



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Methanol masers and millimetre lines : a common origin in protostellar envelopes

Torstensson, K.J.E.

Citation

Torstensson, K. J. E. (2011, December 6). *Methanol masers and millimetre lines : a common origin in protostellar envelopes*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/18187>

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/1887/18187>

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

Stervorming

Zware sterren, reuzen, spelen een belangrijke rol, zowel bij de evolutie van ons Melkwegstelsel, alsook voor ons bestaan in de ruimste betekenis. Hoe zwaarder een ster, des te korter is zijn levensduur en hoe spectaculairder zijn dood. Reuzen voorzien in een grote hoeveelheid mechanische energie en intense ultraviolette straling door middel van krachtige straalstromen, sterrenwinden en uiteindelijk ook als explosieve supernovae. Bovendien verrijken zij het interstellair medium met zware elementen. In feite bestaan wij allemaal voornamelijk uit sterrenstof van vroegere sterren zwaarder dan onze zon. Toch is ons inzicht in het ontstaan van zulke reuzensterren beperkt, grotendeels ten gevolge van de beperkingen die de waarnemingen aan hun ontstaan ondervinden. Reuzen worden gevormd in die gebieden van moleculaire wolken waar zich de grootste dichtheden ophopen en kunnen daarom niet worden waargenomen bij optische golflengtes. Omdat ze juist ontstaan in deze gebieden, worden ze vaak in clusters gevormd en is het dus moeilijk om te kunnen onderscheiden wat er precies gebeurt. Een ander probleem is dat reuzen zeldzaam zijn, doordat zij sneller evolueren dan lichte sterren. Een consequentie daarvan is dat ze gemiddeld op veel grotere afstanden gevonden worden dan dwergen, wat weer betekent dat de waarnemingen moeten worden gedaan met een groter oplossend vermogen.

Sterren ontstaan als gevolg van de ineenstorting van een moleculaire gaswolk onder invloed van zijn eigen zwaartekracht (zie figuur 1.1). In zo'n gaswolk kan de gasdruk de zwaartekracht enigszins compenseren. Maar de wolk zal ineenstorten als de gasdruk te laag is of de massa te groot. Andere fysische processen, zoals de aanwezigheid van magnetische velden en turbulentie kunnen het ineenstorten en fragmenteren van de wolk ook beïnvloeden. Bij het samentrekken van de wolk komt er gravitatie-energie vrij die via straling kan ontsnappen. Wanneer de wolk echter een steeds grotere dichtheid krijgt, wordt deze minder transparant en als de stralingskoeling niet meer efficiënt is, zal de temperatuur van de wolk stijgen. Op een gegeven moment gaat de ster 'aan' en brandt dan eerst op deuterium en vervolgens op waterstof. Op dat moment neemt de stralingsdruk drastisch toe. Theoretisch werk laat zien dat voor het ineenstorten van een bolvormige wolk de stralingsdruk de zwaartekracht opheft, wat ervoor zorgt dat sterren niet zwaarder kunnen worden dan acht zonnemassa's. Dit wordt echter niet onderschreven door de prak-

Nederlandse Samenvatting

tijk; veel zwaardere sterren zijn immers waargenomen en moeten dus via een onbekend mechanisme zijn ontstaan.

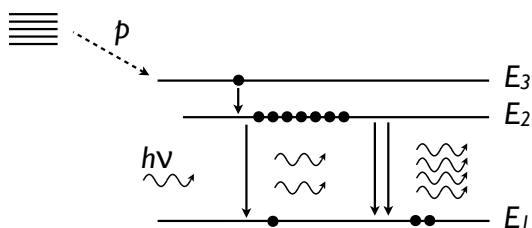
Er bestaan verschillende theorieën voor de vorming van reuzen. Momenteel zijn de twee belangrijkste theorieën de competitieve accretie en de monolitische ineenstorting. De twee scenario's verschillen voornamelijk in hoe wolkfragmenten individuele kernen worden, waaruit dan weer één of meerdere sterren ontstaan. Ondanks de overeenkomsten tussen beide modellen, hebben ze bijzonder verschillende implicaties voor de efficiëntie van de vorming van sterren. In het competitieve accretie model wordt bijna al het gas omgezet in sterren terwijl de monolitische ineenstorting voorspelt dat slechts een klein deel van het gas voor stervorming wordt gebruikt. In principe is dit een opgeschaalde versie van de vorming van gewone, lichte sterren waarbij accretie via een schijf plaatsvindt om zo de stralingsdruk te overwinnen. Vandaag de dag is de monolitische ineenstorting het meest gesteunde scenario.

