

Nederlandse samenvatting

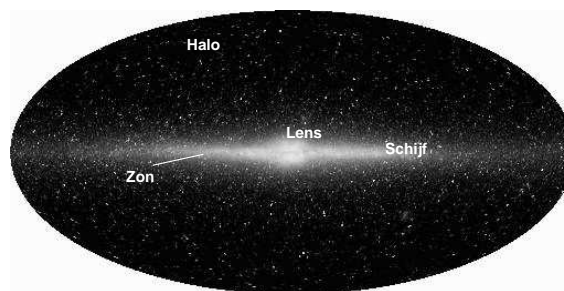
Op een heldere avond kunnen we aan de hemel een witte, op sommige plekken onderbroken band van licht tegenkomen. Wat we zien zijn miljoenen sterren die samen de schijf van ons eigen sterrenstelsel, de Melkweg, vormen. De Melkweg is opgebouwd uit een enorme bolvormige halo die grotendeels uit donkere materie bestaat, verder een grote, vlakke schijf van gas en sterren, en in het midden van de Melkweg bevindt zich een verdikking in de schijf, de lens (zie fig. 1). Sterren in de schijf van de Melkweg draaien rond het centrum, waarvan we nu weten dat het een zwart gat bevat. Hoe dichterbij een ster bij het centrum staat, des te korter is de tijd die het de ster kost om één keer rond te gaan. De zon bevindt zich op een afstand van ongeveer 26.000 lichtjaren van het centrum van de Melkweg en beweegt met een snelheid van zo'n 220 km per seconde rond het centrum. Zelfs met deze snelheid kost het ons zonnestelsel rond de 226 miljoen jaar om één keer rond het centrum van de Melkweg te gaan.

Het bestuderen van onze Melkweg is belangrijk voor ons begrip van de vorm, het ontstaan en de ontwikkeling van sterrenstelsels in het algemeen. De structuur en dynamica van het gas en de sterren die deel uitmaken van de Melkweg kunnen door hun relatieve nabijheid (vergeleken met andere sterrenstelsels) in groot detail worden bestudeerd. Maar omdat wij ons ook zelf in de Melkweg bevinden krijgen we te maken met projectie-effecten die het ons lastig maken om de grote schaal structuur van de Melkweg te achterhalen.

De Melkweg: een spiraalstelsel met een balk in het centrum

De sterren en het gas in de schijf van de Melkweg liggen gegroepeerd in vier spiraalarmen. Wijzelf bevinden ons aan de rand van de Orion spiraalarm, tussen de Sagittarius arm en de Perseus arm in.

Over het algemeen is de lens in het centrale deel van een sterrenstelsel ofwel bolvormig, net als een bal, of uitgerekt tot een balk, waarbij de spiraalarmen aan de uiteinden van de balk ontstaan. De beweging van zowel gas als sterren geeft aan dat zich in het centrum van de Melkweg een balk bevindt. Ofschoon we tegenwoordig overtuigd zijn van het bestaan van deze balk in het centrum van de Melkweg, weten we nog nauwelijks iets af van zijn eigenschappen, zoals zijn lengte en dikte, of de hoek waaronder we de balk zien.

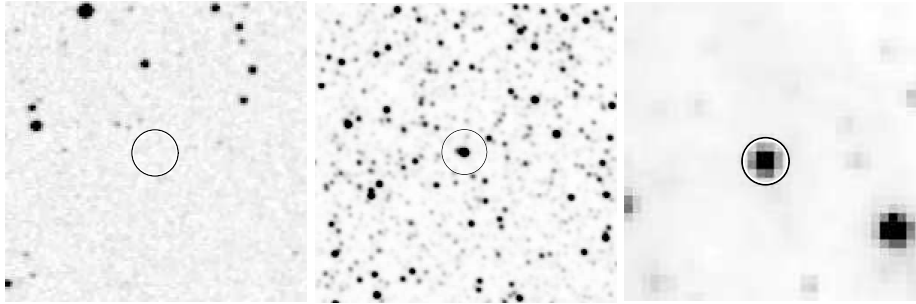


Figuur 1: Deze afbeelding gemaakt met de COBE satelliet laat zien hoe onze Melkweg eruit ziet in het nabij-infrarode deel van het spectrum, waar het meeste licht afkomstig is van geëvolueerde sterren genaamd rode reuzen. De extinctie door interstellair stof is veel zwakker op infrarode golflengten dan op golflengten in het zichtbare deel van het spectrum. Door nu juist op deze golflengten te kijken kunnen we ons dus een veel beter beeld vormen van de Melkweg.

