Universiteit
Leiden
The Netherlands

Tales of Orion : the interplay of gas, dust, and stars in the interstellar medium

Ochsendorf, B.B.

Citation
Ochsendorf, B. B. (2015, September 1). *Tales of Orion : the interplay of gas, dust, and stars in the interstellar medium*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/34931

Version:	Not Applicable (or Unknown)
License:	Leiden University Non-exclusive license
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/34931

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page

Universiteit Leiden

The handle http://hdl.handle.net/1887/34931 holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Ochsendorf, Bram Benjamin
Title: Tales of Orion : the interplay of gas, dust, and stars in the interstellar medium
Issue Date: 2015-09-01

Nederlandse samenvatting

Het interstellaire medium

Orion is een van de meest herkenbare constellaties aan de winterse sterrenhemel. Het welbekende zandloperfiguur van Orion staat helder en imposant tussen andere sterren in het gebied. Het menselijk oog is echter alleen gevoelig voor een klein gedeelte van het elektromagnetische spectrum. Wat aan het blote oog voorbijgaat zijn bijvoorbeeld gamma-, röntgen-, ultraviolet-, infrarood, en radiostraling. Orion laat zich van zijn beste kant zien in vele van deze golflengte regimes. Neem het (verre) infrarood (figuur 1), waarin recente ruimtetelescopen zoals *Spitzer*, *Herschel*, en *Planck* een beeld registreren waarover zelfs Christiaan Huygens en Charles Messier niet hadden kunnen dromen na hun ontdekking van de Orionnevel in zichtbaar licht. In het infrarood lijkt Orion in vuur en vlam te staan, waar chaotische en complexe structuren zich door elkaar strengelen. Deze ingewikkelde structuren zijn waarschijnlijk het gevolg van interacties van sterren met de materie die tussen de sterren ligt. Inderdaad, de ruimte tussen de sterren is niet leeg, maar bestaat uit een ijl plasma van atomen, moleculen, en stof (kleine deeltjes van silicaat, koolstof, en ijs). We noemen deze ruimte het *interstellaire medium* (ISM).

De moleculen en het stof in het ISM lichten op door sterlicht te absorberen en deze opnieuw uit te stralen in het infrarood. Zoals figuur 6.1 duidelijk laat zien geven het stof en de moleculen een goede weergave over de structuur van het ISM in Orion, welke erg complex blijkt te zijn op alle waarneembare niveaus. De moleculen die we in dit figuur zien zijn Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAKs), geraamtes van hexagonale koolstofringen met waterstofatomen aan de randen. Deze PAKs hebben ultraviolet fotonen nodig om te fluoriseren. Fotonen met deze energie worden snel geabsorbeerd door materie, waardoor de PAKs alleen de buitenste randen van de wolken in het ISM laten zien. Stof daarentegen kan verhit worden door allerlei soorten fotonen, ook door diegene met minder energie. De minder energetische fotonen kunnen tot diep in dezelfde wolken reiken. Samen geven de PAKs en het stof een zeer gedetailleerd beeld hoe het ISM in Orion is opgebouwd.

Interstellair stof maakt ongeveer 1 procent op van de totale massa van materie in het ISM, de overige 99 procent ligt in het gas. Ondanks de kleine hoeveelheid massa die stof omvangt vergeleken met het gas, is het een erg belangrijke component van het ISM. Stof absorbeert sterlicht en zendt deze opnieuw uit op langere golflengtes, zoals in het infrarood. De aanwezigheid van stof in het ISM zorgt ervoor dat het licht van achtergelegen objecten zwakker word. Daarnaast kan het oppervlakte van stofkorrels als een katalysator dienen voor vele chemische reacties. Stofkorrels kunnen ook als een schild dienen om bepaalde moleculen te beschermen tegen de hoog-energetische fotonen van sterren. Verder kunnen de mantels van stofkorrels elementen vasthouden en loslaten als gevolg van veranderingen in de fysische eigenschappen van hun omgeving. Op deze manier bepalen ze de gas abundanties, en daarmee de koeling van het ISM, omdat deze gassen energie wegstralen door lijnemissie waneer ze in de gasfase terechtkomen. Tegelijkertijd speelt het foto-elektrisch effect op het oppervlakte van stofkorrels een dominante rol in de verhitting van het ISM. Interstellair stof is daarom op vele vlakken een belangrijke pion in de fysische en chemische structuur van het ISM. Desondanks weten we

