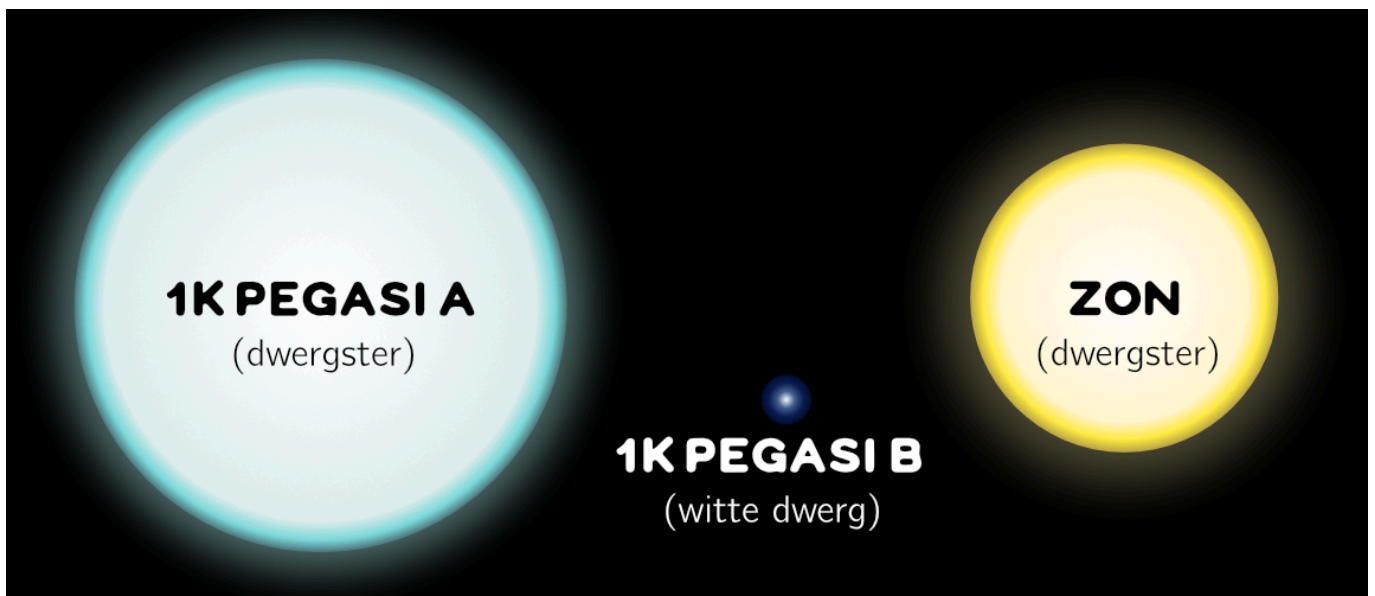


Witte dwergen met een hart van kristal

De sterren van het sprookje van Sneeuwwitje waren de zeven dwergen. Échte dwergsterren bestaan ook: zij vullen 's nachts onze sterrenhemel. Wanneer een dwergster zijn nucleaire brandstof heeft opgebruikt, wordt hij een witte dwerg die langzaam maar zeker van binnen uit kristalliseert. In dit artikel verdiepen we ons in het ware sprookje van deze betoverende kristallen bollen.



Afbeelding 1. Vergelijking van de grootte van 1K Pegasi A, 1K Pegasi B en de zon.

