

University of Groningen

Infrared emission features

Boersma, Christiaan

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2009

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Boersma, C. (2009). *Infrared emission features: probing the interstellar PAH population and circumstellar environment of Herbig Ae/Be stars*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

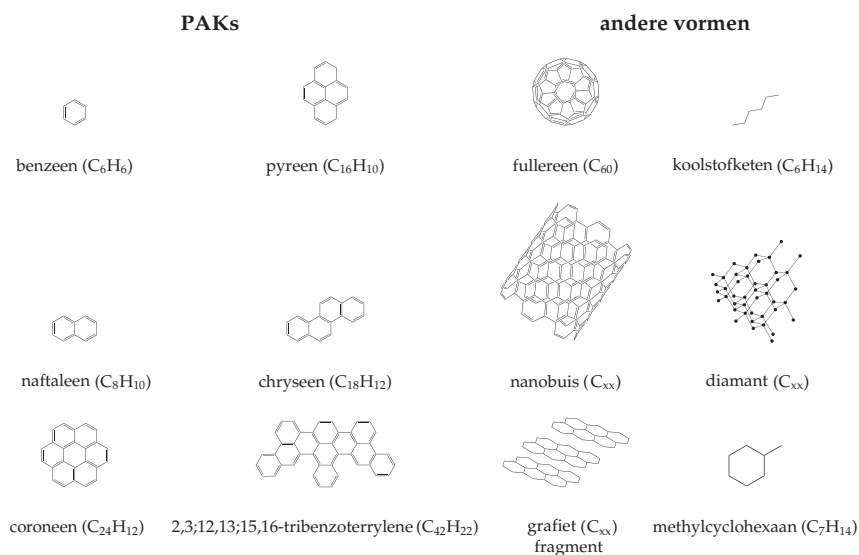
Nederlandse samenvatting

STOF

Dit proefschrift vertelt over stof, maar dan niet over het huis-tuin-en-keukenstof dat we allemaal wel kennen. Stof is in sterrenkundige context een breder begrip. Sterrenkundige stof kan grofweg in twee groepen worden ingedeeld. De eerste groep is opgebouwd uit silicaat; zand behoort onder andere tot deze groep. De tweede groep is opgebouwd uit koolstof. Koolstof is het zesde op rij meest voorkomende element in het Universum. Het wordt gevormd in het kernfusieproces dat plaats vindt in het binnenste van sterren. Koolstof vormt de basis voor een breed scala aan stoffen. Verschillende klassen van deze stoffen zijn te onderscheiden. Bekende, alledaagse, voorbeelden zijn o.a. roet, diamant en grafiet. Een bijzondere klasse van koolstofrijke stoffen bestaat uit de zogenaamde Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAKs). PAKs zijn moleculair stof, grote moleculen van gefuseerde zeshoekige ringen, in structuur vergelijkbaar met kippengaas. Op aarde zijn dit soort moleculen ondermeer te vinden in uitlaatgassen, de rook van kaarsen en aangebrand eten. Een paar voorbeelden van koolstofrijke stoffen en hun chemische structuur zijn te vinden in Figuur 6.1.

