



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Faint quasars at very low frequencies

Retana Montenegro, E.F.

### Citation

Retana Montenegro, E. F. (2019, October 16). *Faint quasars at very low frequencies*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/79263>

Version: 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/1887/79263>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:  
<http://hdl.handle.net/1887/79263>

**Author:** Retana Montenegro, E.F.

**Title:** Faint quasars at very low frequencies

**Issue Date:** 2019-10-16

# Samenvatting

Rond de tijd van de ontdekking van de eerste quasar, 3C273, stond het algemeen geaccepteerde paradigma van een statisch heelal onder druk vanwege de theorie dat zware zwarte gaten aanwezig zijn in het centrum van de meerderheid van sterrenstelsels, en vanwege de waarneming dat sterrenstelsels zich van ons af bewegen. Sindsdien heeft de continue verbetering van sterrenkundige waarnemingen ons in staat gesteld om de belangrijke rol van zwarte gaten in het ontstaan en de evolutie van sterrenstelsels beter te begrijpen.

Nu, meer dan 50 jaar na de ontdekking van 3C273, zijn er meer dan een half miljoen quasars gevonden die alsmaar in massa toenemen, verspreid over een enorme tijdspanne van het heden (het lokale heelal) tot aan een tijd waar het (verre) heelal minder dan zevenhonderd miljoen jaar oud was. De grote lichtkracht van quasars stelt ons in staat deze objecten in groot detail te bestuderen, met name de karakteristieken van de zwarte gaten die de drijvende kracht zijn achter quasars.

Een kernthema van dit proefschrift is het bestuderen van quasars vanuit een radio-sterrenkundig perspectief. Radiostraling van quasars geeft onder andere informatie over hoe quasars ontstaan en evolueren, over het verband tussen de quasar en z'n directe omgeving, en over eigenschappen van het sterrenstelsel waarin de quasar zich bevindt. Bijvoorbeeld, de meest krachtige radio-quasars (radio-loud quasars; RLQs) worden waarschijnlijk aangedreven door de zwaarste zwarte gaten en bevinden zich in de meest massieve structuren in het heelal. Daarintegen worden zwakke radio-quasars (radio-quiet quasars; RQQs) waarschijnlijk aangedreven door minder zware zwarte gaten.

## Quasars

Omdat quasars compacte bronnen zijn met een hoge lichtkracht, werd de eerst ontdekte quasar verkeerd geclassificeerd als zijnde een ster in ons eigen sterrenstelsel

(de Melkweg) met een ongewoon spectrum. Deze vergissing leeft nog steeds voort in de naam quasar, een afkorting van quasi-stellar radio source. De kosmische aard van quasars werd als eerste herkend door de Nederlands-Amerikaanse sterrenkundige Maarten Schmidt. Schmidt identificeerde de brede emissielijnen in het optische quasar-spectrum als emissielijnen van waterstof die meer dan 15% verschoven waren naar de rode kant van het spectrum. Quasars hebben verscheidene karakteristieke eigenschappen die ze onderscheidt van andere actieve kernen van sterrenstelsels (active galactic nuclei; AGN). De aanwezigheid van sterke, brede emissielijnen is een kenmerkende eigenschap van quasars, en wordt toegeschreven aan de aanwezigheid van wolken van hoog geëxciteerd gas van hoge dichtheid en zeer hoge temperatuur, die met hoge snelheid nabij het centrale zwarte gat bewegen. Onder de aanname dat de beweging van de gaswolken wordt beschreven door klassieke Newtoniaanse mechanica kan de massa van het zwarte gat worden afgeleid. Hieruit volgt een typische massa van zwarte gaten in quasars van meer dan een paar miljoen zonsmassas.

Variatie in lichtkracht is een andere belangrijke eigenschap van quasars die al vroeg werd bestudeerd. Zo varieert de lichtkracht van de vroegst-bekende quasar 3C273 op tijdschalen van dagen tot jaren. Deze variaties impliceren dat de emissie afkomstig is van een compacte bron, niet groter dan een paar lichtjaar. De kleur van quasars is significant anders dan die van de meeste sterren en sterrenstelsels vanwege de brede emissielijnen (vooral de  $\text{Ly}_\alpha$  emissielijn). Deze onderscheidende eigenschap heeft in de afgelopen twee decennia geleid tot een aantal grote zoektochten (surveys) naar quasars op grote afstand (hoge roodverschuiving). Hierdoor zijn er nu meer dan een half miljoen quasars bekend tot op een roodverschuiving van 7.5. Radio-waarnemingen zijn een andere belangrijke manier om quasars beter te begrijpen. De meerderheid van quasars zijn zwakke radiobronnen (RQQs) en blijven meestal ongedetecteerd in grote radio surveys, maar ongeveer 10–15% van de quasars is honderden tot duizenden malen krachtiger (RLQs). Radiostraling van bronnen in deze laatste categorie is afkomstig van gecollimeerde jets nabij het zwarte gat. Waarom quasars radio-loud worden is nog steeds een openstaande vraag.

