



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Polycyclic aromatic hydrocarbons in disks around young solar-type stars

Geers, V.C.

Citation

Geers, V. C. (2007, October 23). *Polycyclic aromatic hydrocarbons in disks around young solar-type stars*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/12414>

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/1887/12414>

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

Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen in Schijven rond Jonge Zon-type Sterren

STUDIE VAN STER- EN PLANEETVORMING

Het onderzoek in dit proefschrift betreft de vorming van sterren en planeten. Binnen dit onderzoek zijn er nog veel vragen onbeantwoord. Hoeveel zon-type sterren hebben een circumstellaire schijf? Wat is de typische grootte van deze schijven en hoeveel massa bevindt zich hier in? Blijven deze schijven lang genoeg bestaan voor de vorming van planeten? Hoe groeien de kleine stofdeeltjes naar grote rotsblokken? Waaruit bestaan de stofdeeltjes in deze schijven, die de bouwstenen van toekomstige planeten zijn, en hoe evolueert de samenstelling van dit stof?

In de afgelopen 20 jaar is het onderzoek naar het ontstaan van lage massa sterren zoals onze eigen Zon één van de snelst ontwikkelende gebieden in de moderne sterrenkunde geworden. Met de komst van telescopen die zeer gevoelig zijn voor mid-infrarode straling, op de Aarde en in de ruimte, kunnen wij nu voor het eerst deze lichtzwakke jonge sterren waarnemen in nabij gelegen stervormingsgebieden.

In dit proefschrift bestuderen wij het stof rondom deze jonge zon-type sterren, en in het bijzonder een specifiek soort stof, namelijk de Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (afgekort PAKs), in het Engels aangeduid als Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). PAKs zijn een familie van grote moleculen, ook wel beschouwd als kleine stofdeeltjes, die alom waargenomen worden in nabij gelegen stervormingsgebieden.

In deze samenvatting wordt eerst een beschrijving gegeven van ons huidige beeld van de vorming van lage massa zon-type sterren en de planetenstelsels er omheen, gevolgd door een samenvatting van de PAKs, hun molecuul structuur en hun typische eigenschappen. Vervolgens wordt in het kort aangegeven welke waarnemingen en modelleer methoden zijn gebruikt. Als laatste wordt een overzicht van de belangrijkste vragen en resultaten in dit proefschrift gegeven.

ONS HUIDIGE BEELD VAN LAGE MASSA STER- EN PLA-NEETVORMING

Sterren worden gevormd in grote wolken van waterstofgas en stof, met een massa tussen 100 en 1000 zonsmassa's. In het binnenste van deze wolken is het koud (~ 10 Kelvin ofwel -263° Celsius) en is de dichtheid relatief hoog (10.000 – 100.000 deeltjes per kubieke centimeter) vergeleken met de omliggende ruimte tussen de sterren. Deze wolken worden in stand gehouden door magneetvelden en turbulentie van het gas. Wanneer dit magneetveld zwakker wordt en/of de turbulentie afneemt kunnen er zich gebieden met een hogere dichtheid vormen. Deze gebieden met hogere dichtheid kunnen zich via de zwaartekracht samentrekken in kernen en verdere materie aantrekken in een proces wat accretie genoemd wordt. Gedurende deze accretie fase kan de kern groeien tot een massa van één tot enkele zonsmassa's, en wordt de gravitatie energie van de materie uitgezonden als straling. In de oorspronkelijke gaswolk is er vrijwel altijd geordende rotatie van de materie aanwezig. Deze rotatie veroorzaakt een middelpuntvliedende kracht op de invallende materie waardoor deze materie deels afgeremd wordt en in het vlak van rotatie een schijf vormt rondom de ster. In deze fase is de centrale protoster en diens circumstellaire schijf nog volledig omhuld door het gas en stof in de omliggende wolk (zie linkerpaneel van Figuur 7.1), en daardoor onzichtbaar bij alle golflengten (UV, visueel, infrarood) met uitzondering van het millimeter en radiogebied. Deze fase wordt de Klasse 0 fase genoemd en duurt relatief kort (binnen tienduizend jaar na het begin van de samentrekking van de kern).

