



Universiteit
Leiden
The Netherlands

The puzzle of protoplanetary disk masses

Miotello, A.

Citation

Miotello, A. (2018, March 7). *The puzzle of protoplanetary disk masses*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/61006>

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/1887/61006>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:

<http://hdl.handle.net/1887/61006>

Author: Miotello, A.

Title: The puzzle of protoplanetary disk masses

Issue Date: 2018-03-07

SAMENVATTING

*De kosmos zit in ons.
We zijn gemaakt van sterrenstof.
We zijn een manier voor het heelal om zichzelf te kennen.*
Carl Sagan

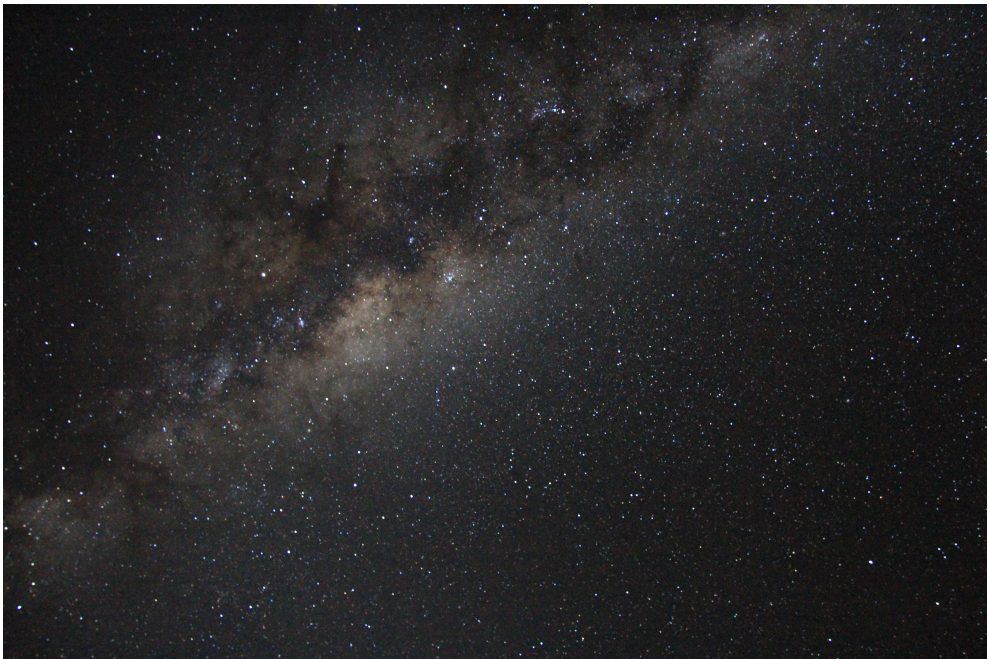


Figure 7.1: Foto van het galactisch centrum en de Melkweg – vol met donkere stofwolken – vanaf Cerro Paranal tijdens nieuwe maan op 26 maart 2017 (foto genomen door de auteur met een spiegelreflexcamera, belichting 30 sec).

