



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Mid-infrared spectroscopy of starbursts : from Spitzer-IRS to JWST-MIRI

Martínez-Galarza, J.F.

Citation

Martínez-Galarza, J. F. (2012, June 19). *Mid-infrared spectroscopy of starbursts : from Spitzer-IRS to JWST-MIRI*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/19113>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/19113>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/19113> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Martínez-Galarza, Juan Rafael

Title: Mid-infrared spectroscopy of starbursts : from Spitzer-IRS to JWST-MIRI

Date: 2012-06-19

Nederlandse Samenvatting

Veel van de spectaculaire sterrenkundige afbeeldingen in wetenschappelijke tijdschriften en documentaires, recentelijk verkregen met professionele telescopen, vinden hun oorsprong in natuurkundige processen die betrekking hebben op het leven van sterren. Dit omvat zowel hun geboorte te midden van dichte wolken van interstellair gas en stof dat tot massieve sterclusters leidt, als ook hun spectaculaire einde in grootse explosies, supernovae genaamd, die voor korte duur zo helder als een heel melkwegstelsel kunnen worden. De fysica achter deze fenomenen zijn niet alleen visueel schitterend, maar ze bevatten ook de geheimen over hoe het leven van sterren verbonden is met de evolutie van het Universum in zijn geheel.

Dit proefschrift onderzoekt een specifiek aspect in deze complexe relatie in het bijzonder: de invloed die de straling geproduceerd door jonge massieve sterren heeft op het interstellair medium (ISM) uit waar ze zijn geboren, afgeleid uit waarnemingen gemaakt met infraroodtelescopen. In dit boekje ontwikkelen we een nauwkeurige en krachtige methode om infraroodwaarnemingen van intensieve stervormingsgebieden te combineren met theoretische voorspellingen. Het doel is om een beter begrip te krijgen van wat de interacties tussen massieve sterren en het ISM ons kan leren over de fysica achter massieve stervorming in het Universum.

Massieve sterren en hun relatie met het ISM

De meeste sterren in een melkwegstelsel vormen zich uit een gravitationele ineenstorting van een enorme moleculaire wolk (GMC; vertaald uit het Engels: giant molecular cloud). Deze ineenstorting doet zich voor op tijdschalen van honderd tot duizend jaar. Eén van de mogelijke gevolgen van dit proces, misschien wel één van de meest spectaculaire, is het ontstaan van sterclusters en associaties met een massa in de orde van honderd tot duizend keer die van onze zon. De meest massieve sterren in deze clusters kunnen ieder wel 100 keer zo zwaar zijn als onze zon. Deze massieve sterren hebben sterke stralingsvelden en sterwinden die actief wisselwerken met het overgebleven gas en stof uit de oerwolk waaruit ze zijn gevormd. Het massieve stervormingsgebied, bekend als de Tarantula nevel (ook wel als 30 Doradus), dat we in Hoofdstuk 2 bestuderen, is een indrukwekkend voorbeeld van deze wisselwerking (zie Figuur 1).

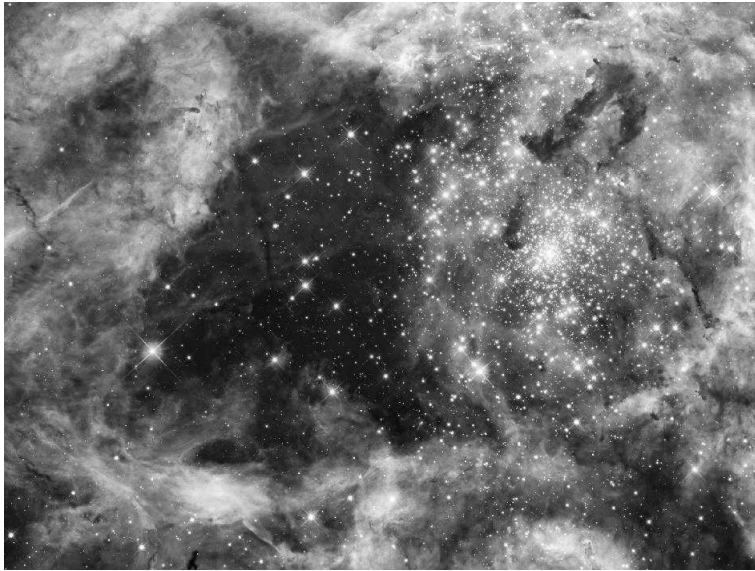


Figure 1 Het massieve stervormingsgebied 30 Doradus, in de Grote Magelhaense Wolk, gefotografeerd met de Ruimtetelescoop Hubble (Afbeelding via NASA).

