



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Millimeter emission from protoplanetary disks : dust, cold gas, and relativistic electrons

Salter, D.M.

### Citation

Salter, D. M. (2010, November 25). *Millimeter emission from protoplanetary disks : dust, cold gas, and relativistic electrons*. Leiden Observatory, Faculty of Science, Leiden University. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/16175>

Version: Corrected 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/1887/16175>

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

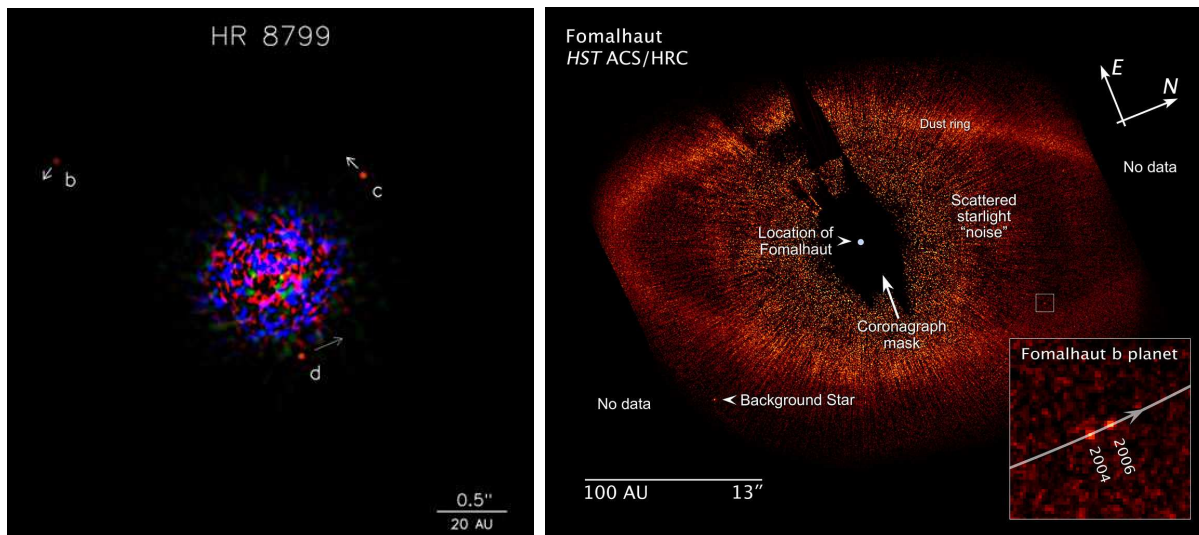
# Nederlandse Samenvatting

In de 18e eeuw werd duidelijk dat de planeten in ons zonnestelsel allemaal in dezelfde richting rond de zon draaien en in hetzelfde baanvlak. Dit bracht verscheidene Europese filosofen ertoe te opperen dat ons zonnestelsel gevormd moest zijn in een platte, roterende schijf. Meer dan 200 jaar later, en met name in de jaren 60 en 70 van de vorige eeuw, begonnen sterrenkundigen die zich gespecialiseerd hadden in ster-  
vormingstheorieën te beseffen dat het overblijvende materiaal van dit proces zich in een schijf rondom de centrale ster moet bevinden, een zogenaamde circumstellaire schijf. In de daarop volgende decennia leidden steeds betere telescopen en instrumenten tot de ontdekking van deze schijven rond jonge, vormende sterren en bleek bovendien dat deze schijven alom vertegenwoordigd zijn. Het doorslaggevende en indrukwekkendste bewijs voor het bestaan van circumstellaire schijven kwam wellicht van de Hubble Ruimte Telescoop, die in 1993 afbeeldingen maakte van een aantal schijven in silhouet (Figuur 1). Deze circumstellaire schijven van gas en stof, met afmetingen vergelijkbaar met ons zonnestelsel, worden proto-planetaire schijven genoemd, omdat ze het materiaal vasthouden waaruit planeten gevormd kunnen worden. Deze ontdekkingen hebben veelbelovende implicaties voor het bestaan van andere planeten en van leven in het heelal.

Vlak nadat zo het veelvuldig voorkomen van proto-planetaire schijven was vastgesteld, volgde in 1995 de eerste indirecte ontdekking van een planeet rond een verre zonachtige ster. In de 15 jaar die daarop volgden zijn meer dan 500 mogelijke planeten gevonden met zowel directe als indirecte methodes. Indirecte ontdekkingen komen het vaakst voor, aangezien de planeten zelf veel te zwak zijn om direct



**Figuur 1** — Vier proto-planetaire schijven in de Orion Nevel, hier getoond in silhouet. De grootste schijf heeft een doorsnede van 800 AE, waarbij 1 AE (ongeveer 150 miljoen kilometer) de afstand is van de aarde tot de zon. Deze foto is in 1993 genomen door de Hubble Ruimte Telescoop. (Credit: C.R. O'Dell of Rice University / NASA)



**Figuur 2** — De eerste directe afbeeldingen van een exoplaneet. Links: de ster HR 8799 en drie dichtbijstaande mogelijke planeten, aangegeven met *b*, *c* en *d*. (Credit: Gemini Observatory / NRC / AURA / Marois et al. 2010). Rechts: opnamen met tussenposen van 2 jaar (2004 en 2006) met de Hubble Ruimte Telescoop van de ster Fomalhaut. Hierop is een mogelijke planeet zichtbaar in zijn baan op grote radiële afstand. Deze afbeelding is gemaakt met coronografische technieken, die het licht van de centrale ster afdekken. Dit leidt tot het ‘gat’ in het midden van de afbeelding, waar de ster zich zou moeten bevinden. (Credit: NASA / ESA / P. Kalas van de Universiteit van Californië te Berkeley).

te kunnen worden waargenomen naast hun felschijnende ster. Zulke methodes bestaan bijvoorbeeld uit het ontdekken van een ‘wiebelende’ ster veroorzaakt door de omlopende planeet, of een periodieke dip in de helderheid van een ster als de planeet in zijn omloopbaan voor de ster langs gaat. De eerste methode vindt vooral zware planeten, vaak met massa’s groter dan Jupiter, die erg dicht bij hun ster staan. De tweede methode kan alleen planeten vinden die in onze gezichtslijn de planeet passeren, en die groot genoeg zijn om een groot gedeelte van het sterlicht te blokkeren. Geen van beide methodes is waterdicht en de bevestiging van de mogelijke planeet kan vele jaren (of decennia) in beslag nemen, afhankelijk van de omlooptijd van de planeet en de technieken die gebruikt kunnen worden om de massa en samenstelling van de planeet te bepalen. Directe waarnemingen van een planeet daarentegen vangen licht op van de planeet zelf, en dit werd pas mogelijk in 2008. Figuur 2 laat twee voorbeelden zien van inventieve waarneemtechnieken, waarbij het licht van de ster wordt afgedekt om de lichtzwakke planeet zichtbaar te maken.

De meeste van deze zogenaamde exoplaneten verschillen erg van de planeten in ons eigen zonnestelsel, en zijn zelfs in strijd met de traditionele theorieën over hoe planeten vormen. Veel van de grote vragen binnen de sterrenkunde—en in dit proefschrift—hebben betrekking op het identificeren van de fysische en chemische processen die proto-planetaire schijven omvormen tot de grote variëteit in planetenstelsels die we vandaag om ons heen zien, inclusief de vraag waarom sommige schijven geen enkele planeet lijken te produceren.

