoogte van een geostationaire satelliet?
- Wat zijn satellieten met polaire banen en waarvoor worden ze gebruikt?
- Wat is de ontsnappingssnelheid en hoe kun je die berekenen?
- Wat zijn de drie wetten van Kepler?

12.5 Informatie uit de ruimte

- Waarom staan moderne lichttelescopen niet in Europa maar bijvoorbeeld in Chili?
- Wat is radio-astronomie?
- Wat zijn ruimtetelescopen en waarom worden ze gebruikt?
- Hoe kun je met de parallax-methode de afstand tot een ster bepalen?
- Hoe kun je met de Cepheïden-methode de afstand tot een ster bepalen?
- Hoe hangt de golflengte van uitgestraald licht af van de temperatuur?
- Hoe hangt het vermogen van het uitgestraald licht af van de temperatuur?
- Hoe hangt de intensiteit van uitgestraald licht af van de temperatuur?
- Waarom zijn sterren die dichtbij staan helderder dan sterren op grote afstand?
- Wat staat er op de assen van een Hertzsprung-Russell diagram (HR-diagram)?
- Waar zijn de hoofdreeks-sterren, de reuzen, de superreuzen en de witte dwergen te vinden in een HR-diagram?
- Hoe kun je de chemische samenstelling van een ster en van een nevel bepalen?
- Wat is het dopplereffect?
- Hoe kun je met het dopplereffect de snelheid van een sterrenstelsel bepalen?

12.6 De levensloop van sterren

- Waar worden nieuwe sterren gevormd?
- Wat is een protoster?
- Waar komt de energie vandaan die een ster uitstraalt?
- Met welke formule bereken je de hoeveelheid massa die een ster verbruikt?
- Waarom zendt een ster heel lang een constante hoeveelheid energie uit?
- Wat gebeurt er met een hoofdreeksster aan het einde van zijn leven?
- Wat is een rode reus en wat is een witte dwerg?
- Wat is een neutronenster?
- Wat is een pulsar?
- Wat is een zwart gat?
- Wat is de Schwarzschildstraal van een zwart gat en hoe bereken je die?
- Wat is een nova en wat is een supernova?
- Wanneer ontstaan de zware elementen van het periodiek systeem?

12.7 Kosmologie

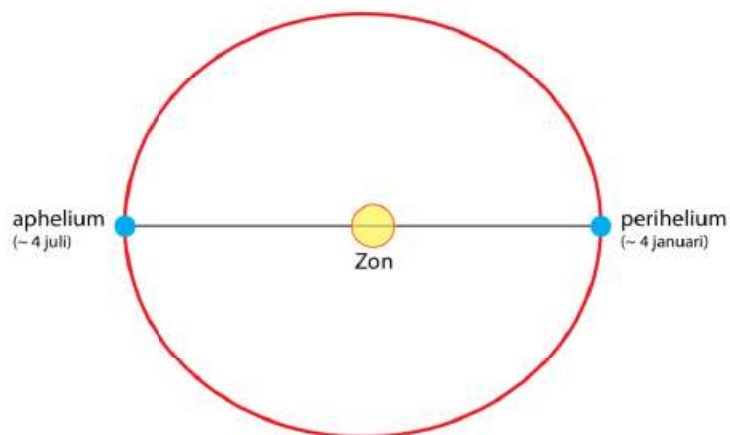
- Wat is de oerknal?
- Hoe weten we dat het heelal steeds groter wordt?
- Wat is de Hubble constante?
- Wat is de achtergrondstraling en hoe is deze straling ontstaan?
- Waardoor ontstaat er vervorming van de ruimtetijd?
- Wat is een gravitatielens en hoe merk je de invloed van een gravitatielens?
- Wat zijn gravitatiegolven en hoe kan je een gravitatiegolf waarnemen?
- Waarom denken we dat er veel donkere materie in de ruimte is?
- Waarom denken we dat er veel donkere energie in de ruimte is?

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 uur, één uur in 60 minuten en één minuut is 60 seconden.

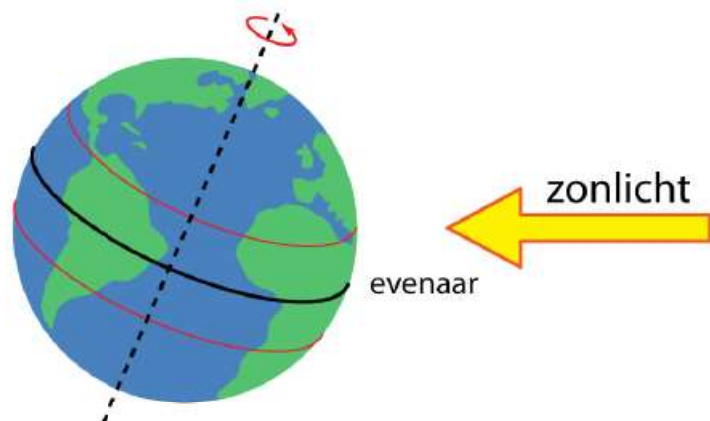
De afstand van de aarde tot de zon is gemiddeld 149,6 miljoen km. De aardbaan is bijna cirkelvormig. Het verschil tussen de grootste en de kleinste afstand is 3,3 %. De plaats op de baan met de grootste afstand tot de zon heet het aphelium. De plaats met de kleinste afstand tot de zon is het perihelium. Voor de aarde geldt: afstand tot de zon in het aphelium is 152,1 miljoen km en in het perihelium 147,1 miljoen km. Het verschil is 5 miljoen km (ongeveer 10 keer de straal van de zon). De snelheid waarmee de aarde haar baan doorloopt is gemiddeld 29783 m/s (107.219 km/h).



Figuur 1

De baan van de aarde om de zon (niet op schaal).

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 figuren 2 en 3. Door deze zogenaamde **inclinatie** verandert de hoek waarmee de zon de aarde gedurende een jaar beschijnt. 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, zie figuur 2. Een half jaar later is het Zuidelijk halfrond naar de zon gekanteld, zie figuur 3.

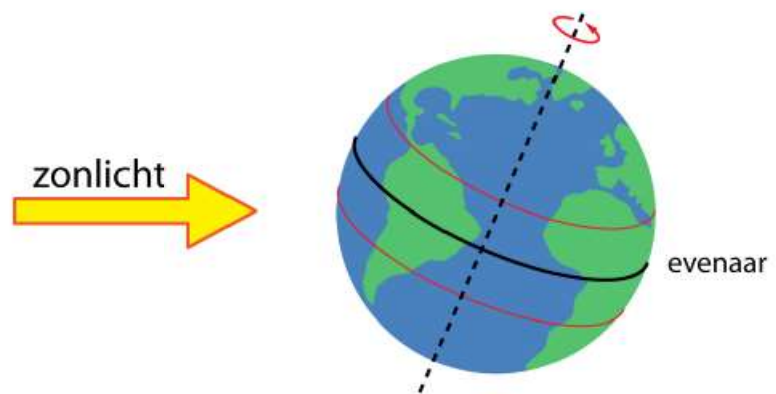


Figuur 2

De zon staat om 12 uur 's middags boven de Kreeftskeerkring. Dit is het begin van de zomer op het noordelijk halfrond en het begin van de winter op het zuidelijk halfrond.

Figuur 3

De zon staat om 12 uur 's middags boven de Steenbokskeerkring. Dit is het begin van de winter op het noordelijk halfrond en het begin van de zomer op het zuidelijk halfrond.

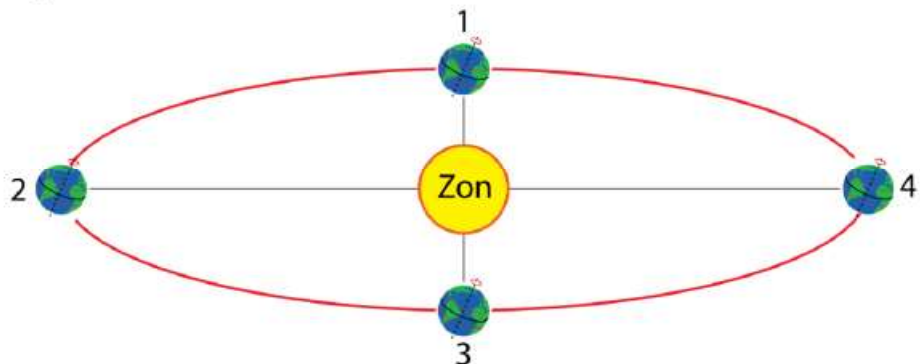


In de astronomie zijn de seizoenen vastgelegd aan de hand van de stand van de aardas ten opzichte van de zon. De twee punten in de aardbaan waar één van de twee polen naar de zon gericht is, worden zonnewendes genoemd en de twee punten waarop de zon precies boven de evenaar staat, de equinoxen. Die vier punten verdelen een jaar in **zomer**, **herfst**, **winter** en **lente**. Voor het noordelijk halfrond is de afstand tot de zon in het zomerseizoen iets groter dan in het winterseizoen; de zomer duurt hier dan ook een paar dagen langer dan de winter. Op het zuidelijk halfrond is dat juist andersom.

Figuur 4

De seizoenen op het noordelijk halfrond.

- 1: begin van de lente
- 2: begin van de zomer
- 3: begin van de herfst
- 4: begin van de winter

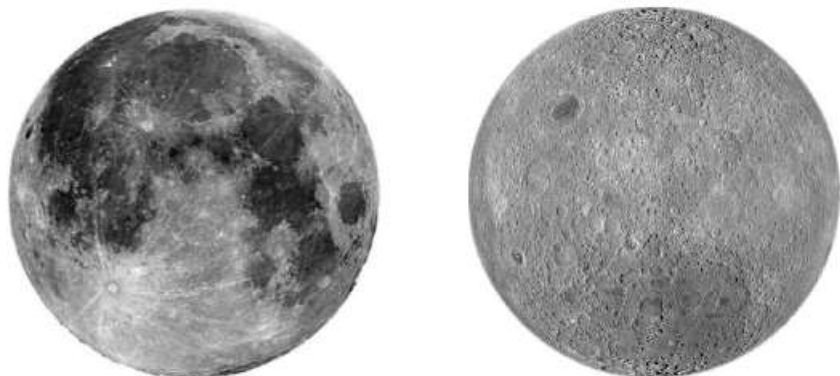


De maan

Op een afstand van gemiddeld 384.450 km van de aarde bevindt zich de maan, zie figuur 5. De straal van de maan is 3,6657 keer kleiner dan de straal van de aarde en de massa van de maan is 81,25 keer kleiner dan de massa van de aarde. 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. Bijvoorbeeld de getijden eb en vloed worden veroorzaakt doordat de maan een aantrekkende kracht op de aarde uitoefent.

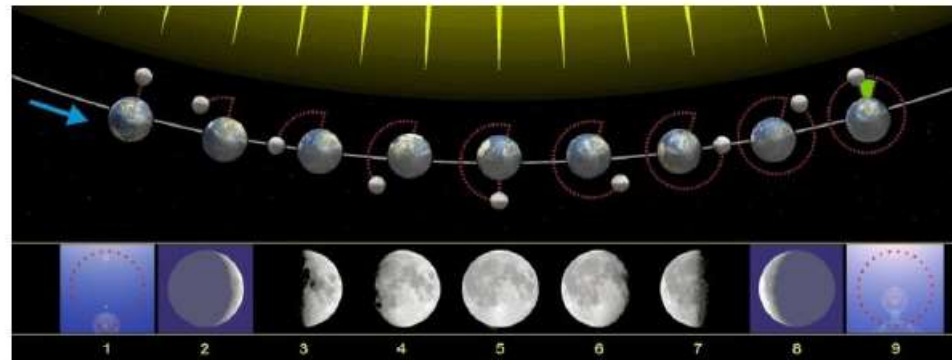
Figuur 5

De maan. Links de voorkant die vanaf de aarde is te zien. Rechts de achterkant die vanaf de aarde onzichtbaar is.



Kijk je vanaf de aarde naar de maan dan zie je alleen het deel dat door de zon wordt belicht. De maan geeft immers zelf geen licht maar weerkaatst het licht van de zon. Wat je ziet van de maan zijn de **schijngestalten**, zie figuur 6.

- | | | |
|-------------------|------------------|--------------------|
| 1 nieuwe maan | 4 wassende maan | 7 laatste kwartier |
| 2 wassende maan | 5 volle maan | 8 krimpende maan |
| 3 eerste kwartier | 6 krimpende maan | 9 nieuwe maan |

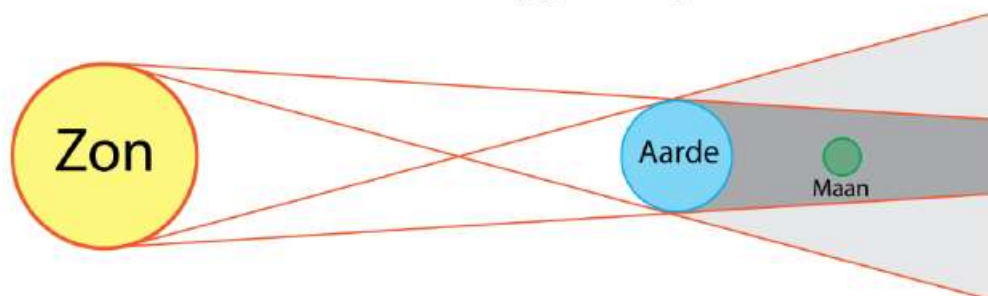


Figuur 6
De schijngestalten van de maan.

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).

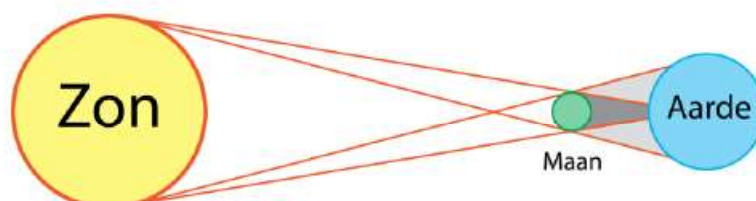
Tijdens volle maan staat de aarde tussen de zon en de maan in. Staan de zon, de aarde en de maan precies op één lijn, dan is er een **maansverduistering**. De schaduw van de aarde valt dan op de maan, zie figuur 7. In het donkergrijze gebied valt de **kernschaduw**. Daar is de maansverduistering volledig. In het lichtgrijze gebied valt de **halfschaduw**. Daar is de maansverduistering gedeeltelijk.

Figuur 7
Maansverduistering bij een perfecte volle maan.



Tijdens nieuwe maan staat de maan tussen de zon en de aarde in. Staan de zon, de maan en de aarde precies op één lijn dan is er een **zonsverduistering**. De schaduw van de maan valt dan op de aarde, zie figuur 8. In het donkergrijze gebied valt de **kernschaduw**. Daar is de zonsverduistering volledig. In het lichtgrijze gebied valt de **halfschaduw**. Daar is de zonsverduistering gedeeltelijk.

Figuur 8
Zonsverduistering bij een perfecte nieuwe maan.



De periode waarin de maan een ronde om de aarde draait ten opzichte van de sterrenhemel heet de **siderische maand** en duurt 27,321661 dagen. Een volledige omwenteling van de maan om de aarde ten opzichte van de zon heet de **synodische maand**, die 29,530588 dagen duurt. In een synodische maand doorloopt de maan precies één maal alle schijngestalten. Dit is de maand die in lengte het dichtst in de buurt ligt van onze kalendermaand.

Synchrone rotatie van de maan

Net als de aarde draait ook de maan om haar eigen as. Deze omwenteling duurt even lang als een siderische maand. De omwentelingstijd van de maan om de aarde is exact even lang als de omwentelingstijd van de maan om haar as. Dit noem je **synchrone rotatie**. De reden van deze synchrone rotatie is de kracht die de aarde op de maan uitoefent. Doordat de massa van de aarde ruim 80 keer zo groot is als die van de maan, heeft de aarde invloed op de vorm van de maan. Lang geleden was de omwentelingssnelheid van de maan om haar as veel groter dan nu, maar door de invloed van de aarde is de draaisnelheid van de maan zo sterk afgenomen dat de maan gezien vanaf de aarde niet meer om haar as draait. 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 van 6371 km klein, zie figuur 9. 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 9
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 de kracht 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 de vloed hoger en de eb lager dan normaal. Het getijde dat optreedt bij nieuwe maan en bij volle maan heet **springtij**. Springtij komt daarom twee keer per maand voor.

Figuur 10
Springtij bij
nieuwe maan.



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 11
Het zonnestelsel.
De afstanden zijn niet
op schaal getekend.

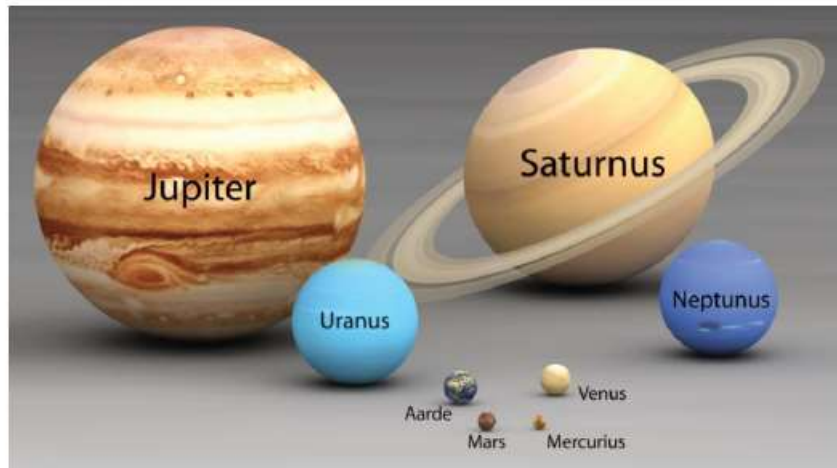


Gerekend vanaf de zon is de volgorde van de planeten:

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

Zoals te zien in figuur 11 zijn de vier binnenste planeten, Mercurius – Venus – Aarde – Mars, klein ten opzichte van de vier buitenste planeten, Jupiter – Saturnus – Uranus – Neptunus. In figuur 12 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 gasbollen en worden daarom "gasplaneten" genoemd.

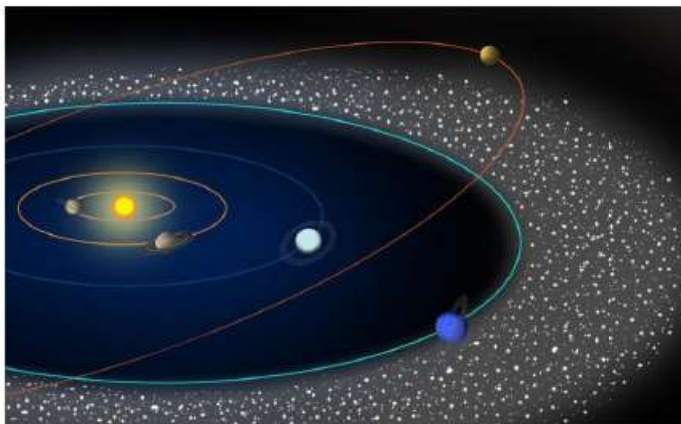
Figuur 12
 Relatieve groottes van de planeten.



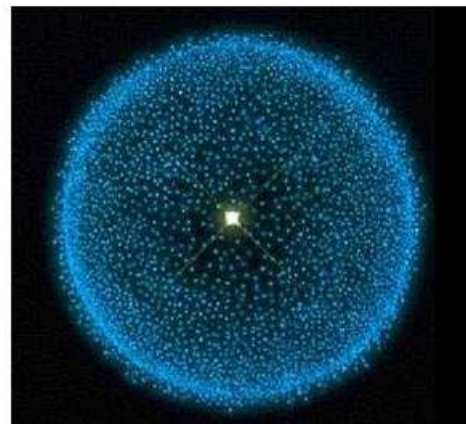
Planetoïdegordel, Kuipergordel en Oortwolk

Tussen Mars en Jupiter bevindt zich de **planetoïdegordel**. Dit is een ring met kiezels en rotsblokken. Het grootste object in deze gordel is de **dwergplaneet 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 **dwergplaneet 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 13 De Kuipergordel.



Figuur 14 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. Sinds 240 voor Christus wordt deze komeet beschreven in Chinese, Babylonische en Europese geschriften. De laatste passage heeft plaatsgevonden in 1986 en in 2061 komt de komeet van Halley weer voorbij.



Figuur 15
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 atmosfeer, waarbij ze vanwege de luchtwrijving sterk worden verhit. Meestal verbrandt de meteoroïde hierbij volledig. Het licht dat ontstaat bij het verbranden van een meteoroïde is zichtbaar als **metoor**, 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 een combinatie van deze twee.



Figuur 16 Meteor (vallende ster).



Figuur 17 Een meteoriet van ijzer.

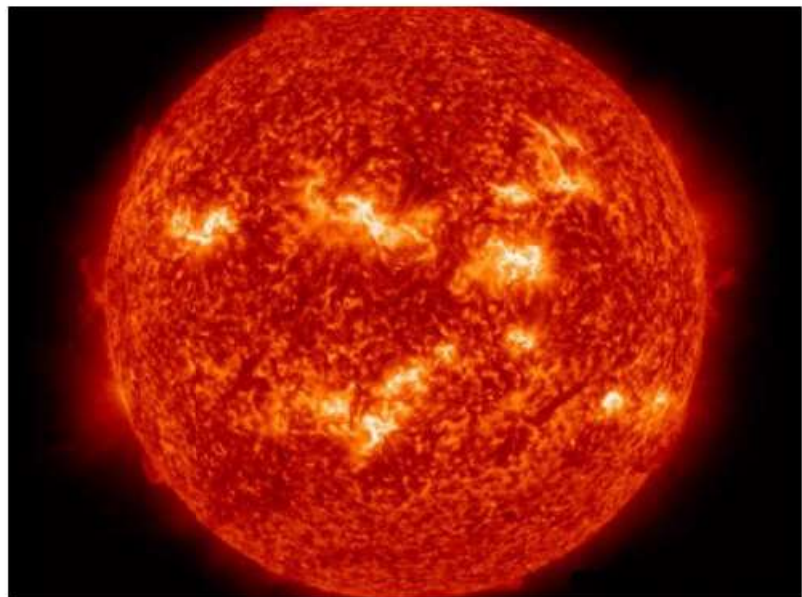
Het gebeurt zelden dat er een grote meteoriet op aarde valt. Waarschijnlijk de bekendste inslagkrater op aarde is van een meteoriet die ongeveer 50.000 jaar geleden in Arizona, Verenigde Staten, is ingeslagen, zie figuur 18.



Figuur 18
Meteoriet inslagkrater in
Arizona, Verenigde Staten.

De zon

In het centrum van de 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.

