

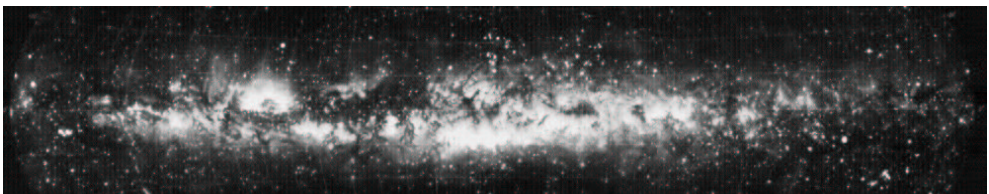
Nederlandse samenvatting

De ruggegraat van de nacht

STERRENKUNDE wordt door Nederlanders meestal geassocieerd met de enkele honderden lichtpuntjes die onze onbewolkte nachthemel rijk is: behalve de Maan zijn dat een paar planeten en enkele honderden kris-kras over de hemel verdeelde sterren. Maar iedereen, die in de zomer wel eens op vakantie is geweest in dunbevolkte zuidelijke streken en daar de tijd heeft genomen om de nachthemel wat beter te bestuderen, weet dat wij in Nederland maar een fractie van de naar schatting 8000 sterren kunnen zien die voor het blote oog zichtbaar zijn. De overdaad aan sterren kan er soms zelfs zo groot zijn dat het moeilijk wordt de afzonderlijke sterrenbeelden terug te vinden. In plaats daarvan openbaart zich een andere, niet door mensen verzonnen structuur: een vage lichtende band, door de oude Grieken ‘Melkweg’ genaamd¹. Deze band omspant de hele hemel, maar is op het noordelijk halfrond het duidelijkst te zien tussen de sterrenbeelden Zwaan, Arend, Boogschutter en Schorpioen. Tussen deze laatste twee sterrenbeelden is hij ook het breedst en helderst, maar dat is zelfs vanuit Zuid-Europa maar moeilijk vast te stellen. Een beter zicht daarop hebben volkeren dicht bij de evenaar, waar dit deel van de Melkweg vaak hoog aan de hemel staat. De !Koeng-stam uit Botswana bijvoorbeeld. In hun legenden heet de Melkweg ‘de ruggegraat van de nacht’, naar het grillige, gewervelde verloop van lichte en donkere plekken over vrijwel de gehele lengte van de band² (Figuur 1). Daarmee zitten de !Koeng verbazingwekkend dicht bij de waarheid.

¹Volgens de Griekse mythologie dankt de Melkweg zijn naam aan de melk die uit de borsten van Hera, de echtgenote van Zeus, langs de hemel is gespoten bij het zogen van Hercules.

²Op onze breedten is deze afwisseling van lichte en donkere plekken het best te zien in een stuk Melkweg ter hoogte van het sterrenbeeld Zwaan, waar een donkere band de Melkweg in de lengterichting in tweeën slijt.



FIGUUR 1 — 360° panorama-foto van de hele Melkwegband. Duidelijk zichtbaar is het grillige patroon van lichte en donkere plekken, voor de !Koeng-stam uit Botswana aanleiding de Melkweg de ‘ruggegraat van de nacht’ te noemen. Foto: Lund Observatory.



FIGUUR 2 — De Andromedanevel is het meest nabije grote melkwegstelsel gerekend vanuit het onze en wordt beschouwd als het evenbeeld van de Melkweg. De losse sterren op de foto zijn voorgrond-sterren uit ons eigen melkwegstelsel, die als druppels op een ruit zijn meegefotografeerd met de er op grote afstand achter gelegen Andromedanevel. Het aantal sterren in de Andromedanevel wordt geschat op een paar honderd miljard. Hun gezamenlijk licht is verantwoordelijk voor de diffuse nevelachtige verschijning. Foto: Jason Ware.

Want wat de ruggegraat is voor een gewerveld dier, is de Melkweg voor de sterrenhemel. Alle sterren aan de hemel, inclusief de Zon, worden door deze structuur bijeen gehouden en maken er deel van uit. Het lichtende karakter van de Melkweg is dan ook niets anders dan het gecombineerde licht van de vele miljarden sterren die de Melkweg rijk is en die te ver weg staan om afzonderlijk met het blote oog gezien te worden.

Het universum na de uitvinding van de telescoop

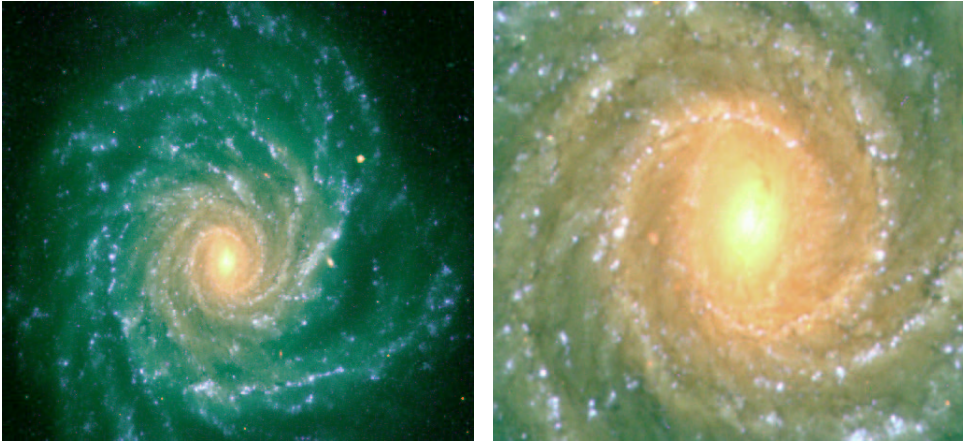
Inzicht in de feitelijke structuur van de Melkweg heeft lang op zich laten wachten. Onderzoek kwam pas goed op gang met de uitvinding van de telescoop door de Duitse Nederlander Hans Lippershey, in 1608. Met een veelvoud van de lichtgevoeligheid van het menselijk oog en de mogelijkheid objecten uit te vergroten stelde de telescoop natuurwetenschappers zoals Galileo Galilei en Christiaan Huygens in staat meer te zien dan alle generaties mensen vóór hen. Nieuwe werelden openden zich voor hun ogen: de Maan bleek bezaaid te zijn met kraters en gebergten; Venus gehuld te zijn in wolken; Jupiter omgeven te zijn door manen; Saturnus getooid te zijn met een ring; en de wazige Melkwegband te bestaan uit ontelbare sterren en nevels. Een blik door een hedendaagse verrekijker geeft misschien een goed idee van wat deze pioniers gezien moeten hebben en — voor wie dit voor het eerst doet — van het gevoel dat deze aanblik bij hen moet hebben opgeroepen.

In de eeuwen die volgden op de uitvinding van de telescoop werd de beeldscherpte steeds beter en de lichtgevoeligheid steeds groter. Dit stelde de astronomen in staat de vele nevels die inmiddels ontdekt waren³ in detail te bestuderen. Hierbij kwamen grote verschillen aan het licht. Zo bleken sommige nevels bij nader inzien uit een compacte groep sterren te bestaan, anderen uit één of meerdere sterren gehuld in lichtende nevelvelden, terwijl anderen nog het meest weg hadden van lichtende draaikolken.

Hoe groot de telescopen ook werden, één parameter bleef maar zeer moeilijk te achterhalen: de afstand⁴ tot de verschillende hemelobjecten en daarmee de driedimensionale structuur

³een aantal heldere nevels is al sinds mensenheugenis bekend, omdat zij met het blote oog zichtbaar zijn: voorbeelden zijn de Orionnevel, de Andromedanevel, de η -Carina nevel en de Magelhaense Wolken. Laatstgenoemden werden voor het eerst door een westerling aanschouwd in 1520, door ontdekkingsreiziger Fernão de Magalhães.

⁴Tot op de dag van vandaag zijn er een aantal typen sterren en nevels in de Melkweg waarvan de afstand niet goed bekend is.



FIGUUR 3 — NGC 1232 (**links**: het gehele stelsel; **rechts**: alleen de kern) is een prachtig voorbeeld van een melkwegstelsel waar we recht van boven op neerkijken. Duidelijk zichtbaar zijn de spiraalarmen, die het stelsel een draaikolk-achtige vorm geven. Onze Melkweg heeft ook een dergelijke structuur, maar die kunnen wij niet als zodanig herkennen, omdat wij er zelf tussen zitten. Ook de Andromedanevel zou er zo uitzien, ware het niet dat we het stelsel onder een grote hoek zien, waardoor de afzonderlijke spiraalarmen elkaar deels afdekken. Foto: ESO

van de sterrenhemel en die van de Melkweg in het bijzonder. Een belangrijke rol in het achterhalen van de structuur van de Melkweg speelde Jacobus Kapteyn⁵, die ongeveer een eeuw geleden op basis van een groots opgezet project van sterstellingen en meting van sterbewegingen concludeerde dat de Melkweg de vorm van een platte schijf moet hebben, met de Zon nabij het centrum van deze verdeling. De diameter van de schijf schatte hij op 30 duizend lichtjaar⁶ en de dikte op 6 duizend lichtjaar. Hoewel de Melkweg inderdaad het beste met een schijf kan worden vergeleken, zat hij er voor de rest flink naast. Het duurde echter tot de jaren twintig van de vorige eeuw totdat de juiste afmetingen van de schijf (diameter 150 duizend lichtjaar; dikte 1500 lichtjaar) en de correcte positie van de Zon in deze schijf (28 duizend lichtjaar van het centrum vandaan) werden bepaald. In die tijd werd ook duidelijk dat draaikolk-achtige nevels, zoals de Andromedanevel (Figuur 2) en NGC 1232 (Figuur 3), vele honderden tot duizenden malen verder weg staan dan andere nevels aan de hemel. Dit soort nevels maken dan ook geen deel uit van de Melkweg, maar zijn melkwegstelsels op zich.