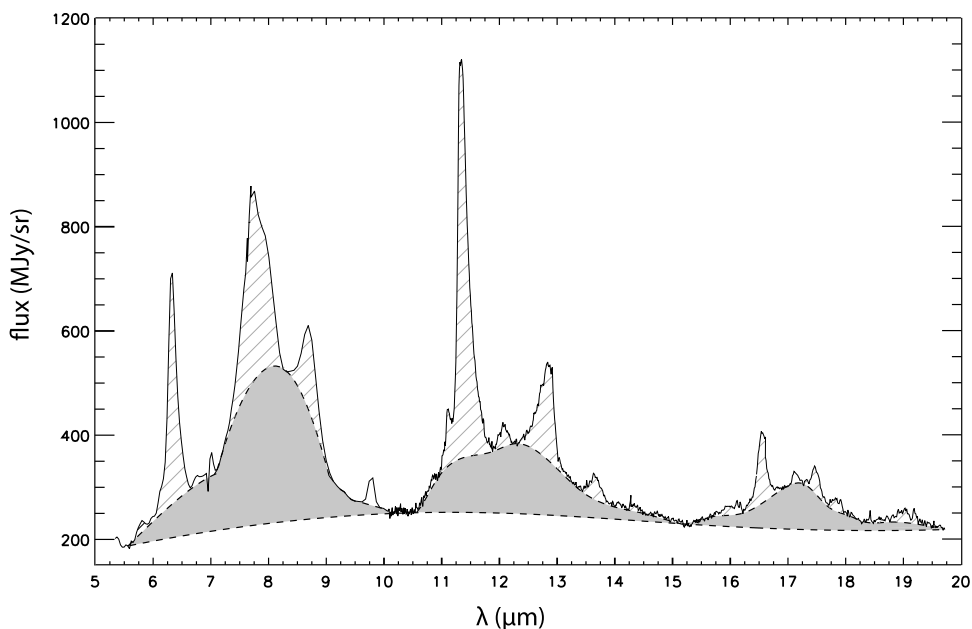
Sterrenkundige waarnemingen laten zien dat PAKs veelvoorkomend zijn in en rond een verscheidenheid aan astronomische objecten. Met name in het infrarood, licht dat zo rood is dat het menselijk oog het niet meer kan waarnemen, zijn deze PAKs goed te bestuderen. Eind jaren '70 en begin jaren '80, de begintijden van het infrarood tijdperk, werd duidelijk dat er veel viel te leren van spectra waargenomen met de toenmalige topklasse infrarood telescopen. Een spectrum zet de bestanddelen van licht uiteen in een grafiek. Eén manier om een spectrum te verkrijgen is door het licht door een prisma te leiden. Op de horizontale as van een spectrum staat vaak golflengte of frequentie, meestal aangegeven met de Griekse letter λ of ν . De bijbehorende eenheden zijn micron (μm) en Hertz (Hz) voor respectievelijk golflengte en frequentie. Op de verticale as staat de intensiteit, vaak aangegeven als F , in eenheden van Jansky (Jy). Het patroon waarmee pieken en dalen voorkomen, zogenaamde banden of profielen, vertelt welke stoffen aanwezig zijn. Figuur 6.2 laat een infrarood spectrum zien met sterke banden afkomstig van PAKs.

Nederland kent een rijke historie met betrekking tot infrarood sterrenkunde.



Figuur 6.1 – Chemische structuur van verschillende vormen van koolstofrijke stoffen met o.a. PAKs en andere vormen zoals diamant en grafiet.

De Infrarood Astronomische Satelliet (IRAS) en zijn opvolger het Infrarood Ruimte Observatorium (ISO) hadden beide instrumenten aan boord ontwikkeld en gebouwd in Nederland. Met de lancering van deze ruimtetelescopen werd nogmaals bevestigd dat infrarood spectroscopie bijzonder waardevol is. Identificatie van de stoffen verantwoordelijk voor de verschillende waargenomen patronen in astronomische spectra vlotte gestaag. Maar een aantal steeds terugkerende patronen bleven lange tijd een mysterie. Deze serie van patronen droeg dan ook de illustere naam van ‘niet-geïdentificeerde infrarood’ banden (UIR). Met vooruitstrevend astronomisch en laboratorium onderzoek werden de veroorzakers van deze banden uiteindelijk vastgepind op koolstofrijk materiaal. Een veelbelovende familie van koolstofrijk moleculair materiaal bleken de eerder geïntroduceerde PAKs. Tegenwoordig worden de PAKs banden veel gebruikt binnen de sterrenkunde, o.a. als indicator van gebieden waar stervorming plaatsvindt. Maar de PAKs banden geven nog meer prijs. Zo zit er veel informatie verstopt in de variërende spectrale details. Een mooi voorbeeld dat leidde tot de identificatie van de UIR banden met PAKs, is dat van de vergelijking van het astronomisch spectrum van een gebied in het sterrenbeeld Orion met dat van roet uit een uitlaatpijp van een auto (Figuur 6.3).

