



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Studies of dust and gas in the interstellar medium of the Milky Way
Salgado Cambiazo, F.J.

Citation

Salgado Cambiazo, F. J. (2015, September 2). *Studies of dust and gas in the interstellar medium of the Milky Way. PhD Thesis*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/34943>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/34943>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/34943> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Salgado Cambiano, Francisco Javier

Title: Studies of dust and gas in the interstellar medium of the Milky Way

Issue Date: 2015-09-02

SAMENVATTING

6.1 Het belang van het interstellaire medium

Vrijwel alle informatie die we ontvangen van verschillende astronomische verschijnselen verkrijgen we via licht. Terwijl het meeste licht wat we van de hemel ontvangen afkomstig is van sterren, kunnen onze ogen maar een kleine fractie van het elektromagnetische spectrum zien. Vele interessante fysische verschijnselen gebeuren echter niet op optische golflengten, met name op lange golflengtes van het infrarood tot het radio gebied.

In melkweg stelsels is het merendeel van de baryonische massa is opgesloten in sterren. Daarnaast is er een kleine fractie van ongeveer 10–15% van de massa van de Melkweg in de materie tussen de sterren: het interstellaire medium (ISM). Het ISM bestaat voornamelijk uit waterstof (in atomaire en moleculaire vorm), helium, en sporen van zwaardere elementen. Deze zwaardere elementen zijn geproduceerd door nucleosynthese. Nieuwe sterren verrijzen uit het as van vorige generaties van sterren in dichte moleculaire wolken van het ISM. Gedurende hun evolutie injecteren sterren energie in het ISM in de vorm van straling, sterwinden, en straalstromen. Op het einde van hun leven geven sterren grote hoeveelheden materiaal terug aan het interstellaire medium. De meest zware sterren eindigen hun leven in de vorm van een supernova explosie, waarmee een gigantische hoeveelheid aan kinetische energie gepaard gaat. Het materiaal dat vrijgegeven wordt zal gebruikt worden voor een nieuwe generatie van sterren. Uiteindelijk vormt en bepaalt het samenspel van sterren en het interstellaire medium de evolutie van sterrenstelsels.

De interacties van sterren en gas in sterrenstelsels leidt tot de formatie van verschillende fases van het ISM, dat zichzelf manifesteert als een complex, dynamisch systeem. In het algemeen wordt de structuur van het ISM beschreven door drie verschillende hoofdfases. In Figuur 6.1 laten we een diagram zien die de verschillende fases van het ISM beschrijft.

De meest zware sterren (diegene met meer dan acht maal de massa van onze eigen zon) spelen een belangrijke rol in de evolutie van het ISM. Deze zware sterren zenden een grote fractie van hun licht uit in het ultraviolet. Deze emissie van de zware sterren ioniseert het waterstof in hun omgeving en produceert gebieden van hoge temperatuur welke bekend staan als ‘HII gebieden’. Op de

