



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Unveiling the nature of giant radio galaxies

Dabhade, P.

### Citation

Dabhade, P. (2021, May 25). *Unveiling the nature of giant radio galaxies*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3179453>

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/1887/3179453>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <https://hdl.handle.net/1887/3179453> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Dabhade, P.

**Title:** Unveiling the nature of giant radio galaxies

**Issue Date:** 2021-05-25

# Samenvatting in het Nederlands

## Gigantische radiostelsels

Ons huidige begrip van actieve sterrenstelsels vertelt ons dat ze grofweg zijn onderverdeeld in twee verschillende fysieke klassen, namelijk stelsels die gedomineerd worden door hun actieve kern en radio-jets die straling uitzenden op radiogolflengten, genaamd radio-luide actieve sterrenstelsels, en stelsels zonder radio-jets, genaamd radio-zwakke actieve sterrenstelsels. Radio-luide actieve sterrenstelsels worden ook wel radiostelsels genoemd. De radio-jets en lobben die ze vertonen reiken verder dan het optische sterrenstelsel. Hun vorming, groei en evolutie wordt al bijna zes decennia lang onderzocht en bestudeert met behulp van grootschalige radio- en optische observaties, samen met theoretisch onderzoek en numerieke simulaties. Dit heeft geresulteerd in de ontwikkeling van modellen die de meeste waargenomen eigenschappen verklaren en bijdragen aan ons huidige begrip ervan. Enkele openstaande problemen met betrekking tot radio-luide actieve sterrenstelsels of radiostelsels worden echter nog actief onderzocht, zoals wat de omstandigheden zijn waaronder een actief sterrenstelsel radio-luid wordt en waarom alleen een klein deel van de radiostelsel-populatie tot megaparsec-grootte groeit. Radiostelsels of radio-luide quasars die meer dan 0,7 megaparsec groot worden, worden gedefinieerd als gigantische radiostelsels (GRGs), die bijna twee decennia (1974) na de ontdekking van radiostelsels rond 1950 werden gevonden.

Tot de komst van grote observatie campagnes met radio telescopen in de jaren negentig, hing het ontdekken van uitzonderlijke radio objecten af van de toegewijde observaties van heldere bronnen die waren geselecteerd uit verfijnde radio catalogi (bijv. 3CRR), die honderden radio bronnen bevatten. De komst van gevoelige grote observatie campagnes zoals NVSS, WENSS, FIRST en SUMSS in de jaren negentig luidde het tijdperk in van snelle ontdekkingen van interessante radio objecten, variërend van galactisch tot extragalactisch; sterren tot actieve stelsels tot clusters van sterrenstelsels. Dit gaf de mogelijkheid om grote groepen radio bronnen te bestuderen, die de trends in hun respectievelijke eigenschappen aan het licht brachten en leidde tot de ontdekking van GRGs. De meeste onderzoeken naar GRG's waren echter beperkt tot radio golflengten en waren gericht op hun eigenschappen op grote schaal. De actieve kern eigenschappen van GRG's biedt

ons daarom de mogelijkheid om ze te vergelijken met normale radiostelsels. Deze vergelijking stelt ons in staat om de onderscheidende factoren tussen de twee groepen te bepalen en te leren hoe sommige radio stelsels zo groot zijn geworden. In dit proefschrift is gewerkt aan de bovengenoemde vragen (zie sectie 1.5 van hoofdstuk 1) over de gigantische aard van GRGs om ons begrip over hun eigenschappen te verbeteren.

## Dit proefschrift

Tot het jaar 2016 waren slechts ongeveer 300 GRG's bekend en de studies van hun actieve kernen waren zeer beperkt. Om de mogelijke oorzaken van de gigantische aard van GRG's en de zeldzaamheid ervan te begrijpen, is het essentieel om zowel hun actieve kernen als hun omgevings eigenschappen te bestuderen en grootschalige onderzoeken uit te voeren. Om dit te bereiken is er behoefte aan een statistisch grote hoeveelheid GRGs. Daarom was de belangrijkste focus van dit proefschrift het uitvoeren van grootschalige zoektochten in radio observaties, aangevuld met nieuwe optische data om grote groepen GRGs te maken voor het bestuderen van hun eigenschappen en trends. Het onderzoek wat is uitgevoerd met deze nieuwe groepen GRGs heeft een aantal belangrijke vragen beantwoord over de zeldzaamheid en eigenschappen van de actieve sterrenstelsels die worden beschreven in de hoofdstuksgewijze samenvatting hieronder.

