

University of Groningen

## Emission characteristics of water in the Universe

Poelman, Dieter Roel

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2007

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Poelman, D. R. (2007). *Emission characteristics of water in the Universe*. s.n.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

# Nederlandse samenvatting

## Stralingseigenschappen van water in het heelal

In tegenstelling tot wat hun naam doet vermoeden, bestaan sterrenstelsels niet enkel uit sterren, maar ook uit uitgestrekte gas- en stofwolken waaruit nieuwe sterren geboren kunnen worden. Dit interstellair gas bestaat voornamelijk uit neutrale atomen zoals waterstof (H) en helium (He); moleculen zoals moleculair waterstof ( $\text{H}_2$ ), koolstofmonoxide (CO) en water ( $\text{H}_2\text{O}$ ); en ook geladen deeltjes zoals electronen en ionen. Deze verscheidenheid aan elementen was er niet vanaf het begin. Nieuwe (zwaarder dan He) elementen – waaruit onze ster, de planeten en wijzelf opgebouwd zijn – worden geproduceerd door nucleaire reacties in het binnenste van sterren of door supernova explosies van hoge-massa-sterren. Dit zorgt voor een continue verrijking met elementen als koolstof (C), stikstof (N), zuurstof (O), ... in het heelal. Tot op de dag van vandaag zijn ongeveer 130 verschillende interstellair moleculen waargenomen, zoals  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{HCONH}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{CHCHO}$ , ..., en nog meer wachten om ontdekt te worden.

De manier om meer te weten te komen over objecten in het heelal is het analyseren van de uitgezonden elektromagnetische straling. Een stralingsbron kan energie op verschillende golflengtes uitzenden, bv. radiogolven (10 cm – 100 km) of gamma-straling ( $10^{-6}$  –  $10^{-2}$  nm). De soort uitgezonden straling en de hoeveelheid ervan vertellen iets over de eigenschappen van het object. Zo zendt een warm object het merendeel van zijn energie uit op korte golflengtes (met een oppervlaktetemperatuur van  $\sim 6000$  K straalt de zon het overgrote deel van zijn energie uit in het visueel licht), terwijl een koud object meer straling op langere golflengtes produceert (de aarde absorbeert de korte-golf straling van de zon en straalt vervolgens een deel terug in het infrarood op 300 K). Op vergelijkbare wijze gedragen atomen en moleculen zich: elk chemisch element straalt energie uit (als het heet is) of absorbeert energie (als het koud is) op nauwkeurige golflengten. Naargelang de omgeving waarin het molecuul/atoom zich bevindt, produceert het op die manier zijn eigen reeks lijnen in het elektromagnetisch spectrum en brengt vervolgens een uniek patroon voort. De hoeveelheid aan verschillende gebieden in het universum, bv., koude, warme, en compacte gebieden,

maakt het bestuderen ervan, en dus het begrijpen van de chemische reacties tussen het gas en stof, complex.

In dit proefschrift worden de stralingseigenschappen van het watermolecuul onderzocht. In wat volgt ga ik nader in op een paar punten waaruit de significantie van het onderzoek naar dit molecuul blijkt.

