



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Inextricable ties between chemical complexity and dynamics of embedded protostellar regions**

Drozdovskaya, M.N.

### **Citation**

Drozdovskaya, M. N. (2016, October 6). *Inextricable ties between chemical complexity and dynamics of embedded protostellar regions*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/43439>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/43439>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/43439> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Drozdovskaya, Maria

**Title:** Inextricable ties between chemical complexity and dynamics of embedded protostellar regions

**Issue Date:** 2016-10-06

## NEDERLANDSE SAMENVATTING

---

### INLEIDING

Astrochemie is één van de meest interdisciplinaire onderzoeksgebieden binnen de theoretische en observationele sterrenkunde met raakvlakken aan de experimentele en theoretische chemie. Astrochemici bestuderen de vorming van moleculen in de ruimte en hun chemische evolutie tot uiteindelijk complexe organische moleculen, waar het onderzoek samenkomt met het gebied van de astrobiologie. De grote vraag die centraal staat bij dit onderzoek is hoe planeten en leven gevormd kunnen worden uit stof en atomen. Daarnaast willen de onderzoekers begrijpen welke omstandigheden het meest geschikt zijn voor leven, ook al staat de definitie van leven nog ter discussie.

Nederland is gezegend met vier universiteiten met gespecialiseerde sterrenkunde afdelingen verenigd in de Nederlandse Onderzoekschool voor Astronomie (NOVA; Netherlands Research School for Astronomy). Astrochemie zelf is een van de programma's die worden gefinancierd door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), wat het centrale belang van dit onderzoeksgebied binnen de Nederlandse wetenschapsgemeenschap aangeeft. Bij de Universiteit Leiden werken vier grote groepen op dit gebied onder één dak: prof. dr. Xander Tielens, dr. Michiel Hogerheijde, prof. dr. Harold Linnartz en de promotor van de auteur - prof. dr. Ewine van Dishoeck. Dit 'powerhouse' maakt Leiden de kern van het astrochemisch onderzoek in Nederland.

### CHEMIE IN DE RUIMTE

Het eerste meer-atomige molecuul dat in de ruimte gedetecteerd werd was ammoniak in 1968, gevolgd door water en het eerste organische molecuul, formaldehyde, in 1969. Vijftig jaar later worden er steeds complexere moleculen ontdekt. In 2012 werd met behulp van de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) glycolaldehyde, een suikermolecuul, waargenomen in het gas rond de jonge, zonachtige ster IRAS 16293-2422. Twee jaar later werd isopropyl cyanide gedetecteerd in Sagittarius B2, een ster-vormingsgebied nabij het centrum van onze Melkweg. Deze ontdekking was bijzonder omdat dit de eerste keer was dat een molecuul met een zijtak werd waargenomen in de ruimte. Dit jaar, 2016, hebben onderzoekers in Sagittarius B2 het eerste chirale molecuul ontdekt. Polycyclische aromatische koolwaterstoffen worden overal in de interstellaire ruimte gevonden. Zulke moleculen spelen een belangrijke rol in allerlei biologische processen. Dankzij ALMA en andere nieuwe telescopen worden er nog veel nieuwe ontdekkingen van complexe moleculen verwacht in het komende decennia.

Moleculen zijn het makkelijkst te identificeren wanneer ze zich in het gas bevinden. Enerzijds omdat ze dan meer unieke emissielijnen bezitten en anderzijds zijn de meeste faciliteiten geschikt voor dit soort waarnemingen. Maar er is ook een grote chemische diversiteit in interstellair ijs. Waterijs werd gedetecteerd in 1973 en sindsdien zijn er ook een aantal andere moleculen aangetoond in de vaste fase. Het is moeilijk om de grootste moleculen in het ijs te bestuderen omdat er relatief weinig van deze moleculen aanwezig



Figure .6: Donkere koude interstellaire wolken en bipolaire straalstromen in HH 901/902 in zichtbaar licht als gezien door *The Hubble Space Telescope*. Jonge sterren en protoplanetaire schijven vormen binnen deze wolken (NASA, ESA, and M. Livio and the Hubble 20th Anniversary Team, STScI).

