

# ‘Het Levend Heelal’

## LEVEN EN DOOD VAN STERREN

Dr. F.P. Israel, Sterrewacht Leiden

### 1 EIGENSCHAPPEN VAN STERREN

#### 1.1 Aantallen

Met het blote oog zijn aan de hemel ca. 3000 sterren te zien; het totaal aantal met het blote oog zichtbare sterren is dus ca. 6000. Met een kijker neemt het aantal zichtbare sterren snel toe. Het Melkwegstelsel bevat ca. 200 miljard sterren.

#### 1.2 Afstanden

Alleen van de meest nabije sterren (een zeer geringe fractie van het totaal aantal sterren) kan de afstand direct bepaald worden volgens de principes van de klassieke *driehoeksmetkunde*. Van alle andere sterren kan de afstand slechts *langs indirecte weg* gevonden worden. De meest nabije ster is de Zon, op een afstand van 150 miljoen km, door het licht overbrugd in 8 minuten, zodat de afstand van de Zon 8 lichtminuten is. De op één na dichtstbijzijnde ster is  $\alpha$  Centauri aan de Zuidelijke sterrenhemel (niet zichtbaar in Nederland), op een afstand van 4 lichtjaren ( $4 \times 10^{16}$  meter). De meeste sterren die aan de hemel met het blote oog zichtbaar zijn, staan op afstanden van *tientallen of zelfs honderden lichtjaren*. Deze sterren maken evenals de Zon deel uit van het *Melkwegstelsel*. De Melkweg heeft een diameter van ongeveer 65 000 lichtjaar.

#### 1.3 Massa

De massa van sterren kan strikt genomen slechts in bijzondere gevallen bepaald worden, namelijk waar twee sterren op bekende afstand om elkaar heen wentelen (dubbelsterren). Men gebruikt daartoe de zwaartekrachtwet van Newton (zie College 3 van Icke) en lost op:

$$(G m_1 m_2) / (r_1 + r_2)^2 = m_1 r_1 (2\pi/t)^2 = m_2 r_2 (2\pi/t)^2$$

waarin  $m_1$  en  $m_2$  de massa's van de twee sterren zijn,  $r_1$  en  $r_2$  de respectieve afstanden tot hun gemeenschappelijk massamiddelpunt en  $t$  hun periode van omloop is.

## 1.4 Temperaturen

De oppervlaktetemperatuur van een ster wordt bepaald aan de hand van het *spectrum* van het ontvangen sterlicht. Analyse van de *absorptielijnen* in het ster-spectrum maakt een vrij nauwkeurige temperatuurbepaling mogelijk. Een ruwe maat voor de temperatuur van een ster is zijn *kleur*. Het verband tussen kleur en temperatuur wordt gegeven door de zogeheten *Verschuivingswet van Wien*, die de golflengte  $\lambda_{max}$  waarop de meeste straling wordt geproduceerd ('kleur') relateert aan de temperatuur  $T$ :

$$\lambda_{max}T = 0.0029 \text{ m K}$$

Stertemperaturen variëren van ca. 3000 K (dieprode kleur) tot ca. 50 000 K (intens blauwe kleur). De Zon is een lichtgele ster met een temperatuur van ca. 6000 K. Naar het inwendige van een ster lopen temperatuur en druk zeer snel op tot waarden van *tientallen miljoenen Kelvin* of meer.

## 1.5 Lichtkracht

De lichtkracht of het vermogen van een ster is de *hoeveelheid energie die per seconde het steroppervlak verlaat* in de vorm van licht, warmtestraling, UV-straling etc. Hij wordt gegeven door:

$$L_* = 4\pi R_*^2 F_* = 4\pi r_*^2 \sigma T_{eff}^4$$

waarin  $R_*$  de afstand tot de ster in meters, en  $F_*$  het op Aarde ontvangen vermogen per vierkante meter (ook wel flux genoemd),  $r_*$  de straal van de ster in meters,  $T_{eff}$  de effectieve temperatuur van de ster in Kelvins en  $\sigma$  de zgn. constante van Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Watt m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).

Dit betekent bijv.: als we op Aarde twee sterren even helder zien, terwijl de één twee keer verder weg staat dan de ander, dan heeft de verste ster een vier keer zo grote lichtkracht, en ook : als twee sterren even groot zijn, en de ene is twee keer zo heet als de ander, dan heeft die ster een zestien keer zo grote lichtkracht.

De Zon heeft een lichtkracht van  $2 \times 10^{26}$  Watt; dat komt overeen met het vermogen van honderd miljoen maal een miljard grote electriciteitscentrales op Aarde. Op Aarde ontvangen wij daarvan ca. 1400 Watt per vierkante meter.

## 1.6 Verband tussen Lichtkracht en Massa

Voor de meeste sterren blijkt de empirische massa-lichtkracht-wet te gelden:

$$(L_*/L_\odot) = (M_*/M_\odot)^{3.5}$$

Voorbeeld: een ster met tweemaal de massa van de Zon heeft een massa die  $2^{3.5}$ , i.e. ruim tienmaal, groter is.

De Zon heeft een massa van  $2 \times 10^{30}$  kg. Dat is 300 000 maal zwaarder dan de Aarde, en nog altijd duizend maal zwaarder dan de meest massieve planeet van het zonnestelsel, Jupiter.