De structuur van de Melkweg en andere spiraalstelsels

Melkwegstelsel NGC 1232 (Figuur 3) is een erg mooi voorbeeld van hoe de Melkweg er van bovenaf bekeken uit zou zien. Zeer karakteristiek is de spiraalstructuur die de aanblik van dit soort melkwegstelsels domineert. De vorm vertoont veel gelijkenis met de patronen die een draaikolk teweeg brengt rond een afvoerput. En inderdaad, net als het water in een draaikolk, draaien ook de sterren in een melkwegstelsel rondjes rond de kern. Maar waar

⁵Astronoom te Groningen; grondlegger van het huidige naar hem vernoemde sterrenkundig instituut.

⁶Eén lichtjaar is de afstand die het licht in één jaar aflegt. Ter vergelijking: de Maan staat op een afstand van 1,3 lichtseconde (384 duizend kilometer) en de Zon op een afstand van 8 lichtminuten van de Aarde.



FIGUUR 4 — De Orionnevel in het wintersterrenbeeld Orion wordt tot lichten gebracht door de ioniserende straling van één van de sterren in het centrum van de nevel. Vergelijkbare nevels zijn ook in NGC 1232 (Figuur 3) te zien als heldere stippen langs de spiraalarmen. Die nevels staan 66 duizend maal verder weg dan de Orionnevel. Foto: Robert Gendler.

de drijvende kracht in een draaikolk de zuigkracht van het putje is, is de drijvende kracht voor de rotatie van sterren rond een melkwegkern de zwaartekracht van de materie in het melkwegstelsel. Dezelfde kracht zorgt er in ons zonnestelsel voor dat de Maan rond de Aarde draait, de planeten rond de Zon draaien maar ook dat een glas rode wijn op een nieuw wit tapijt kapot kan vallen.

In onze Melkweg bevindt de Zon zich op ongeveer 28 duizend lichtjaar van de kern. Op die afstand en met een omloopsnelheid van zo'n 800 duizend kilometer per uur (!) doet de Zon er 246 miljoen jaar over om één rondje rond de kern te voltooien. Dit betekent dat gedurende de paar miljoen jaar dat er mensen op Aarde rondlopen de Zon dus maar een klein stukje van haar baan rond de Melkweg heeft afgelegd! Melkwegstelsels mogen dan dus wel roteren, maar binnen een mensenleven zien we daar heel erg weinig van⁷.

Opnames van melkwegstelsels zoals NGC 1232 (Figuur 3) tonen behalve het diffuse samengebalde sterlicht van de vele honderden miljarden sterren die het bevolken ook een groot aantal heldere vlekjes die de spiraalarmen accentueren. Dit zijn gebieden waar compacte groepjes jonge, zeer heldere sterren staan, temidden van de resten van de geboortewolk van waaruit zij zijn ontstaan. Ook in ons eigen Melkwegstelsel komen dit soort gebieden voor. De Orionnevel (Figuur 4) in het wintersterrenbeeld Orion bijvoorbeeld. De pasgevormde sterren in deze nevel zijn zo heet dat zij in staat zijn de randen van hun geboortewolk met hun sterlicht te *ioniseren*, dat wil zeggen, te ontleden in losse protonen en elektronen, de twee bouwstenen van het waterstof-atoom. Dergelijke zogenaamde H II-gebieden lichten op kleurenfoto's rood op, omdat bij het *recombineren*, zeg maar, het weer versmelten van een proton en een elektron tot een waterstof-atoom, één heel bepaalde kleur rood licht vrijkomt. Met het blote oog, door een verrekijker en zelfs door een vrij forse amateurteleskoop is deze kleur niet als kleur te herkennen. Daarvoor zouden de kleurgevoelige kegeltjes in ons oog zeker een miljoen maal gevoeliger⁸ moeten zijn. In plaats daarvan zien we de nevelvelden grijs

⁷Voor onze eigen Melkweg is dit niet helemaal waar. Het is mogelijk kleine verschillen in sterposities te meten op opnames die met tussenpozen van een paar jaar zijn gemaakt. Voor sterren in andere, nabije melkwegstelsel is deze techniek niet haalbaar, omdat die sterren duizenden tot miljoenen malen verder weg staan en, gemeten langs de hemel, even zo vele malen minder snel bewegen.

⁸de zwart-wit gevoelige staafjes in ons oog zijn veel gevoeliger dan de kleurgevoelige kegeltjes. Daarom kunnen

FIGUUR 5 — NGC 891 is een melkwegstelsel waar we van opzij tegenaan kijken, waardoor de spiraalstructuur niet zichtbaar is. In plaats daarvan wordt duidelijk hoe dun de schijf eigenlijk is. De opname wordt gedomineerd door een donkere band van verduisterend materiaal dat het licht van achtergelegen sterren tegenhoudt. Foto: WIYN Consortium, Inc.

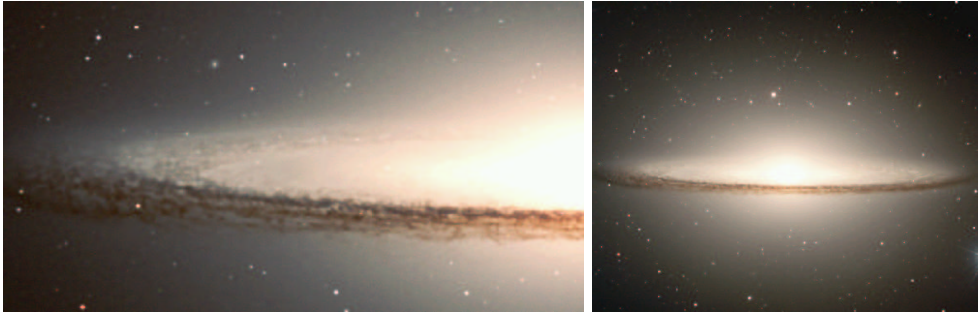


oplichten, hetgeen een stuk minder spectaculair is. Ons melkwegstelsel telt vele van dit soort H II-gebieden. De meeste van hen zijn te vinden in de Melkwegband en daarvan vooral het deel tussen de sterrenbeelden Schild, Boogschutter en Schorpioen. In deze richting ligt dan ook het grootste deel van ons eigen melkwegstelsel.

Melkwegstelsels worden onder alle mogelijke hoeken aan de hemel aangetroffen. Sommige zien we recht van boven, zoals NGC 1232; anderen van schuin opzij, zoals de Andromedanavel; en een aantal precies in het verlengde van hun platte schijf. NGC 891 (Figuur 5) is een voorbeeld van de laatste categorie. Te oordelen aan de breedte-dikte verhouding van de lichtende schijf zijn melkwegstelsels inderdaad afgeplatte structuren. Opvallend is de donkere band die het stelsel over de gehele breedte van de schijf in tweeën lijkt te delen. Deze aanblik vertoont veel gelijkenis met die van de Melkwegband (Figuur 1), die ook smal is en onder de donkere vlekken zit. Deze overeenkomst is niet toevallig. Want als wij aan de hemel in de richting van de Melkwegband kijken, dan gaat onze blik, net als in het geval van NGC 891, langs het vlak van ons melkwegstelsel. Aangezien de meeste sterren van ons melkwegstelsel in dit vlak zitten, vormt hun versmolten licht samen een lichtende band: de Melkwegband. De donkere vlekken in deze band zijn plekken waar verduisterende wolken, die ook deel uitmaken van de melkwegschijf, het achtergelegen sterlicht tegenhouden. Een paar van die wolken staan precies in de richting van de kern van ons melkwegstelsel. Waren die verduisterende wolken er niet, dan zou de Melkwegband ter hoogte van het sterrenbeelden Boogschutter en Schorpioen vele malen helderder zijn!

Verduisterende materie is niet alleen in de Melkwegband en in NGC 891 voorhanden. Ook op de foto's van de Andromedanavel (Figuur 2) en NGC 1232 (Figuur 3) zijn dergelijke structuren duidelijk zichtbaar. Net als sterren en H II-gebieden horen zij in de spiraalarmen van melkwegstelsels thuis. Een erg fraaie aanblik biedt de Sombरणonevel (Figuur 6), een melkwegstelsel waar we vrijwel van opzij tegenaan kijken en dat door een aantal sierlijke

we 's nachts of in de schemering wel grijstinten zien, maar er geen kleur aan verbinden.



