



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Radio galaxies at low frequencies: high spatial and spectral resolution studies with LOFAR

Morabito, L.K.

Citation

Morabito, L. K. (2016, September 13). *Radio galaxies at low frequencies: high spatial and spectral resolution studies with LOFAR*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/43072>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License:

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/43072>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/43072> holds various files of this Leiden University dissertation.

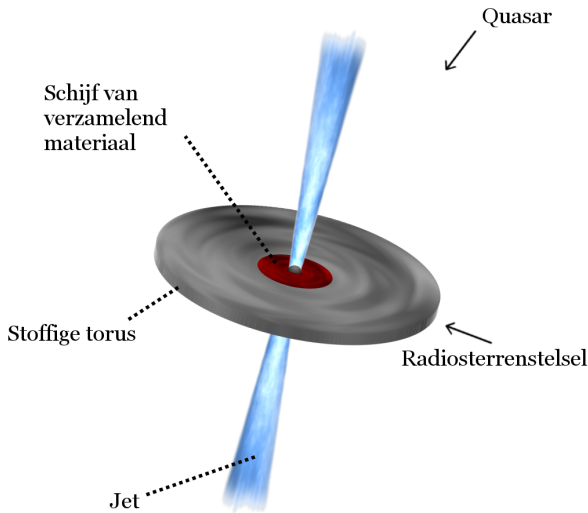
Author: Morabito, L.K.

Title: Radio galaxies at low frequencies: high spatial and spectral resolution studies with LOFAR

Issue Date: 2016-09-13

Actieve Sterrenstelsels

In het hart van bijna elk massief sterrenstelsel bevindt zich een zwart gat dat miljoenen tot miljarden keren zwaarder is dan onze Zon. De meeste sterrenstelsels bevatten ‘slapende’ zwarte gaten. In een fractie van sterrenstelsels ziet men zwarte gaten in interactie met hun gaststerrenstelsels, waarbij gas wordt ingevangen in een heldere hete schijf van verzamelend materiaal, dat rond hen spiraalt als water in het afvoerputje van een badkuip. Wanneer het zwarte gat van een sterrenstelsel op deze manier wordt gevoed, dan noemt men het sterrenstelsel ‘actief’. De schijf van verzamelend materiaal rond het zwarte gat is klein vergeleken met de grootte van het hele sterrenstelsel, maar kan genoeg zichtbaar licht produceren om de rest van het sterrenstelsel te overschijnen. Het heldere licht afkomstig van deze compacte schijf ziet er voor een waarnemer op Aarde uit als een puntbron, vergelijkbaar met een ster. Vandaar dat men dit ook quasi-stellaire bronnen of *quasars* noemt. Actieve sterrenstelsels hebben een variatie aan verschillende kenmerken, en niet alle zijn quasars. De schijf van verzamelend materiaal kan omgeven zijn door stoffig moleculair gas. Dit stoffige gas wordt warmer als het licht afkomstig van de schijf absorbeert en het gloeit hierdoor helder in het infrarood. Aangezien alles aan de hemel slechts in twee dimensies (en niet drie) door ons wordt waargenomen, kan het stoffige gas afhankelijk van de orientatierichting van het sterrenstelsel soms het licht van de schijf blokkeren. Zelfs als wij weten dat een sterrenstelsel actief is, kunnen wij dan geen quasar zien. Er zijn ook andere observationele kenmerken die eveneens afhangen van de orientatierichting, en sterrenkundigen gebruiken daarom meerdere aanwijzingen om actieve sterrenstelsels te identificeren. Figuur 1 laat een diagram zien van het zwarte gat en het omliggende gebied in een radioluid actief sterrenstelsel.



Figuur 1: Een diagram van het zwarte gat en het omliggende gebied in een actief sterrenstelsel. De straalstroom is slechts in ongeveer 10 procent van de actieve sterrenstelsels aanwezig. Deze stelsels noemt men 'radioluid'. Actieve sterrenstelsels kunnen verschillende waargenomen kenmerken hebben, afhankelijk van de orientatie ten opzichte van de waarnemer. De pijlen geven aan welk type object (afhankelijk van de kijkhoek) wordt gezien. Afbeelding afkomstig van J. Harwood.

