

De geboorte van de zon

De zon heeft sinds mensenheugenis een belangrijke plek ingenomen in ons dagelijks leven, zowel om praktische als filosofische en religieuze redenen. Voor sterrenkundigen is de zon interessant, omdat het verreweg de meest nabije ster is, waardoor de fysische processen die in elke ster plaatsvinden in veel meer detail bestudeerd kunnen worden dan die van welke andere ster dan ook. Ter vergelijking: de zon staat op 8 lichtminuten (150 miljoen kilometer) afstand, en de eerstvolgende ster, Proxima Centauri, op maar liefst 4,3 lichtjaar ($4 \cdot 10^{13}$ kilometer)! Toch is het beseft dat de zon slechts een van de vele sterren in de Melkweg is, met een begin en een eindige 'levensduur', pas in de laatste paar eeuwen gegroeid. Talloze technologische ontwikkelingen in de sterrenkunde in de afgelopen honderd jaar hebben onderzoek naar het ontstaan van sterren steeds verder gebracht.

De zon en het omringende zonnestelsel van planeten en planetoiden (rotsblokken variërend van een kilometer tot honderden kilometers in grootte) zijn zo'n 4,6 miljard jaar geleden ontstaan. Deze waarde is grotendeels gebaseerd op isotopenonderzoek aan meteorieten in ons zonnestelsel: de oudste daarvan zijn meer dan 4,57 miljard jaar oud. De acceptatie van het heliocentrische model in plaats van het geocentrische model was een belangrijke eerste stap in de ontwikkeling van een theorie over het ontstaan van de zon. Dit model stelt dat de planeten rond de zon draaien in plaats van andersom. In combinatie met de ontdekking van de zwaartekracht leidde dit op een vrij natuurlijke manier tot een theorie van de vorming van ons zonnestelsel: een 'instorting' van een veel grotere wolk van gas en stof (zie figuur 1). Daarbij komt het meeste materiaal in het midden terecht waar zich het zwaarste object vormt (de zon). Het resterende materiaal belandt in een platte schijf daaromheen, waaruit uiteindelijk de planeten vormen. Deze theorie, ook wel de zonnenevelhypothese genoemd, werd voor het eerst voorgesteld in de achttiende eeuw door filosofen Emanuel Swedenborg, Immanuel Kant en Pierre-Simon Laplace. Hoewel dit model op het eerste oog een elegante oplossing lijkt te zijn voor de configuratie van het zonnestelsel, gooien de natuurkundige wetten roet in het eten: het impulsmoment (product van massa, draaisnelheid en afstand tot het draaipunt) moet tijdens en na het instorten behouden blijven en terwijl de zon 99,9% van de massa van het stelsel bevat, heeft zij slechts 1% van het impulsmoment! Om impulsmoment te behouden zouden de planeten

Figuur 1. Afbeelding van de Paardekopnevel met de Euclid-ruimtetelescoop, een stervormingsgebied in Orion van gas en stofwolken waar sterren nog altijd vormen. Afbeelding: ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, image processing by J.-C. Cuillandre (CEA Paris-Saclay), G. Anselmi.

“Er moet een moment zijn geweest waarop de dichtheid en temperatuur hoog genoeg werden om kernfusie te laten plaatsvinden.”

veel langzamer rond de zon moeten draaien, of de zon zelf veel sneller. Verscheidene andere theorieën werden ontwikkeld zonder overduidelijk succes, tot in de tweede helft van de twintigste eeuw de nevelhypothese dan toch echt geaccepteerd werd. Dit had twee belangrijke redenen: ten eerste, de ontdekking van het bestaan van stofschijven rond andere sterren door middel van optische waarnemingen van strooilicht afkomstig van het stof in de schijf (onder andere de silhouetten van stofschijven rond jonge sterren in Orion, 1995, zie figuur 2) en infraroodemissie van stof rond jonge sterren met de IRAS-ruimtetelescoop (1983). Ten tweede: de berekeningen van verschillende fysische processen die het binnenste deel van de schijf kunnen vertragen, zoals viscositeit in de schijf, sleepkrachten van stofdeeltjes, magnetische velden en zonnewinden, waardoor het probleem van het impulsmoment opgelost kon worden. Dus zowel door observatieoneel bewijs als met natuurkundige berekeningen werd de nevelhypothese ineens een stuk waarschijnlijker.

