

Beobachtungen der unmittelbaren
Umgebung von Supermassiven Schwarzen
Löchern
Millimeter-VLBI von AGN

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Anke Pagels

aus

Siegburg

Bonn 2006

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1.Referent: Prof. Dr. Ulrich Klein

2.Referent: Priv. Doz. Dr. Maria Massi

Tag der Promotion: 28. August 2006

<p>Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.</p>
--

Zusammenfassung

Dieser Arbeit liegen Beobachtungen von Aktiven Galaktischen Kernen (engl. AGN) zugrunde, die zwischen 1993 und 1999 mit “Very Long Baseline Interferometry” (VLBI) bei 86 GHz durchgeführt wurden. Die vorliegende Dissertationsschrift unterteilt sich im Wesentlichen in zwei Abschnitte. Im ersten Teil der Arbeit werden eine Vielzahl von Beobachtungsergebnissen vorgestellt. Der Großteil der vorgestellten Quellen wurde in diesem Zeitraum erstmalig bei dieser hohen Frequenz (Winkelauflösung) beobachtet, so dass es erstmals möglich war, die Jetstrukturen zwischen Kern innerhalb einer Millibogensekunde Abstand zu beobachten und zu kartieren. In der hier vorgestellten Analyse wird die Problematik von VLBI-Beobachtungen bei 86 GHz sowie die anschließende Datenverarbeitung eingehend diskutiert. Um z.B. ein zu Beobachtungen bei 22 oder 43 GHz äquivalentes Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erhalten, muss sowohl die Integrationszeit deutlich erhöht, als auch bei optimalen Wetterbedingungen beobachtet werden. Andernfalls ist eine Eindeutigkeit der abgeleiteten Objektstruktur nicht gegeben.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der Quasar 3C 454.3 bei verschiedenen Frequenzen und in unterschiedlichen Epochen eingehend betrachtet. Beobachtungen dieser Quelle über einen Zeitraum von 20 Jahren zeigen in regelmässigen zeitlichen Abständen starke Helligkeitsausbrüche (*Flares*), deren mögliche Ursachen durch eine Multifrequenzanalyse der gesammelten Daten durch ein konsistentes Modell erklärt werden kann, das auf der Wechselwirkung des Supermassiven Schwarzen Loches in eines unsichtbaren Begleiters beruht.

If you torture data long enough, nature will confess!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aktive Galaktische Kerne	1
1.1.1	Standardmodell	1
1.1.2	Beobachtungstechniken	5
1.2	Gegenstand dieser Arbeit	6
2	VLBI	7
2.1	Millimeter-VLBI	7
2.1.1	Prinzip der Interferometrie auf langen Basislinien	8
2.1.2	Erste Gehversuche – Tests bei 89 GHz	10
2.1.3	Die ersten Schritte – Das CMVA	10
2.1.4	Der Sprint – Das GMVA	13
2.2	Die Beobachtungen und Datenreduktion	14
3	Die Quellen	17
3.1	Die Auswahl der Quellen	17
3.1.1	Nichtdetektionen	20
3.1.2	Detektionen	20
3.1.3	Kartierungen	21

3.2	Zusammenfassung und Interpretation	81
4	3C454.3	85
4.1	Lichtkurven	86
4.2	Kinematik bei 22 und 43 GHz	93
4.3	Kinematik bei 86 GHz	101
4.4	Zoom-Out and -In	102
4.4.1	Großskalige Struktur	103
4.4.2	Kernstruktur	103
4.5	Binary Black Hole System	103
4.6	Zusammenfassung	106
A	Epochen von 3C 454.3 bei 22 GHz	115
B	Epochen von 3C 454.3 bei 22 GHz	125
C	Epochen von 3C 454.3 bei 43 GHz	131
D	Epochen von 3C 454.3 bei 43 GHz	141
E	Epochen von 3C 454.3 bei 86 GHz	149
F	Spektralindexkarten von 3C 454.3	159
G	Spektralindexkarten von 3C 454.3	175
	Literaturverzeichnis	188
	Abbildungsverzeichnis	194

Tabellenverzeichnis	201
Danksagung	205

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Aktive Galaktische Kerne

1.1.1 Standardmodell

Aktive Galaktische Kerne (Active Galactic Nuclei, AGN) sind in den letzten Jahrzehnten Ziele multipler radioastronomischer Beobachtungen gewesen. Aufgrund permanent verbesserter Empfängertechnik sowie gesteigener Computerkapazitäten konnte die Winkelauflösung und Empfindlichkeit der Beobachtungen deutlich erhöht werden (Kapitel 2). Viele Jahre hatten die Beobachtungen das primäre Ziel, über die gesteigerte Winkelauflösung, die eigentliche Quellstruktur zu studieren und damit das Standardmodell des AGN zu überprüfen.

Das Standardmodell eines AGN (Abb. 1.1) wird beschrieben über ein Supermassives Schwarzes Loch mit etwa 1 Mio. bis 10 Mill. Sonnenmassen im Zentrum einer Galaxie (Antonucci (1993), Urry & Padovani (1995), Siebenmorgen et al. (2005)). Durch das Gravitationspotential wird Materie in Form einer Akkretions-scheibe in der direkten Umgebung des Schwarzen Loches gehalten (Henkel et al. (1984), Braatz et al. (1996), Yu et al. (2005)). Es ist bis heute nicht direkt beobachtet worden, ob Materie in zeitlichen Abständen oder kontinuierlich von der Akkretionsscheibe auf das Schwarze Loch einfällt. Dem Standardmodell nach, wird diese hypothetisch einfallende Materie zu einem Teil durch Magnetfelder gelenkt, zu Plasmajets kollimiert und senkrecht zu der Scheibe ausgestossen (Blandford & Znajek

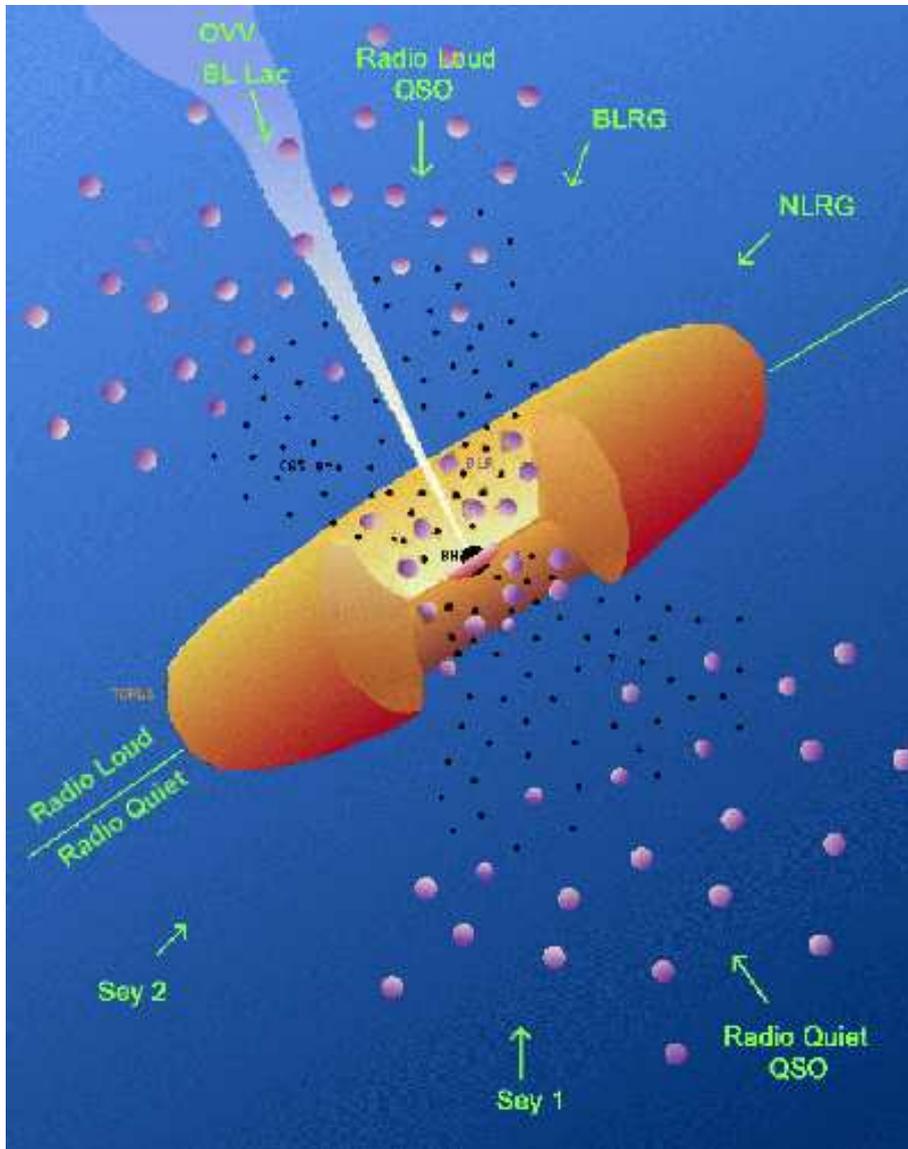


Abbildung 1.1:

Skizze des AGN-Standardmodells. Das Supermassive Schwarze Loch (BH) befindet sich im Zentrum des AGN.

Obere Hälfte: Radiolaute AGN: Je nach Orientierungswinkel werden verschiedene Arten von Radiogalaxien beobachtet. Bei einem kleinen Winkel zur Torusebene werden Narrow Line Radio Galaxies beobachtet, dann folgen Broad Line Radio Galaxies, Radio Loud QSOs und OVV und BL Lac Objekte.

Untere Hälfte: Radioleise AGN: Wie bei den Radiolauten Objekten wird in Abhängigkeit zur Sichtlinie zum BH verschiedene Objekttypen beobachtet. Seyfert I, Seyfert II und Radio Quiet QSOs. Die Strahlung der Broad Line Region (BLR) wird bei seitlicher Betrachtung durch den Torus absorbiert (NLRG und Seyfert II), bei diesen dominiert die Narrow Line Region (NLR).

(http://www-xray.ast.cam.ac.uk/xray_introduction/AGN.gif)

(1977)). In der Rotationsebene der Akkretionsscheibe befindet sich in einem Abstand von mehreren Parsec ein Staubtorus (Arshakian (2005), Mason et al. (2006)).

Die Klassifikation gemäß des Standardmodells von AGN (Abb. 1.1) in Typ I oder Typ II ist direkt abhängig von dem Blickwinkel relativ zum Staubtorus. Bei einem Winkel von ca. 0° können sowohl der Jet, sowie der Counterjet beobachtet werden. Die Quellen weisen im Allgemeinen keine superluminalen Geschwindigkeiten auf, solange die Jetrichtung konstant ist. In diesem Fall befindet sich der Staubtorus zwischen dem Kern und dem Beobachter, was zu einer starken Extinktion der bekannten breiten optischen Spektrallinien führt. Bei einem deutlich größeren Winkel werden sowohl breite, als auch schmale optische Spektrallinien beobachtet. Es kann zu dem Effekt des Doppler-*Boosting* bei der Kern- und Jetstruktur sowie des *De-Boostings* beim Counterjet kommen. Bei diesen Quellen werden sowohl bei Flussdichteveränderungen im Kern wie auch im Jet, superluminale Geschwindigkeiten gemessen, der Counterjet ist hingegen in der Regel nicht mehr detektierbar. Mit Hilfe von vielen sukzessiven Beobachtungen (Monitoring), also mehrere Beobachtungen verteilt über einen längeren Zeitraum, wurden viele AGN kartiert und deren Jetgeschwindigkeiten sowie Komponentenbewegung ermittelt (Jorstad et al. (2001), Kellermann et al. (2004)).

- **Quasar** (*Quasi Stellar Radio Source*) ist die Bezeichnung für sehr leuchtstarke und weit entfernte Galaxienkerne, die 1960 als sternartige Objekte entdeckt wurden. Aufgrund der großen Entfernung und der Häufung ihres Vorkommens in elliptischen Galaxien können Quasare als Objekte des frühen Universums eingeordnet werden. Bei Quasaren wird anhand ihrer Radioleuchtkraft zwischen radiolauten und radioleisen Objekten unterschieden.
- **Blazare** werden ausnahmslos in elliptischen Galaxien beobachtet und zeigen im Gammastrahlenbereich eine deutlich stärkere Leuchtkraft als Quasare. Die Inklination dieser Objekte ist gering, so dass der Beobachter fast direkt in den Jet blickt. Bei diesen Quellen wird dementsprechend dominant ein Jet beobachtet, der sich mit hochrelativistischen Geschwindigkeiten auf den Beobachter zu bewegt. Die Klasse umfasst ebenfalls BL Lacertae (BL Lac), radiolauter Objekte mit einem flachen Radiospektrum, die eine hohe Variabilität in der Polarisation zeigen.

- **Radio Galaxien** sind radiolaute Objekte mit einer geringen visuellen Leuchtkraft. Sie weisen immer Jets auf und haben eine ähnliche Morphologie wie Quasare, sind jedoch räumlich deutlich ausgedehnter. Sie werden unterschieden in *Broad Line Radio Galaxies* (BLRG) mit breiten Emissionslinien und einer blauen Kontinuumsmission und in *Narrow Line Radio Galaxies* (NLRG) mit schmalen Emissionslinien. Eine weitere Unterscheidung wurde von Fanaroff und Riley (Fanaroff & Riley (1974)) vorgenommen (FRI und FRII), wobei Quellen mit stark kollimierten Jets und großen Radiolobes mit *Hot-spots* als FRII-Quellen, und mit abschwächenden und aufgeweiteten Jets als FRI-Quellen bezeichnet werden.
- **Seyfert Galaxien** wurden 1943 von Carl K. Seyfert entdeckt. Diese Gruppe von AGN wird hauptsächlich in Spiralgalaxien beobachtet und verfügt im Gegensatz zu Quasaren oder Radio Galaxien über eine deutlich schwächer ausgeprägte Jetstrukturen. Bei Seyfert Galaxien werden eine hohe Leuchtkraft des Kerns, wie auch breite Emissionslinien und Variabilität auf einer Zeitskala von Monaten beobachtet.

In den letzten Jahren wurde ein größerer Anteil an Multifrequenzbeobachtungen angestrebt, um die physikalischen Prozesse der Einzelkomponenten und ihr Zusammenwirken als AGN zu verstehen. Der Begriff der Multifrequenzbeobachtungen kann dabei sowohl Beobachtungen bei verschiedenen Radiofrequenzen, als auch Kombinationen z.B. von Radio- und Röntgenbeobachtungen beinhalten. Die Unterschiede und damit die Möglichkeit zu ergänzenden Beobachtungen liegen in der Reichweite/Durchdringungsfähigkeit der beobachteten Strahlung: Die im Radiokontinuum beobachtete Synchrotronstrahlung bildet großskalige Jetstrukturen im Bereich von Megaparsec aus. Die Jetstruktur einer Quelle kann durch Multifrequenzbeobachtungen angefangen von einem Kernabstand von wenigen Parsec (hochfrequent) bis zu einem Kernabstand von einigen Megaparsec (niederfrequent) studiert werden. Röntgensynchrotronstrahlung ist im Gegensatz zu Radiostrahlung sehr kurzlebig (< 100 Jahre), die Jetstrukturen können nur über wenige Parsec nachgewiesen werden. Beobachtungen von ausgedehnteren Röntgenjets lassen auf eine Nachbeschleunigung innerhalb des Jets schließen. Im Röntgenbereich wird zusätzlich thermische Strahlung beobachtet, die durch die Strahlung in der Akkretionscheibe und der Wechselwirkung des Jets mit dem ihm umgebenden Medium entsteht. Ebenfalls gibt die durch inverse Compton-Streuung erzeugte Röntgenstrahlung Aufschluss über die

beim Auftreffen der hochenergetischen Elektronen auf das umgebene Medium stattfindenden Kühlprozesse.

1.1.2 Beobachtungstechniken

Bei Beobachtungen mit Einzelteleskopen wird aufgrund der geringen Winkelauflösung lediglich die gesamte Flussdichte gemessen. Beobachtet wird also die überlagerte Emission des Kerns, Jets und des umgebenden Mediums. Mittels Multifrequenzmessungen ist es möglich, Veränderungen in der Gesamtflussdichte der Quelle, wie zum Beispiel *Flares* und Variationen im spektralen Verlauf mit geringem Aufwand an Beobachtungsdauer und Datenreduktion zu erhalten.

Mit interferometrischen Messungen dagegen ist es möglich, die Jetstruktur unabhängig von der Strahlung des AGNs zu studieren. Damit können sowohl Komponentenbewegungen im Jet, als auch Flussdichteveränderungen in Kern- und Jetstruktur voneinander getrennt betrachtet werden. Liegen zeitlich koinzidierende Beobachtungen in mehreren Radiofrequenzen vor, können Spektralindexkarten der Jetstruktur erstellt und der zeitliche und räumliche Verlauf des Spektralindex analysiert werden. Die maximale Winkelauflösung liegt dabei im Bogensekundenbereich.

Interferometrische Beobachtungen auf langen Basislinien (VLBI, VLBA, VSOP¹) erhöhen abhängig von der Frequenz die Winkelauflösung bis hin zum Mikrobogensekundenbereich. Mit diesem Werkzeug wird die Grenze der AGN-Beobachtungen bis auf Lichttage zum Kern hin verschoben. Dabei können Prozesse beobachtet werden, die sich innerhalb der Torusstruktur (vgl. Abb. 1.1) abspielen. Durch die Kombination verschiedener Radiofrequenzen können Abläufe der Komponentenausstossung in den Jet nachvollzogen und die Komponenten über einen grösseren zeitlichen Bereich beobachtet werden.

Beobachtungen mit Röntgenteleskopen erlauben die Betrachtung der Wechselwirkung des Schwarzen Loches mit der umgebenen Akkretionsscheibe. Die freigesetzte hochenergetische Strahlung wird nur wenig durch den umgebenen Staubtorus absorbiert ($\sigma \propto E^{-3}$) und erlaubt damit die direkte Beobachtungen der Prozesse nahe dem

¹Very Long Baseline Interferometry, Very Long Baseline Array (USA), VLBI Space Observatory Programm (VLBI + HALCA Satellit, Japan)

Supermassiven Schwarzen Loch. Durch die Beobachtung von Röntgenjets können deren mögliche Beschleunigungsmechanismen im Vergleich zu den Radiobeobachtungen analysiert werden.

Multifrequenzkampagnen in Kombination mit kontinuierlichen Monitoringprogrammen über einen längeren Zeitraum werden heute als DIE Lösung zum Verständnis von ungeklärten Prozessen des AGN Phänomens angesehen.

1.2 Gegenstand dieser Arbeit

In **Kapitel 2** dieser Arbeit wird ein kurzer Überblick über die Radiointerferometrie auf langen Basislinien, sowie in die Entwicklung des Millimeter-VLBI gegeben. Der analytische Teil dieser Arbeit gliedert sich wie folgt: In **Kapitel 3** werden Beobachtungen bei 86 GHz vorgestellt, wie sie mit dem VLBI zwischen 1994 und 1999 aufgenommen wurden. Die meisten dieser Quellen sind zum ersten Mal mit einer derart hohen Winkelauflösung beobachtet und kartiert worden. Das Auswahlkriterium dieser Beobachtungsobjekte war die mit Einzelteleskopen gemessene Flussdichte bei 86 GHz – es wurden nur die hellsten Quellen für VLBI-Messungen in Betracht gezogen. Durch die unterschiedlichen Quantität und Qualität der Daten sind bei einigen Quellen Geschwindigkeitsangaben zur Komponentenbewegung möglich, sowie die Analysen der einzelnen Jetstrukturen. In **Kapitel 4** wird im Detail eine Quelle untersucht und Daten von verschiedenen Wellenlängenbereichen (Radio und Röntgen) miteinander in Verbindung gesetzt. Dabei handelt es sich um den Quasar 3C 454.3, der in Abständen von 2 Jahren schwächere und von 12 Jahren sehr starke *Flares* ausbildet. Bei der Analyse der vorliegenden Daten, sowohl in Form von Lichtkurven, als auch in Form von interferometrischen Daten verschiedener Wellenlänge werden die sich über einen Zeitraum von Jahrzehnten abspielenden Prozesse sowie deren mögliche Ursachen genauer betrachtet.

Kapitel 2

VLBI

2.1 Millimeter–VLBI

Die Forderungen nach gesteigerter Winkelauflösung führte sowohl zum Bau von großen Teleskopen (100-m Klasse), als auch zu der Weiterentwicklung der Empfänger-technologie. Die Verbindung dieser Einzelteleskope zu einem virtuellen einzigen wurde in der “Very Long Baseline Interferometry” (VLBI) verwirklicht, wodurch ein virtuelles Teleskop mit Erddurchmesser erzeugt wird. Dieses Teleskop ausgerüstet mit Empfängern im Millimeterwellenlängenbereich ermöglicht Beobachtungen mit der Winkelauflösung von wenigen Mikrobogensekunden. Damit können die innersten Bereiche von AGN kartieren und Jetstrukturen beobachtet werden die sich im Abstand von wenigen Lichttagen vom Supermassiven Schwarzen Loch befinden.

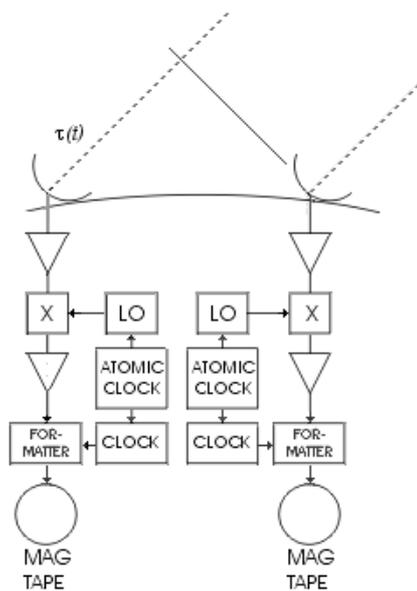
Die VLBI-Beobachtungen bei Millimeterwellenlängen sind deutlich schwieriger durchzuführen, als vergleichbare niederfrequente Messungen. Die Gründe hierfür haben verschiedene Ursachen. Die zeitliche Durchführung der Experimente wurde in den letzten Jahren auf zwei Zeiträume von etwa fünf Tagen im Frühling und Herbst gelegt. In dieser Zeit ist die witterungsbedingte Ausfallrate der beteiligten europäischen Teleskope erhöht, was zu einer deutlichen Verschlechterung sowohl der Sensitivität, als auch der Winkelauflösung führt. Desweiteren sind die mm-Flussdichten des beobachteten AGN im Allgemeinen deutlich geringer, als bei vergleichbaren Beobachtungen bei niedrigen Frequenzen. Es muss also eine deutlich höhere Sensitivität erreicht werden, um diese Variationen der Quellintensität

detektieren zu können, was wiederum einen hohen Anspruch an die verwendete Empfängertechnik stellt. Die zeitliche Dichte der Messungen (April – Oktober) ist für die Beobachtung von Variationen in einer Quelle teilweise nicht hoch genug. So kann eine superluminale Komponente in einem Jet gegebenenfalls nicht mehr nach einem halben Jahr detektiert oder eindeutig zugeordnet werden, was die Untersuchung der Jetkinematik deutlich erschwert. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass bei Monitoringprogrammen eine oder zwei Epochen witterungs- oder technikbedingt ausfallen, was bei einem halbjährlichen Abstand zum Abbruch des Programms führen kann.

2.1.1 Prinzip der Interferometrie auf langen Basislinien

Die Technik der Interferometrie erlaubt bei gleicher Wellenlänge eine Steigerung der Winkelauflösung um mehrere Größenordnungen im Vergleich zu einem Einzelteleskop. Um ein möglichst effizientes Instrument zu erhalten, werden Teleskope weltweit zu bestimmten Zeitpunkten auf eine Quelle ausgerichtet. Die empfangene Signale werden in einem Computer so überlagert, dass sie interferieren. Um die hohe Zeitgenauigkeit zu erreichen, wird ein Wasserstoff-Maser verwendet, der über eine hohe Kurzzeitstabilität verfügt, langfristig jedoch driftet. Zur Normierung des Masers wird das Signal des “Global Positioning Systems” (GPS) verwendet, welches im Gegensatz dazu langzeitstabil ist. Damit ist es möglich, zeitlich synchrone Messung an allen Teleskopen durchzuführen. Welche Teleskope zeitgleich beobachten können, hängt sowohl von ihrer Lage, als auch von der Deklination der Quelle ab. Ein Objekt mit sehr hoher Deklination kann theoretisch von allen Teleskopen auf der nördlichen Erdhalbkugel beobachtet werden, die weniger als den halben Erdumfang voneinander entfernt liegen. In der Beobachtungspraxis erreichen die längsten Basislinien etwa 6000-7000 km, was es ermöglicht, gleichzeitig mit europäischen Teleskopen und den östlichen VLBA Antennen zu beobachten, oder mit den Teleskopen auf dem amerikanischen Festland und Hawaii. Sinnvoll wäre hier der Aufbau von VLBI-Stationen in Asien, um diese Lücke zu schließen (“VLBI Korea” ist in Planung).

Die bei den einzelnen Stationen aufgenommenen Daten werden in einem zentralen Korrelator korreliert.

**Abbildung 2.1:**

Prinzip eines Zwei-Elemente-Interferometers

(<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/vlbicor/de/gener1.d.htm>). Das Signal kann durch eine ebene Welle beschrieben werden. Der gleiche Wellenzug trifft mit einem Laufzeitunterschied $\tau(t)$ zwischen den beiden Teleskopen ein. Da die Teleskope nicht physikalisch miteinander verbunden sind, wird über eine Atomuhr das Signal versehen mit entsprechenden Zeitmarken auf einem Speichermedium aufgezeichnet. In einem Korrelator werden die verschiedenen Datensätze miteinander zeitlich abgeglichen, bis der Laufzeitunterschied, und damit die Kohärenz des Wellenzuges, gefunden ist.

2.1.2 Erste Gehversuche – Tests bei 89 GHz

Die ersten Versuche Interferometrie bei langen Basislinien und kurzen Wellenlängen von 3.4 mm durchzuführen, fanden in den frühen 80er Jahren statt und sind von Readhead et al. (1983b) dokumentiert. Die Entwicklung von rauscharmen Millimeterempfängern und einem breitbandigen (112 MHz) Mark III-VLBI-Aufnahmesystem ergaben im Oktober 1981 eine erste erfolgreiche *Fringed*detektion. Parallel zu den Beobachtungen bei 89 GHz wurde bei 5 GHz beobachtet, um Systemfehler abschätzen zu können. Die Daten wurden anschliessend mit dem Mark III-VLBI-Prozessor am Haystack Observatory korreliert.

Die Beobachtungen beschränkten sich auf die 485 km ($1.4 \times 10^8 \lambda$) lange Basislinie zwischen dem Owens Valley Radio Observatory und dem Hat Creek Observatory. Damit konnte eine Winkelauflösung von 10^{-4} arcsec erreicht werden. Die damals beobachtete Quelle 3C 84 (NGC 1275) ist seitdem immer wieder Objekt zahlreicher Beobachtungen gewesen und wird in Kapitel 3 eingehender betrachtet.

Nach den ersten erfolgreichen Tests dauerte es noch fast 10 Jahre, bevor VLBI-Beobachtungen bei 3 mm systematisch durchgeführt wurden. Zwischen 1993 und 1996 wurden globale 3 mm VLBI Beobachtungen *ad hoc* organisiert. In diesem Zeitraum nahmen zwischen drei und sieben Antennen regelmäßig an den Messungen teil.

2.1.3 Die ersten Schritte – Das CMVA

In der zweiten Hälfte der 90er wurde das “Coordinated Millimetre VLBI Array” (CMVA) gegründet. Dadurch wurde es deutlich einfacher, die einzelnen Antennen aufeinander abzustimmen und größere Experimente zu planen und durchzuführen. Desweiteren wurde hierbei ein Instrument geschaffen, welches Beobachtern ausserhalb der beteiligten Institute den Zugang zu 3 mm-VLBI ermöglicht. Ab 1997 wurde das CMVA sukzessive durch Antennen des “Very Long Baseline Arrays” (VLBA) erweitert, was die Leistung und Empfindlichkeit deutlich verbesserte.

Beteiligte Institute waren

- Berkeley, Illinois, Maryland Association (BIMA)

- Max-Planck-Institut für Radioastronomie (Effelsberg)
- Metsähovi Radio Observatory
- Millimeter Radio Astronomy Institute (IRAM)
- NEROC Haystack Observatory
- Onsala Space Observatory
- Swedish-ESO Submillimeter Telescope (SEST)
- Very Long Baseline Array (VLBA)

Abgesehen von den VLBA-Antennen, die über einen identischen Aufbau verfügen, unterscheiden sich die Antennen stark in ihren Charakteristika. In Tabelle 2.1 sind diese für die beteiligten Antennen wiedergegeben. Dabei wird der SEFD (*System Equivalent Flux Density*, systemequivalente Flussdichten) wie folgt errechnet:

$$SEFD = (8kT_{\text{sys}})/\eta_{\text{ap}}\pi D \quad (2.1)$$

wobei k die Boltzmann Konstante ($k=1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$) ist, η_{ap} ist die Apertur Effizienz, D der Durchmesser der Teleskopschüssel und T_{sys} die Systemtemperatur bei einer bestimmten Elevation (in Tab. 2.1 45°).

Um die Sensitivität einer bestimmten Basislinie zu erhalten, gilt:

$$S_{th} = (SNR_{th})/\eta_{pr})\sqrt{SEFD_i SEFD_j / 2B\tau_{coh}} \quad (2.2)$$

wobei SNR_{th} das Signal-zu-Rauschen innerhalb einer Kohärenzzeit τ_{coh} ist, B die Bandbreite der Beobachtungen, η_{pr} der Signalverlust durch das Korrelieren und $SEFD_i$ und $SEFD_j$ die jeweiligen SEFD's der Antennen sind.

Die Aufnahme erfolgte im MkIII-Modus A, wobei sie *Scanlänge* 6.5 Minuten betrug. Jede Stunde wurden drei *Scans* aufgenommen, sodass 13 Minuten für T_{sys} -Messungen, *Gainkalibrationen* und *Pointing* verwendet werden konnten. Stationen

Antenne	Durchmesser [m]	Ap. Eff. ^a	T _{sys} at 45° [K]	VLBI Backend	Max BW ^b [MHz]	Dual Pol. ^c	SEFD ^d [Jy]
Haystack	37	0.09	250	MKIII	112	Y	7000
Kitt Peak	12	0.6	220	VLBA	64	Y	8950
Pico Veleta	30	0.5	180	VLBA	112	Y	1450
Metsahovi	14	0.3	350	VLBA	112	N	21000
Hatcreek	8×6m	0.6	300	MKIII	112	Y	6100
Effelsberg	100	0.1	200	MKIV	112	Y	2000
Onsala	20	0.4	300	MKIV	112	N	6600
VLBA ^e	25	0.12 – 0.19	120 – 170	VLBA	128	Y	3500 – 5200
SEST	14	0.6	250	VLBA	112	N	7500

Tabelle 2.1:

Eigenschaften der CMVA-Antennen. Alle Angaben beziehen sich nur auf das 3 mm Empfangssystem.

^a: Apertur Effizienz in Prozent.

^b: Die maximale Bandbreite in MHz.

^c: Polarisationsmessungen möglich (Y) oder nicht möglich (N).

^d: Der Wert SEFD (System Equivalent Flux Density) beinhaltet die Effektivität der Empfänger, die Verluste über die Atmosphäre und die Effektivität des Teleskops.

^e: Seit Frühjahr 2002 mit 3 mm Empfängern ausgerüstet: NL, FD, LA, PT, KP, OR, MK.

mit 8 BBC's (*Baseband Converter*) verwendeten ebenfalls den MkIII-Modus, jedoch wurden hier die Bänder in der gleichen Zeit beschrieben, wie bei Stationen mit 14 BBC's. Für Polarisationsexperimente wurden jeweils eine Hälfte der BBC's für LCP (*Left Circular Polarisation*) und für RCP (*Right Circular Polarisation*) verwendet.

Die Korrelation wurde entweder in Bonn oder in Haystack durchgeführt. Die *Fringesuche* wurde dabei zunächst auf die Kalibratorquellen beschränkt, bis alle Stationsuhren und -raten abgeglichen worden waren.

2002 lief die Finanzierung für das CMVA aus und das Instrument stellte den Betrieb ein. Im gleichen Jahr wurde das IRAM Interferometer auf dem Plateau de Bure als Phasen Array für mm-VLBI verfügbar.

2.1.4 Der Sprint – Das GMVA

Um die exzellente Sensitivität des IRAM Interferometers in Kombination mit den übrigen Antennen zu erhalten, wurde 2003 das “Global mm VLBI Array” (GMVA) als Nachfolger des CMVA gegründet. Das GMVA kombiniert alle verfügbaren Antennen des VLBA mit den Stationen Effelsberg, Pico Veleta, Plateau de Bure, Onsala und Metsähovi in Europa und ist damit derzeit ca. 3–4 mal empfindlicher als das VLBA alleine. Es wird derzeit eine Winkelauflösung von $50\mu\text{as}$ erreicht. Dabei beschränkt sich das GMVA nicht nur auf Wellenlängen von 3mm, sondern experimentiert ebenfalls mit Empfängern bei 2mm (129 und 147 GHz) und bei 1.3mm (215 und 230 GHz).

Bislang finden die 3mm-Kampagnen zweimal im Jahr im April und Oktober jeweils für ca. 5 Tage statt. Die Daten werden hiernach in Bonn korreliert.

Die Standardfrequenz für Kontinuumsbeobachtungen ist 86 GHz. Für Linien-VLBI ist ein Bereich von 84-95 GHz in Effelsberg, Pico Veleta und Plateau de Bure, von 80-90 GHz an den VLBA-Stationen Los Alamos und Hancock und von 80-96 GHz an allen übrigen VLBI-Stationen abgedeckt.

Die europäischen Stationen verfügen über ein MKV-System mit 1 Gbps, die VLBA Stationen über ein MKIV-System mit einem Aufnahmemodus von bis zu 512 Mbps. Empfänger für duale Polarisierung sind in Effelsberg, Pico Veleta und dem VLBI verfügbar, Plateau de Bure und Onsala können bislang lediglich eine Polarisationsrichtung aufnehmen.

In dem Standard-Aufnahmemodus von 512 Mbit/s werden 4 *Scans* mit einer Länge von 220s alle 15 Minuten aufgenommen. Der Zeitraum zwischen den *Scans* beträgt hier 11.3min und ist damit groß genug, um Messungen der Systemtemperatur, der *Gainkurve* und des *Pointings* einzufügen. Bei diesem Modus liegt die Bandbreite bei 128 MHz (16 Zwischenfrequenzbänder mit je 8 MHz Bandbreite und 2 *Bit Sampling* in linkszirkularer Polarisierung oder 8 Zwischenfrequenzbänder mit je 8 MHz Bandbreite und 2 *Bit Sampling* je in links und rechtszirkularer Polarisierung), was im Idealfall zu einer Verbesserung der Sensitivität entsprechend der Radiometerformel um einen Faktor $\sqrt{2}$ gegenüber früheren Messungen mit 256 Mbit/s führt. Die europäischen Stationen erreichen mit dem MKV-System inzwischen Aufnahme-raten von 1 Gbit/s, dieses System ist jedoch noch nicht bei den VLBA-Stationen

Antenne	Durchmesser [m]	Zenith T_{sys} [K]	Gain [K/Jy]	Ap. Eff.	SEFD [Jy]
Effelsberg	100.0	130.0	0.140	0.10	929
Plateau de Bure	31.0	120.0	0.180	0.65	667
Pico Veleta	30.0	120.0	0.140	0.50	857
VLBA	25.0	120.0	0.030	0.17	4000
Onsala	20.0	250.0	0.053	0.40	4717
Metsähovi	14.0	300.0	0.017	0.30	17647

Tabelle 2.2:

Eigenschaften der GMVA-Antennen. Alle Angaben beziehen sich nur auf das 3 mm Empfangssystem.

implementiert.

Mit diesem Instrument (GMVA) wird eine Sensitivität von 40 mJy in 20 Sekunden oder 1.2 mJy in 12 Stunden erreicht (<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/vlbi/globalmm/index.html>).

In Tabelle 2.2 sind die Teleskopparameter unter der Voraussetzung von einer Zenith-Opazität von ≤ 0.1 aufgelistet.

Zukünftig sollen weitere Teleskope bei diesen Messungen mitarbeiten, wie z.B. Yebes in Spanien und das APEX in Chile. Die zeitgleiche Beobachtung mit Teleskopen auf der Nord- und Südhalbkugel beschränkt sich dabei auf wenige Quellen wie z.B. das galaktische Zentrum. Der bei diesen Beobachtungen zu erwartende *Beam* ist stark elliptisch und die gesteigerte Winkelauflösung demzufolge nur in eine Richtung vorhanden. Bei Beobachtungen des Galaktischen Zentrums kann diese Kombination von Instrumenten von großem Nutzen sein, da sowohl mit dem APEX Teleskop, als auch mit dem Pico Veleta und dem Plateau de Bure Messungen bei Frequenzen > 100 GHz möglich sind wodurch die Winkelauflösung im Vergleich zu dem derzeit in Betrieb befindlichen GMVA erheblich gesteigert wird.

2.2 Die Beobachtungen und Datenreduktion

Die hier in dieser Arbeit untersuchten 3 mm-Beobachtungen wurden zwischen 1993 und 1999 mit den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Instrumenten getätigt.

Die Epochen wurden mit dem 'MKIII' VLBI System aufgezeichnet und entweder in Bonn oder in Haystack korreliert. Anschliessend wurden die Daten mehrfach *gefringed*, d.h. eine mit einer in Haystack entwickelten Software (HOBS, Haystack Observatory Software) nach dem Korrelationsmaximum im *Delay-Rate*-Fenster gesucht. Dieser Vorgang ist iterativ, dass heisst es wurden bei jeden Durchgang die Suchfenster (*Delay, Rate*) verkleinert. Jeder neue *Fringe* ergibt mit den bereits vorhandenen eine Lösung der *Closure*phasenbeziehung (Cornwell (1989)) und damit einen weiteren Datenpunkt für die anschliessende Auswertung. Wenn die Suchfenster zu klein gewählt werden, besteht die Möglichkeit, Rausch*peaks* als *Fringepeaks* zu detektieren. An diesem Punkt sollte die *Fringesuche* abgebrochen und mit der Kalibration begonnen werden.

Die Kalibration erfolgt mit dem *Caltech-Package*. In die Kalibration fliessen die während der Messung aufgenommenen Parameter ein. So wird die Systemtemperatur, die *Gainkurve*, aber auch die bei Einzelteleskop-Messungen erhaltenen Flussdichten der einzelnen Quellen in das Kalibrationsfile eingelesen. Die von Gómez und Marscher zu Verfügung gestellten Daten bei 22 und 43 GHz (Kap. 4) waren bereits in AIPS kalibriert worden und wurden wie auch die 3 mm Beobachtungen für diese Arbeit mit *Difmap* kartiert.

Kapitel 3

Die Quellen

3.1 Die Auswahl der Quellen

Die Beobachtungskampagnen Mitte der neunziger Jahre waren, wie in Kapitel 2 beschrieben, als Testmessungen für VLBI bei höchsten Frequenzen zu betrachten. Es wurden diesem Status entsprechend die bei 86 GHz-Einzelteleskop-Beobachtungen hellsten AGN beobachtet. Zwischen 1993 und 1999 waren dies 36 Quellen zwischen 0.8 und 28 Jy, die in 11 Epochen (Tab. 3.1 und 3.2) die bei einer Frequenz von 86 GHz beobachtet wurden. Die Anzahl der beobachteten *Scans* der einzelnen Quellen differiert stark, wodurch es zu großen Unterschieden in Umfang und Qualität der Datensätzen kommt. Bei einigen Quellen war die Anzahl der *Scans* nicht ausreichend, um eine finale Karte der Intensitätsverteilung zu erstellen.