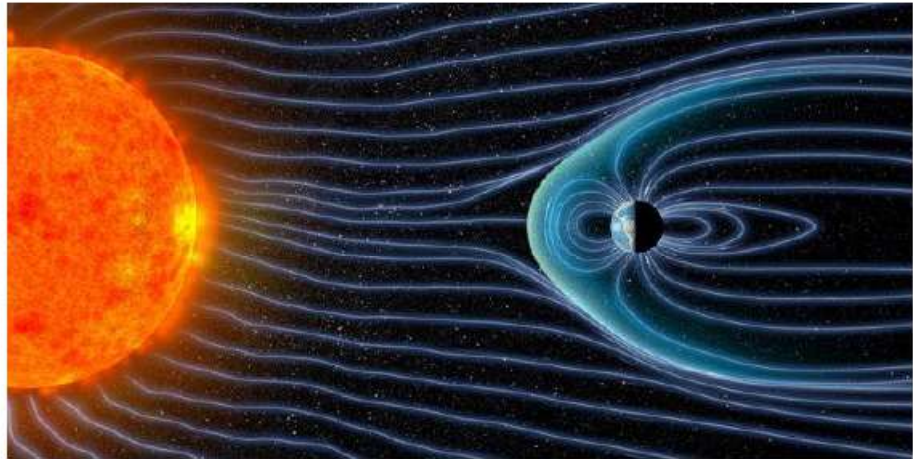


Figuur 19
De zon.

Het oppervlakte 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 maar bij een zonnevlek is deze temperatuur afgenomen tot 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 zonnewind. Langzame en snelle zonnewind zijn anders van samenstelling. **Langzame zonnewind** ontstaat aan de evenaar van de zon en bevat deeltjes met een gemiddelde snelheid van 300 – 400 km/s. **Snelle zonnewind** ontstaat op enige afstand van de evenaar en bevat deeltjes met een gemiddelde snelheid van zo'n 700 km/s.



Figuur 20
Zonnewind 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 zonnewind-deeltjes 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 21
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 dichtbijzijnde 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.

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.

één lichtjaar is $9,46 \cdot 10^{15}$ m

BEWIJS

- 1 jaar heeft 365,256 dagen
- 1 dag = $24 \cdot 60 \cdot 60 = 86400$ seconden
- lichtsnelheid = $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s
- $s = v_{\text{gem}} \cdot t$
- 1 lichtjaar = $2,99792458 \cdot 10^8 \cdot 365,256 \cdot 86400 = 9,460886 \cdot 10^{15}$ m

Op iets grotere afstanden staan de sterren:

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 3,43 keer groter is dan die van de zon, heeft twee keer zoveel massa, en straalt per seconde 25 keer meer energie uit dan de zon.

Exoplaneten

Net als de zon hebben de meeste sterren planeten om zich heen. Planeten om andere sterren dan de zon noem je **exoplaneten**. Het waarnemen van exoplaneten is erg moeilijk omdat ze veel kleiner zijn dan de ster waarbij ze horen. De eerste exoplaneet is in 1991 ontdekt bij een ster op 1000 lichtjaar afstand. Er zijn ook planeten die los zijn geraakt van hun ster en eenzaam door de ruimte reizen.

Exoplaneten kun je waarnemen door te kijken naar kleine variaties in de lichtintensiteit van een ster. Als de planeet tussen de aarde en de ster staat komt er minder licht van de ster op aarde. Bij de zon gebeurt hetzelfde als de planeet Venus tussen de aarde en de zon staat. Dit wordt een **Venusovergang** genoemd.

Je kunt ook kijken naar de beweging van een ster. Vanwege de aantrekking tussen de ster en de planeet draaien de ster en de planeet om een gemeenschappelijk punt. Een ster met een planeet staat dus niet helemaal stil, maar beschrijft een kleine cirkelbaan.

Exoplaneten die op de aarde lijken zijn extra interessant vanwege de mogelijkheid dat er leven op voorkomt. De aanwezigheid van vloeibaar water en een temperatuur waarbij de complexe biologische chemie kan plaatsvinden zijn hierbij essentieel. Er zijn intussen al heel wat van dergelijke exoplaneten gevonden. De planeet Kepler-22b is in 2011 ontdekt als eerste planeet in de bewoonbare zone. Deze planeet ligt op een afstand van 600 lichtjaar. Figuur 22 is een illustratie van Kepler-22b. Intussen zijn er meerdere planeten ontdekt waarop leven in principe mogelijk is.



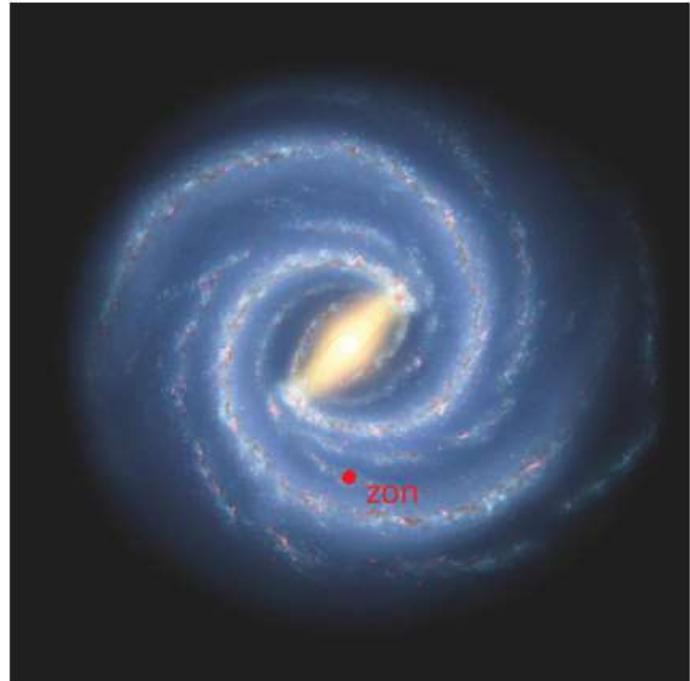
Figuur 22
Illustratie van
exoplaneet Kepler
22b waarop leven
mogelijk is.

De Melkweg

Ons zonnestelsel maakt deel uit van de **Melkweg**, dit is een groep van ongeveer 200 miljard sterren. Zo'n groep van sterren wordt een **sterrenstelsel** genoemd (Engels: galaxy). In figuur 23 is een illustratie van de Melkweg. Omdat we er midden in 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 dus in een plat vlak en omdat de zon ook in dit vlak ligt zie je een smalle band.

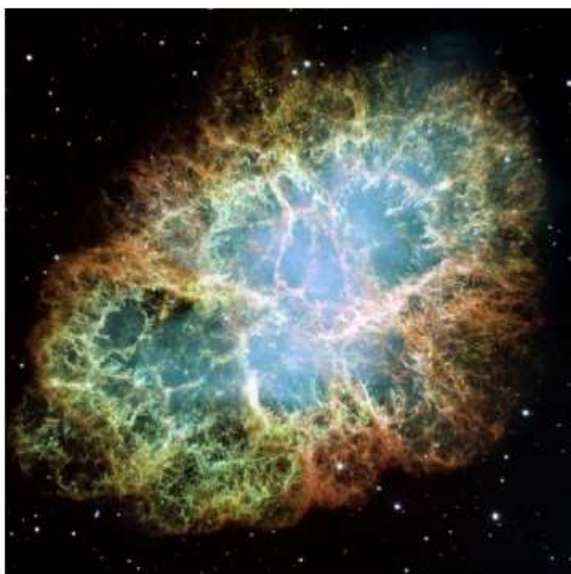
De Melkweg is een spiraalvormig sterrenstelsel. Een aantal belangrijke eigenschappen van de Melkweg vind je in Tabel 3 aan het einde van dit hoofdstuk. De sterren van de Melkweg draaien rond een **zwart gat** dat zich in het centrum bevindt. Wat een zwart gat is komt later aan de orde. De omlooptijd van de sterren die zich

het dichtst bij het centrum bevinden is kleiner dan de omlooptijd op grotere afstand van het centrum. Hieruit kun je berekenen hoeveel massa het zwarte gat bevat. Momenteel wordt deze massa geschat op zo'n 100 miljoen keer de zonmassa. Omdat een zwart gat zowel licht als materie aantrekt en opneemt wordt de massa van het zwarte gat steeds groter.



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 het zichtbare licht van de achterliggende sterren. Maar zichtbaar licht is niet de enige straling die een ster uitzendt. Door straling met veel langere golflengten dan zichtbaar licht te gebruiken kan er informatie van sterren die achter een stofwolk staan worden verkregen.



Figuur 24 Nevels in de Melkweg. Links: Krabnevel, rechts: Paardekopnevel.



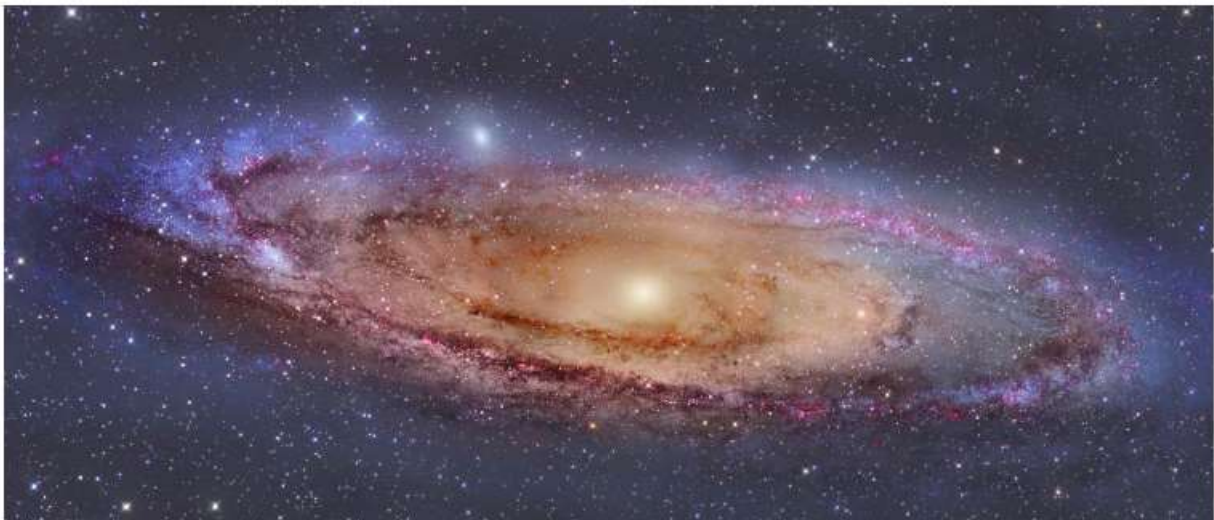
Orion-nevel



Helixnevel

Sterrenstelsels

Behalve de Melkweg zijn er nog veel meer sterrenstelsels in het heelal. 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.



Figuur 25 Het Andromeda sterrenstelsel.

Ook het Andromeda stelsel is spiraalvormig. De diameter van Andromeda is ongeveer 10 keer groter dan die van de Melkweg. Andromeda bevat $17 \cdot 10^{11}$ zon-massa's en de Melkweg $8,5 \cdot 10^{11}$ zonmassa's.

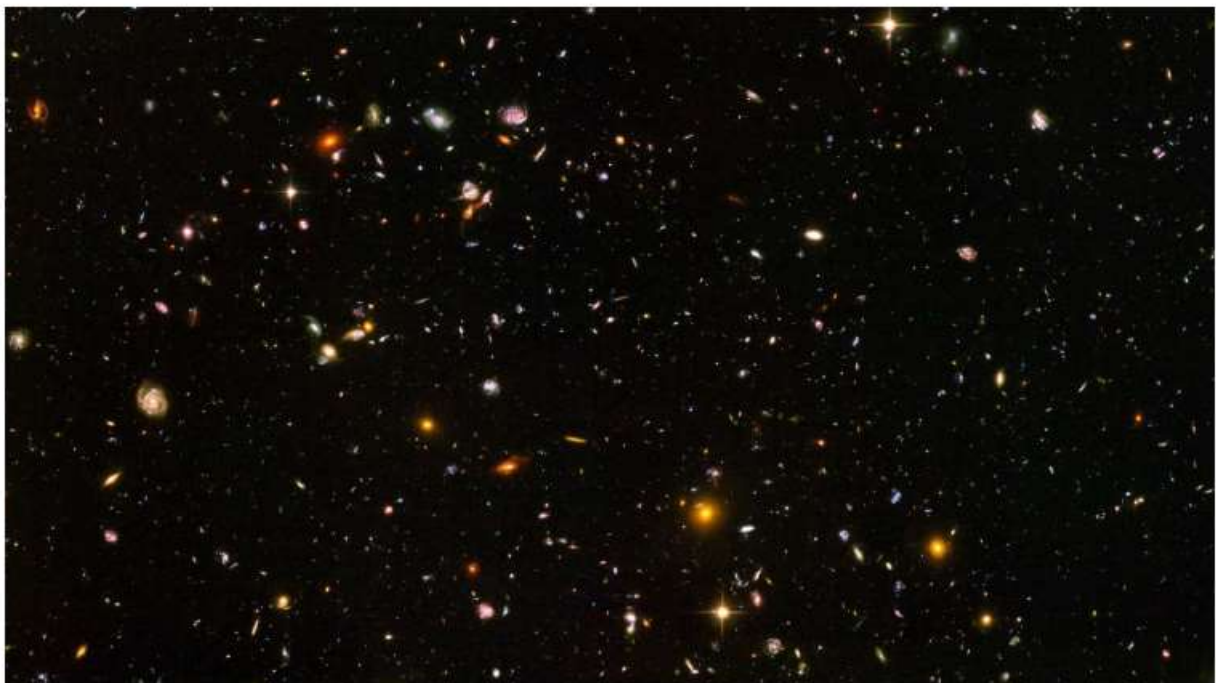
Het Andromeda stelsel en de Melkweg bewegen naar elkaar toe met een snelheid van 200 km/s. Over ongeveer 3,75 miljard jaar botsen Andromeda en de Melkweg frontaal op elkaar. Omdat een sterrenstelsel voornamelijk uit lege ruimte bestaat

zullen er maar weinig directe botsingen tussen sterren plaatsvinden. De stelsels zullen samengaan waarbij onder andere de zon uit haar baan wordt geslingerd. 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 ongeveer 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 75 miljoen lichtjaar. De Canes Venaticiwolk maakt deel uit van het **Virgo-supercluster** dat meer dan 10.000 sterrenstelsels bevat en een doorsnede heeft van 250 miljoen lichtjaar.

Het heelal

Het zichtbare heelal bevat ongeveer 100 miljard sterrenstelsels en heeft een straal van 46 miljard lichtjaar. Het heelal is 13,8 miljard jaar geleden ontstaan uit de oerknal, waarover je hieronder meer zult leren. Vanwege de **expansie van het heelal** is de geschatte straal van het heelal meer dan 13,8 miljard lichtjaar. Nemen we een object waar aan de rand van het heelal dan heeft het licht 13,8 miljard jaar nodig gehad om de aarde te bereiken. We zien dit object dus 13,8 miljard jaar terug in de tijd. In deze 13,8 miljard jaar zijn het object en de aarde verder van elkaar verwijderd, zodat de huidige afstand op 46 miljard lichtjaar wordt geschat.



Figuur 26 Sterrenstelsels diep in de ruimte, waargenomen door de Hubble telescoop.

12.3 Cirkelbeweging

Eenparige cirkelbeweging

Bij een **cirkelbeweging** is de afstand van het voorwerp tot een vast punt constant. Bij een **eenparige cirkelbeweging** is bovendien de grootte van de snelheid constant en wordt de cirkelbaan in een vaste tijd afgelegd.

De tijd die nodig is om één complete cirkelbaan af te leggen is de **omlooptijd**. De **omloofrequentie** is het aantal omlopen dat per seconde wordt afgelegd.

T is de omlooptijd, de tijd die nodig is om één cirkel af te leggen.
f is de frequentie, het aantal cirkels dat per seconde wordt afgelegd.

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

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

Het **toerental** is het aantal omlopen **per minuut**. Omdat een minuut 60 seconden heeft is het aantal omlopen per minuut 60 keer het aantal omlopen per seconde.

Baansnelheid

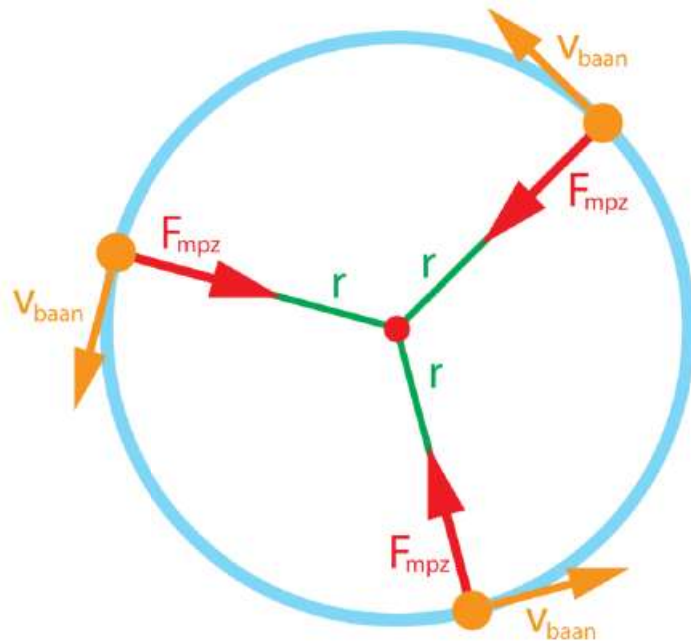
De snelheid waarmee een cirkelbaan wordt afgelegd is de **baansnelheid**. Bij een eenparige cirkelbeweging verandert de **grootte** van de baansnelheid niet. De **richting** van de snelheid verandert wel.

De baansnelheid is de snelheid waarmee de cirkelbaan wordt doorlopen.

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

$$v_{\text{baan}} = \frac{2\pi \cdot r}{T}$$

- v_{baan} 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)



Figuur 27

Bij een eenparige cirkelbeweging verandert alleen de richting van de snelheid. De grootte van de baansnelheid verandert niet.

VOORBEELD **Booster XXX**

De kermisattractie "Booster XXX" is 60 m hoog en heeft een baansnelheid van 125 km/h.

Bereken de omlooptijd van de Booster XXX.

- diameter = 60 m $\rightarrow$ $r = 30$ m
- $v_{\text{baan}} = 125$ km/h $\rightarrow$ $v_{\text{baan}} = \frac{125}{3,6} = 34,722$ m/s
- $r = 30$ m | $v_{\text{baan}} = 34,722$ m/s | $T = \dots$ s
- $v_{\text{baan}} = \frac{2\pi \cdot r}{T}$
- $34,722 = \frac{2\pi \cdot 30}{T} \rightarrow T = \frac{2\pi \cdot 30}{34,722} = 5,4287 = 5,4$ s

Bereken de omloofrequentie van de Booster XXX.

- $f = \frac{1}{T}$ (met T in seconde)
- $f = \frac{1}{5,4287} = 0,1842 = 0,18$ Hz

Bereken het toerental van de Booster XXX.

- het toerental is het aantal omlopen per minuut
- één omwenteling in 5,4287 s
- in 60 seconde zijn er $\frac{60}{5,4287} = 11,052 = 11$ omlopen
- het toerental is 11 omlopen per minuut

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.

F_{mpz} is de kracht die nodig is om een cirkelbeweging te kunnen maken.

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

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

- F_{mpz} is de middelpuntzoekende kracht in newton (N)
- m is de massa in kilogram (kg)
- v_{baan} is de baansnelheid in meter p er 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 die op de trein werkt.

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



Waar komt deze middelpuntzoekende kracht vandaan?

- F_{mpz} wordt door de rails zijwaarts op de wielen uitgeoefend

Wat gebeurt er met F_{mpz} als de trein langzamer door de bocht gaat?

- dan oefent de rails minder zijwaartse kracht uit en wordt F_{mpz} kleiner

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
- $r = 384,4 \cdot 10^6$ m | $T = 2,360448 \cdot 10^6$ s | $v_{\text{baan}} = \dots$ m/s
- $v_{\text{baan}} = \frac{2\pi \cdot r}{T}$
- $v_{\text{baan}} = \frac{2\pi \cdot 384,4 \cdot 10^6}{2,360448 \cdot 10^6} = 1023,22 = 1023$ 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
- $F_{\text{mpz}} = \frac{m \cdot v_{\text{baan}}^2}{r}$
- $F_{\text{mpz}} = \frac{0,0735 \cdot 10^{24} \cdot 1023,22^2}{384,4 \cdot 10^6} = 2,001896 \cdot 10^{20} = 2,00 \cdot 10^{20}$ N

Waar komt deze middelpuntzoekende kracht vandaan?

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

12.4 Gravitatie

De gravitatiewet van Newton

De aanwezigheid van zwaartekracht op aarde is een bijzonder geval van de gravitatiewet van Newton. Newton heeft ontdekt dat massa's elkaar altijd aantrekken. Hij heeft geen idee waarom dit zo is en wil daar verder ook niet over speculeren. In zijn boek *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (filosofie van de natuur op wiskundige grondslag) uit 1687 zet Newton zijn ideeën uiteen.

Volgens Newton trekken twee massa's m_1 en m_2 elkaar altijd aan. Om deze kracht te berekenen moet je de massa's met elkaar vermenigvuldigen en het resultaat delen door het kwadraat van de afstand tussen de zwaartepunten van deze massa's. Vervolgens vermenigvuldig je de uitkomst met het getal G (de gravitatieconstante). De **gravitatiekracht** is de zwakste kracht van de natuurkunde, de andere krachten, zoals de elektrische en magnetische kracht en de krachten in een atoomkern zijn veel groter. Je merkt bijvoorbeeld niet dat een potlood en een gum elkaar aantrekken. Maar als één van de massa's erg groot is, bijvoorbeeld een planeet, wordt de gravitatiekracht duidelijk merkbaar. Hoewel de gravitatiekracht erg klein is bepaalt deze kracht hoe het heelal eruit ziet.

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

- F_G is de gravitatiekracht in newton (N)
- G is de gravitatieconstante: $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- m_1 is de massa van voorwerp 1 in kilogram (kg)
- m_2 is de massa van voorwerp 2 in kilogram (kg)
- r is de afstand tussen de zwaartepunten van beide massa's 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 valversnelling. 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 valversnelling aan het oppervlak berekenen.

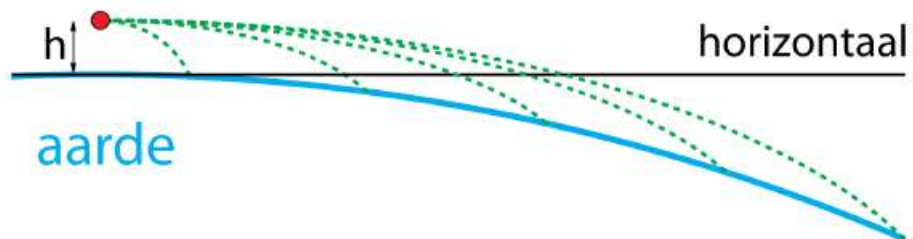
$$g = \left(G \cdot \frac{m_{\text{aarde}}}{r_{\text{aarde}}^2} \right)$$

- g is de valversnelling op het oppervlak van de aarde (m s^{-2})
- G is de gravitatieconstante: $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- m_{aarde} is de massa van de aarde in kilogram (kg)
- r_{aarde} is de straal van de aarde 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.

Figuur 28
Invloed van de kromming van de aarde op het vallen van een weggeschoten projectiel.