FIGUUR 6 — De Sombrero-nivel. **Links:** detailopname van een deel van de verduisterende stofring. **Rechts:** het gehele melkwegstelsel. De Sombrero-nivel dankt zijn bijnaam aan een buitenproportionele grootte van de kern in combinatie met de aanwezigheid van duistere wolken in het melkwegvlak. Op de detailfoto is goed te zien dat de donkere wolken veel, tot de verbeelding sprekende, structuur vertonen. Foto: ESO

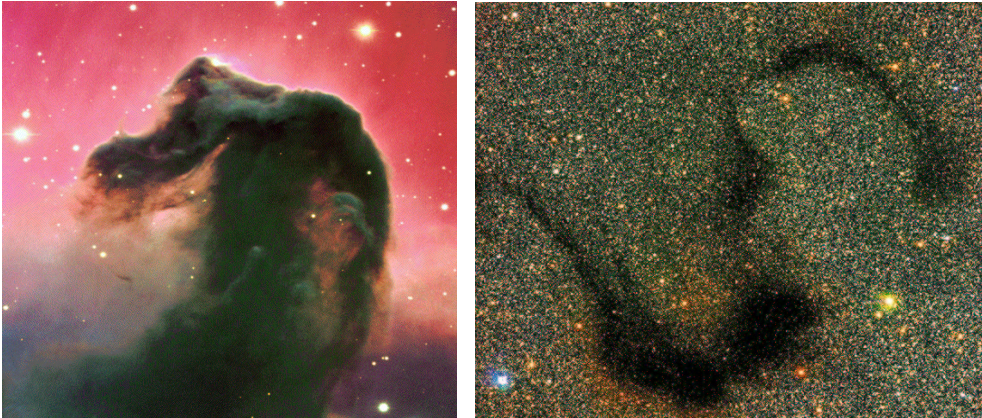
banden van verduisterende materie toont. Ook op kleinere schaal, in onze eigen Melkweg, levert verduisterende materie mooie plaatjes op. Wat te denken van bijvoorbeeld de Paardekopnevel of de Slangenevel (Figuur 7)?

Het bestaan van verduisterende materie wordt door veel astronomen echter eerder ervaren als een plaag, omdat het de waarneming van achtergelegen objecten bemoeilijkt of zelfs onmogelijk maakt. De kern van ons melkwegstelsel is al genoemd. Maar ook de stertellingen van Jacobus Kapteyn werden er sterk door beïnvloed. Hij corrigeerde zijn stertellingen namelijk niet voor het percentage sterren dat achter de verduisterende wolken schuil gaat, omdat hij de berichten die destijds de ronde deden over het bestaan van verduisterende materie niet geloofwaardig achtte. Dit leidde er echter wel toe dat hij de grootte van ons Melkwegstelsel zwaar onderschat heeft. Het huidige heelalmodel is daarom dan ook niet met zijn naam verbonden.

Interstellaire materie

Inmiddels is er veel onderzoek gedaan naar de ware aard van de verduisterende materie, of *interstellaire materie*, zoals astronomen het noemen. Interstellaire materie komt voor het grootste deel voor in de vorm van grillig gevormde gaswolken, die bijeengehouden worden door de onderlinge aantrekkingskracht⁹ van de deeltjes. Deze zogeheten *moleculaire wolken* komen vooral voor in de spiraalarmen van melkwegstelsels. De grootste moleculaire wolken kunnen tot een miljoen maal de massa van de Zon hebben. Diep in het binnenste heersen er temperaturen van zo'n -260°C en bedraagt de dichtheid 100 tot 300 deeltjes per kubieke centimeter. Ter vergelijking, op zeeniveau is de dichtheid van de lucht 10 miljoen miljard (10^{16}) maal zo hoog. Buiten de moleculaire wolken is de dichtheid van de interstellaire materie veel en veel lager. De interstellaire ruimte is dan ook in het algemeen ontzettend ijl, ijler nog dan het beste vacuüm dat wij op Aarde kunnen maken. Dit is dan ook de reden dat wij zo ver de ruimte in kunnen kijken: 384 duizend kilometer tot aan de kraters op de Maan, 1440 miljoen kilometer tot aan de ringen van Saturnus en nog eens 13 miljard maal zo ver

⁹Alle materie oefent een aantrekkende kracht uit op andere materie.



FIGUUR 7 — **Links:** de Paardekopnevel in het sterrenbeeld Orion ontleent z'n naam aan het paardekopachtige vorm waarmee een wolk verduisterende materie in ons melkwegstelsel een achtergelegen H II-gebied gedeeltelijk afdekt. Foto: ESO. **Rechts:** De Slangenevel in het sterrenbeeld Ophiuchus. Op het eerste gezicht lijken de donkere slangvormige structuren gebieden te zijn waar geen sterren voorkomen. In werkelijkheid wordt het licht van de achtergelegen sterren er tegengehouden door een complex van slietvormige verduisterende materie, op slechts 650 lichtjaar van de Zon. Foto: CFHT

tot aan de Andromedanevel. En het kan nog veel verder. Staat er echter toevallig net een moleculaire wolk, zoals de Slangenevel of de Paardekopnevel (Figuur 7) in de weg, dan stopt het zicht al ergens in een spiraalarm van ons eigen melkwegstelsel.

Moleculaire wolken: kraamkamers van sterren

Moleculaire wolken spelen een belangrijke rol in de evolutie van melkwegstelsels. Zij bestaan namelijk voor het grootste deel uit waterstofgas en helium, de elementen waaruit sterren kunnen worden gevormd. Moleculaire wolken zijn dan ook de plekken waar nieuwe sterren ontstaan. De manier waarop dit begint, is echter nog niet helemaal begrepen, omdat dit proces zich diep in het inwendige van de wolk afspeelt en daarom moeilijk waarneembaar is. Duidelijk is wel dat lokale verstoringen van de dichtheid de aanleiding kunnen zijn dat een deel van de wolk onder invloed van de eigen zwaartekracht begint samen te trekken en op te warmen. Aan dit proces, dat miljoenen jaren kan duren, komt pas definitief een eind wanneer de temperatuur en druk in de kern van de *proto-ster* zo hoog is opgelopen dat er spontaan *kernfusie* gaat optreden: het versmelten van een aantal lichte atoomkernen tot een zwaardere kern — in dit geval waterstof tot helium. Omdat bij dit proces veel energie in de vorm van straling vrijkomt, ontstaat er een uitwaarts gerichte stralingsdruk, die verdere samentrekking van de gasbol tot staan brengt. De jonge ster is geboren!

Sterren worden geboren met massa's variërend tussen 1/10 en 100 maal de massa van de Zon. Aangezien deze massa tevens ook hun brandstofvoorraad is, zou je verwachten dat zware sterren langer leven dan lichte sterren. Zware sterren gaan echter veel kwistiger met hun brandstof om dan lichte sterren door sterker te stralen. Een ster van 100 zonsmassa's bijvoorbeeld straalt een miljoen maal helderder dan de Zon. Maar met een brandstofvoorraad van slechts het honderdvoudige van die van de Zon heeft een zware ster een stuk minder lang

te leven: een paar miljoen jaar, tegen 15 miljard jaar voor de Zon.

Helder als ze zijn, zetten zware sterren hun omgeving gemakkelijk naar hun hand. Met hun enorme stralingsdruk blazen zij al snel na hun geboorte grote gaten in hun geboortewolk en ioniseren zij hun omgeving. De eerder besproken Orionnevel (Figuur 4), met in het centrum een aantal jonge hete sterren, is het resultaat van dit proces.

Kosmische recycling

Eenmaal op leeftijd gekomen hebben sterren in hun inwendige heel wat kernfusie-afval verzameld. In lichte sterren, zoals de Zon, komen deze produkten kort voor de terminale fase aan het steroppervlak terecht en worden zij door een dan inmiddels ontstane *sterwind*¹⁰ van de ster weggeblazen. Tot de afvalprodukten die op deze manier in het interstellair medium terecht komen behoren helium, koolstof en zuurstof. Zware sterren ‘verrijken’ hun omgeving op een minder subtiele manier. Zij doen dit door, middels een geweldige *supernova-explosie*, hun buitenste lagen van zich af te slingeren. Op deze manier worden grote hoeveelheden in deze sterren gevormde metalen aan het interstellair medium prijsgegeven.

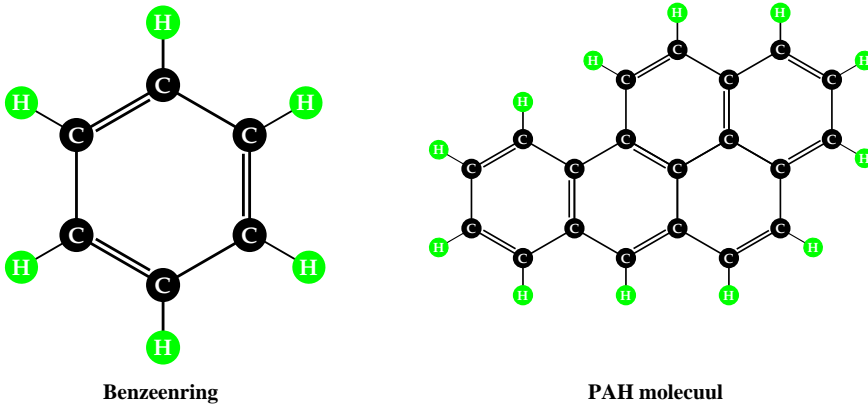
Uiteindelijk komt al dit sterafval weer terecht in moleculaire wolken. Hetzij in oude bestaande wolken in de buurt van waar de ster ter ziele is gegaan, hetzij in nieuwe wolken die onder invloed van de zwaartekracht over een tijdspanne van vele miljoenen jaren uit het sterafval samentrekken. Een volgende generatie sterren die uit deze ‘as’ herrijst, zal met deze metalen vervuild zijn. Ook onze Zon draagt de sporen met zich mee van een eerder leven. Net als ieder van ons overigens: alle zuurstof, koolstof en andere elementen waaruit ons lichaam is opgebouwd, zijn ooit gevormd in het inwendige van vorige generaties sterren en worden door ons gerecycled.

