



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Isotopes and the characterization of extrasolar planets

Zhang, Y.

### Citation

Zhang, Y. (2023, June 6). *Isotopes and the characterization of extrasolar planets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3619726>

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/1887/3619726>

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

# Nederlandse Samenvatting

Hoe zijn we ontstaan? Zijn we alleen? De oorsprong van het leven en onze plek in het universum zijn al lang een zoektocht van de mensheid. Pas drie decennia geleden begonnen astronomen met het bestuderen van exoplaneten, planeten buiten ons zonnestelsel. In 1995 werd de eerste exoplaneet rond een hoofdreeksster, 51 Pegasi b, ontdekt, wat leidde tot de ontwikkeling van de exoplanetenwetenschap. Sindsdien is het veld snel voortgeschreden met meer dan 5000 diverse exoplaneten die tot op heden zijn ontdekt. Deze ontdekkingen omvatten een populatie van dichtbijgelegen planeten bij hun gastheersterren, bekend als 'hete Jupiters', een klasse van jonge, massieve reuzenplaneten, genaamd 'super-Jupiters', en planeten met tussenliggende maten tussen de Aarde en de Neptunus, genaamd 'super-Aardes' en 'mini-Neptunussen'. De aanwezigheid van deze vreemde werelden zonder tegenhangers in het zonnestelsel stelt uitdagingen aan ons begrip van planeetvorming en -evolutie, maar opent ook spannende nieuwe vensters van begrip.

Met het snel groeiende aantal gedetecteerde exoplaneten betreden we een tijdperk van gedetailleerde karakterisering van hun eigenschappen. Observaties van exoplaneet atmosferen openen een essentiële weg naar verdere karakterisering buiten de dimensie van planeetmassa's en -groottes. De studie van exoplaneet atmosferen heeft als doel hun chemische samenstelling te onthullen, die een cruciale rol speelt bij het achterhalen van de vormingsgeschiedenis van planeten, het beoordelen van de bewoonbaarheid en het zoeken naar buitenaards leven. Dit kan worden bereikt door spectroscopische waarnemingen, waarbij licht wordt verspreid in verschillende golflengten (of kleuren). Aangezien verschillende soorten licht absorberen bij verschillende golflengten en unieke handtekeningen in de spectra veroorzaken, kunnen de chemische bestanddelen worden geïdentificeerd via spectroscopie.

De spectrale karakterisering van exoplaneet atmosferen profiteert van een hoge resolutie, die atomaire of moleculaire kenmerken oplost in individuele spectraallijnen, wat de ontwarring van verschillende soorten en zelfs isotopologen vergemakkelijkt. Bovendien bieden de positie en vorm van spectraallijnen een schat aan informatie over dynamische processen in de atmosfeer. Als zodanig stellen spectrale analyses ons in staat om thermische structuren, winden, wolken/nevels en atmosferische ontsnappingen van exoplaneten in kaart te brengen. Hoofdstuk 2 tot 5 van deze dissertatie onderzoeken de toepassing van hoge-resolutie-spectroscopie bij het bestuderen van de atmosferen van gasreuzen-exoplaneten.

In de zoektocht naar de vorming van gasreuzen blijven er fundamentele vragen onbeantwoord, ondanks de drie belangrijkste voorgestelde scenario's, namelijk kerngroei, gravitationele instabiliteit en wolkfragmentatie. Het verbinden van atmosferische samenstelling met planeetvorming is een van de meest uitdagende fronten van de planetenwetenschap. De verhoudingen van elementaire overvloed in de atmosfeer, zoals de koolstof-tot-zuurstof (C/O) en stikstof-tot-koolstof (N/C) ratio's, zouden belangrijke aanwijzingen moeten bieden. Naarmate de temperatuur afneemt in protoplanetaire schijven met de af-