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 29
Kromming van de aarde. Na 8,0 km ligt het oppervlak van de aarde 5,0 m onder de horizon.

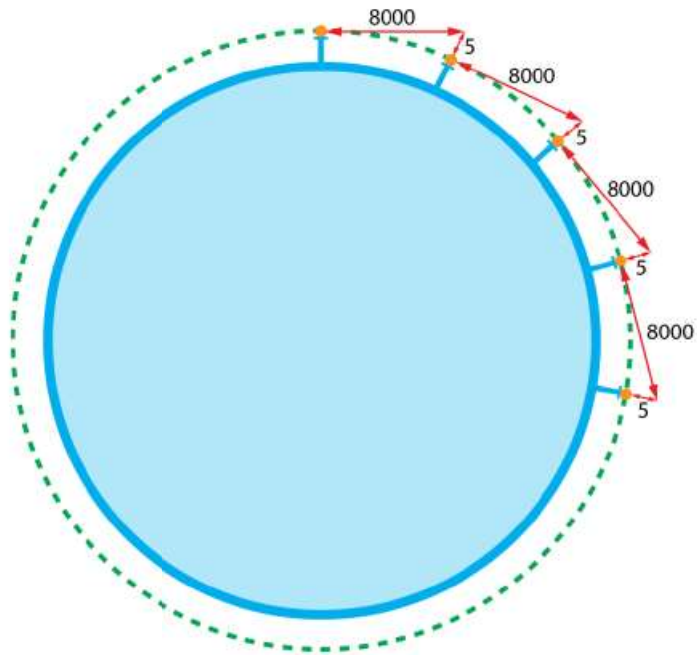


We doen nu het volgende gedachtenexperiment. We schieten een kogel van een 10 meter hoge toren horizontaal weg met een snelheid van 8,0 km/s. Uiteraard zal de luchtwrijving bij zo'n hoge snelheid groot zijn, maar in onze redenering houden we daarmee geen rekening. We doen alsof de aarde geen dampkring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

Bij een horizontale snelheid van 8,0 km/s heeft de bal in één seconde horizontaal 8000 m afgelegd. In één seconde wordt verticaal 5 meter afgelegd:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \rightarrow s = \frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot 1^2 \rightarrow s \approx 5 \text{ m. Maar na 8000 meter ligt het}$$

aardoppervlak 5 meter onder de horizon. De bal bevindt zich na één seconde dus nog steeds op 10 meter hoogte. In de volgende seconde herhaalt dit zich, met als resultaat dat de bal het aardoppervlak nooit zal bereiken, zie figuur 30.

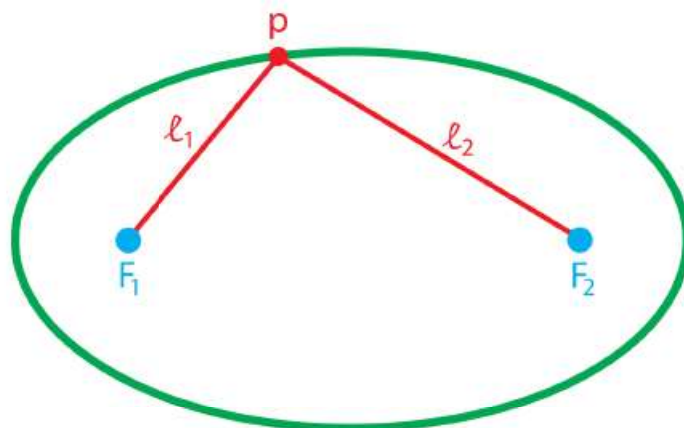


Figuur 30
Zonder luchtweerstand komt een projectiel dat met 8,0 km/s horizontaal is weggeschoten nooit aan bij het aardoppervlak.

Dit theoretische 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

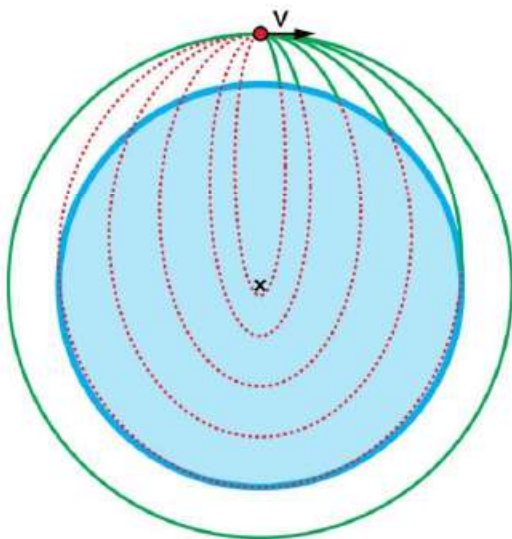
De gravitatiekracht is gericht naar het middelpunt van de aarde. Schiet je een kogel horizontaal weg dan krijgt de kogel een ellipsvormige baan om dit middelpunt. Een ellips is een speciale curve. Een punt beweegt in een elliptische baan als de som van de afstanden tot twee vaste punten (de brandpunten) constant is. In figuur 31 zie je een ellips met twee brandpunten F_1 en F_2 . ℓ_1 en ℓ_2 zijn de afstanden van de brandpunten tot punt p . Voor ieder punt p op de ellips geldt: $\ell_1 + \ell_2 = \text{constant}$



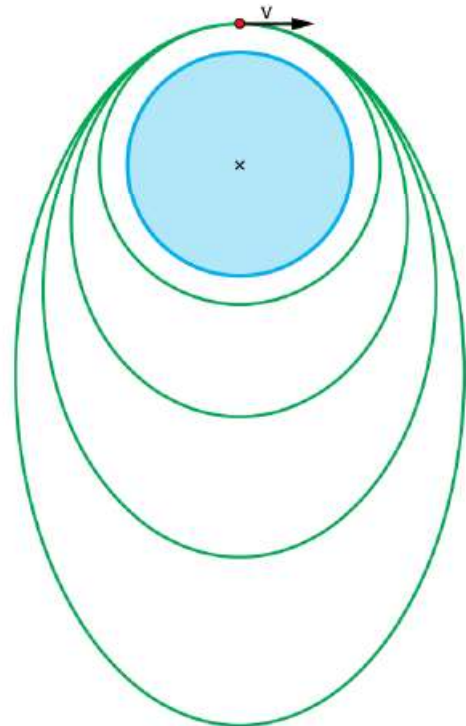
Figuur 31
Een ellips heeft twee brandpunten F_1 en F_2 . Voor ieder punt p op de ellips geldt: $\ell_1 + \ell_2 = c$

- Bij een beginsnelheid kleiner dan 8,0 km/s ligt F_1 dichtbij het vertrekpunt. Het brandpunt F_2 bevindt zich in het middelpunt van de aarde.
- Bij een beginsnelheid van 8,0 km/s vallen de twee brandpunten samen in het middelpunt van de aarde; $F_1 = F_2$. De ellips is dan een cirkel. Een cirkel is dus een bijzondere ellips.
- Bij een beginsnelheid groter dan 8,0 km/s is F_1 het middelpunt van de aarde. F_2 ligt verder weg, ergens in de ruimte buiten de aarde.

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 doorgetrokken lijnen zijn de banen tot aan het aardoppervlak. De rood 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 $v_{\text{begin}} < 8,0$ km/s.



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

Hoewel gravitatiekracht een ellipsvormige baan geeft, houden we daar bij onze berekeningen geen rekening mee. We gaan uit van cirkelvormige banen en gebruiken de formule voor de middelpuntzoekende kracht. Voorwerp 1 heeft een massa m_1 die veel kleiner is dan massa m_2 van voorwerp 2. Voorwerp 1 voort daarom een cirkelvormige baan uit om voorwerp 2. In de ruimte werkt alleen de gravitatiekracht zodat geldt:

$$\Sigma F = F_G = F_{\text{mpz}} \rightarrow G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \frac{m_1 \cdot v^2}{r}$$

- F_G is de gravitatiekracht in newton (N)
- G is de gravitatieconstante: $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- m_1 is de massa van voorwerp 1 dat om voorwerp 2 draait in kilogram (kg)
- m_2 is de massa van voorwerp 2 waaromheen voorwerp 1 draait in kilogram (kg)
- r is de afstand tussen de zwaartepunten van beide massa's in meter (m)
- v is de baansnelheid van voorwerp 1 in meter per seconde (m/s)

Als we bovenstaande formule combineren met $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$ dan vinden we een formule die door Johannes Kepler (Duitsland, 1571 – 1630) is gebruikt om de afstanden van de planeten tot de zon te berekenen en bekend staat als de **derde wet van Kepler**:

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot m_2}{4\pi^2}$$

BEWIJS

- $F_G = F_{\text{mpz}} \rightarrow G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \frac{m_1 \cdot v_{\text{baan}}^2}{r} \rightarrow G \cdot \frac{m_2}{r} = v_{\text{baan}}^2$
- $v_{\text{baan}} = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow v_{\text{baan}}^2 = \frac{4\pi^2 \cdot r^2}{T^2}$
- $G \cdot \frac{m_2}{r} = \frac{4\pi^2 \cdot r^2}{T^2} \rightarrow \frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot m_2}{4\pi^2}$

VOORBEELD de massa van de zon

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

Bereken de massa van de zon.

- $\frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot m_{\text{zon}}}{4\pi^2}$
- $m_{\text{zon}} = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot T^2}$
- $m_{\text{zon}} = \frac{4\pi^2 \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^3}{G \cdot (365,256 \cdot 24 \cdot 3600)^2} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

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 zich boven de evenaar bevinden, 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 kunnen we met de 3^e wet van Kepler berekenen.

$$3^{\text{e}} \text{ wet van Kepler: } \frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot m_{\text{aarde}}}{4\pi^2}$$

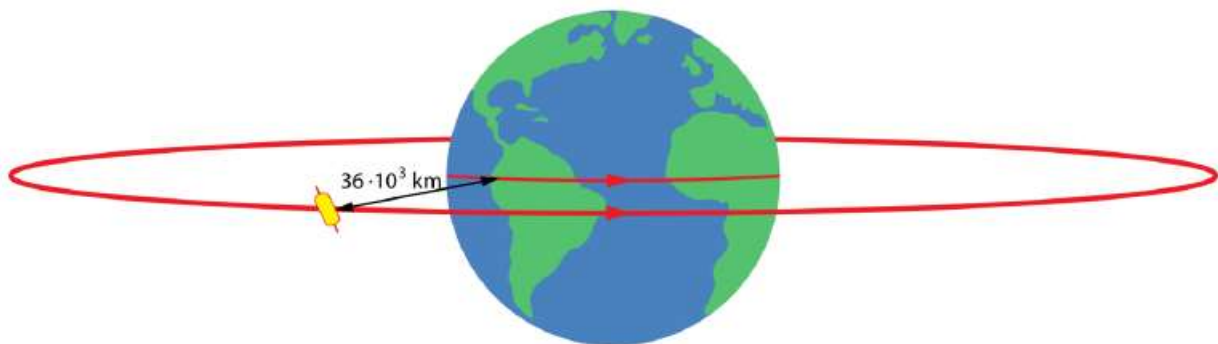
$$T = 24 \text{ h} = 24 \cdot 60 \cdot 60 = 86400 \text{ s}^* \quad \text{waaruit volgt: } r = 4,2237 \cdot 10^7 \text{ m}$$

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

$$h_{\text{geostationair}} = 4,2237 \cdot 10^7 - 6,378 \cdot 10^6 = 3,5866 \cdot 10^7 \text{ m} = 35.866 \text{ km}$$

* 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 uur, 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 radio-signalen uit die je met een schotelantenne kunt ontvangen. Momenteel zijn er vijf ASTRA satellieten in bedrijf. 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 zeer lage hoogte rondjes om de aarde draaien. De dampkring heeft een dikte van ongeveer 40 km en op 100 km hoogte is er daarom vrijwel geen luchtweerstand. Omdat 100 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.

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot m_{\text{aarde}}}{4\pi^2} \quad \text{met } r = 6,378 \cdot 10^6 \text{ m} \quad \text{volgt } T = 5066 \text{ s} \quad (1\text{h} : 24 \text{ min} : 26 \text{ s})$$

Gaan we uit van een cirkelvormige baan met straal r dan vinden we voor de snelheid:

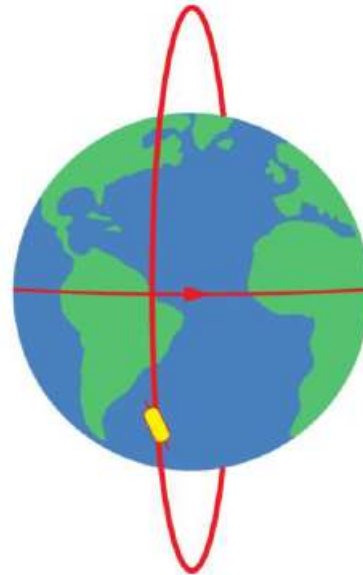
$$v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow v = \frac{2\pi \cdot 6,378 \cdot 10^6}{5066} \rightarrow v = 7,91 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

De snelheid van 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 Noord- en Zuidpool. Ze staan niet op een vaste plaats boven het aardoppervlak maar hebben een lage baan van bijvoorbeeld 400 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.



Figuur 35

Een polaire satelliet draait met een korte omlooptijd om de polen. De aarde draait er onder, zodat het hele aardoppervlak kan worden waargenomen.

Ontsnappingssnelheid

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 heet de **ontsnappingssnelheid**. Als de beginsnelheid groter is dan de ontsnappingssnelheid raakt het los van de aarde

en komt het niet meer terug. De ontsnappingssnelheid kun je met de volgende formule berekenen.

$$v_{\text{ontsnap}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot m_2}{r}}$$

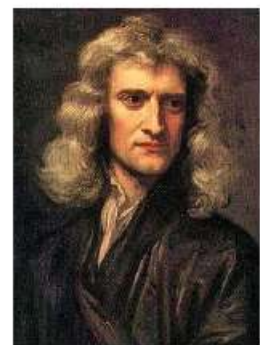
- v_{ontsnap} is de ontsnappingssnelheid in meter per seconde (m/s)
- G is de gravitatieconstante: $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- m_2 is de massa van het hemellichaam (de aarde) in kilogram (kg)
- r is de afstand tot het middelpunt van dit hemellichaam in meter (m)

Vullen we alle gegevens in dan vinden we voor de aarde: $v_{\text{ontsnap}} = 11,182 \text{ km/s}$ (ongeveer 40000 km/h). De ontsnappingssnelheid wordt bepaald door de verhouding tussen de massa en de straal en is voor ieder hemellichaam anders.

Hemellichaam	Ontsnappingssnelheid
Aarde	11,2 km/s
Maan	2,38 km/s
Jupiter	59,5 km/s
Zon	600 km/s
zwart-gat	meer dan de lichtsnelheid

De wetten van Kepler

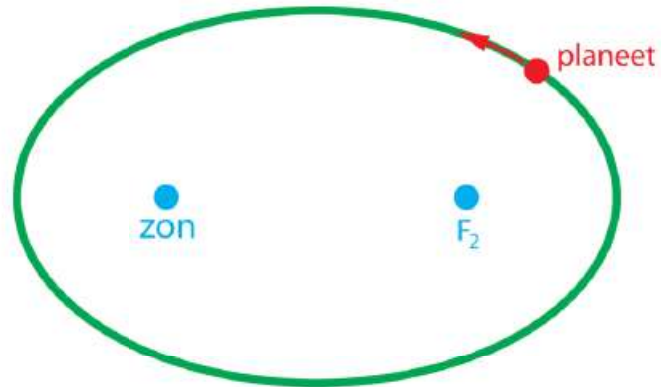
Het werk van Newton is gebaseerd op de ontdekkingen van drie grote voorgangers. Nicolaas Copernicus (Polen, 1473 – 1543) beweert in zijn boek: *Revolutionibus Orbium Coelestium* (over de omwentelingen van de hemellichamen) uit 1543 dat niet de aarde maar de zon in het middelpunt van het zonnestelsel staat. Galileo Galilei (Italië, 1564 – 1642) is het roerend met Copernicus eens en gaat hierover de confrontatie met de kerk aan. Johannes Kepler (Duitsland, 1571 – 1630) is een tijdgenoot van Galileo 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. Tien jaar later, in 1619, publiceert hij zijn derde wet.



Figuur 36 Van links naar rechts: Nicolaas Copernicus, Galileo Galilei, Johannes Kepler en Isaac Newton.

Kepler wet 1: over de vorm van de planeetbaan

De baan van iedere planeet is een ellips met de zon in één van de brandpunten.

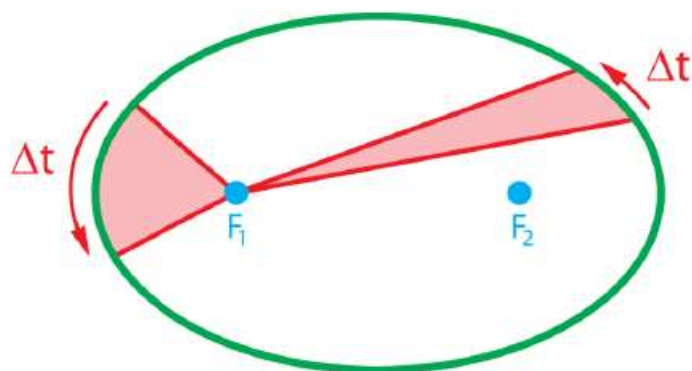


Figuur 37
Kepler's 1^e wet stelt dat planeten in ellipsvormige banen om de zon bewegen.

Een planeet heeft geen constante snelheid. Dicht bij de zon is de snelheid groter dan wanneer de planeet op grotere afstand staat. De tweede wet van Kepler legt de verhoudingen vast tussen de snelheid van een planeet en de afstand tot de zon.

Kepler wet 2: over de snelheid waarmee de baan wordt doorlopen (perkenwet)

Een lijn die de planeet met de zon verbindt doorloopt per tijdseenheid een oppervlakte van gelijke grootte.



Figuur 38
Kepler's 2^e wet stelt dat in tijdsinterval Δt een planeet een zodanige afstand aflegt dat de verbindingslijn tussen de zon, hier in F₁, en de planeet hetzelfde oppervlak (rood) doorloopt.

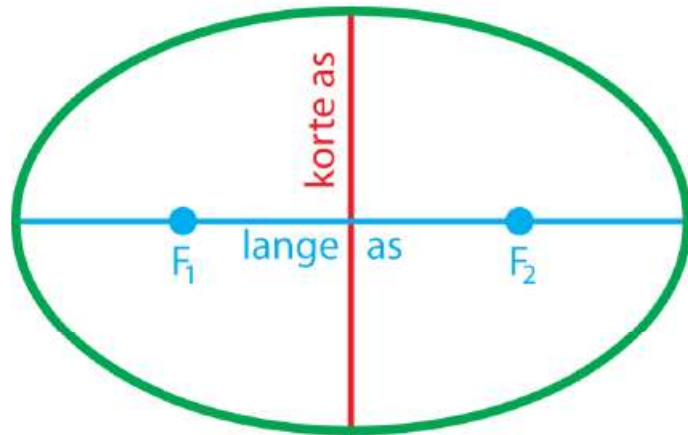
Omdat de lange en de korte as voor de planeten bijna dezelfde waarde hebben mogen we de planeetbanen bij benadering opvatten als cirkels met een straal r gelijk aan de helft van de lange (en korte) as. We vinden dan de volgende formule voor de omlooptijd T waarin het getal k voor iedere planeet dezelfde waarde heeft.

$$T^2 = k \cdot r^3$$

Kepler wet 3: over de relatie tussen de omlooptijd en de vorm van de ellipsbaan

Het kwadraat van de omlooptijd van een planeet is recht evenredig met de derde macht van de halve lange as van de ellipsbaan.

Figuur 39
Kepler's 3^e wet legt het verband
tussen de lengte van de helft
van de lange as en de
omlooptijd.



12.5 Informatie uit de ruimte

Kijken vanaf de aarde met een lichttelescoop

Vanaf de aarde kan licht uit de ruimte worden waargenomen. In de oudheid gebeurde dit met het blote oog. In 1608 is in Nederland de telescoop (Hollandse Kijker) uitgevonden. Galileo Galilei (Italië, 1564 – 1642) verbetert de telescoop en richt hem naar de hemel. In januari 1610 ontdekt hij hiermee de vier grootste manen van Jupiter. Vanaf dat moment is in Europa de belangstelling voor de sterrenkunde gewekt. Christiaan Huygens (Nederland, 1629 – 1695) ontdekt met de door hem gebouwde telescoop de ringen en de manen van Saturnus. Isaac Newton realiseert zich dat je voor een goede telescoop beter spiegels dan lenzen kunt gebruiken en bouwt in 1668 de eerste spiegeltelescoop. Op veel plaatsen worden telescopen opgesteld om de hemel te bestuderen. In 1633 krijgt de universiteit van Leiden zijn eerste sterrenwacht. De sterrenwacht die nu nog in Leiden te bezichtigen is komt uit 1861.



Figuur 40
Sterrenwacht in Leiden uit
1861.

Tegenwoordig worden sterrenwachten, vanwege de storende lichtvervuiling, niet meer in bewoond gebied gebouwd. Een aantal Europese landen, waaronder Nederland, hebben de **European Southern Observatory (ESO)** opgericht. De belangrijkste sterrenwachten van deze organisatie bevinden zich in 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 hulpteleoscopen. 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 deze acht telescopen kunnen met een ingewikkeld stelsel van spiegels worden gecombineerd, waardoor de resolutie toeneemt tot een paar duizendste van een boogseconde. Lichtstralen die met een hoek van een miljoenste graad op aarde komen kunnen door de VLT telescoop van elkaar worden onderscheiden. Dat is zoiets als het van elkaar onderscheiden van beide koplampen van een auto op de afstand van de maan.

Figuur 41
De door ESO
vervaardigde Very
Large Telescope
bevindt zich 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 afstand van de VLT en wordt naar verwachting in 2024 in gebruik genomen.

Figuur 42
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 1933 dat er door het centrum van de Melkweg radiostralen worden uitgezonden. Deze ontdekking is het begin van de radio-astronomie, waarmee veel nieuwe informatie beschikbaar is gekomen.

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 waar-nemingen te doen kan een telescoop met een diameter van 2,7 km worden nagebootst. De antennes zijn gevoelig voor radiogolven tussen 350 MHz (golflengte 92 cm) en 8,3 GHz (golflengte 3,6 cm).



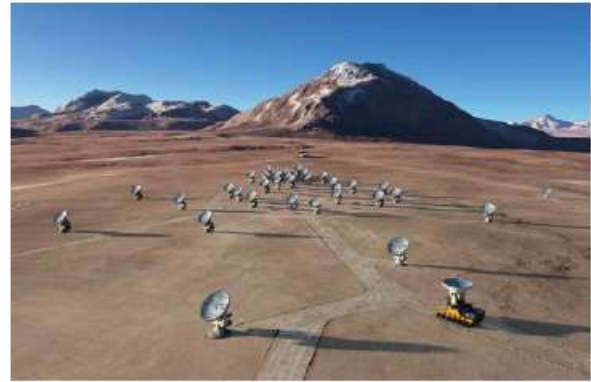
Figuur 43
Radiotelescoop in
Westerbork,
Drenthe.