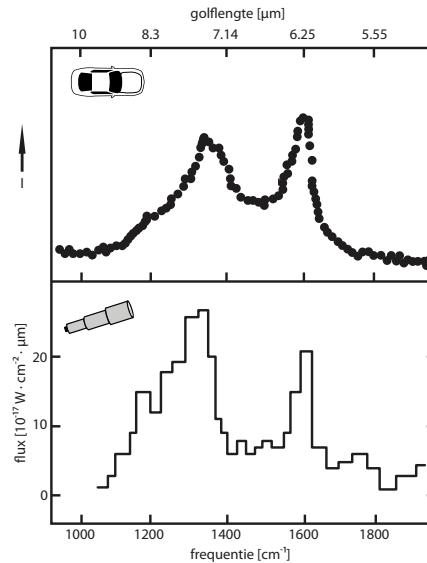


Figuur 6.2 – Infrarood spectrum van de reflectievlak NGC 7023 zoals waargenomen door NASA's ruimte telescoop Spitzer. De gearceerde gebieden geven de emissies afkomstig van PAKs aan, met in het grijs de bredere 'plateaus'. Gegevens afkomstig van Sellgren et al. (2007).

Met de komst van zeer gevoelige (ruimte) telescopen die fijne spectrale details kunnen blootleggen, is gebleken dat er toch nog enige ongerijmdheden bestaan tussen de astronomische en laboratorium spectra van PAKs. Omdat het de subtiële variaties binnen de PAKs banden zijn die ons astronomisch inzicht moeten verschaffen, is inzicht verkrijgen in PAKs en hun spectra noodzakelijk. Bij het NASA Ames onderzoekslaboratorium (Californië, Verenigde Staten) doet men theoretisch en laboratorium onderzoek naar PAKs. De karakteristieken van families van PAKs en de invloed van bijvoorbeeld incorporatie van het element stikstof in het koolstofskelet op de vorm en piekposities van de profielen worden onderzocht. Dit onderzoek wordt gestuurd door de analyse van astronomische spectra: deze bieden inzicht in de vorming en veranderingen die PAKs ondergaan in de astronomische omgevingen waar ze voorkomen.

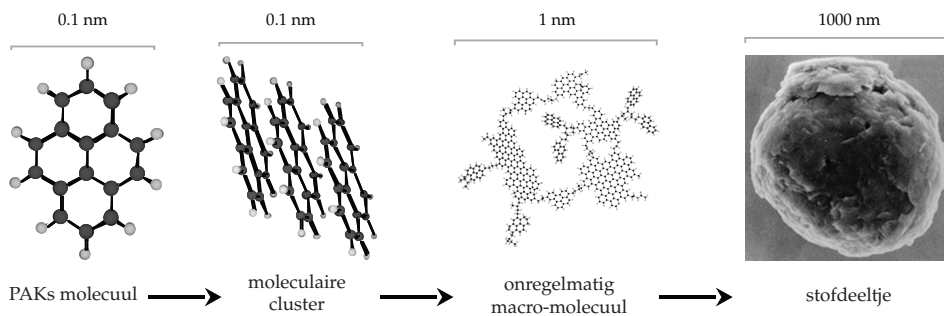
Zo is het mogelijk met de resultaten van intensief laboratoriumonderzoek naar de invloed van grootte, vorm, samenstelling en ladingstoestand (PAKs die wel of niet een elektron verwijderd hebben) op spectra van PAKs, mogelijk een vorming- en evolutieschema vast te stellen. PAKs vormen zich hoogstwaarschijnlijk in de

Figuur 6.3 – De vergelijking van het spectrum van roet uit een uitlaatpijp van een auto (boven) met het waargenomen spectrum van Orion (beneden). De figuur is een aangepaste versie van die te vinden is in Allamandola et al. (1985).



circumstellaire wolken van oude sterren die rijk aan koolstof zijn. In deze omgeving zijn de PAKs vooral lading neutraal en bestaan ze voornamelijk uit koolstof, wellicht een beetje verrijkt met stikstof. PAKs kunnen gaan samenklonteren en grotere stofdeeltjes vormen. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 6.4. In de volgende fase, de overgang van de circumstellaire wolk naar planetaire nevel, ondergaan de PAKs, die niet geïntegreerd zijn in grotere stofdeeltjes, weinig veranderingen. Alleen het sterke stralingsveld afkomstig van de ‘dode’ overgebleven ster, een witte dwerg genoemd, zorgt voor een toegenomen aantal PAKs in een verhoogde ladingstoestand. In de daaropvolgende fase, het interstellaire medium, ondergaan de PAKs vervolgens radicale veranderingen. Grootte, vorm en samenstelling veranderen continu. Op het moment dat zich een moleculaire wolk vormt is er weinig terug te vinden van de oorspronkelijke PAKs. De PAKs die het wel ‘overleven’ worden samen met de andere PAKs vernietigd in de onvriendelijk omgeving rond een zich nieuw vormende ster. Wanneer deze ster een hoge leeftijd bereikt en koolstofrijk blijkt te zijn, is de astronomische PAK levenscyclus rond.

