



**Universiteit  
Leiden**  
The Netherlands

## **From clouds to comets: tracing the molecular journey of interstellar ices in the JWST era**

Slavičinská, K.

### **Citation**

Slavičinská, K. (2026, June 10). *From clouds to comets: tracing the molecular journey of interstellar ices in the JWST era*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4305137>

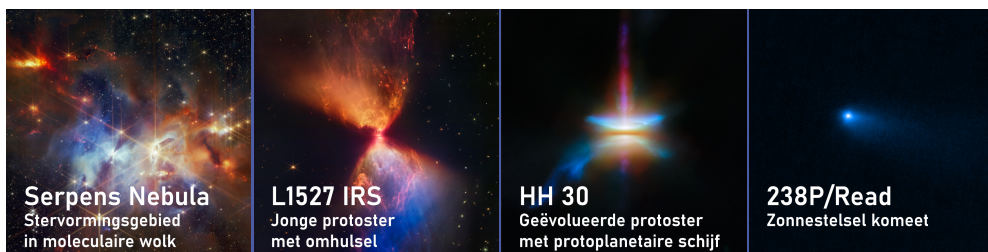
Version: Publisher's Version

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4305137>

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

# Nederlandse samenvatting



**Figuur 1:** Vier kosmische objecten die verschillende stadia van de ster- en planeetvormingsvolg-orde vertegenwoordigen, vastgelegd met de *James Webb* Space Telescope (JWST). Al hun spectra duiden op een chemische samenstelling rijk aan vluchtige ijzen. Credits: NASA/ESA/CSA/STScI en, van links naar rechts, 1. Klaus Pontoppidan (NASA-JPL)/Joel Green (STScI). 2. Joseph DePasquale (STScI)/Alyssa Pagan (STScI)/Anton Koekemoer (STScI). 3. Ryo Tazaki et al. 4. Mike Kelley/Henry Hsieh (PSI)/Alyssa Pagan (STScI).

Diep in het verre interstellair medium worden wolken van gas en microscopische stofdeeltjes door fysische processen gevormd tot pilaren, bolwolken en filamenten. De dichtste gebieden van deze wolken zijn grotendeels afgeschermd van de omringende interstellair straling, wat uitzonderlijk koude en donkere omstandigheden creëert die, wellicht contra-intuïtief, ideaal zijn voor chemische reacties. De afkoeling van de stofdeeltjes binnen deze wolken verandert ze in katalytische oppervlakken – gasdeeltjes hechten zich eraan en reageren vervolgens met elkaar om een overvloed aan vluchtige prebiotische moleculen te vormen in de vorm van ijslagen die bovenop de stofdeeltjes groeien.

Het meest abundante molecuul is water, dat bijzonder efficiënt wordt geproduceerd onder dergelijke donkere en stoffige omstandigheden. Er worden echter ook een verscheidenheid aan andere moleculen zoals methanol, formaldehyde en ammoniumzouten in deze ijzen gevonden. Uiteindelijk kan de stofwolk onder invloed van de zwaartekracht ineensinken, waardoor er in het centrum een protoster kan beginnen te vormen. De ijzige stofdeeltjes uit de wolk – nu verrijkt met vluchtige stoffen – voeden vervolgens de groeiende ster en de omliggende protoplanetaire schijf, waar de planeten worden gevormd. Op deze manier worden de ijzen uit interstellair stofwolken één van de primaire ingrediënten van planetaire systemen en dienen ze als een belangrijke bron van biogene vluchtige stoffen tijdens de planeetvorming.

Het werk gepresenteerd in dit proefschrift onderzoekt 1) de chemie die plaatsvindt in interstellair ijs tijdens deze vroegste stadia van ster- en planeetvorming, en 2) hoe die chemie de basis legt voor de vorming van zonnestelsels zoals het onze en de distributie van vluchtige stoffen daarin. Om dit te doen, maakt het gebruik van infrarood (IR) spectroscopie in een gecombineerde experimentele en observationele benadering, waarbij gegevens verzameld in aardse laboratoria die interstellair omstandigheden simuleren, worden gebruikt om interstellair spectra te analyseren die zijn waargenomen door state-of-the-art IR-faciliteiten zoals de *James Webb* Space Telescope (JWST) en zijn voorgangers. De studies richten zich grotendeels op moleculen die zijn gedetecteerd in primitieve kleine objecten in ons zonnestelsel – met name kometen – om de chemische link tussen het interstellair medium en planetaire systemen te bepalen.