Het belang van het onderzoek naar water in het heelal kan niet onderschat worden. Eerst en vooral komt water op uiteenlopende plaatsen voor, waaronder moleculaire wolken, stervormingsgebieden, planetaire nevels, kometen, enz. Daarnaast kan water, als gevolg van zijn interne structuur, straling absorberen en/of uitzenden in zowel koude ( $< 100$  K) als warme ( $> 100 - 1000$  K) gebieden. Dit maakt van water een uitermate geschikt molecuul om te observeren. Ten tweede, het begrijpen van fundamentele interstellaire chemische processen staat of valt met het doorgronden van de rol van water (in gas- en bevroren toestand) in deze chemie. Aangezien water, naast CO, één van de grootste reservoirs van zuurstof is, speelt het een sleutelrol in de chemische reacties die zich voordoen in interstellaire wolken, en meer bepaald in gebieden van stervorming. Water, in gasvorm, komt overvloedig voor in de nabijheid van een warme bron zoals een jonge ster. Hoge temperaturen ( $\geq 230$  K) leiden tot een opeenvolging van snelle reacties met zuur- en waterstof, met als gevolg een stijging in de abundantie tot wel  $\sim 2 \times 10^{-4}$ , t.o.v.  $\text{H}_2$ . Deze hoge abundanties worden niet enkel gevonden in de binnenste gebieden rond jonge sterren, maar ook in gebieden die onder invloed van schokken samengeperst worden. In tegenstelling tot de warme gebieden, daalt de abundantie aanzienlijk tot een lager niveau, van de orde  $10^{-9} - 10^{-8}$  t.o.v.  $\text{H}_2$ , in gebieden met een lage temperatuur ( $\leq 100$  K). Bij deze temperatuur vriezen de watermoleculen uit op stofdeeltjes, en verdwijnen hierdoor uit de gasfase. Dit gedrag, m.a.w. hoge (*lage*) abundantie bij hoge (*lage*) temperaturen, leidt ertoe dat water uitermate geschikt is om de energetische input te bestuderen in interstellaire wolken. Ten derde, water kan een belangrijke rol spelen in het koelen van een medium. Dit komt vooral voor in stervormingsgebieden waar de hoge temperaturen en dichtheden ervoor zorgen dat water de opgeslagen energie overvloedig wegstraalt. Hierdoor kan een wolk, die als gevolg van de zwaartekracht ineentstort, blijven samentrekken tot de vorming van een ster.

Het observeren van straling uit het heelal is één, het analyseren is een ander. De analyse gebeurt door middel van stralingstransport. In dit proefschrift presenteren we een nieuw ontwikkelde code voor het oplossen van het stralingstransportprobleem. De toepassingen van de code worden in de volgende paragrafen kort toegelicht, alsook de rol van de Herschel satelliet met betrekking tot toekomstige waarnemingen van water.

## Foton-gedomineerde gebieden

Foton-gedomineerde gebieden zijn gebieden in het interstellair medium (ISM) die een overgang vormen tussen een gebied bestaande uit geïoniseerd of atomair gas, waarin ultraviolette (UV) fotonen vrij spel hebben, en een gebied opgebouwd uit moleculair gas en stof, ondoordringbaar voor UV fotonen. In principe stelt elke rand van een moleculaire wolk in onze Melkweg en andere sterrenstelsels een foton-gedomineerd gebied voor, m.a.w. de chemie en de temperatuurstructuur in deze gebieden wordt bepaald door de UV fotonen uitgezonden door een nabijgelegen ster of van het Galactisch stralingsveld op zich. Het bestuderen van deze gebieden is belangrijk daar deze systemen tonen wat de interactie is tussen stervorming en het moleculaire medium, aangezien moleculair materiaal voor een deel wordt vernietigd door de straling van reeds gevormde sterren. Het observeren en modelleren van deze gebieden draagt derhalve bij tot een beter begrip van de interactie tussen stervorming/straling en het moleculaire gas.

In hoofdstuk 3 nemen we het foton-gedomineerd gebied S140 onder de loep. Om de inhomogeniteit van het gebied in rekening te brengen maken we gebruik van drie-dimensionale modellen waarin klompjes van dicht opeengepakt gas willekeurig verspreid liggen in een gas met lagere dichtheid. Deze aanpak leidt tot een ietwat ander resultaat in vergelijking met homogene modellen. De inhomogeniteit laat de UV fotonen, uitgezonden door een nabijgelegen ster, dieper doordringen, met als gevolg een lagere abundantie van water en een uitgebreider gebied dat opgewarmd wordt door de fotonen. We hebben aangetoond dat niet-homogene modellen de waarnemingen beter reproduceren dan wanneer S140 als een homogeen gebied beschouwd wordt. We vinden dat het merendeel van de wateremissie wordt uitgezonden door de lage energetische lijnen, afkomstig van de warme ( $\sim 50$  K) randen van de klompjes.