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.



Figuur 44 Very Large Array (VLA) radiotelescoop in New Mexico, Verenigde Staten.

In de Atacama woestijn in Chili bevindt zich de ALMA microgolven telescoop. ALMA is een samenwerking tussen Europa, Noord Amerika, Oost Azië en Chili. De ALMA telescoop bestaat uit 66 antennes van 12 en 7 meter diameter met een golflengte-bereik van 0,3 tot 9,6 mm. De antennes zijn verplaatsbaar over 150 meter tot 16 km.



Figuur 45 Microgolven-telescoop ALMA in Chili.

Ruimtetelescopen

Om de storende invloed van de atmosfeer uit te schakelen zijn er in de afgelopen jaren telescopen in de ruimte gebracht. Deze telescopen bestrijken een groot deel van het elektromagnetisch spectrum. Een aantal belangrijke telescopen die op dit moment in gebruik zijn vind je hieronder.

Radiostraling wordt waargenomen met de RadioAstron telescoop (2011, Rusland).

Microgolven worden waargenomen met de Planck telescoop (2009, ESA).

Infraroodstraling wordt waargenomen met de Spitzer Space Telescope (2003, NASA), de Wide-field Infrared Survey Explorer (2010, NASA) en de Herschel telescoop (2009, ESA).

Zichtbaar licht wordt waargenomen met de Hubble telescoop (1990, NASA en ESA) met de Solar and Heliospheric Observatory (1995, NASA en ESA), met de Kepler Space Observatory (2009, NASA) en met de GAIA missie (2013, ESA).

Ultraviolet licht wordt waargenomen met de telescopen GALEX (2003, NASA) en STEREO (2006, NASA).

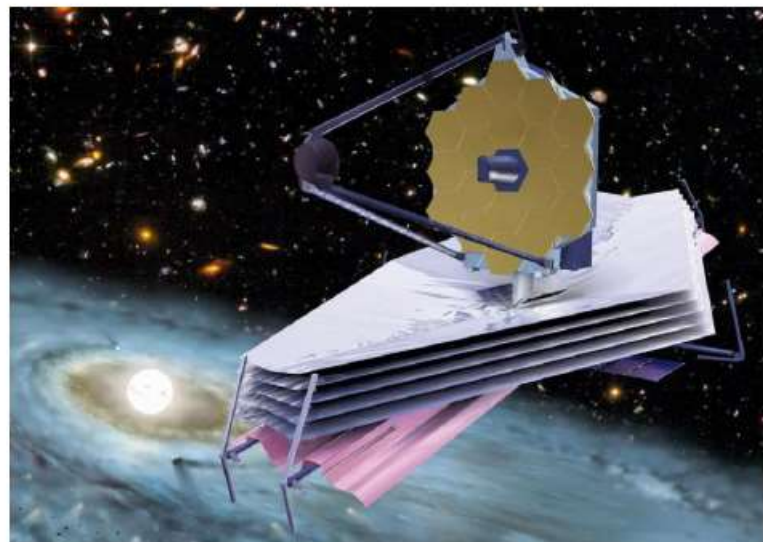
Röntgenstraling wordt waargenomen met Chandra X-Ray Observatory (1999, NASA), de XMM Newton (1999, ESA), Hinode (2006, Japan) en Hitomi (2016, Japan).

Gammastraling wordt waargenomen met de INTEGRAL telescoop (2002, ESA), de Swift (2004, NASA, Italië, Verenigd Koninkrijk) en de Fermi Gamma-ray Space Telescope (2008, NASA).



Figuur 46
Hubble ruimtetelescoop.

De Hubble telescoop wordt in 2018 opgevolgd door de **James Webb ruimte-telescoop (JWST)**. Het is een samenwerkingsproject van NASA en ESA. 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. De JWST werkt in het infrarode gebied met golflengtes tussen 0,6 en 28,5 μm .

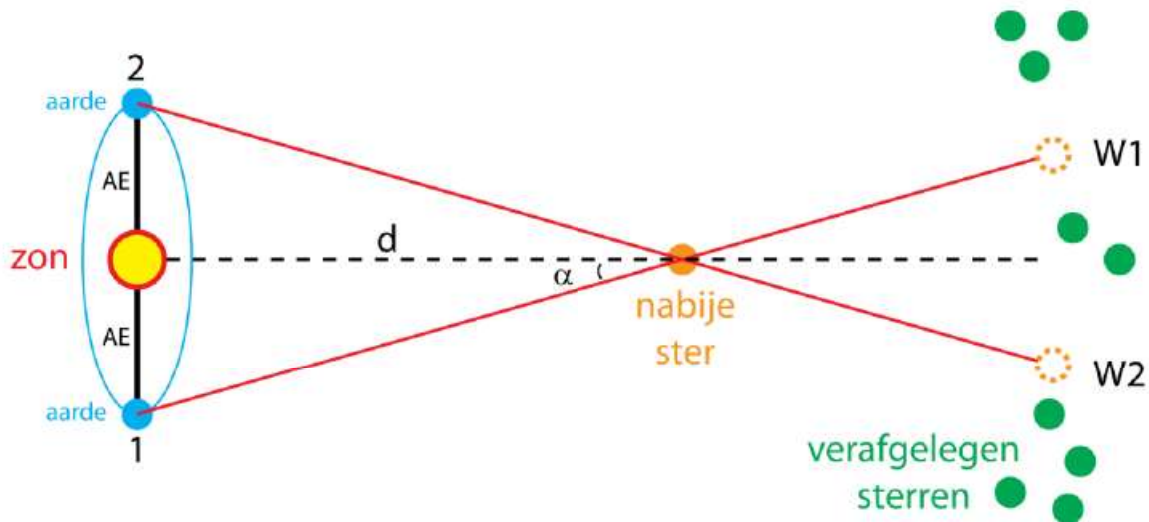


Figuur 47
De James Webb ruimte-telescoop wordt in 2018 in een baan om de zon gebracht.

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 48. 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 48 De afstand van een nabije ster meten met behulp van parallax.

De gemiddelde afstand van de aarde tot de zon is $1,496 \cdot 10^{11}$ meter. Deze afstand wordt de **astronomische eenheid** AE genoemd.

De astronomische eenheid AE is $1,496 \cdot 10^{11}$ meter.

Eén lichtjaar is 63241 astronomische eenheden.

Eén graad heeft 60 boogminuten en een boogminuut heeft 60 boogseconden. Een parallaxhoek α van één boogseconde is $1/3600$ deel van één graad.

Meet je een parallaxhoek van 1 boogseconde dan kun je de afstand d tussen de nabije ster en de zon uitrekenen.

- $\tan \alpha = \frac{1,496 \cdot 10^{11}}{d}$
- $d = \frac{1,496 \cdot 10^{11}}{\tan(1/3600)} \rightarrow d = 3,085678 \cdot 10^{16} \text{ m}$

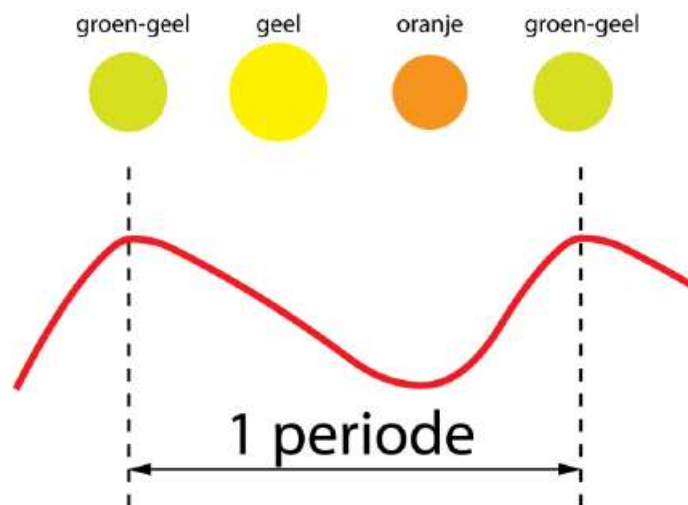
De afstand die een parallaxhoek van één boogseconde geeft bij een meetafstand van één astronomische eenheid wordt een **parsec** genoemd. Een parsec is 3,261564 lichtjaar.

Eén parsec is $3,085678 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,261564 \text{ lichtjaar}$.

Een moderne telescoop op aarde heeft een nauwkeurigheid van ongeveer 0,01 boogseconde. Met de parallaxmethode kunnen afstanden tot 100 parsec (326 lichtjaar) worden gemeten. 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 zon 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 24 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 Cepheïden-methode 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.



Figuur 49
Periodieke variatie in
lichtintensiteit en kleur van een
Cepheïde ster.

Omstreeks 1910 ontdekt de Amerikaanse astronoom Henrietta Leavitt de relatie tussen de pulsperiode en de lichtintensiteit (helderheid). Ze gebruikt hiervoor de Cepheïden die zich in de Kleine Magelhaense Wolk bevinden. Dit is een klein sterrenstelsel dat zich in de buurt van de Melkweg bevindt en vanaf de aarde alleen vanaf het zuidelijk halfrond zichtbaar is. De Kleine Magelhaense Wolk staat op 197.000 lichtjaar afstand en heeft een diameter van 7000 lichtjaar. In dit dwergsterrenstelsel staan de Cepheïden dicht bij elkaar, zodat de waargenomen lichtintensiteit niet wordt beïnvloed door het verschil in afstand. Voor Cepheïden is er een verband tussen de periode en de lichtintensiteit: hoe langer de periode hoe groter de lichtintensiteit. Door deze relatie te kijken aan Cepheïden, waarvan de afstand met de

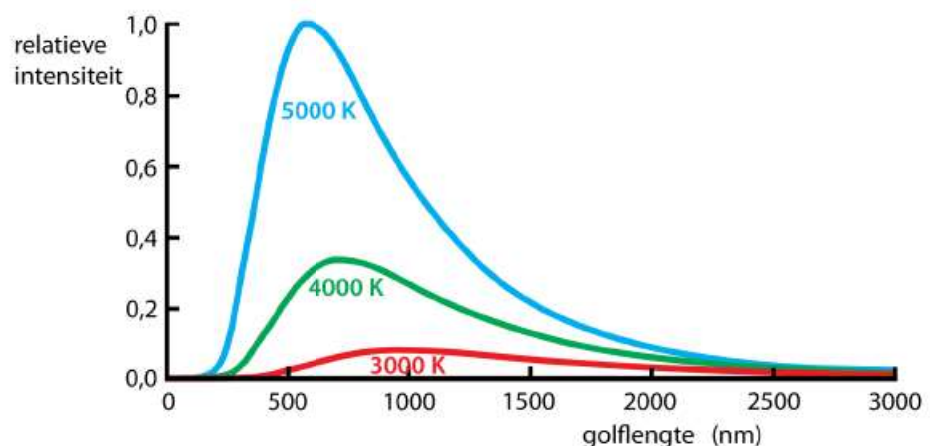
parallaxmethode kan worden bepaald, heeft Henrietta Leavitt een formule gevonden waarmee je uit de pulsperiode de lichtintensiteit kunt berekenen. Door van een Cepheïde de intensiteit van het licht én de pulsperiode te meten kun je met deze formule de afstand tussen de aarde en de Cepheïde berekenen.

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 de 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 met behulp van de Hubble ruimtetelescoop 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 relatief veel infrarode straling uitgezonden. Wordt de temperatuur hoger dan verschuift het uitgestraalde spectrum naar kortere golflengtes met een blauwe kleur. In figuur 50 zie je de uitgestraalde spectra bij verschillende temperaturen.

Figuur 50
Elektromagnetische straling. Naarmate de temperatuur toeneemt, wordt de hoeveelheid straling groter en schuift het de uitgezonden kleur van rood naar blauw.



De golflengte van de straling die 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.

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

- $\lambda_{\max}$ is de golflengte waarbij de intensiteit van de uitgezonden straling maximaal is in meter (m)
- k_W is de constante van Wien: $2,897756 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}$
- T is de temperatuur in kelvin (K)

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

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

- P is de uitgestraalde energie per seconde (het vermogen) in watt (W)
- A is de oppervlakte in vierkante meter (m²)
- σ is $5,67056 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ = de constante van Stefan-Boltzmann
- T is de temperatuur in kelvin (K)

Omdat sterren bolvormig zijn geldt:

$$A = 4\pi \cdot r^2$$

- A is de oppervlakte in vierkante meter (m²)
- r is de straal in meter (m)

Uit golflengte waarbij de lichtintensiteit maximaal is kan met de wet van Wien de oppervlaktetemperatuur van een ster worden berekend. Zijn deze temperatuur én de straal van de ster bekend dan kan met de wet van Stefan-Boltzmann de uitgestraalde energie per seconde worden berekend. Dit is het **stralingsvermogen P** van een ster.

Het stralingsvermogen P van een ster is de hoeveelheid stralings-energie die een ster per seconde uitzendt.

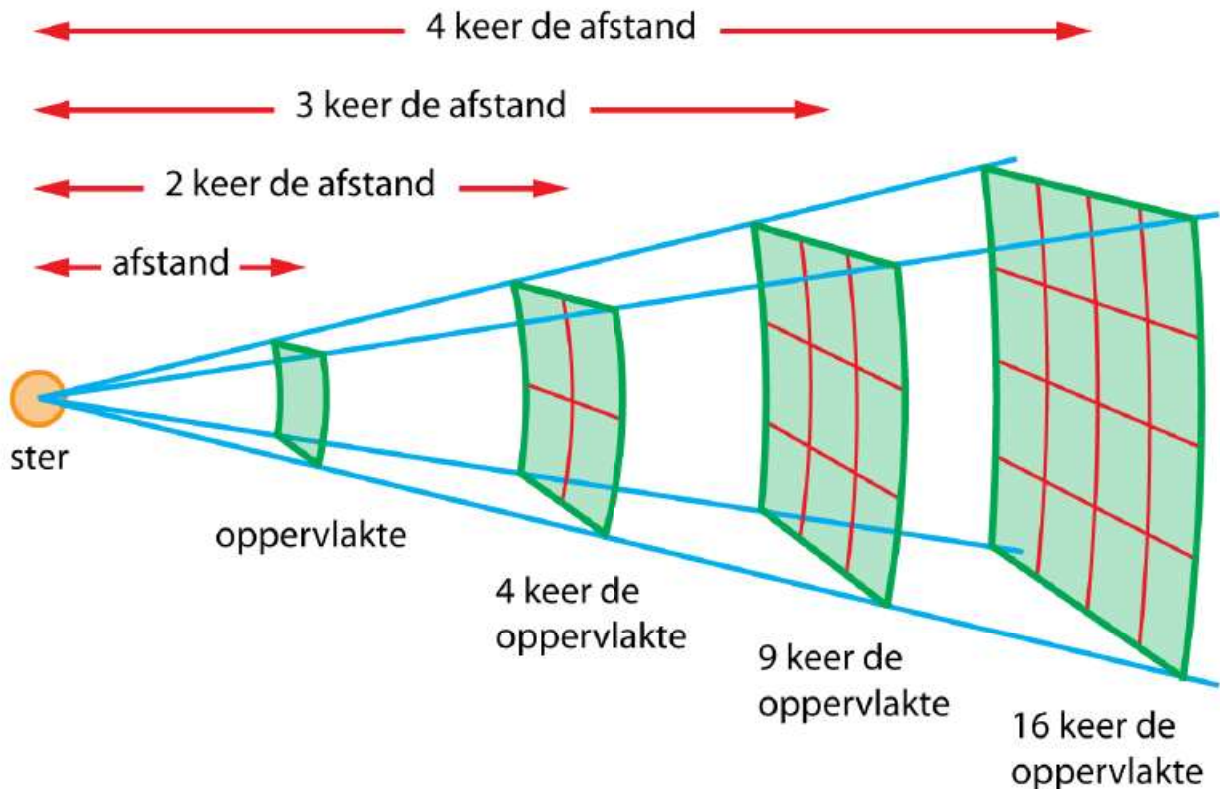
De eenheid van stralingsvermogen is watt (W)

De helderheid van sterren

De helderheid waarmee je een ster aan de hemel ziet hangt af het uitgestraalde vermogen én van de afstand van de ster.

– afstand –

Stel dat een ster twee keer zo ver weg zou staan dan komt er vier keer minder licht op aarde. Staat de ster 4 keer zo ver weg dan komt er 16 keer minder licht op aarde. De helderheid van een ster neemt af met het kwadraat van de afstand. Dit meetkundige verband is een **omgekeerde kwadratenwet**. Het geeft aan dat een grootheid omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand. Zie figuur 51.



Figuur 51 De omgekeerde kwadratenwet. Als de afstand x -keer groter wordt neemt de intensiteit met $1/x^2$ af.

– **straal** –

Als de straal van een ster twee keer zo groot is dan is de oppervlakte vier keer zo groot en zendt de ster vier keer zoveel licht uit. De helderheid van een ster neemt toe met het kwadraat van de straal.

De helderheid van een ster neemt af met het kwadraat van de afstand.

De helderheid van een ster neemt af met het kwadraat van de straal.

In figuur 52 zie je de invloed van de straal van een ster op de waargenomen helderheid.



Figuur 52 De helderheid waarmee een ster wordt waargenomen neemt af met het kwadraat van de straal van de ster.

De intensiteit van licht

In plaats van helderheid is het beter om te spreken over de intensiteit. Hiermee bedoel je de hoeveelheid ontvangen lichtenergie per seconde per vierkante meter.

Lichtintensiteit is hoeveelheid ontvangen lichtenergie per seconde per vierkante meter wordt uitgedrukt in watt per vierkante meter (W / m^2).

Op aarde ontvangen we van loodrecht invallend zonlicht een lichtintensiteit van 1368 W/m^2 . Dit noemen we de **zonneconstante**. Hoe verder een planeet van de zon afstaat, hoe kleiner zijn zonneconstante is.

VOORBEELD het stralingsvermogen 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 1368 W/m^2 .

Bereken het stralingsvermogen van de zon.

- A is de oppervlakte van de denkbeeldige bol om de zon met een straal van $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- $A = 4\pi \cdot r^2$
- $A = 4\pi \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^2 = 2,812374 \cdot 10^{23} \text{ m}^2$
- door iedere m^2 gaat een vermogen van 1368 watt
- het stralingsvermogen van de zon is $1368 \cdot 2,812374 \cdot 10^{23} = 3,847 \cdot 10^{26} \text{ W}$

De grootte van een ster bepalen

Om de grootte van een ster te bepalen ga je als volgt te werk.

- meet de afstand met de parallaxmethode
- meet welke golflengte het meest wordt uitgezonden
- bereken de temperatuur van het oppervlak van de ster
- bereken de uitgestraalde vermogen per vierkante meter
- meet de ontvangen energie per seconde per m^2 , dit is intensiteit van het licht
- vermenigvuldig de ontvangen lichtintensiteit met $4\pi \cdot r^2$ met r de afstand tot de ster
- bereken de oppervlakte van de ster (*uit het vermogen en het vermogen per m^2*)
- bereken de straal van de ster

VOORBEELD de grootte van de zon

Pas bovenstaande procedure toe op de zon.

- parallaxmethode → afstand tussen de aarde en de zon is $1,496 \cdot 10^{11}$ m
- zon zendt het meeste licht uit bij $\lambda = 501$ nm
- wet van Wien → $\lambda_{\max} = \frac{k_W}{T}$ met $k_W = 2,897756 \cdot 10^{-3}$ K m
- $T = \frac{2,897756 \cdot 10^{-3}}{501 \cdot 10^{-9}} = 5784$ K
- wet van Stefan-Boltzmann → $P = \sigma \cdot A \cdot T^4$ met $\sigma = 5,67056 \cdot 10^{-8}$ W·m⁻²·K⁻⁴
- $P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \rightarrow P = 5,67056 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot 5784^4 = 6,34657 \cdot 10^7 \cdot A$
- de aarde ontvangt 1368 W/m²
- het stralingsvermogen van de zon is $1368 \cdot 2,812374 \cdot 10^{23} = 3,84733 \cdot 10^{26}$ W (zie vorige voorbeeld)
- $3,84733 \cdot 10^{26} = 6,34657 \cdot 10^7 \cdot A \rightarrow A = 6,062058 \cdot 10^{18}$ m²
- $A = 4\pi \cdot r^2$
- $6,062058 \cdot 10^{18} = 4\pi \cdot r^2 \rightarrow r = 6,9455256 \cdot 10^8 = 6,946 \cdot 10^8$ m

De temperatuur van een planeet

Omdat een planeet stralingsenergie van een ster ontvangt heeft de planeet een bepaalde temperatuur. Bij deze temperatuur straalt de planeet zelf ook elektromagnetische straling uit. De temperatuur van een planeet is stabiel als de geabsorbeerde stralingsenergie gelijk is aan de uitgezonden stralingsenergie.

De planeet wordt bestraald met een hoeveelheid stralingsenergie per seconde per vierkante meter. Van deze stralingsenergie wordt een deel gereflecteerd. Het percentage gereflecteerd licht is de **albedo** van de planeet. Zo heeft de aarde een albedo van ongeveer 38%. Het licht wat niet wordt gereflecteerd wordt geabsorbeerd. De totale hoeveelheid geabsorbeerde energie per seconde vind je door de geabsorbeerde energie per m² te 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 52.

Nu je de hoeveelheid geabsorbeerde stralingsenergie van de planeet weet stel je dit gelijk aan de hoeveelheid uitgestraalde energie. Hierbij gebruik je de wet van Stefan-Boltzmann: $P = \sigma \cdot A \cdot T^4$. Omdat de planeet naar alle kanten uitstraalt is de oppervlakte in deze formule het oppervlakte van een bol: $A = 4\pi \cdot r^2$. In het onderstaande voorbeeld gaan we dit toepassen op de aarde.

VOORBEELD de temperatuur van de aarde

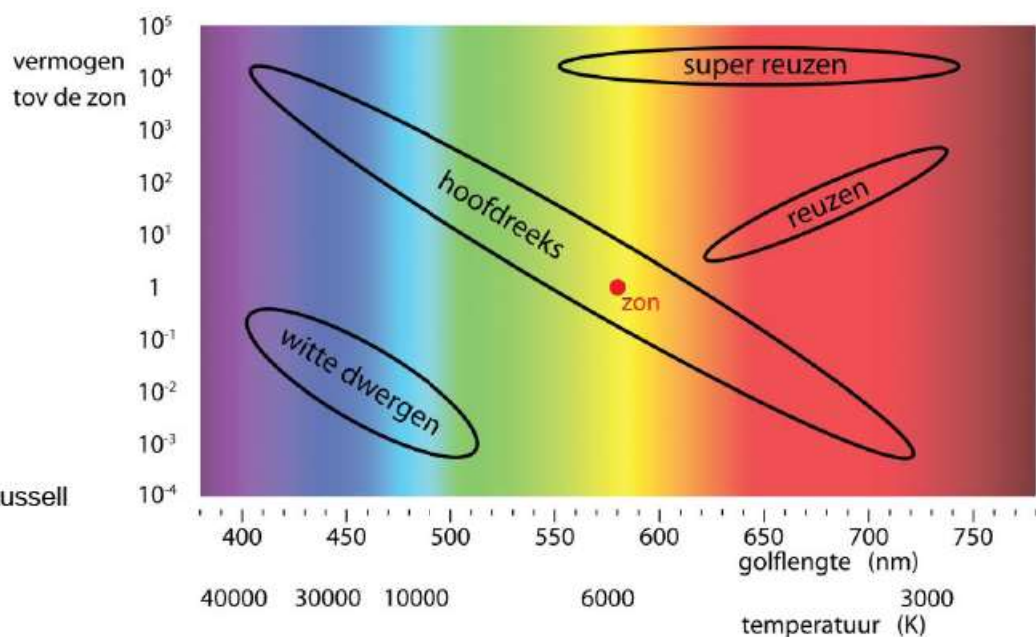
De aarde ontvangt per vierkante meter 1368 W stralingsenergie van de zon. Hiervan wordt 30% gereflecteerd en 70% geabsorbeerd. De geabsorbeerde energie wordt door de buitenste laag van de dampkring uitgezonden in de ruimte.

