



Inleiding tot de sterrenkunde

Sofie Beke, Claudia Degroote, Ilse De Looze, Hilde De Ridder,
Frederik Meskens, Laurian Parmentier, Tim Raeymaekers,
Charlotte Sonck, Karel Van Bockstal, Wim Van Hoof, Timo
Vertongen

Hoofdstuk 1

Our Place in the Universe

Vraag 1.1 *What do we mean by a geocentric universe? In broad terms, contrast a geocentric view of the universe with our modern view of the universe.*

- Geocentrisch model: een oud grieks model dat werd gebruikt om de positie van de planeten te verklaren onder de veronderstelling dat de aarde in het centrum van het heelal lag.
- Moderne beeld : heliocentrisme = zon in centrum van het heelal (voor het eerst bij Copernicus - 16de eeuw)

Vraag 1.2 *Briefly describe the major levels of structure (such as planet, star, galaxy) in the universe.*

- ster = onze zon en andere sterren zijn grootte, gloeiende ballen van gas die licht en warmte ustralen door nucleaire fusie in hun kern
- kernfusie = het proces waarbij lichtere atoomkernen samensmelten tot zwaardere
- planeet = een groot object dat op een baan rond een ster beweegt. Samenstelling: rots, ijs, gas,.... Planeten lijken te schijnen maar ze reflecteren licht van hun ster
- maan = een object dat een baan aflegt om een ster
- satelliet = deze term wordt gebruikt om te verwijzen naar willekeurige objecten die rond een ander object bewegen.
- asteroïde = een relatief klein en rotsig object dat rond een ster beweegt, ook wel kleine planeten (Engels: minor planets) genoemd
- komeet = relatief klein en ijsrijk object dat een baan aflegt om een ster
- zonnestelsel = ons zonnestelsel bestaat uit de zon en al het materiaal dat een beweging maakt rond de zon, inclusief de planeten
- sterrenstelsel = bestaat uit een ster (soms meer dan één) en alle planeten of ander materiaal dat rond de ster beweegt, ongeveer de helft van alle sterrenstelsels bevat 2 of meer sterren

- galaxy = een groot eiland van sterren in de ruimte, bestaat uit meer dan 100 miljoen sterren die tesamen worden gehouden door de aantrekkingskracht en die bewegen rond een gemeenschappelijk centrum. Ons eigen galaxy is het melkwegstelsel
- clusters (or group) of galaxies = tros galaxies = een collectie van galaxies tesamen gehouden door de aantrekkingskracht, indien het over kleine collecties (enkele dozijnen) gaat spreken we over group anders clusters
- supercluster = een gigantisch gebied in de ruimte waar verschillende individuele galaxies, groepen en trossen van galaxies te samen gepakt zijn, het meest dicht bij elkaar dan gelijkwaar in het universum
- universum of cosmos = de totale som van alle materie en energie, dat is alle galaxies en alles tussen hen

Vraag 1.3 *What do we mean when we say that the universe is expanding? How does expansion lead to the idea of the Big Bang?*

We zeggen dat het universum uitbreidt omdat de gemiddelde afstand tussen galaxies vergroot in de tijd. Merk op dat zolang het universum in zijn geheel uitbreidt, de individuele galaxies en zijn bestanddelen (dus ook groepen en trossen) niet uitbreiden door de aantrekkingskracht. Indien het universum uitbreidt moet alles in het verleden dichter bij elkaar gestaan hebben. Na het bekijken van de gemiddelde snelheid van de uitbreiding hebben sterrenkundigen geschat dat de uitbreiding ongeveer 14 miljard jaar geleden begonnen is. Dat beginpunt noemen we de big bang.

Vraag 1.4 *What did Carl Sagan mean when he said that we are “star stuff”?*

Het meeste materiaal waar wij en dus onze planeet van gemaakt zijn is gecreërd in sterren die gestorven zijn voor de geboorte van de zon.

Vraag 1.5 *How fast does light travel? What is a light-year?*

De snelheid van het licht is ongeveer 300000 km/s. Een lichtjaar is de afstand dat het licht kan afleggen in 1 jaar, 9.46 triljoen (9.46×10^{12}) km.

Vraag 1.6 *Explain the statement The farther away we look in distance, the further back we look in time.*

Dit komt uit het feit dat licht tijd nodig geeft om te reizen door de ruimte. Bijvoorbeeld, de helderste ster in e hemel, Sirius, is ongeveer 8 lichtjaar van ons verwijderd, wat betekent dat het licht er 8 jaar over doet om ons te bereiken. Dus wanneer we naar Sirius kijken zien we Sirius zoals het acht jaar geleden was.

Vraag 1.7 *What do we mean by the observable universe? Is it the same thing as the entire universe?*

Het observeerbare universum is het deel van het gehele universum dat kan gezien worden vanop aarde. Het bestaat uit alle objecten die binnen 14 miljard lichtjaar van de aarde liggen (figuur 1.5 pag 8).

Vraag 1.8 *Describe the solar system as it looks on the 1-to-10-billion scale used in the text. How far away are other stars on this same scale?*

De zon en de planeten zijn minuscule in vergelijking met de afstand tussen hen. In het reisschaalmodel is de zon ongeveer de grootte van een appelsien, de andere planeten verschillen in grootte van een amper zichtbaar puntje tot een knikker (Jupiter). De grootte van de aarde is de punt van een balpen en bevindt zich op 15 meter van de zon. Op het vlak van afstand worden de planeten in twee groepen onderscheiden:

- binnenplaneten = Mercurius, Venus, aarde en Mars. Liggen binnen enkele stappen van de zon.
- buitenplaneten = Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus. bv. Jupiter ligt drie keer verder van de zon verwijderd dan Mars

Eén van de meest opvallende kenmerken van ons zonnestelsel is de leegheid (vandaan de naam space). Om de volledige baanbeweging om de zon te beschouwen van de planeten heeft het reismodel een gebied nodig van een km op een km. Verspreid over dit groot gebied zijn alleen de zon, de planeten en enkele manen groot genoeg om zichtbaar te zijn met het blote oog. De sterren liggen heel ver weg. De afstand Pluto-zon is 600m en de afstand zon-dichtste ster is 4000km (de dichtste ster is Alpha Centauri). We kunnen geen details van een ster bekijken (bv oppervlak), zelfs niet met een telescoop. Het is opmerkelijk dat we sterren kunnen zien. Dit komt door de zwartheid van de nachtelijke hemel die toelaat om het oog een zwak punt licht te laten zien.

Manier om ordening planeten te onthouden: My very excellent mother just sent us nine pizzas (Mercurius, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptunus, Pluto).

Vraag 1.9 *Describe at least one way to put the scale of the Milky Way Galaxy into perspective and at least one way to put the size of the observable universe into perspective.*

De 1 op 10 miljard schaal is waardeloos om sterren in perspectief te zien. Daarom delen we die schaal nog eens door 1 miljard en bekomen een schaal van 1 op 10^{19} . Op deze schaal is melkweg stelsel 100m groot (1 lichtjaar is 1mm en diameter melkwegstelsel is 100000 lichtjaar). Ons zonnestelsel wordt nu een microscopisch klein puntje. De 4.4 lichtjaar verwijdering tussen ons zonnestelsel en Alpha Centauri is 4.4 mm op deze schaal.

Het melkwegstelsel is één van de 100 miljard galaxies in het observeerbare universum. Als we aannemen dat er 100 miljard sterren in elk galaxie zijn, dan zijn er 10^{22} sterren. Dit is te vergelijken met het aantal zandkorreltjes op alle stranden in de wereld (math insight p13).

Vraag 1.10 *Imagine describing the cosmic calendar to a friend. In your own words, give your friend a feel how the human race fits into the scale of time.*

Het menselijk bestaan valt in de laatste 30 seconden. Meer op pag 14 en 15 figuur 1.11

Vraag 1.11 *Define astronomical unit, ecliptic plane, and axis tilt. Explain how each is related to Earth's rotation and/or orbit.*

- astronomische eenheid = AE = de gemiddelde afstand tussen aarde en zon, ongeveer 150 miljard km.
- rotatie = de beweging van een object om zijn as, bv aarde beweegt elke dag om zijn as
- orbit = de baanbeschrijvende beweging van een object rond een ander, bv aarde beweegt elk jaar om de zon
- eclipticavlak = vlak waarin de aarde om de zon beweegt.
- gehele as (axis tilt) van een planeet in ons zonnestelsel is de hoek waarover de as van een planeet is geheld tov een loodlijn op het eclipticavlak. Bij de aarde is dit 23.5 graden.

De aarde draait rond de zon met ongeveer een snelheid van 30km/s. Merk op dat de aarde rond de zon draait in dezelfde richting dat de aarde om haar as draait (tegen de klok in). Het idee van axis tilt heeft alleen betekenis in relatie met het eclipticavlak. Het idee "tilt" geeft geen betekenis in de ruimte, want er is daar geen up en down. We zien up als weg van het centrum van de planeet en down als naar het centrum van de planeet.

Vraag 1.12 *What is the shape of the Milky Way Galaxy? Where is our solar system located within the galaxy? How does our solar system move within the galaxy?*

De vorm is een platte schijf met centraal een uitstulping (fig 1.15 pag 18). Ons zonnestelsel bevindt zich 28000 lichtjaar van het centrum van het melkwegstelsel (fig 1.14 p16). We bewegen random tov van de andere sterren in ons local solar neighborhood (sterren in de nabijheid van ons zonnestelsel). Sterren in de local solar neighborhood bewegen random tov. van elkaar. Die sterren bewegen ook vrij snel tov. elkaar (70000km/h, 3 keer zo snel als een ruimtestation dat rond de aarde vliegt). Toch zien we die sterren niet bewegen met het blote oog. Dit komt omdat de sterren heel erg ver van ons verwijderd zijn. Over een tijdsspanne van 10000 jaar zal je wel een duidelijk verschil merken tussen de sterrenbeelden. Na 500000 jaar zijn alle sterrenbeelden onherkenbaar geworden. Onze zon en andere sterren in onze omgeving maken een baan om het centrum van het melkwegstelsel elke 230 miljoen jaar omdat het gehele melkwegstelsel roteert.

Vraag 1.13 *Distinguish between our galaxy's disk and halo. Where do most visible stars reside? Where does the mysterious dark matter seem to reside?*

De galactische schijf heeft een doorsnee van 100.000 lichtjaren en een dikte van ongeveer 3.000 lichtjaren. In de schijf zijn er diverse spiraalarmen, plaatsen waar de dichtheid van sterren (en vooral die van jonge, lichtkrachtige sterren) groter is dan elders. Deze 'armen' lopen van binnen naar buiten. De schijf bevat ook stof van tussen de sterren, koel gas en sterren van verschillende leeftijden. De halo is een 'bolvormige ruimte' om de Melkweg heen. Daarin bevinden zich de relatief kleine bolvormige sterrenhopen, elk

bestaande uit zo'n 100.000 zeer oude sterren. Door spectraalanalytisch onderzoek ontdekten de astronomen dat de samenstelling van die sterren verschilt van die van de schijf. De meeste zichtbare sterren bevinden zich in de schijf. Het meeste licht van het melkwegstelsel komt van sterren en gas. Metingen leveren als resultaat dat de meeste massa van het melkwegstelsel in de halo zit. We kennen niet de aard van die massa omdat we geen licht ontdekken dat vandaar afkomstig is, we noemen die massa zwarte materie. In werkelijkheid is de meeste massa van het universum gemaakt uit zwarte materie, maar we weten niet wat het is. In het centrum van de Melkweg bevindt zich hoogst waarschijnlijk een zwart gat. Dit is echter niet erg actief, want - in tegenstelling tot de situatie in de galactische schijf - is er in het centrum weinig interstellair gas overgebleven.

Vraag 1.14 *What key observations by Edwin Hubble lead us to conclude that the universe is expanding? Use the raisin cake¹ model to explain how these observations imply expansion.*

- Alle galaxies buiten de local group (de groep van meer dan 30 galaxies waartoe ook het melkwegstelsel behoort) bewegen van ons weg.
- Hoe verder de galaxies van ons verwijderd zijn, hoe sneller ze bewegen. (cake model pag 19 fig 1.16)

Besluit: we zitten nooit stil (fig 1.17 pag 20)

- We draaien rond de aardas en bewegen op een baan rond de zon
- ons zonnestelsel beweegt relatief tov nabijgelegen sterren (van het local solar neighborhood) terwijl het een baan beschrijft om het centrum van het melkwegstelsel (doordat melkwegstelsel roteert)
- ons melkwegstelsel beweegt tov de andere galaxies in de locale groep
- het universum breidt uit: hoe verder het object van ons gelegen hoe sneller het wegbeweegt van ons

¹Of chocoladeschuimkoekjes. . .

Hoofdstuk 2

Discovering the universe for yourself

Vraag 2.1 *What are constellations? How did they get their names?*

Een sterrenbeeld is een gebied aan de hemel met goedgedefinieerde randen. Je kan het vergelijken met: elk stuk grond in de VS is een deel van een staat, zo behoort elk punt in de hemel tot een sterrenbeeld. De officiële randen van de sterrenbeelden werden in 1928 beslist door leden van de IAU (International Astronomical Union), een vereniging van sterrenkundigen over de gehele wereld. De IAU verdeelde de hemel in 88 sterrenbeelden en gaf de sterrenbeelden namen die Europese en Amerikaanse sterrenkundigen gewoon waren.

Vraag 2.2 *Suppose you were making a model of the celestial sphere with a ball. Briefly describe all the things you would need to mark on your celestial sphere.*

De sterren in een bepaald sterrenbeeld lijken heel dicht bij elkaar te liggen. We verliezen ons dieptezicht omdat die sterren ver van ons afliggen. Die sterren liggen onderling ook nog ver uit elkaar (verschillende afstanden). Onze Griekse voorouders hielden deze illusie voor werkelijkheid en dachten dat de sterren op een grote bol lagen rond de aarde, de hemelsfeer.

We weten dat de aarde niet in het centrum ligt van een bal met sterren, maar het kan ons wel helpen om een beeld te hebben van de hemel. Daarvoor hebben we nodig:

- *noordelijke hemelpool* = het punt boven de aardse noordpool
- *zuidelijke hemelpool* = het punt boven de aardse zuidpool
- *equator* = projectie van de evenaar van de aarde in de ruimte, maakt een complete cirkel aan de hemelsfeer
- *ecliptica* = is het pad dat de zon volgt zoals zij lijkt een cirkel te beschrijven op de hemelsfeer één keer per jaar.

Daarnaast krijgen we ook nog op de hemelsfeer:

- de randen van de sterrenbeelden
- voorbeelden van heldere sterren

Vraag 2.3 *On a clear, dark night, the sky may appear to be full of stars. Does this appearance accurately reflect the way stars are distributed in space? Explain.*

Op een klare, maanloze nacht ver van ieder licht zijn er meer dan 2000 sterren zichtbaar met het blote oog samen met een witachtige baan van licht die we de Melkweg noemen (zie fig. 2.1). Je kan alleen maar delen van de melkweg zien op speciale tijdstippen. Maar de melkweg cirkelt altijd rond de hemelsfeer en passeert daarbij meer dan een dozijn sterrenbeelden. Het grootste en helderste deel van de Melkweg is zichtbaar vanop het zuidelijk halfrond. De melkweg heeft een belangrijk verband met het melkwegstelsel: het volgt het symmetrievlak van het melkwegstelsel - het vlak van de melkweg - zoals het lijkt vanop onze plaats in de buitenkant van het melkwegstelsel. In welke richting we ook kijken in de schijf van het melkwegstelsel, we zien ontelbaar veel sterren en wolken van stof. Deze sterren en wolken vormen de melkweg in onze nachtelijke hemel. We zien veel minder sterren en stofwolken als we in richtingen kijken die weg gaan van het galactische vlak. Als we zo blijven kijken, krijgen we een goed zicht op verafgelegen sterren (fig. 2.5).

Vraag 2.4 *Why does the local sky look like a dome? Define horizon, zenith, and meridian. How do we describe the location of an object in the local sky?*

Als we buiten naar de sterren kijken, zien we niet de hemelsfeer. Als we kijken, neemt de hemel de vorm aan van een koepel. We zien de helft van de hemelsfeer van op gelijk welke locatie. Die helft van de hemelsfeer die je op die plaats ziet op elk moment, noemen we de lokale hemel of de local sky.

De horizon is de grens tussen de aarde en de hemel, het is m.a.w. de grens tussen wat je kan zien en wat niet.

Het zenit is het punt boven je hoofd (hoogte = 90°).

De meridiaan is een imaginaire halve cirkel die zich uitstrekt van de horizon in het zuiden, door het zenit en weer in de horizon maar in het noorden.

Elk object aan de hemel kan beschreven worden door zijn azimut (direction) en zijn hoogte (altitude) (zie cursus blz. 24 en fig. 2.6 blz. 30).

Vraag 2.5 *Explain why we can measure only angular sizes and angular distances for objects in the sky.*

Omdat we geen gevoel van diepte hebben op de hemelsfeer kunnen we ook niet de juiste grootte van het object inschatten dat we zien.

De hoekmaat (angular size) van een object is de hoek die het object lijkt te maken in je gezichtsveld (vb. zie fig. 2.7 blz. 30). Merk op dat de hoekmaat niet bijdraagt om de grootte van het object te weten (vb. de diameter van de zon is 400 keer de diameter van de maan, maar toch hebben ze dezelfde angular size).

De angular distance (hoekafstand) tussen twee objecten in de hemel is de die hoek die hen lijkt te scheiden.

Vraag 2.6 *What are circumpolar stars? Are most stars circumpolar at the North Pole or in the US? Explain.*

Een circumpolaire ster is een ster die altijd boven de horizon blijft op een bepaalde hoogte. Ze komt nooit op en gaat nooit onder (fig. 2.10 blz. 31). Er zijn meer sterren circumpolair

aan de noordpool, want alle sterren die je ziet op de noordpool zijn circumpolair. De zon ligt elk jaar een half jaar op de noordelijke helft van de hemelsfeer. Gedurende deze zes maanden cirkelt de zon, gezien vanop de noordpool, rond de noordelijke hemelpool als een circumpolaire ster.

Vraag 2.7 *What are latitude (breedtegraad) and longitude (lengtegraad)? Does the sky vary with latitude? Does it vary with longitude? Explain.*

De sterrenbeelden die je ziet aan de nachtelijke hemel hangen af van de locatie en de tijd van het jaar.

- Breedtegraad: Meet de noord-zuid positie op aarde en is gedefinieerd op 0° bij de evenaar en stijgt naar noord- en zuidpool toe. Breedtegraadcirkels zijn dus cirkels evenwijdig met de evenaar.
- Lengtegraad: Meet de oost-west positie. Internationaal geldt dat de lijn die door Greenwich gaat lengtegraad nul heeft. Deze lijn noemen we de nulmeridiaan.

De hemel varieert mee met de breedtegraad (zie fig. 2.12 blz. 34). Merk op dat de breedtegraad van de hemelpool die zichtbaar is op de plaats waar je je bevindt altijd gelijk is aan de breedtegraad van de plaats. De hemel varieert niet met de lengtegraad.

Vraag 2.8 *What is the zodiac, and why do we see different parts of it at different times of year?*

De nachtelijke hemel verandert doorheen het jaar omdat de positie van de aarde verandert doordat die rond de zon beweegt (zie fig. 2.14 blz. 35). De zodiak bestaat uit de sterrenbeelden langs de ecliptica.

Vraag 2.9 *Suppose Earth's axis has no tilt. Would we still have seasons? Why or why not?*

We hebben dan geen seizoenen. De seizoenen zijn een gevolg van de verandering in oriëntatie van de rotatie-as van de aarde, relatief tov van de zon. Moest de aardas niet getild zijn, zou het altijd warm zijn rond de evenaar, en kouder naar de polen toe.

Vraag 2.10 *Briefly describe what is special about the summer and winter solstices and the spring and fall equinoxes.*

Hoe ontstaan seizoenen? Door de helling van de aardas valt het zonlicht verschillend in op de aarde op verschillende tijdstippen in het jaar (zie fig. 2.15 blz. 36). Hieruit volgt ook dat dagen langer en warmer zijn in de zomer dan in de winter. Zonlicht treft het zomerhalfmond met een veel steilere hoek dan het winterhalfmond treft. Een steilere hoek betekent dat het zonlicht meer geconcentreerd is, daarom is de zomer warmer dan de winter. De steilere hoek impliceert ook dat de zon een langer en hoger pad aan de hemel volgt dan in de winter. Daardoor zijn de dagen langer en de schaduwen 's middags korter. Merk op dat de seizoenen niet afhangen van de afstand aarde-zon.

- Zomerpunt: Rond 21 juni elk jaar, het moment waarop het noordelijk halfrond het meest direct zonlicht ontvangt (het zuidelijk halfrond ontvangt dus het minst directe zonlicht).
- Winterpunt: Rond 21 december, het noordelijk halfrond ontvangt het minste rechtstreekse zonlicht.
- Lentepunt: Rond 21 maart, het moment dat het noordelijk halfrond van weg van de zon getild overgaat naar getild naar de zon toe. Het zonlicht valt dan gelijk in op beide hemisferen.
- Herfstpunt: Rond 22 september, het moment dat het noordelijk halfrond van naar de zon toe getild gaat naar van de zon weggetild (zie fig. 2.17, 2.18 en 2.19).
- Zomerpunt: Punt op de hemelsfeer waar de ecliptica het verst noordelijk van de hemelequator is verwijderd.
- Winterpunt: Punt op de hemelsfeer waar de ecliptica het verst zuidelijk van de hemelequator is verwijderd.
- Lentepunt: Punt in Pisces (zie fig. 2.14 blz. 35) op de hemelsfeer waar de ecliptica de hemelequator snijdt en het moment in tijd wanneer de zon daar passeert elk jaar.
- Herfstpunt: Punt in Virgo op de hemelsfeer waar de ecliptica en de hemelequator elkaar snijden.

Vraag 2.11 *What is precession, and how does it affect the sky that we see from Earth?*

Precessie is de geleidelijke schommeling van de as van een draaiend object rond een verticale lijn (zie fig. 2.20 blz. 40). De gevolgen zijn:

- Heeft geen invloed op de seizoenen (want de helling zélf verandert niet, enkel de oriëntatie in de ruimte).
- De sterrenbeelden, geassocieerd met het zomer-, lente-, herfst- en winterpunt, veranderen in de tijd, en de hemelpool wijst niet meer naar de poolster.

Het ontstaan van de precessiebeweging is een gevolg van de aantrekkingskracht op een geheld, draaiend object dat geen perfecte bol is. De rotatie precesseert omdat we gravitationele rukken krijgen van de maan en van de zon. De aarde is geen perfecte bol, maar puilt wat uit aan de evenaar. Omdat de evenaar $23,5^\circ$ geheld is t.o.v. het eclipticavlak, probeert de gravitationele aantrekkingskracht van de zon en de maan de equatoriale uitpuiling in het eclipticavlak te trekken. Die kracht probeert dus om de getilde as recht te maken zodat de equator en de evenaar samenvallen. De aarde wil echter rond dezelfde as draaien. De gravitatiekracht slaagt er niet in om de aardas van de aarde te veranderen en er neemt alleen een precessiebeweging plaats. Binnen de 26000 jaar zal de as dezelfde richting hebben als ze nu heeft.

Vraag 2.12 *Briefly describe the Moon's cycle of phases. Can you ever see a full moon at noon? Explain.*

Zie fig. 2.22 blz. 42. Volle maan komt voor wanneer de zon in oppositie ligt met de maan. Je kan nooit een volle maan hebben op de middag. De volle maan komt op bij zonsondergang en gaat onder bij zonsopgang, met zijn hoogste punt om middernacht (want natuurlijk enkel zichtbaar als in de nachtkant van de aarde zit).

Vraag 2.13 *What do we mean when we say that the Moon exhibits synchronous rotation? What does this tell us about Moon's periods of rotation and orbit?*

De omlooptijd van de maan om de aarde (zijnde 27 dagen en 1/3) is gelijk aan de tijd waarop de maan één keer rond haar as draait. Het gevolg is dat we altijd dezelfde kant van de maan zien.

Vraag 2.14 *Why don't we see an eclipse at every new and full moon? Describe the conditions that must be met for us to see a solar or lunar eclipse.*

De baan van de maan om de aarde maakt een helling van 5° met het eclipticavlak. Bij een maansverduistering ligt de aarde tussen de maan en de zon zodanig dat de schaduw van de aarde op de maan valt. Bij een zonsverduistering ligt de maan tussen de zon en de aarde zodat de schaduw van de maan op aarde valt. De voorwaarden zijn:

1. Voor een maansverduistering hebben we een volle maan nodig, voor een zonsverduistering een nieuwe maan. Dit zijn de enige fasen zodanig dat de zon, aarde en maan op één lijn liggen.
2. De nieuwe en volle maan neemt plaats tijdens één van de periodes wanneer dat de knopen van de maanbaan op één lijn liggen met de zon en de aarde, want dit zijn de enige tijdstippen waarop de volle en nieuwe maan in het eclipticavlak liggen.

Soorten zons en maansverduistering: zie blz. 26 tot 29 en blz. 45, fig. 2.24, 2.25, 2.26 en 2.28.

De twee periodes in het jaar dat de knopen van de maanbaan om de aarde op één lijn liggen met de zon noemen we de eclipsseizoenen. Door de teruglopende beweging van de knopenlijn van de maanbaan nemen die seizoenen op verschillende tijdstippen plaats. De Sarosperiode is de periode waarin een eclips opnieuw plaatsvindt (18 jaar en 11,33 dagen).

Vraag 2.15 *What do we mean by the apparent retrograde motion of the planets? Why was it difficult for ancient astronomers to explain but easy for us to explain?*

De ogenschijnlijke achterwaartse beweging refereert naar de ogenschijnlijke beweging van een planeet, gezien vanop aarde, gedurende een periode van enkele weken of maanden wanneer de planeten relatief westwaarts bewegen t.o.v. de sterren in onze hemel. In vroegere tijden dacht men dat de aarde in het centrum van het heelal lag. De ogenschijnlijke achterwaartse beweging heeft een simpele uitleg als we veronderstellen dat de zon in het centrum ligt (zie fig. 2.23 a, merk op dat hoe verder een planeet van de zon gelegen is, hoe trager ze om de zon beweegt). De oude sterrenkundigen konden dit verschijnsel niet uitleggen. Hun uitleg was complex en volledig fout (ze dachten o.a. dat de hemelsfeer rond de aarde draait).

Vraag 2.16 *What is stellar parallax? Briefly describe the role it played in making ancient astronomers believe in an Earth-centered universe.*

De sterrenparallax is de ogenschijnlijke verplaatsing van de positie van een dichtbij gelegen ster die voorkomt als we de ster bekijken vanop verschillende posities in de omloopsbaan van de aarde om de zon elk jaar. Dichterbij gelegen objecten hebben meer parallax dan verder afgelegen objecten. De Grieken geloofden dat alle sterren op dezelfde hemelsfeer lagen, ze verwachtten sterrenparallax op een andere manier te zien. Als de aarde om de zon draait, dachten ze dat we op verschillende tijdstippen in het jaar dichterbij de hemelsfeer lagen en dat er daarom verschil was in de hoek waarop we de sterren zagen t.o.v. elkaar. Hoe hard ze ook zochten, ze vonden geen teken van sterrenparallax. Ze concludeerden dat één van de volgende twee redenen waar was:

1. De aarde draait rond de zon en de sterren zijn zodanig ver afgelegen dat we geen sterrenparallax met het blote oog kunnen waarnemen.
2. Er is geen sterrenparallax omdat de aarde het centrum van het universum is.

Ze dachten dat het tweede antwoord waar was. Ze konden zich niet inbeelden dat sterren zo ver weg liggen. Vandaag kunnen we sterrenparallax ontdekken met de hulp van een telescoop.

Hoofdstuk 3

The science of astronomy

Vraag 3.1 *Eratostenes' schatting voor de omtrek van de aarde.*¹

Hij deed dit door het vergelijken van de hoogtes van de zon op het zomerpunt in de Egyptische plaatsen Syene en Alexandrië. Eratostenes wist dat de zon juist boven je hoofd (zenit) passeerde op het zomerpunt. Hij wist ook dat de zon in Alexandrië ten tijde van het zomerpunt amper 7° afwijkt van het zenit. Hij beredeneerde dat Alexandrië 7° meer naar het noorden ligt (7° noorderbreedte) dan Syene. Aangezien 7° gelijk is aan $\frac{7}{360}$ van een cirkel, concludeerde hij dat de noord-zuid afstand tussen Alexandrië en Syene $\frac{7}{360}$ van de omtrek van de aarde moet zijn. Eratostenes schatte dat de noord-zuid afstand tussen Syene en Alexandrië ongeveer 5000 stadia was (de stadia is een Griekse eenheid van afstand; 1 stadia \approx 1/6km. Hij concludeerde:

$$\frac{7}{360} \times \text{omtrek aarde} = 5000 \text{ stadia},$$

waaruit

$$\text{omtrek aarde} \approx 250000 \text{ stadia} \approx 42000 \text{ km},$$

wat vrij dicht bij de juiste waarde is (40000km) (zie ook figuur blz. 67).

Vraag 3.2 *Hoe legden de Grieken de beweging van de planeten uit?*

Om de ogenschijnlijke achterwaartse beweging van planeten uit te leggen, gaf het Ptolemeïsch model een idee dat al gesuggereerd werd door Apollonius. Dit idee houdt in dat elke planeet beweegt rond de aarde op een kleine cirkel die draait op een grote cirkel (zie fig. 3.15 blz. 68). De kleine cirkel wordt een epicyclus genoemd en de grote cirkel een deferent. Een planeet die deze cirkel-op-cirkelbeweging maakt, volgt ten lus, gezien vanop aarde, met het achterwaartse deel van de lus dat de schijnbare achterwaartse beweging nabootst.

Vraag 3.3 *De derde wet van Kepler.*

De derde wet van Kepler leert ons dat $p^2 = a^3$, met a de grote as (uitgedrukt in AE) en p de omlooptijd van een planeet om de zon (uitgedrukt in aardse jaren). Kepler wist

¹Enkel de belangrijkste onderwerpen worden hier besproken. De vragen in het boek zijn niet echt relevant.

enkel dat deze wet gold voor planeten die om de zon bewegen. Deze wet geldt ook voor asteroiden en planeten. We kunnen de derde wet van Kepler gebruiken onder de volgende voorwaarden:

1. In de vorm $p^2 = a^3$, Keplers derde wet laat alleen objecten toe die om de zon bewegen of die bewegen om andere sterren met precies dezelfde massa als de zon.
2. We kunnen de derde wet van Kepler gebruiken in zijn originele vorm als we de omlooptijd uitdrukken in jaren en de afstanden in AE.

Zie ook *MATHEMATICAL INSIGHT 3.2* blz. 75.

