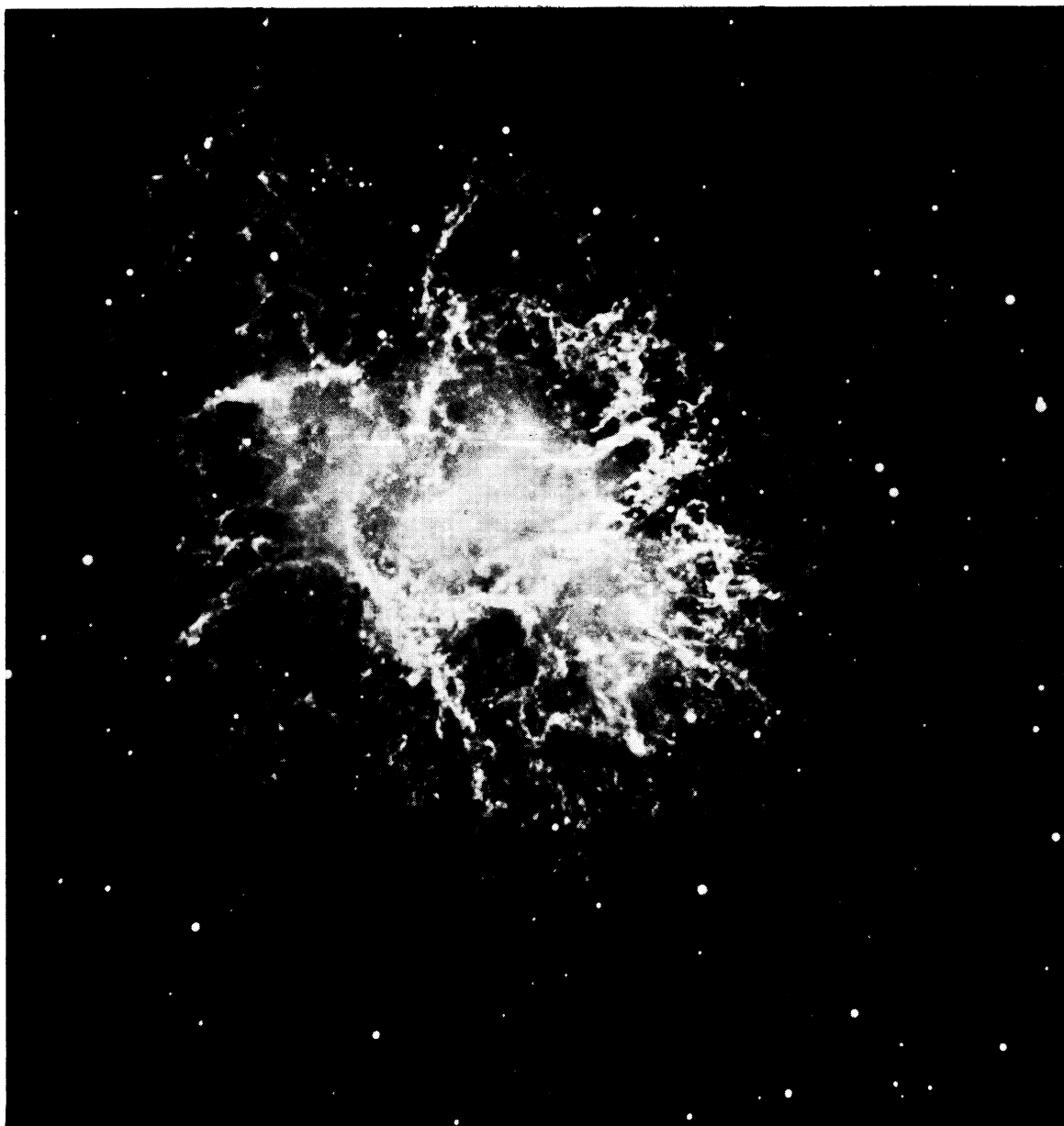


natuurkunde van zon en sterren

door: R.J. Ruitzen
Sterrewacht 'Sonnenborgh' - Utrecht

en

J.E. Geuzebroek - Frederik
Lerarenopleiding ZWN - Delft



stichting "De Koepel" Utrecht

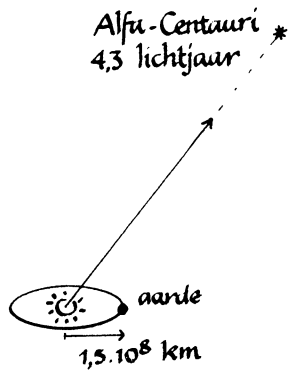
INHOUDSOPGAVE

<u>Leerlingentekst</u>	Pagina
1. DE ZON IS EEN STER	1
2. DE STRALING VAN DE ZON	
2.1. Energie van de zonnestraling op aarde	2
2.2. Totale energie van de zonnestraling	2
3. DE STRUCTUUR VAN DE ZON	
3.1. De aard van het zonnegas	3
3.2. Druk tegen zwaartekracht	4
3.3. De energiebron van de zon	5
4. DE TOEKOMST VAN DE ZON	
4.1. De waterstof raakt op	7
4.2. Witte dwergen	8
5. DE TOEKOMST VAN ZWARE STERREN	
5.1. De massa bepaalt de ster	9
5.2. Evolutie van zware sterren	9
5.3. Supernova's	10
5.4. Nucleosynthese	10
5.5. Neutronensterren en zwarte gaten	11
 <u>Appendix</u>	
6. WAARNEMINGEN VAN EINDSTADIA	
6.1. De geschiedenis van Sirius B	12
6.2. Jocelyn Bell en de pulsars	13
6.3. UHURU vindt een zwart gat in de Zwaan	13
ANTWOORDEN OP DE VRAGEN IN DE LEERLINGENTEKST	15
TOELICHTING VOOR DOCENTEN	
2.3. Astronomie van buiten de dampkring	16
2.4. Energieverdeling van de zonnestraling	16
2.5. Spectraallijnen: informatie op atomaire schaal	18
3.4. Opwekking en transport van energie in de zon	19
LITERATUUR	22
DANKBETUIGING	22

Voorplaat: Opname van de Krabnevel gemaakt met de 5-meter Hale teleskoop van Mt Palomar.

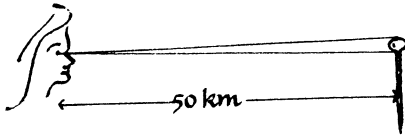
DEEL I : leerlingentekst

1. DE ZON IS EEN STER



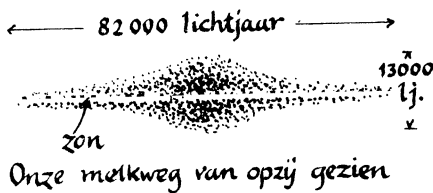
De zon is een ster. Ze verschilt niet van de sterren die we 's nachts als lichtpuntjes aan de hemel zien staan. De zon toont zich alleen maar anders aan ons omdat ze de centrale ster is van ons planetenstelsel. De afstand van de aarde tot de zon is slechts $1,5 \times 10^8$ km, terwijl de afstand van de aarde tot de eerstvolgende ster (Alfa Centauri) 4,3 lichtjaar bedraagt.

1. Hoe groot is de lichtsnelheid? ¹⁾
2. Welke afstand legt licht in een jaar af?
3. Hoe lang reist licht over de afstand zon-aarde?
En hoe lang zou een auto die 100 km/uur rijdt over die afstand doen?
4. Hoeveel kilometer is Alfa Centauri van ons vandaan?
5. Hoeveel verder is Alfa Centauri van ons dan de zon?
6. Hoeveel kleiner zien wij Alfa Centauri dan de zon?



Vanaf de aarde zien we Alfa Centauri slechts zo groot als een speldeknop op vijftig kilometer: de andere sterren dan de zon zien we dus alleen maar als lichtpuntjes.

De zon staat dichtbij de rand van de Melkweg. Zij behoort tot de doodgewone kleinere sterren. Onze Melkweg bevat *honderd miljard* sterren - en er zijn minstens *tien miljard* andere melkwegstelsels in het heelal. De zon is dus niets bijzonders: één ster uit vele. Maar omdat de zon zo dichtbij staat kunnen we haar goed bekijken: ze dient als voorbeeld in het onderzoek van de sterren. Evenzo dient ze als voorbeeld in deze les over de natuurkunde van de sterren (hoofdstukken 2 en 3).

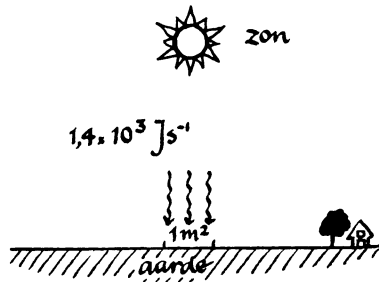


Er zijn verschillende soorten sterren: grote en kleine, hete en koude, jonge en oude sterren. Er ontstaan steeds nieuwe sterren, terwijl andere reeds lang niet meer waarneembaar zijn. We zullen zien dat begrip van de aard van de sterren ook leidt tot het begrijpen van hun *levensloop* (hoofdstukken 4 en 5).

1) Antwoorden op de vragen op pagina 15

2. DE STRALING VAN DE ZON

2.1 Energie van de zonnestraling op aarde



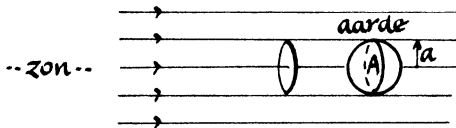
De hoeveelheid energie van de zonnestraling die iedere seconde een m^2 van het aardoppervlak treft bedraagt $1,2 \times 10^3 \text{ joule s}^{-1} m^{-2}$ (= watt m^{-2}), bij heldere hemel en met de zon pal boven je. Dat getal kun je wel aanvoelen: ongeveer de warmte van een straalkachel, dat dan ook dient om de zon te vervangen. Buiten de dampkring die een gedeelte van de zonne-energie absorbeert, is deze energiestroom $1,4 \times 10^3 \text{ J s}^{-1} m^{-2}$.

7. Hoeveel energie ontvangt de gehele aarde van de zon? (zie voor de grootte van de straal van de aarde de tabel op pag. 8)

De totale energiebehoefte van de mensheid bedraagt nu $4 \times 10^{20} \text{ J}$ per jaar.

8. Kan deze behoefte met zonne-energie worden gedekt?

De zonne-energie vormt de basis van het aardse leven. De zonnestraling verwarmt het aardoppervlak. Hierdoor wordt weer de atmosfeer verwarmd en een voor ons leefbaar klimaat in stand gehouden. Ook is de zonnestraling de energiebron van de koolstofassimilatie van de planten, die de zuurstof in de dampkring op peil houdt (en lang geleden heeft aangemaakt). De zuurstof is weer de energiebron van onze lichamen: eigenlijk lopen we dus op zonne-energie. Ook de aardse voorraden kolen, aardgas en aardolie zijn in feite door planten opgeslagen fossiele zonne-energie.

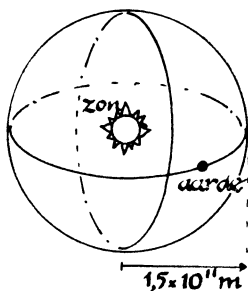


2.2 Totale energie van de zonnestraling

9. Denk je een bol met de zon als middelpunt en de afstand van de zon tot de aarde als straal. Hoeveel energie ontvangt deze bol per seconde aan zonnestraling? (De oppervlakte van een bol met straal R is $4\pi R^2$)

Tussen de planeten bevindt zich vrijwel geen materie: de zonnestraling passeert daar zonder verlies. Dezelfde hoeveelheid energie verlaat dus per seconde in totaal het gehele oppervlak van de zon: de zon straalt $4 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$ uit. Deze hoeveelheid is enorm. In één seconde straalt de zon voldoende energie uit om al het water in de oceanen ($1,4 \times 10^{21} \text{ kg}$) aan de kook te brengen!