## Ijschemie tijdens ster- en planeetvorming

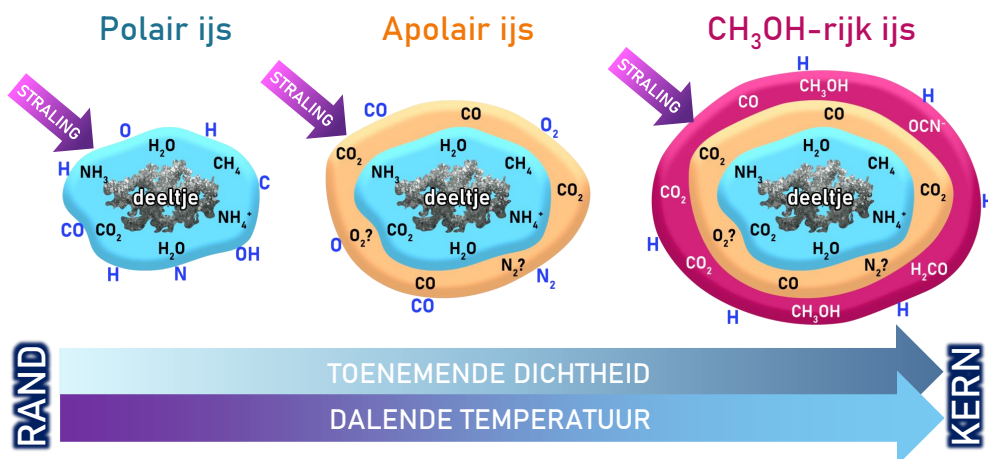
De chemische inventaris van het interstellair medium (ISM) bestaat voornamelijk uit waterstof en enkele heliumatomen die kort na de oerknal zijn gevormd. Zwaardere elementen worden door kernfusie in het inwendige van sterren gevormd. Uitstromen van exploderende stervende sterren leveren dan minuscule hoeveelheden van zwaardere elementen zoals koolstof, stikstof, zuurstof, zwavel en silicium in de vorm van atomen, ionen en microscopische korrels van zeer stralingsbestendige moleculen zoals polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) en silicaatmineralen.

Deze stofdeeltjes beschermen, absorberen en verstrooien interstellair straling en catalyseren reacties op hun oppervlakken, waardoor hun omgeving afkoelt en chemische reacties mogelijk worden. In de dichtste gebieden van interstellair wolken kunnen temperaturen zo laag zijn als 10 K (-263.15°C). Bij deze temperaturen vormen de gasvormige atomen en moleculen die aan de stofdeeltjes blijven kleven ijslaagjes. De grote overvloed en mobiliteit van waterstofatomen op de oppervlakken van deze deeltjes leidt tot de vorming van gereduceerde verbindingen zoals  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  en  $\text{NH}_3$ , waarbij water verreweg het meest abundant is. Verbindingen die in chemisch opzicht een zuur zijn, kunnen reageren met een base zoals  $\text{NH}_3$  om ammoniumzouten te vormen, zoals  $\text{NH}_4\text{SH}$  en  $\text{NH}_4\text{OCN}$ . Organische moleculen zoals  $\text{H}_2\text{CO}$  en  $\text{CH}_3\text{OH}$  kunnen ook ontstaan via de hydrogenering van CO dat vanuit de gasfase op de stofdeeltjes uitvriest. Tijdens de evolutie van de wolk domineren verschillende verbindingen de ijschemie in verschillende stadia en op verschillende locaties in de wolk, wat resulteert in een chemische gelaagdheid (Fig. 2). Namelijk, ijslagen rijk aan water worden grotendeels geproduceerd in vroege, minder dichte stadia van de wolk, terwijl ijslagen rijk aan CO en de daarvan gemaakte producten, zoals  $\text{CH}_3\text{OH}$ , worden gemaakt in de latere, dichtere stadia.