Vraag 3.4 *Ptolemeïsch zicht van Venus tegenover de Copernicaanse visie.*

Figuur 3.24 geeft een mooi overzicht.

Vraag 3.5 *Wat is het verschil tussen astrologie (sterrenwichelarij) en astronomie (sterrenkunde)?*

Astronomie en astrologie hebben een gemeenschappelijk verleden met observatie van de hemel, maar zijn vandaag heel erg verschillend. Astronomie is een moderne wetenschap die ons meer leert over het universum. Astrologie is een zoektocht naar verborgen invloeden op het menselijk leven gebaseerd op die positie van planeten en sterren in de hemel.² Wetenschappelijke testen hebben aangetoond dat astrologische voorspellingen die juist zijn, niet meer is dan puur toeval. Voorspellingen hebben dus geen enkele wetenschappelijke waarde.

²Of gelijk Dejonghe het zou definiëren als b.s., bullshit.

Hoofdstuk 4

Celestial Timekeeping and Navigation

Vraag 4.1 *Why is a sidereal day shorter than a solar day?*

We denken gewoonlijk dat een dag de tijd is dat de aarde één keer roteert, maar als we de tijd precies opmeten vinden we dat die niet precies 24 uur is. De periode van een aardrotatie is ongeveer 4 minuten korter dan 24 uur.

We herinneren ons dat de dagelijkse beweging van de sterren aan onze hemel een illustratie is gecreëerd door de aardrotatie. De aardrotatie (west naar oost) zorgt ervoor dat de sterren rond de aarde lijken te cirkelen elke dag van oost naar west.

Dus, je kan de aardrotatie meten door te meten hoe lang het duurt voor een willekeurige ster om zijn hoogste punt in de hemel op een dag naar zijn hoogste punt in de hemel te gaan op de volgende dag.

Deze tijdsperiode noemen we de sterrendag en is ongeveer 23 uur 56 minuten. De sterrendag is de aardse rotatieperiode. Onze 24 uur dag, die we de zonnedag noemen is de gebaseerd op de tijd die het neemt voor de zon om één omtrek te maken aan de lokale hemel. Je meet deze periode om dezelfde manier als de sterren en ze is ± 24 uur. Op figuur S1.2 pag 92 staat gedemonstreerd waarom een sterrendag korter is dan een zonnedag.

De aarde heeft ongeveer 365 dagen (1 jaar) nodig om een baan rond de zon te maken. De aarde beweegt 1° per dag over zijn baan. Dus een zonnedag representeert ongeveer 361° rotatie, meer dan de 360° voor een sterrendag. Deze extra 1° rotatie neemt ongeveer $\frac{1}{360}$ van de aardrotatie periode, wat ongeveer 4 minuten is.

Vraag 4.2 *What is the difference between a sidereal month and a synodic month? Between a sidereal year and a tropical year? Between planet's sidereal period and its synodic period?*

- *synodische maand*: de tijd voor een volledige cyclus van maanfasen, met een gemiddelde van ongeveer 29.5 dagen.
- *siderische maand*: ongeveer 27.25 dagen, de tijd nodig voor de maan om een volledige baan om de zon af te leggen (gemeten langs de sterren)'
- *siderisch jaar*: de tijd nodig voor de aarde om juist één baan af te leggen, gemeten t.o.v. de sterren. ongeveer 20 minuten lager dan het tropisch jaar waar onze kalender op gebaseerd is.

- *tropisch jaar*: de tijd van een lentepunt tot het volgende, waar onze kalender op gebaseerd is.
- *siderische periode van een planeet*: de periode waarin de planeet een baan aflegt om de zon.
- *synodische periode van een planeet*: de tijd tussen opeenvolgende tijdstippen waarop de planeet en de zon op één lijn liggen in onze hemel. Voor buitenplaneten is dit de tijd tussen twee opposities. Voor binnenplaneten is dit de tijd tussen twee bovenconjuncties.

De synodische maand heeft zijn naam gekregen omwille van het feit dat de zon en de maan elkaar in de hemel ontmoeten (liggen op één lijn) met elke nieuwe maan. De synodische maand is niet de juiste maanrotatieperiode. De beweging van de aarde om de zon betekent dat de maan meer dan een volledige baan om de aarde moet afleggen om van nieuwe maan naar nieuwe maan te gaan (zie figuur S1.3 pag. 93).

Het verschil tussen siderisch en tropisch jaar is een gevolg van de 2600 jaar durende cyclus van de aardprecessie. Precessie verandert niet alleen de aardrotatie van de as maar verandert ook de locatie op de baan van de aarde wanneer de seizoenen beginnen. Elk jaar verandert de locatie van het winter-, herfst-, zomer- en lentepunt langs de sterren ongeveer $\frac{1}{2600}$ van de weg (± 20 minuten) rond de baan.

Vraag 4.3 *What do we mean by opposition, conjunction and greatest elongation for planets? Explain both for planets closer than Earth to the Sun and for planets further than Earth from the Sun.*

Zie figuur S1.4 pag 93 en pag 17 en 18.

- *oppositie*: het punt waar een planeet tegenovergesteld lijkt te staan t.o.v. de zon in onze hemel.
- *conjunctie*: wanneer de planeet en de zon op één lijn liggen.
- *elongatie*: voor Mercurius en Venus, het punt waar ze het verst lijken te zitten van de zon in onze hemel.

Vraag 4.4 *Under what circumstances do we see a transit of a planet across the Sun?*

Als de binnenplaneet bij een bendenconjunctie bovendien in de buurt van één van zijn knopen staat, kan een overgang over de zon plaatsvinden: planeetschijf schuift vanop aarde gezien voor de zonnenschijf.

Vraag 4.5 *What is apparent solar time? Why is it different from mean solar time? How are standard time, daylight saving time, and universal time related to mean solar time?*

Vraag 4.6 *Describe the origins of Julian and Gregorian calendars. Which one do we use today?*

Zie cursus pag 65 en 66.

Juliaanse kalender: schrikkeljaar.

Gregoriaanse kalender: wordt wereldwijd gebruikt.

Merk nog even op dat onze kalender gebaseerd is op de lengte van het tropisch jaar, wat de tijd is tussen twee doorgangen door het lentepunt.

Julius Ceasar voerde het concept van een schrikkeljaar in om de seizoenen en de kalender gelijklopend te houden. Bv. indien het lentepunt voorkwam op 22 maart, kwam het vier jaar later voor op 23 maart en zo verder.

Vraag 4.7 *What do we mean when we describe the equinoxes and solstices as point on the celestial sphere? How are these points related to the times of year that we call the equinoxes and solstices?*

Zie figuur S1.8 pag. 99.

Herinner dat de zomer-, lente-, herfst- en winterpunten speciale momenten in het jaar zijn die ons helpen om de seizoenen te definiëren. Bijvoorbeeld, het lentepunt, wat plaatsheeft op 21 maart elk jaar, is het moment wanneer de lente begint op de noordelijke hemelsfeer en de herfst begint op de zuidelijke hemelsfeer. Deze momenten corresponderen met posities in de aardse baan en vandaar met schijfbare locaties van de zon langs de ecliptica. Zoals getoond in figuur S1.8, heeft het lentepunt plaats wanneer de zon op de ecliptica is op het punt waar de zon gaat van de zuidelijke kant van de hemelequator naar de noordelijke kant van de hemelequator. Dit punt noemen we het lentepunt. Dus, de term lentepunt heeft een dubbele betekenis: het is het moment waarop de lente begint en ook het punt op de ecliptica waar de zon lijkt te zijn op dat moment. Voor de andere punten analoog. (Bekijk ook de figuur S1.9 pag. 100.)

Vraag 4.8 *What are declination and right ascension? How are these celestial coordinates similar to latitude and longitude on Earth? How are they different?*

Vraag 4.9 *How and why do the Sun's celestial coordinates change over the course of each year?*

De zon beweegt geleidelijk langs de ecliptica. Het duurt een jaar voor de zon om één volledige toer om de zon af te leggen, wat betekent dat ze beweegt door al de 24 uren van de rechte klimming tijdens de loop van het jaar (zie figuren 1.12 pag. 101). Uit tabel S1.1 pag. 103 volgt dat de verandering in de declinatie van de zon sneller is aan het herfst- en lentepunt dan aan het zomer- en winterpunt. De declinatie van de zon verandert van -12° op 21 februari naar 12° op 21 april, een verschil van 24° in juist 2 maanden. Dit in tegenstelling tot de variatie van 20° op 21 mei naar 23.5° op 21 juli aan het zomerpunt. Dit verklaart waarom het aantal uren daglicht snel toeneemt in de lente en snel daalt in de herfst, terwijl het aantal uren zonlicht ongeveer constant blijft gedurende enkele maanden in de zomer en winter.

Vraag 4.10 *Suppose you are standing at the North Pole. Where is the celestial equator in your sky? Where is the north celestial pole? Describe the daily motion of the sky. Do the same for the sky at the equator and at latitude 40° N.*

Vraag 4.11 *Describe the Sun's paths through the local sky on the equinoxes and on the solstices for latitude 40° N. Do the same for the North Pole, South Pole and Equator.*

De baan van de zon hangt alleen af van de declinatie en de breedtegraad.

Op het lente- en herfstpunt is de zon in de hemelequator en volgt het hemelequatorpad: komt op in het oosten snijdt de meridiaan op een hoogte van 90° -breedtegraad, en gaat onder in het westen.

Zie figuren 1.17 1.18 1.19 1.20.

Vraag 4.12 *What is special about the tropics of Cancer and Capricorn? Describe the Sun's path on the sositices at these latitudes. Do the same for the Arctic and Antartic Circles.*

Niet belangrijk.

Vraag 4.13 *Briefly describe how you can use the Sun or stars to determine your latitude and longitude.*

Vraag 4.14 *What is the global psitioning system?*

Triviaal.

Hoofdstuk 5

Making Sense of the Universe

Vraag 5.1 *How does speed differ from velocity? Give an example in which you can be traveling at constant speed but not at constant velocity.*

- ‘Speed’ zegt hoe snel een voorwerp beweegt in een zekere tijdseenheid. Vb: wagen rijdt tegen 100 km/u.
- ‘Velocity’ zegt hoe snel een voorwerp beweegt in een bepaalde richting. Vb: wagen rijdt tegen 100 km/u naar het noorden.
- Wagen die constant aan zelfde snelheid rijdt, maar bochten maakt heeft steeds zelfde ‘speed’, maar niet zelfde ‘velocity’.

Vraag 5.2 *What do we mean by acceleration? What is the acceleration of gravity? Explain what we mean when we state an acceleration in units of m/s^2 .*

- Versnelling is elke verandering van ‘velocity’, wat betekent: vertragen, versnellen, of aan constante snelheid veranderen van richting.
- De gravitatieversnelling is de versnelling die voorwerpen ondergaan wanneer ze in vrije val naar een hemellichaam aangetrokken worden.
- De eenheid in ‘meter per seconde kwadraat’ kan aanzien worden als per seconde verder in val de snelheid van het voorwerp in het kwadraat zal toenemen. Vb bij de aarde: 9,82 meter per seconde per seconde.

Vraag 5.3 *What is momentum? How can momentum be affected by a force? What do we mean when we say that momentum will be changed only by a net force?*

- Moment = massa \times snelheid (‘velocity’) = $m \cdot v$; verandering van moment bij constante massa is steeds verandering van snelheid. Aangezien kracht $F = m \cdot a$ (zie Newton) en $a = v/s$ kan dit een moment beïnvloeden. Vb: botsen van twee bewegende voorwerpen met vervorming is vb van omzetting moment in kracht.

- Op elk voorwerp werken een aantal basiskrachten op in, zoals gravitatiekracht of elektromagnetische kracht tss atomen, deze krachten moeten eerst overwonnen worden (gelijk van grootte en tegengesteld van zin) om te spreken van een netto kracht groter dan nul. Indien de netto kracht groter is dan nul, dan wordt het moment veranderd.

Vraag 5.4 *What is free-fall, and why does it make you weightless? Briefly describe why astronauts are weightless in the Space Station.*

- Vrije val gebeurt als je valt wanneer er geen tegenkracht (opwaartse kracht, de ‘grond’ vb) op je inwerkt waardoor je niet wordt tegengehouden en enkel de gravitatiekracht werkt. Je bent gewichtloos omdat je geen ‘gewicht’ (in tegenstelling tot ‘massa’ is dit de druk van je massa op iets) op iets uitoefend, er is geen massa-drukkracht bij vrije val, dus geen gewicht.
- Ze zijn in ‘vrije val’: indien je snel genoeg vooruit beweegt terwijl je ‘valt’ (± 28000 km/u), ben je eigenlijk ver genoeg voorbewogen rond de aarde om niet meer te ‘vallen’, maar om rond de aarde mee te bewegen.

Vraag 5.5 *State each of Newton’s three laws of motion. For each law, give an example of its application.*

1. 1e wet: Een object beweegt aan constante snelheid als er geen netto kracht op inwerkt.
Vb: een ruimteschip heeft geen brandstof nodig om te blijven bewegen in de ruimte.
2. 2e wet: $\text{Kracht} = \text{massa} \times \text{versnelling}$. Vb: een voetbal versnelt als een voetballer een kracht uit zijn been haalt door dit te bewegen.
3. 3e wet: Voor elke kracht is er steeds een zelfde maar tegengestelde ‘reactiekracht’.
Vb: Om een raket te laten ontsnappen aan de aardse zwaartekracht is er een gasontbradingskracht nodig tegengesteld aan deze aardse zwaartekracht.

Vraag 5.6 *What are the laws of conservation of momentum, conservation of angular momentum, and conservation of energy? For each, give an example of how it is important in astronomy.*

1. Behoud van moment:
Het totale moment van interagerende objecten kan niet veranderen, zolang er geen externe kracht op inwerkt, dus het totale moment is geconserveerd. Vb: afschieten raket: de hoeveelheid voorwaarts moment dat de raket wint = de hoeveelheid achterwaarts moment in het gas dat uit de raket schiet.
2. Behoud van hoekmoment: ($\text{hoekmoment} = m \times v \times r$)
Het totale moment van roterende/omwentelende voorwerpen blijft behouden, zolang er geen ‘draaikracht’ of ‘torsie’ op inwerkt. Vb: aardse hoekmoment blijft steeds constant als het om de zon draait.
Gevolg:

- Aarde beweegt sneller dichterbij de zon, trager verder van de zon (cf. formule hoekmoment: m cte, v en r (straal tot zon) variabel = 1e wet Kepler!)
- Aarde heeft geen brandstof nodig (zolang het geen deel van zijn draaimoment afgeeft aan ander object \leftrightarrow werkelijkheid: klein deeltje afgeven aan de maan).

3. Behoud van energie:

Energie kan niet verschijnen uit of verdwijnen in het niets: winnen/verliezen E van een object kan enkel door E -uitwisseling met andere objecten.

Gevolg: Verhaal van universum is in essentie een verhaal van interactie tussen energie en materie Vb: nucleaire reacties in de zon omgezet in stralingsenergie.

Vraag 5.7 Define kinetic energy, radiative energy, and potential energy. For each type of energy, give at least two examples of objects that either have it or use it.

1. Kinetische energie = energie die bewegende objecten bezitten.
Voorbeelden: vallende stenen en ronddraaiende planeten.
2. Stralingsenergie = energie uitgestraald door licht.
Voorbeelden: Licht die moleculen (kegelcellen) in onze ogen doen veranderen waardoor we zien en licht dat planeten doet opwarmen.
3. Potentiële energie = opgeslagen energie, kan worden omgezet naar kinetische energie of stralingsenergie.
Voorbeelden: Rots op rand afgrond bezit gravitationele potentiële energie en mazout bezit chemische potentiële energie.

Vraag 5.8 Define temperature and thermal energy. How are they related? How are they different?

- Thermische energie:
Meet de totale kinetische energie van alle random bewegende deeltjes in een object/substantie.
- Temperatuur:
Meet de gemiddelde kinetische energie alle deeltjes, dus: hogere temperatuur = deeltjes hebben gemiddelde hogere kinetische energie en bewegen sneller.

Vraag 5.9 Which has more gravitational potential energy: a rock on the ground or a rock that you hold out the window of a 10-story building? Explain.

Eerste, want 'potentiële gravitationele energie' is evenredig met de massa én hoe ver het kan vallen als gevolg van gravitatiekracht.

Vraag 5.10 What do we mean by mass-energy? Is it a form of kinetic, radiative, or potential energy? How is the idea of mass-energy related to the formula $E = mc^2$?

- Massa-energie is de energie die een voorwerp zélf bezit.

- Vorm van potentiële energie (zie vraag 7).
- Einstein: massa kan worden omgezet in potentiële energie volgens $E = mc^2$ (0,1 kg H-atomen evenredig met 9.106 J).

Vraag 5.11 Summarize the universal law of gravitation in words. Then state the law mathematically, explaining the meaning of each symbol in the equation.

- Newton vatte de gravitatiekracht mathematisch samen in de formule:

$$F_g = \frac{GM_1M_2}{d^2}.$$

- - Elke massa trekt elke andere massa aan dmv de ‘gravitatie’kracht (F_g).
 - De sterkte van die gravitatiekracht is recht evenredig met het product van hun massa’s ($F_g \sim M_1M_2$).
 - De sterkte van de gravitatie tss twee objecten neemt af met het kwadraat van de afstand ($F_g \sim \frac{1}{d^2}$).
 - Deze drie statements samen met de gravitatieconstante (G) geeft universele gravitatiewet (met $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$).

Vraag 5.12 What is the difference between bound and unbound orbit? What orbital shapes are possible?

- ‘Gebonden’ orbit verwijst naar objecten die steeds maar weer rond een ander object draaien (vb: planeten, kometen rond de zon; manen rond planeten) ten gevolge van de gravitatie tussen beide.
- ‘Niet-Gebonden’ orbit verwijst naar een object die eens langs een ander object passeert, om dan weer te verdwijnen (vb: kometen die ons zonnestelsel binnenkomen, lans de zon passeren en dan weer voorgoed verdwijnen).
- Denk aan de kegelsneden: ellips, parabool en hyperbool.

Vraag 5.13 What do we need to know if we want to measure an object’s mass with Newton’s version of Kepler’s third law? Explain.

Derde wet van Kepler: $p^2 = a^3$ met p = planeet orbitperiode (jaren), a = gem afstand planeet-zon (in AE).

Newton’s versie:

$$p^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)} a^3$$

met p en a niet specifiek in jaren en AE. Verder zie je dat de relatie tussen orbitaalperiode en de gemiddelde afstand afhangt van de massa van de roterende objecten.

Gevolg: wanneer een véél lichter object rond een zwaarder roteert kun je de massa bepalen van het centrale object d.m.v. p en a .

Vraag 5.14 *Explain why orbits cannot change spontaneously. How can atmospheric drag affect an orbit? How can a gravitational encounter cause an orbit to change? How can an object achieve escape velocity?*

- Vooraf: orbits hebben twee essentiële soorten E :
 1. Kinetische energie (roteren rond lichaam) \sim orbit-snelheid .
 2. Gravitationele potentiële E (vallen naar centraal object indien rotatie stopt) \sim afstand.

Hieruit halen we: totale orbit $E =$ gravitationele potentiële E (1) + kinetische E (2) \sim wet behoud van energie. Dichter bij de zon is (1) kleiner (afstand kleiner), (2) groter (snelheid groter), verder van de zon (1) kleiner, (2) groter. Tezamen echter constante en uitwendige E nodig om te veranderen!

- Spontaan kan een orbit niet veranderen, echter wel door E -uitwisseling:
Bij gravitationeel tegengewicht passeren twee objecten dicht genoeg naast elkaar zodat ze elk het effect van de ander z'n zwaartekracht voelen. Vb: Komeet op een paraboolbaan rond de zon passeert op een bepaald moment zo dicht bij Jupiter, dat ze een deel van haar gravitatie-energie aan Jupiter afgeeft om zo te veranderen van paraboolbaan naar ellipsbaan om de zon.
- Wrijving kan voor objecten verlies van orbitenergie leiden:
Voorbeelden:
 - Trage omwentelende satellieten (enkele km boven aardoppervlak) kunnen door wrijvingsenergie met aanwezige atmosfeer snelheid verliezen tot ze uiteindelijk neerstorten op aarde.
 - Speelde waarschijnlijk een rol in vormgeving van tegenwoordige orbits van bepaalde manen en planeten.
- Ontsnappingsnelheid: $v_{\text{escape}} = (2G \cdot M/R)^{1/2}$.
Dit valt af te leiden uit $E_{\text{kin}} = G \cdot m \cdot M/R = 11 \text{ km/s}$ (40.000 km/u) voor aarde (oppervlak) en 2,4 km/s voor maan (oppervlak) (onafhankelijk van massa object!). Door het toevoegen van orbitaal-energie kan een object op een verdere orbit-afstand roteren. Indien deze orbitenergie-toename (vb. a.h.v. chemische potentiële energie bij verbranding brandstof) groot genoeg is kan het object (raket) eindigen in een 'ongebonden orbit' en dus ontsnappen aan de gravitatiekracht.

Vraag 5.15 *Explain how the Moon creates tides on Earth. Why do we have two high and low tides each day?*

- Gravitatie trekt zowel Aarde als Maan naar elkaar toe, maar beïnvloedt verderaf gelegen delen (t.o.v. maanpositie!) op aarde lichtjes anders dan dichterbij gelegen delen, t.g.v. de dalende gravitatie met de afstand (t.o.v. maancentrum): kant aarde - maan ondervindt meer aantrekking dan tegenovergestelde kant. Opmerking: gravitatie enkel voelbaar op watermassa, niet op landmassa. Door verschil in aantrekking ontstaat een trekkracht, of getijdenkracht (cf. druk op fietsband levert deze kracht niet één bult, maar twee 'getijdenbulten', één naar de maan toe en één aan tegenovergestelde kant maan).

- Doordat de aarde in 1 dag om haar as draait passeert ze twee keer een bult (= eb) en twee keer een dal, op de plaatsen tussen de bulten (= vloed).

Vraag 5.16 *How do the tides vary with the phase of the Moon? Why?*

- De twee getijden variëren cyclisch om de 12u25 min (maan dan op hoogste punt) en niet om de 12 u, omwille van rekenschap met de omlooptijd van de maan om de aarde!
- Zon ook aantrekking op aarde ($F_g = 1/3$ maan).
- Springtij bij samenwerking F_{gzon} en F_{gmaan} i.e. volle/nieuwe maan.
- Neap tij bij tegenwerking F_{gzon} en F_{gmaan} i.e. eerste/laatste kwartier.

Vraag 5.17 *What is tidal friction? What effects does it have on Earth? How does it explain the Moon's synchronous rotation?*

- Doordat getijdenkrachten de aarde zelf uitrekken én door de aardrotatie (schuine asstand!) worden de posities van de 'getijdenbulten' lichtjes uit het maan-aard-vlak geduwd. Het effect op aarde op lange termijn is dat het gradueel de aardrotatie vertraagd, doordat de maan steeds aan de bulten trekt (om op het aard-maanvlak te komen te liggen) (en op de maan dat ze op een afstand verder van de aarde roteert - wet van behoud van draaimoment).
- Het steeds zien van hetzelfde maanzicht op aarde is een gevolg van de 'getijdenfrictie': omdat de aarde een grotere massa heeft dan de maan, oefent ze een grotere getijdenkracht uit op de maan, dan de maan op de aarde. Dit geeft als gevolg dat de maan ook twee 'getijdenbulten' zou moeten hebben (idd, maar door afwezigheid van water moeilijk zichtbaar). Indien de maan ook zou roteren om haar as, zou ze een gelijkaardig effect uitoefenen op haar getijdenbulten, net zoals de aarde dit doet, met als gevolg dat de resulterende frictie de maanrotatie zou moeten vertragen. Men denkt dat dit lang geleden gebeurd is. Vroeger zou de maan roteren om haar as, maar dit zorgde voor een steeds afremmende kracht op haar getijdenbulten, totdat de maan en haar getijdenbulten met dezelfde snelheid bewegen, i.e. synchroon met de orbitperiode om de aarde. Opmerking: als aarde en maan lang genoeg samen blijven, zal aardrotatie ook verdwijnen en synchroon rond de maan draaien, een soort dubbelplaneet nastrevend.

Vraag 5.18 *Would you fall at the same rate on the Moon as on Earth? Explain.*

Nee. Formule $g_{aarde} = G \cdot M_{aarde} \cdot M_{zelf}/d^2 \leftrightarrow g_{maan} = G \cdot M_{aarde} \cdot M_{zelf}/d^2$ (M_{zelf} verwaarloosbaar) levert $g_{aarde} = 9,8m/s^2$ terwijl $g_{maan} = 1,7m/s^2$, zodat je op de maan trager valt.

Hoofdstuk 6

Light and matter: Reading messages from the cosmos

Vraag 6.1 *What is the difference between energy and power? What units do we use to measure power?*

De energie (E) wordt uitgedrukt in Joule , terwijl de power (vermogen) uitgedrukt wordt in $\frac{\text{Joule}}{\text{seconde}}$ ofwel $\text{vermogen} = \frac{E}{t}$.

Vraag 6.2 *What is a spectrum, and how do we see one?*

Het spectrum is een overzicht van alle golflengtes (elektromagnetisch spectrum). Het visuele spectrum is dat deel dat voor het menselijk oog zichtbaar is, met andere woorden van rood tot blauw.

Vraag 6.3 *Give an example from everyday life of each of the four major types of interaction between matter and light.*

- Emissie : lamp die licht uitzendt
- Absorbtie : Wanneer je je hand tegen een lamp houdt, absorbeert deze licht, en zet het om in warmte.
- Transmissie : glas laat licht door.
- Reflectie, verstrooiing : bijvoorbeeld de vloer, het bord,...

Vraag 6.4 *How does a particle differ from a wave in everyday life? Define wavelength, frequency and speed for a wave.*

Deeltjes bewegen over langere afstanden, terwijl golven die door een medium bewegen voortgebracht worden door deeltjes in het medium die op en neer bewegen (transversale golf) of deeltjes die over korte afstand heen en weer bewegen volgens de richting van de golf (longitudinale golf) enerzijds en anderzijds golven die niet door een medium bewegen (elektromagnetische golven) worden voortgebracht door fotonen.

Vraag 6.5 *What do we mean if we say that light is an electromagnetic wave? How is wavelength related to frequency for electromagnetic waves? Explain.*

Een elektromagnetische golf is een golf die voortgebracht wordt door fotonen, met andere woorden het volledige elektromagnetische spectrum, van radiogolven tot het visuele spectrum, tot γ -stralen.

Vraag 6.6 *What is a photon? In what way is a photon like a particle? In what way is it like a wave?*

Een foton is een lichtdeeltje. Het beweegt in een rechte lijnige beweging, net zoals een deeltje. Het kent een golflengte en frequentie, en beweegt zoals een golf.

Vraag 6.7 *List the different forms of light in order from lowest to highest energy. Would the list be different if you went in order from lowest to highest frequency? From shortest to longest wavelength? Explain.*

radiogolven-infrarood-zichtbaar licht-ultraviolet-röntgenstralen- γ -stralen zichtbaar licht:
rood-oranje-geel-groen-blauw-indigo-violet

Aangezien

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

geldt er dat de volgorde behouden wordt bij rangschikking van lage naar hoge frequentie, maar niet van korte tot lange golflengte.

Vraag 6.8 *Briefly describe the structure of an atom. How big is an atom? How big is the nucleus in comparison to the entire atom?*

Kern met protonen en neutronen, daarrond draaien in banen elektronen. Het aantal atomen in een druppel water is gelijk aan 10^{23} . De verhouding $\frac{\text{aatom}}{\text{kern}} = 10^{10}$

Vraag 6.9 *What determines an atom's atomic number? What determines its atomic mass number? Under what conditions are two atoms different isotopes of the same element? What is a molecule?*

De atomaire massa is het aantal kerndeeltjes (protonen + neutronen).

Het atoomgetal is het aantal protonen in de kern.

Isotopen van een element zijn deeltjes met eenzelfde aantal protonen in de kern, maar een verschillend aantal neutronen.

Een molecuul is een verbinding van atomen.

Vraag 6.10 *What is electrical charge? Will an electron and a proton attract or repel one another? Explain.*

Een elektrische lading is een maat van hoe sterk het object zal interageren met een elektromagnetisch veld. Tegengestelde ladingen trekken mekaar aan, dus een proton en een elektron trekken mekaar aan.

Vraag 6.11 *Describe the phase changes of water as you heat it starting from its solid form, ice. What happens at a very high temperature? What is plasma?*

Ijs warmt op tot een temperatuur van 0°C . Vervolgens begint het te smelten en blijft de temperatuur constant tot het gesmolten is. Dan begint het intussen vloeibare water op te warmen tot een temperatuur van 100°C , alwaar het begint te verdampen, en waar de temperatuur weer constant blijft. Wanneer al het water verdampt is, stijgt de temperatuur weer tot een zeer hoge temperatuur, waar de energie van de moleculen zo groot is dat de moleculen beginnen te ontbinden in atomen. Wanneer de temperatuur weer verder stijgt, kan het zelfs zo extreem zijn dat zelfs de elektronen afgestoten worden (plasma). Uiteindelijk kunnen zelfs de kernen ontbinden, zodat we volledig geïoniseerd plasma bekomen.

Vraag 6.12 *What do we mean when we say that energy levels are quantised in atoms? Under what circumstances can energy level transitions occur?*

De elektronen kunnen zich niet om het even waar rond een kern bevinden, maar bevinden zich op specifieke afstanden van de kern, de zogenaamde energieniveaus of schillen. Wanneer een atoom door externe factoren geëxciteerd raakt, springt er een elektron naar een hogere schil. Hier blijft het echter niet, maar springt onmiddellijk terug, waardoor er een foton uitgezonden wordt (soms in de vorm van licht).

Vraag 6.13 *How do we convert a spectrum shown as a band of light (like a rainbow) into a graph of the spectrum?*

We bereken de intensiteit per golflengte.

Vraag 6.14 *Describe the conditions that would cause us to see each of the three basic types of spectra. What do we see in the sun's spectrum shown on the opening page of this chapter?*

- Continu spectrum: We sturen een lichtstraal (van een lamp) door een prisma.
- Emissie lijn spectrum: Een gaswolk die licht uitzendt in een aantal frequenties.
- Absorptie lijn spectrum: We sturen wit licht door een gaswolk die een aantal frequenties verstoort en sturen de resterende lichtgolven door een prisma.

Vraag 6.15 *How can we use emission or absorption to determine the chemical composition of a distant object?*

Elk element heeft een eigen emissiespectrum. Door uitgezonden frequenties op te meten, komen we te weten welke stoffen in een gaswolk zitten.

Vraag 6.16 *Describe two ways in which the radiation spectrum of an 8,000 K star would differ from a 4,000 K star.*

De maximale frequentie ligt hoger bij een ster met een hogere temperatuur.