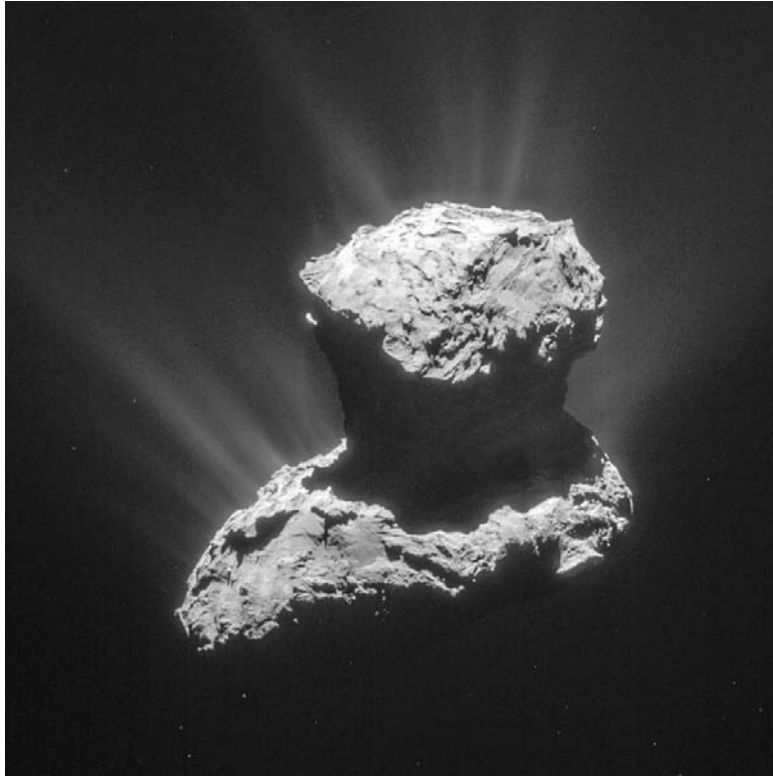


Figure 7: Komeet 67P op 25 maart 2015 genomen met de Navigation Camera (NavCam) van *Rosetta* op 86,6 km afstand vanaf het centrum van de komeet. De gas 'jets' zijn het gevolg van sublimatie van het ijs op en onder het oppervlakte van de komeet en vormen de koma van de komeet (ESA/Rosetta/NAVCAM-CC BY-SA IGO 3.0).

zijn. Bovendien hebben ze minder unieke vibraties, wat het lastig maakt ze onderling te onderscheiden.

Desondanks voorspellen moderne experimentele studies en complexe fysico-chemische modellen dat de chemische processen in de vaste fase een cruciale rol spelen in de ontwikkeling van de chemische diversiteit in de ruimte. Grote complexe moleculen kunnen gevormd worden uit kleinere moleculen en atomen via chemische reacties op het oppervlak van met ijs bedekte stofdeeltjes in interstellaire wolken. Op deze manier kan de chemische ontwikkeling al plaatsvinden onder de heel koude omstandigheden in de vroegste stadia van ster- en planeetvorming, wanneer reacties in het gas nog inefficiënt zijn door de te lage temperaturen en dichtheden. De stofdeeltjes zelf groeien tot grotere lichamen door middel van verschillende mechanismen en vormen uiteindelijk kometen en planeten. Op deze manier worden moleculen van biologische belang automatisch opgenomen in de grotere objecten die een volwassen planeetstelsel vormen.