Bereken de temperatuur van de buitenste laag van de dampkring van de aarde.

- 70% van 1368 W/m² wordt geabsorbeerd → $0,7 \cdot 1368 = 957,6 \text{ W/m}^2$
- frontaal oppervlakte is $A = \pi \cdot r^2$ met r de straal van de aarde
- $A = \pi \cdot (6,371 \cdot 10^6)^2 = 1,275161 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$
- geabsorbeerd vermogen $P = 957,6 \cdot 1,275161 \cdot 10^{14} = 1,221094 \cdot 10^{17} \text{ W}$
- uitgestraald vermogen $P = \sigma \cdot A \cdot T^4$
- $A = 4\pi \cdot r^2$ met r de straal van de aarde
- $A = 4\pi \cdot (6,371 \cdot 10^6)^2 = 5,100645 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$
- geabsorbeerd vermogen = uitgestraald vermogen
- $1,221094 \cdot 10^{17} = 5,67056 \cdot 10^{-8} \cdot 5,100645 \cdot 10^{14} \cdot T^4$
- $T^4 = 4,270728 \cdot 10^9 \rightarrow T = 255,638 = 256 \text{ K}$

Hertzsprung-Russell-diagram

Om de grootte van een ster te berekenen heb je de afstand nodig. De GAIA ruimtetelescoop is speciaal ontworpen om de afstand van meer dan een miljard sterren te bepalen. Weet je de afstand, de temperatuur en de op aarde ontvangen lichtintensiteit van een groot aantal sterren, dan kun je een Hertzsprung-Russell-diagram maken.



Figuur 53
Hertzsprung-Russell
diagram.

Bij een Hertzsprung-Russell-diagram (HR-diagram) staat op de horizontale as de **temperatuur** van de oppervlakte van een ster en op de verticale as het **vermogen** (de hoeveelheid lichtenergie die de ster per seconde uitstraalt). 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. De meeste sterren bevinden zich in een gebied dat van linksboven naar rechtsonder loopt. Deze sterren behoren tot de **hoofdreks**. Rechts van de hoofdreks bevindt zich een groep die de **reuzen** worden genoemd. Daarboven bevinden zich de **super reuzen**. Linksonder zijn de **witte dwergen** te vinden. Deze verschillende soorten sterren tonen de verschillende levensfasen waarin een ster zich kan bevinden. Een hoofdreksster wordt aan het einde van zijn leven een (rode) reus of een superreus. Na niet al te lange tijd explodeert de reus en blijft zijn kern als witte dwerg bestaan. Hierover leer je verderop meer.

– Hoofdreks –

De wet van Stefan-Boltzmann geeft aan dat sterren met een hoge temperatuur per vierkante meter meer licht uitstralen, $P = \sigma \cdot A \cdot T^4$. Sterren linksboven op de hoofdreks hebben een hoge temperatuur en daarom een grote lichtintensiteit. Sterren rechtsonder op de hoofdreks hebben een lage temperatuur en daarom een kleine lichtintensiteit. Berekenen we de straal van de sterren van de hoofdreks dan zijn de verschillen klein. Alle sterren op van hoofdreks zijn ongeveer even groot, variërend tussen 0,8 en 5 keer de straal van de zon.

– Reuzen –

De reuzen hebben een lage temperatuur en stralen daarom rood licht uit. Omdat ze een groot oppervlak hebben stralen ze veel licht uit. Ze worden daarom ook wel rode reuzen genoemd. De naam rode reus is dus goed te begrijpen, want ze stralen rood licht uit en ze zijn groot. Rode reuzen hebben een straal die 10 tot 50 keer groter is dan die van de zon.

– Superreuzen –

Boven de reuzen bevinden zich in het HR-diagram de superreuzen. Deze sterren hebben meestal ook een vrij lage temperatuur maar stralen desondanks erg veel licht uit. Dit komt vanwege hun enorme afmeting. De straal van een superreus is meer dan 100 keer die van de zon.

– Witte dwergen –

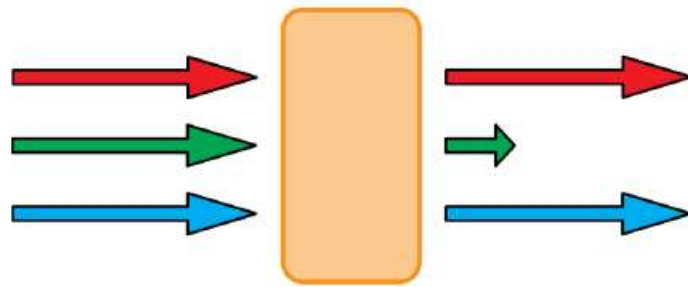
Tegenovergesteld aan de superreuzen zijn de witte dwergen. Deze sterren hebben een hoge temperatuur en stralen toch maar weinig licht uit. Dit komt omdat ze klein zijn. Een temperatuur van een witte dwerg varieert tussen 10.000 en 30.000 kelvin terwijl ze honderd keer minder licht uitstralen dan de zon.

Absorptiespectrum en emissiespectrum van atomen

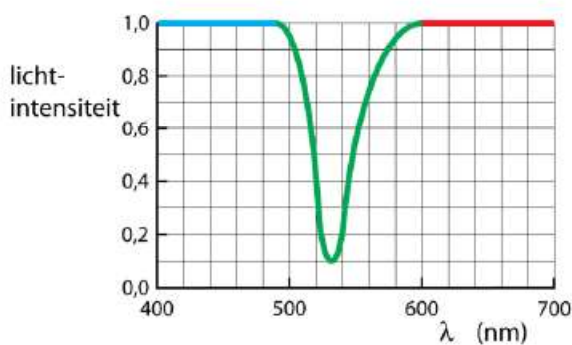
Het **absorptiespectrum** zijn de spectrale lijnen die door een atoom worden opgenomen. Om dit spectrum te verkrijgen wordt het atoom bestraald met een lichtbron waarin alle golflengten aanwezig zijn. Het atoom is alleen in staat fotonen op te nemen die precies de juiste energie hebben. Het licht van de lichtbron verliest hierdoor deze specifieke fotonen waardoor donkere lijnen in het spectrum ontstaan.

Figuur 54

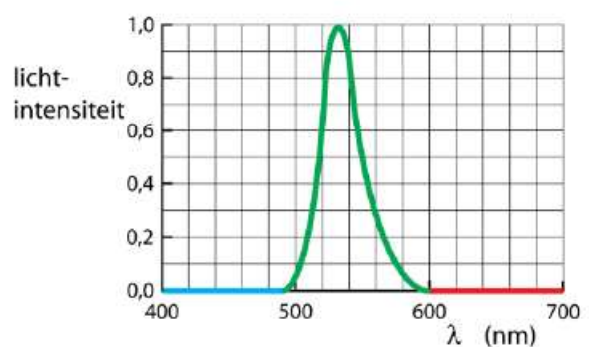
Absorptiespectroscopie.
Het preparaat wordt met rood,
groen en blauw licht (wit licht)
bestraald. Een deel van het
groene licht wordt geabsorbeerd.
Rood en blauw worden niet
geabsorbeerd.



Het **emissiespectrum** is de verzameling van spectrale lijnen die door een atoom worden uitgezonden. Om dit spectrum te verkrijgen moet er eerst energie aan het atoom worden toegevoegd om het in een aangeslagen toestand te brengen. Vervolgens verliest het atoom deze energie door het uitzenden van een foton met een voor het atoom specifieke energie.



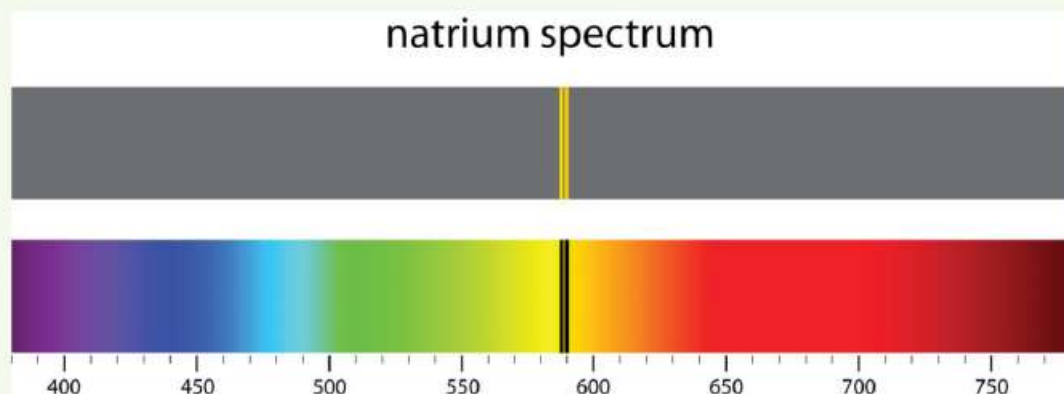
Figuur 55 Absorptiespectrum.
Groen licht wordt geabsorbeerd.
Blauw en rood licht worden doorgelaten.



Figuur 56 Emissiespectrum.
Groen licht wordt uitgestraald.
Blauw en rood licht worden niet uitgestraald.

VOORBEELD natrium atomen

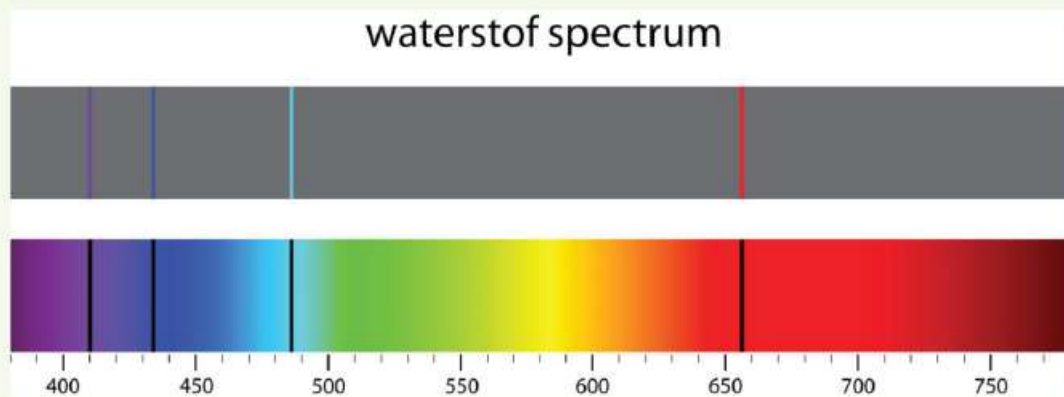
Een gas van natrium atomen bij lage druk heeft een emissiespectrum met twee scherpe lijnen die vlak naast elkaar liggen bij 589 nm en 590 nm. Alleen deze twee golflengten worden geabsorbeerd en uitgezonden. Een lamp met natriumgas geeft oranje/geel licht.



Figuur 57 Emissie- en absorptiespectrum van natrium.

VOORBEELD waterstof atomen

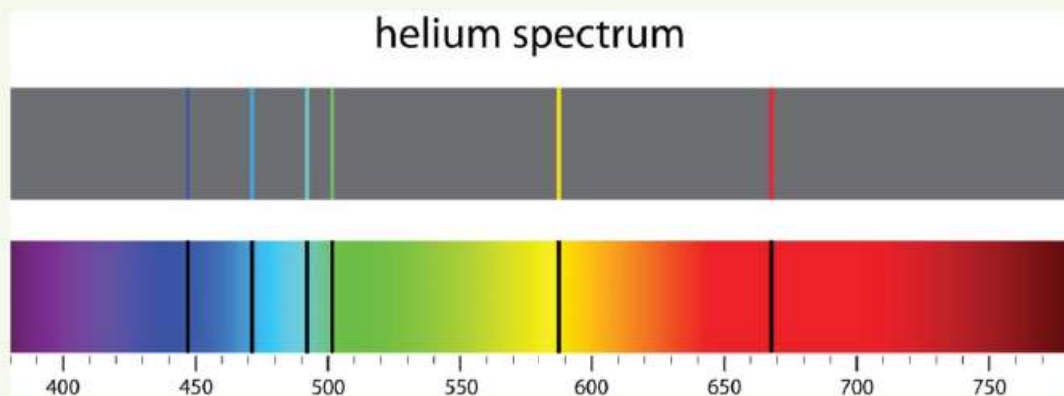
Een gas van waterstof atomen bij lage druk heeft een emissiespectrum met scherpe lijnen bij 410, 434, 486, en 656 nm. Waterstof is het meest voorkomende element in het heelal.



Figuur 58 Emissie- en absorptiespectrum van waterstof.

VOORBEELD helium atomen

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



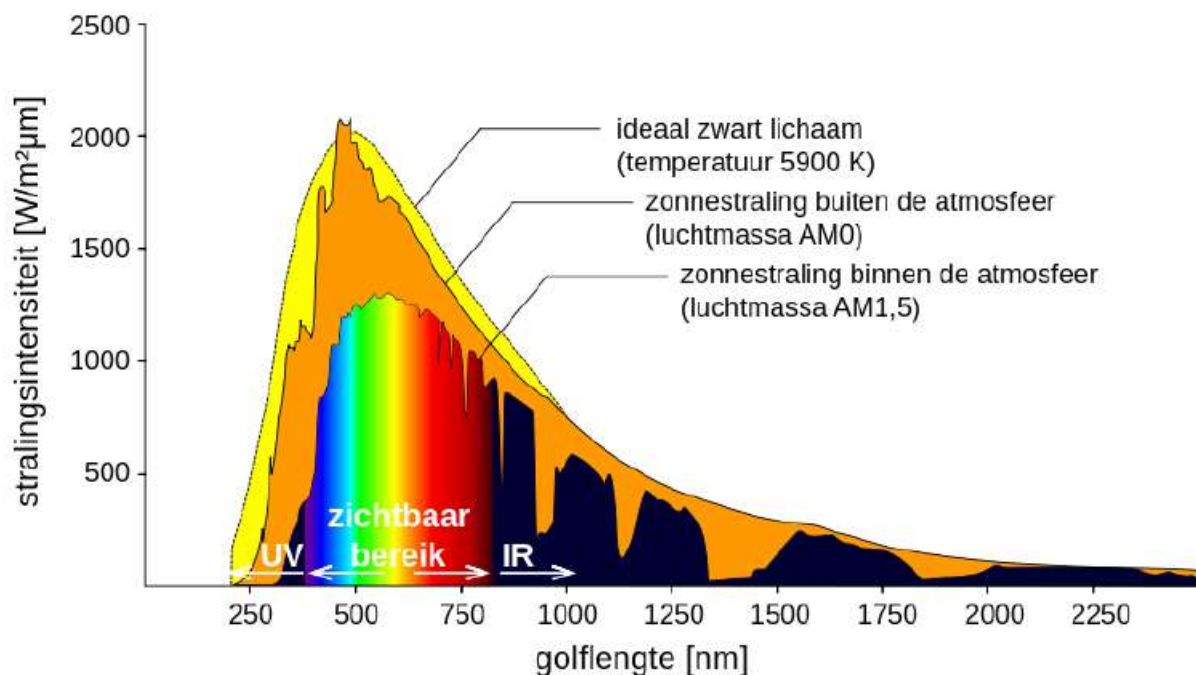
Figuur 59 Emissie- en absorptiespectrum van helium.

De chemische samenstelling van sterren en nevels

Door het emissiespectrum van een ster te meten kun je achterhalen welke chemische 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, CO₂, ozon en andere gassen in de atmosfeer van de aarde de metingen van de emissiespectra beïnvloeden.

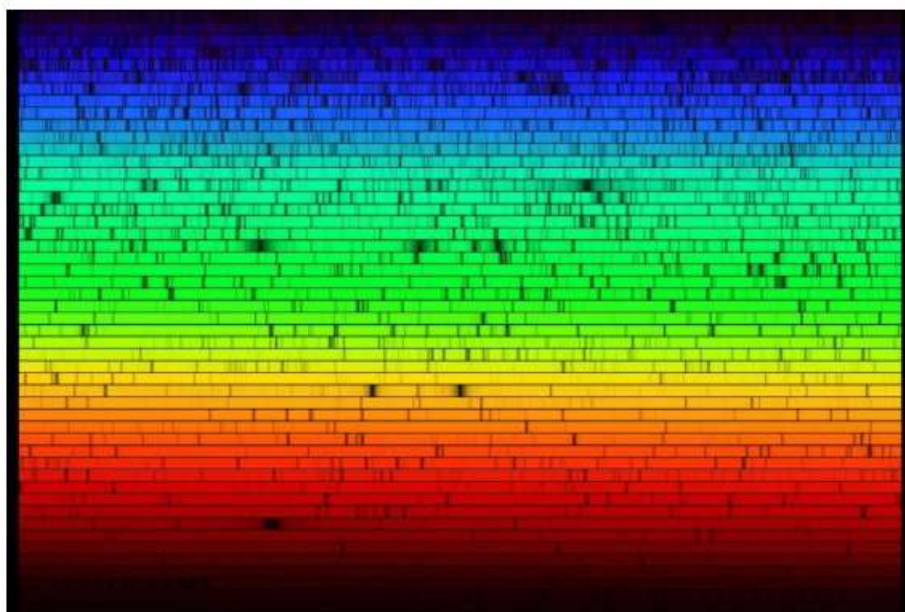
In figuur 60 zie je het spectrum van het licht dat door de zon wordt uitgestraald en wat op de aarde wordt ontvangen. De gele grafiek is het theoretische spectrum van een voorwerp met een temperatuur van 5900 K. Het oranje spectrum is de straling zoals buiten de atmosfeer van de aarde wordt waargenomen. Het verschil tussen het oranje en het gele spectrum wordt veroorzaakt doordat zich om de zon een gaswolk bevindt, de **corona**, die een deel van het uitgestraalde zonlicht absorbeert. De door de corona geabsorbeerde golflengtes heet het **Fraunhofer spectrum**, genoemd naar Joseph von Fraunhofer (Duitsland, 1787 – 1826). Het met kleuren aangegeven spectrum is de straling, zoals op het aardoppervlak wordt waargenomen. Het verschil tussen dit spectrum en het oranje spectrum wordt veroorzaakt doordat zich om de aarde een atmosfeer van voornamelijk stikstof, zuurstof, koolstofdioxide en waterdamp bevindt.

Met ruimtetelescopen kan het spectrum van de zon zeer gedetailleerd worden bepaald. In figuur 61 zie je het resultaat. De horizontale banen moet je achter elkaar leggen om een zeer 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 in de zon.



Figuur 60 Spectrum van zonlicht.

Figuur 61
Spectrum van
zonlicht gemeten
in de ruimte. De
horizontale banen
moet je opvatten
als een lange
strook die in
stukken is geknipt.



Tabel 3 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 kan de chemische samenstelling worden bepaald. Wat hierbij naar voren komt is dat de chemische elementen, zoals wij op aarde kennen, overal in de ruimte voorkomen. Verder is een belangrijke constatering dat elders in de ruimte geen elementen voorkomen die we op aarde niet kennen. De conclusie is daarom dat het **periodiek systeem der elementen** universeel is. Deze verzameling elementen zijn niet alleen de bouwstenen van wat zich op aarde bevindt, inclusief alle levende organismen, maar zijn ook de bouwstenen van de kosmos. Een kanttekening is hierbij op zijn plaats. Recente ontdekkingen suggereren dat er naast de ons bekende vormen van materie er ook nog een onbekende vorm bestaat, donkere materie genoemd. Aan het einde van dit hoofdstuk leer je hier meer over.

De atomen van het periodiek systeem komen overal in de ruimte voor.

Snelheid bepalen uit de doppler verschuiving

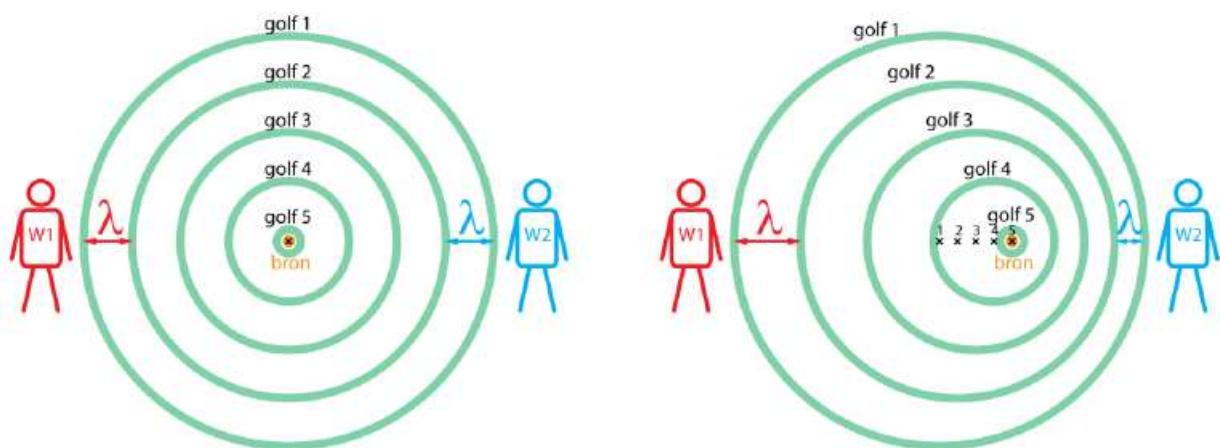
Het dopplereffect is een verschijnsel dat bij golven hoort en dus ook bij elektromagnetische golven. Een golf wordt veroorzaakt door een trillingsbron. De trilling wordt doorgegeven aan de omgeving en verplaatst zich met de golfsnelheid weg van de trillingsbron.

Als de afstand tussen de trillingsbron en de waarnemer niet verandert geldt voor een elektromagnetische golf:

$$\lambda = c \cdot T$$

- λ 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 de situatie anders. In figuur 62 zie je links de situatie met een stilstaande bron en rechts met een bron die ten opzichte van waarnemers W1 (links van de bron) en W2 (rechts van de bron) beweegt. 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 en waarnemer W2 meet een kleinere golflengte. Omdat de lichtsnelheid c gelijk blijft zal de frequentie voor W1 afnemen en voor W2 toenemen. Voor W1 neemt de frequentie af en wordt het licht roder. Voor W2 neemt de frequentie toe en wordt het licht blauwer.