Interstellaire extinctie

Een van de grootste problemen die we tegenkomen bij het bestuderen van de structuur van onze Melkweg is de verduistering door interstellair stof die sterker wordt naarmate we dichter bij het centrum van de Melkweg komen. Interstellair stof dat zich langs de gezichtslijn bevindt absorbeert en verstrooit het licht afkomstig van de sterren die we waarnemen. Dit effect genaamd extinctie (of 'uitdoving') zwakt de helderheid van de ster af en het maakt het spectrum van het sterlicht roder. Het sterspectrum laat zien hoe het licht afkomstig van de ster verdeeld is over de verschillende golflengten. Voor licht in het zichtbare deel van het spectrum is de extinctie zeer hoog, maar voor langere golflengten, zoals in het nabije- en mid-infrarode deel van het spectrum, is de extinctie minder sterk (zie fig. 2). Op infrarode golflengten kunnen we dus een veel duidelijker beeld krijgen van onze Melkweg. In de afgelopen tien jaar zijn verschillende onderzoeken (surveys) uitgevoerd op infrarode golflengten om de structuur en de vormingsgeschiedenis van onze Melkweg te achterhalen. Deze data bevat een schat aan informatie over de opbouw van sterpopulaties die er nog op wacht om volledig geanalyseerd te worden.

Dit promotie-onderzoek gaat over de bepaling van de structuur en samenstelling van de binnenste delen van onze Melkweg, daarbij gebruik makend van geëvolueerde sterren (sterren die al het grootste deel van hun leven achter de rug hebben) om het zwaartekrachtsveld in dit deel van de Melkweg in kaart te brengen. Het zwaartekrachtsveld kan ons namelijk meer vertellen over de verdeling van massa in de Melkweg.



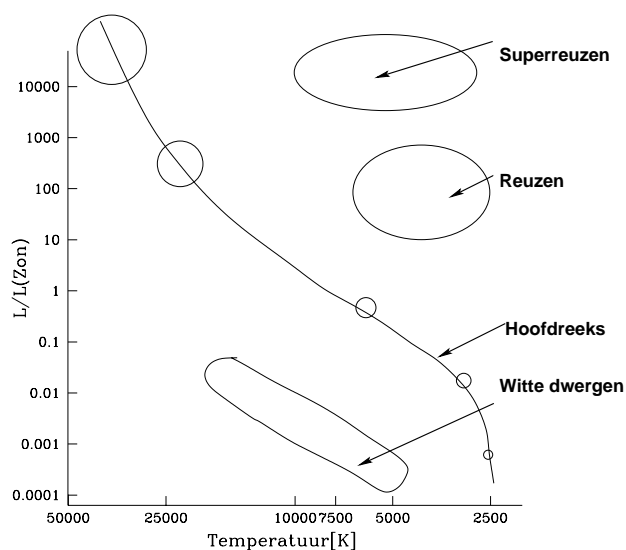
Figuur 2: Op verschillende golflengten ziet de hemel er heel anders uit! Deze figuur laat hetzelfde gebied aan de hemel (afmeting $1/20^\circ \times 1/20^\circ$) zien op 3 verschillende golflengten. De linker afbeelding laat zien hoe het gebied in zichtbaar licht eruit ziet. Er zijn maar weinig sterren zichtbaar vanwege de hoge interstellair extintie. Deze foto is gemaakt met de telescoop op Mt. Palomar. De middelste afbeelding laat hetzelfde gebied zien in het nabij-infrarood; deze afbeelding is afkomstig uit de 2MASS survey. Rechts staat een ISOGAL afbeelding in het mid-infrarode deel van het spectrum. Hierin kunnen we alleen sterren zien met een circumstellair mantel. De omcirkelde ster hebben wij gedetecteerd in onze zoektocht naar SiO maser straling (het is nr. 12 uit onze catalogus). Uit de SiO maser lijn afkomstig van deze ster hebben wij afgeleid dat deze ster zich met een snelheid van -193 km per seconde langs de gezichtslijn beweegt.

Geëvolueerde sterren en de massaverdeling en kinematica van de Melkweg

De meeste sterren die we kunnen zien op infrarode golflengten zijn geëvolueerde reuzesterren, koude (rode) sterren die aan hun oppervlakte typisch zo'n 3000 K warm zijn (ter vergelijking: onze zon heeft een oppervlaktetemperatuur van zo'n 6000 K!). Wij noemen ze reuzesterren vanwege hun grote omvang: als de zon een reuzester is geworden zal haar straal groter zijn dan de aardbaan. De sterren waar we het hier over hebben zijn ongeveer even zwaar of wat zwaarder dan onze eigen zon (tot zo'n 6 keer zo zwaar). Ofschoon deze sterren relatief koud zijn voor sterbegrippen zijn ze toch heel helder: typisch 3000 keer helderder dan onze zon. Rode reuzen verbranden waterstof en/of helium in een schil rond hun kern. Hun leeftijd ligt tussen de 1 en de 15 miljard jaar; ze zijn bijna aan het eind van hun leven aangekomen.