Het interstellair medium: een groot chemisch laboratorium

De verrijking van het interstellair medium met de in sterren gevormde elementen zoals koolstof (C), zuurstof (O), stikstof (N) en silicium (Si) opent de deur voor een breed scala aan chemische reacties in het interstellair medium. Sommige reacties beginnen nog voor de fusieprodukten goed en wel de ster hebben verlaten. Zo gaan koolstofatomen al in de sterwind van een lichte ster eenvoudige verbindingen aan met andere atomen, waarbij o.a. water en koolmonoxide ontstaan. Andere koolstofatomen klitten hier al samen tot roet en ontstaat uit o.a. zuurstof en silicium zand. Meedeinend op de sterwind kunnen de roet- en zanddeeltjes uitgroeien tot grotere clusters, die door astronomen heel huiselijk *stofdeeltjes* genoemd worden.

Eenmaal aangekomen in het *diffuse interstellair medium* wacht de net gevormde moleculen en stofdeeltjes een hard klimaat. De bindingen tussen de atomen in een molecuul worden gemakkelijk verbroken onder invloed van energierijk sterlicht, door de inslag van energierijke deeltjes of door schokken afkomstig van supernova-explosie’s. Veel net gevormde moleculen vallen dan ook al weer snel uit elkaar of gaan in zwaar gehavende staat verbindingen aan met andere atomen. Stofdeeltjes zijn beter bestand tegen het zware interstellair klimaat. Aan hun oppervlak bieden zij atomen en moleculen de gelegenheid om aan te hechten en met hun naaste burens nieuwe chemische verbindingen uit te proberen. Sommige van deze

¹⁰Door de druk van uittreidend sterlicht worden gasdeeltjes behorend tot de buitenste gasschillen van een ster weggeblazen. Sterren die hun leven als hete ster beginnen kunnen op deze manier de helft van hun massa al tijdens hun leven kwijtraken.



FIGUUR 8 — Benzeenringen en PAH moleculen zijn complexe moleculen die in de buurt van oude sterren ontstaan uit de door de sterwind van dit soort sterren aangedragen bouwstenen. Tekening: Els Peeters.

reacties gaan razendsnel, andere vergen vele eeuwen voordat het passende deeltje aandakt. Is zo'n nieuwe verbinding stabiel, dan zal het bestand zijn tegen bestraling met energierijk licht, bombardementen van energierijke deeltjes en schokgolven afkomstig van supernova-explosie's. Eén van de meest complexe, maar ook stabielste moleculen die zich uiteindelijk kunnen vormen, zijn de uit benzeenringen opgebouwde Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAKs), of 'PAHs' in het Engels (zie Figuur 8). Op Aarde ontstaan deze zeer giftige moleculen o.a. bij de verbranding van benzine, tabak en hamburgers. PAHs worden inmiddels overal aangetroffen, tot in de ijsberen op de Noordpool aan toe. Ook in mijn onderzoek spelen deze deeltjes een belangrijke rol.

Een veel vriendelijker klimaat ontstaat wanneer het diffuus verdeelde gas en stof door toedoen van de aantrekkende werking van de zwaartekracht de kans krijgt samen te trekken tot dichtere wolken. De grootsten hiervan worden *moleculaire wolken* genoemd en hebben massa's tot wel een miljoen maal die van de Zon. De buitenste lagen van deze wolken beschermen de verder naar binnen gelegen delen tegen de inwerking van sterstraling en snelle deeltjes. Dit betekent echter ook dat de binnendelen minder goed verwarmd worden dan de buitenlagen. De temperatuur is hier dan ook lager dan buiten de wolk: -200°C of lager. In de aller dichtste delen kan de temperatuur zelfs zakken tot onder de -250°C . Stofdeeltjes raken hier dan ook bedekt met dunne laagjes ijs, o.a. in de smaken: water-ijs, koolmonoxide-ijs, kooldioxide-ijs, zuurstof-ijs en stikstof-ijs. In deze ijzige omstandigheden, maar goed beschermd tegen agressie van buitenaf, kunnen zich broze moleculen vormen die het buiten de wolk niet lang zouden uithouden.

De ijsafzettingen verdwijnen weer één voor één als een stofkorrel de warmte te voelen krijgt van een zich in zijn omgeving uit de moleculaire wolk vormende ster. Met toenemende temperatuur en helderheid van deze *proto-ster* wordt het klimaat in de wolk steeds onvriendelijker voor moleculen en stofdeeltjes. Een deel vindt een veilig heenkomen in kleine compacte verdichtingen rond de proto-ster, die later tot planeten en kometen uitgroeien. Een ander deel valt ten prooi aan de intense straling van de jonge ster en wordt weer opgesplitst in de losse bouwstenen.

Infrarood-astronomie

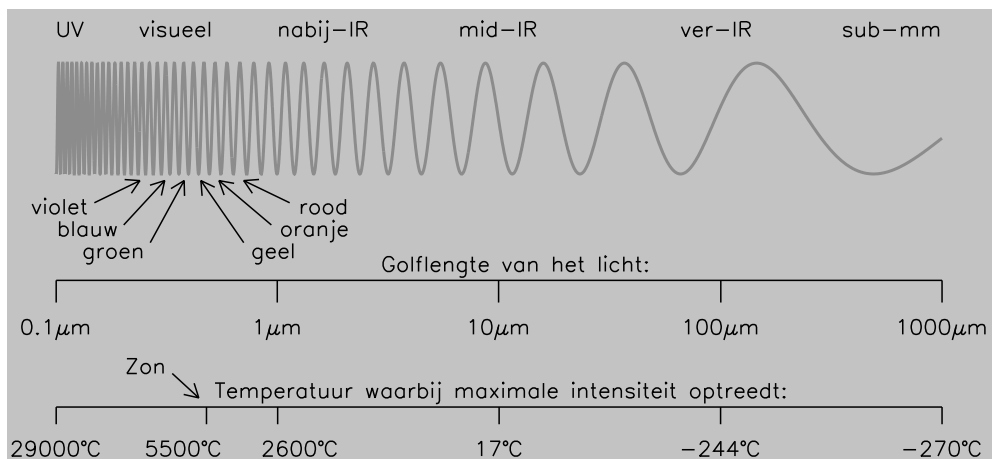
Veel van de kennis die is vergaard over de processen die zich in het heelal afspelen zouden we nooit hebben kunnen opdoen zonder het bestuderen van het licht dat onze studie-objecten uitzenden. Veldwerk verrichten behoort voor astronomen immers niet tot de mogelijkheden, aangezien de eerst volgende ster, na de Zon, zo'n 40 duizend miljard kilometer van ons vandaan staat.

Licht is net als geluid een golfverschijnsel. Zoals bij geluid lage tonen een lange golflengte hebben en hoge tonen een korte golflengte, zo heeft ook iedere kleur licht z'n eigen karakteristieke golflengte. Rood licht, bijvoorbeeld, heeft een golflengte van $0.70 \mu\text{m}$ ¹¹, oranje licht een golflengte van $0.60 \mu\text{m}$, geel licht een golflengte van $0.55 \mu\text{m}$, groen licht een golflengte van $0.53 \mu\text{m}$, blauw licht een golflengte van $0.49 \mu\text{m}$ en violet licht een golflengte van $0.44 \mu\text{m}$. Deze volgorde is precies dezelfde als die in een regenboog. Maar net zoals er geluiden zijn die ons oor niet kan horen — maar een hond bijvoorbeeld wel — zijn er ook kleuren licht die onze ogen niet kunnen zien. Zo wordt licht met een golflengte korter dan violet 'ultra-violet' genoemd (afgekort: UV) en licht met een golflengte langer dan rood licht 'infra-rood' (afgekort: IR). De hele kleurenwaaier, inclusief de voor ons onzichtbare kleuren, wordt het *electro-magnetisch spectrum* genoemd. Een groot deel hiervan staat in het bovenste deel van Figuur 9 afgebeeld.

Alles dat een temperatuur heeft hoger dan -273°C (de laagst mogelijke temperatuur) produceert¹² zelf licht. Dat geldt net zo zeer voor een blokje ijs van -5°C , als voor het men-

¹¹ $1 \mu\text{m} = 1$ micro-meter = het 1 miljoenste deel van een meter.

¹² Licht produceren is iets anders dan licht weerkaatsen. De hete gloeidraad in een lamp produceert zichtbaar licht; de muur weerkaatst het alleen maar. Hetzelfde geldt voor zonlicht: de Zon produceert het, het strand weerkaatst het.



FIGUUR 9 — Het electromagnetisch spectrum. Iedere kleur licht heeft zijn eigen karakteristieke golflengte. Behalve voor ons zichtbare kleuren (*visueel*) bestaan er ook kleuren met kortere golflengten (*ultra-violet*) en langere golflengten (*infrarood*). Infrarood licht is opgedeeld in de kleuren *nabij-infrarood*, *mid-infrarood* en *ver-infrarood*. Onderaan de figuur staat afgebeeld welke temperatuur de lichtbron moet hebben om op de bijbehorende kleur het helderst te zijn. Zo straalt een glas Madeira wijn met een temperatuur van 17°C het helderst op een golflengte van $10 \mu\text{m}$.

