



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Infrared Interferometric observation of dust in the nuclei of active galaxies

Raban, D.

Citation

Raban, D. (2009, November 24). *Infrared Interferometric observation of dust in the nuclei of active galaxies*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/14564>

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/1887/14564>

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

Nederlandse samenvatting

Actieve Galactische Kernen

We weten nu dat er een super-massief zwart gat in het centrum van elk sterrenstelsel aanwezig is. In de meeste sterrenstelsels, bevat het zwarte gat niet veel materiaal en deze worden normale sterrenstelsels genoemd. In bepaalde gevallen, waarschijnlijk als gevolg van een samenvoeging/botsing met een ander sterrenstelsel, verkrijgt het zwarte gat meer en meer massa. Wanneer de materie in het zwarte gat valt, vormt zich een accretie schijf welke zeer efficiënt is in het converteren van potentiële energie door de zwaartekracht, naar warmte en licht. Als gevolg zijn de centra van deze sterrenstelsels zeer helder en stralen meer energie uit vanuit een gebied ter grootte van het zonnestelsel dan vanuit het gehele sterrenstelsel. De electromagnetische straling vanuit dit gebied varieert vaak sterk. Frequenties van de straling varieert van radio tot Röntgen. Deze sterrenstelsels worden 'actief' genoemd en hun kernen: 'Actieve Galactische Kernen' (engels: Active Galactic Nuclei: AGN)

AGN dierenrijk

De eerste AGN werd in 1963 ontdekt. In eerste instantie leek het een gewone ster te zijn maar verscheidene emissielijnen hadden een roodverschuiving van $z=0.158$, de grootste roodverschuiving ooit gedetecteerd en derhalve het verste object dat bekend was in die tijd. Het was duidelijk dat dit geen normale ster kon zijn, gegeven de enorme afstand van 2 miljard lichtjaar. Het object werd vanaf toen 'quasi stellar object' of quasar genoemd.

We weten natuurlijk nu veel meer over deze mysterieuze en exotische objecten. Het belangrijkste kenmerk van AGN is de grote verscheidenheid van types. Dit heeft geleid tot de term 'AGN dierenrijk'. Voorbeelden van de diversiteit zijn

- Verschillen in variabiliteit. Sommige stralen electromagnetische straling uit op een constant niveau, bij anderen kan dit dramatisch wijzigen binnen enkele uren
- Emissie bij verschillende golflengtes. Van sommige AGN worden geen energetische deeltjes zoals Röntgen en UV fotonen gemeten. Anderen laten weer geen radiostraling zien.
- Verschillend gedrag van nucleaire emissie lijnen. Sommige AGN laten brede nucleaire emissie lijnen zien terwijl die bij anderen weer heel nauw zijn.
- Verschillen in morfologie. Bijvoorbeeld, de radio-takken van AGN met radios-traling zijn soms helder aan de randen en soms helder in het centrum.

AGN zijn verdeeld in 2 klassen: Radiostil en radioluid. Radioluide AGN zijn degene waarbij de radiostraling domineert in de lichtkracht. Anders worden ze radiostil genoemd. Elke klasse van AGN is verder onderverdeeld in types. Radiostille objecten zijn vooral verdeeld in type 1 en type 2 objecten. Als de lichtkracht van de AGN laag is,

worden ze Seyferts type 1 en 2 genoemd. Wanneer de bolometrische lichkracht van de AGN hoog is, worden ze type 1 en type 2 quasars genoemd. Voor AGN van het Seyfert type, is het gast-sterrenstelsel nog duidelijk te zien terwijl dit bij het Quasar type niet het geval is. Het grootste verschil tussen type 2 en type 1 bronnen is het ontbreken van Röntgen en UV emissie als ook de brede emissielijnen van het spectrum van type 2 bronnen. Radioluide objecten laten vooral verschillen zien in de morfologie van de radiotakken en het variabele gedrag van de kern.

AGN bouwblokken:

De belangrijkste componenten waaruit een AGN bestaat, staan hieronder beschreven:

- **Accretieschijf.** Het invallen van gas in een zwart gat is de meest efficiënte methode van energieproductie die we kennen. Het is de energiebron voor AGNs. Zwaartekracht zorgt ervoor dat materiaal in de schijf naar binnen spiraliseert richting het supermassieve zwarte gat. Het invallend materiaal vormt een schijf. Wrijving tussen deeltjes in de schijf, die met hele hoge snelheden bewegen, zorgen ervoor dat de schijf straalt. Accretieschijven in AGNs zenden elektromagnetische golven uit, die het hele spectrum van radio- tot Röntgen- en gammastraling. Typische bolometrische helderheden van AGNs zijn van de orde van grootte van $10^{44} - 10^{47}$ ergs/s.
- **Brede lijn regio (BLR).** De BLR is een gebied waar emissielijnen waar te nemen zijn in het optische licht die breed zijn (>1000 km/s). Het emitterende materiaal bevindt zich zeer dicht bij het zwarte gat, aan de rand van de accretieschijf. De brede lijnen worden veroorzaakt door de grote rotatiesnelheden van het emitterende materiaal. De BLR is te klein om opgelost te worden in huidige observaties. Daardoor is de exacte morfologie van de BLR niet bekend.
- **Nauwe lijn regio (NLR).** De nauwe lijn regio is een gebied waar nauwe lijnen (<1000 km/s) worden waargenomen in het optische en infrarode licht. De NLR is orden van grootte groter dan de BLR, afhankelijk van het specifieke object. Ten gevolge hiervan kan de morfologie eenvoudig opgelost worden, zelfs met kleine spiegeltelescopen, zoals de Hubble ruimte telescoop. Normaliter is de NLR kegelvormig en bevat geïoniseerd materiaal. Daarom wordt zij ook wel de ionisatiekegel genoemd.
- **Verduisterende torus.** Deze component van de AGN is het hoofdonderdeel van deze studie. De verduisterende torus is een structuur gemaakt van stofdeeltjes, die de accretieschijf en de BLR omgeven. De verduisterende torus absorbeert UV fotonen van de accretieschijf, wordt daardoor verhit en zendt de energie uit in het infrarood.
- **Relativistische jets en lobben.** Vaak worden enorme stromen van materiaal waargenomen, die uit het centrum van een AGN komen. De materie vormt een nauwe, lineaire stroom, jet genaamd, met deeltjes die met bijna de snelheid van het licht bewegen. Het precieze mechanisme om jets te produceren wordt nog niet volledig begrepen. We geloven dat jets uit het binnenste deel van de accretieschijf komen en dat hun oriëntatie is gekoppeld aan het impulsmoment van het binnenste deel van de schijf. Jets zijn vaak groot, typisch enkele kpc. Gi-

gantische opgeblazen lobben zijn dubbele, vaak redelijk symmetrische, ongeveer elliptische structuren aan beide zijden van de actieve kern. Ze zijn typisch enkele tientallen kilometers groot en zenden radiogolven uit. De lobben van een AGN kunnen een aantal keer groter zijn dan het sterrenstelsel.

Unificatie van AGN

AGN unificatie-theorieën proberen AGN-verschijnselen te vereenvoudigen door te suggereren dat de waargenomen verschillen tussen de verschillende AGN-types een gevolg zijn van de oriëntatie van de AGN ten opzichte van de waarnemer.

In lijn met de onderverdeling tussen radioluide en radiostille AGN zijn er unificatiemodellen voor zowel radiostille als radioluide objecten.

Deze hebben een gemeenschappelijke eigenschap: AGN van een bepaalde klasse zijn in wezen allemaal hetzelfde. Maar omdat het gaat om asymmetrische objecten, hangt hetgeen een waarnemer ziet af van de oriëntatie van de AGN. De uitstromen ('jets') zijn bijvoorbeeld een duidelijke bron van asymmetrie, en daardoor zou een object waarvan de uitstroom rechtstreeks naar de waarnemer gericht is er anders uitzien, dan een object waarvan de gezichtslijn van de waarnemer haaks op de uitstroomrichting staat.

Voor radiostille AGN, de belangrijkste objecten die in dit proefschrift worden bestudeerd, stelt de unificatie-theorie dat de verschillen tussen type 1 en type 2-objecten (zij het Seyferts of quasars) het resultaat zijn van verschillende oriëntatie van de waarnemer ten opzichte van de waargenomen 'torus'. Van bovenaf bekeken, dus met het gat naar de waarnemer toe, zouden de accretieschijf (Röntgenstraling) en de BLR waarneembaar moeten zijn, en zal het object geclassificeerd worden als type 1. Als de torus van de zijkant waargenomen wordt, verduistert de torus de accretieschijf en de BLR, en wordt het object geclassificeerd als type 2.

De unificatiemodellen zijn simpel en elegant, maar het is niet zo gemakkelijk om directe bewijzen te vinden die ze ondersteunen. De voornaamste reden is dat AGN erg compact zijn, en dat daardoor de accretieschijf, BLR en de verduisterende torus niet opgelost kunnen worden door conventionele telescopen. Daardoor bleef het bestaan van de verduisterende torus met zijn eigenschappen slechts een veronderstelling, tot een paar jaar geleden. Om direct bewijs te leveren voor de unificatie van type 1- en type 2-objecten moet men het bestaan de een torus-achtige stofverdeling aantonen in Seyferts en quasars. Het doel van dit proefschrift is, om dit te bereiken met behulp van interferometrische waarnemingen met hoge resolutie.