Geëvolueerde sterren hebben sterke winden die de ster omhullen met een mantel van gas en stof. De aanwezigheid van stof is vastgesteld uit een overschot aan infrarood licht dat van deze sterren afkomt. Stof absorbeert namelijk licht afkomstig van de ster en zendt dit weer uit op (voornamelijk) infrarode golflengten. We weten dat zich ook gas in de mantel rond deze sterren moet bevinden omdat we straling meten die wordt uitgezonden door sommige moleculen (zoals CO) op

Nederlandse samenvatting



Figuur 3: Grafiek van de helderheid van een ster (de 'magnitude') versus de temperatuur van de ster (de 'kleur'): dit type figuur heet een Hertzsprung-Russell (of HR) diagram, of ook wel een kleur-magnitude diagram. Astronomen gebruiken 2 criteria om sterren in deze figuur te classificeren. Het eerste criterium gebruikt het spectrum van de ster, de kleur van het licht dat de ster uitzendt. De kleur hangt af van de temperatuur van de ster. Zo ziet een hete ster (zoals Sirius) er blauw uit, terwijl een koele ster (zoals Betelgeuze) er rood uitziet. De zon is bijvoorbeeld geel. Het tweede criterium gebruikt de helderheid van de ster, dus eigenlijk de energie die per seconde door de ster wordt uitgezonden. Sterren liggen niet kris-kras verspreid in een HR diagram, maar ze liggen op bepaalde banden (reeksen). Elk van deze banden correspondeert met een zekere fase in het leven van de ster, i.e. een zekere manier waarop kernfusie plaatsvindt in het centrum van de ster.

golflengten van een millimeter of iets minder dan een millimeter. Deze circum-stellaire mantels zenden bovendien vaak maserstraling uit (het equivalent van laserstraling maar dan in het millimeter deel van het spectrum), afkomstig van moleculen zoals OH, SiO en H₂O (water). We kunnen deze maserstraling opvangen uit alle delen van de Melkweg. De golflengte van deze maserlijnen lijkt in de waarnemingen verschoven ten gevolge van het Doppler effect, hetzelfde effect waardoor een naderende ambulance een hogere toon lijkt te hebben dan één die weg rijdt. Daarom kunnen we door heel nauwkeurig de golflengte van de maser-emissie te meten de snelheid van deze sterren langs de gezichtslijn bepalen.

Geëvolueerde reuzesterren die helder zijn op infrarode golflengten zijn vanwege bovenstaande redenen uitermate geschikt om de geschiedenis, de structuur en de kinematica (de beweging van o.m. sterren) van de Melkweg te achterhalen.

Deze sterren zijn gevormd op verschillende tijdstippen in de geschiedenis van de Melkweg, zoals blijkt uit hun onderlinge leeftijdsverschillen, waardoor zij ons in staat stellen om meer te weten te komen over stervorming in verschillende perioden van het bestaan van de Melkweg. Hun ruimtelijke verdeling wordt bepaald door het zwaartekrachtsveld van de Melkweg, daarom kunnen wij hen ook gebruiken om de massaverdeling die dit zwaartekrachtsveld in de Melkweg veroorzaakt te bepalen. Tenslotte kan de maser-emissie in deze sterren worden gebruikt om nauwkeurig de snelheden van deze sterren te achterhalen, waardoor ze heel goed bruikbaar zijn om de kinematica van de Melkweg te bestuderen.

Onze survey van SiO masers

In dit promotie-onderzoek hebben wij gegevens geanalyseerd uit verschillende surveys in het infrarood, en wij hebben ook SiO maserlijnen waargenomen rond geëvolueerde reuzesterren. De twee hoofddoelen van dit onderzoek zijn ten eerste het bepalen van de snelheid langs de gezichtslijn van de waargenomen sterren en ten tweede het bepalen van de massaverdeling van sterren in de binnenste delen van onze Melkweg. Eigenschappen van geëvolueerde sterren, zoals hun helderheid en massaverlies, kunnen ons verder iets vertellen over de voorwaarden waaronder masers in dit type sterren voorkomen.