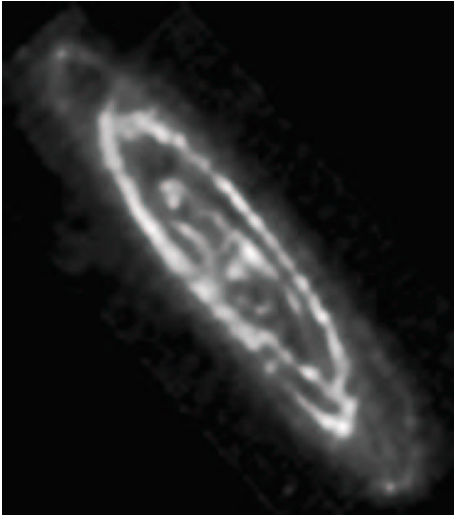


FIGUUR 10 — **Links:** Een werkende haardroger, gefotografeerd in zichtbaar licht. De hete lucht is niet heet genoeg om zichtbaar licht uit te stralen. **Rechts:** Dezelfde werkende haardroger, nu gefotografeerd in infrarood licht. De hete lucht straalt helder op infrarode golflengten. Foto: NASA/IPAC.

selijk lichaam (37°C), een roodgloeiende ijzeren staaf (500°C) en het oppervlak van de Zon (5500°C). Toch kunnen we een blokje ijs in het donker niet zien. Dit komt doordat, afhankelijk van de temperatuur, alleen maar een deel van alle kleuren wordt opgewekt. Een ijsblokje is dan ook alleen te zien in infrarode kleuren (die ons oog niet kan waarnemen), terwijl de Zon ook, en vooral, zichtbaar licht uitstraalt. De kleur waarop een lichtgevend object het helderst is, wordt bepaald door zijn temperatuur. Zo straalt een ijsblokje het helderst in mid-infrarode kleuren, terwijl de Zon het helderst straalt in geel licht. Dit wordt nog duidelijker door een blik op de onderste helft van Figuur 9. Hier kan worden afgelezen welke kleur het helderst oplicht voor verschillende temperaturen van een lichtbron. Zo kunnen wij ook afleiden dat een rode ster koeler is dan een gele ster en een gele ster koeler is dan een blauwe ster.

Tot een jaar of 50–60 geleden konden sterrenkundigen alleen waarnemingen doen in zichtbaar licht. Dit is een prima kleurbereik als het er om gaat warme (5000°C) en hete ($20,000^{\circ}\text{C}$) sterren waar te nemen, maar niet als het er om gaat het licht van koele (2000°C) sterren en van koude (-260°C) moleculaire wolken te detecteren. Deze laatste stralen namelijk alleen infrarood licht uit. De ontwikkeling van infrarood-gevoelige detectoren kwam in de jaren 60 op gang, toen duidelijk werd dat naderende kernraketten goed kunnen worden opgespoord aan de hand van de hete uitlaatgassen van hun motoren. Dat dit principe inderdaad werkt, wordt treffend geïllustreerd door het rechter paneel van Figuur 10, dat het infrarode licht van de hete ‘uitlaatgassen’ van een modale haardroger toont. De eerste sterrenkundige infrarood-waarnemingen volgden uiteindelijk eind jaren zestig.

Waarneem-technisch komt er bij een infrarood-waarneming veel meer kijken dan bij een waarneming in zichtbaar licht. De aardatmosfeer is namelijk tamelijk ondoorlatend voor infrarood licht afkomstig van buiten de dampkring (op een paar ver van elkaar gelegen infraroodkleuren na) en produceert bij een luchttemperatuur van tussen de -50 en $+20^{\circ}\text{C}$ zelf ook veel infraroodstraling! De uitdagingen zijn misschien het best te vergelijken met die voor een waarnemer, die in zichtbaar licht overdag zijn waarnemingen moet doen en zich daarbij moet beperken tot slechts één bepaalde kleur, bijvoorbeeld geel. Een verder belangrijk verschil met optische waarnemingen is de noodzaak om de infrarood-camera in een vacuüm-koelkast (cryogeen vat) te plaatsen, omdat de camera inclusief detector anders zelf teveel infraroodstraling produceert. De eisen, die hierbij aan het koelend vermogen gesteld worden, nemen



FIGUUR 11 — De Andromedanevel gezien op een golflengte van $175\ \mu\text{m}$, in de kleur ver-infrarood. Op deze golflengte stralen vooral koude moleculaire wolken met temperaturen van typisch -257°C . Opmerkelijk is dat de moleculaire wolken in de Andromedanevel in een ringvormige in plaats van een spiraalvormige structuur zijn ondergebracht. Foto: ESA/ISO/ISOPHOT & Martin Haas.

toe naarmate de golflengte waarop waargenomen wordt langer is. Voor moleculaire wolken met een temperatuur van -250°C , die vooral op $100\ \mu\text{m}$ in het ver-infrarood stralen, moet daarom zeer veel meer worden gekoeld dan voor ‘warm’ gas van -10°C , dat vooral rond $11\ \mu\text{m}$ in het mid-infrarood straalt. Alle met de aardatmosfeer gerelateerde problemen verdwijnen wanneer de infrarood-telescoop in de ruimte wordt gebracht. De belangrijkste winst van een observatorium in de ruimte is de vrijheid om alle, in plaats van slechts een paar, infraroodkleuren te kunnen waarnemen. Nadelen zijn echter de hoge kosten om de telescoop ‘space-qualified’ te bouwen, hem te lanceren en de hoge afschrijvingskosten vanwege de beperkte levensduur, bepaald door de beperkte hoeveelheid koelmiddel dat mee omhoog kan. De eerste infrarood-telescoop die desondanks boven de dampkring werd getild was de Amerikaans/Brits/Nederlandse satelliet IRAS (1983). Deze werd 12 jaar later gevolgd door de Europese satelliet ISO (1995–1998). De waarnemingen van deze satelliet vormen de aanleiding voor dit proefschrift.

Een treffende illustratie van waartoe een infrarood-telescoop in de ruimte in staat is, toont de opname van de Andromedanevel, gemaakt op een golflengte van $175\ \mu\text{m}$ in het ver-infrarood (Figuur 11). Op deze golflengte stralen vooral koude wolken met temperaturen van om en de nabij -257°C . Dergelijke wolken zijn veel te koud om zichtbaar licht uit te stralen. Op foto’s genomen in zichtbaar licht vallen die koude wolken niettemin op, omdat zij het licht van erachter gelegen sterren tegenhouden (zie Figuur 2).

Botsende melkwegstelsels

In 1983 bracht de IRAS satelliet-telescoop de hele hemel in kaart in vier kleuren infraroodlicht. De metingen zouden astronomen in staat stellen om voor hun favoriete objecten de temperatuursverdeling van de daar aanwezige interstellair materie te bepalen uit de infrarode helderheid op golflengten van 12, 25, 60 en $100\ \mu\text{m}$, corresponderend met temperaturen van -32°C , -157°C , -225°C en -244°C . Aangezien dit tot die tijd nooit eerder was gedaan, was het aan het begin van de missie wel duidelijk dat er een aantal verrassingen zouden volgen. Eén van die verrassingen was de vondst van een aantal infraroodbronnen die op

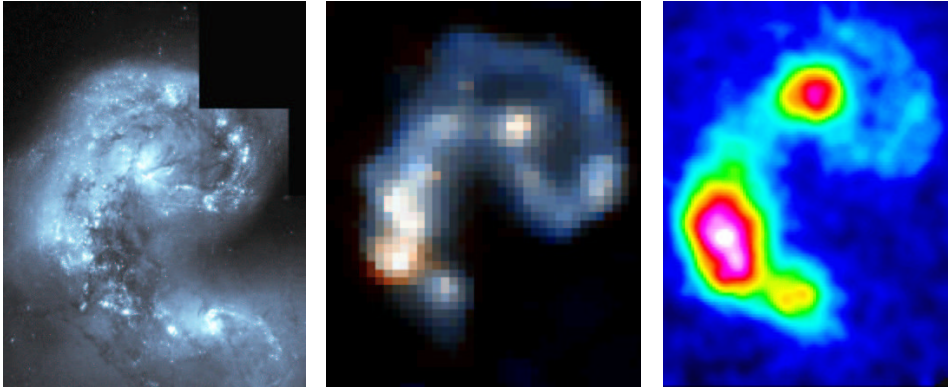


FIGUUR 12 — “De Antennes” (NGC 4038/39). **Links:** Groothoek-opname van de botsende stelsels. Duidelijk zichtbaar zijn twee sierlijke slierten bestaande uit sterren die bij de botsing weggeslingerd zijn. Foto: CTIO. **Rechts:** Detail-opname van de twee in elkaar verwrochte melkwegstelsels. De kern van het ene stelsel is rechtsonder zichtbaar, de kern van het andere stelsel staat net iets boven het midden. De interactie-zone bevindt zich ietwat links van de verbindingslijn tussen de beide kernen en is te herkennen aan de vele donkere wolken. Foto: Brad Whitmore (STScI) & NASA.

foto's in zichtbaar licht niet voorkwamen. Na het meten van de afstand tot deze nieuwe bronnen bleek dat zij heel ver weg staan, op afstanden van 240 miljoen lichtjaar (120 maal de afstand tot de Andromedanevel) en verder. Om op die afstand nog voor IRAS zichtbaar te zijn moesten zij dus een *lichtkracht*¹³ hebben die minstens 100 maal zo hoog is als die van onze Melkweg! Dit bezorgde deze melkwegstelsels de naam *Ultra-Luminous Infrared Galaxies* (afgekort: ULIRG). Gerichte zoekacties met optische telescopen resulteerde uiteindelijk in de detectie van deze merkwaardige stelsels. Hierbij bleken zij in zichtbaar licht vele malen zwakker te zijn dan op grond van hun infrarood helderheid had mogen worden verwacht. Dit, gecombineerd met de extreme lichtkracht, vroeg om een extreme verklaring.