Interferometrie en de V.L.T.I

Interferometrie is het combineren van licht van twee of meer telescopen met als doel om een significante winst te maken in resolutie. Licht van elke telescoop afzonderlijk wordt opgevangen en geleid naar een gemeenschappelijke plaats waar het licht gecombineerd wordt in een interferentie patroon. Dit patroon bevat de informatie van de bron met een resolutie die afhangt van de telescoop configuratie. Als er genoeg waarnemingen van een bron gemaakt worden met een verscheidenheid aan telescoop

configuraties, dan kan het beeld van de bron gevormd worden. Als er slechts enkele telescoopconfiguraties beschikbaar zijn, kunnen met behulp van een model toch de verdeling in de ruimte van de bron bepaald worden. Interferometrie wordt traditioneel geassocieerd met radio-astronomie, waar al sinds decennia met antennes in plaats van telescopen wordt waargenomen, met als voordeel dat de radio golven niet fysiek getransporteerd hoeven te worden naar de combinatieruimte. Interferometrie voor infrarood licht is relatief nieuw, met eerste resultaten uit 2001. De interferometrische waarnemingen die hier gepresenteerd worden zijn verkregen met de Very Large Telescope Interferometer (VLTI), gesitueerd in the Atacama woestijn in het noorden van Chili. De VLTI bestaat uit vier 8.2 meter telescopen en verscheidene 1.8 meter telescopen. Voor het observeren van sterrenstelsels worden de grote telescopen gebruikt, terwijl de kleine telescopen gebruikt worden voor heldere en dichterbij staande objecten zoals sterren. Het licht, verzameld in de telescoop, wordt met spiegels geleid door tunnels onder de grond, waar het uiteindelijk gecombineerd wordt tot een interferentieplaatje die wordt opgeslagen. Er zijn verschillende instrumenten die het licht kunnen combineren en detecteren: Het instrument dat gebruikt wordt in dit werk is MIDI (Mid Infrared Interferometer), die werkt als een klassieke Michelson interferometer in het infrarood (7-14 μm) ?

Dit proefschrift

Dit proefschrift gaat voornamelijk over het gebruik van de ultra-hoge resolutie van interferometrie om informatie te vergaren over de ondoorzichtige torus. Het primaire doel is te bevestigen dat een ondoorzichtig, torus-vormig object aanwezig is in de kern van beide types Seyfert-sterrenstelsels. Vervolgens hopen we limieten te bepalen voor de fysische eigenschappen van de torus, zoals de grootte, temperatuur, verdeling, chemische samenstelling en de relatie tussen de torus en de andere bouwstenen van AGNs. Hieronder volgt een korte beschrijving van elk hoofdstuk.

Hoofdstuk 2

Interferometrische observaties zijn kostbaar en waarneemtijd wordt niet gemakkelijk verstrekt. Daarom moeten we van tevoren bepalen welke objecten de moeite waard zijn om te observeren, gegeven een gelimiteerde waarneemtijd met de interferometer. In dit hoofdstuk gebruiken we de 3.6 meter telescoop in La Silla, Chili, om 21 bronnen waar te nemen die mogelijke interessante doelwitten voor MIDI kunnen zijn. We trachten te bepalen welke bronnen helder genoeg zijn om te worden waargenomen, en voor welke bronnen de mid-infraroodstraling wordt opgelost. In de gevallen dat er structuur zichtbaar is worden afbeeldingen gepresenteerd.

Hoofdstuk 3

In dit hoofdstuk presenteren we waarnemingen van het Seyfert 2 sterrenstelsel NGC 1068. Voor dit object gebruiken we een uitgebreide UV-verdeling bestaande uit 16 verschillende basislijnen, één van de meest uitgebreide interferometrische infrarood-waarnemingen van een extragalactisch object. We lossen de stofstructuur volledig op en verrichten metingen aan belangrijke eigenschappen zoals grootte en temperatuur.

We presenteren ook een afbeelding van de bron op 8 micron, gegenereerd met behulp van maximale entropie beeldreconstructie. We zien dat de stofcomponent (de torus) samenvalt met de reeds bekende maser-schijf en bediscussieren de relatie tussen het stof en de ionisatiekegel. Het stof maakt een hoek van 45 graden ten opzichte van de jet, wat duidt op een gecompliceerde historie van accretie voor dit specifieke object. Vanwege het zijaanzicht van de torus in NGC 1068 kunnen we laten zien dat de opgeloste stofstructuur inderdaad een opgezwollen torus is. In vergelijking met de resultaten voor andere objecten is de waarneming van NGC 1068 het meest overtuigende geval van een ondoorzichtige torus.

