Models of molecular clouds

Boland, W.H.M.

INLEIDING EN SAMENVATTING

Tussen de sterren bevinden zich wolken interstellair gas en stof. Om nog duistere redenen kunnen zich in dit gas verdichtingen vormen, die na verloop van tien tot honderd miljoen jaar weer verdwijnen. Deze verdichtingen worden moleculaire wolken genoemd omdat ze voornamelijk bestaan uit moleculaire waterstof (H_2). De overgang van diffuse atomaire wolken naar dichtere moleculaire wolken vindt plaats wanneer de dichtheid van de materie langs de gezichtslijn voldoende groot is om het interstellaire ultraviolette licht (dat een vernietigende uitwerking heeft op moleculen) te verhinderen door te dringen tot het centrum van de wolk.

De dichtheid van het gas in interstellaire wolken kan varieren van een atoom per cm^3 in diffuse atomaire wolken tot meer dan honderdduizend moleculen per cm^3 in kernen van moleculaire wolken. De temperatuur van het gas in deze wolken kan dalen tot -260 °C in de binnenste delen van moleculaire wolken.

Laat ik een voorbeeld geven waaruit blijkt dat er sterren in ons melkwegstelsel zijn die veel jonger moeten zijn dan de geschatte leeftijd van ons zonnestelsel (deze is circa 4,6 miljard jaar). De heldere sterren in de bekende Orionnevel zijn elk 100.000 maal helderder dan de zon terwijl ze 'slechts' 30 maal zoveel materie bevatten als de zon. Daarom bevatten ze ook 'slechts' 30 maal zoveel brandstof als de zon. Derhalve is hun voorraad brandstof in een tijdsbestek van 30/100.000 maal de levensduur van de zon (circa 10 miljard jaar) verbruikt. Hieruit blijkt dat deze sterren jonger zijn dan 3 miljoen jaar. Zo zijn er meerdere voorbeelden te geven waaruit valt af te leiden dat het proces van stervorming een continue proces is dat nog steeds plaatsvindt.

De jongste sterren in ons melkwegstelsel worden uitsluitend waargenomen in of nabij moleculaire wolken. Algemeen wordt aangenomen dat deze sterren zijn ontstaan doordat -een deel van- een moleculaire wolk zich is gaan samentrekken omdat de interne gasdruk niet meer in staat bleek te zijn de zwaartekracht te kompenseren. Ook kan het proces van samentrekking op gang worden gebracht door een - tijdelijke- extra uitwendige kracht (bv. een schokgolf van een supernova, een sterrenwind of een botsing van twee interstellaire wolken). Een beter begrip van de fysische processen die de structuur en stabiliteit van moleculaire wolken bepalen, is van essentieel belang om het proces van stervorming beter te leren begrijpen.

STELLINGEN

behorende bij het proefschrift "Models of Molecular Clouds"

29 september 1982

Wilfried Boland
Burg. Weimalaan 14, 7948 AM Nijeveen

1. De uitspraak van Glassgold en Langer dat er een thermische instabiliteit kan optreden in moleculaire wolken blijkt onjuist te zijn.

   (A.E. Glassgold en W.D. Langer: 1976, Astrophys. J. **204**, 403; dit proefschrift, hoofdstuk IA)

2. Circulatie van gas en stof ten gevolge van turbulente stromingen in moleculaire wolken heeft grote invloed op de chemische samenstelling van het gas in het centrum van deze wolken.

   (Dit proefschrift, hoofdstukken IB en II)

3. Moleculaire wolken met een hoge HC_3N concentratie zijn niet in chemisch evenwicht.

   (Dit proefschrift, hoofdstuk IC)

4. De HCO^+/HCO verhouding blijkt een goede indicator te zijn voor het metaalgehalte in de gasfase in kernen van moleculaire wolken.

   (Dit proefschrift, hoofdstuk IB)

5. Formaldehyde masers zijn geassocieerd met extreem jonge compacte HII gebieden.

6. "Gamma ray bursters" kunnen optische lichtflitsen voortbrengen die niet van puntmeteoren zijn te onderscheiden.

   (B. E. Schaefer, Bull. Werkgroep Meteoren NVWS, **6**, nr. 1 p.24, 1982)

7. De Nederlandse overheid bezuinigt nauwelijks door personeel te ontslaan.

8. Een milieu-vriendelijk gebruik van papier houdt in dat papier aan twee zijden wordt beschreven of bedrukt.

9. De eerste voetstap op de maan heeft nog steeds niet de aangekondigde sprong voor de mensheid opgeleverd.

10. Bij het volksdansen kun je beter geen klompen aandoen.

11. Dit proefschrift leest gemakkelijker wanneer men de betrekkelijkheid ervan inziet.

Waarnemingen van moleculaire lijnstraling verschaffen informatie over de dichtheid, temperatuur en snelheidsvelden in moleculaire wolken. De bevolkingen van de energieniveau's en daarmee samenhangend ook de intensiteit van de lijnstraling blijkt zeer gevoelig te zijn voor de dichtheid en de temperatuur van het gas en voor de abundantie van het betreffende molecuul. Uit de vorm en de breedte van deze spectraallijnen kunnen conclusies worden getrokken over de snelheidsvelden in moleculaire wolken. Grote locale snelheidsverschillen kunnen duiden op een samentrekking van een deel van de wolk, een proces dat vooraf gaat aan het eigenlijke proces van stervorming.