Het begrijpen van het ontstaan van sterren en planeten, en indirect het leven, is één van de belangrijkste doelen binnen de hedendaagse sterrenkunde. De weg van samentrekkende interstellaire gaswolken naar planetaire systemen, zoals ons zonnestelsel, is lang en complex (Figuur 6.4). Op de weg van samentrekkende gaswolk naar planetair systeem ontstaat er (tijdelijk) een schijf. Via deze protop-



Figuur 6.4 – Schematische voorstelling van de vorming van een groter stofdeeltje uit een enkel PAK molecuul. Boven elke stap is een schaalgrootte aangeven in nm. 1 nm komt overeen met 0.0000001 millimeter. *De figuur is beschikbaar gesteld door D. M. Hudgins.*

lanetaire schijf wordt materiaal naar de zich vormende ster geleid. De fysica van schijven en de (chemische) processen die zich daarin afspelen zijn nog grotendeels onbekend. Onderzoek naar PAKs helpt hierbij. PAKs zijn belangrijke beginpunten voor bijvoorbeeld stofgroei en het ontstaan van complexe moleculen in de schijf. Met behulp van de infrarood spectra, waargenomen met de hedendaagse topklasse (ruimte)telescopen zoals o.a. Spitzer en de Europese Extreem Grote Telescoop (VLT) te Chili, is het mogelijk de PAKs in en nabij stofschijven te bestuderen. Onderzoek aan deze infrarood spectra moeten onder andere inzichten verschaffen over schijfstructuur en de (chemische) stof evolutie.

IN DIT PROEFSCHRIFT

In dit proefschrift staat onderzoek naar PAKs en wat ze vertellen over de astronomische omgevingen waar ze voorkomen centraal. Allereerst is er studie verricht naar een tweetal gebieden in het PAK spectrum die tot nu toe nog niet eerder uitvoerig zijn bestudeerd. Het uitgangspunt van dit onderzoek is om nieuwe inzichten in de astronomische PAK familie te krijgen en om bestaande inzichten te bevestigen. In de tweede plaats richt dit proefschrift zich op stervorminggebieden. Er wordt met behulp van PAKs gekeken naar de structuur van de omgeving en hoe die verandert met de tijd. In een afsluitend derde deel wordt er een blik in de toekomst geworpen en wordt er gekeken naar de rol die de komst van de NASA Ames PAKs IR Spectroscopische Database daarin zal gaan spelen.

Wat nu volgt is een korte samenvatting van elk hoofdstuk:

Deel I : Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen

Hoofdstuk 1: De 5.25 en 5.7 μm PAKs Emissie Banden – Laboratorium spectra van PAKs laten zien dat er zich emissie patronen bevinden rond 5.25 en 5.7 μm . De aard van deze banden is anders dan die van de ‘gewone’ banden. De emissies rond 5.25 en 5.7 μm zijn boventonen van de gewone banden of combinaties daarvan. In spectra van astronomische bronnen zijn deze banden ook waargenomen. Door te kijken naar een aantal astronomische spectra van hoge kwaliteit en die te vergelijken met berekende spectra en spectra verkregen in het laboratorium, is het mogelijk iets te zeggen over de vorm en variatie van de interstellaire familie van PAKs. Het hier gedane onderzoek laat zien dat interstellaire PAK moleculen vooral compact zijn en dat de gedetailleerde structuur van de 5.7 μm band afhangt van hoe hoekig het molecuul is. Op dit moment is het nog niet mogelijk om systematisch de boventonen en combinatie banden te berekenen. Op het moment dat dit wel mogelijk is, zal hier opnieuw naar gekeken moeten worden.

Hoofdstuk 2: De 15 – 20 μm PAK emissie banden: individuele PAKs? – Emissie patronen tussen 15 - 20 μm worden nu regelmatig waargenomen in astronomische spectra. Deze emissies bestaat vaak uit een aantal discrete pieken bovenop een breed onderliggend plateau. In enkele gevallen is er alleen sprake van een plateau zonder schijnbare structuur. Binnen de verzameling van astronomische spectra lijken de banden binnen dit golflengtegebied zich onafhankelijk van elkaar te gedragen en is er ook geen verband met de PAKs banden in andere golflengtegebieden te leggen. Een uitzondering is de band rond 16.4 μm , deze lijkt zowel in sterkte als in de vorm van het profiel een relatie te hebben met de kortere golflengte PAKs banden.