## Radio-sterrenkunde op zeer lage frequenties

Er is nog steeds veel onduidelijk over oorsprong van radiostraling in quasars. In RLQs wordt radiostraling gegenereerd in de vorm van synchrotron-straling. Voor RQQs bestaat het vermoeden dat ook stervormingsprocessen in het sterrenstelsel waar de quasar gevestigd is verantwoordelijk zijn voor een deel van de radiostraling. Het radiospectrum kan goed worden beschreven met een simpele functie  $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ , waarbij  $S_\nu$  de waargenomen radio-lichtkracht (flux density) is van de bron,  $\nu$  is de waarneemfrequentie, en  $\alpha$  de zogenaamde spectraalindex. Voor quasars heeft  $\alpha$  een positieve waarde, waardoor de radio-lichtkracht toeneemt bij lagere waarneemfrequenties.

De Low-Frequency Array (LOFAR) is een nieuwe radio-telescoop, gebaseerd op revolutionaire phased-array technologie, die waarneemt op zeer lage-frequenties (10-240 MHz). Een phased-array radio-telescoop bestaat uit stations van kleine antennes (dipolen) die niet bewegen. Voor ieder station worden de ontvangen signalen van de antennes digitaal gecombineerd tot een virtuele bestuurbare schotel-antenne. Dit elimineert het gebruik van dure, mechanisch bestuurbare schotel-antennes zoals bij de Amerikaanse Very Large Array (VLA) en de Indiase Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT). LOFAR is opgebouwd twee soorten antennes: de Low Band Antenna (LBA), werkend tussen 10 en 80 MHz, en de High Band Antenna (HBA), werkend tussen 120 en 240 MHz. LOFAR bestaat momenteel uit 38 Nederlandse stations, en 13 internationale stations in Duitsland, Frankrijk, Verenigd Koninkrijk, Ierland, Zweden en Polen. Het Nederlandse deel van LOFAR alleen produceert al waarnemingen van ongekennde resolutie en gevoeligheid op lage radiofrequenties. En door het gebruik van de internationale stations is het mogelijk om de beeld-resolutie met nog een factor tien te verhogen. De volledig digitale besturing van LOFAR maakt het mogelijk om tegelijkertijd in verschillende richtingen en op verschillende frequenties waar te nemen, waarbij alleen de totale bandbreedte van de telescoop de beperkende factor is. Deze zogenaamde multi-beam capaciteit geeft een groot instantaan blikveld, die samen met de hoge gevoeligheid en resolutie van LOFAR een enorm krachtige survey telescoop maken.

Het verleggen van de grenzen door diepere waarnemingen en hogere resoluties op zeer lage-frequenties leidt ook tot nieuwe uitdagingen. Één van de grootste uitdagingen

is verstoring van radiosignalen door de Aardse ionosfeer, waardoor radiobronnen aan de hemel zich continue lijken te verplaatsen. Dit kan een grote (negatieve) invloed hebben op de kwaliteit van de radio-afbeeldingen. Het onderdrukken van ionoferische effecten vereist de ontwikkeling en toepassing van nieuwe kalibratie-algoritmes.

## Dit proefschrift

Quasars representeren de actieve fase van zware zwarte gaten, en bevinden zich onder de meest heldere, krachtigste, en meest energetische objecten in het heelal. Het doel van dit proefschrift is om radio-waarnemingen op lage en hoge frequenties te gebruiken om de volgende vragen te beantwoorden:

- Zijn radio-sterke en radio-zwakke quasars verschillende objecten?
- Zijn diepe, laag-frequente radio-waarnemingen effectief te gebruiken om quasars op hoge roodverschuiving te vinden?
- Hoe evolueert de populatie van zwakke radio-quasars als een functie van roodverschuiving?
- Is er een samenhang tussen de directe omgeving van quasars en de oorsprong van hun radiostraling?

In dit proefschrift wordt gebruik gemaakt van radio-afbeeldingen op lage en hoge frequenties, van bestaande catalogi van optische spectra van quasars, en van ondersteunende survey data uit optische en infrarood-waarnemingen. In het tweede hoofdstuk worden bestaande radio en spectroscopische catalogi van quasars gebruikt om gemeenschappelijke eigenschappen van RQQs en RLQs te bestuderen. In het derde hoofdstuk wordt beschreven hoe een richtingsafhankelijk kalibratie-algoritme is gebruikt om een diepe LOFAR afbeelding op 150 MHz te maken van het Boötes veld, (een onderdeel van de NOAO Deep Wide-field Survey; NDWFS) en hoe daaruit een catalogus van radiobronnen is geconstrueerd. De daarop volgende hoofdstukken combineren deze catalogus van radiobronnen met data uit de optische en infrarood surveys om quasars op

hoge roodverschuiving te selecteren, en om de evolutie van deze geselecteerde quasars te bestuderen als een functie van roodverschuiving.