#### VORMING VAN EEN ZONNESTELSEL

De interstellaire ruimte is niet leeg, maar gevuld met donkere koude wolken van ver-

schillende gassen en stofdeeltjes (afb. .6). Op een gegeven moment kunnen deze wolken instorten onder de invloed van de zwaartekracht en een jonge ster is dan geboren. Door de rotatie van het systeem vormt er zich een schijf rond de ster. Hierin zullen de kometen en planeten vormen en daarom heet zo'n schijf een protoplanetaire schijf. In eerste instantie is het ster-schijf systeem ingebed in de resterende wolk materie. Door bipolaire straalstromen (meerdere zijn te zien in afb. .6) wordt de omgeving schoongeveegd en uiteindelijk blijven alleen de ster en schijf over. Als het systeem verder ontwikkelt verdwijnt het gas uit de schijf en worden de stofdeeltjes gebruikt voor de vorming van grotere lichamen of weggeblazen. Uiteindelijk blijft er een volwassen zonnestelsel over die vergelijkbaar is met het onze. Zo'n zonnestelsel bestaat uit een aantal planeten en zit vol met achtergebleven kleinere planetaire bouwstenen, zoals kometen (afb. .7) en asteroiden.

De *Rosetta* missie is een unieke in situ poging om de komeet 67P de bestuderen. De orbiter volgt de komeet sinds 6 augustus 2014 en zal nog tot 30 september 2016 67P blijven volgen. Hierdoor kunnen de gassen en stofdeeltjes in de koma bestudeerd worden gedurende meer dan twee jaar, inclusief het moment waarop de komeet zich het dichtst bij de zon bevindt (perihelium op 13 augustus 2015). De *Rosetta* orbiter ging gepaard met een lander *Philae* die op 12 november 2014 een historische landing op een komeet heeft gemaakt. De data van de orbiter en de lander worden nog onderzocht, maar er zijn al meerdere ontdekkingen gedaan. Bijvoorbeeld de eerste detectie van moleculair zuurstof en glycine in een komeet. Daardoor is dit de ultieme tijd voor onderzoekers op het gebied van chemische inventarisatie van zonnestelsels.

#### CHEMISCHE PROCESSEN

De vorming van een zonnestelsel is een ingewikkeld dynamisch, fysisch proces met een grote variatie in temperatuur, dichtheid en hoeveelheid straling gedurende de evolutie. Simultaan vinden de chemische reacties plaats, die op hun beurt afhankelijk zijn van de fysische condities en de tijd die beschikbaar is voor verschillende chemische processen. Buiten ons zonnestelsel bevinden de meeste complexe moleculen zich in andere stervormingsgebieden. Dit is de reden waarom andere zonnestelsels zo interessant en belangrijk zijn om te begrijpen hoe en wanneer het leven op Aarde zou hebben kunnen ontstaan. Chemische processen zijn universeel, maar het is nog onduidelijk of het leven hier uniek is.

De synthese van grotere complexe moleculen begint met de vorming van kleine simpele moleculen in de interstellaire wolken. Tijdens de instorting van de wolk tot een ster en schijf zal de chemie verder ontwikkelen door hogere temperaturen, sterkere straling en grotere dichtheden. Belangrijke pre-biologische moleculen kunnen al vormen voordat de materie zich in de schijf bevindt (afb. .8). In de protoplanetaire schijf zal de vorming van kometen en planeten plaatsvinden in het centrale gedeelte waar de dichtheid het hoogst is. Daar kunnen de grote complexe moleculen opgenomen worden in de bouwstenen voor grotere lichamen. Op deze manier zijn de vroegste stadia van ontwikkeling (zoals de wolken in afb. .6) verbonden met de oudste componenten van een zonnestelsel (zoals de kometen in afb. .7).