Een gedeelte van de straling uitgezonden door deze sterren ioniseert het nabije gas, daarbij kleurrijke aanblikken producerend die met onze telescopen zijn vastgelegd, in zogenoemde H II gebieden die gevuld zijn met heet geïoniseerd waterstof. Een ander gedeelte van de straling wordt geabsorbeerd door stofdeeltjes in het ISM die daarbij verhit worden en in het infrarood licht beginnen te gloeien en dat met onze telescopen kan worden waargenomen. Vervolgens, drukken de mechanische druk uitgeoefend door de straling van de sterren en de heftige supernova explosies het ISM samen waardoor de ineenstorting van naburige moleculaire wolken veroorzaakt wordt, leidend tot nieuwe periodes van stervorming. Al deze processen modifieren de galactische omgeving en beïnvloeden de latere ontwikkeling van de melkwegstelsels waarin ze plaatsvinden. Eén van de grootste uitdagingen in de moderne sterrenkunde is om deze processen te begrijpen en te kwantificeren. Het is ook één van de belangrijkste doelstellingen in dit proefschrift.

Massieve sterren en recente stervorming

De sterren die stellaire associaties zoals die in Figuur 1 omvatten, zijn bijna allemaal tegelijkertijd geboren en hebben een breed bereik in individuele stellaire massa's. Niettemin, alleen die sterren met een massa gelijk aan een paar keer die van onze zon hebben een aanzienlijk effect op het ISM. In feite, in gebieden waar deze associaties gevormd worden, komt het meeste van het waargenomen licht afkomstig van deze massieve sterren; hoewel minder in aantal zijn ze wel vele malen helderder dan hun lage-massa tegen-

hangers. Het zijn deze massieve sterren die de energievoorraad in stervormingsgebieden domineren. Aan de andere kant, de meest massieve sterren zijn ook diegene met de kortste levensduur, waarbij ze al na een paar miljoen jaar door hun brandstof heen zijn, een kort leven vergeleken met de enkele miljarden jaren dat een ster zoals onze zon kan leven. Daarom, door in een afzonderlijk gebied van een melkwegstelsel het geïoniseerde gas en het stof te bestuderen dat verhit wordt door het licht van de massieve sterren, kunnen we objecten onderzoeken die minder dan 10 miljoen jaar geleden gevormd zijn (i.e. een korte tijdschaal in een kosmologisch perspectief) en zodoende kunnen we de recente stervormingsgeschiedenis in dat gebied bestuderen.

Starbursts

Het is mogelijk om kwantitatief vast te stellen hoe snel nieuwe sterren worden gevormd in specifieke gebieden. Om dit te doen kunnen we bijvoorbeeld de hoeveelheid infrarood licht meten, dat wordt uitgezonden door opgewarmd stof ¹. Ook kunnen we het licht meten dat wordt uitgezonden door atomaire deeltjes die geïoniseerd zijn door het stralingsveld van jonge sterren. De hieruit voortkomende helderheden kunnen worden geïnterpreteerd als fysisch meer intuïtieve grootheden. We kunnen bijvoorbeeld de infrarode helderheid van een stervormingsgebied zien als de gemiddelde moleculaire massa die wordt omgezet in sterren per jaar. Nogmaals, aangezien deze sterren slechts een zeer korte levenscyclus hebben, kunnen we hieruit schatten hoe snel sterren worden gevormd in bepaalde gebieden van het universum *op dit moment*. We kunnen bijvoorbeeld afleiden dat in onze Melkweg sterren worden gevormd met een snelheid van ongeveer 1 zons-massa per jaar. Anders gezegd, elk jaar wordt gemiddeld genomen een enkele ster met een massa gelijk aan onze Zon geboren in ons melkwegstelsel.