Als een moleculaire wolk voldoende massief en dicht is, kan het ineensinken door gravitationele instabiliteiten en turbulentie, wat resulteert in de vorming van een protostellair kern. De ontluikende protoster volgt een evolutionaire reeks die eindigt in de vorming van een ster en soms planeten. Eerst wordt de protoster gevoed door materiaal uit de moleculaire wolk, en wordt gravitationele potentiële energie omgezet in thermische energie, waardoor het omringende omhulsel van materiaal wordt verwarmd. Terwijl de protoster omringend materiaal uit het omhulsel blijft aantrekken, resulteert het behoud van impulsmoment in uitstromen van materiaal vanaf de polen van de bron. Ook wordt het binnenste gedeelte van het omhulsel afgeplat tot een *protoplanetaire schijf*. Materie binnen de schijf begint samen te klonteren tot grotere lichamen, wat het begin van planeetvorming markeert. Uiteindelijk raakt het materiaal in het omhulsel volledig uitgeput door uitstromen en accretie van materiaal op de jonge ster, waardoor alleen de schijf en een centrale pre-hoofdreeksster overblijven. Ten slotte raakt ook het schijfmateriaal uitgeput door winden en accretie, of door vorming van planetesimalen in de schijf.

IJzen uit de moleculaire wolk worden getransporteerd door het protostellair omhulsel en de schijf, waar ze kunnen worden omgezet door verschillende fysische processen (Fig. 3). Eén van de processen die het meest centraal staat in deze transformatie is de desorptie van ijsverbindingen naar de gasfase, die plaatsvinden bij zogenaamde moleculaire *sneeuwlijnen*: de grenzen die de gebieden definiëren waar de temperaturen in het omhulsel of de schijf warm genoeg worden om specifieke ijsverbindingen te sublimeren.

In de koudere delen van protostellair omhulsels en in de koude middenvlakken van protoplanetaire schijven, blijven de ijzen uit de moleculaire wolk grotendeels intact. Naarmate



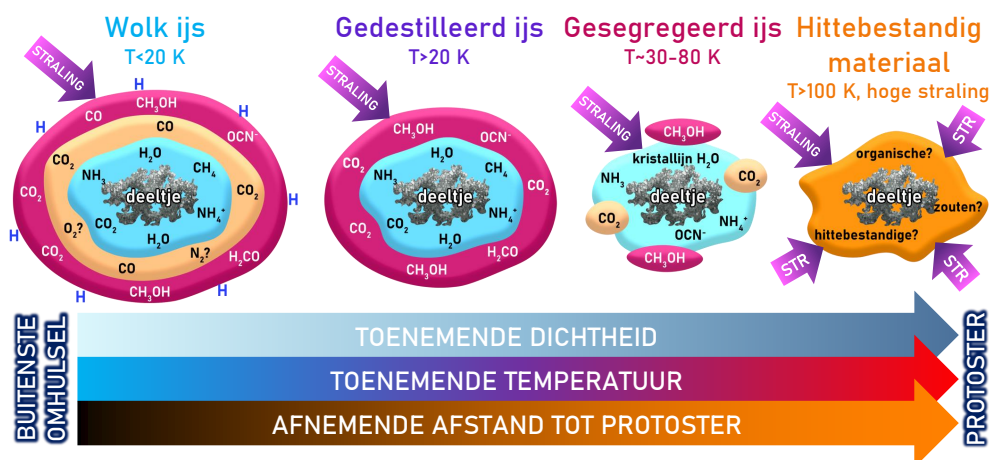
**Figuur 2:** Verschillende stadia van ijsgroei in moleculaire wolken. De eerste ijslagen groeien in de minder dichte, half-doorzichtige gebieden dicht bij de randen van de wolk, en bestaan uit  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  en gehydrogeneerde moleculen zoals  $\text{NH}_3$  en  $\text{CH}_4$ . Naarmate de dichtheid toeneemt, daalt de temperatuur, wat de groei van een apolaire ijslaag mogelijk maakt die wordt gedomineerd door  $\text{CO}$  en  $\text{CO}_2$ . In de dichtste gebieden wordt  $\text{CO}$  efficiënt gehydrogeneerd tot  $\text{CH}_3\text{OH}$ , wat resulteert in een  $\text{CH}_3\text{OH}$ -rijke laag die ook andere deeltjes bevat die uit  $\text{CO}$  zijn gevormd, zoals  $\text{CO}_2$ ,  $\text{OCS}$  en  $\text{OCN}^-$ .

de ijsen naar warmere gebieden bewegen, passeren ze moleculaire sneeuwlijnen in volgorde van afnemende vluchtigheid, waardoor de ijslagen effectief worden *gedestilleerd* terwijl verschillende ijsverbindingen sublimeren naar de gasfase, waar ze verder kunnen reageren met andere gassen. Voordat ze sublimeren, verhogen hogere temperaturen ook de mobiliteit van deeltjes binnen het ijs, wat leidt tot een herstructurering van de ijsmatrix. Daarnaast kan een verhoogde mobiliteit de snelheid verhogen van reacties waarbij zwaardere deeltjes betrokken zijn.