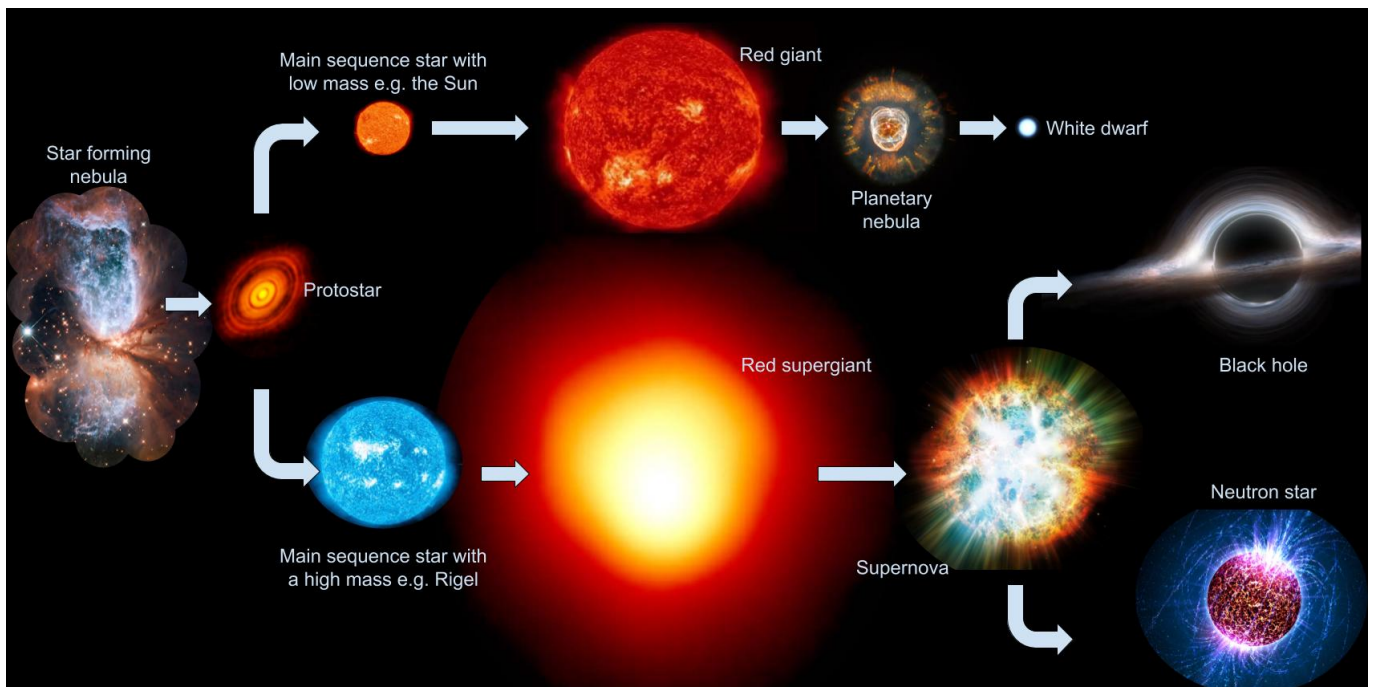
Witte dwergen zijn veel kleiner dan actieve dwergsterren. Afbeelding: [R.J. Hall](#) (bewerkt)

Levensloop van een 'normale' ster

Alle sterren in ons universum zijn ooit begonnen als een verzameling van gassen die door zwaartekracht samenkwam tot een zogeheten *protoster*. Een ster komt pas echt tot leven wanneer de druk en temperatuur hoog genoeg zijn om protonen (waterstof-atoomkernen) samen te smelten tot helium-atoomkernen. Bij dit [kernfusieproces](#) komt veel energie vrij, wat wij vanaf de aarde zien als licht.

Welk soort ster zich uit een protoster ontwikkelt, hangt sterk af van hoeveel massa de protoster bevat. (Zie afbeelding 2.) Verreweg de meeste sterren in ons universum, zo'n 97%, hebben een massa vergelijkbaar met die van onze zon, en beginnen hun sterrenleven als een dwergster. De energie uit de kernfusie in hun kern werkt tegen de zwaartekracht in, en zo kunnen de sterren miljarden jaren stabiel doorschijnen. Wanneer hun protonenbrandstof opraakt, wordt de kern echter samengeperst terwijl de buitenste lagen uitzetten, en verandert de ster in een rode reus. Door die extra druk kan het deze sterren toch lukken om ook heliumkernen en zwaardere elementen te fuseren, tot en met koolstof of zelfs neon-atoomkernen.

Op een gegeven moment houdt ook dit feestje op, werpen deze sterren hun buitenste lagen af en eindigen ze hun leven als een *witte dwerg*. Zonder kernfusie om ze actief te houden koelen deze objecten langzaam af, totdat ze ooit zullen eindigen als een dode, donkere, zwarte dwerg. Berekeningen tonen aan dat dit proces echter langer duurt dan het universum bestaan heeft (13,8 miljard jaar), en we hebben nog nooit een zwarte dwerg in het heelal gevonden. Dit is eigenlijk ook wel handig – daar komen we aan het eind van het artikel weer op terug.