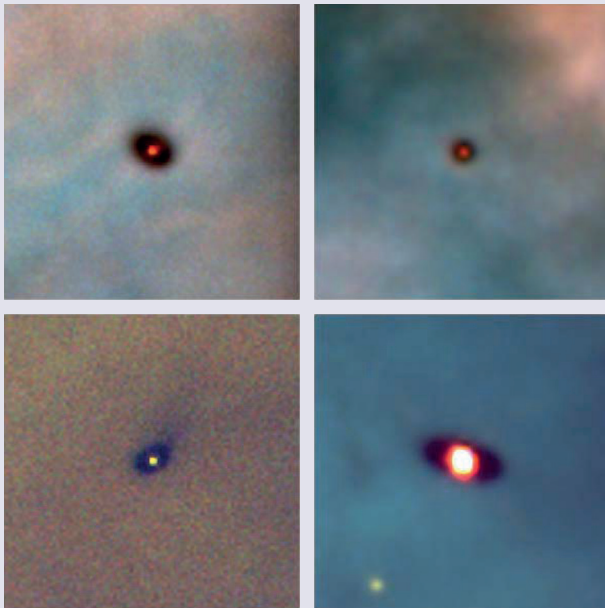
Zonneonderzoek

In de tussentijd had de rest van de sterrenkundewereld niet stilgezeten. De compositie van de zon was inmiddels vastgesteld met optische spectroscopie (Fraunhoferlijnen). De zon bleek met name uit waterstof te bestaan, maar ook een deel helium, koolstof, zuurstof en andere 'zware' elementen te bevatten. Door werk van Arthur Eddington in de jaren twintig en de beroemde formule $E=mc^2$ die Einstein in 1915 had gepostuleerd, kon ineens verklaard worden hoe de zon (en andere sterren) aan haar

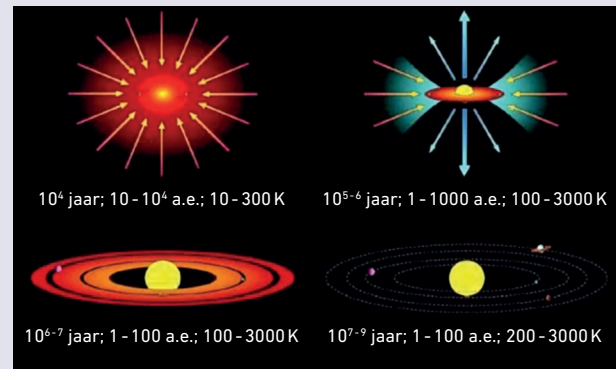
schijnbaar onuitputtelijke energiebron komt: de fusie van waterstofatomen tot helium. Dat er al 25% helium aanwezig is, betekent dat kernfusie al lang geleden moet zijn begonnen: er moet een moment zijn geweest waarop de dichtheid en temperatuur hoog genoeg werden om kernfusie te laten plaatsvinden. Logischerwijs is dit het moment dat voldoende materiaal door zwaartekracht naar binnen is getrokken. De uitwaartse druk van kernfusie zorgt er dan voor dat de 'wolk' niet verder in elkaar stort. Dat was dus 4,6 miljard jaar geleden. Naast het ontwikkelen van de ontstaansgeschiedenis van de zon en sterren, was in de twintigste eeuw een ander belangrijk besef gegroeid: nog steeds zijn er sterren aan het ontstaan in het huidige heelal! Dit kan men allereerst concluderen uit een simpele berekening van de leeftijd van massieve sterren (O-sterren, met een massa tussen de vijftien en honderd keer de zonsmassa). Uit de massa, het heliumpercentage en de absolute lichtkracht (de energieproductie) volgt eenvoudig de maximale leeftijd die een dergelijke ster kan hebben: slechts enkele miljoenen jaren! De sterren in de Melkweg zijn dus niet in een enkele 'geboortegolf' ontstaan en er is geen reden om aan te nemen dat die golf nu zou zijn opgehouden.

Stofwolk als kraamkamer

Aangezien sterren geboren worden in grote wolken van gas en stof, zijn donkere nevels in het heelal de beste plekken om op zoek te gaan naar vormende sterren. Zulke donkere nevels zijn allereerst zichtbaar als een groot, zwart 'silhouet' tegen een heldere achtergrond in zichtbaar licht. Een



Figuur 2. Eerste afbeeldingen van de silhouetten van stofschijven rond jonge sterren in het sterrenbeeld Orion met de Hubble-ruimtetelescoop in 1995. Afbeeldingen: PRC95-45b, STScI OPO, Mark McCaughrean (Max-Planck-Institute for Astronomy), C. Robert O'Dell (Rice University), NASA.



Figuur 3. Schematische voorstelling van stervorming door middel van de instorting van een wolk van gas en stof (linksboven), waarna een straalstroom (rechtsboven) een groot deel van de wolk wegblaast en een jonge ster met schijf overblijft (linksonder). Uiteindelijk vormen in de schijf de planeten (rechtsonder). De voettekst geeft voor elke fase de typische leeftijd, schaalgrootte (in astronomische eenheden (AE): afstand van de aarde tot de zon) en temperatuur. Figuur uit Shu et al. 1987.

