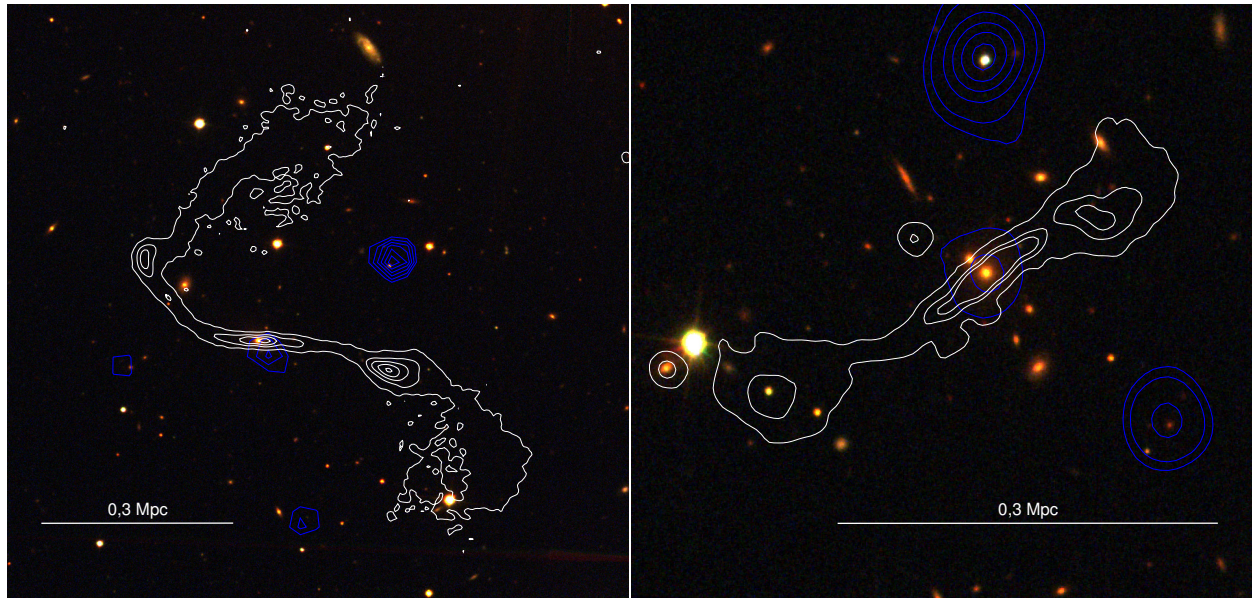




CHALMERS



Undersökning av radiogalaxer i kartläggningen XXL-North

Frida Karlsson
Christoffer Krook
Andreas Nilsson
Lukas Tolliner

KANDIDATARBETE RRYX02-17-03

Undersökning av radiogalaxer i kartläggningen XXL-North

Frida Karlsson
Christoffer Krook
Andreas Nilsson
Lukas Tolliner



Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap
Astronomi och plasmafysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2017

Undersökning av radiogalaxer i kartläggningen XXL-North

Frida Karlsson

Christoffer Krook

Andreas Nilsson

Lukas Tolliner

© Frida Karlsson, 2017.

© Christoffer Krook, 2017.

© Andreas Nilsson, 2017.

© Lukas Tolliner, 2017.

Handledare: Cathy Horellou, Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap

Examinatorer: Magnus Thomasson och Vincent Desmaris, Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap

Kandidatarbete RRYX02-17-03

Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap

Astronomi och plasmafysik

Chalmers tekniska högskola SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Optisk bild över de två centrala radiogalaxerna för den här rapporten, med radiodetektionerna överlagda som vita konturlinjer samt röntgendetektioner som blåa konturlinjer.

Typsättning: L^AT_EX

Göteborg, Sverige 2017

Undersökning av radiogalaxer i kartläggningen XXL-North
Frida Karlsson
Christoffer Krook
Andreas Nilson
Lukas Tolliner
Institutionen för rymd-, geo- och miljövetenskap
Chalmers tekniska högskola

Sammandrag

Denna rapport syftar till att undersöka två nyligen upptäckta radiogalaxer i en 25 deg^2 -region av himlen betecknad *XXL-North*. I första steget genomsöks en känslig, högupplöst radiokarta erhållen med Giant Meterwave Radio Telescope i Indien efter intressanta radiogalaxer; i andra steget görs en detaljerad analys av två av de funna radiogalaxerna, och ytterligare data vid radiofrekvenser och i andra delar av det elektromagnetiska spektret (röntgen, optiskt) används. De spektrala fluxtätheterna, spektralindexen och spektrala luminositeterna beräknas för de två radiogalaxerna och kopplas till deras morfologi. Värddgalaxerna identifieras och deras rödförskjutningar och avstånd fastslås. Båda har samma rödförskjutning $z \simeq 0.14$. Radiostrukturernas utsträckning är $353''$ respektive $180''$, vilket motsvarar projicerade storlekar på 850 kpc respektive 439 kpc. De härledda luminositeterna är $(1,27 \pm 0,13) \cdot 10^{25} \text{ W Hz}^{-1}$ respektive $(6,30 \pm 0,63) \cdot 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$. Dessa är rimliga luminositetsvärden för radiogalaxer av morfologisk klass FR II. Deras utseendemässiga struktur, med lobor innehållandes distinkta *hotspots*, stödjer denna klassificering.

Abstract

This report aims at investigating two newly discovered radio galaxies in a 25 deg^2 region of the sky labeled *XXL-North*. In the first step, a sensitive, high angular resolution radio map obtained with the Giant Meterwave Radio Telescope in India is scanned for interesting radio galaxies; in the second step, two of the found radio galaxies are analyzed in detail and additional data at radio frequencies and in other parts of the electromagnetic spectrum (X-ray, optical) are used. The spectral flux densities, spectral indices and spectral luminosities of the two radio galaxies are computed and related to their morphology. The host galaxies are identified and their redshifts and distances are established. Both have the same redshift $z \simeq 0.14$. The extents of the radio structures are, respectively, $353''$ and $180''$, which amounts to projected sizes of 850 kpc and 439 kpc, respectively. The derived luminosities are, respectively, $(1.27 \pm 0.13) \cdot 10^{25} \text{ W Hz}^{-1}$ and $(6.30 \pm 0.63) \cdot 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$. These are reasonable luminosity values for radio galaxies of morphological class FR II. Their structural appearance, with lobes containing distinct *hot spots*, supports this classification.

Nyckelord: XXL-North, radiogalax, galaxhop, aktiv galaxkärna, synkrotronstrålning, spektralindex, fluxtäthet, luminositet, Double Irony Radio Galaxy, Sarcasm Radio Galaxy

Förord

Vi vill först och främst tacka vår handledare Cathy Horellou för att ha initierat detta projekt och för hennes ovärderliga stöd under projektets gång. Vi vill även rikta ett varmt tack till Magnus Thomasson och Iván Martí-Vidal för deras synpunkter och idéer gällande frågor vi haft under olika delar av processen, samt Simon Casey för engagerad och snabb teknisk support gällande Dore-systemet och insticksprogrammet Radio Flux Measurement till SAOImage DS9.

Frida Karlsson, Christoffer Krook, Andreas Nilsson, Lukas Tolliner

Göteborg, maj 2017

Lista över enheter

Bågsekund ("): Enhet för mätning av vinklar, där en bågsekund = $\frac{1}{3600}$ av en grad. Liknande för bågminut ('), där en bågminut = $\frac{1}{60}$ av en grad.

Kvadratgrad (deg²): Kvadratgrad är en icke-SI-enhet för rymdvinklar, där hela himlen täcker drygt 41 000 deg².

Jansky (Jy): Enhet för spektral fluktäthet, där $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

Parsec (pc): Enhet för avstånd, där $1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$, alternativt $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly}$. Vintergatan är exempelvis $\sim 30 \text{ kpc}$ i diameter och Lokala galaxhopen $\sim 1 \text{ Mpc}$.

Innehåll

Figurer	xi
Tabeller	xv
1 Introduktion	1
1.1 Syfte	3
1.2 Avgränsningar	3
1.3 Rapportens struktur	4
2 Bakgrund	5
2.1 XXL-projektet	5
2.2 Astronomiska källor	5
2.2.1 Galaxhopar	5
2.2.2 Aktiva galaxkärnor	7
2.2.3 Radiogalaxer	7
2.3 Morfologi: Fanaroff–Riley-klassifikation	8
2.4 Synkrotronemission	8
2.5 Fluxtäthet och luminositet	10
2.6 Observationella metoder och teknik	11
2.6.1 Vinkelupplösning	12
2.6.2 Största vinkelstorlek, θ_{LAS}	12
3 Observationella data	15
3.1 Radioobservationen av XXL-North med GMRT vid 610 MHz	15
3.2 Kompletterande observationer i radiobandet	15
3.2.1 TGSS – 150 MHz	15
3.2.2 FIRST – 1400 MHz	17
3.2.3 NVSS – 1400 MHz	17
3.3 Observationer vid andra våglängder	18
3.3.1 XXL-North (XMM) – röntgenobservation	18
3.3.2 SDSS – optiska bilder och spektroskopiska data	19
4 Metod	21
4.1 Visuell inspektion av XXL-North GMRT 610 MHz	21
4.2 Mätning av fluxtäthet	21
4.3 Beräkning av spektralindex	22
4.3.1 Två mätpunkter	22
4.3.2 Fler mätpunkter	22
4.4 Antagna kosmologiska parametrar	23

5	Resultat och analys	25
5.1	Visuell inspektion av kartan XXL-North GMRT 610 MHz	25
5.2	Double Irony Radio Galaxy	26
5.2.1	Andra astronomiska objekt runt Double Irony	28
5.2.2	Fluxtäthet för Double Irony	28
5.2.3	Spektralindex och synkrotronspektrum för Double Irony	28
5.3	Sarcasm Radio Galaxy	31
5.3.1	Korresponderande galaxhop för Sarcasm	31
5.3.2	Andra astronomiska objekt runt Sarcasm	31
5.3.3	Fluxtäthet för Sarcasm	33
5.3.4	Spektralindex och synkrotronspektrum för Sarcasm	33
5.4	Spektral luminositet	36
6	Diskussion	37
6.1	Observationella data	37
6.1.1	De två 1400 MHz-kartorna	37
6.1.2	Brus	37
6.2	Radiogalaxernas verkliga storlek	39
6.3	Analys av spektralindex	40
6.4	Morfologi och polarisering	41
6.5	Röntgenmätningar	41
7	Slutsats	43
A	Kompletterande teori	I
A.1	Rödförskjutning	I
A.2	Relativistisk <i>beaming</i>	I
B	Resultatet från den initiala visuella inspektionen	III
C	Koder för beräkningar och visuella illustrationer	V
C.1	Fluxtäthet och spektralindex	V
C.2	Spektralindex mellan två frekvenser	VII
C.3	Ursprungligt skript för att räkna ut flux	VII
C.4	Skript som isolerar en godtycklig del av radiokartan som vi är intresserade av . . .	VII
C.5	Skript för <i>Monte Carlo</i> -beräkning	VIII
C.6	Skript för att själv välja en godtycklig polygon över Double Irony eller Sarcasm-bilder	IX
C.7	Skript som anpassar en funktion över fluxpunkter	XVIII
C.8	Skript för brusanalysering	XIX
C.9	Unix-skript för extrahering av mindre FITS-bilder ur de större radiokartorna . . .	XX
C.10	Unix-skript för att skapa PNG-filer från extraherade FITS-filer med hjälp av DS9	XXII

Figurer

1.1	Karl Jansky med sin antenn – den första att göra en radioastronomisk detektion. (Bild: NRAO)	2
1.2	Illustration över hur radiovågor och annan elektromagnetisk strålning tar sig igenom atmosfären. Y-axeln anger hur stor %-sats av infallande strålning som tar sig ner till jordytan. Radiofönstret sträcker sig mellan våglängden ~ 1 mm och ~ 10 m och det optiska mellan $\sim 0,4 \mu\text{m}$ och $\sim 0,8 \mu\text{m}$. (F. Granato (ESA/Hubble). Public Domain.)	3
2.1	Observation vid 610 MHz från <i>Giant Meterwave Radio Telescope</i> (GMRT) av området XXL-North som täcker 25 deg^2 . Tidigare identifierade galaxhopar i XXL-projektet är markerade med små svarta cirklar.	6
2.2	Översiktsbild av en typisk radiogalax – Hercules A – observerad i frekvensbandet 4–9 GHz. Utmärkt är den aktiva galaxkärnan som accelererar partiklarna, jetstrålarna som transporterar dem utåt i magnetfältet, och loberna där partiklarna interagerar med det omgivande intergalaktiska mediet. (Bild: R. Perley & W. Cotton, NRAO/AUI/NSF. © ⓘ)	7
2.3	Den kanske mest kända av alla radiogalaxer – Cygnus A. Tack vare dess relativa närhet till vår galax har den kunnat avbildas detaljerat, och vi ser tydligt jetstrålarna som emanerar från en distinkt centralpunkt – den aktiva galaxkärnan. Strålarna utmynnar i sin andra ände i stora, molnliknande lober, i vilkas utkanter intensivt emitterande <i>hotspots</i> syns. Cygnus A är ett typexempel på en radiogalax av klass FR II. (Bild: NSF/NRAO/AUI/VLA. Använd med tillstånd.)	9
3.1	Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT), nära Pune, Indien – källan för observationerna vid 610 och 150 MHz. (Bild: (National Centre for Radio Astrophysics (NCRA-TIFR) 2017))	16
3.2	Very Large Array (VLA), nära Socorro, New Mexico – källan för de två observationerna vid 1,4 GHz. (Foto: John Fowler © ⓘ)	17
3.3	Illustration av rymdteleskopet XMM-Newton i omlopp. (Bild: ESA(ESA 2017[c]))	18
5.1	De två radiokällorna vid 610 MHz. Färgskalan indikerar strålningens intensitet, vid frekvensen 610 MHz, i enheten Jy/beam. Utmärkt är även beam-storleken för den aktuella observationen, som är en indikation på kartans upplösning.	26

5.2	Kompositbild över Double Irony med omgivning. Konturlinjer för radiostrukturen vid 610 MHz i vitt samt konturlinjer för röntgenobservationen från XMM-Newton i blått är superponerade över en optisk bild. De optiska observationerna från SDSS består av ultraviolett, grönt och rött ljus vid våglängderna 3543, 4770 respektive 6231 Å. Ett objekt markerat med ett "g" (exempelvis (1a-g)) indikerar en galax. På samma sätt indikerar ett "s" att objektet är en stjärna. I strukturens centrum (1a-g) ligger den förmodade värdgalaxen, samt en omgivning av andra galaxer (2a-g), liksom stjärnor tillhörande vår egen galax (3a-s, 4a-s). Röntgenobservationen nära radiogalaxens kärna ser ut att vara relaterad till värdgalaxen (1a-g), om än något förskjuten, troligtvis på grund av röntgenkartans otillräckliga kvalitet. Inga konkreta slutsatser kan dras kring detta.	27
5.3	Översikt över de regioner som Double Irony Radio Galaxy uppdelas i vid beräkningar av fluxtätheten. C betecknar kärnan, A1 och B1 de "inre loberna", samt A2 och B2 de "yttre loberna". T är en region för beräkning av ett totalvärde (i jämförelse med den region som bildas av unionen av A1, A2, B1, B2 och C, betecknad T_{AUBUC} i tabell 5.2, 5.5, 5.3 och 5.6). Färgskalan har enheten Jy/beam, och cirkeln betecknad "Beam" indikerar beam-storleken vid respektive observation.	29
5.4	Synkrotronspektrum för Double Irony över området T_{AUBUC} vid frekvenserna 150 MHz, 610 MHz och 1400 MHz, där den senare kommer från NVSS-projektet. Figuren visar således den uppmätta fluxtätheten med felmarginal på 10% och en anpassad potenslagsfunktion med spektralindex $\alpha = -0,54 \pm 0,06$	30
5.5	Kompositbild över Sarcasm med omgivning. Konturlinjer för radiostrukturen vid 610 MHz i vitt samt konturlinjer för röntgenobservationen från XMM-Newton i blått är superponerade över en optisk bild. De optiska observationerna från SDSS består av ultraviolett, grönt och rött ljus vid våglängderna 3543, 4770 respektive 6231 Å. Ett objekt markerat med ett "g" (exempelvis (1b-g)) indikerar en galax. På samma sätt indikerar ett "s" att objektet är en stjärna. Vi ser i strukturens centrum den förmodade värdgalaxen (1b-g), samt en omgivning av andra galaxer ((2b-g), (3b-g), (4b-g), (7b-g)), liksom stjärnor tillhörande vår egen galax ((5b-s), (6b-s), (8b-s)). Den förmodade värdgalaxen är dessutom ljusstark i röntgenspektret, vilket framgår ur röntgenobservationerna (blå konturlinjer). De optiskt synliga galaxerna vid (9b-g) och (10b-g) är även synliga i röntgen, men ej i radiokartan.	32
5.6	Översikt över de regioner som Sarcasm uppdelas i vid beräkningar av fluxtätheten. C betecknar kärnan, och A och B de två loberna. T är en region för beräkning av ett totalvärde (i jämförelse med den region som bildas av unionen av A, B och C, betecknad T_{AUBUC} i tabell 5.2, 5.5, 5.3 och 5.6). Färgskalan har enheten Jy/beam, och cirkeln betecknad "Beam" indikerar beam-storleken vid respektive observation.	34
5.7	Synkrotronspektrum för Sarcasm över området $T_{AUBUC} \setminus (S1US2)$ vid frekvenserna 150 MHz, 610 MHz och 1400 MHz, där den senare kommer från NVSS-projektet. Figuren visar således den uppmätta fluxtätheten med felmarginal på 10% och en anpassad potenslagsfunktion med spektralindex $\alpha = -0,55 \pm 0,07$	35
6.1	Histogram över det mindre brusområdet. På x-axeln presenteras det uppmätta värdet för varje datapunkt samt på y-axeln presenteras relativ sannolikhet att ett värde har ett motsvarande värde på x-axeln.	38
6.2	En närbild av Double Irony vid 610 MHz där bruset tydligt syns. En struktur tycks kunna urskiljas i bruset; Double Irony verkar ligga i ett brusmässigt "hål" med negativt fluxvärde.	39
B.1	Double Irony Radio Galaxy vid 610 MHz; en av de källor som rapporten behandlar.	III

B.2	Sarcasm Radio Galaxy vid 610 MHz; en av de källor som rapporten behandlar. . .	III
B.3	Källa 3 vid 610 MHz.	III
B.4	Källa 4 vid 610 MHz.	III
B.5	Källa 5 vid 610 MHz.	IV
B.6	Källa 6 vid 610 MHz.	IV
B.7	Källa 7 vid 610 MHz.	IV

Tabeller

3.1	Tabell över de olika kartläggningar i radiobandet som spänner över området XXL-North där jämförelser kan göras. θ_{FWHM} står för halvvärdesbredd (<i>Full Width at Half Maximum</i>), vilket karaktäriserar kartans upplösning. θ_{LAS} står för <i>Largest Angular Scale</i> och motsvarar storleken på de största strukturer som är synliga med interferometern.	16
3.2	Exempel på värden för de olika egenskaperna för VLA då mätningar görs vid 1,4 GHz. (Witz 2017) L_{max} och L_{min} representerar största respektive minsta avstånd mellan antennerna i konfigurationen. θ_{LAS} är dess största vinkelstorlek, <i>largest angular scale</i>	18
5.1	Övergripande information över de två källor som huvudsakligen studeras. Rödförskjutning inom parentes indikerar att enbart fotometriska data från SDSS är tillgängliga; i annat fall är det spektroskopiska data från SDSS. Rödförskjutning för Double Irony och Sarcasm är för den närmast belägna optiskt synliga galaxen i SDSS. Notera att de två storleksangivelserna gäller vid 610 MHz, vilket är den av våra studerade frekvenser som visar dem tydligast.	25
5.2	Tabellen visar den uppmätta fluxtätheten för Double Irony över de regioner som visas i figur 5.3 vid de olika frekvenser som behandlas i rapporten.	28
5.3	Tabellen visar olika värden på spektralindex för Double Irony för de olika regionerna som visas i figur 5.3. Kolumn (1) till (3) visar spektralindex mellan två olika frekvenser och kolumn (4) det totala spektralindexet för samtliga frekvenser som nyttjas. . . .	30
5.4	Information om rödförskjutning och massa hos XXL-galaxhopen XLSSC 112. Både den totala massan hos galaxhopen och massan hos den ljusstarkaste galaxen i galaxhopen (BCG) är angivna.	31
5.5	Tabellen visar den uppmätta fluxtätheten för Sarcasm över de regioner som visas i figur 5.6 vid de olika frekvenser som behandlas i rapporten.	33
5.6	Tabellen visar olika värden på spektralindex för Sarcasm för de olika regionerna som visas i figur 5.6. Kolumn (1) till (3) visar spektralindex mellan två olika frekvenser och kolumn (4) det totala spektralindexet för samtliga frekvenser som nyttjas. . . .	33
5.7	Luminositet för hela Double Irony och Sarcasm (benämnda T_{AUBUC} respektive $T_{\text{AUBUC}} \setminus (\text{S1US2})$) vid samtliga frekvenser.	36

Kapitel 1

Introduktion

Dark star crashes

Pouring its light into ashes

Reason tatters

The forces tear loose from the axis

Shall we go, you and I, while we can –

Through the transitive nightfall of diamonds?

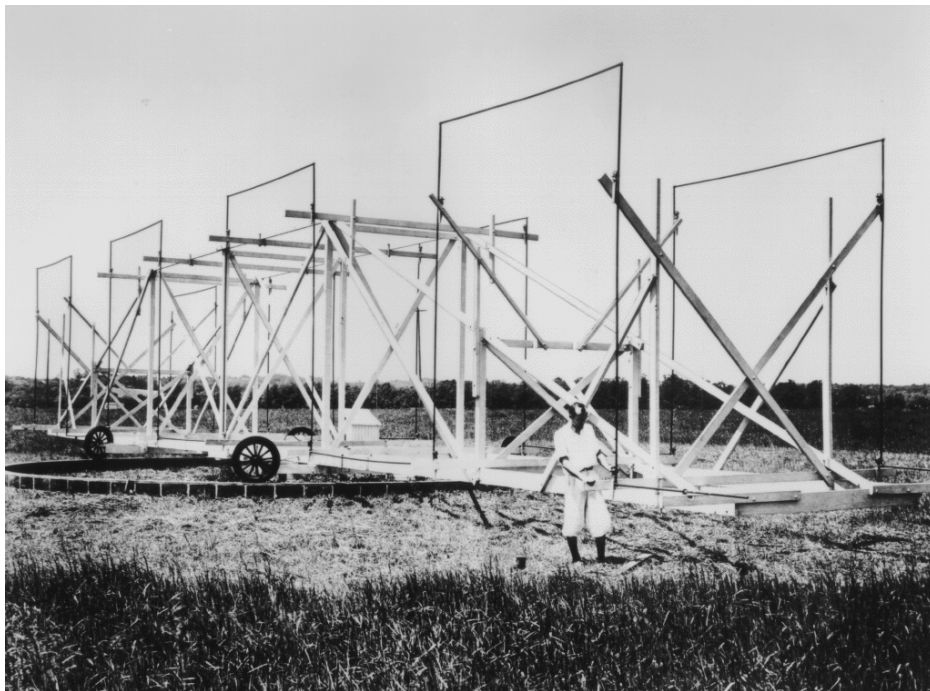
– Robert Hunter, *Dark Star* (1968)

År 1931 konstruerade den av Bell Telephone Laboratories anställda forskaren Karl Jansky en roterbar antenn (figur 1.1), uppbyggt av hjul från en T-Ford, med vilken han avsåg att detektera radiostrålning som kunde interferera med transatlantisk telekommunikation. Han lyckades särskilja tre typer av radiosignaler: brus från närlägen åskväder, brus från avlägsna dito, samt ett tredje, mystiskt brus av okänt ursprung. Efter att ha analyserat den sistnämnda signalen djupare kunde Jansky, mycket överraskande, fastslå att den kom från centret av Vintergatan – beläget i stjärnbilden Skytten (lat: Sagittarius). Denna radiokälla fick senare namnet Sagittarius A* (med stjärnan indikerandes att källan ansågs *exceptionellt* spännande).

Under decennierna efter Janskys upptäkt lyckades astronomer detektera radiostrålning från en mängd objekt på himlen – bland annat en typ av himlakropp som liknade stjärnor men emitterade starkt i radiobandet, olikt vanliga stjärnor. Dessa objekt fick namnet kvasi-stellära radiokällor, *kvasarer*. Under 1960-talet lades teorier fram om att supermassiva svarta hål kan finnas i mitten av kvasarer och så kallade aktiva galaxer, och en koppling gjordes mellan dessa teorier och radiodetektionen av Sagittarius A*. Därefter har teorier uppkommit om att supermassiva svarta hål finns i mitten av alla stora galaxer i universum.