Wie in Tabelle 3.2 wiedergegeben, wurden einige der Quellen deutlich häufiger beobachtet oder in einer Epoche besonders intensiv. Die Qualität dieser Daten erlaubt es, die Jetstruktur und gegebenenfalls auch die Kinematik der Quellen genauer zu untersuchen. Die Daten werden im Folgenden qualitativ unterteilt in die Kategorien 'nicht detektierbar', 'detektiert' sowie 'detektiert und kartierbar'. Die angegebenen Entfernungen wurden unter der Annahme von folgenden Konstanten errechnet: $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$. Der Positionswinkel ist als positiv definiert beginnend im Norden von 0° – 90° gegen den Uhrzeigersinn und negativ von 0° – -90° mit dem Uhrzeigersinn.

Source	α [J2000]	δ [J2000]	redshift ^a [z]	distance [Mpc]	Flux density ^b [Jy]	kpc /arcsec	m_v [mag]	Morph. Type ^c
0106+013	01 08 38.8	+01 35 00.00	2.107	1738.0	1.39	8.426	18.34	HPQ
0234+285	4C 28.07	02 37 52.4	+28 48 09.00	1.207	1724.4	3.69–5.0	8.360	LPQ/HPQ
0316+413	3C 84	03 19 48.1	+41 30 42.103	0.017	70.34	4.82–4.98	0.341	cD/SyII/NLRG
0355+508	NRAO 150	03 59 29.7	+50 57 50	1.51	1761.9	4.50–4.64	8.542	
0415+134	3C 111	04 18 21.326	+38 01 35.676	0.049	195.3	3.51	0.947	SyI/BLRG
0420-014		04 23 15.801	-01 20 33.063	0.915	1619.3	2.92–4.94	7.851	OV/BL Lac/HPQ
0440-003	NRAO 190	04 42 38.6	-00 17 43	0.844	1579.3	1.3	7.657	OV/HPQ
0528+134	OG 147	05 30 56.416	+13 31 55.148	2.070	1741.7	2.32–7.21	8.444	LPQ
0607-157		06 09 40.9	-15 42 41	0.324	961.4	5.00–8.50	4.661	17.00
0642+449		06 46 32.026	+44 51 16.590	3.408	1554.0	1.30	7.521	OV/LPQ
0804+499		08 08 39.666	*49 50 36.53	1.432	756.0	1.3	8.517	18.3
0827+243		08 30 52.086	+24 10 59.820	0.939	1631.3	1.9	7.909	17.3
0851+202	OJ 287	08 54 48.875	+20 06 30.639	0.306	924.5	1.58–2.50	4.482	14.00
0923+392	4C 39.25	09 27 03.014	+39 02 20.851	0.689	1471.9	5.35–6.40	7.136	17.86
1156+295	4C 29.45	11 59 31.8	+29 14 44	0.729	1497.9	1.70–2.30	7.262	17.00
1226+023	3C 273B	12 29 06.699	+02 03 08.596	0.158	557.0	18.0–28.9	2.701	12.86
1228+126	3C 274	12 30 49.423	+12 23 28.044	0.004	16.81	4.30–4.79	0.081	9.59
1308+326		13 10 28.6	+32 20 44	0.997	1657.3	2.1–2.76	8.035	19.00
1334-127		13 37 39.8	-12 57 25	0.539	1305.0	8.24–8.39	6.328	17.20
1510-089		15 12 50.533	-09 05 59.824	0.360	1031.0	1.9	4.998	16.52
1546+027	OR 178	15 49 29.4	+02 37 01	0.412	1122.2	4.3	5.441	17.20
1611+343	OS 319	16 13 41.0	+34 12 48	1.401	1753.8	2.0–3.70	8.503	17.50
1633+38	4C 38.41	16 35 15.5	+38 08 04	1.807	1761.1	2.08–3.00	8.538	18.05
1638+398	NRAO 512	16 40 29.6	+39 46 46	1.666	1765.1	12.8	8.557	18.50
1641+399	3C 345	16 42 58.809	+39 48 36.996	0.594	1369.8	3.55–7.50	6.641	16.50
1652+398	MRK 501	16 53 52.2	+39 45 37	0.033	134.0	0.86	0.650	14.15
1730-130	NRAO 530	17 33 02.706	-13 04 49.544	0.902	1612.0	6.11–8.50	7.818	18.50
1749+096		17 51 32.818	+09 39 00.731	0.32	953.3	3.82	4.622	16.78
1921-293		19 24 51.0	-29 14 30	0.352	1016.0	4.68	4.926	17.00
1957+405	CYGA	19 59 28.358	+40 44 02.425	0.056	221.3	0.8	1.073	17.04
2005+403		20 07 44.945	+40 29 48.611	1.736	1763.8	1.0	8.551	19.50
2145+067	4C 31.63	21 48 05.458	+06 57 38.606	0.999	1658.2	3.30–7.10	8.039	16.47
2200+420	BL Lac	22 02 43.291	+42 16 39.984	0.069	268.7	2.76–5.49	1.303	14.50
2201+315	4C 31.63	22 03 15.0	+31 45 38	0.298	907.3	3.0	4.400	15.47
2230+114	CTA102	22 32 36.409	+11 43 50.902	1.037	1673.1	2.10–6.62	8.111	17.33
2251+158	3C 454.3	22 53 57.748	+16 08 53.565	0.859	1588.3	4.37–8.40	7.700	16.10

Tabelle 3.1:

Die in dieser Arbeit analysierten Beobachtungen bei 86 GHz.

^a: Rotverschiebung mit $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$

^b: Flussdichte gemessen mit Pico Veleta und Metsähovi

^c: HPQ = High Polarised Quasar, LPQ = Low Polarised Quasar, cD = Core Dominated, SyI-II = Seyfert Type I und II, NLRG = Narrow Line Radio Galaxy, BLRG = Broad Line Radio Galaxy, OV = Optical Variable

Source	Apr.93	Jan.94	Dec.94	Mar.95	Jan.96	Oct.96	Apr.97	Oct.97	Apr.98	Apr.99	Oct.99
0106+013					✓						
0234+285											✓
0316+413								✓		✓	✓
0355+508										✓	✓
0415+134							✓				
0420-014			✓		✓	✓	✓	✓			
0440-003			✓								
0528+134			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
0607-157						✓	✓				✓
0642+449			✓								
0804+499			✓								
0827+243						✓					
0851+202			✓		✓	✓	✓				✓
0923+392			✓		✓	✓					
1156+295			✓			✓					
1226+023				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1228+126						✓	✓				
1308+326			✓		✓						
1334-127					✓		✓				
1510-089			✓								
1546+027						✓	✓				
1611+343			✓		✓	✓	✓				
1633+38						✓	✓				✓
1638+398						✓					
1641+399			✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓
1652+398							✓				
1730-130			✓				✓				
1749+096							✓				
1921-293							✓				
1957+405						✓					
2005+403						✓					
2145+067			✓			✓					✓
2200+420							✓	✓	✓	✓	✓
2201+315											✓
2230+114			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2251+158	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle 3.2:

86 GHz-Beobachtungen der Quellen zwischen April '93 bis Oktober '99. Markiert sind die Zeiträume (Epochen) in denen die einzelnen Quellen beobachtet wurden.

Quelle	Scans	Zeit [std]
0106+013	6	0.75
1510-089	11	3
1652+398	2	0.11
1921-293	3	0.75

Tabelle 3.3:

Nichtdetektierte Quellen bei 86 GHz. Trotz der vergleichsweise langen Beobachtungszeit von 3 Stunden und ausreichender Intensität liegt die Nichtdetektion von 1510-089 unter Anderem an den schlechten atmosphärischen Bedingungen während der Messung.

3.1.1 Nichtdetektionen

Anhand der vorliegenden Daten war es nicht möglich, eine positive Detektion der folgenden Quellen zu erhalten: 0106+013, 1510-089, 1652+398 und 1921-293. Die Anzahl der beobachteten *Scans* zu je 6.5 Minuten, die Epoche in der die Quelle beobachtet wurde, sowie das Zeitintervall in dem die *Scans* liegen, sind in Tabelle 3.3 wiedergegeben. Bis heute wurden jedoch die Beobachtungsmethoden und -techniken fortwährend verbessert, so dass die inzwischen auch um drei Größenordnungen schwächere Quellen wie z.B. NGC 4261 (Middelberg et al. (2005)), mit einer Flussdichte von ≤ 60 mJy, detektiert werden können.

3.1.2 Detektionen

Die in Tabelle 3.4 notierten Quellen konnten als nicht aufgelöste Quellen (Punktquellen) detektiert werden. Für diese Quellen konnten jeweils eine einzelne Gaußkomponenten an den Kern *gefittet* werden, wodurch eine Kernflussdichte und eine Strahlungstemperatur abgeleitet werden konnte.

Die Strahlungstemperatur wurde aus der gemessenen Flussdichte (S_ν), der beobachteten Frequenz (ν), der Rotverschiebung (z) und der großen (b_{maj}) und kleinen Halbachse (b_{min}) der Gaußkomponente in Millibogensekunden errechnet:

$$T_{B,obs} = 1.224 \times 10^{12} \frac{S_\nu(1+z)}{\nu^2 \times b_{min} \times b_{maj}} [\text{K}]$$

Quelle	Flussdichte [Jy]	Strahlungstemperatur [K]
0440-003	0.41 ± 0.08	$3.86 \pm 0.04 \times 10^{11}$
0642+449	0.49 ± 0.09	$8.93 \pm 1.64 \times 10^{11}$
0804+499	0.64 ± 0.12	$6.34 \pm 1.20 \times 10^{11}$
1308+326	1.98 ± 0.40	$1.87 \pm 0.36 \times 10^{11}$
1334-127	3.82 ± 0.76	$2.70 \pm 0.32 \times 10^{11}$
	4.27 ± 0.85	$6.77 \pm 1.11 \times 10^{11}$
1638+398	0.77 ± 0.15	$4.30 \pm 0.80 \times 10^{11}$
1957+405	0.96 ± 0.28	$4.64 \pm 0.07 \times 10^{10}$
2005+403	1.21 ± 0.04	$3.20 \pm 0.11 \times 10^{11}$

Tabelle 3.4:

Quellen, die nicht räumlich aufgelöst werden konnten, werden als Punktquellen bezeichnet. Die Quelle 1334-127 wurde sowohl 1996.07, als auch 1997.28 beobachtet.

3.1.3 Kartierungen

Für die übrigen Quellen konnten hochaufgelöste Karten der Intensitätsverteilung angefertigt werden. In Abhängigkeit des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses konnten für einige der Karten Modellfits erstellt werden. Bei geringem SNR oder einem Jet mit viel Feinstruktur und diffusem Medium (z.B. 3C 84, 3C 345) wurde die Entfernung der Komponenten zum Kern manuell bestimmt. Die Flussdichte für den Kern wurde mittels des verwendeten Programms `Difmap` errechnet, wobei es notwendig ist, eine Gausskomponente an die jeweilige Struktur zu *fitten*. Bei vielen Jetkomponenten konvergiert der *Fit* aufgrund der Feinstruktur nicht oder nicht eindeutig, es wird daher bei dieser Arbeit auf diese Angaben verzichtet und auf die dargestellten Kontourniveaus verwiesen. Am Beispiel 3C 84 (Abb. 3.6) wird die Differenz zwischen der ursprünglichen und der durch Modellfits erstellten Karte deutlich.

Der Großteil der Quellen wurden in den vorliegenden Epochen zum ersten Mal mit einer derartig guten Auflösung beobachtet, desweiteren liegt für einen Teil der Quellen genügend Datenmaterial vor, so dass der zeitliche Verlauf einzelner Jetkomponenten verfolgt und ihre anscheinende Geschwindigkeit errechnet werden kann.

Komponente	Flussdichte [Jy]	Kernabstand [mas]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
K	1.25 ± 0.25	--	0.03 ± 0.006	$5.07 \pm 0.84 \times 10^{11}$
A	0.78 ± 0.15	0.16 ± 0.03	0.11 ± 0.02	$2.35 \pm 0.38 \times 10^{10}$
B	0.14 ± 0.03	0.42 ± 0.11	0.06 ± 0.01	$1.42 \pm 0.23 \times 10^{10}$
C	0.40 ± 0.08	1.60 ± 0.32	0.09 ± 0.02	$1.80 \pm 0.29 \times 10^{10}$

Tabelle 3.5:

Jetkomponenten der Quelle 0234+285 beobachtet bei 86 GHz (Abb. 3.3).

0234+285

Der Quasar 0234+285 wurde bei 86 GHz zum ersten Mal im Oktober 1999 beobachtet. Die Jetstruktur ist einseitig. Auf der Kiloparsec-Skala (Murphy et al. (1993), Abb. 3.1) ist der Jet in Richtung Norden bis zu einem Kernabstand von ca. 5 Bogensekunden (entspricht 41.8 kpc) orientiert, danach knickt der Jet nach Westen ab. Bei 15 GHz (Kellermann et al. (1998), Abb. 3.2) wird ein Jet über eine Länge von 10 Millibogensekunden ebenfalls in nördlicher Richtung beobachtet. Bei 86 GHz zeigt sich, dass der Jet ausgehend vom Kern eine deutliche Struktur in östlicher Richtung bis zu einem Kernabstand von ca. 0.4 Millibogensekunden aufweist (Abb. 3.3). Diese Komponente wurde bereits von Jorstad et al. (2001) als eine bei 22 GHz nicht aufgelöste Komponente beschrieben. Die hier gezeigten hochaufgelösten Karten ermöglichen nun eine darüber hinaus detaillierte Darstellung des inneren Kernbereiches. Auf einer Distanz von ca. 0.5–0.8 mas Kernabstand ist keine Jetstruktur zu erkennen, erst bei einer Entfernung von ca. 1.5 mas wird der Jet wieder in nördlicher Richtung sichtbar. Für die Epoche Oktober 1999 ist es möglich, eine Kern- und drei Jetkomponenten zu modellieren. Die Flüsse, Abstände, Größen und Strahlungstemperaturen sind in Tabelle 3.5 notiert.

Fügt man die Beobachtungen der verschiedenen Frequenzen zusammen, lässt sich eine großskalige Spiralstruktur des Jets ableiten. Um diese Struktur vollständig zu erfassen, ist es sinnvoll, den Frequenzbereich der Beobachtungen dichter zu *samplen* und sowohl im Millimeter-, als auch im Zentimeterwellenbereich besser zu überdecken. Der Winkel zur Sichtlinie liegt ausgehend von den ermittelten Geschwindigkeiten (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/allsources.shtml>) von $\beta_{app} = 13.44 c$ bei ca. $5^\circ \pm 3^\circ$.

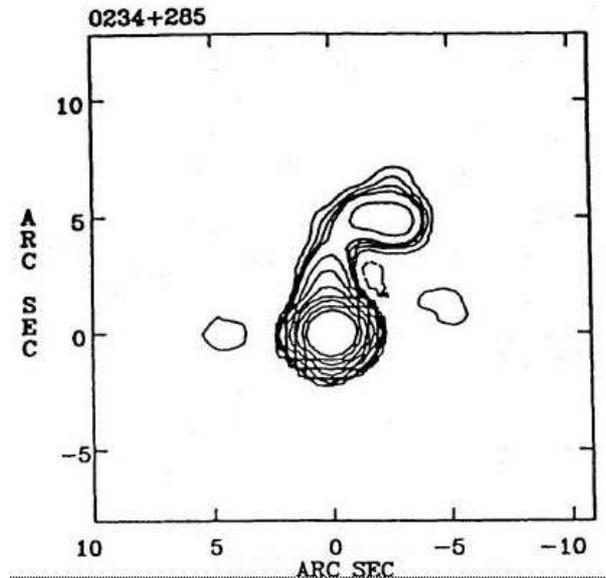


Abbildung 3.1:

18 cm Beobachtung von 0234+285 (Murphy et al. (1993)). Die Kontourniveaus sind $0.99 \times (-4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 8, 16, 32, \dots)$ mJy beam⁻¹.

3C 84

Der AGN im Inneren der Seyfert II Galaxie NGC 1275 (Per A) zeigt entsprechend ihres morphologischen Typs eine *Jet-Counterjet* Struktur und dementsprechend keine superluminalen Geschwindigkeiten. Diese Quelle war die erste, die bei einer Frequenz von 100 GHz beobachtet wurde (Readhead et al. (1983b)). Bei diesen hochfrequenten Beobachtungen (Oktober 1981) wurde mit OVRO eine Flussdichte von (53 ± 5) Jy gemessen, ein halbes Jahr früher (April 1981) bei 22 GHz eine Flussdichte von 50 Jy (Readhead et al. (1983a)). Im Gegensatz zu den Beobachtungen bei 100 GHz wird bei dieser geringen Frequenz eine höhere Flussdichte erwartet. Offensichtlich handelt es sich hierbei um die Beobachtungen des Abfalls der Flussdichte nach einem starken Ausbruch zwischen 1979 und 1980 der von Dent et al. (1983) ursprünglich beobachtet wurde. Bei diesen Messungen wurde eine Zeitverzögerung zwischen dem *Flare* bei 89 GHz und dem bei 31 GHz von 0.7 Jahren festgestellt. Bei einer Verzögerung zwischen 31 und 22 GHz von nur einigen Wochen, sind die hohen Flussdichten im April 1981 mit dem bei 89 und 31 GHz beobachteten *Flare* korreliert.

Die erste Beobachtung bei 86 GHz ergab eine Struktur, die deutlich kompakter zu

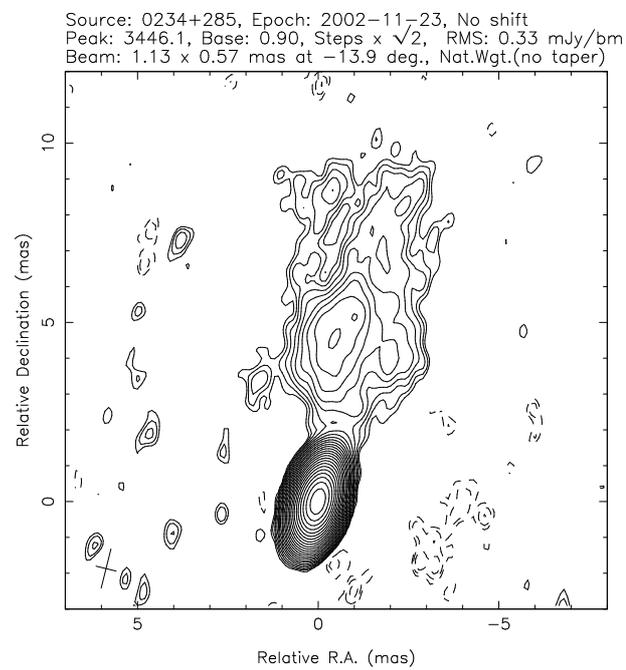
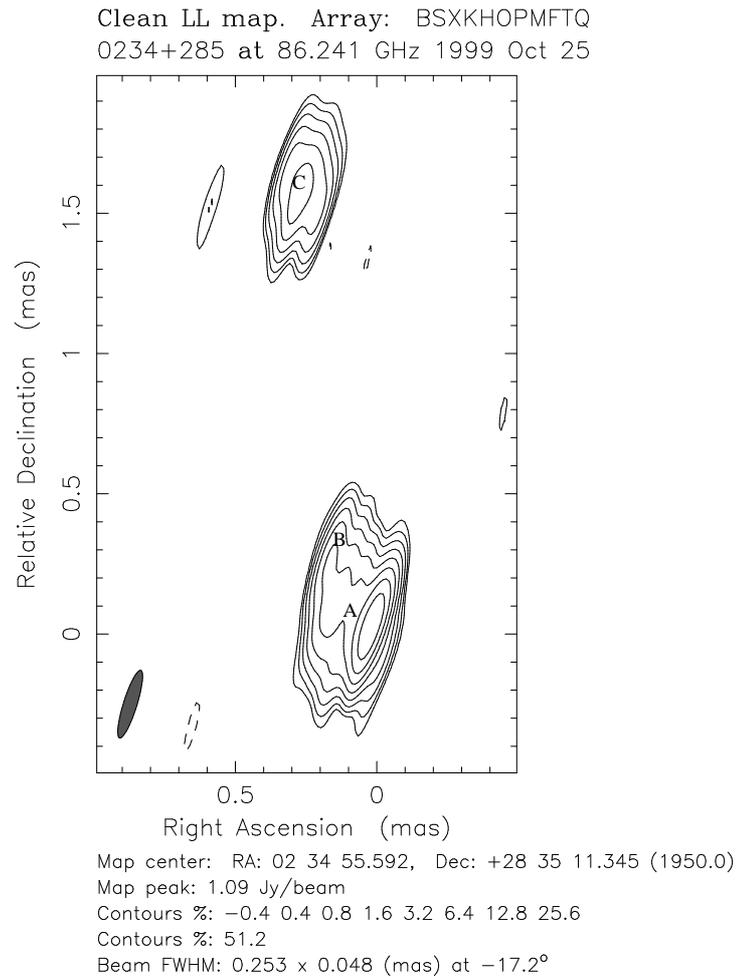


Abbildung 3.2:

2 cm Beobachtung von 0234+285 (Kellermann et al. (1998)) Im Gegensatz zu Bogensekundenskala (Abb. 3.1) verläuft auf Millibogensekundenskala der Jet gradlinig (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/sourcepages/0234+285.shtml>).

**Abbildung 3.3:**

3 mm Beobachtung von 0234+285 im Oktober 1999. Unterhalb einer Millibogensekunde Winkelauflösung fragmentiert der Jet in mehrere Komponenten (A-C, Tab. 3.5). Im Gegensatz zu Abbildung 3.2 ist der Jet zunächst nach Osten orientiert. Ein Vergleich der drei unterschiedlichen Wellenlängen deutet auf eine Rotation des Jets im Uhrzeigersinn mit wachsendem Abstand zum Kern hin.

sein schien, als die Beobachtungen bei 22 GHz. Es wurde lediglich eine Kernstruktur, sowie eine dem Jet zugeordnete Komponente detektiert. Die Beobachtungen bei 22 GHz zeigen eine Kernkomponente, die nach Südwesten elongiert ist, sowie eine Jetstruktur in südlicher Richtung. Die Beobachtungen bei 86 GHz erfolgten mit den Teleskopen OVRO und Hat Creek, die Beobachtungen bei 22 GHz mit OVRO, Effelsberg, Haystack, NRAO, VLA und dem Algonquin Radio Observatory. Die dichtere *uv*-Bedeckung bei 22 GHz und die Beobachtungen auf langen Basislinien ergab im Gegensatz zu 86 GHz eine deutlich bessere Datenqualität. Die ersten Hinweise auf eine Counterjetstruktur bei 86 GHz wurden erst 1988/1989 von Bååth et al. (1992) gefunden. Die Qualität der Daten erlaubte jedoch keine eindeutige Detektion des Counterjets.

3C 84 wurde bei 86 GHz im Oktober 1997, April 1999 und Oktober 1999 beobachtet. Die Daten von Oktober 1997 waren nicht von ausreichender Qualität, so dass lediglich Karten von zwei Epochen für diese Dissertation vorliegen. Zum ersten Mal ist hier mit einer Auflösung von 0.15 Millibogensekunden (0.34 pc bei $z = 0.017$) in beiden Epochen die Counterjetstruktur im Norden des Kerns eindeutig nachgewiesen. Die Jetstruktur ist nicht durchgängig und unterbrochen auf einer Länge von 0.2 Millibogensekunden im April 1999 und 1.0 Millibogensekunden im Oktober 1999. Beobachtungen bei 8 und 22 GHz ergaben ein mit $\alpha = 1.7$ stark invertiertes Spektrum der Counterjetstruktur. Aufgrund dessen und der nicht durchgängigen Beobachtbarkeit wird Frei-Frei-Absorption durch den Staubtorus angenommen (Vermeulen et al. (1994)). Bei dem Versuch, Modellkomponenten an die erstellte Karte zu *fitten*, stellte sich heraus, dass einige in den Karten offensichtliche Komponenten bei einem *Fit* nicht berücksichtigt wurden und dafür durch das Programm Komponenten *gefittet* wurden, die nicht mit den Karten übereinstimmen (Abb.3.6). Trotz guter Kalibration der Daten sind offensichtlich zuviele freie Parameter vorhanden, die eine eindeutige Zuordnung verhindern.

Bei der Jetstruktur von 3C 84 zeigen sich einige Auffälligkeiten. So finden sich im südlichen Teil des Jets bei 86 GHz mehrfach Krümmungen und zahlreiche Knoten entlang einer Linie des Positionswinkels $PA \simeq -130^\circ$ (Abb. 3.5). Bei längeren Wellenlängen bildet der Jet in einem Abstand von ca. 5–15 Millibogensekunden ausgedehnte Strukturen sowohl im Norden, als auch im Süden (Abb. 3.4). Bei letzterer wurde von Lister und Homan (2005) lineare Polarisation in den Epochen 2003 und 2004 bei 15 GHz beobachtet, die durch eine Abbremsung des Materials interpretiert

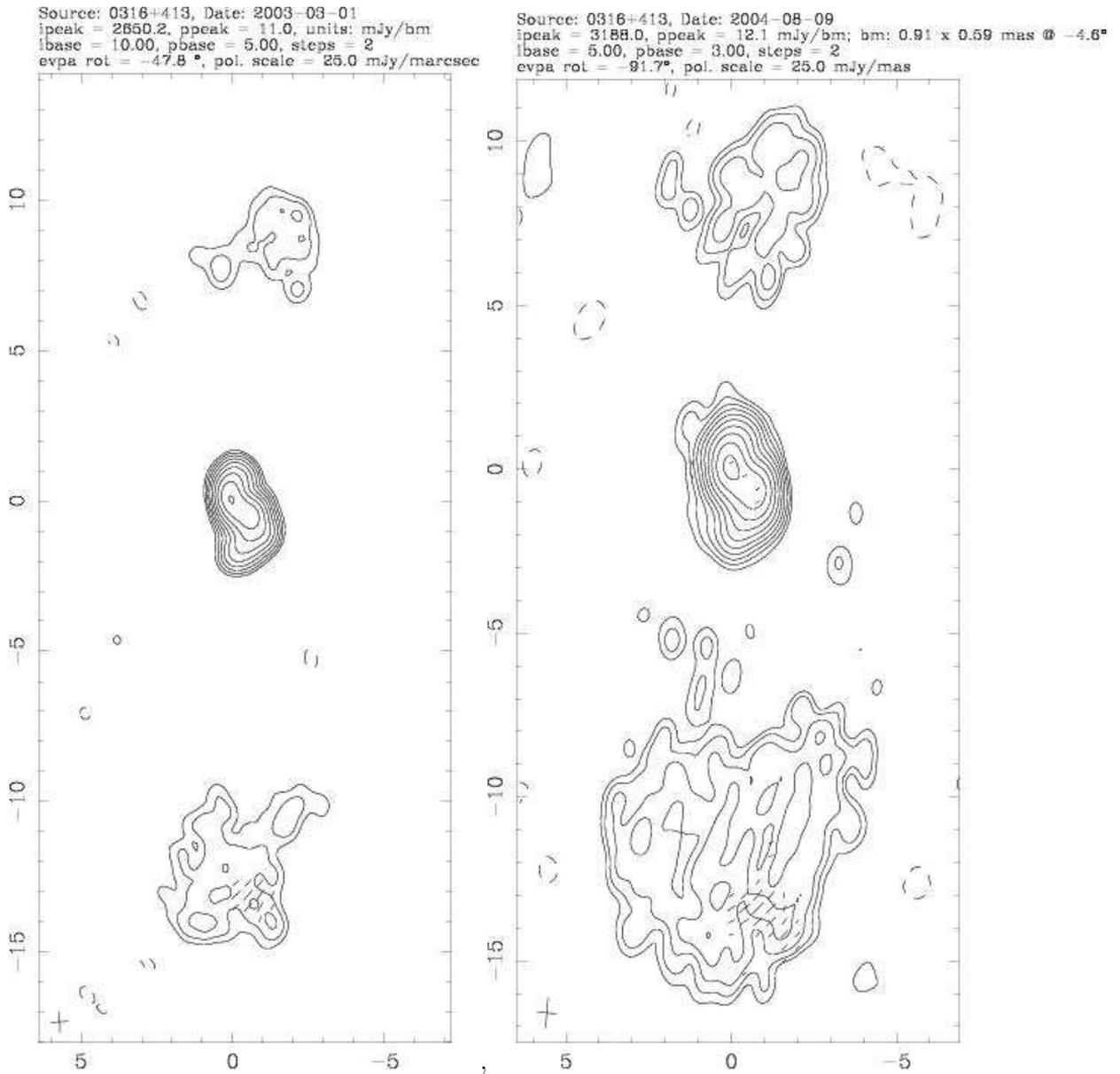


Abbildung 3.4:

15 GHz Beobachtungen von 3C 84 in den Jahren 2003 (links) und 2004 (rechts) (Lister & Homan (2005)). In der südlichen Struktur ist die lineare Polarisation eingezeichnet.

werden. Diese Strukturen bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 0.3 mas/yr von der Kernregion weg (Walker & Anantharamaiah (2003)) was einer scheinbaren Geschwindigkeit von $\beta_{app} = 0.33c$ entspricht. Die zeitliche Extrapolation der beobachteten Struktur ergibt einen Ausstoßzeitpunkt, der Ende der 50'er Jahre stattgefunden haben muss. Zu diesem Zeitpunkt wurde auch ein Anstieg der Gesamtflussdichte verzeichnet, der in der 80'er Jahren seinen Höhepunkt hatte (80 Jy bei 89 GHz (Dent et al. (1983))). Die Counterjetstruktur ist deutlich schwächer und zeigt diese ausgedehnten Strukturen nur bis zu einem Abstand von 10 Millibogensekunden (Walker & Anantharamaiah (2003)). Um derartige Strukturen zu erhalten, ist es wahrscheinlich, dass der Jet in einem Abstand von $ca. 4 \pm 1.5 \text{ pc}$ (entsprechend 10–15 Millibogensekunden) auf ein umgebendes Medium trifft, welches die Bewegung der Komponenten bremst.

Frühere Beobachtungen (Dhawan et al. (1998)) sowie aktuelle Beobachtungen des heissen Röntengases (Dunn et al. (2006)) deuten auf eine Präzession des Jets hin. Damit zusammenhängend stellt sich die Frage nach der Bewegung der einzelnen Jetkomponenten:

Bewegen sich die Komponenten auf gradlinigen Bahnen oder folgen sie einer mehrfach gekrümmten Jetbahn?

- Model mit gradlinigen Bahnen

Da eine offensichtliche Jetkrümmung beobachtet wird, können in diesem Fall die Komponenten in unterschiedlichen Winkeln ausgestoßen werden bzw. worden sein. Es werden sowohl beim Jet, als auch beim Counterjet keine gradlinigen Strukturen in Süd- bzw. Nordrichtung beobachtet. Die Krümmungen des Jets ist in diesem Modell darauf zurückzuführen, dass aufgrund der Präzessionsbewegung des Kerns die Komponenten in einem zeitlichen Abstand und mit leicht unterschiedlichen Winkeln zur vorherigen Komponente ausgestoßen werden. Vergleichbar ist dieses mit einer Kreisbewegung und der Bewegung der Komponenten auf der Oberfläche eines Konusses. Aus den hier analysierten Daten lässt sich ein Öffnungswinkel für den Konus von 35° – 45° ableiten und ist damit konsistent mit den Beobachtungen von Dhawan et al. (1998) bei 15 und 43 GHz, der 40° als Öffnungswinkel angibt. Entlang dieser Bahnen ist die Existenz eines dichten interstellares Mediums, welches dem Druck der Komponenten permanent standhält, unwahrscheinlich. Das Medium würde durch den Jet so weit nach Außen zusammen geschoben, bis sich die Masse soweit

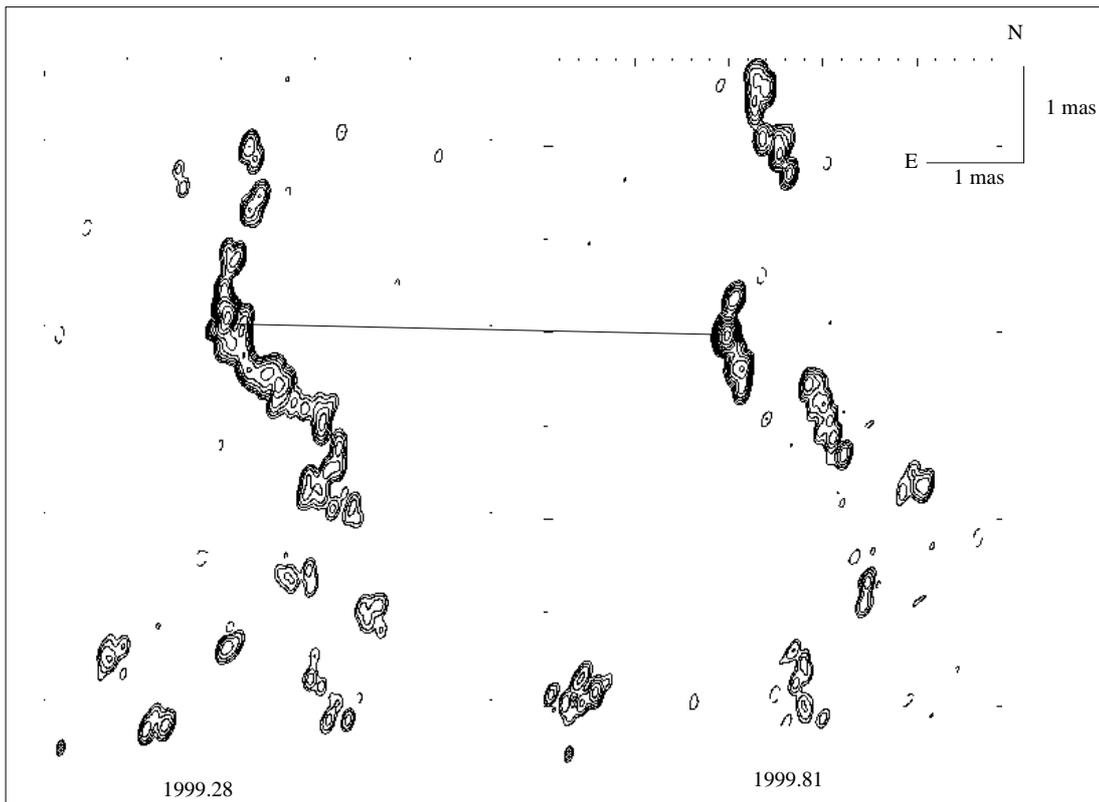


Abbildung 3.5:

86 GHz Beobachtungen von 3C 84 von den Epochen 1999.28 und 1999.81 die in dieser Arbeit analysiert wurden. Die gesamte Karte umfasst nur den zentralen Bereich der in Abbildung 3.4 dargestellt ist. Die Beobachtungen bei 86 GHz zeigen eine viel detailreichere Jetstruktur als die Beobachtungen bei 15 GHz. Die Unterschiede zwischen den beiden nur Monate auseinanderliegenden Beobachtungen sind auf Unterschiede in der Datenqualität und Variationen in der Jetstruktur zurückzuführen. Die Jet-Counterjetstrukturen sind in beiden Epochen deutlich in Nord-Südrichtung zu erkennen. Die Kernstruktur ist durch eine Linie gekennzeichnet.

erhöht hat bzw. die Vorwärtsbewegung des Jets sich soweit verringert hat, dass sich ein Druckgleichgewicht einstellt hat. Der Jet würde an dieser Stelle das Medium nicht weiter durchdringen oder verschieben.

Für das umgebene Medium wurde eine *ad hoc* Dichte vergleichbar mit der des Interstellaren Mediums (1 cm^{-3}) innerhalb der Gasverteilung einer Galaxie angenommen. Damit ergibt sich unter der Annahme für das bewegte Volumen ein Wert für die Masse des aufgeschobenen Mediums von $1.88 \times 10^{34}\text{g}$, also etwa 10 Sonnenmassen. Um einen leeren Raum mit einem Volumen dieser Größenordnung zu füllen, werden bei einer Jetgeschwindigkeit von $0.23c$ 138 Jahre benötigt. Zu Beginn der Aktivität musste das ISM durch den Jet verdrängt werden, wobei die Geschwindigkeit des Jets vermutlich durch das ISM gebremst wurde und die Jetmasse deutlich geringer gewesen ist, als es jetzt beobachtet wird. Durch den permanenten Nachfluß von Materie durch den Jet und das damit verbundene Auftreffen auf das gestaute Medium, ist ein Aufheizen dieses Mediums zu erwarten. Die derzeit verfügbaren Infrarotdaten liegen in keiner genügend hohen Winkelauflösung vor (notwendig $\leq 5\text{ mas}$), so dass eine Unterscheidung zwischen dem vermutlich ebenfalls aufgeheiztem Staubtorus in direkter Umgebung des AGN und des durch den Jet komprimierten und verschobenen Mediums möglich wäre, jedoch ist die detektierte Polarisierung ein guter Hinweis auf die Abbremsung des Jetmaterials durch das ISM. Infrarotspektroskopie mit hoher spektraler Auflösung könnte dazu genutzt werden nach Emissionslinien zu suchen, die in ihrer Linienform durch Stoßfronten beschrieben werden können.

- Model einer mehrfach gekrümmten Bahn

Bei diesem Modell bewegen sich die Komponenten entlang einer gekrümmten Bahn. Um eine solche Mehrfachkrümmung zu erzeugen, müssen äußere Einflüsse wie zum Beispiel ein umgebendes Medium auf den Jet wirken, die zu einer Abbremsung und Umlenkung des Jets führen. Da die Krümmungen des Jets abwechselnd nach Osten und Westen weisen, ist eine unregelmäßige Verteilung dieses Mediums anzunehmen. Desweiteren muss die Masse der einzelnen Komponenten im Medium so hoch sein, dass der Jet abgelenkt wird, ohne das Medium langfristig zu verschieben und damit den Jetverlauf zu ändern (siehe 'gradlinige Bahn'). Bei den beobachteten Jetbiegungen ist eine hohe

Polarisation zu erwarten, die durch die Abbremsung und Umlenkung des Jet-mediums zustande kommt.

Die bislang vorliegenden Daten lassen keinen eindeutigen Schluss über die Jetbahn zu, wobei eine Präzession des Jets als wahrscheinlich anzusehen ist, da weniger extreme Bedingungen an das umgebene ISM zu richten sind. Es wird entlang der Jetbiegungen keine nennenswerte Polarisation detektiert und die partielle 'Verklumpung' des ISMs im Verlauf einer Jetbahn ist unwahrscheinlich, da die 'Lebensdauer' von kompakten Wolken hoher Masse bei der großen Energiezufuhr in der Parsec-Umgebung des Supermassiven Schwarzen Loches extrem kurz ist. Um die einzelnen Komponenten mit hoher Genauigkeit zu verfolgen, ist ein *Monitoring*-Programm mit dichter zeitlicher Abfolge (halbjährliche Beobachtungen über einen Zeitraum von ca. 3 Jahren) notwendig. Da die Jetkrümmung nicht ausschliesslich im Frequenzbereich von 86 GHz beobachtet wird, ist es für nachfolgende Programme sinnvoll, diese Beobachtungen mit dem VLBA bei 22 und 43 GHz durchzuführen, da hier zum Einen die wetterbedingten Ausfälle deutlich geringer sind als bei 86 GHz, zum Anderen mehr Epochen in einem Jahr beobachtet werden können, als mit VLBI bei 86 GHz. Vergleichbar mit den VLBA-Messungen von 3C 454.3 (vgl. Kap.4) sollte diese Quelle über einen Zeitraum von 2–3 Jahren mit jeweils 4–5 Epochen/Jahr gemessen werden. Dabei wäre es ausreichend, die *Scans* auf einen Zeitraum von 1.5–2 Stunden zu begrenzen. Trotz der geringeren Winkelauflösung, sollte es bei diesen Frequenzen gut möglich sein, Komponenten entlang der Jetbahn zu verfolgen und damit die Frage nach dem Ursprung der Bahnkrümmung zu beantworten. Anzustreben wären ebenfalls Beobachtungen hoher Winkelauflösung im Infraroten, um sowohl den Staubtorus, als auch eventuell aufgestautes und erhitztes Medium nachzuweisen.