Afbeelding 2. Het leven van een ster De levensloop van een ster hangt af van hoeveel massa hij bevat. Verreweg de meeste sterren beginnen als dwergster en eindigen hun leven als witte dwerg. Zwaardere protosterren beginnen als superreuzen, en eindigen na een

supernova als neutronenster of een zwart gat. Afbeelding: [Oliver Toogood](#)

Samengeperste quantummaterie

Hoewel 'witte dwerg' wellicht niet zo spectaculair klinkt als een [zwart gat](#) of [neutronenster](#), zijn deze sterren vanuit een natuurkundig oogpunt belangwekkende objecten. Zo zijn ze ongelooflijk compact: een typische witte dwerg is even zwaar als onze zon, en maar een honderdste zo groot in doorsnede. Een theelepeltje materie van zo'n witte dwerg weegt evenveel als een olifant op aarde, zo'n vijf ton!

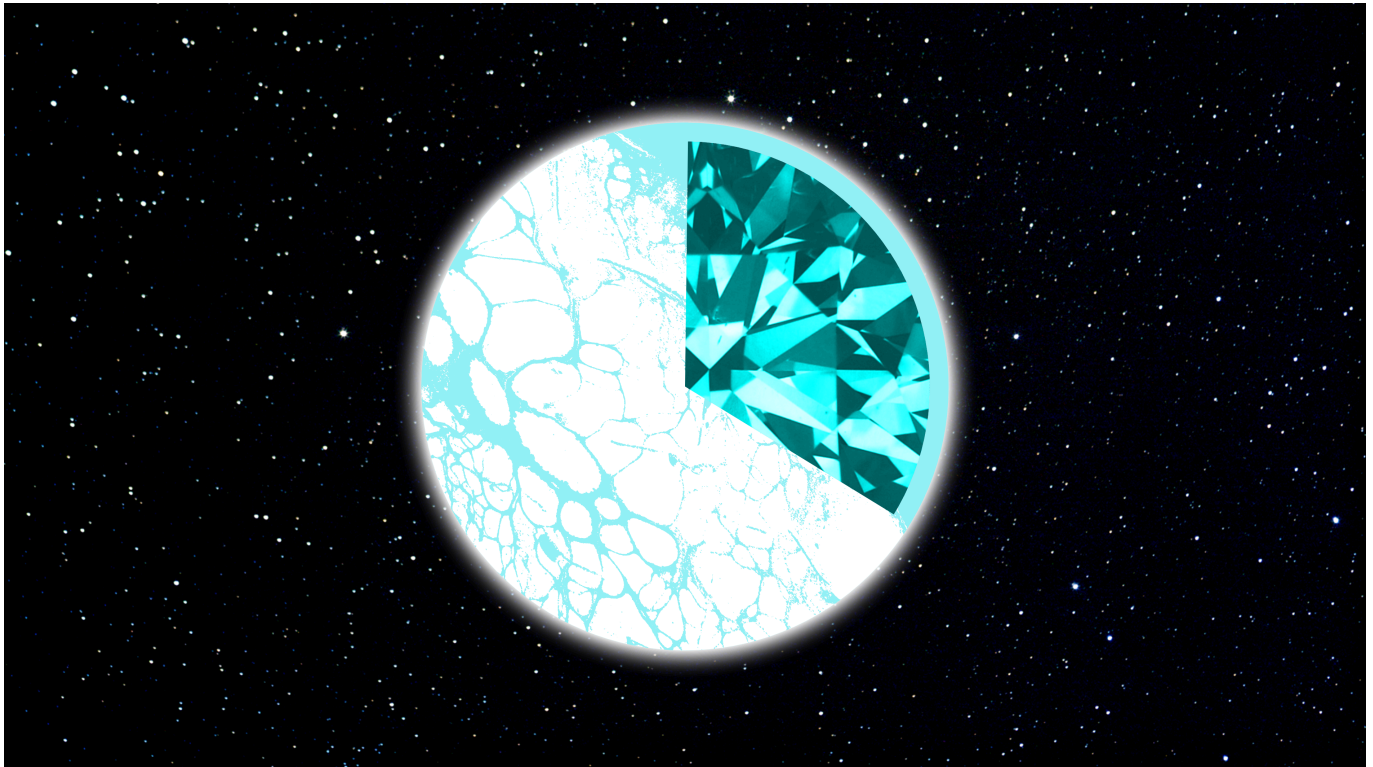
Bij gebrek aan kernfusie komt de enig overgebleven reden dat witte dwergen door de zwaartekracht niet instorten uit de quantummechanica. De elektronen kunnen in de kern van een ster zo hard samengeperst worden dat ze zogeheten '[ontaarde materie](#)' vormen. Het [uitsluitingsprincipe van Pauli](#) zorgt er dan voor dat twee elektronen zich nooit in dezelfde quantumtoestand kunnen bevinden, waardoor de elektronen elkaar als het ware wegduwen. De atoomkernen in de kern van een witte dwerg worden ook samengeperst, maar niet genoeg om ontaard te worden. Dit gebeurt bijvoorbeeld wel in een neutronenster, waar elektronen door de hoge druk eerst samenvoegen met protonen om neutronen te vormen, die dan weer door het uitsluitingsprincipe van Pauli verdere instorting tegenwerken.