Svarta hål har egenheten att de är omöjliga att observera direkt, då deras gravitation är för stark ens för ljuset att övervinna. Vad som däremot är möjligt är att titta på hur de svarta hålen påverkar sin omgivning, och de processer som sker i deras närhet. När materia faller in i ett svart hål emitteras stora mängder strålning, och denna emission kan vara stark nog att överglänsa hela galaxen, som i fallet med kvasarer. Dessutom kan i vissa fall materia, genom olika komplexa och delvis okända processer, slungas ut ifrån kärnan och ge upphov till enorma strukturer som kan detekteras genom främst radioobservationer, varför denna typ av galaxer benämns som *radiogalaxer*. Nämnade fenomen är några av nycklarna till att förstå de svarta hålen – dessa universums mest extrema objekt.

Radioastronomin har kommit en lång väg sedan Janskys initiala detektioner, och idag finns mycket stora, avancerade anläggningar runt om i världen – till exempel Atacama Large Millime-



Figur 1.1: Karl Jansky med sin antenn – den första att göra en radioastronomisk detektion. (Bild: NRAO)

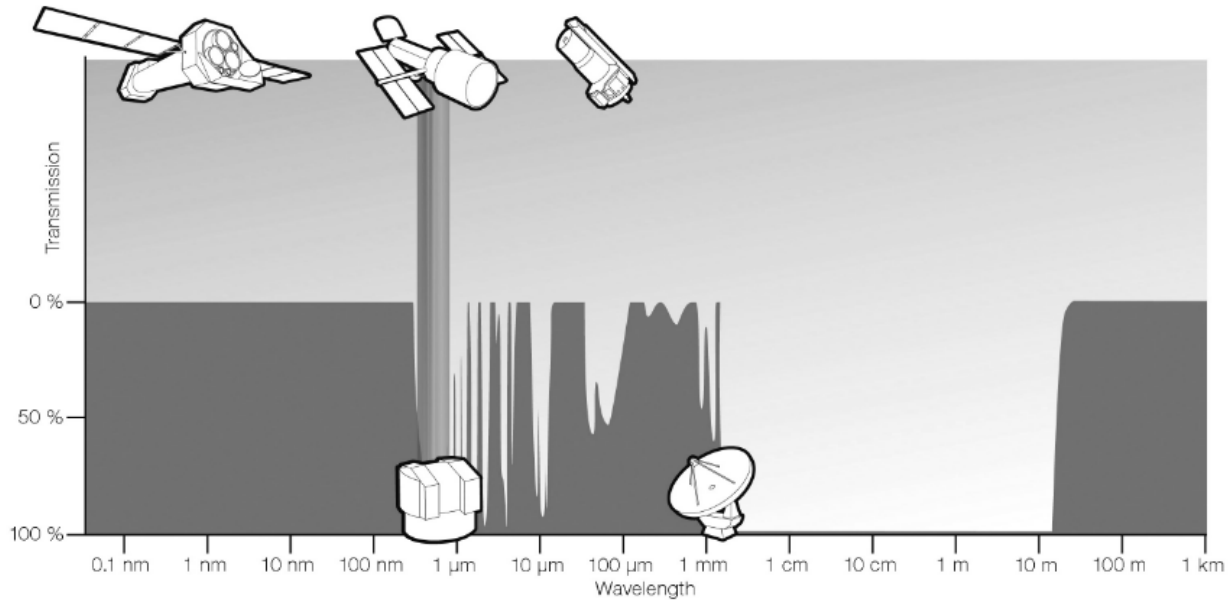
ter/Submillimeter Array i Chile, Very Large Array i USA och det internationellt uppdelade Low Frequency Array – som använder raffinerade metoder för att detektera allt mindre och avlägsnare objekt med allt högre upplösning. Genom att kartlägga fler och fler radioemitterande extragalaktiska objekt, och på så vis utöka den totala, samlade mängden data gällande objekten och deras mångfald av fenomen, så kan en allt djupare förståelse nås gällande de bakomliggande astrofysikaliska och kosmologiska processerna.

I detta kandidatarbete undersöker vi en sådan radiokartläggning, genomförd inom ramen för XXL, som är ett internationellt projekt huvudsakligen fokuserat på att studera röntgenemission från galaxhopar i två områden på himlen – men kompletterande kartläggningar har även utförts inom andra delar av det elektromagnetiska spektret. Generellt sett så skiljer sig informationen som erhålls från ett frekvensband till en annat, varför himlakroppar vanligtvis studeras vid många olika frekvenser för att generera en helhetsbild. För att utföra observationer vid de olika frekvenserna krävs varierande metoder. Två frekvensband – det optiska bandet och radiobandet – kan detekteras från marknivå på jorden, medan resterande delar av det elektromagnetiska spektret, till exempel röntgenbandet, blockeras av jordens atmosfär och användningen av rymdteleskop blir nödvändig. Atmosfärens genomsläpplighet för radio- och optiska frekvenser brukar kallas radiofönstret respektive det optiska fönstret. (Condon och Ransom 2017, Kap 1.1) Dessa fönster illustreras i figur 1.2, som även belyser hur stor procentandel av de olika frekvensernas infallande intensitet som når marknivå.

De två områden som studeras inom XXL täcker vardera 25 deg^2 och är betecknade XXL-North respektive XXL-South. Den radiokarta vi har fått tillhandahållen som grund för vårt arbete är resultatet av en observation vid radiofrekvensen 610 MHz av XXL-North. I kartan letar vi efter intressanta radiogalaxer och finner i första ledet sju objekt. Två av dessa väljs ut för vidare analys med avseende på spektral fluxtäthet, spektralindex, spektral luminositet, morfologisk klassificering och association med inom XXL detekterade galaxhopar.

Det vi finner är att det ena objektet – en radiogalax med relativt typiskt utseende – har den uppskattade fluxtätheten $S_{610} = 124 \text{ mJy}$, spektralindex $\alpha = -0,55$ mellan 150 och 1400 MHz,

luminositet $L_{610} = 6,30 \cdot 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$, och ligger i XXL-galaxhopen XLSSC 112. Den andra radiogalaxen – vilken uppvisar en betydligt mer unik och spektakulär form – har en uppskattad fluxtätet $S_{610} = 241 \text{ mJy}$, spektralindex $\alpha = -0,54$ mellan 150 och 1400 MHz, och luminositet $L_{610} = 1,27 \cdot 10^{25} \text{ W Hz}^{-1}$. Denna ligger inte i någon hittills detekterad galaxhop inom XXL.



Figur 1.2: Illustration över hur radiovågor och annan elektromagnetisk strålning tar sig igenom atmosfären. Y-axeln anger hur stor %-sats av infallande strålning som tar sig ner till jordytan. Radiofönstret sträcker sig mellan våglängden $\sim 1 \text{ mm}$ och $\sim 10 \text{ m}$ och det optiska mellan $\sim 0,4 \mu\text{m}$ och $\sim 0,8 \mu\text{m}$. (F. Granato (ESA/Hubble). Public Domain.)

1.1 Syfte

Detta kandidatarbete syftar till att upptäcka, undersöka och klassificera radiogalaxer i en nyligen genomförd kartläggning vid 610 MHz av området XXL-North. Vidare att göra jämförande undersökningar av de funna objekten i tre andra radiokartläggningar täckande samma område, vid två andra frekvenser: 150 MHz och 1400 MHz.

1.2 Avgränsningar

Ovanstående syfte avgränsas genom att vi väljer att, för ett begränsat antal, beräkna radiogalaxernas spektrala fluxtätet, i samtliga fyra tillhandahållna kartor. På så vis kan vi upprätta synkrotronspektra för objekten, både totalt sett och i delregioner av respektive radiogalax. Ur dessa synkrotronspektra beräknas sedan motsvarande spektralindex. Vi tar också hjälp av kartläggningar i det optiska bandet och röntgenbandet för att utföra kompletterande analyser gällande radiogalaxernas allmänna egenskaper, såsom avstånd, storlek och associerade galaxer och galaxhopar. Vi beräknar även radiogalaxernas korresponderande luminositet och drar slutsatser om morfologisk klassificering.

1.3 Rapportens struktur

Rapporten inleds med ett bakgrundsavsnitt som innehåller en beskrivning av XXL-projektet, vilket detta arbete bygger på, såväl som en skildring av de mest centrala begrepp som förekommer inom radioastronomin och som är väsentliga i detta arbete. Detta följs av ett avsnitt som beskriver var de observationella data som används under arbetet kommer ifrån och hur dessa har erhållits. Därefter redogörs metoden för den undersökning som utförts, och de resultat som den producerat. Rapporten avslutas med analys- och diskussionsavsnitt.

Kapitel 2

Bakgrund

I det följande kapitlet ges inledningsvis en bakgrund om XXL-projektet, som detta arbete har sin grund i. Därefter ges den relevanta bakgrunden om astronomiska källor, såväl som en redogörelse över de olika observationella metoder och tekniker som har använts för de data som nyttjas, samt hur dessa påverkar de beräkningar som sedan görs.

För ytterligare teori om rödförskjutning och relativistisk *beaming* hänvisas läsaren till appendix A.

2.1 XXL-projektet

XXL-projektet är en storskalig kartläggning som ursprungligen har utfört observationer av röntgenstrålning med rymdteleskopet XMM-Newton. Teleskopet befinner sig i omloppsbana utanför atmosfären på grund av att strålning från röntgenspektret ej tar sig igenom jordens atmosfär. (ESA 2017[a]) Det stora område som studeras är uppdelat i två mindre områden som kallas XXL-South och XXL-North, som vardera täcker cirka 25 deg^2 av himlen – vilket kan sättas i jämförelse med månen som endast täcker $0,2 \text{ deg}^2$. Områdena hyser ett stort antal galaxhopar och aktiva galaxkärnor och det är ett primärt mål för XXL att kartlägga dessa, eftersom detta kan bidra till mer precis bestämning av kosmologiska parametrar. (Pierre m. fl. 2016)

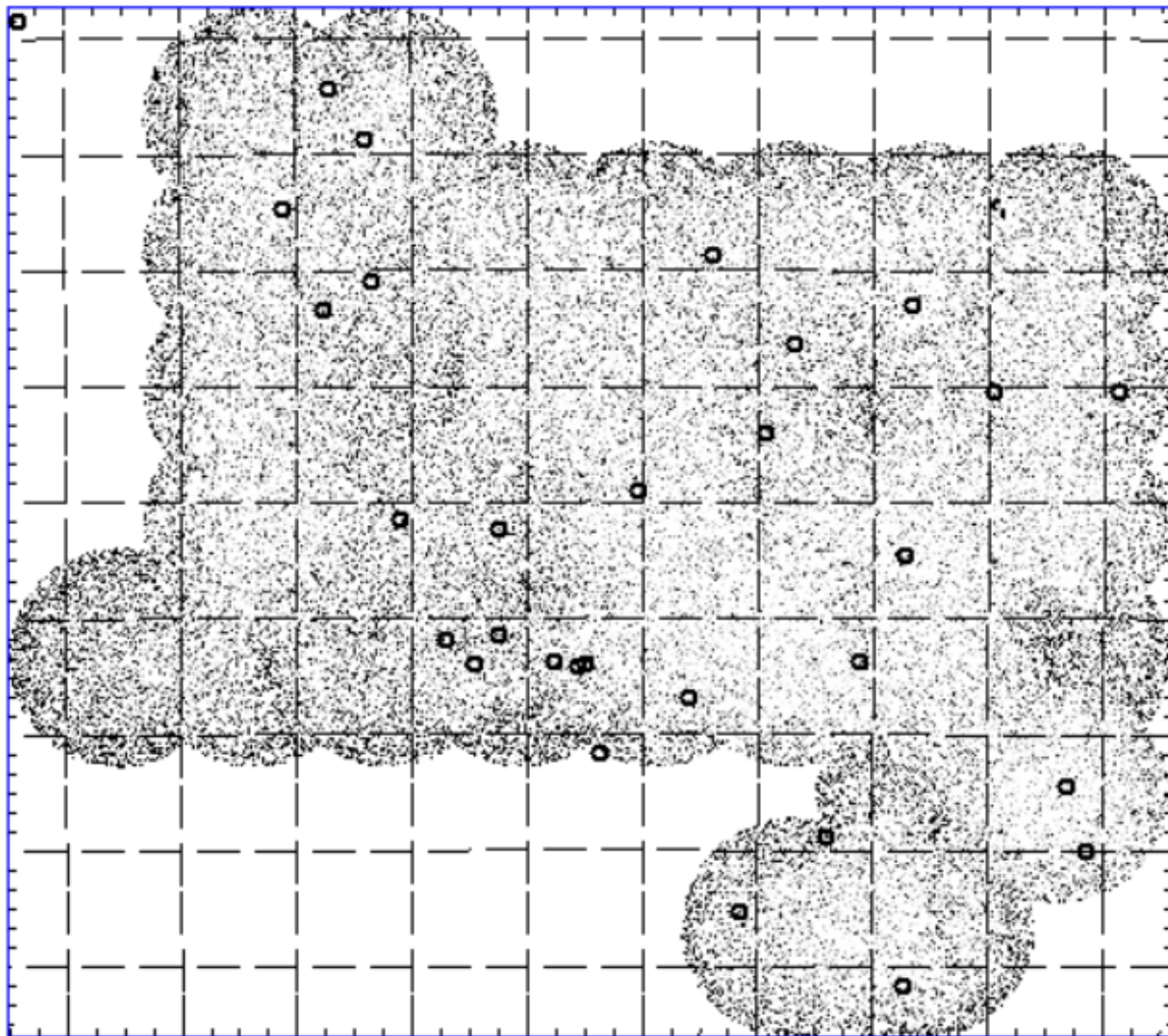
Som ett komplement till röntgenobservationerna har ett flertal andra astronomiska kartläggningar utförts i olika frekvenser där delar, eller hela, XXL-området studerats. En av dessa har nyligen producerat bilder av XXL-North utförd med radioteleskopet *Giant Meterwave Radio Telescope* (GMRT) vid 610 MHz. Observationen över XXL-North av GMRT visas i figur 2.1, där även identifierade galaxhopar markerats med svarta cirklar.

2.2 Astronomiska källor

Nedan beskrivs de tre typer av astronomiska strukturer som är centrala för detta arbete.

2.2.1 Galaxhopar

Större delen av galaxerna i universum hittas i stora strukturer kallade galaxhopar. Dessa är bland de största strukturerna i universum och kan hysa tusentals enskilda galaxer som hålls samman av gravitationen. (Trenti m. fl. 2017) Förutom själva galaxerna består en galaxhop även av stora mängder varma gaser och plasma – det så kallade intergalaktiska mediet – samt mörk materia. Vanliga fysikaliska storheter relaterande till galaxhopar är bland annat hopens rödförskjutning z_{cluster} , antalet galaxer i hopen N_{gal} , storleksmåttet r_{500} som betecknar radien inom vilken densiteten är 500 gånger högre än bakgrundens vid källans rödförskjutning, massmåttet M_{500} , som är den



Figur 2.1: Observation vid 610 MHz från *Giant Meterwave Radio Telescope* (GMRT) av området XXL-North som täcker 25 deg^2 . Tidigare identifierade galaxhopar i XXL-projektet är markerade med små svarta cirklar.

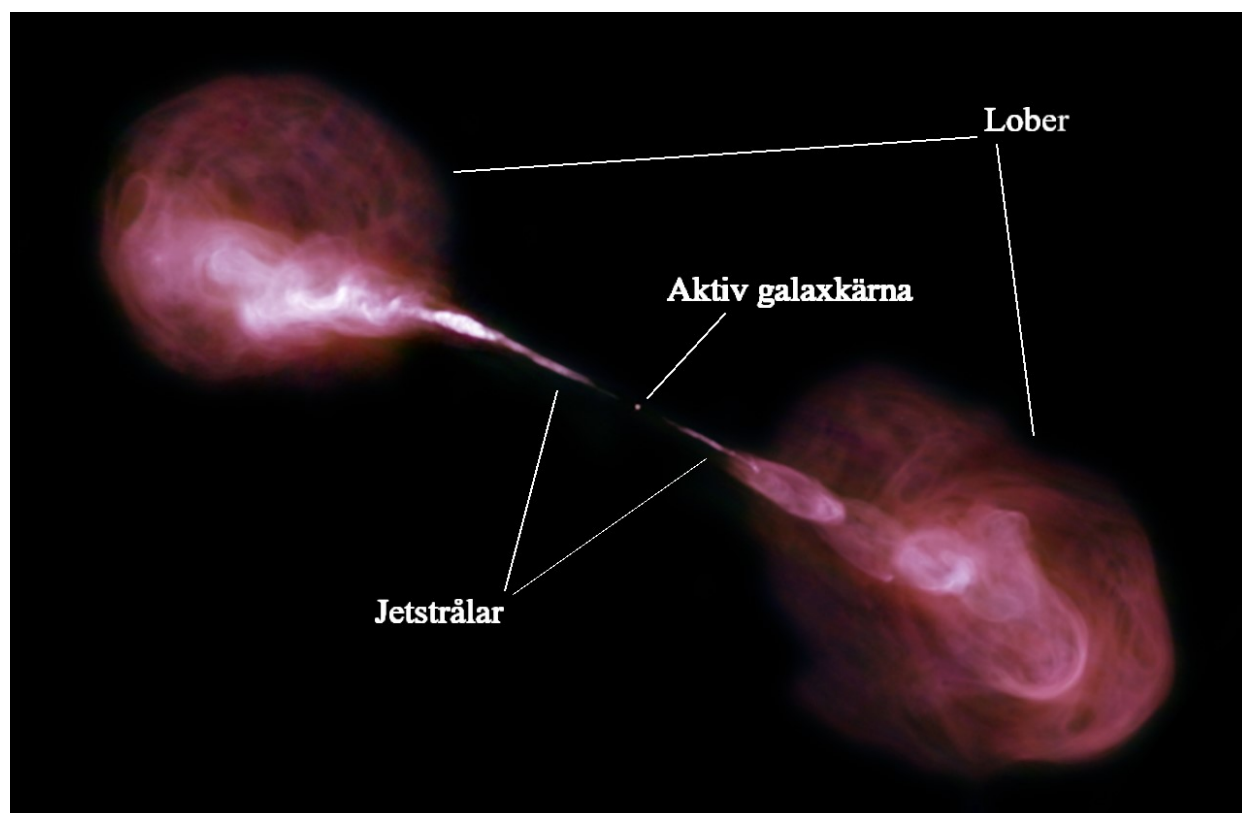
uppskattade massan inom r_{500} , (Pacaud m. fl. 2016) samt temperaturen T_{gas} för det intergalaktiska mediet i hopen.

2.2.2 Aktiva galaxkärnor

Det astrofysikaliska fenomen som är centralt för den här rapporten är vad som refereras till som aktiva galaxkärnor (AGN, *Active Galactic Nuclei*). Med en aktiv galaxkärna avses en region belägen i mitten av en galax och varandes mycket ljusstark inom ett eller flera elektromagnetiska spektra. Relevant för denna rapport är framförallt radiospektret. Regionens mittpunkt utgörs av ett supermassivt svart hål, och den starka strålningen uppkommer då stora mängder omgivande materia faller in i det svarta hålet genom en så kallad *ackretionsskiva*. Denna är en roterande skiva runt det svarta hålet i vilken partiklar, från exempelvis sönderslitna stjärnor från omgivningen, ansamlats innan de faller in mot den centrala singulariteten. (Condon och Ransom 2017)

Aktiva galaxkärnor är universums starkaste radiokällor och är därför utmärkta för att studera avlägsna fenomen. (Beckmann och Schrader 2012) En galax som är värd för en aktiv galaxkärna kallas en aktiv galax och kan vara av ett flertal nära relaterade varianter, som till exempel kvasarer, Seyfert-galaxer och radiogalaxer. (Condon och Ransom 2017)

2.2.3 Radiogalaxer



Figur 2.2: Översiktsbild av en typisk radiogalax – Hercules A – observerad i frekvensbandet 4–9 GHz. Utmärkt är den aktiva galaxkärnan som accelererar partiklarna, jetstrålarna som transporterar dem utåt i magnetfältet, och loberna där partiklarna interagerar med det omgivande intergalaktiska mediet. (Bild: R. Perley & W. Cotton, NRAO/AUI/NSF. ©i)

I en del fall, då en aktiv galaxkärnas supermassiva svarta hål roterar med hög hastighet, kan det generera ett par av motriktade *jetstrålar* av partiklar längs med det svarta hålets rotationsaxel. Dessa jetstrålar uppkommer som en följd av rotationen, i kombination med det magnetfält som genereras i ackretionsskivan på grund av friktion och laddade partiklar i skivan.

Den mest vedertagna teorin bakom fenomenet bygger på att rotationen framkallar ett område runt det svarta hålet i vilket rumtiden dras med och roterar tillsammans med hålet, *ergosfären*. Partiklar i detta område kan utvinna arbete ur det svarta hålet och därmed accelereras. Tack vare att ergosfären för roterande svarta hål är större än *händelsehorisonten* (den sfäriska yta runt ett svart hål varifrån ingen information kan ta sig ut) kan partiklar med tillräckligt hög hastighet övervinna flykthastigheten efter att de accelererats. Detta resulterar i att en del partiklar från ackretionsskivan slungas ut med relativistiska hastigheter i form av ett par av tidigare nämnda jetstrålar, längs med det svarta hålets rotationsaxel. Karaktäristiskt för jetstrålarna är att de är kollimerade och polariserade. Magnetfältet som genereras av ackretionsskivan får laddade partiklar i jetstrålarna att rotera längs med fältlinjerna och därmed emittera synkrotronstrålning, se nedan i avsnitt 2.4. De strukturer som detta fenomen resulterar i kan ha en utsträckning många hundra gånger större än värdgalaxen, och då den emitterade strålningen i fråga framför allt ligger inom radiospektret benämns galaxen som en *radiogalax*. Vanligt är att jetstrålarna i sina ändar övergår till att forma *lober*, se figur 2.2 och figur 2.3, i vilka partiklarna har ansamlats efter att de interagerat med det *intergalaktiska mediet* (plasma och gaser som utbreder sig i områden mellan galaxer). (Condon och Ransom 2017)

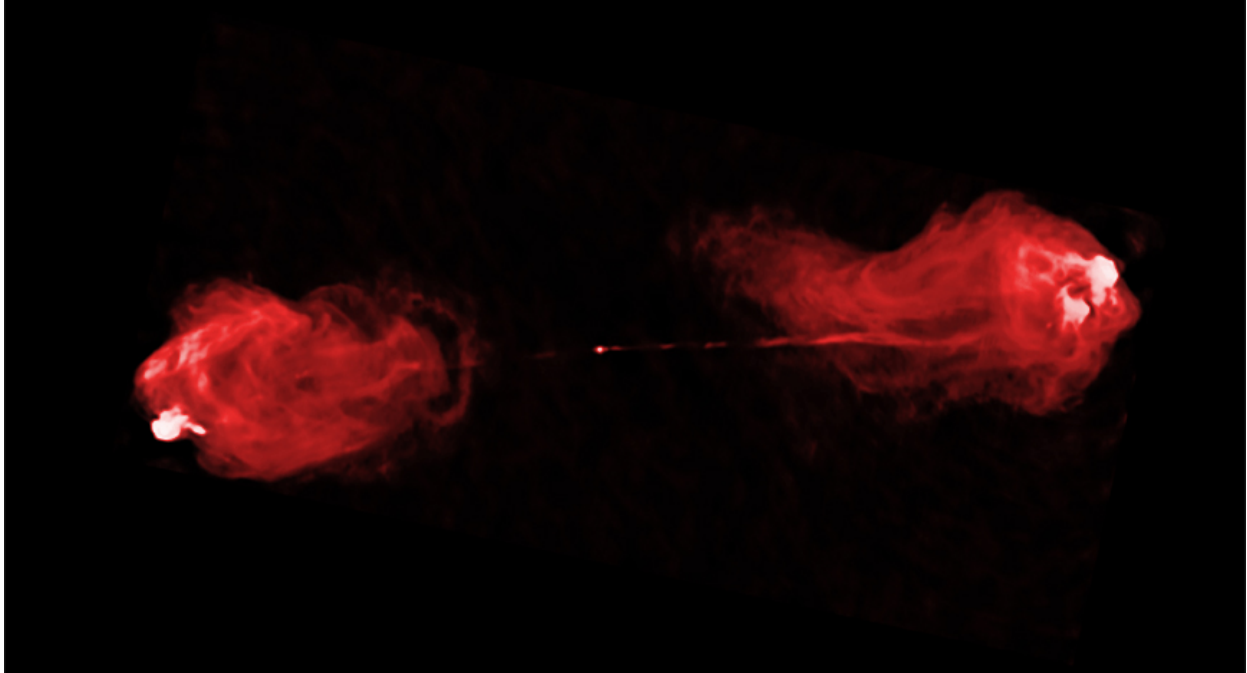
En speciell klass av radiogalaxer av extraordinär storlek benämns vanligtvis som *gigantiska radiogalaxer*, GRG, och består av dem vars uppskattade utsträckning är större än ungefär 0,7 Mpc. (Tamhane m. fl. 2015)

2.3 Morfologi: Fanaroff–Riley-klassifikation

Många radiogalaxer uppvisar en extra intensivt emitterande region i respektive lob, så kallade *hotspots* (se till exempel figur 2.3). Enligt en ofta använd konvention kan radiogalaxer morfologiskt sett delas upp i två klasser, baserat på förhållandet mellan avståndet mellan dessa hotspots och radiostrukturens totala storlek. De fall där förhållandet är mindre än 0,5 klassificeras som typ FR I och de fall där förhållandet är större än 0,5 klassificeras som typ FR II. Beteckningarna härrör från Fanaroff–Riley, som lade fram en teori om att det finns en distinkt skiljelinje i luminositet mellan de två klasserna. Enligt deras sammanställning, vid frekvensen 178 MHz, och med ett värde på Hubbles konstant $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, så ligger denna skiljelinje vid cirka $2 \cdot 10^{25} \text{ W Hz}^{-1}$, där radiogalaxer i klass FR I i princip uteslutande har luminositet lägre än skiljevärdet, och omvänt för FR II. (Fanaroff och Riley 1974) Vid 1400 MHz är skiljelinjen $\sim 10^{25} \text{ W Hz}^{-1}$. (Owen och Ledlow 1994)

2.4 Synkrotronemission

Det är ett känt faktum från elektromagnetisk fältteori att laddade partiklar som accelereras emitterar elektromagnetisk strålning. En viktig kategori av detta fenomen är *synkrotronstrålning*. Den uppkommer som ett resultat av att laddade partiklar som rör sig i ett magnetfält accelereras radiellt, det vill säga böjs av från en rätlinjig bana. Strikt talat benämns fenomenet som synkrotronstrålning endast i det fall då de laddade partiklarna rör sig med relativistiska hastigheter, i annat fall *cyklotronstrålning*. Den avgivna strålningens frekvens täcker in större delen av det elektromagnetiska spektret, från radiovågsbandet till röntgenbandet. Den är dessutom polariserad i ett plan ortogonalt mot magnetfältet, vilket gör att man från polarisationsdata kan dra slutsatser om fältriiktningen. Synkrotronstrålning är av stor vikt inom astronomi, då den utsänds av en mängd olika typer av



Figur 2.3: Den kanske mest kända av alla radiogalaxer – Cygnus A. Tack vare dess relativa närhet till vår galax har den kunnat avbildas detaljerat, och vi ser tydligt jetstrålarna som emanerar från en distinkt centralpunkt – den aktiva galaxkärnan. Strålarna utmynnar i sin andra ände i stora, molnliknande lober, i vilkas utkanter intensivt emitterande *hotspots* synes. Cygnus A är ett typexempel på en radiogalax av klass FR II. (Bild: NSF/NRAO/AUI/VLA. Använd med tillstånd.)

astronomiska objekt, t.ex. radiogalaxer. Detta gör att vi kan observera strukturer i universum som annars hade varit osynliga från jorden, som t.ex. den typ av jetstrålar och lober som behandlas i denna rapport.