Met de beschikking over een grote verzameling berekende PAK spectra is het mogelijk om uit te zoeken welke groep van PAK moleculen verantwoordelijk is voor de emissies in dit golflengtegebied en wat dit vertelt over de omgeving waarin ze zich bevinden. Met behulp van de NASA Ames PAK IR Spectroscopische Database is er gekeken naar verschillende groepen PAKs en hun spectrale gedrag. Elke groep heeft een gemeenschappelijk moleculair karakteristiek zoals bijvoorbeeld structuur, compositie, lading of grootte. Uit de spectrale analyse komt naar voren dat er geen systematisch gedrag binnen een groep is. Een uitzondering is de groep van PAKs die een vrije hangende hexagonale ring hebben.

Deze laat systematisch een band rond $16.4 \mu\text{m}$ zien. Hoewel het verleidelijk is deze klasse toe te schrijven aan de astronomisch waargenomen band, voorspelt deze klasse ook een sterke band rond $13.5 \mu\text{m}$, die echter niet met de verwachte sterkte wordt waargenomen.

In het algemeen laten vooral grote PAKs in de database een eenvoudige spectrale structuur, met slechts een paar sterke pieken tussen $15 - 20 \mu\text{m}$, zien. Het overeenkomende eenvoudige astronomische spectrum impliceert dat de emissies tussen $15 - 20 \mu\text{m}$ bijzonder moleculair specifiek is. De gebruikte database van berekende PAK spectra heeft de beperking dat het maar een gering aantal grote PAK moleculen heeft. Helaas is het door deze beperking niet mogelijk om uit te sluiten dat er zich wel systematisch gedrag voordoet bij nog grotere PAK moleculen.

Samenvattend, de twee bestudeerde emissie gebieden laten zien dat er nog veel informatie verborgen zit in PAK spectra. Het $5 - 6 \mu\text{m}$ gebied kan nog veel blootleggen omtrent de hoekigheid van PAK moleculen en het $15 - 20 \mu\text{m}$ gebied slaat wellicht de brug naar de mogelijkheid individuele PAK moleculen te identificeren.

Deel II : PAKs in gebieden van ster- en planeetvorming

Hoofdstuk 3: Karakteristieken van IR emissie banden in Herbig Ae sterren – Herbig sterren, een klasse van middelzware vormende sterren, hebben sterke emissie banden in hun infrarood spectra. Deze emissie banden zijn echter niet alleen afkomstig van PAKs. Uit een verzameling van 15 spectra van Herbig sterren zijn de twee spectra die gedomineerd worden door emissies afkomstig van PAKs geanalyseerd. Er bestaan analogieën tussen deze twee spectra en de spectra van drie andere, goed bestudeerde, Herbig sterren met bekende ruimtelijke structuur. Hieruit komt naar voren dat in het geval van de specifieke bronnen HD 36917 en HD 97048, er zich twee ruimtelijk gescheiden PAK families rond de zich vormende ster bevinden. Het voorkomen van deze twee families wordt toegeschreven aan de veranderingen die PAKs ondergaan in het stervormingsproces. Gewoonlijk vinden deze veranderingen plaats in een circumstellaire stofschijf. Echter, geen van beide families bevindt zich in een circumstellaire stofschijf. Hieruit blijkt dat veranderingen al eerder kunnen plaatsvinden. Wellicht kunnen in de toekomst telescopen met hoge ruimtelijke resolutie meer inzicht verschaffen.