NRAO 150

Die Quelle NRAO 150 ist zum ersten Mal von Pauliny-Toth 1966 katalogisiert worden und wird seit den 80ern regelmässig im mm-Bereich beobachtet. Durch die sehr geringe Galaktische Breite von -1.6° war bis vor Kurzem eine optische Identifizierung nicht möglich und damit die Rotverschiebung der Quelle unbekannt. Im März 2005 konnte ein Spektrum im Infrarot-Bereich mit dem 4.2 m William Herschel Teleskop auf La Palma (Spanien) aufgenommen werden und anhand einer $H\alpha$ -Linie

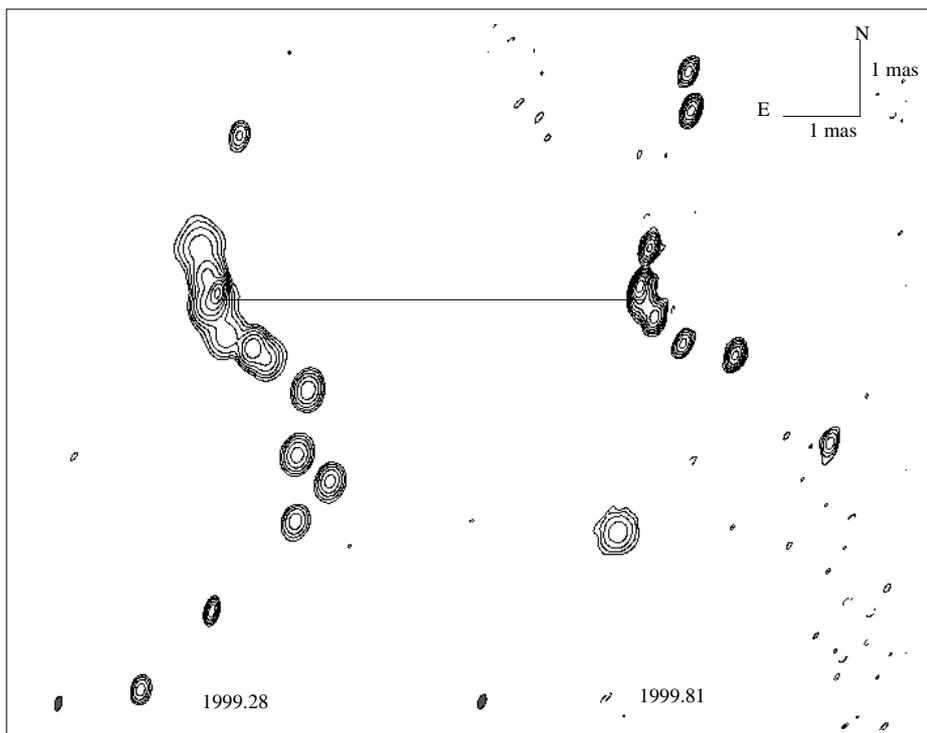


Abbildung 3.6:

Modelkomponenten von 3C 84 in den Epochen 1999.28 und 1999.81.

Die Datenbasis ist identisch mit der aus Abbildung 3.5, hierbei wurde jedoch die Jetstruktur durch Verwendung von Gausskomponenten genähert. Dadurch werden nur die hellsten Strukturen wiedergegeben. Für schwache/diffuse Jetstrukturen ist diese Art der Modellierung dementsprechend wenig geeignet. Konsistent finden sich in beiden Analysemethoden eine Variation der Jetstruktur auf Monatsbasis.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1999.28	1.87 ± 0.37	0.06 ± 0.01	$2.15 \pm 0.25 \times 10^{11}$
	1999.81	1.82 ± 0.36	0.07 ± 0.01	$1.31 \pm 0.10 \times 10^{11}$

Tabelle 3.6:

Eigenschaften des Kerns der Quelle NRAO 150 bei 86 GHz. Wie in Abb. 3.7 zu ersehen, ist der Kern nicht durch die Beobachtung aufgelöst.

zum ersten Mal für diese Quelle eine Rotverschiebung von $z = 1.51$ bestimmt werden (Agudo priv.comm.) Im Zentimeterwellenlängenbereich gehört NRAO 150 zu den stärksten variierenden Quellen. Beobachtungen bei 2.2 GHz (Chen et al. (2001)) zeigen eine ausgedehnte Jetstruktur von fast 80 mas in Richtung Nordosten (Positionswinkel $\sim 30^\circ$). Bei dieser Beobachtung handelt es sich um eine einzige Epoche von Januar 1997, so dass keine Variation im Jet über einen längeren Zeitraum untersucht werden konnte. Die in der vorliegenden Arbeit erstellten Karten von NRAO 150 bei 86 GHz in den Epochen 1999.28 und 1999.82 zeigen eine leichte Variation des Positionswinkels über den beobachteten Zeitraum. Die Jetrichtung ändert sich von Ost (1999.28) nach Nord–Ost (1999.82). Spätere Beobachtungen ab Oktober 2001 zeigen einen Rücklauf des Jets auch bei 86 GHz in südöstliche-Richtung (Agudo priv. comm.). Aus Daten der Epochen 1999.28 und 2001–2004 leitet Agudo eine Präzession des Jets von 10° pro Jahr, eine Amplitude von $\geq 50^\circ$ und eine Periode von ≥ 8.3 Jahren ab. Ausgangspunkt dafür ist die Annahme, dass der Scheitelpunkt im April 1999 (1999.28) erreicht wurde. Die Beobachtungen von Oktober 1999 (1999.81) zeigen im Gegensatz dazu jedoch deutlich, dass sich in diesem Zeitraum die Jetrichtung um mehr als 30° nach Norden verlagerte und somit die Amplitude größer sein muss als von Agudo angenommen. Geht man von einem Scheitelpunkt im Oktober aus, verringert sich die Periode um etwa ein halbes Jahr auf 7.8 Jahre und die Amplitude vergrößert sich auf $\sim 100^\circ$. Mit den hier vorgestellten Epochen, sowie der von Agudo ermittelten Rotverschiebung, ist es für diese Quelle zum ersten Mal möglich, Geschwindigkeiten für zwei Komponenten mit bis zu 0.32 mas/yr anzugeben, was einer Geschwindigkeit von $\beta_{app} = 2.7c$ entspricht.

Komponente	Epoche	Kernabstand	Geschwindigkeit
		[mas]	[mas/yr]
A	1999.28	2.09 ± 0.42	
B	1999.28	1.29 ± 0.26	
C	1999.28	0.68 ± 0.14	
D	1999.28	0.34 ± 0.07	
	1999.81	0.51 ± 0.10	0.32
E	1999.28	0.20 ± 0.04	
	1999.81	0.25 ± 0.03	0.09

Tabelle 3.7:

Modellkomponenten der Quelle NRAO 150 bei 86 GHz. In Abb. 3.7 sind die einzelnen Komponenten markiert, die Komponenten A, B und C sind unverändert, während die Komponenten D und E im Beobachtungszeitraum ihre Position verändern.

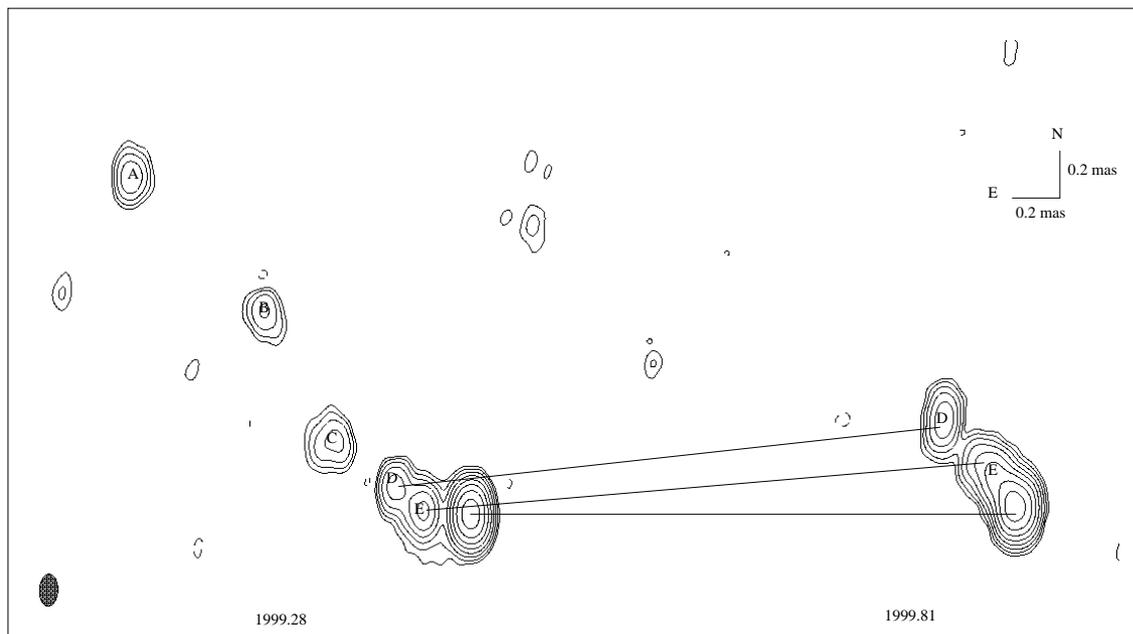


Abbildung 3.7:

86 GHz Beobachtungen von NRAO 150 in den Epochen 1999.28 (links) und 1999.81 (rechts). Die Jetrichtung in Kernnähe hat sich in einem halben Jahr um mehr als 30° von Osten nach Nordosten verlagert. Die kernnahen Jetkomponenten konnten über diesen Zeitraum beobachtet und Geschwindigkeiten bis zu $\beta_{app} = 2.7c$ ermittelt werden.

3C 111

Die Quelle 3C 111 wurde im Zuge der hier vorgestellten Daten nur während einer Epoche im April 1997 beobachtet. Bei dieser Quelle handelt es sich um ein Fanaroff–Riley Typ II Objekt.

Frühere Beobachtungen bei 43 GHz (Alef et al. (1998)) zeigen eine mehrkomponentige Jetstruktur im Juli und September 1996 mit einer Ausdehnung von 1.1 mas, deren Richtung mit der großskaligen Struktur übereinstimmt. Im Januar 1996 wurde bei dieser Quelle mit dem IRAM Interferometer auf dem Plateau de Bure ein Ausbruch mit Flussdichten von >10 Jy bei 90 GHz beobachtet. Eine Folge dieses Ausbruches könnten die von Alef kartierten Komponenten sein, unter der Annahme, dass sich die entfernteste Jetkomponente mit einer scheinbaren Geschwindigkeit von $4.5c$ bewegt und die Komponenten erst nach Januar 1996 ausgestoßen worden sind. Die Jetrichtung ist Nord-Ost und bis zu einem Abstand von mehr als 3 mas gradlinig. In den Beobachtungen von 1997 sind sechs Komponenten sichtbar. Die geringe Rotverschiebung von 3C 111 mit $z = 0.0485$ ermöglicht eine Auflösung dieser zentralen Komponenten in einem Bereich von wenigen Lichtmonaten. Beobachtungen bei 4.8 GHz (Goetz et al. (1987)) ergaben *Superluminal Motion* von mehr als $3c$ und aus dem 2 cm-Survey gehen Geschwindigkeiten von über $5c$ hervor. Unter der Annahme, dass sich die Komponenten mit Geschwindigkeiten $\leq 5c$ vom Kern wegbewegen, sind alle Komponenten bis zu einem Abstand von ca. 2 ± 0.2 mas nach dem Ausbruch von 1996 entstanden. Die entfernteren Komponenten sind damit entweder vor dem Flussdichteanstieg ausgestossen und bei den 43 GHz Beobachtungen nicht detektiert worden, oder die Geschwindigkeiten sind deutlich höher als bislang vermutet, da etwa $\beta_{app} = 7c$ notwendig wären. Die Zuordnung der Komponenten bei 43 GHz (Alef) und 86 GHz (diese Arbeit), begonnen bei den entferntesten, ergeben $\beta_{app} \geq 8c$. Die Eindeutigkeit ist aufgrund der nicht exakten Geschwindigkeitsangaben nicht gegeben. Desweiteren ist nicht klar ersichtlich, ob alle bei 43 GHz detektieren Komponenten mit den bei 86 GHz detektierten übereinstimmen, bzw. bei höherer Frequenz zusätzliche Komponenten detektiert wurden.

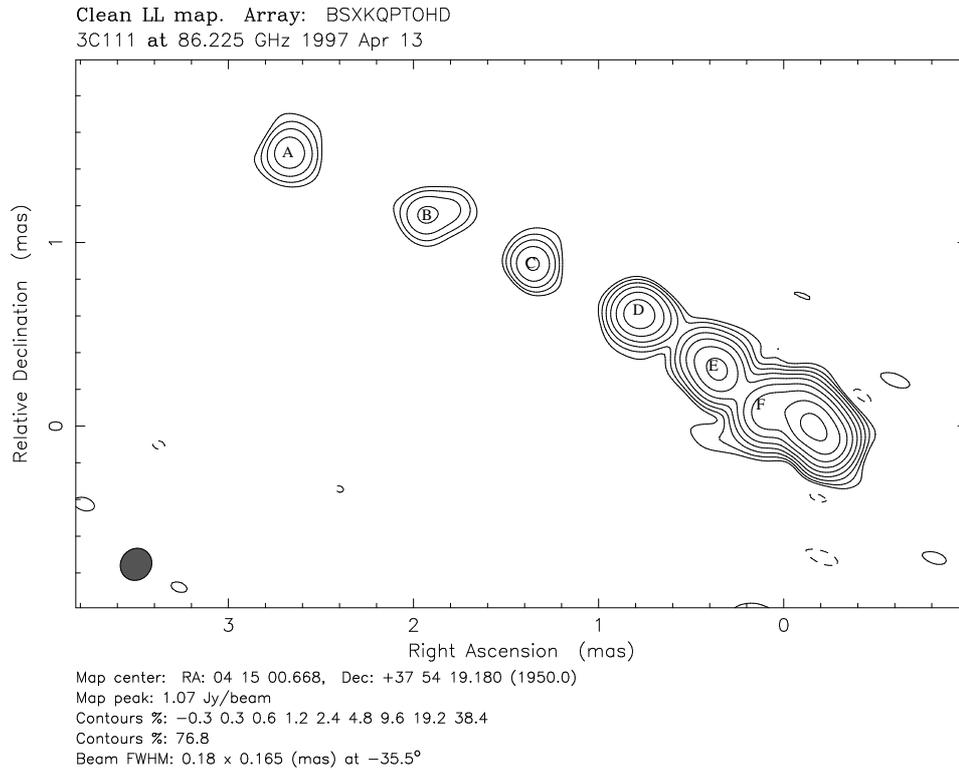


Abbildung 3.8:

86 GHz Beobachtungen von 3C111 im April 1997. Insgesamt besteht dieser Jet aus sechs aufgelösten Komponenten, die in den Tabellen 3.8 und 3.9 verzeichnet sind.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1997.28	1.59 ± 0.32	0.11 ± 0.02	$2.27 \pm 0.31 \times 10^{10}$

Tabelle 3.8:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 3C 111 bei 86 GHz.

Komponente	Epoche	Kernabstand [mas]
A	1997.28	3.07 ± 0.61
B	1997.28	2.24 ± 0.45
C	1997.28	1.63 ± 0.33
D	1997.28	0.97 ± 0.19
E	1997.28	0.49 ± 0.10
F	1997.28	0.11 ± 0.02

Tabelle 3.9:

Modellkomponenten der Quelle 3C 111 bei 86 GHz.

0420-014

Der Flachspektrum–Radio–Quasar 0420-014 wurde in früheren VLBI Beobachtungen bei 8.4 GHz über einen Zeitraum von drei Jahren beobachtet und für fünf Jetkomponenten Geschwindigkeiten abgeleitet (Britzen et al. (2000)). Diese Beobachtungen zeigen eine Jetstruktur, die sich innerhalb von nur wenigen Jahren stark verändert. Die Hauptausrichtung des Jets ist Süden. In einem Kernabstand von ca. 1.5 Millibogensekunden knickt der Jet in einem Winkel von ca. 45° ab, wobei die weitere Richtung nicht fest ist, sondern in einem Zeitraum von weniger als fünf Monaten variiert und sich von Westen nach Osten verlagert. An diesem Knick befindet sich eine sehr langsame Komponente, die in einem Zeitraum von drei Jahren ihre Position relativ zum Kern nur unwesentlich ändert (0.05 mas/yr). Diese Komponente wurde von Britzen als Komponente 'F' bezeichnet. Wie in Kapitel 4 noch gezeigt wird, ist eine anscheinende stationäre Komponente oft eine Region, in der sich die Jetrichtung gravierend ändert.

Bei 86 GHz wurde diese Quelle zwischen 1994 und 1997 in insgesamt fünf Epochen beobachtet, wobei die Epoche 1997.82 die besten Daten enthält. In diesem Datensatz scheint ebenfalls eine Komponente in einem Kernabstand von ca. 2 Millibogensekunden zu sein, jedoch geht aus den Daten bei 86 GHz nicht hervor, ob es sich hierbei um eine stationäre Komponente handelt, da sie den früheren Epochen nicht eindeutig zuzuordnen ist. Die Beobachtungen von Britzen sind für eine Komponentenidentifikation besser geeignet, da das Monitoringprogramm mit drei Beobachtungen pro Jahr um 50% dichter war und die Quelle bei 8.4 GHz deutlich heller ist, als bei 86 GHz. Nur durch die VLBI–Beobachtungen bei 86 GHz ist es

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1994.92	1.62 ± 0.32	0.07 ± 0.01	$1.04 \pm 0.08 \times 10^{11}$
	1996.07	2.37 ± 0.47	0.09 ± 0.02	$9.24 \pm 1.80 \times 10^{10}$
	1996.78	1.68 ± 0.34	0.07 ± 0.01	$1.08 \pm 0.08 \times 10^{11}$
	1997.28	1.37 ± 0.27	0.006 ± 0.001	$1.20 \pm 0.14 \times 10^{13}$
	1997.82	0.30 ± 0.06	0.10 ± 0.02	$9.47 \pm 1.55 \times 10^9$

Tabelle 3.10:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 0420-014 bei 86 GHz. Wiedergegeben sind die Beobachtungsergebnisse über den Zeitraum von ca. drei Jahren. Die Flussdichte variiert dabei um eine Größenordnung. Die deutlich größere Variation der Strahlungstemperatur beruht auf den abgeleiteten Kerndurchmessern. In keinem Fall ist die Kernkomponente räumlich aufgelöst, daher ist die Strahlungstemperatur kritisch zu bewerten.

jedoch möglich, die Jetstruktur vom Kern bis zu einem Abstand von 0.25 Millibosekunden aufzulösen. Der Kernfluß erhöht sich bis 1996.07 auf 2.37 Jy, um dann in den folgenden Epochen wieder abzunehmen. 1997.28 wird eine neue Komponente sichtbar, die sich in einem Abstand von 0.002 mas befindetet. Anhand der Quelle 3C 454.3 wird in Kapitel 4 gezeigt werden, dass es sich hierbei scheinbar um eine typische Intensitätsvariationsabfolge vor und während des Ausstoßes einer neuen Komponente handelt.

0528+134

Der Blazar PKS 0528+134 ist eine der am häufigsten beobachteten Quellen. Bei dieser Quelle wurde ein quasartypisches flaches Radiospektrum beobachtet. 0528+134 zeigt bei 18 cm eine einseitige Jetstruktur auf Kilo-Parsec-Skala in nördlicher Richtung. Beobachtungen bei 15 GHz und 8.5 GHz (Kellermann et al. (1998), Britzen et al. (1999)) zeigen eine Jetstruktur, die in einem Abstand von ≤ 0.5 mas einen Positionswinkel von 20° – 30° und von ≥ 0.5 mas einen Positionswinkel von 5° – 10° aufweist. Bei 43 GHz-Beobachtungen (Krichbaum et al. (1995)) zeigt sich ebenfalls, dass der Jet zunächst in östlicher Richtung vom Kern ausgestoßen wird (Positionswinkel 71°) und bei ca. 0.5 mas Kernabstand nach Norden abknickt.

Bei 86 GHz wurde diese Quelle zwischen Dezember 1994 und April 1999 in insgesamt acht Epochen beobachtet. Die Beobachtungen im Oktober 1997 waren jedoch

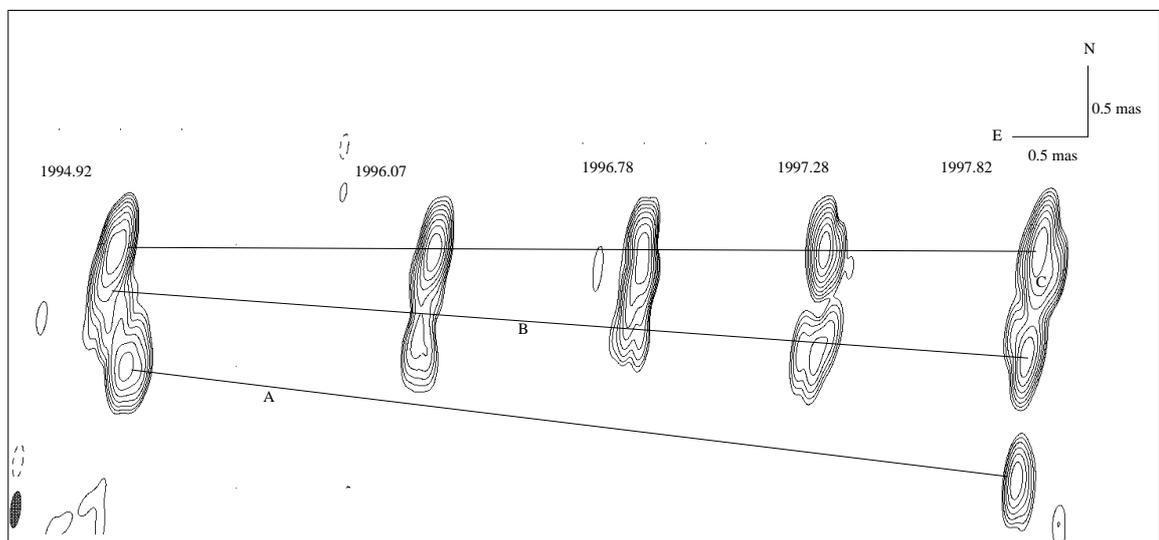


Abbildung 3.9:

86 GHz Beobachtung von 0420-014 in den Epochen 1994.92, 1996.07, 1996.78, 1997.28 und 1997.82 (von links nach rechts). In Tab. 3.11 sind die Parameter der einzelnen Komponenten wiedergegeben.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Kernabstand [mas]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]	Geschwindigkeit [mas/yr]
A	1994.92	0.81 ± 0.16	1.04 ± 0.21	0.11 ± 0.02	$2.11 \pm 0.29 \times 10^{10}$	
	1997.82	0.14 ± 0.03	1.96 ± 0.39	0.08 ± 0.01	$6.93 \pm 0.28 \times 10^9$	0.32
B	1994.92	0.22 ± 0.04	0.81 ± 0.16	0.11 ± 0.02	$5.76 \pm 0.88 \times 10^9$	
	1996.07	0.29 ± 0.06	0.92 ± 0.18	0.07 ± 0.01	$1.87 \pm 0.14 \times 10^{10}$	0.09
	1996.78	0.15 ± 0.03	0.66 ± 0.13			-0.36
	1997.28	0.24 ± 0.05	0.85 ± 0.17	0.05 ± 0.01	$3.04 \pm 0.48 \times 10^{10}$	0.38
C	1997.82	0.24 ± 0.05	0.92 ± 0.18	0.02 ± 0.004	$1.90 \pm 0.30 \times 10^{11}$	0.13
	1997.82	0.63 ± 0.13	0.19 ± 0.04	0.22 ± 0.04	$4.13 \pm 0.57 \times 10^9$	

Tabelle 3.11:

Modellkomponenten der Quelle 0420-014 bei 86 GHz. Die einzelnen Komponenten sind in der Abb. 3.9 markiert. Die Komponente B zeigt die stärkste positionelle Veränderung während des Beobachtungszeitraums. Teilweise wird eine rückläufige Bewegung beobachtet, die durch eine gegen die Sichtlinie geneigte Helixstruktur des Jets erklärbar ist.

nicht ausreichend, um eine Karte zu erstellen. Die Jetstruktur bei 86 GHz ist konform mit den niederfrequenten Beobachtungen. Der Jet wird in östlicher Richtung ausgestoßen und knickt bei einem Kernabstand von ca. 0.5 Millibogensekunden nach Norden. Ebenfalls konnten mit den 3 mm Beobachtungen Geschwindigkeiten von einzelnen Komponenten von durchschnittlich $\beta_{app} = 11\text{--}14 c$ ermittelt werden (Tab. 3.13), für Komponente B sogar 68 c. Diese Geschwindigkeiten liegen deutlich über den von Krichbaum gefundenen Geschwindigkeiten von 4–4.5 c bei 22 und 43 GHz. Auffällig ist hierbei die Zuordnung der Komponentengeschwindigkeiten zu ihrer Platzierung innerhalb der Jetstruktur. Bei den Komponenten C, D, E und F liegt ein oder das Maximum der Geschwindigkeit in einem Bereich von ca. $1.2 \pm 0.3 \text{ mas}$ Kernabstand, bei Komponente B, C und D ebenfalls bei 2.2 ± 0.3 . Dies lässt auf Biegungen im Jet schließen, die an diesen Stellen zum Betrachter hinführen und sich kurz danach wieder vom Betrachter entfernen. Die maximalen Geschwindigkeiten von über 20 c werden nur erreicht, wenn sich der Blickwinkel zum Jet auf unter 2° verringert. Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten von 11–16 c implizieren einen Winkel zur Jetachse von ungefähr 10° , die minimale Geschwindigkeit von 6.6 c (Komponenten C und D, 1996.78) wird bereits bei einem Winkel von $15\text{--}20^\circ$ erreicht. Die Komponenten C und D bewegen sich in den Epochen 1994.92 bis 1997.28 fast gleichmäßig schnell mit einem örtlichen Versatz von $\sim 0.5 \pm 0.2 \text{ mas}$. 1996.07 ist der Winkel zum Jetverlauf 5° , erhöht sich innerhalb eines halben Jahres auf $15\text{--}20^\circ$ und

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1994.92	1.57 ± 0.31	0.04 ± 0.01	$4.97 \pm 1.10 \times 10^{11}$
	1995.09	5.49 ± 1.10	0.001 ± 0.0002	$2.78 \pm 0.45 \times 10^{15}$
	1996.07	1.98 ± 0.39	0.26 ± 0.05	$1.48 \pm 0.22 \times 10^{10}$
	1996.78	0.63 ± 0.13	0.05 ± 0.01	$1.27 \pm 0.20 \times 10^{11}$
	1997.28	0.52 ± 0.10	0.01 ± 0.002	$2.63 \pm 0.30 \times 10^{12}$
	1998.25	1.23 ± 0.24	0.05 ± 0.01	$2.49 \pm 0.41 \times 10^{11}$
	1999.28	2.93 ± 0.59	0.31 ± 0.06	$1.54 \pm 0.23 \times 10^{10}$

Tabelle 3.12:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 0528+143 bei 86 GHz. Die Flussdichte variiert während des Beobachtungszeitraums von fünf Jahren um einen Faktor zehn. Die deutlich ausgeprägte Variation der Strahlungstemperatur beruht auf den abgeleiteten Kerndurchmessern. Während zwei Epochen (1996.07 und 1999.28) ist der Kern räumlich aufgelöst.

verringert sich nach einem weiteren halben Jahr auf weniger als 5° . Das entspricht einer Biegung mit einem Radius von 0.04 ± 0.01 mas oder bei dieser Quelle von 0.36 ± 0.07 pc. Die gesamte Biegung des Jets hat damit eine Länge von 0.72 ± 0.14 pc. Dies scheint sehr hoch, da in keinem Inertialsystem Geschwindigkeiten $> c$ möglich sind. Um das zu erreichen, darf der maximale Radius bei dieser Quelle 5° nicht überschreiten. Ursachen für diese Diskrepanz liegen hauptsächlich in der Berechnung der Geschwindigkeiten. Aufgrund der großen Entfernung dieser Quelle haben Fehler in den Ortsangaben der einzelnen Komponenten gravierenden Einfluß auf die errechnete Geschwindigkeit. So ergibt ein Fehler von 0.3 mas in der Ortangabe eine Variation in der errechneten Geschwindigkeit von über $8c$ und eine Abweichung im Winkel zur Sichtlinie von ca. $10\text{-}20^\circ$. In Abbildung 3.11 ist die Abhängigkeit von Maßstab zu Rotverschiebung aufgetragen.

0607-157

Diese Quelle wurde im Oktober 1996, April 1997 sowie im Oktober 1999 beobachtet. Im Gegensatz zu vielen anderen Quellen in dieser Arbeit, liegen zu 0607-157 nur wenige Beobachtungen vor. Der Jet bei 2 cm Wellenlänge erstreckt sich fast gradlinig in Richtung Osten (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/sourcepages/0607-157.shtml>). Im Gegensatz dazu ist der Jet bei einer Wellenlänge von 43 GHz in westlicher Richtung ausgedehnt. Ähnliche Strukturen werden auch

Komponente	Epoche	Kernabstand [mas]	Geschwindigkeit [mas/yr]
A	1994.92	2.58 ± 0.51	
B	1994.92	1.58 ± 0.32	
	1995.09	2.00 ± 0.40	2.47
C	1994.92	1.08 ± 0.22	
	1995.09	1.33 ± 0.26	1.47
	1996.07	1.91 ± 0.38	0.59
	1996.78	2.08 ± 0.41	0.24
	1997.28	2.50 ± 0.50	0.84
D	1994.92	0.58 ± 0.11	
	1996.07	1.25 ± 0.25	0.58
	1996.78	1.42 ± 0.28	0.24
	1997.28	1.91 ± 0.38	0.98
E	1994.92	0.16 ± 0.03	
	1996.07	0.75 ± 0.15	0.51
	1997.28	1.50 ± 0.30	0.62
	1999.28	2.50 ± 0.50	0.50
F	1996.07	0.12 ± 0.02	
	1997.28	0.92 ± 0.18	0.66
	1999.28	1.91 ± 0.38	0.49
G	1998.25	0.66 ± 0.13	
	1999.28	1.42 ± 0.28	0.74
H	1999.28	0.50 ± 0.10	

Tabelle 3.13:

Modellkomponenten der Quelle 0528+143 bei 86 GHz. Die Komponenten C bis G verändern während des Beobachtungszeitraums ihren relativen Abstand zum Kern. In Abb. 3.10 kann diese Bewegung verfolgt werden.

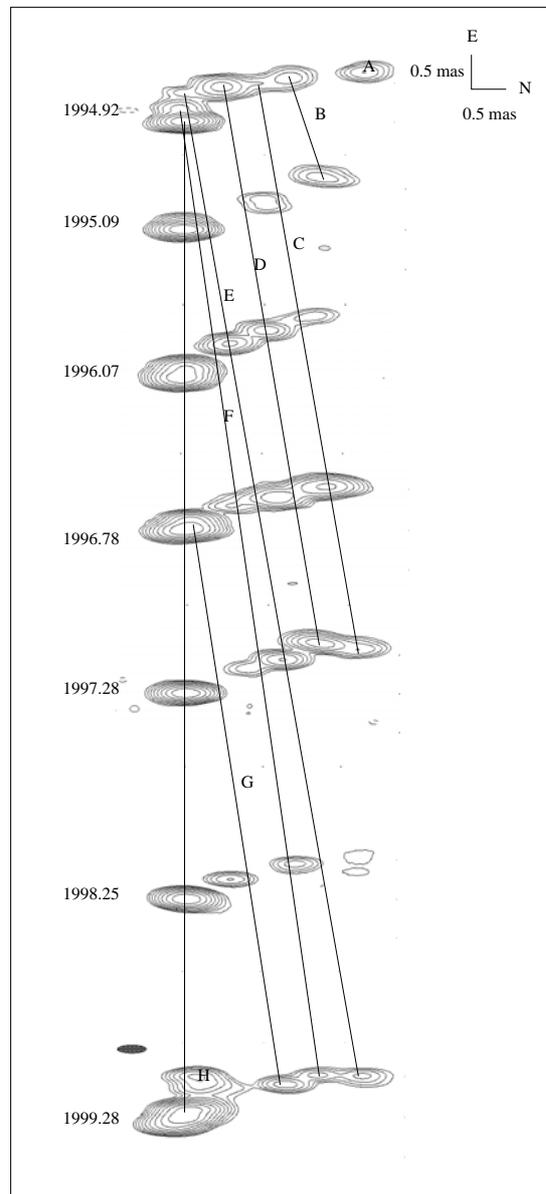


Abbildung 3.10:

86 GHz Beobachtung von 0528+143 in den Epochen 1994.92, 1995.09, 1996.07, 1996.78, 1997.28, 1998.25, 1999.28 (von oben nach unten). Zur besseren Betrachtung der Komponentenbewegung wurden die Karten um 90° gedreht. Die Veränderung der relativen Position sind in der Tab. 3.13 angegeben.

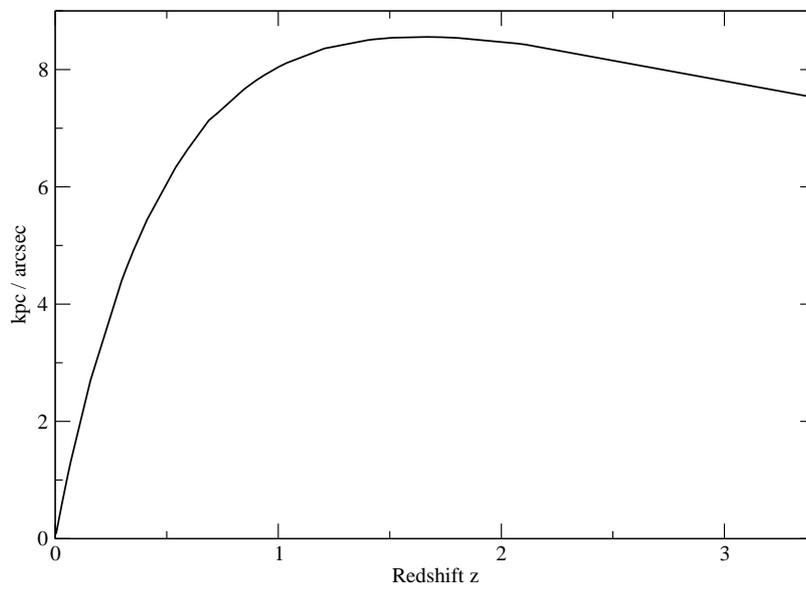


Abbildung 3.11:

Konversionskurve der Winkelausdehnung als Funktion der Rotverschiebung z . Insbesondere in einem Bereich von $z > 1$ können Unsicherheiten in der Positionsbestimmung der Komponenten große Variationen der abgeleiteten Geschwindigkeiten bewirken.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
K	1996.78	3.07 ± 0.61	0.23 ± 0.04	$1.27 \pm 0.16 \times 10^{10}$
	1997.28	2.21 ± 0.44	0.20 ± 0.04	$1.21 \pm 0.20 \times 10^{10}$
	1999.81	3.59 ± 0.71	0.10 ± 0.02	$7.84 \pm 1.30 \times 10^{10}$

Tabelle 3.14:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 0607-157 bei 86 GHz. Während der drei Beobachtungsperioden variiert die Flussdichte nur marginal.

bei 86 GHz beobachtet: In Epoche 1996.78 ist die Jetrichtung Nordosten. In der darauffolgenden Epoche scheint der Jet sowohl nach Osten, als auch nach Westen zu führen. Ebenso wie 1999.81, wobei hier der Jet eine deutlich weiter entfernte östliche Komponente zeigt. Hierfür gibt es verschiedene Erklärungsansätze. Davon ausgehend, dass die hellste Komponente der Kern der Quelle ist, ändert sich die Richtung des Jets (vgl. 3C 84, 0420-014). Der Unterschied zu anderen Quellen bei 0607-157 ist jedoch, dass der Jet zum Teil von der Quelle verdeckt wird und scheinbar hinter der Quelle liegt. Die Amplitude dieser Präzession liegt bei etwas weniger als 130° . Da diese Uneindeutigkeit der Jetrichtung auch bei anderen Wellenlängen auftritt, kann diese Möglichkeit als wahrscheinlich betrachtet werden. Eine andere Erklärung ergibt sich durch die Art der Kartierung: Die Karten wurden unter der Annahme erstellt, dass der Kern die hellste Komponente in dem zu kartierbaren Bereich ist. Ist dies jedoch nicht der Fall (vgl. Quelle 3C454.3 in Kap.4; der Unterschied zwischen Kern und heller Komponente ist gering) und der Kern in der Regel ungewöhnlich schwach, ist es denkbar, dass eine sehr hellen Komponente aus dem Jet irrtümlich als Kern identifiziert wurde. Aufgrund der aus dem 2 cm-Survey errechneten superluminalen Geschwindigkeiten von $2.6c$ kann für diese Quelle eine Counterjetstruktur als unwahrscheinlich angesehen werden, da diese Geschwindigkeiten einen großen Winkel zum Staubtorus implizieren.

0827+243

Die Messungen dieser Quelle, die dieser Arbeit zugrunde liegen, wurden im Oktober 1996 durchgeführt. Beobachtungen von Jorstad (Jorstad et al. (2001)) bei 22 und 43 GHz, zeigen eine Jetstruktur, die im Millibogensekundenbereich nach Südosten ausgerichtet ist. In den Epochen 1996.60 (43 GHz) und 1996.90 (22 GHz) zeigt sich

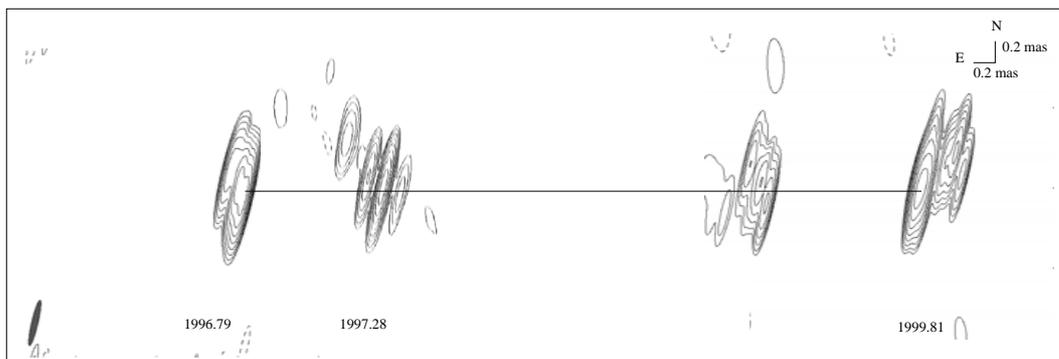


Abbildung 3.12:

86 GHz Beobachtung von 0607-157 in den Epochen 1996.78, 1997.28 und 1999.81 (von links nach rechts). Die Ausrichtung des Jets variiert deutlich zwischen den Epochen. Das kann dadurch interpretiert werden, dass der Jet einen sehr kleinen Winkel zur Sichtlinie aufweist. Teilweise verdeckt der AGN die Jetemission.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Kernabstand [mas]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
K	1996.78	2.49 ± 0.50	–	0.07 ± 0.01	$1.63 \pm 0.13 \times 10^{11}$
A	1996.78	0.87 ± 0.17	1.55 ± 0.31	0.08 ± 0.01	$4.35 \pm 0.23 \times 10^{10}$
B	1996.78	0.18 ± 0.04	0.55 ± 0.11	0.06 ± 0.01	$1.60 \pm 0.16 \times 10^{10}$
C	1996.78	1.28 ± 0.25	0.25 ± 0.05	0.05 ± 0.01	$1.64 \pm 0.27 \times 10^{11}$

Tabelle 3.15:

Eigenschaften der Komponenten der Quelle 0827+243 bei 86 GHz.

eine neue Komponente, die sich aus der Kernstruktur ausbildet (bei Jorstad als B1 bezeichnet). Es ist wahrscheinlich, dass es sich dabei um die bei 86 GHz im Südosten liegende Komponente handelt. Da die Winkelaufösung bei Jorstad jedoch deutlich geringer ist als bei den vorliegenden 86 GHz Daten, konnten die Komponenten mit Abstand ≤ 0.5 mas aus Abbildung 3.13 nicht beobachtet werden. Da lediglich eine Epoche diese Quelle vorliegt, konnten keine Geschwindigkeiten abgeschätzt werden. Die aus der vorliegenden Epoche ermittelten Parameter finden sich in Tabelle 3.15.