## 1 De vorming van sterren als de zon

Lang werd gedacht dat sterren eeuwig en onveranderlijk aan de hemel staan, maar inmiddels weten we dat ook zij een levenscyclus doorlopen. Ze worden geboren, worden ouder en gaan uiteindelijk dood. Het onderzoek in dit proefschrift richt zich op de processen die vooraf gaan aan de geboorte van een nieuwe ster, die een tijdsbestek van meer dan 10 miljoen jaar in beslag kunnen nemen. Omdat niet alle sterren

een zelfde geboorteprocess doormaken, specialiseren wij ons hier tot sterren met een massa vergelijkbaar met de zon. Deze lage-massa sterren variëren in massa van 0,5 tot 2,0 keer de massa van de zon  $M_{\odot}$ , met  $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$  kg.<sup>1</sup> Als lage-massa sterren nog in vorming zijn, worden deze voorlopers van de zon ook wel T Tauri sterren genoemd.

Voor stervorming is een grote voorraad gas en stof nodig, meer nog dan de massa van de uiteindelijke ster, omdat veel materiaal verloren gaat tijdens het vormingsproces. Gemiddeld bevat de interstellaire ruimte ongeveer 1 deeltje per  $\text{cm}^3$ , wat de ruimte tussen de sterren tot de dichtst mogelijke benadering van een perfect vacuüm maakt, zelfs al is deze ruimte verre van leeg. Om een klomp gas en stof gravitationeel instabiel te laten worden zodat hij instort is een dichtheid nodig van  $10^5$  deeltjes per  $\text{cm}^3$ . Ter vergelijking: de atmosfeer op aarde bevat  $10^{19}$  deeltjes per  $\text{cm}^3$ . Soms, als een ster aan het eind van zijn leven explodeert in een supernova, kan een nabije gaswolk door de schokgolf van de explosie samengeperst worden, waardoor de dichtheid in het gas toeneemt en de vorming van een nieuwe generatie van sterren kan beginnen.

Er is genoeg materiaal beschikbaar om een enkele ster te vormen, als een bolvormige, gravitationeel gebonden wolk van gas en stof een dichtheid heeft zoals hierboven beschreven en een omvang van ongeveer  $2 \times 10^5$  Astronomische Eenheden (AE), waarbij 1 AE (ongeveer 150 miljoen km) gelijk is aan de afstand van de aarde tot de zon. Om in te kunnen storten moet het materiaal in de wolk extreem koud zijn, zo'n 10 K ( $-263$  °C), om de inwendige druk door de aanwezige hitte te overkomen. Het instorten zelf begint van binnenuit en materiaal van grotere en grotere straal wordt naar het centrum getrokken. De instortende wolk begint te roteren, en de rotatie neemt toe naar mate de wolk kleiner en compacter wordt. Dit is te vergelijken met een schaatser die tijdens een pirouette haar armen en benen intrekt om sneller rond te kunnen draaien. Deze rotatie heeft twee belangrijke gevolgen, namelijk dat de instortende wolk afplat en dat de individuele gas- en stofdeeltjes in de wolk genoeg rotatie-energie verzamelen om in een baan rond de zich vormende ster te blijven draaien in plaats van erop te vallen. Zo is een proto-planetaire schijf ontstaan als een logisch en natuurlijk gevolg van een stergeboorte.

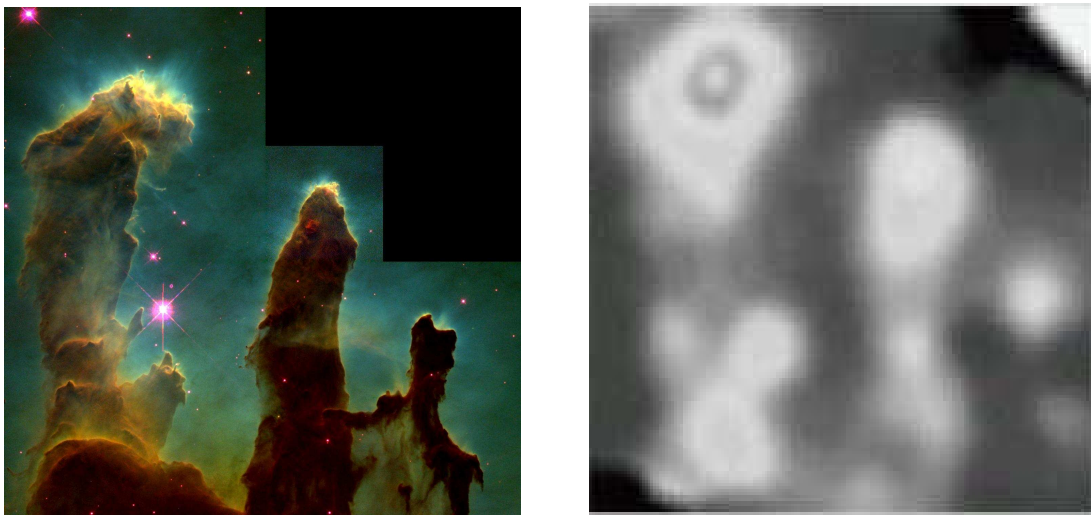
## 2 De geboorteplekken van planetaire stelsels

Hoewel proto-planetaire schijven een intrinsiek gevolg zijn van het stervormings proces hoeft dit niet te betekenen dat planeten dat ook zijn. Onder welke omstandigheden planeten vormen, of juist niet, blijft onduidelijk. Uiteindelijk zal dit afhangen van een directe competitie tussen de tijd die de schijf nodig heeft om uit elkaar te vallen (of om al zijn massa kwijt te raken), en de tijd die de planeet nodig heeft om te vormen.

Schijven komen in vele vormen en afmetingen voor, afhankelijk van de verschillende stadia in hun formatiegeschiedenis. Eerst heeft de schijf een afmeting van een paar honderd AE en is zijn massa grofweg gelijk aan 5% van die van de centrale ster. In de loop der tijd wordt de schijf dunner en neemt de totale massa af. Dit zorgt voor een levensspan van een paar miljoen jaar voor de schijf, wat de belangrijkste beperking aan de vorming van een planeet is. Er zijn verschillende mogelijkheden voor een schijf om zijn materiaal te verliezen, maar één ding is duidelijk: de leeftijd van de ster is niet de belangrijkste factor voor de snelheid waarmee de schijf oplost. Stoffige schijven rond koele sterren leven zelfs 2–3 keer langer dan rond hetere sterren, wat betekent dat andere eigenschappen van de centrale ster een belangrijke rol kunnen spelen om de levensloop van de schijf te verlengen. Aan de andere kant lijkt ook de snelheid waarmee planeten vormen te variëren in verschillende schijven. Modellen van planeetvorming en statistieken van exoplaneten suggereren beide dat schijven met een hogere stof/gas ratio sneller planeten vormen, wat zou betekenen dat ook de samenstelling van de schijf grote invloed

---

<sup>1</sup>Om grote getallen uit te drukken gebruiken sterrenkundigen exponenten zoals  $10^{30}$  om aan te geven dat de 10 nog 30 keer met zichzelf vermenigvuldigd moet worden.



**Figuur 3** — De kraamkamers van de sterren. Links: afbeelding van de Adelaarsnevel, getiteld “Zuilen der Scheping”, door de Hubble Ruimte Telescoop in 1995. In de zuilen bevinden zich jonge sterren in wording. (Credit: NASA / ESA). Rechts: dezelfde zuilen, maar nu afgebeeld op langere millimeter golflengten (en daardoor met lagere resolutie) door de JCMT schotelantenne op Mauna Kea in Hawaï. (Credit: Scott et al. 2010).

heeft op het proces van planeetvorming. Deze twee voorbeelden laten mooi het contrast zien tussen de invloed van de samenstelling van de schijf (omgeving) en de invloed van de evolutie van de ster (ontwikkeling) op de vorming van planeten: hier kunnen we dus spreken van een ‘nature vs nurture’ vraagstuk.