Hoofdstuk 2 presenteert de resultaten van het project genaamd SAGAN, wat staat voor 'Search and Analysis of Giant radio Galaxies with Associated Nuclei'. Het doel van dit project is om een specifieke studie van GRG's uit te voeren om open vragen die ermee verband houden te beantwoorden. In het kader van dit project hebben we systematisch gezocht naar GRG's uit beschikbare radio data aangevuld met optische observaties. Als resultaat werden 25 GRG's ontdekt in de NRAO VLA Sky Survey (NVSS) met een roodverschuiving van  $0,07 < z < 0,67$ . Met behulp van openbaar beschikbare gegevens hebben we hun radio-, optische en middel-infrarood eigenschappen bestudeerd. Door de nieuw ontdekte 25 GRG's te combineren met de bekende GRG's uit de literatuur, hebben we een groep van 137 GRG's gemaakt en voor het eerst hun actieve stelsel excitatie type geclassificeerd met behulp van infrarood kleuren. Hierdoor konden we aantonen dat actieve stelsels van de GRG's geen geprefereerde excitatie toestand hebben (hoog of laag). Ten slotte hebben we met behulp van onze 25 nieuwe GRG's en andere GRG-gegevens uit de literatuur een groep van 82 GRG's gemaakt om ze te bestuderen met betrekking tot hun lichtkracht en grootte (met behulp van een P-D-diagram), samen met een groep kleinere radio bronnen uit de literatuur. Onze analyse heeft onthuld dat de GRGs een lagere helderheid hebben vergeleken met de radiostelsels op een frequentie van 1.4 GHz. Dit zou mogelijk kunnen komen door de hogere adiabatiese uitzetting en verlies van straling in GRGs. Radiostelsel modellen hebben laten zien dat radiostelsels met leeftijd evolueren naar grotere formaten en lagere helderheden. Daarnaast hebben we ook gevonden dat er zich geen bronnen

bevinden in de rechter onder hoek van het P-D diagram, wat betekent dat we geen bronnen hebben gevonden met heel grote formaten en lage helderheden. Deze bronnen hebben een lage oppervlaktehelderheid en zijn te zwak om gedetecteerd te worden door observatie campagnes zoals NVSS. Ook tonen onze resultaten aan dat GRGs met formaten groter dan 2 Mpc zeldzaam zijn.

