



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Facets of radio-loud AGN evolution : a LOFAR surveys perspective

Williams, W.L.

Citation

Williams, W. L. (2015, December 10). *Facets of radio-loud AGN evolution : a LOFAR surveys perspective*. PhD Thesis. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/37016>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/37016>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/37016> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Williams, Wendy L.

Title: Facets of radio-loud AGN evolution : a LOFAR surveys perspective

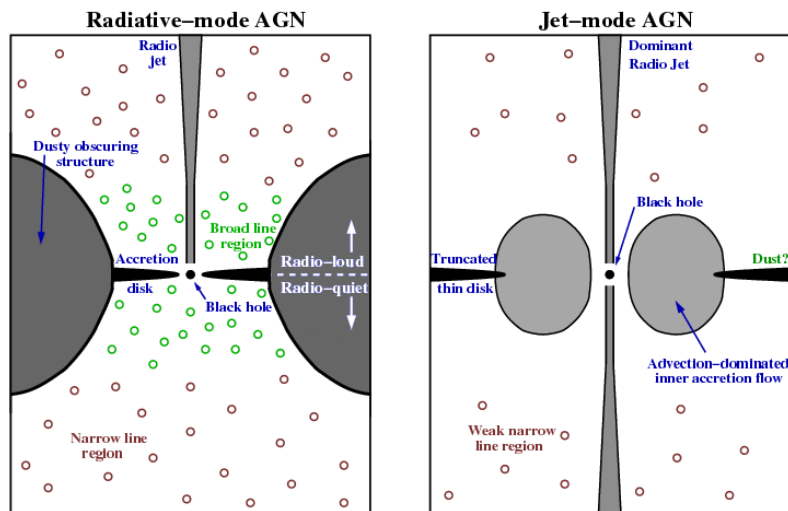
Issue Date: 2015-12-10

Samenvatting

Active Galactic Nuclei

De kernen van actieve sterrenstelsels (*Active Galactic Nuclei*, of kortweg *AGN*) worden aangedreven door gas dat instroomt in de relativistische gravitationele put rondom zwarte gaten. Deze zogenaamde *supermassive black holes* (*SMBHs*) van miljarden zonsmassa's bevinden zich in of nabij het centrum van (waarschijnlijk) alle sterrenstelsels. De waarneembare kenmerken van AGN lopen sterk uiteen, zoals een extreme lichtkracht, emissie vanaf zeer kleine schaal, variabel in tijd, brede en smalle emissielijnen, en (gepolariseerde) radiostraling. AGN spelen een cruciale rol in de evolutie van sterrenstelsels, en zijn een onmisbaar ingrediënt in de verklaring voor de waarneembare eigenschappen van sterrenstelsels in het nabije heelal. Theoretische modellen passen *terugkoppeling* toe tussen de SMBH en het gas en stof in de omringende sterrenstelsels, om zo de gekoppelde evolutie van zwarte gaten en sterrenstelsels te verklaren. Via terugkoppeling kan het zwarte gat de vorming van nieuwe sterren in het sterrenstelsel beïnvloeden of onderdrukken. Het is daarom zeer belangrijk om de processen van gastoevoer naar de AGN en terugkoppeling fysisch in detail te begrijpen, en om te bepalen hoe deze processen veranderen in de tijd.