Een bevriezend hart

De atoomkernen in een witte dwerg vormen wel een extreem hete, extreem compacte, quantummechanische vloeistof (een plasma) in een achtergrond van snel rondvliegende, relativistische elektronen. Pasgevormde witte dwergen hebben een kerntemperatuur van tientallen miljoenen graden Celsius, en koelen in de loop van miljarden jaren langzaam af. Dat dit zo lang duurt komt mede door de heel dunne, maar sterk isolerende atmosfeer van waterstof en helium die om de kern heen zit.

Hoe koeler de kern van de ster, hoe minder energie de ionen hebben om rond te bewegen. In de jaren 60 werd al voorspeld dat de kern van deze afkoelende sterren vanuit het midden kan bevriezen en een [kristal](#) vormen. Hoe zwaarder de atoomkernen in de ster, hoe makkelijker dit zal gebeuren. De kristallisatie-temperatuur is ook afhankelijk van de totale massa van de witte dwerg: bij zwaardere sterren wordt de kristallisatietemperatuur ook nog eens [onderdrukt door quantumfluctuaties](#).

Omdat de gemiddelde witte dwerg veel koolstof in zijn kern heeft zitten, wordt er ook wel de vergelijking gemaakt met diamant, een uit koolstof bestaand kristal dat zich ook in de aarde vormt. Dat doen die kristallen in de bovenste laag van de aardmantel, bij voor aardse begrippen ook 'hoge' temperatuur - rond 1000°C - en druk - zo'n 50.000 keer zo hoog als de luchtdruk op het aardoppervlak.



Afbeelding 3. Wanneer een witte dwerg afkoelt, kristalliseert zijn kern
Afbeelding: Jans Henke.

Een exotisch kristal

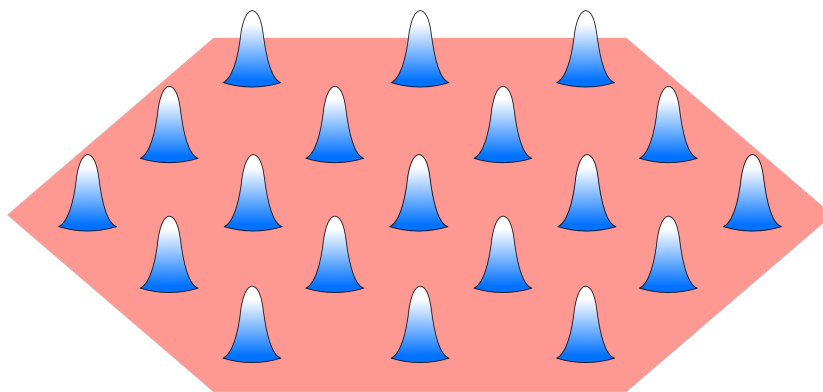
Het bevrozende hart van een witte dwerg is echter veel exotischer van aard dan de diamant in de aardmantel. In tegenstelling tot de chemische bindingen die de koolstofatomen in diamant samenbinden, waarbij elektronen tussen paren van atomen worden gedeeld, vliegen de elektronen in de kern van een witte dwerg veel te hard rond om zich zo te laten binden, of überhaupt bij een atoomkern te blijven. In een ster zijn de atomen compleet geïoniseerd!

