

Vormende sterren door de infrarood-ogen van de James Webb-ruimtetelescoop

De James Webb-ruimtetelescoop is de grootste en geavanceerdste ruimte telescoop die ooit is gebouwd. Deze telescoop is een cruciale stap voorwaarts voor astronomische waarnemingen. Met zijn infrarode ogen kan Webb perfect naar stervormingsgebieden kijken en zo de fysica en chemie rond jonge protosterren in detail bekijken.

Waarom een ruimtetelescoop?

Op 25 december 2021 was het eindelijk zo ver: na decennia van ontwikkelen werd de James Webb-ruimtetelescoop gelanceerd. Het is de grootste ruimtetelescoop ooit gebouwd. De spiegel is 6,5 meter in diameter en het zonnescild is nog veel groter: 21 bij 14 meter, ongeveer de grootte van een tennisveld. Webb kijkt de ruimte op basis van infraroodgolflengten tussen 0,6 en 25 micrometer. Dat is licht dat we met onze eigen ogen niet kunnen zien maar wel kunnen voelen als warmtestraling. Waarnemingen van infraroodlicht zijn daardoor onder andere uitstekend om de warme gebieden van de ruimte te bestuderen waar de temperatuur tussen een paar honderd en een paar duizend Kelvin ligt.

Voor astronomische waarnemingen van infraroodlicht vanaf de aarde is er echter een groot probleem: onze atmosfeer blokkeert het grootste deel van het spectrum vanwege selectieve absorptie door moleculen zoals zuurstof (O_2), koolstofdioxide (CO_2) en water (H_2O). Hierdoor missen we grote delen van het spectrum van infraroodlicht dat de aarde bereikt. Er bestaan wel enkele telescopen op de Aarde die op bepaalde infraroodgolflengten kunnen waarnemen, maar deze missen altijd bepaalde cruciale golflengten. De beste oplossing hiervoor is daarom om een telescoop buiten onze atmosfeer te plaatsen.

Stervorming in een notendop

Sterren worden geboren uit grote moleculaire wolken, voornamelijk bestaande uit waterstofgas (H_2) van enkele tot honderden lichtjaren in

diameter. De dichtstbijzijnde stervormingsgebieden liggen op zo'n zeshonderd lichtjaar van de aarde, maar nieuwe sterren worden door de gehele Melkweg geboren. Naast het gas bestaat ongeveer 1% van de totale massa van de wolk uit kleine stofkorrels (onder andere bestaande uit silicaten en ijzeroxiden) van minder dan 0,1 micrometer in grootte. De wolk zelf staat niet stil, maar roteert heel langzaam. Onder zijn eigen zwaartekracht begint de moleculaire gaswolk ineen te storten. In het centrum begint zich een zogeheten protoster te vormen. Door het behoud van draaimoment vormt zich rondom deze jonge protoster een schijf van het naar binnen vallende gas en stof. Op hun beurt beginnen er in deze schijf planeten te vormen. Niet al het materiaal van de ineenstortende wolk eindigt echter in de schijf, planeten of protoster. Een deel van



Figuur 1. De Carinanevel, zoals waargenomen door het NIRC*am*-instrument aan boord van de James Webb-ruimtetelescoop. Elke kleur is gemaakt met een ander filter van NIRC*am*. In deze nevel worden meerdere nieuwe sterren geboren. Door de hoge resolutie en gevoeligheid van Webb is het nu mogelijk om zowel de vorm van de nevel als de jonge sterren in wording te zien. Op de figuur zijn ook duidelijke structuren in de wolk (1), een schokgolf (2) en de rand van de wolk die wordt verdampt door externe ultraviolette straling (3) aangegeven. Credits: NASA, ESA, CSA, and STS*cl*.