Astronomische waarnemingen op radio-frequenties zijn een belangrijk hulpmiddel voor het vinden van AGN. Met name 'radio-luide' bronnen zijn belangrijk voor ons begrip van AGN. Ondanks dat het slechts een kleine fractie van alle AGN betreft, is het gedurende deze radio-luide fase dat de impact van de AGN op hun omgeving het best kan worden waargenomen en bestudeerd. De waargenomen groep radio AGN kan worden gesplitst in twee groepen, afhankelijk van de accretie snelheid en de eigenschappen van de SMBH en het omringende sterrenstelsel (zie figuur 1). Klassificatie van de eerste groep hangt samen met stralings-efficiënte accretie via een accretie-schijf. Deze klassieke 'optische quasars', zijn zichtbaar over vrijwel het gehele elektromagnetische spectrum. Deze *radiative mode* gaat gepaard met sterke optische emissielijnen, waardoor deze bronnen ook wel 'hoge excitatie' bronnen worden genoemd, of *high excitation radio galaxies* (*HERGs*). Dit zijn relatief blauwe sterrenstelsels met een relatief lage massa, en bevinden zich in relatief dun-bevolkte omgevingen. Deze modus is mogelijk belangrijk in het onderdrukken van de vorming van sterren in vroeger tijden, en het ontstaan van de waargenomen samenhang tussen de massa's van het zwarte gat en het omringende sterrenstelsel in het nabije heelal. De tweede groep AGN werd oorspronkelijk opgemerkt vanwege de afwezigheid van emissielijnen. Men denkt dat dit komt door directe instroom van heet gas in het zwarte gat via een stralings-arm proces. Bij deze objecten wordt geen mid-infrarood straling van de stof-torus gedetecteerd, noch Röntgenstraling van de accretieschijf. Deze zogenaamde *low excitation radio galaxies* (*LERGs*) zijn sterrenstelsels die over het algemeen verschillen van HERGs door hun rode kleur en aanwezigheid in relatief dicht-bevolkte omgevingen. Specifiek deze *jet mode* voorziet in een directe link tussen de AGN en het instromende hete gas, vanwege de arbeid die de expanderende radio lobes verrichten in het hete gas tussen sterrenstelsels. Het is mogelijk de belangrijkste reden waarom nabije, eliptische sterrenstelsels 'oud, rood en dood' blijven.



Figuur 1: Schematisch overzicht van het centrum van AGN in de *radiative mode* en *jet mode*. Radiative-mode AGN hebben een dunne accretie-schijf die de nabij-gelegen breed- en smal-lijn regio's belicht met UV-straling. Afhankelijk van de waarneemhoek zijn de accretie-schijf en brede-lijn regio's zichtbaar, of liggen verscholen achter een band van stof. Een fractie van deze bronnen produceert krachtige radio jets. Jet-mode AGN hebben geen accretie-schijf en emissielijnen, maar wel radio jets. (Afbeelding overgenomen uit Heckman & Best 2014).

Lage-Frequentie Radio Sterrenkunde

De radiostraling van AGN is synchrotron-straling, gegenereerd door relativistische elektronen die rond magnetische veldlijnen cirkelen, beide waarschijnlijk afkomstig van dichtbij de centrale SMBH. Deze straling heeft een karakteristiek *power-law* spectrum ($S_\nu \propto \nu^\alpha$) over een zeer breed frequentiebereik, waarbij de waarde van de *spectral index* (α) meestal negatief is. Radio waarnemingen van AGN hebben het voordeel van toenemende helderheid bij lagere frequenties. In het afgelopen decennium heeft er een sterke groei plaatsgevonden in het aantal en soort nieuwe radio (interferometer) telescopen, onder andere als voorbereiding op de ontwikkeling van de *Square Kilometre Array (SKA)* inclusief een terugkeer naar lage frequenties. De Low-Frequency Array (LOFAR, zie figuur 2) is een nieuwe lage-frequentie radiotelescoop die zich voornamelijk in Nederland bevindt, maar ook in enkele omliggende landen. Het revolutionaire ontwerp van LOFAR maakt gebruik van *phased arrays* in plaats van traditionele en dure schotels, welke elektronisch worden gekoppeld om een beweegbare schotel na te bootsen. De telescoop bestaat uit 'stations' die zijn opgebouwd uit simpele dipool-antennes. LOFAR werkt binnen de *Very High Frequency (VHF)* band die meestal gebruikt wordt voor de FM-radio en televisie-uitzendingen, amateur radio, marine- en luchtverkeers-communicatie. Er zijn twee soorten antennes, namelijk de *Low Band Array (LBA)* antennes voor waarnemingen tussen 10 en 80 MegaHertz (MHz), en de *High Band Array (HBA)* antennes voor waarneemfrequenties tussen 110 en 240 MHz. Met enkel de LOFAR stations in Nederland worden al ongekend hoge resolutie afbeeldingen geproduceerd. En toevoegen van internationale stations leidt tot resoluties die nog een factor tien hoger zijn.