Figuur 62 Het dopplereffect. Links staat de bron stil. Rechts beweegt de bron van waarnemer W1 vandaan en naar waarnemer W2 toe. Waarnemer W1 ziet een grotere golflengte en W2 een kleinere golflengte. Voor W1 verschuift het spectrum naar het rood en voor W2 naar het blauw.

Als de snelheid v_{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.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_{\text{bron}}}{c} \quad (v_{\text{bron}} \ll c)$$

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

- $\Delta\lambda$ is de verandering van de golflengte in meter (m) ($\Delta\lambda = \lambda_w - \lambda_0$)
- λ_0 is de golflengte bij een stilstaande bron in meter (m)
- v_{bron} is de snelheid van de bron in meter per seconde (m/s)
- c is de lichtsnelheid = $2,998 \cdot 10^8$ m/s

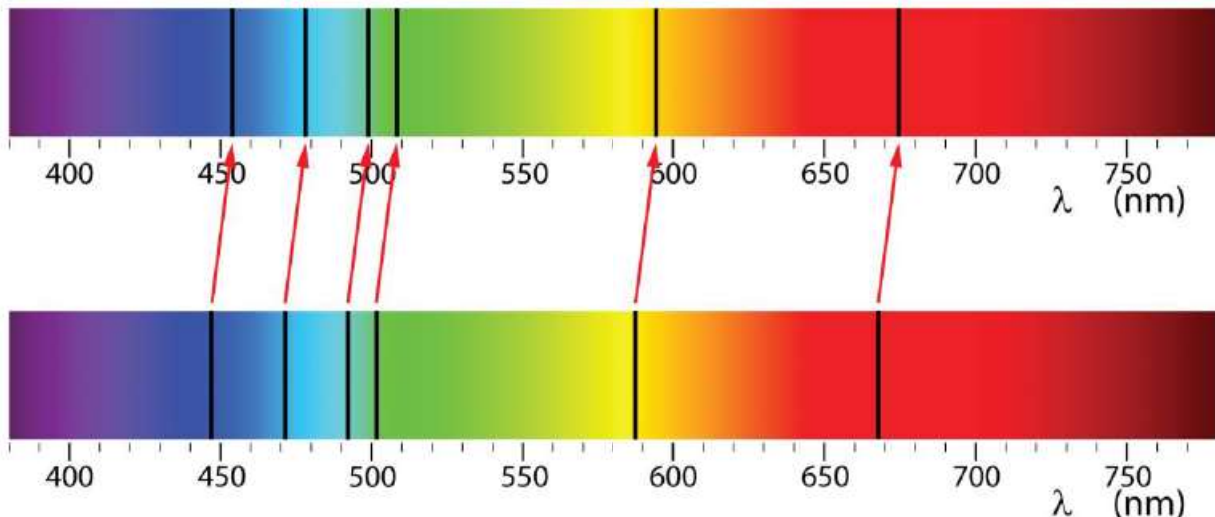
BEWIJS

- de bron beweegt van je vandaan: $\lambda = \lambda_0 + v_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron}} \rightarrow \lambda - \lambda_0 = v_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron}}$
- links en rechts delen door λ_0 geeft $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron}}}{\lambda_0}$
- elektromagnetische golven hebben de lichtsnelheid: $\lambda_0 = c \cdot T_{\text{bron}}$
- $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron}}}{c \cdot T_{\text{bron}}}$ rechts delen door T_{bron} geeft
- $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_{\text{bron}}}{c} \rightarrow \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_{\text{bron}}}{c}$

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.

Ieder atoom zendt elektromagnetische straling uit met een aantal scherpe lijnen. De golflengten van deze lijnen zijn voor alle atomen verschillend. Het licht van een ster bevat de emissielijnen en absorptielijnen van de atomen die zich in de buitenste lagen van de ster bevinden. Door de golflengten van deze lijnen te meten kan niet alleen de chemische samenstelling van een ster worden bepaald maar ook de snelheid van deze ster ten opzichte van de aarde.

In figuur 63 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 een naar het rood verschoven. Hieruit kun je de snelheid berekenen waarmee de ster van de aarde vandaan beweegt.



Figuur 63 Onderaan is het absorptiespectrum van helium. Van een ster wordt het bovenste spectrum waargenomen. De absorptielijnen zijn naar rood verschoven omdat de ster met grote snelheid van de aarde af beweegt. Helium heeft sterke absorptielijnen bij de volgende golflengten: 447,1 – 471,3 – 492,2 – 501,6 – 587,6 – 667,8 nm

VOORBEELD Doppler verschuiving

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.

- de verschuiving is naar het rood → de ster beweegt van de aarde vandaan
- $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_{\text{bron}}}{c}$
- $\frac{509,1 - 501,6}{501,6} = \frac{v_{\text{bron}}}{c} \rightarrow \frac{7,5}{501,6} = \frac{v_{\text{bron}}}{c}$
- $v_{\text{bron}} = 0,015 \cdot c \rightarrow v_{\text{bron}} = 4,482543 \cdot 10^6 = 4,5 \cdot 10^6 \text{ m/s}$

Roodverschuiving vanwege het uitdijend heelal

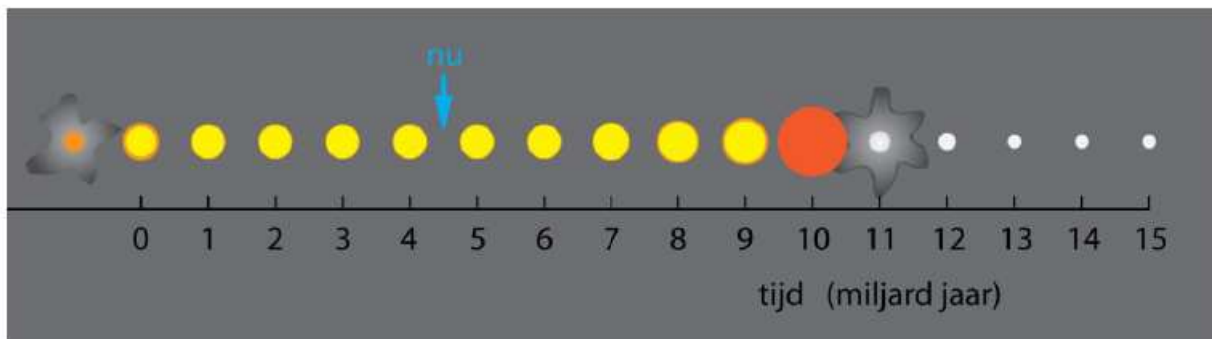
Behalve door het bewegen van een ster treedt roodverschuiving ook op vanwege het uitdijen van het heelal. In paragraaf 12.7 leer je hier meer over. Stel dat we een ster waarnemen op 5 miljard lichtjaar afstand. Het licht is 5 miljard jaar geleden door deze ster uitgezonden en in deze tijd is de ruimte groter geworden. De ruimte gedraagt zich als een ballon die almaar groter wordt. Hierdoor wordt alles uitgerekt, dus ook de golflengte van licht. De golflengte die we waarnemen is dus niet dezelfde als de golflengte die door de ster is uitgezonden. Als het heelal sinds het vertrek van het licht in iedere richting twee keer groter is geworden dan is de golflengte ook met een factor 2 toegenomen.

12.6 De levensloop van sterren

Het ontstaan van nieuwe sterren

Tot het begin van de 17^e eeuw denkt men in Europa dat de sterrenhemel nooit verandert. Toch is dit verre van waar. In de ruimte is van alles gaande. Een ster ontstaat, straalt gedurende langere of kortere tijd elektromagnetische straling uit, en dooft daarna uit.

Omdat onze zon een vrij gewone ster is gaan we het leven van sterren zoals de zon nader bekijken. Deze sterren bevinden zich op de hoofdreeks van het Hertzsprung-Russell diagram. In figuur 64 zie je een overzicht van de gebeurtenissen die in het verleden hebben plaatsgevonden en gebeurtenissen die de zon nog te wachten staan.



Figuur 64 De levensloop van de zon.

Ongeveer 4,6 miljard jaar geleden is de zon ontstaan. Sterren worden geboren 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.



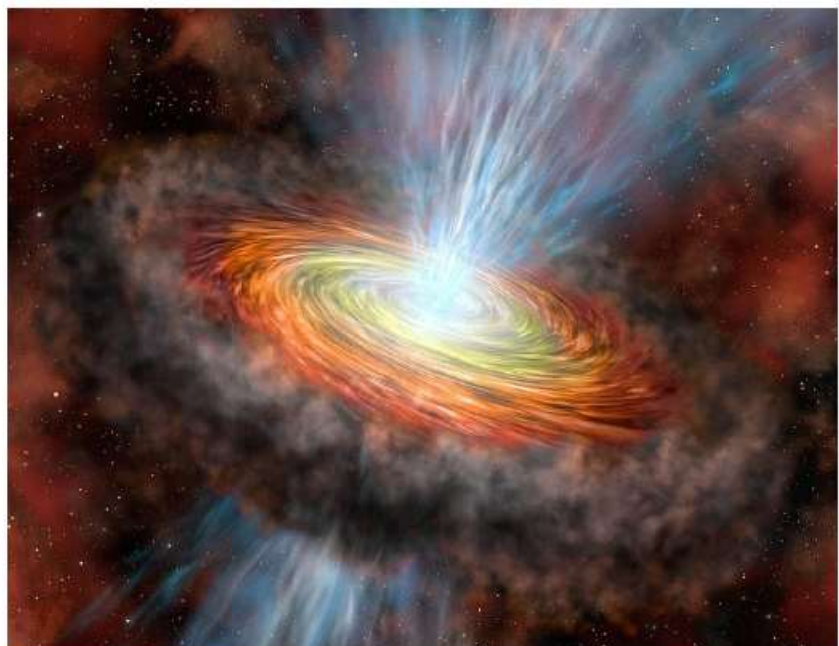
Figuur 65 In een stervormende nevel is 4,6 miljard jaar geleden de zon ontstaan. Links: stervorming in de Eagle nevel , Rechts: stervorming in de Carina nevel.

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 (tussen -263 en -223 °C). De H_2 -moleculen bewegen kriskras door elkaar, met een gemiddelde snelheid die correspondeert met de temperatuur. 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. Een gaswolk in evenwicht heeft geen reden om te krimpen. 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 10 tot 100 keer groter is dan die van de oorspronkelijke moleculaire wolk en heeft een temperatuur van 10 kelvin. Onder deze omstandigheden wint de gravitatiekracht het van de thermische kracht en gaat de gaswolk samentrekken. Bij het samentrekken loopt de temperatuur op. Er ontstaat een gasbol, waarin de naar buiten gerichte thermische kracht en de naar binnen gerichte 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.

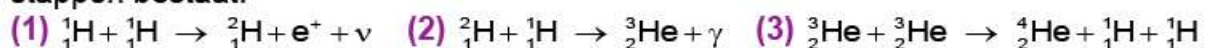


Figuur 66
Illustratie van een protoster. Uit de draaiende gaswolk om de protoster ontstaan de planeten.

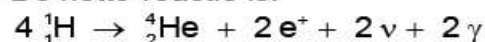
In een protoster is de gravitatiekracht sterker dan de thermische kracht, zodat de protoster zich blijft samentrekken. De temperatuur in het centrum loopt hierdoor op. Het proces van samentrekken duurt bij een protoster met de massa van de zon ongeveer 100 miljoen jaar. Uiteindelijk loopt de temperatuur op tot 10 miljoen kelvin en wordt de dichtheid 100 gram per kubieke centimeter (ongeveer 10 keer de dichtheid van lood). Onder deze omstandigheden botsen de H-atomen heel vaak en met grote snelheid op elkaar. Op een bepaald moment zijn de botsingen zo krachtig dat twee H-atomen met elkaar samensmelten (fuseren). Dit levert veel energie op, waardoor het lokaal 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 (hoofdreks) ster.

De proton-proton kernfusiereactie

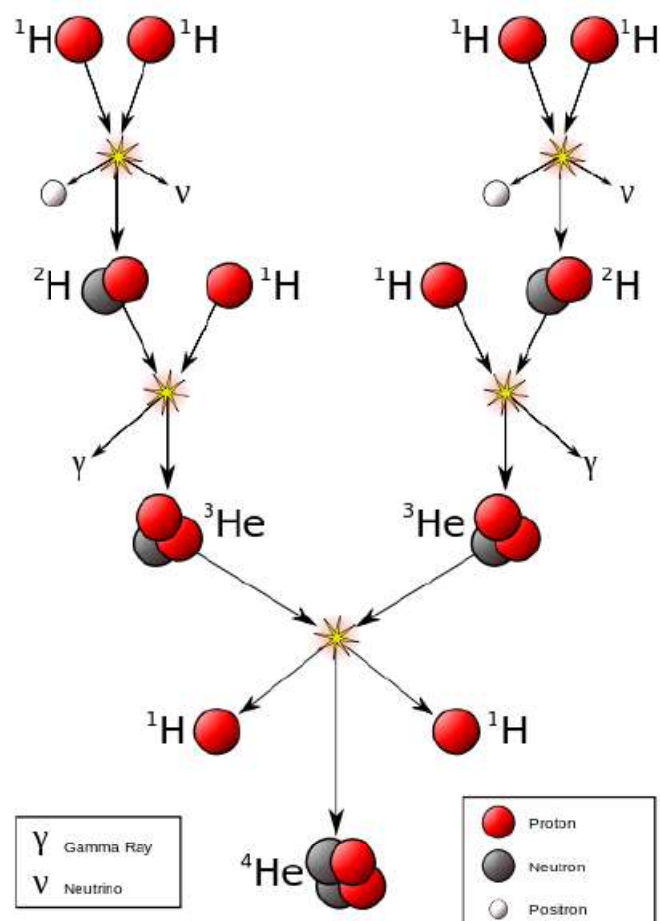
De belangrijkste energiebron van een ster is de proton-proton cyclus. Per reactiecyclus komt er $3,954 \cdot 10^{-12}$ J energie vrij. Deze energie zorgt ervoor dat de oppervlakte van de ster een hoge temperatuur krijgt en daardoor licht gaat uitstralen. In figuur 67 zie je een schematische weergave van de proton-proton cyclus die uit drie stappen bestaat:



De netto-reactie is:



- ${}^1_1\text{H}$ is een proton
- ${}^2_1\text{H}$ is een proton plus een neutron
- e^+ is een positron (anti-elektron)
- ν is een neutrino
- ${}^3_2\text{He}$ is een helium kern met twee protonen en één neutron
- γ is een gamma foton
- ${}^4_2\text{He}$ is een helium kern met twee protonen en twee neutronen



Figuur 67
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 1906 heeft Einstein aangetoond dat massa en energie in elkaar kunnen overgaan. De formule die het verband tussen energie en massa legt is zijn beroemde $E = m \cdot c^2$.

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

- E is de energie in joule (J)
- m is de massa in kilogram (kg)
- c is de lichtsnelheid: $3,0 \cdot 10^8$ m/s

Passen we deze formule toe op de zon dan kunnen we uitrekenen hoeveel massa er per seconde in energie wordt omgezet:

- energieproductie per seconde: $E = 3,85 \cdot 10^{26}$ J
- $E = m \cdot c^2$
- $3,85 \cdot 10^{26} = m \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2$
- massaverlies per seconde: $m = 4,28 \cdot 10^9$ kg

De zon is nu 4,5 miljard jaar oud en heeft intussen al veel massa in energie omgezet.

- 4,5 miljard jaar heeft $4,5 \cdot 10^9 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 1,42 \cdot 10^{17}$ s
- massaverlies per seconde: $m = 4,28 \cdot 10^9$ kg
- massaverlies in 4,5 miljard jaar is: $1,42 \cdot 10^{17} \cdot 4,28 \cdot 10^9 = 6,08 \cdot 10^{26}$ kg

Bij de proton-proton cyclus wordt maar 0,717 % van de protonmassa in energie omgezet. 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. Als we er van uitgaan dat de zon volledig uit waterstof bestaat heeft de zon sinds haar geboorte nu 4,26 % van haar 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 bijna 10% van al het waterstof verbruikt en is de beschikbare 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. Daarbij worden ze 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. Omdat de richting van een foton bij een botsing verandert mag je niet stellen dat na honderd botsingen het foton 100 cm is opgeschoten. Een nadere analyse toont aan dat na 100 botsingen de afgelegde afstand niet 100 keer 1 cm is

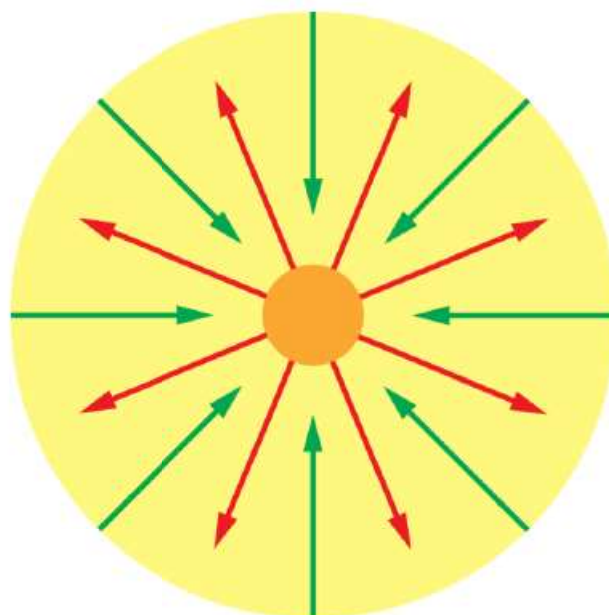
maar $\sqrt{100}$ keer $1 \text{ cm} = 10 \text{ cm}$. Na 10000 botsingen is een foton gemiddeld $\sqrt{10000} = 100 \text{ cm}$ opgeschoten. De zon heeft een straal van $6,963 \cdot 10^{10} \text{ cm}$. Om deze afstand te overbruggen moet een foton $(6,963 \cdot 10^{10})^2 = 4,848 \cdot 10^{21}$ keer 1 cm afleggen. Om van het centrum naar de buitenkant van de zon te komen moet een foton dus $4,848 \cdot 10^{19}$ meter afleggen. Verplaatst het foton zich met de lichtsnelheid dan heeft het $1,616 \cdot 10^{11}$ seconden nodig om deze afstand af te leggen. Dit komt neer op 5121 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 ruim 5000 jaar licht.

Voor de neutrino's die vrijkomen is het verhaal heel anders. Omdat ze nagenoeg geen interactie hebben met atomen hebben neutrino's een haast oneindig grote vrije weglengte. Neutrino's hebben bijna de lichtsnelheid. De neutrino's die in het centrum van de zon ontstaan zijn daarom al na 8,3 minuten op aarde aangekomen.

Stabiliteit van een ster

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

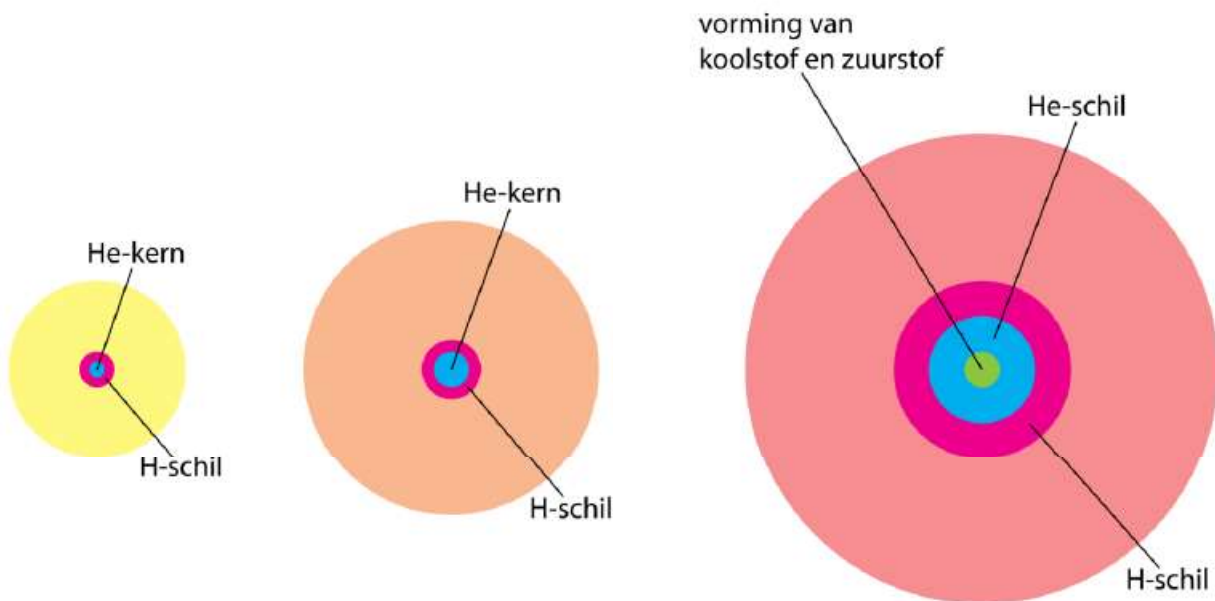
Stel dat de ster een beetje samentrekt, dan stijgt hierdoor de druk en de temperatuur in het centrum van de ster. Bij deze hogere temperatuur produceren de fusiereacties meer energie, zodat er een grotere thermische tegendruk ontstaat die het samentrekken stopt of zelfs omkeert. Als de ster wat opzwelt, 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 precies 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 68
Evenwicht in een ster. De rode pijlen geven de thermische druk weer. De groene pijlen geven de druk aan die door de gravitatiekracht wordt veroorzaakt.

Rode reuzen

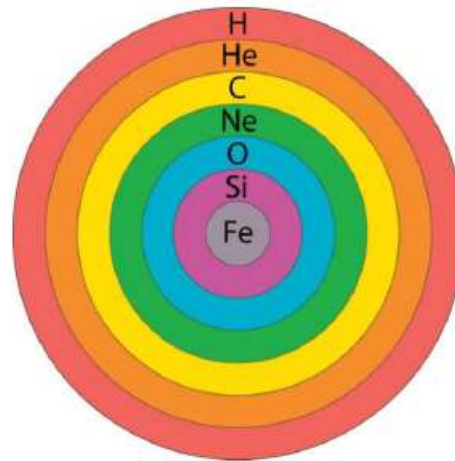
De zon heeft in 9 miljard jaar het waterstof in het centrum verbruikt. Het centrum van de zon bestaat nu uit helium, met daaromheen een schil van waterstof waarin de fusiereacties blijven plaatsvinden. De temperatuur in het centrum loopt op, zodat de fusiereacties sneller gaan verlopen. De zon gaat feller 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 kernfusieproces stop. Door de verandering van de samenstelling van de buitenste laag zwelt de zon op en wordt steeds groter. De zon wordt nu een **rode reus**.



Figuur 69 De zon wordt een rode reus.