## 1.7 Afmetingen

De Zon heeft een straal van  $7 \times 10^5$  km; hij is daarmee meer dan 100 maal groter dan de Aarde. Door de lichtkracht  $L_* = 4 \pi r_*^2 \sigma T_{eff}^4$  in zonseenheden uit te drukken krijgen we een eenvoudiger uitdrukking:

$$(L_*/L_\odot) = (T_*/T_\odot)^4 \times (r_*/r_\odot)^2.$$

Op deze wijze kan men uit de temperatuur en de lichtkracht van een ster zijn afmeting bepalen zonder hem in een telescoop van een puntbron te kunnen onderscheiden! Tegenwoordig kan met bijzondere technieken de afmeting van de allergrootste, nabije sterren ook direct meten.

## 1.8 Hertzsprung-Russell Diagram

Men kan sterren in een diagram plotten waarin de horizontale as temperatuur (of kleur) verbeeldt, naar links oplopend, en de verticale as lichtkracht of helderheid weergeeft. Het blijkt dat de sterren niet willekeurig over zo'n diagram verdeeld zijn. De meeste sterren liggen in een band, diagonaal van linksboven (blauw/heet, zeer helder) naar rechtsonder (rood/koel, lichtzwak). Dit noemt men de *hoofdreeks*. Ook de Zon ligt op de hoofdreeks. Uit het bovenstaande blijkt dat deze hoofdreeks ook een reeks van massa's vertegenwoordigt: grote, massieve sterren linksboven, kleine lichte sterren rechtsonder.

Buiten de hoofdreeks treft men nog aan *rode reuzen*, koeler maar lichtkrachtiger dan de Zon, *rode en blauwe superreuzen*, koeler resp. heter dan de Zon, véél lichtkrachtiger, en *witte dwergen*, heter maar veel lichtzwakker (en kleiner dan de Zon).

Type Ster	Straal in $r_{\odot}$	Lichtkracht in $L_{\odot}$
Superreus	100 - 1000	100 000
Reus:	10 - 200	1000
Hoofdreeks:	0.1 - 10	1/1000 – 100 000
Witte Dwergeren:	0.001 - 0.1	1/100

## 2 ONTSTAAN VAN STERREN

De ruimte is *dun bevolkt met sterren*. In de buurt van de Zon is de onderlinge afstand tussen de sterren ca. 5 lichtjaar  $\approx 50\,000$  miljard kilometer, ofwel: de onderlinge afstand van sterren is ongeveer 10 miljoen ( $10^7$ ) maal hun eigen diameter.

De ruimte tussen de sterren is *niet geheel leeg*: per kubieke centimeter bevinden zich daarin enkele waterstofatomen. Hoewel dit interstellair gas daarmee ongeveer 1000 miljard maal ijler is dan het ijlste vacuum dat men op Aarde kan maken, is de ruimte zo groot dat zulke ijle gaswolken uiteindelijk toch *aanzienlijke massa's* kunnen hebben: duizendmaal of meer massa dan de Zon. Tussen de waterstofatomen komen ook atomen van andere elementen voor (vooral helium, neon, koolstof, stikstof en zuurstof), maar wel in veel mindere getale. Merk op dat de voor het leven belangrijkste elementen behoren tot de minst zeldzame! Tenslotte is het gas ook in lichte mate ‘verontreinigd’ met rook- of roetdeeltjes (interstellair stof)

In het algemeen zijn die wolken in evenwicht. De interne gasdruk volgens:

$$\text{de ideale gaswet} \quad p = NkT/V = \rho kT$$

waarin  $p$  = druk,  $N$  = aantal deeltjes,  $T$  = temperatuur,  $V$  = volume,  $\rho = N/V$  = dichtheid,  $k$  = constante van Boltzmann.

weegt juist op tegen de onderlinge gravitatie-aantrekkingskracht der gasdeeltjes.

In die ijle wolken gas en stof kunnen zich door al dan niet toevallige omstandigheden *verdichtingen* vormen. Voor een wolk in aanvankelijk evenwicht leidt een plotselinge *verhoging van dichtheid* of een plotselinge *verlaging van temperatuur* (afkoeling) onherroepelijk tot samentrekking. Zulke omstandigheden doen zich voor bijv. bij passage van een *schokgolf*. Daarbij doet zich in de wolk een situatie voor waarbij de inwendige druk niet langer opweegt tegen de onderlinge aantrekkingskrachten: de wolk *stort in*. Bij die instorting komt potentiële energie vrij, die wordt omgezet in kinetische energie van warmte (Wet van Behoud

van Energie), zodat *de temperatuur stijgt*. In de samentrekkende gaswolk nemen temperatuur, druk en dichtheid toe. Maar omdat de wolk nu opnieuw aan de evenwichtsregels van de ideale gaswet gehoorzaamt, kan de inwendige druk nooit hoog genoeg oplopen om de samentrekking tot een halt te brengen. Integendeel: een deel van de vrijgekomen thermische energie wordt uitgestraald, bijv. als warmtestraling (infraroodstraling). Daardoor neemt de toch al tekort schietende inwendige energie van de wolk alleen maar verder af. Voor stopzetting van de samentrekking is het noodzakelijk dat het zo ontstane tekort aan inwendige energie door een *nieuwe, inwendige energiebron* aangevuld wordt. En dat gebeurt inderdaad wanneer in het steeds sneller samentrekkende centrum van de wolk de temperatuur en de druk zó hoog zijn opgelopen dat het *proces van kernfusie* spontaan start. Een ster is dan ontstaan. De nieuwe energiebron levert zoveel extra energie dat daardoor de inwendige druk voldoende hoog oploopt om verdere samentrekking een halt toe te roepen, ja zelfs even in uitdijning om te zetten – maar niet voor lang. Evenwicht bestaat zolang de kernfusie in het inwendige per seconde precies evenveel energie vrijmaakt als aan het oppervlak per seconde wordt uitgestraald.

De kwantitatieve details van dit proces staan uitgewerkt in de Appendix (Sectie 7).