Dit soort telescopen initiëren nieuwe wetenschappelijke en technische uitdagingen. Dit laat-



Figuur 2: De LOFAR kern (de 'superterp') nabij Exloo (Drenthe), met daarop verschillende stations met HBA en LBA antennes (*links*). Individuele LBA (*boven rechts*) and HBA (*onder rechts*) antennes. (LOFAR/ASTRON).

ste omvat het ontwikkelen van nieuwe modellen ter beschrijving van instrumentele en atmosferische effecten die voorheen werden genegeerd, en het ontwikkelen van algoritmes die deze modellen doorrekenen. Het vereist een sterke toename in de nauwkeurigheid algoritmes om optimale gevoeligheid en contrast te verkrijgen. In de praktijk leidt het gebruik van nieuwe instrumenten tot een sterke toename van de hoeveelheid gegenereerde data (een factor 100–1000). De gegevensbewerking vereist zeer krachtige computers en snelle algoritmes voor kalibratie en beeldvorming. Specifiek voor lage-frequentie radio waarnemingen is het belangrijk om richtingsafhankelijk te kalibreren, om zo de versturende effecten van de ionosfeer teniet te doen.

Dit Proefschrift

Één van de meest fundamentele onderwerpen in het begrip van de rol van AGN in de formatie van sterrenstelsels is de noodzaak om nauwkeurig de accretie-geschiedenis van zwarte gaten te meten, en om deze te vergelijken met de opbouw van sterren in sterrenstelsels: groeien zwarte gaten en de omringende sterrenstelsels tesamen, of gaan de één de ander voor? De meest dominante groei van SMBHs en de sterren in sterrenstelsels vindt plaats toen the heelal tussen de 3 en 8 miljard jaar oud was. De huidige groei is een orde van grootte langzamer dan op het maximum. Om het gedetailleerde proces van de formatie en evolutie van sterrenstelsels goed te begrijpen is het nodig om de fysische processen van terugkoppeling van AGN te identificeren en te kwantificeren. Recente radio en optische surveys hebben ons begrip van de huidige populatie van AGN sterk doen toenemen. Om ten volle het effect van AGN te kwantificeren is het nodig om dit werk ook uit te voeren in vroeger tijden, toen de activiteit van AGN en stervorming in het heelal maximaal waren. Met de krachtigere radiotelescopieën die nu beschikbaar zijn is het mogelijk om deze verre AGN direct te bestuderen. Om deze reden zijn in dit proefschrift de volgende onderzoeksvragen gedefiniëerd:

1. Hoe evolueert de relatie tussen de massa van sterrenstelsels en de fractie van radio AGN

(oftewel de relatieve duur van de radio-luide fase) met de tijd?

2. Hoe evolueert de populatie radio-luide AGN met de tijd?
3. Wat is het verband tussen de eigenschappen van radio-luide AGN en de omringende sterrenstelsels in vroeger tijden?

De belangrijkste gereedschappen om dit onderzoek te doen zijn zeer gevoelige, hoge-resolutie radiokaarten op lage frequenties, aangevuld met complementaire waarnemingen van andere type telescopen. Het eerste deel van dit proefschrift (hoofdstukken 2 t/m 4) beschrijft de productie van lage-frequentie radiokaarten uit GMRT en LOFAR waarnemingen, gebruikmakend van de meest geavanceerde kalibratie-technieken. In het tweede deel van het proefschrift (hoofdstukken 5 en 6) worden geselecteerde radiobronnen gecombineerd met optische waarnemingen ter bestudering van de eigenschappen van sterrenstelsels rondom radio-luide AGN als functie van tijd.

In **hoofdstuk 2** worden 153 MHz GMRT waarnemingen gepresenteerd van het zogenaamde *NOAO Boötes veld*. Dit extragalactische veld is uitgebreid bestudeerd met optische, ultraviolet- en infrarood-telescopen. De lage-frequentie radio data is gekalibreerd voor richtings-afhankelijke ionosferische effecten met behulp van het SPAM softwarepakket. De gecombineerde GMRT kaart, opgebouwd uit zeven afzonderlijke kaarten, is op het moment van publicatie de grootste en diepste van z'n soort, en bevat 1289 detecteerbare radiobronnen. Een belangrijke eigenschap bij het analyseren van de radiobronnen is het tellen van het aantal bronnen als functie van helderheid. Deze brontellingen zijn met behulp van de lage-frequentie GMRT kaart gedetailleerd uitgevoerd.