Sinds het begin van de mensheid heeft men omhoog gekeken naar de nachtelijke hemel en zich verwonderd over de betekenis van zo'n majestieuze voorstelling (Fig. 7.1). Oude beschavingen over de hele wereld, van Egypte tot China en van Oceanië tot Zuid-Amerika, kenden mythen en legendes over de sterrenbeelden en nevelachtige objecten die ze aan de hemel zagen. Ook gedurende onze Europese geschiedenis zijn vele dichters, schilders en kunstenaars geïnspireerd geweest door hemelse verschijnselen. De verbazing over de nachtelijke hemel is altijd hand in hand gegaan met het verlangen om de relatie tussen mensheid en universum te begrijpen. Zelfs nu de wetenschap en technologie verder ontwikkeld zijn, en we de fysische en chemische structuur van astronomische objecten kunnen verklaren, blijft deze vraag ons bezig houden. De wetenschap heeft onthuld dat de verbinding tussen de cosmos en ons bestaan veel inniger is dan de wildste pre-wetenschappelijke voorstellingen. Onze kennis over het sterrenstelsel waarin wij ons bevinden vertelt ons bijvoorbeeld dat alle verschijnselen in de Melkweg, van zwarte gaten en ontplofende supernovae tot de exacte locatie van ons zonnestelsel, hebben samengewerkt om te zorgen dat leven kon evolueren tot hoe wij dat nu kennen. Daarnaast kunnen we door de groeiende populatie van ontdekte exoplaneten hun eigenschappen vergelijken met die van ons eigen planetenstelsel. Ondanks het grote aantal bekende planetenstelsels lijkt de inrichting van ons eigen zonnestelsel erg "speciaal" te zijn. Uit omvangrijke studies naar exoplaneten blijkt dat een zon-Jupiter systeem maar in één op duizend planetenstelsels wordt waargenomen. Maar aan de andere kant voorspellen theoretische modellen dat Jupiter een fundamentele rol heeft gespeeld in de evolutie van ons zonnestelsel.

Vorming van sterren en protoplanetaire schijven

De vraag over onze oorsprong is gecentreerd rond de vorming van sterren en planeten. Hoe vormen sterren en de planeten die om hen heen draaien? Wat zijn de beginvoorwaarden om een planetenstelsel zoals het onze te vormen? Welke rol speelt de fysische structuur en de chemische samenstelling van deze stelsels in wording?

De vorming van sterren begint op grote schaal met het ontstaan van filamenten in gigantische moleculaire wolken. Waarnemingen hebben laten zien dat deze filamenten langgestrekte structuren zijn waarin zich in het algemeen tientallen kleinere draadvormige structuren vormen. Deze draden vallen uiteindelijk uiteen in kernen met zeer hoge dichtheden die we *pre-stellare kernen* noemen, omdat ze waarschijnlijk instorten om één of meerdere sterren te vormen. Tijdens dit ineenstorten wordt er een draaiende schijfvormige structuur gevormd zodat het hoekmoment behouden blijft. Via deze schijf beweegt materiaal naar binnen om uiteindelijk in de groeiende protoster te vallen (Fig. 7.2). We noemen het een *protoplanetaire schijf* omdat het de plaats is waar planeten, zoals de aarde en de andere planeten in ons zonnestelsel,

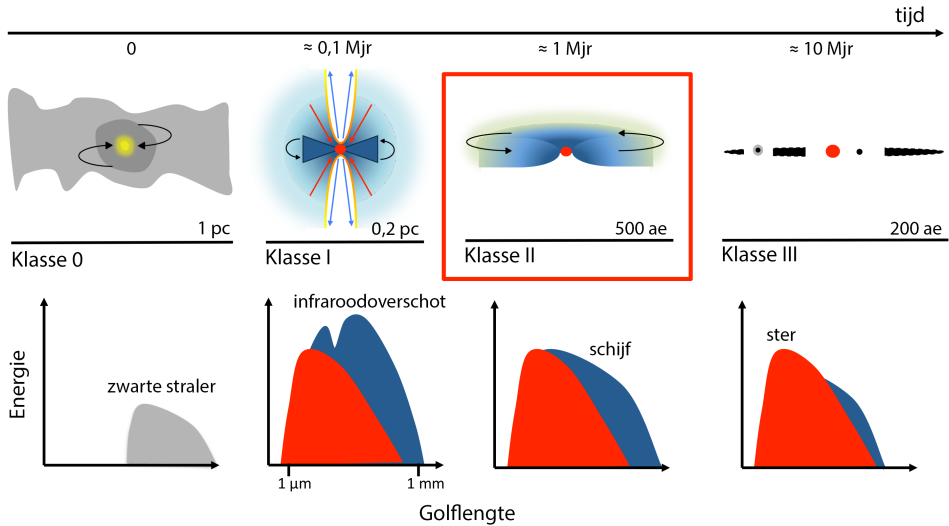


Figure 7.2: Illustratie van de vorming van een ster en daaromheen draaiende planeten. De verschillende evolutionaire stadia zijn weergegeven in de bovenste rij. De onderste rij laat de bijbehorende waarneembare kenmerken zien in de vorm van schematische Spectrale Energie Diagrammen (SEDs). Dit proefschrift richt zich op het Klasse II stadium.

gevormd worden.