Terwijl de materie van omliggende gaswolk, ofwel omhulsel, nog steeds invalt op de schijf en via de schijf verder naar de ster beweegt, kan er een sterke uitwaartse straalstroom van materie, genaamd 'jets', ontstaan in de polaire richtingen van de ster, loodrecht op het rotatievlak. Deze jets kunnen het deel van het omhulsel rond de rotatieas wegblazen en de aanwezigheid van jets is waargenomen als gaten in gaswolken en scherp gedefinieerde uitstromingen van gas bij hoge snelheden (zie middelste paneel Figuur 7.1). De accretie van materie binnenin de sterschijf richting de ster gaat gepaard met veel botsingen en gravitationele interactie welke het materiaal in de schijf opwarmen. Hierdoor gaat de schijf met toenemende lichtkracht zelf warmtestraling in het ver-infrarood uitzenden. Deze fase wordt de Klasse 0-I fase genoemd, en duurt ongeveer honderdduizend jaar. Gedurende deze fase wordt de straling van de centrale ster en het warme stof in de schijf meestal nog steeds versluierd door het omliggende stof en gas.

Het is onvermijdelijk dat op een gegeven moment materie in het omhulsel op begint te raken en hierdoor komt er een einde aan de inval van materie. Vervolgens zal de accretie van materie binnenin de schijf richting de ster ook sterk afnemen, waardoor de lichtkracht van de sterschijf weer afneemt. De sterwind kan nu materie wegblazen in alle richtingen. De circumstellaire schijf met diens veel hogere dichtheid ondervindt in het begin weinig invloed van de sterwind. Door het uitwaaien van het omliggende gas en stof wordt geleidelijk de centrale ster en schijf zichtbaar bij alle golflengten (zie rechterpaneel Figuur 7.1).

Dit markeert de start van de Klasse II fase welke ongeveer één tot tien miljoen jaar

duurt. Gedurende deze fase is de centrale ster grotendeels gevormd en trekt de ster verder samen onder zwaartekracht totdat de druk en temperatuur in de kern hoog genoeg worden voor de start van kernfusie van eerst deuterium en daarna waterstof. Dit kernfusie proces produceert zoveel warmte en lichtstraling dat het tegendruk geeft aan de zwaartekracht zodat de samentrekking tot halt komt. Op het moment dat de ster in deze stabiele situatie is beland zegt men wel dat de ster is geboren, met leeftijd 0. Afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare waterstof, leeft de ster in deze fase tussen de tien miljoen en tien biljoen jaar.

Gedurende de Klasse II fase is de toevoer van materie aan de schijf gestopt en begint de materie in de schijf door verschillende processen verwijderd te worden. Straling van de centrale protoster verwarmt het gas en stof in de bovenlagen van de schijf, waardoor stof verdampt en er een wind van materie van de schijf beweegt. Tegelijkertijd kunnen de stofdeeltjes in de schijf door botsingen groeien tot centimeter grote steentjes. Wanneer stofgroei tot kilometer grote stofdeeltjes leidt spreken we van planetesimalen en deze kunnen door zwaartekracht meer massa beginnen aan te trekken en de lokale structuur van de schijf beïnvloeden. De grootste van deze planetesimalen kunnen uiteindelijk planeten vormen, en leiden tot gaten in hun baan in de circumstellaire schijf rondom de jonge ster. Deze gaten worden in sommige schijven waargenomen als de afwezigheid van de infrarood straling van warm stof en deze worden "koude schijven" genoemd. Het grootste deel van het stof is in deze fase inmiddels niet meer het oorspronkelijke stof wat op de schijf is ingevallen, maar eerder stofdeeltjes die geproduceerd zijn in de botsingen tussen grotere planetesimalen.

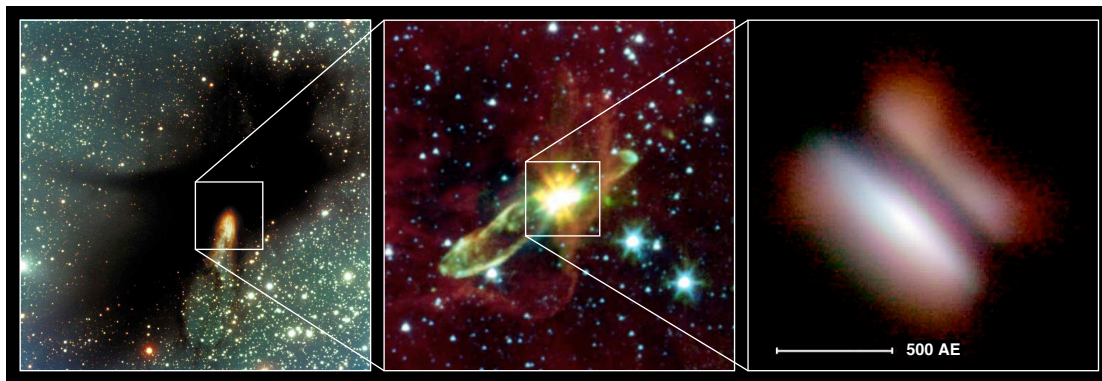
De combinatie van sterwind en stralingsdruk van de ster op de schijf veroorzaakt een erosie van de kleinste stofdeeltjes die nog niet gevangen zijn. Deze erosie verwijdert het resterende gas en stof totdat er uiteindelijk alleen een ster met een planetenstelsel overblijft. In dit proefschrift focussen wij voornamelijk op jonge sterren in de Klasse I en II fasen, tot aan de overgang naar de planetesimalen schijf.

POLYCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN

Structuur en straling van PAKs

PAKs zijn grote moleculen opgebouwd uit meerdere ringen van ieder zes koolstofatomen, met waterstof atomen aan de uiteinden. De molecuul structuur van een aantal PAKs is weergegeven in Figuur 1.1 op pagina 3. Omdat de koolstofatomen een aantal elektronenbindingen met elkaar delen worden deze ringen aromatische structuren genoemd. Op aarde komen PAKs voornamelijk voor als product bij verbranding van materiaal, oftewel roet.

PAKs worden voornamelijk geëxciteerd door ultra-violet (UV) straling. Absorptie van een UV foton resulteert in elektronische excitatie welke intern wordt omgezet in vibrationele energie. Vervolgens zenden de PAKs de energie in meerdere infrarood fotonen weer uit. Deze infrarood straling uit zich in zeer karakteristieke emissie banden bij bepaalde golflengten. De gelijktijdige aanwezigheid van deze specifieke banden in een infrarood spectrum kan gezien worden als een soort vingerafdruk en is een



Figuur 7.1: Links: Donkere koude wolk van gas en stof waar binnenin een ster aan het vormen is. Midden: infra-rood close-up van een jonge ster met jets, binnenin een gaswolk. Rechts: close-up van een schijf rondom een jonge ster, gezien vanaf de zijkant. AE is Astronomische Eenheid, de gemiddelde afstand tussen de Aarde en de Zon. Merk op dat deze plaatjes richting verschillende gebieden genomen zijn.

Credits: links: VLT image van Bok globule BHR 71 (J. Alves et al., ESO); midden: Spitzer IRAC image van lage massa protoster met jet, HH46 (NASA/JPL-Caltech/A. Noriega-Crespo (SSC/Caltech), Digital Sky Survey); rechts: Keck nabij-infrarood image van schijf rondom de jonge ster PDS 144N, (Perrin et al. 2006, ApJ, 645, 1272).

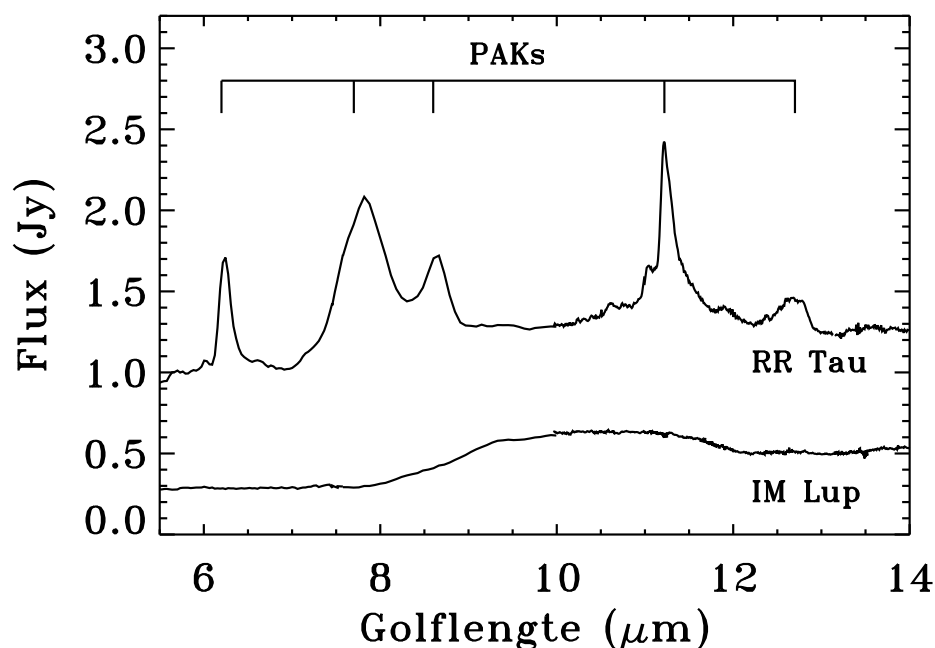
duidelijke maat voor de aanwezigheid van PAKs (zie Figuur 7.2). De grootte en de elektrische lading van PAKs kunnen de vorm en onderlinge verhouding van de sterkte van de PAK banden beïnvloeden. Grote PAKs verliezen de scherp gedefinieerde emissie banden, en zenden hun straling eerder in een brede ondiepe emissie band uit. Hierdoor kan de aanwezigheid van PAK emissie banden geïnterpreteerd worden als de aanwezigheid van relatief kleine stofdeeltjes. Daarnaast kan de onderlinge verhouding van de emissie lijnen gebruikt worden als een maat voor de lading van stof in bepaalde gebieden.