Inmiddels is duidelijk geworden dat ULIRGs het resultaat zijn van de botsing van twee melkwegstelsels. Scherpe opnames onthullen dat vrijwel alle ULIRGs er ‘verstoord’ uitzien. In plaats van een mooie spiraalstructuur, zoals NGC 1232 (Figuur 3), tonen zij een chaotisch patroon van heldere en donkere gebieden. Een prachtig voorbeeld van een botsing, die nog aan de gang is, wordt geboden door een tweetal melkwegstelsels die vooral bekend staan onder hun bijnaam “de Antennes”. In het linker paneel van Figuur 12 is goed te zien waaraan zij hun naam ontleen. De twee diffuse slierten die aan de beide stelsels ‘kleven’ bestaan uit sterren die ten gevolge van de zwaartekrachtsaanrekening van het andere melkwegstelsel uit hun omloopsbanen zijn geraakt en vervolgens zijn weggekatapulteerd. Uiteindelijk zullen deze sterren allemaal weer terugkeren naar het centrum van de botsing, waar dan inmiddels de beide stelsels tot één groter stelsel zullen zijn versmolten. Tijdens de botsing, die nog vele miljoenen jaren zal voortduren, komen sterren niet daadwerkelijk met elkaar in aanvaring. De afstand tussen sterren in een melkwegstelsel is namelijk zo groot dat andere sterren er ge-

¹³Lichtkracht is een andere naam voor uitgestraald vermogen en wordt uitgedrukt in de eenheid Watt. De lichtkracht van de Zon bedraagt 3.9×10^{26} Watt. De lichtkracht van een 60-Watt-lamp bedraagt . . . 60 Watt.



FIGUUR 13 — “De Antennes” (NGC 4038/39) gefotografeerd in drie verschillende kleuren. **Links:** De opname in zichtbaar licht toont de verdeling van sterren. Foto: Brad Whitmore (STScI) & NASA. **Midden:** De opname in mid-infrarood licht bewijst dat warm stof vooral in de interactie-zone voorkomt. Foto: ESA/ISO/ISOCAM & Laurent Vigroux. **Rechts:** De opname in sub-mm licht ($850\ \mu\text{m}$) laat zien dat er zich ook veel koud stof in de interactie-zone bevindt. Foto: Paul van der Werf.

makkelijk tussendoor¹⁴ kunnen. Voor de moleculaire wolken en het diffuus verdeelde gas ligt dit anders. Zij komen daadwerkelijk met elkaar in aanvaring en worden opgehoopt en samengeperst op de plek waar de twee stelsels elkaar ‘geraakt’ hebben. Foto’s gemaakt in zichtbaar licht tonen op deze plek vooral donkere wolken (linker paneel van Figuur 13). Infraroodfoto’s daarentegen laten zien dat er in de *interactie-zone* veel warm gas en stof voorkomt (midden-paneel van Figuur 13), terwijl de foto genomen in ‘sub-millimeter’ licht (op $850\ \mu\text{m}$) er ook de aanwezigheid van grote hoeveelheden zeer koud gas in aantoonde (rechter paneel van Figuur 13). Het is daarmee duidelijk dat er in de moleculaire wolken die in de *interactie-zone* zijn opgehoopt een geweldige golf van stervorming heeft plaatsgevonden, ingezet door de compressie van het gas. Anno 2003 verhitten de pasgevormde sterren hun geboortewolk en doen hem in infrarood licht helder stralen. Later, als deze ‘babyboomers’ hun geboortewolk hebben stukgeblazen, zullen op deze plek grote hoeveelheden heldere sterren blijken te staan, die dan vooral in zichtbaar licht goed te zien zullen zijn.

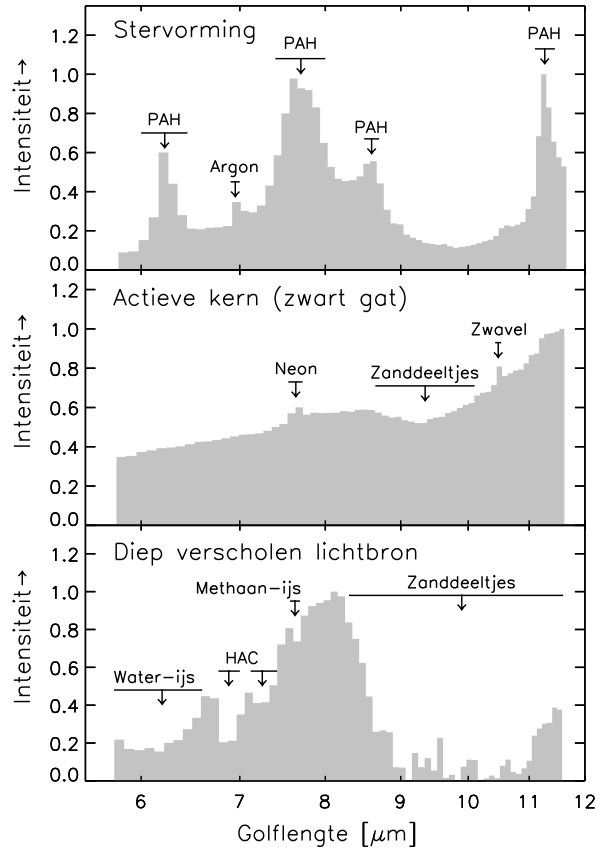
Ook onze Melkweg en de Andromedanevel liggen op ramkoers. Op dit moment vliegen zij met een snelheid van 1 miljoen kilometer per uur op elkaar af. Met een huidige onderlinge afstand van 2 miljoen lichtjaar duurt het echter nog wel even voordat wij dekking moeten gaan zoeken.

Met een lichtkracht van 10 tot 100 maal de lichtkracht van de Antennes moeten de botsingen in ULIRGs zo mogelijk nog dramatischer van aard zijn dan die in het Antenne-stelsel. Astronomen vragen zich dan ook serieus af of de enorme lichtkracht van ULIRGs wel enkel en alleen veroorzaakt kan worden door een golf van stervorming (in het Engels: *starburst*). Een alternatief is namelijk *accretie* (massa-aanvoer) op een groot zwart gat¹⁵, waarbij ook erg veel energie vrijkomt. Veel bekende melkwegstelsels hebben zo’n *actieve kern* en ontlenen er een (groot) deel van hun lichtkracht aan. Helaas gaan de kernen van ULIRGs schuil achter

¹⁴Stel: we verkleinen de diameter van de Zon van 1.4 miljoen km tot die van een tennisbal. De eerstvolgende ster staat op deze schaal dan op een afstand van 3000 km. Dit laat zien dat de ruimte tussen de sterren heel erg leeg is!

¹⁵Een zwart gat is een object dat zo zwaar is dat zelfs licht niet kan ontsnappen. Het object is dan ook onzichtbaar.

FIGUUR 14 — **Boven:** Het spectrum van een stervormingsgebied wordt gedomineerd door intensiteitspieken die toe te schrijven zijn aan tot stralen gebrachte PAH-molekulen en Argon-atomen. **Midden:** De aanwezigheid van een actieve kern kan in het infrarood worden afgeleid uit de aanwezigheid van infraroodstraling van heet (500° C) stof, dat deel uitmaakt van een torus rond het centrale zwarte gat. Heet stof straalt heel gelijkmatig over een breed golflengtebereik. Ook karakteristiek zijn intensiteitspieken van neon en zwavel. **Onder:** Het spectrum van een hete infraroodbron, verscholen achter een dikke laag moleculaire wolken, wordt gekenmerkt door de *afwezigheid* van intensiteit op bepaalde golflengten. De missende intensiteit wordt tegengehouden door zand en door verschillende soorten ijs. Zowel zand als ijs komen voor in stofdeeltjes die deel uitmaken van zeer koude moleculaire wolken.



dikke 'dekens' van moleculaire wolken, die ten gevolge van de botsing op de nieuwe kern terecht zijn gekomen. Hierdoor is het moeilijk om na te gaan of de lichtkracht van de kern wordt gedomineerd door een golf van stervorming of door accretie op een groot zwart gat. Eén ding staat in elk geval vast: de 'dekens' bevatten voldoende gas en stof om zowel een grote starburst als een groot zwart gat te kunnen 'voeden'.