De totale hoeveelheid licht uitgezonden door een koudere ster is kleiner dan die uitgezonden door een warmere ster.

Vraag 6.17 *Describe each of the key features of the spectrum in Figure 5.20 and explain what it tells us about the object.*

Het emissie-spectrum van Mars.

Door een heterere bovenste atmosfeer, zendt Mars UV-stralen uit. Het oppervlak absorbeert blauw licht en reflecteert rood licht. Door CO_2 in de atmosfeer, wordt infrarood licht verstrooid. Mars is bovendien zelf een zwarte straler en zendt infrarood licht uit.

Vraag 6.18 *Describe the Doppler Effect for light and what we can learn from it. What does it mean to say that radio waves are blueshifted? Why does the Doppler Effect widen the spectral lines of rotating objects?*

Wanneer we naar een lichtbron toebewegen, is de golflengte van het uitgezonden licht groter dan ze werkelijk is, dit is blueshifting. Wanneer we ons van een lichtgevend object verwijderen, lijkt de uitgezonden golflengte langer, dit is redshifting. De golflengte van het licht uitgezonden door het gedeelte van het object dat het dichtst bij ons staat, is vast. De ene zijde van het object draait van ons weg: redshifting, en de andere zijde van het object draait naar ons toe: blueshifting.

Hoofdstuk 7

Telescopes

Vraag 7.1 *How does your eye focus light? How is a glass lens similar? What do we mean by the focal plane of a lens?*

De twee belangrijkste onderdelen van het oog zijn de lens en het netvlies. Wanneer een lichtstraal de lens van het oog passeert, dan vertraagt de golf, wat resulteert in een afbuiging van het licht. Dit wordt refractie genoemd. Deze afbuiging maakt het mogelijk om de dingen goed te kunnen zien. We onderscheiden twee gevallen. Veronderstel eerst dat de lichtstralen in een parallelle lichtbundel voorkomen. Eens die straal de lens gepasseerd is, worden de stralen afgebogen en convergeren die in een punt, de focus. Bij een perfect oog, ligt dit punt op het netvlies. In het tweede geval, waarbij de lichtstralen dus niet parallel zijn, geldt dezelfde redenering, maar dan worden de lichtstralen niet gefocuseerd in een punt, maar men ziet het beeld ondersteboven (zie fig. 6.4 blz. 176).

Vraag 7.2 *For purposes of astronomy, what advantages does a camera have over the human eye? What advantages do CCDs have over photographic film?*

- Camera ↔ oog
 1. Een gefotografeerd beeld is betrouwbaarder en gedetailleerder.
 2. De sluitertijd is vrij te kiezen, zodat we kunnen beslissen hoe lang we licht laten invallen op de detector. Hoe groter de sluitertijd, hoe meer fotonen verzameld worden, en dus hoe gedetailleerder het beeld.
- CCD ↔ fotografische film
 1. De lichtgevoeligheid: bij CCD heb je minder licht nodig om toch een goede foto te maken.
 2. CCD's hebben een veel ruimere "dynamic range": ze kunnen gemakkelijker én dimlicht én helder licht tegelijk opnemen, wat resulteert in details in het heldere én in het donkere gebied van de foto.
 3. Een digitale foto kan achteraf nog bewerkt worden zodat andere details ook naar voren treden, details die je anders niet ziet.

Vraag 7.3 *What are the two key properties of a telescope, and why is each important?*

1. Light-collecting area (diameter objectief)

De grootte van een telescoop wordt gekarakteriseerd door zijn diameter. Hoe groter de diameter, hoe meer licht er wordt opgevangen. Let op: het verband tussen diameter en oppervlakte is kwadratisch! Een tien meter telescoop heeft een diameter die vijf keer zo groot is als een twee meter telescoop, maar zijn light-collecting area heeft een oppervlakte die 25 keer groter is.

2. Angular resolution

Dit is een maat voor hoe ver twee voorwerpen van elkaar mogen staan, gezien vanuit het standpunt van de waarnemer. Het is meer precies de kleinste hoek waarover we kunnen zeggen dat twee punten verschillend zijn. Ons oog heeft een angular resolution van $1'$, d.w.z. dat twee sterren als één ster zullen aanzien worden indien ze op minder dan $1'$ van elkaar staan. Het probleem echter is dat de telescopen op de aarde staan waardoor de atmosfeer van de aarde een limiet kan zetten op de angular resolution. Licht is namelijk een elektromagnetische golf waardoor de deeltjes met elkaar kunnen interfereren. Dit resulteert in een overlapping van het beeld (zie fig. 6.7 blz. 178).

Formule:

$$\text{angular separation} = \text{physical separation} \cdot \frac{360^\circ}{2\pi \cdot \text{distance}} \cdot \frac{3600''}{1^\circ}$$

Vraag 7.4 *What is the diffraction limit, and how does it depend on a telescope's size and the wavelength of light being observed?*

De diffraction limit is de angular resolution die een telescoop kan bereiken als het enkel begrensd wordt door de interferentie van de lichtgolven.

- Hoe groter de telescoop, hoe lager de diffractielimiet (beter).
- Hoe langer de golflengte, hoe groter de diffractielimiet (slechter)

Gevolg: Radiotelescopen moeten veel groter zijn dan visible-light telescopen om dezelfde angular resolution te verkrijgen.

Vraag 7.5 *How do reflecting telescopes differ from refracting telescopes? Which type is more commonly used by professional astronomers, and why?*

Refractietelescopen gebruiken een glazen lens om de lichtbundel afkomstig van een hemellichaam te laten convergeren (zie fig. 6.9 blz. 180). Reflectietelescopen gebruiken twee spiegels: de eerste spiegel kaatst het licht naar de tweede die op zijn beurt de lichtstralen doet convergeren in de focus waar men dan het oog of een instrument plaatst.

De meest gebruikte telescoop is de reflectietelescoop:

1. Bij refractietelescopen moeten lenzen gemaakt worden uit helder glas van hoge kwaliteit, die nog eens goed gevormd moeten zijn ook. Bij de reflectietelescopen moet enkel de spiegel goed gevormd zijn en de kwaliteit van het onderliggende glas is van weinig belang.

2. Lenzen zijn zeer zwaar (en moeilijk vast te houden). De refractietelescoop is dus moeilijk te stabiliseren en het is moeilijk om bij dergelijke grote lens vervorming te vermijden. Bij de reflectietelescoop zit de spiegel onderaan (makkelijker te balanceren) en speelt het gewicht ook niet zo'n grote rol.
3. Chromatische aberratie: een lens focuseert verschillende kleuren op verschillende plaatsen. Dit is op te lossen door het gebruik van meerdere lenzen.

Vraag 7.6 *What are the three basic categories of astronomical observation, and how is each conducted?*

1. Imaging
Men plaatst op de plaats van de focus een camera (desnoods met filters) en men neemt foto's van hetgeen men observeert.
2. Spectroscopy
Astronomen verkrijgen en bestuderen spectra a.d.h.v. spectroscopen.
3. Timing
Men bestudeert hoe een object verandert in de loop der tijd.

Vraag 7.7 *What do we mean when we speak of images made from nonvisible light, such as X-ray or infrared images? What do the colors in these images mean?*

Bepaalde hemelobjecten stralen onzichtbaar licht uit, zoals röntgenstralen. Deze zijn met het blote oog niet waarneembaar, maar we kunnen de informatie, ontvangen door een röntgenstraal detector, een kleur toekennen. Elk kleur definieert m.a.w. een code. Zo kunnen kleuren corresponderen met verschillende golflengtes, verschillende lichtintensiteiten, ... (zie fig. 6.14 blz. 183)

Vraag 7.8 *What do we mean by spectral resolution? Why is higher spectral resolution more difficult to achieve?*¹

Dit is een maat voor de resolutie van het verkregen spectrum. Hoe hoger de resolutie, hoe gedetailleerder het spectrum (zie fig. 6.16 blz. 184). Telescopen nemen in een gegeven tijd een zekere hoeveelheid licht op. De moeilijkheid zit hem in het feit dat de spectroscopen het licht breed kunnen verspreiden zodanig dat er meer licht (en dus meer tijd) nodig is om een spectrum te verkrijgen waarmee iets aan te vangen is (meer tijd leidt dus tot een hogere resolutie).

Vraag 7.9 *List at least three ways in which Earth's atmosphere can hinder astronomical observations, and explain why putting a telescope into space helps in each case. What problem can adaptive optics help with?*

- 1. Lichtvervuiling

¹Ik ben niet zeker of dit antwoord correct is...

2. Twinkling en atmosferische turbulentie (seeing)

De lucht in onze atmosfeer is constant aan het bewegen onder invloed van de wind en dergelijke. Dit noemen we turbulentie. Als gevolg hiervan zullen de lichtstralen, afkomstig uit het heelal, steeds kleine afwijkingen vertonen waardoor het moeilijk is om scherpe astronomische foto's te maken (it blurs astronomical images). Dit zorgt voor de limiet van $0,5''$ bij de angular resolution.

3. De meeste vormen van licht bereiken de grond niet (infraroodlicht, ...).

- Adaptieve optica kan heel wat van dat blurring elimineren. Zonder deze techniek lijkt het alsof de ster heen en weer danst, maar dankzij deze technologie, die in essentie a.h.w. een tegenovergestelde beweging maakt, kunnen twee sterren op een hoek van minder dan een halve boogseconde geobserveerd worden als twee afzonderlijke objecten (zie fig. 6.20 blz. 188). Dit gebeurt door computerberekeningen toegepast op een heldere ster in de buurt of -als die er niet is- a.d.h.v. laserstralen om op die manier een kunstmatige ster te vormen.

Vraag 7.10 *Study Figure 6.22 and describe how deeply each portion of the electromagnetic spectrum penetrates Earth's atmosphere. Based on your answers, why is space astronomy so important to our understanding of the universe?*

Enkel zichtbaar licht en radiogolven dringen door tot op de aardbodem. Verder is het mogelijk dat ook infraroodlicht tot de aardbodem reikt. Andere soorten golven kunnen enkel maar vanop grote hoogte geobserveerd worden. Daarom is het nuttig om telescopen de ruimte in te sturen, want die kunnen dan ander licht observeren dan op aarde om zo de samenstelling van hemellichamen beter te kunnen analyseren.

Vraag 7.11 *How do telescopes for nonvisible wavelengths differ from those for visible light? Answer for each major wavelength band and give examples of important observatories in those bands.*

• Radiotelescopen

Radiotelescopen zijn veel groter dan visible light telescopen aangezien de radiogolven grotere golflengtes hebben.

Vb. The Arecibo Radio Dish (zie fig. 6.24 blz. 191). Ondanks zijn grootte heeft deze telescoop een angular resolution van één boogseconde.

• Infraroodtelescopen

Deze telescopen lijken enorm op de visible light telescopen met als enige beperking de atmosfeer van de aarde aangezien de infraroodstralen deze zelden bereiken.

Vb. SOFIA (zie fig. 6.25 blz. 192) en Spitzer (zie fig. 6.26 blz. 192).

- UV-telescopen Visible light telescopen kunnen in principe UV-licht verzamelen en focuseren ware het niet dat de atmosfeer van de aarde het UV-licht bijna volledig absorbeert.

Vb. FUSE, GALEX, Hubble Space Telescope

• röntgenstraling telescopen

Röntgenstralen hebben voldoende energie om materialen te doorboren (te vergelijken met kogels). Dat maakt het zo moeilijk om dergelijke stralen te laten samenkomen in één punt. Dit wordt gerealiseerd m.b.v. spiegels.

Vb. Chandra (zie fig. 6.27 blz. 193), XMM-Newton

- Gamma-straling telescopen

Deze stralen zijn nog intenser dan röntgenstralen en daarom is het niet mogelijk om deze stralen te focuseren a.d.h.v. spiegels.

Vb. Compton Gamma Ray Observatory

Vraag 7.12 *What is interferometry, and how can it improve astronomical observations?*

Astronomen hebben ontdekt dat men twee of meer individuele telescopen kan doen samenwerken met als resultaat dat de angular resolution verbetert (the total collecting-light area is uiteraard de som van elk van de radiotelescopen). Deze techniek noemen we interferometrie.

Hoofdstuk 8

Our planetary System

Vraag 8.1 *What do we mean by comparative planetology? Does it apply only to planets?*

Het vergelijken van de werelden in ons zonnestelsel om te proberen de gelijkenissen en de verschillen te verklaren. We kunnen meer leren over een bepaalde wereld gezien in de context van de andere. Wordt niet enkel voor planeten gebruikt, maar ook voor manen, asteroïden en kometen.

Vraag 8.2 *What would the solar system look like to your naked eye if you could view it from beyond the orbit of Pluto?*

Wanneer je alle planeten vergroot en de banen tekent, krijg je fig 7.1, p. 202.

Vraag 8.3 *Briefly describe the overall layout of the solar system as it is shown in Figures 7.1 en 7.2.*

Alle planeten draaien rond de zon in dezelfde richting (in tegenwijzerszin gezien van boven de noordpool) en ongeveer in hetzelfde vlak (de hoek tussen de pool van het eclipticavlak en de pool van het baanvlak is relatief klein). De vier binnenplaneten zijn kleiner en staan dicht bij elkaar dan de vier volgende. De meeste planeten hebben ongeveer cirkelvormige banen, en de *meeste* belangrijke manen draaien rond hun planeet in dezelfde richting als hun planeet roteert (om zijn eigen as).

Vraag 8.4 *For the Sun and each of the planets in our solar system, describe et least two features that you find interesting.*

1. De zon

- bevat meer dan 99.9% van de totale massa van het zonnestelsel
- de aarde kan er ongeveer 100 keer in
- verliest elke seconde een massa van vier miljoen ton

2. Mercurius

- grote temperatuurverschillen
- bijna geen lucht: je kan de sterren overdag zien als je met je rug naar de zon staat

3. Venus

- roteert heel traag en in wijzerszin
- enorm broeikaseffect

4. Aarde

- grote maan in vergelijking met de planeet
- leven

5. Mars

- twee asteroïdenmaantjes
- poolkappen

6. Jupiter

- geen vast oppervlak
- vier manen die planeten zouden kunnen zijn, moesten ze rond de zon draaien
- meer dan 300 keer zo zwaar als de aarde en ongeveer 10 keer zo groot

7. Saturnus

- spectaculaire ringen
- maan Titaan is groter dan Mercurius

8. Uranus

- roteert in wijzerszin
- ligt op zijn kant, vergeleken met de andere planeten
- bleke blauw-groene kleur

9. Neptunus

- maan Triton is de enige grote maan die in een zin rond zijn planeet draait tegengesteld aan de zin waarin de planeet roteert
- Triton is groter dan Pluto
- blauwer dan Uranus

Ezelsbruggetje om deze volgorde te onthouden: de eerste letters van Saturnus, Uranus en Neptunus vormen het woord SUN.

10. Pluto

- grotere helling tov het eclipticavlak en baan met grotere eccentriciteit
- roteert in wijzerszin

Vraag 8.5 *Describe at least four orderly patterns of motion that we observe in our solar system.*

1. Alle planeetbanen zijn ongeveer cirkelvormig en liggen ongeveer in hetzelfde vlak.
2. Alle planeten draaien rond de zon in dezelfde zin.
3. De meeste planeten roteren in dezelfde zin als in dewelke ze rond de zon draaien, met assen die weinig geheld zijn. De zon roteert ook in deze zin.
4. De meeste grote manen hebben dezelfde eigenschappen voor hun banen rond hun planeten.

Vraag 8.6 *What are the basic differences between the terrestrial and jovian planets? Which planets in our solar system fall into each group?*

De aardse planeten: Mercurius, Venus, Aarde en Mars. Ze zijn relatief klein en hebben een grote dichtheid, rotsachtig oppervlak en vanbinnen metaalrijk. Ze hebben weinig manen -als ze er hebben- en geen ringen.

De jovische planeten: Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus. Ze zijn veel groter en hebben een lagere gemiddelde dichtheid, bestaan voornamelijk uit waterstof, helium en waterstofsamenstellingen: water (H_2O), ammoniak (NH_3) en methaan (CH_4) ("gasreuzen"). Ze hebben ringen en meerdere manen.

Vraag 8.7 *What do we mean by hydrogen compounds? In what kinds of planets or small bodies are they major ingredients?*

Zie vorige vraag.

Vraag 8.8 *In what ways does Pluto resemble a terrestrial planet? In what ways does it resemble a jovian planet? In what ways does it resemble neither?*

- terrestrial: maar één maan
- jovian: ver van de zon
- neither: veel kleiner, baan heeft grotere eccentriciteit, grotere helling tov eclipticavlak, bestaat uit ijs en rotsen.

Vraag 8.9 *What are asteroids? Where do we find most asteroids in our solar system?*

Asteroiden zijn kleine rotsachtigen die rond de zon draaien, meestal niet sferisch van vorm. De meeste bevinden zich in de asteroidengordel tussen de banen van Mars en Jupiter.

Vraag 8.10 *What are comets? How do they differ from asteroids?*

Kometen zijn ook kleine objecten die rond de zon draaien, maar ze zijn vooral van ijs gemaakt, gemengd met rots. De meerderheid van de kometen komt nooit in het binnenste van het zonnestelsel, maar draait rond de zon in de verste gebieden van het zonnestelsel.

Vraag 8.11 *What is the Kuiper belt? What is the Oort cloud? How do the orbits of comets differ in the two regions?*

De Kuipergordel is een gebied voorbij de baan van Neptunus die bestaat uit kometen die rond de zon draaien in dezelfde zin en ongeveer in hetzelfde vlak als de planeten. De Oortwolk is een gebied nog verder van de zon dan de Kuipergordel, kometen in dit gebied tonen geen eenvoudig patroon in hun banen rond de zon.

Vraag 8.12 *Describe at least two exceptions to the rules that we find in our solar system.*

- Uranus roteert bijna op zijn kant
- Venus roteert in wijzerszin
- Aarde heeft één van de grootste manen in het zonnestelsel

Vraag 8.13 *Describe and distinguish between space missions that are flybys, orbiters, landers or probes, and sample return missions. What are the advantages and disadvantages of each mission type?*

- flybys: vliegt één keer voorbij een bepaald object in het zonnestelsel. Het is de goedkoopste missie, want enkel brandstof nodig om te ontsnappen aan het gravitatieveld van de aarde, en om van baan te veranderen. Dit laatste kan zelfs zonder brandstof, door van de gravitatie van een planeet gebruik te maken. Een flyby geeft slechts een korte periode van studie van een object, maar de beelden en spectra die het neemt hebben een veel grotere resolutie dan telescopen op aarde. Flybys geven soms ook een zicht op een object dat we vanop aarde niet hebben, meten lokale magnetische veldsterkte, verzamelen interplanetair stof, en leren over massa en dichtheid van objecten.
- orbiters: een ruimtetuig dat in een baan rond het object draait dat het bestudeert. Een voordeel op de flyby is studie op lange termijn, maar is ook duurder door het gewicht van de extra brandstof (nodig om in een baan rond een object te geraken). Dit kan geminimaliseerd worden door de orbiter slechts genoeg brandstof mee te geven om in een elliptische baan met hoge eccentriciteit rond het object te geraken, waarna wrijving met de atmosfeer het ruimtetuig vertraagt en in een meer cirkelvormige baan brengt. Naast de informatie die een flyby levert, kan een orbiter ook nog radar gebruiken om hoogtemetingen uit te voeren van het oppervlak van een object.
- landers or probes: landen op het oppervlak van een planeet of dringen door in de atmosfeer van een planeet. Levert de beste close-up studie van een object. De probe kan de temperatuur, druk, samenstelling en straling in een atmosfeer meten. Een lander geeft close-up beelden van het oppervlak en het weer, en kan voorgeprogrammeerde experimenten uitvoeren. Sommige dragen robots die over het oppervlak kunnen rijden. Een nadeel is dat er brandstof nodig is om de lander te vertragen bij het landen, maar hiervoor leveren airbags een oplossing.
- sample return missions: een ruimtetuig dat een monster van een object neemt en terugbrengt naar de aarde. Een voordeel op de probe en lander is dat de experimenten met het monster niet op voorhand gepland moeten zijn, maar op aarde kunnen uitgevoerd worden. Nadeel is de hoge kostprijs.

Vraag 8.14 *For a few of the most important past, present, or future robotic missions to the planets, describe their targets, types, and mission highlights.*

Niet te kennen.

Hoofdstuk 9

Formation of the Solar System

Vraag 9.1 *What are the 4 major features of our solar system that provide clues to how it formed? Describe each one.*

1. Bewegingspatronen tussen grote hemellichamen. De zon, planeten en grote manen roteren rond hun as en bewegen in een ellipsvormige baan over het algemeen op een zeer georganiseerde manier.
2. Twee hoofdtypen planeten: de eerste 8 planeten scheiden zich in 2 groepen: de kleine rotsachtige aardse planeten, die het dichtst bij de zon staan, en de grote, waterstofgasrijke jupiterachtige planeten, welke verder uit elkaar staan en relatief verder verwijderd zijn t.o.v. de zon.
3. Asteroïden en kometen: tussen en voorbij de planeten bevinden zich heel veel asteroïden en kometen, die in een baan rond de zon draaien. De locaties, banen en samenstellingen van deze asteroïden en kometen volgen duidelijke patronen: ze verblijven resp. in de asteroïdengordel en in de Kuiper belt + Oort cloud.
4. Uitzonderingen op de regels. Vb: Aarde heeft als enige een zeer grote maan. Uranus staat op zijn zijkant gedraaid en heeft een vreemde rotatiehelling t.o.v. de rest van de planeten.

Vraag 9.2 *What is the nebular theory, and why is it widely accepted by scientists today?*

Deze theorie heeft roots in 1755 en stelt dat ons zonnestelsel ontstaan is uit een gaswolk, die inkrimpte als gevolg van zijn eigen gravitatie. Deze theorie wordt bijna overal aanvaard omdat hij zowat alle aspecten van ons zonnestelsel kan verklaren. Bovendien voorspelt het (met succes) veel van wat we ontdekt hebben over andere planetenstelsels. De theorie is zelfs consistent met enkele verrassingen, onthuld door recente ontdekkingen van planeten rond andere sterren.

Vraag 9.3 *What do we mean by the solar nebula? What was it made of, and where did it come from?*

Deze gaswolk (van vorige vraag) noemen we de solar nebula. Galactische recyclage: Het heelal ontstond tijdens de Big Bang. H, He en een beetje Li waren de enige chemische

elementen die aanwezig waren. Al de zwaardere elementen zijn geproduceerd door sterren, i.h.b. via kernfusie in hun binnenste, of door ontploffingen die met hun dood gepaard gingen. Wanneer sterren sterven, sturen ze veel van hun inhoud de ruimte in, nl. de vele nieuw geproduceerde zware elementen. Vervolgens ontstaat een nieuwe generatie sterren uit gaswolken en stof. Dit proces heeft 14 miljard jaar geduurd. Voor de vorming van ons zonnestelsel, 4.6 miljard jaar geleden, was slechts 2% van de massa van de originele hoeveelheid H-gas en He in de melkweg omgezet tot zwaardere elementen. De rest bleef H-gas en He (dit is nu de basissamenstelling van de zon). Samengevat was het gas waaruit de solar nebula ontstond, het resultaat van miljarden jaren van galactische recyclage voor de vorming van ons zonnestelsel. De zon en planeten ontstonden uit dit gas en de aardse planeten onstonden voornamelijk uit de zwaardere elementen.

Opmerking:

Sterk observationele bewijzen ondersteunen het idee dat ons zonnestelsel ontstaan is uit een interstellaire gaswolk, omdat sterren die zich in het formatieproces lijken te bevinden vandaag de dag, altijd gevonden worden binnen interstellaire wolken (vb Orion Nebula). Meer nog, elke ster die we in dergelijk proces waarnemen, is omringd met relatief dicht gas, dat lijkt in te krimpen onder zijn eigen gravitatie. Dit suggereert dat de ster in zijn eigen solar nebula aan het vormen is.

Vraag 9.4 *Describe each of the three key processes that led the solar nebula to take the form of a spinning disk. What observational evidence supports this scenario?*

Oorspronkelijk was ze een zeer uitgespreide (waarschijnlijk enkele lichtjaren in diameter), praktisch sferische wolk, traag roterend, zeer koud en had een lage dichtheid. Hieruit concludeert men dat gravitatie wellicht niet genoeg was om tot inkrimpen te leiden. Een serieuze impact van een schokgolf als gevolg van een desastreuze gebeurtenis zou aan de basis kunnen liggen (vb. door de explosie van een dichte ster \rightarrow supernova). Eenmaal de inkrimping begonnen was, zorgde de wet van de gravitatie dat dit bleef duren. Maar wanneer de diameter halveerde (inkrimping gebeurde in elke richting), werd de aantrekking $4\times$ zo groot. 3 zaken brachten de omvorming tot een kleinere roterende schijf teweeg:

1. Opwarming. Wegens behoud van energie werd tijdens het inkrimpen gravitationele potentiële energie omgezet in kinetische energie van individuele gasdeeltjes die inwaarts vielen. Deze botsten tegen elkaar en zorgden ervoor dat de kinetische energie deels omgezet werd tot chemische energie (random). De zon werd gevormd in the centrum, waar de temperatuur en de dichtheid het grootst waren.
2. Roteren. Hoe kleiner de straal van de wolk werd, hoe sneller de wolk begon te draaien (cf. ijsschaatser die ter plekke rondjes blijft draaien) wegens behoud van draaimoment. De snelle rotatie had tot gevolg dat niet al het materiaal zich rond het centrum zou concentreren: hoe groter het draaimoment van een roterend wolkje, hoe meer uitgespreid ze zal zijn.
3. Afplattung tot een schijf. Dit is een natuurlijk gevolg van de botsingen tussen deeltjes in een ronddraaiende wolk. Een wolk kan starten met gelijk welke grootte en vorm en verschillende stukken gas kunnen in een random richting bewegen tegen random snelheden. Deze stukken botsten tegen elkaar en smolten samen wanneer de wolk inkrimpte zodat elk nieuw stuk gas de gemiddelde snelheid kreeg van de stukken gas waaruit het gevormd werd. Dus de random bewegingen van de originele wolk gebeurden ordelijker.

Deze 3 processen impliceerden de omvorming tot een roterende afgeplatte schijf met massa en hoogste temperatuur geconcentreerd rond het centrum. Hetzelfde proces zou dan ook in andere inkrimpende gaswolken moeten gebeuren om sterren te vormen. We kunnen dit model dus testen door in de ruimte andere roterende schijven te zoeken. Observatieel bewijs komt van het detecteren van infraroodstraling afkomstig van vele nebulae waar sterrenstelsels lijken te vormen. Immers, deze straling is het gevolg van de opwarming van de ineenslopende wolk, zodat het gas thermische straling moet uitzenden (zie H5). Bovendien bevestigen computersimulaties de meest algemene kenmerken van de bewegingen in ons zonnestelsel. Verder is er bewijs van de correctheid, dat komt van vele andere structuren in het universum. We verwachten afplatting daar waar deeltjes in een baan kunnen botsen, wat zou kunnen verklaren waarom we zo veel gevallen van platte schijven vinden, inclusief planetaire ringen, schijven van spiraalvormige galaxieën (zoals bvb. het Melkwegstelsel) en aanslibbingschijven die vele neutronsterren en zwarte gaten omringen.

Vraag 9.5 *List the 4 categories of materials in the solar nebula by their condensation properties and abundance. Which ingredients are present in terrestrial planets? In jovian planets? In comets and asteroids? Explain why.*

In het centrum van de inkrimpende wolk bracht de gravitatie genoeg materiaal bijeen om de zon te vormen, maar in de omringende schijf was het gasvormig materiaal te verspreid om samen te klitten. In plaats daarvan begon de materie zich op een andere manier te bundelen totdat de massa groot genoeg was om dan via gravitatie planeten te vormen. Wanneer de temperatuur van een gas laag genoeg is, kunnen sommige atomen en/of moleculen zich binden en vast worden (de druk in de gaswolk was te laag om condensatie tot waterdruppels toe te laten. Het proces waarin vaste of vloeibare deeltjes gevormd worden in een gas, wordt condensatie genoemd. We zeggen dat de aanvankelijk microscopisch kleine deeltjes uit het gas condensereren, afhankelijk van de aard van de deeltjes en natuurlijk ook van het gas. Bijgevolg krijgen we 4 categorieën:

1. H en He- gas (98% van solar nebula) condensereren niet in de solar nebula.
2. H- verbindingen (1.4 %) zoals H₂O, CH₄, en NH₃, kunnen ijs worden bij lage temperaturen (< 150K) onder de druk in de gaswolk.
3. Rotsachtig materiaal (0.4 %) is gasvormig bij zeer hoge temperaturen, maar condensereren tot vaste delen mineralen (bij een temp. van 500-1300K, afhankelijk van het type rots)
4. Metaal (0.2%). Metalen zoals ijzer, nikkel en aluminium zijn eveneens gasvormig bij zeer hoge temperaturen, maar condensereren tot vaste vorm bij hogere temperaturen dan rotsachtig materiaal (bij een temperatuur van 1000-1600K).

Bijgevolg moeten de aardse planeten veel metaal en rots, de jupiterachtigen ijs, de asteroïden rots en de kometen ijs bevatten. De meeste massa van de gaswolk condenseerde niet.

Vraag 9.6 *What was the frost line in the solar nebula? Explain how temperature differences led to the formation of 2 distinct types of planets.*

In de buurt van het centrum kon de aantrekking genoeg materiaal bij elkaar verzamelen om de zon te vormen, waar de temperatuur te hoog was ($> 1600\text{K}$) voor condensatie. Waar nu Mercurius zich bevindt, was het wel koud genoeg zodat metalen en bepaalde types rots konden condenseren in kleine vaste deeltjes, maar andere types rots en al de waterstofverbindingen bleven gasvormig, nl. op afstanden van de zon waar Venus, Aarde en Mars gevormd zouden worden. In de omgeving waar de asteroidengordel uiteindelijk gevormd zou worden, was de temperatuur laag genoeg om donkere, koolstofrijke mineralen toe te laten te condenseren, samen met mineralen die kleine hoeveelheden water bevatten. H-verbindingen konden enkel condenseren voorbij de frostlijn, die tussen de hedendaagse banen van Mars en Jupiter ligt. Dit is de scheidingslijn tussen de warmere regio's waar aardse planeten gevormd werden en de koudere buitenste regio's waar de jupiterachtige planeten gevormd werden. Binnen de frostlijn kon enkel metaal en rots condenseren zodat de aardse planeten gemaakt zijn van metaal en rots. Buiten de frostlijn was het koud genoeg voor H-verbindingen om tot ijs te condenseren; de vaste deeltjes werden gemaakt van ijs, metaal en rots, maar doordat de massa van de H-verbindingen $3\times$ zo groot was als de som van de rotsachtige materie en de metalen, was de totale hoeveelheid vast materiaal veel groter buiten de frostlijn.