Om onderscheid te kunnen maken tussen deze twee invloeden moeten we begrijpen wat de ratio en de verdeling van het gas en stof in de schijven zijn, en hoe deze misschien zelfs onafhankelijk van elkaar veranderen als functie van tijd. Zo vindt bijvoorbeeld het ontbinden van de schijf plaats van binnen naar buiten, waarbij eerst een gat rond de centrale ster wordt gevormd dat zich naar buiten toe uitbreidt. Zulke gaten in schijven zijn inderdaad waargenomen rond verscheidene jonge sterren als gekeken wordt naar het stof. Dit zou dus kunnen duiden op een grotere invloed van de ster (‘nurture’), maar het kan ook zijn dat we de eerste stappen zien voor de vorming van een planeet, waarbij het stof is opgeveegd door een niet zichtbare proto-planeet. Er is dus geen eenduidig antwoord te geven, zeker niet als we niet weten wat de eigenschappen van de ster zijn die invloed hebben op de schijf, of wat de belangrijkste mechanismen zijn om een schijf uit elkaar te laten vallen, waarbij het stof misschien makkelijker is kwijt te raken dan het gas. Waarnemingen van het gas in proto-planetaire schijven kunnen ons helpen na te gaan welke processen zich afspelen in de schijf zelf, zeker als we deze combineren met waarnemingen van het stof. Daarom is het waarnemen van moleculair gas het belangrijkste doel in twee van de waarneemprojecten die in dit proefschrift beschreven worden. Grote statistische studies naar het stof in proto-planetaire schijven hebben laten zien dat in sommige schijven het stof gelijktijdig verdwijnt. Hier zijn verschillende verklaringen voor, waaronder de beginomstandigheden van de schijf (‘nature’), of andere invloeden van buitenaf die de schijf als geheel beïnvloeden en niet zoals de centrale ster vooral het binnenste gedeelte van de schijf verhitten.

In de meeste gevallen is het waarnemen van stof onze enige mogelijkheid om iets te weten te komen over het vormen van planeten in de schijf. Maar de schijf bestaat typisch slechts voor maar 1% uit stof (koolstof en silicium), terwijl de overige 99% uit koud gas bestaat (vooral waterstof en helium). Het is daarom van groot belang dat we ook het gas in de schijf waarnemen, wat een stuk gecompliceerder blijkt te zijn dan voor het stof (zie Sectie 3.3). Pas vrij recentelijk is het mogelijk geworden om de fysische en chemische evolutie van de gasschijf vast te stellen. Uit deze studies blijkt dat schijven opvallende



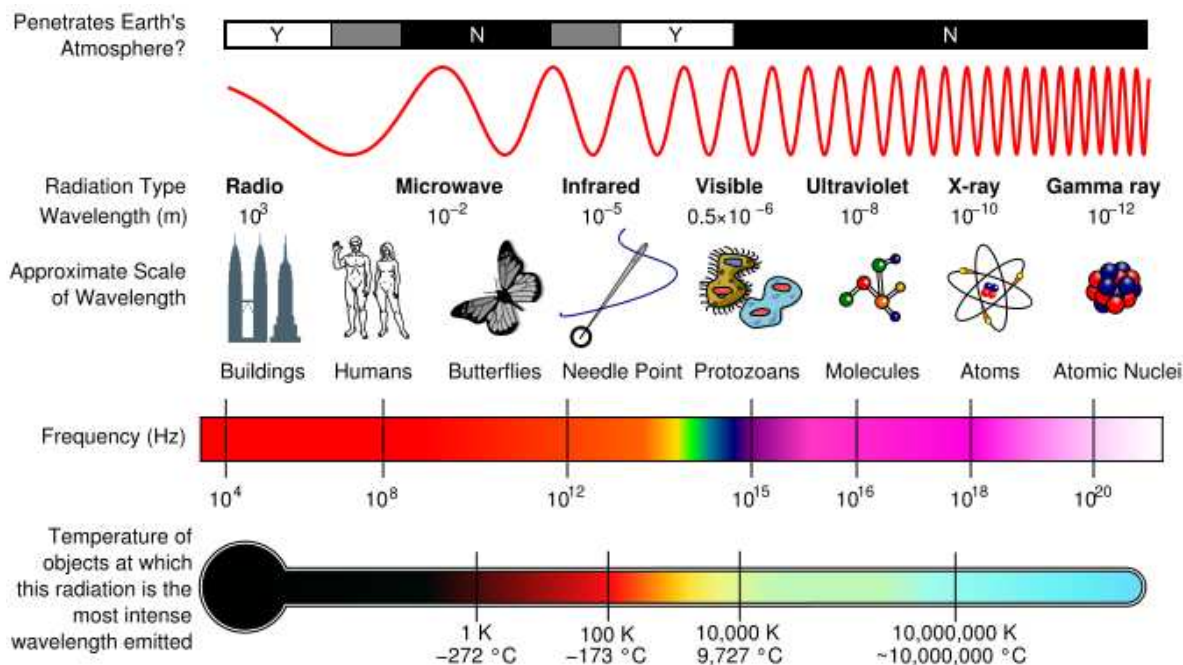
verschillende gas en stof structuren hebben. Aanvullende studies naar het gas, zoals gepresenteerd in het eerste deel van dit proefschrift, kunnen licht werpen op de processen die relevant zijn voor zowel de verspreiding van het stof als het gas, en hoe deze processen met elkaar verbonden zijn.

### 3 De studie naar proto-planetaire schijven

Omdat de tijdschalen waarmee we hier te maken hebben erg lang zijn (enkele miljoenen jaren), gebruiken we statistische studies van een groot aantal proto-planetaire schijven die zich in verschillende stadia van ontwikkeling bevinden. Op deze manier kunnen we de complete evolutie van deze schijven in kaart brengen. We vinden ze in wolken van gas en stof die een hoge dichtheid hebben en waar op grote schaal stervorming plaats vindt. Hoe dichterbij deze wolken zijn, hoe makkelijker ze in detail zijn waar te nemen. Voorbeelden van zulke dichtbijstaande stervormende wolken zijn het Taurus-Auriga stervormingscomplex, de Orionnevel en  $\rho$  Ophiuchus. Een wat verderweg staand voorbeeld is de Adelaarsnevel in het sterrenbeeld Serpens, zie Figuur 3. Als we de schijven in één stervormende wolk bestuderen, hebben we een uniforme selectie van schijven, die allemaal in een zelfde omgeving ontstaan zijn, onder dezelfde omstandigheden. Dit is ideaal voor het bestuderen van evolutionaire effecten op de planeetvorming. In dit proefschrift kijken we daarom naar het stervormingscomplex in Taurus.

#### 3.1 Instrumenten voor millimeter golflengtes

Al de waarnemingen gepresenteerd in dit proefschrift komen uit het millimeter golflengtegebied. In Figuur 4 geven we een overzicht van de verschillende soorten elektromagnetische straling, ook wel ‘licht’ genoemd. Het zichtbare licht is dat gedeelte van het spectrum dat wij met onze ogen kunnen waarnemen,



**Figuur 4** — Het elektromagnetische spectrum. Zichtbaar licht maakt maar een klein deel uit van het hele spectrum van elektromagnetische straling, ook wel bekend als licht. Merk op dat langere golflengtes koudere objecten in kaart brengen, en hoe dit uiteinde van het spectrum geassocieerd wordt met lage-energie processen.