Radiosterrenstelsels

Ongeveer 10 procent van actieve stelsels produceert straalstromen (ofwel 'jets') van plasma dat met relativistische snelheden beweegt. Deze straalstromen genereren radiostraling vanwege spiralende electronen in magneetvelden; een proces dat men synchrotronstraling noemt. Deze heldere krachtige jets bestaan uit twee klassen met duidelijk verschillende morfologische eigenschappen. Figuur 2 laat voorbeelden zien van de twee verschillende klassen: Fanaroff-Riley I (FRI) bronnen, die radiojets bevatten die meer op fonteinen lijken, met brede jets die zwakker worden richting de rand; en Fanaroff-Riley II (FRII) bronnen, die zeer gerichte radiojets hebben en het helderst zijn op het uiteinde van de jet.

Van verre radiosterrenstelsels wordt vermoed dat zij evolueren tot de meest massieve sterrenstelsels in het huidige heelal, en vaak bevat de ruimte rond hen meer sterrenstelsels dan verwacht. Daarom zijn deze stelsels belangrijke indicators om de evolutie van sterrenstelsels te bestuderen. Vooral ook omdat populaties van sterrenstelsels bestudeerd kunnen worden terwijl zij de overgang maken naar clusters van sterrenstelsels, de grootste gravitationeel gebonden objecten in het heelal.

De verst afgelegen radiosterrenstelsels hebben eigenschappen die verschil-



Figuur 2: Voorbeelden van typische Fanaroff-Riley FRI en FRII bronnen. *Links:* FRI radiosterrenstelsel Centaurus A. De kleur paars laat de radio-emissie zien (Bronnen: Röntgen: NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al; Radio: NSF/VLA/Univ.Hertfordshire/M.Hardcastle; Optisch: ESO/WFI/M.Rejkuba et al.). *Rechts:* Cygnus A, het archetypale FRII radiosterrenstelsel. De kleur rood laat de radio-emissie met typische heldere rand zien. (Bronnen: Röntgen: NASA/CXC/SAO; Optisch: NASA/STScI; Radio: NSF/NRAO/AUI/VLA).

len van lokale radiosterrenstelsels en het is niet duidelijk of deze verschillen intrinsiek zijn of aan omgevingsfactoren liggen. Een van de meest intrigerende verschillen tussen lokale en verre radiostelsels is dat hoe verder een radiostelsel ligt, hoe steiler zijn radiospectrum is (de maat van steilheid is de spectrale index parameter, α). De relatie tussen de spectrale index in het radiogebied en de roodverschuiving (een astronomische afstandsmaat) is in het verleden succesvol toegepast om de verst afgelegen radiosterrenstelsels te vinden. Desondanks is de oorzaak van deze relatie onbekend.

Koolstof-radio-recombinatielijnen

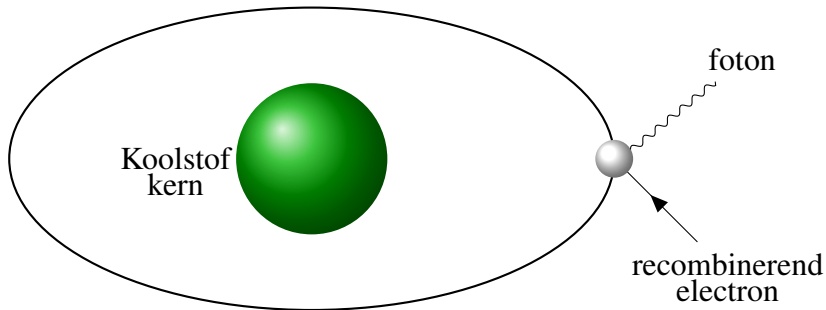
De cyclus van sterformatie speelt een belangrijke rol in de evolutie van een sterrenstelsel. Het interstellair medium (ISM) levert de brandstof om nieuwe sterren te maken en is de verzamelplaats voor uitgestoten materiaal van oude sterren. Er zijn veel verschillende componenten in het ISM, en doorgronden hoe deze componenten bijdragen aan stervorming is van uiterst belang om de evolutie van sterrenstelsels te begrijpen. Een van de minst bekende onderdelen van het ISM is het koude neutrale medium, dat meer dan 10^{19} keer minder dicht is dan de lucht op Aarde en dat tevens een paar honderd graden onder nul is. Dit nevelachtige gas bestaat met name uit neutrale waterstofatomen en koolstofatomen

die eenmaal geïoniseerd zijn (dat wil zeggen een electron missen).