### 3 KERNFUSIE - LEVENSBRON VAN STERREN

Zoals de Zon straalt elke ster voortdurend energie uit in de vorm van licht, warmte etc. Zolang dit *verlies van energie aan het oppervlak* van de ster maar gecompenseerd wordt door voortgaande *produktie van energie in het inwendige*, is de ster stabiel: de inwendige druk (welke de ster wil doen opzwellen) is juist in evenwicht met de zwaartekracht (welke de ster verder wil doen inkrimpen).

De inwendige energieproductie vindt plaats door middel van kernfusie, waarbij lichte elementen tot zwaardere worden omgevormd. De massa van het eindproduct is iets geringer dan de massasom van de samenstellende elementen. Het kleine massaverschil (*massadefect*) is vrijgekomen als energie. Uit de fameuze

*Einstein-vergelijking:*

$$E = mc^2$$

volgt dat een kleine hoeveelheid materie  $m$  kan overgaan in een relatief grote hoeveelheid energie  $E$ . De evenredigheidsfactor is  $c^2$ , waarin  $c$  de lichtsnelheid is ( $3 \times 10^8$  m/sec).

De belangrijkste bron van energie in sterren is de *kernfusie van waterstof naar helium*. Bij temperaturen beneden de 25 miljoen K verloopt dit direct via de zogeheten protoncyclus, bij temperaturen daarboven via de koolstofcyclus (niet te verwarren met koolstofverbranding! – in de koolstofcyclus dient koolstof uitsluitend als katalysator). Bij beide processen worden steeds 4 waterstofkernen (protonen) in een heliumkern (2 protonen, 2 neutronen) omgezet.

Een nieuwgevormde heliumkern He heeft een massa 0.7% kleiner dan de massa van 4 waterstofkernen H. Dit verschil is omgezet in energie.

Als  $m_H = 1.67 \times 10^{-27}$  kg, dan levert elke fusie een energie op van:

$$E = 0.007 \times 4 \times 1.67 \times 10^{-27} \times 9 \times 10^{16} = 4.2 \times 10^{-12} \text{ Watt sec.}$$

Geheel overeenkomstig brengt elke fusie met zich mee een massaverlies van  $4.8 \times 10^{-29}$  kg.

De Zon heeft een vermogen van  $L_\odot = 3.9 \times 10^{26}$  Watt. Hij moet dus per seconde ongeveer  $L/E = 10^{38}$  fusiereacties verrichten om dit energieverlies te compenseren. Daarbij verliest hij dus ook elke seconde een massa van  $\Delta M = 4.5 \times 10^9$  kg.

Zou de Zon geheel uit waterstof bestaan, en zou alle waterstof tot helium verbranden, dan zou de Zon een totale levensduur van  $10^{11}$  jaar kennen. In werkelijkheid bestaat 10% van de Zon (25% van de massa) uit helium, en zijn alléén in het centrum van de Zon temperatuur en druk hoog genoeg om de heliumfusie te doen plaatsvinden. Veel waterstof ‘doet niet mee’. De werkelijke levensduur van de Zon is dan ook ‘slechts’ 12 miljard jaar.

## 4 PLANEETTEMPERATUREN

### 4.1 Algemeen

Men kan de wet van Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T^4$$

gebruiken worden om de gemiddelde temperatuur op een planeet te berekenen tengevolge van het opvallende licht van zijn moederster (in ons geval de Zon).

Per seconde verlaat een energiestroom het totale steroppervlak (vgl. Sectie 1.5):

$$E_* = 4\pi r_*^2 \sigma T_*^4$$

waarin  $T_*$  de stertemperatuur en  $r_*$  de straal van de ster is. Op de afstand  $R$  van de planeet tot de Zon constateert men (Wet van Behoud van Energie) een energiestroom per eenheid van oppervlak:

$$F_p = E_* / (4\pi R_p^2)$$

Een fractie  $a$  van deze flux wordt gereflecteerd; een fractie  $(1 - a)$  wordt geabsorbeerd; absorptie vindt plaats over het geprojecteerde oppervlak van de planeet, een schijf met oppervlak  $\pi r_p^2$ , zodat:

$$E_{abs} = (1 - a) \pi r_p^2 F_p = (1 - a) \pi r_p^2 (r_*/R_p)^2 \sigma T_*^4.$$

De gereflecteerde fractie  $a$  wordt het albedo van de planeet genoemd. Wolken hebben een hoog albedo ( $a = 0.7$ ) terwijl poreus (vulkanisch) gesteente een laag albedo ( $a = 0.1$ ) heeft.

Omdat de planeet in evenwicht is (hij koelt niet af, hij warmt niet op) wordt de *gehele* geabsorbeerde energie door de planeet weer uitgestraald. Bij een planeet als de Aarde met een relatief snelle aswenteling en een niet te verwaarlozen dampkring, zijn de temperatuurverschillen tussen de dag- en de nachtzijde niet groot, en vindt uitstraling effectief plaats over een oppervlak  $4\pi r_p^2$ , zodat:

$$E_p = 4\pi r_p^2 \sigma T_p^4 = E_{abs}$$

waarin  $T_p$  de gemiddelde planeettemperatuur. Hieruit volgt:

$$\sigma T_p^4 = 4 \sigma T_*^4 (r_*/R_p)^2 (1 - a)$$

ofwel:

$$T_p/T_* = 0.7 (r_*/R_p)^{1/2} (1 - a)^{1/4}$$

Aangezien planeten in het algemeen staan op afstanden  $R_p \gg r_*$ , zullen hun temperaturen liggen in de orde van enkele honderden K. Zij stralen dan voornamelijk in het infrarood; in het visueel ziet men slechts teruggekaatst zonlicht (albedo!). Wanneer we voor de Aarde en haar burens zo de temperatuur uitrekenen, vinden we voor Mercurius een goede overeenstemming tussen de berekende en de gemeten temperatuur, maar de Aarde zelf, Mars en vooral Venus hebben in werkelijkheid een *veel hogere temperatuur* dan berekend. Hoe komt dat?