OJ 287

Bei OJ287 handelt es sich um ein BL Lac-Objekt, welches immer wieder Ziel von Beobachtungen wurde. Sillanpaa et al. (1988) beobachtete zahlreiche Flussdichteanstiege und ermittelte eine Periodizität in deren Auftreten von 11.6 Jahren. Als Ursache für diese *Flares* wird dabei ein Binary Supermassive Black Hole angenommen (vgl. Kap. 4). Beobachtungen mit dem VLBI von 1981 (Roberts et al. (1987)) zeigen eine Superluminal-Komponente (~ 3.3 c) bei einem Positionswinkel von -116° . In den darauffolgenden Jahren sind Positionswinkel des Jets von -80° – -120° beobachtet worden, die Anlass zu Überlegungen über eine Spiralstruktur gaben (Vincente et al. 1996). Jorstad (Jorstad et al. (2001)) hat in den Beobachtungen bei 15, 22 und 43 GHz superluminale Geschwindigkeiten von 5.4-8.4 c bei fünf Komponenten beobachtet. Desweiteren wird bei 43 GHz eine stationäre Komponente in einem Abstand von 1.2 mas angegeben, die als eine Krümmung in einem spiralförmigen Jet interpretiert werden kann. Im Gegensatz dazu wurde von Abraham (2000) die Variation im Positionswinkel mit einem präzidierenden aber ballistischen Jet erklärt; eine Erklärung, die in dieser Arbeit für die Jetstruktur der Quelle 3C 84 ebenfalls

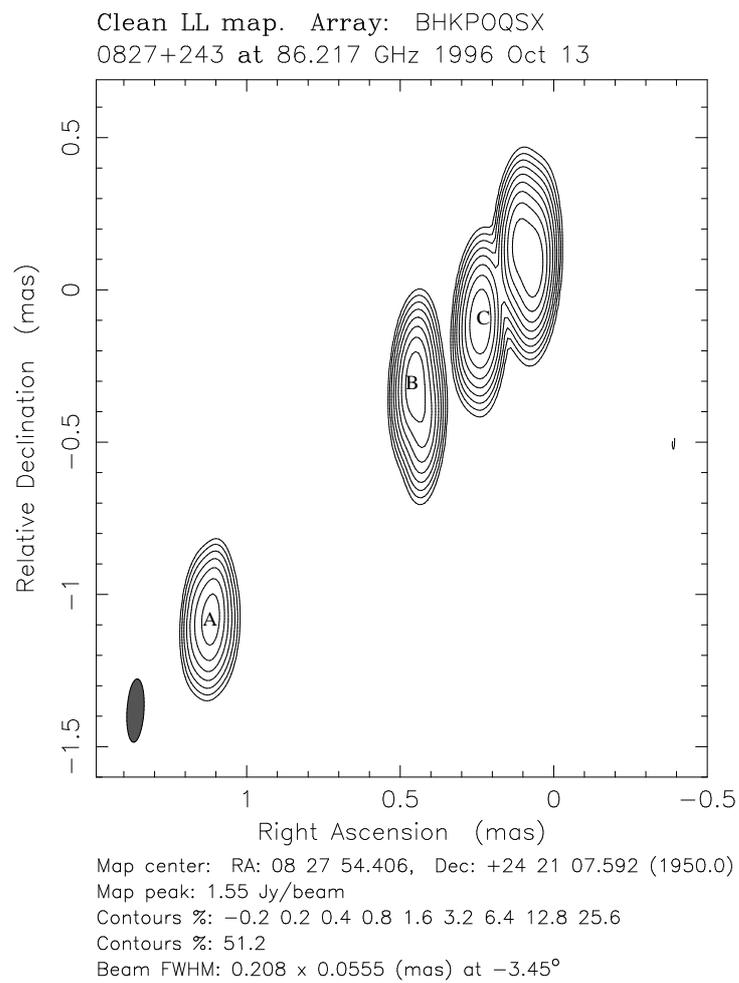


Abbildung 3.13:
86 GHz Beobachtung von 0827+243 im Oktober 1996.

in Betracht gezogen wird. Die ersten Karten dieser Quelle bei 86 und 100 GHz wurden von Rantakyo et al. (1998) veröffentlicht. Die Quellstruktur war im April 1990 bei 100 GHz nicht aufgelöst, bei 86 GHz konnte '93 eine Jetstruktur in nordwestlicher Richtung detektiert werden (P.A. -45°). Daraus leitet Rantakyo einen Ausstoß dieser Komponente nach 1990 ab, was eine Geschwindigkeit von $34 \mu\text{as}/\text{Jahr}$, also deutlich subluminal, für diese Komponente ergibt. Die Gesamtflussdichte fiel während dieser beiden Epochen um 40% ab. Die Berechnung der Geschwindigkeit ist jedoch aufgrund der hohen Ungenauigkeit im Ausstoßzeitpunkt nur als Maß für die minimale Geschwindigkeit zu betrachten.

Die Beobachtungen, die in der vorliegenden Arbeit zugrunde liegen, beinhalten fünf Epochen zwischen 1994 und 1999 (Abb. 3.14). Die Qualität der Daten ist unterschiedlich, was die Zuordnung der Komponenten über den Zeitraum der Epochen erschwerte. Die hier gezeigte Identifikation ist eine Möglichkeit, wobei für drei gut zu identifizierende Komponenten zwischen 0.25 ± 0.05 und 0.75 ± 0.15 mas Kernabstand Geschwindigkeiten von durchschnittlich $51 \mu\text{as}/\text{Jahr}$ ermittelt wurden. Bei einer Rotverschiebung von $z = 0.306$ ergibt sich damit eine Geschwindigkeit von $0.74c$. Diese Geschwindigkeit ist um etwa 50% höher als die von Rantakyo ermittelte minimale Geschwindigkeit dieser Quelle, sie liegt jedoch ebenfalls im subluminalem Bereich. Die Ursachen für so stark abweichenden Geschwindigkeitswerte können sowohl in der Positionsbestimmung, als auch in der Ausrichtung der Jetachse liegen: Zum Einen ist bei dieser Quelle die Rotverschiebung sehr groß, was bei der Berechnung der absoluten Komponentenposition zu großen Abweichungen führen kann (vgl. Quelle: 0528+134), zum Anderen ist es möglich, dass der Winkel zur Jetachse deutlich kleiner ist als 2° und die absolute Jetgeschwindigkeit $< c$, was zu einer scheinbaren Geschwindigkeit im subluminalem Bereich führen würde, dies widerspricht jedoch den Messungen von superluminalen Geschwindigkeiten von Roberts et al. (1987) und Jorstad et al. (2001). Deren Beobachtungen basieren jedoch auf Daten mit deutlich geringerer Winkelauflösung, bei denen die einzelnen Komponenten nicht in dem Detail unterschieden werden können, wie bei den vorliegenden 86 GHz Beobachtungen.

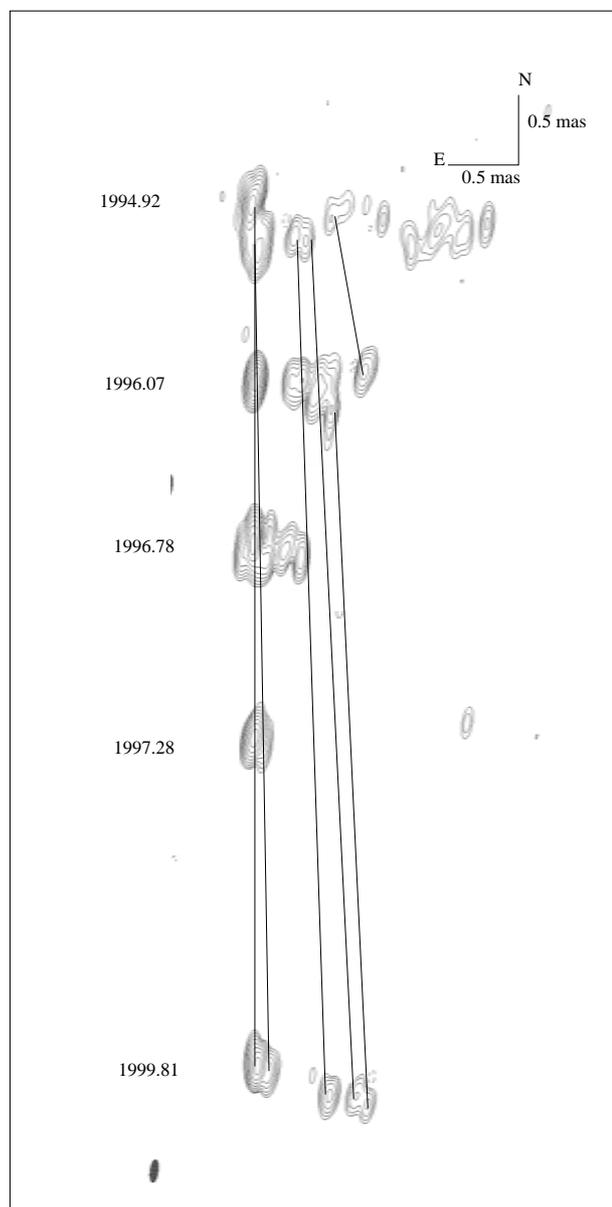


Abbildung 3.14:

86 GHz Beobachtung von OJ287 in den Epochen 1994.92, 1996.07, 1996.78, 1997.28 und 1999.81 (von oben nach unten). Die durchgezogenen Linien dienen der Identifikation der einzelnen Komponenten.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
K	1994.92	0.89 ± 0.18	0.02 ± 0.004	$4.79 \pm 0.40 \times 10^{11}$
	1996.07	0.60 ± 0.12	0.01 ± 0.002	$1.29 \pm 0.21 \times 10^{12}$
	1996.78	0.41 ± 0.08	0.02 ± 0.004	$2.21 \pm 0.37 \times 10^{11}$
	1997.28	0.90 ± 0.18	0.04 ± 0.008	$1.21 \pm 0.20 \times 10^{11}$
	1999.81	0.59 ± 0.12	0.03 ± 0.006	$1.41 \pm 0.22 \times 10^{11}$

Tabelle 3.16:

Eigenschaften des Kerns der Quelle OJ 287 bei 86 GHz. In den vorliegenden fünf Epochen variiert die Flussdichte um einen Faktor zwei. Der Durchmesser des Kerns ist innerhalb der gegebenen Fehler konstant.

4C 39.25

In den letzten 10 Jahren ist die kompakte Radioquelle 4C 39.25 Ziel von hochauflösenden VLBI Beobachtungen gewesen. Alberdi et al. (1997) veröffentlichte eine der ersten Karten bei einer Wellenlänge von 3 mm. Diese Beobachtung von 1993 zeigt eine Quellstruktur mit drei Komponenten. Auf den ersten Blick scheint dabei der Kern östlich des Jets zu liegen. Messungen des Spektralindex zeigen für die westliche Komponente ein invertiertes Spektrum mit einem Spektralindex von $\alpha = +0.6$ ($S \propto \nu^\alpha$), woraus Alberdi auf die Kernkomponente schließt. Die Spektralindizes der übrigen Komponenten liegen nach Alberdi zwischen $\alpha = -0.9$ und -1.8 . Vergleiche mit anderen Frequenzen, sowie Analysen der Kinematik von einzelnen Komponenten deuten daraufhin, dass bei den Frequenzen 22, 43 und 86 GHz der Kern nicht die hellste Komponente ist, sondern ca. 2.5 Millibogensekunden westlich dieser liegt, was mit der Annahme Alberdis über die Lokalität der Kerns übereinstimmt.

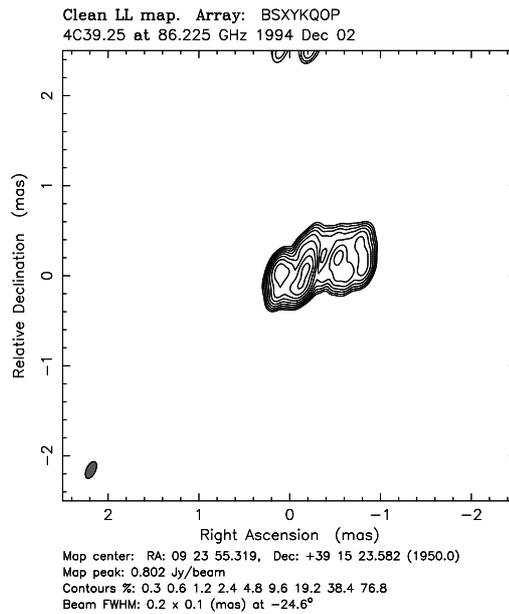
Bei 86 GHz ist dieser Quelle im Dezember 1994, sowie im Januar und Oktober 1996 beobachtet worden. Die Beobachtungen 1994 zeigen eine Quellstruktur, mit einem Jet in Ost–West–Richtung. Die folgenden Beobachtungen 1996 waren jedoch deutlich kürzer integriert und die Datenqualität somit schlechter, so dass eine Komponentenidentifikation über diese Epochen nur schwer möglich war. Es zeigt sich jedoch deutlich, dass sich die Jetstruktur zwischen 1994 und 1996 um etwa 50° in südliche Richtung gedreht hat. Diese Veränderung deutet auf eine Präzession des Jets hin, die jedoch aufgrund fehlender Folgeepochen nicht weiter untersucht werden kann. Eine Änderung des Positionswinkels ist mit einem Monitoringprogramm

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1994.97	–	–	–
	1996.07	1.28 ± 0.06	0.20 ± 0.04	$8.92 \pm 2.41 \times 10^9$
	1996.78	2.04 ± 0.41	0.27 ± 0.05	$7.79 \pm 1.21 \times 10^9$

Tabelle 3.17:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 4C 39.25 bei 86 GHz. Die Datenqualität der Beobachtungen von 1994.97 war so gering, dass keine eindeutigen Parameter abgeleitet werden konnten.

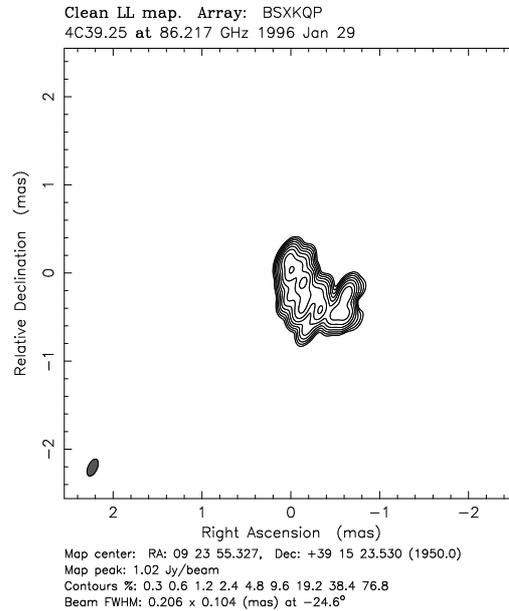
über 2 Jahre mit ca. 2 Beobachtungen pro Jahr mit dem VLBA bei 43 GHz gut nachzuweisen und sollte für zukünftige Beobachtungen in Betracht gezogen werden.

**Abbildung 3.15:**

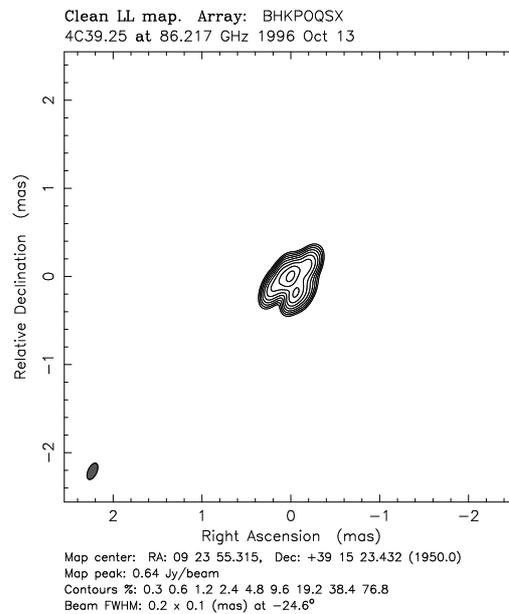
86 GHz Beobachtungen von 4C 39.25 im Dezember 1994. Die Quelle und Jetstruktur sind signifikant detektiert, jedoch ist eine Unterscheidung zwischen der Position des Kerns und der Jetemission nicht signifikant zu treffen.

1156+295

Die Quelle 1156+295 ist in der Epoche 1996.78 beobachtet worden. Auf der Karte (Abb. 3.18) ist eine Ausdehnung um 0.1 mas des Kerns in nordöstlicher Richtung

**Abbildung 3.16:**

86 GHz Beobachtungen von 4C 39.25 im Januar 1996. Im Vergleich zu Epoche 1994.97 (Abb.3.15) hat sich die Jetstruktur nach Südwesten verlagert.

**Abbildung 3.17:**

86 GHz Beobachtungen von 4C 39.25 im Oktober 1996. Ein ausgedehnter Jet ist nicht detektiertbar.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Kernabstand [mas]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1996.78	2.34 ± 0.47	–	0.07 ± 0.01	$1.36 \pm 0.10 \times 10^{11}$
A	1996.78	1.65 ± 0.33	0.10 ± 0.02	0.16 ± 0.03	$1.84 \pm 0.27 \times 10^{10}$

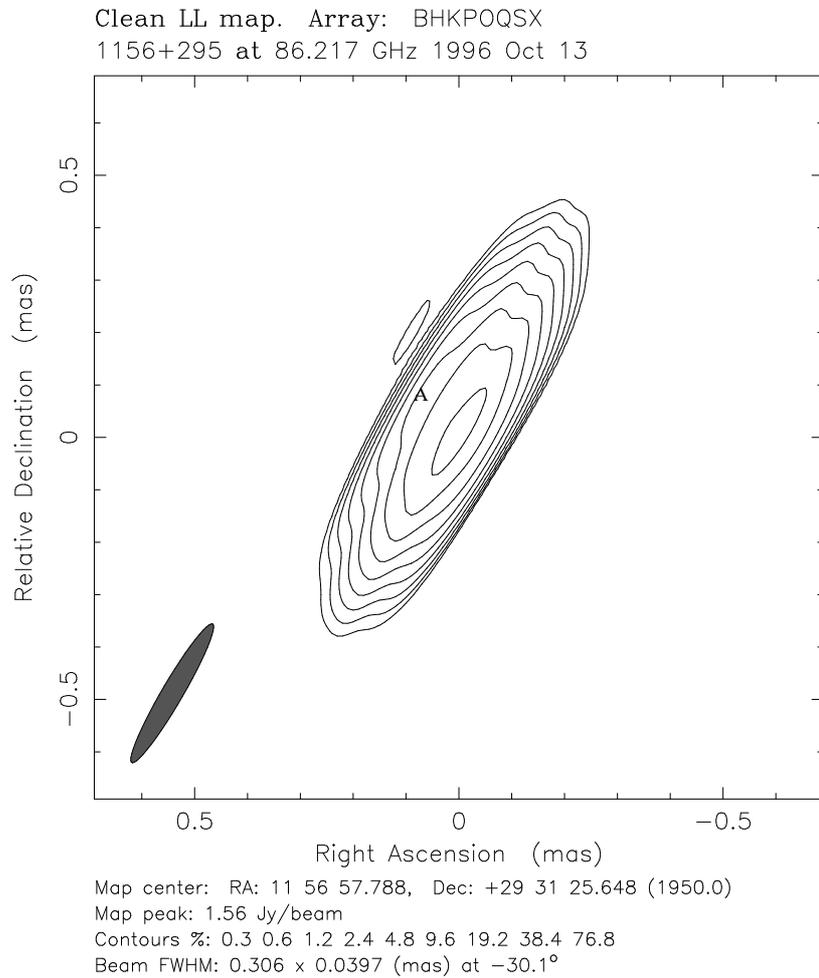
Tabelle 3.18:

Eigenschaften der Komponenten der Quelle 1156+295 bei 86 GHz.

zu erkennen. Multifrequenzbeobachtungen zwischen 1.6 und 15 GHz (Hong et al. (2004)) zeigen eine Jetstruktur die sich bei einem Kernabstand von < 30 mas nach Nordosten und > 30 mas nach Nordwesten ausdehnt. Die hier vorgestellten Messungen liegen in einem Bereich von < 0.5 mas Kernabstand und vervollständigen das Bild dieser Quelle im Bereich der hochaufgelösten Karten. Flussdichtemessungen von Teräsranta et al. (2004) im Oktober 1996 ergaben bei einer Frequenz von 22 GHz 2.32 ± 0.07 Jy und bei 37 GHz 2.76 ± 0.15 Jy. Daraus errechnet sich ein Spektralindex von $\alpha = 0.33$. Aus der Kern- und Komponentenflussdichte (3.18) kann man die Größenordnung der Gesamtflussdichte bei 86 GHz zu > 4 Jy abschätzen. Daraus ergeben sich für die Spektralizes: $\alpha_{86/22} = 0.39$ und für $\alpha_{86/37} = 0.43$. Die Invertierung des Spektrums, sowie die Kernnähe der Komponente bei 86 GHz deuten auf einen Ausstoß dieser zu einem Zeitpunkt ca. 2 - 3 Monate vorher hin, was wiederum zu einer Geschwindigkeitsabschätzung von 8 - 14 c führt. Beobachtungen bei 22 GHz (Jorstad et al. (2001)) zeigen Ende 1996 und Anfang 1997 deutlich mehrere ausgestoßene Komponenten, die sich mit Geschwindigkeiten zwischen 8.9 und 14.1 c bewegen. Diese Komponenten können jedoch nicht mit dem Flare bei 86 GHz in Verbindung gebracht werden, da sie bereits vorher ausgestoßen worden sein mussten. Die errechneten Geschwindigkeiten sind konsistent mit denen der anderen Komponenten.

3C 273B

Diese Quelle ist in insgesamt acht Epochen zwischen Mai 1996 und Oktober 1999 beobachtet worden, für diese Arbeit stehen jedoch nur die Epochen 1999 zu Verfügung. Bei einer Frequenz von 86 GHz ist dieser Quasar einer der hellsten am Himmel und daher Ziel zahlreicher Messkampagnen. 1996 beobachtete Homan (Homan & Wardle (1999)) in sechs Epochen bei 15 und 22 GHz, Geschwindigkeiten von $\beta_{app} = 7.9-11.9$.

**Abbildung 3.18:**

86 GHz Beobachtung von 1156+295. Die Elongation des Kerns in nordöstlicher Richtung deutet auf die Existenz eines Jets hin.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1999.28	3.35 ± 0.67	0.03 ± 0.006	$7.11 \pm 1.17 \times 10^{11}$
	1999.81	1.31 ± 0.25	0.03 ± 0.006	$2.78 \pm 0.47 \times 10^{11}$

Tabelle 3.19:

Eigenschaften des Kern der Quelle 3C 273B bei 86 GHz.

Komponente	Epoche	Kernabstand [mas]	Geschwindigkeit [mas/yr]
A	1999.28	0.35 ± 0.07	
	1999.81	0.50 ± 0.01	0.28
B	1999.28	0.57 ± 0.11	
	1999.81	0.93 ± 0.18	0.68
C	1999.28	0.85 ± 0.17	
	1999.81	1.14 ± 0.23	0.54
D	1999.28	1.14 ± 0.23	
	1999.81	1.71 ± 0.34	1.07

Tabelle 3.20:

Eigenschaften der Modellkomponenten der Quelle 3C 273B bei 86 GHz. Zwischen den beiden Epochen weisen alle Komponenten des Jets eine relative Bewegung auf.

2001 wurde diese Quelle zum ersten Mal erfolgreich bei 147 GHz auf der Basislinie Metsähovi–Pico Veleta detektiert (Greve et al. (2002)). Bei dieser Frequenz wurde eine korrelierte Flussdichte von $F \sim 2.2 \pm 0.7$ Jy ermittelt, was etwa 25 – 30 % der totalen Flussdichte entspricht. Damit ergibt sich ein unteres Limit der Helligkeitstemperatur der inneren Jetregion von $\sim 1 \times 10^{10}$ K. 2002 wurden Multifrequenz–Very Long Baseline Polarimetry–Beobachtungen mit dem VLBA bei 43 und 86 GHz durchgeführt (Attridge et al. (2005)). In einem Kernabstand von einer Millibogensekunde sind dabei zwei stark polarisierte Komponenten detektiert worden, deren Rotationsmaß um etwa $\sim 4.3 \times 10^4$ rad m⁻² differiert.

Die hier präsentierten Beobachtungen zeigen eine zusammenhängende Jetstruktur, die sich über 1.5 mas nach Südwesten erstreckt. Im Oktober 1999 können darüber hinaus unzusammenhängende Strukturen bis hin zu 9 mas Kernabstand kartiert werden. Mittels dieser Karten können vier Komponenten identifiziert werden. Die Geschwindigkeiten differieren bei den Komponenten zwischen 2.4 und 9.4 c und liegen zum Teil etwas unter den von Homan (Homan & Wardle (1999)) beobachteten Werten. Aufgrund der deutlich besseren Winkelauflösung dieser Daten wird mit 86 GHz der innere Jet betrachtet. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Komponenten könnte auf einen Präzession der Jetstruktur hinweisen.

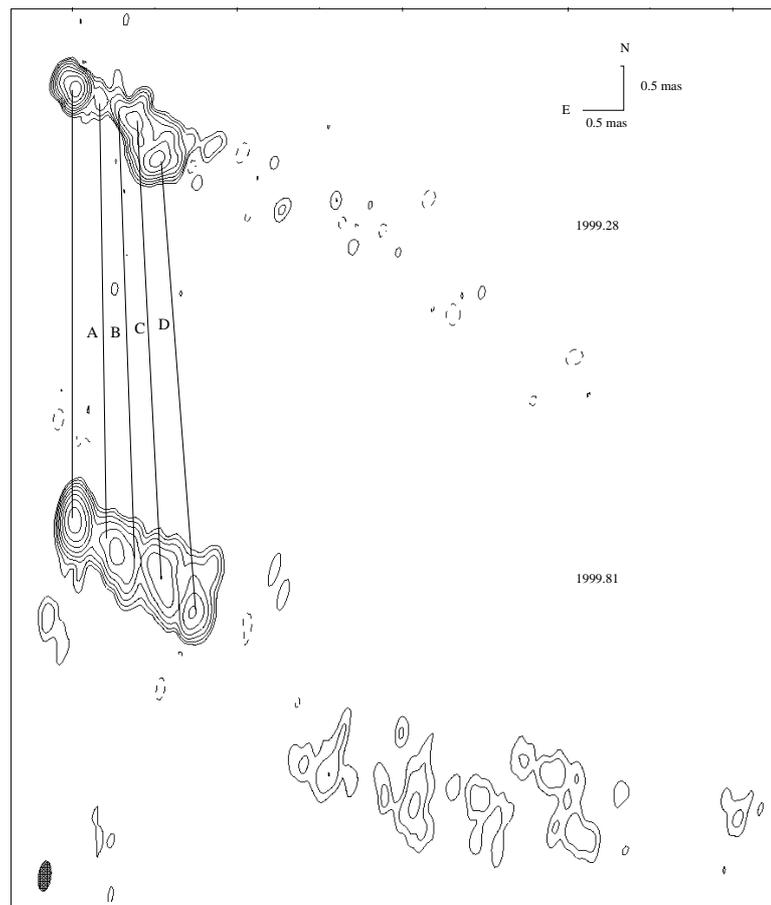


Abbildung 3.19:

86 GHz Beobachtung von 3C 273B in den Epochen 1999.28 (oben) und 1999.81 (unten). Der Jet ist offensichtlich viel ausgedehnter, als bei den meisten anderen Quellen. Untersucht wurde vor Allem die mit dem Kern verbundene Jetstruktur. Die Modellkomponenten werden in Tab. 3.20 wiedergegeben.

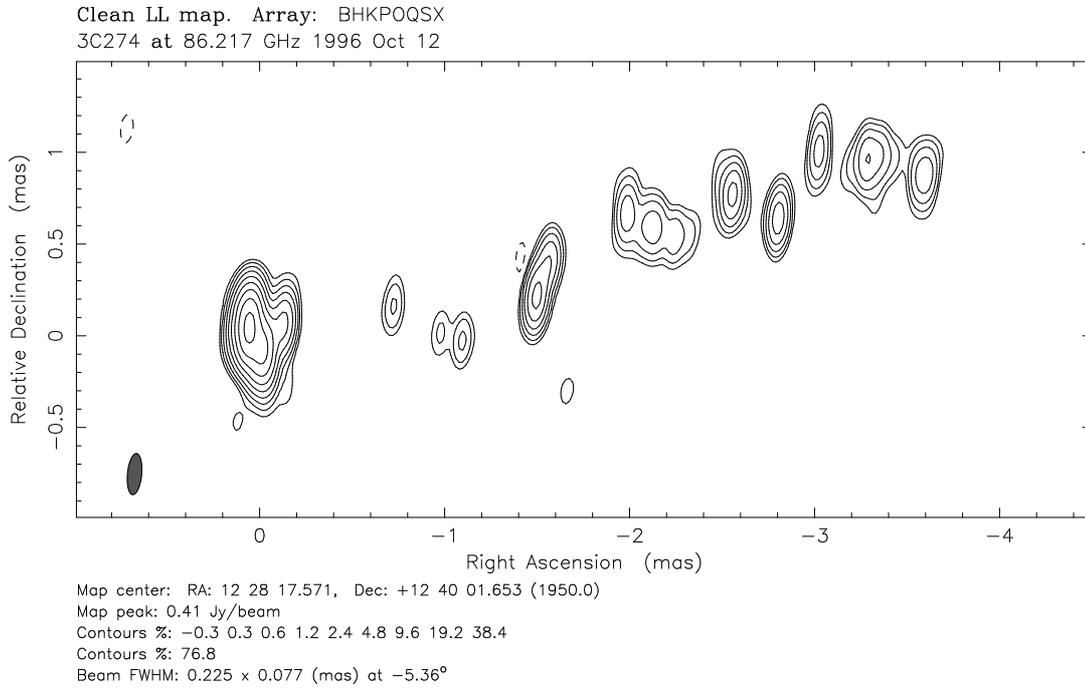
Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1996.78	0.38 ± 0.07	0.04 ± 0.008	$3.93 \pm 0.68 \times 10^{10}$

Tabelle 3.21:

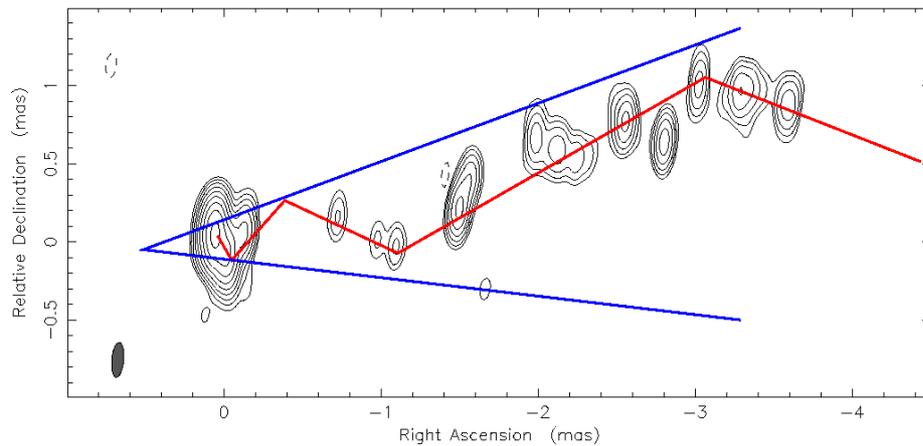
Eigenschaften des Kerns der Quelle 3C 274 bei 86 GHz.

3C 274

Diese starke Radioquelle (Vir A, M87) zeigt bei 86 GHz–Beobachtungen einen ausgedehnten Jet bis zu einem Kernabstand von 4 mas in westlicher Richtung. Die großskalige Radiostruktur, aufgenommen mit dem 100 m-Radioteleskop in Effelsberg bei 10 GHz, beinhaltet zwei gegensätzliche *Loops* in Nord-Südausrichtung über eine Länge von etwa 15-20 Bogenminuten (Rottmann et al. (1996)). Innerhalb dieser *Loop*struktur wurden von Owen (Owen et al. (2000)) Beobachtungen mit dem VLA bei 300 MHz durchgeführt, die eine Jetstruktur sowohl in östlicher, als auch in westlicher Richtung zeigen, wobei der westliche Jet nach ca. 0.5-1 Bogenminute nach Süden abknickt. Röntgenkarten, aufgenommen mit XMM-Newton und ROSAT (Forman et al. (2005), Belsole et al. (2001)) zeigen eine Jetstruktur, die sich zunächst ca. 27 Bogensekunden nach Nordwesten erstreckt. Die Struktur unterbricht auf eine Länge von etwa einer Bogenminute und setzt sich dann in einem Jet in südwestlicher Richtung fort. In östlicher Richtung ist der Röntgenjet ununterbrochen und deutlich stärker. In den hier vorliegenden hochaufgelösten Radiokarten ist eine Jetstruktur zu erkennen, die hauptsächlich in nordwestliche Richtung führt. Die beobachtete Jetlänge liegt etwa bei 4 mas. Bei dieser Frequenz werden Biegungen innerhalb der Jetstruktur deutlich, die einer Spiralstruktur entsprechen (Abb.3.21). Der Öffnungswinkel dieser Spirale liegt bei $\sim 23^\circ$, der Ursprungspunkt etwa 0.5 mas östlich der hellsten Komponente, was einer Entfernung von etwa 0.04 pc entspricht. Diese Diskrepanz gibt einen Hinweis auf das Vorhandensein eines Staubtorus, sowie dessen Ausdehnung. An dieser Stelle sind hochaufgelöste Infrarotdaten sinnvoll, die den Stabtorus abbilden könnten.

**Abbildung 3.20:**

86 GHz Beobachtung von 3C274. Der Jet zerfällt in eine Vielzahl von aufgelösten Komponenten.

**Abbildung 3.21:**

Die 86 GHz Beobachtung von 3C274 mit Überlagerung einer möglichen Spiralstruktur (rot) und dem Öffnungswinkel und Ursprung (blau). Der Öffnungswinkel der Spiralstruktur beträgt 23° , der Ursprungspunkt liegt etwa 0.5 mas östlich des Kerns.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Kernabstand [mas]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1997.28	1.56 ± 0.31	–	0.04 ± 0.008	$2.27 \pm 0.37 \times 10^{11}$
A	1997.28	0.49 ± 0.08	2.36 ± 0.47	0.06 ± 0.01	$3.17 \pm 0.45 \times 10^{10}$
B	1997.28	0.50 ± 0.10	1.54 ± 0.31	0.06 ± 0.01	$3.24 \pm 0.38 \times 10^{10}$
C	1997.28	0.20 ± 0.04	0.90 ± 0.18	0.04 ± 0.008	$2.91 \pm 0.47 \times 10^{10}$
D	1997.28	0.25 ± 0.05	0.20 ± 0.04	0.02 ± 0.004	$1.46 \pm 0.24 \times 10^{11}$

Tabelle 3.22:

Eigenschaften der Komponenten der Quelle 1546+027 bei 86 GHz.

1546+027

Diese Quelle wurde in insgesamt zwei Epochen beobachtet. Die Daten im Oktober 1996 waren jedoch nicht ausreichend, um eine Karte zu erstellen. Aus den Daten von April 1997 konnte jedoch eine gute Karte dieser Quelle erstellt werden, die zum ersten Mal detailliert die innere Struktur dieser Quelle zeigt. Die Jetrichtung ist Süden, wobei sich der Jet nahezu gradlinig ausbreitet. Bis zu einem Kernabstand von 2.5 mas sind vier Komponenten eindeutig identifizierbar (Tab. 3.22). In diesem Fall war es möglich, über modellierte Flussdichten und den Durchmesser der Komponenten, die Strahlungstemperatur zu bestimmen. Die Struktur setzt sich bei 15 GHz (Lister & Homan (2005)) in südlicher Richtung fort, knickt jedoch bei einer Entfernung von ca. 5 mas leicht ($\leq 5^\circ$) nach Osten ab. Die großskalige Struktur (Murphy et al. (1993)) zeigt ein Jetstruktur bis zu 5 Bogensekunden, und eine helle Komponente in südöstlicher Richtung bei einer Entfernung von etwa 15 Bogensekunden.