Koolstofatomen hebben normaal zes protonen en zes electronen en zijn ongeveer een half miljoen keer kleiner dan de gemiddelde dikte van een menselijk haar. Het buitenste electron is redelijk makkelijk uit zijn baan te schieten door laagenergetische ultravioletstraling, waarna een eenmaal geïoniseerd koolstofatoom overblijft. In het koude neutrale medium leven deze koolstofatomen samen met vrije electronen en neutrale waterstofatomen. De vrije electronen kunnen opnieuw ingevangen worden door de koolstofionen in een proces dat recombinitie heet (Figuur 3 laat een diagram zien van recombinitie). Op het moment dat deze recombinitie plaatsvindt naar een hoog energieniveau ($n \geq 300$), worden spectrale kenmerken gegenereerd op lage radiofrequenties (≤ 240 MHz). Er zijn veel van deze koolstof-radio-recombinatielijnen (CRRLs) in het radiofrequentiegebied maar zij zijn het sterkst in de FM-radioband.

Het waarnemen van CRRLs op lage frequenties heeft drie grote voordelen. Ten eerste zijn zij makkelijk waar te nemen omdat de spectrale kenmerken (door de achterliggende fysische processen) sterker zijn. Ten tweede liggen de lijnen dicht bij elkaar op lage frequenties en daardoor kunnen instrumenten met een breed golflengtebereik meerdere CRRLs tegelijkertijd waarnemen. Meerdere CRRLs gelijktijdig waarnemen verbetert de signaal-ruisverhouding waardoor het koude neutrale medium beter waargenomen kan worden. Ten derde worden laagfrequente CRRLs waargenomen als absorptie (in tegenstelling tot emissie), en hierdoor zijn de detecties alleen gelimiteerd door de hoeveelheid van absorberend gas en niet door de afstand tot het gas. Dit maakt het mogelijk om CRRLs op zeer grote afstanden waar te nemen, waar vrijwel niets bekend is over de koude neutrale medium inhoud van sterrenstelsels.

Door waarnemingen van deze koolstof-radio-recombinatielijnen te vergelijken met gedetailleerde theoretische modellen is het mogelijk om informatie te verkrijgen over de temperatuur en dichtheid van het koude neutrale medium. Deze modellen werden ontwikkeld in de jaren 60 en 70 en zijn pas recent uitgebreid om ook de laagst waarneembare radiofrequenties te omvatten (Salgado et al., verstuurd). Ontwikkelingen op computergebied maken het mogelijk om een nauwkeurige berekening te doen van de benodigde kwantiteiten om de electronpopulatie in koolstofatomen te berekenen, alsook een complete studie van hoe de stimulatie van de grondtoestand van koolstof de sterkte van CRRLs kan beïnvloeden.



Figuur 3: Schematische weergave van een recombinerend koolstofatoom. De groene bal is de kern die protonen, neutronen en vijf electronen bevat. De witte bal is een vrij electron dat ingevangen is door de koolstofkern. Bij dit proces komt een foton vrij.

De Low Frequency Array

De resolutie die een telescoop kan halen is gerelateerd aan de waarnemfrequentie en de grootte van de telescoop. Voor een hoge resolutie bij lage frequenties zijn telescopschotels nodig die zo groot zijn dat het onpraktisch wordt. Radio-sterrenkundigen gebruiken daarom vaak arrays van telescopen. Het combineren van de signalen van individuele telescopen vormt effectief een instrument met de eigenschappen van een vele malen grotere telescoop. Dit proces noemt men interferometrie.

De Low Frequency Array (LOFAR; van Haarlem et al., 2013) is een nieuwe radio-interferometer met een revolutionair fase-array ontwerp dat gebruikt maakt van elektronisch gerichte dipolen in plaats van de traditionele schotelantennes. De simpele dipoolantennes zijn gegroepeerd in stations. Er liggen 37 stations geconcentreerd in Nederland, en verder zijn 12 stations verspreid over 5 andere Europese landen. Er zitten twee verschillende dipooltypes in elk station. De High Band Array (HBA) werkt net boven de FM-radioband en bestaat uit dunne metalen dipolen ondersteund door piepschuim en afgeschermd van weersinvloeden. De Low Band Array (LBA), waarop de focus van dit proefschrift ligt, werkt net onder de FM-radioband en is het meest gevoelig rond 60 MHz. Elke LBA-antenne bestaat uit twee simpele draaddipolen vastgemaakt aan de grond, en op het hoogste punt in het midden worden ze ondersteund door een plastic buis. De locatie van de stations wordt getoond in Figuur 4, samen met een overzichtsfoto van een station en een detailfoto van de LBA-dipolen.