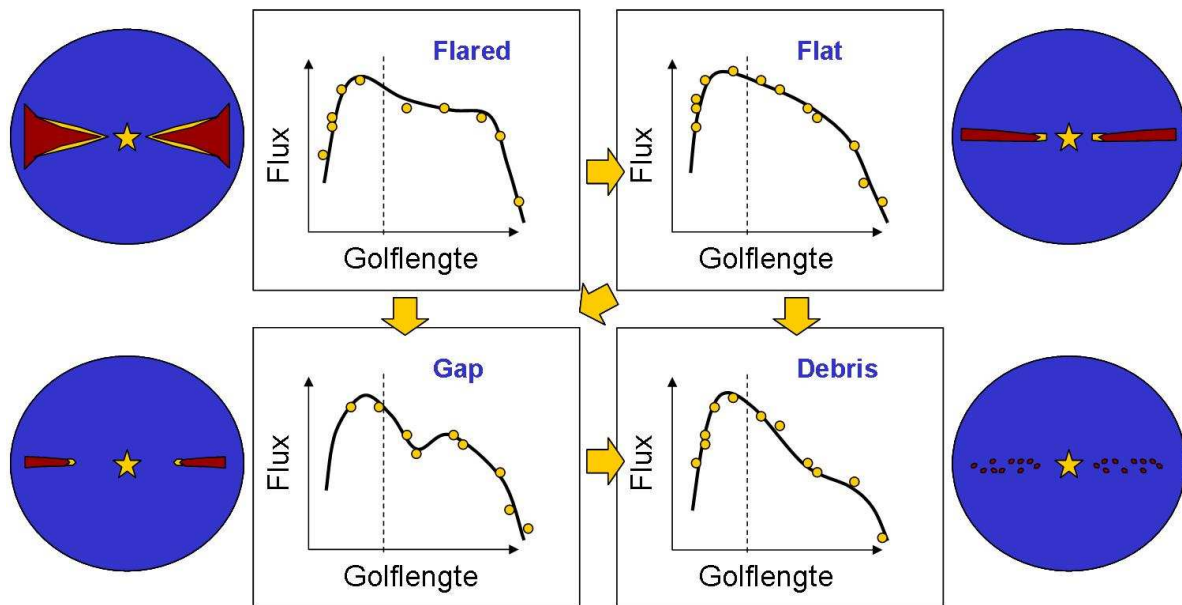


**Figuur 5** — Een kunstenaarsimpressie van de oorspronkelijke visie voor de Atacama Large Millimeter / submillimeter Array (ALMA), gelegen op het Chajnator platform in de Atacama woestijn in Chili. ALMA wordt nu klaar gemaakt voor gebruik en zal eind 2011 haar eerste resultaten prijs geven, als de eerste 16 van de geplande 66 antennes in gebruik worden genomen. (Credit: ESO)

terwijl de millimeter golven waar we in dit proefschrift bij stil staan tot de straling behoort met langere golflengtes. Alle voorwerpen zenden zelf straling uit, afhankelijk van hun temperatuur. In Taurus variëren de protoplanetaire schijven in temperatuur van 10 K ( $-263\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in het middenvlak tot 500 K ( $226\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aan het oppervlak. Dit houdt in dat het grootste gedeelte van de straling die de schijf uitzendt in het millimeter gebied zal zijn.

Om straling met langere golflengtes waar te nemen zijn ook grotere telescopen nodig, als we dezelfde resolutie of mate van detaillering willen halen als mogelijk is in het zichtbare licht (zie Figuur 3). Ter vergelijking: de grootste optische telescopen zijn ongeveer 8–10 meter in doorsnee en de Hubble Ruimte Telescoop heeft een spiegel met een diameter van 2,4 meter. De JCMT millimeter telescoop op Mauna Kea in Hawaï (zie Hoofdstuk 2) heeft daarentegen een schotel met een doorsnede van 15 meter, terwijl de IRAM telescoop op Pico Veleta in Spanje (Hoofdstuk 6) met zijn 30 meter doorsnee de op een na grootste millimeter schotelantenne ter wereld is. Nog grotere telescopen bouwen die ook nog wendbaar zijn is een grote technologische uitdaging. In zowel Hoofdstuk 2 als 6 zijn de schijven die we met de genoemde schotels bestuderen niet opgelost, wat inhoudt dat we geen spatiële resolutie hebben en niet kunnen onderscheiden waar in de schijf precies de straling vandaan komt. Onze waarnemingen laten dus alleen de totale uitstoot aan straling van de schijf zien, zonder de fijnere details van waar de straling precies vandaan komt. Deze schotels zijn daarom erg geschikt voor grote waarneemprojecten, waarbij heldere schijven kunnen worden geïdentificeerd en onderzocht. Toch gaat een hoop informatie verloren in de data van deze telescopen, die slechts uit één enkele schotel bestaan. Zo kan niets worden gezegd over de verdeling van het stof en gas in de schijf, terwijl we in Sectie 2 juist hebben laten zien dat dit juist belangrijk is om te begrijpen welke processen de schijf kan ondergaan.

Daarom gebruiken we een speciale techniek, interferometrie, om een hogere resolutie te bereiken. Bij



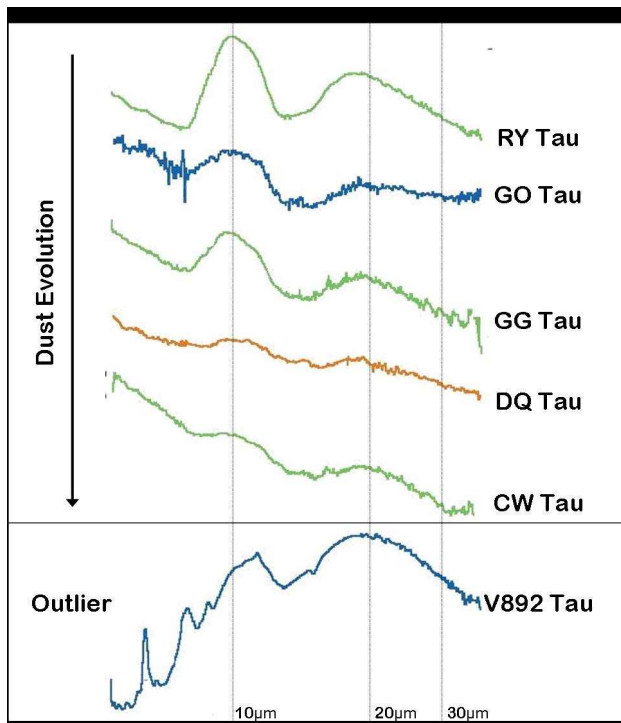
**Figuur 6** — Een schematische weergave van de flux (of helderheid) als functie van golflengte voor vier verschillende schijven. Vanaf linksboven en met de klok mee zien we een uitstaande schijf ('flared'), een afgeplatte schijf ('flat'), een schijf bestaande uit puin ('debris') en een schijf met gat in het centrum ('gap'). De punten in de grafieken zijn de metingen die we kunnen uitvoeren op een specifieke golflengte en de zwarte lijn is een fit aan deze meetpunten. Metingen links van de verticale stippellijn komen van de ster, en rechts (op langere, koelere golflengtes) van de schijf. Schijven met hogere massa, zoals de uitstaande en afgeplatte schijf zijn het helderst op langere golflengtes, terwijl schijven met een gat in het centrum meer straling op kortere golflengte uitzenden. Met pijlen is aangegeven wat mogelijke routes zijn voor de evolutie van de schijf, over de loop van enkele miljoenen jaren.

deze methode worden meerdere losse telescopen met elkaar verbonden, waardoor een virtuele telescoop ontstaat met een doorsnede van enkele tientallen meters tot soms zelfs honderden kilometers! Behalve hogere resolutie zijn er nog vele andere voordelen, zoals een verbeterde gevoeligheid en de mogelijkheid om compacte, diepgelegen concentraties van materiaal te detecteren. Voorbeelden van zulke interferometers zijn de CARMA array in oost-Californië, IRAM PdBI in de Franse Alpen, de SMA op Mauna Kea in Hawaï en de NMA in Japan. De Atacama Large Millimeter / submillimeter Array (ALMA) is de volgende generatie van interferometers, en zal de enige millimeter interferometer op het zuidelijk halfrond zijn. ALMA is op dit moment in opbouw (zie Figuur 5 voor een kunstenaarsimpressie) en zal een tot 25 keer betere resolutie halen dan de huidige interferometers, in slechts een fractie van de nu nog nodige waarnemingsduur.