Hoofdstuk 4: Karakteristieken van mid-IR emissie banden in vier Herbig Ae/Be sterren

– Met behulp van topklasse observatoria zoals de ruimtetelescoop Spitzer en de klasse van 10-meter telescopen in Chili is gekeken naar het stof rond Herbig sterren. Alhoewel het uitgangspunt PAKs zijn, is ook gekeken naar de emissies van silicaat. Vier bronnen zijn bestudeerd. Behalve de bron HD 176386 vertonen alle vier emissies afkomstig van PAKs. De bronnen HD 176386 en TY CrA hebben silicaatemissies in hun spectrum. Er zit grote variatie in de ruimtelijke verdeling van deze emissie componenten. Deze variatie is in twee klassen in te delen. Allereerst is er de klasse van Herbig sterren die spectraal gezien vergelijkbaar zijn met reflectielevels: een vormende ster verlicht het omliggend diffuse stof en gas. De tweede klasse komt beter overeen met Herbig A sterren. Het verschil tussen beide klassen wordt toegeschreven aan het verschil in lichtkracht. De zwaardere, en daardoor heldere, Herbig B sterren zijn in staat veel meer van hun omgeving te beïnvloeden. De relatief zwakkere Herbig A sterren beïnvloeden alleen hun directe omgeving: de circumstellaire stofschiif. De hoge ruimtelijke resolutie van de telescopen in Chili maakt het mogelijk om een gedetailleerde ruimtelijke structuur voor TY CrA af te leiden. Deze bron vertoont karakteristieken die overeenkomen met beide geïdentificeerde klassen. Op grote schaal domineren de reflectieeveleigenschappen en op kleinere schaal die van de circumstellaire stofschiif. De voorgestelde structuur van deze bron is dan ook de volgende: een centraal gelegen zonnestelsel met drie dicht om elkaar heen draaiende sterren is omringd door een stofschiif waarin zich een vierde bron bevindt. Uiteraard zijn er meer gegevens nodig om de voorgestelde klasse indeling met zekerheid vast te kunnen stellen .

Samenvattend, de bestudering van PAKs in stervormingsgebieden laat zien dat het mogelijk is om nieuwe inzichten te verwerven in het ster- en planeetvormingsproces. Met name kunnen PAKs gebruikt worden om de structuur van deze gebieden bloot te leggen, alsook, indirect een maat te geven voor de heersende astrofysische condities.

Deel III : De toekomst

Hoofdstuk 5: De NASA Ames PAK IR Spectroscopische Database

– De verzameling van berekende en experimenteel bepaalde spectra van PAKs die door de jaren heen verzameld zijn op het Ames onderzoekscentrum van NASA, zijn samengevoegd in de NASA Ames PAK IR Spectroscopische Database. Deze database van bijna 800 spectra maakt het mogelijk om systematisch PAK spec-

tra te onderzoeken. Eind 2009 wordt de database openbaar gemaakt, begeleid door een scala aan gereedschappen om het gebruik te vereenvoudigen. Omdat de spectra in de database *absorptie* spectra zijn, is uiteengezet hoe deze kunnen worden omgezet in *emissie* spectra. In deze uiteenzetting worden details als de temperatuurverandering die het PAK molecuul ondergaat tijdens het emissieproces gedemonstreerd. Het resultaat is dat er relatief meer emissies te vinden is in de langere golflengte banden dan wanneer er met minder detail naar het emissieproces wordt gekeken. Verder is uitgelicht hoe de database heeft geholpen bij het onderzoek naar de emissiekenmerken tussen 15 – 20 μm en wordt er een uitstap gemaakt naar het ver-infrarood. Met missies op komst die dit golflengtegebied gaan onderzoeken, is dit bijzonder relevant. Er wordt aangetoond dat het ver-infrarood de potentie heeft om individuele PAK moleculen te identificeren. Alhoewel de ver-infrarood banden in eerste instantie een goede maat lijken te gaan geven voor de grootte van de PAK moleculen, moet het met hoge spectrale resolutie mogelijk zijn de substructuur van de banden bloot te leggen om zo een mogelijkheid te bieden specifieke PAK moleculen te identificeren.

Hoofdstuk 6: Samenvatting en vooruitzicht – Afsluitend is er een samenvattend hoofdstuk en wordt er een blik in de toekomst geworpen. Met nieuwe observatoria in het vooruitzicht, alsook de beschikking over een grote consistente database van PAK spectra, ligt het PAK Universum voor het grijpen.

Samenvattend, dit proefschrift geeft inzicht in de compositie van interstellaire PAKs en hoe ze hun omgeving toetsen en beïnvloeden. Astronomische studies toegewijd aan PAKs bepalen niet alleen de huidige koers van onderzoek binnen een sterk interdisciplinair veld van astronomen, chemici en fysici, maar met nieuwe missies zoals HIFI voor de deur, ook die van toekomstig onderzoek.