Vraag 9.7 *Briefly describe the proces by which terrestrial planets are thought to have formed.*

De aardse planeten werden gevormd door een aanslibbingproces, waarbij de aanvankelijke condensatiekernen tegen elkaar begonnen te plakken, t.g.v. elektrostatische krachten (aanvankelijk hadden de deeltjes in een cirkelvormige baan rond de jonge zon - dezelfde snelheid als hun burens), dus botsingen waren meer zachte contacten. De deeltjes waren te klein om elkaar aan te trekken. De samengeklitte deeltjes werden zwaarder en gravitatie begon in actie te treden, zodat de groei nog werd versneld totdat ze planetesimalen werden (delen van een planeet). Hierdoor veranderden vooral de grote planetesimalen de banen van de kleintjes. We krijgen een zogenaamd biljarteffect: doordat bepaalde banen elkaar kruisten, gebeurden botsingen tussen de planetesimalen bij hogere snelheden. Enkel de grootste vermeden verbreekt te worden in botsingen (die meer voorkwamen dan botsingen met aanslibbing tot gevolg).

Vraag 9.8 *How was the formation of jovian planets similar tot that of the terrestrial planets? How was it different? Why did the jovian planets end up with so many moons?*

De vorming van de joviaanse planeten zou praktisch op dezelfde manier gebeurd zijn als bij de aardse, maar condensatie tot ijs betekende dat er meer vast materiaal aanwezig was. De planetesimalen die aanslibden, bevatten dus grote hoeveelheden ijs, met daarnaast ook wat metaal en rots. Het grote verschil zit hem in het feit dat de planeten zelf niet grotendeels van ijs gemaakt zijn! Ze bevatten wel grote hoeveelheden H- en He- gas. Volgens een of ander model zouden er ijsrijke planetesimalen aangegroeid zijn met veel grotere massas dan die van de Aarde. De gravitatie was dan groot genoeg om wat van het omliggende H- en He- op te scheppen en vast te houden. De gravitatie werd nog sterker en ze gingen nog meer gas invangen, zodat ze uiteindelijk meer op een gasbol dan op een ijsbol begonnen te trekken. Door het proces van opwarming, roteren en afplatten werd het aangetrokken gas van de jonge planeet beïnvloed zodat elke joviaanse planeet waarschijnlijk omgeven werd door zijn eigen gasschijf, die in de zelfde richting van de planeet roteerde in bijna cirkelvormige banen. Dit verklaart de grote manen van deze planeten.

Opmerking:

Enkele wetenschappers hebben een alternatief model voorgesteld waarin storingen in de schijf van de gaswolk zou kunnen geleid hebben tot hoopjes gas die inkrimpten om rechtstreeks de joviaanse planeten te vormen zonder eerst de vorming van ijsplanetesimalen. Dit model is relatief nieuw en ze hebben nog niet genoeg details uitgewerkt om te weten of het alle kenmerken kan verklaren. M.a.w. voor t zelfde geld zitten ze ernaast.

Vraag 9.9 *What is the solar wind, and what roles did it play in the early solar system?*

De grote meerderheid H- en He- gas in de gaswolk werd nooit deel van een planeet. Het werd in de interstellaire ruimte weggeschoten door de zonnwind (die vroeger sterker was dan nu). Dit verzegelt het feit van planeten: moest het gas niet uitgespuwd zijn, zou het kunnen afgekoeld zijn totdat H- verbindingen gecondenseerd zouden zijn tot ijs, zelfs binnen de frostlijn. Dus de aardse planeten zouden overvloedig ijs aangeslibd hebben evenals H- en He- gas en zouden dus een andere structuur gehad hebben. Moest de overschot te vroeg weggeblazen zijn, zouden de ruwe materialen van de planeten weggeveegd zijn, voor de vorming van planeten, zoals soms gebeurt rond andere sterren. Bovendien verklaart het de vermindering in rotatiesnelheid van de zon. Wegens behoud van draaimoment roterde de gasschijf het snelst rond het centrum (met meeste massa). Dus de zon draaide vroeger heel snel. Nu draait ze zeer traag. Dit komt omdat draaimoment overgedragen kan worden van het ene object naar het andere (cf. 2 ijsschaatsers, de ene draait ronde en probeert de andere vast te pakken om draaimoment te verliezen). De snel roterende jonge zon veroorzaakte een magnetisch veld waardoor er meer activiteit was op het oppervlak van de zon (zonestormen en zonnevlekken). Hierdoor kwam er hoogenergetische UV en rntgen straling vrij welke gas ioniseerde in de solar nebula, zodat veel geladen deeltjes ontstonden. Het magnetisch veld trok de deeltjes in de gaswolk mee, sneller dan de rotatiesnelheid van de solar nebula zelf. Bijgevolg stond de zon draaimoment af aan de geladen deeltjes, die dan door de sterke zonnwind weggeblazen werden. Zo begon de zon trager te draaien.

Vraag 9.10 *In the context of planet formation, what are asteroids and comets? Explain why we find asteroids in the asteroid belt en comets in the Kuiper belt en Oort cloud.*

Asteroiden zijn de rotsachtige overgebleven planetesimalen van het binnenste van het zonnestelsel. De 4 binnenste planeten moeten de meeste planetesimalen weggeveegd hebben in de omgeving van hun banen rond de zon, maar tussen Mars en Jupiter (vanwege Jupiters grote aantrekking wegens grotere massa) werd geen planeet gevormd, dus dit gebied de asteroidengordel - moest eens dicht geweest zijn met rotsachtige planetesimalen. In feite was er genoeg om een nieuwe planeet te vormen, maar de meeste crashten uiteindelijk op de binnenplaneten of werden uiteindelijk uit het zonnestelsel weggekata-pulteed. Vandaag de dag vertegenwoordigt de totale massa van de asteroiden op deze locatie een heel klein deel van de massa van gelijk welke aardse planeet. Kometen zijn de ijsrijke overgebleven planetesimalen van het buitenste gedeelte van het zonnestelsel. In het begin waren ze over heel de buitenkant verspreid, vermoedelijk op een afstand verder dan Neptunus. Deze zouden veel gegroeid zijn zonder storing door de joviaanse planeten; meer nog, ze zouden in hun originele stabiele banen in het zelfde baanvlak als dat van de planeten gebleven zijn. Deze grote kometen werden kometen van de Kuipergordel, die dezelfde basispatronen als de planeten. Pluto, die niet echt in het rijtje der planeten past, heeft meer weg van een grote komeet in de Kuipergordel dan van een planeet.

De kometen die rondzwierven tussen de joviaanse planeten kwamen praktisch onvermijdelijk in botsing met deze planeten. Deze botsingen hadden tot gevolg dat die kometen weggeslingerd werden in random richtingen in banen zeer ver verwijderd van de zon. Hierdoor vertoonden hun nieuwe banen niet langer de originele ordelijke bewegingen van de schijf waarin de planeten gevormd werden. Dit is de reden waarom ze zich nu in Oort Cloud bevinden, met random georiënteerde banen zeer ver van de zon. Vaporiseren

Vraag 9.11 *What was the heavy bombardment, and when did it occur?*

Aangezien er nu maar een klein gedeelte meer van de vaste aantallen van overgebleven planetesimalen die rondzwierven in het jonge zonnestelsel, aanwezig zijn, moet er een groot gedeelte weggeslingerd zijn in de diepe ruimte, maar er moeten ook vele restanten gebotst zijn tegen de planeten. Deze botsingen gebeurden in de eerste honderd miljoen jaren van de geschiedenis van ons zonnestelsel. Deze periode noemt men de heavy bombardment. Dit bracht met zich mee dat er heel veel kraters werden gevormd. De impacts brachten ook materie mee van andere gebieden van het zonnestelsel (dit was kritiek voor ons bestaan). Zo werd bvb. water meegebracht via kometen of via rotsachtige planetesimalen, die kleine hoeveelheden water bevatten afkomstig van de buitenste asteroidengordel.

Vraag 9.12 *How do we think the moon formed, and what evidence supports this hypothesis? Should we be surprised that a giant impact could have affected our planet?*

We denken dat de maan ontstaan 4,4 miljard jaar geleden door botsing van een zeer reusachtige planetesimaal (van de grootte van Mars) met de jonge aarde. Deze impact zou rots weggeblazen hebben van de buitenste lagen van de aarde i.e. mantel en korst en zou dit materiaal in een baan rond onze planeet gestuurd hebben. Volgens computermodellen zou dit materiaal aangeslibd kunnen zijn om dan de maan te vormen. Uren na deze impact was onze planeet volledig gesmolten door de hitte, veroorzaakt door de botsing. Bovendien draaide ze zeer snel rond, maar door miljarden jaren van getijdenkrachten is de rotatiesnelheid aanzienlijk verminderd. Er zijn 2 redenen om deze hypothese te ondersteunen. Eerst en vooral lijkt de totale samenstelling van de maan op die van de buitenste lagen van de aarde. Daarnaast heeft de maan maar een kleine hoeveelheid gemakkelijk verdampte ingrediënten (zoal water). Door de hitte van de impact zouden deze ingrediënten dan verdampt zijn.

Vraag 9.13 *Describe the technique of radiometric dating. What is a half-life?*

Radiometrische datering past men toe om bvb. de leeftijd van een rots te bepalen. Dit is de tijd waarop zijn atomen samengebonden werden zoals in de huidige toestand. Men meet de hoeveelheden van verscheiden atomen en isotopen in de rots. Wanneer een radioactief isotoop (de ouder) instabiel is, kan de kern radioactief verval ondergaan (vb. een proton dat omgezet wordt in een neutron), zodat het oorspronkelijke ouderisotoop overgaat in een dochter isotoop. Bijgevolg kan een element in een totaal verschillend element veranderen met verschillende chemische eigenschappen. Het tempo waarop deze transformatie gebeurt wordt gekenmerkt door de unieke halfwaardetijd van het ouderisotoop. Dit is de tijd waarna de helft van de ouderkernen in een collectie atomen van een

ouderisotoop vervallen is.

Een handige formule:

$$\frac{\text{huidige hoeveelheid}}{\text{originele hoeveelheid}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{\text{half}}}},$$

met t de leeftijd van het ding uitgedrukt in jaren en t_{half} de halfwaardetijd; t vind je door van beide leden de logaritme te nemen. De hoeveelheden zijn uitgedrukt in unit.

Vraag 9.14 *How old is the solar system, and how do we know?*

Ons zonnestelsel is 4.6 miljard jaar oud: de planeten werden 4.6 miljard jaar geleden, wat we weten door radiometrische datering op de oudste meteorieten, die onveranderd bleven sinds ze condenseerden en aanslibden in het jonge zonnestelsel.

Hoofdstuk 10

Planetary Geology

Vraag 10.1 *What do we mean by planetary geology? Briefly summarize the different geological appearances of the five terrestrial worlds.*

- **planetaire geologie** is de studie van de aarde, uitgebreid naar andere werelden. Het is dus de studie van een vaste wereld, ook als het een maan is in plaats van een planeet.
- Mercurius: vertoont een grote hoeveelheid kraters, behalve in de gebieden die vulkanische vlakten lijken te zijn.
- Maan: idem als Mercurius.
- Venus: het oppervlak van Venus vertoont uitstulpingen en vreemde vulkanen.
- Mars: heeft de grootste vulkanen van heel het zonnestelsel, een reusachtige ravijn die over zijn oppervlak loopt en verscheidende features die door stromend water lijken gevormd te zijn.
- Aarde: heeft kenmerken gelijkaardig aan al deze op de andere Aard-achtige planeten en bovendien een unieke laag van levende organismen die bijna het hele oppervlak van de Aarde bedekken.

Vraag 10.2 *What is differentiation, and how did it lead to the core-mantle-crust structures of the terrestrial worlds?*

- **Differentiatie:** onder invloed van de gravitatiekracht worden meer dichtere materialen gescheiden van de minder dichtere.
- De **kern** bevat al het meest dichte materiaal.
De **mantel** bevat minder dichte materiaal.
De **korst** bevat het minst dichte materiaal.
- De aard-achtige planeten hebben verschillende lagen (als je kijkt naar de dichtheid van het materiaal). Hierdoor weten we dus dat deze planeten ooit binnenin heet genoeg waren zodat rotsen en metalen smolten en gescheiden werden volgens dichtheid. De dichte metalen (zoals ijzer) zonken naar het centrum en dreven het minder dichte rotsachtige materiaal naar het oppervlak.

Vraag 10.3 *What do we mean by the lithosphere, and why isn't it listed as one of the three layers by composition? How does lithospheric thickness vary among the five terrestrial worlds?*

- Rotsen kunnen heel langzaam vervormd worden, en dit gebeurt makkelijker als het warmer is. We spreken dus over de sterkte van een rots.
- De buitenste laag van een planeet bestaat uit relatief koelere en onbuigzame rotsen. Deze laag noemt de lithosfeer en „drijft” op warmere, zachtere rotsen. Het bestaat meestal uit de korst en een deel van de mantel.
- Het is een laag volgens de sterkte van de rotsen, niet volgens de dichtheid. Het hoort daarom niet bij de drie andere lagen thuis.
- Kleinere planeten hebben doorgaans dikkere lithosferen.
- De Aarde en Venus (de twee grootste aard-achtige planeten) hebben een zeer dunne lithosfeer die slecht over een klein stuk van de mantel uitstrekt.
- Mars, Mercurius en de Maan hebben dikke lithosferen die zich bijna tot aan de kern uitstrekken.

Vraag 10.4 *Summarize the processes by which planetary interiors get hot and cool off. Why do large planets retain internal heat longer than smaller planets?*

- Hoe warmt de binnenkant van een planeet op?
 - Niet door de zon! De energie van het zonlicht dringt maar enkele meters diep door in de grond. Zonlicht is de voornaamste bron van warmte voor het oppervlakte, niet voor de binnenkant.
 - **Warmte door accretie:** een planetesimaal heeft veel gravitationele potentiële energie als het ver weg is. Als het een vormende planeet nadert wordt potentiële energie omgezet in kinetische, waardoor de planetesimaal meer snelheid krijgt. Bij impact wordt veel van de kinetische energie omgezet in warmte.
 - **Warmte van differentiatie:** als de dichtere materialen zinken naar de bodem en de lichtere stijgen gaat er veel van de massa van de planeet naar binnen. Daardoor is er een verlies aan potentiële energie. Die wordt door wrijving omgezet naar thermische energie.
 - **Warmte van radio-actief verval:** wanneer radio-actieve kernen vervallen, vliegen subatomische deeltjes weg met hoge snelheden. Deze botsen met andere atomen en verwarmen hen. Er wordt dus een deel van de massa-energie ($E = mc^2$) van de radio-actieve kern overgedragen op de thermische energie van de planeet. Het is de enige vorm van opwarming die continue doorgaat. De andere twee gebeurtenissen alleen toen de planeet nog jong was. De mate van radio-actief verval neemt af met de tijd.
 - de combinatie van de drie warmtebronnen verklaart de kern-mantel-korst structuur: De vele gewelddadige inslagen tijdens de accretiefase gaven zoveel energie dat de buitenste lagen van de jonge planeten begonnen te smelten. Dit startte het differentiatie-proces en dit proces begon zelf ook bijkomende energie vrij te geven. Samen met de niet-onaanzienlijke hoeveelheid warmte van het radio-actief verval, zorgde dat ervoor dat het interieur warm genoeg werd om te smelten en helemaal te differentiëren.

- Hoe koelt de binnenkant van een planeet af?
 - **Convectie:** Convectie transporteert warmte naar boven doordat heet materiaal uitzet en stijgt, en koeler materiaal inkrimpt en valt. Het komt voor wanneer er een opwarming is van beneden uit. Er ontstaan convectiecellen. Mantel-convectie is een zeer traag proces, dat stopt aan de basis van de lithosfeer.
 - **Conductie:** Conductie is het proces waar bij heet materiaal warmte overdraagt op koeler materiaal door contact. Conductie gebeurt door de microscopische botsingen tussen de vele individuele atomen of moleculen. Moleculen of materialen die een dicht contact hebben botsen constant met elkaar en de snellere moleculen in warm materiaal transfereren een gedeelte van hun energie aan de trager-bewegende moleculen van het koelere materiaal.
 - **Straling:** warmte verliezen door energie (in de vorm van licht) uit te stralen. Alle objecten zenden thermal radiation uit, specifiek voor hun temperatuur, en verliezen zo energie.
 - Convectie en conductie transporteren interne warmte naar het oppervlak, en de planeet verliest uiteindelijk zijn warmte door ze uit te stralen. Convectie transporteert warmte tot de basis van de lithosfeer, vanaf de basis van de lithosfeer gaat de warmte voornamelijk door conductie naar het oppervlak.
 - De grootte van een planeet is de belangrijkste factor in de afkoeling. Een grote planeet kan langer warm blijven binnenin dan een kleinere, omdat de „extra” rotsen als isolatie werken, zodat het langer duurt voor interne warmte om de oppervlakte te bereiken.

Vraag 10.5 *Why does Earth have a global magnetic field? Why don't the other terrestrial worlds have similarly strong magnetic fields? (p. 254)*

- Geladen deeltjes bewegen met de gesmolten metalen in de buitenkern (buitenste deel van de kern). Interne warmte doet de vloeibare metalen rijzen en vallen (convectie), terwijl de rotatie van de Aarde het convectie patroon van deze gesmolten metalen draait en verwingt. Het resultaat is dat de elektronen in de gesmolten metalen in de buitenkern van de Aarde bewegen, net als in een elektromagneet, waardoor er dus een magnetisch veld gecreëerd wordt.
- Er zijn drie benodigdheden voor een magnetisch veld:
 1. Een binnenste gedeelte van elektrisch geleidend fluidum (vloeibaar of gas), zoals gesmolten metaal.
 2. **Convectie** in dat gebied
 3. Minstens een medium **rappe rotatie**.
- De Maan: heeft ofwel geen metalen kern ofwel is de kern al lang vast geworden en is de convectie dus opgehouden.
- Mars: de kern is waarschijnlijk ook vast geworden.
- Venus: heeft waarschijnlijk een gesmolten laag van de kern zoals dat van de Aarde, maar ofwel zijn convectie, ofwel zijn rotation period (243 dagen) is te traag om een magnetisch veld te creëren.

- Mercurius: blijft een raadsel. Het heeft een meetbaar magnetisch veld ondanks zijn kleine grootte en trage rotatie (59 dagen). De reden daarvoor kan zijn dat Mercurius een enorme metalen kern heeft die nog altijd gedeeltelijk gesmolten en convectierend kan zijn.

Vraag 10.6 *Define each of the four major geological processes and give examples of features shaped by each process.*

- **Impact cratering:** asteroïden of kometen die inslaan op de oppervlak van een planeet vormen een komvormige impact krater door de inslag.
 - de standaardvorm: een ronde kom-vormige krater met een scherpe rand en een ring van weggeslagen overschot.
 - Een komeet/asteroïde die inslaat op een oppervlak met een ondergrond van water of ijs vormt ook een ronde kom-vormige krater maar die kan een extra bult in het center hebben en de modderige resten vormen een patroon van modderstromen rondom de kern, toen ze verhardden.
 - Een krater kan een rand hebben die verweerd is, wat dus wijst op erosie.
- **Vulkanisme:** de eruptie van gesmolten rots, of lava, van een planeets binnenste, naar de oppervlakte.
 - „**volcanic plains**”: gevormd door zeer vloeibare lava die ver en vlak stroomt en vervolgens verhardt. Bvb. lava plains (maria) op de Maan.
 - „**shield volcanoes**”: door wat dikkere lava gevormd, het wordt hard voor het volledig uitgespreid is. Kan zeer hoge, maar niet erg steile ophopingen vormen. Bvb. Olympus Mons op Mars.
 - „**stratovolcanoes**”: gevormd door het dikste lava, dat niet ver kan vloeien voor het vast wordt. Het kan zeer hoog en steil worden. Bvb. Mount Kilimanjaro in Tanzania.
- **Tectoniek:** de verstoring van een planeets oppervlakte door interne stress.
 - samendrukkingsverschijnselen in plaatsen waar naburige convectiecellen rots samendrukken. Bvb. De Appalachen in het oosten van de VS.
 - mantel convectie kan op sommige plaatsen de korst uiteentrekken en zo barsten en valleien vormen. Bvb. de Rio Grande Vallei in Nieuw Mexico.
- **Erosie:** het afslijten of opbouwen van geologische features door wind, water, ijs en andere fenomenen van het weer van een planeet.
 - Vormen van valleien door gletsjers (ijs) bvb. De Yosemite Vallei.
 - Vormen van ravijnen door rivieren (vloeistoffen) bvb. De Grand Canyon.
 - Het verplaatsen (op en af bouwen) van zandduinen. bvb. De Californian desert.
 - Afzetten van afval van erosie, met de vorming van bvb een rivier delta.

Vraag 10.7 *What is outgassing, and why is it so important to our existence?*

De Aarde en andere aard-achtige planeten vormden door accretie van rotsachtige en metallische planetesimalen. Het water en gas in hun binnenstes kwamen (waarschijnlijk) van met ijs bedekte planetesimalen van verdere gebieden van het zonnestelsel, die op de aarde insloegen. Dit water en gas werden gevangen in het binnenste van de planeten zoals koolzuurhoudende dranken worden opgeslaan in een fles onder druk. Wanneer gesmolten rotsen uitbarsten als lava kunnen de gassen ontsnappen doordat de druk wegvalt. Dit noemen we **outgassing**. Dit kan plotseling of meer geleidelijk. Bijna al het gas dat de atmosferen van Venus, de Aarde en Mars vormt, en de waterdamp die neerregende om de oceanen van de Aarde te vormen waren oorspronkelijk losgelaten van het innerlijke van de planeet door outgassing.

Vraag 10.8 *How do crater counts tell us the age of a planetary surface? Briefly explain why the Moon is so much more heavily cratered than Earth.*

We beschouwen oppervlakken met vulkanisme, tectoniek en erosie als „geologisch jong” omdat ze voortdurend herschapen worden door deze processen. Een oppervlak dat niet veranderd is in miljarden jaren noemen we „geologisch oud”. Dit is dus de leeftijd van het oppervlak zoals het lijkt, niet de leeftijd van de planeet zelf (wat 4,6 miljard jaar is). Al de terrestrische planeten zijn even erg gekraterd door het „Grote Bombardement”, het aantal inslagen op een oppervlakte zou gelijk moeten zijn, ongeacht grootte, afstand tot de zon, rotatiesnelheid. Als we de Maan bekijken zien we gebieden met kraters bovenop kraters („lunar highlands”) en andere gebieden met slechts een paar kraters („lunar maria”). Er zijn dus processen geweest die de kraters van de maria gewist hebben na het einde van het Grote Bombardement. Rotsen van de highlands zijn 4,4 miljard jaar oud en rotsen van de maria tussen de 3,0 en 3,9 miljard jaar. De maria hebben ongeveer 3% zoveel kraters als de highlands. Het Grote Bombardement is dus bedaald relatief vroeg in de geschiedenis van het zonnestelsel. Een oppervlak dat veel kraters heeft (zoals de Maan en Mercurius), moet onverstoord gebleven zijn sinds het einde van het Grote Bombardement. Bij een oppervlak met weinig kraters (zoals de Aarde en Venus) zijn de oude kraters gewist door recentere geologische processen.

Vraag 10.9 *Summarize the ways in which a terrestrial world’s size, distance from the Sun, and rotation rate each affect its relative level of impact cratering, volcanism, tectonics, and erosion.*

- De grootte: zowel vulkanisme als tectoniek vereisen interne warmte. Grotere planeten hebben meer interne warmte en dus meer vulkanisme en tektoniek activiteit. Grotere werelden koelen minder rap af dan kleinere. Erosie kan alleen voorkomen op planeten met een significante atmosfeer. Anders is er geen wind, klimaatsveranderingen,... . Ook mag deze atmosfeer niet stationair zijn. De grootte is belangrijk omdat terrestrische werelden alleen een atmosfeer kan hebben als er voldoende outgassing is, en outgassing is een deel van vulkanisme. Bovendien bepaalt de grootte van de planeet de grootte van de graviteit en werelden met zwakkere graviteit verliezen eerder hun gassen aan de ruimte.
- De afstand tot de zon bepaalt de temperatuur. Als al de rest gelijk is, zullen de hogere temperaturen op de planeet dicht bij de zon, het makkelijker maken voor de gassen om te ontsnappen. Op planeten verder van de zon, kunnen de gassen bevroren. Erosie is effectiever bij vloeibaar water dan bij waterstof of ijs. Daarom is een gemiddelde temperatuur het effectiefst voor erosie.

- Rotatie is belangrijk voor erosie omdat rotatie de belangrijkste drijfveer is van wind en andere vormen van weer. Snellere rotatie betekent sterkere winden en stormen.

Hoofdstuk 11

Planetary Atmospheres

Vraag 11.1 *Briefly summarize the different atmospheric properties of the five terrestrial worlds. How do they differ in surface temperature and pressure? What are the different atmospheres made of?*

zie tabel in boek: atmospheres of the terrestrial worlds, p.289.

Mercurius en de maan hebben zeer weinig atmosfeer (de meeste atomen in de atmosfeer werden losgelagen van het oppervlak door de zonnewind, energierijke fotonen of micro-meteorieten) en hebben dus praktisch geen weer of wind. De gasdichtheid is er zeer laag. Venus, daarentegen, is gehuld in een dikke atmosfeer. De druk en temperatuur zijn er hoog. De atmosfeer van Venus bestaat bijna volledig uit CO_2 . Deze planeet roteert vrij traag en heeft daarom geen stormen.

Ook op Mars bevat de atmosfeer voornamelijk CO_2 . De druk en temperatuur zijn er laag. Mars heeft soms stofstormen.

Op Aarde bestaat de atmosfeer vooral uit N_2 en O_2 . Onze planeet heeft de juiste omstandigheden voor leven.

Vraag 11.2 *Using a balloon as an analogy, explain the origin of gas pressure. What do we mean by atmospheric pressure? why does pressure decrease with altitude? What is 1 bar of pressure?*

In een ballon botsen de gasmoleculen constant met de ballonwand en oefenen zo een druk uit naar buiten toe. De moleculen buiten de ballon botsen ook met de wand en oefenen een druk uit naar binnen toe. Indien beide gelijk zijn, behoudt de ballon haar vorm. Indien de ballon opgewarmd wordt of er lucht in geblazen wordt, stijgt het aantal of de intensiteit van de botsingen en dus de druk binnendien de ballon. Als gevolg daarvan zet de ballon uit tot de drukken langs binnen en langs buiten weer gelijk zijn.

Het gas in de atmosfeer wordt naar de Aarde toe getrokken door de zwaartekracht. Een bepaalde laag in de atmosfeer voelt druk van de bovenliggende lagen en wordt samenge-drukt. Hoe hoger in de atmosfeer, hoe kleiner de druk. Gasmoleculen in de atmosfeer die snel bewegen, oefenen een druk uit op hun omgeving, o.a. naar boven toe. Dit doet de atmosfeer uitzetten.

De bar is de eenheid van druk; 1 bar komt overeen met de atmosferische druk op zeeniveau op aarde.

Vraag 11.3 *Is there any atmosphere at the orbital altitude of the Space Station above Earth?*

Het ruimtestation bevindt zich in een baan om de aarde in de uiterste grenzen van de atmosfeer. Daar zijn druk en dichtheid enorm laag, maar de weinige gasmoleculen beïnvloeden toch satellieten die zich daar bevinden. Het doet ze spiraalsgewijs naar beneden bewegen, weliswaar traag.

Vraag 11.4 *What does the greenhouse effect do to a planet? Explain the role of greenhouse gases and describe the basic mechanism of the greenhouse effect.*

Het broeikaseffect zorgt ervoor dat het oppervlak van een planeet warmer is dan het zou zijn zonder dit effect.

Het zonlicht dat een planeet ontvangt, bestaat vooral uit zichtbaar licht. Dit kan vrij gemakkelijk door de atmosfeer doordringen tot aan het oppervlak van de planeet. Daar wordt een deel geabsorbeerd en de rest gereflecteerd. De opgenomen energie wordt opnieuw uitgezonden als infrarode straling (omdat de planeet te koud is om zichtbaar licht uit te zenden). Een deel van de infrarode straling wordt geabsorbeerd door zogenaamde broeikasgassen. Voorbeelden van dergelijke broeikasgassen zijn: waterdamp (H_2O), koolstofdioxide (CO_2) en methaan (CH_4). Wanneer die een infrarood foton absorberen, gaan ze roteren en vibreren en opnieuw een infrarood foton uitzenden in een willekeurige richting. Zo worden infrarode fotonen continu geabsorbeerd en opnieuw uitgezonden; dit vertraagt het ontsnappen van zo'n foton uit de onderste atmosfeer. De moleculaire bewegingen warmen de omringende lucht op en het broeikaseffect warmt dus het oppervlak en het onderste deel van de atmosfeer op. De graad van opwarming hangt af van het aantal broeikasgassen.

Vraag 11.5 *If there were no greenhouse effect, what factors would determine a planet's surface temperature? How do the 'no greenhouse' temperatures of the terrestrial planets compare to their actual temperatures, and why?*

Bij een planeet moet er een evenwicht zijn tussen de ontvangen energie en de energie terug uitgezonden in de ruimte. Het broeikaseffect verandert niets aan de ontvangen energie, maar verhoogt op elk moment de hoeveelheid energie in de onderste lagen van de atmosfeer, en warmt die dus op. De hoeveelheid energie die de ruimte ingezonden wordt, blijft dezelfde, maar de infrarode straling wordt vertraagd. Zonder broeikaseffect zou de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van een planeet afhankelijk zijn van de volgende 2 zaken:

- de afstand tot de zon: De intensiteit van het invallende zonlicht vermindert met de afstand
- de totale reflectiviteit van de planeet: Dit bepaalt de mate waarin zonlicht gereflecteerd en geabsorbeerd wordt. Hoe hoger de reflectiviteit (albedo), hoe minder zonlicht de planeet absorbeert en hoe kouder ze is.