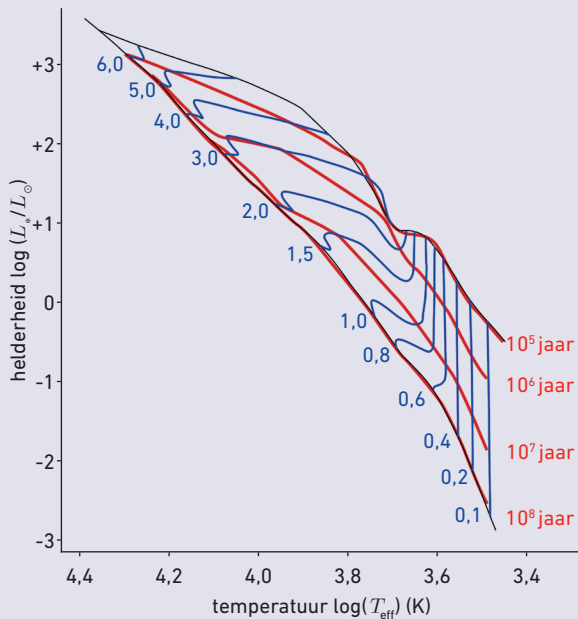
bekend voorbeeld is de beroemde Paardekopnevel in het sterrenbeeld Orion (zie figuur 1). Zo'n silhouet ontstaat doordat de stofdeeltjes in de wolk het zichtbare licht van de sterren in de nabije omgeving grotendeels absorberen ('extinctie'), waardoor minder sterren zichtbaar zijn. Zulke nevels waren aan het begin van de twintigste eeuw al een tijd bekend, al wist men nog niet hoe deze gelinkt zijn aan stervorming. Een typische stervormingsnevel is tientallen lichtjaren in diameter, en sterren worden gevormd door lokale instortingen op verschillende plekken in de wolk. De wolk valt in kleinere wolkfragmenten uit elkaar die elk instorten tot een ster. Zo'n cluster van pasgevormde sterren zal over honderden miljoenen jaren door dynamische interacties steeds verder uit elkaar bewegen totdat de sterren nog amper te herkennen zijn als 'groep'. Ook van de zon wordt – op basis van haar samenstelling – gedacht dat ze in een cluster is gevormd. Uit de samenstel-

ling kan ook worden afgeleid dat een nabije supernova mogelijk heeft meegeholpen aan de vorming van de zon. De zware elementen in ons zonnestelsel zoals goud en uranium kunnen alleen afkomstig zijn uit een supernova (de explosie van een massieve ster aan het einde van zijn leven). De schokgolf die ontstaat bij een supernova zorgt dan voor een snellere samentrekking. Aanwijzingen voor recente stervorming in zulke wolken zijn met name de ontdekking van grote, bipolaire straalstromen die door de wolk schieten. Zo'n straalstroom ontspringt uit het binnenste deel van een schijf rond een jonge ster, loodrecht op het oppervlak van de schijf, in beide richtingen. De straalstroom ontstaat door een combinatie van magnetische velden en impulsmoment en resulteert onder meer in CO-lijn emissie op hoge snelheid (50-100 km/s), afkomstig van het CO-gas in de wolk dat naar buiten gestuwd wordt. Deze snelheid wordt gemeten door vaststel-

ling van de dopplerverschuiving van rotationele emissielijnen op millimeter golflengten. Ook zogenoemde Herbig-Haro-objecten, ontdekt in de jaren veertig van de vorige eeuw, zijn een indicator van straalstromen: kleine, heldere neveltjes in zichtbaar licht in stervormingsgebieden die het resultaat zijn van schokgolven door de interactie tussen de straalstroom en de wolk. Vrij-vrij-emissie of Bremsstrahlung van geïoniseerd gas uit de straalstromen van jonge sterren is ook waargenomen op radiogolflengten (typische golflengte van een paar centimeter). Jonge protosterren zelf blijven grotendeels onzichtbaar in optisch licht door de absorptie van het licht door het omringende stof; pas na de komst van infrarood (ruimte-) telescopen zoals IRAS en Spitzer konden die in meer detail worden bestudeerd.