1611+343

Die Quelle 1611+343 wurde zwischen 1994 und 1997 insgesamt vier Mal beobachtet. Die Beobachtungen ermöglichen sowohl eine Komponentenidentifikation über diesen Zeitraum, als auch eine Abschätzung der Geschwindigkeiten. Die Hauptausbreitungsrichtung des Jets ist Süden, wobei sich der Jet in unmittelbarer Kernnähe nicht gradlinig ausbreitet, sondern eine scheinbare Präzession über einen Winkel von ca. 20° aufweist. Der Jet ist in Epoche 1994.92 über eine Länge von 1.44 mas zu beobachten. In den nachfolgenden Epochen ist der Jet scheinbar deutlich kürzer, was

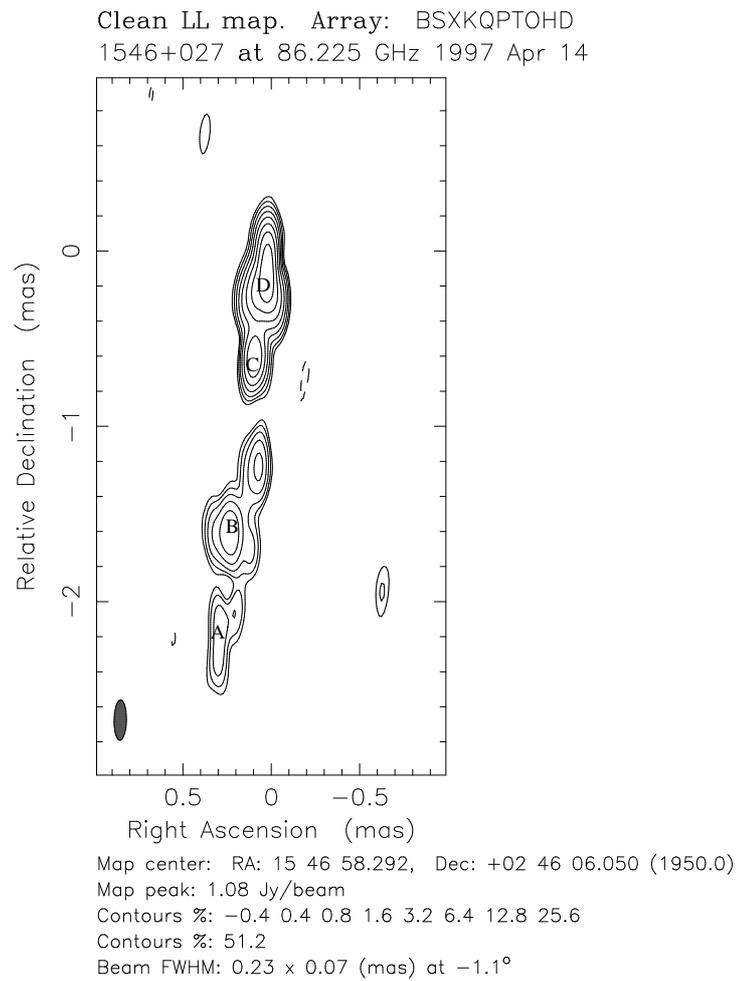


Abbildung 3.22:
86 GHz Beobachtung von 1546+027

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1994.92	1.58 ± 0.32	0.07 ± 0.01	$1.28 \pm 0.10 \times 10^{11}$
	1996.07	0.47 ± 0.09	0.005 ± 0.001	$7.44 \pm 1.26 \times 10^{12}$
	1996.78	0.43 ± 0.09	0.01 ± 0.002	$1.70 \pm 0.27 \times 10^{12}$
	1997.28	1.22 ± 0.24	0.13 ± 0.03	$2.86 \pm 0.59 \times 10^{10}$

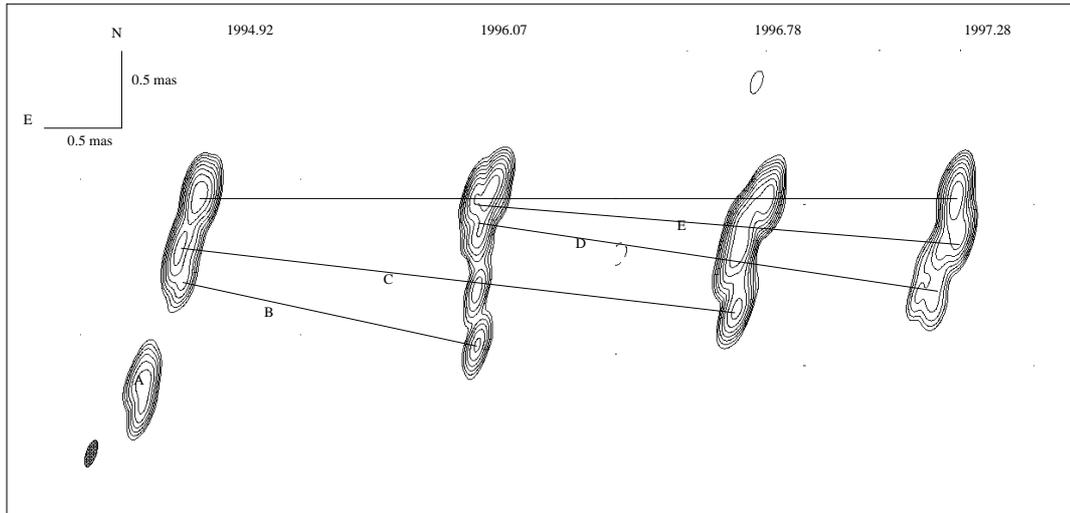
Tabelle 3.23:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 1611+343 bei 86 GHz. Die Flussdichte variiert über einen Zeitraum von ca. 2.5 Jahren um einen Faktor 3.5. Die Variation der Strahlungstemperatur ist bedingt durch die unterschiedlich ermittelte Kerngröße.

jedoch auf geringere Beobachtungsdauer, sowie schlechtere uv-Bedeckung zurück zu führen ist. Bei 22 und 43 GHz wird zwischen 1994 und 1997 eine gradlinige südlich orientierte Jetstruktur beobachtet, die in einem Abstand von 4-5 mas in einem 90° nach Westen abknickt. Es werden zwei stationäre Komponenten identifiziert, die sich in den Abständen 0.3 und 2.8 mas vom Kern entfernt befinden. Bei den in Abbildung 3.23 gezeigten Epochen werden ebenfalls Komponenten in dieser Kernentfernung detektiert, sie aber eindeutig in Folgeepochen mit Komponenten in weiterer Entfernung identifiziert. Daraus ergeben sich Jetgeschwindigkeiten von durchschnittlich 6.6 c. Beobachtungen bei 15 GHz zeigen ebenfalls eine Jetstruktur (Kellermann et al. (1998), Lister & Homan (2005)), die zunächst nach Süden führt, hier ist jedoch kein Knick, sondern eine Aufweitung des Jets zu sehen: Bis zu einer Entfernung von 6 mas hat sich die Breite des Jets von 3 auf 7 mas vergrößert und zeigt am Rand andeutungsweise nach Norden. Die Polarisation dieser Struktur ist deutlich höher als im Kern- oder in dem schmalen Jetbereich. Dieser Jetverlauf und die gemessene Polarisation an der südlichen Jetfront deuten auf eine starke Abbremsung an dieser Stelle hin.

1633+38

Von der Quelle 1633+38 liegen drei Epochen 1996.78, 1997.28 und 1999.81 vor. Die Jetrichtung ist Westen, wobei bei dieser Quelle ähnlich des Jets von 3C 274 eine angedeutete Biegung in Kernnähe, sowie ein großer Bogen bei größerem Kernabstand zu erkennen ist. Da die Beobachtungsdauer nur 1996.78 ausreichend für die Kartierung des Jets bis zu einem Abstand von ca. 2 mas war, kann jedoch keine

**Abbildung 3.23:**

86 GHz Beobachtung von 1611+343 in den Epochen 1994.92, 1996.07, 1996.78 und 1997.28 (von links nach rechts). Die Bewegung der einzelnen Jetkomponenten sind durch die durchgezogenen Linien wiedergegeben.

Komponente	Epoche	Kernabstand [mas]	Geschwindigkeit [mas/yr]
A	1994.92	1.25 ± 0.25	
B	1994.92	0.58 ± 0.12	
	1996.07	1.00 ± 0.20	0.36
C	1994.92	0.35 ± 0.07	
	1996.07	0.65 ± 0.12	0.26
	1996.78	0.70 ± 0.14	0.07
D	1996.07	0.25 ± 0.05	
	1996.78	0.35 ± 0.07	0.14
	1997.28	0.50 ± 0.10	0.30
E	1996.07	0.10 ± 0.02	
	1997.28	0.25 ± 0.05	0.12

Tabelle 3.24:

Eigenschaften der Modellkomponenten der Quelle 1611+343 bei 86 GHz. Nicht alle Komponenten konnten über den gesamten Zeitraum detektiert werden.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1996.78	0.43 ± 0.08	0.02 ± 0.004	$4.98 \pm 0.86 \times 10^{11}$
	1997.28	1.12 ± 0.22	0.03 ± 0.006	$5.76 \pm 0.96 \times 10^{11}$
	1999.81	0.66 ± 0.13	0.05 ± 0.01	$1.22 \pm 0.20 \times 10^{11}$

Tabelle 3.25:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 1633+38 bei 86 GHz. Die Flussdichte des Kerns variiert über einen Zeitraum von ca. drei Jahren um einen Faktor drei.

Komponente	Epoche	Kernabstand [mas]	Geschwindigkeit [mas/yr]
A	1996.78	0.21 ± 0.04	0.02
	1997.27	0.22 ± 0.04	
B	1996.78	0.14 ± 0.03	0.02
	1997.27	0.15 ± 0.03	
	1999.81	0.18 ± 0.04	
C	1999.81	0.14 ± 0.03	

Tabelle 3.26:

Eigenschaften der Modellkomponenten der Quelle 1633+38 bei 86 GHz. Die Quelle bewegt sich offensichtlich mit $\beta_{app} = 0.55 c$ deutlich subluminal.

Komponentenbewegung des entfernteren Jets beobachtet werden. Lediglich der innerste Bereich bis zu einem Kernabstand von 0.3 mas wurde in allen drei Epochen aufgelöst. Die beobachteten Jetgeschwindigkeiten liegen deutlich im subluminalem Bereich bei 0.55 c, was um mehr als eine Größenordnung unter den Literaturwerten liegt (Jorstad et al. (2001)). In diesem Fall wird die nicht ausreichende zeitliche Abdeckung sowie Unterschiede in der Datenqualität bei Monitoringprogrammen besonders deutlich. Die in der Literatur angegebenen Geschwindigkeiten liegen bei bis zu 0.2 mas/yr. Diese Geschwindigkeit führt die hier beobachteten Komponenten in den in den Epochen 1997.28 und 1999.81 nicht sichtbaren Bereich des Jets. Eine Zuordnung ist damit nicht möglich. Die in Abbildung 3.24 getätigte Komponenten-zuweisung ist damit nur ein Maß für die minimale aus diesen Daten zu errechnende Geschwindigkeit.

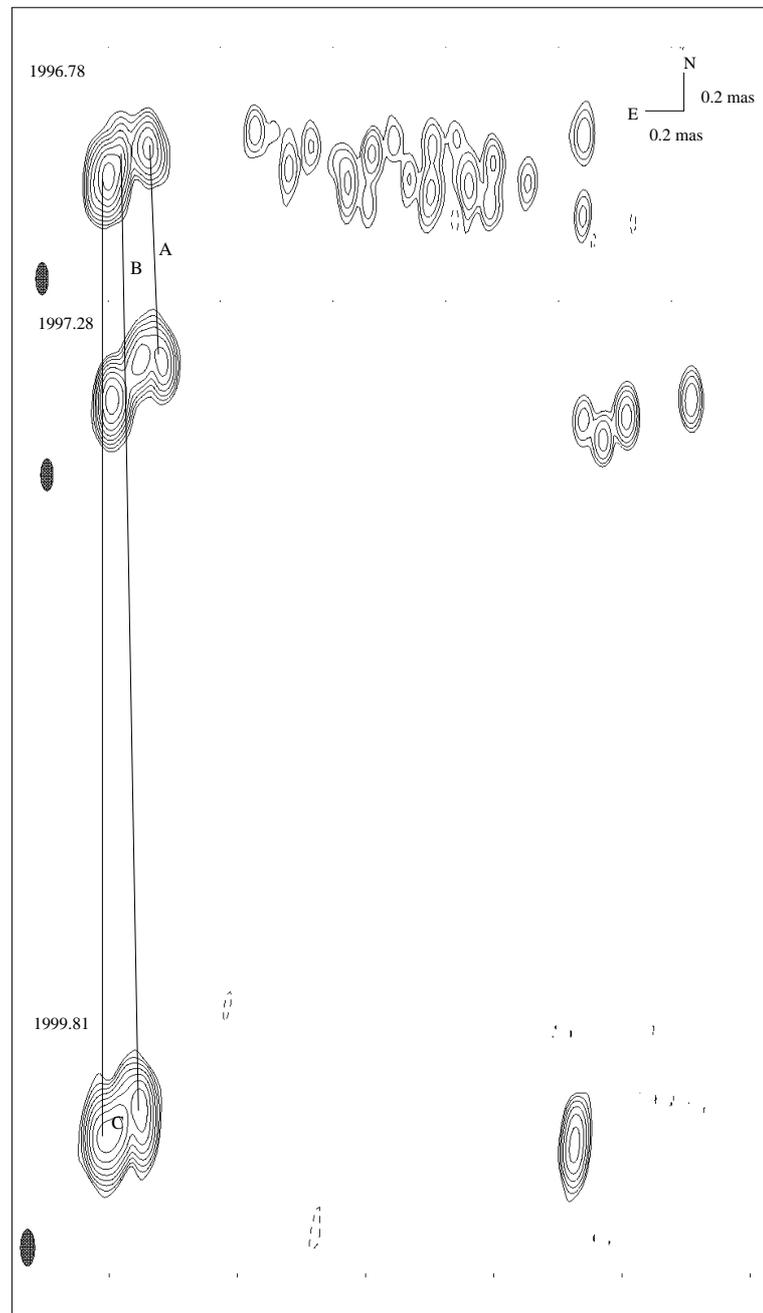


Abbildung 3.24:

86 GHz Beobachtung von 1633+38 in den Epochen 1996.78, 1997.28 und 1999.81 (von oben nach unten). Die Qualität der Daten variiert über den beobachteten Zeitraum, so dass die ausgedehnte Jetstruktur nur 1996.78 nachgewiesen werden konnte. Die mit dem Kern verbundenen Komponenten finden sich in Tab. 3.26.

3C 345

Der Quasar 3C 345 wurde bei 86 GHz in insgesamt sechs Epochen beobachtet (Abb. 3.25). Die Hauptausbreitungsrichtung des Jets ist Westen. Auffällig bei diesen Beobachtungen ist der Jetverlauf in den ersten 1-1.5 mas Kernabstand: der Jet scheint zunächst bis zu einer Entfernung von 0.25 mas konstant zu sein, und beginnt danach zu oszillieren bzw. zu präzidieren. Die Schwingung kann hier über einen Zeitraum von fast fünf Jahren beobachtet werden. Die Schwingungsdauer liegt dabei bei etwa 1.2 - 1.8 Jahren, die Amplitude in einer Kernentfernung von ~ 0.5 mas bei ca. 3.3 pc. Bei einer longitudinalen Schwingung entspricht dies einer Geschwindigkeit von fast 12 c. Die bislang beobachteten Komponentengeschwindigkeiten liegen bei etwa 17 c. Im Falle einer Bewegung auf einer Spiralbahn, beträgt der Öffnungswinkel 15.2 bis 19.7°. In dieser Entfernung ist damit der Durchmesser des Kegels 4.43 pc. Ein vollständiger Umlauf der Jetkomponenten in zwei Jahren impliziert damit eine Geschwindigkeit von mehr als 25 c. Eine weitere Möglichkeit ist die Bewegung auf geraden Bahnen und einer Präzession der Quelle selbst (vgl. 3C 84). Dazu müssen Komponentenbewegungen über einen Zeitraum von mehreren Jahren und einer zeitlichen Dichte von mindestens 2 Beobachtungen pro Jahr bei dieser Winkelauflösung gegeben sein. Der weitere Jetverlauf > 1.5 mas Kernabstand ist nahezu gradlinig, was auf eine starke Dämpfung der Schwingung hindeutet. Bei 15 GHz zeigt sich, dass der Jet bis zu einer Entfernung von 5 Millibogensekunden ebenfalls gradlinig nach Westen verläuft und dann nach Nordwesten abknickt. Komponentenbeobachtungen bei 22 GHz ergeben eine Variation des Positionswinkels in einer Kernentfernung von 0.5 mas (Lobanov & Roland (2005)). Die von Lobanov ermittelte Änderung des Positionswinkels an dieser Stelle von $\sim 20^\circ$ stimmt mit dem aus den 86 GHz ermittelten Winkel gut überein, es wird jedoch eine Periode von 9.5 Jahren ermittelt, die deutlich über der hier ermittelten Schwingungsdauer liegt. Die Grundlage für diese Berechnungen von Lobanov sind Beobachtungen bei 22 GHz, bei denen die Winkelauflösung deutlich geringer ist, als bei den hier gezeigten 86 GHz Daten. Desweiteren sind die Positionsbestimmungen von Lobanov & Roland sehr ungenau (die angegebenen Fehler liegen zum Teil $> 50\%$), was in der Berechnung der Schwingungsdauer große Fehler nach sich ziehen kann.

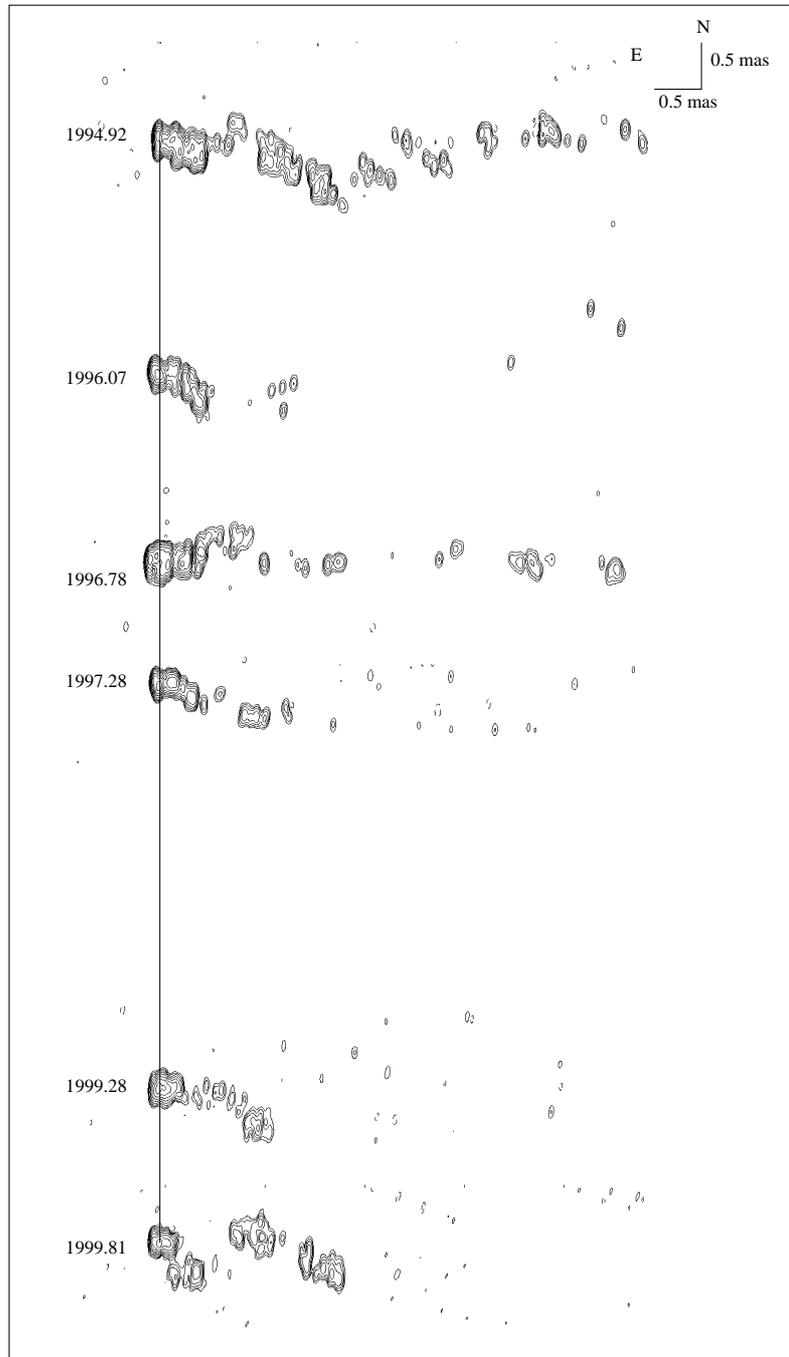


Abbildung 3.25:

86 GHz Beobachtung von 3C345 in den Epochen 1994.92, 1996.07, 1996.78, 1997.28, 1999.28 und 1999.81 (von oben nach unten). Der Jet ist reich strukturiert, was eine Identifikation der einzelnen Komponenten erschwert. In dem Zeitraum von fünf Jahren wird trotz unterschiedlicher Datenqualität die Helixstruktur des Jets deutlich.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1994.97	0.96 ± 0.19	0.05 ± 0.01	$1.01 \pm 0.16 \times 10^{11}$
	1996.07	0.40 ± 0.08	0.02 ± 0.004	$2.62 \pm 0.42 \times 10^{11}$
	1996.78	0.33 ± 0.07	0.01 ± 0.002	$8.68 \pm 1.35 \times 10^{11}$
	1997.28	0.71 ± 0.02	0.04 ± 0.008	$1.16 \pm 0.32 \times 10^{11}$
	1999.28	1.75 ± 0.35	0.08 ± 0.02	$7.18 \pm 1.64 \times 10^{10}$
	1999.81	0.98 ± 0.20	0.08 ± 0.02	$4.03 \pm 0.92 \times 10^{10}$

Tabelle 3.27:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 3C 345 bei 86 GHz. Die Flussdichte variiert über einen Zeitraum von fünf Jahren um einen Faktor sechs.

NRAO 530

Die Quelle NRAO 530 wurde lediglich in zwei zeitlich sehr weit auseinanderliegenden Epochen beobachtet (1994.92 und 1997.28). Auch wenn in Abbildung 3.26 die Struktur der Quelle sehr ähnlich ist, ist es sehr unwahrscheinlich, dass die beobachteten Komponenten identisch sind, da die über den 2 cm-Survey ermittelten Geschwindigkeiten nahezu $30c$ betragen. Auffällig an der Karte von 1997.28 ist die neue Komponente, die scheinbar etwas heller ist, als der Kernbereich. Flussdichtemessungen zwischen 1995 und 2000 bei 22 und 37 GHz (Teräsranta et al. (2004)) zeigen einen *Flare* zwischen Ende 1995 und Anfang 1997, sowie einen starken Abfall der Flussdichte im ersten Quartal von 1997 (bis zu 75%). Der Spektralindex kann Anfang 1995 und Anfang 1997 errechnet werden. Die bei 86 GHz verwendeten Gesamtflussdichten wurden während der VLBI Messung am Pico Veleta aufgenommen. Jul. 1995:

$$\alpha_{22/37} = 0.02$$

$$\alpha_{22/86} = -0.23$$

$$\alpha_{37/86} = -0.36$$

Feb. 1997:

$$\alpha_{22/37} = -0.66$$

$$\alpha_{22/86} = -0.53$$

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1994.97	2.47 ± 0.49	0.03 ± 0.006	$8.61 \pm 1.42 \times 10^{11}$
	1997.28	2.66 ± 0.53	0.24 ± 0.048	$1.45 \pm 0.24 \times 10^{10}$

Tabelle 3.28:

Eigenschaften des Kerns der Quelle NRAO 530 bei 86 GHz. In den zwei Epochen zeigt sich keine Variation in der Flussdichte. Die unterschiedliche Strahlungstemperatur wird durch die Variation im Kerndurchmesser hervorgerufen.

$$\alpha_{37/86} = -0.44$$

Der Abfall der Flussdichte wird bei 37 GHz zwischen Januar und Mai 1997 und bei 22 GHz etwas langsamer zwischen März und Juni beobachtet. Die hier gezeigte Unregelmäßigkeit in der Kernstruktur liegt demnach genau in dem Zeitraum der Flussdichteabnahme. Die in Abbildung 3.26 gezeigte Komponente liegt bei einem Kernabstand von ca. 0.5 mas. Bei einer Geschwindigkeit von $> 30 c$ wäre der Ausstoß der Komponente im September 1996 erfolgt. Zeitgleich zum Maximum der Gesamtflussdichte bei 37 GHz mit 15.55 Jy. Das Maximum bei 22 GHz folgte im November mit 17.07 Jy. Offensichtlich hängt bei dieser Quelle der Flussdichteanstieg bzw. -abfall von Hoch- zu Niederfrequent mit dem Ausstoßen einer neuen Komponente zusammen. Für eine Bestätigung dieser Zusammenhänge könnten Flussdichtemessungen bei 86 GHz Mitte 1996, sowie VLBI Karten bei 22 und 37 GHz Mitte 1997 betrachtet werden, die jedoch für diese Arbeit nicht verfügbar waren.

1749+096

Diese Quelle wurde 1997.28 beobachtet. Der Jet bewegt sich zunächst nach Osten, um bei einem Kernabstand von ca. 0.4 mas nach Nordosten abzuknicken. Mit einem Modellfit war es möglich, drei Komponenten bis zu einem Kernabstand von 1.62 mas zu identifizieren. Auf der Karte (3.27) ist eine leichte Ausdehnung des Kerns nach Osten zu erkennen, also wahrscheinlich eine neue Komponente kurz vor der Ejektion in den Jet, für den Fit einer Modellkomponente ist diese Ausdehnung jedoch nicht ausreichend. Beobachtungen bei 15 GHz (Lister & Homan (2005), Kellermann et al. (2004)) zeigen ebenfalls eine Jetstruktur über 3 mas in nordöstlicher Richtung, die

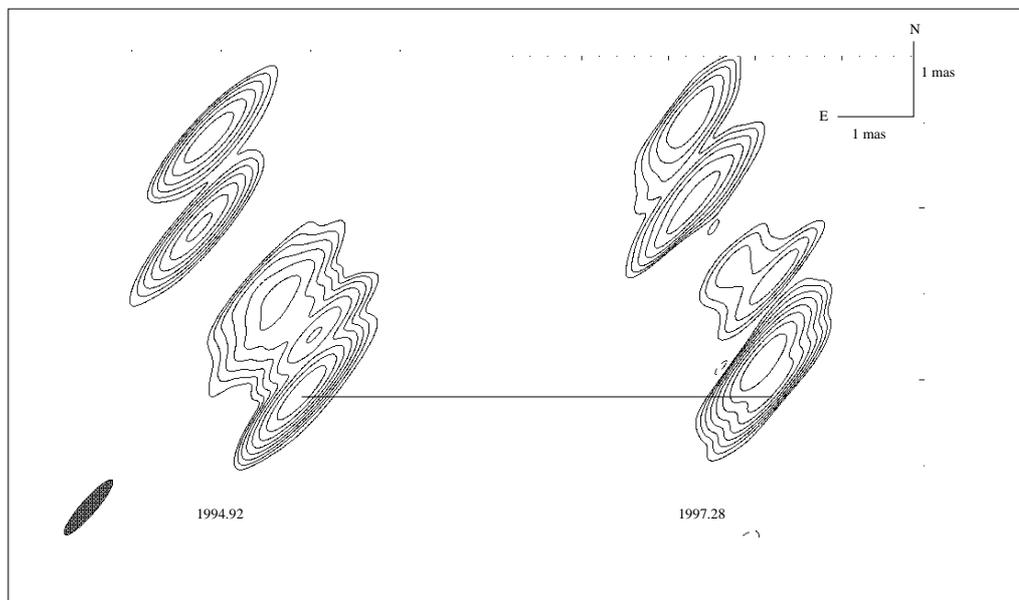


Abbildung 3.26:

86 GHz Beobachtungen von NRAO530 in den Epochen 1994.92 (links) und 1997.28 (rechts). Durch die große zeitliche Differenz der beiden Epochen ist eine Komponentenidentifikation als unwahrscheinlich anzusehen. Die Jetstruktur selbst hat sich nur marginal verändert.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Kernabstand [mas]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1997.28	1.99 ± 0.40	–	0.06 ± 0.01	$1.20 \pm 0.38 \times 10^{11}$
A	1997.28	0.25 ± 0.05	1.62 ± 0.32	0.05 ± 0.01	$2.18 \pm 0.36 \times 10^{10}$
B	1997.28	0.71 ± 0.14	0.40 ± 0.08	0.07 ± 0.01	$3.17 \pm 0.27 \times 10^{10}$
C	1997.28	0.36 ± 0.07	0.35 ± 0.07	0.05 ± 0.01	$3.15 \pm 0.54 \times 10^{10}$

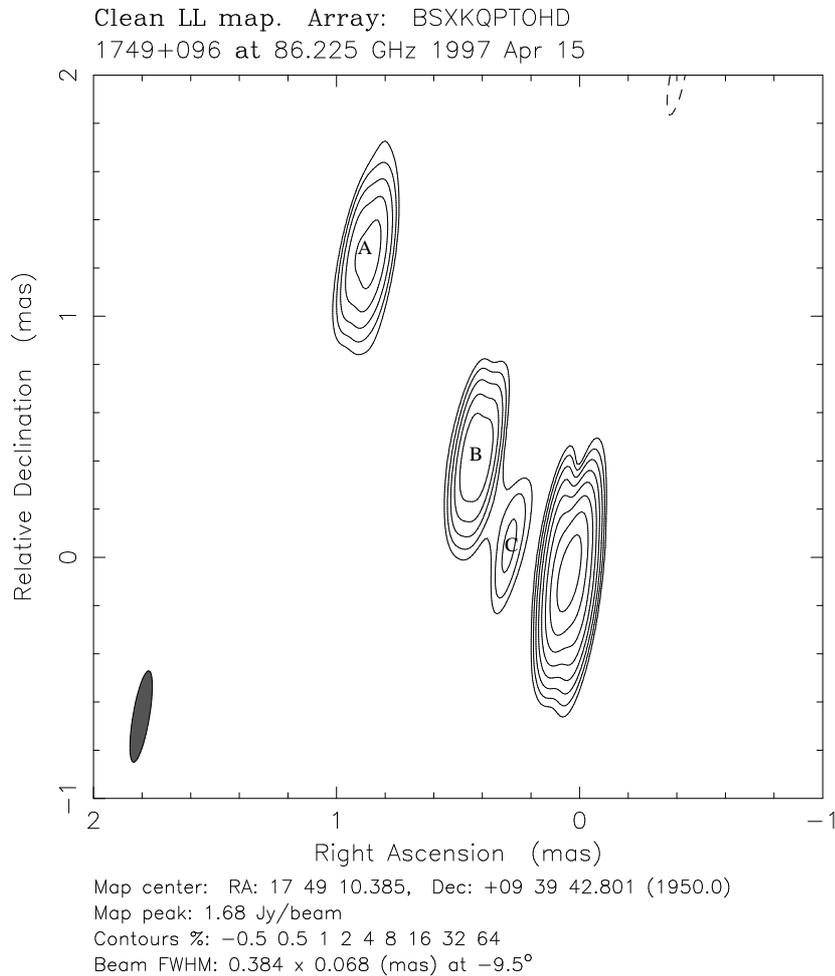
Tabelle 3.29:

Eigenschaften der Komponenten der Quelle 1749+076 bei 86 GHz.

mit diesen Daten ermittelte Geschwindigkeit liegt bei 3 c. Auffällig bei dieser Quelle ist die sehr kurze Jetstruktur, die auch bei 2.3 GHz nur etwa 30 mas lang ist (Fey & Charlot (1997)). In höheren Frequenzen ist diese Quelle punktförmig. Der Spektralindex kann auch bei dieser Quelle durch die online verfügbaren Daten von Teräsranta (Teräsranta et al. (2004)) bei 22 und 37 GHz bestimmt werden: $\alpha_{22/37} = -0,004$. Flussdichtemessungen bei 86 GHz lagen zum Zeitpunkt der Beobachtung nicht vor; die von Teräsranta gemessene Flussdichte wurde ein halbes Jahr später aufgenommen und wird daher hier nicht berücksichtigt.

2145+067

Diese Quelle wurde in insgesamt drei Epochen beobachtet. Die einzelnen Epochen sind von guter Qualität, so dass eine Identifikation von drei Komponenten möglich ist. Die Ausdehnungsrichtung des Jets ist Südosten und zeigt keine Biegungen bis zu einer Länge von 2 mas. Die Jetstruktur bei 15 GHz verläuft ähnlich der bei 86 GHz und zeigt eine kompakte Struktur (Lister & Homan (2005)) mit etwa 2 mas Durchmesser, sowie eine eher diffuse Struktur, die sich bis zu 4 mas nach Südwesten reicht. Anhand der 15 GHz Daten wurde eine Geschwindigkeit von 1.41 c ermittelt. Bei 43 GHz (Lister & Smith (2000)) wird ebenfalls ein kompakter Kern detektiert sowie eine Jetstruktur, die bis zu 1 mas nach Südosten ausdehnt. Aus den 86 GHz Daten können Geschwindigkeiten für die drei beobachteten Komponenten abgeleitet werden. Die Jetgeschwindigkeit variiert stark und liegt bei den hier beobachteten Daten zwischen 1.05 und 6 c. Jedoch resultiert auch bei dieser Quelle durch die hohe Rotverschiebung von $z = 0.999$ eine kleine Änderung in der Positionsbestimmung in einer großen Abweichung in der Geschwindigkeit.

**Abbildung 3.27:**

86 GHz Beobachtung von 1749+096

	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
K	1994.92	2.47 ± 0.49	0.12 ± 0.02	$5.65 \pm 0.65 \times 10^{10}$
	1996.78	–	–	
	1999.81	2.73 ± 0.55	0.14 ± 0.03	$4.59 \pm 0.83 \times 10^{10}$

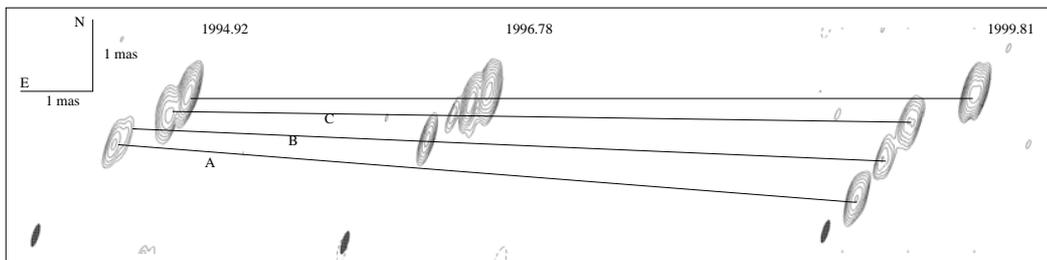
Tabelle 3.30:

Eigenschaften des Kerns der Quelle 2145+067 bei 86 GHz. 1996.78 war es nicht möglich, die Kernparameter eindeutig zu bestimmen.

Komponente	Epoche	Kernabstand [mas]	Geschwindigkeit [mas/yr]
A	1994.92	1.30 ± 0.26	
	1999.81	2.42 ± 0.48	0.23
B	1994.92	1.08 ± 0.22	
	1996.78	1.15 ± 0.23	0.04
	1999.81	1.73 ± 0.34	0.19
C	1994.92	0.39 ± 0.08	
	1996.78	0.64 ± 0.13	0.13
	1999.81	1.06 ± 0.21	0.14

Tabelle 3.31:

Eigenschaften der Modellkomponenten der Quelle 2145+067 bei 86 GHz. Komponente A wurde dabei jedoch nur in zwei Epochen detektiert.

**Abbildung 3.28:**

86 GHz Beobachtung von 2145+067 in den Epochen 1994.92, 1996.78 und 1999.81 (von links nach rechts). Die Komponenten konnten über einen Zeitraum von fünf Jahren eindeutig identifiziert werden, und ihre Bewegungen sind durch die durchgezogenen Linien wiedergegeben.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
K	1997.28	0.90 ± 0.02	0.03 ± 0.006	$1.76 \pm 0.50 \times 10^{11}$
	1997.82	1.04 ± 0.21	0.03 ± 0.006	$2.03 \pm 0.32 \times 10^{11}$
	1998.25	1.48 ± 0.30	0.06 ± 0.01	$7.25 \pm 0.82 \times 10^{10}$
	1999.28	2.07 ± 0.41	0.03 ± 0.006	$4.05 \pm 0.66 \times 10^{11}$
	1999.81	1.49 ± 0.30	0.02 ± 0.004	$6.57 \pm 1.07 \times 10^{11}$

Tabelle 3.32:

Eigenschaften des Kerns der Quelle BL Lac bei 86 GHz. Die Flussdichte variiert in 2.5 Jahren um einen Faktor zwei. Die Variation der Strahlungstemperatur ist bedingt durch die Varianz im Durchmesser des Kerns.

BL–Lac

Bei 86 GHz verläuft der Jet bis zu 1 mas Kernabstand in südlicher Richtung. Vergrößert sich der Abstand zum Kern auf ca. 2 mas, ändert sich der Positionswinkel auf bis zu 168° , der Jet knickt nach Südosten ab. Die einzelnen Jetkomponenten können bei diesen Beobachtungen gut über die einzelnen Epochen detektiert und identifiziert werden (Tab.3.33). Die Jetgeschwindigkeiten variieren stark über den beobachteten Bereich. So wird für die kernnächste Komponente nur eine Bewegung von 0.09 mas/yr detektiert, für die entfernteste Komponente eine Bewegung von 1.33 mas/yr . Die durchschnittliche Komponentengeschwindigkeit liegt bei etwa $2c$, was der unteren bisher beobachteten Geschwindigkeit bei 22 und 43 GHz (Denn et al. (2000)) entspricht. Beobachtungen bei 15 GHz (Kellermann et al. (1998)) zeigen einen Jet, der sich zunächst sehr gradlinig nach Süden bewegt und sich in einem Kernabstand von 5 mas nach Osten hin auffächert. Polarisationsmessungen bei dieser Frequenz zeigen eine leichte Polarisation im Kern, sowie eine stärkere Polarisation im südlichen breiten Jet. Wie bei Quelle 1611+343 scheint hier eine Abbremsung und Umlenkung des Jets vorzuliegen. Diese eher diffuse Jetstruktur ist bei den Beobachtungen bei 86 GHz nicht zu detektieren.

2201+315

Für diese Quelle liegt eine Beobachtung von Oktober 1999 vor. Der Jet kann bis zu einer Distanz von 1.5 mas zum Kern beobachtet werden, jedoch zeigt sich eine große

Komponente	Epoche	Kernabstand [mas]	Geschwindigkeit [mas/yr]
A	1997.28	1.94 ± 0.39	
	1997.82	2.34 ± 0.47	0.74
B	1997.28	1.25 ± 0.25	
	1997.82	1.83 ± 0.37	1.07
	1998.25	2.40 ± 0.48	1.33
C	1997.28	0.85 ± 0.17	
	1997.82	1.08 ± 0.22	0.48
	1998.25	1.25 ± 0.25	0.40
	1999.28	1.60 ± 0.32	0.33
D	1997.28	0.45 ± 0.09	
	1997.82	0.63 ± 0.13	0.33
	1998.25	0.74 ± 0.15	0.26
	1999.28	1.26 ± 0.25	0.50
E	1997.28	0.34 ± 0.07	
	1998.25	0.69 ± 0.14	0.81
	1999.28	1.03 ± 0.21	0.33
	1999.81	1.20 ± 0.24	0.32
F	1997.28	0.11 ± 0.02	
	1997.82	0.23 ± 0.05	0.22
	1998.25	0.34 ± 0.07	0.25
	1999.28	0.57 ± 0.11	0.22
	1999.81	1.03 ± 0.21	0.87
G	1998.25	0.22 ± 0.04	
	1999.28	0.34 ± 0.07	0.11
	1999.81	0.40 ± 0.08	0.11
H	1999.28	0.17 ± 0.03	
	1999.81	0.22 ± 0.04	0.09

Tabelle 3.33:

Eigenschaften der Modellkomponenten der Quelle BL Lac bei 86 GHz. Es konnten acht Komponenten über einen Zeitraum von 2.5 Jahren identifiziert und verfolgt werden. Die durchschnittliche Komponentengeschwindigkeit liegt bei $\beta_{app} = 2c$.

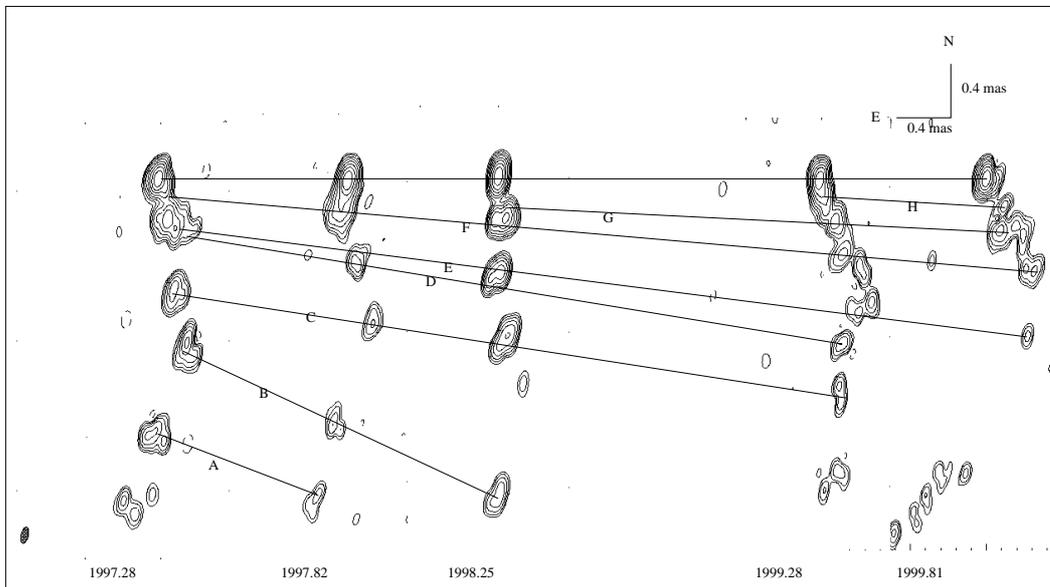


Abbildung 3.29:

86 GHz Beobachtungen von BL Lac in den Epochen 1997.28, 1997.82, 1998.25, 1999.28 und 1999.81 (von links nach rechts). Die einzelnen Komponenten des Jets konnten sehr signifikant nachgewiesen werden. Teilweise verlassen einige der Komponenten das kartierte Gebiet (A, B) innerhalb eines Jahres.

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Kernabstand [mas]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
Kern	1999.81	0.82 ± 0.16	–	0.04 ± 0.008	$1.10 \pm 0.19 \times 10^{11}$
A	1999.81	0.08 ± 0.02	2.41 ± 0.48	0.07 ± 0.014	$3.50 \pm 0.45 \times 10^9$
B	1999.81		2.33 ± 0.47	0.07 ± 0.014	
C	1999.81	0.18 ± 0.04	0.55 ± 0.11	0.07 ± 0.014	$7.86 \pm 1.16 \times 10^9$

Tabelle 3.34:

Eigenschaften Komponenten der Quelle 2201+315 bei 86 GHz.