10. Hoe lang kan de mensheid toe met de energie die de zon in één seconde uitstraalt?



De zon straalt deze grote energiestroom reeds heel lang uit: al 4,5 miljard jaar. De grootte-orde van dit getal volgt al uit onze aanwezigheid op aarde: de miljarden jaren durende evolutie van het aardse leven had niet plaats kunnen vinden als de zon niet al die tijd zeer constant had geschinen. Dat de zon $4,5 \times 10^9$ jaar oud is heeft men bepaald uit isotoopverhoudingen van de chemische elementen in aardse gesteenten en in maanstenen die door de Apollo-astronauten naar de aarde zijn gebracht.

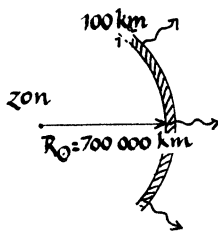
11. Hoe groot is de totale energie die de zon tot dusver heeft uitgestraald?

3. DE STRUKTUUR VAN DE ZON

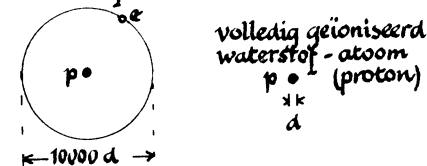
3.1 De aard van het zonnegas

Tabel: Hoeveelheden (in procenten) van enkele elementen in de zon

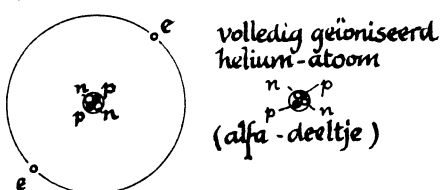
waterstof	92,06
helium	7,82
koolstof	0,03
stikstof	0,008
zuurstof	0,06
aluminium	0,0002
silicium	0,003
ijzer	0,004
platina	7×10^{-9}
goud	4×10^{-10}



waterstof-atoom



helium-atoom



Evenals de meeste sterren bestaat de zon helemaal uit gas: grotendeels waterstofgas (92,1 % van de atomen), en verder heliumgas (7,8 %) en een spoortje van alle overige elementen (samen 0,1 %). Voor 99,9 % bestaat de zon dus uit de lichtste gasen die er zijn.

12. Zoek de straal en de massa van de zon op in de tabel. Hoe groot is de gemiddelde dichtheid van het zonnegas?

Deze dichtheid is evenveel als de dichtheid van asfalt. Denk je dat je door de zon heen kunt kijken?

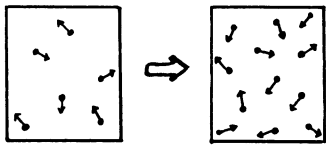
De zonnestraling die wij ontvangen komt uit een laagje van slechts honderd kilometer dikte aan de buitenkant van de zon. Dit laagje noemen we het zonne-oppervlak. In het centrum van de zon is de dichtheid veel groter dan de gemiddelde dichtheid: 10^5 kg m^{-3} . De materie is daar enorm samengedrukt. Toch is de materie ook daar *gasvormig*. Dat komt doordat de temperatuur er erg hoog is: 15 miljoen kelvin. Bij zo'n hoge temperatuur komen geen vaste stoffen, vloeistoffen of zelfs molekulen voor: het gas bestaat helemaal uit losse atomen. Bovendien zijn de onderlinge botsingen van de atomen zo krachtig door de hoge temperatuur, dat alle elektronen zijn losgeslagen van de atoomkernen: het gas is 'volledig geïoniseerd'. In het centrum van de zon bestaat het gas uit losse elektronen en losse atoomkernen, vooral van waterstof (protonen) en helium (alfa-deeltjes).

De doorsnede van een waterstofkern (proton) is tienduizend (10^4) maal zo klein als de doorsnede van een waterstofatoom (proton + elektron). De inhoud is dus 10^{12} maal zo klein. De deeltjes in het zonnegas zijn zo klein dat ze als puntjes zijn te beschouwen. Daarom, en ook omdat de temperatuur zo hoog is, gedraagt het zonnegas zich ondanks de hoge dichtheid als *ideaal gas*, net zoals lucht bij normale druk en temperatuur. Het voldoet aan de *ideale gaswet*:

$$p = k n T$$

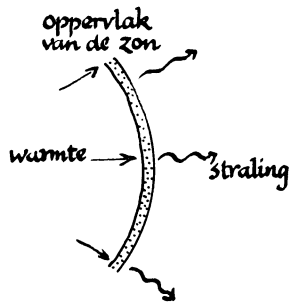
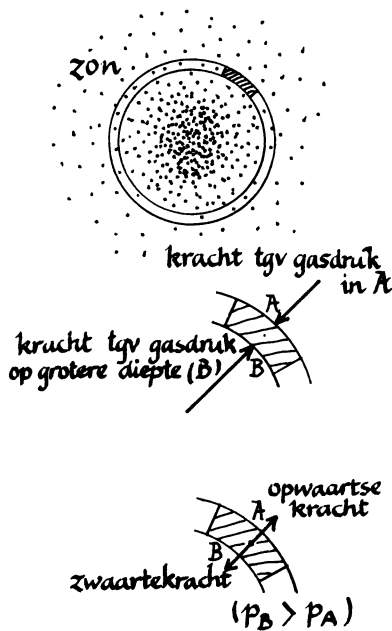
met p - de gasdruk (Nm^{-2}) ;
 n - de deeltjesdichtheid (m^{-3}) ;
 k - constante van Boltzmann ($= 1,38 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$)
 T - de temperatuur (K)

(De wet van Boyle-Gay Lussac $pV/T = \text{constant}$ geldt voor een afgesloten hoeveelheid gas: voor N gasdeeltjes in een volume V . Zou men het aantal gasdeeltjes in V verdubbelen, dan zou ook het aantal botsingen op de wanden van V verdubbelen. De druk verdubbelt dan en de constante dus ook. De constante is blijkbaar evenredig met het totaal aantal deeltjes. De evenredigheidsconstante is de constante van Boltzmann k . De wet van Boyle-Gay Lussac luidt dus algemener: $pV/T = kN$, of na hergroepering met $N/V = n$: $p = k n T$).



n 2x zo groot maakt p 2x zo groot

3.2 Druk tegen zwaartekracht



Er stroomt warmte van binnen naar buiten; de temperatuur neemt daarom naar binnen toe.

13. Wat gebeurt er met de druk in het zonnegas als de temperatuur plaatselijk toeneemt?
14. Hoe hangt de druk in de zon van de plaatselijke deeltjesdichtheid af?

Wanneer het waakvlammetje van de gasgeiser uitgaat ruik je al snel overal in de keuken gas. Het gas verspreidt zich over de hele ruimte. Hoe komt het dat het gas van de zon zich niet óók over de hele ruimte verspreidt? Hoe blijft de gasvormige bol bij elkaar?

De dampkring van de aarde is ook gasvormig, en verdwijnt ook niet in de ruimte. Op iedere m^3 lucht in de dampkring werkt de zwaartekracht van de aarde. Net zo zal een m^3 gas aan de buitenkant van de zon niet ontsnappen omdat het de zwaartekracht van de rest van de zon ondervindt: het zonnegas wordt naar binnen getrokken. Waarom valt het dan niet helemaal naar binnen?

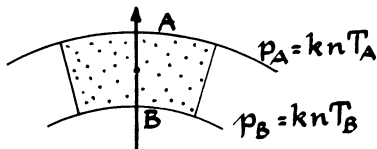
Bij een duik in het zwembad zul je wel eens hebben gemerkt dat je oren op grotere diepte pijn gaan doen. Hoe dieper je duikt, des te meer drukt het water op je trommelvlieszen. De druk wordt groter door het toenemende gewicht van de erboven liggende lagen. Zo geldt ook bij de zon dat de druk van het gas toeneemt bij toenemende diepte in de zon. We bekijken een laagje zonnegas nauwkeuriger. De onderkant van het laagje zit dieper in de zon dan de bovenkant. De druk op grotere diepte is groter: het drukverschil tussen onder- en bovenkant geeft een kracht omhoog, naar buiten. Deze ontstaat net zoals de opwaartse (Archimedes-)kracht in een aardse vloeistof. De opwaartse kracht is naar buiten gericht; de zwaartekracht is naar binnen gericht. Als één van beide groter is dan de andere zal het laagje bewegen; als ze elkaar precies opheffen blijft het in rust, net als een zwevend voorwerp in water.

Omdat we weten dat de zon al miljarden jaren in dezelfde vorm bestaat kunnen we concluderen dat overal in de zon de opwaartse kracht en de zwaartekracht elkaar opheffen, net als in de oceanen op aarde.

In een ster die niet verandert weegt overal de opwaartse kracht juist op tegen de zwaartekracht. Als de binnenwaartse druktoename in het sterregas niet in evenwicht is met de zwaartekracht zal de ster veranderen.

Verder weten we dat de zon een grote hoeveelheid energie de ruimte in straalt. De straling komt uit het honderd kilometer dunne laagje dat we "oppervlak" noemen. De uitgestraalde energie wordt van binnen uit de zon aangevuld. Er stroomt warmte van binnen naar buiten, dus de temperatuur neemt van binnen naar buiten af. Deze energiestroom moet worden onderhouden: er is een *energiebron* nodig.

Stel dat de energiebron plotseling ophoudt te werken. Dan vervalt de energiestroom en het oorspronkelijke temperatuurverschil tussen binnen- en buitenkant van een laagje zoals hiernaast getekend zal afnemen. Volgens de ideale gaswet neemt dan ook het drukverschil tussen binnen- en buitenkant af. Dus zal ook de opwaartse kracht in het laagje verminderen. De zwaartekracht op het laagje is niet verminderd, dus het laagje valt naar binnen. We concluderen: *als de energiebron in een ster uitvalt trekt de ster samen.*



Als $(T_B - T_A)$ afneemt wordt de zwaartekracht groter dan de opwaartse kracht.

3.3 De energiebron van de zon



Door de samentrekking neemt de deeltjesdichtheid toe. Ook de temperatuur neemt toe, omdat de vallende gasdeeltjes extra bewegingsenergie winnen uit potentiële energie. Dus: *bij inkringing nemen de temperatuur en de dichtheid in de vallende lagen toe.*

We zullen zien dat deze eigenschappen van een ster zoals de zon in belangrijke mate haar toekomstige ontwikkeling bepalen.

De zon straalt per seconde 4×10^{26} J de ruimte in, reeds gedurende $4,5 \times 10^9$ jaar. Waar komt deze energie vandaan? Lange tijd was dit een groot raadsel, tot in deze eeuw bleek dat bij *kernreacties* zulke grote hoeveelheden energie kunnen vrijkomen. De kernreacties die in de zon optreden zullen we nu nader bekijken.

Atoomkernen zijn opgebouwd uit nucleonen: protonen (p) en neutronen (n).

15. Hoeveel nucleonen zitten er in een waterstofkern?
16. Hoeveel nucleonen zitten er in een heliumkern?
17. Hoe zijn de nucleonen geladen?
18. Wat voor elektrische kracht oefenen de nucleonen op elkaar uit?

Toch blijven de nucleonen in een atoomkern bijeen. Blijkbaar zijn er nog andere krachten werkzaam, die sterker zijn dan de onderlinge elektrostatische afstoting van de protonen: de zogenaamde *kernkrachten*.