Moleculen in de ruimte

Eén van de methoden die gebruikt wordt om het binnenste van wolken waar sterren ontstaan te onderzoeken, is het waarnemen van moleculaire emissie lijnen. Tijdens het ineenstorten en de gravitationele opwarming kan een keur aan chemische reacties plaats vinden in het koude ijs op de interstellaire stofdeeltjes en zo kunnen complexe moleculen ontstaan. Wanneer de temperatuur van de wolk verder stijgt, sublimeren deze moleculen waarna hun emissie in de gas fase kan worden waargenomen. Deze emissie vindt plaats in het millimeter en sub-millimeter gebied van het electromagnetisch spectrum. Het licht van deze grote golflengtes kan zich door de dichte wolken voortplanten en na een ruimtereis van enkele duizenden jaren ons hier op aarde bereiken, waar wij het kunnen waarnemen. Tot op heden zijn er bijna 170 moleculen geïdentificeerd in de ruimte. Sommige van deze moleculen kunnen worden gebruikt om de fysische condities te onderzoeken van de gebieden waar reuzensterren ontstaan. Door verschillende spectrale overgangen van een molecuul als methanol (CH_3OH) waar te nemen, kan de hoeveelheid methanol worden afgeschat en daarmee ook de temperatuur van het gas en de dichtheid van de wolk.

Maser emissie

Eén emissiemechanisme waar hier in het bijzonder aandacht aan wordt besteed, is de zogenaamde Microgolf Amplificatie door Gestimuleerde Emissie van Straling (Engels: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation - MASER). Dit is het equivalent van een LASER, maar dan voor langere golflengtes. In de ruimte kan maser emissie plaatsvinden als er een populatie-inversie van het gas is, dat wil zeggen, wanneer meer moleculen zich in een hoog aangeslagen toestand bevinden dan in een lagere energie-toestand. Een foton met de juiste energie of golflengte kan dan de emissie van een volgend, coherent foton stimuleren (figuur 1). Dit tweede foton is identiek aan het eerste en samen kunnen zij nogmaals twee fotonen stimuleren, enzovoorts. Het resultaat is een



Figuur 1: Een schema van het maser emissie principe.

exponentiële toename in de foton flux langs het pad van zo'n maser. In dit proefschrift ligt de nadruk op de 6.7 GHz (4.5 cm) CH₃OH maser. Deze specifieke maser wordt alleen waargenomen in de richting van plekken waar reuzen ontstaan en kan daarom worden gezien als een baken van het vroegste stadium waarin een reus geboren wordt. Het is echter meer dan alleen een baken, omdat de maser emissie zo helder is dat we deze objecten kunnen waarnemen met 'Very Long Baseline Interferometry' (VLBI), dat het grootst mogelijke oplossend vermogen biedt. Daarom kunnen we de kinematica bestuderen en onderzoek doen aan de fysische condities op zeer kleine schaal, vlakbij het protostellaire object.

Radio Interferometrie

De resolutie van een telescoop bestaand uit een enkele schotel wordt bepaald door de waargenomen golflengte en de diameter van de telescoop. Idealiter bestudeert een astronoom zijn objecten met optische telescopen en radio telescopen van vergelijkbare resolutie. Maar radiogolven hebben langere golflengtes en daarom zou men eigenlijk gebruik moeten maken van telescopen die zo groot zijn, dat dat fysiek niet haalbaar is. De manier om de resolutie te vergroten is het combineren van het signaal van verschillende telescopen door middel van interferometrie om zo een veel groter instrument te creëren. De resolutie wordt dan bepaald door de afstand tussen de twee telescopen. Echter, voor deze hogere resolutie moet ook een prijs betaald worden. Het blijkt dat hoewel de resolutie groter wordt, de helderheid van het object ook groter moet zijn om gedetecteerd te kunnen worden. Voor VLBI komen alleen niet-thermische emissie mechanismen, zoals maser emissie, in aanmerking.

Dit proefschrift

Het doel van dit proefschrift is om de relatie te onderzoeken tussen de 6.7 GHz maser emissie, de protoster(ren) die verantwoordelijk zijn voor de verhoogde excitatie en de thermische CH₃OH emissie. Meer specifiek is er gekeken naar waar de CH₃OH maser



Figuur 2: De Onsala Space Observatory (Zweden) in de winter. Aan de rechterkant staat de 25 m telescoop en links de radome met de 20 m antenne. Beide telescopen worden gebruikt voor VLBI waarnemingen en zijn deel van het Europese VLBI Network. Credit: Onsala Space Observatory/Magnus Thomasson

emissie ontstaat in relatie tot de protoster en wat de excitatie omstandigheden van het ‘maserende’ gas zijn. Om dit te kunnen doen, is een set van 14 CH_3OH maser objecten bestudeerd bij verschillende golflengtes en aan de hand van verschillende emissie mechanismen. De set omvat enkele van de dichtstbijzijnde gebieden waar reuzen vormen.