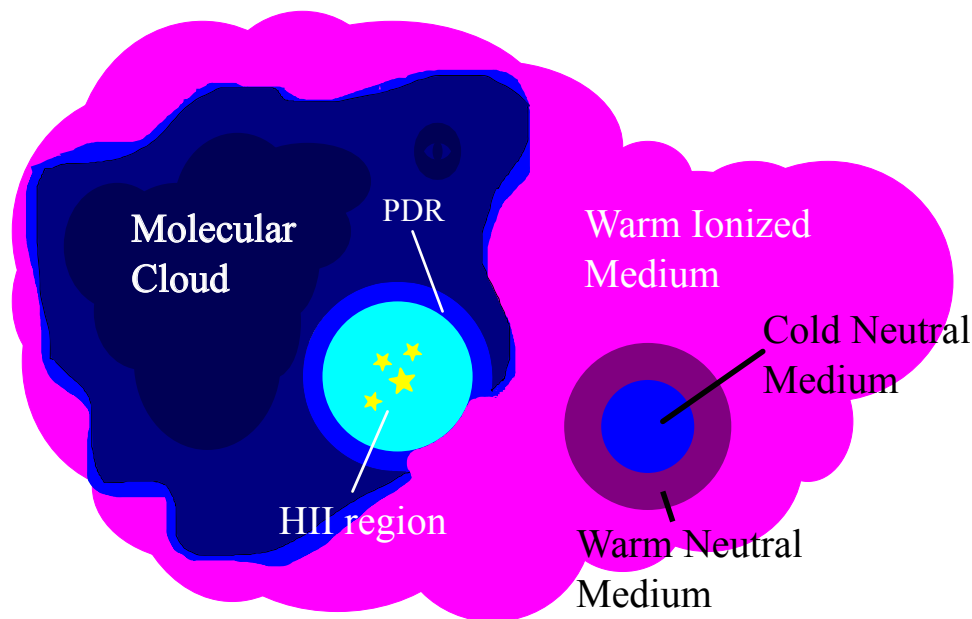


Figure 6.1: De fases van het ISM.

rand van het HII gebied en de wolk waarin dit HII gebied zich bevindt vormt zich een photo-dissociatie regio (PDR). In een PDR spelen niet-ioniserende fotonen een grote rol: ze dissociëren moleculen, ioniseren atomen met lagere ionisatie potentialen (zoals C, S, Na), en verhitten het gas.

Een grote fractie van het ISM verkeert in een neutrale staat omdat de meeste waterstof-ioniserende fotonen (geproduceerd door zware sterren) worden gebruikt om het gas van HII gebieden te geïoniseerd te houden. Het neutrale gas van het ISM is onderverdeeld in twee regimes die vaak worden beschouwd als zijnde in drukevenwicht: het Koude Neutrale Medium (KNM), dat bestaat uit koude (~ 100 K) wolken met een dichtheid van $\sim 50 \text{ cm}^{-3}$ welke ongeveer 1% van het volume van het sterrenstelsel omvatten; en het Warme Neutrale Medium (WNM) met temperaturen van de orde $\sim 10^4$ K, dichtheden van $\sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$ en een veel grotere volumefractie ($\sim 30\%$) vergeleken met het KNM. Deze neutrale fases zijn omgeven door warme (10^4 K) en hete (10^6 K) geïoniseerde gassen. Het warme gas op 10^4 K wordt gevormd door de (relatief weinige) waterstof-ioniserende fotonen die aan HII gebieden ontsnappen; het hete gas op 10^6 K correspondeert met oude supernova restanten. Met de tijd zal de zwaartekracht

het materiaal in het ISM samenklonteren in moleculaire wolken: de meest dichte gebieden van het Galactische ISM. In deze wolken worden uiteindelijk nieuwe sterren gevormd.

In het KNM is waterstof overwegend neutral. Echter, stellaire fotonen met een energie tussen de 11.2 eV en 13.6 eV kunnen koolstofatomen ioniseren. De diffuse wolken die het KNM opmaken worden verhit door het foto-elektrisch effect op Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAKs) en stofkorrels. De koeling van het gas wordt gedomineerd door de emissie van de [CII] fijnstructuurlijn op 157 μm . Het KNM en PDRs lijken in vele opzichten op elkaar: in feite kan het KNM worden beschreven als een PDR met een lage dichtheid. Het ISM speelt een belangrijke rol in de evolutie van een sterrenstelsel, omdat het als een reservoir dient voor de producten van nucleosynthese in sterren. Deze producten worden ook als bouwstenen voor de volgende generatie van sterren gebruikt. Deze kringloop van materie in het ISM is echter nog niet goed begrepen, wat vooral te maken heeft met het ontbreken van geschikte observationele methoden om deze processen te kunnen traceren. Om de interacties van sterren met hun omgeving in stervormingsgebieden te bestuderen (zoals HII gebieden en PDRs) hebben we gevoelige observaties nodig op mid- and ver-infraroodgolflengten. Op deze golflengtes liggen de meest belangrijke diagnostische lijnen, en het is dankzij de lancering van de ruimtetelescopen Spitzer in 2003, en Herschel in 2009 dat we deze straling kunnen waarnemen. Daarnaast is in 2010 het Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) begonnen met waarnemen: SOFIA zal de infrarood revolutie van het afgelopen decennium voortzetten.