Uiteindelijk krijgt de zon een straal die 250 keer groter is 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 worden gevormd door kernfusie zijn ze toch aanwezig in een rode reus. Dit komt omdat bij sommige kernfusieprocessen neutronen vrijkomen. Bijvoorbeeld: $^{13}_6\text{C} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{16}_8\text{O} + ^1_0\text{n}$. 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 ingrijpend 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 70
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 zendt 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 nu 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 ongeveer 1000 keer groter dan in gewone materie. Op aarde is de gemiddelde dichtheid 5 gram per kubieke centimeter. In een witte dwerg is dit 5 kilogram per kubieke centimeter. In een witte dwerg wordt de naar binnen gerichte gravitatiedruk tegengewerkt door de tegendruk van het samengeperste elektronengas. In vele miljarden jaren koelt een witte dwerg langzaam af en wordt uiteindelijk een **zwarte dwerg**.

Neutronensterren

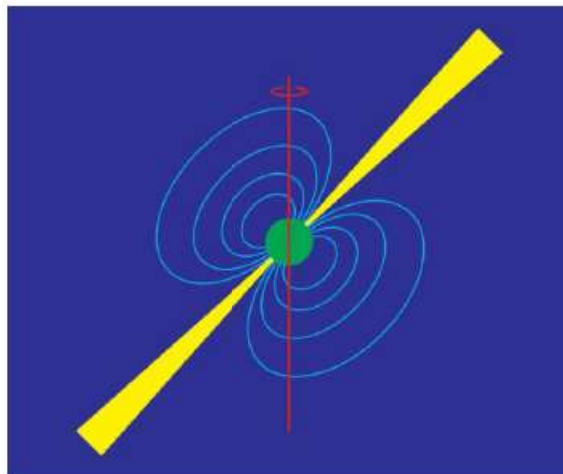
Een ster met meer dan acht keer zoveel massa als de zon wordt geen witte dwerg maar een **neutronenster**. Zo'n ster doorloopt vanaf de geboorte dezelfde fasen als de zon. Als het waterstof in de kern op is stoppen de fusieprocessen en wordt de buitenste laag afgestoten. Het afstoten van de buitenste laag gaat bij zo'n grote ster gepaard met een enorme explosie. Dit is een **supernova** en is de meest spectaculaire gebeurtenis in het heelal. Supernova's komen later aan de orde. De kern die na de supernova overblijft bevat zoveel massa dat het elektronengas niet genoeg tegendruk kan leveren. De gravitatiekracht perst de elektronen in de atoomkern. Protonen worden hierbij omgezet in neutronen volgens: ${}^1_1\text{p} + e^- \rightarrow {}^1_0\text{n}$. Een neutronenster bestaat daarom alleen uit neutronen. 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 neemt de straal 100.000 keer af. Een neutronenster is een bal van neutronen, waarin de oorspronkelijke lege ruimte in de atomen is opgevuld. De dichtheid van een neutronenster is $(100.000)^3 = 10^{15}$ keer groter dan de dichtheid van gewone, niet ontaarde, materie. Is de dichtheid op aarde 5 g/cm^3 , in een neutronenster loopt dit op tot $5 \cdot 10^{15} \text{ g/cm}^3$. De aarde heeft een straal van 6371 km. Stel dat de aarde wordt samengeperst tot neutronenster dan blijft er een bal neutronen met een straal van 64 meter over.

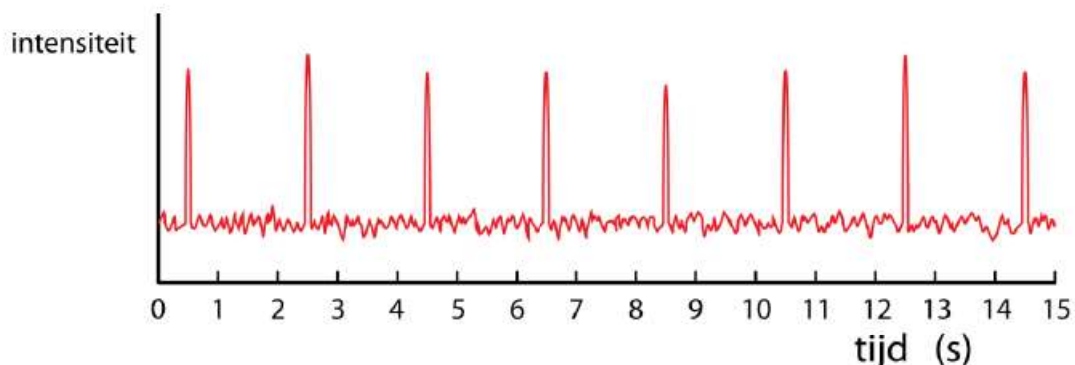
Pulsars

Pulsars zijn neutronensterren met een magneetveld die snel om hun as draaien en daardoor elektromagnetische straling uitzenden. De straling verlaat de pulsar in twee tegenovergestelde bundels bij de magnetische noord- en zuidpool. Omdat, net als bij de aarde, de rotatie-as van een pulsar meestal niet samenvalt met de magnetische-as gedraagt een pulsar zich als een vuurtoren. Zie figuur 71.

Soms bevindt de aarde zich precies in het verlengde van zo'n stralingsbundel. Je vindt dan een stralingspuls die zich met een vast ritme herhaalt, zie figuur 72. De eerste pulsar is in 1967 ontdekt door Noord-Ierse astronoom 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 maar liefst 2000 keer per minuut om zijn as.



Figuur 71
Een pulsar.



Figuur 72 Pieken elektromagnetische straling afkomstig van een pulsar.

Zwarte gaten

Sterren tussen 8 en 20 keer de zonmassa eindigen hun leven als neutronenster. Maar er zijn sterren die nog zwaarder zijn, en als deze sterren hun buitenste schil in een gigantische supernova uitstoten blijft er een kern over waarin de gravitatiekracht sterk genoeg is om een neutron te kraken. Wat er dan van de materie 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 er niet aan kan ontsnappen. Om te berekenen wanneer elektromagnetische straling niet meer kan ontsnappen beschouwen we de ontsnappingssnelheid die we eerder zijn tegengekomen.

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

- v_{ontsnap} is de ontsnappingssnelheid in meter per seconde (m/s)
- G is de gravitatieconstante: $G = 6,67408 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
- m is de massa van het hemellichaam in kilogram (kg)
- r is de afstand tot het centrum in meter (m)

Voor een zwart gat is de ontsnappingssnelheid groter dan de lichtsnelheid. Bij een zwart gat is er een straal r_s waarbij de ontsnappingssnelheid 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 73. Er is daarom 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 werkelijk zo is is maar de vraag. Wie weet 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 onderstaande formule.

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

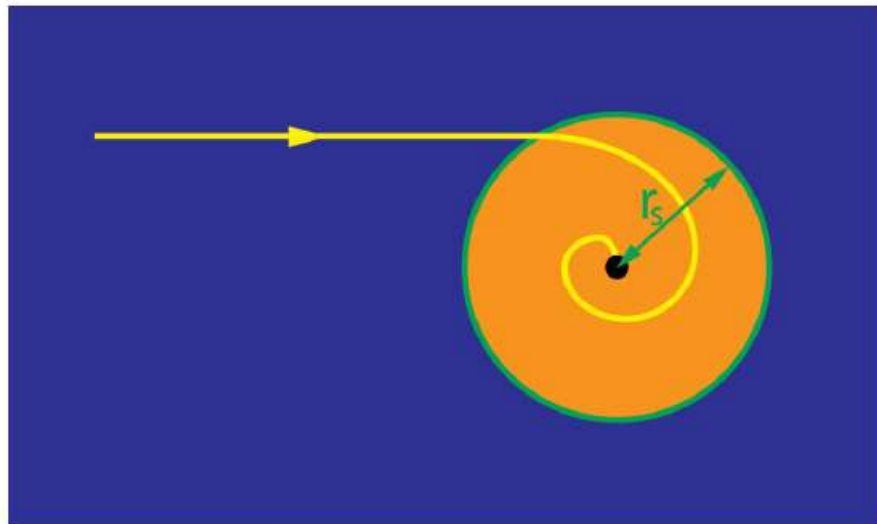
- r_s is de schwarzschildstraal in meter (m)
- G is de gravitatieconstante: $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$
- m is de massa van het hemellichaam in kilogram (kg)
- c is de lichtsnelheid: $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

De ontsnappingssnelheid van hemellichamen varieert tussen 10^4 en 10^8 m/s .

- planeet $v_{\text{ontsnap}} \approx 10^4 \text{ m/s}$
- hoofdreeksster $v_{\text{ontsnap}} \approx 10^6 \text{ m/s}$
- witte dwerg $v_{\text{ontsnap}} \approx 10^7 \text{ m/s}$
- neutronenster $v_{\text{ontsnap}} \approx 10^8 \text{ m/s}$
- zwart gat $v_{\text{ontsnap}} > 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Figuur 73

Alles wat zich binnen de afstand van de Schwarzschildstraal bevindt wordt door een zwart gat opgenomen. Ook licht kan niet ontsnappen.



VOORBEELD de zon als zwart gat

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

- $m_{\text{zon}} = 1,9884 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- $r_s = \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2}$
- $r_s = \frac{2 \cdot 6,67408 \cdot 10^{-11} \cdot 1,9884 \cdot 10^{30}}{(3,0 \cdot 10^8)^2}$
- $r_s = 2,95 \cdot 10^3 \text{ m} \quad (2,95 \text{ km})$

VOORBEELD de aarde als zwart gat

Bereken de schwarzschildstraal van het zwarte gat dat ontstaat als de aarde wordt samengeperst tot een punt.

- $m_{\text{aarde}} = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
- $r_s = \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2}$
- $r_s = \frac{2 \cdot 6,67408 \cdot 10^{-11} \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}{(3,0 \cdot 10^8)^2}$
- $r_s = 8,87 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (8,87 \text{ mm})$

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) geeft aan dat er tijdelijk een nieuwe ster aan de hemel lijkt te bestaan. Maar dat is dus niet het geval. Staat de rode reus ver weg dan is hij met het blote oog niet te zien. Tijdens de explosie wordt er plotseling veel meer licht uitgestraald, zodat de ster ineens zichtbaar wordt.

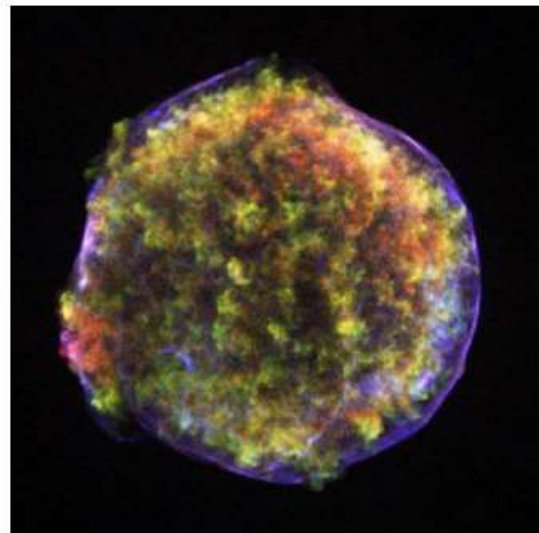
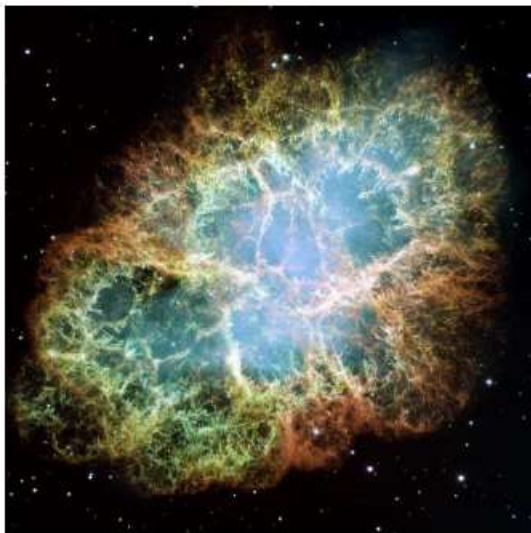
Bij een **nova** wordt de buitenste schil weggeschoten met een snelheid van 1000 km/s en neemt de helderheid met een factor tienduizend toe. Bij een **supernova** wordt de buitenste schil weggeschoten met een snelheid van 10.000 km/s en wordt de helderheid 100 miljoen keer groter. Bij een supernova straalt de ster soms meer licht uit dan het complete sterrenstelsel waarvan ze deel uitmaakt.

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 heeft plaatsgevonden in het sterrenbeeld Stier op 4 juli 1054. Deze supernova was zo sterk dat ze zelfs 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.

Na 1054 zijn er nog meer supernova's waargenomen. Op 11 november 1572 ontdekt de Deense astronoom Tycho Brahe dat er in het sterrenbeeld Cassiopeia plotseling een nieuwe ster is verschenen. In zijn boek "Stella Nova" (Over de Nieuwe Ster) doet hij nauwkeurig verslag van deze gebeurtenis. Nu weten we dat het een supernova betreft. De nieuwe ster is helderder dan alle andere sterren aan de hemel en zelfs helderder dan Jupiter. De supernova uit 1572 is twee weken lang ook overdag met het blote oog zichtbaar.

De gebeurtenis in 1572 is van groot belang voor de ontwikkeling van de natuurwetenschap in Europa. Tot die tijd domineert het wereldbeeld van Aristoteles, die beweert dat het noodzakelijk zo moet zijn dat de hemel onveranderlijk is. Volgens Aristoteles is de hemel immers volmaakt, en kan er dus niets veranderen omdat daar geen reden voor is. Tycho Brahe toont het ongelijk van Aristoteles aan, waardoor de mening van Copernicus uit 1543, dat niet de aarde maar de zon het middelpunt van het zonnestelsel is, aan invloed wint.

Op 11 oktober 1604 neemt ook Johannes Kepler een supernova waar. De volmaaktheid van de hemel is voor Kepler door die ene gebeurtenis uit 1572 nog niet afgedaan, maar omdat hij zelf in 1604 ook getuige wordt van een nieuwe ster wordt het voor hem duidelijk dat het wereldbeeld van Aristoteles onjuist is. Vanaf dat moment begint hij zijn astronomisch onderzoek, waaruit in 1609 zijn eerste twee wetten en in 1619 zijn derde wet zijn voortgekomen.



Figuur 74 Links: de Krabnevel, het restant van de supernova uit 1054. Rechts: het restant van de supernova uit 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 en de vraag is waar en wanneer deze atomen zijn ontstaan. Het antwoord is dat alle elementen met meer dan 26 protonen worden gevormd tijdens een supernova.

Bij een supernova komt er in zeer korte tijd onvoorstelbaar veel energie vrij. De maximale energieproductie tijdens een supernova is ongeveer 10^{36} joule per seconde en dat is 3 miljard keer meer als de zon nu uitstraalt. 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 een supernova maar een paar weken duurt.

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 weken 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.

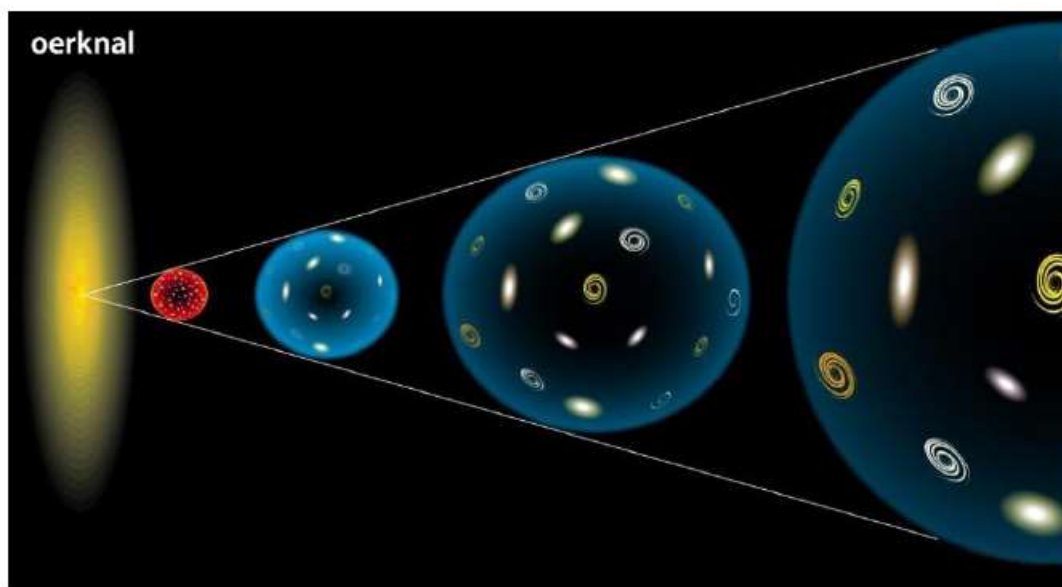
12.7 Kosmologie

In deze laatste paragraaf richten we onze aandacht op de structuur en de evolutie van de kosmos als geheel. Het vakgebied dat zich hiermee bezighoudt heet de **kosmologie**. Vooral in de afgelopen twintig jaar is er veel nieuwe informatie over het heelal verzameld. Door de opkomst van de elektronica zijn de meetinstrumenten enorm verbeterd. We kunnen nu verder in het heelal kijken en met een grotere nauwkeurigheid dan ooit tevoren. Ook de komst van ruimtetelescopen heeft veel nieuwe gegevens over het heelal opgeleverd. Deze nieuwe informatie heeft onze kijk op de kosmos ingrijpend veranderd. Nieuwe theorieën zijn bedacht om alles een plaats te geven. De meeste van deze theorieën zijn 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 tevens priester was, komt tot dit idee omdat uit waarnemingen blijkt dat het heelal niet onveranderlijk is, maar steeds groter wordt. Sterren en sterrenstelsels bewegen bijna altijd van elkaar vandaan. En als je dan terugrekenet kom je tot de conclusie dat alles ooit is begonnen vanuit één punt.

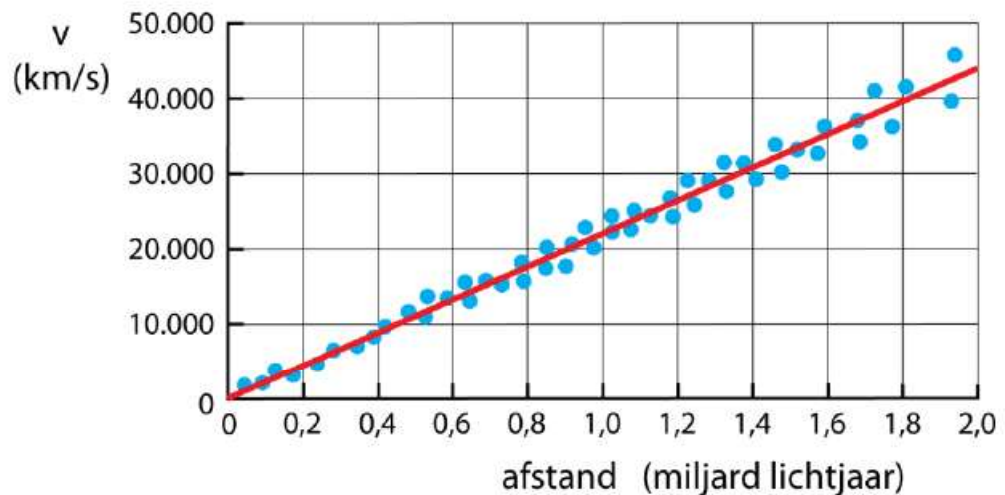
Op dit moment zijn er zoveel aanwijzingen die erop duiden dat het heelal in één punt is begonnen dat de meeste astronomen de oerknaltheorie aanhangen. De oerknal heeft 13,8 miljard jaar geleden plaatsgevonden en de gevolgen van deze knal zijn nog steeds te merken.



Figuur 75 Het heelal is 13,8 miljard jaar geleden ontstaan in één punt en is daarna steeds groter geworden.

Het uitdijend heelal

De belangrijkste ondersteuning voor de oerknaltheorie is het feit dat het heelal uitdijt. De meeste sterrenstelsels bewegen van elkaar vandaan. De Amerikaanse astronoom Edwin Hubble ontdekt in 1929 dat er een lineair verband bestaat tussen de afstand van het sterrenstelsel en de snelheid waarmee het stelsel van de aarde vandaan beweegt. Zie figuur 76.



Figuur 76
Hubble diagram.

De Hubble-relatie luidt:

$$v = H_0 \cdot r$$

- v is de snelheid waarmee het stelsel van de aarde vandaan beweegt (km/s)
- H_0 is de Hubble constante, H_0 is ongeveer 22 km/s per miljoen lichtjaar
- r is de afstand tussen de aarde en het sterrenstelsel in miljoen lichtjaar

De Hubble constante H_0 is ongeveer 22 km/s per miljoen lichtjaar.

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.

- $H_0 = 22 \cdot 10^3$ m/s per miljoen lichtjaar afstand | $r = 50$ miljoen lichtjaar
- $v = H_0 \cdot r$
- $v = 22 \cdot 10^3 \cdot 50 = 1,1 \cdot 10^6$ m/s

VOORBEELD de snelheid van een sterrenstelsel

Een sterrenstelsel staat op 13,8 miljard lichtjaar afstand van de aarde.

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

- $v = H_0 \cdot r$
- $H_0 = 22 \text{ km/s per miljoen lichtjaar afstand}$ | $r = 13.800 \text{ miljoen lichtjaar}$
- $v = 22 \cdot 10^3 \cdot 13.800 = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- dit is gelijk aan de lichtsnelheid

Achtergrondstraling

Tussen 1930 en nu is er veel onderzoek gedaan om meer te weten te komen over de oerknal. Alleen het feit dat de kleur van de meeste sterrenstelsels naar het rood is verschoven is nog niet genoeg bewijs dat er ook echt een oerknal is geweest. Daarom is er gezocht naar een meer direct bewijs. Bij een explosie zo groot als de oerknal wordt er enorm veel straling uitgezonden, welke gelijkmatig over de ruimte is verspreid. Als er ooit 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.

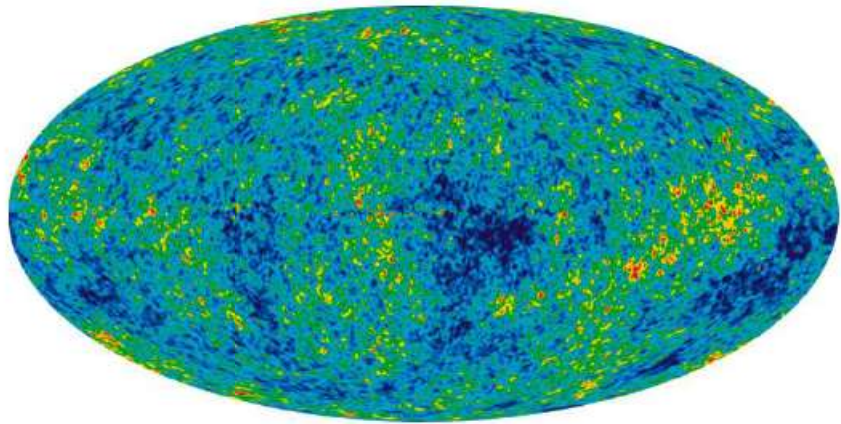
Met meer geluk dan wijsheid is in 1965 deze straling waargenomen. Bij communicatie met satellieten is er altijd een zwakke storing op de achtergrond. Deze achtergrondstraling komt niet vanaf een bepaalde plaats maar is overal in de ruimte aanwezig. In 1989 is de satelliet COBE (Cosmic Background Explorer) gelanceerd om deze achtergrondstraling in kaart te brengen. De achtergrondstraling correspondeert met een gemiddelde temperatuur van het heelal van 3 kelvin, wat gelijk is aan 270 °C onder nul.