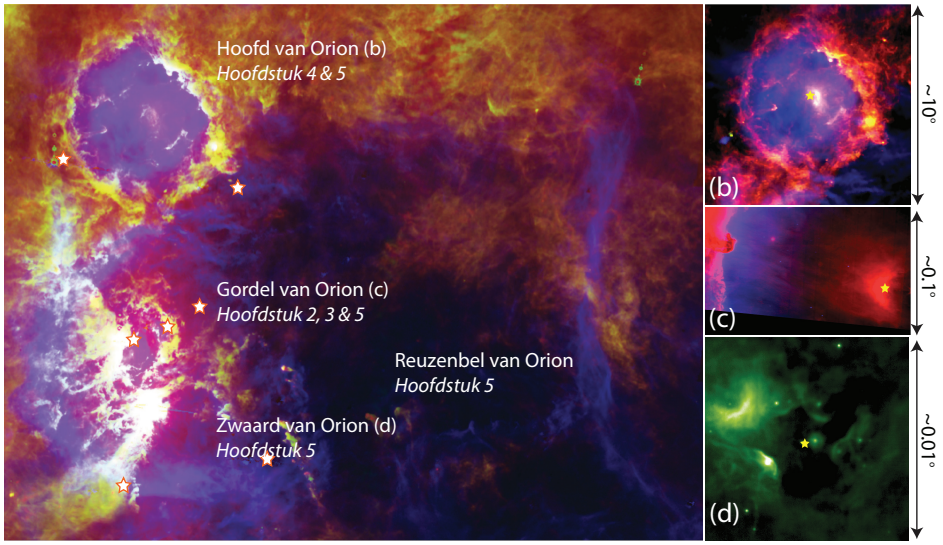

Figure 6.1: (a) Een drie-kleuren figuur van het Orion-Eridanus gebied. Het blauw geeft geïoniseerd gas weer, terwijl het groen Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAKs) laten zien. Rood laat koude stofkorrels zien op een temperatuur van ongeveer 20 Kelvin. De PAKs volgen de geïllumineerde randen van de wolken van koud stof, zodat groen en rood hier samen geel vormen. De grootte van dit beeld is ongeveer 28 bij 38 graden aan de hemel (vergelijk: de volle maan heeft een diameter van ongeveer 0.5 graden). De herkenbare sterren van het sterrenbeeld Orion zijn weergegeven, en expliciet genoemd zijn gebieden die het onderwerp vormen van verschillende hoofdstukken in dit proefschrift. **(b)** - **(d)**: Infrarood boogvormige structuren zijn te zien rond sterren in Orion (gele asterisken) op elke waarneembare schaal. De boogstructuren zijn *stofgolven* die oplichten door stofkorrels die verhit worden door de centrale ster. Figuur (b) heeft een diameter van 10 graden en laat het gebied van λ Ori zien, het 'hoofd van Orion'. Figuur (c) is van de grootte van enkele tientallen boogminuten en laat de ster σ Ori zien in de 'gordel van Orion'. Rechtsboven zien we ook de beroemde paardenkopnevel. Figuur (d) is enkele tientallen boogseconden groot, en is gefocust op de ster θ^1 Ori C, de meest massieve ster in het 'zwaard van Orion', verantwoordelijk voor de ionizatie van de Orionnevel (hoofdstuk 1 & 5). De stofgolven kunnen worden gebruikt om de interacties tussen sterren en het ISM te bestuderen en geven weer hoe belangrijk de beweging van materie in het ISM is.

eigenlijk nog niet goed wat de precieze eigenschappen van stof in het ISM zijn.