Deze geven een onderlinge aantrekkingskracht tussen de nucleonen die buitengewoon groot is, maar alléén op zeer kleine afstand. Op grotere afstand, buiten de atoomkern, zijn de kernkrachten niet merkbaar.

Veranderingen in de structuur van atoomkernen gaan gepaard met veranderingen in de potentiële energie van de nucleonen. Zulke veranderingen ken je bij de zwaartekracht (die véél zwakker is dan de kernkrachten, maar wél op grote afstanden ook nog werkt):

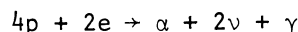
19. Een steen van 1 kilogram valt 1 meter naar de aarde. Wat gebeurt er met zijn potentiële energie?

20. Hoeveel bedraagt de afname?

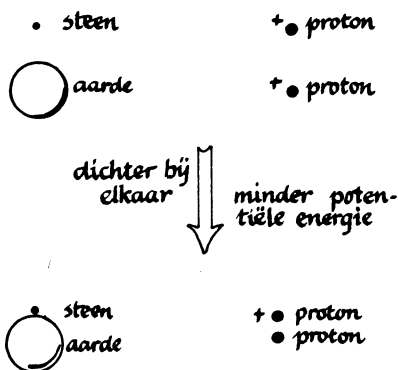
Deze energie komt vrij als kinetische energie.

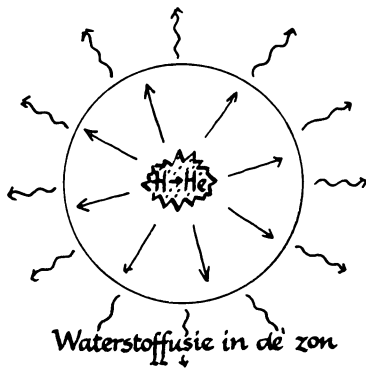
Precies zo hebben nucleonen wanneer ze in een atoomkern dicht bijeen gebonden zijn minder potentiële kernenergie dan wanneer ze minder dicht op elkaar zitten. Bij sommige kernreacties worden atoomkernen met een losse binding van de nucleonen omgezet in atoomkernen met een vastere binding per nucleon: bij zulke kernreacties komt dus potentiële kernenergie vrij.

Sterren ontlenen hun energie aan *kernfusie* reacties in hun inwendige. Daarbij worden enkele lichte atoomkernen, met losse binding per nucleon, samengesmolten tot één zwaardere atoomkern met sterkere binding per nucleon. In de zon worden als nettoresultaat vier waterstofkernen (losse protonen) en twee elektronen omgezet in één heliumkern (alfa-deeltje: α):



Naast het alfa-deeltje (α) komen ook twee neutrino's (ν) en enkele fotonen (γ) vrij, de laatste in de vorm van energierijke kortgolvlige gammastraling. Beide soorten deeltjes zijn massaloos. De neutrino's vliegen ongehinderd de





hele zon door, en er uit. De fotonen van de gammastraling worden ter plaatse geabsorbeerd, opnieuw uitgezonden, enz... Bij de herhaalde absorpties wordt de straling steeds lang-golviger. Uiteindelijk bereikt deze straling het oppervlak van de zon waar ze ontsnapt, voornamelijk in de vorm van zichtbaar licht. Deze γ -fotonen vertegenwoordigen de energie die de zon uitstraalt. Bij een vallende steen komt de afname van de potentiële zwaartekracht-energie vrij als kinetische energie; bij hechtere binding van de nucleonen in atoomkernen komt de afname van de potentiële kern-energie vrij als straling.

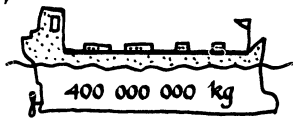
De zon zet waterstofkernen om in heliumkernen, met productie van stralingsenergie, ten koste van de potentiële bindings-energie van betrokken nucleonen. Dit proces wordt waterstoffusie genoemd.

Omdat de kernkrachten binnen een atoomkern zo sterk zijn, is de energie die per kernfusiereactie vrijkomt erg groot: per gevormd alfa-deeltje maar liefst $4,3 \times 10^{-12}$ J. Bedenk dat dit een bedrag per atoomkern is! We vergelijken het met de steen van 1 kilogram die 10 J potentiële energie vrijmaakt door een meter naar de aarde te vallen. Die steen bestaat uit 10^{25} atomen.

21. Hoeveel potentiële energie verliest de steen per atoom?
22. De massa van een waterstofkern bedraagt $1,7 \times 10^{-27}$ kg. Hoeveel energie levert de omzetting in de zon van één kilogram waterstofkernen in heliumkernen?

Van deze energie wordt 5 % meegenomen door de neutrino's (ν) die uit de zon ontsnappen. De overige 95 % komt uiteindelijk als straling aan het oppervlak vrij. In hoofdstuk 2 heb je gevonden hoeveel dit is.

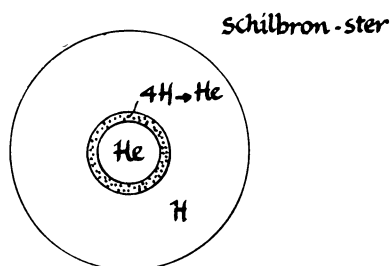
Supertanker



23. Hoeveel kilogram waterstof zet de zon per seconde om in helium?
 24. Is dat veel? (Hoeveel van nevenstaande supertankers per seconde?)
 25. Hoeveel kilogram waterstofkernen heeft de zon tot dusver omgezet?
 26. Is dat veel? (Hoeveel maal de massa van de aarde?)
- De zon bevatte oorspronkelijk $1,5 \times 10^{30}$ kg waterstofkernen.
27. Hoeveel procent daarvan is nu omgezet?
 28. Is dat veel? Denk je dat de zon binnenkort uitdooft?

4. DE TOEKOMST VAN DE ZON

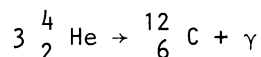
4.1 De waterstof raakt op



De omzetting van waterstof in helium gebeurt alleen in het centrum van de zon omdat daar de temperatuur voldoende hoog is: alleen bij hoge temperatuur bewegen de protonen voldoende snel om bij een botsing de afstotende elektrostatische kracht te kunnen overwinnen, tot in het bereik van de kernkrachten. Wat gebeurt er als in het centrum van de zon de waterstof opdraakt? Het centrale deel van de zon bestaat dan uit het inmiddels gevormde heliumgas. Rondom is er nog wel waterstof beschikbaar, maar daar is de temperatuur te laag voor kernfusie. De energiebron valt dan dus weg, en zoals we in paragraaf 3.2 zagen volgt dan onherroepelijk inkrimping. De binnendelen trekken zich samen, waarbij de temperatuur toeneemt. (*Waarom?*)

Uiteindelijk wordt de temperatuur in het waterstofgas rondom het centrale helium zo hoog, dat daar wel waterstoffusie mogelijk wordt. De zon wordt dan een *schilbron* ster.

In grote rekenmachines kan men de ontwikkeling van een ster versneld nabootsen. Uit zulke berekeningen blijkt dat de waterstofomzettende schil zich langzaam naar buiten "vreet". De binnendelen krimpen daarbij geleidelijk in. Het blijkt dat de buitenste lagen intussen opzwellen: de zon wordt een *rode reuzenster*. Over vijf miljard jaar zal ze de binnenste planeten (Mercurius, Venus, wellicht de aarde) opslokken! In het inwendige stijgt door de inkrimping de temperatuur; tenslotte wordt de temperatuur van het heliumgas in het centrum van de zon hoog genoeg voor een volgende kernfusiereactie:



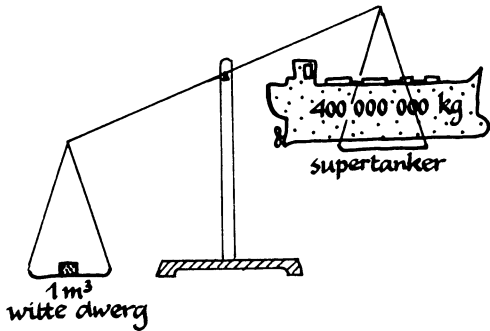
Hierin wordt het pas gevormde helium omgezet in koolstof; dit proces wordt *heliumfusie* genoemd.

29. *Waarom is er voor kernfusie een hoge temperatuur nodig?*

30. *Waarom vergt de heliumfusie een hogere temperatuur dan de waterstoffusie?*

De heliumfusie begint waarschijnlijk *explosief*: in enkele minuten wordt dan een groot deel van het helium in het inwendige van de zon omgezet in koolstof. Deze drastische verandering noemt men de "heliumflits". Wat er dan met de buitenlagen gebeurt is nog niet precies bekend; wellicht worden ze in hun geheel uitgestoten. Van de zon blijft dan maar een klein sterretje over dat grotendeels uit koolstof en helium bestaat. Het krimpt in één omdat er geen kernreacties meer zijn om de uitgestraalde energie aan te vullen. De zon wordt dan een *witte dwerg* - en zal dat blijven tot in lengte van dagen.

4.2 Witte dwergen



Een witte dwerg is een zeer compacte ster. Zijn diameter bedraagt 10^3 tot 10^4 km, zijn massa 0,4 tot 1 zonsmassa (1 zonsmassa = 2×10^{30} kg) en zijn dichtheid 10^8 tot 10^{11} kg m^{-3} .

31. Vergelijk deze waarden met die van de aarde en die van de zon (zie tabel 1).
32. Hoeveel supertankers wegen even veel als één m^3 witte dwerg materie?

Na de heliumflits schrompelt de zon bij gebrek aan een energiebron in één tot een witte dwerg. Bij de extreem hoge dichtheid die daarbij wordt bereikt is het gas niet meer ideaal, maar het is *gedegenereerd* of *ontaard*. De losse elektronen bewegen nog wel vrij door elkaar, maar met zeer grote snelheden die niet meer bepaald worden door de temperatuur. De hoge snelheden voldoen aan de zogenaamde kwantumvoorwaarden. Deze vereisen dat alle deeltjes in een volume-eenheid verschillende snelheden hebben. Bij zeer grote deeltjesdichtheden, zoals in een witte dwerg, moeten daarom veel deeltjes met grote snelheden bewegen. Deze oefenen een grote druk uit (de ontaardingsdruk), die *onafhankelijk* is van de temperatuur. De opwaartse kracht die hier gevolg van is kan in een witte dwerg de gravitatiekracht blijvend weerstaan. In een witte dwerg is daarom geen energiebron meer nodig! Alle aanwezige warmte mag nog worden uitgestraald - de ster blijft toch bestaan.

Een witte dwerg is het "eindstation" van een ster zoals de zon: een langzaam afkoelend, uitdovend sterretje waarin een blijvend evenwicht heerst tussen de zwaartekracht en de opwaartse kracht tengevolge van de grote ontaardingsdruk van de elektronen.

In onze Melkweg maken de witte dwergen nu zo'n tien procent van het aantal sterren uit. Ze zijn grotendeels voor ons onzichtbaar, waarom? Neemt hun aantal toe of af?