In hoofdstuk I en II van dit proefschrift heb ik een studie gemaakt van de fysische structuur van koude moleculaire wolken. Een belangrijk deel van de resultaten is verkregen door middel van numerieke berekeningen van de thermische en chemische eigenschappen van het moleculaire gas onder interstellaire omstandigheden. Het blijkt dat de temperatuur van het gas van buiten naar binnen toe afneemt. Het gas in de buitenlagen van de wolk wordt voornamelijk verhit door super-thermische electronen die door interstellaire ultraviolet fotonen uit het stof worden geslagen. Het wordt gekoeld door botsingsexcitatie van de fijnstruktuur niveau's van C en C^+ gevolgd door fotodeëxcitatie. Het gas in de kern van de wolk wordt voornamelijk verhit als gevolg van ionisatie van waterstof moleculen door de kosmische straling en het wordt voornamelijk gekoeld door de rotatieovergangen van ^{12}CO, ^{13}CO en HCO^+.

De geconstrueerde modellen van moleculaire wolken ontlenen hun benodigende stabiliteit aan een extra ingevoerde turbulente druk. De turbulente stromingen in het gas verklaren dan ook meteen de super-thermische breedten van de waargenomen moleculaire lijnen. De modellen vertonen naar binnen toe een grote toename van de gasdichtheid.

In hoofdstuk IA worden de resultaten gepresenteerd voor plan parallelle modellen. De berekende kolomdichtheden van H, CH, OH, CO, HCO^+ en H_2CO blijken overeen te stemmen met die waargenomen in de moleculaire stofwolk (globule) L134. Een belangrijk nieuw facet van deze modelberekeningen vormt het feit dat er rekening is gehouden met het gegeven dat de zware elementen (voornamelijk (koolstof, zuurstof en stikstof) in atomaire of in moleculaire vorm op stofdeeltjes condenseren onder de omstandigheden zoals die heersen in kernen van donkere moleculaire wolken. Om te verhinderen dat teveel C, N en O verdwijnen uit de gasfase moest worden verondersteld dat moleculaire wolken jonger zijn dat 10^6

jaar of dat het condensatieproces inefficient is. Beide mogelijkheden zijn echter onwaarschijnlijk en daarom ook niet aantrekkelijk.

Daarom wordt in hoofdstuk II voorgesteld dat de materie in moleculaire wolken voortdurend circuleert als gevolg van turbulente stromingen zodat continue niet gecondenseerde koolstof, zuurstof en stikstof van de buitenlagen van de wolk naar het centrum worden getransporteerd. De stofmantels, die in de kern van de wolk zijn gevormd als gevolg van het condensatieproces, worden in de buitenlagen weer volledig afgebroken onder invloed van ultraviolet licht of verdampen geheel door verhitting van het stof door het oplichten van een supernova.

In hoofdstuk IB worden sferische modellen van moleculaire wolken geconstrueerd waarbij de abundantie van de zware elementen als funktie van de diepte in de wolk wordt berekend volgens het zojuist beschreven circulatie patroon. Het blijkt dat modellen van dit type de moleculaire lijn waarnemingen in L134, L183 en TMC-1 bevredigend kunnen verklaren wanneer de circulatiesnelheid van dezelfde grootte is als de locale geluidssnelheid.

Uit een vergelijking van de resultaten verkregen voor een circulatie model, waarbij de chemie en de condensatie van zware elementen tijdsafhankelijk zijn berekend (hoofdstuk IC), met de resultaten, verkregen voor een verder identiek model in chemisch evenwicht (hoofdstuk IB), blijkt dat de voorspelde kolomdichtheden minder dan een factor 2 tot 3 verschillen voor de meeste moleculen. Moleculen, waarvoor de berekende kolomdichtheid wel significant verschilt, zijn HC_3N, H_2CO, CH_4, C_2H_2, O_2 en N_2. Op grond van een vergelijking van de berekende en waargenomen HC_3N kolomdichtheden wordt voorspeld dat de circulatiesnelheid afneemt of dat de visuele extinctie door het centrum van de wolk toeneemt in de volgorde TMC-1, L183 en L134.

Pas geboren sterren worden nog omgeven door het restant van de gas en stof waaruit ze ontstaat zijn. Dit stof absorbeert al het sterlicht zodat zeer jonge sterren optisch niet waarneembaar zijn. Bij hete sterren wordt het gas in de onmiddelijke omgeving van de ster volledig geioniseerd door het sterlicht. Zo ontstaat een compact HII (ofwel H^+) gebied dat waarneembaar is bij radiogolflengten. Dit HII gebied gaat expanderen en botst daarbij op het moleculaire gas daarbuiten.

Waarnemingen met een hoog scheidend vermogen, zoals die verkregen kunnen worden met de Westerbork Radio Synthese Telescoop, zijn onontbeerlijk om het moleculaire gas nabij de

jongste ultra compacte HII gebieden bestuderen. Zoals beschreven in hoofdstuk IV blijken compacte HII gebieden die geassocieerd zijn met OH maser emissie omgeven te zijn door koud ($T \approx 20$ K) neutral moleculair gas met dichtheden van de orde 10^4 tot 10^6 moleculen per cm^3. In hoofdstuk III is aangetoond dat de bevolking van de energieniveau's behorende bij de $1_{10}-1_{11}$ overgang van formaldehyde geinverteerd kan worden door de vrij-vrij straling van een nabij compact HII gebied. Het HII gebied dient dan wel ultracompact te zijn met een emissiemaat van 10^8-10^{10} cm^{-6} pc. Het moleculaire gas dient een dichtheid $<10^5$ cm^{-3} te hebben om te verhinderen dat de laagste rotatieniveau's van formaldehyde thermaliseren ten gevolge van botsingen met H_2. Tevens is een model geconstrueerd van een compact HII gebied en het omringende gas om de formaldehyde maser te verklaren die is waargenomen nabij NGC 7538 - IRS 1.