In Hoofdstuk 2 wordt een gedetailleerde studie van de 6.7 GHz en 12.2 GHz CH_3OH maser emissie in Cepheus A HW2 gepresenteerd, gebaseerd op VLBI waarnemingen. Het object HW2 is een protoster met een massa van ongeveer 20 zonsmassa’s, op een afstand van 700 pc. Cep A is één van de dichtstbijzijnde gebieden waar reuzen vormen. De CH_3OH maser vormt een filamentachtige boog langs de equator van de protoster, loodrecht op de thermische jet die waargenomen is bij radio golflengten. De kinematica van de masers locaties suggereert dat een invallende stroming prevaleert over rotatie, zoals je misschien aanvankelijk zou verwachten. We laten hier zien dat de CH_3OH masers voorkomen in (de buurt van) een schok op het grensvlak tussen de feitelijke accretie schijf en de wolk met het invallende materiaal dat daaromheen ligt. Dit beeld is consistent met metingen van het magnetisch veld.

In Hoofdstuk 3 worden sub-millimeter waarnemingen van het thermische CH_3OH gas in Cep A gepresenteerd, die uitgevoerd zijn met de James Clerk Maxwell Telescope. De distributie en excitatie van het CH_3OH gas op grote lengteschalen is in kaart gebracht. Het uitgebreide gas heeft een relatief lage temperatuur en het snelheidsveld suggereert dat het gas meegevoerd wordt door een straalstroom. Op de positie van de protoster HW2 wordt echter een tweede gas component waargenomen met een veel hogere excitatie. Deze tweede component is waarschijnlijk geassocieerd met de maser emissie, ondanks dat de

resolutie van onze waarnemingen te laag is om dit in detail te kunnen bestuderen.

Dezelfde observationele technieken en methodologieën die gebruikt zijn in Hoofdstuk 3, zijn toegepast op een set van 13 objecten die met 6.7 GHz CH_3OH maser emissie. Dit wordt beschreven in Hoofdstuk 4. Eén van de conclusies is dat de helft van de objecten een compacte CH_3OH gasdistributie hebben die zijn maximum heeft vlakbij de positie van de maser emissie. Voorts suggereert het lineaire snelheidsveld langs de hoofdas dat het thermische gas meegevoerd wordt in een straalstroom. In verschillende objecten zijn aanwijzingen van hoog geëxciteerd gas waargenomen. Waarschijnlijk gebeurt dit op de positie van de maser, maar met de huidige data is het onmogelijk deze excitatie tot in detail te bestuderen.

In Hoofdstuk 5 wordt een VLBI studie gepresenteerd naar de CH_3OH emissie in de richting van de compacte objecten uit Hoofdstuk 4. Ondanks dat de VLBI waarnemingen typisch slechts een fractie van de totale maser flux detecteren, zijn de contouren van de jonge sterren herkenbaar en kunnen we concluderen dat de VLBI data een representatie zijn van de totale fysieke structuur. De maser emissie komt voor op ruimtelijke schalen van een paar honderd tot een paar duizend astronomische eenheden, wat goed overeenkomt met eerdere studies. Voorts blijken de CH_3OH masers in de helft van de objecten onderdeel te zijn van een schijf of torus in de equatoriale regio van de reuzen-protoster, waarbij de invallende beweging te onderscheiden is. De oriëntatie van de schijf/torus is loodrecht op de thermische snelheidsgradiënt van methanol, wat de hypothese onderschrijft dat het uitgebreide gas meegevoerd wordt in een straalstroom.

Tot slot; we hebben laten zien dat voor een redelijke hoeveelheid van de objecten de methanol masers voorkomen op een ruimtelijke schaal van ongeveer 1000 AU, in de equatoriale regio van de reusachtige protoster. Het lijkt erop dat de invallende beweging belangrijker is dan de roterende beweging. Wij stellen voor dat de maser emissie plaatsvindt vlakbij, of in een geschokt grensvlak, wat mogelijk gerelateerd is aan de accretiestroom van de protostellaire wolk naar de accretie schijf. De morfologie en kinematica van het thermische CH_3OH gas onderschrijft de hypothese dat de maser omgeving ook het gebied is waar de CH_3OH moleculen los worden gemaakt uit het koude ijs op stofdeeltjes. We hebben ook een afschatting gemaakt van de temperatuur en kolomdichtheid van het CH_3OH gas in de straalstromen en hebben bewijs gevonden voor excitatie ten gevolge van straling van het CH_3OH gas op de locatie van de maser emissie.