Evolutie en rol van PAKs in de ruimte

De karakteristieke emissie banden van PAKs zijn waargenomen in veel verschillende soorten gebieden in het heelal, waaronder de sterwinden rondom uitgestorven sterren, in andere sterrenstelsels, en in stervormingsgebieden.

Men denkt dat PAKs voornamelijk gevormd worden in de sterwinden van koolstofrijke sterren welke aan het einde van hun leven zijn gekomen. In deze wind geven de relatief hoge dichtheid, hoge temperatuur en hoge fractie van het aanwezige koolstof de juiste condities voor het vormen van de eerste koolstofringen die de bouwstenen vormen voor grotere PAK moleculen. De materie in de sterwind komt uiteindelijk terecht in de ruimte tussen de sterren genaamd het interstellair medium. PAKs zijn dan ook waargenomen in het interstellair medium, met name in de buurt van heldere sterren die voor voldoende UV zorgen om de PAKs aan te stralen.

Aangezien PAKs sterk lokaal verhit worden door de UV straling gedragen PAKs



Figuur 7.2: Spitzer mid-infrarood spectra van twee jonge sterren met schijven. De karakteristieke emissie banden van PAKs zijn alleen zichtbaar in richting de ster RR Tau.

zich anders dan de typische stofdeeltjes. Op grote afstanden van sterren, waar de intensiteit van het interstellaire stralingsveld laag is, is het meeste stof te koud om infraroodstraling uit te zenden. In deze gebieden kunnen PAKs, door UV absorptie, wel nog veel straling uitzenden in het infrarood.

PAKs spelen een belangrijke rol in de gebieden waar zij worden waargenomen. In het interstellaire medium dragen ze bij aan de temperatuur balans van de materie. Ze zijn een goede markering van de aanwezigheid van UV straling en daardoor indirect een goede indicator voor stervorming in gebieden waar de dichtheid erg hoog is. In de schijf rondom jonge sterren vormen ze een maat voor de sterkte van het stralingsveld in het oppervlakte van de schijf, en kunnen ze gebruikt om de structuur van de schijf te bepalen. Daarnaast kunnen PAKs ook de schijf beïnvloeden, bijvoorbeeld door na absorptie van UV-straling elektronen uit te zenden welke de gemiddelde elektrische lading van het lokale stof veranderen en het gas door botsingen kunnen verhitten.

Ook voor de chemie zijn PAKs belangrijk. In de ruimte is de dichtheid zo laag dat chemische reacties waarbij meer dan twee deeltjes nodig zijn eigenlijk niet voorkomen omdat botsingen tussen slechts twee deeltjes al heel uitzonderlijk zijn. Als een klein stofdeeltje met een groot oppervlak vormen PAKs een lokatie voor atomen om op vast te haken, waar atomen elkaar met grotere kans kunnen vinden voor chemische reactie.

DIT PROEFSCHRIFT

In dit proefschrift behandelen we de rol van PAKs in de omhulsels en schijven rondom jonge zon-type sterren. We behandelen daarbij de volgende vragen. Wat gebeurt er met PAKs in de vroege fase van stervorming, wanneer de protoster nog omhuld wordt door een wolk van gas en stof? Zijn PAKs aanwezig in de jonge, zich nog vormende lage massa zonnestelsels? Komt de straling van PAKs in deze bronnen van de omliggende gaswolk of van het materiaal in de circumstellaire schijf? Hoe groot zijn de moleculen zoals wij ze waarnemen in deze gebieden? Wat kunnen wij uit hun aanwezigheid leren over de schijfstructuur, de evolutie en over stofgroei?