Unterbrechung von mehr als einer Millibogensekunden. Die Hauptrichtung des Jets ist Südsüdost. Beobachtungen von Lister bei 22 und 43 GHz (Lister & Smith (2000)) zeigen eine ähnliche Unterbrechung der Struktur zwischen 1 und 3 mas Kernabstand sowie einen Anstieg der Polarisation kurz vor der Unterbrechung. Eine mögliche Ursache für diese Struktur, ist eine starke Abbremsung und Umlenkung des Jets vom Beobachter weg. Bei einer Entfernung von ca. 3 mas verläuft dann eine erneute Biegung wieder in Richtung des Beobachters.

CTA 102

Die Quelle CTA 102 wurde zwischen 1994 und 1999 regelmäßig als Kalibrator für Messungen der 3C 454.3 (Kap.4) beobachtet. Da die Kalibratoren nur jeweils für ein paar *Scans* beobachtet werden, ist die Qualität der Daten nicht hochwertig. Bei zeitlich dicht aufeinanderfolgenden Epochen (1996.78 und 1997.28, 1999.28 und 1999.81) und mittlerer uv-Bedeckung konnten trotzdem Daten gewonnen werden, die die Quellstruktur bis zu einer Kernentfernung von 5 mas wiedergeben. Der Jet kann über einen Bereich von > 3 mas beobachtet werden. Die Ausbreitungsrichtung in Kernnähe ist Osten, bei einem Abstand von ca. 0.5-0.8 mas knickt der Jet nach Südosten ab. In allen Epochen scheint der Jet in einem Kernabstand von ca. 1 mas schwächer zu werden oder ist nicht detektierbar. Beobachtungen bei 22 GHz (Wiik et al. (2001)) zeigen ein ähnliches Verhalten: Der Jet ist über einen Bereich von fast 3 mas nicht detektierbar und kann erst bei einer Entfernung von > 5 mas wieder beobachtet werden. Polarisationsmessungen bei 15 GHz (Lister & Homan (2005)) zeigen eine unpolarisierte Kern- und Jetkomponente (in 5 mas Kernabstand), sowie leicht polarisiertes diffuses Medium, welches nach der Jetkomponente

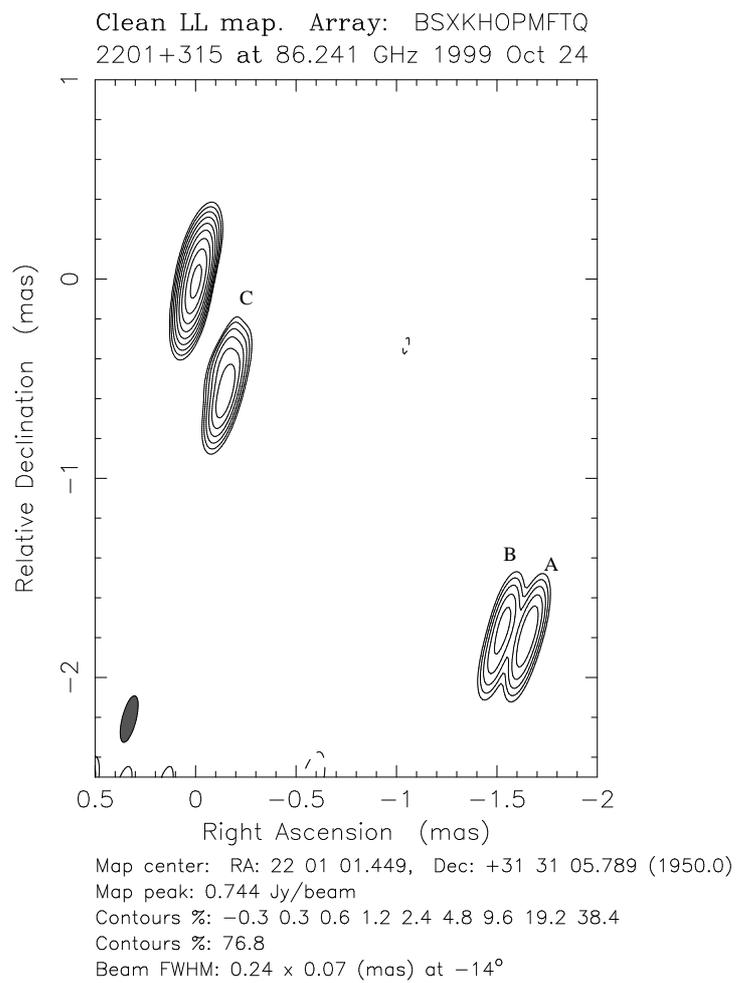


Abbildung 3.30:
86 GHz Beobachtung von 2201+315

Komponente	Epoche	Flussdichte [Jy]	Durchmesser [mas]	Strahlungstemperatur [K]
K	1994.97	0.81 ± 0.16	0.02 ± 0.004	$6.80 \pm 1.12 \times 10^{11}$
	1996.07	0.55 ± 0.11	0.03 ± 0.006	$2.05 \pm 0.33 \times 10^{11}$
	1996.82	1.36 ± 0.27	0.03 ± 0.006	$5.08 \pm 0.84 \times 10^{11}$
	1997.28	1.48 ± 0.30	0.02 ± 0.004	$1.24 \pm 0.20 \times 10^{12}$
	1997.82	1.64 ± 0.32	0.06 ± 0.01	$1.53 \pm 0.18 \times 10^{11}$
	1998.25	1.52 ± 0.30	0.06 ± 0.01	$1.41 \pm 0.16 \times 10^{11}$
	1999.28	1.66 ± 0.22	0.04 ± 0.008	$3.48 \pm 0.73 \times 10^{11}$
	1999.81	2.84 ± 0.57	0.08 ± 0.02	$1.49 \pm 0.34 \times 10^{11}$

Tabelle 3.35:

Eigenschaften des Kerns der Quelle CTA 102 bei 86 GHz. Die Flussdichte schwankt in fünf Jahren um einen Faktor 4, die Strahlungstemperatur variiert aufgrund der unterschiedlichen Kerndurchmesser.

abnimmt. Bei 43 GHz wird ebenfalls ein unpolarisierter Kern, sowie eine unpolarisierte Jetkomponente detektiert (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/sourcepages/2230+114.shtml>), letztere in ~ 1.5 mas Kernentfernung. Innerhalb der Jetstruktur finden sich bei einer Wellenlänge von 2 cm lokale Maxima in der gemessenen Polarisation, die sich dicht (1 mas) an dem jeweiligen Maximum der Flussdichte einer Jetkomponente befinden. Offensichtlich wird bei dieser Quelle in einem Kernabstand von 1.5 und 5 mas das Magnetfeld komprimiert und der Jet für eine gewisse Strecke nicht sichtbar. Dies deutet auf mehrere Biegungen innerhalb der Jetstruktur hin die sowohl zum Betrachter, wie auch von ihm weg weisen. Jorstad (Jorstad et al. (2001)) findet bei dieser Quelle zwischen 1995 und 1997 mehrere stationäre Komponenten bei 43 GHz, die sich in den Abständen 1.8, 4.3 und 7.4 mas befinden. An diesen Stellen ändert sich ebenfalls die Jetrichtung mehrmals abwechselnd von Südost nach Süden und zurück. Diese Beobachtungen unterstützen ebenfalls die Theorie mehrerer Jetbiegungen in dieser Struktur.

Für eine Verifikation ist ein Monitoringprogramm bei 43 GHz und bis zu einem Abstand von ~ 8 mas sinnvoll, welches Komponentenbewegung über einen längeren Zeitraum aufnimmt. Damit können Unterschiede in den Geschwindigkeiten bei einzelnen Komponenten detektierbar sein, die bei einer Annäherung an eine Biegung bzw. an eine stationäre Komponente stattfinden sollte.

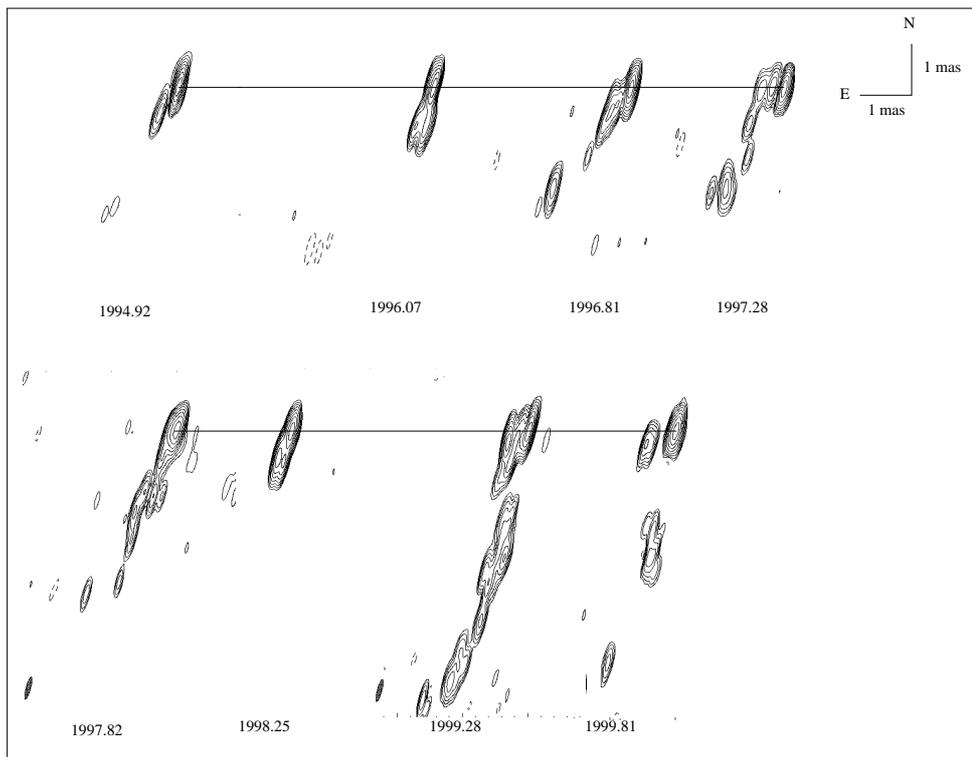


Abbildung 3.31:

86 GHz Beobachtungen von CTA 102 in den Epochen 1994.92, 1996.07, 1996.78, 1997.28, 1997.82, 1998.25, 1999.28 und 1999.81 (von links nach rechts). Diese Quelle wurde in den vorliegenden Epochen als Kalibrator verwendet, wodurch nur jeweils geringe Anzahlen von Scans mit kurzen Integrationszeiten vorliegen. Die Datenqualität ist daher gering. Aufgrund der hohen Intensität der Quelle ist dennoch eine reiche Jetstruktur zu beobachten.

3C 454.3

Wie in Tabelle 3.2 ersichtlich, ist diese Quelle am häufigsten beobachtet worden. Zusätzlich liegen Daten anderer Wellenlängen vor, die eine genauere Analyse der Jetdynamik und -prozesse ermöglichen. Im folgenden Kapitel (4) werden diese Ergebnisse präsentiert.

3.2 Zusammenfassung und Interpretation

Die hier vorgestellten Daten sollen einen Überblick über AGN-Beobachtungen bei 86 GHz liefern. Die verwendeten Daten eignen sich nur zum Teil für eine genaue Analyse, da sowohl die Lage der einzelnen Epochen in den Jahren zwischen 1993 und 1999 unregelmäßig war, als auch die Datenverarbeitung mit den verwendeten Programmen für 86 GHz-Beobachtungen nicht einheitlich erfolgte. Beobachtungen bei hohen Frequenzen setzen eine stabile Wetterlage voraus, die gerade in Europa im April und Oktober nicht immer vorhanden ist. Bis zu einem bestimmten Punkt werden Umweltbedingungen über die Systemtemperatur aus den Daten eliminiert, jedoch muss das Wetter dazu überhaupt eine Datenaufnahme zulassen. Bei der Einbeziehung der europäischen Teleskope zur Erzeugung langer Basislinien ist die Verschiebung von April auf Mitte Januar bzw. von Oktober auf Ende August/Anfang September zu überdenken. Aus den Karten geht hervor, dass bei den meisten mehrfach beobachteten Quellen die Komponenten nicht eindeutig über mehrere Epochen detektierbar sind. Die in dieser Arbeit vorgenommenen Zuordnungen sind jeweils eine Möglichkeit, die bei den vorliegenden Daten am wahrscheinlichsten ist. Für die Mehrdeutigkeit gibt es folgende Ursachen:

- Der Dynamikbereich der Daten schwankt zwischen den einzelnen Epochen. Durch die Variationen in der Datenqualität können nicht in jeder Epoche die gleichen Jetstrukturen detektiert werden.
- Die Flussdichte der einzelnen Komponenten ist nicht konstant. Ursache hierfür können sowohl Prozesse innerhalb des Jets sein, als auch kleinere und größere Biegungen der Jetbahn, die zu einer Ausrichtung entgegen der Sichtlinie des Beobachters und damit zu einer starken Abschwächung des Jets führen.

- Der zeitliche Abstand der Epochen ist für die Bewegung einiger Komponenten zu lang. Je nach Quelle (Entfernung, Integrationszeit, Helligkeit) können die Jets nur bis zu einem bestimmten Kernabstand detektiert werden. In diesem Fall ist nur eine mehrdeutige Zuordnung möglich, da sich Komponenten bereits aus dem Gesichtsfeld des Teleskops bewegt haben könnten.
- Die Komponentenbewegung kann nur mit einer Genauigkeit von $\pm 20\%$ angegeben werden. Durch die große Abhängigkeit des Maßstabs von der Rotverschiebung kann eine ungenaue Ortsangabe das Ergebnis der Berechnung der Komponentengeschwindigkeit erheblich verzerren.

Im Gegensatz zu Beobachtungen bei niedrigeren Frequenzen zeigen viele dieser Quellen eine stark ausgeprägte Feinstruktur des Jets und nur geringfügig diffuses Material. Es ist selten möglich, den Jet mit einer abzählbaren Anzahl von Modellkomponenten in der normalerweise verwendeten Analysesoftware zu beschreiben (Beispiel Abb. 3.6). Daher wurde bei der Analyse der Karten weitgehend auf die genaue Klassifikation der einzelnen Komponenten verzichtet und die Jetstruktur als Ganzes bzw. nur die Komponentenbewegung betrachtet. Die bei einigen Quellen vorgenommenen Geschwindigkeitsabschätzungen der Jetkomponenten zeigen deutlich, wie stark die einzelnen Komponenten über mehrere Epochen zu beschleunigen oder abzubremesen scheinen (vgl. 0528+143). Ursache hierfür ist scheinbar oftmals eine inhomogene Bewegung innerhalb der Jetstruktur. Bei den hier vorgestellten Quellen zeigt sich nahezu eine Gleichverteilung in drei Untergruppen:

- Bei etwa einem Drittel der Quellen werden Biegungen und Knicke im Jet beobachtet, wobei die Richtung nur zweidimensional anhand der Karte angegeben werden kann. Eine deutliche Erhöhung der Geschwindigkeit kann aus einer Biegung zum Beobachter resultieren. In diesem Fall ist eine Änderung in der Jetpolarisation zu erwarten und gibt ergänzend Aufschluss über den tatsächlichen Jetverlauf.
- Etwa ein Drittel der Quellen zeigt eine Jetstruktur, die auf eine Präzession des Jets deutet. Es werden periodische Änderungen im Positionswinkel des Jetfußpunktes, sowie Schwingungen innerhalb der Jetstruktur beobachtet. Die Schwingungsdauern liegen nach den hier präsentierten Daten zwischen 2 und 12 Jahren.

- Die übrigen Jets verlaufen nahezu gradlinig und weisen keine Biegungen oder Schwingungen auf.

In Hinblick auf das Standardmodell eines AGN, welches eine gradlinige Ausbreitung der Jetstrukturen senkrecht zu der Akkretionsscheibe postuliert, weichen demnach 2/3 der beobachteten Quellen bereits in der unmittelbaren Umgebung der Akkretionsscheibe von diesem Modell ab. Diese Abweichungen können mehrere Ursachen haben. Zum Einen ist eine Ablenkung des Jets durch das umgebene Medium möglich. Hierbei würde sich das Medium durch den Plasmajet aufheizen und sollte im Bereich des Infraroten detektierbar sein. Zum Anderen können Präzessionsbewegungen des Jets zu den beobachteten Biegungen führen.

Zukünftige Beobachtungen mit verbesserter Datenqualität in Kombination mit Beobachtungen anderer Wellenlängen werden zum Verständnis der physikalischen Prozesse innerhalb eines AGN beitragen.

Kapitel 4

3C454.3

3C 454.3 wurden in den letzten 20 Jahren Ziel intensiver Beobachtungen in Radiofrequenzbereichen von 4.8 GHz (Cawthorne & Gabuzda (1996)), 10.45 GHz (Pauliny-Toth et al. (1987), Pauliny-Toth (1998)), 15 GHz (Kellermann et al. (1998)), 43 GHz (Kemball et al. (1996)), 43 GHz (Marscher et al. (1997)), 22 und 43 GHz (Gómez et al. (1999)) und Jorstad et al. (2005)), in infraroten und optischen Wellenlängen (Fuhrmann et al. (2006)) und im hochenergetischen Gammastrahlenbereich von 3-10 und 100 MeV (Zhang et al. (2005)). In diesem Kapitel werden zunächst Helligkeitsausbrüche studiert, die bei dieser Quelle über einem Zeitraum von bis zu 25 Jahren in verschiedenen Frequenzen detektiert worden sind. Aus diesen Beobachtungen ergibt sich eine Periodizität der Intensitätsvariation von 12 Jahren, deren mögliche Ursachen und Auswirkungen auf die Jetstruktur durch die Betrachtung der großskaligen, sowie der kleinskaligen Struktur analysiert wird. Der Jet im Bereich von einigen Millibogensekunden bis hin zu einem Kernabstand von < 1 Millibogensekunde wird in den Frequenzen 22, 43 und 86 GHz kartiert und die Struktur unter Verwendung von Spektralindexkarten analysiert. Innerhalb dieser Jetstruktur entdeckte Pauliny-Toth während eines 5-jährigen Monitoringprogramms bei 10.45 GHz superluminale Geschwindigkeiten von 0.21 bis 0.68 mas yr⁻¹. Bei 22 und 43 GHz differierten die Geschwindigkeiten deutlich davon und wurden von Gómez mit 0.14 mas yr⁻¹ angegeben. Beobachtungen von Jorstad zeigen bei 43 GHz eine stationäre Komponente in einem Kernabstand von $\sim 0.66 \pm 0.04$ mas. Eine solche Komponente wurde sowohl

bei Kemball bei 43 GHz, als auch bei Pauliny-Toth bei 10.7 GHz in einer vergleichbaren Entfernung detektiert und ebenfalls als stationär bezeichnet. Ausserdem wurde eine nahezu stationäre Komponente bei 5 mas Kernabstand beschrieben, die im 2 cm-Survey detektiert wurde. Eine nähere Betrachtung dieser stationären Komponenten, sowie der Komponentengeschwindigkeiten folgt im Abschnitt 'Kinematik'.

4.1 Lichtkurven

Für die hier vorliegende Lichtkurven wurden sowohl Daten aus Metsähovi (Teräsran-ta, priv.comm.), als auch vom Pico Veleta (Ungerechts, priv.comm.) verwendet. Die Daten der Frequenzen 22 und 37 GHz liegen aus den Jahren 1980 bis 2005, die 90 und 230 GHz aus den Jahren 1985 bis 2005 und 150 GHz aus 1988 bis 2005 vor. Diese Messungen ermöglichen daher eine Analyse der Spektralindexvariation der Quelle erstmals über einen Zeitraum von ~ 20 Jahren. Es kann erwartet werden, dass es diese Variationsbetrachtungen erlauben, erstmals über einen typischen AGN Aktivitätszyklus von 1-15 Jahren hinweg zu studieren.

Für die Lichtkurven in den Abbildungen 4.1 (90, 150, 230) und 4.2 (22, 37, 90) wurden Daten in den Frequenzen 22, 37, 90, 150 und 230 GHz ausgewertet. In der ersten Hälfte des Jahres 2005 wurde an den Observatorien am Pico Veleta, sowie in Metsähovi und mit dem VLBA ein mit 1982 und 1994 vergleichbarer Anstieg der Flussdichte gemessen (Ungerechts, Krichbaum, Marscher, priv.comm.). Die Flussdichte dieser Quelle variiert in allen hier vorliegenden Frequenzen regelmäßig in einem Bereich von $\pm 30\%$ in einem Zeitraum von 1-2 Jahren. Desweiteren kann eine Periode von 12 ± 1 Jahren für das Auftreten von extremen *Flares* (1982 und 1994 Abb. 4.2, 2005 (Krichbaum, Marscher, priv.comm)) mit einem Anstieg der Flussdichte von mehr als 100% angegeben werden. Zur genaueren Untersuchung dieser Vorgänge wird das Verhältnis der Flussdichten von 22 und 37, sowie 150 und 230 GHz (Abb. 4.3), sowie der Spektralindex genauer betrachtet. Aus Abbildung 4.3 ist nicht eindeutig zu erkennen, ob bei den auftretenden *Flares*, Kühlprozesse relevant sind, die bei hohen Frequenzen zuerst beobachtet werden. Die "Lebensdauer" der hochrelativistischen Elektronen ($t_s \simeq 3 \times 10^4$ yr, $B_{\perp}^{-3/2}[G], \nu_e^{-1/2}[Hz]$) beträgt bei 230 GHz etwa 1/3 der Lebensdauer bei 22 GHz. In diesem Fall verläuft das Spektrum nicht gerade, sondern flacht mit steigender Frequenz ab, was in Abbildung 4.3

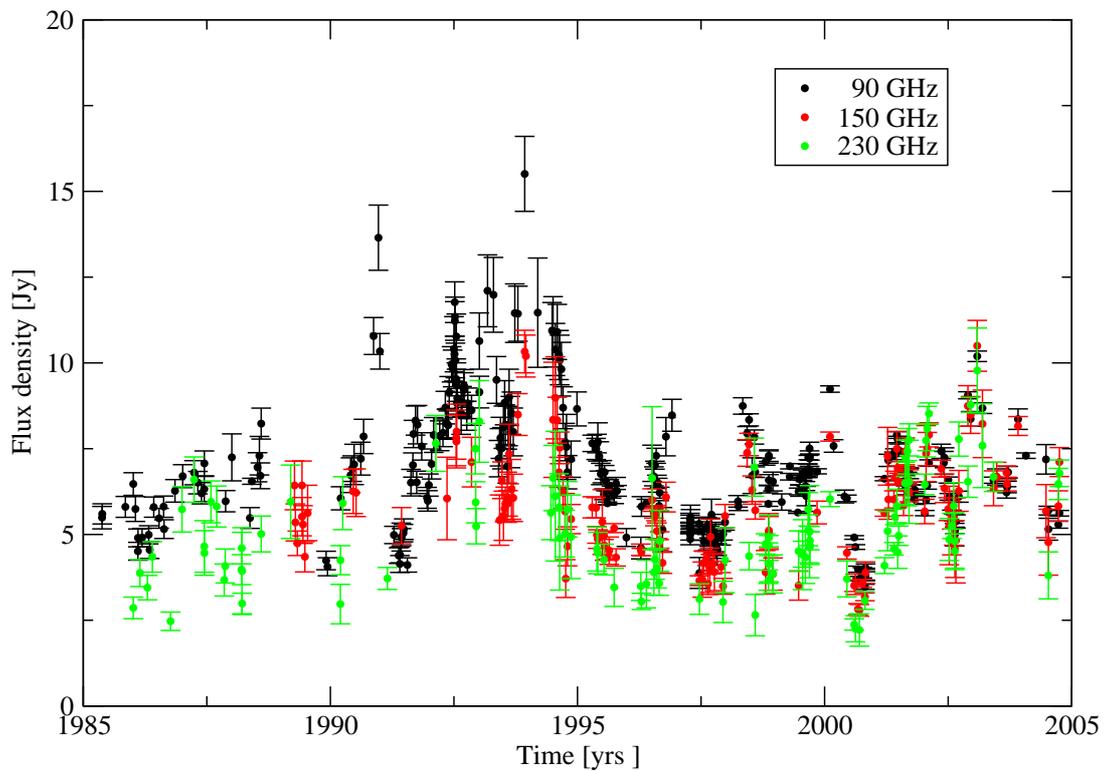


Abbildung 4.1:

Lichtkurven von 3C 454.3 in den Frequenzen 90, 150 und 230 GHz. Aufgetragen ist die Flussdichte gemessen mit den Einzeltelegopen Pico Veleta und Metsähovi als Funktion der Zeit. Zwischen 1992 und 1995 ist ein sogenannter *Mega-Flare* zu beobachten, währenddessen sich die Flussdichte für einen Zeitraum von ca. 2 Jahren verdoppelt. Auffällig ist der kurzzeitige Flussdichteanstieg bei 1991 vor dem eigentlichen *Mega-Flare*, der zu einer Invertierung des Spektrums führt.

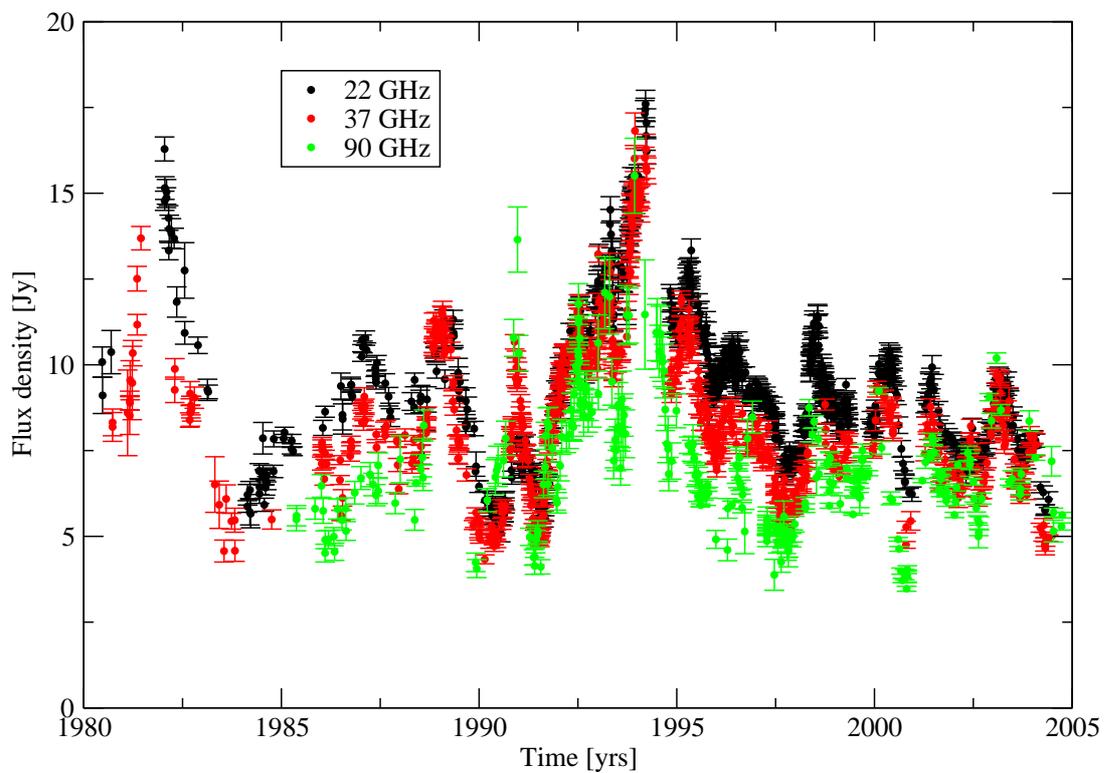


Abbildung 4.2:

Lichtkurven von 3C 454.3 in den Frequenzen 22, 37 und 90 GHz. Bei niedrigen Frequenzen wurde 3C 454.3 von den Radioteleskopen Pico Veleta und Metsähovi bereits seit 1980 beobachtet. Diesen Daten ist zu entnehmen, dass sich ein *Mega-Flare* bereits in den frühen 80er Jahren ereignete. Die *Flares* mit einem Flussdichteanstieg von 30% ereignen sich in einem zeitlichen Abstand von zwei Jahren.

lediglich zu erahnen ist. Die hierfür verwendeten Daten beinhalten den gesamten beobachteten Zeitraum von 1980 bis 2005. Über den gesamten Zeitraum gesehen ist das umgebende Medium in den vorliegenden Frequenzen optisch dünn. Bei der allgemeinen Betrachtung der Intensitätsmaxima während der großen *Flares* verändert sich dieses Bild deutlich (Abb. 4.4): Für niedrige Frequenzen ist das Medium optisch dick und das Spektrum wird steiler. Da die Lebensdauer der Elektronenpopulation zu 230 und 150 GHz lediglich um 23% verschieden sind, muß die Dämpfung der Radiostrahlung in der Umgebung des Supermassiven Schwarzen Loches dominieren. Der starke Intensitätsanstieg der Flussdichte bewirkt höchstwahrscheinlich eine Verschiebung der Ionisationsfront in der Umgebung des Schwarzen Loches.

Die Betrachtung des Spektralindex ist eine weitere Möglichkeit, Informationen über Strahlungsprozesse zu erhalten. Die Flussdichten bei 150 und 230 GHz wurden nicht über einen weiten Zeitraum ausreichend dicht aufeinanderfolgend gemessen, daher werden für die Ermittlung des Spektralindex nur die Frequenzen 22, 37 und 90 GHz verwendet.

Wie in Abbildungen 4.5 gezeigt, variiert der Spektralindex α zwischen 0.4 und -0.7 und ist demnach als eher flach zu bezeichnen. Kleinere Variationen von $\alpha = -0.3$ bis $+0.2$ treten in einem Abstand von 2 bis drei Jahren regelmäßig auf.

Auffällig ist der zeitliche Versatz zu einem auftretenden großen *Flare* (Abb. 4.5): Das Maximum des Spektralindex liegt Anfang der 90er Jahre bei ~ 0.5 und fällt mit einem kleineren *Flare* zusammen, das absolute Maximum der Flussdichte folgt in einem Abstand von ca. 3–4 Jahren. Ähnlich ist der Verlauf Mitte bis Ende 2003: Aus den Lichtkurven geht ein kleiner Anstieg der Flussdichte bei hohen Frequenzen hervor, der jedoch eine große Variation des Spektralindex zur Folge hat. Der eigentliche *Flare* im Millimeterwellenlängenbereich fand jedoch erst Mitte bis Ende 2005 statt (Krichbaum priv.comm, Marscher priv.comm), also in einem Zeitabstand von etwa 2 Jahren! Dies unter der Annahme, dass der mit Effelsberg und dem VLBA 2005 beobachtete *Flare* sein Maximum erreicht und überschritten hat. Bei einem systematischen Verhalten wäre demnach der Anstieg des Spektralindex vor dem *Flare* 1982-83 noch nicht in diesen Daten dokumentiert, ebenso wie der beobachtete Anstieg der Flussdichte 2005 noch nicht in absoluten Flussdichten vorliegt. Aus dem Verlauf des Spektralindex lässt sich jedoch ebenfalls eine Periodizität von 12 ± 1 Jahren erkennen, wobei Prozesse innerhalb der Quelle zu einer Veränderung des Spektrums führen, in deren Abfolge sich ein *Flare* mit starker Intensität ereignet.

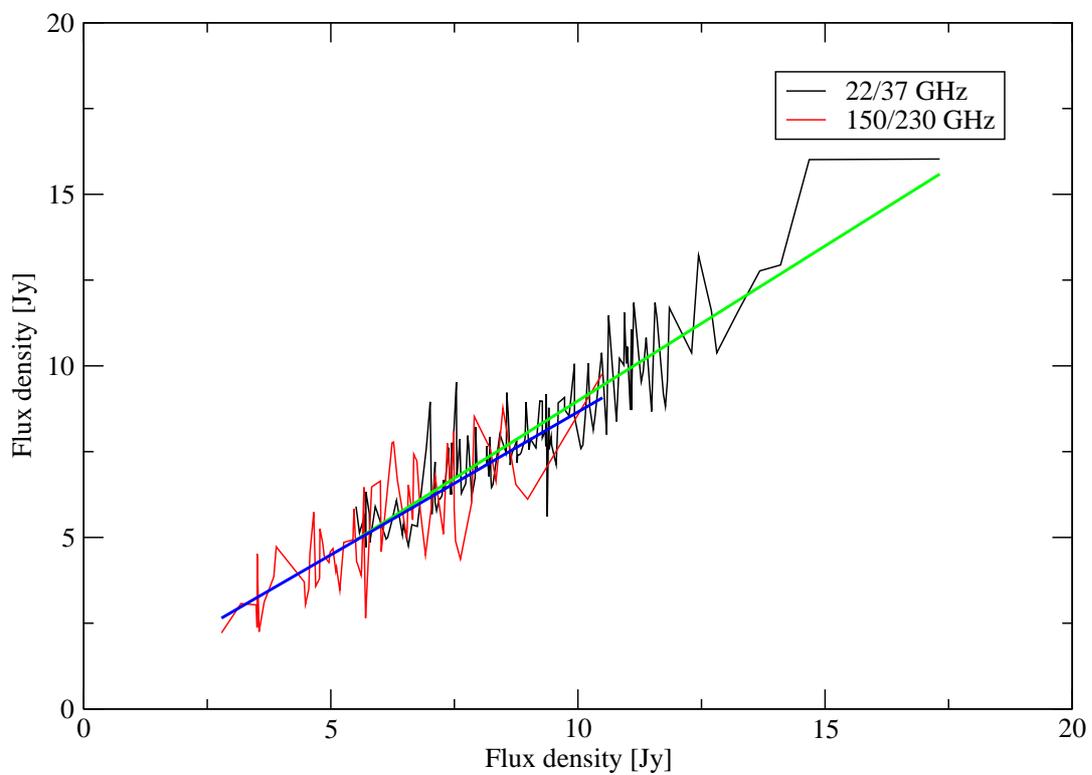


Abbildung 4.3:

Verhältnis der Flussdichten 22 zu 37, und 150 zu 230 GHz zwischen 1985 und 2005. Hierbei wurden alle Beobachtungen berücksichtigt. Da keine Abhängigkeit von der Frequenz zu erkennen ist, kann das umgebende Medium als optisch dünn angenommen werden.

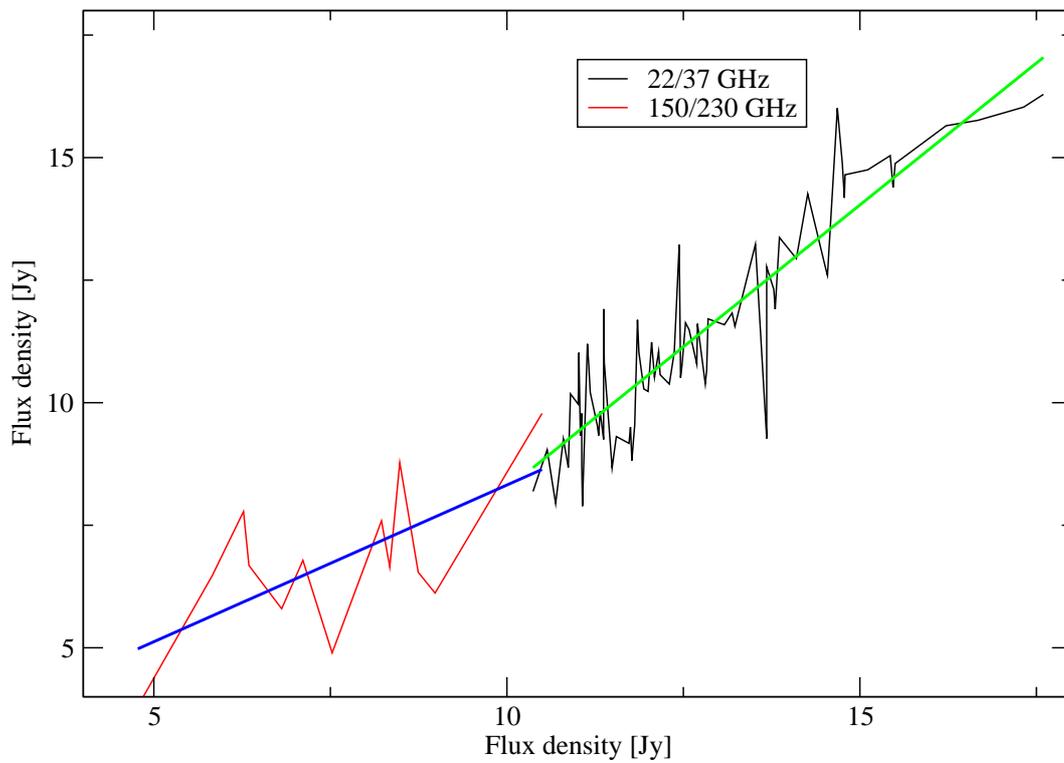


Abbildung 4.4:

Verhältnis der Flussdichten 22 zu 37, und 150 zu 230 GHz selektiert nach den in den Lichtkurven beobachteten Maxima. Es ist deutlich eine Zwei-Komponenten-Struktur erkennbar, die darauf hinweist, dass während der *Mega-Flares* die Opazität des umgebenden Mediums für hohe Frequenzen verringert wird, oder alternativ ein höherer Anteil hochrelativistischer Elektronen emittiert wird.

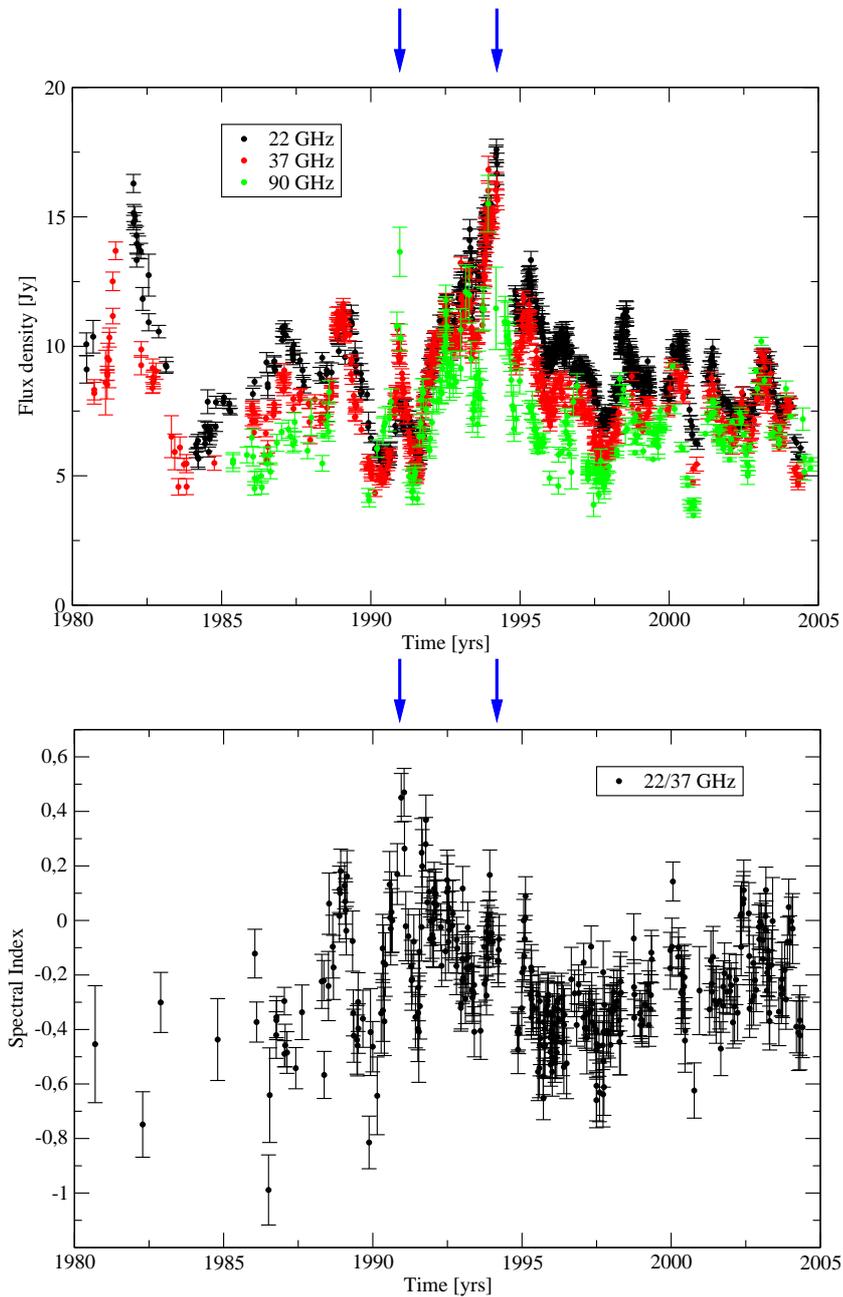


Abbildung 4.5:

Vergleich Flussdichte- und Spektralindexverlauf über 25 Jahre. Die Maxima sind durch Pfeile in beiden Kurven gekennzeichnet.