Hoe kan het dan dat de ionen alsnog een kristal vormen? Dat komt alleen maar door de pure afkeer die de naakte atoomkernen voor elkaar hebben. Zonder hun beschermende jasje van negatief geladen elektronen, voelen de positief geladen ionen de afstotende kracht van alle andere ionen om zich heen. Zelfs bij een temperatuur van tien miljoen graden Celsius kan

deze kracht groot genoeg zijn om de ionen te bevriezen, van een vloeibaar plasma tot een netjes gerangschikt kristal.

Dat zulke kristallen zouden kunnen bestaan, werd in 1934 al voorspeld door de natuurkundige Eugene Wigner. Hij had het echter niet over sterren, maar voorspelde dat de elektronen in aardse materialen op dezelfde manier zouden kunnen 'bevriezen', van een elektronen-vloeistof tot een elektronen-kristal. Elektronen zijn echter duizenden malen lichter dan de kristalliserende atoomkernen in witte dwergen, en blijven daardoor veel moeilijker stilzitten in een kristal: door de [wetten van de quantummechanica](#) gedragen ze zich liever als uitgespreide golven dan als gelocaliseerde deeltjes.

Experimenten hebben in enkele gevallen wel aangetoond dat zo'n elektronisch Wigner-kristal kan bestaan, maar alleen in een- of tweedimensionale systemen met een heel lage elektrondichtheid, bij extreem lage temperaturen (kouder dan een tiende graad boven het absolute nulpunt!), en vaak in een sterk magneetveld. Het blijft dus een exotische fase van materie!



Afbeelding 4. Een tweedimensionaal Wigner-kristal Bij lage temperaturen en een lage elektrondichtheid kunnen elektronen een Wigner-kristal vormen. Dit is het elektronische equivalent van het soort kristal dat zich in de kern van een witte dwerg vormt. De blauwe pieken geven de vorm van de elektron-golffuncties aan. Afbeelding: Jans Henke

Kristal der jeugdigheid

Zoals eerder vermeld, is het universum nog niet oud genoeg om witte dwergen te bevatten die helemaal tot een zwarte dwerg zijn afgekoeld - de koudste witte dwergen die we kennen

hebben een oppervlakte-temperatuur van ongeveer 3.600°C . Dat we deze temperatuur weten, en dat die niet nul is, is handig, want door de temperatuur van deze koudste witte dwergen te vergelijken met hun verwachte begintemperatuur, kunnen we inschatten hoe oud een bepaalde sterrenpopulatie (ten minste) moet zijn. Deze methode [is bijvoorbeeld gebruikt](#) om te schatten dat onze regio van de Melkweg tussen de 8,5 en 11 miljard jaar oud is, terwijl sterrenclusters in de galactische halo al ten minste twee miljard jaar langer hebben bestaan.

Om zo'n leeftijdsschatting te maken, moet je wel een model hebben van hoe lang het duurt voordat een ster met een bepaalde massa en beginnende (oppervlakte)temperatuur afkoelt tot een lagere temperatuur. Hierbij speelt de kristallisatie een belangrijke rol, omdat dat proces de afkoeling van een ster kan *vertragen*. Wanneer een kristal zich vormt, komt er namelijk latente warmte vrij, wat de ster weer een beetje opwarmt. Dit werkt precies hetzelfde als bij het bevriezen van water: het proces van bevriezen geeft een klein beetje warmte af, terwijl smelten een beetje warmte (of eigenlijk energie) absorbeert.

Dat we de modellen die we gebruiken voor het afkoelen van witte dwergen nog moeten aanscherpen, [werd in 2019](#) duidelijk uit de data van ESA's [Gaia-satelliet](#). Daarin is duidelijk te zien dat de kristallisatie van de kern vanaf een bepaalde temperatuur begint, en leidt tot een andere verhouding tussen de helderheid en de kleur van het licht dat witte dwergen uitzenden – iets wat nog niet goed door de huidige modellen beschreven werd. Zo zie je maar dat we zelfs over de normaalste sterren in het heelal nog veel kunnen leren!