TABEL 1

Objekt	Diameter (m)	Massa	Gemiddelde dichtheid (kg m^{-3})
aarde	$1,276 \cdot 10^7$	$5,976 \cdot 10^{24}$ kg	$5,518 \cdot 10^3$
zon	$1,392 \cdot 10^9$	$1,989 \cdot 10^{30}$ kg	$1,409 \cdot 10^3$
witte dwerg	$\approx 10^7$	$\approx 1 M_{\odot}$	$10^8 - 10^{11}$
neutronenster	$\approx 10^3$	$\approx 2 M_{\odot}$	$10^{14} - 10^{18}$
zwart gat	$\approx 0?$	$> 3 M_{\odot}$	$\approx \infty$

Zon: dichtheid aan het oppervlak	$2,7 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-3}$
temperatuur aan het oppervlak	6000 K
dichtheid in het centrum	$1,6 \cdot 10^5 \text{ kg m}^{-3}$
temperatuur in het centrum	$1,5 \cdot 10^7$ K
ouderdom	$4,5 \cdot 10^9$ jaar = $1,4 \cdot 10^{17}$ seconde

5. DE TOEKOMST VAN ZWARE STERREN

5.1 De massa bepaalt de ster

Tot dusver spraken we over sterren zoals de zon. We zagen dat de omvang en de samenstelling van de zon tijdens haar ontwikkeling van waterstofomzettende ster tot uitgedoofde witte dwerg ingrijpend zullen veranderen. Uiterlijk verschillende sterren kunnen dus verschillende ontwikkelingsstadia zijn van hetzelfde prototype.

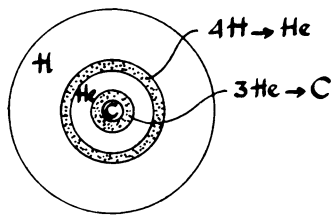
Als de oorspronkelijke eigenschappen van sterren, direkt na hun ontstaan uit samengebalde gasnevels, steeds dezelfde zijn, dan zullen de sterren die we zien slechts verschillen in evolutiestadium. Nu blijkt het dat de aanvankelijke *chemische samenstelling* van sterren die dicht bij elkaar en kort na elkaar ontstaan dezelfde is - maar ze verschillen in hun *massa's*. Ze variëren van 0,1 tot 50 zonsmassa's. De snelheid en de aard van de ontwikkeling van een ster worden grotendeels bepaald door zijn massa. Hoe zwaarder een ster, hoe groter de energie die hij per seconde uitstraalt.

33. Een ster van 10 zonsmassa's straalt per seconde $2,5 \times 10^3$ zoveel energie uit als de zon. Zet deze ster meer of minder waterstof om per seconde dan de zon? Hoeveel kilogram waterstofkernen zet deze ster per seconde om in heliumkernen? Deze ster soupeert zijn waterstof dus veel sneller op dan de zon; daar staat tegenover dat hij tien maal zo veel waterstof bezit. Hoe veel langer of korter vertoeft deze ster in de fase van waterstoffusie?
34. De duur van de waterstoffusie-fase is dus evenredig met de massa van een ster en omgekeerd evenredig met de per seconde uitgestraalde energie. Vul nu de volgende tabel aan:

massa (in zonsmassa's)	energie-uitstraling per seconde t.o.v. de energie-uitstraling van de zon per seconde	duur waterstoffusie (in jaren)
0,1	2×10^{-3} maal zoveel
1	1 maal zoveel	10^{10}
10	$2,5 \times 10^3$ maal zoveel
50	5×10^5 maal zoveel

5.2 Evolutie van zware sterren

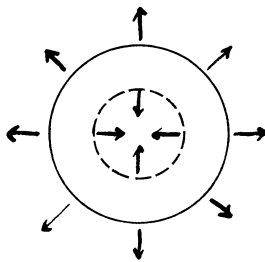
De zwaarste sterren vertoeven dus maar betrekkelijk kort in de fase van waterstoffusie. Ook gaat hun verdere ontwikkeling heel anders dan bij de zon. De temperatuur en druk in hun inwendige zijn veel hoger, en de materie raakt *niet* ontaard bij de inkrimping tijdens de schilbronfase. De kernfusie van helium tot koolstof verloopt rustiger, zonder heliumflits. Daarbij wordt het centrum van de ster van koolstof. Er omheen is een schil, waarin nog heliumfusie optreedt; daarbuiten een laag helium en daaromheen een waterstofomzettende schil.



De buitenste lagen zijn nog steeds van waterstof. De binnendelen van de ster trekken zich voortdurend samen, waardoor de fusie-schillen zich naar buiten kunnen vreten. De centrale temperatuur neemt ook toe. Als deze boven 100 miljoen graden komt treedt de *koolstoffusie* in, waarbij uit koolstof elementen als zuurstof, neon, magnesium en natrium worden gevormd. Dan volgen in snelle opeenvolging de *zuurstoffusie* (fosfor, silicium, zwavel) en de *siliciumfusie* die ijzer als eindproduct heeft. In de zware sterren gaat de kernfusie dus veel verder dan in de lichte sterren.

5.3 Supernova's

Supernova:
explosie buitenkant
implosie binnenkant

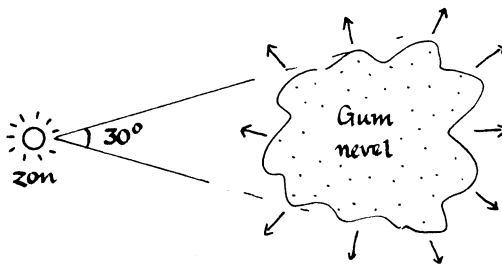


Als een zware ster een ijzeren inwendige heeft gekregen komt hij in moeilijkheden. Bij ijzer bereikt de binding van de nucleonen een maximum. In ijzer zijn de nucleonen dichter opeengehoopt dan in enige ander element. Vanuit ijzer zijn daarom geen energieleverende kernreacties meer mogelijk: alle kernreacties met ijzer als grondstof *kosten* energie.

Er is dus geen energiebron meer voorhanden. Het ijzeren centrum van de ster stort onherroepelijk in elkaar. Dit gebeurt zeer snel. Tijdens deze ineenstorting loopt de temperatuur in de buitenlagen enorm op. Daardoor kunnen allerlei energiekostende kernreacties optreden: heel snel worden alle elementen zwaarder dan ijzer gevormd, en tenslotte komen er zoveel elementaire deeltjes vrij dat de buitenste lagen van de ster de ruimte worden ingeblazen. Terwijl het inwendige *implodeert*, *explodeert* de buitenkant.

Deze buitengewone implosie/explosie heet *supernova*: een nieuwe ster (*nova*), en ook nog *super*: omdat de helderheid korte tijd enorm toeneemt, tot 10^8 maal.

Sommige nabije supernova's waren *overdag* zichtbaar. De best bekende is degene waarvan de Krabnevel is overgebleven: deze supernova is ontploft in 1054. Ook in 1572 (Tycho Brahe) en 1604 (Johannes Kepler) waren er nabije supernova's. Een zeer nabije moet 11 000 jaar geleden zijn geëxplodeerd: de expanderende ijle nevel die toen gevormd werd (de Gumnevel) bedekt nu een groot deel van onze hemel: minstens 30° , dat is 60 maal de diameter van de maan! Binnenkort ($\approx 10^4$ jaar) zal deze nevel ons zonnestelsel bevatten. Sinds Kepler is er geen nabije supernova meer geweest, tot groot ongenoegen van de astronomen; wel worden ze regelmatig in andere melkwegstelsels waargenomen.



5.4 Nucleosynthese

De supernova's vervullen een belangrijke rol bij het verrijken van het gas in een melkwegstelsel met zware atomen. Waarschijnlijk is een groot deel van alle atomen zwaarder dan helium *in een ster gevormd* en bij zulke explosies de ruimte in geslingerd. Ook het materiaal waaruit de planeten, de aarde en wijzelf zijn opgebouwd is van zo'n explosie afkomstig. (Er zit zoveel ijzer in de aarde omdat de produktie van ijzer de laatste stap vóór de supernova-explosie is.)

Bij het ontstaan van onze Melkweg waren er nauwelijks zware atomen voorhanden. Nu nog waarneembare sterren uit die tijd (dat zijn de hele *lichte*, die nu nog steeds waterstof omzetten) bevatten slechts waterstof en helium. Alle *zware* sterren uit die tijd zijn echter reeds lang geleden geëxplodeerd als supernova. Zij hebben het gas

tussen de sterren verrijkt met hun produktie van zware atomen. Uit zulk gas zijn later weer nieuwe sterren ontstaan, waaronder de zon. Steenklompen zoals de aarde konden toen ook worden gevormd. *Zo zien we dat het ontstaan van de aarde (en het aardse leven) pas mogelijk werd toen de chemische samenstelling van de Melkweg zelf voldoende was gewijzigd - tengevolge van de evolutie van individuele sterren.*

5.5 Neutronensterren en zwarte gaten

Na de supernova-explosie blijft het imploderende inwendige van de ster achter. Wat gebeurt daarmee? Energie-leverende fusiereacties zijn niet meer mogelijk met ijzer als grondstof. Verdere samentrekking is dus onafwendbaar - tot de materie in dit ijzeren sterretje *ontaard* raakt. Net als bij de witte dwergen is dan de opwaartse kracht tengevolge van de ontaarde deeltjessnelheden weer opgewassen tegen de zwaartekracht. Een blijvend evenwicht is dan bereikt; het supernova-overblijfsel is dan in een *eindstadium* beland.

De dichtheid van de materie is daarin zo groot dat niet alleen de *elektronen* ontaard zijn, zoals bij de witte dwergen. Ook de *atoomkernen* degenereren. Bovendien combineren de protonen in de kernen met elektronen tot neutronen, en wat overblijft is een hechte klomp materie die voornamelijk bestaat uit ontaarde neutronen. Er omheen zit een korst ijzer en een heel dunne atmosfeer van gas (≈ 1 meter dik). Zo'n ster heet een *neutronenster*.

Zijn diameter is maar 10 km, zijn massa 1 à 3 zonsmassa's, zijn dichtheid tot 10^{18} kg m⁻³! (Hoeveel supertankers hebben dezelfde massa als één kubieke *centimeter* neutronenster materie?)

Het bestaan van neutronensterren, en het ontstaan ervan bij supernova-explosies werd reeds in de dertiger jaren voorspeld. Maar pas in 1967 werden ze voor het eerst waargenomen, in de onverwachte vorm van pulsars (Appendix 6.2).



Een zwart gat is een ster die blijft ineenstorten



Zelfs een foton kan uit een zwart gat niet ontsnappen

In de dertiger jaren werd ook reeds het mogelijke bestaan van *zwarte gaten* geopperd. Deze ontstaan bij supernova-explosies wanneer het samenballende inwendige van de ster zwaarder is dan ongeveer drie zonsmassa's. Dan is de massa-concentratie zo groot dat ook de ontaardingsdruk van de neutronen onvoldoende is. De zwaartekracht overheerst dan *blijvend*: de ster *blijft* inkrimpen. In principe wordt zo'n ster dan oneindig klein!

Maar dan gelden de ons nu bekende natuurkundewetten waarschijnlijk niet meer, zodat we niet kunnen zeggen wat er precies gebeurt. Bovendien zal de ster zich al vóór dat moment aan ons gezicht onttrekken. De zwaartekracht aan het oppervlak van de ster neemt immers snel toe terwijl de ster inkrimpt; tenslotte wordt de ontsnappings-snelheid groter dan $300\,000$ km s⁻¹ en kan zelfs licht niet meer ontsnappen. Vandaar de naam "zwart gat": er kan wel van alles in verdwijnen (zoals materie die er naar toe valt), maar er komt niets meer uit. Waarneembaar is het niet meer; alleen de aantrekkingskracht ervan is op grotere afstand merkbaar.