Planeet	$R_p$ (AE)	$a$	Temperatuur	
			Berekend (K)	Gemeten (K)
Mercurius	0.4	0.06	623	600
Venus	0.7	0.72	236	600
Aarde	1.0	0.39	244	290
Mars	1.5	0.16	214	240

Merk op dat Mercurius en Mars een laag albedo (gesteenten) hebben; de Aarde en vooral Venus hebben een hoog albedo (wolken).

## 4.2 Broeikaseffect

Venus en Mars hebben een dampkring die vrijwel geheel uit koolzuurgas bestaat; Venus heeft een zeer dichte dampkring (druk: 100 bar), Mars een zeer ijle (druk: 0.01 bar). De Aardse dampkring bevat een kleine hoeveelheid koolzuurgas, en daarnaast ook waterdamp, methaan en stikstofdioxide. Dit zijn alle zogeheten *broeikasgassen*.

Het broeikaseffect werkt als volgt. Vrijwel alle zonne-energie ( $T_{zon} = 5800$  K, stralingspiek in het visueel) bereikt ongehinderd de diepere lagen van de dampkring en het oppervlak van de planeet, welke daardoor in eerste instantie een temperatuur  $T_p$  krijgt. Aangezien  $T_p$  veel lager is dan  $T_{zon}$ , vindt de maximale *uitstraling* door de planeet zelf niet langer plaats in het visueel, maar verschoven naar een veel langere golflengte in het nabij-infrarood (wet van Wien – zie Sectie 1.4). In *dat golflengtegebied* absorberen de moleculen van het broeikasgas echter sterk (vergelijk: microgolfoven waarin water snel verhit kan worden), zodat de dampkring voor straling op *die golflengten* vrijwel ondoorzichtig is. De geabsorbeerde straling doet het gas in de dampkring in temperatuur toenemen. Door die hogere temperatuur neemt de uitstraling op andere golflengten dan het infrarood sterk toe, zodat uiteindelijk toch alle ontvangen zonne-energie weer terug de ruimte ingaat, en de temperatuuroptimalisatie, bij een hogere temperatuur, tot stilstand komt.

Opmerkelijk gegeven: van de drie 'aardse' planeten is alleen de Aarde zelf geschikt voor menselijk leven. Mars heeft een ijle dampkring en is ondanks zijn broeikaseffect te koud. Venus heeft daarentegen een zeer dichte dampkring en is veel te heet ('runaway greenhouse'). Beide extreme 'klimaten' zijn stabiel tegen verstoringen. Maar hoe stabiel is het klimaat van de Aarde?

## 4.3 Bewoonbare Planeten bij Andere Sterren

Hebben andere sterren ook planeten? Voor sterren als de Zon is het antwoord bevestigend. Zulke planeten zijn langs indirecte weg waargenomen, zij het dat de totnogtoe gevonden systemen, waarschijnlijk tengevolge van selectieve waarneming, in het geheel niet lijken op het Zonnestelsel en hoogstwaarschijnlijk ook geen bewoonbare planeten kunnen bevatten.

Sterren beduidend massiever en heter dan de Zon zijn ongeschikte kandidaten: zij leven vrij kort, evolueren snel en eroderen in zo korte tijd de oerwolk waaruit zich



planeten hadden kunnen vormen dat daarvan geen sprake meer kan zijn. Veel van de inmiddels met kunstmaantelescopen gevonden stofringen rond sterren zijn dan ook waarschijnlijk ‘mislukte’ zonnestelsels.

Sterren van veel geringere massa en lichtkracht dan de Zon zijn evenmin goede kandidaten. Zij hebben zo weinig massa, dat de bijbehorende ‘oerwolk’ nauwelijks echte planeten kan vormen. Ook dubbelsterren zijn niet zo geschikt. De aanwezigheid van een tweede massief lichaam leidt in veel gevallen tot flinke turbulentie in de gas- en stofschijf, waarbij de vorming van planeten wordt verstoord. Jupiter heeft, met een massa  $M$  van slechts  $0.001M_{\odot}$ , de vorming van een planeet tussen hemzelf en Mars kunnen verhinderen. Een lichaam met  $M = 0.1M_{\odot}$  (ster) op de plaats van Jupiter zou voor ons catastrofaal geweest zijn.

Om leven te kunnen herbergen moeten planeten zich in de zgn. bewoonbare zone bevinden, dat wil zeggen niet te dichtbij de ster (te heet) en niet te ver van de ster (te koud). De begrenzingen van de bewoonbare zone bij andere sterren hangen af van verschillende factoren, zoals:

- a. vermogen: afmeting en temperatuur van de ster
- b. evolutietempo van de ster
- c. eigenschappen van de planeetatmosfeer (bijv. grootte van broeikas effect)
- d. nabije (interstellaire) omgeving

Factoren a. en b. zijn beide functies van de massa van een ster. mede daarom richten zoektochten zich voornamelijk op sterren met een massa ongeveer gelijk aan die van de Zon. In ons zonnestelsels bevinden de buurplaneten Venus ( $R = 0.7R_{Aarde}$ ) en Mars ( $R = 1.5R_{Aarde}$ ) zich – klaarblijkelijk – juist buiten de bewoonbare zone. Venus ontvangt per seconde tweemaal zoveel energie van de Zon als de Aarde, en Mars tweemaal zo weinig. Een factor twee variatie in energiestroom is kennelijk fataal.