Eén van de eigenschappen van interstellair materie is dat het minder sterk verduistert naarmate de golflengte waarop wordt waargenomen langer is. Een waarnemer in infrarood licht heeft het dus minder moeilijk door de verduisterende 'deken' heen de componenten van de kern te ontwaren dan een waarnemer in zichtbaar licht. Met de lancering van het *Infrared Space Observatory* (ISO) in 1995 werd het voor het eerst mogelijk om ULIRGs over een breed infrarood golflengtebereik te bestuderen en een poging te wagen de belangrijke vraag te beantwoorden: wat veroorzaakt de enorme lichtkracht van ULIRGs? Stervorming of accretie op een groot zwart gat.

De beste manier om in het infrarood de aanwezigheid van een actieve kern (zwart gat) of van jonge sterren (stervorming) vast te stellen in de kern van een ULIRG is door de intensiteit (helderheid) van de ontvangen infraroodstraling te meten als functie van de golflengte. De bovenste twee panelen van Figuur 14 laten zien dat de intensiteitsverdeling — of *spektrum* in vaktaal — er voor een stervormingsgebied duidelijk anders uitziet dan voor een actieve

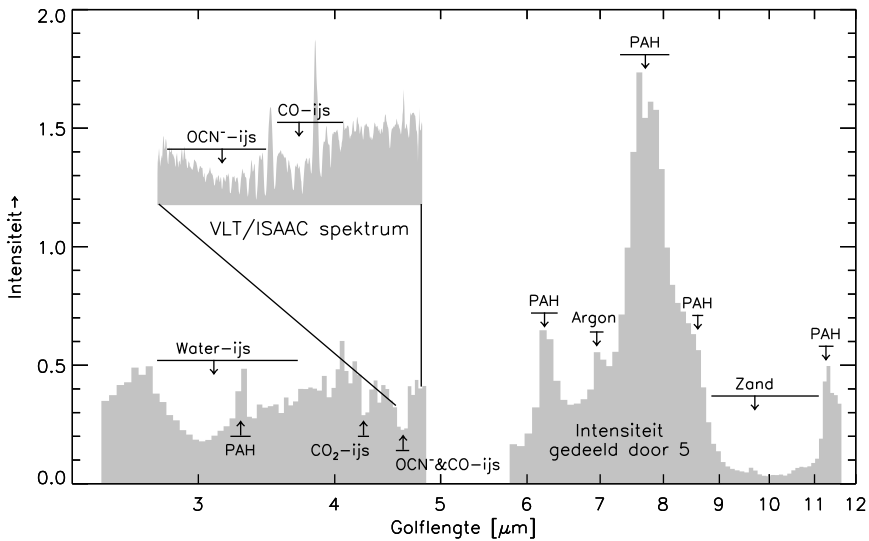


FIGUUR 15 — Een extreem lang belichte opname van een klein stukje ‘lege’ nachthemel in het sterrenbeeld Grote Beer (het zogeheten “Hubble Deep Field”). Op één ster uit ons eigen melkwegstelsel na (onder in beeld) toont de foto uitsluitend andere melkwegstelsels. De afstanden tot deze stelsels bedragen vele miljarden lichtjaren, hetgeen betekent dat wij hen zien zoals zij er uitzagen toen het heelal zo’n 5 tot 10 miljard jaar jonger was. Bron: R. Williams & het HDF Team (STScI) en NASA.

kern. Zo wordt het infraroodspektrum van een stervormingsgebied gedomineerd door intensiteitspieken op 6,2, 7,7, 8,6 en 11,2 μm . Deze pieken zijn de spektrale ‘vingerafdrukken’ van PAH-molekulen (Figuur 8), die door het licht van jonge sterren tot stralen gebracht worden. Het infraroodspektrum van een zwart gat daarentegen, wordt vooral gedomineerd door de warmtestraling afkomstig van een *torus* (een dikke ring; nog het best te vergelijken met een zwemband) van heet (500° C) stof, dat rond het zwarte gat draait. De mate waarin het spektrum van een ULIRG meer lijkt op het spektrum van een stervormingsgebied (bovenste paneel van Figuur 14) dan op dat van een actieve kern (middelste paneel van Figuur 14), wordt sinds de ISO-missie door velen gebruikt om te bepalen of de lichtkracht van ULIRGs gedomineerd wordt door stervorming of door accretie op een zwart. De meeste astronomen zijn er inmiddels van overtuigd dat de enorme lichtkracht toch vooral door een botsings-geïnduceerde golf van stervorming veroorzaakt wordt en niet door een actieve kern.

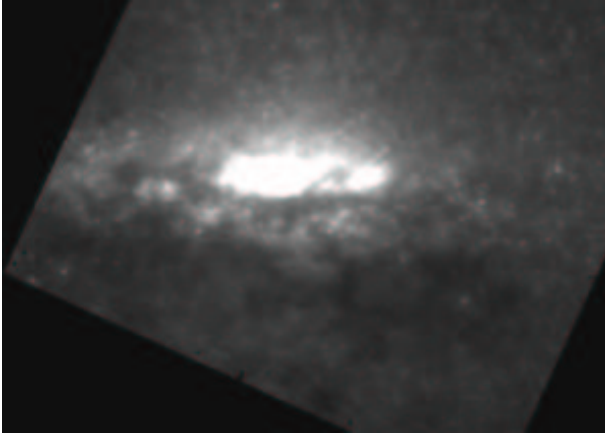
ULIRGs: de laatsten der Mohicanen

Het onderzoek aan ULIRGs neemt een bijzondere plaats in in het onderzoek naar de evolutie van het heelal. ULIRGs zijn mogelijk de meest recente exponenten van een tijdvak in de geschiedenis van heelal waarin melkwegstelsels er nog niet zo uitzagen zoals wij hen nu zien en waarin het veel vaker voorkwam dat melkwegstelsels met elkaar in botsing kwamen. Aanwijzingen voor het bestaan van een dergelijke roerige periode komen van waarnemingen aan zeer ver weg gelegen melkwegstelsels. Het licht dat wij van deze stelsels ontvangen is vele vele miljarden jaren onderweg geweest, waardoor wij deze stelsels zien zoals zij er in hun



FIGUUR 16 — Het door ISO gemeten spectrum van de kern van NGC 4945 toont de spektrale vingerafdrukken van vele soorten ijs. Dit duidt op de aanwezigheid van koude moleculaire wolken nabij de kern van het stelsel. De aanwezigheid van sterke vingerafdrukken van PAH-molekulen wijst op sterke stervorming in de kern. **Inzet:** De ISAAC-spectrograaf van de VLT was in staat de spektrale vingerafdrukken van OCN^- -ijs en CO-ijs van elkaar te scheiden.

jeugd hebben uitgezien. Een prachtig voorbeeld van een dergelijke reis terug in de tijd biedt de opname van het zogeheten ‘Hubble Deep Field’, gemaakt in een combinatie van zichtbaar en infrarood licht (Figuur 15). Alle lichtbronnen op deze foto, op één ster na, zijn melkwegstelsels. Een aantal van hen ziet er heel normaal uit, terwijl anderen de lidtekens tonen van aanvaringen met andere melkwegstelsels. De meest ver weg gelegen stelsels zijn helaas te klein om goed geanalyseerd te kunnen worden. Andere opnames, gemaakt in sub-millimeter licht bevatten aanwijzingen dat er in het jonge heelal een periode van sterke stervorming moet zijn geweest, waarschijnlijk het gevolg van botsingen tussen deze jonge melkwegstelsels. Tot dezelfde conclusie komen waarnemers die de mate van stervormingsactiviteit afleiden uit de sterkte van de *recombinatie-straling*¹⁶ afkomstig van melkwegstelsels. Helaas zijn waarnemingen aan ver weg gelegen stelsels zeer tijdsintensief en moeilijk uitvoerbaar, omdat de stelsels vanwege hun afstanden extreem zwak zijn. De opname van het Hubble Deep Field alleen al koste 10 volle dagen (240 uur) waarnemingstijd! Willen we dus meer te weten komen over de processen die zich afspeelden in de roerigste periode in de geschiedenis van het heelal, dan zijn de relatief dichtbij gelegen ULIRGs, als laatsten der Mohicanen, uitstekende vervangende studie-objecten.



FIGUUR 17 — De kern van het melkwegstelsel NGC 4945 in nabij-infrarood licht. Goed zichtbaar zijn de vele moleculaire wolken (*donker*) die het licht van de sterren (*wit*) in de kern deels verduisteren. Een dergelijke aanblik doet denken aan de effecten van verduisterende wolken in de Melkwegband. Foto: Allesandro Marconi.

Mijn proefschrift

Als medewerker van het ISO Spectrometer Data Center (ISO-SDC) van het Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) in Garching (Duitsland) had ik het voorrecht gedurende de operationele fase van de ISO-missie (1995–1998) nauw betrokken te zijn bij de analyse van de mid-infrarood spektra van diverse soorten infrarood-heldere melkwegstelsels. Hieronder waren ook een groot aantal ULIRGs. Aangezien de meeste van deze stelsels nooit eerder in dit golflengte-gebied waren bestudeerd, was vrijwel alles dat ons onderzoek opleverde nieuw. Hierdoor was ik bij het begin van mijn promotie-onderzoek in 1999 helemaal klaargestoomd om het pionierswerk van onze groep voort te zetten. Mijn speciale interesse ging hierbij uit naar een nauwkeurige vergelijking van de mid-infrarood spektra van de kernen van starburst-stelsels, actieve stelsels en ULIRGs om te kijken in hoeverre de methode, die wij hadden bedacht om de bijdrage van stervorming tot de helderheid van ULIRGs te meten, robuust is. Alle hoofdstukken in mijn proefschrift hebben hier in meerdere of mindere mate mee te maken.