De reflectiviteit hangt af van de samenstelling van het oppervlak en de kleur (hoe donkerder, hoe meer absorptie). Op Mercurius en de Maan is geen broeikaseffect. Op Mars heerst een zwak, op aarde een middelmatig en op Venus een extreem broeikaseffect. Op aarde is het broeikaseffect noodzakelijk om leven mogelijk te maken, zonder dit effect zou onze planeet permanent bevroren zijn. De temperatuur zonder broeikaseffect kan berekend worden via de volgende formule:

$$T = 280K * \sqrt[4]{(1 - reflectivity)/d^2}.$$

Voor een overzicht, zie tabel p.295

Vraag 11.6 *Describe Earth's basic atmospheric structure, from the ground up. How do interactions of sunlight and gases explain the existence of each of the atmospheric layers?*

De aardatmosfeer bestaat uit 4 grote lagen:

- de troposfeer: Dit is de onderste laag van de atmosfeer. Ze wordt opgewarmd door het broeikaseffect. De temperatuur daalt als de hoogte stijgt, omdat dicht bij de grond meer infrarood licht (komende van het oppervlak) geabsorbeerd wordt. In deze laag voedt de opwarming van het oppervlak convectie, wat ervoor zorgt dat de troposfeer de enige laag is waarin stormen kunnen voorkomen
- de stratosfeer: Deze laag start waar de temperatuur opnieuw stijgt met de hoogte. Die stijging komt er doordat ozonmoleculen (O_3) ultraviolet licht absorberen en zo de omringende lucht opwarmen. In het bovenste deel van de stratosfeer zakt de temperatuur opnieuw (mesosfeer).
- de thermosfeer: Deze laag begint waar de temperatuur weer stijgt na de stratosfeer. Hier stijgt de temperatuur door absorptie van X-stralen. Deze vorm van straling ioniseert een klein gedeelte van het gas in de thermosfeer. Het geïoniseerde deel van de thermosfeer wordt de ionosfeer genoemd en is belangrijk voor radiocommunicatie (reflecteert de meeste radiouitzendingen weer naar het oppervlak).
- de exosfeer: De buitenste laag van de atmosfeer, waar die overgaat in de ruimte. Deze laag heeft een zeer lage dichtheid. Gaspartikels bewegen er zeer snel, wat tot een hoge temperatuur leidt, sommige gasdeeltjes bereiken zelfs de ontsnappingsnelheid.

Vraag 11.7 *Why is the sky blue? Why are sunrises and sunsets red?*

Een deel van het zichtbare licht wordt door gasmoleculen in de atmosfeer verstrooid. Daarom is de hemel overdag niet zwart. Hoger energetisch blauw licht wordt meer verstrooid dan lager energetisch rood licht. Overdag bereikt blauw licht ons dan vanuit alle richtingen, zodat de hemel blauw kleurt. Bij zonopgang of -ondergang moet het licht door veel meer atmosfeer passeren alvorens het ons bereikt. Het grootste deel van het blauwe licht wordt verstrooid en bereikt ons niet; enkel de rode fotonen bereiken ons en zorgen 's morgens en 's avonds voor een rode hemel.

Vraag 11.8 *Why does convection occur in the troposphere, leading to active weather, but not in the stratosphere?*

Om convectie (warme lucht stijgt, koude lucht daalt) te kunnen hebben, is er warmte nodig van beneden af. De troposfeer is de laag van de atmosfeer het dichtst bij het aardoppervlak en dus kan de opwarming daarvan convectie in de troposfeer mogelijk maken. Dit geeft aanleiding tot het ontstaan van stormen.

In het onderste deel van de stratosfeer kan warme lucht niet stijgen, omdat de hogere luchtlagen nog warmer zijn. De stratosfeer bestaat bijgevolg uit een aantal relatief stationaire warmere en koudere luchtlagen boven elkaar (warm boven koud). Omdat de lucht niet voldoende in beweging is, kan er geen convectie optreden.

Vraag 11.9 *What is ozone? How does the absence of ozone on Venus and Mars explain why these planets lack a stratosphere?*

Ozon of O_3 is een molecule die gemakkelijk ultraviolet licht absorbeert en daarbij uiteenvalt. Ozon zorgt zo voor de opwarming van het onderste deel van de stratosfeer. Ozon maakt het bestaan van de stratosfeer op aarde mogelijk. Omdat de andere aardse planeten geen moleculen bevatten die gemakkelijk ultraviolet licht absorberen, hebben ze ook geen stratosfeer.

Vraag 11.10 *What is a magnetosphere? Briefly explain how a magnetosphere can protect a planet from the solar wind and lead to the creation of auroras.*

Een magnetosfeer is een soort bel of band die een hele planeet omhult. De grootte van de magnetosfeer hangt af van de sterkte van het magnetisch veld van de planeet: hoe sterker, hoe groter de magnetosfeer.

Een magnetosfeer zorgt ervoor dat deeltjes van de zonnwind (stroom van geladen deeltjes komende van de zon) niet rechtstreeks op de planeet kunnen inslaan, maar afgebogen worden. Sommige deeltjes kunnen tot in de magnetosfeer doordringen via de polen (de meest kwetsbare punten). Eens in de magnetosfeer bewegen ze onder invloed van de magnetische krachten langs de magnetische veldlijnen. De geladen deeltjes (ionen en elektronen) vormen samen grote geladen gordels (op aarde Van Allen gordels genoemd).

Veranderingen in de zonnwind kunnen geladen deeltjes die gevangen zitten in de magnetosfeer extra energie geven, waardoor ze de magnetische veldlijnen helemaal tot in de atmosfeer kunnen volgen. Door botsingen met atomen en moleculen daar beginnen die laatste te stralen en veroorzaken zo de aurora (aurora borealis op het noordelijk halfrond en aurora australis op het zuidelijk halfrond).

Vraag 11.11 *What is the difference between weather and climate?*

Het weer is een samenraapsel van de steeds variërende winden, wolken, temperatuur en druk. Het klimaat is een verzamelnaam voor de weergemiddelden op lange termijn. Klimaten zijn vaak stabiel gedurende meerdere eeuwen of millennia. Soms zijn beide begrippen moeilijk te onderscheiden.

Vraag 11.12 *What are Earth's global wind patterns? Explain why our planet has circulation cells that transport warm air toward the poles and cool air toward the equator. How does our planet's rotation affect these cells?*

p de middelste breedtes (bv. in onze streken) waait de wind meestal van west naar oost, elders van oost naar west. Twee zaken zijn bepalend voor de globale windpatronen:

- de opwarming van de atmosfeer: Over het algemeen ontvangt het evenaarsgebied meer licht dan de rest van een planeet. Daardoor zet de atmosfeer er uit en beweegt naar boven toe en dan naar de polen. Daar daalt koude lucht en vloeit terug naar de evenaar. Zo ontstaan circulatiecellen (Hadley cellen).
- de rotatie van een planeet: Indien een planeet een snelle rotatie heeft, worden de circulatiecellen gesplitst in meerdere kleine cellen. Het Corioliseffect zorgt ervoor

dat lucht op het noordelijk halfrond naar rechts wordt afgebogen en op het zuidelijk halfrond naar links. Op aarde splitst elke grote circulatiecel zo in 3 kleinere. In de tropen en aan de polen waaien oppervlaktewinden naar de evenaar. Het Corioliseffect doet ze afbuigen naar het westen toe \Rightarrow oost-west wind. In de middelste breedtes blazen oppervlaktewinden naar de polen toe, en worden ze dus naar het oosten afgebogen \Rightarrow west-oost wind.

Vraag 11.13 *What are clouds made of? How does rain or snow form?*

Door de verdamping van oppervlaktewater (of sublimatie van ijs en sneeuw) komt er waterdamp in de atmosfeer. Door convectie stijgt die waterdamp in de troposfeer naar koudere lagen, waar ze condenseert tot vloeibaar water of sneeuwvlokken. Wolken bestaan uit kleine druppeltes vloeistof of kleine ijsdeeltjes (door condensatie van atmosferische gassen). De wolken groeien aan tot ze zo groot worden dat de opwaartse convectiestromen de druppels of vlokken niet langer op hun plaats kunnen houden. Die vallen dan naar beneden als regen, hagel of sneeuw.

Wolken kunnen ook gevormd worden wanneer de wind tegen een bergketen blaast.

Vraag 11.14 *Describe each of the four factors that can lead to long-term climate change, and the effects of each factor.*

- straling van de zon: Deze factor beïnvloedt het hele zonnestelsel. De zon wordt helderder naarmate ze langer schijnt. Zo stijgt de hoeveelheid warmte en licht die een planeet ontvangt, maar dit zorgt pas na miljoenen jaren voor een eventuele klimaatverandering. Vandaag is de zon ongeveer 30% helderder dan toen ons zonnestelsel nog jong was.

De volgende 3 factoren hebben enkel betrekking op 1 planeet

- veranderingen in de helling van de as: Over een periode van duizenden of miljoenen jaren kunnen kleine gravitationele aantrekking van manen, andere planeten of de zon de helling van de rotatieas wijzigen. Op aarde varieert de helling van 22° tot 25°, gemiddeld is ze 23.5°. Een grotere helling zorgt voor meer extreme seizoenen (warmere zomers, koudere winters). De planeet wordt gemiddeld warmer. De ijstijden in de aardse geschiedenis lijken overeen te komen met periodes van een kleinere helling van de aardas.
- veranderingen in de reflectiviteit van een planeet: Deze factor beïnvloedt de hoeveelheid zonlicht die geabsorbeerd en gereflecteerd wordt. Wanneer meer zonlicht geabsorbeerd wordt, warmt de planeet op. In het andere geval, koelt ze af. Dit kan bv. voorkomen na een grote vulkaanuitbarsting. Ook menselijke activiteit beïnvloedt de reflectiviteit, al weet men nog niet goed in welke richting. Wel zorgt ontbossing voor een stijging ervan, omdat er minder zonlicht-absorberende planten zijn.
- veranderingen in de hoeveelheid broeikasgassen: Een stijging zorgt voor opwarming van een planeet. Indien de opwarming voldoende groot is, stijgen verdamping en sublimatie, zodat de hoeveelheid gas in de atmosfeer vergroot. Dit resulteert in een grotere atmosferische druk. Bij een daling van de broeikasgassen, zal de planeet afkoelen en de druk afnemen (doordat gas bevriest).

Vraag 11.15 Describe each of the processes by which a planet can gain or lose atmospheric gas. What factors determine whether gases are lost through thermal escape?

Een atmosfeer kan op de volgende 3 manieren gas winnen:

- gasuitstoot: Het vrijkomen van gas dat vastzat in rotsen door vulkanische activiteit. Dit proces is veruit het belangrijkste en creëert de eigenlijke atmosfeer.
- verdamping, sublimatie: Vaste stoffen en vloeistoffen worden gasvormig. Dit kan maar voorkomen als er al een soort atmosfeer is.
- inslagen: Micrometeorieten, deeltjes uit de zonnwind of fotonen kunnen bij inslag op een planeet moleculen en atomen losslaan van rots aan de oppervlakte en zo een dunne atmosfeer creëren. Dit is de voornaamste bron van gas op planeten die bijna vacuüm zijn, zoals de Maan en Mars, maar speelt bijna geen rol op planeten die een atmosfeer hebben door de eerste 2 processen (de deeltjes die voor inslagen zorgen kunnen het oppervlak niet bereiken).

Een atmosfeer kan op de volgende 5 manieren gas verliezen:

- condensatie: Gas condenseert tot vloeistof of vaste stof.
- chemische reacties: Via chemische reacties kan gas uit de atmosfeer vastgezet worden in rotsen. Op aarde lost een deel van het CO_2 uit de atmosfeer op in de oceanen, waar het uiteindelijk rotsen vormt.
- verwijdering van gas door de zonnwind: Dit gebeurt wanneer geïoniseerde gassen uit de buitenste lagen van de atmosfeer weggekatapulteerd worden. Hoe sterker het magnetisch veld van een planeet, hoe minder dit proces kan plaatsvinden.
- inslagen: Door inslagen kunnen grote hoeveelheden gas weggeblazen worden (bv. tijdens *het grote bombardement*). Hoe sterker de zwaartekracht, hoe minder gas de planeet op deze manier verliest.
- ontsnappen van warmte: Dit komt voor wanneer een gasmolecule voldoende snelheid heeft om te kunnen ontsnappen aan de zwaartekracht van een planeet. Dit hangt af van 3 zaken: de ontsnappingssnelheid van een planeet, de temperatuur (hoe warmer, hoe hoger de gemiddelde snelheid van de deeltjes), de massa van de gasdeeltjes (lichte gassen zullen meer ontsnappen) Bij de eerste 2 processen blijft het gas op de planeet, bij de andere verdwijnt het in de ruimte.

Hoofdstuk 12

Jovian Planet Systems

Vraag 12.1 *Briefly describe how the differences in composition among the jovian planets can be traced to their formation in the solar nebula.*

Jupiter en Saturnus hebben zoveel waterstof en helium ingevangen dat deze gassen verantwoordelijk zijn voor het grootste deel van hun massa. Uranus en Neptunus hebben veel minder waterstof en helium, het grootste deel van hun massa bestaat uit materiaal van de planetesimaal waaruit ze gevormd zijn: waterstofsamenstellingen met kleine hoeveelheden rots en metaal. Dit komt omdat, verder van de zon weg, de dichtheid van de planetesimalen lager was. Bijgevolg duurde het, verder van de zon weg, langer om een planetesimaal te vormen die groot genoeg was om waterstof en helium te vangen.

Vraag 12.2 *Why is Jupiter so much denser than Saturn? Could a planet be smaller in size than Jupiter but greater in mass? Explain.*

De extra massa van Jupiter comprimeert de binnenste lagen zodanig dat het binnenste van Jupiter een veel hogere dichtheid krijgt. Een planeet kleiner maar zwaarder dan Jupiter kan, als er meer massa toegevoegd wordt zou het binnenste onder zijn gewicht genoeg samengedrukt worden om de planeet kleiner te maken.

Vraag 12.3 *Briefly describe the interior structure of Jupiter and why it is layered in this way. How do the interiors of the other jovian planets compare to Jupiter?*

Zie ook fig. 11.4. De lagen verschillen niet veel in samenstelling (behalve de kern) maar wel in de aggregatietoestand van de materie, daarom is alles in deze vraag met waterstof uitgelegd, hoewel er natuurlijk ook helium en waterstofsamenstellingen aanwezig zijn. De bovenste laag is waterstof in gasfase, meer naar beneden, waar de druk stijgt, vind je vloeibaar waterstof. Als de druk nog hoger wordt, kom je metallisch waterstof tegen, dit is waterstof ontdaan van zijn elektron, net als in een metaal zijn er in deze laag veel vrije elektronen. De kern bestaat uit waterstofsamenstellingen, rots en metaal.

Voor Saturnus is het hetzelfde, maar door zijn lagere massa (en dus lagere druk in het binnenste van de planeet) is er een dikkere laag gasvormig en vloeibaar waterstof en een dunnere laag metallisch waterstof.

Uranus en Neptunus hebben geen vloeibaar of metallisch waterstof (de druk in hun binnenste is niet groot genoeg), enkel een dikke laag gasvormige waterstof rond een kern van waterstofsamenstellingen, rots en metaal. Deze kern is misschien vloeibaar.

Vraag 12.4 *Why does Jupiter have so much internal heat? What generates internal heat on other jovian planets?*

Jupiter zendt twee maal zoveel warmte uit als het van de zon ontvangt. Dit komt door de viriaalstelling: Jupiter is nog steeds heel langzaam aan het krimpen, dus wordt zijn gravitationele potentiële energie negatiever (want $|E_{pot}|$ is evenredig met $\frac{1}{r}$) waardoor zijn kinetische energie (= warmte) stijgt. De gravitationele potentiële energie van Saturnus is te klein (door zijn lagere massa) om Saturnus te doen samentrekken, maar Saturnus krimpt door chemische differentiatie: zwaardere delen (helium) condenseren en zakken naar beneden. Uranus zendt geen extra interne energie uit. Neptunus zendt ook twee maal zoveel energie uit als het ontvangt van de zon. Op één of andere manier is Neptunus aan het samentrekken, maar men weet niet goed waarom.

Vraag 12.5 *Briefly describe Jupiter's atmospheric structure and cloud layers. How do the structures and clouds differ on the other jovian planets?*

De atmosfeer van Jupiter bevat verschillende gassen die elk op een andere temperatuur condenseren, zo worden er wolkenlagen op verschillende hoogtes gevormd. Zie ook fig. 11.6 en 11.7. Saturnus heeft dezelfde drie wolkenlagen als Jupiter, maar deze liggen dieper in de atmosfeer door de lagere temperatuur. De wolken op Uranus en Neptunus bestaan vooral uit methaan.

Hoofdstuk 13

Other Planetary Systems

Vraag 13.1 *Why are extrasolar planets hard to detect directly?*

Onze telescopen zijn nog niet zo ver ontwikkeld dat ze deze planeten kunnen waarnemen. Er zijn hierbij twee moeilijkheden te overbruggen. Eerst en vooral zijn de planeten op een enorm grote afstand van ons zonnestelsel gelegen. Ten tweede wordt het licht dat de planeten uitzenden sterk verzwakt door de sterren waarrond ze draaien die een veel grotere intensiteit hebben en dus veel meer licht uitzenden, waardoor het bijna niet mogelijk is voor ons om de planeten waar te nemen.

Vraag 13.2 *What are the three major methods used to detect extrasolar planets indirectly?*

De eerste 2 manieren steunen op de gravitationele aantrekkingskracht die de planeten op hun respectievelijke ster uitoefenen. In een systeem bestaande uit sterren en planeten, bewegen alle objecten rond het massamiddelpunt van het systeem. Dus ook de ster zal een kleine rotatiebeweging ondergaan, ook al is deze klein, want het massamiddelpunt van het systeem is dicht tegen deze ster gelegen. Deze methode is indirect omdat we naar de ster zelf kijken om te zien of er rond deze ster planeten bewegen.

- Astrometrische techniek: Hier wordt de positie van de ster nauwkeurig bestudeerd met een telescoop om na te gaan of de positie van de ster verandert en hoe ze juist verandert.
- Doppler techniek: Hier wordt gebruik gemaakt van het feit dat een roterende ster op een bepaald ogenblik in zijn baan lichtjes naar ons toe zal bewegen en op een ander tijdstip van ons zal weg bewegen. Het spectrum van de ster leunt voor deze naar ons toe bewegende ster aan bij de blauwe spectraallijnen, terwijl de ster meer in het rode spectrum zal uitzenden wanneer ze van ons weg beweegt.

De laatste manier heeft niks met gravitationele aantrekking te maken.

- We verklaren de aanwezigheid van een planeet door de helderheid van de ster na te gaan. Als een planeet voor(transit) of achter(eclips) een ster zal bewegen, neemt de helderheid van de ster af, omdat een deel van de ster wordt afgeschermd.

Vraag 13.3 *Explain why a planet can cause its star to move slightly in the sky.*

Zoals reeds in puntje 2 uitgelegd zal de ster ook rond het massamiddelpunt van het systeem bewegen. Dit wordt verklaard door de gravitationele aantrekking die beiden op elkaar uitoefenen. Aangezien de massa van de ster veel groter is in vergelijking met de massa van de planeet, zal de aantrekkingskracht die de planeet op de ster uitoefent veel kleiner zijn. Als de planeten minder massa vertegenwoordigen en dicht bij de ster gelegen zijn, zal het massamiddelpunt vrijwel het middelpunt van de ster zijn en zal de beweging van de ster aan de hemel te verwaarlozen zijn. Op verre afstand gelegen en zware planeten zorgen er dus voor dat het massamiddelpunt van het systeem verder van de ster verschuift, waardoor de roterende beweging van de ster veel duidelijker waar te nemen is aan de hemel.

Vraag 13.4 *How does the astrometric technique work? Why hasn't it been very succesful in discovering planets to date?*

Er wordt in observaties van de ster gezocht naar een verandering van haar positie. Moeilijkheden bij deze techniek:

- Hoe verder de ster gelegen, des te moeilijker het wordt om een verandering in positie waar te nemen.
- Enkel zeer massieve en ver van de ster afgelegen planeten zullen een dermate grote aantrekkingskracht op de ster uitoefenen, zodat ze een significante verandering van positie ondergaan.
- Een nadeel aan het feit dat ver af gelegen planeten vooral invloed hebben op een positieverandering is dat deze positieverandering van de ster ook meer tijd vraagt om waar te nemen, aangezien de omwentelingstijd van de planeten die verder afgelegen zijn langer duurt.

Deze nadelen zorgen ervoor dat het zeer moeilijk is met deze techniek een planeet rond een ster te lokaliseren. (Deze techniek kan wel handig zijn voor het vinden van systeem met 2 sterren, omdat de krachten die hier door beide sterren worden uitgeoefend redelijk groot zijn en daardoor een grote positieverandering veroorzaken.)

Vraag 13.5 *How does the Doppler technique work? Explain how it can tell us a planet's orbital period, orbital distance, and orbital eccentricity.*

Voor de werking: zie vraag 2.)

De periode van de baan van de planeet rond de ster is de tijd die de ster erover doet om opnieuw hetzelfde spectrum uit te zenden (dus na n rotatie van de ster). Aangezien de ster en de planeet steeds op een rechte lijn door het massamiddelpunt tegenover elkaar zijn gelegen is dus de omloopstijd van de planeet gelijk aan de omloopstijd van de ster.

We kunnen de halve grote as van de baan van de planeet om de ster bepalen door de volgende formule:

$$a^3 = G \times M_{\text{ster}} \times \frac{p^2}{4\pi^2}.$$

Hierin is G de gravitationele constante, M_{ster} de massa van de ster en p de omlooperperiode van de planeet (zie hierboven) gekend.

We kunnen de vorm van de baan van de planeet afleiden uit de vorm van de Doppler data. Perfect symmetrische data wijzen op een cirkelvormige baan. Hoe meer de Doppler data asymmetrisch zijn, hoe meer de planeet met veranderende snelheid beweegt, des te groter de excentriciteit van de baan van de planeet.

Vraag 13.6 *Why does the Doppler technique generally allow us to determine only minimum planetary masses rather than actual planetary masses? Should we expect these minimum masses to be close to the actual masses? Explain.*

Als de ster in een vlak loodrecht op onze gezichtslijn beweegt, kunnen we geen Doppler shift waarnemen. De ster beweegt immers op geen enkel moment naar ons toe of van ons weg. We kunnen in dit geval de baansnelheid van de ster niet bepalen. Wanneer het vlak waarin de ster beweegt een andere hoek met onze gezichtslijn maakt van 90 kunnen we wel een baansnelheid bepalen. Maar enkel wanneer het baanvlak van de ster evenwijdig aan onze gezichtslijn is, kunnen we de volledige baansnelheid van de ster bepalen, omdat we weten dat de snelheid van de ster enkel een component zal hebben volgens deze evenwijdige richting. Enkel in dit geval kunnen we de werkelijke massa van de planeet bepalen. In de andere gevallen kunnen we slechts een minimummassa bepalen.

Uit statische overwegingen kunnen we berekenen dat de werkelijke massa niet meer dan het dubbel van de minimummassa zal zijn, waaruit we kunnen besluiten dat de minimummassa nog een relatief goede benadering vormt.

Voor de volledigheid nog even de formule om de massa van de planeet dan effectief te bepalen:

$$M_{\text{planeet}} = \frac{M_{\text{ster}} \times v_{\text{ster}} \times p_{\text{planeet}}}{2\pi a_{\text{planeet}}}.$$

Vraag 13.7 *How does the transit technique work? Could we use this method to find planets around all stars that have them? Why or why not?*

We verklaren de aanwezigheid van een planeet door de helderheid van de ster na te gaan. Als een planeet voor (transit) of achter (eclips) een ster zal bewegen, neemt de helderheid van de ster af, omdat een deel van de ster wordt afgeschermd. Deze methode vereist wel herhaalde observaties van een afnemende helderheid, want een ster kan soms zelf lichte variaties in helderheid vertonen. Pas als we een periodieke aard vinden in deze vermindering van helderheid mogen we er zeker van zijn dat deze te wijten is aan de aanwezigheid van een planeet.

We kunnen deze techniek enkel toepassen voor planeten waarbij hun baan juist voor of achter de ster passeert in onze gezichtslijn. Slechts weinig planeten voldoen aan deze eis.

Vraag 13.8 *Have any planets been detected directly? Explain.*

Er is één kandidaat planeet ontdekt via directe waarnemingen. Doordat ze tot een systeem behoort met een zeer zwakke ster (brown dwarf = iets tussen een kleine ster en een grote planeet) die bijna geen zichtbaar licht uitstraalt, konden telescopen de infrarode straling die van de planeet kwam waarnemen. De straling werd in dit geval immers niet tenietgedaan door de sterke intensiteit van een nabije ster.

Vraag 13.9 *Briefly summarize all the planetary properties we can in principle measure with current techniques, and state which techniques allow us to measure each of these properties.*

- Periode van de baan van de planeet(omloopstijd) : alle 3 de methodes.
- Massa: We hebben de omloopstijd en de baansnelheid van de ster nodig. De baansnelheid van de ster kan volledig bepaald worden uit de 1ste methode, terwijl de 2de methode slechts een minimumsnelheid garandeert.
- Halve grote as: vereist de kennis van de massa van de planeet en omloopstijd (dus 1ste en onnauwkeurig uit de 2de periode).
- Vorm van de baan: 1ste en 2de methode.
- Straal van de planeet: enkel via de 3de methode
- Dichtheid van de planeet: we hebben de 1ste methode (of soms de 2de) nodig om de massa te bepalen en de 3de methode om de straal van de planeet te berekenen.
- Samenstelling van de planeet: uit de 3de methode kunnen we via het absorptiespectrum informatie krijgen over de samenstelling van de buitenste lagen van de atmosfeer.

Hoofdstuk 14

Our Star

Vraag 14.1 *Briefly describe how gravitational contraction generates energy. When was it important in the Sun's history? Explain.*

De zon genereert energie door langzaam samen te trekken, dit proces noemen we gravitationele samentrekking. Een krimpende gaswolk warmt op omdat een deel van de gravitationele potentiële energie van gasdeeltjes ver van het centrum van de gaswolk wordt omgezet in warmte-energie als het gas samentrekt. Deze warmte-energie houdt de binnenste lagen van de zon heet. Omdat de massa van onze zon zo groot is, moet de zon slechts heel langzaam samentrekken om zijn temperatuur te kunnen behouden. Onze zon is ongeveer 4,6 miljard jaar geleden in een in elkaar vallende wolk van interstellair gas ontstaan. De samentrekking van deze wolk ging gepaard met het vrijkomen van gravitationele potentiële energie. Veel van die energie werd uitgestraald als warmte-energie, maar de rest bleef binnen de wolk en veroorzaakte een stijging van de inwendige temperatuur en een stijgende druk, hoog genoeg om kernfusie mogelijk te maken.

Vraag 14.2 *What two forces are balanced in gravitational equilibrium? Describe how gravitational equilibrium makes the Sun hot and dense in its core.*

Gravitationeel evenwicht is een natuurlijk evenwicht tussen de zwaartekracht, een kracht die naar binnen duwt, en een druk (inwendige gasdruk) naar buiten toe. Omdat op elk punt in de zon dit evenwicht bestaat, is de zon stabiel van grootte (zie figuur 14.2). Omdat het gewicht van de bovenliggende lagen toeneemt naarmate we dieper in de zon haar kern gaan, neemt de druk ook toe. Diep in de kern van de zon maakt druk gas heet en dicht genoeg zodat kernfusie kan plaatsvinden. De energie die vrijkomt bij die fusie daarentegen, warmt het gas op en onderhoudt de druk die de zon in evenwicht houdt met de inwaarts duwende gravitatiekracht.

Vraag 14.3 *State the Sun's luminosity, mass, radius, and average surface temperature, and put the numbers into perspective that makes them meaningful. (zie ook tabel 4.1.)*

- Straal van de zon: 700000 km.
Dit is 100 keer de straal van de aarde. Zelf zonnevlekken, de donkere vlekken aan het oppervlak van de zon, kunnen groter zijn dan de zon zelf.

- Massa van de zon: 2×10^{30} kg. (Te berekenen via Keplers 3de wet)
Dit is ongeveer 300000 keer de massa van de aarde en meer dan 1000 keer de massa van alle planeten in ons zonnestelsel tezamen.
- Lichtkracht van de zon: $3,8 \times 10^{26}$ W
Als we 1 seconde de lichtkracht van de zon zouden kunnen opvangen, zouden we genoeg energie hebben om de aarde de komende 500000 jaar te voorzien.
- Oppervlaktetemperatuur: 5800K.

Vraag 14.4 *Briefly describe the distinguishing features of each of the layers of the Sun shown in Figure 14.3.*

(Onze zon is een plasmabool, m.a.w. een gas waarin vele atomen geïoniseerd zijn door de hoge temperaturen. Plasma gedraagt zich ongeveer zoals een gewoon gas, met als enige verschil dat vele positief geladen ionen en vrij bewegende elektronen ervoor zorgen dat er een magnetisch veld gecreëerd worden.

De verschillende temperaturen en dichtheden van het plasma op verschillende dieptes zorgen ervoor dat de zon bestaat uit een gelaagde structuren.) Zelf op grote afstand van de zon heb je al het effect van de zonnwind, een stroom van geladen deeltjes die voortdurend naar buiten worden geblazen in alle richtingen weg van de zon. Deze zonnwind helpt mee aan de vorming van de magnetosfeer van planeten. De zonnwind is ook verantwoordelijk voor het verwijderen van het gas uit de zonnenevel op het einde van de planetenvorming zo'n 4,5 miljard jaar geleden.

Als we nog dichter bij de zon naderen, kom je gas tegen met een zeer lage dichtheid, dit is dan de atmosfeer van de zon. De buitenste laag van deze atmosfeer, de corona, strekt zich vele miljoenen kilometers uit boven het zichtbaar oppervlak van de zon. De temperatuur van de corona is enorm hoog, zo'n 1 miljoen K, dit verklaart waarom dit het gebied is van de zon die het meeste X-stralen uitzendt. Als we nog meer naderen naar het oppervlak van de zon, zakt de temperatuur plots tot 10000K, dit gebied noemen we de chromosfeer. Het is de middelste laag van de zonneatmosfeer, die het meeste van de zon's ultraviolet uitstraalt. Uiteindelijk komen we dan tot de diepste laag van de atmosfeer, nl. de fotosfeer, die het zichtbaar oppervlak van de zon vormt. Deze fotosfeer bestaat uit gas, met een nog kleinere dichtheid dan onze atmosfeer op aarde. Haar temperatuur bedraagt ongeveer 6000K. Hier vindt je ook de zonnevlekken terug. In deze zonnevlekken hebben we een zeer sterk magnetisch veld.

Als je nu echt in de zon zelf gaat kijken, hebben we eerst een convectiezone, waar energie gecreëerd in de kern, opwaarts stijgt, getransporteerd door stijgende hete gassen terug dalend door afkoelend gassen(convectie). Convectie is ook verantwoordelijk voor de stralende indruk, die de zon geeft van op de aarde bekeken. Ongeveer op een derde van de weg die we moeten afleggen tot aan het centrum van de zon stopt de convectie en hebben we een kalmere stralingszone, waar energie naar buiten beweegt, hoofdzakelijk in de vorm van fotonen. De temperatuur in deze zone is bijna 10 miljoen K en X-stralen zijn er meer dan een triljoen keer zo intensief als het gewoon zichtbaar licht aan het zonneoppervlak. Het diepste gedeelte van de zon is de kern, waar je de bron van de zon haar energie kan terugvinden. Kernfusie zet er nl. H-stof om in Helium. In de kern stijgt de temperatuur nog tot 15 miljoen K. De dichtheid is er meer dan 100x die van water en de druk is 200 miljard keer die van op het aardoppervlak.