stand tot de centrale ster, bevrozen moleculen op stofdeeltjes en worden ze verwijderd van de gasfase naar de vaste fase, wat de elementaire overvloedverhoudingen in de gas- en vaste reservoirs verandert. Planeten die op verschillende locaties worden gevormd met betrekking tot moleculaire ijslijnen en/of verschillende hoeveelheden vaste stoffen opnemen, zullen naar verwachting verschillende chemische overvloedverhoudingen in hun atmosferen vertonen, wat implicaties heeft voor vormingswegen, geboorteplaatsen en de relatieve bijdragen van gas versus vaste-stofaccrétie. Evenzo worden isotoopverhoudingen, zoals D/H en  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ , voorgesteld als krachtige tracers voor de vormings- en evolutiegeschiedenis van planeten. Met state-of-the-art faciliteiten en technieken wordt het haalbaar om meerdere observationele probes te combineren om de subtiliteiten van planeetvormingsprocessen te ontrafelen. Dit wordt met name onderzocht in hoofdstuk 2 en 3.

### **Hoofdstuk 2: Eerste detectie van het lichte isotopoloog $^{13}\text{CO}$ in een exoplaneet**

Isotopen in planetaire atmosferen kunnen onthullen hoe planeten zijn gevormd. Dit idee is geïnspireerd door metingen van isotopenverhoudingen, zoals de deuterium-tot-waterstofverhouding, in ons eigen zonnestelsel. Deze verhoudingen verschillen aanzienlijk tussen verschillende planeten en zijn waarschijnlijk verbonden met de isotoopverhoudingen in protoplanetaire schijven. Deze verhoudingen worden beïnvloed door temperatuur- en stralingsafhankelijke processen die fractionatie worden genoemd. Door isotopen in exoplaneetatmosferen te detecteren en te analyseren, kunnen we bepalen waar de planeet is gevormd, hoeveel gas en vaste stoffen hebben bijgedragen aan de vorming ervan, en hoeveel atmosferisch verlies het heeft ondergaan (aangezien zware isotopen minder vatbaar zijn om te ontsnappen uit atmosferen).

Dit hoofdstuk presenteert de eerste detectie van het lichte isotopoloog van koolmonoxide  $^{13}\text{CO}$  in de atmosfeer van een super-Jupiter genaamd YSES-1b, met behulp van de nabij-infrarood integraalveldspectrograaf SINFONI op de VLT. Dit markeert de eerste keer dat isotopenmetingen zijn uitgebreid naar exoplaneten. Door modellering van planetaire atmosferen en Bayesiaanse ophalingsanalyses hebben we de koolstofisotoopverhouding in de planetaire atmosfeer bepaald op  $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO} \sim 31$ , wat betekent dat er een factor van twee versterking van  $^{13}\text{C}$  is vergeleken met het lokale interstellair medium ( $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \sim 68$ ). Dit resultaat suggereert dat de planeet waarschijnlijk buiten de CO-ijslijn is gevormd en hoofdzakelijk koolstof heeft verworven door accretie van  $^{13}\text{C}$ -verrijkte ijsdeeltjes. Dit opent een spannende nieuwe weg om atmosferische kenmerken te verbinden met de vorming van planeten.

### **Hoofdstuk 3: Eerste detectie van het lichte isotopoloog $^{13}\text{CO}$ in een bruine dwerg**

Na de detectie van  $^{13}\text{CO}$  in de exoplaneet YSES-1b hebben we onze methode uitgebreid naar een exoplaneet-analoog genaamd 2M0355, een jonge, geïsoleerde bruine dwerg met vergelijkbare massa en effectieve temperatuur als de super-Jupiter-begleider. Interessant genoeg toonde deze studie geen verrijking van  $^{13}\text{CO}$  in de bruine dwerg op basis van archiefwaarnemingen die waren genomen met de hoogwaardige spectrograaf NIRSPEC op de Keck-sterrenwacht. De koolstofisotoopverhouding in de bruine dwerg ( $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO} \sim 100$ ) staat in schril contrast met die in de exoplaneet en duidt op verschillende vormingsprocessen. Om dit benchmarkobject verder te onderzoeken, hebben we vervolgwarnemingen