### 3.2 Stof

Hoewel het gas het grootste gedeelte van de massa van de schijf voor zijn rekening neemt (zie Sectie 2), levert het stof de belangrijkste bijdrage aan de straling die de schijf uitzendt op millimeter golflengtes. Een stofdeeltje dat straling van de centrale ster opvangt, zendt deze straling weer uit met een karakteristieke golflengte, die bepaald wordt door zijn eigen temperatuur, afmeting en emissievermogen. De totale straling van alle stofdeeltjes vormt een spectrum van flux per golflengte, dat we het stof continuüm noemen (zie Figuur 6). Dit stof continuüm, dat van het nabije infrarood tot radiogolflengtes loopt,





**Figuur 7** — De  $10\mu\text{m}$  stralingspiek van silicaat in 6 verschillende schijven in de Taurus stervormende wolk, waargenomen op nabij-infrarood golflengtes door de Spitzer Ruimte Telescoop (Credit: Kessler-Silacci et al. 2006). Van boven naar beneden neemt de hoeveelheid kleine stofdeeltjes aan de oppervlakte van deze schijven af, zoals bepaald door de afname in helderheid van de stralingspiek. De minder steile helling van de grafiek suggereert dat dit komt doordat de stofdeeltjes in omvang toenemen en zich in de schijf nestelen, in plaats van vernietigd te worden door verdamping.

is één van de makkelijkst te verkrijgen metingen om een schijf te kunnen classificeren. Daar komt bij dat als we meten hoeveel licht wordt uitgezonden, wat bepaald wordt door de centrale ster, dan kunnen we hieruit opmaken wat de temperatuur en dichtheidsverdeling van het stof in de proto-planetaire schijf zijn. In Figuur 6 zien we dat grotere schijven meer straling uitzenden, wat hen helderder maakt op grotere golflengtes. Dit verband is belangrijk om schijven te kunnen identificeren die grote hoeveelheden circumstellair gas en stof bevatten. Als we corrigeren voor de afstand tot de schijf (objecten die ver weg staan lijken zwakker), dan moeten de helderste schijven het meeste stof bevatten.

Behalve de structuur van de gehele schijf, kunnen we ook uit het stof continuüm opmaken wat de afmetingen van de individuele stofdeeltjes zijn. Dit is belangrijk om te kunnen bepalen in welk stadium van planeetvorming de schijf zich bevindt. Stofdeeltjes beginnen typisch als microdeeltjes (met 1 micrometer =  $1\mu\text{m} = 10^{-6}$  meters), die gemiddeld zo'n 100 keer kleiner zijn dan de doorsnede van een menselijke haar. Door het stof continuüm op millimeter golflengtes te bestuderen zijn sterrenkundigen tot de ontdekking gekomen dat stofdeeltjes in protoplanetaire schijven afmetingen hebben van enkele centimeters. Als stofdeeltjes nog meer groeien wordt het lastiger om ze te detecteren, omdat ze minder straling uitzenden en alleen op steeds langere golflengtes. Zo weten we dat stofdeeltjes in schijven inderdaad in grootte toenemen, omdat een deel van de straling van de schijf zich naar langere golflengtes heeft verplaatst. Dit kunnen we nauwkeuriger vastleggen door op millimeter golflengtes de helling te meten van het stof continuüm (ofwel, hoe snel valt de zwarte lijn in Figuur 6 af als functie van golflengte).

Behalve het stof continuüm kunnen we ook de stralingspiek van silicaat ( $\text{SiO}$ ) gebruiken, die veroorzaakt wordt door de vibratie van de band die het silicium (S) en zuurstof (O) bij elkaar houdt in het  $\text{SiO}$  molecuul. De stofdeeltjes die deze piek veroorzaken moeten verhit zijn tot een temperatuur van ongeveer 500 K ( $226^\circ\text{C}$ ). Deze stofdeeltjes moeten zich dus aan het oppervlak van de schijf bevinden, dicht bij de centrale ster. Dit zijn ook de kleinste stofdeeltjes, aangezien grotere stofdeeltjes niet goed verhit kunnen worden en dus eerder straling op langere golflengtes zullen uitzenden. De  $10\mu\text{m}$  stralingspiek is dus minder prominent aanwezig als de kleinste stofdeeltjes uit de bovenste laag van de schijf verdwenen zijn,

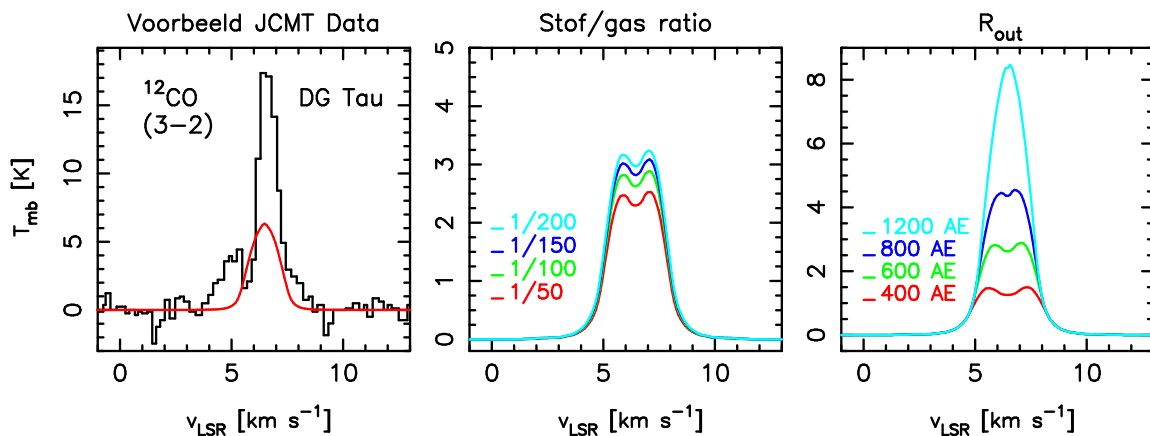
ofwel doordat ze in omvang zijn toegenomen, ofwel doordat ze verdampt zijn door de straling van de ster (zie Figuur 7). Om te bepalen welke van deze twee processen domineert (groei of vernietiging), meten we de helling van het mid-infrarode spectrum, net zoals we dat voor het stof continuüm in het millimeter gebied deden. Een kleinere helling geeft aan dat het stof zich in het middenvlak van de schijf heeft genesteld, als gevolg van de groei van de stofdeeltjes. Dit leidt tot het platter worden van de stofschijf. Het gas hoeft het stof hier echter niet in te volgen.

Aangezien er verscheidene modellen voor het gedrag van stof beschikbaar zijn in de literatuur, hebben we in dit proefschrift ons niet toegelegd op het herhalen van de studies naar stof waarnemingen. In plaats daarvan willen we het moleculaire gas in de schijven bestuderen, en zullen alleen in die context de resultaten van het onderzoek naar stof bespreken.