## 5 DOOD VAN STERREN

### 5.1 Eindige Levensduur

Sterren hebben niet het eeuwige leven. Zodra de voor kernfusie beschikbare hoeveelheid brandstof is verbruikt, wordt in het inwendige geen nieuwe energie meer geproduceerd, terwijl de ster aan zijn oppervlak nog wél energie uitstraalt.

Hierdoor neemt de totale inwendige energie af en zal de zwaartekracht de ster weer doen instorten.

De brandstof-hoeveelheid is evenredig met de ster massa  $M$ ; het verbruik is evenredig met het vermogen  $L \propto M^{-3.5}$  (zie boven). De levensduur  $t$  wordt bepaald door de verhouding brandstofvoorraad/brandstofverbruik:

$$t_*/t_\odot \approx (M_*/M_\odot) / (L_*/L_\odot) = (M_*/M_\odot)^{-2.5}.$$

Voorbeelden:

Kleine rode sterren zijn koel en hebben een kleine massa; zij leven veel langer dan de Zon. Het heelal is niet ouder is dan 15 miljard jaar, en de levensduur (NIET de leeftijd!) van de Zon is al 12 miljard jaar. Sterren met een massa maar iets lager dan die van de Zon hebben een levensduur die de leeftijd van het heelal overtreft. *Alle ooit gevormde sterren minder massief dan de Zon bestaan dus nog steeds!*

Grote blauwe sterren zijn heet en hebben een grote massa; zij leven heel veel korter dan de Zon. Bijvoorbeeld: een ster met  $M = 10M_\odot$  heeft een levensduur van ca.  $1/300e t_\odot$  ofwel slechts een kleine 40 miljoen jaar. De meest massieve sterren met  $M_* = 50M_\odot$  hebben een enorme lichtkracht, maar leven juist daardoor slechts een miljoen jaar. *Van alle sterren ooit gevormd met een massa aanmerkelijk hoger dan die van de Zon, is er vrijwel geen meer over!* Zulke sterren komen en gaan in een kosmische oogwenk. Toen nog niet zo lang geleden de dinosaurussen uitstierven, bestond het prachtige sterrenbeeld Orion met zijn vele hete blauwe sterren niet eens.

## 5.2 Crisis

Wanneer de voor fusie beschikbare waterstof in het hart van de ster grotendeels in helium is omgezet, treedt een crisis op. De energieproductie schiet tekort om de inwendige druk op peil te houden en de hete, maar inerte heliumkern trekt samen. Hierdoor stijgt de centrale temperatuur; er kan nog waterstoffusie plaatsvinden in een schil rond de heliumkern. Tengevolge daarvan zet de mantel van de ster uit en koelt af, zodat de ster veel groter en roder wordt. Dus: *de kern krimpt in en wordt heter, maar de mantel zet uit en wordt koeler.*

Sterren die veel massiever zijn dan de Zon, ontwikkelen ook een relatief massieve heliumkern die door voortdurende samentrekking een temperatuur van ca. 100 miljoen Kelvin kan bereiken. Dàt volstaat om een nieuw fusieproces in gang te zetten waarbij steeds drie heliumatomen fuseren tot een koolstofatoom.

De heliumfuserende kern wordt omgeven door een inerte heliumschil; deze wordt

weer omgeven door een schil waarin bij lagere (maar nog steeds hoge) temperatuur waterstoffusie optreedt, en daarom heen bevindt zich weer de hete, maar inerte waterstofmantel van de ster. Op analoge wijze ontstaat bij toenemend heliumverbruik in de kern een inerte, samentrekkende koolstofkern omgeven door een heliumbrandende schil etc. Ook hier kan, na enige tijd, de samentrekkende koolstofkern zelf ook weer ‘ontbranden’ waarbij koolstof in nog zwaardere elementen wordt omgezet.

Al deze verschillende fusie-stadia duren steeds korter, want:

- (1). het aantal beschikbare atomen neemt – uiteraard – bij elk vólgend fusieproces drastisch verder af;
- (2). er zijn steeds hogere temperaturen (in een steeds kleiner volume) vereist, waarbij bovendien het fusietempo sterk toeneemt;
- (3) elk volgend fusieproces levert steeds minder energie op. Waar waterstof naar helium nog een rendement van 7 pro mille heeft, moet helium naar koolstof het doen met een rendement van 0.3 pro mille, ruim twintig maal lager.

Daardoor is de *effectieve levensduur van een ster nauwelijks langer dan de ‘hoofdreeksfase’ waarin de ster zijn energie aan waterstoffusie ontleent.*

### 5.3 Met een plof ....

Bij sterren van *intermediaire massa* komt dit proces tot stilstand als de kern uit een mengsel van zuurstof, neon en magnesium bestaat. De ster is dan instabiel geworden en verliest massa, in de vorm van virulente, soms zelfs semi-explosieve *sterrewinden*. Uiteindelijk zakt hij snel ineen tot een kleine, hete en zeer compacte ster. De overgang van *rode reus naar witte dwerg is plotseling*. De resulterende witte dwerg heeft niet veel meer dan een zonsmassa over, en is niet veel groter dan onze planeet Jupiter. Hij wordt voor verdere zwaartekracht-instorting behoed door de enorme druk die de elektronen in zijn inwendige uitoefenen; de ideale gaswet is niet meer van toepassing bij de enorme dichtheid die de witte dwerg kenmerkt. Hij produceert geen inwendige energie meer. De aanwezige energie wordt zeer langzaam uitgestraald, omdat hij maar klein is. Toch zal hij in de loop der tijden langzaam afkoelen, en daarbij steeds roder en lichtzwakker worden.