De interacties tussen sterren en materie in het interstellaire medium

Ook al zijn er maar een aantal dozijn sterren in Orion met het blote oog te zien, weten we tegenwoordig dat in de afgelopen 15 miljoen jaar ongeveer tienduizend sterren zich hebben gevormd in Orion. Deze stergroep in zijn geheel noemen we de Orion OB associatie. Het interessante is dat deze sterren zich hebben gevormd in groepen of clusters afzonderlijk van elkaar in de tijd. In elke groep vormen zich zware en minder zware sterren. De meest zware zullen zich het meest snel ontwikkelen, en ook het meest snel sterven. Zware sterren ioniseren het gas om hen heen met hoog-energetische fotonen. Het geïoniseerde gas zal een temperatuur van ongeveer 10.000 Kelvin bereiken, wat erg hoog

is vergeleken met het neutrale materiaal eromheen (wat hooguit 100 Kelvin bereikt). De druk van het geïoniseerde gebied, wat astronomen een H II gebied noemen, zal daarom veel hoger zijn vergeleken met het omliggende neutrale gebied: het geïoniseerde gebied zal expanderen. Tijdens zijn leven blaast een zware ster als het ware een bel van geïoniseerd materiaal in het ISM. Daarnaast verliezen zware sterren tijdens hun leven veel materie en accelereren ze deze met hun straling tot intense sterwinden. Tenslotte zal een ster die minstens acht maal zo zwaar is als onze Zon zijn leven eindigen in een spectaculaire explosie: een supernova. Een zware ster zal door de voorgenoemde processen de structuur en beweging van het nabije ISM bepalen.

Naast het ioniseren van het gas, sterwinden, en supernovae kunnen sterren op nog een andere manier de materie van het ISM in beweging te zetten. De straling van de ster is veruit de grootste bron van energie van een ster, en een groot deel word opgebruikt in het ioniseren van het omliggende gas. Deze energie zal voornamelijk worden uitgestraald en wordt niet gebruikt in de dynamiek van het ISM. Echter, de fotonen dragen ook *stralingsdruk* met zich mee. Wanneer de fotonen opgevangen worden, danwel door het gas, danwel door het stof, zullen ze stralingsdruk overdragen in de vorm van momentum. Omdat stofdeeltjes typisch een fractie van een micrometer groot zijn (10^{-6} meter), terwijl bijvoorbeeld een waterstofatoom van de orde van een tiende nanometer groot is (10^{-10} meter), zijn de stofdeeltjes veel efficiënter in het absorberen van stralingsdruk. Wanneer het foton word geabsorbeerd, zal er momentum worden overgebracht naar het stofdeeltje, en deze zal worden geaccelereerd. Hierna kan het stof botsen met de zwerm van gasdeeltjes om zich heen, waardoor ook het gas in beweging word gezet. Stof kan zo indirect stralingsdruk omzetten in de beweging van materie in het ISM. Echter, dit mechanisme is niet goed begrepen en hangt van vele factoren af, met name de structuur en de compositie van het stof in het ISM.

Zware sterren zijn erg zeldzaam vergeleken met minder zware sterren. Echter, op de bovengeschreven manieren bepalen ze de structuur en de evolutie van het ISM met de energie die gepaard gaat met hun fotonen, sterwinden, en supernovae. De vrijgekomen energie veroorzaakt schokgolven welke de materie om de sterren in beweging zet. De overdracht van momentum via stralingsdruk op het stof kan ook een belangrijke bijdrage hierin leveren. De materie word opgeveegd en samengeperst in expanderende schillen. Deze schillen kunnen afkoelen en fragmenteren, en in de individuele klonten van materie kunnen nieuwe groepen van sterren zich vormen. De dood van de ene ster kan dus tot de geboorte van een ander leiden. Dit proces noemen we sequentiële stervorming, en dit is wat we denken dat de groepvorming in de Orion OB associatie kan verklaren.

Dit proefschrift

Fotonen, sterwinden, en supernovae zijn dus allemaal bronnen van energie waardoor er een terugkoppeling ontstaat vanuit de sterren met het gas en het stof in het ISM. Deze terugkoppellingen hebben niet alleen het ISM in Orion, maar ook die in de gehele Melkweg zijn complexe en chaotische uiterlijk gegeven (hoofdstuk 1). Er zijn echter nog vele vragen die nog steeds onbeantwoord blijven. Hoe vormen zware sterren zich, en hoe bepalen ze de structuur van het ISM? Wat zijn de relatieve contributies van terugkoppelling naar het ISM via hun sterwinden, supernovae, en de overdracht van momentum via interstellair stof? Wat zijn de precieze eigenschappen van interstellair stof, en hoe evolueert het als het tussen moleculaire wolken en het diffuse ISM beweegt?