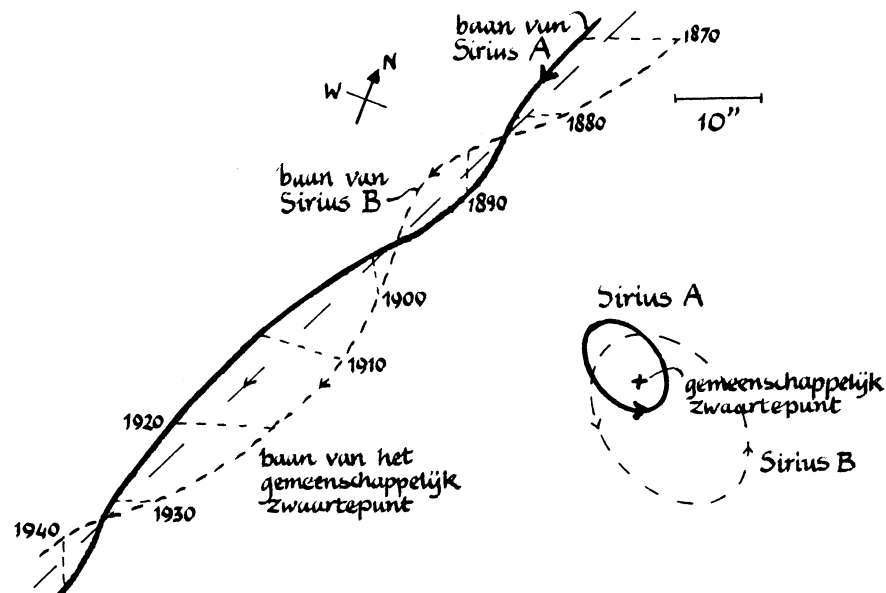
Kort geleden zijn aanwijzingen gevonden dat zich in het sterrenbeeld De Zwaan een zwart gat bevindt (Appendix 6.3).

DEEL II: appendix

6. WAARNEMINGEN VAN EINDSTADIA

6.1 De geschiedenis van Sirius B, of: wetenschap gaat per hink-stap-sprong.

De helderste ster aan de hemel heet Sirius. Friedrich Bessel ontdekte in 1834 dat er een donker sterretje om Sirius heen moet draaien, dat zelf niet waarneembaar is:



Sirius beweegt zich net als andere dichtbijstaande sterren langzaam langs de hemel, ten opzichte van veel verder wegstaande sterren. Maar Sirius doet dit volgens een slingerlijn: blijkbaar wordt de ster periodiek heen en weer getrokken door een onzichtbare begeleider die er omheen draait. In 1862 bevestigde de kijkerbouwer Alvan Clark dit: in zijn nieuwste kijker was de begeleider net te zien, tienduizend maal zo zwak als Sirius zelf.

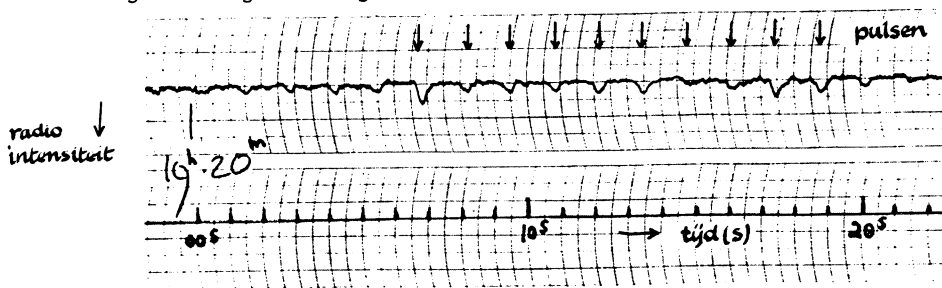
De naam van dit sterretje is Sirius B. Het vormde voor de astronomen uit die tijd een onverklaarbaar raadsel: uit de helderheid en de kleur (wit) van Sirius B volgt dat het sterretje slechts twee keer zo groot is als de aarde, vijftig maal zo klein als de zon, terwijl uit de waargenomen baan van Sirius volgt dat de massa gelijk is aan die van de zon. Een 'witte dwergster' dus, slechts tweemaal zo groot als de aarde, maar driehonderdduizend maal zo zwaar - hoe kan dat? De dichtheid ervan is 2.10^8 kg m^{-3} ; een lucifersdoosje vol Sirius B materie weegt 5000 kg! Het is begrijpelijk dat zo'n enorme materiedichtheid voor de natuurkundigen uit de vorige eeuw onbegrijpelijk was: de zwaarste stof op aarde weegt immers slechts 2.10^4 kg m^{-3} .

De oplossing kwam pas veel later, in 1926, toen Fermi en Fowler de theorie van de ontardingsdruk in ontaarde materie opstelden. Daarmee werd het bestaan van de witte dwergen verklaard (paragraaf 4.2). Al kort daarna (1932) deden Baade en Zwicky de suggestie dat er ook sterren zouden kunnen bestaan waarin niet alleen de lichte elektronen maar ook de zware atoomkernen ontaard zijn. Dat zijn de neutronensterren. Daar werden toen reeds uitvoerige berekeningen over gemaakt, en ook de vorming bij supernova-uitbarstingen en het mogelijke bestaan van zwarte gaten werden toen reeds uitgebreid beschreven. Maar deze suggesties bleven hypothesen tot pas vijfendertig jaar later de eerste pulsar werd ontdekt.

Zo zien we dat de vooruitgang van sterrenkunde en natuurkunde hand in hand gaan, maar soms met lange wachttijden tussen waarneming en interpretatie, of tussen theoretische voorspelling en bevestiging. De witte dwergen waren al een eeuw bekend en hun buitengewone materiedichtheid al zestig jaar, vóórdat hun bestaan werd begrepen. Dat begrip leidde onmiddellijk tot de theoretische veronderstelling van het bestaan van neutronensterren en zwarte gaten - die pas in onze tijd werkelijk zijn gevonden. Wetenschap gaat per hink-stap-sprong!

6.2 Jocelyn Bell en de pulsars

In 1967 besloot Anthony Hewish te Cambridge (Engeland) een radiotelescoop te bouwen speciaal voor het waarnemen van snelle veranderingen in de radiostraling van ver verwijderde melkwegstelsels. Zijn budget was beperkt en de "telescoop" werd heel eenvoudig: 1024 houten palen in nette rijen in een weiland, verbonden door kabels. Hewish sloeg de palen zelf in de grond, geholpen door collega's en studenten, waaronder Jocelyn Bell, een meisje uit Ierland. Er werd gevoelige meetapparatuur aangesloten, en weldra werden vele radiobronnen onderzocht op snelle veranderingen. Jocelyn vond op één van de kilometerslange papierstroken met registraties een rare storing, bestaande uit kortdurende variaties in een klein signaal. De storing verdween weer snel, maar toen deze enkele maanden later terugkeerde sloot ze nog snellere meetapparatuur aan, om hem beter te kunnen bekijken. Ze verkreeg de volgende registratie:



De onbekende storingsbron gaf radiostraling in de vorm van heel korte stootjes ("pulsen"), onregelmatig van sterkte maar heel regelmatig herhaald. Al gauw bleek dat de regelmaat in de tijdstippen waarop de stootjes arriveren verbluffend is: zo precies als het tikken van een klok - maar dan met de precisie van de beste atoomklok! De bron werd 'pulsar' genoemd. Al snel werden er meer ontdekt; er zijn nu ruim honderd pulsars bekend.

Het zijn onverwachte manifestaties van *neutronensterren* in onze Melkweg. Deze draaien aanvankelijk zeer snel rond: bij de supernova-implosie waarin ze worden gevormd wordt de langzame draaiing van de oorspronkelijke ster enorm versneld. De sneldraaiende neutronenster zendt bundels radiostraling uit die als vuurtorenbundels voorbij zwiepen, en als stootjes worden waargenomen. De neutronensterren in de nabije, kort geleden gevormde supernova-resten (de Krabnevel en de Gumnevel) pulseren zo niet alleen op radiogolflengten maar ook in zichtbaar licht: de Krab-pulsar knippert dertig keer per seconde.

Anthony Hewish kreeg in 1974 de Nobelprijs voor *natuurkunde* voor deze ontdekking - de vondst van de eerste neutronenster.

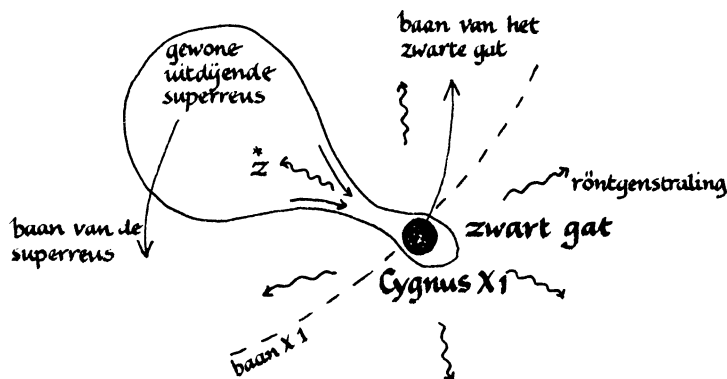
6.3 UHURU vindt een zwart gat in de Zwaan

Op 12 december 1970 werd de Amerikaanse Explorer 42 in een baan om de aarde gebracht van een Italiaans lanceerplatform voor de kust van Kenya. Het satellietje werd "UHURU" gedoopt omdat het juist op de onafhankelijkheidsdag van Kenya werd gelanceerd ("Uhuru" is Swahili voor vrijheid). UHURU was de eerste kunstmaan gewijd aan het röntgenonderzoek van het heelal en werd de meest beroemde van de sterrenkundige kunstmannen. Het ontdekte vele nieuwe bronnen van röntgenstraling aan de hemel. Van een bron die al langer bekend was: Cygnus X-1 (in De Zwaan) ontdekte UHURU dat de sterkte van de röntgenstraling snel (binnen 0,1 s.) wisselt.

Met de kunstmaan kon niet precies worden bepaald wáár deze bron aan de hemel staat. L. Braes en G. Miley van de sterrenwacht te Leiden vonden echter met de grote radio-telescoop te Westerbork (Drente) in dezelfde richting een radiobron, waarvan de radiostraling tegelijk met Cygnus X-1 van sterkte wisselt. Dat kon geen toeval zijn: de radiobron en de röntgenbron horen blijkbaar bij elkaar. Met de Westerbork telescoop konden Braes en Miley wèl precies de plaats van de bron bepalen. Op die plaats werd met een gewone telescoop een gewone ster gevonden (een zware "superreus"). Het bleek dat de onzichtbare radio- en röntgenbron daar omheen draait. Uit de baanbeweging van de zichtbare ster werd de massa van de onzichtbare begeleider afgeleid. Deze bedraagt minstens 3,5 zonsmassa; dat is teveel voor een neutronenster. Waarschijnlijk heeft men hier voor het eerste een zwart gat ontdekt.

Waarom straalt het zwarte gat röntgenstraling en radiostraling uit? Deze kunnen niet uit het zwarte gat zelf komen: daar komt immers nooit meer iets uit. Ze komen uit de omgeving van het zwarte gat, vanwaar nog wel straling kan ontsnappen. De gewone ster is kort geleden (minder dan 10 000 jaar) begonnen aan het stadium van de schilbronfusie waarin hij opzwellt. Er wordt nu materie door deze ster verloren aan het zwarte gat. Onder het er in vallen zendt deze materie de onregelmatige röntgen- en radiostraling uit.

Nu kun je je ook wel voorstellen hoe dit dubbelster-systeem zich heeft ontwikkeld. Het zwarte gat was oorspronkelijk een heel zware ster: 16 zonsmassa's of meer, volgens de berekeningen van E.P.J. van den Heuvel (Amsterdam) en J. Heise (Utrecht). Deze zware ster evolueerde sneller dan zijn lichtere begeleider, en explodeerde lang geleden als supernova. Het overblijvende zwarte gat bleef zijn rondjes rond de andere ster draaien.



De ontwikkeling van deze lichtere ster gaat veel langzamer. Eerst nú is het zijn beurt om op te zwellen - waarbij dan nu zijn uitdijende buitenlagen worden opgeslorpt door het zwarte gat.