Protoplanetaire schijven evolueren van een beginstadium waarin ze nog omhuld worden door een grote hoeveelheid gas en stof (Klasse 0 en Klasse I objecten) naar een meer typerende fase waarin ze veel gas herbergen en het omhulsel verdwenen is (Klasse II). In het volgende stadium bevatten ze nog maar weinig gas en moeten grotere lichamen zoals planeten en asteroiden al gevormd zijn (Klasse III). Zoals te zien in de illustratie in Fig. 7.2 worden de diverse evolutionaire stadia gekenmerkt door verschillen in de vorm van hun Spectrale Energie Diagram (SED). Dit proefschrift richt zich op het modeleren van het gas in protoplanetaire schijven tijdens de gasrijke Klasse II fase en het vergelijken van deze resultaten met spiksplinternieuwe waarnemingen van gas en stof in schijven gedaan met de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, zie Fig. 7.3).

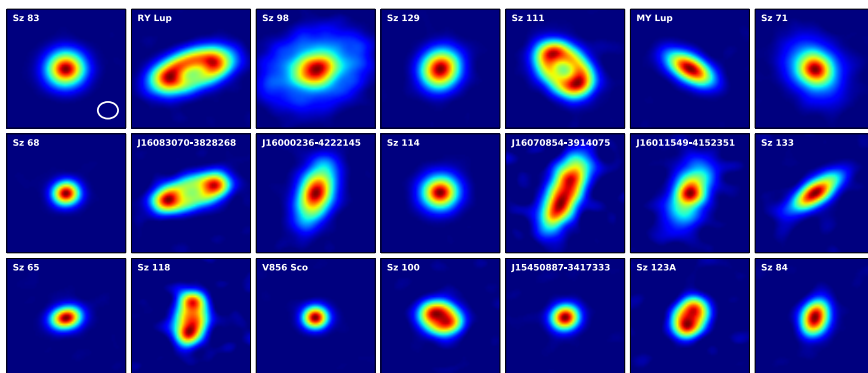


Figure 7.3: Compositie van protoplanetaire schijven die met ALMA zijn waargenomen in het stervormingsgebied Lupus en die illustratief zijn voor de grote variëteit aan type schijven. De afbeeldingen laten de thermische straling zien bij een golflengte van $890\ \mu\text{m}$. Deze straling wordt uitgezonden door stofdeeltjes in de schijf die een grootte hebben van enkele millimeters. Figuur door M. Ansdell.

Openstaande vragen omtrent protoplanetaire schijven

De totale massa is een fundamentele eigenschap van een schijf, want het bepaalt niet alleen zijn structuur en evolutie, maar ook de kenmerken van het planetenstelsel dat uiteindelijk gevormd wordt. Desondanks is het nog niet gelukt om de massa's van schijven met grote zekerheid af te leiden uit waarnemingen. Schijven bestaan uit gas en stof, en hoewel het gas 99% van de massa uitmaakt, is het het stof dat grotendeels bepaalt wat voor straling uitgezonden wordt. Daar komt nog bij dat het merendeel van het stof bestaat uit deeltjes van enkele millimeters die niet noodzakelijkerwijs goed gemengd zijn met het gas. Om deze redenen zou de massa van het gas en stof dus apart gemeten moeten worden. Verwacht wordt dat het grootste gedeelte van de schijfmassa bestaat uit moleculair waterstof (H_2). H_2 is echter moeilijk waar te nemen, omdat het niet gemakkelijk geëxciteerd wordt bij de lage temperaturen die heersen in het merendeel van de schijf. Van oudsher wordt daarom de aanwezigheid van gas in schijven afgeleid aan de hand van koolstofmonoxide (CO) emissielijnen die wel gemakkelijk geëxciteerd worden. Maar omdat deze emissie in het algemeen optisch dik is is het erg moeilijk, en modelafhankelijk, om met behulp van CO de gasmassa nauwkeurig te bepalen. De belangrijkste vragen die in dit proefschrift behandeld worden zijn de volgende:

- Wat kan het best gebruikt worden als maatstaaf voor de gasmassa in protoplanetaire schijven? Zijn de minder voorkomende isotopologen¹ van CO hiervoor

¹Isotopologen zijn moleculen die enkel van elkaar verschillen in hun isotoop samenstelling. Simpel

geschikt? Kan gedeutereerd waterstofgas (HD) een goed alternatief zijn en wat zijn hiervan de beperkingen?

- Hoe kunnen huidige en toekomstige waarnemingen met ALMA² gebruikt worden om de massa's te bepalen van een statistisch significant aantal schijven?
- Wat is de daadwerkelijke verhouding tussen de gas- en stofmassa in schijven, en hoe wordt de bepaling hiervan beïnvloed door het feit dat een deel van de koolstof en zuurstof opgesloten kan zitten in rotsachtig materiaal?

Dit proefschrift en een toekomstperspectief

Het bepalen van gasmassa's in schijven is vanaf het begin de rode draad geweest door dit proefschrift. CO isotopologen zijn al vele jaren veelbelovende kandidaten voor het meten van de gasmassa, en door de opkomst van ALMA kunnen zij routinematig waargenomen worden in schijven. Openstaande vragen zijn of chemische isotoop-specifieke processen een belangrijke rol spelen in de verhouding waarin de verschillende isotopologen van CO voorkomen en bij het bepalen van de gasmassa. Het minder voorkomende isotopoloog $C^{18}O$ wordt inderdaad sneller afgebroken door uv-straling dan de hoofdvorm van koolstofmonoxide, $^{12}C^{16}O$. Dit proefschrift begint daarom vanuit een modelleerperspectief. Inmiddels heeft de *Lupus Disk Survey*, uitgevoerd met ALMA, het aantal waarnemingen van CO isotopologen in schijven sterk vergroot, en de modellen die gepresenteerd worden in Hoofdstuk 3 zijn hiermee vergeleken. Hiernaast zijn nog een aantal op (toekomstige) waarnemingen gerichte onderzoeken gedaan.

- Hoofdstuk 2 beschrijft voor het eerst de correcte behandeling van isotoop-specifieke fotolyse in een fysisch-chemisch model voor schijven, genaamd DALI. Isotoop-specifieke fotolyse is het proces dat de onderlinge verhoudingen van de CO isotopologen in de laag waar de CO emissie vandaan komt het meest beïnvloedt. In dit model worden de ^{13}CO , $C^{18}O$ en $C^{17}O$ isotopologen behandeld als aparte soorten in een chemisch netwerk. Daarnaast worden de chemie, de temperatuur structuur, en het stralingstransport van zowel lijn- als continuümstraling in beschouwing genomen. Het belangrijkste resultaat is dat in bepaalde gebieden in de schijf isotoop-specifieke processen leiden tot verhoudingen van de isotopologen die afwijken van de isotoopverhoudingen van

gezegd heeft een isotopoloog tenminste één atoom met een ander aantal neutronen dan het normale molecuul.

²ALMA is een internationaal samenwerkingsverband tussen de European Southern Observatory (ESO), de Amerikaanse National Science Foundation (NSF) en de National Institutes of Natural Sciences (NINS) van Japan, samen met NRC (Canada), NSC en ASIAA (Taiwan), en KASI (Korea), en in samenwerking met Chili.

de elementen. Dit betekent dat schijfmassa's onderschat kunnen worden met meer dan een orde van grootte als de verhouding tussen de isotopologen als constant wordt beschouwd.