Hoofdstuk 4

In dit hoofdstuk presenteren we waarnemingen die de stofverdeling in het Seyfert 1 sterrenstelsel NGC 4151 oplossen. De grootte en temperatuur van de opgeloste structuur zijn vergelijkbaar met die van Seyfert 2 sterrenstelsels, wat een sterke aanwijzing is ten gunste van unificatiemodellen. We voeren een gedetailleerde vergelijking uit tussen onze resultaten en interferometrische waarnemingen op kortere golflengtes en concluderen dat de onopgeloste bron in deze laatste waarnemingen geen voortzetting kan zijn van de opgeloste structuur die wordt waargenomen door MIDI. We detecteren het silicaat-kenmerk in emissie, zij het marginaal, en bediscussieren hoe de afgeleide grootte en temperatuur voor deze bron passen binnen de unificatiemodellen.

Hoofdstuk 5

In hoofdstuk 5 presenteren we waarnemingen van de quasar 3C 273. Deze bron is uniek binnen onze selectie, omdat dit een verafgelegen object is. Dit staat ons toe om de voorspellingen van de unificatiemodellen te toetsen op een zeer helder object op hoge roodverschuiving en om de resultaten voor dit object te vergelijken met die voor nabije AGNs. We nemen een opgeloste, uitgerekte structuur waar in de kern van 3C 273. De grootte van de structuur is consistent met de door unificatiemodellen voorspelde grootte van de stof-torus. Vergelijkbaar met NGC 4151 detecteren we ook hier het 10 micron silicaat-kenmerk in emissie, zij het marginaal. Deze waarnemingen tonen voor de eerste keer de opgeloste emissie van het stof in the centrum van een quasar op hoge roodverschuiving en leveren het eerste directe bewijs dat unificatie ook geldig blijft voor dit type objecten.

Hoofdstuk 6

In dit hoofdstuk presenteren we waarnemingen van een selectie van 10 Seyfert stelsels, een combinatie van beide soorten Seyfert sterrenstelsels. Voor elke bron hebben we één en drie UV-punten verkregen, waarmee we kunnen zien of het doelwit is opgelost en waarmee we basale eigenschappen kunnen meten zoals de grootte van de mid-IR emissiegebieden. Voor zeven van de tien waargenomen objecten zijn afmetingen of limieten van afmetingen bepaald van het door de AGN verwarmd stof. In deze gevallen zien we dat de grootte van het mid-IR emissiegebied in de orde van parsecs is. Verder zien we dat de afgeleide grootte grofweg schaalt met de wortel van de AGN

helderheid. Het 10 micron silicaat-kenmerk wordt marginaal gedetecteerd in emissie of absorptie.

Hoofdstuk 7

In dit hoofdstuk we onze aandacht weg van de ondoorzichtige torus, in de richting van milimeter en radio emissie afkomstig van de jet. Zijn alleen publiek toegankelijke gegevens gebruikt, inclusief WMAP metingen die zijn verzameld voor het bepalen van eigenschappen van de microgolf achtergrondstraling. In dit hoofdstuk gebruiken we de WMAP metingen om het radioemissie-mechanisme van FR-I AGN NGC 5128 (Centaurus A) te bestuderen. We bepalen het centimeter en milimeter continuüm spectrum voor de gehele Centaurus A radiobron, en meten op frequenties tussen 86 GHz (3.5 mm) en 345 GHz (0.85 mm) de continuüm emissie van de kern van het actieve radiospectrum op verschillende tijdstippen tussen 1989 en 2005. De gegevens laten zien dat het integrale radiospectrum steiler wordt bij frequenties boven de 5 GHz. De zuidwestelijke buitenste lob heeft een steiler spectrum dan het noordoostelijke middendeel en buitenste lob. De milimeter-emissie van de kern van Centaurus A is variabel, een variabiliteit die aanzienlijk beter correleert met 20-200 keV Röntgen-variabiliteit dan met 2 - 10 keV variabiliteit. In de niet-actieve toestand heeft de kern een spectrale index die steiler wordt naarmate de kern helderder is. De variabiliteit lijkt het meest samen te hangen met de binnenste nucleaire jet-componenten die middels VLBI metingen zijn gedetecteerd. De meest dichte nucleaire componenten zijn optisch dik beneden de 45-80 GHz. Dit hoofdstuk is een voorbeeld van hoe bestaande, publiek toegankelijke gegevens kunnen worden gebruikt om resultaten te verkrijgen in een ander deel van de sterrenkunde dan waarvoor de gegevens oorspronkelijk bedoeld waren.