Antwoorden op de vragen in de leerlingentekst

1. $300.000 \text{ km s}^{-1} = 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
2. $3,0 \times 10^5 \text{ km s}^{-1} \times 365 \text{ dag jaar}^{-1} \times 24 \text{ uur dag}^{-1} \times 60 \text{ min uur}^{-1} \times 60 \text{ s min}^{-1} = 9,5 \times 10^{12} \text{ km}$.
3. Licht: $1,5 \times 10^8 \text{ km} / 3,0 \times 10^5 \text{ km s}^{-1} = 500 \text{ s} = 8,3 \text{ min}$.
Auto: $1,5 \times 10^8 \text{ km} / 100 \text{ km uur}^{-1} = 1,5 \times 10^6 \text{ uur} = 171 \text{ jaar}$.
4. $4,3 \text{ lichtjaar} = 4,3 \text{ lj} \times 9,5 \times 10^{12} \text{ km lj}^{-1} = 4,1 \times 10^{13} \text{ km}$.
5. $4,1 \times 10^{13} \text{ km} / 1,5 \times 10^8 \text{ km} = 2,7 \times 10^5 \text{ maal zo ver}$.
6. $2,7 \times 10^5 \text{ maal zo klein}$
7. Aardstraal $a = 6,4 \times 10^6 \text{ m}$ (tabel op blz. 8), dus $1,4 \times 10^3 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \times \pi a^2 = 1,8 \times 10^{17} \text{ J s}^{-1}$
8. Verhouding: $1,8 \times 10^{17} \text{ J s}^{-1} \times 3,2 \times 10^7 \text{ s jaar}^{-1} / 4 \times 10^{20} \text{ J jaar}^{-1} = 1,4 \times 10^4$.
9. $1,4 \times 10^3 \text{ J s}^{-1} \times 4\pi \times (1,5 \times 10^{11} \text{ m})^2 = 4,0 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$.
10. $4,0 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1} / 4 \times 10^{20} \text{ J jaar}^{-1} = 10^6 \text{ jaar}$.
11. $4,0 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1} \times 4,5 \times 10^9 \text{ jaar} \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ sec jaar}^{-1} = 5,7 \times 10^{43} \text{ J}$.
12. $1,99 \times 10^{30} \text{ kg} / (\frac{4}{3}\pi \times (7,0 \times 10^8 \text{ m})^3) = 1,4 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$.
13. De druk neemt toe evenredig met de temperatuur.
14. De druk is evenredig met de deeltjesdichtheid.
15. Eén proton
16. Twee protonen en twee neutronen
17. Protonen: positief. Neutronen: geen lading
18. Protonen stoten elkaar af.
19. Neemt af.
20. $9,8 \text{ m s}^{-2} \times 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m} = 9,8 \text{ J}$.
21. $10 \text{ J} / 10^{25} \text{ atomen} = 10^{-24} \text{ J/atoom}$
22. $4,3 \times 10^{-12} \text{ J} / (4 \times 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}) = 6,3 \times 10^{14} \text{ J kg}^{-1}$.
23. $4,0 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1} / (0,95 \times 6,3 \times 10^{14} \text{ J kg}^{-1}) = 6,7 \times 10^{11} \text{ kg s}^{-1}$.
24. $6,7 \times 10^{11} \text{ kg s}^{-1} / 4,0 \times 10^8 \text{ kg supertanker}^{-1} = 1675 \text{ supertankers s}^{-1}$
25. $4,5 \times 10^9 \text{ jaar} \times 6,7 \times 10^{11} \text{ kg s}^{-1} \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s jaar}^{-1} = 9,5 \times 10^{28} \text{ kg}$.
26. $9,5 \times 10^{28} \text{ kg} / 6,0 \times 10^{24} \text{ kg} = 1,6 \times 10^4 \text{ maal de massa van de aarde}$.
27. $9,5 \times 10^{28} \text{ kg} / 1,5 \times 10^{30} \text{ kg} = 6,3 \times 10^{-2}$ of 6,3 %.
28. De vraag of de zon binnenkort uitdooft valt voor de leerling eigenlijk niet te beantwoorden. Slechts de waterstof in het binnenste van de zon kan deelnemen aan de kernfusiereacties: dit is ongeveer 12 % van de totale voorraad waterstof (Toelichting voor docenten: paragraaf 3.4). De zon is nu halverwege, en heeft nog waterstof voor ongeveer 5×10^9 jaar.
29. Om de elektrostatiche afstoting van de protonen te overwinnen.
30. De heliumkernen zijn twee maal zo zwaar geladen als waterstofkernen.
31. Een witte dwerg pakt de massa van de zon in het volume van de aarde.
32. $10^{11} \text{ kg m}^{-3} / 4,0 \times 10^8 \text{ kg supertanker}^{-1} = 2500 \text{ supertankers/m}^3$.
33. Méér waterstof per seconde: $2,5 \times 10^3 \times 6,7 \times 10^{11} \text{ kg s}^{-1}$ (vraag 23) = $1,7 \times 10^{15} \text{ kg s}^{-1}$.
 $10 / 2,5 \times 10^3 = 4,0 \times 10^{-3}$ maal zo lang, of 250 x korter, als de zon.

34.

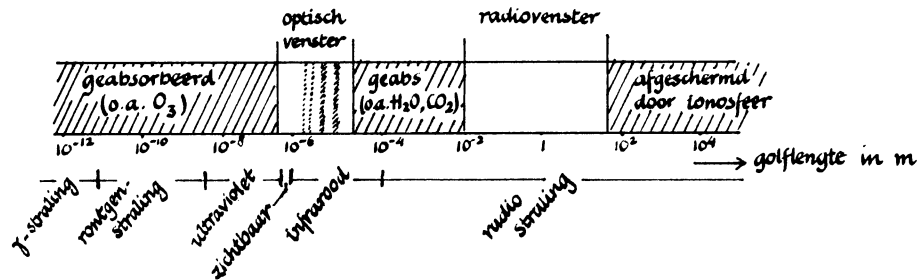
massa (zonsmassa's)	energieuitstraling (t.o.v. de zon)	duur waterstoffusie (jaren)
0,1	2×10^{-3} maal zoveel	5×10^{11}
1	1 - -	10^{10}
10	$2,5 \times 10^3$ - -	4×10^7
50	5×10^3 - -	10^6

DEEL III : toelichting voor docenten

Deze toelichting biedt extra informatie voor de docent, gerangschikt als uitbreiding van de leerlingentekst. De toelichting kan zonder enig bezwaar bij de voorbereiding van de les(sen) worden overgeslagen: zij is onafhankelijk van de leerlingentekst en is slechts bedoeld als achtergrond en uitbreiding voor de dieper-gravende docent.

2.3. Astronomie van buiten de dampkring.

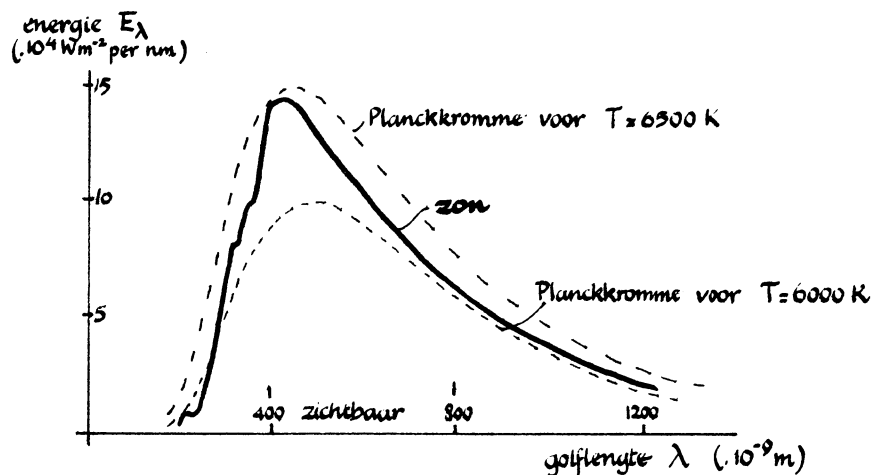
De zon en de andere sterren stralen op alle golflengten van het elektromagnetische spectrum, van gammastraling (golflengte $< 10^{-11}$ m) tot langgolvlige radiostraling (golflengte $> 10^3$ m). Vrijwel alles wat we van sterren weten berust op het onderzoek van deze straling. De meeste van deze golflengten worden niet door de aard-atmosfeer doorgelaten:



Slechts in het 'optisch venster' en in het 'radiovenster' is de dampkring doorzichtig. De straling op andere golflengten kan slechts vanuit de ruimte worden onderzocht. Telescopen en spektrografen voor gammastraling, röntgenstraling en ultraviolette straling worden daartoe geplaatst in raketten, ballongondels, kunstmanen (zoals de Astronomische Nederlandse Satelliet ANS), en in de toekomst in de Space Shuttle. Zo worden nieuwe domeinen van sterrekundig onderzoek geopend. Het laatste te openen domein is dat van de infrarode straling met golflengte $\lambda = 10^{-4}$ m. Daartoe moet apparatuur in de ruimte worden gebracht die tot nabij het absolute nulpunt is gekoeld! Dat zal, als alles goed gaat, voor het eerst geschieden met de Nederlands-Amerikaans-Britse IRAS kunstmaan.

2.4 Energieverdeling van de zonnestraling

Het zichtbare licht geeft een bijdrage tot de totale energie van de zonnestraling:



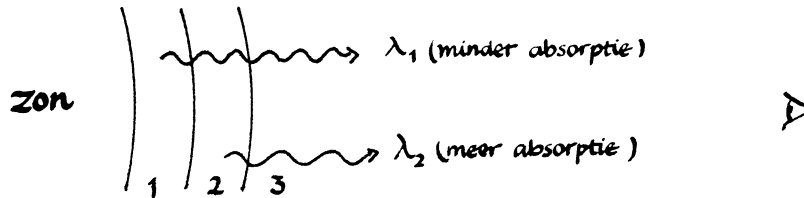
De energieverdeling van de zonnestraling (voor het centrum van de zonneshijf), per golflengte interval van 10^{-9} m. De oppervlakte onder de kromme geeft de totale energie. De gestippelde krommen zijn Planck-krommen voor de straling van zwarte lichamen van respectievelijk 6000 K en 6500 K.

De energieverdelingskromme ligt dichtbij een Planckkromme voor de straling van een zwart lichaam van 6000 K.

De zonnestraling is *thermische straling*: de intensiteit wordt bepaald door de *temperatuur* van het gas in de laag waar de straling vandaan komt - en deze temperatuur is ongeveer 6000 K. Uit welke laag komt de straling?

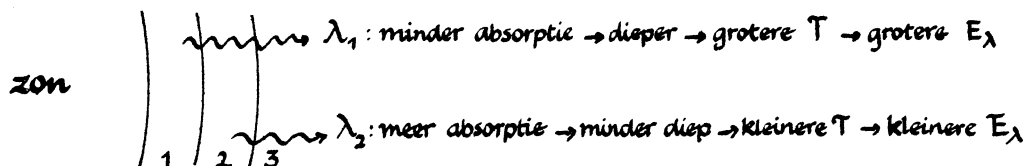
Dat hangt af van de *absorptie* door het gas. Als de absorptie groter is kijken we minder diep in de zon, net zoals we minder ver kunnen zien in dikke mist. Nu hangt de absorptie af van de *golflengte*: bij verschillende golflengten is de absorptie van het gas verschillend.