We gebruiken in deze studie enkele van de meest moderne nieuwe infrarood spectrometers en camera's, welke in de afgelopen 3–10 jaar beschikbaar zijn gekomen, waaronder de ISAAC en VISIR instrumenten op de Very Large Telescope in Chili, en ook het IRS instrument aan boord van de NASA Spitzer Space Telescope.

In Hoofdstuk 2 presenteren wij de eerste studie met de Spitzer infrarode ruimtetelescoop naar de aanwezigheid van PAKs rondom jonge lage en middelzware jonge sterren. PAKs worden in slechts 4 van de 37 zon-type sterren gevonden ($\pm 11\%$), wat een lagere fractie is dan waargenomen richting middelzware sterren (54%). Uit berekeningen met stralingstransport modellen concluderen wij dat de abundantie van PAKs in deze bronnen minstens 10–100x lager moet zijn dan in het interstellair medium en dat bij deze abundantie onze waarnemingen niet gevoelig genoeg waren voor het waarnemen van PAKs rondom nog koudere ($T \leq 4200$) jonge sterren. De $11.2 \mu\text{m}$ PAK emissie lijn wordt het best waargenomen, terwijl de emissielijnen bij 7.7 en $8.6 \mu\text{m}$ in de meeste gevallen worden versluierd door de aanwezigheid van emissie van silicaten.

In Hoofdstuk 3 presenteren wij één van de eerste ruimtelijk opgeloste plaatjes van stof en PAKs in een schijf rondom een hele lage massa ster, van type M0, IRS 48. Deze ster is de laagste massa ster waarvoor PAKs zijn waargenomen. De PAKs zijn direct aanwezig in de sterschijf zelf, en diens aanwezigheid duidt op extra UV emissie van de centrale ster. Uit de plaatjes concluderen we verder dat er een gat in het binnenste deel van de schijf is gevormd waar de grootste stofdeeltjes verwijderd zijn, vermoedelijk door de aanwezigheid van een vormende planeet. Dit ogenschijnlijke gat in de stofpopulatie in het binnendeel van de schijf wordt opgevuld met PAK emissie, oftewel emissie van kleine stofdeeltjes. Deze ruimtelijke scheiding van kleine en grote stofdeeltjes duidt erop dat de twee stofpopulaties verschillend evolueren.

In Hoofdstuk 4 presenteren wij een studie naar de ruimtelijke verdeling van PAK emissie rondom protoplanetaire schijven. Hiervoor maken we gebruik van de hoge ruimtelijke resolutie van de ESO Very Large Telescope en de ISAAC, VISIR en NACO instrumenten. Uit de waarnemingen blijkt dat de PAK emissie wordt uitgezonden op kleine schaal van enkele tientallen tot ± 100 Astronomische Eenheden. Dit bevestigt dat de PAKs direct geassocieerd zijn met de schaal van de stofschijf en niet alleen toe te kennen zijn aan diffuse voorgrond emissie van de oorspronkelijke gaswolk waaruit de ster is ontstaan. Deze kleine schaal van ruimtelijke uitbreidheid van de PAK emissie bij 8.6 en $11.2 \mu\text{m}$ is consistent met grotere PAKs van ≥ 100 koolstof atomen.

In Hoofdstuk 5 presenteren wij de eerste spectroscopische studie met VLT-ISAAC en de Spitzer ruimtetelescoop naar de aanwezigheid van PAK emissie in de vroege fa-

se van lage massa jonge sterren, wanneer deze nog omgeven worden door een wolk van gas en stof (Klasse I). We vinden dat er in het overgrote deel van deze Klasse I bronnen (~97%) geen PAK emissie direct geassocieerd is met de centrale ster. Uit modelberekeningen concluderen wij dat de PAK abundantie in deze bronnen minstens een factor 10–20 lager moet zijn dan in het interstellair medium. Dit zou kunnen gebeuren doordat meerdere PAKs samengeklonterd zijn tot grotere PAKs en/of doordat PAKs in deze fase zijn uitgevroren op de ijslaagjes van stofdeeltjes.