Förändringen i energi, genom emission, hos en partikel med laddning q som accelereras ges, i partikelns vilosystem, av Larmors formel (i SI-enheter)

$$P = -\frac{dE}{dt} = \frac{q^2 |\mathbf{a}|^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad (2.1)$$

där $\mathbf{a}$ är accelerationen i vilosystemet. Denna acceleration, som är vinkelrät mot partikelns hastighet, ger upphov till en spirallrörelse med frekvensen

$$\nu_{\text{rot}}(B) = \frac{qB}{2\pi m} \quad (2.2)$$

där B är magnituden hos den magnetiska flödestätheten i fältet som genererar accelerationen, och m partikelns massa. Vi kan uttrycka accelerationens storlek som en funktion av rotationsfrekvensen, och därmed av den magnetiska flödestätheten, enligt

$$a(v, B) = 2\pi\nu_{\text{rot}}(B)v \sin \theta \quad (2.3)$$

där θ är vinkeln mellan partikelns hastighetsvektor $\mathbf{v}$ och den magnetiska flödestäthetsens vektor $\mathbf{B}$, och $v \sin \theta$ således partikelns hastighetskomponent ortogonalt mot fältet i fråga. Detta uttryck kan sedan sättas in i ekvation (2.1) för att erhålla den emitterade energimängden som funktion av partikelns hastighet och den magnetiska flödestätheten. (Sparke och Gallagher III 2007) Vi noterar här att den avgivna energin blir omvänt proportionell mot massan i kvadrat (enligt ekvation (2.2) insatt i (2.3) insatt i (2.1)); detta implicerar att lätta partiklar som t.ex. elektroner är betydligt mer effektiva strålare än tyngre partiklar som protoner.

Den observerade frekvensen ν_γ hos den emitterade synkrotronstrålningen kan uttryckas som en funktion av partikelns rotationsfrekvens ν_{rot} enligt

$$\nu_\gamma(v, B) = \frac{3}{2}\gamma^2(v)\nu_{\text{rot}}(B) \quad (2.4)$$

där $\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ är Lorentz-faktorn från relativitetsteorin. (Sparke och Gallagher III 2007) Motsvarande observerade fotonenergi E_γ ges av Plancks lag $E_\gamma = h\nu_\gamma$.

Allt eftersom elektronerna avger sin kinetiska energi i form av synkrotronstrålning så kommer deras hastighet avta och följaktligen blir den avgivna energin per tidsenhet successivt lägre, då den är beroende av hastigheten enligt ekvation (2.4). De emitterade fotonerna får alltså allt lägre frekvens ju längre elektronen färdas genom magnetfältet. Förloppet kan sammanfattas i en ordinär differentialekvation, genom insättning av (2.2) i (2.3) i (2.1):

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{q^4 B^2}{6\pi m^2 \epsilon_0 c^3} (v(E))^2 \sin^2 \theta \quad (2.5)$$

Då den totala populationen av elektroner i rörelse i en radiogalax magnetiska struktur momentant har en stor spridning i tillryggalagd sträcka, och således total emitterad energi, så kommer den följaktligen uppvisa ett brett spektrum av kinetiska energier, enligt

$$N(E)dE \propto E^{-\delta}dE \quad (2.6)$$

där $N(E)dE$ är antalet elektroner per volymenhet med energier i intervallet E till $E + dE$. (Condon och Ransom 2017) Elektronenergin är således fördelad enligt en potenslag, och dess spridning innebär en korresponderande spridning i frekvens hos synkrotronemissionen. Om vi kartlägger detta synkrotronspektrum – med hjälp av observationer vid så många frekvenser som möjligt – så kommer vi se att även den utsända strålningen följer en potenslagsfördelning enligt

$$S_\nu \propto \nu^\alpha \quad (2.7)$$

där S_ν är den spektrala fluxtäteten (utstrålad effekt per yta per frekvens) vid aktuell frekvens ν , och α det så kallade *spektralindexet*, vilket relaterar till indexet δ i elektronernas fördelning (ekvation (2.6)) genom sambandet (Condon och Ransom 2017)

$$\alpha = \frac{1 - \delta}{2}$$

Spektralindex är ett mått på den emitterade strålningens fördelning över spektret i fråga, som vanligtvis håller sig inom intervallet $-1,2 \leq \alpha \leq -0,7$. (Sparke och Gallagher III 2007)

Potenslagsfördelningen är karaktäristisk för emission från synkrotronprocesser, och upptäckten av densamma var således en avgörande ledtråd i att förstå att det var just en synkrotronprocess som låg bakom strålningen från detekterade extragalaktiska radiostrukturer.

Den enorma mängd energi som finns lagrad i magnetfältet och de relativistiska partiklarna som utgör jetstrålar och lober i en radiogalax antas vanligtvis vara fördelad enligt ekvipartition. (Condon och Ransom 2017; Sparke och Gallagher III 2007; Harwood m. fl. 2016) Detta innebär att ungefär lika stor andel av energin finns i magnetfältet som i partiklarna, och utifrån detta antagande kan en uppskattning göras av magnetfältets styrka.

2.5 Fluxtätet och luminositet

För att studera olika källor, såsom radiogalaxer, är ett vanligt tillvägagångssätt att mäta styrkan på dess strålning som funktion av olika parametrar, exempelvis frekvens. Vanliga storheter som

detta mäts i är *spektral fluxtätthet* och *spektral luminositet* (spektral innebär att storheten är frekvensberoende; vanligtvis tappas detta förord).

Som beskrivs i (Condon och Ransom 2017, kap 2.1), vilket all information i detta avsnitt kommer från, är det viktigt att man inte förväxlar fluxtätthet med intensitet, även om dessa är nära relaterade. Intensiteten I_ν definieras här, i enlighet med ekvation (2.8), som den effekt, dP , som träffar en detektor per areaenhet, $d\sigma$ och rymdvinkel, $d\Omega$, mätt från observatörens position. Där θ är vinkeln mellan källan och detektorns normal.

$$I_\nu \equiv \frac{dP}{(\cos\theta d\sigma) d\nu d\Omega} \quad (2.8)$$

Således är intensiteten *inte* beroende av avståndet mellan källa och observatör. Det totala antalet fotoner som träffar detektorn minskar med ökat avstånd, men detta endast för att *rymdvinkeln* för källan minskar. Fluxtättheten är däremot beroende av avståndet, eftersom denna är direkt beroende av rymdvinkeln av källan (som är en variabel som minskar vid ökat avstånd). Den spektrala fluxtättheten betecknas oftast som S_ν och är definierad som intensiteten I_ν integrerad över källan enligt ekvationen nedan,

$$S_\nu = \int_{\text{källa}} I_\nu(\theta, \phi) \cos\theta d\Omega .$$

Vid astronomiska observationer är källan oftast väldigt liten ($\ll 1$ rad), vilket medför att $\cos\theta \approx 1$ och uttrycket kan förenklas till

$$S_\nu \approx \int_{\text{källa}} I_\nu(\theta, \phi) d\Omega . \quad (2.9)$$

Enheten för den spektrala fluxtättheten är $\text{W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$, men eftersom fluxtättheten för astronomiska källor tenderar att vara extremt små, använder man oftast enheten Jansky (Jy), där

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

Den spektrala luminositeten, L_ν , återger den totala energin som är emitterad av källan per frekvens. För en källa på avståndet d ges luminositeten av följande uttryck:

$$L_\nu = 4\pi d^2 S_\nu , \quad (2.10)$$

där $4\pi d^2$ är arean av en sfär med radien d . Den totala luminositeten L erhålls genom integration över samtliga frekvenser. Luminositet är en inre egenskap hos källan och beror följaktligen inte på avståndet mellan källa och observatör, eftersom avståndsberoendet i ekvation (2.10) tas ut av beroendet i S_ν . Luminositet för ett objekt är en storhet som oftast jämförs med solen.

2.6 Observationella metoder och teknik

Inom radioastronomi finns det olika metoder för att utföra observationer. Dessa kan grovt delas upp i två sorters tekniker: *single dish*-observationer samt användandet av många single dish-teleskop som kombineras med interferometriteknik för att simulera ett stort teleskop.

I fallet med en interferometer arbetar flera single dish-teleskop tillsammans för att generera en bild med högre upplösning och känslighet. Däremot begränsas den maximala vinkelstorleken som kan observeras av det minsta avståndet mellan detektorerna. Vidare förklaring av detta ges i avsnitt 2.6.2.

2.6.1 Vinkelupplösning

För observationer är vinkelupplösningen en viktig komponent. Konventionen inom radioastronomi är att definiera vinkelupplösningen som halvvärdesbredden (eng: *Full Width at Half Maximum*, FWHM) av teleskopets huvudbeam. (Marr m. fl. 2015) Halvvärdesbredden är således vinkeln mellan två punkter vars intensitet är hälften av toppvärdet, och ges av ekvationen

$$\theta_{\text{FWHM}} \approx 0.89 \frac{\lambda}{D} ,$$

där λ är våglängden i fråga och D teleskopets apertur. (Condon och Ransom 2017, kap. 3) Utifrån detta kan rymdvinkeln av beamen, under antagandet att beamen är gaussisk, bestämmas enligt följande,

$$\Omega_{\text{beam}} = \frac{\pi}{4\ln(2)} \theta_{\text{FWHM}}^2 . \quad (2.11)$$

Så som förklaras i boken *Fundamentals of Radio Astronomy: Observational Methods* (Marr m. fl. 2015) (där den mesta informationen i detta avsnitt kommer ifrån, om inget annat nämns) benämner man oftast astronomiska källor antingen som *upplösta* eller *oupplösta*. Här betecknar en upplöst källa ett objekt som har en större rymdvinkel än teleskopets huvudbeam ($\Omega_{\text{källa}} \gg \Omega_{\text{beam}}$), medan en oupplöst källa (som ibland kallas för en punktkälla) är ett objekt vars rymdvinkel är mindre än huvudbeamen ($\Omega_{\text{källa}} \ll \Omega_{\text{beam}}$).

För oupplösta källor fås fluxtätheten direkt vid en mätning, men för fallet med en upplöst källa (vilket är vad denna rapport kommer att behandla) blir dessa beräkningar mer komplicerade. Kontentan av vad som händer vid dessa mätningar är att all fluxtäthet från källan inte blir detekterad. Här mäts således *inte* fluxtätheten, utan snarare medelintensiteten över huvudbeamen. Denna intensitet ges oftast i enheten *Jy per beam*, där beam är enheten för beamens rymdvinkel och där $1 \text{ beam} = \Omega_{\text{beam}}$.

För att kunna beräkna den faktiska fluxtätheten för en upplöst källa gäller det att känna till den aktuella beamstorleken Ω_{beam} som bestäms med ekvation (2.11). Genom att dividera den erhållna intensiteten (som alltså har enheten Jy/beam) med beamens rymdvinkel fås intensiteten i mer användbara enheter; Jy/sr eller Jy/pixel för digitala bilder. Detta kan sedan integreras över området för att erhålla fluxtätheten.

För astronomiska kartor är det vanligt att enheten Jy/beam används utan hänseende till om källan är upplöst eller ej, vilket innebär att denna omvandling görs oavsett.

2.6.2 Största vinkelstorlek, θ_{LAS}

För en interferometer som vid en viss konfiguration har det maximala avståndet L_{max} mellan två antenner ges upplösningen istället av,

$$\theta_{\text{FWHM}} \approx \frac{\lambda}{L_{\text{max}}} ,$$

som relaterar till det minsta objektet en interferometer kan detektera. På liknande sätt finns det ett värde som anger det största objektet som kan detekteras av en interferometer vid en viss konfiguration. Detta värde ges av den största vinkelskalan (eng: *largest angular scale*) θ_{LAS} , som alltså är ett mått på hur stor rymdvinkel ett astronomiskt objekt kan uppta innan det filtreras bort som följd av interferometerens konfiguration. Värdet kan beräknas enligt

$$\theta_{\text{LAS}} \approx 0.6 \frac{\lambda}{L_{\text{min}}} , \quad (2.12)$$

där $L_{\min}$ således är det minsta avståndet mellan två antenner i interferometern. (Murphy 2017)
Som senare kommer att diskuteras ger detta konsekvenser vid beräkningar av spektralindex α för källor som är större än θ_{LAS} , eftersom mycket information förloras. (Crossley m.fl. 2017)

Kapitel 3

Observationella data

För de aktiva galaxkärnor som behandlas i denna rapport gäller det att olika delar av källan sänder ut olika sorters strålning. Loberna och jetstrålarna emitterar primärt strålning i radiospektret, detta på grund av synkrotronstrålning som redogjordes i avsnitt 2.4. Kärnan sänder utöver radiostrålning även ut röntgenstrålning. Detta arbete behandlar i första hand radioobservationer och den information som erhålls i den delen av spektret. Därför har radioobservationer vid frekvenserna 150, 610 och 1400 MHz valts ut för studien.

Utöver radioobservationer finns det utförliga optiska observationer från framförallt *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), som även ofta har information om rödförskjutning – antingen fotometrisk rödförskjutning eller en mer exakt spektroskopisk rödförskjutning. Spektroskopisk rödförskjutning finns dock inte till alla optiska detektioner utan ibland får den mindre exakta fotometriska anges. Information från SDSS i form av optiska och spektroskopiska observationer kan användas för att relatera radiodetektioner till optiska detektioner och därav dra slutsatser om radiogalaxers värdgalaxer.

I nästkommande avsnitt ges korta presentationer av de observationer som har använts i arbetet samt vilka metoder som använts för dessa observationer. En översikt över observationerna som använts kan ses i tabell 3.1.

3.1 Radioobservationen av XXL-North med GMRT vid 610 MHz

Radioobservationen vid 610 MHz är, som redan nämnt, den karta som störst fokus lagts på under detta arbete, med anledningen att denna observation var dedikerad för XXL-projektet och mättes således under ett längre tidspann (integrationstid 3 h 35 min (Smolčić m. fl. in prep.)) för att generera djupa och detaljrika kartor – se figur 2.1. Dessa observationer är gjorda med radioteleskopet *Giant Metrewave Radio Telescope* (GMRT), som är en internationell anläggning i Indien bestående av en interferometer med 30 styrbara antenner, vardera med en diameter på ca 45 meter, som genomför mätningar vid låga frekvenser. Observationerna inleddes vid årsskiftet till år 2014. (Lal 2013)

3.2 Kompletterande observationer i radiobandet

3.2.1 TGSS – 150 MHz

Observationerna från *Tata Institute of Fundamental Research GMRT Sky Survey* (TGSS) är också gjorda med hjälp av radioteleskopet GMRT. Denna karta är däremot gjord vid frekvensen 150 MHz och täcker hela norra halvklotet ner till -53° deklination och omfattar totalt $36\,900\text{ deg}^2$ (där hela himlen täcker drygt $41\,000\text{ deg}^2$). (Intema m. fl. 2017) Syftet med denna observation var

Tabell 3.1: Tabell över de olika kartläggningar i radiobandet som spänner över området XXL-North där jämförelser kan göras. θ_{FWHM} står för halvvärdesbredd (*Full Width at Half Maximum*), vilket karaktäriserar kartans upplösning. θ_{LAS} står för *Largest Angular Scale* och motsvarar storleken på de största strukturer som är synliga med interferometern.

Namn		TGSS	XXL-N GMRT	NVSS	FIRST
Teleskop		GMRT	GMRT	VLA	VLA
Antal antenner		30 ^b	30 ^b	27	27
Antennstorlek	[m]	45 ^b	45 ^b	25	25
Konfiguration		—	—	D, DnC ^d	B ^f
Frekvens	[MHz]	150 ^a	610	1 400 ^d	1 400 ^f
Våglängd	[m]	2	0,49	0,21	0,21
Upplösning, θ_{FWHM}	["]	25 ^a	6	45 ^d	5 ^f
Pixelstorlek	["]	6,2 ^a	1,5	5 ^d	1,8 ^f
Brus (rms)	[mJy beam ⁻¹]	3,5 ^a	0,06	0,45 ^d	0,15 ^f
Största vinkelstorlek, θ_{LAS}	["]	4 080 ^b	1 020 ^b	1 040 ^e	130 ^e
Kartans storlek	[deg ²]	36 900 ^a	25 ^c	33 600 ^d	10 575 ^f
Integrationstid		15 min ^a	3 h 35 min ^c	30 - 60 s ^d	3 min ^f

^a (Intema m. fl. 2017)

^b (Lal 2013)

^c (Smolčić m. fl. in prep.)

^d (Condon m. fl. 1998)

^e (Witz 2017)

^f (White 2012)



Figur 3.1: Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT), nära Pune, Indien – källan för observationerna vid 610 och 150 MHz. (Bild: (National Centre for Radio Astrophysics (NCRA-TIFR) 2017))

således inte att få en djup karta, utan snarare att täcka så stort del av stjärnhimlen som möjligt. Integrationstiden för varje delobservation är således bara 15 minuter, till skillnad från kartan vid 610 MHz i XXL-N som hade en integrationstid på 3 timmar och 35 minuter.



Figur 3.2: Very Large Array (VLA), nära Socorro, New Mexico – källan för de två observationerna vid 1,4 GHz. (Foto: John Fowler ©)

3.2.2 FIRST – 1400 MHz

Projektet *Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters* (FIRST) har med hjälp av *NRAO Very Large Array* (VLA) sammanställt en karta som omfattar ett område på $10\,575\text{ deg}^2$, däribland annat området XXL-North, vid 1 400 MHz. (White 2012) VLA är en interferometer i New Mexico bestående av 27 radioantennor med vardera en diameter på 25 meter. Antennerna är konfigurerade som ett Y och avståndet mellan antennerna är ställbara till 4 olika standardkonfigurationer som refereras till som A, B, C och D. Skillnaden på de olika konfigurationerna är avståndet mellan antennerna som resulterar i olika upplösningar och θ_{LAS} . Vilken konfiguration som är lämpligast beror på målet med mätningarna i fråga – se tabell 3.2. (Witz 2017) Teleskopet var i B-konfiguration vid FIRST-kartläggningen på 1 400 MHz, vilket innebär att kartans *largest angular scale* är ungefär $130''$. (Witz 2017)

Denna karta är mycket högupplöst och är utmärkt för detektion av kompakta källor. Däremot förväntas ingen detektion av de två största radiogalaxernas lobor synas i denna karta på grund av teleskopets låga känslighet för strukturer större än ungefär $130''$ vid denna frekvens och konfiguration.

3.2.3 NVSS – 1400 MHz

Mellan september 1993 och oktober 1996 samt under slutet av 1997 kartlades hela norra stjärnhimlen ner till -40° deklination (82% av stjärnhimlen, totalt $33\,600\text{ deg}^2$) under projektnamnet *NRAO VLA Sky Survey* (NVSS) vid 1 400 MHz. Precis som FIRST gjordes detta med hjälp av radioteleskopet VLA, men denna gång i D- och DnC-konfiguration. (Condon m. fl. 1998)

Upplösning för denna karta är lägre än FIRST-kartan (se tabell 3.1), men i denna konfiguration

Tabell 3.2: Exempel på värden för de olika egenskaperna för VLA då mätningar görs vid 1,4 GHz. (Witz 2017) $L_{\max}$ och $L_{\min}$ representerar största respektive minsta avstånd mellan antennerna i konfigurationen. θ_{LAS} är dess största vinkelstorlek, *largest angular scale*.

Konfiguration	FIRST		NVSS	
	A	B	C	D
$L_{\max}$ (km)	36,4	11,1	3,4	1,03
$L_{\min}$ (km)	0,68	0,21	0,035	0,035
Upplösning (")	1,4	4,6	15	45
θ_{LAS} (")	39	130	1 040	1 040

ligger den största vinkelstorleken θ_{LAS} på 1 040" och är därmed stor nog för att detektera de radiogalaxer denna rapport fokuserar på – se kapitel 5.

3.3 Observationer vid andra våglängder

Utöver observationer i radiobandet används även optiska observationer samt röntgenobservationer.

3.3.1 XXL-North (XMM) – röntgenobservation

Som nämndes i avsnitt 2.1 så är röntgenteleskopet XMM-Newton centralt för XXL-studien då XXL är det största projektet som utförts av XMM-Newton. 1999 skickades XMM-Newton upp av Europeiska rymdorganisationen, ESA. (ESA 2017[a]).



Figur 3.3: Illustration av rymdteleskopet XMM-Newton i omlopp. (Bild: ESA(ESA 2017[c]))

XMM-Newton har en högst elliptisk bana där högsta punkten för tillfället ligger på 114 000 km

och den lägsta punkten på 7 000 km. (ESA 2017[b]) På grund av den elliptiska formen och att det tar 2 dygn för den att genomföra ett varv så kan teleskopet under långa perioder göra djupa mätningar på en och samma punkt. Omloppsbanan kan varieras om så önskas men tiden det tar att genomföra ett varv hålls alltid vid 48 h.

3.3.2 SDSS – optiska bilder och spektroskopiska data

Optiska bilder samt information om rödförskjutning får vi ifrån SDSS, *Sloan Digital Sky Survey*, som är en omfattande studie som påbörjades år 2000 efter ett årtiondes förberedelse. I dagsläget är cirka 35% av himlen kartlagd av SDSS och det finns spektroskopiska data för över 3 miljoner objekt samt fotometriska data för över 500 miljoner objekt. (Sloan Digital Sky Survey 2017[a])

Bilderna ifrån denna kartläggning kan användas för okulära inspektioner och jämförelse med bilder i andra spektra samt, framförallt, för att erhålla värden på rödförskjutning för galaxer som överlappar med radiogalaxer i radiokartorna. Med hjälp av de data SDSS bidrar med kan man till exempel försöka avgöra vilken galax som är värd för en aktiv galaxkärna på en karta, alternativt avfärda en eller flera galaxer som värdgalax i de fall då flera ligger nära samma radiodetektion. (Sloan Digital Sky Survey 2017[b])

Kapitel 4

Metod

Det här kapitlet redogör visuella inspektioner av radiokartorna såväl som de efterföljande mätningarna av fluxtäthet och bestämmandet av spektralindex. Detta följs av ett avsnitt bland annat förklarar vilka konventioner som användes vid beräkningarna.