### 3.3 Gas

Het moleculaire gas in proto-planetaire schijven is een stuk lastiger waar te nemen dan de stof deeltjes. Maar zoals we hierboven al hebben besproken, maakt het gas het grootste deel uit van de schijf en is het een belangrijk ingrediënt voor de vorming van gasplaneten, zoals Jupiter en Saturnus. Het meest voorkomende molecuul in de schijven, en in het hele Heelal, is moleculair waterstof ( $H_2$ ). Helaas zorgt de symmetrische structuur (twee samengebonden waterstofatomen) van dit molecuul ervoor dat het geen straling produceert door rotatie-energie die we kunnen oppikken in het millimeter gebied. In plaats van  $H_2$  gebruiken we daarom koolstofmono-oxide (CO) als een indicator voor het koude gas. Dit is het op één na meest voorkomende molecuul in het heelal, hoewel er 10.000 keer minder CO moleculen dan  $H_2$  moleculen zijn. Daar staat tegenover dat het wel een groot aantal sterke rotatie lijnen heeft op millimeter golflengtes, wat het één van de geschiktste moleculen maakt om koud gas in schijven waar te nemen.

In tegenstelling tot stofdeeltjes zendt gas licht uit op specifieke golflengtes, die we emissielijnen noemen. Iedere emissielijn in het millimeter gebied hoort bij één specifieke rotatie-energie. Ieder molecuul heeft een beperkt aantal energieniveaus, en verschillende types (of soorten) moleculen hebben verschillende energieniveaus en dus verschillende karakteristieke golflengtes. De energie van een molecuul neemt toe door botsingen met andere moleculen of stofdeeltjes in de schijf, waardoor het naar een hoger energieniveau kan worden gebracht. Deze energie raken ze ook snel weer kwijt door terug te vallen naar een lager energieniveau, waarbij ze straling uitzenden op een golflengte die gelijk is aan het



**Figuur 8** — Modellen van spectra die laten zien wat voor invloed de verandering van één parameter heeft op het voorspelde lijnprofiel van een onopgeloste schijf. Van links naar rechts zien we (met de oorspronkelijk waarde tussen haakjes): een voorbeeld van een JCMT waarneming met bijdrage van een naburige systeem inclusief onze beste fit aan een theoretisch schijf model; variatie van de stof/gas ratio (1/100); en variatie van de doorsnede van de schijf (600 AE).

energieverschil tussen de twee niveaus. Om een sterke emissielijn te kunnen produceren moeten de moleculen zich in een omgeving bevinden met een geschikte combinatie van dichtheid en temperatuur. Dit houdt in dat we specifieke gebieden in de schijf kunnen bestuderen door naar verschillende moleculen of door naar verschillende emissielijnen van eenzelfde molecuul te kijken. We kunnen ook bepalen hoeveel gas van een bepaald molecuul aanwezig is, door te kijken hoe helder de bijbehorende emissielijnen zijn.

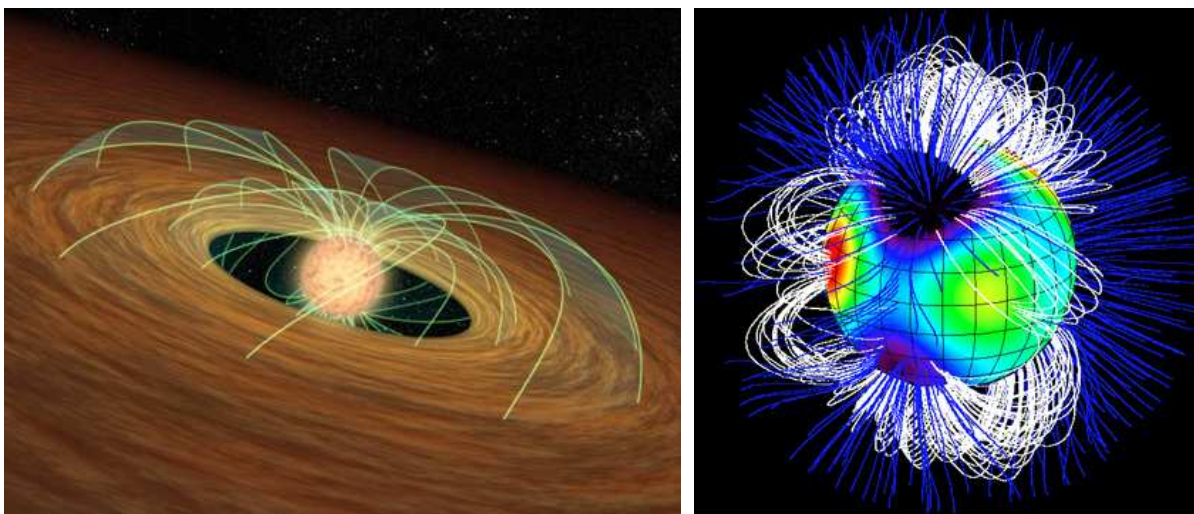
Andere eigenschappen van de schijf kunnen echter ook invloed hebben op de helderheid van een lijn. Daarom hebben we theoretische modellen nodig die voorspellen hoe de lijnprofielen van verschillende schijven eruit zien. In Figuur 8 laten we zien wat de helderheid en de vorm van de emissielijn ons kan vertellen over het moleculaire gas in de schijf. Deze modellen zijn opgesteld voor data van één schotel waardoor de schijf niet opgelost is, maar we kunnen toch informatie over de dichtheidsverdeling, de grootte en de inclinatie van de schijf uit het profiel halen. Maar als we deze parameters afzonderlijk in de modellen aanpassen, zien we dat ze eenzelfde effect op het lijnprofiel kunnen hebben. Hierdoor kunnen we bijvoorbeeld niet gemakkelijk onderscheid maken tussen een grotere schijf (grote  $R_{\text{out}}$ ) met een lagere stof/gas verhouding en een kleinere schijf (kleine  $R_{\text{out}}$ ) met een hogere stof/gas verhouding. Daarom willen we interferometrie gebruiken om de schijf op te lossen, waarmee we in dit voorbeeld de afmetingen van de schijf direct kunnen bepalen. Opgeloste waarnemingen zijn dus belangrijk, maar zoals al eerder aangegeven, worden ze nu nog begrensd door de gevoeligheid van de instrumenten waarmee we werken. Daarom richten sterrenkundigen zich vooral op de helderste objecten die ze vinden door studies met enkele schotels. Dit proefschrift bevat beide soorten waarnemingen: grote studies met een enkele schotel en gedetailleerde waarnemingen van enkele van de helderste objecten in Taurus.

### 3.4 Relativistische elektronen

Eén van de belangrijkste eigenschappen van de millimeter straling rond T Tauri sterren is dat deze vrijwel constant is. Dit nemen we aan als we de emissie van het stof continuüm gebruiken om de totale hoeveelheid en de verdeling van het stof rond de ster te bepalen (zie Sectie 3.2 en Figuur 6), aangezien veranderingen in de stof eigenschappen miljoenen jaren in beslag nemen. Het kwam daarom als een complete verrassing toen tijdens één van onze 8 uur durende waarnemingen één van onze bronnen plotseling 27 keer in helderheid toenam in slechts een paar uur tijd (Hoofdstuk 4). Een vergelijkbaar verschijnsel was pas drie keer eerder waargenomen. Deze plotselinge en ongewone toename in helderheid kan worden toegeschreven aan synchrotron straling: straling die uitgezonden wordt door elektronen die langs magnetische veldlijnen spiraliseren met snelheden vergelijkbaar met de lichtsnelheid. Vanwege hun zeer hoge snelheid worden deze elektronen ‘relativistisch’ genoemd.