De neutrale fases van het ISM worden voornamelijk bestudeerd door middel van transitie in het ultraviolet (UV) en optische golflengten, alsmede door de 21 cm hyperfijne transitie van neutraal atomair waterstof. Het is echter moeilijk om fysische eigenschappen uit UV en optische lijnen te halen, omdat deze worden beïnvloed door stofextinctie. Het is ook een uitdaging om fysische eigenschappen van het neutrale ISM te achterhalen met de 21 cm lijn, omdat het moeilijk is om koude (KNM) en warme (WNM) componenten van elkaar te scheiden. In deze proefschrift onderzoeken we hoe infraroodwaarnemingen gebruikt kunnen worden om HII gebieden en PDRs te kunnen bestuderen, en bekijken we hoe radio recombinitie lijnen op lage frequenties de eigenschappen van het gas in het KNM kunnen meten. Op deze manier hopen we een eerste stap te zetten naar een beter inzicht in de kringloop van het ISM en de evolutie van sterrenstelsels.

6.2 Koolstof Radio Recombinatie Lijnen op lage frequenties

Recombinatielijnen komen voor wanneer een electron word ingevangen door een ion die zich in een kwantumtoestand bevind die boven de grondtoestand ligt. Onder de juiste fysische condities kan het gerecombineerde electron naar de grondtoestand vallen via tussengelegen kwantumtoestanden: dit proces gaat gepaard met de vorming van recombinitie lijnen. Koolstof kan geïoniseerd zijn in gebieden waar waterstof neutraal is (zoals in het KNM) omdat de ionisatiepotential van koolstof lager ligt dan die van waterstof. Lijnen die worden geproduceerd door koolstof kunnen worden gebruikt om de fysische eigenschappen van het ISM te achterhalen. Transities tussen hoge Rydberg toestanden leiden tot de productie van Koolstof Radio Recombinatie-lijnen (KRRLs) op sub-millimeter tot decameter golflengten. Op deze lange golflengten is stofextinctie niet meer belangrijk (in tegenstelling tot op UV en optische golflengten). De KRRLs zijn gedetecteerd door het gehele ISM van de Melkweg. Om de gebieden te bestuderen waar de KRRLs worden gevormd zijn gedetailleerde modellen nodig. In deze thesis presenteren we dit soort modellen, gebruikmakende van verbeterde methoden en de meest recente botsingsfrequenties. Daarnaast zijn KRRLs erg zwak en hierdoor zijn diepe observaties nodig om deze lijnen te kunnen detecteren in het ISM.

6.3 LOw Frequency ARray (LOFAR)

De Low Frequency ARray (LOFAR) is een *aperture synthesis array* die bestaat uit *phased array* stations. De antennes van elk station vormen een *phased array* die een of meerdere bundels op de hemel produceren. Het combineren van verschillende bundels is een groot voordeel voor het concept van een *phased array*. Het word niet alleen gebruikt om de efficiëntie van de observaties te vergroten, maar kan ook belangrijk zijn voor het kalibreren van deze observaties. De *phased array* stations worden gecombineerd in een groot *aperture synthesis array*. De stations liggen verspreid over een groot oppervlak in Nederland en in Europa. Er zijn twee verschillende antenne soorten: de Lage Band Antenna (LBA) werkt tussen 10 en 90 MHz, terwijl de Hoge Band Antenna (HBA) tussen 110 en 250 MHz werkt. De observatiestations liggen verspreid in een gebied met een diameter van ongeveer 100 kilometer in het noordoosten van Nederland. Andere observatiestations liggen in Duitsland, Zweden, het Verenigd Koninkrijk en Frankrijk.

LOFAR opent het lage frequentie gebied van de hemel voor het bestuderen van KRRLs door middel van zijn hoge gevoeligheid en groot oplossend vermogen. Recente hoge resolutie (40 boogseconden) observaties van KRRLs

met LOFAR hebben de structuur van de wolken blootgelegd in de gezichtslijn naar Cas A. Daarnaast geeft de hoge spectrale resolutie van LOFAR voor het eerst de gelegenheid om verschillende snelheidscomponenten te onderscheiden op lage frequenties. Nieuwe detecties van KRRLs naar Cyg A en de eerste detectie buiten ons sterrenstelsel (in M82) geven weer hoe belangrijk LOFAR kan zijn in het onderzoek naar KRRLs.

De eerste studies laten zien dat het nu mogelijk is om grote programma's uit te voeren waarmee het gehele Melkwegvlak in kaart kan worden gebracht met radio recombinitie lijnen op lage frequenties. Hiermee kunnen we op een nieuwe manier het diffuse ISM bestuderen. De nieuwe observaties hebben ons gemotiveerd om de bestaande recombinitie lijn theorie en resultaten van eerdere studies opnieuw te onderzoeken. Daarnaast bestuderen we de invloed van verschillende factoren op de gemeten lijnsterktes, zoals temperatuur, dichtheid, en externe stralingsvelden.