In hoofdstuk 3 worden de resultaten gepresenteerd van een uitgebreide zoektocht naar GRG's in de LOFAR Two-meter Sky Survey (LoTSS). De eerste LoTSS data release bestreek een gebied van 424 graden<sup>2</sup> aan de noordelijke hemel op 144 MHz met een gevoeligheid van  $\sim 100 \mu\text{Jy}$  en met resoluties van  $6''$  en  $20''$ . De lage frequentie van de observaties is ideaal voor het in kaart brengen van de diffuse en steil-spectrum radiostraling van de bronnen. Verder is LoTSS met zijn hoge gevoeligheid en hoge resolutie in staat om kleinere details van de bronnen te zien, waardoor we hun morfologieën in meer detail kunnen bestuderen. Als resultaat van een hybride methode van handmatig en semi-automatisch zoeken, werd een recordaantal van 239 GRG's gevonden met roodverschuivingen in het bereik van  $0,1 < z < 2,3$ , waarvan 225 nieuwe ontdekkingen. Dit is het grootste aantal van GRG's die tot nu toe is gevonden in radio data en daarmee bijna een verdubbeling van de bekende populatie GRG's. Onze nieuwe catalogus bevat ook drie gigantische radio quasars (GRQ's) met  $z > 2$ , waarvan wordt aangenomen dat ze moeilijk te detecteren zijn vanwege de hoge roodverschuiving en zeldzaamheid. Een aantal van de GRG's hebben een zeer steil radio spectrum en zijn daarom niet zichtbaar in observaties op hogere frequenties, zoals de 1.4 GHz NVSS, waarvan zeven met geprojecteerde lineaire groottes groter dan 2 Mpc. We hebben de lage frequentie LoTSS gegevens gecombineerd met hoge frequentie NVSS gegevens om voor het eerst de spectrale index ( $\alpha$ ) van een groot aantal GRGs te bepalen en ontdekten dat de gemiddelde  $\alpha$  van GRG's 0,78 is, wat vergelijkbaar is met die van radiostelsels. In tegenstelling tot de eerdere opvattingen, toont deze studie aan dat oude GRG's met diffuse relikwie-emissie de GRG-populatie niet domineren, aangezien de spectrale index verdeling vergelijkbaar is met die RG's. Door de grootte van onze groep GRGs en beschikbaarheid van goede observaties, konden we GRGs identificeren met bijzondere kenmerken. Zo bevat onze groep 40 GRG's die worden gehost door quasars (GRQ's), 14 met herstartte actieve kern activiteit - de zogenaamde dubbele-dubbele radiostelsels. (DDRG's), 6 GRG's met hybride radio morfologie en 20 GRG's die worden gehost door de helderste cluster stelsels (BCG's) die zich in de cluster omgeving bevinden. Ten slotte stelde de grote hoeveelheid GRG's ons ook in staat om vast te stellen dat ten minste 16% van de GRG's van  $z < 0,55$  zich in de hoge dichtheid cluster- of groepsomgeving bevinden. Dit resultaat benadrukt dat ondanks de hoge dichtheid van de omgeving, onder voorbehoud van voldoende jet vermogen in combinatie met voortdurende actieve kern brandstof, RG's kunnen uitgroeien tot megaparsec-schalen.

Hoofdstuk 4 presenteert de eerste resultaten van project SAGAN, waar we de vondst van 162 nieuwe GRG's rapporteren op basis van onze zoektocht in NVSS. De nieuwe groep van GRG's is gevonden in het roodverschuivings bereik van 0,03

$< z < 0,95$  met groottes tot  $\sim 2,8$  Mpc, waarvan 23 bronnen een quasar bevatten. Door de GRG's die in de literatuur sinds 1974 (tot maart 2020) zijn gerapporteerd te combineren met onze samples van SAGAN en LoTSS, hebben we de grootste GRG-catalogus van 820 bronnen tot nu toe gedefinieerd en gemaakt. Om de GRG-catalogus te maken, werden alle artikelen die GRG's rapporteerden sinds de ontdekking in 1974 doorzocht in de verschillende databanken en alle gerapporteerde GRG's werden handmatig geïnspecteerd met nieuwe radio data zoals NVSS, TGSS, FIRST, SUMSS en WENSS. De optische sterrenstelsels van elke gerapporteerde GRG werden ook opnieuw onderzocht met behulp van de nieuwste optische databanken zoals SDSS, 6dF, 2MASS, 2dF en PANSTARRS. Bij gebrek aan kaarten met hoge resolutie die volledige structuren tonen, werden de afmetingen van bronnen opnieuw gemeten met behulp van NVSS. Een uniforme kosmologie werd gebruikt door de nieuwste Hubble-constante waarden van de Planck-missie over te nemen om de geprojecteerde lineaire afmetingen van GRG's te berekenen. Onze GRG-catalogus heeft ons in staat gesteld om statistisch significante groepen samen te stellen om de actieve kernen en omgevings eigenschappen te onderzoeken van GRGs in vergelijking met normale radiostelsels. We hebben een analyse uitgevoerd met observaties van verschillende golflengtes van de actieve kernen van de GRG's met behulp van optische, middel-infrarood en radio data. Onze resultaten tonen aan dat de massa van het zwarte gat en de radio spectrale index verdeling van GRG's en radiostelsels vergelijkbaar zijn. In tegenstelling tot het bovenstaande bleek de gemiddelde Eddington-ratio (ER) van GRG's lager te zijn dan die van RG's. We laten ook zien met grote groepen GRGs dat actieve kernen geen geprefereerde excitatie toestand hebben (laag of hoog), wat de resultaten gepresenteerd in Hoofdstuk 2 bevestigt. We zien dat GRG's in hoge excitatie toestand de neiging hebben om grotere afmetingen, hogere radio vermogens en snellere accreties te hebben. Met behulp van de data over meerdere golflengten hebben we ook het kinetische jet vermogen, het totale radio vermogen, het magnetische veld en de totale afmetingen geschat en vergeleken met hoge en lage excitatie klassen. Bovendien vinden we dat 10% van de GRG's zich in centra van clusters van sterrenstelsels bevinden, d.w.z. in een hoge dichtheid omgeving en toch uitgroeien tot megaparsec-schalen. De omgeving kan dus niet de enige factor zijn in het grote formaat van de GRGs. Met behulp van alle bovenstaande resultaten bespreken we in detail de mogelijke factoren die de vorming en groei van GRG's beïnvloeden.