Alle lage-massa sterren, inclusief onze eigen zon, hebben een magnetisch veld met veldlijnen die van de magnetische noordpool van de ster naar de magnetische zuidpool lopen (zie Figuur 9). In gecompliceerdere gevallen kunnen de veldlijnen ook van een magnetische noordelijke ankerpunt naar een magnetische zuidelijke voetstap leiden. Elektronen die ingevangen worden door deze veldlijnen kunnen heen en weer spiraliseren van de ene pool naar de andere (of van de ene voetstap naar de andere), terwijl ze synchrotron straling uitzenden met een karakteristieke golflengte die omgekeerd evenredig is met hun snelheid. Zo zenden langzamere elektronen straling uit op langere radio-golflengten dan snellere elektronen. Hierdoor is synchrotron straling een veel voorkomend verschijnsel voor radio, maar zeldzamer in het millimeter gebied. De verdeling van snelle en langzame elektronen is een continuüm, wat ervoor zorgt dat de synchrotron straling in een breed spectrum wordt waargenomen, vergelijkbaar met het stof continuüm in Sectie 3.2, in tegenstelling tot de gas emissielijnen van Sectie 3.3.

Door de synchrotron straling van de zon te bestuderen kunnen we de grootte van de magnetische veldlijnen afschatten die de elektronen gevangen houden. Deze lussen worden in verband gebracht met zonnevlammen, die optreden als magnetische veldlijnen op het oppervlak van de zon elkaar snijden en gedwongen worden te hergroeperen. Dit kan alleen gebeuren als de veldlijnen in tegengestelde richting



**Figuur 9** — Links: kunstenaarsimpressie van stellaire magnetische veldlijnen in interactie met de circumstellaire schijf. (Credits: NASA / JPL-Caltech / R. Hurt van SSC). Rechts: een topografische weergave van de magnetische veldlijnen rond de ster  $\tau$  Scorpio. Open veldlijnen laten toe dat geladen deeltjes, zoals elektronen en geïoniseerde moleculen, uit het systeem ontsnappen met behulp van sterwinden. Dit is ook een manier om een schijf rond een ster te laten verdwijnen. Gesloten veldlijnen geven aan waar geladen deeltjes vastgehouden kunnen worden vlak bij het oppervlak van de ster. (Credits: ESPaDOnS / CFHT).

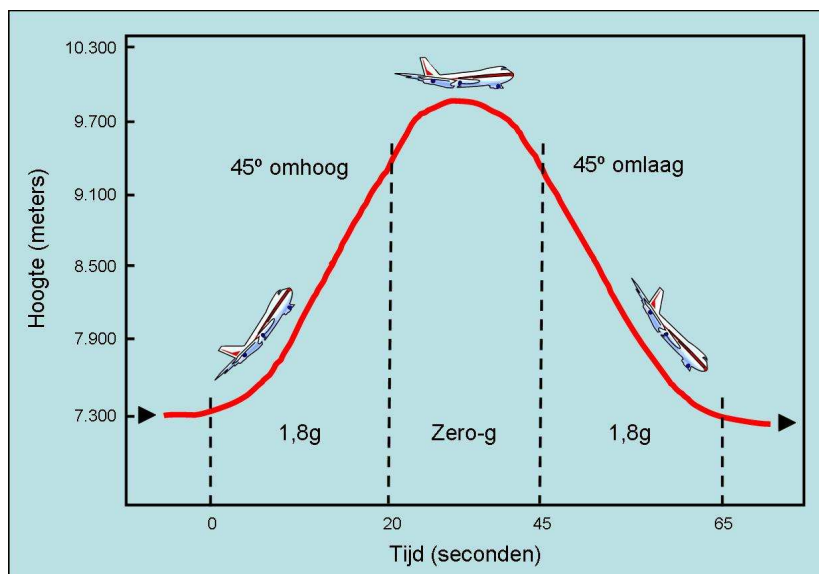
lopen, omdat ze elkaar anders afstoten. Als de veldlijnen hergroeperen komt een grote hoeveelheid magnetische energie vrij, die gebruikt wordt om de elektronen in de buurt van de lus te versnellen. De elektronen verliezen vervolgens snelheid doordat ze energie kwijtraken in de vorm van synchrotron straling, totdat ze geen energie meer over hebben.

Dit proces vindt plaats op de oppervlakken van alle lage-massa sterren, inclusief sterren die zich nog aan het vormen zijn. Grote uitbarstingen van millimeter straling zijn echter zeldzaam, en worden in verband gebracht met reusachtige veldlussen, veel groter dan de typische lussen die we op de zon zien. Door deze uitbarstingen te bestuderen kunnen sterrenkundigen meer leren over de magnetische velden rond andere sterren dan de zon. Voor de studie van proto-planetaire schijven—het onderwerp van dit proefschrift—is het interessant te weten hoe vaak vergelijkbare uitbarstingen met lagere intensiteit, zonder dat we het doorhebben, onze millimeter metingen kunnen beïnvloeden en wat voor effect de bijbehorende hoog-energetische ultraviolette en röntgen stralingspieken op de chemie van de schijf kunnen hebben.

### 3.5 In het lab

Een andere manier om planeetvorming te bestuderen is door het laboratorium in te duiken. Hier moeten we de eigenschappen en omgeving van een proto-planetaire schijf simuleren, waaronder een hoog vacuüm, extreem lage temperaturen en een verminderd zwaartekrachtsveld. Daarnaast moeten de fysische processen die we willen bestuderen kleiner zijn dan het laboratorium zelf. In dit proefschrift bespreken we de fysische uitdaging om stofdeeltjes groter te laten groeien dan enkele centimeters. Tot zover zijn theoretische studies er nog niet in geslaagd te verklaren hoe stofdeeltjes groter kunnen worden. Met een parabolische vlucht manoeuvre kunnen we gewichtsloosheid simuleren voor periodes van 22 seconden (zie Figuur 10), wat de langst mogelijke periode is van verminderde zwaartekracht die we kunnen bereiken zonder de ruimte in te gaan. In plaats daarvan blijven we op een vlieghoogte die door commerciële vliegtuigen wordt gebruikt. In deze 22 seconden van gewichtsloosheid laten we stofdeeltjes met afmetingen van enkele millimeters op elkaar botsen en bestuderen we het resultaat van die botsingen. Een





**Figuur 10** — Een schematische voorstelling van het verloop van een parabolische vlucht, zoals uitgevoerd door de Europese Ruimtevaart Organisatie (European Space Agency) ESA. Een parabolische vlucht is een methode om de nul-zwaartekracht ('zero-gravity') situatie in proto-planetaire schijven na te bootsen, zodat in intervallen van 22 seconden experimenten uitgevoerd kunnen worden om de processen te testen die stofdeeltjes laten groeien in deze schijven.

dergelijk experiment op de grond uitvoeren is niet mogelijk, omdat de stofdeeltjes met lage snelheden moeten botsen, zoals ze dat ook in de proto-planetaire schijf doen. Op aarde zouden ze echter door het zwaartekrachtsveld al op de grond zijn gevallen voordat de botsing plaats zou hebben gevonden. Op deze manier kunnen we in onze eigen laboratoria dezelfde processen van planeetvorming bestuderen, die verantwoordelijk kunnen zijn geweest voor de vorming van de aarde en de andere planeten in ons eigen zonnestelsel.

## 4 Dit proefschrift

Het onderwerp van dit proefschrift is de straling in het millimeter gebied die door proto-planetaire schijven rondom jonge vormende sterren wordt uitgezonden. Dit proefschrift bestaat uit drie delen.