Is het *restant veel zwaarder dan een zonsmassa*, dan helpt zelfs de elektronendruk niet. De inwendige druk is dan zo groot dat de elektronen met de protonen versmelten tot neutronen. De ster krimpt in tot een *neutronenster* met een afmeting van slechts enkele tientallen kilometers, een beschamend einde voor een ster die begonnen is met een omvang veel groter dan die van de Zon! De dichtheid is enorm; de neutronen zijn zo sterk op elkaar geperst, dat zij op hun beurt nu

voldoende druk leveren om nog verdere inkrimping te voorkomen. De onooglijke neutronenster is een stabiel eindprodukt.

## 5.4 Met een klap ...

De *allerzwaarste sterren* ( $M \geq 10M_{\odot}$ ) kennen een meer spectaculair einde. Daar gaat de reeks van opeenvolgende kernfusieprocessen dóór met de vorming van steeds zwaardere elementen, totdat de kern vrijwel geheel uit ijzer bestaat. Dan is kernfusie als energiebron uitgeput, omdat de vorming van nog zwaardere elementen geen energie meer vrijmaakt, maar juist vereist.

De inerte ijzerkern trekt daardoor steeds sterker samen waarbij de temperatuur voortdurend oploopt. Wanneer de kern een temperatuur van 5 miljard Kelvin bereikt, produceert hij enorme hoeveelheden energierijke  $\gamma$ -straling. Deze is zó energetisch dat zij de ijzeratomen in de kern weer *splijt*. Hierbij worden grote aantallen *neutrino's* geproduceerd. Neutrino's hebben *geen lading en vrijwel geen massa*. Daardoor treden ze nauwelijks in wisselwerking met andere deeltjes en kunnen ze vrijwel ongehinderd uit het diepste van de ster de ruimte in ontsnappen. Bij het uiteenvallen van de ijzerkern wordt een groot deel van de *inwendige energie met de neutrino's plotseling uit de ster weggevoerd*; de centrale delen van de ster storten in. In het middelpunt van de ster, waar de instortende materie zichzelf ontmoet, ontstaat een zeer krachtige schokgolf die zich een weg naar buiten baant. De *implosie van de kern gaat over in een explosie van de ster*. De exploderende mantel kan de nu plotseling toegevoerde energie (ook een klein deel van de neutrino's draagt hieraan bij) niet onmiddellijk uitstralen. De gedurende korte tijd beschikbare, vrijwel onbeperkte hoeveelheden energie maken door kernfusie nu ook de endotherme *vorming van elementen zwaarder dan ijzer* (kobalt, uranium etc) mogelijk.

Meer dan de helft van de stermassa vliegt met snelheden van 10 000 km/sec de ruimte in. Daarbij neemt de helderheid van de exploderende ster in korte tijd toe tot *100 miljoen maal de oorspronkelijke helderheid*. Met zijn enorme helderheid domineert de zogeheten *supernova* gedurende korte tijd het licht van soms wel een heel melkwegstelsel. Al in een jaar wordt de uitdijende schil zo ijl en koel dat zijn licht uitdooft. De schil vermengt zich langzaam met het omringende interstellaire gas, tot hij na enkele duizenden jaren daarvan ononderscheidbaar is geworden. Dat *interstellaire gas wordt zo echter verrijkt met de elementen die de ster tijdens zijn leven door kernfusie heeft gemaakt*. Dit verrijkte gas is nu beschikbaar voor de volgende ronde van stervorming.

In het magere restant van ster zijn de dichtheden zo hoog dat ook hier een neutronenster van enkele tientallen kilometers diameter resteert. Wanneer de massa van deze restant echter meer dan een paar zonsmassa's bedraagt, dan is zelfs de

enorme neutronendruk niet in staat aan de zwaartekracht weerstand te bieden. De neutronenster krimpt in met toenemende dichtheid. Het object wordt zo compact dat zelfs licht er niet meer van kan ontsnappen; het object is dan onzichtbaar geworden, en een ‘zwart gat’ is ontstaan. De diameter (in kilometers) van het nu onwaarneembare deel van de ruimte dat het zwart gat inneemt is recht evenredig met de massa (in Zonsmassa’s) van het gat:

$$D_{ZG} = 6 M_{ZG}$$

De zwaartekracht van een zwart gat is nog wel voelbaar, en deze beïnvloedt de omgeving van het zwarte gat aanzienlijk. Dit geeft aanleiding tot verschijnselen die wél waarneembaar zijn. Van wat zich ín het zwarte gat afspeelt hebben we echter weinig of geen weet.

Er zijn relatief weinig zeer massieve sterren, zodat de verschijning van een supernova een zeldzame gebeurtenis is. Men schat dat in de hele Melkweg tussen de twee en vier keer per eeuw een supernova explodeert. Omdat de Melkweg groot is, ontsnapt het merendeel daarvan aan onze aandacht, en zien we op Aarde gemiddeld maar eens in de paar eeuwen zo’n verschijnsel met het blote oog. Op dit moment bekende kandidaten voor een spoedige (morgen? over 10 000 jaar?) supernova-explosie zijn de heldere sterren Betelgeuse (Orion), Antares (Schorpioen) alsmede  $\eta$  Carinae op het Zuidelijk Halfrond.