4.1 Visuell inspektion av XXL-North GMRT 610 MHz

Arbetet inleddes med en övergripande visuell inspektion av radiokartan XXL-North GMRT 610 MHz, vilket är den karta där radiokällorna framträder tydligast. Detta för att identifiera intressanta aktiva radiogalaxer, på vilka vidare analys skulle utföras. Majoriteten av radiokällorna på denna karta består av punktformiga källor. De källor som däremot var av intresse för denna studie var de som har en väldefinierad struktur med större projicerad storlek. Detta innebar i den här studien källor där jetstrålar förekommer.

Därefter utfördes en kontroll av identifierade galaxhopar från tidigare undersökningar inom XXL (Pacaud m. fl. 2016) för att se om de utvalda radiogalaxerna hade en tillhörande galaxhop, för att kunna sätta dem i ett större sammanhang. Om sådant var fallet kunde även den approximativa rödförskjutningen för galaxhopen även användas för den aktiva galaxkärnan.

I ett senare skede valdes, av de initialt utvalda radiogalaxerna, *två* källor som ansågs vara lämpliga för analys i större omfattning. Beskrivningen av dessa två radiogalaxer presenteras i större detalj i avsnitt 5.1. Med dessa genomfördes sedan ett antal olika mätningar som beskrivs i de följande avsnitten.

4.2 Mätning av fluxtäthet

En av de mest betydelsefulla mätningarna var de av fluxtätheten, vilket är, som förklarades i avsnitt 2.5, ett avståndsberoende mått på den mottagna intensiteten över källan.

Vid mätningen av fluxtätheten av de två utvalda radiogalaxerna beräknades fluxtätheten dels över hela källan, såväl som i ett antal mindre regioner. Indelningen av de mindre regionerna baserades dels på vetenskapen om var man vanligen kan se viktiga skillnader i spektralindex, men även de områden som hade särskilt starkt flux. Vidare detaljer om uppdelningen behandlas i kapitel 5 och illustreras i figurerna 5.3 och 5.6. En aspekt som även fick tas i beaktning vid dessa mätningar var bruset i de olika observationskartorna. Problematiken kring detta redogörs i avsnitt 6.1.2 i diskussionskapitlet.

Eftersom de valda källorna visade sig vara upplösta, i samband med att all intensitet i observationskartorna gavs i enheten Jy/beam, behövdes några extra steg utföras för att bestämma fluxtätheten, i enlighet med det som beskrivits i avsnitt 2.6.1. Med hjälp av de formler som gavs i det hänvisade avsnittet, såväl som informationen om pixelstorlek och halvvärdesbredd

som ges i tabell 3.1, kunde den faktiska fluxtätheten bestämmas. För de framtagna fluxv rdena gavs därefter en felmarginal på 10%, som inkluderar det formella bruset i kartorna, fel från databearbetningsprocessen samt fel från den absoluta fluxkalibreringen.

4.3 Beräkning av spektralindex

Spektralindex α definieras i ekvation (2.7):

$$S_\nu = A\nu^\alpha \quad (4.1)$$

Eftersom fluxt thetsv rdena S_ν har mätfel av varierande storlek måste deras felmarginaler tas i beaktning vid beräkning av spektralindex, där två olika metoder användes beroende på mellan vilket antal frekvenser som felmarginalen skulle bestämmas.

4.3.1 Två mätpunkter

Vid beräkning av spektralindex mellan två frekvenser användes uttrycket nedan, som kan härledas algebraiskt.

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{S_{\nu_2}}{S_{\nu_1}}\right)}{\log\left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)}, \quad (4.2)$$

som även kan skrivas som $\alpha_{\nu_1}^{\nu_2}$. Osäkerheten för detta värde härleddes sedan med statistiska metoder och teori gällande felfortplantning som ledde till följande uttryck

$$\Delta\alpha = \frac{1}{\log\left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)} \sqrt{\left(\frac{\Delta S_{\nu_2}}{S_{\nu_2}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{\nu_1}}{S_{\nu_1}}\right)^2}.$$

Detta kunde i sin tur förenklas ytterligare eftersom de mätdata som användes hade mätfel som en procentsats av mätvärdet, i detta fall 10%. $\left(\frac{\Delta S_{\nu_2}}{S_{\nu_2}}\right)^2$ kunde förenklas som följd av att $\Delta S_{\nu_2} = 0.1S_{\nu_2}$. På grund av detta kunde uttrycket ovan istället omskrivas till följande;

$$\Delta\alpha = \frac{1}{\log\left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)} 0.1\sqrt{2}. \quad (4.3)$$

Således användes ekvationerna (4.2) och (4.3) för att beräkna spektralindex och det associerande felet mellan två frekvenser.

4.3.2 Fler mätpunkter

För att beräkna ut index över samtliga tre mätpunkter som nyttjades i detta arbete kunde inte samma metod som beskrevs ovan användas. Istället tillämpades beräkningar gjorda med *Monte Carlo*-metoden. Monte Carlo-beräkning är en metod där en modell anpassas flera gånger, i detta fall ekvation (4.1), tillsammans med ett normalfördelat slumpmoment. H r beräknades således spektralindex med fluxt thetsv rden enligt $S + \Delta S r$ där r är en normalfördelad slumpvariabel med väntevärde 0.

Detta resulterade i ett värde för spektralindexet α och ett värde f r den framf rst ende konstanten A i ekvation (4.1). I och med att denna beräkning genomfördes ett flertal gånger, kommer resultatet att hamna i två datamängder med olika värden f r de båda variablerna. Eftersom dessa datamängder  r normalfördelade så representerar väntevärdet för respektive datamängd ett bra värde för konstanterna där felmarginalerna f r S_ν således är tagna i beaktning. Osäkerheten på spektralindexet ansätter vi till första standardavvikelsen (1σ) i normalfördelningen f r α .

4.4 Antagna kosmologiska parametrar

Vid beräkningen av astronomiska storheter, såsom avstånd och luminositet, gäller det att man tar ställning till vilka konventioner som ska användas, såväl som vilka kosmologiska parametrar som nyttjas. Eftersom detta arbete är ett utskott av XXL-projektet följer dessa val i analogi med deras konventioner. Detta innebär att för de beräkningar som relaterar till rödförskjutning och avstånd antogs följande kosmologi: ett platt universum med $\Omega_m = 0,3$, $\Omega_\Lambda = 0,7$ och Hubbles konstant $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$. För dessa beräkningar användes *Ned Wright's Cosmology Calculator*. (Wright 2006)

Övriga beräkningar som har tagits upp i detta kapitel har genomförts med beräkningsprogrammet MATLAB. Dessutom nyttjades två olika Unix-skript för bland annat skapandet av de bilder som rapporten innehåller. Dessa skript samt MATLAB-kod återges i appendix C.

Kapitel 5

Resultat och analys

I detta kapitel redovisas de resultat som erhållits från mätningarna som utförts i analogi med metodkapitlet.

5.1 Visuell inspektion av kartan XXL-North GMRT 610 MHz

Våra inspektioner av 610 MHz-kartan resulterade i fynd av ett större antal intressanta radiogalaxer av stor variation i form och vinkelstorlek. För att avgränsa omfånget av vår vidare undersökning sållade vi i första ledet ut sju av galaxerna som vi ansåg särskilt intressanta, baserat på i första hand form och i andra hand vinkelstorlek. De sju galaxerna listades i en prioritetsordning efter vilken potential vi såg i att analysera dem närmare. Ganska snart därefter kom vi till insikt att det var rimligt att avgränsa ytterligare genom att primärt rikta fokus på de två allra mest intressanta galaxerna. Dessa två radiogalaxer tilldelades namnen *Double Irony Radio Galaxy*¹ respektive *Sarcasm Radio Galaxy*² och visas i figur 5.1. Den fullständiga listan över de sju ursprungliga radiokällorna kan ses i appendix B.

De två utvalda galaxerna uppvisar stor skillnad i form sinsemellan, men verkar båda ha en tydlig FR II-struktur, med lobar innehållandes *hotspot*-regioner, enligt avsnitt 2.3.

Tabell 5.1: Övergripande information över de två källor som huvudsakligen studeras. Rödförskjutning inom parentes indikerar att enbart fotometriska data från SDSS är tillgängliga; i annat fall är det spektroskopiska data från SDSS. Rödförskjutning för Double Irony och Sarcasm är för den närmast belägna optiskt synliga galaxen i SDSS. Notera att de två storleksangivelserna gäller vid 610 MHz, vilket är den av våra studerade frekvenser som visar dem tydligast.

Egenskap	Double Irony Radio Galaxy	Sarcasm Radio Galaxy
Rödförskjutning, galax ^a	(0,136 ± 0,007)	0,13818 ± 0,00002
Vinkelstorlek	353''	180''
Avstånd ^b	496,6 Mpc	503,4 Mpc
Projicerad verklig storlek ^b	850 kpc	439 kpc

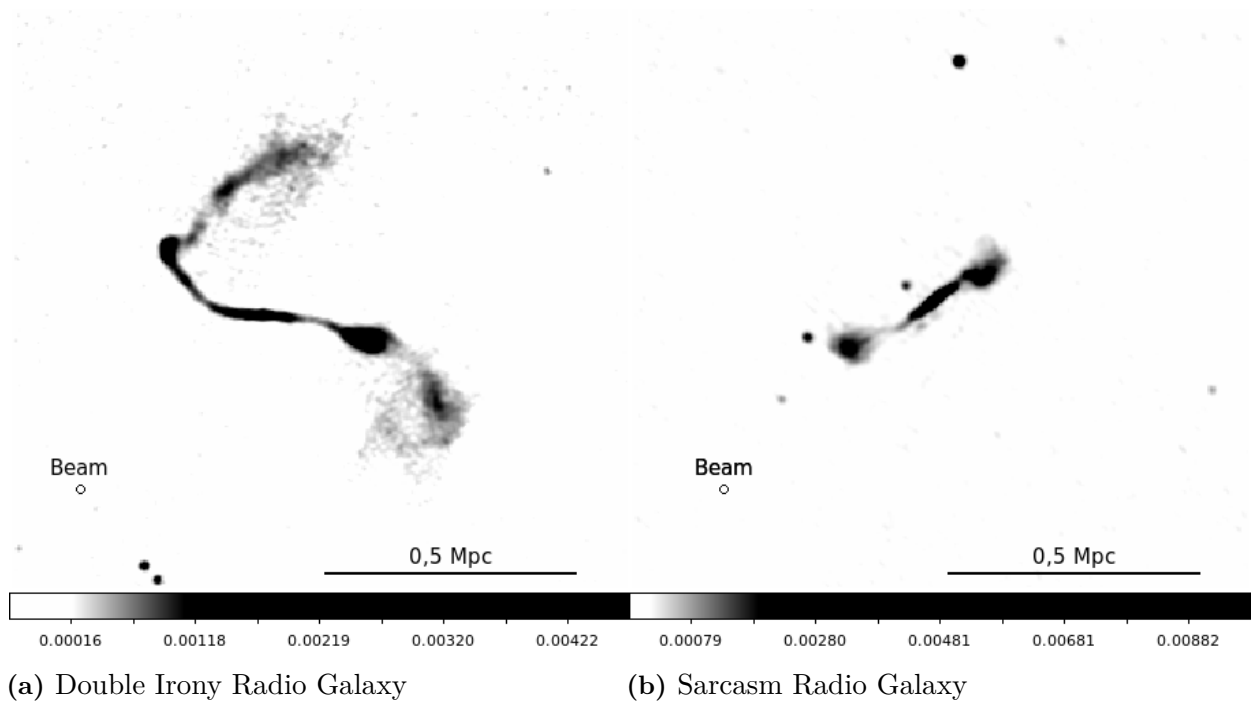
^a (Sloan Digital Sky Survey 2017[a])

^b Vinkelstorleksavstånd (*angular size distance*) (Wright 2006)

^c (Wright 2006)

¹Namnet *Double Irony* kommer från att radiogalaxens form påminner om två ironitecken – ? – sammanfogade i (den förmodade) galaxkärnan.

²Namnet *Sarcasm* valdes som en följd av den första radiogalaxens namn tillsammans med det faktum att de båda radiogalaxerna har jämförbara rödförskjutningar och ligger i samma fält och ansågs därför i någon mening vara ”syskongalaxer” vid denna studie.

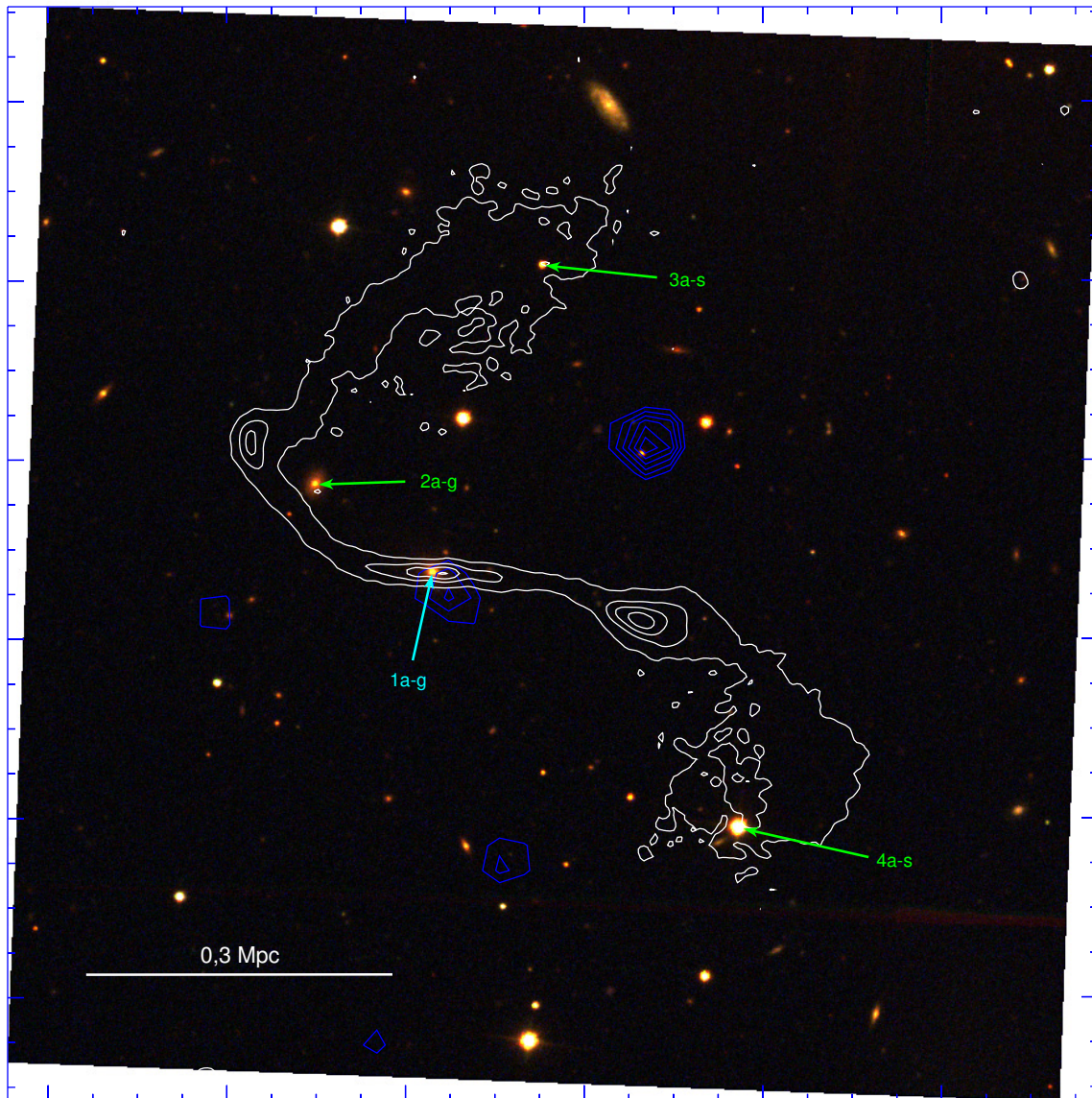


Figur 5.1: De två radiokällorna vid 610 MHz. Färgskalan indikerar strålningens intensitet, vid frekvensen 610 MHz, i enheten Jy/beam. Utmärkt är även beam-storleken för den aktuella observationen, som är en indikation på kartans upplösning.

5.2 Double Irony Radio Galaxy

Den otvivelaktigt mest intressanta av de radiogalaxer som återfinns i fältet XXL-North är Double Irony. Den har en uppmätt vinkelstorlek på cirka $6'$ vid 610 MHz med motsvarande identifierade optiskt synliga värdgalax markerad som (1a-g) i figur 5.2. Denna figur representerar konturlinjer för radiostrukturen vid 610 MHz (vita konturlinjer) samt röntgenobservationer från XMM-Newton (blåa konturlinjer) superponerade över en optisk bild över motsvarande område. De optiska observationerna från SDSS består av ultraviolett, grönt och rött ljus vid våglängderna 3543, 4770 respektive 6231 Å. (Sloan Digital Sky Survey 2017[a]) Röntgenobservationen för detta område är olyckligtvis relativt lågupplöst och av otillfredsställande kvalitet. Det går däremot att ana en röntgendetektion nära värdgalaxen (1a-g), om än något förskjuten – troligtvis på grund av den låga kvaliteten på kartan. Inga konkreta slutsatser kan dras ur detta innan bättre röntgenobservationer gjorts i fältet.

Det är framförallt två aspekter som slår en vid betraktelse av denna galax – dess stora relativa projicerade storlek i fältet och dess mycket speciella, vridna form. Double Irony är det överlägset största radioobjektet i XXL-North vid 610 MHz. Genom att använda data från SDSS för värdgalaxens fotometriska rödförskjutning, $z = 0,136 \pm 0,007$, (Sloan Digital Sky Survey 2017[a]) vilket med den kosmologi som är angiven i avsnitt 4.4 implicerar ett avstånd på 496,6 Mpc (1,619 Gly), (Wright 2006) så uppskattas dess projicerade verkliga storlek till 850 kpc (2,771 Mly). Med tanke på att strukturen inte nödvändigtvis ligger i ett plan vinkelrätt mot vår siktlinje, och att den dessutom har en vriden form, är dess sanna storlek rimligtvis ännu större, och klassificeringen som en *giant radio galaxy* enligt avsnitt 2.2.3 står således utom allt tvivel. Se tabell 5.1 för fullständig information om radiogalaxen.



Figur 5.2: Kompositbild över Double Irony med omgivning. Konturlinjer för radiostrukturen vid 610 MHz i vitt samt konturlinjer för röntgenobservationen från XMM-Newton i blått är superponerade över en optisk bild. De optiska observationerna från SDSS består av ultraviolett, grönt och rött ljus vid våglängderna 3543, 4770 respektive 6231 Å. Ett objekt markerat med ett "g" (exempelvis (1a-g)) indikerar en galax. På samma sätt indikerar ett "s" att objektet är en stjärna. I strukturens centrum (1a-g) ligger den förmodade värdgalaxen, samt en omgivning av andra galaxer (2a-g), liksom stjärnor tillhörande vår egen galax (3a-s, 4a-s). Röntgenobservationen nära radiogalaxens kärna ser ut att vara relaterad till värdgalaxen (1a-g), om än något förskjuten, troligtvis på grund av röntgenkartans otillräckliga kvalitet. Inga konkreta slutsatser kan dras kring detta.

5.2.1 Andra astronomiska objekt runt Double Irony

I fältet runt radiokällan finns ett antal optiskt synliga källor. Förutom den galax som har identifierats som källan till radioemissionen, (1a-g) i figur 5.2, ligger bland annat en galax vid (2a-g) med en spektroskopisk rödförskjutning på $z = 0,13433 \pm 0,00003$. Denna är inte ljusstark i radiospektret och bidrar därför inte till den totala emissionen från radiogalaxen. Den har däremot en rödförskjutning likvärdig med radiogalaxen vid (1a-g).

Till sist är de optiskt synliga källorna vid (3a-s) och (4a-s) båda stjärnor, och tillhör därmed vår lokala galax Vintergatan och bidrar inte till radioemissionen från radiogalaxen.

Det framgår dessutom några röntgenkällor i fältet. Dessa diskuteras inte ytterligare på grund av röntgenkartans otillfredsställande kvalitet.

5.2.2 Fluxtäthet för Double Irony

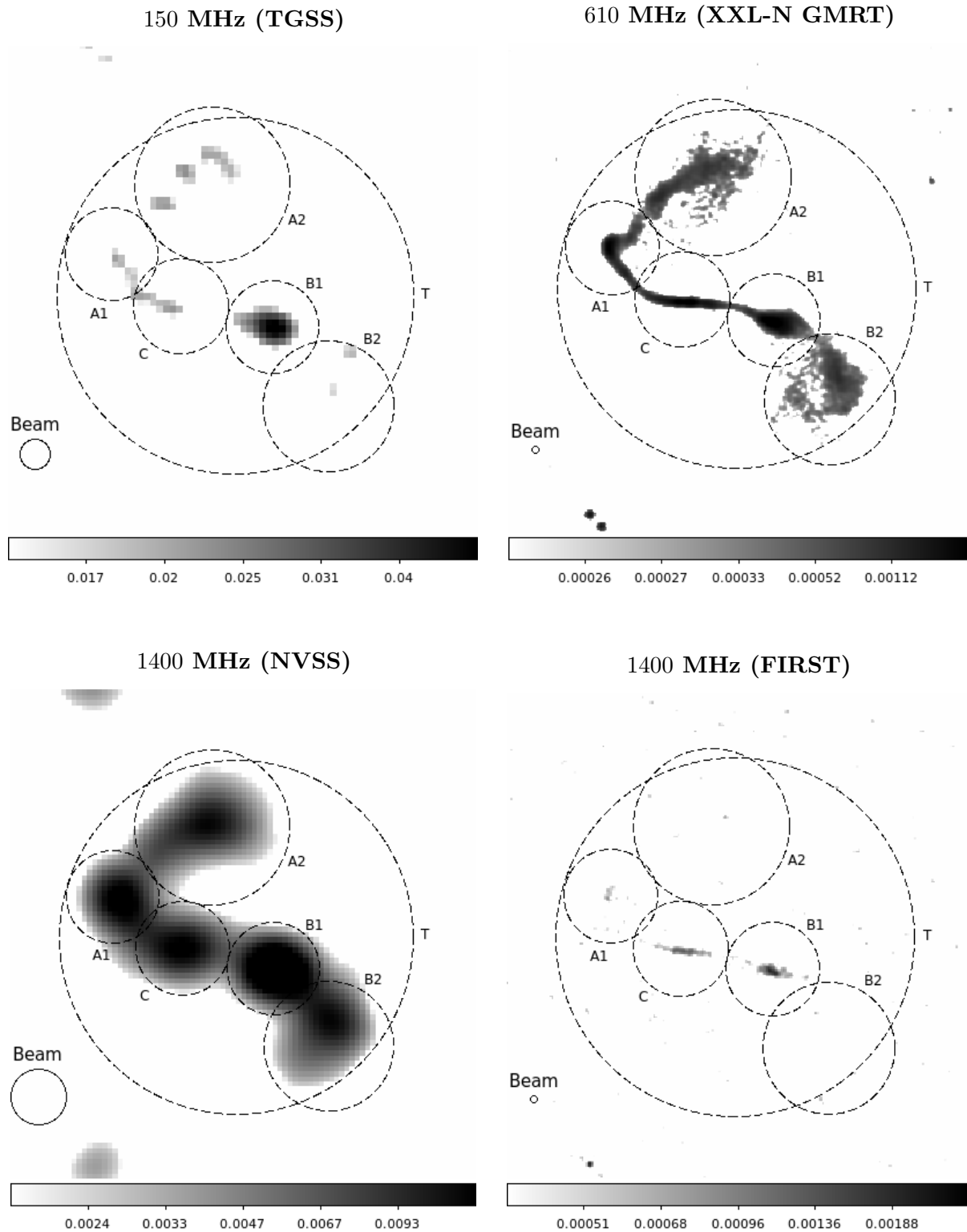
Nedan i figur 5.3 visas de cirkulära regioner som källorna delades upp i. Double Irony indelades i sex regioner: en som täcker hela källan vid alla frekvenser (T, *Total*), en för källans kärna (C, *Core*) samt fyra för de två loberna (A₁, A₂ och B₁, B₂). Vid mätningen av fluxtäthet över dessa regioner jämfördes även skillnaden mellan det totala värdet erhållet från den stora regionen, T, och det totala värdet erhållet från unionen av de mindre mindre regionerna, T_{AUBUC}, för att kunna undersöka brusets påverkan. Mätresultaten för de olika regionerna, som utfördes i enlighet med avsnitt 4.2, visas i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Tabellen visar den uppmätta fluxtätheten för Double Irony över de regioner som visas i figur 5.3 vid de olika frekvenser som behandlas i rapporten.