## Massieve sterren

Alhoewel massieve sterren ( $M \gtrsim 10 M_{\odot}$ ,  $L > 10^4 L_{\odot}$ ) niet in grote aantallen voorkomen (ze maken maar 1% uit van de totale massa van alle sterren), leveren ze de belangrijkste bijdrage aan de energetische en chemische input in sterrenstelsels. Het waarnemen van de geboorte van een massieve ster, in tegenstelling tot hun lagere massa kompanen, wordt voor een groot deel verhinderd door de grote afstanden ( $> 1$  kpc), hun korte levenscyclus en het feit dat ze omhuld worden door een dikke laag stof. Het gebied rond een in vorming zijnde massieve ster wordt gekenmerkt door een geheel aan temperaturen (10 K–2000 K) en dichtheden ( $10^4 - 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ), met elk hun eigen chemische eigenschappen. Zo wordt water in de koude buitengebieden gevormd op stofdeeltjes. Dieper naar binnen toe stijgt de abundantie

van water met ordes van grootte als gevolg van twee processen. Ten eerste de in de gasfase endothermische reacties van zuurstof (O) met moleculair waterstof ( $H_2$ ), efficiënt wanneer de temperatuur hoger is dan 230 K. Ten tweede, het verdampen van het waterijs gevormd op de stofdeeltjes wanneer de temperatuur van het stof  $\sim 100$  K overschrijdt. De enorme afstanden maken het voor de huidige telescopen onmogelijk om deze warme en koude gebieden, en dus de zones met verschillende waterchemie, ruimtelijk op te lossen. Om toch deze zones te bestuderen is er behoefte aan een enorme hoeveelheid moleculaire lijndata gekoppeld aan gedetailleerde fysische modellen en stralingstransportmodellen.

In hoofdstuk 5 modelleren we AFGL 2591, één van de prototypes van massieve sterren. De complexe structuur van het systeem – een koud buiten- en een compact binnengebied, tesamen met hogesnelheidsgas dat langs de polen van de centrale ster wordt uitgestoten – noodzaakt het gebruik van axi-symmetrische modellen. We vinden dat (i) de lage energetische lijnen, zoals de  $1_{10}-1_{01}$ ,  $2_{12}-1_{01}$  en  $1_{11}-0_{00}$  transities, voornamelijk gevoelig zijn voor de condities van excitatie in de buitengebieden. (ii) De hoge energetische lijnen daarentegen, waaronder  $3_{12}-3_{03}$ ,  $3_{21}-3_{12}$  and  $2_{21}-2_{12}$ , worden geproduceerd in de binnengebieden en kunnen dus gebruikt worden om de excitatiecondities aldaar, en ook de waterabundantie, te bepalen. (iii) Het plaatsen van een proto-planetaire schijf in het centrum van het systeem heeft geen invloed op de lijnsterktes en -profielen voor de rotationele lijnen die we onderzoeken.