Hoofdstuk 5 presenteert de resultaten van onze studie op millimeter golflengte van de optische sterrenstelsels van GRG's. Het doel van deze studie was het begrijpen van het moleculaire gasgehalte van de sterrenstelsels van GRG's en hun rol in de actieve kern brandstofvoorziening. Dergelijke studies van GRG's zijn schaars en zijn zeer essentieel om uit te voeren om hun werking te begrijpen. De meeste GRG's bevinden zich in elliptische sterrenstelsels (op een paar uitzonderingen na), die over het algemeen geen grote hoeveelheid stervorming hebben. Voor deze studie werden in totaal 12 GRG's geselecteerd op basis van hun middel-infrarood kleuren, die tekenen van verhit stof vertonen en zich waarschijnlijk in de fase van gas accretie en sterformatie bevinden. Met behulp van onze waarnemingen rapporteren

we het moleculaire gasgehalte en de efficiëntie van stervorming met betrekking tot hun melkwegstelsel morfologie. Onze waarnemingen met IRAM-30M millimeter golflengte telescoop tonen detecties aan in drie van de twaalf geselecteerde GRG's en rapporteren bovengrenzen voor de rest van de bronnen in de groep. We vinden twee van de GRG's met een tekort aan moleculair gasgehalte en met een korte uitputtingstijd van  $\sim 200$  Myr. Twee detecties uit onze groep behoren tot GRG's die worden gehost door gigantische gasrijke spiraalstelsels die uiterst zeldzaam zijn. We gebruiken de informatie die beschikbaar is in de literatuur voor vier andere GRG's naast onze groep om de waargenomen resultaten en trends te bespreken. We zien dat de sterrenstelsels van de GRGs de hoofdreeks volgen en dat de meeste passieve sterrenstelsels zijn. GRG's met detectie van moleculair gas vertonen ook tekenen van herstartende actieve kern activiteit of maken deel uit van melkwegstelsels. Dit werpt meer licht op de rol van de omgeving bij het voorzien van brandstof aan de actieve kern. Vandaar dat onze millimeter golflengte studie van GRG's laat zien dat een complexe cyclus van brandstof voorzien aan de actieve kern samen met omgevingsfactoren betrokken is bij de groei van GRG's, die verder onderzoek vereisen met behulp van een grotere groepen van GRG's.