We kunnen de stervormingssnelheid (star formation rate, SFR) in verscheidene gebieden van ons universum afleiden door het infrarode licht te meten dat wordt uitgezonden door nabije en verre melkwegstelsels. Astronomen hebben dit gedaan en leiden daaruit af dat niet alle melkwegstelsels sterren vormen met dezelfde snelheid. Een belangrijk deel van deze stelsels hebben SFRs die tientallen, honderden of zelfs duizenden malen groter zijn dan die van onze Melkweg. Dit betekent dat deze objecten grote infrarode helderheden hebben. Sterker nog, als we verder weg gaan van ons melkwegstelsel om verder weg gelegen gebieden in ons universum te bestuderen, dan valt op dat het aandeel van objecten met een hoge SFR, die we 'starbursts' noemen, alleen maar toeneemt. Tot op de dag van vandaag is het nog niet helemaal duidelijk waarom deze starbursts zulke hoge stervormingssnelheden hebben. We weten dat om dit mogelijk te maken, grote hoeveelheden moleculair gas verplaatst moeten worden naar relatief kleine gebieden in een melkwegstelsel binnen korte tijd. Echter, de processen die dit transport mogelijk maken, alsmede het proces waarmee opeenvolgende stervorming wordt veroorzaakt door voorafgaande stervorming, moeten nog steeds afdoende worden verklaard.

¹Aangenomen moet worden, uiteraard, dat andere warmtebronnen die niets van doen hebben met stervorming relatief onbelangrijk zijn voor dit proces.



Figure 2 De kern van het melkwegstelsel NGC 1097 heeft een intensieve starburst ring, zichtbaar op deze afbeelding genomen in het infrarood door de Spitzer Space Telescope. Dit is een van de stelsels die we bestuderen in **Hoofdstuk 4**. (Afbeelding geproduceerd door NASA.).

Spectroscopie van stervormingsgebieden in het infrarood

Om antwoorden te vinden op sommige van deze vragen rondom het fenomeen van starbursts zijn astronomen in de afgelopen twee à drie decennia het infrarode universum gaan bestuderen. Er zijn verscheidene redenen om dit golflengtegebied te kiezen. Allereerst, zoals gezegd, schijnen stervormingsgebieden sterk in infrarood licht vanwege thermische straling van opgewarmd stof. Bovendien vindt de meest intensieve stervorming plaats achter dichte lagen van gas en stof, waar zichtbaar licht dat onze ogen kunnen zien niet doorheen komt, terwijl het infrarode licht er juist wel uit komt. Dus het licht dat wordt opgevangen door onze infrarode telescopen schijnt door de compacte lagen van gas en stof en bereikt ons vanuit de zeer diepe gebieden waar nieuwe, zware sterren worden geboren. Naast de digitale afbeeldingen gemaakt door detectoren speciaal ontworpen om infrarood licht te zien, die de structuur van het stof en moleculair gas tonen, bestuderen we tegenwoordig starbursts met infrarood spectroscopie – een van meest geavanceerde technieken van dit moment.

Om te begrijpen wat infrarood spectroscopie is, kunnen we denken aan de kleuren van de regenboog. Net zoals we een prisma kunnen gebruiken om zonlicht op te breken in de kleuren van de regenboog (het spectrum van het zichtbare licht), kunnen we, met de juiste instrumenten, ook het spectrum van het infrarode licht uitgezonden door astronomische lichamen opvangen. In het specifieke geval van stervormingsgebieden zijn infrarode spectra essentieel om de energieverdeling van de verschillende bestanddelen van het interstel-

laire medium te kunnen waarnemen. Dit biedt aan degenen die dergelijke spectra kunnen interpreteren de mogelijkheid om een precieze beschrijving van de fysische toestanden van deze gebieden te geven. Sommige van deze bestanddelen die herkenbaar zijn aan hun infrarode straling zijn atomair gas, stofdeeltjes, en een bepaald soort moleculen dat karakteristiek is voor stervormingsgebieden, genaamd polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAHs). De analyse van infrarode spectra maakt het mogelijk om belangrijke fysische gegevens af te leiden van deze gebieden, zoals de stervormingssnelheid, de gasdruk waartegen de straling van sterren zich voortplant, of de hoeveelheid jonge sterren die nog verborgen zijn in het dichte gas en de stofsluiers waaruit deze gevormd werden.