	TGSS 150 MHz (mJy)	XXL-N GMRT 610 MHz (mJy)	NVSS 1400 MHz (mJy)	FIRST 1400 MHz (mJy)
A ₂	175,72 ± 17,57	73,60 ± 7,36	30,81 ± 3,08	2,83 ± 0,28
A ₁	35,37 ± 3,54	32,38 ± 3,24	19,53 ± 1,95	4,79 ± 0,48
C	54,26 ± 5,43	28,47 ± 2,85	20,50 ± 2,05	4,20 ± 0,42
B ₁	121,98 ± 12,20	51,42 ± 5,14	30,95 ± 3,10	7,90 ± 0,79
B ₂	89,72 ± 8,98	59,26 ± 5,93	23,83 ± 2,38	5,27 ± 0,53
T _{AUBUC}	469,56 ± 46,96	241,35 ± 24,14	131,45 ± 13,15	18,50 ± 1,85
T	427,53 ± 42,75	220,46 ± 22,05	131,49 ± 13,15	13,26 ± 1,33

5.2.3 Spektralindex och synkrotronspektrum för Double Irony

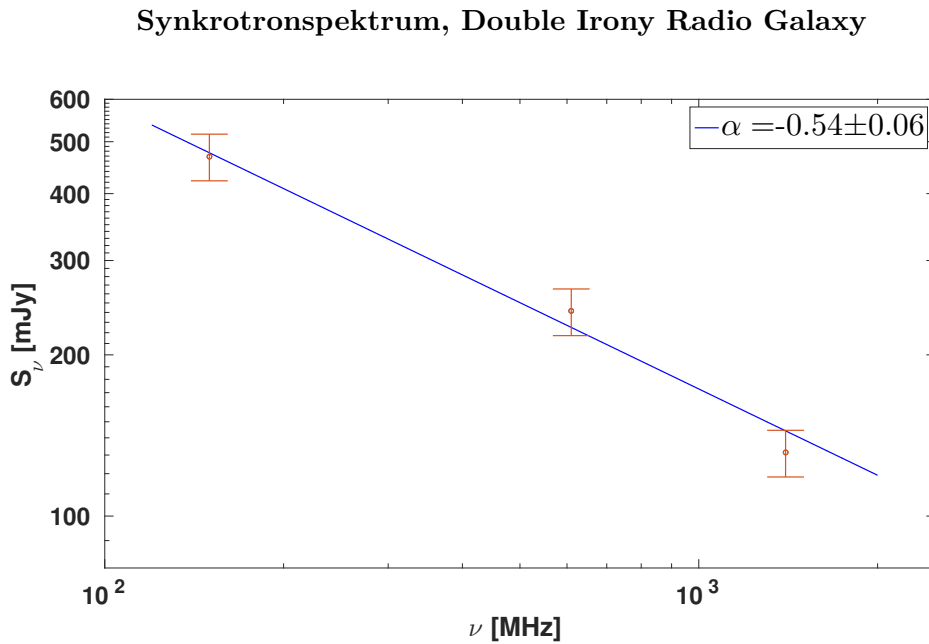
De olika regionernas spektralindex, som beräknades utifrån vad som beskrevs i avsnitt 4.3, visas i tabell 5.3. Ett av de relaterade synkrotronspektrumen visas i figur 5.4.



Figur 5.3: Översikt över de regioner som Double Irony Radio Galaxy uppdelas i vid beräkningar av fluxtätheten. C betecknar kärnan, A1 och B1 de "inre loberna", samt A2 och B2 de "yttre loberna". T är en region för beräkning av ett totalvärde (i jämförelse med den region som bildas av unionen av A1, A2, B1, B2 och C, betecknad T_{AUBUC} i tabell 5.2, 5.5, 5.3 och 5.6). Färgskalan har enheten Jy/beam, och cirkeln betecknad "Beam" indikerar beam-storleken vid respektive observation.

Tabell 5.3: Tabellen visar olika värden på spektralindex för Double Irony för de olika regionerna som visas i figur 5.3. Kolumn (1) till (3) visar spektralindex mellan två olika frekvenser och kolumn (4) det totala spektralindexet för samtliga frekvenser som nyttjas.

	(1) $\alpha_{150\text{ MHz}}^{1400\text{ MHz}}$	(2) $\alpha_{610\text{ MHz}}^{1400\text{ MHz}}$	(3) $\alpha_{150\text{ MHz}}^{610\text{ MHz}}$	(4) α
A2	$-0,78 \pm 0,15$	$-1,05 \pm 0,39$	$-0,62 \pm 0,23$	$-0,69 \pm 0,07$
A1	$-0,27 \pm 0,15$	$-0,61 \pm 0,39$	$-0,06 \pm 0,23$	$-0,69 \pm 0,07$
C	$-0,44 \pm 0,15$	$-0,40 \pm 0,39$	$-0,46 \pm 0,23$	$-0,45 \pm 0,07$
B1	$-0,61 \pm 0,15$	$-0,61 \pm 0,39$	$-0,62 \pm 0,23$	$-0,62 \pm 0,07$
B2	$-0,59 \pm 0,15$	$-1,10 \pm 0,39$	$-0,30 \pm 0,23$	$-0,45 \pm 0,05$
T _{AUBUC}	$-0,57 \pm 0,15$	$-0,73 \pm 0,39$	$-0,47 \pm 0,23$	$-0,54 \pm 0,06$
T	$-0,53 \pm 0,15$	$-0,62 \pm 0,39$	$-0,47 \pm 0,23$	$-0,49 \pm 0,07$



Figur 5.4: Synkrotronspektrum för Double Irony över området T_{AUBUC} vid frekvenserna 150 MHz, 610 MHz och 1400 MHz, där den senare kommer från NVSS-projektet. Figuren visar således den uppmätta fluxtäteten med felmarginal på 10% och en anpassad potenslagsfunktion med spektralindex $\alpha = -0,54 \pm 0,06$.

5.3 Sarcasm Radio Galaxy

Den radiogalax som vi anser vara näst mest relevant att undersöka, främst baserat på att den är det näst största objektet i fältet vid 610 MHz, är Sarcasm Radio Galaxy (den är formmässigt en ordinär FR II-källa). Radiostrukturen har vid 610 MHz en ungefärlig vinkelstorlek på $180''$. Det centrala maximum för radioemissionen kan identifieras med en optiskt synlig galax, från SDSS, markerad som (1b-g) i figur 5.5. Denna figur visar konturlinjer för radiostrukturen vid 610 MHz (vita konturlinjer) samt röntgenobservationer från XMM-Newton (blåa konturlinjer) superponerade över en optisk bild över motsvarande område. De optiska observationerna från SDSS består av ultraviolett, grönt och rött ljus vid våglängderna 3543, 4770 respektive 6231 Å. (Sloan Digital Sky Survey 2017[a]) Det framgår av figuren att galaxen vid radiostrukturens kärna dessutom är ljusstark i röntgenspektret.

Den förmodade värdgalaxens spektroskopiska rödförskjutning från SDSS är $z = 0,13818 \pm 0,00002$. (Sloan Digital Sky Survey 2017[a]) Utifrån denna rödförskjutning, tillsammans med kosmologin som redogjordes i avsnitt 4.4, kan avståndet till radiogalaxen uppskattas till 503,4 Mpc (1,641 Gly). Detta implicerar i sin tur, tillsammans med radiogalaxens vinkelstorlek, att den har en projicerad verklig storlek på 439 kpc (1,431 Mly). (Wright 2006)

5.3.1 Korresponderande galaxhop för Sarcasm

Sarcasm sammanfaller med en galaxhop i XXL-North betecknad XLSSC 112 som har spektroskopisk rödförskjutning $z = 0,139$. (Pacaud m. fl. 2016) Denna galaxhops *Brightest Cluster Galaxy* (BCG – den ljusstarkaste galaxen i galaxhopen) är belägen vid samma koordinater och rödförskjutning som den ovan identifierade galaxen från SDSS. Av den anledningen det är ett rimligt antagande att värdgalaxen för radiokällan vid (1a-g) i figur 5.5 är den ljusstarkaste galaxen i galaxhopen XLSSC 112. Denna BCG har en uppskattad massa $M_{BCG} = 5,35^{+0,41}_{-0,29} \cdot 10^{11} M_{\odot}$, och galaxhopen som helhet $M_{500} = (9 \pm 4) \cdot 10^{13} M_{\odot}$ (se tabell 5.4). (Lavoie m. fl. 2016)

Tabell 5.4: Information om rödförskjutning och massa hos XXL-galaxhopen XLSSC 112. Både den totala massan hos galaxhopen och massan hos den ljusstarkaste galaxen i galaxhopen (BCG) är angivna.

Egenskap	XLSSC 112 ^a
Rödförskjutning, galaxhop	0,139 ^a
Massa, BCG (M_{BCG})	$5,35^{+0,41}_{-0,29} \cdot 10^{11} M_{\odot}$ ^b
Massa, galaxhop (M_{500})	$9 \pm 4 \cdot 10^{13} M_{\odot}$ ^b

^a (Pacaud m. fl. 2016)

^b (Lavoie m. fl. 2016)

5.3.2 Andra astronomiska objekt runt Sarcasm

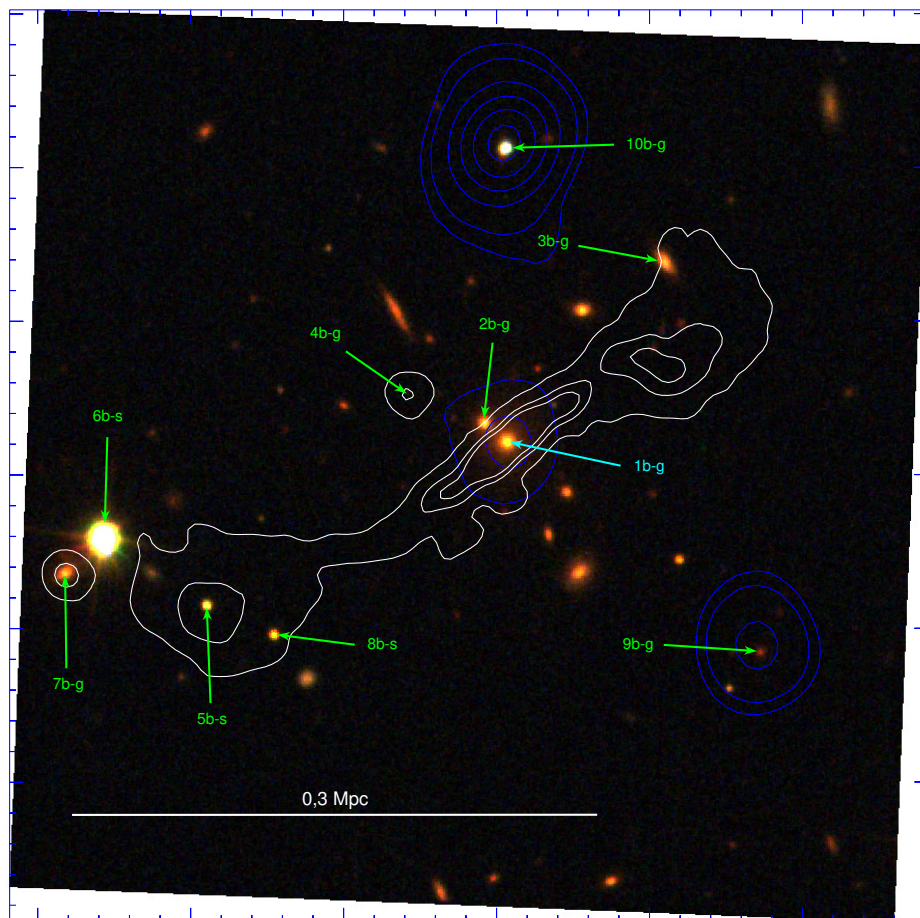
Precis som för Double Irony så ligger ett antal optiska såväl som radiostarka källor i närheten av radiogalaxens emission. Förutom den förmodade värdgalaxen i (1b-g) ligger en optiskt ljusstark galax vid (2b-g) som har en fotometrisk rödförskjutning på $z = 0,144 \pm 0,011$. I 610 MHz-kartan syns det däremot att denna galax inte är ljusstark i radiospektret, och den bidrar således inte till den totala radioemissionen från Sarcasm.

Galaxen vid (3b-g) har en fotometrisk rödförskjutning på $z = 0,156 \pm 0,021$ och ligger delvis inom radiogalaxens lober. Denna rödförskjutning är jämförbar med värdgalaxens rödförskjutning. Ingen tydlig förhöjning av radiostrålning syns dock vid denna galax i 610 MHz-kartan.

Vid (4b-g) finns en tydlig radiokälla. Det troliga motsvarande objektet till denna emission är en avlägsen radiogalax med fotometrisk rödförskjutning på $z \approx 0,5$. Eftersom denna är ljusstark i radiospektret måste den tas i beaktande vid beräkning av fluxtäthet från radiogalaxen Sarcasm i avsnitt 5.3.3. Samma sak gäller för galaxen vid (7b-g) som även den är ljusstark i radiospektret. Några data om den sistnämnda galaxens rödförskjutning finns inte tillgängligt i SDSS.

De resterande tydligt optiskt synliga källorna som är markerade i figur 5.5, (5b-s), (6b-s) och (8b-s), är stjärnor som därmed ligger i vår lokala galax Vintergatan och bidrar inte med radioemission, trots att exempelvis (5b-s) till synes ligger precis i den södra loben av Sarcasm. Detta är med andra ord bara en tillfällighet.

De synliga galaxerna vid (9b-g) och (10b-g) avger dessutom tydlig röntgenemission, men ingen radioemission. Galaxen vid (9b-g) har en fotometrisk rödförskjutning på $z = 0,351 \pm 0,118$ och



Figur 5.5: Kompositbild över Sarcasm med omgivning. Konturlinjer för radiostrukturen vid 610 MHz i vitt samt konturlinjer för röntgenobservationen från XMM-Newton i blått är superponerade över en optisk bild. De optiska observationerna från SDSS består av ultraviolett, grönt och rött ljus vid våglängderna 3543, 4770 respektive 6231 Å. Ett objekt markerat med ett "g" (exempelvis (1b-g)) indikerar en galax. På samma sätt indikerar ett "s" att objektet är en stjärna. Vi ser i strukturens centrum den förmodade värdgalaxen (1b-g), samt en omgivning av andra galaxer ((2b-g), (3b-g), (4b-g), (7b-g)), liksom stjärnor tillhörande vår egen galax ((5b-s), (6b-s), (8b-s)). Den förmodade värdgalaxen är dessutom ljusstark i röntgenspektret, vilket framgår ur röntgenobservationerna (blå konturlinjer). De optiskt synliga galaxerna vid (9b-g) och (10b-g) är även synliga i röntgen, men ej i radiokartan.

är därmed relativt avlägsen i förhållande till Sarcasm. Det motsatta gäller för galaxen vid (10b-g) som har en spektroskopisk rödförskjutning på $z = 0,028 \pm 0,014$ och ligger därmed i förgrunden. (Sloan Digital Sky Survey 2017[a])

5.3.3 Fluxtäthet för Sarcasm

På liknande sätt som för Double Irony delades Sarcasm upp fyra regioner enligt figur 5.6. Här behandlades även regionerna S1 och S2 som täcker två tydliga radiokällor som inte tillhör Sarcasm. Mätningresultaten för de olika regionerna, som utfördes i enlighet med avsnitt 4.2, visas i tabell 5.5.

Tabell 5.5: Tabellen visar den uppmätta fluxtätheten för Sarcasm över de regioner som visas i figur 5.6 vid de olika frekvenser som behandlas i rapporten.

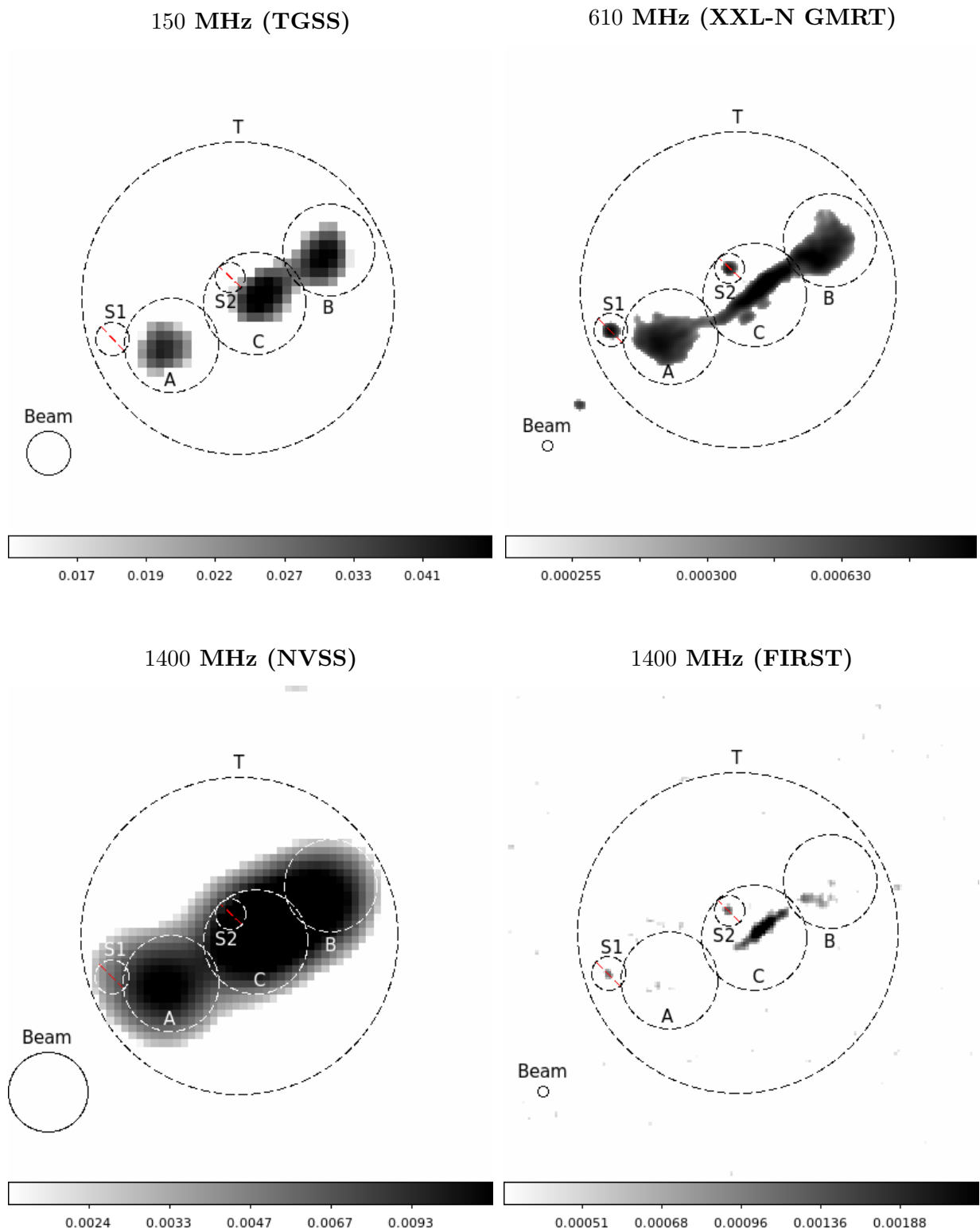
	TGSS 150 MHz (mJy)	XXL-N GMRT 610 MHz (mJy)	NVSS 1400 MHz (mJy)	FIRST 1400 MHz (mJy)
A	$63,92 \pm 6,39$	$32,17 \pm 3,22$	$13,43 \pm 1,34$	$0,91 \pm 0,09$
A\S1	$63,92 \pm 6,39$	$32,12 \pm 3,21$	$13,26 \pm 1,33$	$0,96 \pm 0,10$
B	$84,96 \pm 8,50$	$40,44 \pm 4,04$	$16,00 \pm 1,6$	$4,29 \pm 0,53$
C	$98,50 \pm 9,85$	$55,65 \pm 5,57$	$30,63 \pm 3,06$	$22,04 \pm 2,20$
C\S2	$93,46 \pm 9,35$	$53,23 \pm 5,32$	$28,11 \pm 2,81$	$20,80 \pm 2,08$
S1	$2,10 \pm 0,21$	$3,36 \pm 0,34$	$1,04 \pm 0,10$	$0,52 \pm 0,05$
S2	$5,04 \pm 0,50$	$2,42 \pm 0,24$	$2,52 \pm 0,25$	$1,24 \pm 0,12$
T_{AUBUC}	$244,92 \pm 24,49$	$126,67 \pm 12,67$	$59,15 \pm 5,92$	$27,11 \pm 2,71$
$T_{\text{AUBUC}} \setminus (S1 \cup S2)$	$239,88 \pm 23,99$	$124,20 \pm 12,42$	$56,45 \pm 5,65$	$25,93 \pm 2,59$
T	$284,26 \pm 28,43$	$135,11 \pm 13,51$	$75,91 \pm 7,59$	$21,32 \pm 2,13$
$T \setminus (S1 \cup S2)$	$277,11 \pm 27,71$	$129,33 \pm 12,93$	$72,34 \pm 7,23$	$19,57 \pm 1,96$

5.3.4 Spektralindex och synkrotronspektrum för Sarcasm

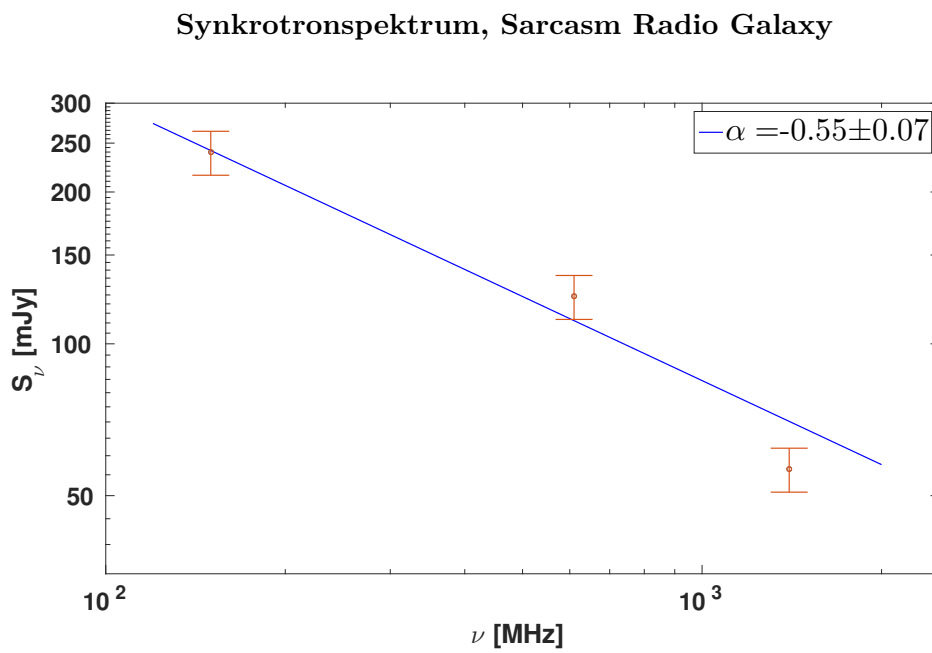
De olika regionernas spektralindex, som beräknades utifrån vad som beskrevs i avsnitt 4.3, visas i tabell 5.6. Det relaterade synkrotronspektret visas i figur 5.7.

Tabell 5.6: Tabellen visar olika värden på spektralindex för Sarcasm för de olika regionerna som visas i figur 5.6. Kolumn (1) till (3) visar spektralindex mellan två olika frekvenser och kolumn (4) det totala spektralindexet för samtliga frekvenser som nyttjas.

	(1) $\alpha_{150 \text{ MHz}}^{1400 \text{ MHz}}$	(2) $\alpha_{610 \text{ MHz}}^{1400 \text{ MHz}}$	(3) $\alpha_{150 \text{ MHz}}^{610 \text{ MHz}}$	(4) α
A	$-0,70 \pm 0,15$	$-1,05 \pm 0,39$	$-0,49 \pm 0,23$	$-0,60 \pm 0,06$
A\S1	$-0,70 \pm 0,15$	$-1,06 \pm 0,39$	$-0,49 \pm 0,23$	$-0,59 \pm 0,06$
C	$-0,52 \pm 0,15$	$-0,72 \pm 0,39$	$-0,41 \pm 0,23$	$-0,46 \pm 0,06$
C\S2	$-0,54 \pm 0,15$	$-0,77 \pm 0,39$	$-0,40 \pm 0,23$	$-0,47 \pm 0,07$
B	$-0,75 \pm 0,15$	$-1,12 \pm 0,39$	$-0,53 \pm 0,23$	$-0,62 \pm 0,07$
T_{AUBUC}	$-0,64 \pm 0,15$	$-0,92 \pm 0,39$	$-0,47 \pm 0,23$	$-0,56 \pm 0,07$
T	$-0,59 \pm 0,15$	$-0,64 \pm 0,39$	$-0,56 \pm 0,23$	$-0,57 \pm 0,08$
$T_{\text{AUBUC}} \setminus (S1 \cup S2)$	$-0,65 \pm 0,15$	$-0,95 \pm 0,39$	$-0,47 \pm 0,23$	$-0,55 \pm 0,07$
$T \setminus (S1 \cup S2)$	$-0,60 \pm 0,15$	$-0,70 \pm 0,39$	$-0,54 \pm 0,23$	$-0,57 \pm 0,07$



Figur 5.6: Översikt över de regioner som Sarcasm uppdelas i vid beräkningar av fluxtätheten. C betecknar kärnan, och A och B de två loberna. T är en region för beräkning av ett totalvärde (i jämförelse med den region som bildas av unionen av A, B och C, betecknad T_{AUBUC} i tabell 5.2, 5.5, 5.3 och 5.6). Färgskalan har enheten Jy/beam, och cirkeln betecknad "Beam" indikerar beam-storleken vid respektive observation.