Sneeuwlijnen in protoplanetaire schijven zijn een sleutelfactor die gedeeltelijk de samenstelling van planetaire objecten bepaalt op basis van hun vormingslocatie binnen de schijf. Een bepaalde verbinding kan worden aangetrokken door planetesimalen die zich buiten de sneeuwlijn van die verbinding bevinden. Het startmateriaal dat uiteindelijk een planeet vormt, hangt dus af van waar dat lichaam zich in de protoplanetaire schijf bevindt ten opzichte van de sneeuwlijnen. Deze initiële chemische ordening wordt vervolgens gewijzigd door veranderingen in de sneeuwlijn tijdens de evolutie van de schijf, de dynamische verstrooiing van planetaire objecten naar verschillende schijfregio's, en de geologische, atmosferische en ruimtelijke verweringsprocessen die planetaire lichamen ondergaan.

Kleine objecten die in de buitenste delen van het zonnestelsel zijn gevormd, worden geacht de meest ongerepte samenstelling van vluchtige stoffen te bevatten die zijn overgeërfd van interstellair ijs: hun kleine omvang sluit aanzienlijke geologische of atmosferische verwerking uit, en hun vormingslocaties in het koude buitenste deel van het zonnestelsel stellen hen in staat om vluchtige stoffen na hun vorming te behouden. Kometen zijn hier een uitstekend voorbeeld van, en vergelijkingen tussen hun samenstelling aan vluchtige stoffen en die van interstellair ijs en protostellair gas hebben enkele opvallende overeenkomsten





**Figuur 3:** Veranderingen in de ijschemie tijdens de evolutie van protostellare omhulsels en protoplanetaire schijven. In de koudste gebieden van het omhulsel en de schijf lijken de ijsstructuren op die van moleculaire wolken. Naarmate de ijzen naar warmere gebieden bewegen, sublimeren de meest vluchtige deeltjes naar de gasfase, waardoor het ijs wordt gedestilleerd. Nog hogere temperaturen drijven de segregatie van bepaalde moleculen binnen de ijsmatrix en de kristallisatie van de amorfe ijzen. Boven de 100 K zijn het merendeel van de vluchtige ijzen naar de gasfase gesublimeerd, waarbij meer hittebestendige deeltjes zoals zouten en grotere complexe organische stoffen op de stofdeeltjes achterblijven.

aan het licht gebracht. Echter, systematische verschillen tussen de chemische inventaris van kometen en die van het interstellair medium wijzen er ook op dat kometair materiaal tenminste een zekere mate van chemische bewerking heeft ondergaan binnen de protoplanetaire schijf.