van deze bruine dwerg uitgevoerd met behulp van de vernieuwde state-of-the-art spectrograaf CRIRES aan de VLT en waren we in staat de beperking op de koolstofisotoopverhouding te bevestigen. Bovendien stellen we voor dat de zuurstofisotoopverhouding ( $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ) nu kan worden bestudeerd in heldere super-Jupiters en bruine dwergen met behulp van hoogwaardige spectroscopie. Het vergelijken van de atmosferische samenstellingen van reuzen-exoplaneten en bruine dwergen speelt een belangrijke rol bij het ontrafelen van hun onderscheidende vormingspaden.

#### **Hoofdstuk 4: Zoeken naar He I airglow emissie van een hete Jupiter**

Gasreuzen die zich zeer dicht bij hun moedersterren bevinden, kunnen aanzienlijke atmosferische erosie ondergaan als gevolg van de intense hoogenergetische straling van hun sterren. Dit proces is vooral relevant voor planeten die kleiner zijn dan Neptunus en drijft de evolutie van hun atmosferen aan. Een krachtige manier om atmosferische ontsnapping in deze planeten te bestuderen, is door te kijken naar de absorptie van heliumatomen in hun atmosferen, wat met succes is gedetecteerd in een dozijn exoplaneet-atmosferen tijdens overgangen. De heliumabsorptie is echter niet doorslaggevend om het atmosferische massaverlies op zichzelf te bepalen, omdat het moeilijk is om de effecten van atmosferische ontsnapping van de exosferische temperatuur te scheiden met alleen heliumabsorptie. Om dit probleem op te lossen, hebben we ons gericht op het zoeken naar helium-airglow-emissie om deze te combineren met de absorptie om de bovenste atmosferen beter te beperken. We hebben deze zoektocht uitgevoerd bij de niet-transiterende hete Jupiter  $\tau$  Bootis b met behulp van de nabij-infrarood-spectrograaf CARMENES op het Calar Alto Observatorium. Hoewel dit leidde tot een niet-detectie, biedt onze studie belangrijke informatie over de detectielimieten van helium-airglow-emissie in exoplaneten, en we geloven dat telescopen van de volgende generatie in staat zullen zijn om deze emissie te meten. Het detecteren van helium-airglow-emissie zal cruciaal zijn bij het bestuderen van de atmosferische structuur, massaverliespercentages en bulk-atmosferische evolutie van gasreuzen die zeer dicht bij hun moedersterren staan.

#### **Hoofdstuk 5: Ontwarren van hydrostatische en exosferische regimes van ultra-hete Jupiters**

De krachtige hoogenergetische straling van nabije hete Jupiters resulteert in twee verschillende atmosferische regimes: de hydrostatische onderste atmosfeer en de hydrodynamische exosfeer. Om de dynamiek van deze regio's te begrijpen, zijn metingen van verschillende atomen of moleculen nodig. In dit hoofdstuk karakteriseren we de atmosfeer van de ultra-hete Jupiter MASCARA-4b, met een evenwichtstemperatuur van meer dan 2000 K, door gebruik te maken van transmissiespectroscopische waarnemingen met de hoogoplossende optische spectrograaf ESPRESSO op de VLT. Onze metingen detecteren verschillende absorberende soorten, waaronder H I, Na I, Fe I en Fe II in de planetaire atmosfeer. Om onze resultaten in context te plaatsen, vergelijken we onze bevindingen met die van zeven andere ultra-hete Jupiters en onderzoeken we de trend van deze atomaire absorptiesterktes. We ontdekken dat neutrale metaalsoorten het hydrostatische regime traceren, terwijl waterstof en geïoniseerde metalen de hydrodynamische exosfeer en atmosferische ontsnapping onderzoeken. Deze vergelijking stelt ons in staat om de eerste stap te zetten naar de analyse van hoogoplossende spectroscopische resultaten op

populatie-niveau, waardoor het mogelijk wordt om verschillende dynamische regimes van hoog-geïrriteerde atmosferen te onderscheiden.