Figur 5.7: Synkrotronspektrum för Sarcasm över området $T_{\text{AUBUC}} \setminus (S1 \cup S2)$ vid frekvenserna 150 MHz, 610 MHz och 1400 MHz, där den senare kommer från NVSS-projektet. Figuren visar således den uppmätta fluxtäteten med felmarginal på 10% och en anpassad potenslagsfunktion med spektralindex $\alpha = -0,55 \pm 0,07$.

5.4 Spektral luminositet

Från de fluxtäthetsvärden som presenterades i avsnitt 5.2.2 och 5.3.3 kan radiogalaxernas spektrala luminositet, L_ν , beräknas. Luminositeten, som alltså är ett avståndsoberoende mått på hur mycket energi en källa sänder ut per tidsenhet, beräknas enligt ekvation (2.10). Här används fluxtätheten för källornas totala område (utan eventuella bredvidliggande kompakta radiokällor), med andra ord används värdena för fluxtätheten i tabeller 5.2 och 5.5 för T_{AUBUC} respektive $T_{\text{AUBUC}} \setminus (\text{S1US2})$ för Double Irony och Sarcasm. Dessutom beräknas källornas luminositetsavstånd, D_L , med hjälp av *Ned Wright's Cosmology Calculator* (Wright 2006) och galaxernas rödförskjutning som visas i tabell 5.1. Här användes de kosmologiska parametrarna som presenterades i avsnitt 4.4.

Detta gav luminositetsavståndet $D_L = 661,4$ Mpc (2,157 Gly) för Double Irony och $D_L = 652,2$ Mpc (2,124 Gly) för Sarcasm. Med denna information bestämdes därefter luminositeten till de värden som visas i tabell 5.7. Dessa kan i sin tur jämföras med solens luminositet som ligger på $L_\odot = 3,828 \cdot 10^{26}$ W. (Williams 2017)

Tabell 5.7: Luminositet för hela Double Irony och Sarcasm (benämnda T_{AUBUC} respektive $T_{\text{AUBUC}} \setminus (\text{S1US2})$) vid samtliga frekvenser.

	TGSS 150 MHz L_{150} (W Hz $^{-1}$)	XXL-N GMRT 610 MHz L_{610} (W Hz $^{-1}$)	NVSS 1400 MHz L_{1400} (W Hz $^{-1}$)	FIRST 1400 MHz L_{1400} (W Hz $^{-1}$)
Double Irony	$(2,48 \pm 0,25) \cdot 10^{25}$	$(1,27 \pm 0,13) \cdot 10^{25}$	$(6,94 \pm 0,69) \cdot 10^{24}$	$(9,77 \pm 0,98) \cdot 10^{23}$
Sarcasm	$(1,22 \pm 0,12) \cdot 10^{25}$	$(6,30 \pm 0,63) \cdot 10^{24}$	$(2,86 \pm 0,29) \cdot 10^{24}$	$(1,32 \pm 0,13) \cdot 10^{24}$

Vi kan även återkoppla dessa resultat till den skiljelinje som beskrevs i avsnitt 2.3 om Fanaroff–Riley-klassifikationen. Där skrevs att vid 1400 MHz kan radiogalaxer med en luminositet över $\sim 10^{25}$ W Hz $^{-1}$ klassificeras som typen FR II. Våra beräkningar av den spektrala luminositet vid denna frekvens ligger som synes lite under denna skiljelinje. Detta skulle indikera på att radiogalaxerna inte tillhör FR II, däremot har dessa radiogalaxer andra egenskaper som tyder på typen FR II.

Kapitel 6

Diskussion

6.1 Observationella data

6.1.1 De två 1400 MHz-kartorna

Under detta arbete studeras två observationskartor vid frekvensen 1400 MHz, ett från projektet NVSS och ett från projektet FIRST. Som tydligt visas i figurerna 5.3 och 5.6 finns det stora skillnader mellan dessa kartor. FIRST har en betydligt mindre beam-storlek och således en mycket bättre upplösning än NVSS. Oturligt nog kan denna observation ej användas till något annat än okulära inspektioner då dess största vinkelstorlek $\theta_{\text{LAS}} = 130''$, som visas i tabell 3.1, är för låg. Radiogalaxerna som studeras i rapporten är för stora och mycket information filtreras bort som ett resultat av detta.

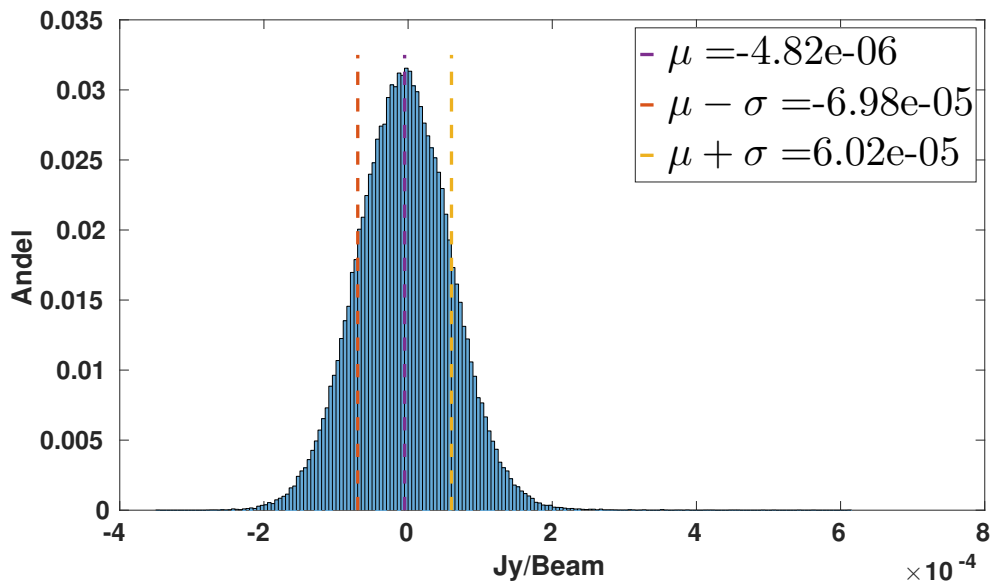
På motsvarande sätt har NVSS-observationen en tämligen låg upplösning, vilket gör att kartan ser ut att vara en aning ”utsmetad”, däremot är dess största vinkelstorlek betydligt större med värdet $\theta_{\text{LAS}} = 1040''$, vilket medför att all information erhålles. Denna karta lämpar sig bättre för mer djupgående analys av fluxtäthet och spektralindex.

Om fluxtätheten för FIRST-mätningarna räknas ut ändå, bekräftas det att det saknas information. Som visas i tabeller 5.2 och 5.5 skiljer sig mätningarna markant, i synnerhet i radiogalaxernas lober. För vidare beräkning av spektralindex och skapandet av synkrotronspektra var det därför av stor vikt att nyttja fluxtäthetsmätningarna gjorda med NVSS istället, för att erhålla de mest korrekta resultaten.

6.1.2 Brus

I mätningarna finns det som redan nämnts vissa felmarginaler att ta i beaktning när analys genomförs. En stor del av denna osäkerhet är ett resultat av brus. Att analysera bruset är en nödvändighet för att kunna bedöma tillförlitligheten hos mätdata.

Med ett skript som återfinnes i appendix C analyserades några av brusets egenskaper. Ett resultat som hade medfört förenklingar vid analysen är om det faller ut att bruset är normalfördelat kring 0. Det förenklar analysen på så vis att fluxberäkningarna kan antas ha ett brus som summeras till 0. Därmed behövs inte exakta polygoner runt radiokällorna utan enkla rektanglar eller cirklar är tillräckliga approximationer, och det resulterade värdet kommer teoretiskt sett inte att avvika betydande ifrån det faktiska värdet. För analysen valdes först ett litet mindre rektangulärt område som enligt en okulär inspektion ansågs bestå av övergripande brus. För att ta reda på hur bruset är fördelat är det fördelaktigt att göra ett histogram av informationen i det utvalda området och ett sådant återfinnes i figur 6.1



Figur 6.1: Histogram över det mindre brusområdet. På x-axeln presenteras det uppmätta värdet för varje datapunkt samt på y-axeln presenteras relativ sannolikhet att ett värde har ett motsvarande värde på x-axeln.

Ifall samma analys genomförs för både TGSS 150MHz samt NVSS 1400MHz faller även de resultaten ut som normalfördelat brus med ett medelvärde som är 0.

Vad datan över dessa brusiga områden representerar i Jy är även det av intresse. De tre datamängderna som histogrammen kommer ifrån summeras till -47 mJy för 150 MHz, -5 mJy för 610 MHz och 0.2 mJy för 1400 MHz. Dessa områdena var större än Double Irony förutom för 1400 MHz (NVSS) som var ungefär $\frac{1}{4}$ av Double Ironys storlek, sett till rymdvinkeln de upptar. Ifall dessa jämförs med värdena för Double Irony, som är 470 mJy vid 150 MHz, 241 mJy vid 610 MHz samt 131 mJy vid 1400 MHz (NVSS) faller samtliga inom 10%-felmarginalen som tillåts. Enligt vad som nämdes i avsnitt 5.2.2 genomfördes kompletterande mätningar för att jämföra denna effekt av bruset. Det faktum att bruset *inte* summeras till 0 förklaras med att det området som summeras är av en ganska liten storlek sett till mätningarnas omfattning. Ifall brusområdena görs större och större utan att krocka med en källa bör mJy-motsvarigheten gå mot 0.

Ett av resultaten som går att återfinna i tabell 5.2 är att det verkar som att ju större område som summeras för att räkna ut fluxtätheten runt Double Irony, desto *mindre* blir värdet för den totala fluxtätheten. Detta tros vara på grund av att bruset i den direkta omgivningen runt Double Irony i 610 MHz-kartan från GMRT verkar ha ett övergripande negativt värde.

Vid en okulär inspektion av figur 6.2 tycks det finnas en "struktur" i bruset. Det ser ut som att bruset nästan agerar som en skugga av Double Irony där bruset runt om detektionen har liknande form och riktning som Double Irony själv samt ett i allmänhet lägre värde. Detta är en typ av artefakt som återstår efter att data ifrån en radiointerferometer har behandlats och Fouriertransformerats för att producera en karta. Fenomenet med "negativt brus" existerar kring Double Irony i samtliga mätningar förutom FIRST.



Figur 6.2: En närbild av Double Irony vid 610 MHz där bruset tydligt syns. En struktur tycks kunna urskiljas i bruset; Double Irony verkar ligga i ett brusmässigt "hål" med negativt fluxvärde.

6.2 Radiogalaxernas verkliga storlek

För att bestämma den verkliga fysiska storleken hos radiogalaxerna är lutningen hos dessa en viktig aspekt att ta i beaktning. Är radiogalaxens jetstrålar riktade åt jordens håll kommer galaxens projicerade storlek vara mindre än den fysiska. Att bestämma denna lutning är svår och en fullvärdig bestämelse ligger utanför rapportens omfattning. Däremot ger en visuell inspektion av källorna en viss fingervisning om lutningen.

Under antagandet att de två jetstrålarna är lika stora ger en visuell inspektion av Sarcasm intrycket att denna är någotsånär ortogonal mot siktlinjen. Vad som däremot belyses i tabell 5.5 är att Sarcasms södra lob (A) besitter ett högre fluxtäthetsvärde, i samtliga frekvenser, än dess norra lob (B). Detta indikerar på att en viss lutning kan förekomma, eftersom objekt som är närmre jorden kan framstå som ljusstarkare än avlägsna.

En liknande visuell inspektion av Double Irony är däremot inte lika självklar på grund av dess

vridna form. Fluxtäthetsvärdena för de två loberna (A_1+A_2 och B_1+B_2) är emellertid snarlika vid majoriteten av frekvenserna, vilket antyder på att den fysiska storleken sammanfaller med den projicerade ganska väl.

Radiogalaxernas projicerade storlek på 850 kpc respektive 439 kpc för Double Irony och Sarcasm, kan ställas i jämförelse med Vintergatans relativt ringa storlek på endast 30 kpc. Eftersom den fysiska storleken på radiogalaxerna i verkligheten är större än detta blir denna skillnad ännu större.

6.3 Analys av spektralindex

I enlighet med det som nämndes i bakgrundsdelens är partiklarnas energiinnehåll i de jetstrålar som skickas ut fördelat enligt en potenslag. Ett väldigt brant index implicerar att det ej finns många högenergipartiklar kvar alternativt att inga fler högenergipartiklar injiceras i loberna och därmed har den aktiva galaxkärnan levat ut de tidigare stadierna i sin livscykel.

Ifall värdena för α för Double Irony inspekteras syns att index över hela området T över samtliga frekvenser approximeras till $\alpha = -0,49 \pm 0,07$. För området T_{AUBUC} är spektralindexet snarlikt med $\alpha = -0,54 \pm 0,06$. Som synes och som diskuteras i avsnitt 6.1.2 har bruset en märkbar effekt på fluxmätningarna men ingen betydande effekt på det slutgiltiga spektralindexet då en liknande effekt skådades i alla kartor bortsett från FIRST, som ej har medverkat vid framtagning av α på grund av dess otillräckliga θ_{LAS} .

Om istället α för de enskilda regionerna för Double Irony inspekteras syns inte direkt någon avstickare förutom området A_1 . Detta område har ett index över alla tre frekvenser på $\alpha = -0,69 \pm 0,07$. Index över de olika frekvensparen har stora variationer med extremfallen på $\alpha_{610\text{MHz}}^{1400\text{MHz}} = -0,61 \pm 0,39$ samt $\alpha_{150\text{MHz}}^{610\text{MHz}} = -0,06 \pm 0,23$.

Om istället resultaten i tabell 5.6 (med värden för Sarcasm) inspekteras syns α för områdena T , $T_{\text{AUBUC}} \setminus (S1US2)$ och T_{AUBUC} som snarlikt motsvarande värdena för Double Irony. För Sarcasm gjordes även några extramätningar för att inspektera ifall två punktkällor som detekterades i närheten påverkade spektralindexet med märkbar effekt. Som synes i tabell 5.6 finns det onekligen en skillnad men ej någon betydande. α för de olika områdena med eller utan en av dessa punktkällor uppvisar värden som inte skiljer sig från varandra nämnvärt. Slutsatsen som kan dras av detta är att punktkällorna har en effekt på detektionerna enligt tabell 5.5, dock påverkar dessa samtliga mätningar vilket resulterar i att det slutgiltiga spektralindexet inte är märkbart påverkat av denna "störning".

Tamhane hänvisar i sin artikel (Tamhane m. fl. 2015) till ett kriterium för att en radiogalax skall anses vara "döende" som säger att ifall $\alpha_{\text{high}} - \alpha_{\text{low}} \leq -1,0$ kan radiogalaxen antas vara döende. I vårt fall kan man anta $\alpha_{\text{high}} = \alpha_{610\text{MHz}}^{1400\text{MHz}}$ och $\alpha_{\text{low}} = \alpha_{150\text{MHz}}^{610\text{MHz}}$ och få ut att för Double Irony blir det

$$-0,62 \pm 0,39 - (-0,47 \pm 0,23) = -0,15 \pm 0,62 \quad (6.1)$$

och den är således inte en döende radiogalax ens i extremfallet då hela felmarginalen blir pålagd. För Sarcasm blir resultatet istället

$$-0,64 \pm 0,39 - (-0,56 \pm 0,23) = -0,08 \pm 0,62 \quad (6.2)$$

vilket innebär att inte den heller är en döende radiogalax.

Det faktum att det generellt över källorna finns värden för α som är till belopp lägre än typiska som brukar vara $-1,2 \leq \alpha \leq -0,7$ (dock något brantare värden ute i loberna) och det faktum att ekvation (6.1) och ekvation (6.2) inte är i närheten av gränsen för vad som kan kallas en döende radiogalax anses det rimligt att anta att galaxkärnorna inte är i slutskedet av dess livslängder utan är närmare början.

Ett intressant resultat är att fluxvärdena för NVSS över regionen T_{AUBUC} för både Double Irony och Sarcasm är lägre än motsvarande värden för regionen T . Detta har en liten om än märkbar

effekt på spektralindexet. Inga slutsatser förändras på grund av detta, men det är värt att nämna. Orsaken till effekten är att delområdena som fluxtätheten mäts över i T_{AUBUC} i NVSS-kartan ej innesluter hela källan, som till exempel synes i figur 5.3. I ”skarvarna” mellan delregionerna som det mäts över finns emission som inte räknas med på grund av detta.

6.4 Morfologi och polarisering

Det finns en ”standardmodell” för aktiva galaxkärnor som astronomer har som utgångspunkt när de analyserar dem. Denna standardmodell säger att det finns ett svart hål i mitten av den aktiva galaxen som omringas av en roterande ackretionsskiva. Denna skiva hettas upp som ett resultat av friktion. Vinkelrätt mot skivan skjuts det eventuellt ut relativistiskt snabba partiklar i två kollimerade jetstrålar. Till slut avtar hastigheten på dessa partiklar på grund av kollisioner och friktion mot det intergalaktiska mediet och de saktar ner och ansamlas i ”partikelmoln” – det är dessa som syns på Sarcasm och på Double Irony som hänvisas till som ”lober”.

En egenskap hos synkrotronstrålning är att den är polariserad. Med information om polarisationen hos radiojetstrålarna från en AGN kan eventuella slutsatser dras kring den aktuella galaxkärnans natur och varför radiogalaxen ser ut som den gör. En teori som Iván Martí-Vidal på Onsala Rymdobservatorium hade angående varför Double Irony ser ut som om den kröker sig/roterar (och därmed resulterar i krökta jetstrålar) var att jetstrålarna kolliderar med det intergalaktiska mediet och ansamlas i lobar tidigare än förväntat. Partiklarna skjuts åt sidan som ett resultat av detta, vilket resulterar i radiogalaxens udda form relativt *The AGN Unification Model*, som ovan nämnda standardmodell kallas. Detta skulle kunna bekräftas med polarisationsdata, då radiostrålningen i det fallet borde vara mer polariserad i kanterna av loberna där kollisionerna inträffar.

En snabb inspektion av polarisationsdata för Double Irony indikerar att radiokällan är mer polariserad vid sina lobar, vilket då bör innebära att den faktiskt har kolliderat med intergalaktiskt medium och Martí-Vidals hypotes styrks. Då polarisationsundersökning dock låg utanför omfattningen av denna rapport kommer dessa resultat inte att presenteras här och ämnet kommer inte beröras mer.

6.5 Röntgenmätningar

Som bland annat nämnts i avsnitt 3.3.1, 5.2 och 5.3 har det genomförts röntgenobservationer av XXL-North med XMM-Newton. De återfinnes i figurerna 5.2 och 5.5 som blå konturlinjer superponerade över en optisk bakgrundsbild. Som visat finns det för båda de aktiva galaxkärnorna röntgendetektioner som ligger på eller i närområdet till de sannolika värdgalaxerna. Röntgenbilderna som har använts är av relativt låg kvalitet; exempelvis ser det ut som att röntgenbilden för området vid Double Irony är i mitten av två s.k. *pointings* för XMM-Newtons observation, och den är således av lägre kvalitet än önskat.

En intressant notering från dessa röntgendata är att det ovanför och under Sarcasms norra lob finns två röntgendetektioner rakt ovanpå optiska detektioner. Dessa optiska detektioner är båda två galaxer och då kan rimligtvis en slutsats dras att de är värdgalaxer för respektive röntgenkälla. Ingen av dessa visar dock aktivitet i någon av radiokartorna.

Kapitel 7

Slutsats

Syftet med detta arbete var att upptäcka och undersöka radiogalaxer i området XXL-North, baserat på en kartläggning vid 610 MHz och kompletterat med motsvarande kartläggningar vid flera andra frekvenser i radiobandet och det övriga elektromagnetiska spektret. Sju radiogalaxer valdes ut som extra intressanta. En analys av två av dessa – Double Irony Radio Galaxy och Sarcasm Radio Galaxy – fokuserades på att mäta radiogalaxernas spektrala fluktäthet, upprätta synkrotronspektra, beräkna spektralindex och spektral luminositet, och att koppla resultaten till deras morfologi. Vi undersökte om radiogalaxerna kunde associeras med i XXL-North detekterade galaxhopar, och identifierade värdgalaxerna, deras rödförskjutningar och avstånd. På så vis kunde radiogalaxernas storlekar beräknas. Utifrån denna analys erhöll vi följande resultat:

För Double Irony beräknades fluktätheten $S_{610} = 241$ mJy, spektralindexet $\alpha = -0,54$ och luminositeten $L_{610} = 1,27 \cdot 10^{25}$ W Hz $^{-1}$, och för Sarcasm, fluktätheten $S_{610} = 124$ mJy, spektralindexet $\alpha = -0,55$ och luminositeten $L_{610} = 6,30 \cdot 10^{24}$ W Hz $^{-1}$. Båda galaxerna antas höra till morfologisk klass FR II. Detta baseras primärt på deras respektive strukturer, som båda verkar bestå av en central aktiv galaxkärna som sänder ut jetstrålar vilka utmynnar i gigantiska lobar med *hotspots*, vilket är den definierande strukturen för klassen i fråga. Även om de beräknade luminositetsvärdena inte är uppenbara FR II-värden, så ligger de inte under vad som kan anses rimligt för radiogalaxer av denna klass ($\sim 10^{25}$ W Hz $^{-1}$). Spektralindex för de två radiogalaxerna är som synes näst intill identiska och baserat på dessa värden framstår de båda varandes fortfarande aktiva galaxer.

De båda värdgalaxerna har mycket lika rödförskjutningar, $z = 0,136 \pm 0,007$ för Double Irony, respektive $z = 0,13818 \pm 0,00002$ för Sarcasm, och med radiostruktureernas vinkelstorlekar $353''$ respektive $180''$ beräknas radiogalaxernas projicerade storlekar till 850 kpc respektive 439 kpc.

Litteratur

- ¹V. Beckmann och C. R. Schrader, *Active Galactic Nuclei* (Wiley-VCH Verlag, 2012).
- ²A. R. Choudhuri, *Astrophysics for Physicists* (Cambridge University Press, 2010).
- ³J. J. Condon m. fl., “The NRAO VLA Sky Survey”, *The Astronomical Journal* **115**, 1693–1716 (1998).
- ⁴J. J. Condon och S. M. Ransom, *Essential Radio Astronomy*, <https://science.nrao.edu/opportunities/courses/era> (hämtad 2017-01-29).
- ⁵A. Crossley m. fl., *Introduction to Radio Interferometry*, <http://www.astro.ufl.edu/starformation/talks/2015/Interferometry.pdf> (hämtad 2017-04-28).
- ⁶ESA, *XMM-Newton*, <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton> (hämtad 2017-05-05).
- ⁷ESA, *XMM-Newton Fact Sheet*, <http://sci.esa.int/xmm-newton/47370-fact-sheet/> (hämtad 2017-05-05).
- ⁸ESA, *XMM-Newton Image Gallery*, <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/image-gallery> (hämtad 2017-05-05).
- ⁹B. L. Fanaroff och J. M. Riley, “The Morphology of Extragalactic Radio Sources of High and Low Luminosity”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **167**, 31P–35P (1974).
- ¹⁰J. J. Harwood m. fl., “FR II Radio Galaxies at Low Frequencies I: Morphology, Magnetic Field Strength and Energetics”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **458**, 4443–4455 (2016).
- ¹¹H. T. Intema m. fl., “The GMRT 150 MHz All-Sky Radio Survey – First Alternative Data Release TGSS ADR1”, *Astronomy & Astrophysics* **598**, A78 (2017).
- ¹²D. V. Lal, *GMRT Observer’s Manual*, (18 nov. 2013) http://gmrt.ncra.tifr.res.in/gmrt_hpage/Users/doc/manual/Manual_2013/manual_20Sep2013.pdf (hämtad 2017-05-12).
- ¹³S. Lavoie m. fl., “The XXL Survey XV: Evidence for Dry Merger Driven BCG Growth in XXL-100-GC X-ray Clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **462**, 4141 (2016).
- ¹⁴J. M. Marr, R. L. Snell och S. E. Kurtz, *Fundamentals of Radio Astronomy: Observational Methods* (CRC Press, 2015).
- ¹⁵D. Murphy, *Largest Angular Scale and Maximum Recoverable Scale*, <https://science.nrao.edu/science/videos/largest-angular-scale-and-maximum-recoverable-scale> (hämtad 2017-04-28).
- ¹⁶National Centre for Radio Astrophysics (NCRA-TIFR), <http://www.ncra.tifr.res.in/ncra> (hämtad 2017-04-05).
- ¹⁷F. N. Owen och M. J. Ledlow, “The FR I/II Break and the Bivariate Luminosity Function in Abell Clusters of Galaxies”, i *The Physics of Active Galaxies*, vol. 54, utg. av G. V. Bicknell, M. A. Dopita och P. J. Quinn, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* (1994), s. 319.