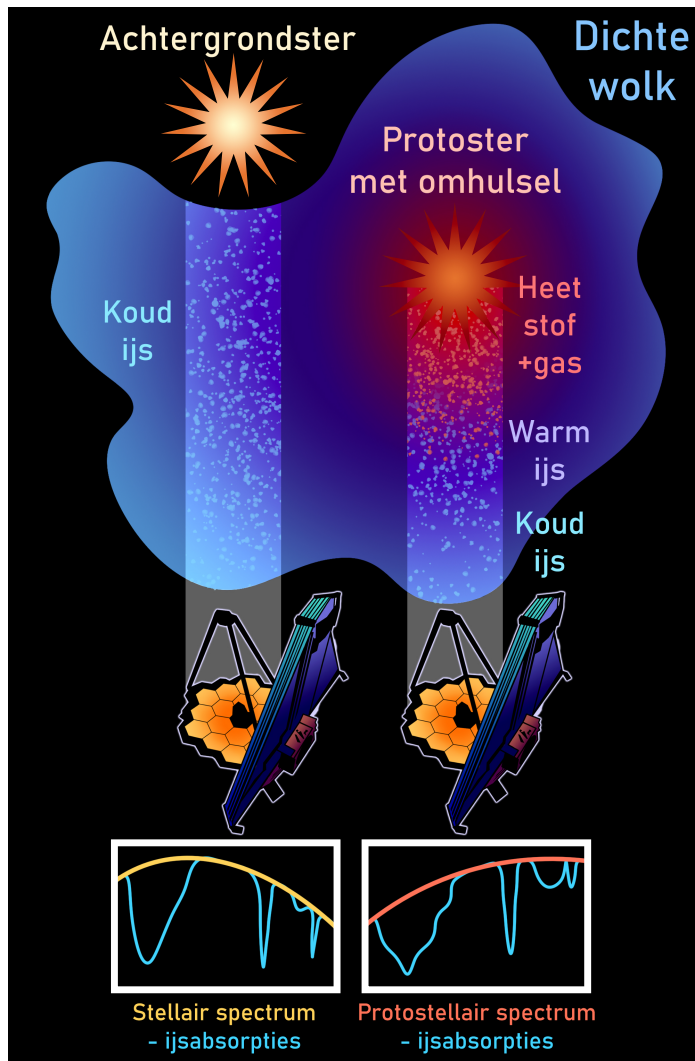
## Infraroodspectroscopie van ijzen

Moleculen absorberen of zenden licht uit door overgangen tussen hun gekwantiseerde energietoestanden. Moleculen in de ruimte kunnen worden geïdentificeerd en gekwantificeerd door hun unieke emissie- of absorptiekenmerken in waargenomen spectra. De ijschemie die in dit proefschrift wordt beschreven, wordt onthuld met behulp van absorptiekenmerken op infrarode (IR) golflengten, geassocieerd met vibratie-overgangen.

De posities, vorm en intensiteiten van de IR-absorptiebanden die worden waargenomen in interstellaire gebieden bevatten informatie over de chemische identiteit, de hoeveelheden en de fysische en chemische omgevingen van interstellair ijs. Het extraheren van deze informatie vereist een geïntegreerde aanpak waarbij waarnemingen worden vergeleken met modellen die gebruikmaken van laboratoriumgegevens.

## Observationele methoden

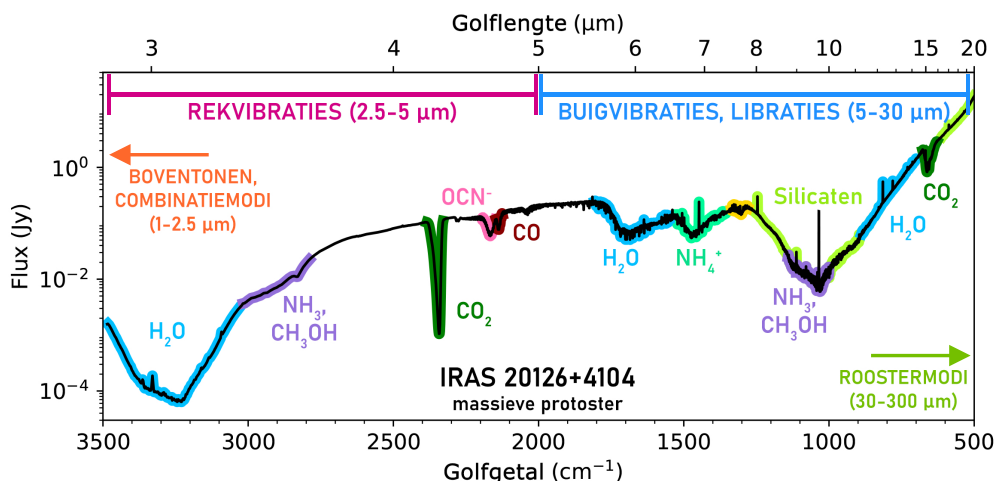
Fig. 4 geeft een schema weer van de geometrie die wordt gebruikt om interstellair ijspectra waar te nemen. De telescoop wordt gericht op een IR-lichtbron, hetgeen een achtergrondster



**Figuur 4:** Schema hoe telescopen de absorptiekenmerken van interstellaire ijzen in dichte wolken en protostellaire omhulsels waarnemen. De ijzen worden waargenomen langs een smalle lichtbundel (“pencil beam”) die het pad volgt van een IR-lichtbron (hetzij een achtergrondster hetzij een protoster) naar de telescoop.

kan zijn die zich achter een interstellaire wolk bevindt, of een protoster die in de wolk is ingebed. Deeltjes die zich langs de gezichtslijn van de lichtbron naar de telescoop bevinden, worden vervolgens waargenomen tegen het (proto)stellaire continuüm. Een groot deel van de waarnemingen die in dit proefschrift zijn gebruikt, is verzameld met de James Webb Space Telescope (JWST), die een superieure gevoeligheid, golflengtebereik en spectrale en ruimtelijke resolutie heeft in vergelijking met de meeste eerdere IR-telescopen. Een voorbeeld van

een JWST-spectrum van interstellair ijs waargenomen bij een protoster is gepresenteerd in Fig. 5.