Vraag 14.5 *What is the difference between nuclear fission and nuclear fusion? Which one is used in nuclear power plants? Which one does the sun use?*

Kernfissie (of kernsplitsing) is het proces waarbij een kern gesplitst wordt in twee kleinere kernen, terwijl kernfusie het proces is waarbij kernen samenkomen en 1 kern vormen met een groter aantal protonen of neutronen. Wij maken gebruik van de kernsplitsing van uranium of plutonium in onze kerncentrales. De zon daarentegen maakt gebruik van kernfusie om H-stof in helium om te zetten.

Vraag 14.6 *Why does nuclear fusion require high temperatures and pressures?*

Kernfusie kan alleen gebeuren bij extreme hoge temperaturen en druk omdat eerst de elektromagnetische krachten (afstoting tussen 2 positief geladen kernen) overwonnen moeten worden. De kernkrachten beginnen maar te werken wanneer de afstand tussen de deeltjes slechts van de grootteorde van een atoomkern is. De verschillende kernen moeten met andere woorden zeer grote snelheden hebben, die verkregen worden door de immense temperaturen in de kern. De hoge druk in de omringende lagen van de kern is noodzakelijk omdat anders het hete plasma van de zonnekern gewoon in de ruimte zou ontploffen en dus op die manier fusie uitsluiten.

Vraag 14.7 *What is the overall nuclear fusion reaction in the Sun? Briefly describe the proton-proton chain.*

H-stof bestaat uit 1 proton, terwijl He uit 2 protonen en 2 neutronen bestaat. De H-stof-fusie zet met andere woorden protonen om in He-kernen. De opeenvolgende stappen in dit proces wordt de proton-proton keten (omdat het proces begint met botsingen tussen protonen) genoemd. Op figuur 14.7. zie je mooi de verschillende stappen van dit proces voorgesteld.

- Stap 1:
Twee protonen fuseren en vormen een kern met een proton en een neutron. Dit is het isotoop van H-stof die we deuterium noemen. Een proton wordt m.a.w. omgezet in een neutron, de lading gaat dus van +2 naar +1. De verloren positieve lading wordt een positron (anti-elektron) en er wordt ook nog een neutrino gevormd. Deze stap moet zich $2\times$ voordoen in ons proces, want we hebben 4 protonen nodig.
- Stap 2:
De volgende stap doet zich voor als een deuteriumkern botst en opnieuw fuseert met een proton. Het resultaat is Helium-3, een zeldzame vorm van Helium met 2 protonen en één neutron, tezamen met een foton. Deze stap moet zich ook $2 \times$ voordoen.
- Stap 3:
De derde en laatste stap van de proton-proton-keten is het toevoegen van nog een neutron aan de helium-3 en zo helium-4 maken. Deze stap kan op verschillende manieren gebeuren, maar de meest gewone manier is door botsing van 2 helium-3 kernen. Die leveren een He-4 kern samen met twee protonen.

Als we nu alles samenvatten zien we dat in stap 1 en 2, 6 protonen nodig waren en we er 2 terugkrijgen in stap 3. 4 protonen worden dus omgezet in een He-kern. Bij deze fusie komt energie vrij in de vorm van fotonen, neutrino's en positronen. Deze energie wordt gecreëerd omdat Helium slecht 0.7% van de massa heeft van de oorspronkelijke vier protonen. Deze massa wordt omgezet in energie.

Vraag 14.8 *Does the sun's fusion rate remain steady or vary wildly? Describe the feedback process that regulates the fusion rate.*

Het fusieproces dat de zon doormaakt is zeer stabiel. De zon doet hier dienst als een soort van thermostaat. De productie van zonne-energie blijft constant omdat (de hoeveelheid) kernfusie zeer temperatuurgevoelig is. Een kleine stijging van de temperatuur in de kern zou direct veel meer fusie veroorzaken, terwijl een kleine daling het omgekeerde effect zou hebben. Elk van deze veranderingen zou het gravitationeel evenwicht veranderen zodanig dat de originele temperatuur en fusiegehalte zeer snel opnieuw dezelfde worden.

Veronderstel nu dat de temperatuur licht zou stijgen. Protonen zouden vlugger bewegen in de kern en vaker botsen. Er zou direct veel meer gefuseerd worden, met veel energie extra tot gevolg. Omdat deze energie zich zo traag doorheen de zon beweegt, zou deze energie zich opstapelen in de kern, wat op zijn beurt een toenemende druk in de kern zou veroorzaken. Deze druk zou tijdelijk de zwaartekracht overschrijden, met als gevolg dat de kern gaat uitzetten en dus afkoelt. Die afkoeling zorgt er dan voor dat het fusiegehalte daalt tot de kern opnieuw haar originele temperatuur en grootte heeft of met andere woorden tot we opnieuw hetzelfde fusiegehalte hebben. Een lichte daling van de temperatuur in de zonnecore brengt een omgekeerde reactie teweeg. Een lagere temperatuur zorgt nl. voor minder fusie, de druk vermindert en de kern trekt samen. Dit heeft als gevolg dat de temperatuur stijgt tot het fusiegehalte opnieuw normaal is en de kern opnieuw tot haar vroegere afmetingen en temperatuur brengt.

In dit proces hebben we dus gesteund op 2 soorten evenwicht: ten eerste het gravitationele evenwicht en ten tweede de energiestroom door de zon moet in balans blijven. De hoeveelheid energie die geproduceerd wordt in de kern moet nl. dezelfde zijn als de hoeveelheid energie die door iedere laag van de zon gaat. Als 1 van deze evenwichten is verstoord, zullen ze automatisch terug hersteld worden, zodat de zon 's centrale temperatuur en fusiegehalte constant blijven eveneens als de zon 's totale energievermogen of productie. (zie figuur 14.8.)

Vraag 14.9 *Why has the Sun gradually brightened with time?*

Hoewel de hierboven beschreven processen ervoor zorgen dat het fusiegehalte geen dramatische veranderingen teweegbrengt, zorgen ze er ook voor dat het fusiegehalte heel langzaam toeneemt over miljarden jaren. Dit zorgt ervoor dat de zon geleidelijk aan verhelderd. Het totaal aantal onafhankelijke deeltjes in de zonnecore vermindert lichtjes door de fusie (4 protonen worden omgezet in 1 He-kern). Dit zorgt ervoor dat de kern zeer traag inkrimpt. Om dit inkrimpen te vertragen, stijgt de temperatuur in de kern en dus ook het aantal fusies die plaatsvinden. Dit zorgt ervoor dat de druk in de kern groot genoeg blijft om tegen de zwaartekracht op te kunnen. Theoretische modellen geven aan dat de lichtkracht van de zon al 30% is toegenomen sinds haar ontstaan 4,6 miljard jaar geleden.

Vraag 14.10 *Why does the energy produced by fusion in the solar core take so long to reach the solar surface? Describe the processes by which energy generated by fusion makes its way to the sun's surface.*

De meeste energie vrijgesteld door fusie start zijn weg uit de kern naar het zonnepoppervlak onder de vorm van fotonen. Hoewel fotonen met de snelheid van het licht bewegen, volgen

zij een zigzag pad richting oppervlak, waardoor het heel lang duurt eer ze daar aankomen. Diep in het interne van de zon is het plasma zo dicht dat een foton slechts een fractie van een seconde kan reizen eer het een elektron tegenkomt en ermee interageert. Telkens het foton botst met een elektron wordt het weggekaatst in een nieuwe richting. Het foton botst dus van het ene naar het andere elektron en krijgt zo een 'random walk' en kan maar beetje bij beetje uitwaarts bewegen. Deze trage migratie van fotonen noemt men radiatieve(stralings)diffusie. (radiatief: verwijst naar radiatie, straling, diffusie=uitspreiding.) De energie vrijgesteld in de kern door fusie beweegt dus door de radiatiezone via deze willekeurige banen. Eens aan de top van de radiatiezone, waar de temperatuur gezakt is tot ong 2 miljoen K, zal het zonneplasma de fotonen regelmatig absorberen. De absorptie zorgt voor de nodige condities voor convectie en bakent op deze manier het begin van de convectiezone af. In de convectiezone gebeurt convectie doordat het gas dichter is dan koeler gas. Een hete bubbel van zonneplasma stijgt door het koeler plasma erboven. Ondertussen zal koeler plasma van bovenuit rond de stijgende bubbels naar lagere lagen glijden. Het stijgen van het plasma en tegelijkertijd dalen van koeler plasma vormt een cyclus die energie transporteert van de basis van de convectiezone naar het zonnepoppervlak toe, naar de fotosfeer dus. Daar is de dichtheid van het gas zo laag dat de fotonen kunnen ontsnappen naar de ruimte. De energie honderduizenden jaren eerder geproduceerd in de kern door fusie verschijnt dus uiteindelijk aan het oppervlak al thermische straling, komende uit het 5800 K gas van de fotosfeer. Eens in de ruimte bewegen de fotonen weg met de snelheid van het licht en laten zo en planeten in zonlicht baden.

Vraag 14.11 *Explain how mathematical models allow us to predict conditions inside the sun. How can we be confident that the models are on the right track?*

Mathematische modellen maken gebruik van de wetten van de fysica om de interne condities van de zon te voorspellen. Een basismodel gebruikt de geobserveerde compositie en massa van de zon als gegevens voor een vergelijking, die het gravitationele evenwicht, de zonnethermostaat, en de graad waarmee de zonne-energie beweegt van de kern naar het oppervlak, beschrijft. Met behulp van de computer kunnen we dan de graad van nucleaire fusie, temperatuur, druk en dichtheid voorspellen, door gebruik te maken van de berekeningen met de vergelijking en de kennis omtrent nucleaire fusie verzameld in labo's. Als een model een goede beschrijving vormt van de werkelijkheid, dan zal het correct de straal, oppervlaktetemperatuur, lichtkracht, leeftijd en andere observeerbare eigenschappen, beschrijven.

Vraag 14.12 *What are neutrinos? What was the solar neutrino problem, and why do we think it has now been solved?*

Een neutrino is een subatomair deeltje met heel kleine massa geproduceerd bij kernfusie. Neutrino's bewegen met een snelheid die de snelheid van het licht benadert en bereiken ons enkele minuten na geproduceerd te zijn in de fusiereactie in de kern van de zon. Neutrino's reageren heel zelden met iets. Het is dus moeilijk om neutrino's te tellen. Heel soms echter reageren ze toch met materie en wordt het mogelijk om ze te detecteren. Neutrino detectors worden heel diep onder de grond opgesteld om het onderscheid te kunnen maken tussen neutrino's en andere deeltjes geproduceerd bij reacties tussen andere deeltjes. Alleen neutrino's kunnen namelijk zonder problemen door de grondlagen. Bij het Homestake-experiment had men een tank opgesteld met daarin chlorine-bevattende

droogkuisvloeistof. Een chlorinenucleus kan in sommige gevallen een neutrino capteren, waarbij deze verandert in een nucleus van radioactief argon. Door dan te kijken hoeveel van dit radioactief argon in de tank zat kon men het aantal neutrino's tellen. Door verschillende berekeningen en modellen van kernfusie in de zon te beschouwen, verwachtte men dat van de biljoenen (trillion is toch biljoen h?) zonneneutrino's die door de tank passeerden elke seconde, gemiddeld 1 neutrino per dag zou kunnen geteld worden. Over een periode van meer dan 2 eeuwen, werd er gemiddeld echter maar om de 3 dagen 1 neutrino geïncapteerd in het chlorine. n-derde minder dus dan verwacht. Dit noemt men het zonneneutrino-probleem. We zijn er nu redelijk zeker van dat sommige neutrino's zich verbergen voor de detectoren doordat ze transformeren naar 1 van de andere 2 typen neutrino's. (Er zijn namelijk 3 soorten neutrino's: elektronen-, muon- en tauneutrino's) De gebruikte detectoren in de experimenten detecteren enkel de elektronenneutrino's en deze die getransformeerd zijn naar een ander type zijn dus niet detecteerbaar. Deze transformatie gebeurt wellicht tijdens de weg van de kern van de zon naar het oppervlak. Door nieuwe detectors te gebruiken die alle types kunnen detecteren, werd duidelijk dat het geobserveerd aantal neutrino's toch overeenkomt met wat men oorspronkelijk verwachtte van de modellen en is het neutrino-probleem dus opgelost.

Vraag 14.13 *What do we mean by solar activity? Describe some of the features of solar activity, including sunspots, solar prominences, solar flares, coronal mass ejections.*

Voordat de energie geproduceerd in kernfusie het oppervlak van de zon bereikt, stimuleert deze energie een weide variteit van fenomenen die we kunnen observeren van op aarde. Omdat deze fenomenen veranderen met de tijd spreken we over zonneweer, of zonneactiviteit.

Zonnevlekken: ze zijn koeler dan het omringende plasma. (4000K tov 5800K). Het feit dat ze zo koel blijven, wil zeggen dat iets het hetere plasma rond de zonnevlek verhindert om binnen te dringen. Dat iets zijn magnetische velden.

Als we de het spectrum van de zon bekijken onthullen de spectraallijnen dat zonnevlekken gebieden zijn met heel sterke magnetische velden. Deze magnetische velden kunnen de energieniveaus in atomen en ionen aanpassen en daardoor de bijhorende spectraallijnen aanpassen. Meer bepaald veroorzaken magnetische velden de splitsing van spectraallijnen in 2 of meer dicht bij elkaar gelegen lijnen. (= het Zeeman-effect). Wetenschappers kunnen op die manier zonnevlekken detecteren door op zoek te gaan naar gesplitste spectraallijnen in het licht van verschillende delen van het zonneoppervlak.

Als we de magnetische veldlijnen van de zon beschouwen zijn deze gedraaid en lopen in knopen door elkaar door de turbulentie van de zonneatmosfeer. Zonnevlekken komen daar voor waar deze draaiingen en knopen het sterkt zijn, waar de magnetische veldlijnen het sterkst rond elkaar gewonden zijn en uitsteken vanuit het binnenste van de zon. Deze stevige veldlijnen verhinderen convectie in de zonnevlek en houden zo het heter plasma tegen, en houden dus zo de zonnevlek koeler.

Zonne-uitsteeksel: Zonnevlekken hebben de neiging om in paren voor te komen, verbonden door een lus van magnetische veldlijnen die hoog boven het zonneoppervlak kan uitsteken. Gas van de chromosfeer en de corona wordt gevangen in deze lus en men krijgt de vorming van een zonne-uitsteeksel.

Zonnevlammen: De magnetische veldlijnen rond elkaar gewonden in zonnevlekken en zonne-uitsteeksel, kunnen heel plotselinge en dramatische veranderingen ondergaan. Ten gevolge worden kortstondige, maar intensieve stormen geproduceerd. De meest dramatische van deze stormen worden zonnevlammen genoemd. Ze ontstaan in de nabijheid van zonnevlekken. De modellen suggereren dat ze voorkomen wanneer de magnetische

veldlijnen zo gedraaid en geknoopt worden dat ze de spanning niet langer aankunnen, knappen en zich reorganiseren in een minder gedraaide configuratie. De energie die hierbij vrijkomt verwarmt het nabije plasma tot 100 miljoen K voor de volgende minuten of uren en schieten hierbij vlagen van X-stralen en snelbewegende geladen deeltjes in de ruimte.

Coronale-massa-uitwerping: Zonnevlammen en andere zonnestormen werpen soms grote hoeveelheden hoog-energetisch geladen deeltjes uit. Deze deeltjes komen uit de zon in grote bubbels: coronale-massa-uitwerpingen. Deze bubbels hebben sterke magnetische velden en kunnen de aarde bereiken in enkele dagen. Eens de aarde bereikt kan een coronale-massa-uitwerping een geomagnetische storm veroorzaken in de magnetosfeer van de aarde. Gevolgen: aurora's, storingen in radio-communicaties, elektrische stroomonderbrekingen, schade aan elektronische componenten in "orbiterende" (Nederlands woord???) satellieten.

Vraag 14.14 *Describe the appearance and temperature of the sun's photosphere. Why does the surface look mottled? How are the sunspots different from the surrounding photosphere?*

Het convecterende gas geeft de fotosfeer een gevlekt uitzicht: we zien heldere bobbel waar heet gas opstijgt van binnenin de zon en meer donkere randen rond de bobbel waar koeler gas zinkt. Elke hete bobbel blijft maar enkele minuten aan het oppervlak voor hij vervangen wordt door een nieuwe bobbel. De gemiddelde temperatuur van het gas in de fotosfeer is ongeveer 5800 K maar de convectie zorgt ervoor dat de precieze temperatuur varieert van plaats tot plaats. Zonnevlekken lijken donkerder op foto's omdat ze minder helder zijn dan de omringende fotosfeer. Ze zijn minder helder omdat ze koeler zijn.

Vraag 14.15 *How do magnetic field keep sunspots cooler than the surrounding photosphere?*

Zie hoger bij uitleg over zonnevlekken.

Vraag 14.16 *Why is the chromosphere best viewed with ultraviolet telescopes? Why is the corona best viewed with X-ray telescopes? Briefly explain how we think the chromosphere and corona are heated.*

De sterke magnetische velden van de zon dragen energie opwaarts van het borrelende oppervlak naar de chromosfeer en corona. Meer bepaald zal het stijgende en dalende gas in de convectiezone de stevig gewonden magnetische veldlijnen schudden onder het zonneoppervlak. Deze energie wordt opwaarts megedragen door de veldlijnen en in de zonneatmosfeer uitgezet als warmte. Het 10000K plasma van de chromosfeer straalt in het ultraviolet en de 1miljoen K corona is de bron van vrijwel alle X-stralen die van de zon komen. Daarom worden zij het best geobserveerd met een ultraviolet-telescoop, resp. X-straal-telescoop.

Vraag 14.17 *What is the sunspot cycle? Describe how the changes that occur during the cycle, including magnetic field reversals at each solar minimum. Are there longer-term changes that occur in solar activity?*

De zonnevlekcyclus is de cyclus waarin het gemiddeld aantal zonnevlekken op de zon gra-
 dueel stijgt of daalt.

Zonnemaximum: meeste zonnevlekken.

Zonneminimum: minste zonnevlekken.

Ook de frequentie van de zonne-uitsteeksels, -vlammen en coronale-massa-uitwerpingen
 volgen deze cyclus. Sommige zonnemaxima tellen meer zonnevlekken dan andere. De
 gemiddelde lengte van een cyclus is 11 jaar, maar dit kan variëren. Ook de plaatsten waar
 de zonnevlekken voorkomen op het zonsoppervlak variëren: zonneminimum: gemiddelde
 breedtes (30° 40°), gedurende de cyclus: steeds lagere breedtes, zonnemaximum: rond
 de zonne-evenaar. Na elke cyclus verandert het magnetische veld van de zon: magne-
 tisch zuid wordt magnetisch noord en omgekeerd. Dit weten we omdat de magnetische
 veldlijnen die een paar van zonnevlekken verbindt die langs de zelfde kan van de evenaar
 gelegen zijn alle in de zelfde richting wijzen gedurende een 11 jaar cyclus. Een complete
 magnetische zonnecyclus bedraagt dus 22 jaar, dan is het magnetisch veld ook terug het
 oorspronkelijke. Wat langere-termijn veranderingen betreft waren er bijna geen zonne-
 vlekken, dus bijna geen zonne-activiteit van 1645 tot 1715. Deze periode noemt men het
 Maunderminimum. Verder is het moeilijk om lange-termijn veranderingen te beschouwen
 omdat de data gelimiteerd zijn (slechts data sinds de uitvinding van de telescoop). Wan-
 neer er meer zonne-activiteit is zal bij een eclips de corona helderder zijn. Verder kan
 men kijken naar boomringen: bomen nemen koolstofdioxide op en bij veel zonneactiviteit
 zullen zonnewinden ervoor zorgen dat de aarde wordt afgesloten voor kosmische straling,
 die CO_2 produceert in onze atmosfeer. Hieruit kunnen we de zonneactiviteit schatten.
 Theoretische modellen voorspellen dat over een heeel lange periode de zonneactiviteit
 zal verminderen. Wanneer de zon nog jong was roteerde ze sneller: meer activiteit.

Vraag 14.18 *Describe the leading model explaining the sunspot cycle. Does the sunspot
 cycle influence Earth's climate? Explain.*

Het leidende model verbindt de zonnevlekcyclus met de combinatie van convectie en de
 manier waarop de zonnerotatie varieert over de verschillende breedtes. Convectie dregt
 zwakke magnetische velden en versterkt ze wanneer ze stijgen. De rotatie van de zon (snel-
 ler aan de evenaar) strekt en vormt deze magnetische velden. Aan de evenaar cirkelen de
 lijnen elke 25 dagen rond de zon, aan de polen lopen ze achter. De lijnen zullen daarom
 meer en meer rond de zon gewonden worden en zo krijgt men verwrongen veldlijnen die
 zonnevlekken en zonneactiviteit veroorzaken. (zie fig. 14.24)

Hoewel de veranderingen gedurende de zonnevlekcyclus, zal de totale energie geprodu-
 ceerd door de zon amper veranderen. De ultraviolet en X-stralen output zal echter veel
 meer veranderen. Sommige data suggereert een verband tussen deze verandering en ons
 klimaat, maar echte bewijzen zijn er niet. Sommige wetenschappers beweren dat sommige
 weerfenomenen zoals frequentie van stormen ook gekoppeld is aan de 11 of 22 jaarscyclus.
 Opnieuw zijn de bewijzen zwak.

Hoofdstuk 15

Surveying the Stars

Vraag 15.1 *How is a star's apparent brightness related to its luminosity? Explain by describing the inverse square law for light.*

- *Luminosity*: de lichtkracht of het vermogen = de hoeveelheid energie die een ster per seconde uitzendt. (W of lm)
- *Apparent brightness*: schijnbare helderheid of stralingsflux = vermogen per oppervlakte-eenheid bij de waarnemer. (Wm^{-2} of lx of m_V)

Indien wij ons op een afstand r van het object bevinden, dan kunnen we de lichtkracht van het object bepalen door de ontvangen flux over het totale oppervlak te integreren, i.e. een boloppervlak rond het object met straal r . Omdat de oppervlakte van een boloppervlak gelijk is aan $4\pi r^2$ vinden we

$$L = 4\pi r^2 f$$

zodat volgende wet geldt

De stralingsflux die wordt ontvangen van een object is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot het object.

Vraag 15.2 *Briefly explain how we use stellar parallax to determine a star's distance. Once we know a star's distance, how can we determine its luminosity?*

Omdat de aarde om de zon (bij benadering) een cirkel beschrijft met straal 1AE zien we op verschillende tijdstippen de hemel vanuit verschillende standpunten. Als we de sterren die ver van ons staan als vast onderstellen dan bewegen de sterren die dicht bij ons staan over deze vaste achtergrond. Het maximale verschil dat we kunnen waarnemen gebeurt bij twee diametraal tegenovergestelde aardstanden. De hoekverschuiving die we waarnemen is 2 maal de parallax. Deze hoek α is dezelfde als de hoek zon ster aarde, zodat

$$\tan(\alpha^{(")}) = \frac{1}{d^{(\text{pc})}}$$

met d de afstand zon ster. Maar omdat α klein is, is $\tan(\alpha) \approx \alpha$ zodat

$$d^{(\text{pc})} = \frac{1}{\alpha^{(")}}.$$

We kunnen de schijnbare helderheid van een ster bepalen en met de paralax de afstand tot een ster zodat we met de “*inverse square law for light*” de lichtkracht van die ster kunnen bepalen.

Vraag 15.3 *What do we mean by a star’s apparent and absolute magnitudes? How are they related to apparent brightness and luminosity?*

Vroeger gaf men de helderste sterren eerste magnetude en de zwakste die nog zichtbaar zijn zonder hulpmiddelen zesde magnetude. Deze magnetudes noemen we schijnbare magnetudes (m). Nu weten we dat er een verband bestaat tussen de helderheid lichtkracht en afstand van/tot een ster. Een vermeerdering van 5 op de magnetudeschaal komt overeen met een factor 100 in vermogen of met andere woorden per eenheid verschil op de magnetudesschaal komt overeen met een energieverval met factor $\sqrt[5]{100} \approx 2.512$. We definiëren de absolute magnetude M van een ster als de schijnbare magnetude die deze zou hebben indien zij op een afstand van 10pc stond. Wegens de “*inverse square law for light*” hebben we dan volgende relatie

$$m - M = 5 \log d - 5.$$

Vraag 15.4 *What do we mean by a star’s spectral type? How is a star’s spectral type related to its surface temperature and color? Which stars are hottest and coolest in the spectral sequence OBAFGKM?*

We kunnen de temperatuur van een ster op twee manieren meten. De kleur geeft ons een indicatie over de hoeveelheid warmtestraling deze uitzendt. Warmere sterren hebben een blauwe kleur, koudere rooder. Een andere manier om de oppervlaktetemperatuur te bepalen is door de te kijken naar het spectrum van die ster. Warme sterren moeten meer geïoniseerde elementen bevatten dan koudere, zodat men uit het spectrum van de ster de temperatuur kan bepalen. Elke ster krijgt aldus een type: de warmste O de koudste M in de serie OBAFGKM.

Vraag 15.5 *How was the spectral sequence discovered? Describe the roles of the most prominent scientist in the early history of stellar astronomy.¹*

Vroeger bepaalde men de types van sterren a.d.h.v de duidelijkheid van de waterstoffijnen die erin voorkwamen. Dit werd voor het eerst gedaan door Williamina Fleming. Annie Jump Cannon vond een natuurlijke volgorde in dit systeem en elimineerde overlappende klassen. Deze volgorde was OBAFGKM. Het antwoord op de vraag waarom het deze volgorde was werd gevonden door Cecilia Payne-Gaposchkin. (Omdat sterren voornamijk bestaan uit H en He en de oppervlaktetemperatuur voornamelijk bepaald wordt door de sterkte van deze lijnen.)

Vraag 15.6 *What are the three basic types of binary star systems? Why are eclipsing binaries so important to measuring masses of stars?*

- visual binary: paar sterren dat we daadwerkelijk door een telescoop kunnen zien. Vaak wordt de tweede ster van zo’n stelsel veel later ontdekt dan de eerste door veranderingen van de positie van de eerste (en tevens de helderste) ster.

¹Dit is geschiedenis, geen sterrenkunde. Maar naar de sterren kijken is kijken in het verleden. Dus toch?

- eclipsing binary: binair systeem dat we enkel kunnen opmerken door het feit dat wanneer de ene ster niet over de andere schuift, de helderheid die we zien gelijk is aan de som van de helderheden van beide sterren. Wanneer de ene ster voor de andere schuift, wordt een vermindering van de helderheid opgemerkt (de ene ster blokkeert licht van de andere).
- spectroscopisch binair: Als de ene ster roteert om de andere, ‘zien’ we periodische bewegingen naar ons toe en van ons weg. Deze bewegingen zijn te observeren door veranderingen in het spectrum (redshift en blueshift).

Snelheden van sterren zijn vaak moeilijk te bepalen omdat we niet weten onder welke hoek het bewegingsvlak van de sterren ligt. Dit weten we enkel bij eclipsing binaries. Het bewegingsvlak ligt hier in de richting van onze kijkrichting. We kunnen hierbij de stralen berekenen door de eclipsen te timen.

Vraag 15.7 *Draw a sketch of a basic Hertzsprung-Russell diagram. Label the main sequence, giants, supergiants and white dwarfs. Where on the diagram do we find stars that are cool and dim? Cool and luminous? Hot and dim? Hot and luminous?*

Zie figuur 15.10

Vraag 15.8 *What do we mean by a star’s luminosity class? What does the luminosity class tell us about the star? Briefly explain how we classify stars by spectral type and luminosity class.*

Dit zijn klassen die ons iets vertellen over de helderheid. (zie tabel 15.2). Het vertelt ons tevens iets over de straal van een ster. Vb.: type I zijn de superreuzen. Deze zijn het helderste en hebben de grootste straal.

De verdeling volgens ‘spectral type’ gebeurt met de code OBAFGKM. Deze verdeling gebeurt van blauw en heet naar rood en koud.

Vraag 15.9 *What is the defining characteristic of a main sequence star? Briefly explain why massive main-sequence stars are more luminous and have hotter surfaces than less massive main-sequence stars.*

Alle sterren op de hoofdreeks fuseren Waterstof in Helium, maar ze verschillen sterk in oppervlaktetemperatuur omdat de snelheid waarmee waterstof gefuseerd wordt sterk afhankelijk is van de massa van de ster. Een groter gewicht betekent dat de ster meer H moet fuseren om de sterke gravitatiekrachten te compenseren. Heldere sterren hebben uiteraard een hoge oppervlaktetemperatuur. Zwaardere sterren zijn helderder door de snellere fusie.

Vraag 15.10 *Which stars have long lifetimes: massive stars or less massive stars? Explain why.*

De minder massieve sterren leven langer. Dit komt omdat grotere en dus helderdere sterren veel sneller hun brandstof (H) verbruiken. Ook al zijn de sterren groter, toch doen ze dit teniet door de enorme snelheid waarmee H gefuseerd wordt, zodat ze uiteindelijk korter leven dan kleine sterren.

Vraag 15.11 *Why is a star's birth mass its most fundamental property?*

De massa van een ster bepaalt de oppervlaktetemperatuur en de intensiteit van deze ster gedurende dat deel van haar leven **op de hoofdreeks**.

- intensiteit: het gewicht van de bovenliggende lagen van de ster bepaalt de snelheid van de nucleaire fusie in de kern: hoe meer gewicht, hoe meer gravitationele druk de bovenste lagen op de kern uitoefenen, hoe hoger de snelheid van de nucleaire fusie moet worden opdat de ster niet inploft, waardoor de intensiteit toeneemt ($L \sim M^{3.5}$).
- oppervlaktetemperatuur: een heel heldere ster is ofwel heel groot of heeft een hoge oppervlaktetemperatuur, of een combinatie van beide ($L \sim R^2 T_e^4$, dus een heel heldere ster die niet zo zwaar is moet een heel hoge oppervlaktetemperatuur hebben, want $R \sim M$).

Vraag 15.12 *How do giants and supergiants differ from main-sequence stars? What are white dwarfs?*

Voor deze sterren is er geen lineaire relatie tussen de magnitude (\sim logaritme van de intensiteit) en de logaritme van de oppervlaktetemperatuur.

Reuzen en **superreuzen** zijn sterren waarvan de brandstof (waterstof) voor kernfusie bijna uitgeput is. Bijgevolg vermindert de druk die de kern uitoefent op de buitenste lagen van de ster, waardoor ze dreigt in te ploffen. Daarom probeert ze nog zoveel mogelijk energie te verliezen door straling, waardoor ze uitzet tot een enorme grootte. Daarom zijn reuzen en superreuzen zo helder en groot.