Een zeer bijzonder spectrum is in dit verband het spectrum van de kern van het starburst-stelsel NGC 4945. Dit spectrum is zo anders dan dat van andere vergelijkbare melkwegkernen dat wij eerst de waarneming hebben laten herhalen voordat wij waarneemfouten durfden uit te sluiten en ons aan een analyse hebben durven te wagen. Deze analyse vormt nu het hart van het eerste gepubliceerde onderzoek voor mijn proefschrift, het huidige hoofdstuk 3. Het bijzondere van het spectrum van de kern van NGC 4945 (Figuur 16) is dat het in tegenstelling tot de spektra van de kernen van vele andere *starburst-stelsels*¹⁷ sterke spektrale vingerafdrukken toont van verschillende soorten ijs. Aangezien ijs alleen kan voorkomen in zeer koude moleculaire wolken betekent dit dat er zelfs in deze, door sterke sterstraling gedomineerde, kern plekken zijn waar nog zeer koud materiaal voorhanden is. Deze zijn goed zichtbaar als donkere vlekken op de infrarood-foto van de kern (Figuur 17). Onze ontdekking vormde voor ons de aanleiding om de *Very Large Telescope* (VLT) van de *European Southern*

¹⁶De rode kleur van bijvoorbeeld de Orionnevel is het resultaat van recombinatie-straling. Rond deze nevel worden vele nieuwe sterren gevormd.

¹⁷Starburst-stelsels zijn melkwegstelsels die een periode van sterke stervorming doormaken. De lichtkracht van dit soort melkwegstelsels is dientengevolge groter dan de lichtkracht van normale melkwegstelsels, maar altijd nog een faktor 10 tot 100 lager dan die van ULIRGs.

Observatory (ESO) in te zetten om de vingerafdrukken van drie soorten ijs nog eens in detail waar te nemen. Deze waarnemingen staan beschreven in hoofdstuk 4 en staan mee afgebeeld in Figuur 16. De gedetailleerde spektrale vingerafdrukken verraden ons dat de moleculaire wolken rond de kern van NGC 4945 inderdaad koud zijn, maar dat de langdurige blootstelling aan sterstraling toch al voor enige opwarming en voor chemische reacties diep binnenin heeft gezorgd. Zo is er al een flinke vingerafdruk te zien van een speciaal soort ijs (OCN^- -ijs; Figuur 16), dat in ‘maagdelijke’ moleculaire wolken niet voorkomt. Ook zijn bepaalde vluchtige soorten CO-ijs al verdampt ten gevolge van de stijging van de temperatuur in de wolk. Onze waarnemingen van de stoffige en ijzige kern van NGC 4945 geven voor het eerst inzicht in de toestand van stofdeeltjes in moleculaire wolken van een ander melkwegstelsel dan het onze. Ook bieden zij inzicht in de samenstelling van de moleculaire wolken in de nog veel ‘stoffigere’ kernen van ULIRGs.

Het in mijn ogen belangrijkste resultaat van mijn proefschrift (hoofdstuk 5) kwam geheel bij toeval tot stand toen ik het mid-infrarood spectrum van het melkwegstelsel NGC 4418 aan mijn verzameling melkwegstelsel-spektra toevoegde. Het spectrum (onderste paneel van Figuur 14) wijkt sterk af van dat van andere nabije melkwegstelsels (overige panelen van Figuur 14) en toont spektrale vingerafdrukken van onder andere water-ijs, methaan-ijs en zanddeeltjes. De kern van dit stelsel is dus kennelijk helemaal omgeven door een dikke laag gas en stof, in de vorm van koude moleculaire wolken. Vergeleken met deze kern is de kern van NGC 4945 zo stofvrij als een operatie-kamer! De aanwezigheid van de dikke stoflaag in NGC 4418 laat niet toe te bepalen wat er onder de deken gebeurt; of de lichtkracht van de kern veroorzaakt wordt door een grote golf van stervorming of door de aanwezigheid van een groot centraal zwart gat, of door een combinatie van beiden. Wat is nu het belang van ‘de ontdekking’ van het spectrum van NGC 4418? De realisatie dat de kernen van melkwegstelsels compleet verscholen kunnen gaan achter een dikke laag zeer koud gas en stof en dat dergelijke kernen te herkennen zijn aan een mid-infrarood spectrum als dat van NGC 4418.

Van de kernen van ULIRGs is bekend dat zij zeer veel gas en stof bevatten. Zouden hun spektra misschien op die van NGC 4418 lijken? Dit blijkt inderdaad zo te zijn voor een aantal van hen, zoals ik in de hoofdstukken 2 en 6 aantoon. Het mooiste voorbeeld is Arp 220 (Figuur 18; melkwegstelsel nummer 220 uit de catalogus van Hilton Arp), de meest nabije en bekendste ULIRG. Het spectrum van Arp 220 (Figuur 19) blijkt het midden te houden tussen dat van een stervormingsgebied en dat van een diep verscholen lichtbron. Dit betekent dat het spectrum van Arp220 uit twee componenten bestaat, die even sterk bijdragen: een stervormings-component en een diep-verscholen-lichtbron-component. Dit betekent dat er in de kern zowel stervorming optreedt als dat er een diep verscholen, niet nader te identificeren, lichtbron huist. Het laatste kan dus een groot zwart gat of een stervormingsgebied blijken te zijn. Eerdere interpretaties van het zelfde mid-infrarood spectrum hebben het *gehele* mid-infrarood spectrum aan stervorming toegeschreven en daarmee, zoals nu blijkt, de verscholen lichtbron over het hoofd gezien.

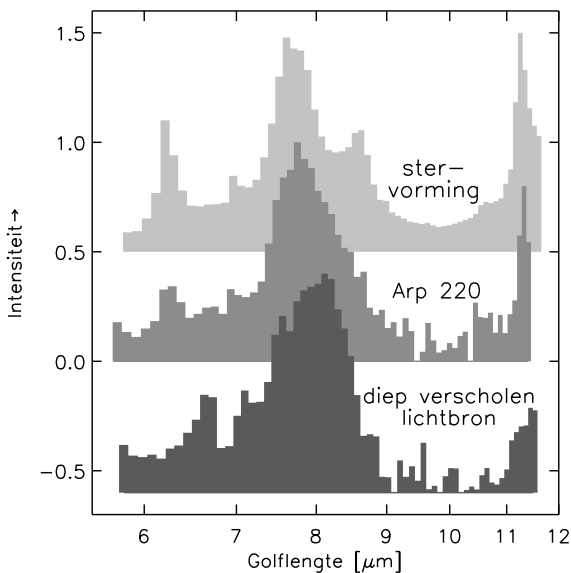
De ontdekking van ijs in de kernen van NGC 4945 en NGC 4418 vormde de aanleiding om alle door mij verzamelde ISO mid-infrarood spektra te onderzoeken op het voorkomen van de vingerafdrukken van water-ijs. Deze studie (hoofdstuk 2 van mijn proefschrift) leverde 16 nieuwe gevallen op. Vooral onder ULIRGs blijkt het vaak voor te komen dat er water-ijs in de gezichtslijn naar de kern zit: 60% van de onderzochte ULIRG-spektra toont de bijbehorende spektrale vingerafdruk. Aangezien water-ijs alleen in koude moleculaire wolken voorkomt, betekent dit dat er in de kernen van ULIRGs nog veel moleculair materi-



FIGUUR 18 — Het kerngebied van de bekendste ULIRG, Arp 220, gezien in nabij-infrarood licht. De grote hoeveelheden verduisterend stof in het kerngebied maakt het moeilijk de twee afzonderlijke kernen van het stelsel te ontwaren. Elk van beide kernen is apart nog eens omgeven door een dikke laag stof. Hierdoor vertoont het spektrum van Arp220 grote gelijkens met dat van NGC 4418. Bron: R. Thompson, N. Scoville en NASA.

aal voorhanden moet zijn om sterren uit te vormen. Een aantal ULIRGs heeft zelfs zo veel moleculair materiaal voor de kern zitten dat het mid-infrarood spektrum zeer veel lijkt op dat van NGC 4418 (onderste paneel van Figuur 14).

Voor veel ULIRGs is het dus niet mogelijk om middels infrarood-spektroscopie er achter te komen of hun enorme lichtkracht (grotendeels) baseert op accretie op een centraal zwart gat of op stervorming. De grote hoeveelheden gas en stof in hun kernen versluieren het antwoord. De kortgeleden gelanceerde opvolger van ISO, genaamd SIRTf, zal het onderzoek aan ULIRGs een nieuwe impuls geven. De detectoren van de satelliet zijn gevoeliger en de telescoop is groter. Er staan ons zeker nog veel verrassingen te wachten!



FIGUUR 19 — Het infraroodspektrum van Arp 220 (**midden**) houdt het midden tussen het spektrum van een stervormingsgebied (**boven**) en dat van een diep verscholen lichtbron (**onder**). In het centrum van Arp 220 vindt er dus stervorming plaats en is er ook een diep verscholen lichtbron aanwezig. Deze laatste kan een actieve kern (zwart gat) zijn of nog meer, zij het verscholen, stervorming.