**Figuur 5:** Voorbeeld van een IR-spectrum van een massieve protoster (IRAS 20126+4104) dat absorptiekenmerken van interstellair ijs en stof laat zien gesuperponeerd op het protostellare continuüm.

Een specifiek molecuul kan worden geïdentificeerd of “toegewezen” als de karakteristieke IR-kenmerken ervan, bepaald via gecontroleerde laboratoriumexperimenten of theoretische kwantummechanische berekeningen, worden waargenomen. Toewijzingen kunnen worden vastgesteld door te vergelijken hoe nauwkeurig de waargenomen piekvormen en golflengten overeenkomen met die in laboratoriumgegevens. Eenmaal toegewezen kan een IR-piek worden gebruikt om moleculen langs een gezichtslijn te kwantificeren. Bovendien kunnen piekvormen worden gebruikt om de fysische en chemische eigenschappen van hun ijsdragers af te leiden.

## Laboratoriummethoden

Laboratoriummetingen leveren experimentele gegevens die essentieel zijn voor het interpreteren van ijswaarnemingen. In dergelijke experimenten worden interstellair ijsanalogen uitgevoren op een cryogeen gekoeld substraat in een ultrahoge vacuümkamer met typische drukken in de orde van  $\leq 10^{-8}$ - $10^{-10}$  mbar (tot biljoenen malen lager dan de standaard atmosferische druk op aarde). Dit in het lab gemaakte ijs is een fysische benadering van de ijslagen bovenop interstellair stofdeeltjes. Vervolgens worden laboratorium-IR-spectra van deze ijsen verzameld, die in sommige gevallen direct kunnen worden vergeleken met ijswaarnemingen om de moleculen te identificeren. Ook kunnen de bandsterktes van specifieke ijsen worden gemeten, die kunnen worden gebruikt om de hoeveelheid waargenomen ijsdeeltjes te kwantificeren. Het laboratoriumwerk dat in dit proefschrift wordt gepresenteerd, is uitgevoerd op de Infrared Absorption Set-up for Ice Spectroscopy (IRASIS) in het Laboratorium voor Astrofysica in Leiden.

## Overzicht van het proefschrift

Infraroodspectroscopie heeft laten zien dat interstellaire stofdeeltjes een rijke ijschemie hebben, die aan de basis ligt van de vorming en het transport van vluchtige stoffen in planetaire systemen. Echter, een aantal vragen over deze chemie bleven onbeantwoord toen dit promotieonderzoek begon: *In welke mate wordt interstellair ijs overgeërfd versus chemisch omgevormd in protostellaire omhulsels en protoplanetaire schijven voordat het opgenomen wordt in planetaire objecten? Welke deeltjes zijn de belangrijkste reservoirs voor zwavel in de dichtste stadia van stervorming? Welke van de vele complexe organische moleculen die in de gasfase bij protosterren zijn gedetecteerd, kunnen ook in ijzen worden gevonden, en wat vertelt dat ons over hun ontstaansgeschiedenis?* De hoofdstukken in dit proefschrift behandelen deze vragen.

**Hoofdstuk 2:** Dit werk presenteert de eerste robuuste detecties van de O-D strekkingsvibratie van HDO-ijs bij  $4,1\ \mu\text{m}$  met JWST. Vervolgens wordt een methode gepresenteerd voor het kwantificeren van ijs-HDO/H<sub>2</sub>O-verhoudingen bij protosterren, en wordt de verhouding bepaald voor twee massieve protosterren die met JWST zijn waargenomen. Voor deze twee bronnen worden ijs-HDO/H<sub>2</sub>O-verhoudingen van  $4,6 \pm 1,8 \times 10^{-3}$  en  $2,6 \pm 1,2 \times 10^{-3}$  verkregen. Deze verhoudingen zijn vergelijkbaar met de hoogste gerapporteerde gas-HDO/H<sub>2</sub>O-verhoudingen gemeten bij massieve protosterren en bij geïsoleerde protosterren met een lage massa, wat suggereert dat ten minste een deel van de gas-HDO/H<sub>2</sub>O-verhoudingen gemeten bij massieve hete kernen representatief is voor die in ijzen.