Straling van verschillende golflengten komt dus uit verschillende lagen:



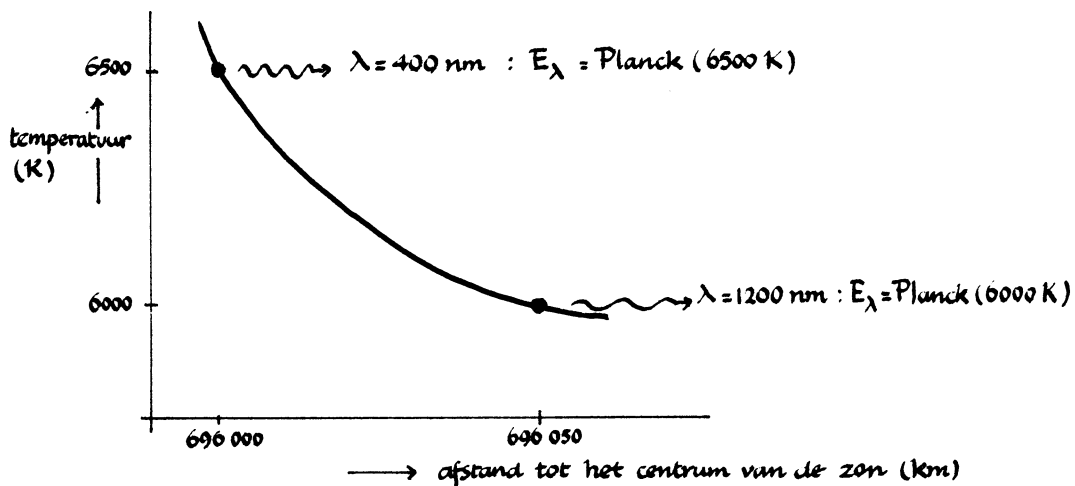
Laag 2 is doorzichtig voor straling met golflengte λ_1 , maar niet voor straling met golflengte λ_2 daar bij de laatste golflengte de absorptie groter is. Laag 3 is doorzichtig voor beide golflengten. (Deze laag strekt zich uit van het zonsoppervlak tot aan de aarde).

De temperatuur in het zonnegas neemt naar binnen toe, dus: hoe dieper de laag, hoe heter, en hoe groter de energie van de door de laag uitgezonden straling, volgens de wet van Planck:



Voor de verschillende golflengten ontvangen we dus straling uit verschillende lagen, volgens de daarbij behorende temperatuur.

De energieverdelingskromme van de zonnestraling bestaat uit een combinatie van verschillende stukjes Planckkromme, voor iedere golflengte horend bij een andere temperatuur.



Bij andere sterren zijn de temperaturen in de oppervlaktelagen weer anders. Bij blauwe sterren zoals Sirius en Rigel komt de straling uit hetere lagen dan bij de geel-witte zon. Bij rode sterren zoals Aldebaran en Betelgeuze zijn de oppervlaktelagen koeler. Hun kleur geeft de temperatuur aan - net zoals dit het geval is bij een gloeiend gestookt potkachelkje (verschuivingswet van Wien).

Niet alle straling van de zon is zulke *thermische* straling. Op radio- en röntgen-golflengten treedt ook *niet-thermische* straling op die veel sterker is dan de op die golflengten zwakke thermische straling. Deze kan ondermeer worden veroorzaakt door snelle elektronen die botsen of die worden vastgehouden door een sterk magnetisch veld. Niet-thermische straling treedt veel op bij heftige verschijnselen zoals zonnevlammen.

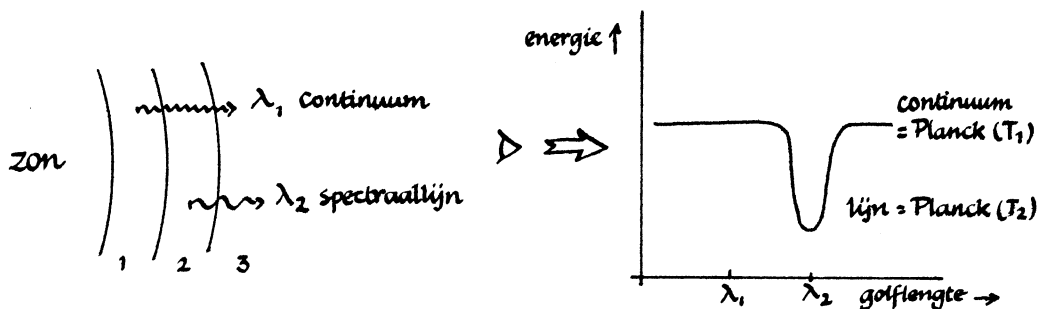
Waar we in zichtbaar licht vooral een *rustig* heelal zien, vol sterren die kalm hun kernenergie als thermische straling uitstralen, zien we op radio- en röntgengolflengten vooral *dynamische* processen: explosies op de zon, exploderende sterren - tot explosies van ganse melkwegstelsels toe.

2.5 Spectraallijnen: informatie op atomaire schaal

Als we de zonnestraling *heel fijn* in golflengte ontleden blijkt het zonnenspectrum te bestaan uit een *continuum* dat de globale energieverdeling van de vorige paragraaf volgt, met daarin talloze *spectraallijnen*. Alleen al het zichtbare deel van het zonnenspectrum bevat meer dan 20.000 spectraallijnen! Ze corresponderen precies met de discrete energiesprongen die de valentieëlektronen van de atomen in het zonnegas kunnen maken.

Het zijn *absorptielijnen*. De sprong van een valentieëlektron naar een hogere baan ("aanslag") onder absorptie van een foton van de juiste golflengte biedt een *extra* mogelijkheid tot absorptie. Door de grotere absorptie kijken we op de lijngolflengte minder diep in de zon. De temperatuur is daar lager en de intensiteit van de uit deze laag ontvangen straling is daardoor ook lager (wet van Planck; zie de vorige paragraaf).

De *spectraallijnen* in het zonnenspectrum zijn donker omdat de temperatuur in de zon naar buiten toe afneemt.



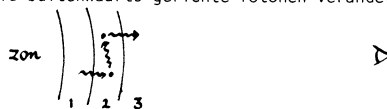
Bij de golflengte λ_2 van de spectraallijn kijken we minder diep in de zon dan de golflengte λ_1 van het continuum. We ontvangen de kleinere intensiteit die bij de lagere temperatuur T_2 van laag 2 hoort.

De vorming van de spectraallijnen in het zonnenspectrum berust dus op de *temperatuurafname*. Ze verschillen van de vorming van de bekende donkere natriumlijnen in het laboratorium:



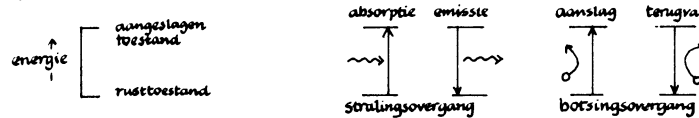
Deze ontstaan door *verstrooiing*: de natriumatomen worden aangeslagen door fotonen van de lichtbron en vallen weer terug onder uitzending van identieke fotonen - maar nu alle kanten uit. In de voorwaartse richting blijven er minder over: we zien *donkere* natriumlijnen gesuperponeerd op het continuum van de lichtbron.

Het verschil met de zon is dat de zon *niet* doorzichtig is in laag 2 op de golflengte van de lijn. Fotonen die terugwaarts of naar opzij worden verstrooid zullen weer andere atomen ontmoeten. Ze kunnen alleen *voorwaarts* (naar buiten) ontsnappen; de hoeveelheid buitenwaarts gerichte fotonen verandert bij herhaalde verstrooiing niet.



Alleen atomen in de doorzichtige laag 3 kunnen door verstrooiing een bijdrage geven - maar voor de meeste spectraallijnen is deze bijdrage verwaarloosbaar omdat deze laag vrijwel geen atomen bevat.

Belangrijker dan de verstrooiing zijn de *botsingen* tussen de atomen in laag 2 en vrije elektronen of andere atomen. Atomen in laag 2 die zijn aangeslagen door absorptie van fotonen uit laag 1 kunnen terugvallen onder afgifte van extra bewegingsenergie, zonder een foton uit te zenden. De straling uit laag 1 kan dus op de lijngolflengte in laag 2 vernietigd worden. Er tegenover staat dat atomen ook kunnen worden aangeslagen in een botsing door opname van bewegingsenergie. Als deze terugvallen komt er een nieuw foton vrij.



Excitatie en de-excitatie van een aangeslagen toestand kan geschieden zowel door absorptie, respectievelijk emissie van een foton als door opname, respectievelijk afgifte van bewegingsenergie tijdens een botsing.

In laag 2 zal de straling uit laag 1 bij de golflengte van de lijn dus worden omgevormd door botsingen, tot straling die overeenstemt met de beschikbare bewegingsenergie van de deeltjes - dus met de temperatuur ter plaatse.

De spectraallijnen bevatten een schat van informatie: ze vertellen ons welke atomen in het zonnegas vóórkomen (door vergelijking met laboratoriumspectra van de elementen) en hoeveel van iedere soort (uit de sterkte van de lijnen). Maar ook fysische grootheden zoals temperatuur en druk en de grootte van magnetische velden kunnen worden afgeleid uit het voorkomen en de vorm van de spectraallijnen. Doppler-verschuivingen van de spectraallijnen vertellen ons de grootte van snelheden in de gezichtsrichting.

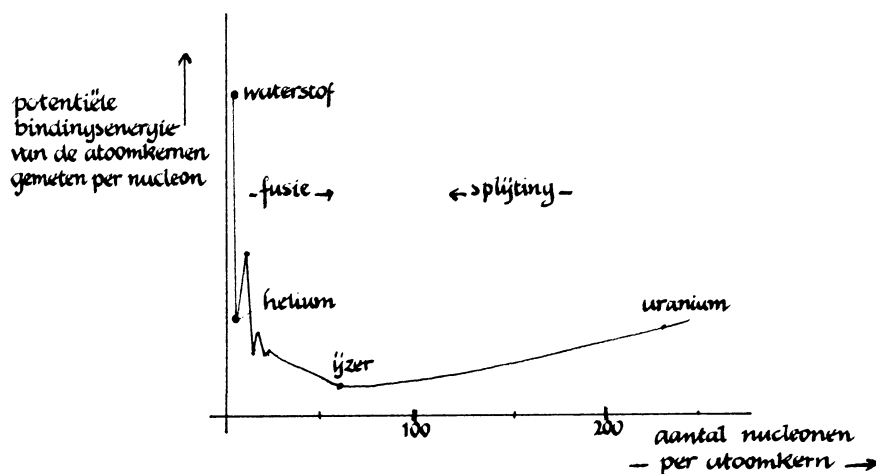
Spectraallijnen vertellen ons de fysische toestand in het zonnegas - op atomaire schaal.

Bovendien is deze code van atomaire informatie *onafhankelijk* van de afstand waarover het licht gereisd heeft. Spectrale analyse gaat evengoed voor een v \acute{e} rverwijderde ster als voor de zon, mits we met een grote telescoop voldoende licht kunnen verzamelen zodat we het spectrum voldoende fijn uit \acute{e} en kunnen rafelen.

Op het onderzoek van de spectraallijnen in sterspectra berust onze kennis van sterren - kennis die zo diep gaat dat we de structuur en de levensloop van de meeste sterren beter kennen dan die van onze eigen aarde.