De meeste LOFAR-waarnemingen gebruiken alleen de Nederlandse stati-



Figuur 4: *Boven*: De locaties van LOFAR-stations. De data in dit proefschrift werd genomen voor de bouw van de stations in Polen, toen de langste basislijn lag tussen Onsala en Nançay (1292 km). *Midden*: Het LOFAR-UK-station in Chilbolton. De LBA-antennes liggen op de voorgrond met daarachter de HBA-antennes bij elkaar onder een weerbestendige bedekking. *Onder*: Dipolen van een LBA-station in de centrale kern van LOFAR, met de auteur voor schaal.

ons, waarbij een beeldveld 40 keer groter dan de volle maan wordt bestreken, en waarbij het kleinst waarneembare object aan de nachthemel zo groot lijkt als Mars. De wijde geografische verdeling van internationale stations geeft LOFAR een effectief verzamelgebied met een diameter van meer dan 1000 kilometer. Dit levert resoluties op die een factor 10 beter zijn dan alleen de Nederlandse kernstations. Deze resolutie is vergelijkbaar met de grootte van een Amerikaanse penny of een 10 eurocentmuntje op 8 kilometer (5 mijl) afstand. Deze eigenschap onderscheidt LOFAR van andere laagfrequente arrays en staat ons toe om compleet andere wetenschappelijke problemen te onderzoeken.

Met nieuwe technologische ontwikkelingen komen nieuwe uitdagingen. Laagfrequente radiotelescopen werken in een frequentiegebied waar de ionosfeer een grote invloed kan hebben op waarnemingen. Waarbij stationaire radiobronnen lijken te bewegen en/of scintilleren in afbeeldingen, zoals sterren lijken te twinkelen als men die met het blote oog door een turbulente atmosfeer bekijkt. Nieuwe calibratietechnieken zijn nodig om deze effecten uit de radiodata te verwijderen. En het probleem is dat dit voor de volledige International LOFAR zelfs nog lastiger wordt, aangezien de signalen van geografisch geïsoleerde stations komen. Met fouten in de positie van de stations, fouten in de tijds klokken, en met fouten afkomstig van de voortplanting van radiogolven bij verschillende atmosferische omstandigheden moet rekening gehouden worden.

Dit proefschrift

Het doel van dit proefschrift is om door middel van laagfrequente radiosterrenkundige technieken de volgende vragen helpen te beantwoorden:

- Zijn verafgelegen radiosterrenstelsels fundamenteel andere objecten dan hun nabijgelegen tegenhangers?
- Wat veroorzaakt de correlatie tussen de spectrale index in het radiogebied en afstand?
- Hoe groot is de koud gas inhoud van radiosterrenstelsels, en hoe speelt het een rol in de cyclus van sterformatie?

In het bijzonder gebruikt dit proefschrift de volgende data om de vragen te beantwoorden: (i) catalogi van bronnen afkomstig van LOFAR afbeeldingen die zwakkere sterrenstelsels laten zien dan eerder waargenomen op deze lage frequenties; (ii) afbeeldingen met de allerhoogste resoluties op frequenties lager dan 100MHz genomen met de International LOFAR LBA-stations; en (iii)

waarnemingen van spectrale kenmerken afkomstig van LOFAR en de Karl G. Jansky VLA (VLA).

Hoofdstuk 2 onderzoekt of de geprojecteerde groottes van radiobronnen bestaande aanwijzingen ondersteunen dat de orientatierichting van een actief stelsel direct gerelateerd is aan de waargenomen kenmerken (de andere verklaring is dat objecten met verschillende kenmerken intrinsiek anders zijn). De kijkhoek bepaalt of de waarnemer de stoffige torus vanaf de zijkant (radiosterrenstelsel) of de schijf van verzamelend materiaal binnen in de torus (quasar) ziet. Met behulp van data uit een catalogus van LOFAR-gedetecteerde radiobronnen van Williams et al. (2016) vinden we dat de LOFAR-gedetecteerde radiosterrenstelsels gemiddeld 3.1 ± 1.0 keer groter zijn dan quasars, wat bewijs levert voor een unificatie op basis van orientatie.