**Hoofdstuk 3:** Dit werk presenteert de eerste detectie van de  $4,1\ \mu\text{m}$  HDO-ijsband met JWST bij een zonsachtige protoster met een lage massa, L1527 IRS. De in Hoofdstuk 2 ontwikkelde methode wordt gebruikt om een ijs-HDO/H<sub>2</sub>O-verhouding van  $4,4^{+3,7}_{-1,7} \times 10^{-3}$  te meten, vergelijkbaar met de gas-HDO/H<sub>2</sub>O-verhoudingen gemeten in de warme kernen van andere geïsoleerde lage massa protostellaire omhulsels en protoplanetaire schijven. Een dergelijke gelijkenis ondersteunt voorzichtig de aanname dat waterdamp gedetecteerd in deze gebieden niet significant wordt gewijzigd door gasfasereacties na ijssublimatie. Het ondersteunt ook de hypothese dat pre- en protostellair waterijs grotendeels in een chemisch ongewijzigde staat wordt overgeërfd door de buitenste delen van protoplanetaire schijven. Echter, de fractie is een factor  $\sim 4$ - $10$  hoger dan de gas-HDO/H<sub>2</sub>O-verhoudingen gemeten bij kometen en lage massa protosterren in stervormingsgebieden met een cluster van sterren. Wellicht komt dit door het opnieuw verwerken van water in de gasfase in de protostellaire fase en protoplanetaire schijven of door verschillen tussen de koude prestellaire condities van geïsoleerde dichte wolken en de warmere geclusterde stervormingsgebieden die meer analoog zijn aan de omgeving waarin onze zon is gevormd.

**Hoofdstuk 4:** Laboratorium-IR-spectra en bandsterktes van ijzen die NH<sub>4</sub>SH-zout bevatten zijn verzameld om spectroscopisch te onderzoeken of NH<sub>4</sub>SH een zwavelreservoir kan zijn en ook de drager van de  $6,85\ \mu\text{m}$ -band in interstellaire ijzen. De laboratorium-IR-spectra zijn vergeleken met die van vier protosterren en twee dichte wolken. De waargenomen  $6,85\ \mu\text{m}$ -band wordt goed gefit met laboratoriumspectra van NH<sub>4</sub>SH:H<sub>2</sub>O-ijs, en de fits leveren NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-kolomdichtheden op die variëren van 8–23% ten opzichte van H<sub>2</sub>O. De bandsterkte van de SH<sup>−</sup>-band is waarschijnlijk te laag om detecteerbaar te zijn, maar de  $5,3\ \mu\text{m}$  NH<sub>4</sub>SH combinatiemode zou een alternatieve manier van detectie kunnen zijn. De voorzichtige toewij-

zing hiervan ondersteunt de aanwezigheid van  $\text{NH}_4^+$ -zouten in ijzen en is de eerste mogelijke waarneming van het  $\text{SH}^-$ -anion in interstellair ijzen. Als het merendeel ( $\gtrsim 80\text{--}85\%$ ) van de gekwantificeerde  $\text{NH}_4^+$ -kationen gebonden is aan  $\text{SH}^-$ -anionen, dan zouden  $\text{NH}_4\text{SH}$ -zouten tot  $17\text{--}18\%$  van hun zwavelbudget kunnen verklaren.

**Hoofdstuk 5:** Dit hoofdstuk biedt een bibliotheek van nieuwe laboratorium-IR-spectra en bandsterktes van OCS in  $\text{CH}_3\text{OH}$ - en CO-rijke ijsmengsels, waarvan sommige ook  $\text{H}_2\text{S}$  en  $\text{H}_2\text{O}$  bevatten, om toekomstige studies naar de hoeveelheid, chemische omgeving en evolutionaire geschiedenis van interstellair OCS-ijs te ondersteunen. Van deze nieuwe laboratoriumspectra bieden tertiaire OCS:CO: $\text{CH}_3\text{OH}$ -ijsmengsels de beste fits aan waarnemingen van protosterren met een hoge massa, wat verder bewijs levert dat OCS samen met  $\text{CH}_3\text{OH}$  wordt gevormd, mogelijk via chemische routes waarbij CO betrokken is. Een massaspectrometrische kalibratiemethode voor het produceren van ijsmengsels met behulp van gassen en vloeistoffen met een hoge dampdruk wordt beschreven.