### **Hoofdstuk 6: Diverse uitkomsten van interacties tussen dubbelsterren en schijven**

Om inzicht te krijgen in de vorming van planeten is het begrijpen van circumstellaire schijven, de geboorteplaats van planeten, nodig. Aangezien ongeveer de helft van de sterren van het zonnetype in meervoudige stersystemen worden geboren, kan de aanwezigheid van stellaire metgezellen de morfologie en evolutie van de schijven wijzigen en mogelijk de uitkomsten van planeetvorming beïnvloeden. In dit hoofdstuk hebben we gepolariseerde differentiële beeldvorming gebruikt met SPHERE/IRDIS op de VLT om circumstellaire schijven in drie meervoudige systemen op te lossen: CHX 22, S CrA, en HP Cha, als onderdeel van het grote programma Disk Evolution Study Through Imaging of Nearby Young Stars (DESTINYs). De waargenomen schijfmorfologie, in combinatie met astrometrische en baananalyses voor de stellaire metgezellen, maakt het mogelijk om een beter begrip te krijgen van de wisselwerking tussen schijven en metgezellen. De vergelijking van de drie systemen beslaat een breed scala aan binaire scheidingen (50 – 500 au) en illustreert de afnemende invloed van metgezellen op schijfstructuren bij toenemende scheiding. Deze bevinding is consistent met de statistische analyse van exoplaneetpopulaties in binaire systemen, die suggereert dat planeetvorming waarschijnlijk wordt belemmerd in nauwe binaire systemen, terwijl het niet wordt onderdrukt in wijdverspreide binaire systemen.

### **Uitzicht: de oorsprong van planeten ontrafelen**

Om de oorsprong van exoplaneten beter te begrijpen en de karakterisering van exoplaneet atmosferen uit te breiden tot een grotere steekproef, is vooruitkijken een belangrijke stap. Door het gebruik van formatietracers zoals elementaire en isotopische samenstellingen uit nabij-infrarood hoge-resolutie spectra, kunnen we populatie-niveau-analyses van jonge gasreuzen en bruine dwergen uitvoeren en verschillende klassen van sub-stellaire objecten vergelijken om zo vragen te beantwoorden. Dit stelt ons in staat om trends in atmosferische bestanddelen te verkennen met stellaire en planetaire eigenschappen, zoals massa en orbitale scheiding, en de plausibiliteit van verschillende formatiescenario's te beoordelen. Het bepalen van de chemische samenstelling kan bijdragen aan het overbruggen van de kloof tussen atmosferische waarnemingen en planeetvorming en -evolutie. Op deze manier kunnen we de fundamentele vraag beantwoorden wat de grens tussen planeten en bruine dwergen bepaalt.

Kijkend naar de toekomst zullen de komende dertig-meter klasse telescopen, zoals de Extremely Large Telescope (ELT), met het verwachte eerste licht binnen vijf jaar, en de volgende generatie vlaggenschip ruimtetelescopen, routinematig karakterisering kunnen leveren van kleinere exoplaneten. Hierdoor is het mogelijk om hun atmosferische biosignalen en bewoonbaarheid te onderzoeken. De ELT zal bijzonder veelbelovend zijn voor het onderzoeken van zeldzame isotopen, zoals deuterium, in exoplaneten. Dit is namelijk een van de meest informatieve tracers voor planeetvorming en atmosferische evolutie. Met deze ontwikkelingen hopen we de ultieme vragen te kunnen beantwoorden over de uniciteit van ons zonnestelsel en hoe we hier zijn gekomen.