6.4 Het belang van PAKs en interstellair stof

Stofdeeltjes zijn een belangrijk bestanddeel van het Interstellair Medium. Deze deeltjes bestaan hoofdzakelijk uit twee zeer verschillende chemische componenten: koolstofhoudende deeltjes en silicaten. Ze dragen bij aan de extinctie van licht op ultraviolette en optische golflengten, waarbij ze sterlicht absorberen en opnieuw uitzenden op langere golflengten. Op die manier domineren de stofdeeltjes het infrarode en sub millimeter deel van het spectrum. De lichtkracht van (ultra) heldere infrarode sterrenstelsels [(U)LIRGs] en starburststelsels (sterrenstelsels waarin met een uitzonderlijk hoge snelheid stervorming plaatsvindt) wordt grotendeels veroorzaakt door emissie van stofdeeltjes. Deze infrarode emissie kan een handig middel zijn voor het traceren van starburststelsels. Emissie door stof is waargenomen in sterrenstelsels met een zeer hoge roodverschuiving van $z \approx 9$ (toen het universum ongeveer 600 miljoen jaar oud was) en is daarom een belangrijke indicator van de eigenschappen van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving.

Bij lage temperaturen en hoge dichtheden kunnen er zich moleculen vormen op het oppervlak van de stofdeeltjes, waardoor ze de chemie in het ISM aandrijven. In protoplanetaire schijven vormen stofdeeltjes bovendien de bouwstenen voor rotsachtige planeten. Het is algemeen bekend dat stofdeeltjes worden gevormd door condensatie in de wind van asymptotische reuzentaksterren (AGB-sterren), Wolf-Rayet sterren, novae en in de ejecta van supernovae. Echter, de mate waarin deze objecten stof produceren is zeer onzeker en het wordt dan ook algemeen aangenomen dat een groot deel van het stof geproduceerd is in het ISM.

Stofdeeltjes hebben een verdeling in grootte die uiteenloopt van kleine polycyclische aromatische koolwaterstof deeltjes (PAK), grote koolstof houdende moleculen gevormd door koolstofringen, die in het infrarood in brede banden licht uitzenden; tot koolstofhoudende en silicaatstofkorrels van ongeveer een micron groot. Extinctie metingen laten zien dat de verdeling in grootte verandert met de positie in de Melkweg. Het is aangetoond dat deze verdeling kan worden omschreven met een machtswet $n(a) \propto a^{-3.5}$, waarbij a de straal van het deeltje is. Deze machtswet wordt gewoonlijk aangeduid als de MRN distributie van Mathis et al. (1977).

De eigenschappen van stofdeeltjes veranderen met de omgeving wanneer ze een interactie aangaan met gas en straling. Gedurende de tijd dat stofdeeltjes zich in een moleculaire wolk bevinden, kunnen ze groeien door een mantel van ijs om zich heen te verzamelen en door samenklontering van stofdeeltjes. Stofdeeltjes kunnen daarentegen makkelijk worden vernietigd in schokgolven door sputteren, waarbij ze hun bestanddelen weer vrijgeven in de gasfase. Andere oorzaken van stofdestructie zijn onder meer verdamping wanneer de deeltjes worden blootgesteld aan sterke stralingsvelden en verbrijzeling door onderlinge botsingen.

In Figuur 6.2 laten we modellen van emissie door stof zien voor twee verschillende omgevingen: het diffuse ISM en dichte PDRs. Hier is te zien dat het licht dat door stofdeeltjes wordt uitgezonden, grotendeels wordt waargenomen op golflengten tussen 1 en 1000 μm . Vanaf de grond zijn deze waarnemingen zeer lastig uit te voeren, omdat de atmosfeer van de aarde een groot deel van dit licht blokkeert (zie het bovenste paneel in Figuur 6.3). Een manier om dit probleem van absorptie door de atmosfeer te omzeilen is door op grote hoogtes te gaan waarnemen, waar de hoeveelheid waterdamp gering is en de transmissie door de atmosfeer in het infrarood toeneemt.