**Hoofdstuk 6:** Formamide is regelmatig als gas in interstellair gebieden gedetecteerd, maar of het zich in het ijs of in het gas vormt, is een onderwerp van significant debat. Dit hoofdstuk karakteriseert de IR-spectra en bandsterktes van puur en gemengd formamide in interstellair ijsanalogen. Drie formamidebanden zijn geïdentificeerd als potentiële indicatoren in observationele ijspectra. De laboratoriumspectra worden vergeleken met de  $7,24\text{ }\mu\text{m}$ -band in spectra van protosterren en prestellair kernen. Als formamide-ijs significant bijdraagt aan de waargenomen band, is dit waarschijnlijker in een water-rijke polaire ijsmatrix, maar andere moleculen zorgen voor betere fits en zijn waarschijnlijker de hoofddragers. Bovengrenzen variërend van  $0,35\text{--}5,1\%$  ten opzichte van  $\text{H}_2\text{O}$  werden berekend, wat in overeenstemming is met de hoeveelheid formamide in zowel de gasfase bij protosterren als in kometen.

## Conclusies en toekomstige richtingen

- HDO-ijs kan nu robuust gedetecteerd worden in stervormingsgebieden met JWST. Overeenkomsten tussen de D/H-verhoudingen van water in ijs en gas gemeten bij protosterren en de D/H-verhouding van watergas gemeten bij schijven suggereren dat interstellair ijs wordt overgeërfd van protostellair omhulsels naar protoplanetaire schijven.
- Vergelijkingen tussen D/H-waarden van water in protostellair ijzen en de coma van kometen suggereren ofwel een zekere mate van waterherverwerking in de gasfase in de protoplanetaire schijf, of een omgevingsgestuurde diversiteit in D/H-waarden van prestellair waterijs tussen verschillende stervormingsgebieden in ons sterrenstelsel.
- Tot  $\sim 20\%$  van het zwavel in dichte stervormingsgebieden kan opgesloten zitten in zouten zoals  $\text{NH}_4\text{SH}$ , wat mogelijk het decennialange raadsel oplost waarom  $\text{H}_2\text{S}$  niet wordt gedetecteerd in interstellair ijzen ondanks voorspellingen uit chemische modellen.
- Gezien hun hogere desorptietemperaturen ten opzichte van hun neutrale zuur-base tegenhangers, hebben zouten zoals  $\text{NH}_4\text{SH}$  mogelijk het transport van de vluchtige elementen N en S naar het binnenste deel van ons zonnestelsel vergemakkelijkt, waar ze

uiteindelijk opgenomen konden worden door lichamen die rijk zijn aan vluchtige verbindingen zoals koolstofhoudende planetoïden.

- Zelfs met JWST is het wellicht niet mogelijk om de absorptiekenmerken van veel van de minder abundante en minder vluchtige complexe organische moleculen zoals formamide ondubbelzinnig te detecteren, vanwege overlappende absorptiebanden van meer overvloedige en vluchtige organische stoffen.

Vooruitkijkend zal een grotere steekproef van ijs-water-D/H gemeten bij protosterren in verschillende omgevingen nodig zijn om de ijs-water-D/H-verhouding die door ons zonnestelsel is overgeërfd beter te begrijpen. Bovendien blijft een groot deel van het interstellair zwavel nog steeds vermist. Als het zich in mineralen of allotropen bevindt, zijn de kansen op directe detectie van dergelijke deeltjes niet veelbelovend. Maar waar deze ontbrekende zwavel zich ook bevindt, het is tijd voor een hernieuwd onderzoek naar zwavelijs met JWST-gegevens om eerdere beperkingen te herzien. De laboratoriumgegevens gepresenteerd in dit proefschrift maken dergelijke onderzoeken mogelijk. En tot slot: waarnemingen van gezichtslijnen met lage ijs-tot-stof-verhoudingen maar hoge stofkolommen (*d.w.z.* protostellair omhulsels die thermisch of energetisch sterk zijn beïnvloed) kan betere mogelijkheden bieden voor het identificeren van minder vluchtige ijsdeeltjes, waarvan de absorpties doorgaans worden overschaduwed door de sterke absorpties van meer abundante vluchtige stoffen.