### Schijven rond jonge sterren

Een deel van het omhullend materiaal, bestaande uit gas en stof, rond een ster-in-vorming zal na verloop van tijd deel uitmaken van een draaiende schijf rond de uiteindelijke ster. Deze schijf levert het materiaal aan waaruit later planeten gevormd kunnen worden. De meeste schijven hebben een variabele dikte – hoe verder van de ster, hoe dikker de schijf – en vangen een deel van de uitgezonden straling van de ster op. Hierdoor ontstaat een gelaagde structuur waarbij in de hete ( $> 1000$  K) toplaag, als gevolg van fotodissociatie, maar enkele moleculen overleven. Een deel van de straling van de ster wordt door de toplaag geabsorbeerd. De overgebleven straling creëert een laag met temperaturen tussen de 100 K en 500 K en zijn verantwoordelijk voor een actieve chemie. Onder deze laag bevindt zich nog een koud gebied waar de meeste moleculen uitgevroren zijn op de stofdeeltjes. Een belangrijk fenomeen in deze schijven is de zogenaamde sneeuwlijn. Deze denkbeeldige lijn wordt gedefinieerd als de positie waar de watermoleculen, vastgevroren op stofdeeltjes, terug in de gasfase terechtkomen. Het belang van deze positie mag niet onderschat worden, daar deze geacht wordt een belangrijke rol te spelen in het ontstaan van planeten. De aanwezigheid van een sneeuwlijn deelt de schijf op in twee gebieden, bestaande

uit voornamelijk solide silicaten (binnen de sneeuwlijn) en een gebied met bevroren deeltjes (buiten de sneeuwlijn). De verschillende radiële snelheden van elementen in gecondenseerde- en gasvorm leiden tot een mogelijke opeenhoping van materiaal langs de sneeuwlijn, het begin van de vorming van een planeet.

Het bewijs van het bestaan van zo een sneeuwlijn is observationeel nog niet onomstotelijk vastgelegd. In hoofdstuk 6 onderzoeken we de wateremissie in een schijf rond een T Tauri ster. We vinden dat de fluxen van lijnen die d.m.v. fluorescentie tot stand komen (en dus niet in thermodynamisch evenwicht zijn) voldoende sterk zijn om waargenomen te worden met de *Echelon Cross Echelle Spectrograph* (EXES) aan boord van de SOFIA telescoop. De intensiteiten van de fluorescerende transitie rond  $6\mu\text{m}$  hangen af van de karakteristieken van het aanwezige stof en variëren met de aangenomen temperatuur waaronder watermoleculen uitvriezen op stofdeeltjes. Hierdoor zullen observaties van deze  $6\mu\text{m}$  transitie, tesamen met de  $2.3\mu\text{m}$  fluorescerende lijnen, in de toekomst bijdragen tot het bepalen van de positie van de sneeuwlijn in schijven rond jonge sterren.

## De rol van Herschel

Het observeren van de wateremissie komende uit het heelal met behulp van telescopen op aarde wordt verhinderd door de aardse atmosfeer. Deze absorbeert het merendeel van de uitgezonden waterstraling, met uitzondering van enkele maserovergangen. Satellieten zijn dus onmisbaar in de zoektocht naar straling afkomstig van watermoleculen in de ruimte. In het verleden werd dit al gedaan door ISO (*Infrared Space Observatory*), SWAS (*Submillimeter Wave Astronomy Satellite*) en Odin, maar hun beperkte ruimtelijke en/of spectrale resolutie verhinderden het verkrijgen van optimale lijndata om een accuraat beeld te vormen van het geobserveerde object. Met de toekomstige lancering van Herschel worden drie instrumenten de ruimte ingebracht: HIFI (*Heterodyne Instrument for the Far Infrared*), PACS (*Photodetector Array Camera & Spectrometer*) en SPIRE (*Spectral & Photometric Imaging Receiver*). Tesamen zullen ze waarnemingen verrichten tussen  $57-670\mu\text{m}$ , het gebied waar water straalt. HIFI, in het bijzonder, heeft een frequentie afhankelijke bundelgrootte tussen de  $13''$  en  $39''$ . Met deze bundelgrootte is het een ideaal instrument om op kleine schaal te onderzoeken of water de dominante koeler is van het interstellair medium. Met een maximale spectrale resolutie van  $0.2-0.4\text{ km s}^{-1}$  is het instrument in staat om voor het eerst de kinematica in stervormingsgebieden te onderzoeken met behulp van water waarnemingen. Het instrument zal bijgevolg een belangrijke rol spelen in het ontleden van de stralingseigenschappen van water in het heelal.