het materiaal wordt het systeem uit gelanceerd in zogeheten straalstromen. Het duurt grofweg een miljoen jaar voordat de gehele ineenstortende wolk op de schijf is gevallen. Hierna duurt het nog eens tien miljoen jaar voordat de gehele schijf is verdwenen en alle oorspronkelijke massa in de gevormde ster en planeten is opgenomen of het systeem uit is gestoten. De jonge ster en haar planetaire stelsel zijn geboren wanneer er waterstoffusie in de kern van de ster begint. In figuur 1 is een afbeelding van een stervormingsgebied te zien door de ogen van Webb. De afbeelding is gemaakt met het NIRC*am*-instrument (Near Infrared Camera), een camera die in verschillende filters (kleuren) waarneemt op infrarode golflengten tussen 0,6 en 5 micrometer. Door de hoge resolutie en gevoeligheid van Webb is het mogelijk om tot in de

kleinste details een stervormingsgebied te bestuderen. Hiervoor is infrarood licht ook cruciaal, aangezien het infrarood licht veel minder wordt verstrooid door de wolk dan bijvoorbeeld optisch licht. Hierdoor kan er door de wolk heen gekeken worden en is het mogelijk om echt naar de fysica en chemie te kijken dicht bij jonge en vormende sterren die zich nog zeer diep in de wolk bevinden. Figuur 1 laat tevens zien hoe complex en gevarieerd een jong stervormingsgebied is: van structuren in de wolk (1) tot schokken (2) en het verdampen van de wolk door externe ultraviolette straling (3).

Heet gas in de schijven rond sterren

In een schijf rond een jonge protoster is de temperatuur hoger dicht bij de centrale protoster dan dat

deze is verder weg in de schijf. Met de infraroodogen van Webb zijn we vooral gevoelig voor de binnenste, warmste regionen van de schijf waar de temperaturen tussen de paar honderd en enkele duizenden graden Kelvin liggen. Voor protosterren die uiteindelijk een ster zoals de Zon worden, komt dit warme infrarode licht precies van de delen van de schijf waar aardachtige planeten zich aan het vormen zijn. Met Webb kunnen we dus het materiaal gaan bestuderen precies waar planeten zoals onze Aarde gecreëerd worden! Dit staat in sterk contrast met andere telescopen zoals de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, gelegen in de Atacama woestijn in Chili). Deze telescoop neemt waar op millimetergolflengten en is daardoor veel gevoeliger voor het koude materiaal dat verder

weg ligt in de schijf, waar men verwacht dat gasreuzen zoals Jupiter zich zullen gaan vormen. Er is nog heel veel onduidelijk over wat de fysische condities en de chemische samenstelling zijn van het materiaal waaruit zich aardachtige planeten vormen. Een belangrijke vraag om te beantwoorden is wat de moleculaire samenstelling is van de schijf in het gebied waar deze planeten vormen. Dit is ook het materiaal waaruit de planeet en diens atmosfeer worden gemaakt. Door dit materiaal in veel schijven te bestuderen, kan dus meer geleerd worden over hoe aardachtige planeten zich vormen. Dit kan direct vergeleken worden met de diversiteit in exoplaneten, planeten die rond een andere ster dan de zon draaien. Ook kunnen we hiermee meer leren over hoe de Aarde en de andere aardachtige planeten (Mercurius, Venus en Mars) in ons eigen zonnestelsel kunnen zijn gevormd.

Sterke straalstromen

In een ineenstortende wolk valt er niet alleen maar materiaal richting de centrale protoster en schijf, maar wordt er ook materiaal de wolk uit gelanceerd. Dit gebeurt in zogeheten straalstromen: smalle stralen van materiaal die met hoge snelheid van de centrale protoster weg bewegen. Deze straalstromen ontstaan door het behoud van draaimoment van de wolk. De ineenstortende wolk moet draaimoment verliezen omdat de centrale protoster anders zo hard zou gaan draaien dat deze uiteenvalt. Door materiaal naar buiten te lanceren verliest het systeem een groot deel van zijn draaimoment en kan er een ster in het centrum vormen. Het is nog grotendeels onduidelijk van waar de straalstroom precies wordt gelanceerd. Gebeurt dit heel dicht bij de centrale protoster of gebeurt het verder weg in het koudere deel van de schijf? Een manier om hier meer over te weten te komen, is door te kijken naar de chemische samenstelling van het materiaal in de straalstroom. Aangezien het materiaal uit de schijf wordt gelanceerd, is