6.5 SOFIA FORCAST

Het Stratosferisch observatorium voor infrarood astronomie (The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA) is een telescoop met een 2.7 m diameter spiegel aan boord van een aangepaste Boeing 747SP. Door op grote hoogte te vliegen (12 tot 14 km), kan er boven de waterdamp laag van de atmosfeer worden waargenomen waar de transmissie van infraroodstraling veel effectiever is (Figure 6.3). De waarnemingen met SOFIA zijn gestart in mei 2012 en er wordt verwacht dat het observatorium 20 jaar in gebruik zal zijn.

Onder de instrumenten aan boord van SOFIA bevindt zich de Faint Object InfraRed Camera for the SOFIA Telescope (FORCAST). FORCAST is een mid-infrarood camera met twee kanalen die een korte golflengte detector (SWC,

variërend van 5 tot 25 μm) en een lange golflengte detector (LWC, variërend van 25 to 40 μm) bevat. Een afbeelding kan worden verkregen door de detectoren individueel of gelijktijdig te gebruiken, door middel van een dichroïsche spiegel. Daarbij is FORCAST ook in staat om grism spectroscopie uit te voeren in een golflengte gebied van 5-50 μm . Het golflengte gebied dat door FORCAST kan worden waargenomen is zeer geschikt voor het observeren van emissie door stof in HII gebieden en PDRs, omdat wordt verwacht dat de piek van de spectrale energie distributie (SED) van het stof zich in dit golflengte gebied bevindt (cf./vergelijk/vgl. Figure 6.2). Daarbij maken het grote blikveld van de FORCAST camera ($\sim 3.2' \times 3.2'$) en de pixelschaal 0.768"/pixel) het instrument zeer geschikt voor om de grote uitgestrekte gebieden van de Melkwegstelsel te observeren. Nu SOFIA in gebruik is genomen, ligt de mogelijkheid om gedetailleerde en ruimtelijk opgeloste studies uit te voeren van stofemissie in HII gebieden binnen handbereik. De studies van HII gebieden die worden gepresenteerd in dit proefschrift zijn een van de eerste die gebruik maken van de nieuwe mogelijkheden die de SOFIA telescoop ons biedt om de stoffige HII gebieden te kunnen karakteriseren.

6.6 Dit Proefschrift

Dit proefschrift richt zich op de studie van het ISM en bestaat uit twee delen: in het eerste deel presenteren wij een studie van de eigenschappen van het stof in HII regio's en hun omliggende PDR's.

We richten onze studies om twee compacte HII regio's: W3(A) en de Orion Nevel (Hoofdstukken 2 en 3, respectievelijk). Deze twee regio's worden gekarakteriseerd door dezelfde eigenschappen, zoals de centrale ster, temperatuur en grootte. Aan de hand van SOFIA/FORCAST waarnemingen hebben we de eigenschappen van stof in het geïoniseerde gas, de omliggende PDR's en hun oorspronkelijke moleculaire wolk bestudeerd. Voor Orion hebben we onze waarnemingen aangevuld met *Herschel*/PACS fotometrie, waardoor we de complete infrarode SED van de regio hebben kunnen karakteriseren, inclusief de geëmitteerde infrarode straling van het stof. Eén van de belangrijkste conclusies van dit proefschrift is dat de groei van de stofdeeltjes van invloed is op de verdeling van de stofgrootte in de gebieden waar zware sterren vormen. De grote hoeveelheid archiefdata die beschikbaar is voor Orion maakt het mogelijk om andere belangrijke fenomenen die gerelateerd zijn aan het stof in deze gebied te bestuderen. Een voorbeeld daarvan is het effect van foto-elektrische verhitting en van verhitting via Lyman alfa straling.