In Hoofdstuk 6 wordt de eerste studie van een eigenaardige “Barbell” -vormige GRG (GRG-J2233+1315) gepresenteerd met behulp van waarnemingen van GMRT, LOFAR en optische 2m Himalayan Chandra Telescope (HCT). Dit object werd gevonden in het SAGAN project en voor het eerst gerapporteerd in [Dabhade et al. 2017](#) (Hoofdstuk 2), waar het formaat geschat werd met behulp van de fotometrische roodverschuiving van SDSS. In dit hoofdstuk rapporteren we de spectroscopische roodverschuiving van onze optische waarneming met HCT en schatten we de stellaire snelheidsverspreiding van het sterrenstelsel, waardoor we de massa van het zwarte gat konden schatten op  $7,7 \pm 2,9 \times 10^9 M_{\odot}$ . De radio data werden verkregen op golflengtes van 144 MHz (LOFAR), 323 MHz, 612 MHz en 1300 MHz (GMRT) en leidden tot de vondst van eigenaardige  $\sim 100$  kpc ‘kink’ structuur in de westelijke jet van de GRG. We bespreken de mogelijke reden voor de zeldzame en eigenaardige ‘knik’-structuur met behulp van beschikbare resultaten en modellen van magnetohydrodynamische (MHD) simulaties, samen met de vergelijking met andere vergelijkbare voorbeelden uit de literatuur. Dergelijke kenmerken in extragalactische radio objecten vormen het ideale laboratorium voor het bestuderen van grootschalige MHD-effecten. We zien ook een lange tegengestelde jet aan de oostkant, wat zeldzaam is in FR-II-type GRG's. Met behulp van de radiogegevens hebben we de klassieke en herziene schattingen van het magnetische veld van beide lobben ( $\sim 5 \mu\text{G}$ ) geschat, die consistent zijn met de schattingen van andere GRG's uit de literatuur. Hierdoor konden we ook de spectrale leeftijden schatten en ontdekken dat ze ouder waren dan  $\sim 110$  Myr, wat ook de levensduur van de activiteit van de sterrenstelsel kern aangeeft. Het is belangrijk op te merken dat tot op heden schattingen van het magnetische veld en de spectrale leeftijd zijn gemaakt voor minder dan 40 GRG's. Interessant is dat de GRG zich in een cluster omgeving met hoge dichtheid bevindt en het helderste sterrenstelsel in de cluster als optische tegenhanger heeft, de zogenoemde ‘brightest cluster galaxy’ (BCG), en toch

is uitgegroeid tot 1,88 Mpc in grootte. Met behulp van de informatie uit de cluster catalogus presenteren we de virale massa van het cluster van sterrenstelsels ( $M_{200} \sim 1.1 \times 10^{14} M_{\text{odot}}$ , virale straal ( $R_{200}$ ) van  $\sim 1,02$  Mpc, en verwachte röntgen lichtsterkte van  $0,29 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ ). Het is zeer waarschijnlijk dat de omgeving van deze GRG een effect heeft gehad op zijn groei en morfologie en daarom zullen toekomstige röntgen- en optische studies van dit object ons nieuwe antwoorden geven.

## Toekomstig onderzoek

Het werk in dit proefschrift heeft aangetoond dat de GRG's niet zo zeldzaam zijn als eerder werd gedacht, dankzij onze vondst van grote aantallen GRGs in LoTSS en NVSS. Nu, met meer dan 800 GRG's gecatalogiseerd, zou de volgende stap zijn om subgroepen (op verschillende roodverschuivingen) van GRG's te maken en hun actieve kern eigenschappen te bestuderen in vergelijking met hun radiostelsel met behulp van optische en infrarood spectrografen met hoge resolutie of integrale spectrale eenheid (IFU) samen met röntgen data. Dit zal helpen bij het bepalen van de accretie toestand en de algehele actieve kern sterkte van de GRG. Evenzo is het met behulp van optische en röntgen data essentieel om de omgevingen van GRG's te bestuderen om het effect van omgevings dichtheid en inhomogeniteiten op de GRG-structuur en groei te onderzoeken. Met de snelle ontwikkeling van hardware en software in de radioastronomie is de snelheid waarmee grootschalige radio onderzoeken worden uitgevoerd toegenomen en daarom zullen onderzoeken met LOFAR, uGMRT, MeerKAT, JVLA en ASKAP honderden nieuwe GRG's ontdekken, die kunnen worden gebruikt voor het onderzoek naar de groei van radio sterrenstelsels en evolutionaire modellen. Ook kan een groot aantal GRG's worden gebruikt om het warm-hete intergalactische medium te onderzoeken (WHIM) zoals beschreven in paragraaf 1.5 van Hoofdstuk 1, door de drukbalans van GRGs uit observaties te vergelijken met WHIM simulaties. Dit specifieke aspect kan worden onderzocht voor GRGs gehost door de helderste cluster sterrenstelsels of GRGs die zich in een cluster omgeving bevinden en met de komst van röntgen data van de eROSITA-missie in de nabije toekomst zal het mogelijk zijn om dergelijke studies uit te voeren.