Infrarode spectra worden gemeten door speciale instrumenten geïnstalleerd in moderne telescopen. Om deze spectra op de juiste wijze te kunnen interpreteren en om er een fysische betekenis aan toe te kennen in de context van stervorming en hoe dit alles zich verhoudt tot het interstellair medium, moeten we deze spectra vergelijken met theoretische modellen die de sterkte en de energieverdeling van de uitgezonden straling voorspellen. Dit is verre van eenvoudig, omdat verschillende fysische omstandigheden kunnen leiden tot vergelijkbare spectra, wat leidt tot tegengestelde en misleidende conclusies. Bovendien zijn de meeste starbursts zo ver weg dat we de structuur ervan niet kunnen onderscheiden, zelfs niet met de grootste telescopen. Daardoor kunnen we de verschillende bestanddelen, zoals sterren, gas en stof, niet herleiden tot verschillende componenten van de spectra. Een nauwkeurige en robuuste methode is nodig om betrouwbare waarden toe te kennen aan de fysische parameters van verafgelegen starbursts, en om de ware toestanden van de materie in deze objecten te kunnen onderzoeken.

Een Bayesiaanse methode om infrarode spectra te interpreteren

In het eerste deel van dit proefschrift (Hoofdstukken 2, 3 en 4) ontwikkelen we een nieuwe methode om infrarode spectra van starbursts te interpreteren. Deze methode geeft nauwkeurige en betrouwbare waarden voor fysische parameters van deze objecten en berekent kwantificeerbare en statistisch-toepasselijke onzekerheden. Deze methode gebruikt Bayesiaanse statistieken ² om de waarschijnlijkheid dat zekere fysische parameters bepaalde waarden hebben te schatten (bijvoorbeeld de stervormingssnelheid). Bayesiaanse statistiek maakt het mogelijk om nieuwe kennis over de parameters (observationeel of theoretisch) op te nemen in de bepaling van hun waarschijnlijkheden. Intuïtief gezien betekent dit dat de onderzoeker op elk moment de mate waarin hij of zij een zeker resultaat als betrouwbaar inschat kan bijwerken door nieuwe gegevens mee te nemen. De methode is reproduceerbaar en biedt betrouwbaardere resultaten dan wat behaald kan worden uit een directe vergelijking tussen modellen en waarnemingen. In dit proefschrift passen we deze nieuwe methode toe op spectra van starbursts genomen door de Spitzer Space Telescope. Hier volgt een korte beschrijving van de hoofdstukken.

Hoofdstuk 2

In dit hoofdstuk introduceren we onze methode en de kalibratie daarvan met het grote

²Genoemd naar Thomas Bayes (1701-1761), een Engelse priester en wiskundige die deze statistieken voor het eerst formuleerde.

ster-vorming gebied 30 Doradus (Figuur 1). Dit gebied heeft twee eigenschappen die het extra geschikt maken voor de kalibratie: 30 Doradus is (1) al vaak en in groot detail bestudeerd door andere auteurs, en (2) ligt zo dichtbij dat we het ruimtelijk op kunnen lossen met onze telescoop. Dit stelt ons in staat om de losse onderdelen van het systeem (massieve sterren, gas, stof, etcetera) van elkaar te onderscheiden en in verband te brengen met bepaalde onderdelen van het infrarode spectrum van 30 Doradus. Onze methode kan de eigenschappen van 30 Doradus goed reproduceren. We laten zien dat we de onzekerheden in het bepalen van zekere parameters significant kunnen verkleinen door het gebruik van spectrale lijnen in onze analyse. Dit zorgt ervoor dat onze methode meer robuuste resultaten oplevert in vergelijking met andere methoden. Tenslotte beschrijven we onze ontdekking dat het infrarode spectrum van 30 Doradus verklaard kan worden met de aanwezigheid van een significant aantal jonge sterren die nog steeds omsloten zijn door de stof- en gas-wolk waaruit ze geboren zijn. Dit is een aanwijzing dat 30 Doradus een actief stervormend gebied is.