In **hoofdstuk 3** worden de eerste LOFAR LBA kaarten gepresenteerd van het Boötes veld en het veld rondom radiobron 3C 295 op 34, 46 en 62 MHz. Deze kaarten zijn de meest gevoelige kaarten ooit op deze frequenties, met elk tussen de 300 en 400 detecteerbare radiobronnen. Relatief lagere brontellingen op 34 MHz in vergelijking met 62 MHz suggereert een gemiddelde afvlakking van de spectral index van radiobronnen bij lagere frequenties. Een groep steil-spectrum (ultra-steep spectrum, or USS) bronnen is geïdentificeerd in het Boötes veld, gebruikmakend van de kaarten op 62, 153 en 1400 MHz. Deze USS bronnen zijn belangrijk omdat zij geassocieerd worden met zware, verre sterrenstelsels.

De eerste diepe LOFAR HBA waarnemingen (130 – 169 MHz) van het Boötes veld worden gepresenteerd in **hoofdstuk 4**. De kaart van 19 vierkante graden is een factor tien beter in gevoeligheid en een factor vier beter in resolutie dan de GMRT waarnemingen in hoofdstuk 2. Veel aandacht is besteed aan de kalibratie van deze data, gebruikmakend van een geavanceerde richtingsafhankelijke kalibratietechniek. De resulterende catalogus bevat 5 652 radiobronnen. De brontellingen gaan een factor tien dieper in gevoeligheid dan wat eerder is gedaan. De brontellingen vertonen een afvlakking voor de zwakste bronnen, welke samenvalt met de verwachte toename van aantallen (radio-zwakkere) sterrenstelsels met significante sterformatie.

Hoofdstuk 5 bevat een studie van de evolutie van de fractie radio-luide AGN als een functie van massa van het omringende sterrenstelsel, en toont hoe de fractie lage-massa sterrenstelsels met krachtige, radio-sterke AGN toeneemt met roodverschuiving. Dit is gerealiseerd door het combineren van radio en optische waarnemingen voor zowel een groep sterrenstelsels in het nabije/huidige heelal alsmede in het verre/vroege heelal. Een toename van meer dan een factor tien is waargenomen in de fractie lage-massa sterrenstelsels met radio-luide AGN. Aan de andere kant blijft de fractie hoge-massa sterrenstelsels met een radio-luide AGN min of meer constant. Een toename in de *cold mode* of *radiative mode* accretie, als gevolg van een toenemende voorraad

koud gas in vroeger tijden, wordt opgevoerd als de reden voor het toenemende aantal lage-massa radio-luide AGN.

In **hoofdstuk 6** wordt de evolutie van radio AGN als functie van de eigenschappen van het omringende sterrenstelsel verder onderzocht. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de LOFAR waarnemingen van het Boötes veld uit hoofdstuk 4. De gecombineerde optische en infrarood data is gebruikt om een catalogus van sterrenstelsels samen te stellen met daarin de intrinsieke optische kleuren, fotometrische metingen van afstand, en totale massa in sterren. Deze worden gebruikt voor het bestuderen van sterke verre radiobronnen. De infrarood-waarnemingen worden gebruikt om een eerste scheiding aan te brengen in de radiobronnen tussen de HERGs en LERGs. Aangetoond wordt dat de fractie HERGs en de fractie van radio-luide AGN in blauwe sterrenstelsels toeneemt met roodverschuiving.

Toekomst Perspectief

De toekomst ziet er kleurrijk uit voor radio-studies van de evolutie van AGN. De huidige LOFAR surveys vinden nu al dergelijke objecten op hogere roodverschuiving, zoals in dit proefschrift is gepresenteerd. Binnen afzienbare tijd zullen complementaire continuüm surveys op hogere frequenties worden uitgevoerd met nieuwe en vernieuwde instrumenten. Diepere optische surveys worden momenteel gepland of reeds uitgevoerd. Nieuw geplande optische instrumenten zullen de belangrijkste bron van spectroscopische informatie worden voor de LOFAR surveys. Verder in de toekomst wordt een grotere vernieuwing van het onderzoeksveld verwacht in termen van ongekende diepte en hoeveelheid hemeloppervlak waargenomen in optische en spectroscopische surveys. Afsluitend, de studie van AGN en evolutie van sterrenstelsels is ook een belangrijk onderwerp in de wetenschappelijke onderbouwing van de SKA.