Het tweede deel van dit proefschrift presenteert theoretische studies van de eigenschappen van het koude neutrale medium aan de hand van radio recombinatie lijnen van koolstof. Hoofdstukken 4 en 5 bestaan uit de theorie voor

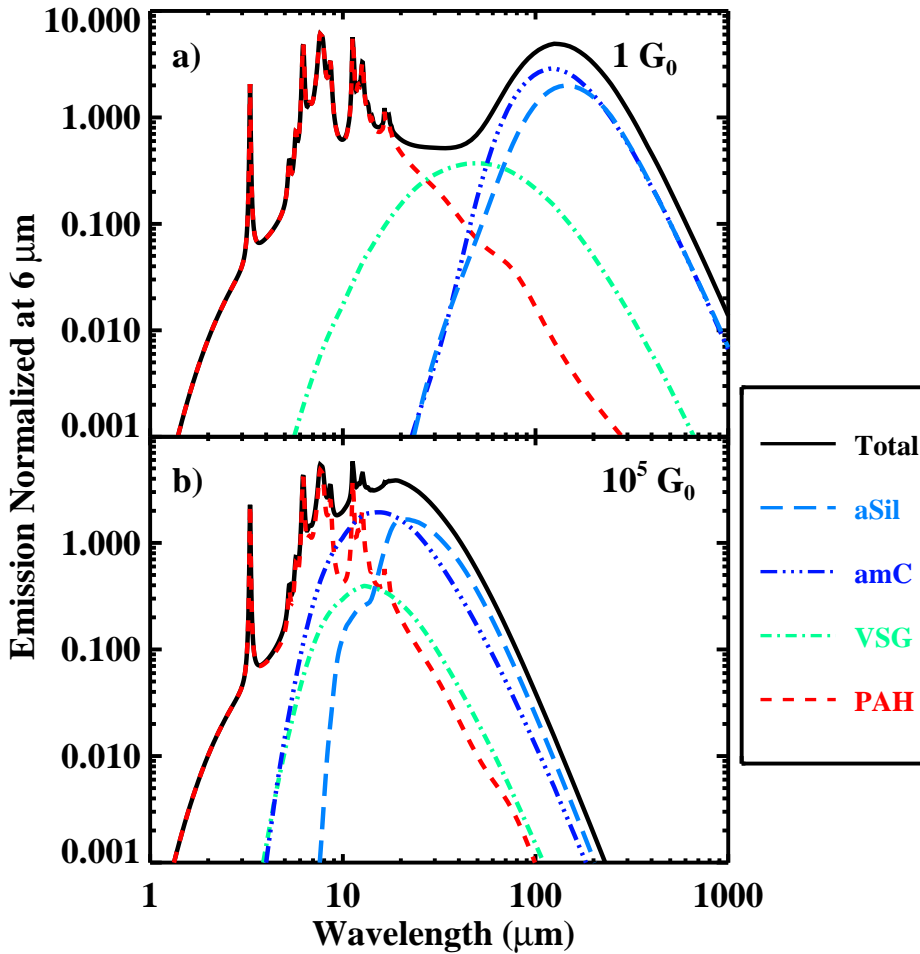


Figure 6.2: Emissie door stof geproduceerd door de Dustem code (Compiègne et al., 2011) voor twee gevallen: a) Onder invloed van een lokaal stralingsveld ($1 G_0 = 1.6 \times 10^{-3} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), vergelijkbaar met het stralingsveld dat kan worden geobserveerd in het ISM. b) Onder invloed van een stralingsveld sterker dan het lokale FUV stralingsveld ($10^5 G_0$), vergelijkbaar met het stralingsveld van een PDR dichtbij een massieve ster. Rode lijnen corresponderen met emissie geproduceerd door PAKs, cyaan kleurige lijnen met emissie door kleine stofdeeltjes, lichtblauwe lijnen met emissie door grote koolstof houdende stofdeeltjes en donkerblauwe lijnen met silicaten.

Koolstof Radio Recombinatie Lijnen; van de vergelijking van niveau populaties (Hoofdstuk 4) tot aan de berekening van de ‘radiative transfer’ (Hoofdstuk 5). Met deze modellen en waarnemingen van KRRL’s kunnen de fysische parame-