#### DIT PROEFSCHRIFT

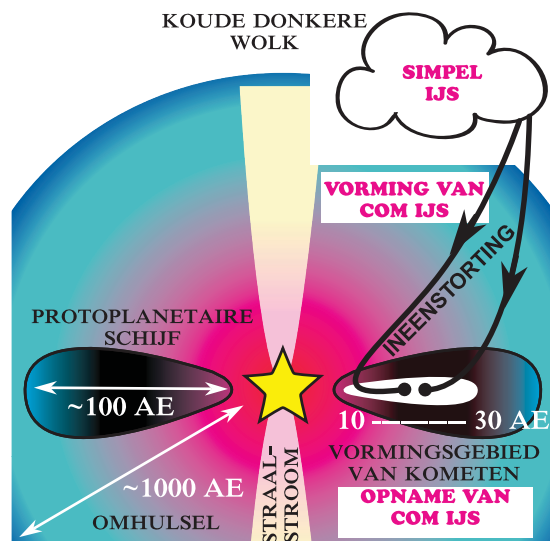


Figure .8: Een afbeelding die aangeeft hoe complexe organische moleculen vormen uit kleinere simpele moleculen in de wolken tijdens de ineenstorting van het systeem tot een ster en een protoplanetaire schijf. In de schijf zullen deze moleculen opgenomen worden in de bouwstenen voor kometen en planeten. 'COM' staat voor 'complex organisch molecuul'. 'AE' staat voor Astronomische Eenheid, wat gelijk is aan de gemiddelde afstand tussen de Aarde en de Zon.

In dit proefschrift staat de jongste fase van ster- en planeetvorming centraal. Het doel is om de oorsprong van op kometen aanwezige complexe organische moleculen te vinden. De grote motivatie is het begrijpen van ons interstellair erfgoed. Drie hoofdstukken van dit proefschrift hebben betrekking op fysico-chemische modellen van deze eerste fase van de vorming van een jong ster-schijf systeem. Het laatste hoofdstuk gaat over ALMA-waarnemingen van zo'n systeem, IRAS 16293-2422, en de zwavelhoudende moleculen daarin.

In hoofdstuk 2 wordt aangetoond dat methanol, één van de belangrijkste bouwstenen voor andere complexe organische moleculen, niet direct vanuit de donkere wolk fase naar de protoplanetaire schijf getransporteerd wordt. Onderweg naar de schijf wordt meer methanol gemaakt, maar uiteindelijk ook vernietigd, wat uiteindelijk leidt tot minder methanol in de schijf dan in de wolk aanwezig was. In hoofdstuk 3 tonen modellen aan dat verschillende complexe organische moleculen worden geproduceerd in het ijs dat zich in een ringvormig gebied rond een jonge ster bevindt, en in het gas langs de holte gemaakt door de bipolaire straalstromen. In hoofdstuk 4 wordt de volledige ijssamenstelling in protoplanetaire schijven geanalyseerd, die belangrijk is voor het opbouw van grotere lichamen zoals kometen. De modellen laten zien dat er meer kooldioxide ijs en complexe organische ijzen kunnen ontstaan in de schijf dan in de wolk, dankzij de ineenstorting van het systeem en de chemische evolutie gedurende die tijd. Het laatste hoofdstuk maakt een vergelijking tussen de aanwezige zwavelhoudende moleculen in 67P, als gedetecteerd door *Rosetta*, en een jonge protoster op de schaal van ons eigen

zonnestelsel. De chemische verschillen zouden kunnen betekenen dat ons zonnestelsel gevormd is in een warmer gebied dan meestal wordt aangenomen. Alles tezamen is dit een poging om de chemische link tussen wolken, schijven en kometen te kwantificeren. *De hoofdconclusie van dit proefschrift is dat het onvermijdelijk is dat een jong zonnestelsel geboren wordt met de complexe organische bouwstenen voor leven.*

#### VOORUITBLIK

Verder onderzoek van de auteur zal zich richten op de latere stadia in de evolutie van schijf tot kometen en planeten. De modellen zullen aangepast worden zodat ze beter te vergelijken zijn met ons jonge zonnestelsel, en het chemische netwerk zal uitgebreid worden met de nieuwe moleculen die *Rosetta* op 67P ontdekt heeft. Dit onderzoek zal verricht worden aan het Center for Space and Habitability (CSH) aan de Universiteit van Bern.