'Geboortedatum' van een ster

Op het moment dat het grootste deel van de direct omringende wolk is



Figuur 4. Hertzsprung-Russell-diagram van de vroege evolutie van sterren. De figuur laat zien hoe een jonge ster in de pre-hoofdreksfase evolueert over de Hayashi-track (van boven naar beneden) voor verschillende sterrenmassa's (blauwe getallen, in zonsmassa). De ster eindigt op de hoofdreks, de onderste diagonale lijn op het diagram. Figuur uit *The Formation of Stars*, Steven W. Stahler en Francesco Palla (2004).

verdwenen en alleen de ster en schijf overblijven (zie figuur 3), spreken we van een jonge ster in plaats van een protoster, omdat deze dan zichtbaar wordt in het nabij-infrarood en (meestal) zichtbaar licht. Dit gebeurt binnen ongeveer een miljoen jaar. Zo'n jonge ster omgeven door een schijf wordt ook wel T Tauri-ster genoemd en houdt zijn schijf nog zo'n vijf tot tien miljoen jaar vast voordat deze ook verdwenen is: een deel verandert in planeten en een deel wordt weggeblazen door de straling van de nieuwe ster.

Over het exacte moment van de vorming van een ster kan men discussiëren: in principe spreekt men pas van een ster (een ster op de 'hoofdreks', op een Hertzsprung-Russeldiagram, zie figuur 4) op het moment dat kernfusie in de kern is begonnen en de ster van energie voorziet om te stralen. Voor die tijd komt de energie van de ster voornamelijk uit de gravitationele samentrekking zelf. In deze fase evolueert de jonge ster volgens

de Hayashi-track (zie figuur 4) in helderheid en temperatuur, en is nog iets helderder en koeler dan op de hoofdreks. Dit laatste klinkt wellicht wat verbazend, maar de helderheid van de ster schaal met haar straal in het kwadraat, en aangezien de jonge ster nog aan het samentrekken is, is deze dus groter dan in haar 'volwassen' fase.

Verder onderzoek

Met moderne ruimtetelescopen zoals Spitzer, Herschel en recentelijk de James Webb-ruimtetelescoop zijn talloze stervormingsgebieden in kaart gebracht om protosterren en jonge sterren in onze nabije omgeving verder te bestuderen. Ook grote telescopen op de grond, zoals ALMA, VLT en Keck, hebben talloze bijdrages geleverd aan ons begrip van ster- en planeetvorming, die onlosmakelijk met elkaar zijn verbonden. Aangezien de instorting en vorming van een ster veel te langzaam gaan om te kunnen volgen, bestuderen

TOEGIFT – EXOPLANETEN

Ook de ontdekking van exoplaneten in de afgelopen decennia heeft een grote invloed gehad op de acceptatie van de zonnenevelhypothese: met meer dan vijfduizend exoplaneten rond andere sterren dan de zon, kan het ontstaan van het zonnestelsel niet een uitzonderlijke toevalsfactor zijn: sterren en planeten moeten gemakkelijk gevormd worden. Daarnaast heeft de ontdekking van exoplaneten de planeetvormingstheorie zelf wel op zijn kop gezet: systemen van exoplaneten zien er vaak compleet anders uit dan de planeten in ons zonnestelsel! Waar wij een goed georganiseerde configuratie hebben van vier rotsachtige planeten binnenin, en vier gasplaneten verder naar buiten, zijn exoplaneten in alle maten te vinden op verschillende afstanden van hun moederster. Lange tijd werd gedacht dat de vorming van gasplaneten werd veroorzaakt doordat deze zich buiten de 'ijsslijn' van ons zonnestelsel bevinden: de afstand tot de zon waar de temperatuur onder de vriestemperatuur van water daalt. Als gevolg daarvan zijn stofdeeltjes bedekt met waterijs en plakken gemakkelijker aan elkaar, wat leidt tot grotere planeten, was de redenering. Nu we ook totaal andere configuraties van exoplaneten zien, moet dit idee volledig herzien worden!

sterrenkundigen doorgaans jonge sterren van verschillende leeftijden en omgevingen om te kijken hoe de fases in de evolutie worden doorlopen. Daarbij blijft natuurlijk de uitdaging: welke ster is een typisch, gemiddeld object en welke ster is een uitzondering die toevallig net wat anders evolueert dan de rest? Grotere aantallen helpen om meer statistisch onderzoek te doen en algemene conclusies te trekken. Binnen vijfhonderd lichtjaar van de zon zijn inmiddels zo'n tweeduizend jonge sterren bekend, maar gedetailleerde waarnemingen zijn pas van enkele tientallen exemplaren genomen. Genoeg werk om de oorsprong van sterren, en dus ook de zon, nog beter te begrijpen!

Nienke van der Marel is universitair docent aan de Leidse Sterrewacht. Ze promoveerde in Leiden in 2015 en werkte daarna onder meer in Hawaii en Victoria BC (Canada).
nmarel@strw.leidenuniv.nl