Uiteindelijk is alle brandstof van de reus of superreus op. De ster blaast haar buitenste lagen weg, en er blijft enkel een "dode" kern over, waarin alle nucleaire fusie gestopt is. Dit overblijfsel is een **witte dwerg**. Witte dwergen zijn heet (dus links in het H-R diagram) omdat het in essentie ontblootte kernen van sterren zijn, maar niet zo helder (dus onderaan in het H-R diagram) omdat ze geen energiebron hebben en enkel hun overblijvende hitte de ruimte in kunnen stralen.

Vraag 15.13 *How does the luminosity of a pulsating variable star change with time?*

Een variërende ster (variable star) is een ster die van tijd tot tijd significant in helderheid varieert. Sommige variërende sterren kunnen geen evenwicht bereiken tussen de energie die opwelt uit hun kern en de energie die weggestraald wordt van het oppervlak. Zo'n ster is een pulserende variërende ster, deze zet afwisselend uit en krimpt dan weer in, waardoor de helderheid afwisselend groter en kleiner wordt.

Vraag 15.14 *Describe in general terms how open clusters and globular clusters differ in their numbers of stars, ages and locations in the galaxy.*

Open clusters zijn te vinden in de vlakke schijf van het melkwegstelsel. Open clusters zijn meestal jong (de oudste zijn 5 miljard jaar) en bevatten enkele duizenden sterren. Bolvormige clusters bevinden zich onder en boven de galaxieschijf en zijn altijd vrij oud (rond de 10-13 miljard jaar). Bolvormige sterhopen bevatten meer dan een miljoen sterren.

Vraag 15.15 *Explain why H-R diagrams look different for star clusters of different ages. How does the location of the main sequence turnoff point tell us the age of the star clusters?*

Zie bevoorbeeld fig. 15.17 p. 519. In dit H-R diagram staan er geen sterren van spectraalklasse O op de hoofdreeks. Dit betekent dat de cluster al zo oud is dat alle O-sterren al verdwenen zijn. Gezien de sterren langer leven hoe verder we afdalen langs de hoofdreeks, zullen de sterren bovenaan de hoofdreeks eerst verdwijnen, en hoe verder we gaan in tijd, hoe meer sterren (van boven naar beneden) de hoofdreeks verlaten.

Het main-sequence turnoff point is het punt op het H-R diagram van een cluster waar de hoofd-

reeks van de cluster afwijkt van de "gewone" hoofdreeks. De leeftijd van de cluster is gelijk aan de leeftijd van de sterren op het main-sequence turnoff point van deze cluster.

Hoofdstuk 16

Star Birth

Vraag 16.1 *What is the interstellar medium? What is its chemical composition and how do we measure it?*

Het interstellair medium zijn de gassen en het stof die de ruimte tussen sterren in een galaxie opvullen. De gassen tussen deze sterren zijn hoofdzakelijk samengesteld uit H-stof en Helium. De oorzaak hiervan ligt bij de oorsprong van het universum, maar sindsdien hebben sterren een kleine fractie van deze oorspronkelijke elementen omgezet in zwaardere elementen. De meest handige manier om de chemische samenstelling van het interstellair medium te weten te komen is als volgt. We observeren het spectrum van een ster die zich achter een gaswolk bevindt en meten de absorptielijnen die de gaswolk achterlaat in het spectrum van de ster. De golflengten van die lijnen vertellen ons welke chemische elementen aanwezig zijn in de wolk. Als we nu de hoeveelheid licht vergelijken die geabsorbeerd wordt door de verschillende elementen, kunnen we de relatieve hoeveelheden van elk element in de wolk bepalen.

Vraag 16.2 *What is a molecular cloud? How does a molecular cloud's temperature and density compare with the rest of the interstellar medium?*

Sterren worden geboren in moleculaire wolken. Moleculaire wolken zijn interstellaire wolken die koud zijn en een hoge dichtheid hebben. Ze worden zo genoemd omdat ze dicht genoeg zijn zodat atomen zich kunnen binden tot moleculen. De temperatuur van zo'n wolk is ongeveer 10-30 K en de dichtheid is ongeveer 300 moleculen per kubieke cm. Dit is tamelijk hoog voor interstellaire normen, hoewel het nog altijd ongelofelijk veel minder dicht is dan lucht bij ons op zeeniveau (triljoen keer). Deze dichtheid is echter wel een gemiddelde; er zijn zeker hogedrukgebieden die honderden keren dichter zijn dan dit gemiddelde.

Vraag 16.3 *What is interstellar dust? How does it interact with visible light? What are the consequences for our view of the heavens and how is that view different in infrared light?*

Vaste korrels van interstellair stof is de plaats waar atomen van zwaardere elementen dan helium terug te vinden zijn. Interstellair stof maakt ongeveer 1% uit van de totale massa van een gaswolk. Deze stofkorrels zijn microscopisch klein, minder dan 1 micrometer

diameter. Ondanks hun grootte, zijn er zoveel van deze stofkorrels, dat ze een groot effect hebben op hoe licht zich door een moleculaire wolk beweegt (zie figuur 16.5). De stofkorrels verspreiden of absorberen ongeveer al het zichtbaar licht dan in de moleculaire wolk terechtkomt en zorgen er zo voor dat wij sterren niet kunnen zien achter zo'n wolk. Sterren aan de rand van een moleculaire wolk lijken ook roder dan gelijkaardige sterren buiten de wolk, een verschijnsel dat interstellaire verroding genoemd wordt. Stofkorrels blokkeren namelijk fotonen met kortere golflengten (blauw) gemakkelijker dan fotonen met langere golflengten (rood). Hierdoor zien sterren er roder uit dan ze in werkelijkheid zijn. Als we nu echter in het infrarood (of nog langere golflengten) kijken, kunnen we wel door een gaswolk kijken. We kunnen dus op deze manier sterren bestuderen die op veel grotere afstand gelegen zijn en nog belangrijker zelf, we kunnen nieuwe sterren ontdekken die zich in zo'n moleculaire wolk bevinden.

Vraag 16.4 *What features of molecular clouds make the conditions favourable for star formation?*

De reden waarom sterren geboren worden in moleculaire wolken is eenvoudig: gravitatiewerking zorgt ervoor dat de wolk samentrekt, en deze samentrekking duurt voort tot een centraal object heet genoeg komt om aan fusie te kunnen doen in zijn kern. Op dit moment is een ster geboren. Overal, uitgezonderd in moleculaire wolken, is de gravitatiekracht niet sterk genoeg om de interne druk van interstellair gas te overwinnen. Alleen daar kan gravitatie de strijd tegen druk winnen en de vorming van sterren kan beginnen.

Vraag 16.5 *What happens to the thermal energy released into molecular clouds as gravity makes them contract? Why doesn't it build up and stop star formation?*

Wanneer een wolk samentrekt, wordt de gravitationele potentiële energie omgezet in thermische energie. Als de wolk deze thermische energie niet kan uitzenden, wordt deze opgestapeld waardoor de temperatuur en dus ook de thermische druk stijgt. De ster kan dus niet gevormd worden. Dit treedt dus niet op. Er ontstaan botsingen tussen moleculen zodat de thermische energie omgezet wordt in fotonen. Zolang deze gevormde fotonen de wolk kunnen verlaten, zal de temperatuur van de wolk vrij laag blijven. Op die manier zal de gravitatie het halen van de druk, zodat de koelere delen van de wolk kunnen samentrekken en bijgevolg een ster vormen.

Vraag 16.6 *Why do stars tend to form in clusters? Describe the process by which a single cloud gives birth to an entire cluster of stars.*

Sterren worden geboren in clusters, gedeeltelijk omdat de gravitatie moeite heeft de thermische druk te overwinnen. In het algemeen is de massa van een moleculaire wolk zeker groter dan $100 \times$ de massa van de zon, wt de minimummassa is opdat de gravitatie de thermische druk zou overwinnen. Maar verschillende delen van de wolk bewegen in verschillende richtingen met snelheden waardoor de wolk zou "scheuren" zonder de werking van de gravitatie. Sterren kunnen dus gevormd worden als de gravitatie deze turbulente beweging overwint. Daarvoor kan het zijn dat er veel meer massa nodig is dan 100 keer de massa van de zon. Een tweede probleem heeft te maken met magnetische velden door dergelijke wolk. Geladen deeltjes bewegen spiraalsgewijs langs de veldlijnen, terwijl

neutrale elementen naar de binnenkant van de wolk willen trekken, maar hierbij tegengehouden worden door de veldlijnen (zie fig. 16.8 blz. 534). Afhankelijk van de sterkte van het magnetische veld, zal dit de gravitatie afremmen of zelfs stoppen.

De reden is de strijd tussen gravitatie en druk. Gravitatie neemt toe naarmate de wolk krimpt. Zolang de fotonen de gravitationele potentiële energie van binnen naar buiten kunnen transporteren (zodat de interne temperatuur en thermische druk laag blijven), zal de gravitatie het halen van de druk. Dit impliceert dat er minder massa zal nodig zijn om de gravitatie te laten winnen. Moleculaire wolken bevatten kleine, dicht clumps¹ in een samentrekkende wolk, die elk op hun eigen zullen beginnen krimpen. Elk van deze delen zal een sterrenstelsel worden en zal dus 1 of meerdere sterren bevatten.

Vraag 16.7 *Under what conditions can a small molecular cloud give birth to a single star?*

Gravitatie kan de druk overwinnen indien de temperatuur ongeveer 10K bedraagt en er enkele tienduizenden moleculen per kubieke centimeter aanwezig zijn, ook al is de massa veel lager dan 100 keer de massa van de zon. Kleine, geïsoleerde moleculaire wolken die hieraan voldoen, vormen dan een geïsoleerde ster.

Vraag 16.8 *Why do we think the very first stars were much more massive than the Sun?*

De eerste generatie sterren kunnen niet op dezelfde manier gevormd worden als nu het geval is aangezien hun geboortewolken geen CO² konden bevatten (want die elementen zijn te zwaar om in de eerste wolken voor te komen) die de thermische energie konden wegstralen. De emissielijnen van H-moleculen konden de wolk koel houden tot een temperatuur van 100K, want dit is de minimumtemperatuur voor emissielijnen van H-moleculen. Dit is dus veel warmer dan 10-30K waardoor de gravitatie het dus veel moeilijker heeft de druk te overwinnen en er dus sterren worden geboren die een massa hadden van minstens 30 keer de massa van de zon.

¹Wat is dit in het Nederlands? Een deelwolk of zoiets ...

²Dit is toch carbon monoxide hé?

Hoofdstuk 17

Star Stuff

Vraag 17.1 *Why is mass so important to a star's life? How and why do we divide stars into groups by mass?*

- Sterren van de hoofdreeks met grotere massa's hebben een grotere helderheid dan diegenen met kleinere massa's, zodat hun kernen fusie energie vrijgeven op een veel hoger tempo. De gravitatiekracht is veel sterker in sterren met grotere massa's dus moet de druk in deze sterren ook groter zijn. Om deze druk te leveren, moeten de kernen heter en dener zijn. Door de hoge fusie tempo branden ze hun waterstof gas vlugger op dan lichtere sterren. Daarom zijn sterren met grote massa's helderder en hebben ze een kortere hoofdreeks levensduur.
- De massa van een ster bepaald wat er gebeurt wanneer de ster zijn voorraad van waterstof in de kern opraakt. Dan stopt de fusie en de kern kan niet langer weerstand bieden tegen de zwaartekracht. De kern trekt samen en de massa bepaald of het heet genoeg wordt om helium te beginnen fuseren.
- Ook zijn uiteindelijke lot hangt af van zijn massa: sterren met relatief kleine massa's (zoals de zon) eindigen als witte dwergen, sterren met grote massa's eindigen als neutron ster of zwarte gaten.
- 1. Lage-massa sterren zijn geboren met minder dan twee zonnemassa's.
 2. Intermediaire-massa sterren hebben geboorte-massa's van 2 tot 8 zonnemassa's.
 3. Hoge-massa sterren zijn geboren met een massa groter dan 8 zonnemassa's.
- De levensfasen van intermediaire-massa sterren zijn gelijkaardig aan de fasen van de hoge-massa sterren tot de eindes van hun leven.

Vraag 17.2 *What do all low-mass stars share in common? Why do they differ in their levels of surface activity? What are flare stars?*

- Lage-massa sterren genereren energie en schijnen gestadig op dezelfde manier als de Zon. Hun interne structuur is gelijkaardig aan die van de Zon, met een paar verschillen in de manier waarop energie van de kern naar het oppervlak reist. De energie doet er net als in de Zon honderdduizenden jaren over om de oppervlakte te bereiken. De energie beweegt naar buiten door een combinatie van radiatieve

diffusie (door willekeurige botsingen van fotonen van n elektron naar een ander) en convection. In een ster gelijk de Zon, zorgen de hoge temperaturen ervoor dat de radiatieve diffusie de energie kan wegvoeren op een zelfde tempo als het in de kern geproduceerd wordt. Convection gebeurt in de buitense lagen van de Zon, waar de koelere temperaturen het moeilijker maken voor fotonen om energie te transporteren. De diepte van de convection zone van de ster hangt af van zijn interne temperatuur en dus van zijn massa. In de zon is de grens tussen radiatieve diffusie en convection op ongeveer 70 % van de weg van de kern naar het oppervlak. Minder massieve sterren zijn koeler intern en hebben diepere convection zones, bij de minst massieve sterren soms totaan de kern. Hogere-massa-sterren zijn intern heter en hebben ondiepere convection zones, de meest massieve sterren hebben helemaal geen convection zone aan het oppervlak. Hoge massa sterren kunnen daarentegen wel convection hebben die energie van de kern wegvoert, omdat radiatieve diffusie het hoge tempo van de energieproductie niet kunnen bijhouden, maar radiatieve diffusie neemt het over van convection voor de rest van de weg.

- Convection speelt een belangrijke rol in het bepalen ofdat een ster een gelijkaardige activiteit heeft als de zonnevlek cyclus op de Zon. De Zons activiteit komt van het verwringen en uitrekken van zijn magnetische veldlijnen door convection en rotatie. De meest actieve sterren zijn zeer-lage-massa sterren: zij hebben een snelle rotatie en een diepe convectionzone. Wanneer de verwrongen veldlijnen plotseling breken en hervormen komt er energie vrij van het magnetisch veld met als resultaat een gigantische vlam („flare”).
- Buiten flares en andere zonne-activiteit, gebeurt er weinig in de levensloop van de lage-massa sterren zolang waterstof fusie verder gaat. Gedurende die tijd stijgt de helderheid van de ster geleidelijk: fusie vermindert het aantal onafhankelijke deeltjes in de kern van vier (protonen) naar n (heliumkern). De kern krimpt en warmt op om de druk in balans te houden met de zwaartekracht. Deze lichte stijging in kern temperatuur verhoogt het tempo van de fusie en daarmee de helderheid.

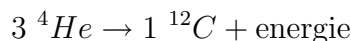
Vraag 17.3 *When a star exhausts its core hydrogen fuel, the core contracts but the star as a whole expands. Why?*

- Wanneer de fusie stopt is er geen energie meer om de druk te onderhouden en krimpt de kern door de gravitatie. De buitenste lagen expanderen. Op het H-R diagram zal hij bijna horizontaal naar rechts gaan terwijl hij groter wordt, en een **subgiant** vormen. De expansie van de buitenste lagen gaat verder en de helderheid stijgt enorm. Binnen ongeveer een miljard jaar zal de ster groeien in grootte en helderheid en een **rode reus** (red giant) vormen, met een straal die tot 100 keer groter is en helderheid die tot 1000 keer groter is.
- Na dat de waterstof van de kern opgebruikt is, bestaat de kern bijna volledig uit helium (de „as” van de waterstof fusie). Het gas rondom de kern bevat wel nog waterstof (hydrogen shell). Door de zwaartekracht krimpt zowel de inerte („niet verbrandende”) helium kern als omringende waterstoflaag. Daardoor wordt de waterstoflaag heet genoeg om waterstoffusie toe te staan. Dit **hydrogen shell burning** zal door de grotere hitte zelfs aan een groter tempo gebeuren. Daarom wordt de ster helderder. Het groeit in grootte omdat het energietransport in het binnenste van de ster niet meekan met het hogere energiegeneratie tempo. Daardoor wordt de thermale energie gevangen in de ster, waardoor de thermale druk groeit die het oppervlak omhoog duwt. Maar de meeste massa blijft vervat in de kern van de ster.

- Bij de Zon reguleert de „thermostaat” het tempo van de fusie: een steiging in het tempo doet de kern groeien en koeler worden tot het tempo weer zakt. Bij de thermale energie geproduceerd door waterstof-verbrandende laag kan de onderliggende kern niet groeien. Meer zelfs: doordat er nieuw geproduceerd helium blijft toegevoegd worden, wordt de zwaartekracht zelfs groter en krimpt de kern meer en de waterstof verbrandende laag krimpt mee waardoor deze warmer en dener wordt en het fusietempo verhoogt.
- Het groeiende fusietempo doet de buitenste lagen steeds verder en verder buitenwaarts duwen, tot de temperatuur van de inerte heliumkern ongeveer 100 miljoen Kelvin bedraagt. Op dat moment kunnen heliumkernen beginnen te fuseren. Ondertussen heeft de groeiende straal van de ster de zwaartekracht op zijn oppervlak vermindert, waardoor grote delen van de massa kunnen ontsnappen in **stellar wind**.
- De tijd om in een rode reus te veranderen is afhankelijk van de massa: bij massievere sterren gebeurt dit sneller (in minder dan 10 miljard jaar) dan bij minder massievere sterren (veel lage-massa sterren hebben zo'n lange levensduur dat nog geen van hen de fase van rode reus bereikt heeft in het 14 miljard jaar oude universum).
- In zeer-lage-massa sterren zal de inerte helium kern nooit warm genoeg worden om helium te fuseren. Het inklappen van de kern zal dan tegengegaan worden door gedegenererde druk, en wordt er een **helium witte dwerg** gevormd.

Vraag 17.4 *What is the basic reaction of helium fusion and why does it require much higher temperatures than hydrogen fusion? Briefly explain why helium fusion in the Sun will begin with a helium flash.*

- Fusie gebeurt wanneer twee kernen (van atomen) dicht genoeg bijeen komen voor de aantrekkende sterke kracht om de elektromagnetische afstoting te overwinnen. Heliumkernen hebben twee protonen (en twee neutronen) en dus een sterkere positieve lading dan een enkele proton. De heliumkernen stoten elkaar dus sterker af, en dus gebeurt helium fusie alleen als de kernen met een veel hogere snelheid botsen dan de benodigde snelheid voor waterstoffusie. Dus heliumfusie heeft een hogere temperatuur nodig dan waterstoffusie.
- Het heliumfusie proces (**the triple-alpha reaction** zet drie heliumkernen om in n koolstof kern:



Energie komt vrij omdat de massa van de koolstof-12 kern iets minder is dan de massa van de 3 helium-4 kernen ($E = mc^2$).

- De thermale druk in de inerte helium kern is te laag om de zwaartekracht tegen te gaan. De druk die de zwaartekracht tegenwerkt is de gedegenererde druk. Deze stijgt niet als de temperatuur stijgt, waardoor bij het begin van de helium verbranding de temp van de kern rap stijgt zonder dat de kern groeit. De groeiende temp doet het tempo van helium fusie omhoog vliegen in een **helium flash**. Deze helium flash laat een enorme hoeveelheid energie los in de kern. De temp wordt op een paar seconden zo hoog dat de thermale druk weer dominant wordt, en gedegenererde druk wordt niet meer belangrijk. De thermale druk wordt sterk genoeg om de kern te laten groeien. De waterstofverbrandende laag wordt naar buiten geduwd, waardoor zijn temp en fusietempo verlaagt. Het resultaat is dat, ondanks het feit dat

er tegelijkertijd helium (door de kern) en waterstof (in de waterstofverbrandende laag) gefuseert wordt, de totale energieproductie daalt na de piek (in de fase van de rode reus). De helderheid daalt, en de buitenste lagen krimpen in na een maximum grootte tijdens de fase van de rode reus. Bij dit inkrimpen stijgt de oppervlaktetemp een beetje. Het wordt een heliumverbrandende ster.

Vraag 17.5 *Why does the H-R diagram of a globular cluster show a horizontal branch? What are the characteristics of the stars on the horizontal branch?*

Bij de heliumverbranding van de heliumkern bij sterren met een lage massa is het tempo van de reactie bij alle sterren ongeveer gelijk, vandaar dat deze sterren ook een even grote lichtkracht zullen vertonen. De massa van de buitenste lagen van de ster kan wel verschillen, deze zal afhangen van de hoeveelheid massa die bij het uitzetten van de ster weggeblazen wordt door de sterrewind. Sterren met een kleinere massa zullen een kleinere straal en hogere oppervlaktetemperatuur hebben en zullen zich dus meer in het linkse deel van het H-R-diagram bevinden. Door deze spreiding in temp en een gelijke lichtkracht krijgen we een horizontale tak in het diagram.

Vraag 17.6 *What happens to a low-mass star after it exhausts its core helium? Why can't it fuse carbon into heavier elements?*

De fusie stopt. Er is geen energieproductie meer die weerwerk kan bieden tegen de zwaartekracht. De koolstofkern krimpt, we krijgen heliumverbranding in een schil rond de koolstofkern. Door de inkrimping stijgt de temp en de fusiesnelheid. We krijgen een ster met een zeer grote lichtkracht, terwijl de buitenste lagen van de ster maar blijven uitzetten door de energie die binnenin geproduceerd wordt. Dit proces van heliumverbranding gebeurt in thermische pulsen en kan niet eeuwig blijven doorgaan. De koolstofkern die overblijft kan echter niet gefuseerd worden aangezien daarvoor een temp van 600.000.000 K vereist is en deze temp bereikt de kern nooit aangezien de gedegenererde druk de gravitationele inkrimping stopt alvorens dergelijke temp bereikt worden.

Vraag 17.7 *What are carbon stars, and how are they important to life on earth?*

Wanneer de waterstof- en heliumschilverbranding stopt, is het einde van de ster nabij. De enorme grootte van de ster zorgt ervoor dat de kern weinig grip heeft op de buitenste lagen, zodat materiaal uit de buitenste lagen van de ster wordt weggeblazen. Ondertussen hebben we tijdens iedere thermische puls van de schilverbranding een sterke convectie die koolstof vanuit het binnenste van de koolstofkern naar het oppervlak brengt. We hebben een rode reus waarvan de fotosfeer vrijwel uitsluitend uit koolstof bestaat. Dit is onze koolstofster. Deze koolstofster heeft een trage, koele sterrewind waarbij de temp afneemt naarmate deze verder verwijderd is van de koolstofkern. Bij een temp van 1000-2000 K kunnen atomen zich binden tot stofdeeltjes die zo in het heelal terechtkomen en mee aan de basis lagen van het ontstaan van het leven op aarde.

Vraag 17.8 *What is a planetary nebula? What happens to the core of a star after a planetary nebula occurs?*

Alvorens de ster volledig aan haar einde komt, zal ze door sterrewinden haar buitenste lagen de ruimte in blazen. Aangezien de kern een zeer hoge temp heeft, zendt deze voortdurend UV-straling uit. Deze straling ioniseert het gas in de buitenste lagen van de ster waardoor we een soort van gloeiende ring rond de ster krijgen. De gloeiing van de planetaire nevel neemt af naarmate meer materiaal in de ruimte verdwijnt en de temp van de kern afneemt. We krijgen een soort van dode kern die eerst nog redelijk helder en warm is, maar steeds verder naar rechtsonder in het H-R-diagram verdwijnt, naarmate de temp en lichtkracht afnemen. Er blijft een witte dwerg over. In zo'n witte dwerg is er een evenwicht tussen de gravitationele en de gedegenererde druk, zolang geen veranderingen aan het systeem worden aangebracht.

Vraag 17.9 *What will happen to Earth as the Sun changes in the future?*

Naarmate de zon ouder wordt, wordt ze helderder. Op een bepaald moment zal de aarde niet meer in staat zijn om de extra warmte te compenseren door het broeikaseffect te verminderen. Wetenschappers zijn het er nog niet helemaal over eens wanneer dit precies zal gebeuren. Sommige modellen voorspellen dat de oceanen over zowat een miljard jaar zullen beginnen verdampen, terwijl andere aangeven dat ons klimaat dan nog steeds vrij stabiel zal zijn. Wel lijkt het vast te staan dat de zon binnen 3 à 4 miljard jaar zo helder zal zijn dat het broeikaseffect op aarde even sterk zal zijn zoals nu op Venus. De temperatuur op aarde zal blijven stijgen en rond het jaar 5.000.000.000 wordt de zon een rode reus. De zon blijft groeien en helderder worden tot ze net voor de 'heliumflits' 100 keer zo groot en 1000 keer zo helder is. Het aardoppervlak is intussen heter dan 1000 K, maar het ergste moet nog komen. Wanneer de fase van heliumverbranding ten einde is, zal de zon nog een paar miljoen jaar leven. Ze zet opnieuw uit (na ietwat gekrompen te zijn na de heliumflits) en wordt vele duizenden malen helderder dan nu. Dan zullen de buitenste delen van de zon bijna tot aan de aarde reiken. Uiteindelijk zal de zon na 12.3655 miljoen jaar haar buitenste lagen uitspuwen tot een planetaire nevel, die Jupiter en Saturnus zal opslokken, en een witte dwerg worden. Van de aarde blijft dan niet veel meer over dan een koud stuk rots dat rond die witte dwerg cirkelt.

Vraag 17.10 *Summarize the stages of life that we see on the Sun's life track in Figure 17.8. Be sure to explain both the changes that occur in the Sun's core with each stage and the changes that are observable from outside the Sun.*

- de lichtkracht: Sinds haar ontstaan is de zon geleidelijk helderder geworden en ze zal dat nog zeker 5 à 6 miljard jaar geleidelijk doen, tot ze de hoofdreeks verlaat. Wanneer de H-fusie in de kern stopt trekt die samen en kan H-fusie plaatsvinden in de bovenliggende laag. De kern blijft krimpen en wordt op zeker ogenblik zo heet dat er He-fusie kan plaatsvinden. Door die fusie wordt de kern zeer heet, maar ze kan niet uitzetten door de gedegenererde elektronendruk. Het gevolg is dat de fusiesnelheid spectaculair toeneemt (en dus ook de lichtkracht van de zon) in een zogenaamde 'heliumflits'. Dan zal de zon ongeveer 1000 keer zo helder zijn als nu. De He-verbranding houdt ongeveer 100 miljoen jaar aan. Als alle He in de kern opgebrand is, zal de helderheid van de zon periodiek op en neer gaan met pieken van ongeveer $1000 * L_{zon}$ tot ze een planetaire nevel uitstoot en zelf een witte dwerg wordt. Bij het begin van dit stadium is haar lichtkracht ongeveer $100 * L_{zon}$.
- de straal: De straal van de zon neemt toe met haar lichtkracht. Als de zon een rode reus is, zal haar straal ongeveer gelijk zijn aan de huidige afstand aarde-zon.

Na de 'heliumflits' krimpt de zon om na de fase van heliumverbranding in de kern in pulsen te stijgen en te dalen (samen met de lichtkracht) tot ze een witte dwerg wordt en veel kleiner is dan nu.

Vraag 17.11 *In broad terms, explain how the life of a high-mass star differs from that of a low-mass star. How do intermediate-mass stars fit into this picture?*

Een zeer massieve ster heeft een enorme zwaartekracht. Hierdoor wordt de H-kern meer samengedrukt dan bij lichtere sterren en wordt ze dus heter. Dat zorgt er dan weer voor dat er meer H-atomen tot helium fuseren via de proton-proton keten. Omdat de kern zo heet is kunnen protonen zelfs stukken van moleculen zoals C, O of N slaan. Dit versnelt de fusie, zodat deze elementen dienst doen als katalysator.

Helium wordt in massieve sterren gevormd via de CNO-keten. Deze bestaat uit 6 stappen:

1. $C_6^{12} + H^1 \rightarrow N_7^{13} + \gamma$
2. $N_7^{13} \rightarrow C_6^{13} + e^+ + \nu_e$ via β^{-1} verval
3. $C_6^{13} + H^1 \rightarrow N_7^{14} + \gamma$
4. $N_7^{14} + H^1 \rightarrow O_8^{15} + \gamma$
5. $O_8^{15} \rightarrow N_7^{15} + e^+ + \nu_e$ via β^{-1} verval
6. $N_7^{15} + H^1 \rightarrow C_6^{12} + He_2^4$

Zoals in de proton-proton keten zijn er 4 protonen nodig om 1 He-kern te vormen. De hoge temperatuur is nodig om in de eerste stap het proton met de C-kern (die 6 protonen bevat) te doen botsen en de elektrische afstoting te overwinnen.

Net zoals in een lichte ster wordt een massieve ster een rode reus nadat de hoeveelheid H in de kern opgebruikt is. De bovenliggende schil wordt warmer en begint H te verbranden. De buitenste lagen zetten uit en de kern krimpt tot ze heet genoeg wordt om He te fuseren tot C. In sterren met een massa $> 2 * m_{zon}$ vindt geen heliumflits plaats, omdat de thermische druk hoog genoeg blijft door de extreem hoge temperaturen. De gedegeneerde elektronendruk speelt dan geen rol. De He-verbranding gaat daarom geleidelijker van start dan in een lichtere ster. Deze fase eindigt al na een paar 100.000 jaar. De inerte C-kern zal dan opnieuw samentrekken door afwezigheid van thermische druk, waardoor de druk, temperatuur en dichtheid van de kern stijgen. Er vormt zich ook hier een schil waarin He verbrand wordt en de buitenste lagen zetten opnieuw uit. Vanaf dit punt is de verdere evolutie verschillend naargelang de massa van de ster.

- middelmatige ster: $2 - 8 * m_{zon}$: De gedegeneerde elektronendruk voorkomt dat de kern heet genoeg wordt om C of O te verbranden en zo zwaardere elementen te creëren. Deze sterren stoten uiteindelijk hun buitenste lagen uit en worden een witte dwerg.
- massieve ster: $> 8 * m_{zon}$: De C-kern blijft samentrekken en wanneer ze een temperatuur van 600 miljoen K bereikt kan C gefuseerd worden tot zwaardere elementen. Op deze manier produceert de kern opnieuw energie, die de zwaartekracht tegenwerkt. Het proces van C-fusie duurt echter maar een paar 100 jaar. Daarna krimpt de kern weer tot ze voldoende heet is om nog zwaardere elementen te vormen en

hetzelfde proces herhaalt zich, maar steeds sneller. Uiteindelijk heeft de ster een soort schilstructuur. Als een nieuwe verbrandingsschil ontstaat zetten de buitenste lagen uit, om daarna bij nieuwe fusie in de kern licht samen te trekken, zodat de ster zigzagt over het H-R diagram. De ster wordt een rode superreus. In haar laatste dagen begint zich Fe op te stapelen in de kern, waarin Si verbrand wordt.