3.4. Opwekking en transport van energie in de zon.

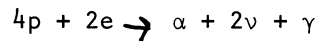
De grondslag van de kernenergie is de sterke binding van de nucleonen in een atoomkern door de kernkrachten (de sterke en zwakke wisselwerkingen). Veranderingen in de potentiële energie van de nucleonen ten aanzien van deze binding kosten of leveren energie, net zoals bij de verplaatsing van massa in een gravitatieveld. Vrijmaking van kernenergie is mogelijk omdat de binding per nucleon verschillend is in de verschillende atoomkernen die bij kernreacties betrokken zijn:



Bij toenemend atoomnummer wordt de pakking van de nucleonen per kern eerst hechter. Voorbij ijzer wordt de pakking per nucleon weer minder hecht, door het snel toenemende aantal neutronen en omdat de protonen deels zo ver naar buiten komen dat hun Coulombafstoting belangrijk wordt. Er zijn grote variaties van kern tot kern; de pakking van ${}^4_2\text{He}$ is uitzonderlijk hecht. Het verloop van de bindingsenergie met het atoomnummer is zo goed bekend omdat het correspondeert met het zogenaamde *massadefect*: hoe groter de pakking van de nucleonen, hoe kleiner de massa per nucleon. Het massadefect is in overeenstemming met de relatie $E = mc^2$ uit Einstein's speciale relativiteitstheorie: een vermindering van de energie E van een systeem laat zich meten als een afname van de totale massa m . Bij de *gravitationele* wisselwerking is het massadefect onmeetbaar klein omdat deze wisselwerking zo zwak is. De kernkrachten zijn echter zo sterk dat het massadefect voor atoomkernen goed meetbaar is - en de betrokken energieën enorm groot.

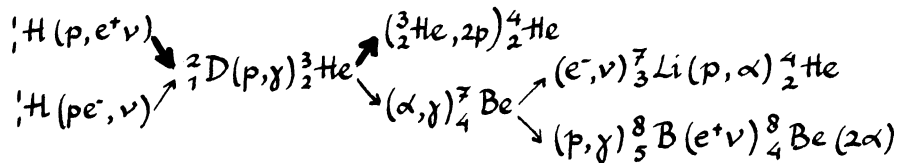
Energieleverende processen zijn: kernfusie links van ijzer en kernsplitsing rechts van ijzer; de omgekeerde processen *kosten* energie. De sprong van ${}^1_1\text{H}$ naar ${}^4_2\text{He}$, waarop de zon nu teert, is uitzonderlijk groot. De zon hoeft dus maar weinig waterstof om te zetten om haar energie afgifte te dekken. Omdat de zon bovendien grotendeels uit waterstof bestaat, duurt deze fase van haar ontwikkeling erg lang: 10 miljard jaar.

De in paragraaf 3.3. gegeven kernreactie

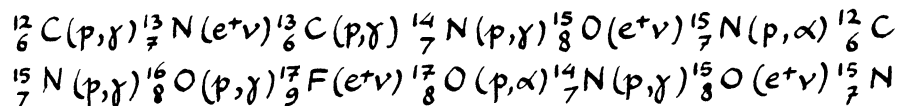


treedt niet zelf op. Het is het nettoresultaat van verschillende reeksen kernreacties, waarbij de protonen niet tegelijk maar nã elkaar, in tussenstappen, met andere atoomkernen reageren. Deze reacties zijn hieronder gegeven, als illustratie.

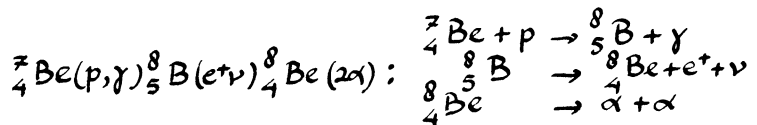
"proton-proton cycli"



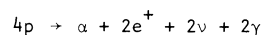
"CNO cycli"



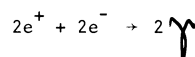
In deze verkorte notatie betekent



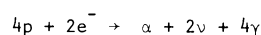
Deze complexe reactieketens komen alle neer op:



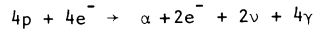
De zo gevormde positronen (e^+) reageren echter onmiddellijk met elektronen:



dus in totaal:



We kunnen in gedachten links en rechts nog twee elektronen optellen:



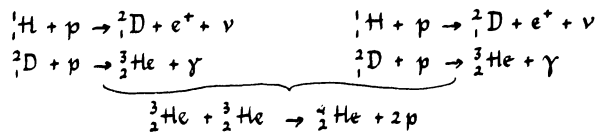
4 H atomen 1 He atoom

en dan zien we dat de beschrijving van het gas in het zonneinwendige als volledig geïoniseerde *atomen* behouden blijft.

In de proton-proton cycli dringen de protonen door in tamelijk zwaar geladen atoomkernen zoals ${}^7\text{Be}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{B}$. Hun thermische snelheden moeten voldoende hoog zijn om de Coulombafstoting te overwinnen. De temperatuur in het zonnecentrum is daarvoor feitelijk te laag: de gemiddelde snelheid van de protonen is onvoldoende. Alleen de protonen in de uiterste staart van de snelheidsverdeling hebben voldoende kinetische energie. Per proton is de reactiekans daarom slechts éénmaal per 10^{10} jaar - en dan alleen maar in het centrum van de zon, voor ongeveer 12 % van de waterstof in de zon.

De zon is dus een buitengewoon onrendabele fusiereactor - ofwel: een buitengewoon zuinige.

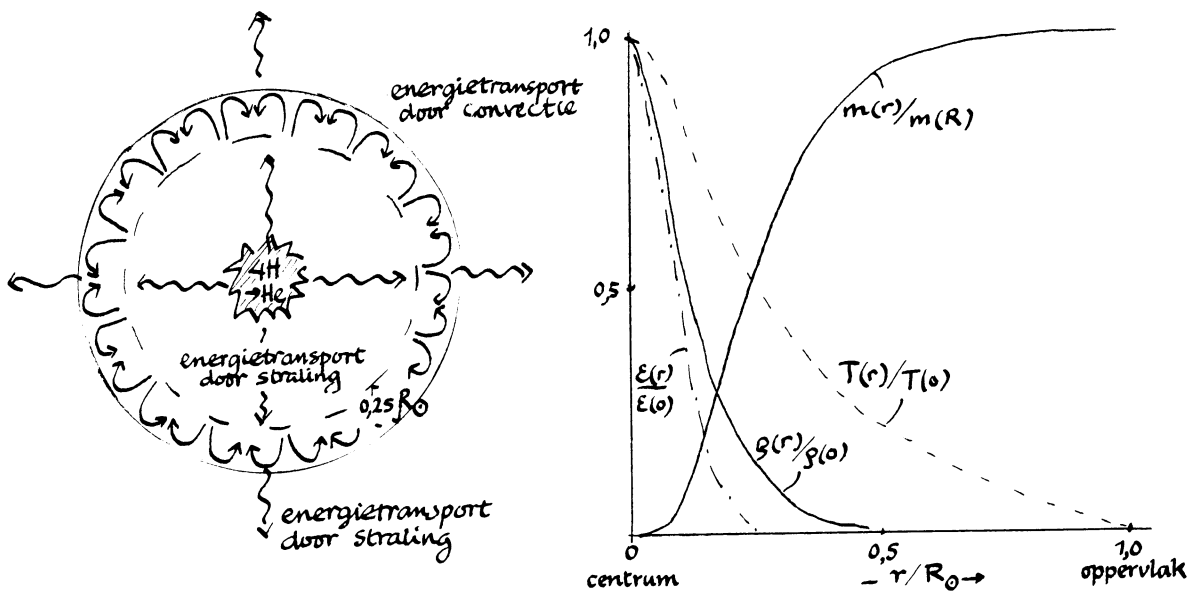
In de zon, met haar lage centrale temperatuur, is de eenvoudigste variant van de proton-proton cyclus de belangrijkste (hierboven met dikke pijlen aangegeven):



In sterren met een hogere centrale temperatuur kunnen de protonen doordringen in grotere, zwaarder geladen atoomkernen zoals ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{15}_8\text{O}$; daar zijn de andere cycli belangrijker.

De neutrino's nemen 5 % van de vrijgemaakte bindingsenergie mee de zon uit. De rest verlaat de zon ook, maar in de vorm van de straling van het zonneoppervlak. De zon zou veranderen als zich onderweg ergens energie zou ophopen; de afname van de druk en de temperatuur naar buiten zijn juist zo dat dit nergens gebeurt. Bij sommige sterren (Cepheïden, RR Lyrae sterren) hoopt zich periodiek wél energie op, resulterend in cycli van periodieke uitdijing en inkrimping van de ster. Het transport van energie door de zon heen geschiedt eerst door straling (voortdurende absorptie en uitzending van fotonen), meer naar buiten door convectie (hete gasbellen stijgen op, geven warmte af, krimpen en dalen weer).

Aan het oppervlak, en buiten de zon, wordt de energie weer door straling getransporteerd. Warmtegeleiding speelt geen belangrijke rol in de zon. De energiedichtheid van de energiestroom neemt naar buiten af omdat het oppervlak van de doorlopen bolschillen steeds groter wordt; de top van de Planckkromme verschuift van gammagolven naar zichtbare golven.



De opbouw van de zon. Links een schematische doorsnede met de soorten energietransport. Rechts het verloop van enige fysische grootheden in de zon, van het centrum ($r = 0$) tot het oppervlak ($r = R_0$): de energieopwekking ϵ door de waterstoffusie, de massadichtheid ρ , de temperatuur T en de massa m van de bol met straal r .

LITERATUUR

Een uitstekend boek op VWO-niveau over de in deze tekst behandelde onderwerpen is: C. de Jager en E.P.J. van den Heuvel, "Ontstaan en levensloop van sterren", Thieme, Zutphen, 1972. Herzien in 1977.

Voor de nieuwste ontwikkelingen in dit onderwerp (zoals de waarnemingen van röntgendubbelsterren, en de theorieën over "gewone", zeer lichte en zeer zware zwarte gaten) is men aangewezen op het tijdschrift "Zenit", uitgegeven door de Stichting "De Koepel", Nachtegaalstraat 82 bis, Utrecht, telefoon 030-311360, die ook dit pakket verzorgde. Dit tijdschrift bevat veel artikelen van vakastronomen, speciaal voor leken geschreven.

Het boek "De Mens in het heelal" van Chriet Titulaer (Elsevier, 1977) bevat veel fraaie foto's en kan dienen als eerste kennismaking met de sterrenkunde.

Een goed overzicht van de sterrenkunde biedt de "Sesam atlas van de astronomie", door J. Herrmann, Bosch en Keuning, Baarn, 1975

Hetzelfde onderwerp wordt véél diepgaander behandeld in het keuzevak "Astrofysica" van J. van der Rijst en C.Zwaan voor de hoogste klassen van het VWO, editie ENVON, Wolters Noordhoff, Groningen 1978.

Dankbetuiging

De Stichting "De Koepel" bedankt al degenen die hebben bijgedragen aan het tot stand komen van deze onderwijsmap.

In het bijzonder de beide auteurs, Dr. R.J. Rutten en mevrouw drs. J.E. Geuzebroek-Frederik. Daarnaast de heren de Graaff, van den Heuvel, Lignac, van der Rijst en Zwaan voor hun kritisch commentaar en Dr. T. de Groot voor de adviezen ten aanzien van de poster. Mevrouw drs. Chr. Jol danken wij voor de hulp bij het opstellen van de enquêtevragen.

De Nederlandse Astronomenclub en het Ministerie van Onderwijs zijn wij erkentelijk voor het verlenen van financiële steun. Laatstgenoemde ook voor het ter beschikking stellen van de adressen van de scholen.

Tenslotte een woord van dank aan mevrouw L.H. Tappermann voor het typen van de eerste versie van het manuscript.

De heer F. Reijmerink en mevrouw J.D. van Middelkoop-Alberts van de Stichting "De Koepel" verzorgden respectievelijk de lay-out en het typewerk.