Oben: Abbildung 4.2 Unten: Spektralindex zwischen 22 und 37 GHz. Dem Mega-Flare vorangehend ist eine Invertierung des Spektrums zu beobachten (siehe auch Abb.4.1).

Nach den vorliegenden Daten ist ein Mega-Flare 2005-2007 zu erwarten.

Beobachtungen bei 8 GHz zwischen 1966 und 2005 zeigen eine ähnliche Periodizität von 12 ± 1.5 Jahren im Radiobereich (Villata et al. (2006)). Die Flussdichte stieg 1968, 1982 und 1995 um mehr als 100%. Der Millimeterflare von 2005 wird vermutlich erst zu Beginn von 2006 detektiert, da eine deutliche Zeitverzögerung zu den Beobachtungen bei 43 und 86 GHz zu erwarten ist.

4.2 Kinematik bei 22 und 43 GHz

Die vorliegenden Daten bei 22 und 43 GHz wurden zwischen März 1996 und März 2001 von Gómez und Agudo, sowie Marscher mit dem VLBA aufgenommen und für diese Arbeit zu Verfügung gestellt. Die zeitliche Dichte von bis zu einem Monat, sowie die gleichzeitig gemessenen Frequenzen von Gómez und Agudo erlauben die Betrachtung des Spektralindex sowohl des Kerns, als auch der Jetstruktur über einen Zeitraum von 5 Jahren. Die Dauer der einzelnen Beobachtungen variiert zwischen 6 und 600 Minuten (Tab. 4.1). Die Karten der beobachteten Epochen sind in den Anhängen A bis D im Detail dargestellt, die zeitlichen Abstände sind am Beispiel der 22 GHz Daten in Abbildung 4.6 dargestellt.

Die Jetstruktur bei 22 GHz reicht zunächst vom Kern gradlinig nach Westen. Bei einem Abstand von 1.5-2 mas knickt der Jet ab und zeigt ein deutliches Minimum in der Flussdichte bis zu einer Entfernung von ca. 4 ± 1 mas. Erst bei einem Kernabstand von ca. 5 mas wird der Jet bei dieser Frequenz wieder stärker sichtbar, ändert seine Richtung um etwa 90° nach Nordwesten und kann bis zu einem Abstand von 6-9 mas beobachtet werden. Dieser Verlauf resultiert vermutlich aus einem Bogen in der Jetstruktur, bei dem sich der Jet zunächst von der Sichtlinie wegbewegt und dadurch deutlich schwächer erscheint sowie einer nachfolgenden Bewegung in Richtung der Sichtlinie, wo sich eine helle und scheinbar stationäre Komponente bei 5 mas Kernabstand (hier weiter K1) findet. In fast allen Epochen tritt zusätzlich eine helle Komponente (K2) westlich des Kerns auf, die in der ersten Hälfte von 1999 den Kern an Intensität übertrifft. Ihr Kernabstand liegt bei 22 GHz bei ~ 0.8 mas. Hinter dieser Komponente zeigt sich der beschriebene erste Knick in der Struktur, wobei die Jetrichtung nach dem Knick über den beobachteten Zeitraum zu variieren scheint. Bei dieser Frequenz ist jedoch keine Systematik im Verlauf zu erkennen, der Jet ändert scheinbar willkürlich seine Richtung.

Epoche	Zeit [min]
1996.34	360*
1996.89	30+30*
1997.57	180+6*
1997.86	6
1997.94	6
1998.03	6
1998.10	6
1998.19	36
1998.28	30
1998.35	42
1998.44	40
1998.53	38
1998.62	30
1998.71	42
1998.82	42
1998.92	30
1999.03	36
1999.11	36
1999.16	40
1999.21	42
1999.32	600*
1999.67	42
1999.76	360*
1999.83	42
2000.11	60
2000.24	44
2000.33	42
2000.38	60
2000.44	40
2000.50	180
2000.84	240
2001.22	270

Tabelle 4.1:

*Beobachtungsdauer der Quelle 3C 454.3 bei 22 und 43 GHz. Die mit * gekennzeichneten Beobachtungen wurden von Alan Marscher zu Verfügung gestellt und liegen nur bei 43 GHz vor.*

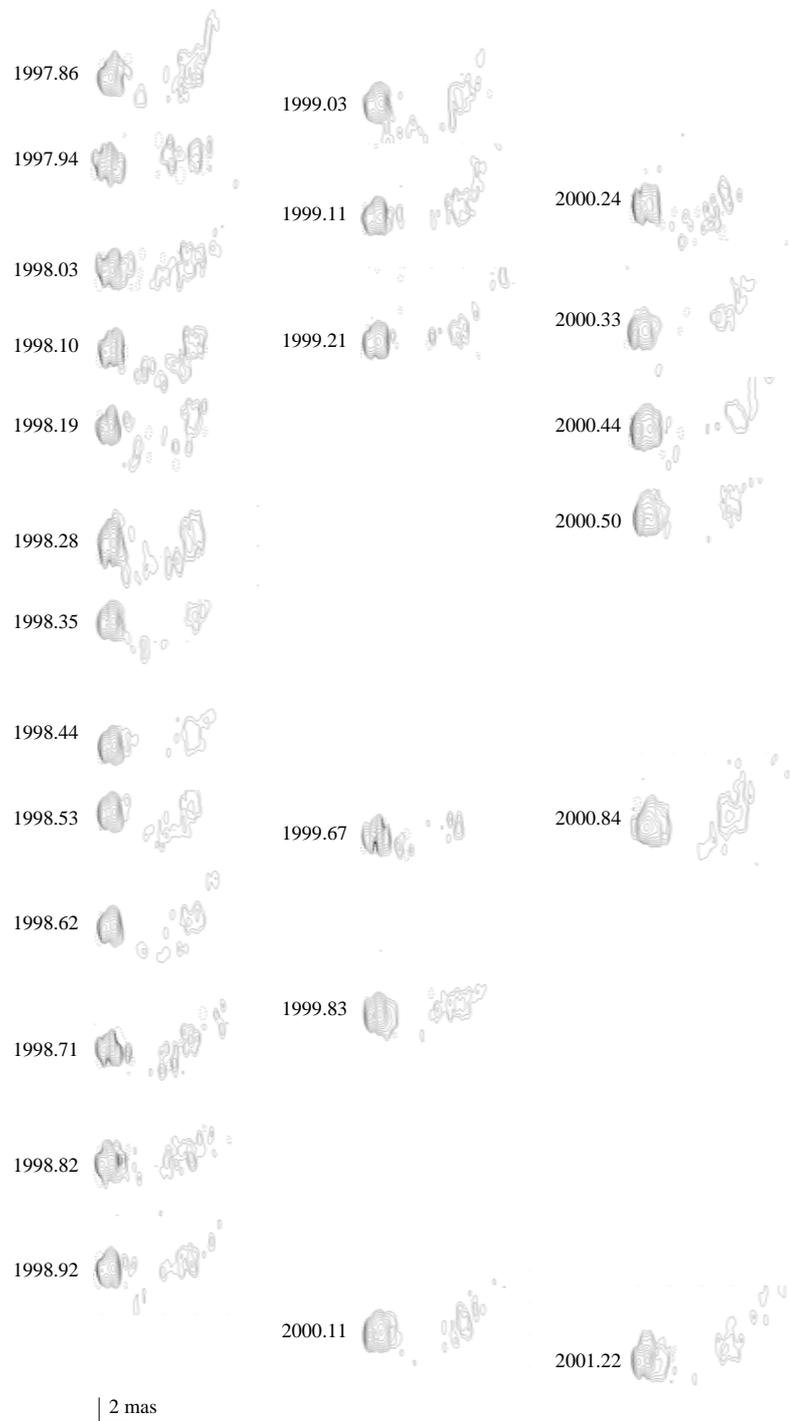


Abbildung 4.6:

Quellstruktur von 3C 454.3 bei 22 GHz in den Jahren 1997 bis 2001. In den Karten ist deutlich eine Unterbrechung des Jets zwischen 2 und 4 mas zu erkennen.

Bei 43 GHz ist die Jetstruktur nur bis ca. 5 mas Kernabstand zu beobachten. Bei dieser Frequenz zeigt sich, dass der bogenförmige Verlauf bereits bei einem Kernabstand von ca. 0.9 ± 0.2 mas beginnt und der Jet dahinter abknickt. In den meisten Epochen ist der Jet ab einem Kernabstand von ca. 2 mas nicht mehr zu detektieren, bzw. ist lediglich Komponente K1 bei einem Abstand von 5 mas zu erkennen. In diesem Frequenzbereich dominiert die unmittelbare Umgebung des Kerns bis zu einem Abstand von 1.0 mas. Es wird ebenso wie bei 22 GHz die sehr starke Komponente K2 bei 0.8 ± 1 mas beobachtet, im Gegensatz zu diesen Beobachtungen ist hier die Komponente jedoch immer schwächer als der Kern. Nach dieser Komponente verbreitert sich der Jet und ändert seine Richtung periodisch. So verläuft der Jet Ende 1997 vorzugsweise nach Nordwesten, Mitte 1998 in Richtung Südwesten und zu Beginn 1999 gerade nach Westen. Bei 43 GHz können einzelne Komponenten aufgelöst und ihre Bahn vom Kern über K2 bis zum Abknicken des Jets bei 0.9 mas verfolgt werden. Bei dieser Frequenz kann besonders gut das Auftreffen der einzelnen Komponenten auf K2 und darüber hinaus beobachtet werden. In diesem Fall zeigt sich zunächst 1999.11 eine Doppelstruktur der Komponente (4.8), dann eine einzelne ausgedehnte Komponente, deren Mittelpunkt einen geringeren Kernabstand von 0.5-0.6 mas hat (1999.76) und sich danach zu einem Kernabstand von 0.8 mas bewegt (2000.44) und schließlich wieder zwei getrennte Komponenten (2000.84). Ein solches Verhalten tritt auf, wenn sich Komponenten auf einem Bogen entlang des Jets bewegen. Die Komponenten sind zunächst getrennt zu beobachten, nähern sich am Scheitelpunkt an, so dass sie nicht mehr aufzulösen sind und trennen sich danach wieder.

Bei 43 GHz zeichnet sich eine Periodizität in der Änderung der Jetbiegung (Tab. 4.2) mit einer Periode von etwa 2 Jahren ab, wobei die Variation des Positionswinkels und damit die Amplitude $\sim 20^\circ$ beträgt. Der Vergleich mit den Lichtkurven (Abb. 4.2) zeigt eine Übereinstimmung der Ausrichtung nach Nordwesten mit dem Anstieg der Flussdichte.

Die Betrachtung der Kernflussdichten in den vorliegenden Epochen (Abb. 4.9) ergibt zwei Maxima die mit den weniger intensiven *Flares*, welche alle zwei Jahre auftreten in den Lichtkurvemessungen der Einzelteleskope übereinstimmen (Abb. 4.2). Diese Übereinstimmung ist bei 22 GHz deutlich stärker ausgeprägt als bei 43 GHz. Ein direkter Vergleich bei diesen Frequenzen zeigt, dass 50-80 % der beobachteten Gesamtflussdichte auf Prozesse innerhalb der Kernstruktur zurückzuführen sind. Bei einem Vergleich dieses Verlaufes mit dem in Abb. 4.1 gezeigten Frequenzverhalten

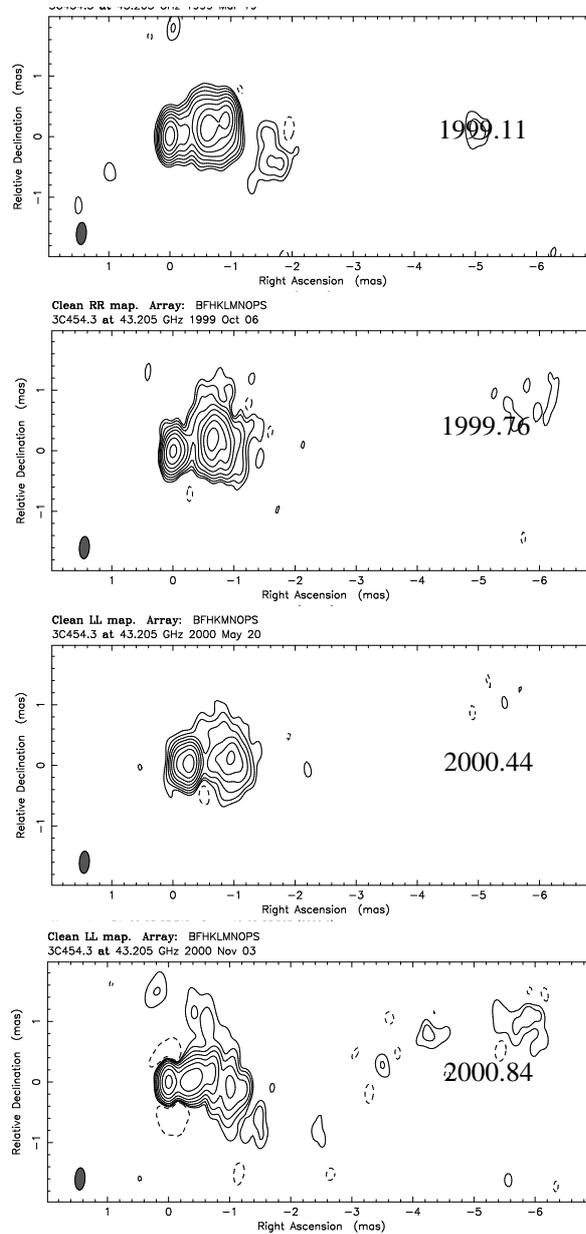


Abbildung 4.7:

Struktur von 3C 454.3 bei 43 GHz zwischen März 1999 und November 2000. Siehe auch Anhang D. Deutlich ist die stationäre Komponente in einem Kernabstand von 0.8 mas in westlicher Richtung zu erkennen. Die verschiedenen Abbildungen zeigen von oben nach unten den Transit einer Jetkomponente durch die stationäre Komponente. Details werden im Text beschrieben.

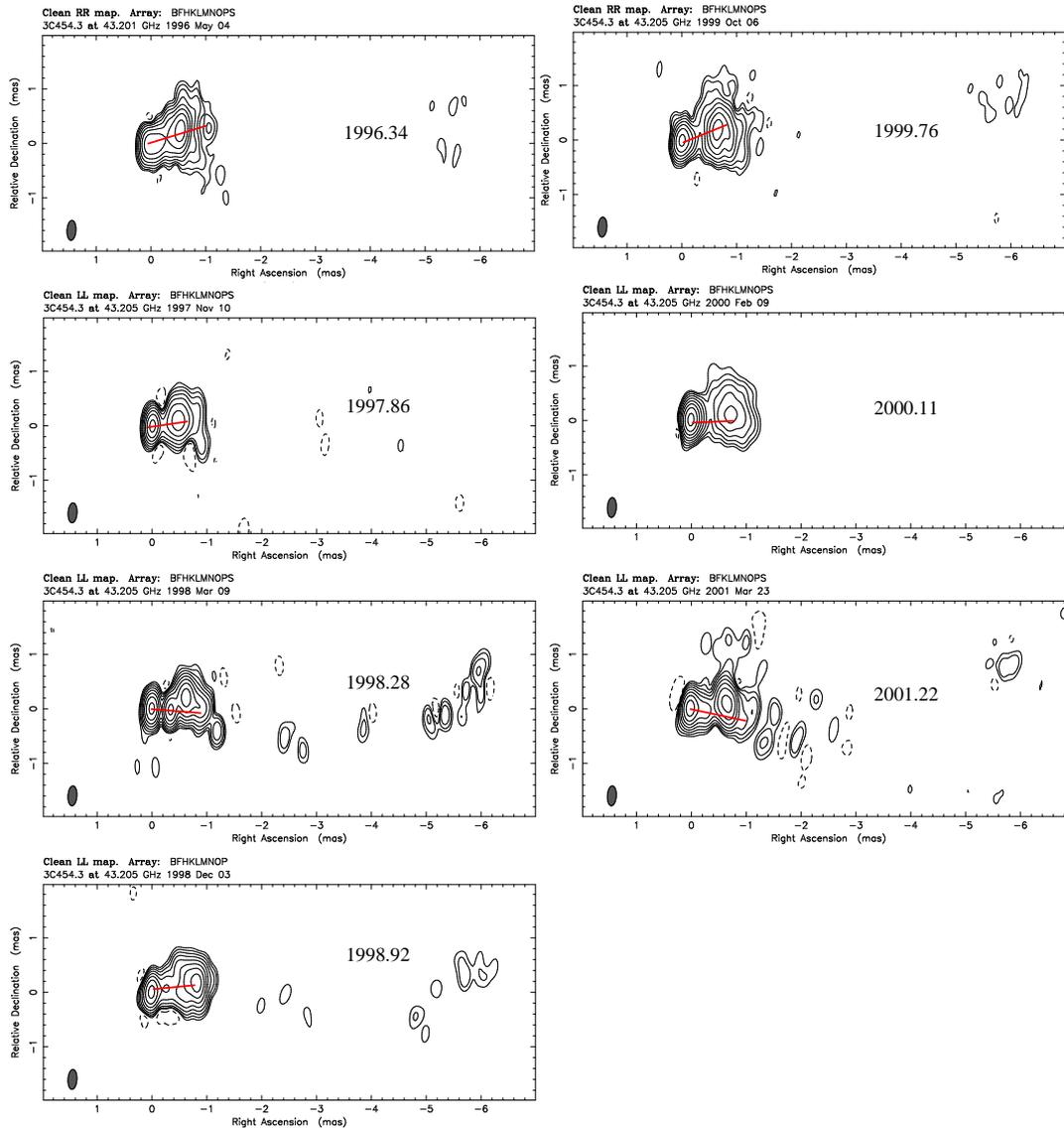


Abbildung 4.8:

Jetbiegung von 3C 454.3 bei 43 GHz. Siehe auch Anhang D. Die rote Linie markiert den jeweiligen Positionswinkel des Jetverlaufs bestimmt hinter der stationären Komponente. Die maximale Änderung des Positionswinkels beträgt hierbei 20° innerhalb von zwei Jahren.

1996.34-1997.58	Nordwesten
1997.86-1998.10	Westen
1998.19-1998.71	Südwesten
1998.82-1999.32	Westen
1999.67-1999.88	Nordwesten
2000.04-2000.24	Westen
2000.33-2001.21	Südwesten

Tabelle 4.2:

Vorzugsjetrichtung bei 43 GHz ab 0.9 mas Kernabstand

der *Mega-Flares*, deutet dies darauf hin, dass sich bei den *Mega-Flares* die Opazität des umgebenden Mediums ändert und nicht die Elektronenpopulation. Die unmittelbare Umgebung des Supermassiven Schwarzen Lochs wird bei einem *Mega-Flare* von interstellarer Materie befreit. In den einzelnen Epochen zeigen sich neue Komponenten zwischen 1996.89 und 1997.57, 1998.82 und 1998.92, 2000.84 und 2001.22. 3-5 Monate vor dem Erscheinen einer neuen Komponente wird ein deutlicher Anstieg der Flussdichte sowohl im Kernfluss, als auch in der Gesamtflussdichte festgestellt. Die Zusammenhänge werden in Abschnitt 4.5 weitgehend diskutiert.

Die Jetstruktur bei 22 und 43 GHz ändert sich im Laufe der Epochen langsam. Von dem Zeitpunkt, bei dem eine neue Komponente bei 43 GHz als Ausdehnung des Kerns erscheint, bis die neue Komponente eindeutig aufgelöst werden kann ($\simeq 0.2$ mas) vergehen etwa 6 Monate. Daraus ergeben sich scheinbare Geschwindigkeiten von über $10c$.

In den Anhängen F und G sind die aus diesen Daten errechneten Spektralindexkarten dargestellt. Die Kartengröße beträgt $20 \text{ mas} \times 20 \text{ mas}$, die 43 GHz Karten wurden vor der Berechnung mit dem Beam der 22 GHz Karten gefaltet. Bei den Karten ist gut die deutlich weiträumiger verteilte 22 GHz-Strahlung an dem negativen Spektralindex in den Randgebieten zu erkennen. Die Kernstruktur, wie auch einzelne Jetkomponenten zeigen im Allgemeinen einen positiven Spektralindex, wobei der Kern das steilste Spektrum aufweist. Diese Region ist für hochfrequente Strahlung optisch dünn. In allen Epochen ist die oben beschriebene Doppelstruktur von Kern und einer Jetkomponente mit ca. 0.9 mas Kernabstand zu erkennen, die einen dem Kern ähnlichen Spektralindex aufweist oder nur wenig flacher ist. Um die Komponente K2 weitet sich der Jet deutlich auf und es wird vorwiegend

22 GHz–Strahlung gemessen. Vereinzelt können zwischen Kern und K2 Komponentenbewegungen als Regionen mit positivem Spektralindex beobachtet werden. Bei einigen Epochen scheint der Spektralindex des Kerns vor Ausstoßen einer neuen Komponente kurzzeitig steiler zu werden. Dieser Effekt ist damit zu erklären dass die Komponente in den 43 GHz Karten noch nicht aufgelöst werden kann, jedoch als Anstieg der Flussdichte in der Kernregion detektiert wird. Wenn die neue Komponente bei 43 GHz beobachtet wird, sind die gleichen Vorgänge zeitverzögert bei 22 GHz zu beobachten: Die Flussdichte der Kernregion steigt an, es kann jedoch keine neue Komponente detektiert werden. Dieser Anstieg bewirkt eine Abflachung des Spektrums in dieser Region. Besonders deutlich kann dies in den Epochen April und Oktober 1999 beobachtet werden, die in sehr guter Winkelauflösung sowohl bei 43 GHz, als auch bei 86 GHz vorliegen (Abb. 4.10). Im April 1999 wird für die Kernregion ein Spektralindex von $\alpha = 0.64$ ($S \sim \nu^{+\alpha}$), also ein invertierter Index, errechnet. Im Oktober 1999 ist $\alpha = -0.39$ und es kann bei 86 GHz eine neue Komponente westlich des Kerns beobachtet werden (Abb. 4.11). Bei 43 GHz ist diese Komponente vollständig unaufgelöst. Die Ursache für den Anstieg des Spektralindex ist höchstwahrscheinlich die Synchrotron–Selbst–Absorption des Jets, wodurch das Elektronengas die im Gas erzeugte Synchrotronstrahlung bis zu einer bestimmten Frequenz (*turnover frequency*) absorbiert, für Emission oberhalb dieser Frequenz jedoch optisch dünn ist.

Auffällig bei diesen Karten sind die Epochen im September und Oktober 1998: Im September ist der Spektralindex durchweg negativ, der Kern und die nächste Komponente sind kaum von dem diffusen Jetmaterial zu unterscheiden. In der nächsten Epoche sind sowohl der Kern, als auch einzelne Jetkomponenten wieder mit positivem Spektralindex zu erkennen. Bei den aus den Lichtkurven abgeleiteten Spektralindizes (Abb.4.5) ist Ende 1998 lediglich ein Anstieg in den positiven Spektralbereich verzeichnet, ein deutlich negativer Spektralindex (< -0.4) wurde zuvor Mitte 1997 gemessen. Bei der Betrachtung der dazugehörigen Flussdichtekarten fällt die Epoche September 1998 bei 22 GHz besonders auf. Die *Peak*flussdichte liegt hier um einen Faktor 3 höher als in den übrigen Epochen. Desweiteren ist die Randstruktur der Quelle stark aufgefasert und bildet deutlich Einbuchtungen negativer Flussdichte. Dies deutet auf einen Fehler in der Kalibration bei dieser Epoche hin.

4.3 Kinematik bei 86 GHz

Bei 86 GHz wird der Bereich unter einem Parsec Kernabstand aufgelöst. Die Quelle wurde zwischen 1993 und 1999 insgesamt über neun Epochen beobachtet (Abb. 4.11).

Deutlich sind verschiedene Komponenten zu erkennen, die vom Kern in westlicher Richtung ausgestoßen werden. Der in niedrigeren Frequenzen zu beobachtende Knick in südlicher Richtung ist bei 86 GHz nur im Oktober 1996 und April 1997 eindeutig zu erkennen, in den übrigen Epochen ist die Jetstruktur in diesem Kernabstand bei 3 mm zu schwach, um eindeutig nachgewiesen zu werden. Wie bereits bei 22 und 43 GHz ist auch bei 86 GHz in einem Kernabstand von ca. 0.6 ± 0.2 mas eine Komponente zu erkennen, die sich durch eine hohe Flussdichte von den übrigen Komponenten unterscheidet. Ebenso wie bei 43 GHz ist die Position der Komponente nicht absolut, sondern variabel und schwankt zwischen 0.4 und 0.8 mas Kernabstand. Diese Komponente wurde von Pauliny-Toth und Jorstad als stationär beschrieben. Die Beobachtungen bei niedrigeren Frequenzen legt die Interpretation von stationären Komponenten als Biegung in der Jetstruktur nahe, wie sie auch bei einem Kernabstand von 5 mas beobachtet werden. Sowohl bei 3C 454.3, als auch bei anderen Quellen im *Sample* treten stationäre Komponenten an Stellen auf, an denen der Jet seine Richtung ändert. Darauf deutet bei dieser Quelle ebenfalls die beobachtete Diskontinuität des Jets nach einer solchen Komponente hin.

Abbildung 4.11 zeigt den Verlauf der Jetstruktur zwischen 1994 und 1999. Durch die im Jet vorhandenen Knicke und Biegungen ist es nur schwer möglich, die einzelnen Komponenten über einen längeren Zeitraum eindeutig zu verfolgen. Die beschriebenen stationären Komponenten können ebenfalls nicht kontinuierlich räumlich getrennt werden, sondern erscheinen als Doppelkomponente. Wird der Jet in einem dreidimensionalen Modell durch eine Helixstruktur beschrieben, so ist ein solches Verhalten zu erwarten, da die einzelnen Strukturen relativ zum Betrachter einmal hintereinander und zum anderen Mal nebeneinander erscheinen. In diesem Modell ist auch eine leichte Variation der Geschwindigkeit innerhalb der Jetstruktur zu erwarten, was jedoch bei den hier verwendeten Daten aufgrund der Auflösung und der beobachteten Jetlänge nicht nachgewiesen werden kann. Die Abbildung 4.11 identifizierten Komponenten bewegen sich fast gleichmäßig entlang des Jets, demzufolge ist bis zu einem Kernabstand von mindestens 1 mas eine Beschleunigung nicht

nachgewiesen.

Aus den für den 2 cm Survey (Kellermann et al. (2004)) gewonnenen Daten wurde eine maximale Geschwindigkeit von 0.041 ± 0.040 mas/yr für diesen Jet abgeleitet. Dieser Wert scheint im Vergleich zu Beobachtungen bei anderen Frequenzen (Jorstad et al. (2001)) sehr niedrig zu sein und ist anhand der hier beschriebenen stationären Komponente bei 5 mas Kernabstand ermittelt worden (Lister, priv. comm.), die sich, wie oben ausführlich beschrieben, für eine solche Analyse nur unzureichend eignet. Die hier analysierten Daten bei 86 GHz sind ebenfalls mit dieser Geschwindigkeit nicht konsistent, sondern zeigen übereinstimmend mit den Daten bei 22 und 43 GHz (Jorstad et al. (2001)) eine um etwa einen Faktor 10 höhere Geschwindigkeit! Diese hohe Geschwindigkeit ist zudem über eine Jetlänge von mehreren Millibogensekunden konstant.

Wie schon bei 43 GHz beobachtet, ist auch bei 86 GHz ein sinusförmiger Jetverlauf über den beobachteten Zeitraum zu erkennen. Die Oszillation beginnt hinter Komponente K2 und zeigt eine Schwingungsperiode von 1.5-2.0 Jahren. Dabei ist die Neuorientierung des Jets nach Westen mit dem Auftreten eines kleineren *Flares* zeitlich korreliert. Die Amplitude der Schwingungen liegt bei $ca\ 0.6 \pm 0.2$ mas, was bei dieser Quelle 3-6 pc entspricht. Es soll an dieser Stelle kein pauschler Zusammenhang zwischen der Neuorientierung des Jets und den beobachteten *Flares* hergestellt werden, es ist jedoch möglich, dass die Präzession der Rotationsachse des AGN sowohl die Ausrichtung des Jets zum Beobachter, als auch die gravitativen Einwirkungen auf die Akkretionsscheibe und die damit verbundenen *Flares* hervorrufen kann. Dies wird eingehend in Abschnitt 4.5 diskutiert.

4.4 Zoom-Out and -In

Die Quelle 3C 454.3 wurde 1993 mit dem VLA von Murphy (Murphy et al. (1993)) bei 1.64 GHz beobachtet. Auf Kiloparsecskala zeigt sich eine Jetstruktur in nordwestlicher Richtung bis zu einem Abstand von ca. 5 Bogensekunden. Diese großräumige Jetausrichtung ist identisch zu der Orientierung des Jets bis auf Skalen hinunter von lediglich 5 mas. Die großskalige Jetrichtung entspricht der Richtung ab einem Kernabstand von 5 mas. Der Jet zeigt demnach bei größeren Wellenlängen keine nachweisbaren weiteren Knicke oder Biegungen.

4.4.1 Großskalige Struktur

3C 454.3 wurde 2004 mit dem Röntgenteleskop *Chandra* für 18.03 ksec beobachtet. Eindeutig ist eine Jetstruktur bis zu einem Abstand von 5 Bogensekunden zu erkennen (Abb. 4.13). Ein Vergleich dieser Struktur mit den großskaligen Strukturen im Radiobereich zeigt deutlich eine Übereinstimmung in der Jetrichtung und -länge (Abb. 4.12, vgl. 5 ksec-Beobachtungen von Marshall et al. (2005)). Der in Abbildung 4.13 sichtbare Punkt im Nordwesten ist ein Stern mit der Bezeichnung A 71 und nicht assoziiert mit 3C 454.3, obwohl er exakt in der Verlängerung des Jets lokalisiert ist.

4.4.2 Kernstruktur

Das aus den *Chandra*-Daten gewonnen Spektrum (Abb. 4.14) lässt verschiedene Interpretationsmöglichkeiten zu, da sowohl ein *Power Law*, als auch ein *Broken Power Law* an das Spektrum in vergleichbarer Qualität gefittet werden kann. Es ist jedoch auffällig, dass das *Broken Power Law* das Spektrum etwas besser fittet (Tab. 4.3), was auf eine zweite röntgenhelle AGN-Komponente in der Quellstruktur hinweisen könnte.

	Γ_1	Γ_2	Break	$\text{intabs} \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$	$N \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$	χ^2	d.o.f.
Modell 1	1.29 ± 0.02	–	–	0.034 ± 0.017	0.00138 ± 0.00002	1.068	366
Modell 2	1.328 ± 0.022	0.017 ± 0.41	5.323 ± 0.032	0.018 ± 0.027	0.0014 ± 0.0002	1.0099	364

Tabelle 4.3:

Fitparameter

Der Energiebereich der verwendeten Daten liegt zwischen 0.3 und 8.0 keV, die für den zusätzlichen Absorber angenommene Rotverschiebung ist $z = 0.853$. Bei beiden Fits wurde eine galaktische HI-Verteilung von $0.072 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ angenommen.

4.5 Binary Black Hole System

Anhand der zahlreichen Epochen bei 22 und 43 GHz kann eine zeitliche Korrelation zwischen der Ausrichtung des Jets, dem Anstieg der Flussdichte im Kern, sowie

dem Auftreten neuer Komponenten erschlossen werden. Alle Effekte treten in einem Rhythmus von 2.5 ± 0.5 Jahren auf, jedoch zeitlich aufeinander folgend. Daher wird folgendes Szenario nun beschrieben: der zuerst beobachtete Anstieg der Flussdichte deutet auf den vorherigen Einfall von Materie auf das Schwarze Loch hin. Die Umgebung ist zu diesem Zeitpunkt optisch dick für niederenergetische Strahlung. Die hochenergetische Strahlung dringt zu diesem Zeitpunkt bereits nach außen, was über die Erhöhung des Spektralindex nachgewiesen werden kann. Die unmittelbare Umgebung des AGN wird durch den *Flare* ionisiert und optisch dünn. Ein Teil der Materie wird in Richtung der Jetachsen beschleunigt und tritt als neue Komponente in die Jetstruktur ein. In Falle von 3C 454.3 kann anhand der Prozesszyklen auf eine räumliche Größe von $\sim 10 \pm 1$ pc für die direkte Umgebung des AGN geschlossen werden.

Die beobachtete Jetstruktur zeigt keine Veränderungen in Abhängigkeit der auftretenden *Mega-Flares*. Das legt nahe, dass die einfallende Materiemenge im Fall eines *Mega-Flares* deutlich stärker beschleunigt wird, als bei einem *Flare* im Rahmen des 2-Jahres Zyklus, und somit nicht in den Jet abgelenkt, sondern fast ausschließlich in Photonen zerstrahlt wird. In diesem Fall ist zu erwarten, dass nahezu die gesamte gemessene Flussdichte auf den Kern konzentriert ist und kein nennenswerter Anteil des Jets vorhanden ist. Es liegen keine ausreichenden Beobachtungen von den *Flares* 1982 und 1994 vor, an denen diese Theorie überprüft werden kann, es sind jedoch Beobachtungen des *Flares* 2005 sowohl mit Einzelteleskopen, als auch mit dem VLBI und VLBA durchgeführt worden, deren Analyse genauere Aufschlüsse geben könnten. Die im September 2005 am Pico Veleta gemessene Gesamtflussdichte bei 230 GHz lag bei über 40 Jy (Krichbaum priv. com.), bei 43 GHz (VLBA) einen Monat später nur bei knapp 13.5 Jy, wobei die Kernflussdichte bei 9.0 Jy lag (Marscher, priv. com). Bei dieser Frequenz fallen also etwa 2/3 der Gesamtflussdichte auf den Kern. Daraus ergibt sich ein Spektralindex von $\alpha = 0.58$. Ein derartig invertiertes Spektrum wurde ebenfalls drei Jahre vor dem letzten gemessenen *Mega-Flare* 1994 beobachtet. Es ist also möglich, dass es sich bei dem 2005 beobachteten Flussdichteanstieg nicht um den eigentlichen *Mega-Flare* handelt, sondern vergleichbar mit dem Anstieg des Spektralindex zu Beginn der 90er ist. In den Fall ist zwischen 2007 und 2008 ein *Mega-Flare* zu erwarten, wobei der Spektralindex vermutlich ~ 0 sein wird! Auch bei diesem Szenario ist es denkbar, dass es in einem zeitlichen Abstand von ca. 12 Jahren zu gravitativen Instabilitäten kommt, die die Akkretionsscheibe einbrechen lassen.

Ein Binary Black Hole System ist eine Erklärung, wobei zum Zeitpunkt der größten Annäherung die auf die Akkretionsscheibe wirkenden Gezeitenkräfte maximal werden und so eine Instabilität einen Einfall von Materie auf eines der Schwarzen Löcher verursacht. Dadurch wird die bei dem Ausbruch freigesetzte Strahlung auch in den niederenergetischen Bereichen als *Mega-Flare* beobachtet. Weitere Hinweise auf ein BBH-System ist eine periodisch variierende Jetstruktur wie sie sowohl bei 43, als auch bei 86 GHz beobachtet wird. Die Röntgendaten sind konsistent mit dieser These, da das Spektrum eine zweite Röntgenquelle impliziert.

Für das Szenario sind verschiedene Modelle möglich.

- Modell I: BBH System mit Orbitperiode von 12 Jahren; eine Akkretionsscheibe

In einem Abstand von 2 Jahren (Präzessionsperiode) brechen Teile der Akkretionsscheibe immer wieder ein und es kommt zu kleineren *Flares*. Nach einem vollständigen Bahnnumlauf (12 Jahre) wird die Akkretionsscheibe instabil, sobald sich das zweite Schwarze Loch am dichtesten Punkt befindet und bricht komplett ein. Nach dem Ausbruch baut sich die Akkretionsscheibe auf, bis sie nach ca. 12 Jahren erneut instabil wird und sich der Prozess wiederholt.

Bei diesem Szenario ist zu erwarten, dass es nach dem *Mega-Flare* für einen bestimmten Zeitraum zu keinen weiteren *Flares* kommt, da sich die Akkretionsscheibe zunächst regenerieren muss. Bei den hier vorliegenden Beobachtungen sind die Minima nach dem *Mega-Flare* sowie die Zeitspanne bis zu dem nächsten kleinen *Flare* jedoch innerhalb der Fehler mit den Vorgängen im 2 Jahres-Rhythmus zu vergleichen.

- Modell II: BBH System mit zwei Akkretionsscheiben

Beide Objekte verfügen über eine Akkretionsscheibe, wobei das Objekt mit der höheren Masse die größere Scheibe (Objekt A) aufbaut. Die Akkretionsscheibe von Objekt A bricht alle 12 Jahre ein und erzeugt einen *Mega-Flare*, die Akkretionsscheibe von Objekt B alle 2 Jahre. Anzunehmen wäre, dass der beobachtete Jet von dem größeren Schwarzen Loch erzeugt wird. Die vorliegenden Karten bei 86 GHz zeigen weder zu diesem Zeitpunkt noch später, Auffälligkeiten in der Jetstruktur, ebensowenig das Auftreten neuer ungewöhnlich starker Komponenten, welche auf den *Mega-Flare* zurückzuführen wären. Diese Beobachtungen legen nahe, dass bei diesem System nur ein AGN eine

Jetstruktur erzeugt. Der Begleiter in diesem System ist nicht sichtbar und durch den stark *gebeamten* Jet des AGN scheinbar abgeschirmt.

- Modell III: BBH System mit einem massenarmen Objekt

Unter der Annahme, dass die Umlaufperiode des BBH 12 Jahre beträgt, ist die maximale Entfernung der beiden Komponenten mit 11.6 pc anzugeben. Bei einer Rotverschiebung von $z=0.859$ entspricht dies einem Abstand von 1.5 mas. Die Winkelauflösung der vorliegenden Daten ermöglicht eine genaue Betrachtung der Umgebung in diesem Kernabstand, es wird jedoch kein zweites Objekt detektiert. Desweiteren kommt es nicht zu Bedeckungen oder Ablenkung der Objekte, was innerhalb einer Rotationsperiode zu erwarten wäre, wenn die Objekte vergleichbare Größen und Massen aufweisen würden. Es ist jedoch möglich, dass es sich bei dem Begleitobjekt um ein deutlich kleineres Schwarzes Loch mit weniger Masse handelt, welches nicht über eine Akkretionsscheibe verfügt und wenig Einfluss auf die Bahnbewegung des massereichen Objektes hat. Denkbar in diesem Szenario ist als Begleiter eine Zwerggalaxie mit einem Schwarzen Loch von 10^{3-4} Sonnenmassen.