dit dus ook een manier om naar de samenstelling van de schijf te kijken op de plek waaruit het gelanceerd wordt. Juist bij infraroodgolflengten zijn de atomen en ionen in de straalstroom goed waar te nemen. De straalstromen kunnen ons echter nog iets meer leren. Doordat ze met hoge snelheid naar buiten worden gelanceerd, knallen ze op de omliggende wolk. Hierdoor ontstaat er een zogeheten schok wat resulteert in een onomkeerbare compressie van in het materiaal (oftewel verhoging van de dichtheid) en een significante verhoging van de temperatuur. Door de hoge temperaturen in zo'n schok kunnen er reacties plaatsvinden tussen moleculen en atomen die in de koude wolk niet mogelijk zijn. Webb heeft uitstekende ogen om zulk soort schokken waar te nemen en ons meer te leren over zowel de fysica als de chemie in die gebieden.

IJskoude moleculen

De temperatuur in de moleculaire wolken waar sterren uit vormen is slechts 10 - 15 kelvin en de dichtheid is niet groter dan één miljoen moleculen per kubieke centimeter. Door deze lage temperatuur en dichtheid is er eigenlijk geen chemie in de gasfase mogelijk. Wanneer echter astronomische waarnemingen van jonge sterren worden gedaan zien we een rijke chemie van moleculen. De reden hiervoor zijn kleine stofkorrels niet groter dan 0,1 micrometer die als een soort katalysator fungeren in de chemie. Doordat de temperatuur zo laag is in moleculaire wolken, blijven atomen en moleculen plakken aan de oppervlakte van deze stofkorrels. Hierdoor kunnen verschillende atomen en moleculen elkaar makkelijker vinden en met elkaar reageren in de koude condities. Enkele moleculen die zo gevormd worden zijn water, ammoniak (NH_3), methaan (CH_4) en methanol (CH_3OH). Deze moleculen blijven op hun beurt ook plakken aan de stofkorrels. Hierdoor ontstaat een laag van ijs rond de stofkorrels. In deze ijslaag kunnen ook nog grotere moleculen gevormd worden zoals

ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) en methylformiaat (CH_3OCHO).

Deze ijslagen rond stofkorrels kunnen worden waargenomen met infrarood licht. Het infrarode licht dat wordt uitgezonden door de centrale protoster (en het binnenste deel van de schijf) kan worden geabsorbeerd door de moleculen in het ijs rond stofkorrels die zich in de omliggende wolk bevinden. Hier absorbeert elk molecuul het infrarode licht op zijn eigen karakteristieke golflengte(s). De moleculaire samenstelling van het ijs kan dus worden bestudeerd door naar de spectrale absorptie te kijken.

Webb heeft de resolutie en gevoeligheid om de soorten ijs rondom protosterren in detail te bestuderen. Het is van groot belang om dit te bestuderen om een aantal cruciale vragen van het stervormingsproces te kunnen beantwoorden. Hoe complex kunnen moleculen in ijs worden? Wat is de samenstelling en hoe verschilt dit van ster tot ster? Hoe verandert de samenstelling van het ijs zich gedurende het stervormingsproces? Het is van belang om dit allemaal goed te begrijpen aangezien dit ook het materiaal is waar eventuele planeten zich uit gaan vormen.

De James Webb-ruimtetelescoop is een cruciale stap voorwaarts voor astronomische waarnemingen. Infrarode golflengten zijn van groot belang om de warme regionen nabij protosterren in detail te bestuderen en de ongeëvenaarde resolutie en gevoeligheid van Webb maken het mogelijk om diep in de wolk te kijken. Dankzij Webb zullen we weer meer te weten komen over hoe sterren vormen en daarmee ook meer leren over hoe onze eigen Zon en haar planeten ooit zijn gevormd.

Martijn van Gelder is momenteel postdoctoraal onderzoeker aan de Leidse Sterrewacht, nadat hij afgelopen november aldaar zijn proefschrift heeft verdedigd. Zijn onderzoek focust zich op hoe sterren vergelijkbaar als de zon vormen.
vgelder@strw.leidenuniv.nl