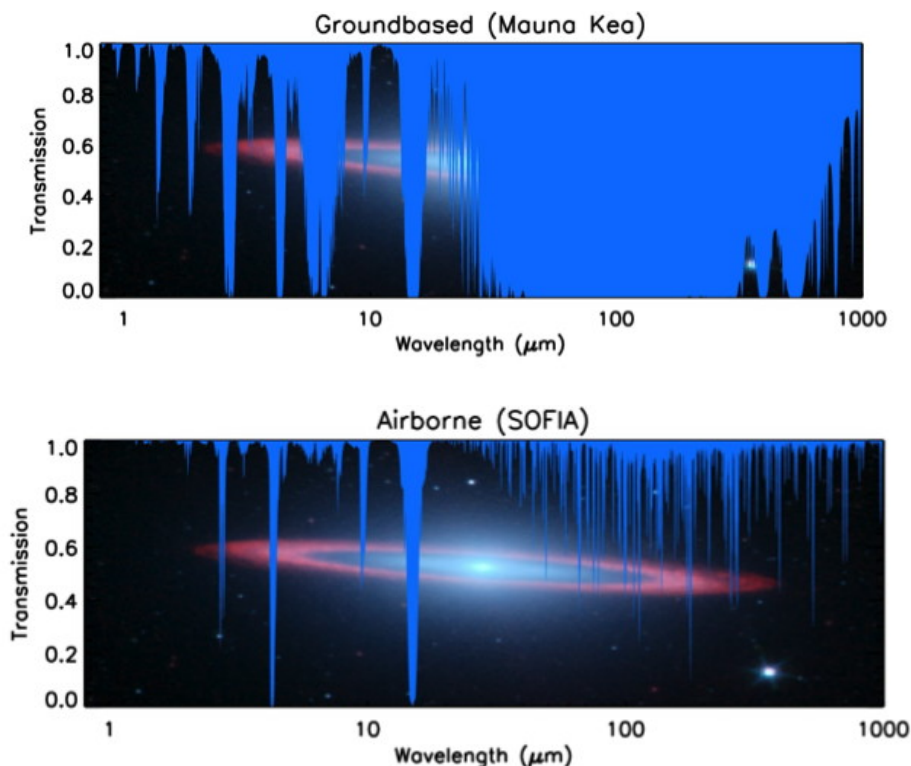


Figure 6.3: Vergelijking tussen de atmosferische transmissie op Mauna Kea en de transmissie die bereikt wordt door SOFIA. Op de hoogtes waar SOFIA kan waarnemen, neemt de atmosferische transmissie in grote mate toe voor golflengten groter dan 20 μm .

ters van de CNM worden bepaald, wat in detail beschreven is in Hoofdstuk 5. De KRRL modellen worden momenteel gebruikt om LOFAR waarnemingen te analyseren.

6.7 De toekomst

Zoals de waarnemingen die in dit proefschrift gepresenteerd worden laten zien zijn de eigenschappen van stof in gebieden van zware stervorming erg verschillend van die van stof in het diffuse ISM. De lancering van de James Webb Space Telescope (JWST) wordt verwacht in oktober 2018 en zal dit vakgebied verder doen uitbreiden. Met een telescoop van 6.5 m zal JWST de grootste spiegel ooit gelanceerd in de ruimte met zich meebrengen. Onder de instrumenten aan boord van JWST heeft het Mid-Infrared Instrument (MIRI)

de mogelijkheid om zowel beeldvormende als spectroscopische studies van stof in HII regio's uit te voeren tussen 5 en 28 μm met een groot oplossend vermogen en een hoge gevoeligheid. De spectroscopische en fotometrische mogelijkheden van de JWST/MIRI kunnen de studie van HII regio's in ons sterrenstelsel uitbreiden zodat zwakkere signalen kunnen worden ontvangen als ook de detectie van nabijgelegen sterrenstelsels. Op deze manier kan een veel groter bereik van fysische karakteristieken (dichtheid, metalliciteit, stellaire cluster grootte, etc.) worden onderzocht met een ongekeerde resolutie. Zulke studies zijn de sleutel om waarnemingen van massieve-stervorming te begrijpen bij roodverschuivingen van ~ 1 .

Zoals de eerste LOFAR studies demonsteren en de resultaten van dit proefschrift kwantificeren bieden KRRL's een krachtige manier van onderzoek van de fysische condities in de koude fases van het ISM. De Square Kilometer Array (SKA) zal de volgende generatie van laag-frequente sterrenwachten zijn en zal daarmee onze studies van KRRL's aanzienlijk verbeteren. Aangezien het SKA op het zuiderlijk halfrond gesitueerd zal zijn is het mogelijk om het Galactisch Centrum en de Magelhaense Wolken in kaart te brengen in de zoektocht naar KRRL's. SKA is uitstekend geschikt voor studies binnen de Melkweg van het gedrag van KRRL's op grote en kleine schaal als ook voor extragalactische studies.