Met de Amerikaanse WMAP satelliet (2001–2010) en de Europese Planck satelliet (2010–2013) is bekend geworden dat de achtergrondstraling niet overal precies 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. Van daaruit start de evolutie van de kosmos zoals we die nu kennen.

In figuur 77 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.

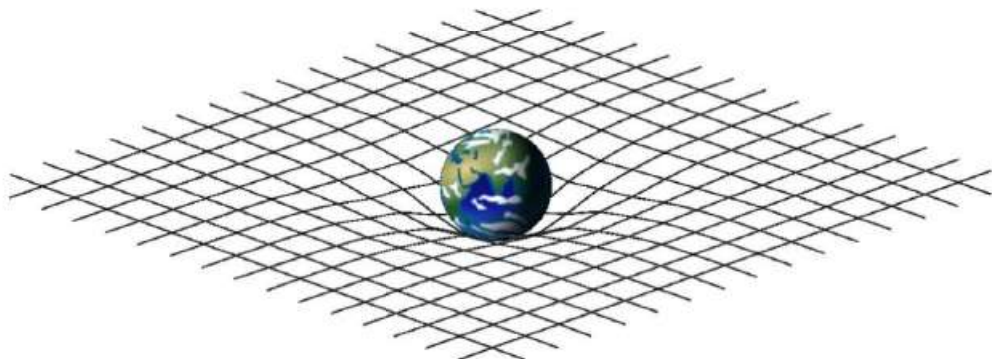
Figuur 77

De achtergrondstraling, waargenomen met de WMAP satelliet. Er zijn minimale verschillen in temperatuur. Hieruit kun je concluderen dat vlak na de oerknal materie en energie niet helemaal gelijkmatig zijn verdeeld.



Gekromde ruimtetijd

Met de ontwikkeling van de speciale relativiteitstheorie in 1905 en algemene relativiteitstheorie in 1916 heeft Albert Einstein een nieuwe kijk gegeven op ruimte en tijd. Vóór de ontdekkingen van Einstein dacht men dat ruimte en tijd voor iedere waarnemer hetzelfde is, maar dat is niet zo. Twee gebeurtenissen die volgens waarnemer A gelijktijdig plaatsvinden hoeven dat volgens waarnemer B niet te zijn. 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, zoals in figuur 78 is te zien.

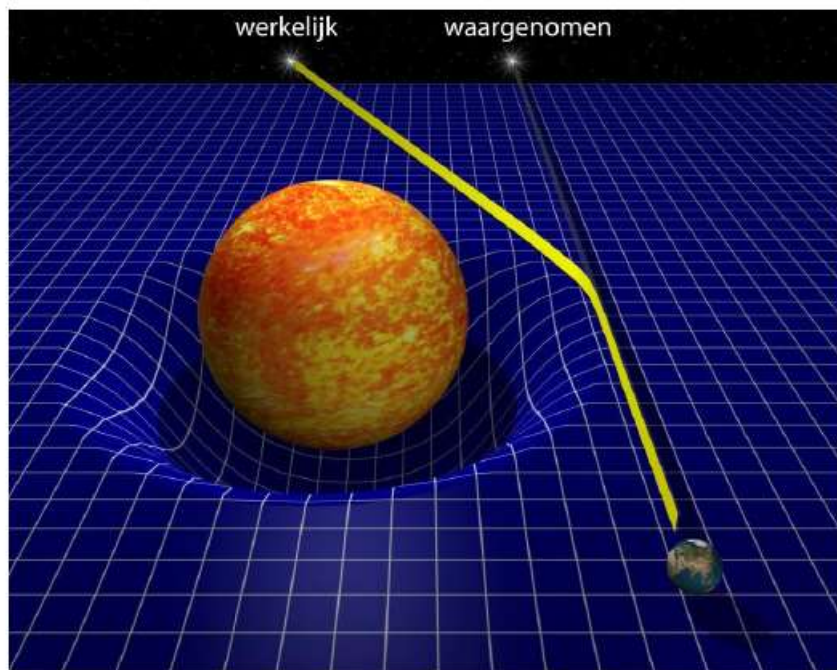


Figuur 78

Vervorming van de ruimtetijd door materie

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 consequentie van de relativiteitstheorie is dat licht om een ster heen kan buigen. Kijk je met een nauwkeurige 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 figuur 79.

Omdat het licht van de zon veel sterker is dan het licht van de sterren op de achtergrond kun je dit effect het beste waarnemen tijdens een totale zonsverduistering. In figuur 80 zie je in het bovenste plaatje een illustratie van de sterrenhemel als de zon niet in de buurt is. In het onderste plaatje zie je dezelfde sterren maar dan tijdens een totale zonsverduistering. De twee middelste sterren staan tijdens de zonsverduistering achter de zon, maar zijn toch te zien omdat het licht van deze sterren om de zon heen buigt.



Figuur 79

Licht van een ster buigt om de zon heen.
Hierdoor verandert de plaats van de ster aan de hemel.



Figuur 80

Bij een zonsverduistering zie je de sterren die achter de zon staan op een andere plaats. Dit wordt veroorzaakt door de gekromde ruimte rond de zon.

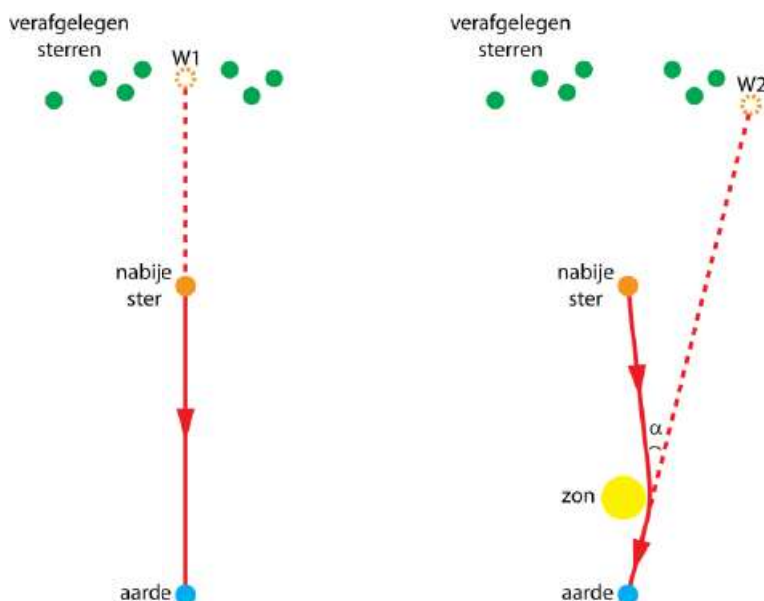


Einsteins voorspelling dat licht afbuigt om de zon, is voor het eerst bevestigd tijdens de totale zonsverduistering op 29 mei 1919 door Arthur Eddington (Engeland, 1882 – 1944).

In figuur 81 zie je hoe het werkt. Je kijkt vanaf de aarde naar een nabij ster (oranje). Daarna wacht je tot er een totale zonsverduistering plaatsvindt. Opnieuw meet je de positie van de nabij ster. Omdat het licht van de ster nu om de zon buigt zie je vanaf de aarde dat de ster is verplaatst.

Figuur 81

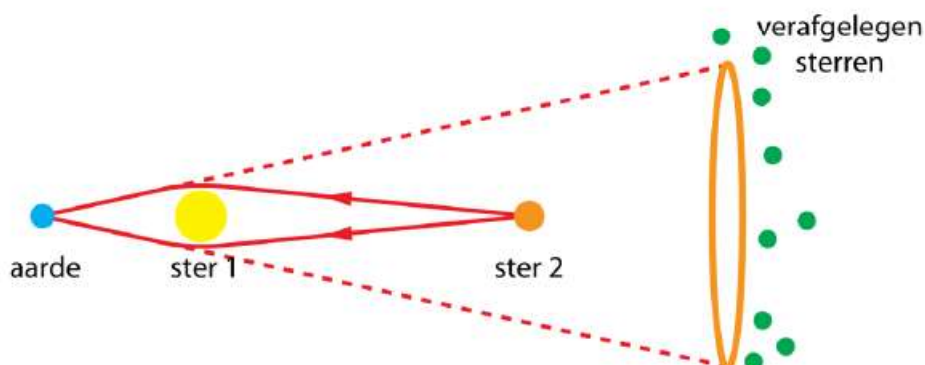
Als de zon niet in de buurt is zie je een nabije ster op een bepaalde plaats aan de hemel. Is de zon wel in de buurt dan verandert deze plaats. Dit wordt veroorzaakt door de kromming van de ruimtetijd om de zon, waardoor het licht afbuigt.



Het effect dat de ruimte wordt vervormd door de aanwezigheid van materie is op dit moment een belangrijk onderzoeksthema. De gravitatie kan net als een lens lichtstralen die van elkaar vandaan bewegen (divergeren) naar elkaar toe brengen (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 figuren 82 en 83.

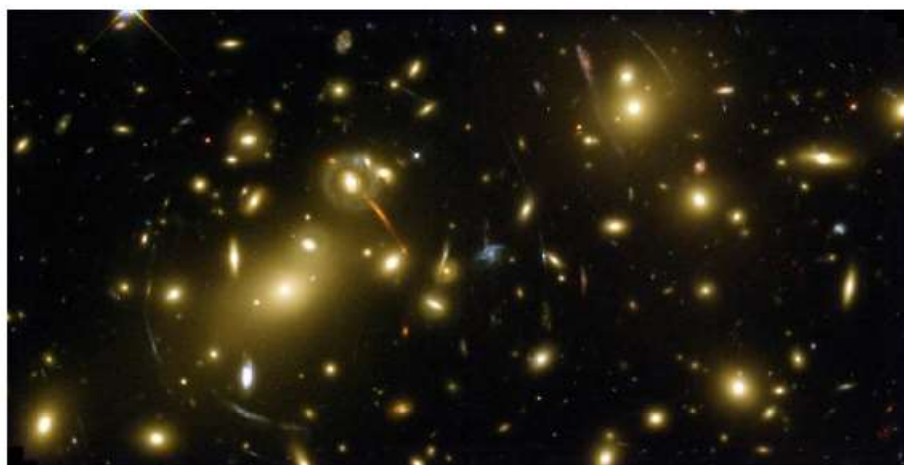
Figuur 82

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



Figuur 83

Opname van een deel van de ruimte waar gravitatielenzen het licht verstoren.



Met ruimtetelescopen, zoals de Hubble telescoop, is de kromming van de ruimte van een groot deel van het heelal in kaart gebracht. De conclusie uit het onderzoek aan ruimtekromming is opmerkelijk. Er lijkt veel meer materie in de ruimte te zijn dan we tot nu toe dachten. Tellen we alle bekende materie bij elkaar op dan is dat maar 15% van wat er lijkt te zijn. De overige 85% wordt **donkere materie** genoemd. Als donkere materie werkelijk bestaat bevat dit geen protonen, neutronen of elektronen maar iets totaal anders. Elektromagnetische straling wordt door donkere materie niet geabsorbeerd of uitgezonden. We hebben daarom geen directe informatie over deze mysterieuze materie. Het is op dit moment niet te zeggen wat er aan de hand is. Misschien is er een onbekende verschijningsvorm van materie waaruit een groot deel van het heelal bestaat. Maar het is ook mogelijk dat de relativiteitstheorie niet overal in het heelal geldig is.

Gravitatiegolven

Gravitatiegolven zijn golven in de ruimtetijd. Het bestaan hiervan is in 1916 door Albert Einstein voorspeld. Komt er een golf in de ruimtetijd voorbij dan trilt de ruimtetijd heel even. Net als bij een aardbeving duurt zo'n trilling maar kort. Tijdens een trilling van de ruimtetijd wordt de ruimte, alsof het van elastiek is, een beetje uitgerekt en ingedrukt. Deze verandering is maar heel klein. In 2015 is een gravitatiegolf voor het eerst in America waargenomen in het LIGO observatorium.

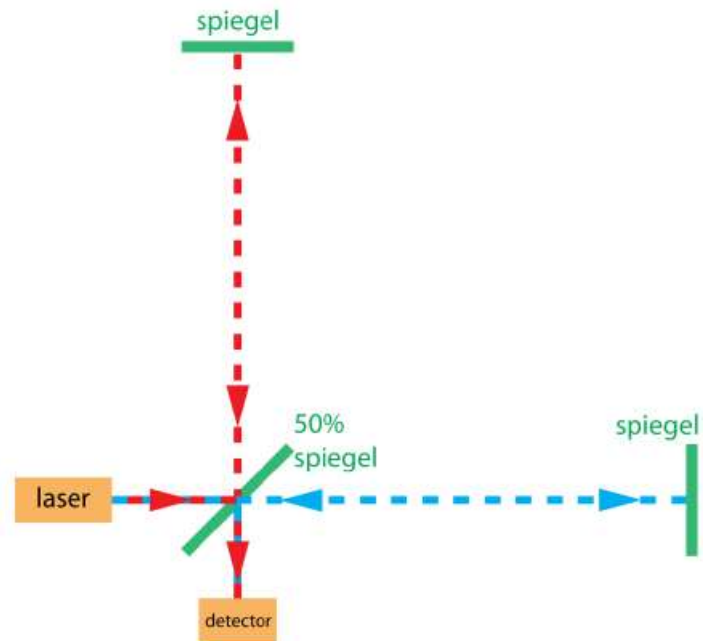
Het LIGO gravitatiegolf observatorium bestaat uit twee identieke opstellingen op 3000 km afstand van elkaar, zie figuur 84. Een opstelling bestaat uit twee 4 km lange buizen die loodrecht op elkaar staan. In figuur 85 zie je het principe van de meetopstelling. Licht uit een laser wordt door een halfdoorlatende spiegel gesplitst in twee bundels, die in figuur 85 met rood en blauw zijn aangegeven. Deze bundels gaan heen en weer door de 4 km lange buizen. Als ze bij elkaar komen treedt er destructieve interferentie op, de lichtbundels doven elkaar precies uit. Als één van de buizen een fractie langer of korter wordt dan de andere buis is de uitdoving niet compleet en neemt de detector een signaal waar.



Figuur 84 LIGO gravitatiegolf observatorium in America met twee opstellingen op 3000 km afstand.

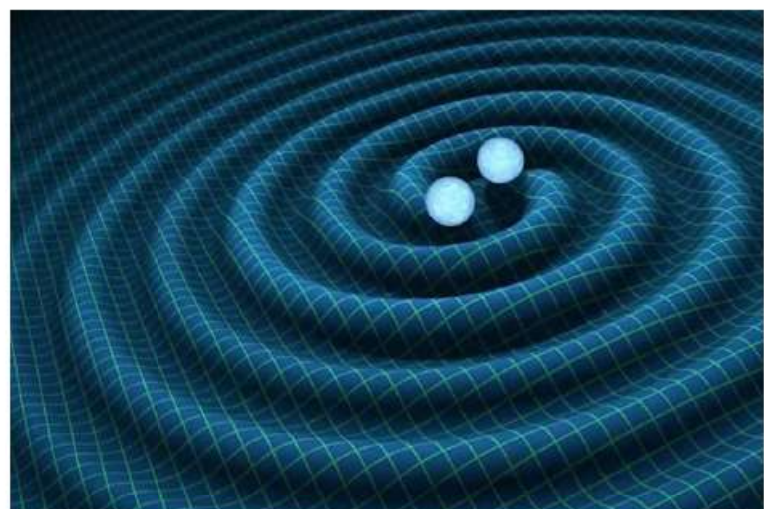
Het LIGO observatorium is zo gevoelig dat als één van de buizen 10^{-18} meter langer of korter wordt dan de andere buis dit kan worden waargenomen. De afstand van 10^{-18} m komt overeen met 1/1000 van de diameter van een proton.

Figuur 85
Interferometer om gravitatiegolven
waar te nemen.



Twee identieke opstellingen zijn nodig, omdat zelfs een kleine aardbeving de meting verstoort. Een gravitatiegolf reist met de snelheid van het licht. Om de afstand van 3000 km te overbruggen heeft een gravitatiegolf 0,01 seconde nodig. Een aardbeving heeft een veel lagere snelheid en doet er dus veel langer over. Als de beide LIGO opstellingen binnen 0,01 s na elkaar precies hetzelfde signaal opvangen is dit waarschijnlijk veroorzaakt door een gravitatiegolf. Op 14 september 2015 is er een gravitatiegolf voorbij gekomen die door beide LIGO opstellingen is waargenomen.

De gravitatiegolf van 14 september 2015 is veroorzaakt doordat 1,3 miljard jaar geleden twee zwarte gaten met 29 en 36 zonmassa's naar elkaar toe spiraliseren en uiteindelijk met 60% van de lichtsnelheid op elkaar botsen en samensmelten tot één zwart gat van 62 zonmassa's. In 0,2 seconde zijn daarbij drie zonmassa's omgezet in de energie van de gravitatiegolf die 1,3 miljard jaar later de aarde bereikt. Zie figuur 86.



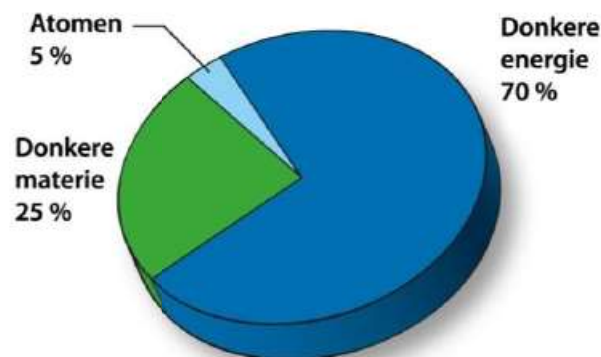
Figuur 86
Twee zwarte gaten spiraliseren
naar elkaar toe en botsen met
grote snelheid op elkaar. Dit
veroorzaakt een gravitatiegolf
die door de ruime verspreidt.

Gravitatiegolven geven informatie over het heelal die niet met elektromagnetische golven kan worden verkregen. Vandaar dat er meer gravitatiegolf observatoriums worden gebouwd. Het VIRGO observatorium in Italië wordt in 2016 operationeel. Er zijn plannen om in Nederland (Zuid-Limburg) een observatorium te bouwen die tien keer gevoeliger is dan LIGO en VIRGO.

Donkere massa en donkere energie

Een andere bijzondere waarneming die de sterrenkunde onlangs door elkaar heeft geschud is de versnelde uitdijing van het heelal. Dat het heelal steeds groter wordt is al sinds 1929 bekend. Maar nieuwe metingen hebben aangetoond dat de uitdijing van het heelal steeds sneller gaat. De uitdijing is een versnelde beweging.

Net als bij een ster geldt ook voor de kosmos 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 thermische kracht. Als er veel meer materie is dan we zien en het heelal desondanks versnelt uitdijt, dan moet er ook veel meer energie in het heelal zijn dan we zien. Deze onbekende energie wordt **donkere energie** genoemd. Is het bestaan van donkere materie al een groot raadsel, donkere energie is nog een stuk moeilijker te begrijpen. De kosmos bestaat uit massa en energie. Kosmologen denken dat aanwezige massa maar voor 5% uit atomen bestaat zoals we die kennen. De overige 95% bestaat uit massa en energie in een ons nog onbekende vorm.



Figuur 87
Aanwezigheid van massa en energie in het heelal.

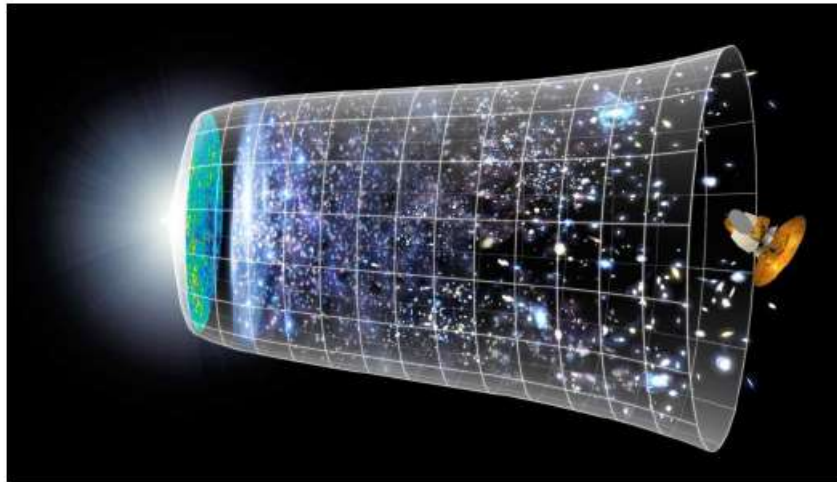
De evolutie van het heelal

Kosmologen proberen een zo volledig mogelijk beeld te krijgen van de evolutie van het heelal. Hoewel er in de afgelopen jaren grote vooruitgang is geboekt zijn er nog heel wat onopgeloste problemen. In figuur 88 zie je de evolutie van het heelal zoals het nu wordt voorgesteld.

Er ligt een grote uitdaging om de evolutie van de kosmos beter te leren begrijpen. Daarbij is het maken van vergissingen onvermijdelijk. Omdat niemand meer heeft bijgedragen aan de kosmologie dan Albert Einstein eindigen we dit hoofdstuk met hem.

Figuur 88

De evolutie van het heelal
vanaf de oerknal tot nu.



Nadat Einstein in 1916 zijn algemene relativiteitstheorie wereldkundig maakt past hij zijn nieuwe theorie toe op het heelal. Hij rekent uit dat het heelal uitdijt en deze gedachte vindt hij onaanvaardbaar. Hierom doet hij iets waar hij later veel spijt van krijgt. Hij paste zijn theorie aan. Einstein gelooft dat het heelal niet uitdijt en niet krimpt maar stabiel is. Om ervoor te zorgen dat zijn theorie een stabiel heelal als uitkomst krijgt voegt hij een factor toe: de **kosmologische constante**. Hiermee begaat Einstein dezelfde fout als Aristoteles ruim 2000 jaar voor hem, hij past zijn theorie aan omdat het resultaat niet klopt met zijn onjuiste wereldbeeld.

In 1929 ontdekt Edwin Hubble dat het heelal niet stabiel is maar uitdijt. Einstein ziet zijn fout in en noemt het aanpassen van de relativiteitstheorie zijn **grootste blunder ooit**. Onmiddellijk schrapt hij de kosmologische constante uit zijn theorie.

In 1998 wordt ontdekt dat het heelal uitdijt met een versnelling. Deze versnelde uitdijing kan alleen worden begrepen als er aan de vergelijkingen van Einstein een kosmologische constante wordt toegevoegd, net zoals Einstein in 1917 voor de verkeerde reden heeft gedaan. Het ironische is dat wat Einstein zijn grootste blunder ooit noemde nu wordt gezien als een belangrijke stap in de goede richting. De grootste wetenschappers maken soms de grootste blunders. Maar of iets een blunder is of een geniale ingeving kan alleen de toekomst uitwijzen.

Figuur 89

Albert Einstein
(1879 – 1955)