- ¹⁸F. Pacaud m. fl., “The XXL Survey – II. The Bright Cluster Sample: Catalogue and Luminosity Function”, *Astronomy & Astrophysics* **592**, A2 (2016).
- ¹⁹M. Pierre m. fl., “The XXL Survey – I. Scientific Motivations – XMM-Newton Observing Plan – Follow-Up Observations and Simulation Programme”, *Astronomy & Astrophysics* **592**, A1 (2016).
- ²⁰R. Pogge, *Lecture 34: The Expanding Universe*, <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit5/expand.html> (hämtad 2017-05-12).
- ²¹Sloan Digital Sky Survey, <http://www.sdss.org/> (hämtad 2017-04-28).
- ²²Sloan Digital Sky Survey, *Scope*, <http://www.sdss.org/dr13/scope/> (hämtad 2017-04-28).
- ²³V. Smolčić m. fl., “XXL-North GMRT 610 MHz Survey”, (in prep.).
- ²⁴L. S. Sparke och J. S. Gallagher III, *Galaxies in the Universe: An Introduction* (Cambridge University Press, 2007).
- ²⁵P. Tamhane m. fl., “J021659-044920: A Relic Giant Radio Galaxy at $z \sim 1.3$ ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **453**, 2438–2446 (2015).
- ²⁶M. Trenti, O. Usher och R. Villard, *Hubble Pinpoints Furthest Protocluster of Galaxies Ever Seen*, <http://www.spacetelescope.org/news/heic1201/> (hämtad 2017-05-10).
- ²⁷R. L. White, *The VLA FIRST Survey*, (2012) <http://sundog.stsci.edu/first/description.html> (hämtad 2017-05-03).
- ²⁸D. R. Williams, *Sun Fact Sheet – Sun/Earth Comparison*, *National Aeronautics and Space Administration*, <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html> (hämtad 2017-11-05).
- ²⁹S. W. Witz, *VLA Observational Status Summary 2017B – Resolution*, <https://science.nrao.edu/facilities/vla/docs/manuals/oss/performance/resolution> (hämtad 2017-04-19).
- ³⁰E. L. Wright, “A Cosmology Calculator for the World Wide Web”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **118**, 1711–1715 (2006).

Bilaga A

Kompletterande teori

A.1 Rödförskjutning

Ett ofta förekommande begrepp inom astronomin är rödförskjutning. I fysiken är rödförskjutning fenomenet när ljus eller annan strålning får en längre våglängd, vilket innebär att synligt ljus går mot en rödare färg. Rödförskjutning är ett exempel på dopplereffekten, som vanligen illustreras med en ambulans och den förändring i tonhöjd som sker då ambulansen passerar förbi en observatör.

Som en följd av universums ständiga expansion har galaxer långt bort från jorden en större hastighet och därmed en större rödförskjutning. Vid mätningen av ett våglängdsspektrum hos en stjärna ser man att det vid vissa frekvenser inte skett någon detektion. Dessa distinkta linjer uppkommer som följd av att vissa ämnen i stjärnan absorberar fotoner vid dessa frekvenser. Uppmätts därför spektret från en stjärna eller galax som är mycket avlägsen och har en rödförskjutning, visas att dessa linjer är förskjutna. Men denna information kan rödförskjutningen z ges genom nedanstående formel,

$$z = \frac{\lambda_{\text{obsv}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}} ,$$

där λ_{obsv} är våglängden vi detekterar och λ_{emit} den faktiska våglängden som emitteras från källan.

Eftersom alla partiklars hastighet är begränsad av ljusets hastighet innebär detta att de fotoner, som kommer från objekt med högt z , sändes ut för en mycket lång tid sedan.

För relativt närliggande galaxer är rödförskjutningen direkt proportionell mot galaxens hastighet, vilket innebär att Hubbles lag kan omskrivas på följande sätt

$$D = \frac{v}{H_0} \approx \frac{cz}{H_0} , \tag{A.1}$$

där H_0 är Hubbles konstant, v galaxens fjärmande hastighet och c ljusets hastighet. För mycket större avstånd blir denna omskrivning däremot inte lika trivial. (Pogge 2017)

Hubbles lag (ekvation (A.1)) används flitigt inom astronomi och det krävs att hänsyn tas till andra kosmologiska parametrar, exempelvis vid bestämningen av avståndet, D . I denna rapport har *Ned Wright's Cosmology Calculator* (Wright 2006) använts för att enkelt utföra dessa beräkningar.

A.2 Relativistisk *beaming*

Ett fundamentalt begrepp för att förstå och tolka synkrotronstrålningen i en astrofysikalisk kontext är fenomenet relativistisk *beaming*: Vi föreställer oss (efter ett exempel i (Choudhuri 2010)) att en accelererad partikel i en avlägsen radiogalax har ett vilosystem S och vi som betraktare har vilosystem S' . De två systemen är i standardkonfiguration med varandra, d.v.s. systemens axlar är parallella och S rör sig i x' -led med en konstant hastighet v' relativt vårt system. I detta fall så

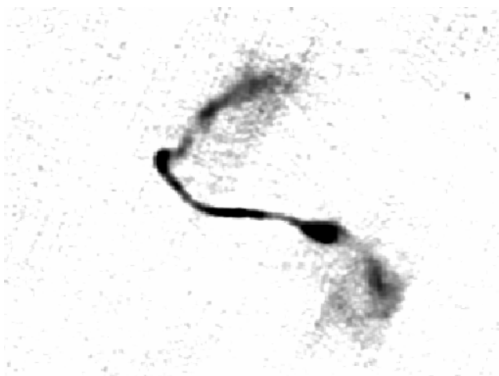
kommer en av partikeln emitterad foton med vinkel θ relativt x -axeln i dess eget system uppfattas som emitterad med vinkel θ' relativt vår x' -axel. Dessa två vinklar hänger ihop enligt

$$\tan \theta' = \frac{u'_y}{u'_x} = \frac{u_y}{\gamma(u_x + v')} = \frac{c \sin \theta}{\gamma(c \cos \theta + v')} = \frac{\sin \theta}{\gamma(\cos \theta + \frac{v'}{c})} \quad (\text{A.2})$$

där $u = u' = c$ är den emitterade fotonens hastighet, d.v.s. ljushastigheten som ju är den samma i alla referenssystem. Detta medför att om en foton avges t.ex. vinkelrätt $\theta = \frac{\pi}{2}$ mot x -axeln så kommer vi se det som att den avges med vinkel $\theta' = \tan^{-1} \frac{1}{\gamma v'/c}$. Om vi då har en Lorentz-faktor γ som har ett värde $\gg 1$, och således en kvot v'/c som närmar sig 1, så kommer vi alltså ta $\tan^{-1}$ av ett litet tal, vilket går mot noll ju mindre tal vi betraktar. Kontentan blir att vår vinkel θ' kommer bli liten; vi uppfattar det i vårt system S' som att fotonen emitteras nästan parallellt med x' -axeln, när den i själva verket emitterades vinkelrätt mot densamma i S . Det är denna effekt som kallas relativistisk *beaming*. En följd blir att om en radiogalax vars jetstrålar och lober ligger i ett plan med en påtagligt icke-rät vinkel till vår siktlinje, så kommer den stråle som är riktad bort från oss att bli mer eller mindre osynlig från vår position. Detta då den relativistiska beamingen gör att de utsända fotonerna kollimeras i riktningen bort från oss. På så vis kan man dra slutsatser om en radiogalax orientering utifrån dess skenbara form på himlen, och effekten har följaktligen en viktig roll i den sammanfattade morfologiska analysen av radiogalaxer.

Bilaga B

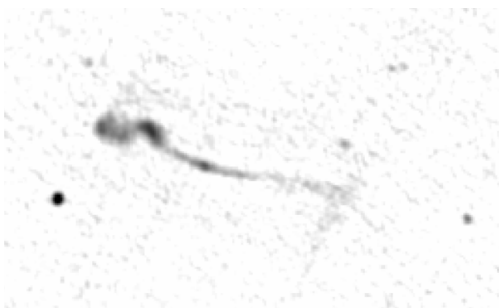
Resultatet från den initiala visuella inspektionen



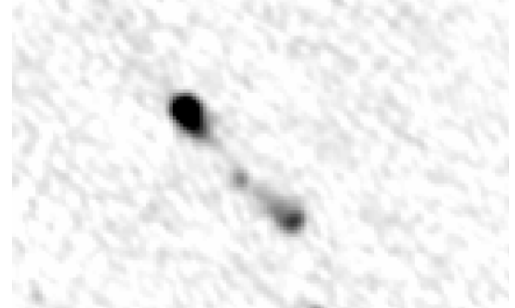
Figur B.1: Double Irony Radio Galaxy vid 610 MHz; en av de källor som rapporten behandlar.



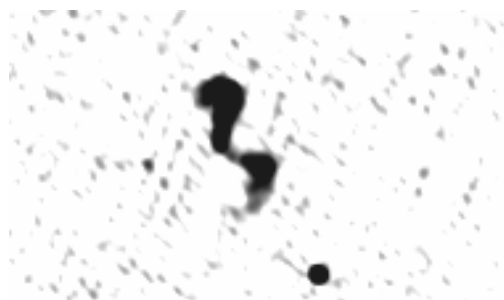
Figur B.2: Sarcasm Radio Galaxy vid 610 MHz; en av de källor som rapporten behandlar.



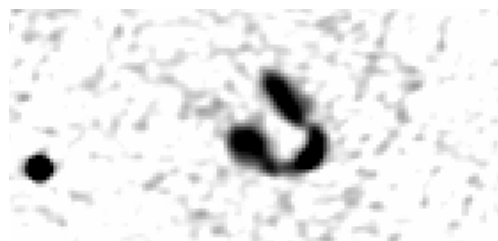
Figur B.3: Källa 3 vid 610 MHz.



Figur B.4: Källa 4 vid 610 MHz.



Figur B.5: Källa 5 vid 610 MHz.



Figur B.6: Källa 6 vid 610 MHz.



Figur B.7: Källa 7 vid 610 MHz.

Bilaga C

Koder för beräkningar och visuella illustrationer

C.1 Fluxtätet och spektralindex

```
1  clc; clear all; close all;
2
3  % — calculates the fluxvalues for a given set of Jy/beam-values from
   ds9
4
5  source1400='nvss';
6
7
8  switch source1400
9      case 'nvss'
10         jy_beam=[5.23  2.44964  6.83145];
11         omegabeam=1.13*[25^2  6^2  45^2];
12         pixsize=[6.2^2  1.5^2  5^2];
13      case 'first'
14         jy_beam=[5.35374  2.44468  0.265986];
15         omegabeam=1.13*[20^2  6^2  5^2];
16         pixsize=[6.2^2  1.5^2  1.8^2];
17  end
18  pix_per_beam=omegabeam./pixsize;
19  S=jy_beam./pix_per_beam*1000;
20
21  % loglog([150 610 1400], S,'o');
22  % hold on
23  % errorbar([150 610 1400], S, S.*0.1, 'o');
24
25  %%
26
27  % calculates the spectral indexes for the different modes with either
   montecarlo or the case for only two frequencies.
28  data_all=monte_carlo(S,'1506101400', 100);
29  data_150610=simple_fit([S(1) S(2)], [150 610]);
```

```
30 data_1501400=simple_fit([S(1) S(3)],[150 1400]);
31 data_6101400=simple_fit([S(2) S(3)],[610 1400]);
32
33 %%
34 close all;
35
36 % draws the flux-values to begin with.
37 loglog([150 610 1400], S, 'o');
38
39 hold on
40
41 % function for the index
42 f=@(xdata,mu,alpha)(10.^mu.*xdata.^alpha);
43 x=linspace(120,2000,100000);
44
45 %values for the constants mu and alpha
46 mu_all=mean(data_all(101:200));
47 0
48 alpha_all=mean(data_all(1:100));
49 alpha_150610=data_150610(1);
50 alpha_1501400=data_1501400(1);
51 alpha_6101400=data_6101400(1);
52
53 % oncertainty for the case of montecarlo
54 sigma_all=std(data_all(1:100));
55
56
57 % draws the entire index
58 p1=plot(x,f(x,mu_all,alpha_all),'b','LineWidth',1.5);
59 errorbar([150 610 1400], S, S.*0.1, 'o','LineWidth',1.5);
60 %axis is changed accordingly for each time the script is run.
61 axis([10^2 2.5*10^3 0.35*10^2 3*10^2]);
62 % sets the legend settings
63 h = legend(p1,['$\alpha = $' num2str(round(alpha_all*100)/100) '$ \pm $'
    ' num2str(round(sigma_all*100)/100)]);
64 set(h,'Interpreter','latex','FontSize',40,'FontWeight','bold');
65
66 %axis-settings
67 set(gca,'FontWeight','bold','FontSize',30);
68 xlabel('\nu [MHz]'); ylabel('S_{\nu} [mJy]');
```

C.2 Spektralindex mellan två frekvenser

```

1 function [ index ] = TwoFrequencies( datapoints , constellation )
2 %   First entry intop index[] is the spectral index which is calculated
   via
3 %   simply algebra. The second entry is the error which is calculated
   using
4 %   errorpropagation. First parameter to send is the datapoints and the
5 %   second parameter to send is the constellation of the
6 %   datapoints(frequencies (in ascending order))
7 index(1)= log10(datapoints(2)/datapoints(1))/(log10(constellation(2)/
   constellation(1)));
8 index(2)=(1/(log10(constellation(2)/constellation(1))))*sqrt(((
   datapoints(1)*0.1)/datapoints(1))^2+((datapoints(2)*0.1)/datapoints
   (2))^2);
9 end

```

C.3 Ursprungligt skript för att räkna ut flux

```

1 function [S_m, sigma] = calc(map, FWHM, pxl, nu)
2
3 total_intensity = sum(sum(map));
4 omega_beam = 1.13*FWHM^2;
5 pixel_size = pxl^2;
6 pixel_per_beam = omega_beam/pixel_size;
7
8 % Flux
9 S = total_intensity/pixel_per_beam;
10 S_m = S*1e3;
11
12 fprintf('S_%d = %3f mJy \n', nu, S_m)

```

C.4 Skript som isolerar en godtycklig del av radiokartan som vi är intresserade av

```

1 function map = insidePolygon(map, polyCoords)
2
3 % — this Script takes a matrix and coordinates for polygoncorners and
   then
4 % — returns another matrix where only the matrixpoints inside the
   matrix is left.
5
6 [ r , c]=size(map);
7 for i = 1:r
8     for j = 1:c
9         in = inpolygon(j , i , polyCoords(:,1) , polyCoords(:,2));

```

```
10         if in == 0
11             map(i,j)=0;
12         end
13     end
14 end
```

C.5 Skript för *Monte Carlo*-beräkning

```
1 function [ Spectral_index ] = spectral_index(fluxdata , configuration ,
    nri)
2 % Montecarlo fit
3 % Takes the fluxvalues , the configuration ( script works for 2 as
    well as 3-frequency values) and also the
4 % number of iterations to do. Returns a vector with the values.
5 if strcmp(configuration , '1506101400')
6     nfreq=3;
7     iterations=nri;
8     errordata=zeros(3,1);
9     A=zeros(length(iterations));
10    alpha=zeros(length(iterations));
11    for i = 1:iterations
12        temp = fluxdata;
13        for j=1:nfreq;
14            errordata(j)=0.10*fluxdata(j);
15            temp(j)=fluxdata(j)+errordata(j)*randn(1,1);
16        end
17        tmp=lsqcurve(temp, configuration);
18        A(i)=tmp(2);
19        alpha(i)=tmp(1);
20    end
21    Spectral_index(1:iterations)=alpha;
22    Spectral_index(iterations+1:2*iterations)=A;
23    Spectral_index(2*iterations+1:2*iterations+3)=fluxdata;
24 elseif strcmp(configuration , '150610')
25     nfreq=2;
26     iterations=nri;
27     errordata=zeros(2,1);
28     A=zeros(length(iterations));
29     alpha=zeros(length(iterations));
30     for i = 1:iterations
31         temp = fluxdata;
32         for j=1:nfreq;
33             errordata(j)=0.10*fluxdata(j);
34             temp(j)=fluxdata(j)+errordata(j)*randn(1,1);
35         end
36         tmp=lsqcurve(temp, configuration);
37         A(i)=tmp(2);
38         alpha(i)=tmp(1);
```

```

39     end
40     Spectral_index(1:iterations)=alpha;
41     Spectral_index(iterations+1:2*iterations)=A;
42     Spectral_index(2*iterations+1:2*iterations+2)=fluxdata;
43 elseif strcmp(configuration, '1501400')
44     nfreq=2;
45     iterations=nri;
46     errordata=zeros(2,1);
47     A=zeros(length(iterations));
48     alpha=zeros(length(iterations));
49     for i = 1:iterations
50         temp = fluxdata;
51         for j=1:nfreq;
52             errordata(j)=0.10*fluxdata(j);
53             temp(j)=fluxdata(j)+errordata(j)*randn(1,1);
54         end
55         tmp=lsqcurve(temp, configuration);
56         A(i)=tmp(2);
57         alpha(i)=tmp(1);
58     end
59     Spectral_index(1:iterations)=alpha;
60     Spectral_index(iterations+1:2*iterations)=A;
61     Spectral_index(2*iterations+1:2*iterations+2)=fluxdata;
62 else
63     nfreq=2;
64     iterations=nri;
65     errordata=zeros(2,1);
66     A=zeros(length(iterations));
67     alpha=zeros(length(iterations));
68     for i = 1:iterations
69         temp = fluxdata;
70         for j=1:nfreq;
71             errordata(j)=0.10*fluxdata(j);
72             temp(j)=fluxdata(j)+errordata(j)*randn(1,1);
73         end
74         tmp=lsqcurve(temp, configuration);
75         A(i)=tmp(2);
76         alpha(i)=tmp(1);
77     end
78     Spectral_index(1:iterations)=alpha;
79     Spectral_index(iterations+1:2*iterations)=A;
80     Spectral_index(2*iterations+1:2*iterations+2)=fluxdata;
81 end
82 end

```

C.6 Skript för att själv välja en godtycklig polygon över Double Irony eller Sarcasm-bilder

```
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 %
3 %
4 % Note:      It is required that the .fits files covers the same region.
5 %      For
6 %      example: a 200x200 pixel file from 610MHz becomes a 48.39
7 %      x48.39
8 %      pixel file for 150MHz. (200*(1.5/6.2)=48.39}
9 %
10 %      The script loads in the 610mhz-map, lets the user select
11 %      values for corners of the polygon. Draws them up and marks
12 %      the
13 %      areas that are left for analysis. Then calculates the index
14 %      and plots everything in a nice way.
15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16 sourceone=1;
17
18 if sourceone ~= 1
19     clc; clear all; close all;
20
21     % Define the objects
22     object = 'Source Two, north lobe';
23
24
25
26     source1400='nvss';
27     switch source1400
28         case 'nvss'
29             datainfo3 = [45,5,1400];
30             filename3 = 'sourceTwo1400nvss.fits';
31         case 'first'
32             datainfo3 = [5,1.8,1400];
33             filename3 = 'sourceTwo1400.fits';
34     end
35
36
37     filename1 = 'sourceTwo150.fits';
38     filename2 = 'sourceTwo610.fits';
39
40
41     %wname1 = [dir , filename1];
42     %wname2 = [dir , filename2];
```

```

43 %wname3 = [dir , filename3];
44
45 smallmap1 = fitsread(filename1);
46 smallmap2 = fitsread(filename2);
47 smallmap3 = fitsread(filename3);
48
49 datainfo1 = [20,6.2,150];      % [FWHM,pxl,freq]
50 datainfo2 = [6,1.5,610];
51
52
53 % -----
54 figure(1)
55 pcolor(smallmap2); colorbar; shading flat; % Choose map of freq to
    draw on
56 colormap(gray)
57 cmin = -0.0002;
58 cmax = 0.0004;
59 caxis([cmin cmax ])
60 axis equal; axis tight
61
62 clc; disp('Outline area of source.')
63 [x,y] = ginput(2);
64
65 A2 = [x,y];
66 A1 = A2.*(72.58/300);
67
68 switch source1400
69     case 'first'
70         A3 = A2.*(250/300);
71     case 'nvss'
72         A3=A2.*(90/300);
73 end
74
75
76 % Gives region outside polygon value 0
77 smallmap1 = insidePolygon(smallmap1,A1);
78 smallmap2 = insidePolygon(smallmap2,A2);
79 smallmap3 = insidePolygon(smallmap3,A3);
80
81 A1=ceil(A1);
82 A2=ceil(A2);
83 A3=ceil(A3);
84
85 % Shows the outlined region in all freq
86 A1X=[A1(1) A1(2) A1(2) A1(1) A1(1)];
87 A1Y=[A1(3) A1(3) A1(4) A1(4) A1(3)];
88 figure
89 pcolor(smallmap1); colorbar; shading flat;
90 colormap(gray)

```

```
91     cmin = -0.02;
92     cmax = 0.13;
93     caxis([cmin cmax ])
94     hold on;
95     plot(A1X,A1Y, 'r', 'LineWidth', 2);
96     axis equal; axis tight
97     set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 24)
98
99     A2X=[A2(1) A2(2) A2(2) A2(1) A2(1)];
100    A2Y=[A2(3) A2(3) A2(4) A2(4) A2(3)];
101    figure
102    pcolor(smallmap2); colorbar; shading flat;
103    colormap(gray)
104    cmin = -0.0002;
105    cmax = 0.0004;
106    caxis([cmin cmax ])
107    hold on;
108    plot(A2X,A2Y, 'r', 'LineWidth', 2);
109    axis equal; axis tight
110    set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 24)
111
112    A3X=[A3(1) A3(2) A3(2) A3(1) A3(1)];
113    A3Y=[A3(3) A3(3) A3(4) A3(4) A3(3)];
114    figure
115    pcolor(smallmap3); colorbar; shading flat;
116    colormap(gray)
117    % cmin = -0.0002;
118    % cmax = 0.0004;
119    % caxis([cmin cmax ])
120    hold on;
121    plot(A3X,A3Y, 'r', 'LineWidth', 2);
122    axis equal; axis tight
123    set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 24)
124
125    clc;
126    % Calculates flux and sigma
127    [S1, sig1] = calc(smallmap1, datainfo1(1), datainfo1(2), datainfo1(3));
128    [S2, sig2] = calc(smallmap2, datainfo2(1), datainfo2(2), datainfo2(3));
129    [S3, sig3] = calc(smallmap3, datainfo3(1), datainfo3(2), datainfo3(3));
130
131    S = [S1, S2, S3];
132    nu = [0.150, 0.610, 1.400];
133    sigma = [sig1, sig2, sig3];
134
135
136    data=monte_carlo(S, '1506101400', 100);
137    data_150_610=monte_carlo(S(1:2), '150610', 100);
138    data_150_1400=monte_carlo([S(1) S(3)], '1501400', 100);
139    data_610_1400=monte_carlo(S(2:3), '6101400', 100);
```

```

140
141 mu1506101400=mean(data(1:100));
142 sigma=std(data(1:100));
143 figure
144 loglog([150 610 1400], data(201:203), 'o', 'LineWidth', 0.1);
145 hold on;
146 errorbar([150 610 1400], data(201:203), data(201:203)*0.1, 'o', '
    LineWidth', 3);
147
148 muA1506101400=mean(data(101:200));
149
150 f=@(v,m,muA)(10.^muA.*v.^(m));
151 x1506101400=linspace(140,1600,1000);
152 x150610=linspace(140,1600,1000);
153 x6101400=linspace(140,1600,1000);
154
155 p1=plot(x1506101400, f(x1506101400, mu1506101400, muA1506101400), '
    LineWidth', 2.5);
156
157 % clc;
158 % disp(['Spectral index : ', num2str(mu)]);
159 % disp(['Error : ', num2str(sigma)]);
160 % disp(['Flux : ', num2str(data(201:203))]);
161 % disp('');
162
163 mu150610=mean(data_150_610(1:100));
164 mu1501400=mean(data_150_1400(1:100));
165 mu6101400=mean(data_610_1400(1:100));
166
167 muA150610=mean(data_150_610(101:200));
168 muA1501400=mean(data_150_1400(101:200));
169 muA6101400=mean(data_610_1400(101:200));
170
171 %disp(['For the values between 150hz, 610hz and 1400hz the spectral
    index is ', num2str(mu1506101400), ' and its uncertainty is ',
    sigma]);
172 %disp(['For the values between 150hz and 610hz the spectral index
    is ', num2str(mean(data_150_610(1:100))), ' and its uncertainty
    is ', num2str(std(data_150_610(101:200)))]);
173 %disp(['For the values between 150hz and 1400hz the spectral index
    is ', num2str(mean(data_150_1400(1:100))), ' and its
    uncertainty is ', num2str(std(data_150_1400(101:200)))]);
174 %disp(['For the values between 610hz and 1400hz the spectral index
    is ', num2str(mean(data_610_1400(1:100))), ' and its
    uncertainty is ', num2str(std(data_610_1400(101:200)))]);
175
176
177 hold on;
178 p2=plot(x150610, f(x150610, mu150610, muA150610), 'LineWidth', 2.5);