Hoofdstuk 3 is een gedetailleerde studie op 55 MHz van 4C 43.15, een object uit een verzameling van 10 verafgelegen FR II radiosterrenstelsels. Dit hoofdstuk presenteert de allerhoogste resolutieafbeeldingen lager dan 100 MHz, genomen met International LOFAR. De beelden van dit radiostelsel laten een brug van radio-emissie zien tussen de twee FR II radiolobben, de eerste keer dat dit fenomeen is gezien in een ver radiostelsel. De waargenomen eigenschappen van 4C 43.15 zijn vergelijkbaar met die van lokale radiostelsels, inclusief de spectrale index in het radio gebied gecorrigeerd naar het ruststelsel. Dit impliceert dat verafgelegen radiosterrenstelsels fundamenteel gelijk zijn aan hun lokale tegenhangers.

Hoofdstuk 4 onderzoekt of de relatie tussen spectrale index en roodverschuiving ($\alpha - z$) simpelweg kan ontstaan door oplopende energieverliezen op hogere frequenties in het radiospectrum door de aanwezigheid van de kosmische achtergrondstraling (CMB), dat toeneemt als $(1 + z)^4$. Dit hoofdstuk neemt een nieuwe benadering door archiefdata te selecteren voor ongeveer 50 lokale radiosterrenstelsels met genoeg data om hun hele radiospectrum te reconstrueren, en door deze te gebruiken om radiospectra te simuleren van radiostelsels op hoge roodverschuiving. We vinden dat de waargenomen relatie volledig kan worden gereproduceerd met alleen de oplopende synchrotronverliezen vanwege inverse Comptonverstrooiing met fotonen van de CMB op hoge roodverschuiving, zonder gebruik te maken van een intrinsieke α -macht relatie of omgevingsfactoren.

Hoofdstuk 5 presenteert de eerste detectie van CRRLs in een ander sterrenstelsel dan het onze. Dit sterrenstelsel is het nabijgelegen M82, dat een intense, kortdurende periode van sterformatie ondergaat. Dit is de eerste extragalactische detectie van RRLs van een element anders dan waterstof en beneden de 1 GHz. De laagfrequente CRRLs komen van koolstofatomen die aanwezig zijn

in het hart van M82 en die het koude neutrale medium volgen. Door 22 CRRLs op te tellen in het frequentiegebied 48-64 MHz, corresponderend met energieniveaus (quantum niveaus) van $n = 468 - 508$, wordt een 8.5σ detectie bereikt. Recombinatie naar zo een hoge energieniveaus betekent dat de koolstofatomen ongeveer 2.1 micron in grootte zijn. Het lijnprofiel lijkt gecorreleerd te zijn met koud atomisch gas in het kerngebied van M82, wat de verwachtingen op basis van CRRLs in onze Melkweg bevestigt.

Hoofdstuk 6 bouwt verder op Hoofdstuk 5, aangezien de eerder beschreven CRRL-detectie niet genoeg data bevat om te vergelijken met gedetailleerde modellen en daarmee de gas temperatuur en -dichtheid af te leiden. Met behulp van VLA-waarnemingen in een hoger frequentiegebied (250–480 MHz) tellen wij 12 CRRLs op om een betekenisvolle bovenlimiet te vinden waarmee we de gastemperatuur en -dichtheid met behulp van modellen kunnen beperken. We vinden dat de gastemperatuur en -dichtheid consistent zijn met de waarden van het koude neutrale medium.

Hoofdstuk 7 beschrijft de berekening van gebonden-gebonden Gaunt factoren voor energieniveaus tot aan $n = 2000$. Deze factoren worden gebruikt om oscillatorsterktes te berekenen; een van de benodigde kwantiteiten in de verbeterde theoretische modellen van CRRLs (Salgado et al., 2016a,b). Een overzicht wordt gegeven van verschillende rekenmethodes, met een nadruk op de computationele problemen waardoor eerdere auteurs hun toevlucht zochten tot benaderingen met grote onzekerheid. De nieuwe berekeningen hebben de onzekerheid met meer dan factor 10 verbeterd. Deze waarden zijn bruikbaar voor een groot aantal natuurkundige toepassingen, en zijn daarom getabuleerd en online beschikbaar gemaakt.

In het algemeen heeft dit proefschrift twee grote conclusies:

- Verre radiosterrenstelsels lijken op hun lokale tegenhangers
- Koolstof-radio-recombinatielijnen zijn detecteerbaar in extragalactische bronnen en kunnen een krachtige techniek zijn om de eigenschappen van het koude neutrale medium in verre sterrenstelsels te bepalen