Vraag 17.12 *Describe some of the nuclear reactions that can occur in high-mass stars after they exhaust their core helium. Why does this continued nuclear burning occur in high-mass stars but not in low-mass stars?*

Als de temperatuur hoog genoeg is (enkel zo in massieve sterren), kunnen elementen die voordien door fusie geproduceerd werden, zelf fuseren om zwaardere elementen te creëren.

- $C^{12} + He^4 \rightarrow O^{16}$
- $O^{16} + He^4 \rightarrow Ne^{20}$
- $Ne^{20} + He^4 \rightarrow Mg^{24}$
- $C^{12} + O^{16} \rightarrow Si^{28}$
- $O^{16} + O^{16} \rightarrow S^{31}$
- $Si^{28} + Si^{28} \rightarrow Fe^{56}$

Vraag 17.13 *Why can't iron be fused to release energy?*

Er zijn maar 2 basisprocessen die kernenergie vrijlaten, nl. fusie van lichtere elementen in zwaardere en fissie van heel zware elementen in minder zware. De fusie van waterstof naar helium stelt energie vrij omdat (ondanks het aantal kerndeeltjes hetzelfde blijft) helium een lagere massa per kerndeeltje heeft dan waterstof. De massa per kerndeeltje neemt af als we van lichtere elementen naar ijzer gaan en hierdoor stelt de fusie dus energie vrij. Maar deze trend keert om bij ijzer: de massa per kerndeeltje neemt toe als we naar nog zwaardere elementen kijken. Bij zwaardere elementen dan ijzer kan fissie energie vrijstellen (door massa om te zetten in energie). IJzer heeft echter de laagste massa per kerndeeltje en kan dus door noch fusie, noch fissie energie vrijstellen.

Vraag 17.14 *Summarize some of the observational evidence supporting our ideas about how heavy elements form in massive stars.*

We verwachten dat sterren die meer recent gevormd zijn een grotere hoeveelheid zware elementen hebben dan sterren die eerder gevormd zijn. De spectra van sterren bevestigen dit: bij heel oude sterren maken elementen behalve waterstof en helium slechts 0.1% van de totale massa uit, bij jongere sterren bestaat ongeveer 2 tot 3% uit zwaardere elementen. Het verschil in de abundantie van de verschillende elementen in de kosmos bevestigt ook ons vermoeden dat kernen met een even aantal protonen veel talrijker aanwezig zijn dan deze met een oneven aantal protonen (omdat 'helium-capture' reacties 2 protonen toevoegen per keer).

Elementen zwaarder dan ijzer zijn zeer zeldzaam, wat ook onze ideeën bevestigt.

Vraag 17.15 *What events initiate a supernova? Explain what happens during the explosion, and why a neutron star or black hole is left behind. What observational evidence supports our understanding of supernova?*

De zwaartekracht zal de elektronen voorbij de kwantummechanische limiet duwen, hierdoor kunnen ze niet meer vrij bestaan en zullen ze combineren met protonen ter vorming van neutronen en neutrino's. De elektronendruk verdwijnt hierdoor en de zwaartekracht heeft vrij spel: de kern zal ineenkrimpen in een bal van neutronen (van slechts enkele kilometers diameter!). Deze zal uiteindelijk stoppen met krimpen door de neutronendruk. Deze gebeurtenis stelt een enorme hoeveelheid energie vrij in een fractie van een seconde die ervoor zorgt dat de buitenste lagen in de ruimte worden gedreven in een explosie die we de supernova noemen. De bal neutronen die achterblijft, noemen we een neutronenster. Soms heeft deze nog zo'n grote massa dat de zwaartekracht ook de neutronendruk overwint en de kern nog verder zal inkrimpen tot het een zwart gat wordt.

Er zijn 2 processen die mogelijks bijdragen tot deze explosie: de 'core-bounce process' en de (volgens recente modellen) shockwave door neutrino's (gevormd door de grote hoeveelheid neutrino's ondanks de zeldzaamheid van reacties met neutrino's).

Het meeste bekende voorbeeld dat onze theorie van de supernova bevestigt, is de Krabnevel, dat een 'supernova remnant' is (een expanderende wolk van overblijfselen van een supernova explosie), deze bevat een spinnende neutronenster in zijn centrum. Historische aantekeningen bevestigen ons vermoeden en stellen in ons staat om de 'supernova remnants' te dateren.

De laatste extragalactische supernova dicht genoeg om te observeren was in 1987 en gaf een unieke kans om een supernova en zijn overblijfselen te bestuderen. Er werd onder andere een uitbarsting van neutrino's waargenomen. Er zijn echter ook nog vele zaken onduidelijk, zoals gedetecteerde gasringen, het onderzoek is dan ook nog volop bezig.

Hoofdstuk 18

The Bizarre Stellar Graveyard

Vraag 18.1 *What is degeneracy pressure, and how is it important to the existence of white dwarfs and neutron stars? What is the difference between electron degeneracy and neutron degeneracy pressure?*

In een witte dwerg zijn de elektronen zo dicht op elkaar gedrukt dat er geen lage energie-niveaus meer beschikbaar zijn, waardoor de elektronen een grotere impuls moeten krijgen wegens het onzekerheidsprincipe van Heisenberg. Die impuls zorgt voor het ontstaan van een druk naar buiten waardoor de witte dwerg ondanks zijn eigen zwaartekracht niet verder kan instorten. De witte dwerg bevindt zich in een stabiele toestand: de inwaartse druk vanwege zijn zwaartekracht werkt de degenererende druk van de elektronen tegen. Elektronen in deze toestand heten ontaard.

Witte dwergen hebben de massa van een ster maar bezitten een kleine straal. Deze combinatie zorgt voor een zeer sterke aantrekkingskracht aan het oppervlak. Moest er enkel de gravitatie zijn, zou de witte dwerg samengedrukt worden tot een nog kleinere grootte.

Een neutronster(pulsar) is de bal neutronen gecreerd door het instorten van de ijzeren kern in een zware ster, een supernova. Neutronsterren zijn in essentie grote atomaire kernen (praktisch volledig gemaakt van neutronen) die door de aantrekkingskracht bij elkaar gehouden worden. Hier treedt hetzelfde principe op als bij witte dwergen, maar in dit geval spreekt men van een degenererende neutronendruk.

Vraag 18.2 *Describe the mass, size, and density of a typical white dwarf. How does the size of a white dwarf depend on its mass?*

Een ster geeft energie af door de fusie van waterstof tot helium in de kern. Na verloop van tijd raakt het waterstof in de kern steeds meer opgebrand, waardoor het fusieproces in de loop der tijd vermindert. Daardoor koelt de ster wat af en neemt de stralingsdruk in de kern af. Hierdoor trekt de kern onder invloed van zijn eigen gewicht wat meer samen waardoor de temperatuur stijgt. Deze temperatuurstijging heeft tot gevolg dat er een waterstoffusie buiten de kern op gang komt.

Een ster waar buiten de kern een fusieproces plaatsvindt, produceert meer energie dan daarvoor en zwelt enorm op. Omdat door het opzwellen de oppervlaktetemperatuur daalt, wordt de ster een rode reus. Als bvb. de zon over ongeveer 5 miljard jaar in dit stadium komt wordt zij zo groot dat de buitenste lagen tot ver voorbij de baan van de Aarde zullen reiken.

Tijdens deze fase hoopt zich steeds meer helium in de kern op, die daardoor nog meer samentrekt (want meer massa) en waardoor de dichtheid van de gedegenereerde kern steeds groter wordt. De omringende schil van waterstoffusie krimpt in waardoor deze schil warmer wordt en dus het tempo van de fusie verhoogd wordt. M.a.w. zolang als de kern inert blijft en er fusie plaatsvindt rond de kern, zal de helderheid van de rode reus gestadig toenemen. Als de kern een temperatuur bereikt van 100 miljoen Kelvin gaat het helium in de kern fuseren tot koolstof. De buitenste gaswolken drijven steeds verder weg en vormen een planetaire nevel. Deze nevel heeft een straal van enkele duizenden kilometers en een dichtheid van honderden tonnen per kubieke centimeter. De kern stort dan in tot een witte dwerg.

Dus aangezien een witte dwerg de blootgestelde kern is van een ster die aan het einde van haar levenscyclus gekomen is, vinden in de witte dwerg vinden dus geen kernreacties meer plaats.

Een doorsnee witte dwerg heeft ongeveer n zonnemassa, maar het volume is niet groter dan de aarde. Dat betekent dat het zwaartekrachtsveld aan de oppervlakte enkele honderdduizenden malen sterker is dan aan het aardoppervlak. Een witte dwerg heeft een massa vergelijkbaar met die van de zon, gecomprimeerd in een object van de grootte van de aarde. Bijgevolg heeft een witte dwerg een zeer hoge dichtheid.

Vanwege de kleine oppervlakte straalt een witte dwerg - ondanks de hoge oppervlakte-temperatuur - 100 tot 10000 maal minder licht uit dan de zon. Hoewel de witte dwergen talrijker zijn dan neutronsterren en zwarte gaten, is er daarom geen enkele die met het blote oog kan worden waargenomen. De heetste witte dwergen kunnen redelijk helder schijnen in UV-licht en in röntgenstralen (hoogenergetisch licht).

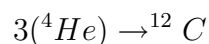
De temperatuur van een jonge witte dwerg is hoog: vele tienduizenden K, waarbij hij heel langzaam afkoelt tot een zwarte dwerg omdat er simpelweg geen brandstof meer is voor fusie in de kern. Zwarte dwergen zijn nog nooit waargenomen omdat het afkoelen 10-tallen miljarden jaren in beslag neemt (dit is langer dan de leeftijd van het heelal tot nu toe).

Men denkt dat witte dwergen bestaan uit koolstof en zuurstof (volledig geoniseerd in de vorm van een dicht plasma), met een atmosfeer van waterstof en helium.

Deze elementen zijn, toen de ster nog een “gewone” ster was, ontstaan bij het volgende fusieproces: Eerst werd waterstof omgezet in helium:



Toen het waterstof was “opgebrand”, nam de druk door de zwaartekracht toe en vond de volgende stap plaats waarbij helium fuseerde tot koolstof:



Daarna volgde een reactie waarbij zuurstof werd gevormd:



Vraag 18.3 *What happens to the electron speeds in a more massive white dwarf, and how does this behavior lead to a limit on the mass of a white dwarf? What is the white dwarf limit?*

Hoe zwaarder een witte dwerg is, hoe kleiner ze wordt doordat haar grotere aantrekking de materie kan comprimeren tot een veel grotere dichtheid. Volgens de wetten van de kwantummechanica moeten de elektronen in een witte dwerg deze compressie beantwoorden door sneller te gaan bewegen, wat de degeneratiedruk sterk genoeg maakt om weerstand te bieden tegen de toegenomen aantrekkingskracht.

Wegens het feit dat de elektronensnelheden groter zijn in zwaardere witte dwergen en de absolute snelheid begrensd is, is de maximale massa van een witte dwerg ook gelimiteerd. Theoretische berekeningen tonen aan dat de elektronensnelheden de lichtsnelheid c zouden bereiken in een witte dwerg die een massa heeft van 1,4 zonsmassa's. Aangezien c de limietsnelheid is, moet de massa kleiner zijn dan $1,4M_{\text{mborzon}}$. Dit noemt men de wittedwerglimiet of de Chandrasekhar-limiet.

Vraag 18.4 *What are accretion disks, and why do we find them only in close binary systems? Explain how the accretion disk provides a white dwarf with a new source of energy that we can detect from Earth.*

Een witte dwerg die zich in een binair systeem bevindt, kan geleidelijk massa winnen wanneer zijn vriend een ster op de hoofdlijn of een reuzenster is. Als een klomp massa overloopt van de reuzenster naar de witte dwerg, heeft het een bepaalde kleine baansnelheid. Wegens behoud van draaimoment zal het klompje sneller en sneller bewegen naarmate het dichterbij het oppervlak van de witte dwerg zal komen. De invallende materie vormt hierdoor een draaikolkachtige schijf rond de witte dwerg. Omdat het proces waarin materie op een ander hemellichaam valt, aanslibbing wordt genoemd, hebben we hier te maken met een snelroterende aanslibbingschijf.

Aanslibbingschijven vormen zich rond witte dwergen om veelal dezelfde reden als dat invallend gas protostellaire schijven rond protosterren creert. In beide gevallen bewegen gasdeeltjes in de schijf in banen die aan de wetten van Kepler voldoen zodat het gas in de binnenste delen van de schijf sneller in een baan beweegt dan het gas in de buitenste delen. Het verschil in snelheden leidt tot wrijving die baanenergie verwijderd uit de binnenste delen van de aanslibbingschijf en het verlies aan energie betekent dat het gas geleidelijk spiraalvormig inwaarts beweegt en zich eventueel op de protoster of witte dwerg installeert. De grootste verschillen tussen protostellaire schijven en de aanslibbingschijven rond witte dwergen zijn de grootte en de baansnelheid. De kleine grootte en hoge dichtheid van een witte dwerg maken zijn oppervlaktegravitatie een stuk sterker dan die van een protoster, wat betekent dat het gas in de accretieschijf rond een witte dwerg tegen veel hogere snelheden beweegt dan het gas in een protostellaire schijf. Wegens de hogere baansnelheden kan meer baanenergie omgezet worden in warmte zodat de schijf rond een witte dwerg veel heter is rond een protoster.

Aanslibbing kan een "dode" witte dwerg voorzien van een nieuwe energiebron, zolang als zijn compagnon materie blijft aanvoeren in de aanslibbingschijf. Theorie voorspelt dat de door wrijving gegenereerde warmte de accretieschijf heet genoeg zou moeten maken om optisch en ultraviolet licht en soms zelfs röntgenstralen uit te zenden. Hoewel aanslibbingschijven rond witte dwergen veel te klein zijn om rechtstreeks waargenomen te worden, zouden we dus hun intens ultraviolet of X-stralen moeten kunnen detecteren. Zoektochten naar deze straling hebben sterk bewijs opgeleverd voor accretieschijven rond vele witte dwergen. In sommige gevallen kan de helderheid van deze systemen sterk variëren. Plotse toenames in helderheid (met vb. een factor 10 of meer) zouden enkele dagen kunnen aanhouden en dan terug verdwijnen. Zulke helderheidsmomenten (soms ook wel dwerg novae) ontstaan waarschijnlijk wanneer onstandvastigheden in de aanslibbingschijf veroorzaken dat een beetje materie plots op het oppervlak van de witte dwerg valt. Hierbij komt er gravitationele potentiele energie vrij.

Vraag 18.5 *What's a nova? Describe the process that creates a nova, and what a nova looks like.*

Een witte dwerg is dood, maar de situatie verandert voor een aanslibbende witte dwerg. Er komt gas van bovenste lagen van de compagnon ster, dus vooral H. De sterke gravitatie van de witte dwerg comprimeert dit gas in een dunne opp.laag, die steeds groter wordt in massa omdat er meer en meer materiaal van de aanslibbingschijf op neerregent. Druk en temp stijgen hierdoor en H-fusie begint te werken in de laag wanneer de temp hoger wordt dan 10 miljoen K. De witte dwerg komt hierdoor weer tot leven. Deze thermonucleaire flash zorgt ervoor dat het binaire systeem begint te stralen voor enkele weken als een NOVA.

Een nova kan zo fel schijnen als 100 000 zonnen. Het genereert hitte en druk, zodat het meeste materiaal dat was aangeslibd terug wordt uitgeworpen.

Vraag 18.6 *What causes a white dwarf supernova? Observationally how do we distinguish white dwarf and massive star supernovae?*

De meeste witte dwergen bestaan grotendeels uit koolstof. Als de massa de 1.4 Msun benadert zal zijn inwendige temp zo hoog oplopen dat er koolstoffusie optreedt. Dit gebeurt doorheen de gehele ster. We kunnen dit zien als een koolstoffbom gelijkend op de heliumflash, maar hier wordt veel meer energie vrijgesteld omdat alle koolstof ineens fuseert. De witte dwerg explodeert in een witte dwerg supernova.

Zowel een massieve ster als een witte dwerg supernova schijnen helder. Het onderscheid kan gemaakt worden door hun licht te bestuderen. Spectra van witte dwerg supernovae missen waterstoflijnen, want witte dwergen bevatten heel weinig waterstof. Massieve ster supernovae hebben wel waterstoflijnen in hun spectra. De intensiteit van witte dwerg supernovae verdwijnt met de tijd, bij massieve ster supernovae gebeurt dit in 2 fases.

Vraag 18.7 *Describe mass, size, density of a typical neutron star. What could happen if a neutron came to your hometown?*

Straal = ong 10 km.

Massa = 300 000 keer massa aarde.

Heel hoge densiteit: een paperclip met densiteit van een neutron ster weegt zoveel als Mount Everest.

De stad en rest van de civilisatie zou worden verwoest door de enorme gravitatie van de neutronenster. Tegen de tijd dat het stof zou gezakt zijn zou de voormalige aarde nog zo groot zijn als een laagje slechts zo dik als je duim op het opp van de neutronster.

Vraag 18.8 *How do we know that pulsars are neutron stars? Are all neutron stars also pulsars? Explain.*

Heel regelmatige en snelle pulsen van radiogolven kwamen van sterrebeeld Cygnus. Zulke rappe radio golven zijn pulsars. Het zijn neutronensterren achtergelaten bij supernova's. De pulsaties verschijnen omdat de neutronenster heel snel rondspint als gevolg van behoud van draaimoment. Als een ijzerkern in een neutronster verandert, moet zijn rotatie stijgen zoals hij krimpt in grootte. Bij de intense magnetische velden van neutronensterren zijn de

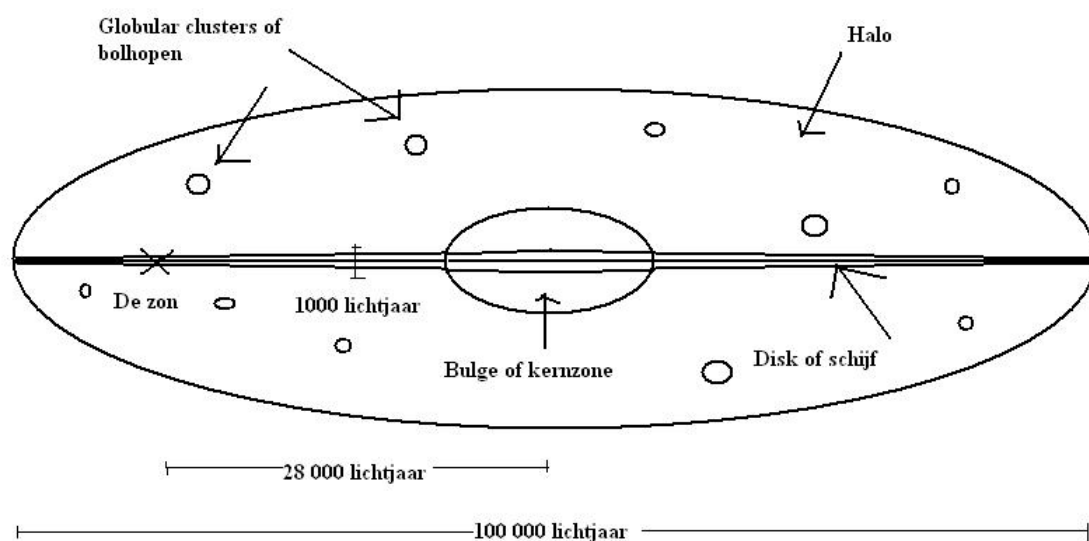
magnetische polen niet uitgelijnd met de rotatie-as, de stralingsvlagen worden daardoor rond gezwierd. We zien een vlaag licht telkens de lichtstraal de aarde passeert (zoals een vuurtoren).

Sommige spinnende neutronensterren zijn zo georiënteerd dat hun lichtstralen niet langs onze locatie gezwierd worden. Dus geldt er de regel: alle pulsars zijn neutronensterren, maar niet alle neutronensterren zijn pulsars.

Hoofdstuk 19

Our Galaxy

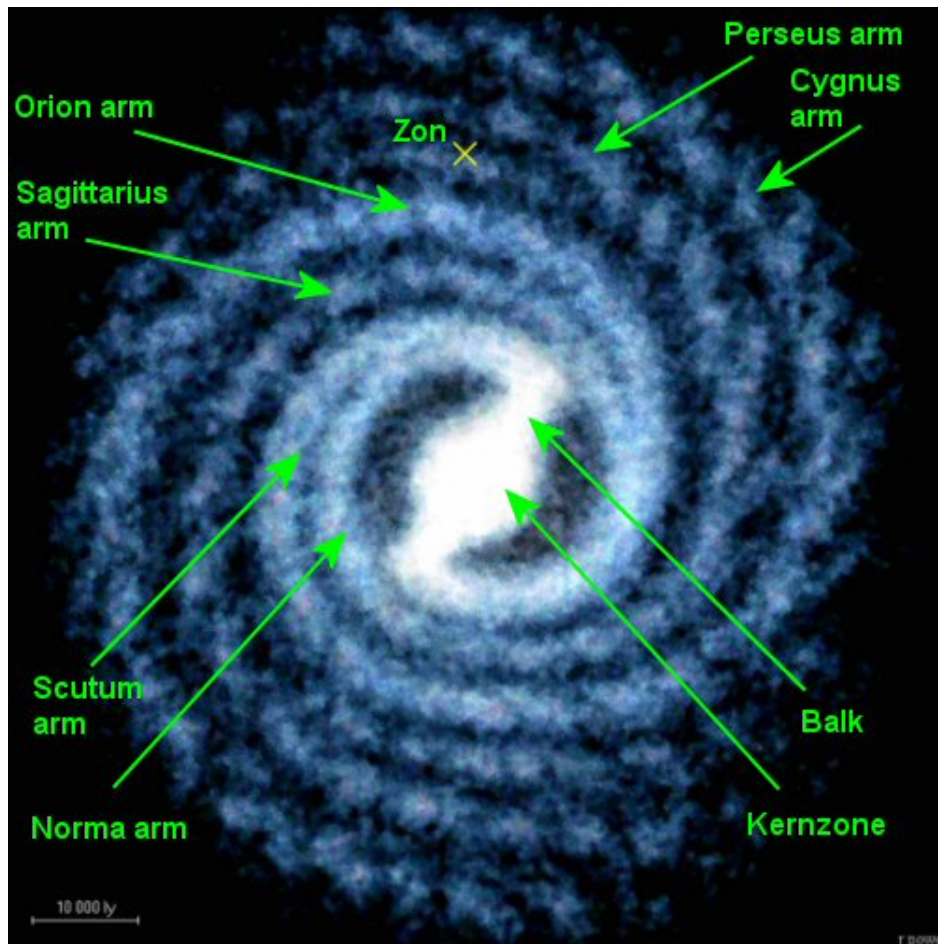
Vraag 19.1 Draw simple sketches of our galaxy as it would appear face-on and edge-on. Identify the disk, bulge, halo, and spiral arms, and indicate the galaxy's approximate dimensions.¹



Figuur 19.1: Zijaanzicht

Het Melkwegstelsel bevat ongeveer 100 miljard sterren. Het is een spiraalgalaxie, genoemd naar de spiraalarmen. Deze maken deel uit van een platte schijf van sterren rondom een heldere kernzone. De hele schijf is omringd door een minder heldere, rondere halo.

¹Voor wie wil inkleuren, zie fig. 9.1 p 593.



Figuur 19.2: Bovenaanzicht met enkele spiraalarmen benoemd

Vraag 19.2 *What are the Large and Small Magellanic Clouds, and the Sagittarius and Canis Major Dwarfs?*

De twee eerste zijn beide kleine galaxieën. Zijn zijn in een baan rond ons melkwegstelsel op een afstand van 150000 en 200000 lichtjaar. Beide zijn ze met het blote oog zichtbaar vanop de zuidelijke hemisfeer.

De beide andere kleine galaxieën liggen zelfs nog dichterbij ons melkwegstelsel. Beide zijn ze aan het samensmelten met het melkwegstelsel. De sterke getijdekrachten van het melkwegstelsel rukken ze uit elkaar. Beiden zijn ze slechts recent ontdekt (resp. 1994 en 2003), omdat het licht ervan geblokkeerd werd door stof in onze melkweg. Hoewel ze klein zijn, bevatten ze wel elk een aantal miljard sterren. Ze zijn wel honderden keren kleiner dan ons melkwegstelsel.

Vraag 19.3 *Describe the basic characteristics of stellar orbits in the bulge, disk, and halo of our galaxy.*

Sterren in de schijf draaien in ongeveer cirkelvormige banen in dezelfde richting en in bijna hetzelfde vlak. Sterren in de bulge en halo daarentegen bewegen in random richtingen (zie fig. 19.2 blz. 595).

Een ster in de schijf, niet in het centrum gelegen, maakt een op- en neerwaartse beweging én een cirkelbeweging rond het centrum. Deze laatste is een gevolg van de gravitationele

aantrekking naar het galactische centrum. Een ster dat te ver boven de schijf is, wordt door gravitatie naar de schijf toegetrokken en doordat de dichtheid in de schijf vrij laag is, “vliegt” die er gewoon door. Wanneer die weer te ver onder de schijf komt, trekt de gravitatie die weer omhoog. Dit verklaart de dikte van de schijf. Merk op dat de sterren in het centrum even rap bewegen als die aan de buitenkant, zodat de sterren in het centrum rapper een volledige orbit zullen maken dan die aan de buitenkant.

Sterren in de bulge en halo bewegen min of meer op elliptische banen, maar hun orientatie is random. Ze gaan tot zeer hoog boven de schijf en vliegen er met grote snelheid weer door, waardoor gravitatie nauwelijks effect heeft op hun traject.

Vraag 19.4 *How can we use orbital properties to learn about the mass of the galaxy? What have we learned?*

We kunnen Newton’s versie van de derde wet van Kepler gebruiken om de massa van een relatief groot object te bepalen aan de hand van de periode en afstand een veel kleiner object (hier een ster) dat rond het eerste draait.

Algemeen zegt de deze wet:

$$p^2 = \frac{4\pi^2 * r^3}{G * (M_{object} + M_{ster})},$$

waarbij p =de periode van de ster in een baan om het object en r =de straal van de baan van de ster rond het object. (We gebruiken r i.p.v. a omdat de baan cirkelvormig is.)

Omdat $M_{object} \gg M_{ster}$ mogen we stellen:

$$p^2 = \frac{4\pi^2 * r^3}{G * M_{object}}.$$

⇒

$$M_{object} = \frac{4\pi^2 * r^3}{G * p^2}.$$

Op de baan van de ster (een cirkel) geldt: $v = \omega * r$ en $\omega = (2\pi)/p$

⇒

$$M_{object} = \frac{v^2 * r}{G}.$$

Dit kunnen we gebruiken om de massa van onze melkweg binnen een bepaalde straal te bepalen. Als we dit toepassen met de zon als ster, vinden we:

$$M_r = \frac{(220 * 10^3)^2 * 2.6 * 10^{20}}{6.67 * 10^{-11}} = 1.9 * 10^{41} kg.$$

De massa van de melkweg binnen de baan van de zon komt dus ongeveer overeen met 10^{11} zonsmassa’s.

Vraag 19.5 *Summarize the stages of the star-gas-star cycle illustrated in Figure 19.3.*

Sterren worden geboren in moleculaire wolken (afkomstig van atomaire waterstofwolken). Ze schijnen en produceren zwaardere elementen via kernfusie en brengen veel van hun inhoud terug in het interstellair medium via stellair winden (die blazen gedurende hun leven) en via planetaire nevel (voor sterren met kleine massa wanneer ze sterven) of supernovae (voor sterren met grotere massa). Lagemassasterren hebben over het algemeen

zwakkere interstellaire winden wanneer ze zich op de hoofdreeks bevinden. De winden worden echter sterker naarmate ze rode reuzen worden. Op het ogenblik dat een lage-massaster ? zoals de zon ? zijn leven beïndigt met de uitstoot van een planetaire nevel (dat natuurlijk gas bevat), heeft het bijna de helft van zijn originele massa in het interstellaire medium gestuurd. Sterren met hoge massa verliezen veel van hun massa op een veel dynamischere en explosievere manier, waarbij ze bijna al hun originele massa in de interstellaire ruimte sturen. De krachtige winden van superreuzen en zware O en B sterren recyclen grote hoeveelheden materie en op het einde van hun leven exploderen ze als supernovae. Het gas uitgezonden door supernovae of krachtige stellaire winden van hete sterren heeft een grote snelheid en geeft aanleiding tot vorming van een bubbel aangezien het gas wat van het omgevend interstellaire materiaal ?opveegt?.

Vraag 19.6 *What creates a bubble of hot, ionized gas? What happens to the gas in the bubble over time?*

Alle sterren geven een deel van hun originele massa terug aan het interstellaire medium door stellaire winden die gedurende hun hele leven blazen en door hun dood: via de planetaire nebula (bij lage massa sterren) of de supernovae (bij massieve sterren). Lage massa sterren hebben zwakke stellaire winden die sterker worden en meer materiaal in de ruimte voeren als ze rode reuzen worden. Massieve sterren hebben sterke stellaire winden die grote hoeveelheden materiaal terug in de ruimte voeren en ze ontploffen als supernovae. Het gas dat aan hoge snelheden naar de ruimte wordt geblazen door de stellaire wind van hete sterren en door supernovae veegt interstellair materiaal samen en vormt een „bubble” van heet, geïoniseerd gas rond de exploderende ster. Deze hete, dunne bubbles komen veel voor in de schijf van de galaxie, maar zijn moeilijk te detecteren. Sommige zenden licht uit in het zichtbaar gebied of X rays, en velen zijn alleen duidelijk door de radio emissie van de lagen gas die hen omringen.

De bubbles die ontstaan bij supernovae hebben een dramatisch effect op het interstellaire medium: supernovae genereren een schokgolf (drukgolven die raper dan het geluid voortbewegen). Een schokgolf veegt omgevend gas samen en creert zo een muur van snelvoortbewegend gas. De schokgolf drukt al het interstellair gas dat het tegen komt samen, warmt het op en ioniseert het. Een „supernova remnant” is de nasleep van de schokgolf. Het opgewarmde gas straalt uiteindelijk al zijn energie weg en de muur van gas vertraagt en vermengt met het interstellaire medium. Wij zitten momenteel in een „Local Bubble”, wat betekent dat een of meer supernovae geexplodeerd zijn in de omgeving van de Zon gedurende de laatste miljoenen jaren.

Schokgolven kunnen zich gedragen als subatomische deeltjesversnellers. Sommige elektronen die interageren met de schokgolf versnellen tot bijna de lichtsnelheid, en zenden radiogolven uit. De bubbles kunnen tot een diameter van ongeveer 100 lichtjaren groeien voor ze vertragen en vermengen met het interstellair gas.