```

```

179 p3=plot(x1506101400,f(x1506101400,mu6101400,muA6101400),'LineWidth',
180 ,2.5);
181 p4=plot(x6101400,f(x6101400,mu1501400,muA1501400),'LineWidth',2.5);
182 loglog([150 610 1400], data(201:203),'o','LineWidth',2);
183
184 set(gca,'FontWeight','bold','FontSize',24)
185 %h=legend([p1 p2 p4 p3],[ 'Spektralindex = ', num2str(mu1506101400)
    ],[ 'Spektralindexet mellan 150Hz och 610Hz = ', num2str(
    mu150610) ] ,[ 'Spektralindexet mellan 150Hz och 1400Hz = ',
    num2str(mu1501400)],[ 'Spektralindexet mellan 610Hz och 1400Hz =
    ', num2str(mu6101400) ]);
186 h = legend([p1 p2 p4 p3],[ '$\alpha = $', num2str(mu1506101400) ],[ '$
    \alpha^{\{610Mhz\}_{150Mhz}}$ = ', num2str(mu150610) ] ,[ '$\alpha
    ^{\{1400Mhz\}_{150Mhz}}$ = ', num2str(mu1501400) ],[ '$\alpha^{\{1400
    Mhz\}_{610Mhz}}$ = ', num2str(mu6101400) ]);
187 set(h,'Interpreter','latex','FontSize',40,'FontWeight','bold');
188 %set(h,'FontSize',14);
189 %axis([100 2000 40 1000]);
190 title('Uppm\''att flux samt spektralindex');
191 xlabel('Frekvens [Hz]');
192 ylabel('Uppm\''att flux [mJy]');
193 else
194     clc; clear all; close all;
195
196     % This case is for when Double Irony is analysed.
197
198     % Define the objects
199     object = 'Source One, north lobe';
200     %dir = 'path';
201
202
203
204     source1400='nvss';
205     switch source1400
206     case 'nvss'
207         datainfo3 = [45,5,1400];
208         filename3 = 'sourceOnenvss1400.fits';
209     case 'first'
210         datainfo3 = [5,1.8,1400];
211         filename3 = 'sourceOne1400.fits';
212     end
213
214
215     filename1 = 'sourceOne150.fits';
216     filename2 = 'sourceOne610.fits';
217
218
219     %wname1 = [dir, filename1];

```

```

220 %wname2 = [dir , filename2];
221 %wname3 = [dir , filename3];
222
223 smallmap1 = fitsread(filename1);
224 smallmap2 = fitsread(filename2);
225 smallmap3 = fitsread(filename3);
226
227 datainfo1 = [20,6.2,150];      % [FWHM,pxl,freq]
228 datainfo2 = [6,1.5,610];
229
230
231 %
232
233 figure(1)
234 pcolor(smallmap2); colorbar; shading flat; % Choose map of freq to
235     draw on
236 colormap(gray)
237 cmin = -0.0002;
238 cmax = 0.0004;
239 caxis([cmin cmax ])
240 axis equal; axis tight
241
242 clc; disp('Outline area of source.')
243 [x,y] = ginput(2);
244
245 A2 = [x,y];
246 A1 = A2.*(48.39/200);
247
248 switch source1400
249     case 'first'
250         A3 = A2.*(166.67/200);
251     case 'nvss'
252         A3=A2*(60/200);
253 end
254
255 % Gives region outside polygon value 0
256 smallmap1 = insidePolygon(smallmap1,A1);
257 smallmap2 = insidePolygon(smallmap2,A2);
258 smallmap3 = insidePolygon(smallmap3,A3);
259
260 A1=ceil(A1);
261 A2=ceil(A2);
262 A3=ceil(A3);
263
264 % Shows the outlined region in all freq
265 A1X=[A1(1) A1(2) A1(2) A1(1) A1(1)];
266 A1Y=[A1(3) A1(3) A1(4) A1(4) A1(3)];

```

```
266 figure
267 pcolor(smallmap1); colorbar; shading flat;
268 colormap(gray)
269 cmin = -0.02;
270 cmax = 0.13;
271 caxis([cmin cmax ])
272 hold on;
273 plot(A1X,A1Y, 'r', 'LineWidth', 2);
274 axis equal; axis tight
275 set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 24)
276
277 A2X=[A2(1) A2(2) A2(2) A2(1) A2(1)];
278 A2Y=[A2(3) A2(3) A2(4) A2(4) A2(3)];
279 figure
280 pcolor(smallmap2); colorbar; shading flat;
281 colormap(gray)
282 cmin = -0.0002;
283 cmax = 0.0004;
284 caxis([cmin cmax ])
285 hold on;
286 plot(A2X,A2Y, 'r', 'LineWidth', 2);
287 axis equal; axis tight
288 set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 24)
289
290 A3X=[A3(1) A3(2) A3(2) A3(1) A3(1)];
291 A3Y=[A3(3) A3(3) A3(4) A3(4) A3(3)];
292 figure
293 pcolor(smallmap3); colorbar; shading flat;
294 colormap(gray)
295 % cmin = -0.0002;
296 % cmax = 0.0004;
297 % caxis([cmin cmax ])
298 hold on;
299 plot(A3X,A3Y, 'r', 'LineWidth', 2);
300 axis equal; axis tight
301 set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 24)
302
303 clc;
304 % Calculates flux and sigma
305 [S1, sig1] = calc(smallmap1, datainfo1(1), datainfo1(2), datainfo1(3));
306 [S2, sig2] = calc(smallmap2, datainfo2(1), datainfo2(2), datainfo2(3));
307 [S3, sig3] = calc(smallmap3, datainfo3(1), datainfo3(2), datainfo3(3));
308
309 S = [S1, S2, S3];
310 nu = [0.150, 0.610, 1.400];
311 sigma = [sig1, sig2, sig3];
312
313 % Makes synchrotron spectrum
314 %figure(2)
```

```

315 %makeGraph(S,nu,sigma,object)
316
317 data=monte_carlo(S, '1506101400', 100);
318 data_150_610=monte_carlo(S(1:2), '150610', 100);
319 data_150_1400=monte_carlo([S(1) S(3)], '1501400', 100);
320 data_610_1400=monte_carlo(S(2:3), '6101400', 100);
321
322 mu1506101400=mean(data(1:100));
323 sigma=std(data(1:100));
324 figure
325 loglog([150 610 1400], data(201:203), 'o', 'LineWidth', 0.1);
326 hold on;
327 errorbar([150 610 1400], data(201:203), data(201:203)*0.1, 'o', '
    LineWidth', 3);
328
329 muA1506101400=mean(data(101:200));
330
331 f=@(v,m,muA)(10.^muA.*v.^(m));
332 %f=@(v)(muA.*v.^(mu));
333 x1506101400=linspace(140,1600,1000);
334 x150610=linspace(140,1600,1000);
335 x6101400=linspace(140,1600,1000);
336
337 p1=plot(x1506101400,f(x1506101400,mu1506101400,muA1506101400),'
    LineWidth', 2.5);
338
339 % clc;
340 % disp(['Spectral index : ', num2str(mu)]);
341 % disp(['Error : ', num2str(sigma)]);
342 % disp(['Flux : ', num2str(data(201:203))]);
343 % disp('');
344
345 mu150610=mean(data_150_610(1:100));
346 mu1501400=mean(data_150_1400(1:100));
347 mu6101400=mean(data_610_1400(1:100));
348
349 muA150610=mean(data_150_610(101:200));
350 muA1501400=mean(data_150_1400(101:200));
351 muA6101400=mean(data_610_1400(101:200));
352
353 %disp(['For the values between 150hz, 610hz and 1400hz the spectral
    index is ', num2str(mu1506101400), ' and its uncertainty is ',
    sigma]);
354 %disp(['For the values between 150hz and 610hz the spectral index
    is ', num2str(mean(data_150_610(1:100))), ' and its uncertainty
    is ', num2str(std(data_150_610(101:200)))]);
355 %disp(['For the values between 150hz and 1400hz the spectral index
    is ', num2str(mean(data_150_1400(1:100))), ' and its
    uncertainty is ', num2str(std(data_150_1400(101:200)))]);

```

```

356 %disp(['For the values between 610hz and 1400hz the spectral index
      is ', num2str(mean(data_610_1400(1:100))), ' and its
      uncertainty is ', num2str(std(data_610_1400(101:200)))]);
357
358
359 hold on;
360 p2=plot(x150610, f(x150610, mu150610, muA150610), 'LineWidth', 2.5);
361 p3=plot(x1506101400, f(x1506101400, mu6101400, muA6101400), 'LineWidth',
      , 2.5);
362 p4=plot(x6101400, f(x6101400, mu1501400, muA1501400), 'LineWidth', 2.5);
363
364 loglog([150 610 1400], data(201:203), 'o', 'LineWidth', 2);
365
366 set(gca, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 24)
367 %h=legend([p1 p2 p4 p3], ['Spektralindex = ', num2str(mu1506101400)
      ], ['Spektralindexet mellan 150Hz och 610Hz = ', num2str(
      mu150610)], ['Spektralindexet mellan 150Hz och 1400Hz = ',
      num2str(mu1501400)], ['Spektralindexet mellan 610Hz och 1400Hz =
      ', num2str(mu6101400)]);
368 h = legend([p1 p2 p4 p3], ['$\alpha = $', num2str(mu1506101400)], ['$
      \alpha^{\{610Mhz\}\_ \{150Mhz\}}$ = ', num2str(mu150610)], ['$\alpha
      ^{\{1400Mhz\}\_ \{150Mhz\}}$ = ', num2str(mu1501400)], ['$\alpha^{\{1400
      Mhz\}\_ \{610Mhz\}}$ = ', num2str(mu6101400)]);
369 set(h, 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 40, 'FontWeight', 'bold');
370 %set(h, 'FontSize', 14);
371 %axis([100 2000 40 1000]);
372 title('Uppm\"att flux samt spektralindex');
373 xlabel('Frekvens [Hz]');
374 ylabel('Uppm\"att flux [mJy]');
375 end

```

C.7 Skript som anpassar en funktion över fluxpunkter

```

1 function [ values ] = fit_data( data , configuration)
2 % performs the lsqcurvefit-matlabfunction.
3 if strcmp(configuration, '1506101400')
4     X=[150,610,1400];
5     x=linspace(150,2000,2000);
6 elseif strcmp(configuration, '150610')
7     X=[150,610];
8     x=linspace(150,2000,2000);
9 elseif strcmp(configuration, '1501400')
10    X=[150,1400];
11    x=linspace(150,2000,2000);
12 else strcmp(configuration, '6101400')
13    X=[610,1400];
14    x=linspace(150,2000,2000);
15 end

```

```

16
17 fun=@(x,xdata)(xdata.^(x(1))*10.^(x(2)));
18 x0=[0, -1];
19
20 values=lsqcurvefit(fun,x0,X,data);
21 end

```

C.8 Skript för brusanalysering

```

1 clc; clear all; close all;
2
3 data=fitsread('XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS','primary');
4
5 %%
6 close all;
7 % cut out a smaller map and draw up a histogram of it, set the axis
8 % accordingly as to make it easier to read. Should be probability and
9 % the
10 % sum of all the bins should add up to 1. (which now is the case)
11 smallmap=data(8300:8700,10350:10673);
12 H=histogram(smallmap,'Normalization','probability');
13 %axis([-1*10^-3 1*10^-3 1.8*10^4 2.2*10^4]);
14 set(gca,'FontWeight','bold','FontSize',30);
15
16 % get our values for the constants.
17 mu=mean2(smallmap);
18 sigma=std2(smallmap);
19
20 %format shortE
21 % set the numbers to the correct number of decimals as to get rid of
22 % xx.xxxxxxxx - values.
23 round(mu,8)
24 round(sigma,7)
25 test=sprintf('%0.8f', mu);
26
27 % plot the values for mu and std on the graph.
28 x1=ones(1,4250)*(mu-sigma);
29 x2=ones(1,4250)*(mu+sigma);
30 x=ones(1,4250)*(mu);
31 y=linspace(0,0.0325,4250);
32 hold on;
33 p1=plot(x1,y,'--','LineWidth',4);
34 p2=plot(x2,y,'--','LineWidth',4);
35 p3=plot(x,y,'--','LineWidth',4);
36
37 % visual settings for the graph, fontsize and typesetting etc.
38 h=legend([p3 p1 p2],[ '$\mu=$' num2str(round(mu,8)) ],[ '$\mu-$\sigma=$'
    num2str(round(mu-sigma,7)) ],[ '$\mu+$\sigma=$' num2str(round(mu+sigma

```

```

    ,7))));
38 set(h,'Interpreter','latex','FontSize',50,'FontWeight','bold');
39 xlabel('Jy/Beam'); ylabel('Andel');
40 [c,r]=size(smallmap);
41 nrofpixels=c*r;

```

C.9 Unix-skript för extrahering av mindre FITS-bilder ur de större radiokartorna

```

1 pixperarcsec150=0.161290323
2 pixperarcsec610=0.666666667
3 pixperarcsecFIRST=0.555555556
4 pixperarcsecNVSS=0.2
5
6 echo -n "Enter horizontal size in arcsec > "
7 read arcsec_x
8 a=$(echo "$arcsec_x * $pixperarcsec150" | bc)
9 b=$(echo "$arcsec_x * $pixperarcsec610" | bc)
10 e=$(echo "$arcsec_x * $pixperarcsecFIRST" | bc)
11 g=$(echo "$arcsec_x * $pixperarcsecNVSS" | bc)
12
13 echo -n "Enter vertical size in arcsec > "
14 read arcsec_y
15 c=$(echo "$arcsec_y * $pixperarcsec150" | bc)
16 d=$(echo "$arcsec_y * $pixperarcsec610" | bc)
17 f=$(echo "$arcsec_y * $pixperarcsecFIRST" | bc)
18 h=$(echo "$arcsec_y * $pixperarcsecNVSS" | bc)
19
20 echo -n "Enter source number (Double Irony = 1, "the regular one" = 2,
    "the asymmetric one" = 3) > "
21 read sourcenum
22 case $sourcenum in
23     1 ) koord1="02:03:51.090" # alla koordinater för T-regionens
        mittpunkt (för att centrera bilden runt densamma)
24         koord2="-04:13:45.67"
25         nick="DoubleIrony"
26         ;;
27     2 ) koord1="02:10:03.329"
28         koord2="-05:28:08.42"
29         nick="sourcetwo"
30         ;;
31     3 ) koord1="02:16:07"
32         koord2="-04:14:00"
33         nick="sourcethree"
34         ;;
35     * ) echo "Error "
36         exit
37 esac

```

```

38
39 if [ "$sourcenummer" = 1 ] || [ "$sourcenummer" = 2 ] || [ "
    $sourcenummer" = 3 ]; then
40
41 getfits -o ${nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits XXL-N.
    GMRT610.MOSAIC.FITS $koord1 $koord2 $b $d
42 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k NAXIS3
43 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k NAXIS4
44 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CTYPE3
45 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CRVAL3
46 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CDEL3
47 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CRPIX3
48 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CROTA3
49 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CTYPE4
50 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CRVAL4
51 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CDEL4
52 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CRPIX4
53 cphead XXL-N.GMRT610.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CROTA4
54
55 getfits -o ${nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits XXL-N.
    GMRT150.MOSAIC.FITS $koord1 $koord2 $a $c
56 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k NAXIS3
57 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k NAXIS4
58 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CTYPE3
59 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CRVAL3
60 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CDEL3
61 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CRPIX3#
62 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CROTA3
63 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CTYPE4

```

```

64 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CRVAL4
65 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CDELTA4
66 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CRPIX4
67 cphead XXL-N.GMRT150.MOSAIC.FITS {nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}
    arcsec.fits -k CROTA4
68
69 getfits -o ${nick}_NVSS_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits ./NVSS/${
    nick}NVSSbig.fits $koord1 $koord2 $g $h
70
71 getfits -o ${nick}_FIRST_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits ./FIRST/${
    sourcenum}.fits $koord1 $koord2 $e $f
72
73 fi

```

C.10 Unix-skript för att skapa PNG-filer från extraherade FITS-filer med hjälp av DS9

```

1  echo -n "Enter horizontal size in arcsec > "
2  read arcsec_x
3
4  echo -n "Enter vertical size in arcsec > "
5  read arcsec_y
6
7  echo -n "Enter source number (Double Irony = 1, "the regular one" = 2,
    "the asymmetric one" = 3) > "
8  read sourcenum
9  case $sourcenum in
10     1 ) koord1="02:03:52"
11         koord2="-04:14:02"
12         nick="DoubleIrony"
13         ;;
14     2 ) koord1="02:10:02"
15         koord2="-05:28:05"
16         nick="sourcetwo"
17         ;;
18     3 ) koord1="02:16:07"
19         koord2="-04:14:00"
20         nick="sourcethree"
21         ;;
22     * ) echo "Error"
23         exit
24 esac
25
26 if [ "$sourcenum" = 1 ] || [ "$sourcenum" = 2 ] || [ "$sourcenum" = 3 ]; then

```

```

27 ds9  ${nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits \
28 -zoom to fit \
29 -scale sqrt -scale limits 0.016 0.05 \
30 -cmap invert yes \
31 -saveimage ${nick}_150MHz.png \
32 -region ${sourcenum}newestt.reg -region ${sourcenum}exclude.
33 reg -region ${sourcenum}_150beamsize.reg \
34 -grid no -grid type publication -grid grid no -grid axes no -grid
    axes type exterior \
35 -grid numerics no -grid numerics type exterior -grid numerics
    vertical no -grid tickmarks yes -grid tickmarks color black \
36 -grid title yes -grid title def no \
37 -grid labels no -grid labels def1 no -grid labels text1
    Rektascension \
38 -grid labels def2 no -grid labels text2 Deklination \
39 -grid border yes -grid border color black -grid numerics color
    black \
40 -colorbar horizontal -colorbar ticks 7 \
41
42 ds9  ${nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits \
43 -cmap invert yes \
44 -zoom to fit \
45 -scale log -scale limits 0.00025 0.003 \
46 -saveimage ${nick}_610MHz.png \
47 -region ${sourcenum}newestt.reg -region ${sourcenum}exclude.
48 reg -region ${sourcenum}_610beamsize.reg \
49 -grid no -grid type publication -grid grid no -grid axes no -grid
    axes type exterior \
50 -grid numerics no -grid numerics type exterior -grid numerics
    vertical no -grid tickmarks yes -grid tickmarks color black \
51 -grid title yes -grid title def no \
52 -grid labels no -grid labels def1 no -grid labels text1
    Rektascension \
53 -grid labels def2 no -grid labels text2 Deklination \
54 -grid border yes -grid border color black -grid numerics color
    black \
55 -colorbar horizontal -colorbar ticks 7 \
56
57 ds9  ${nick}_NVSS_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits \
58 -zoom to fit \
59 -scale sqrt -scale limits 0.0021 0.0125 \
60 -cmap invert yes \
61 -saveimage ${nick}_NVSS_1400MHz.png \
62 -region ${sourcenum}newesttNVSS.reg -region ${sourcenum}
    excludeNVSS.reg -region ${sourcenum}_NVSSbeamsize.reg \
    -grid no -grid type publication -grid grid no -grid axes no -grid
    axes type exterior \

```

```

63  -grid numerics no -grid numerics type exterior -grid numerics
    vertical no -grid tickmarks yes -grid tickmarks color black \
64  -grid title yes -grid title def no \
65  -grid labels no -grid labels def1 no -grid labels text1
    Rektascension \
66  -grid labels def2 no -grid labels text2 Deklination \
67  -grid border yes -grid border color black -grid numerics color
    black \
68  -colorbar horizontal -colorbar ticks 7 \
69
70  ds9  ${nick}_FIRST_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits \
71  -zoom to fit \
72  -scale sqrt -scale limits 0.00045 0.0025 \
73  -cmap invert yes \
74  -saveimage ${nick}_FIRST_1400MHz.png \
75  -region ${sourcenum}newestt.reg -region ${sourcenum}exclude.
    reg -region ${sourcenum}_FIRSTbeamsize.reg \
76  -grid no -grid type publication -grid grid no -grid axes no -grid
    axes type exterior \
77  -grid numerics no -grid numerics type exterior -grid numerics
    vertical no -grid tickmarks yes -grid tickmarks color black \
78  -grid title yes -grid title def no \
79  -grid labels no -grid labels def1 no -grid labels text1
    Rektascension \
80  -grid labels def2 no -grid labels text2 Deklination \
81  -grid border yes -grid border color black -grid numerics color
    black \
82  -colorbar horizontal -colorbar ticks 7 \
83
84  # Nedanst ende är för att skapa en "tile mode"-version av de fyra
    ovanst ende bilderna i DS9:
85
86  ds9  ${nick}_GMRT150_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits \
87  -zoom to fit \
88  -scale sqrt -scale limits 0.016 0.05 \
89  -cmap invert yes \
90  -saveimage ${nick}_150MHz.png \
91  -region ${sourcenum}newestt.reg -region ${sourcenum}exclude.
    reg -region ${sourcenum}_150beamsize.reg \
92  -grid no -grid type publication -grid grid no -grid axes no -grid
    axes type exterior \
93  -grid numerics no -grid numerics type exterior -grid numerics
    vertical no -grid tickmarks yes -grid tickmarks color black \
94  -grid title yes -grid title def no \
95  -grid labels no -grid labels def1 no -grid labels text1
    Rektascension \
96  -grid labels def2 no -grid labels text2 Deklination \
97  -grid border yes -grid border color black -grid numerics color
    black \

```

```

98 -colorbar horizontal -colorbar ticks 7 \
99 ${nick}_GMRT610_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits \
100 -cmap invert yes \
101 -zoom to fit \
102 -scale log -scale limits 0.00025 0.003 \
103 -saveimage ${nick}_610MHz.png \
104 -region ${sourcenum}newestt.reg -region ${sourcenum}exclude.
    reg -region ${sourcenum}_610beamsize.reg \
105 -grid no -grid type publication -grid grid no -grid axes no -grid
    axes type exterior \
106 -grid numerics no -grid numerics type exterior -grid numerics
    vertical no -grid tickmarks yes -grid tickmarks color black \
107 -grid title yes -grid title def no \
108 -grid labels no -grid labels def1 no -grid labels text1
    Rektascension \
109 -grid labels def2 no -grid labels text2 Deklination \
110 -grid border yes -grid border color black -grid numerics color
    black \
111 -colorbar horizontal -colorbar ticks 7 \
112 ${nick}_NVSS_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits \
113 -zoom to fit \
114 -scale sqrt -scale limits 0.0021 0.0125 \
115 -cmap invert yes \
116 -saveimage ${nick}_NVSS_1400MHz.png \
117 -region ${sourcenum}newesttNVSS.reg -region ${sourcenum}
    excludeNVSS.reg -region ${sourcenum}_NVSSbeamsize.reg \
118 -grid no -grid type publication -grid grid no -grid axes no -grid
    axes type exterior \
119 -grid numerics no -grid numerics type exterior -grid numerics
    vertical no -grid tickmarks yes -grid tickmarks color black \
120 -grid title yes -grid title def no \
121 -grid labels no -grid labels def1 no -grid labels text1
    Rektascension \
122 -grid labels def2 no -grid labels text2 Deklination \
123 -grid border yes -grid border color black -grid numerics color
    black \
124 -colorbar horizontal -colorbar ticks 7 \
125 ${nick}_FIRST_${arcsec_x}x${arcsec_y}arcsec.fits \
126 -zoom to fit \
127 -scale sqrt -scale limits 0.00045 0.0025 \
128 -cmap invert yes \
129 -saveimage ${nick}_FIRST_1400MHz.png \
130 -region ${sourcenum}newestt.reg -region ${sourcenum}exclude.
    reg -region ${sourcenum}_FIRSTbeamsize.reg \
131 -grid no -grid type publication -grid grid no -grid axes no -grid
    axes type exterior \
132 -grid numerics no -grid numerics type exterior -grid numerics
    vertical no -grid tickmarks yes -grid tickmarks color black \
133 -grid title yes -grid title def no \

```

```
134 -grid labels no -grid labels def1 no -grid labels text1  
      Rektascension \  
135 -grid labels def2 no -grid labels text2 Deklination \  
136 -grid border yes -grid border color black -grid numerics color  
      black \  
137 -colorbar horizontal -colorbar ticks 7  
138  
139 fi
```