Supernova Fase	Tijdschaal
Kernfusie stopt	0
Kern stort in	0.001 sec
Neutrino produktie	0.01 sec
Explosie begint	1 sec
Vorming zeer zware elementen	dagen
Grote helderheid door uitdijende mantel	maanden
Supernovaschil lost op	honderden jaren

## 5.5 Of met een zucht ....

Sterren als *de Zon*, of met mindere massa ontwikkelen ook een inerte, samen-trekkende heliumkern, maar daarbij lopen de temperaturen langzamer en minder hoog op. Zo’n steeds dichter wordende kern groeit aan, terwijl de stermantel opzwellt en de ster een rode reus wordt, totdat plotseling de heliumfusie aanslaat. Bij de zogeheten ‘heliumflits’ wordt dan in enkele *minuten* tijds ca. 20% van alle helium in koolstof omgezet. Dit gaat gepaard met krachtige pulsaties van het sterlichaam. Terwijl de lichtkracht sterk schommelt stijgt de temperatuur van de kern. Wanneer de heliumfusie ten einde komt kan er nog even, afhankelijk van de

massa van de ster, een korte fase van koolstofvorming optreden. Daarbij wordt de ster dan een rode superreus. In een complexe reeks van lichtflitsen en pulsaties verliest die superreus echter tot de helft van zijn massa. De uiteindelijk overblijvende kleine, maar vrij hete blauwwitte ster doet de uitgestoten massa oplichten tot een zogeheten *'planetaire nevel'*. Die ster vervalt tot een witte dwerg, koelt langzaam af, wordt roder en lichtzwakker en steeds moeilijker waarneembaar.

Ster van:	Wordt:	Afmeting:	1 mm <sup>3</sup> weegt:
Geringe Massa	Witte Dwerg	≈ 20 000 km	1 kg
Intermediaire Massa	Neutronenster	≈ 30 km	200 000 ton
Hoge Massa	Zwart Gat	≥ 10 km	—

## 6 STEREVOLUTIE EN LEVEN

### 6.1 “We are star stuff”

In den beginne bevatte het heelal slechts enkele lichte elementen, voornamelijk waterstof en helium. Alle andere elementen zijn daarna ontstaan door kernfusie in het inwendige van sterren. Bij de ‘dood’ van sterren, dus bij supernova-explosies, bij de vorming van ‘planetaire nevels’ en ook bij de ‘sterrewinden’ die in de rode- (super)reus-fase optreden, worden die elementen aan het gas tussen de sterren teruggegeven (astratie). Elke nieuwe generatie sterren vormt zich uit gaswolken die iets meer ‘verrijkt’ zijn met kernfusieproducten zoals koolstof, zuurstof, stikstof etc. De Zon, en de planeten van het zonnestelsel zijn ongeveer 5 miljard jaar geleden gevormd, toen dit verrijgingsproces (of zo men wil, vervuilingsproces) al miljarden jaren had plaatsgevonden.

Zonder die inmiddels gevormde zware elementen zou er geen stof geweest zijn, en zouden solide planeten als de Aarde zich niet hebben kunnen vormen. Zonder die elementen zouden de organische moleculen waaruit het leven is opgebouwd niet bestaan. Het overgrote deel van ons lichaam bestaat uit atomen die ooit in het diepe inwendige van een ster gevormd zijn. In de woorden van Carl Sagan: “We are star stuff”. Ook de Aarde onder onze voeten en het dak boven ons hoofd bestaat voor een groot deel uit materiaal dat ooit deel van een ster uitmaakte. Beschouw het metaal waaruit uw fiets of auto is opgebouwd, het bestek waarmee u eet: het is diep in een massieve ster gevormd, en slechts door een catastrofale supernova-explosie bij ons gekomen.

## 6.2 Steeds maar warmer ...

De Zon is de ultieme bron van bijna alle energie op Aarde. Hij is stabiel maar niet geheel vrij van verandering. De vrij kleine korte-termijn wisselingen in helderheid (typisch 0.2%) kunnen toch al merkbaar klimatologische gevolgen hebben. Zo wordt de ‘Kleine IJstijd’ uit de 17e toegeschreven aan het zogeheten ‘Maunder Minimum (1645-1715) waarin de Zon ongebruikelijk weinig zonnevlekken vertoonde. Grotere helderheidswisselingen zouden tot catastrofale klimaatveranderingen leiden, maar daarvan schijnt de Zon gevrijwaard.

Op langere termijn is de situatie ongunstig. De Zon is tijdens zijn bestaan tot nu toe geleidelijk aan 30% lichtkrachtiger geworden. Men zou verwachten dat daardoor de *gemiddelde temperatuur op Aarde* met een bedrag van  $1.3^{1/4} = 7\%$ , ofwel zo'n 20 °C zou zijn toegenomen.

Door de aanwezigheid van gassen als waterdamp en koolzuur is de temperatuur van de Aarde thans ongeveer 40 °C hoger dan hij zonder broeikasgassen zou zijn. Het koolzuurgehalte van de atmosfeer is vroeger zeker veel hoger geweest. Mogelijk is de *toenemende helderheid* van de Zon gecompenseerd door een *afnemend broeikas-effect*. Een voortgaande geleidelijke afname van het koolzuurgehalte kan het broeikaseffect van de dampkring net voldoende verminderen om de temperatuur constant te doen zijn. Als dat zo is, ziet het er somber uit, want het regelsysteem is dan bijna aan het einde van zijn bereik. Het koolzuurgehalte van de dampkring is nog slechts 0.03 %, en de Zon neemt nog steeds in lichtkracht toe ...

Over 5 miljard jaar is de lichtkracht van de Zon verdubbeld, en zonder een *aanmerkelijke afname* van het huidige broeikaseffect zou de temperatuur dan zo'n 50 °C *hoger* liggen. Zo'n afname is echter niet erg waarschijnlijk, want hij vereist bijv. de verwijdering van alle waterdamp uit de dampkring. Al veel eerder, mogelijk op de toch wel erg korte tijd tijdschaal van ongeveer honderd miljoen jaar, zal de helderheidstoename van de Zon voor problemen op Aarde zorgen.