Overzicht van dit proefschrift

We hebben gezocht naar SiO maserstraling afkomstig van sterren die in het infrarode deel van het spectrum helder zijn. Het resultaat was dat we het aantal van deze sterren (en daarmee ook hun snelheid langs de gezichtslijn) dat bekend was in de binnenste delen van de Melkweg bijna hebben kunnen verdubbelen. In **hoofdstuk 2** tonen we ons onderzoek dat is uitgevoerd met de IRAM 30 meter telescoop, die zich op de Pico Veleta in Spanje bevindt. De sterren die we selecteerden hebben dezelfde kleur als geëvolueerde sterren en bovendien verandert hun helderheid op een periodieke manier. We hebben deze criteria gebruikt omdat al bekend was dat maser-emissie vaker voorkomt bij dergelijke sterren. We vonden SiO masers in 271 van de onderzochte sterren, waarmee het aantal snelheden dat is bepaald voor sterren in de binnenste delen van de Melkweg met behulp van maser lijnen is verdubbeld.

De verdeling van energie van deze sterren over de verschillende golflengtegebieden (afgeleid uit de helderheid van de sterren in het nabije- en mid-infrarode deel van het spectrum) kan worden gebruikt om de helderheid en het massaverlies van deze sterren te bepalen. In **hoofdstuk 3** presenteren wij de helderheid van de 441 sterren die we hebben onderzocht op maserstraling op golflengten tussen $1\mu\text{m}$ en $25\mu\text{m}$ (ter vergelijking: het licht dat we met onze ogen zien heeft golflengten tussen de $0.4\mu\text{m}$ en $0.8\mu\text{m}$). Metingen gedaan op verschillende tijdstippen laten zien dat de meeste van deze bronnen in helderheid variëren. Hun kleur lijkt op die van veranderlijke geëvolueerde sterren in de zonsomgeving

Nederlandse samenvatting

waarvan we weten dat ze worden omgeven door een dunne mantel.

Om de intrinsieke helderheid van een ster te kunnen bepalen moeten we corrigeren voor interstellair extinctie. We doen dit door de verdeling in het kleur-magnitude diagram (fig. 3) van de door ons waargenomen geëvolueerde sterren te vergelijken met de verdeling in het kleur-magnitude diagram van geëvolueerde sterren waarvan we de extinctie kennen. In **hoofdstuk 4** voeren we deze analyse uit, om daarmee de extinctie voor al onze SiO maserbronnen in de verschillende delen van de Melkweg te bepalen. Uit onze analyse volgen ook nieuwe, interessante waarden voor de interstellair extinctie op verschillende golflengten.

In **hoofdstuk 5** berekenen we de intrinsieke helderheid van onze SiO sterren. Als we aannemen dat alle sterren die minder dan 5° van het Melkwegcentrum af staan dezelfde afstand tot de zon hebben, dan vinden we dat de piek in de helderheidsverdeling van onze sterren samenvalt met de piek in de verdeling van geëvolueerde sterren met OH maser emissie die zich in de buurt van het Melkwegcentrum bevinden (deze piek ligt bij ongeveer 8000 keer de helderheid van de zon). Onze data laat zien dat het belangrijkste verschil tussen sterren met OH masers en sterren met SiO masers is dat sterren met OH masers meer massa verliezen per jaar dan sterren met SiO masers. Sterren met SiO masers zijn echter makkelijker waar te nemen op golflengten in het nabij-infrarood dan sterren met OH masers, waardoor het makkelijker is om sterren met SiO masers te gebruiken om meer te weten te komen over de sterren in het midden van de circumstellair mantel.

Een voorlopige bespreking van de banen van onze SiO maser sterren en een opzet voor onderzoek dat we in de toekomst willen doen wordt besproken in **hoofdstuk 6**. De beweging van de SiO maser sterren bevestigt het bestaan van een balk in het centrale deel van onze Melkweg. We zijn begonnen met een volledige analyse van de dynamica van onze sterren met als doel het verfijnen van de parameters die de balk beschrijven.

Tenslotte beschrijven we in **hoofdstuk 7** in het kort de ISOGAL survey, een survey in het mid-infrarood van het vlak van de Melkweg, maar voornamelijk in de richting van het Galactisch centrum. Deze survey is uitgevoerd om de structuur van de Melkweg te bepalen, in het bijzonder in gebieden in het centrum van de Melkweg en in gebieden waar de interstellair extinctie groot is. Het is erg lastig om van afzonderlijke sterren de positie en helderheid te bepalen om daarmee een betrouwbare catalogus samen te stellen. In dit hoofdstuk beschrijven wij simulaties die gebruikt kunnen worden om de nauwkeurigheid van helderheden afgeleid uit de ISOGAL afbeeldingen te bepalen.