In **deel I** bestuderen we de thermische straling van het stof en het gas in verschillende proto-planetaire schijven in Taurus. We kijken wat er met het gas in de schijven gebeurt als de stofdeeltjes in grootte toenemen en zich dieper in de schijven nestelen. In **Hoofdstuk 2** bespreken we bijvoorbeeld een groot waarnemingproject met een enkele schotel, waarmee we het moleculaire gas via  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HCN}$  en  $\text{CN}$  bestuderen. Terwijl de stofdeeltjes groeien en zich in het middenvlak van de schijf nestelen, zou het gas aan de oppervlakte van de schijf meer blootgesteld moeten worden aan de hoog-energetische UV en röntgenstraling die uitgezonden wordt door de centrale ster. Daarom verwachten we dat de hoeveelheid  $\text{HCO}^+$  en  $\text{CN}$  toeneemt in de schijf ten koste van  $\text{HCN}$ , omdat  $\text{HCN}$  zich onder invloed van UV straling in een waterstofatoom en een  $\text{CN}$  molecuul splitst. Onze waarnemingen van 21 proto-planetaire schijven in Taurus laten echter geen verband zien tussen de gas moleculen en de eigenschappen van het stof. De eigenschappen en de evolutie van de gebieden in de schijf waar de emissielijnen van het gas vandaan komen ( $R \geq 100$  AE) lijken dus niet samen te hangen met de gebieden in de schijf waar we het stof waarnemen ( $R \lesssim 30\text{--}100$  AE). In **Hoofdstuk 3** presenteren we interferometrie waarnemingen van  $^{12}\text{CO}$  van vijf stoffige schijven in Taurus. We vinden  $\text{CO}$  emissie in drie van de vijf schijven, maar onze

waarnemingen kunnen niet alle straling uit de schijf vastleggen. CO is namelijk niet alleen het op één na meest voorkomende molecuul in de schijven, maar ook langs onze gezichtslijn, ofwel in de ruimte tussen ons en de schijven. Hierdoor kan het CO langs de gezichtslijn de straling van de schijven onderscheppen en verstrooien. Dit effect is het grootst voor de lagere-energie niveaus die het makkelijkst te bezetten zijn, zelfs in gebieden met lage dichtheid en temperatuur, zoals in interstellaire moleculaire wolken. We waarschuwen daarom dat de waarnemingen van de lagere rotatie lijnen van CO het gas in de schijven niet volledig traceren, en dus geen goede indicator zijn voor de evolutie van het gas in de schijven. We raden daarom aan voor toekomstige waarnemingen hogere rotatie overgangen van CO te bestuderen.

**Deel II** van dit proefschrift ontstond terwijl we de waarnemingen voor deel I aan het verzamelen waren en legt zich toe op de ontdekking van tijdelijke uitbarstingen in het millimeter gebied, die niet geassocieerd zijn met het stof of het gas, maar met relativistische elektronen die rondom de magnetische veldlijnen van de centrale ster spiralisieren. In **Hoofdstuk 4** bespreken we de ontdekkingen van een uitzonderlijke uitbarsting bij de dubbelster DQ Tau. In **Hoofdstuk 5** bevestigen we vervolgens de zich herhalende eigenschappen van deze uitbarstingen bij DQ Tau en verklaren we deze als de botsing van de stellaire magnetische velden, wanneer de twee sterren elkaar naderen in hun baan. De uitbarstingen treden op omdat de sterren elkaar erg dicht naderen, maar ook omdat ze vervolgens weer op grote afstand van elkaar komen te staan. Dit houdt in dat hun magnetische velden gecombineerd moeten worden op het punt van dichtste nadering, maar ook weer gesplitst moeten worden als de twee sterren weer van elkaar weg bewegen. Iedere keer dat de velden zichzelf moeten reorganiseren, eerst door te combineren en daarna door te splitsen, treedt een uitbarsting op die sterk genoeg is om op millimeter golflengtes te worden waargenomen. In **Hoofdstuk 6** bestuderen we daarom het optreden van deze millimeter uitbarstingen voor een groter aantal jonge dubbelsterren met vergelijkbare banen als DQ Tau. We vinden dat een andere dubbelster, UZ Tau E, tekenen laat zien van een vergelijkbare activiteit. Onze statistieken waarschuwen tegen het traditionele idee van een constant millimeter spectrum en laten zien dat we de millimeter variëteit van jonge sterren beter moeten vastleggen, zeker als we afhankelijk zijn van een enkele fluxmeting in het millimeter gebied om de eigenschappen van het stof en de schijf te bepalen, zoals vaak het geval is voor proto-planetaire schijven.

In **deel III** van dit proefschrift bespreken we een laboratorium opstelling om de aangroei van stofdeeltjes in proto-planetaire schijven op een directe manier te bestuderen. De huidige theorieën voor de vorming van planeten laten stofdeeltjes groeien door botsingen, wat in theoretische modellen en in experimenten in het lab goed en snel werkt voor de kleinste stofdeeltjes. Wat grotere stofdeeltjes zorgen echter voor problemen. Om een rotsachtige planeet zoals de aarde te vormen, of de kern van een gasplaneet zoals Jupiter, moet het stof in de schijf aangroeien tot deeltjes groter dan enkele centimeters. We bevestigen echter met onze experimenten de voorspellingen van theoretische modellen, dat stof- en ijsdeeltjes met afmetingen van enkele centimeters bij snelheden van 1 m/s niet effectief in grootte toenemen door aan elkaar te plakken na botsingen. We vonden dat bij onze experimenten ongeveer 90% van de botsingen gevolgd werd door het terugstuiteren van de deeltjes, terwijl bij 10% versplintering optrad. Deze laboratorium resultaten suggereren samen met recentelijk vervolggexperimenten en aanvullende theoretische modellen, dat een alternatieve methode moet worden gebruikt om keien van enkele meters doorsnee te krijgen, die vervolgens kunnen doorgroeien tot grotere afmetingen door de aantrekkende werking van de zwaartekracht.

In de drie delen van dit proefschrift komen drie belangrijke onderwerpen in de studie naar proto-planetaire schijven aan bod: 1. De evolutie van stof en gas in de schijven en hoe deze met elkaar verband houden, zoals we kunnen opmaken uit waarnemingen van hun thermische straling; 2. De eigenschappen en het voorkomen van tijdelijke niet-thermische uitbarstingen op millimeter golflengtes van relativistische elektronen, en wat deze uitbarstingen ons kunnen vertellen over de eigenschappen van de magnetische velden rondom jonge sterren; 3. Het aangroeien van stofdeeltjes door botsingen in proto-planetaire schijven. Dit werk is van belang voor toekomstig onderzoek met ALMA, de nieuwste revolutie op het

gebied van astronomische instrumentatie en één van de ambitieuste projecten ooit ondernomen binnen de sterrenkunde. Deze nieuwe schotels zullen de variaties van radiële snelheden van het gas en de chemische samenstellingen van de schijven beter in kaart brengen, waardoor we betere en vollediger modellen van de schijven zullen kunnen opstellen voor zowel het stof als het gas, voortbordurend op ons werk in deel I van dit proefschrift. De hogere gevoeligheid van ALMA zal ons ook in staat stellen hogere rotatie overgangen in moleculen waar te nemen, die weliswaar minder helder zijn, maar ook betere indicatoren zijn voor de totale gasinhoud van de schijf. ALMA zal bovendien de benodigde waarneemtijd verminderen voor grote waarneemstudies over meerdere tijdperiodes, waardoor we een beter overzicht zullen krijgen van de variabiliteit in de millimeter straling van jonge sterren, zoals we in deel II hebben besproken. Tenslotte gaven we in deel III van dit proefschrift aan dat een model voor planeetvorming waarin stofdeeltjes door botsingen uitgroeien tot deeltjes van enkele meters in doorsnee zowel in theorie als in de praktijk voor uitdagingen staat. Er is goede hoop dat we met ALMA de effecten van getijdenwerking door proto-planetten in de schijf kunnen waarnemen, wat ons meer aanwijzingen zal leveren voor de huidige theorieën voor planeetvorming.