In dit proefschrift proberen we vele van deze vragen te beantwoorden door gebruik te maken van observaties van Orion, een van de meest en best bestudeerde gebieden aan de hemel. Ondanks de complexe structuur van Orion kan het op een zeer gedetailleerde manier bestudeerd worden. Dit komt omdat Orion uit het vlak van de Melkweg staat, zodat er weinig voorgrond of achtergrond materiaal is die niet tot het gebied hoort. Orion staat ook relatief dichtbij, zodat we erg getailleerde beelden kunnen verkrijgen van het gebied. Daarnaast geeft de nabijheid de mogelijkheid om de beweging van sterren in de Orion OB associatie in kaart te brengen, om zo een driedimensionaal beeld te krijgen van de sterren en hun relatie tot de materie in het ISM van Orion.

In hoofdstuk 2 en 3 van dit proefschrift bouwen we een model om de interactie van een ster met een geïoniseerde stroom van gas te bestuderen. Deze stroom van gas trekt stof met zich mee door momentum overdracht. Wanneer het stof richting de ster beweegt, zal het onder invloed van stralingsdruk afremmen, terwijl het gas het stof zal blijven proberen te accelereren. De balans tussen de krachten bepaalt de beweging van het stofdeeltje, wat uiteindelijk resulteert in een boogvormige distributie van stof om een ster. Deze boogstructuren zijn te zien op alle schalen in Orion (Figuur 1b, 1c, en 1d), en noemen we *stofgolven*. In hoofdstuk 2 en 3 laten we zien dat stofgolven een unieke kans geven om interstellair stof op een nieuwe manier te bestuderen. We bepalen vervolgens enkele belangrijke eigenschappen van het stof in Orion, en laten zien dat de resultaten de validiteit van bestaande modellen van interstellair stof op de proef stellen.

In hoofdstuk 4 laten we zien dat stofgolven overal in de Melkweg te zien zijn, en dan met name binnen de H II gebieden of interstellaire bellen welke zware sterren blazen tijdens hun leven. De fysische condities van interstellaire bellen zijn ideaal voor het vormen van stofgolven. Stofgolven geven een verklaring voor de aanwezigheid en morfologie van stof binnen H II gebieden, en geven direct bewijs dat de bellen aan het leeglopen zijn, en zo hun druk in het omliggende medium dissiperen. We onderzoeken welke fysische parameters belangrijk zijn in de koppeling tussen het stof en het gas, en onder welke omstandigheden stralingsdruk belangrijk kan zijn in de dynamische structuur van het ISM.

In hoofdstuk 5 bestuderen we de Orion-Eridanus reuzenbel, een gigantische variant van een interstellaire bel die is ontstaan door de gezamenlijke effecten van ionisatie, sterwinden, stralingsdruk, en supernovae vanuit de Orion OB associatie. We gebruiken data van de nieuwste telescopen om zo een nieuw beeld te schetsen over de morfologie en evolutie van het gehele gebied. De data laat zien dat de Orion-Eridanus reuzenbel nog groter en complexer is dan dat eerder werd gedacht, en dat de totale morfologie beschreven kan worden als een serie van schillen die in elkaar genesteld zijn. De genestelde schillen zijn het gevolg van materiaal dat evaporeert van de moleculaire wolken in Orion, welke vervolgens word opgeveegd door een supernova in een expanderende schil. De supernovae en expanderende schillen ruimen zo de boel op in het centrale gedeelte van de reuzenbel en verplaatsen vervolgens het materiaal naar de buitenkant, waar het samensmelt met de buitenste rand van de reuzenbel. De cyclus van stervorming, evaporatie, en de schoonmaak van het centrale gedeelte van de reuzenbel door supernovae gaat door totdat de moleculaire wolken compleet zijn geëvaporeert of uiteengereten zijn, waarna de reuzenbel zal samensmelten met het ISM.

In een zin samengevat richt dit proefschrift zich op een verbeterd begrip over het samenspel van sterren met het gas en stof in het ISM, door het sterrenbeeld Orion als voorbeeld te nemen.