Hoofdstuk 3

NGC 604 in het driehoekssterrenstelsel is het op één-na dichtbijzijnde grote stervorming gebied. In dit hoofdstuk combineren we waarnemingen in het infrarood, optisch en Röntgenstraling met onze Bayesische methode om de eigenschappen van NGC 604 te bestuderen. Ons belangrijkste resultaat is de ontdekking van massieve infrarode wolken. Deze wolken zijn erg warm en compact, en binnenin deze wolken worden massieve sterren gevormd. Een intrigerende verklaring voor deze ontdekking is dat de stervorming in deze wolken geactiveerd is door een eerdere episode van stervorming tijdens welke de meeste nu zichtbare sterren in NGC 604 gevormd zijn. Onze resultaten suggeren bovendien dat NGC 604 in een verder geevolueerd stadium van stervorming is dan zijn grotere broer 30 Doradus, maar dat dit niet noodzakelijk het einde van actieve stervorming betekent.

Hoofdstuk 4

In dit hoofdstuk gebruiken we onze methode van interpretatie van infrarood spectra op grotere maar verder weg gelegen stervormingsgebieden. Deze gebieden liggen in het centrum van een paar sterrenstelsels in het nabije universum. Met de in hoofdstuk 2 en 3 opgedane ervaring kunnen we overeenkomsten vinden in de eigenschappen van deze relatief kleine groep stercluster vormingsgebieden. Wij vinden bijvoorbeeld aanwijzingen voor het feit dat de stervormingsgebieden met de grootste hoeveelheid aan moleculaire brandstof (en dus met de hoogste stervormingssnelheid), niet altijd de grootste sterclusters vormen. De grootste groepen lijken in tegenstelling gevormd te worden in de stervormingsgebieden met de laagste stervormingssnelheid. We concluderen ook dat de stervormingsgebieden met de grootste sterclusters een relatief grote bijdrage ondervinden van erg jonge sterren die nog door een dikke envelop van stof omgeven worden. Een meer compleet onderzoek van de spectra van stervormings gebieden is noodzakelijk om definitieve conclusies te trekken over het verband tussen de eerdere episodes van stervorming tijdens welke de ster-groepen gevormd zijn, en de huidige periodes van stervorming.



Figure 3 JWST zal stervormingsgebieden in ongekend detail gaan bestuderen. Hoofdstukken 5 en 6 zijn gewijd aan de spectrometer die gekoppeld is aan deze grote telescoop (Afbeelding via NASA).

Hoofdstukken 5 en 6

Ondanks de ontwikkeling van steeds betere analyse methoden wordt de nauwkeurigheid van onze resultaten nog steeds erg beïnvloed door de techniek en afmetingen van de telescopen die we gebruiken. Dit toont het belang aan van grotere en betere telescopen voor het verder ontwikkelen van onze kennis van stervormingsgebieden. Tegen het einde van dit decennium zullen de ruimtevaartorganisaties uit de Verenigde Staten, Europa en Canada een nieuwe grote en geavanceerde infrarood telescoop de ruimte in sturen. Deze telescoop gaat de "James Webb Space Telescope" (JWST) heten en wordt, met een spiegel van 6.5 meter in diameter, de grootste infrarood telescoop die ooit in de ruimte is geplaatst. Eén van de instrumenten die aan boord zal zijn van de JWST is het "Mid-InfraRed Instrument" (MIRI). MIRI bestaat uit een camera en een spectrometer, en hiermee kunnen we stervormingsgebieden en andere gebieden in ons heelal met een ongekend detail en gevoeligheid bestuderen.

De laatste twee hoofdstukken van dit proefschrift zijn gewijd aan MIRI. Dit instrument is gebouwd in Europa en Nederland heeft hierbij een rol van cruciaal belang gespeeld. De auteur van dit proefschrift heeft gewerkt aan de kalibratie van MIRI bij het Rutherford Appleton Laboratorium in Oxford, Engeland. In het tweede deel van dit proefschrift beschrijven we de functionaliteit van MIRI en de kalibratie processen van de spectrom-

Nederlandse Samenvatting

eter. Meer specifiek beschrijven we één van de belangrijkste kalibraties van de spectrometer - die voor de golflengte kalibratie. We passen onze kalibratiemethode ook toe op gegevens die zijn verzameld tijdens de testfase. Hieruit concluderen we dat MIRI infrarood spectra kan verzamelen met een resolutie die tenminste 10 keer hoger is dan die van zijn voorganger, de infrarood spectrometer aan boord van de Spitzer ruimte telescoop. MIRI aan boord van de JWST betekent dus een grote stap voorwaarts in de nabije toekomst voor het bestuderen van de vorming van massieve sterren.