## 6.3 ... en steeds groter

De Zon wordt vooral helderder omdat hij opzwellt; thans neemt de Zon elk miljard jaar ongeveer 6% in omvang toe. Over ongeveer 4 miljard jaar versnelt het tempo van opzwellen, en minder dan 2 miljard jaar later wordt slokt de Zon de planeet Mercurius op, en strekt hij zich uit tot de baan van de planeet Venus, die evenwel net de dans ontspringt. Vanuit de Aarde gezien is de Zon dan een reusachtige rode gasbol, die aan de hemel een hoek van 90° beslaat. De temperatuur van de Zon is nu weliswaar gezakt tot 3500 K, maar zijn monsterachtige gezwollenheid heeft de temperatuur op Aarde dan toch doen stijgen tot 1000 °C: weg dampkring, weg

oceanen ...

Voor de mens is het dan nog net te harden op de planeet Pluto, maar ook niet voor lang. In de daaropvolgende paar honderd miljoen jaar schommelt de afmeting van de Zon namelijk abrupt heen en weer met een factor 10. De lichtkracht varieert met een factor 100, en na 800 miljoen jaar is het afgelopen: de Zon stort plotsklaps in tot een witte dwerg, met een afmeting ver beneden zijn huidige formaat. Zijn lichtkracht neemt eveneens dramatisch af, en terwijl het heelal rustig voortbestaat is het leven van ons zonnestelsel over.

## 7 Appendix: Fysica van Stervorming

### 7.1 Energie Vrijkomend bij Samentrekking

Bij vrije val van een kleine massa  $dm$  in het zwaartekrachtveld van een totale massa  $M$  vanuit oneindig tot op een afstand  $r$  tot massa  $M$  komt een potentiële energie vrij volgens:

$$E_{grav} = \int_r^\infty G M dm / r'^2 dr' = G M dm / r$$

De totale potentiële energie die vrijkomt bij de vrije val van *alle* massa's  $dm$  is dan:

$$U = \int_R^\infty E_{grav} = \int_R^\infty G M(r) dm(r) / r$$

Neem voor het gemak aan dat de samentrekkende wolk voortdurend sferisch symmetrisch is; dan mogen we gebruiken:

$$M(r) = 4/3 \pi r^3 \rho \quad (\text{massa bol met straal } r)$$

en:

$$dm = 4\pi r^2 \rho dr \quad (\text{massa bolschil met dikte } dr).$$

Substitutie levert voor samentrekking van de wolk tot straal  $R$ :

$$U = \int_R^\infty 16/3 \pi^2 G \rho^2 r^4 dr = -16/15 \pi^2 G \rho^2 R^5$$

Transformeer  $R$  naar  $M$ :

$$U = -16/15 \pi^2 G \rho^2 R^5 = -3/5 G M^2 / R$$



N.B. In het realistischer geval van sferische, maar niet homogene instorting is de waarde  $U$  ongeveer 2.5 maal groter:  $U = 1.5 G M^2/R$

## 7.2 Verhitting bij Samentrekking

Met de bovenstaande waarde:

$$U = -3/5 G M^2/R$$

kan men een schatting maken hoe heet het gas wordt bij instorting. Als de instorting snel verloopt, mogen we in eerste instantie de energieverliezen tengevolge van uitstraling verwaarlozen. Voor de wolk die tot een ster als de Zon instort vinden we dan met:

$$M = 2 \times 10^{30} \text{ kg}, R = 7 \times 10^8 \text{ m}$$

een hoeveelheid vrijkomende energie:

$$U = 2.2 \times 10^{41} \text{ Watt sec.}$$

Als de soortelijke warmte van waterstof is  $\sigma_H = 5000 \text{ W sec kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , dan loopt bij instorting de temperatuur op tot:

$$T = U/M \sigma_H = 20 \text{ miljoen K}$$

Bij zulke hoge temperaturen (en drukken van de orde van 100 miljard bar) zullen kernfusieprocessen spontaan optreden.

## 7.3 Wanneer vindt samentrekking plaats?

Samentrekking vindt plaats als de kinetische energie van alle deeltjes in de wolk ten opzichte van elkaar ( $E_{\text{kin}}$ ) niet meer opweegt tegen de potentiële energie van al die deeltjes ten opzichte van elkaar ( $U$ ):

$$2E_{\text{kin}} < |U| \quad (\text{viriaaltheorema})$$

Nu geldt:

$$E_{\text{kin}} = 3/2 N k T$$

terwijl voor het aantal deeltjes  $N$  geldt:

$$N = M / (\mu m_H)$$

( $M$  is de massa van de wolk,  $\mu$  is het gemiddelde atoomgewicht van de deeltjes in de wolk, en  $m_H$  is de massa van een waterstofatoom)

zodat:

$$E_{\text{kin}} = 3/2 M k T / \mu m_H$$

De vereiste voor wolk-instorting wordt dus:

$$3 M k T / \mu m_H < 3/5 G M^2 / R$$

ofwel voor een bol:

$$k T / \mu m_H < 4 \pi / 15 G \rho R^2$$

Deze uitdrukking kan herschreven worden in de zin dat samentrekking plaatsvindt bij overschrijding van een kritische lengteschaal:

$$R > 15 k / 4 \pi G m_H \mu \times (T / \rho)^{1/2} \quad \text{Jeans Length}$$

of van een kritische massa:

$$M > (5 k / G m_H \mu)^{3/2} (3 / 4 \pi)^{1/2} \times (T^3 / \rho)^{1/2} \quad \text{Jeans Mass.}$$