- In Hoofdstuk 3 wordt de kleine set modellen die in Hoofdstuk 2 gebruikt zijn om de effecten van isotoop-specifieke CO fotolyse te onderzoeken, uitgebreid. Meer dan 800 schijfmodellen zijn gedraaid voor een reeks verschillende parameters voor de ster en schijf. Voor verschillende inclinaties is de totale fluxdichtheid berekend voor lage J overgangen van verschillende CO isotopologen. Dit hoofdstuk laat zien dat de totale schijfmassa afgeleid kan worden uit een combinatie van de totale intensiteit van ^{13}CO en C^{18}O , maar met een grotere foutmarge dan uit voorgaande onderzoeken is gebleken. Deze onnauwkeurigheid kan verkleind worden als de grootte van de schijf, de inclinatie en de kromming van het schijfoppervlak bekend zijn uit andere waarnemingen. De totale intensiteit van de lijnemissie van een aantal lage J overgangen van verschillende CO isotopologen wordt gepresenteerd en beschreven met eenvoudige vergelijkingen. Verder zijn de effecten van een verminderde hoeveelheid koolstof in het gas en van verschillende verhoudingen tussen de hoeveelheid gas en stof onderzocht.
- In Hoofdstuk 4 worden de fysisch-chemische modellen uit Hoofdstuk 3 gebruikt om waarnemingen van stof en CO isotopologen ($^{13}\text{CO } J = 3 - 2$ en $\text{C}^{18}\text{O } J = 3 - 2$) in schijven in Lupus te analyseren. Uit eerdere studies stond het aantal schijven waarvoor de gasmassa berekend was op tien. Dit aantal is aanzienlijk vergroot door voor 34 objecten de gasmassa te bepalen. Dit hoofdstuk laat zien dat, als aangenomen wordt dat de hoeveelheid vluchtig koolstof niet verlaagd is, de gasmassa's gebaseerd op CO in het algemeen erg laag zijn voor schijven rond sterren met een zonsachtige massa: vaak minder dan $1 M_{\text{Jup}}$ (massa van Jupiter). Als gevolg hiervan is de globale verhouding tussen de hoeveelheid gas en stof veel lager dan de verwachte waarde van 100 (de waarde in het interstellair medium). Voor de meeste schijven ligt deze waarde tussen 1 en 10. Lage waarden voor de op CO gebaseerde gasmassa en de verhouding tussen gas en stof kan wijzen op een snel verlies van gas. Andere mogelijke oorzaken zijn chemische evolutie, bijvoorbeeld de omzetting van CO in meer complexe moleculen, of de opslag van koolstof in grotere objecten. De eerste hypothese betekent dat de vorming van reuzenplaneten snel moet gaan of zeldzaam is. Voor de andere verklaring is de betekenis voor de tijdschaal waarop planeetvorming plaatsvindt minder duidelijk.
- In Hoofdstuk 5 wordt met de DALI modellen een andere belangrijke schijfeigenschap onderzocht, namelijk de verdeling van de oppervlakedichtheid van het gas (Σ_{gas}). Robuuste metingen van Σ_{gas} aan de hand van waarnemin-

gen is essentieel om de evolutie van schijven, en het onderlinge belang daarbij van verschillende processen, te begrijpen, alsmede hoe planeten gevormd worden. Recentelijk zijn heeft ALMA waarnemingen gemaakt van de intensiteit van ^{13}CO emissie als functie van de afstand tot de ster. Dit hoofdstuk onderzoekt of zulke metingen gebruikt kunnen worden als maat voor de oppervlaktedichtheid van het gas over de lengte van de schijf. Uit vergelijkingen met de DALI modellen vinden we dat de intensiteitsverdeling van ^{13}CO alleen vergelijkbaar is met de oppervlaktedichtheidsverdeling van het gas in het middelste gedeelte van de schijf. In het binnenste gedeelte dicht bij de ster is de emissie optisch dik en neemt daardoor (relatief) af. In de buitenste gebieden neemt de emissie af door een combinatie van vastvriezen aan stofdeeltjes en inefficiënte zelfbescherming tegen uv-straling.