**Hoofdstuk 2** begint met het samenvoegen van twee surveys: de Sloan Digital Sky Survey (SDSS) en de Faint Images of the Radio Sky at Twenty centimeters (FIRST) survey. Dit resulteert in een dataset van 45441 radio-quiet quasars en 3493 radio-loud quasars met roodverschuivingen van 0.3 tot maximaal 2.3. Hieruit leiden we af dat RLQs zich in halos van donkere materie bevinden die tenminste een orde van grootte zwaarder zijn dan halos met RQQs. Verder vinden we dat de mate waarin quasars zich groeperen afhangt van de massa van de bijbehorende zwarte gaten, waarbij quasars met zwaardere zwarte gaten sterker groeperen dan quasars met minder zware zwarte gaten. Deze resultaten suggereren dat er inderdaad een intrinsiek verschil is tussen RLQs en RQQs.

**Hoofdstuk 3** presenteert de resultaten van een diepe radio survey van het NDWFS-Boötes veld, waargenomen met LOFAR tussen 120 en 168 MHz. Hiervoor is in totaal is 55 uur aan LOFAR-waarnemingen gekalibreerd met het richtings-afhankelijk algoritme *facet calibration*. De resulterende afbeelding heeft een resolutie van ongeveer  $\sim 5.0''$  en een gevoeligheid van  $55 \mu\text{Jy}/\text{beam}$  in het centrum van het veld. De hieruit afgeleide catalogus bevat 10091 radiobronnen (gedetecteerd met een significantie van minstens  $5\sigma$ ) in een gebied van  $20 \text{ deg}^2$ . We bevestigen dat de aantallen zwakke radiobronnen (beneden  $1 \text{ mJy}$ ) als een functie van waargenomen radio-lichtkracht (flux density) overeenkomen met de resultaten uit eerdere surveys op hoge en lage radio-frequenties. De reden voor de waargenomen afvlakking in de zwakke radiobron-aantallen is een toenemende bijdrage van stervormende sterrenstelsels en zwakke AGN. Verder bestuderen we de bijdrage aan de onzekerheid van radiobron-aantallen door kosmische variantie, waaruit volgt dat de spreiding door kosmische variantie groter is dan de Poisson-onzekerheid op het aantal bronnen. Dit kan mogelijk de verschillen verklaren tussen eerder gerapporteerde diepe radiobron-aantallen beneden  $1 \text{ mJy}$ .

**Hoofdstuk 4** bouwt voort op de resultaten van **Hoofdstuk 3**. We presenteren een nieuwe methode voor het selecteren van quasars op hoge roodverschuiving, gebruikmakend van onze diepe LOFAR waarnemingen van het NDWFS-Boötes veld. Deze methode

combineert selectie middels optische en infrarode kleuren met  $> 5\sigma$  LOFAR detecties op 150 MHz, waarbij wordt voorkomen dat sterren ten onrechte worden geïdentificeerd als quasars. De unieke gevoeligheid van onze LOFAR waarnemingen stelt ons in staat om radiostraling te detecteren van quasars die anders als radio-quiet zouden worden geclassificeerd. Verder onderzoeken we het effect van de spectraalindex op de selectie van quasars door de LOFAR waarnemingen te combineren met radio-afbeeldingen op 1400 MHz van de Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT). We vinden dat de door ons geselecteerde quasars relatief stijle radiospectra hebben met een gemiddelde spectraalindex van  $\alpha \simeq -0.73$  tussen 150 en 1400 MHz.

In **Hoofdstuk 5** gebruiken we machinaal leren technieken om een lijst van quasars samen te stellen uit het NDWFS-Boötes veld. Hiermee bestuderen we de ruimtelijke dichtheid van quasars als functie van intrinsieke lichtkracht (de zogenaamde *luminosity function*) voor radio-geselecteerde quasars (RSQs) met roodverschuivingen tussen 1.4 en 5.0. Onze resultaten suggereren dat heldere RSQs een vergelijkbare evolutionaire trend vertonen met lichtzwakke quasars. Door de ruimtelijke dichtheid van RSQs te vergelijken met lichtzwakke quasars op dezelfde roodverschuiving volgt dat RSQs tot 39% van de *totale* populatie quasars vormen. Binnen de onzekerheden lijkt deze fractie niet afhankelijk te zijn van roodverschuiving. Wij beargumenteren dat de meest lichtzwakke quasars een overgangsfase zouden kunnen zijn tussen radio-quiet en radio-quiet quasars.