- In Hoofdstuk 6 is een simpele deuterium chemie toegevoegd aan het chemische netwerk in DALI om HD lijnemissie te simuleren. Het doel is om te onderzoeken hoe robuust deze emissie is als maat voor de gasmassa in schijven, en dan met name wat het effect is van de gasmassa op de ver-infraroodstraling van HD, en hoe gevoelig deze emissie is voor de verticale structuur van de schijf. De onzekerheid in de op HD gebaseerde massabepaling blijkt schappelijk te zijn, en waarnemingen van HD moeten beschouwd worden als een belangrijk wetenschappelijk doel voor toekomstige ver-infrarood-missies zoals SPICA.

De voornaamste conclusies van dit proefschrift zijn als volgt.

1. Isotoop-specifieke fotolyse van CO moet op de juiste wijze in beschouwing genomen worden bij het modeleren van emissie van zeldzame CO isotopologen. Als dit niet gebeurt kan de lijnemissie van C^{18}O overschat worden, en de hiervan afgeleide gasmassa onderschat met een orde van grootte, of zelfs meer.
2. De gasmassa van een schijf kan bepaald worden aan de hand van een combinatie van de totale ^{13}CO en C^{18}O intensiteit, alhoewel de foutmarge hierbij niet verwaarloosbaar is: voor de meest zware schijven kan dit wel twee orden van grootte bedragen.
3. Gasmasa's gebaseerd op CO zijn extreem laag voor schijven in Lupus: vaak minder dan $1 M_{\text{Jup}}$. De globale verhouding tussen de gas- en stofmassa ligt voornamelijk tussen 1 en 10. Dit zou geïnterpreteerd kunnen worden als een snel verlies van gas. Het alternatief is een snelle chemische evolutie waarbij CO is omgezet in andere moleculen en dus geen goede maat meer is voor de totale gasmassa.

-
4. Waarnemingen van ^{13}CO met een hoekoplossend vermogen groter dan de afmetingen van de schijf kunnen de vorm van de schijf's oppervlaktedichtheidsverdeling afbakenen, mits optische diepte, bevriezing en zelfbescherming tegen uv-straling op de juiste manier behandeld worden in de modellen.
 5. Straling van HD in het ver-infrarood kan gebruikt worden om de gasmassa van schijven te bepalen. De foutmarge is hierbij schappelijk en wordt met name veroorzaakt door de verticale structuur in de schijf. Dergelijke waarnemingen moeten beschouwd worden als een belangrijk wetenschappelijk doel voor toekomstige ver-infraroodmissies.

Het blijft een openstaande vraag hoeveel de gasmassa in schijven bedraagt. CO isotopologen zijn nog steeds veelbelovende kandidaten voor het bepalen van de massa, omdat ze routinematig met ALMA kunnen worden waargenomen. Maar deze methode moet wel geijkt worden. Dit proefschrift laat zien dat isotoop-specifieke fotolyse belangrijk is voor een goede massabepaling aan de hand van CO isotopologen. Fotolyse is echter niet de voornaamste reden voor zwakke lijnmissie van CO isotopologen, in ieder geval niet voor de TW Hya schijf, maar mogelijk ook in andere schijven. Een proces dat verder onderzocht en beter begrepen moet worden is de afname van vluchtig koolstof. Waar belandt dit koolstof? Het waarnemen van iets complexere moleculen zoals de koolwaterstoffen C_2H en $\text{c-C}_3\text{H}_2$ zou een manier kunnen zijn om de op CO gebaseerde gasmassa's te ijken. Een andere optie is waarnemingen van [CI], omdat hieruit de hoeveelheid vluchtig koolstof in de bovenste lagen van een schijf kan worden afgeleid. Als uiteindelijk HD emissielijnen met voldoende spectrale resolutie waargenomen kunnen worden met SPICA, dan hebben we een onafhankelijke maat voor de gasmassa in schijven.

Het bepalen van de totale massa van protoplanetaire schijven is niet gemakkelijk. Toch is dit cruciaal omdat het de belangrijkste schijfeigenschap is die nodig is om het ontstaan te begrijpen van planeten zoals onze eigen aarde en de grote verscheidenheid aan exoplaneten³.

³Exoplaneten zijn planeten die om een andere ster dan de zon draaien.