4.6 Zusammenfassung

Durch die Kombination verschiedenster Beobachtungen wie Multifrequenz-, Monitoring- und Flussdichtemessungen einer Quelle ist es möglich, Hinweise auf sich innerhalb der Quellstruktur abspielende Prozesse zu erlangen. Für den Quasar 3C 454.3 sind die Ergebnisse dieser Analysen im Folgenden zusammengefasst:

- Aus den Lichtkurven lässt sich eine Periodizität von 1-2 Jahren ableiten, in denen die Flussdichte um $\sim 30\%$ schwankt. Hierbei wird der Anstieg der Flussdichte zunächst in höheren Frequenzen beobachtet, was auf Synchrotron-Selbst-Absorption des Jet hinweisen könnte. Die VLBI-Beobachtungen bei 22, 43 und 86 GHz zeigen nacheinander in einem zeitlichen Abstand von ca. 6 Monaten nach dem Anstieg der Flussdichte jeweils die Ejektion einer neuen Komponente in den Jet.
- Anhand der Karten bei 86 GHz kann für den innersten Jet (< 2 mas) eine nahezu konstante Geschwindigkeit der Komponenten von $\sim 10c$ bestätigt werden.

Der Vergleich dieser Geschwindigkeiten mit denen bei 22 und 43 GHz für die äußere Jetstruktur (< 10 mas) ermittelten, ergibt keine beobachtete Beschleunigung.

- In einem Kernabstand von 0.8 mas befindet sich eine stationäre Komponente, die als Biegung oder Knick innerhalb der Jetstruktur interpretiert werden kann. Die Jetrichtung ändert sich nach dieser Komponente. Es ist möglich, einzelne Komponenten in verschiedenen Stadien des Durchlaufens dieser Struktur zu kartieren.
- Die Jetrichtung ist nicht fest, sondern variabel und weist eine Periodizität von ca. 2 Jahren auf. Bei 43 GHz fällt die Jetausrichtung nach Nordwesten mit dem Anstieg der Flussdichte zusammen. Die Oszillation beginnt hinter der beschriebenen stationären Komponente.
- Die Nordwestrichtung des beobachteten Röntgenjets ist identisch mit der des Radiojets im Bereich von Bogensekunden bis zu Millibogensekunden. Eine Ausrichtung nach Westen tritt nur bei einem Kernabstand unter einer Millibogensekunde auf.
- Das Röntgenspektrum lässt als Interpretation sowohl einen einkomponentigen AGN, als auch eine BBH Struktur zu. Die beobachteten Periodizitäten sowohl der Lichtkurven, als auch der Jetstruktur in den Radiokarten, untermauern die These eines mehrkomponentigen Systems mit einem im Radio- und Röntgenbereich nicht unmittelbar sichtbaren Begleiter.

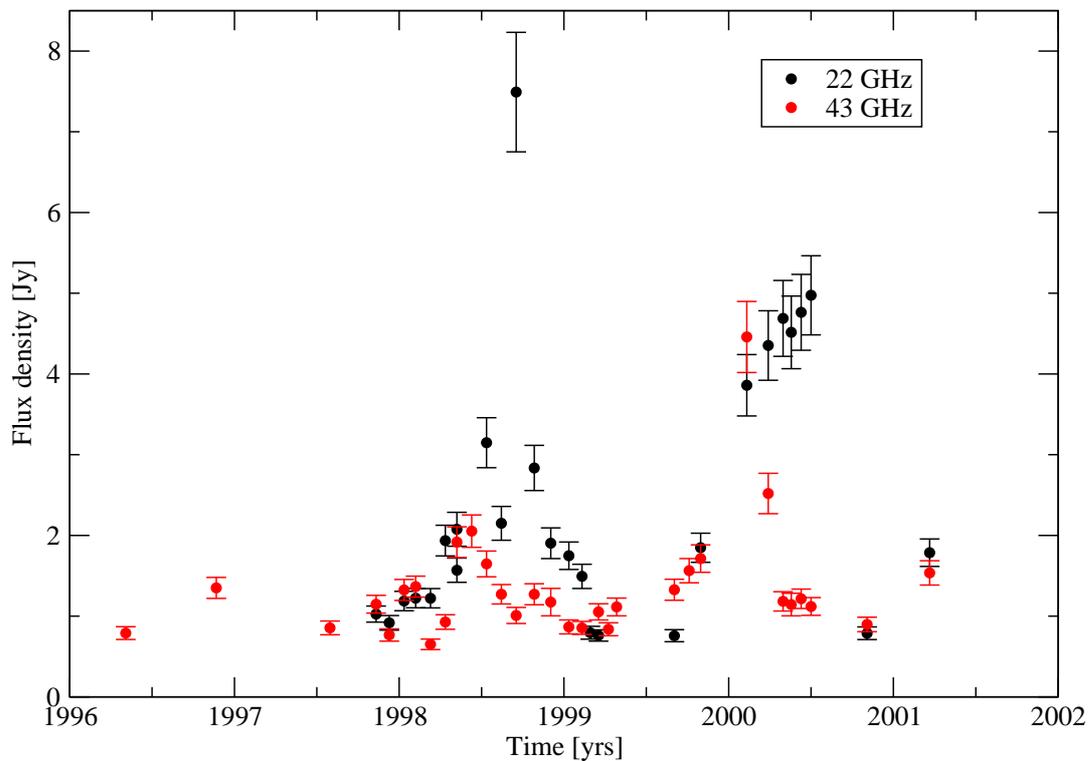


Abbildung 4.9:

Kernflussdichten bei 22 und 43 GHz. Offensichtlich variieren die Flussdichten bei 22 GHz stärker, als bei 43 GHz. Vergleicht man dieses Verhalten mit dem Frequenzverhalten der *Mega-Flares*, deutet dies darauf hin, dass sich bei den *Mega-Flares* die Opazität des umgebenden Mediums ändert und nicht die Elektronenpopulation. Das bedeutet, dass die unmittelbare Umgebung des Supermassiven Schwarzen Lochs bei einem *Mega-Flare* von interstellarer Materie befreit wird.

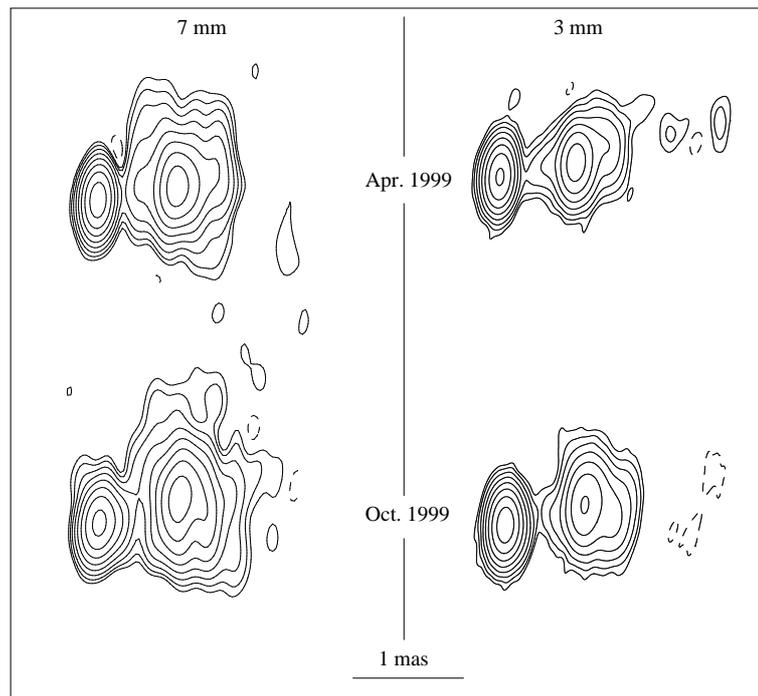
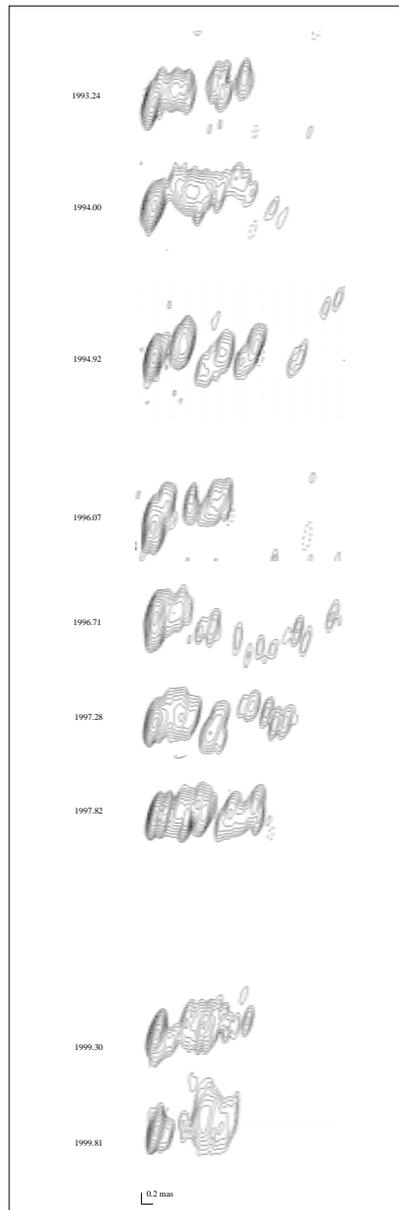


Abbildung 4.10:

Vergleich der Quellstruktur von 3C 454.3 bei 43 GHz und 86 GHz im April und Oktober 1999 (Pagels et al. (2004)). Die Karten sind mit dem gleichen Beam von 0.36×0.16 mas gefaltet, um den Spektralindex des Kerns zu bestimmen. Die Konturniveaus liegen bei $-0.5, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64$ % der Peakflussdichte. Der Spektralindex liegt im April bei $\alpha = 0.64$, im Oktober bei $\alpha = -0.39$. In den 86 GHz Daten wird im Oktober eine neue Komponente beobachtet, die aufgrund der Faltung hier nicht identifiziert werden kann. Bei 43 GHz wird diese Komponente nicht aufgelöst.

**Abbildung 4.11:**

Quellstruktur von 3C 454.3 bei 86 GHz zwischen 1994 und 1999 (von oben nach unten). Der Jet ist stark strukturiert und zum Teil räumlich aufgelöst. Bei der stationären Komponente ist eine räumliche Auflösung nicht permanent möglich, aufgrund des Transits mehrerer Komponenten während des beobachteten Zeitraums, erscheint sie als Doppelkomponente.

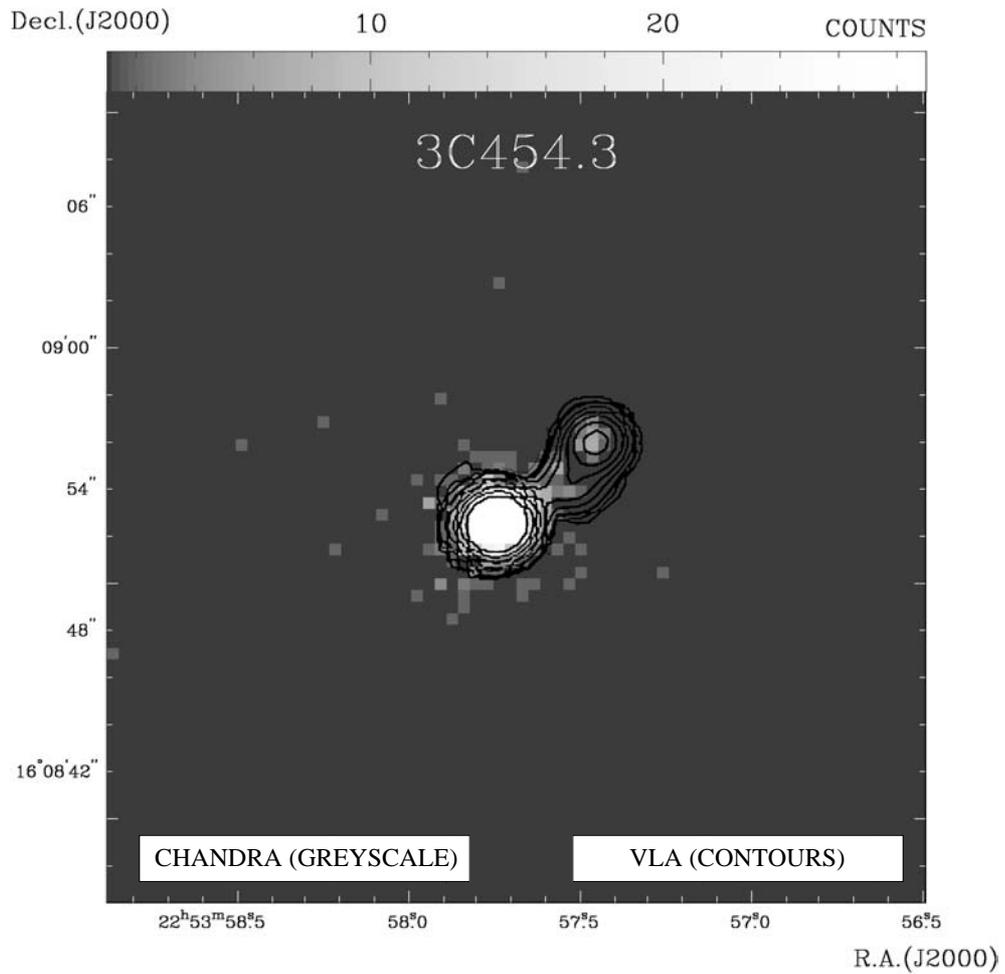


Abbildung 4.12:

Beobachtungen mit Röntgenteleskop *Chandra* (Karte) und dem VLA (Konturen) (Pagels et al. (2004)). Die Jetrichtung bei 1.64 GHz ist konsistent zum Röntgenjet und eine Verlängerung des bei 22 GHz beobachteten Jets in nordwestlicher Richtung. Offensichtlich sind keine weiteren großskaligen Biegungen und Knicke vorhanden.

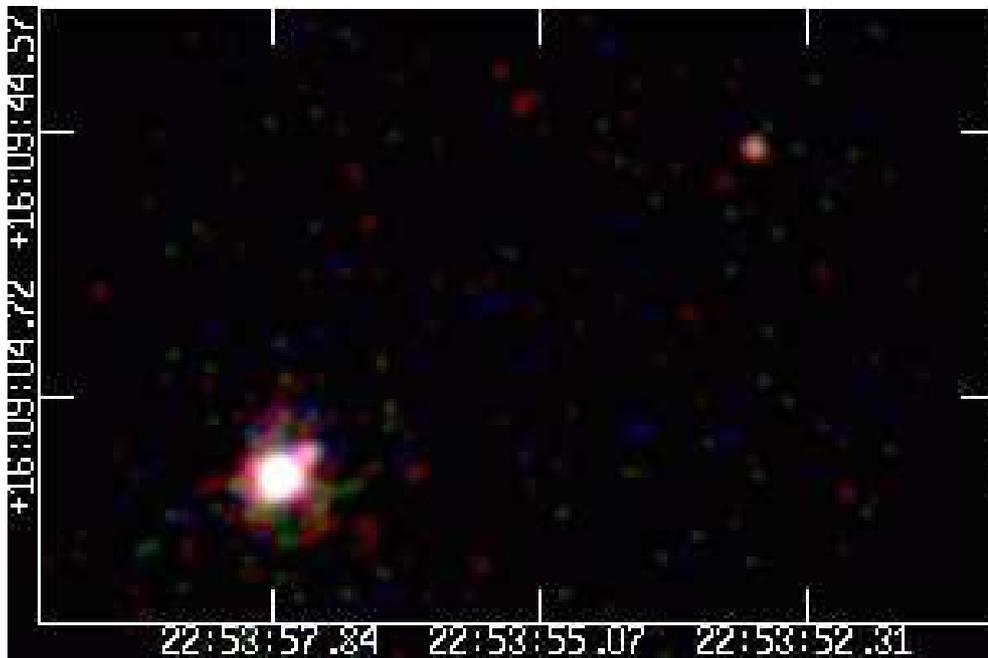


Abbildung 4.13:

*Drei-Farb-Beobachtungen von 3C454.3 mit Röntgenteleskop Chandra. Die Farben indizieren den beobachteten Energiebereich: **rot**: 0.1-1 keV, **grün**: 1-2 keV, **blau**: 2-3 keV. Der Punkt im Nordwesten ist der Stern A 71 und nicht mit dem Röntgenjet assoziiert.*

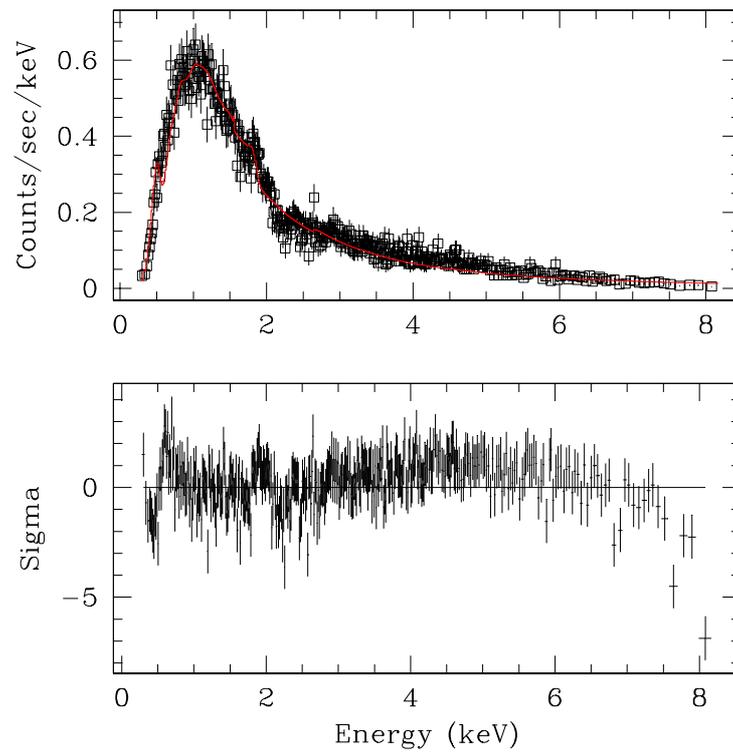


Abbildung 4.14:

Chandra ACIS-S3 Spektrum von 3C454.3 in dem Energiebereich zwischen 0.3 und 8.0 keV. Es wurde dabei ein Broken Power Law mit einem zusätzlichen Absorber gefittet, welches die überlagerte Emission von zwei Power-Law Komponenten repräsentiert. In dem Spektrum (oben) ist der besten Fit eingezeichnet (rote Linie), die untere Darstellung gibt die statistische Abweichung zwischen Modell und Daten an. Das Modell nähert die Daten innerhalb der statistischen Abweichungen offensichtlich sehr gut an (siehe auch Tab.4.3).

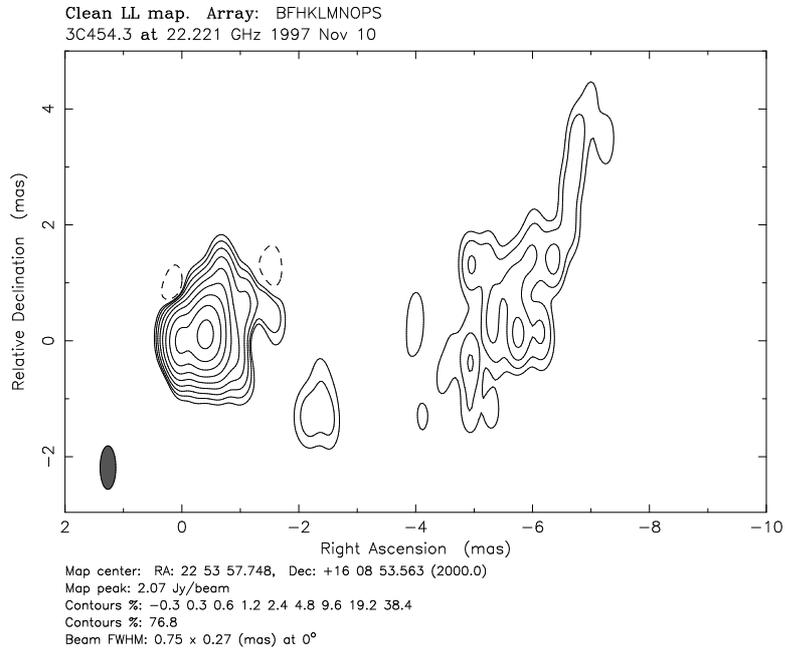
Anhang A

Epochen von 3C 454.3 bei 22 GHz

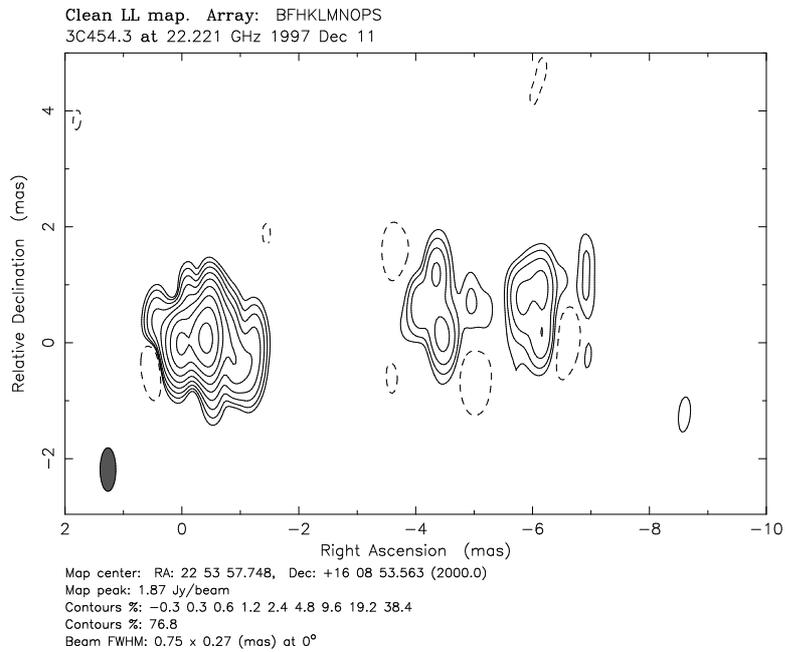
Die in den Anhängen A-E befindlichen Abbildungen, zeigen die Quelle 3C 454.3 bei unterschiedlichen Frequenzen (A, B = 22 GHz, C, D = 43 GHz, E = 86 GHz). Die *Headereinträge* der einzelnen Abbildungen sind dabei identisch aufgebaut:

oben: in der Überschrift finden sich die beteiligten Teleskope in Buchstaben kodiert. Diese Belegung wechselt je nach Epoche und ist nicht allgemeingültig, so dass hier auf eine Aufschlüsselung verzichtet wird. In der zweiten Zeile ist die beobachtete Quelle, die verwendete Frequenz, sowie das Beobachtungsdatum angegeben.

unten: unter der Abbildung wird das Kartenzentrum in Rektaszension und Deklination (2000.0) angegeben. In der zweiten Zeile findet sich die für die hellste Stelle ermittelte Flussdichte. In der dritten und teilweise vierten Zeile werden die Kontourniveaus in % des Intensitätsmaximums angegeben. Die *Beamgröße* in mas, sowie der Positionswinkel finden sich in der letzten Zeile. Dieser ist auch in der jeweiligen Karte links unten als grau schattierte Ellipse angegeben.

**Abbildung A.1:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im November 1997.

**Abbildung A.2:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Dezember 1997

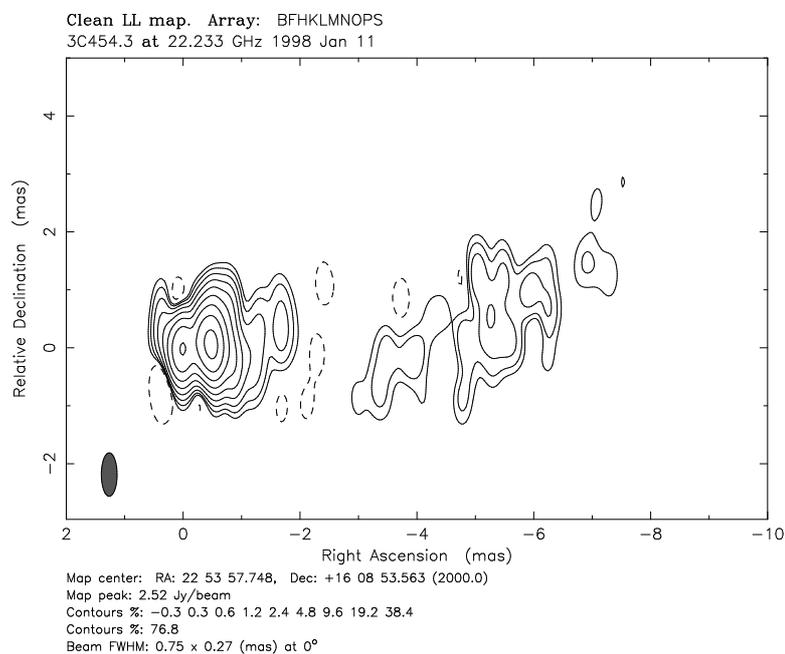


Abbildung A.3:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Januar 1998

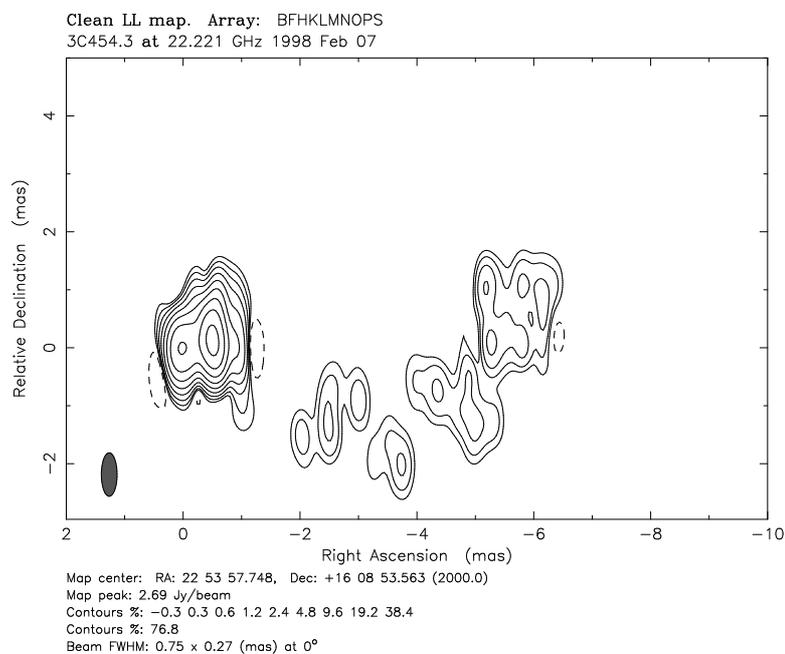
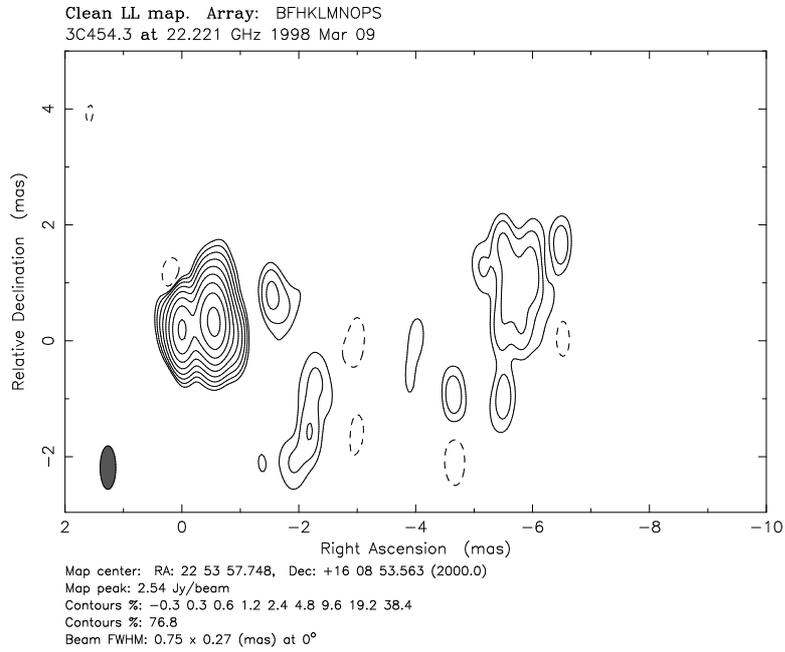
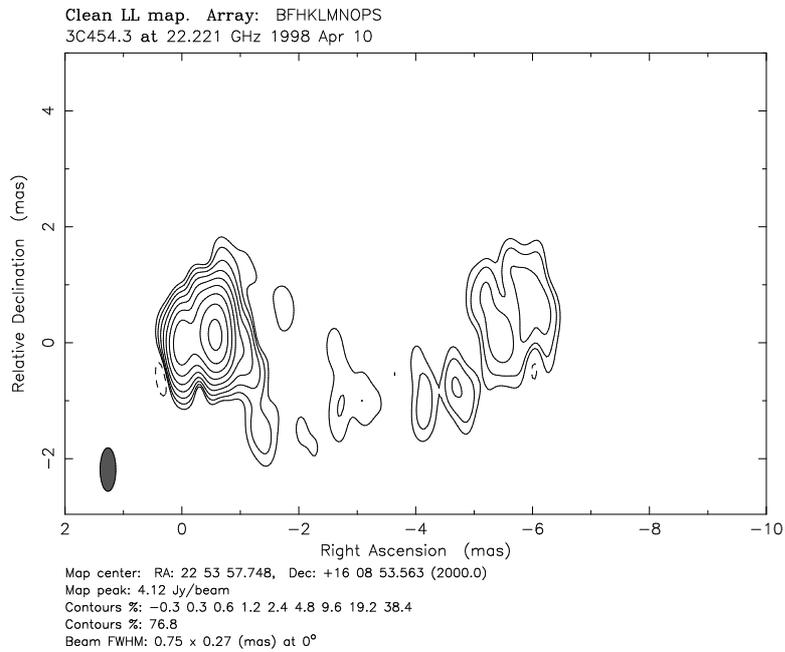


Abbildung A.4:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Februar 1998

**Abbildung A.5:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im März 1998

**Abbildung A.6:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im April 1998

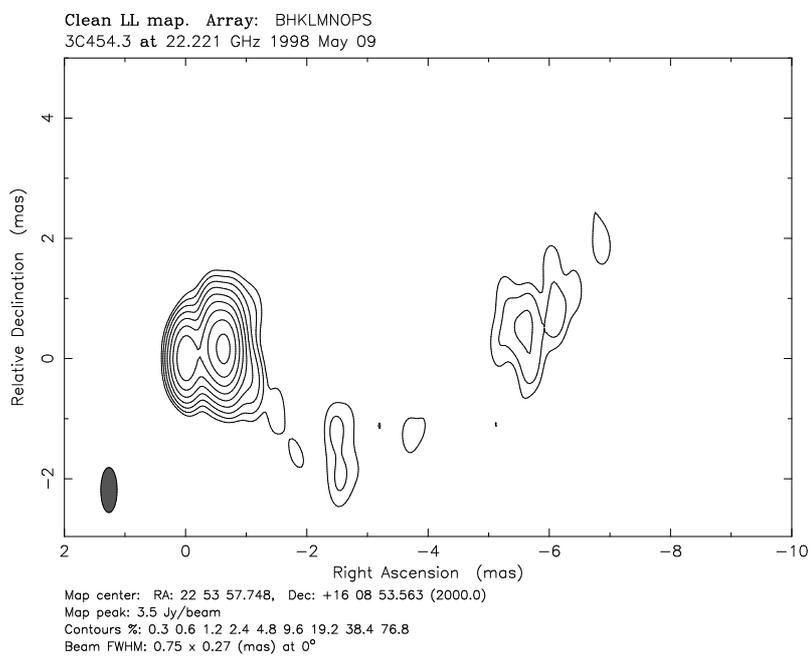


Abbildung A.7:
Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Mai 1998

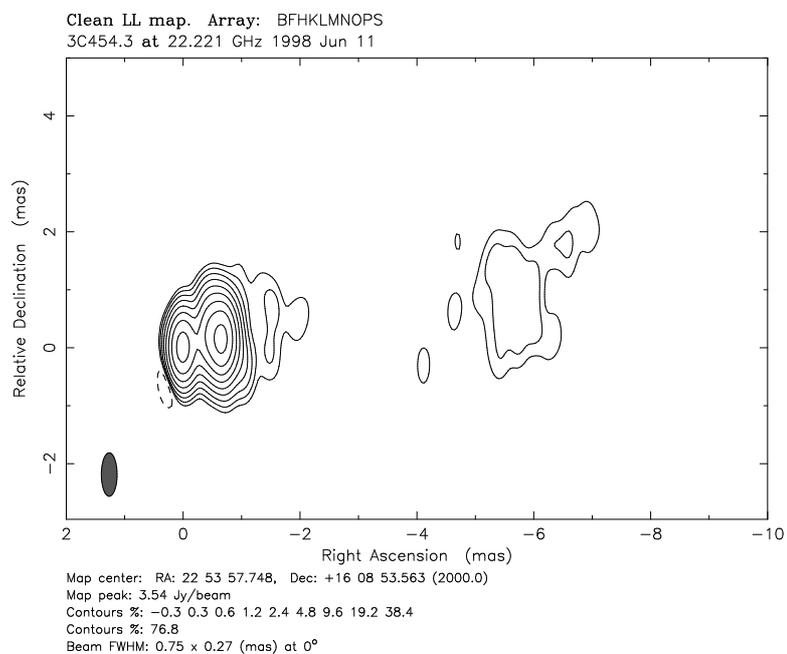


Abbildung A.8:
Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Juni 1998

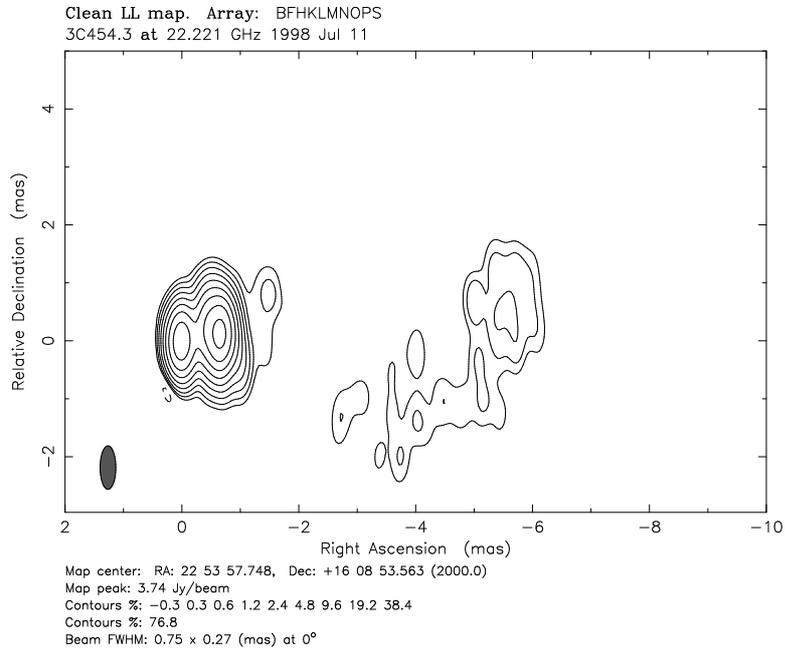


Abbildung A.9:
Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Juli 1998

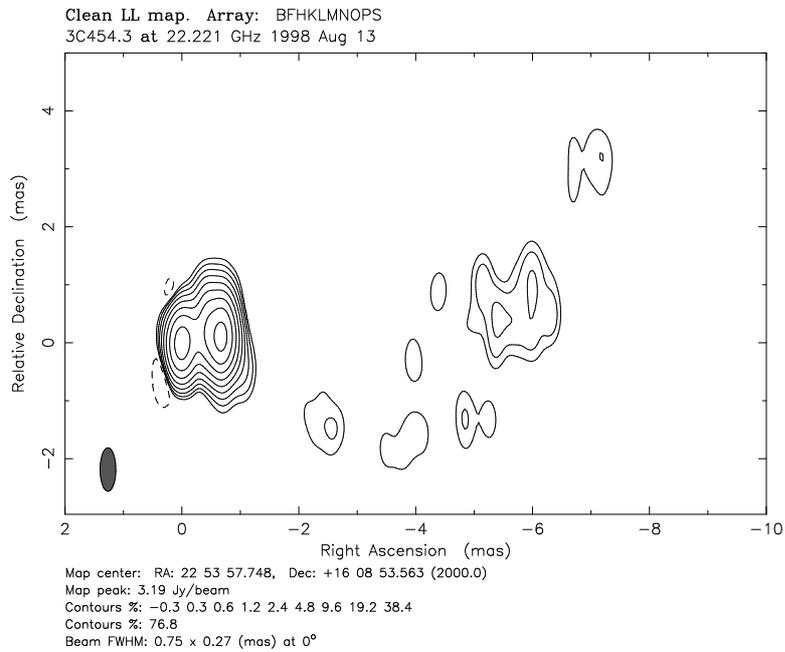


Abbildung A.10:
Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im August 1998

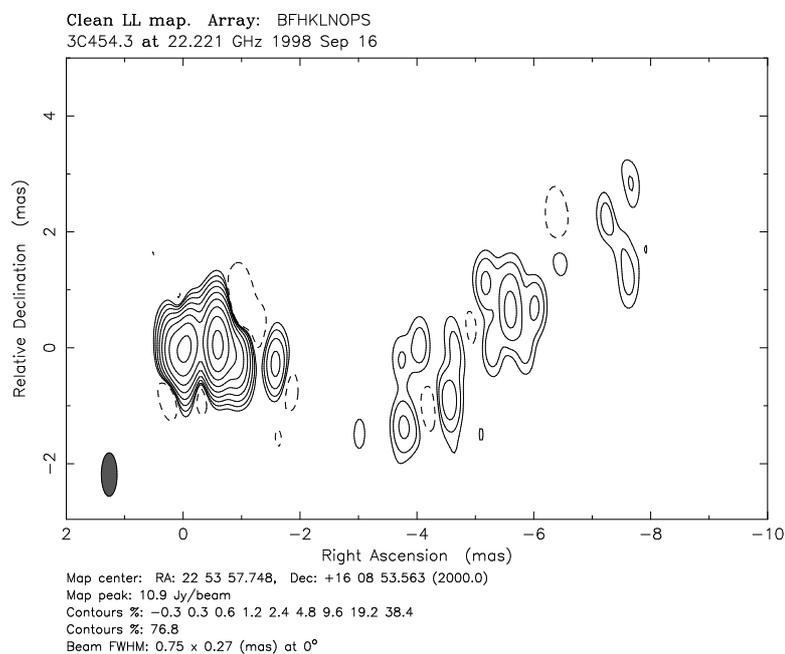


Abbildung A.11:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im September 1998

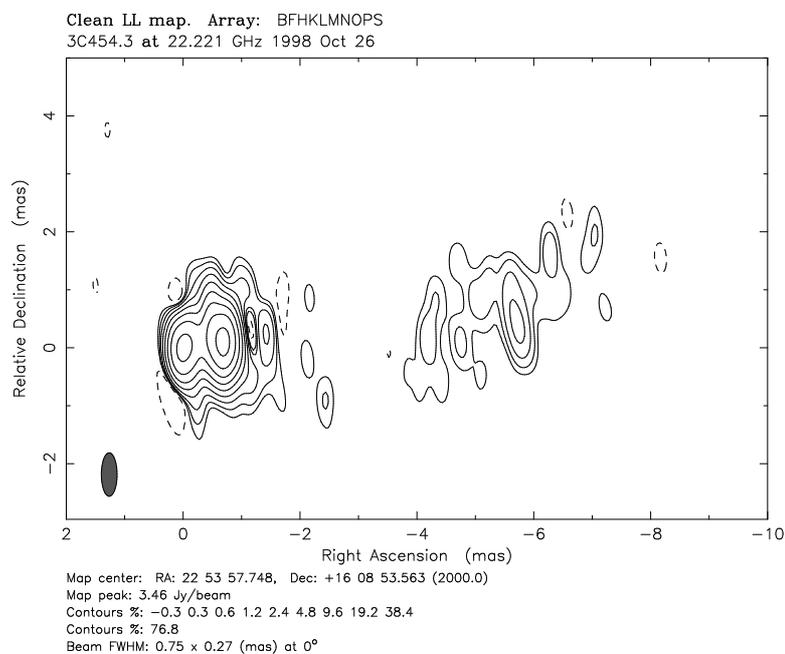
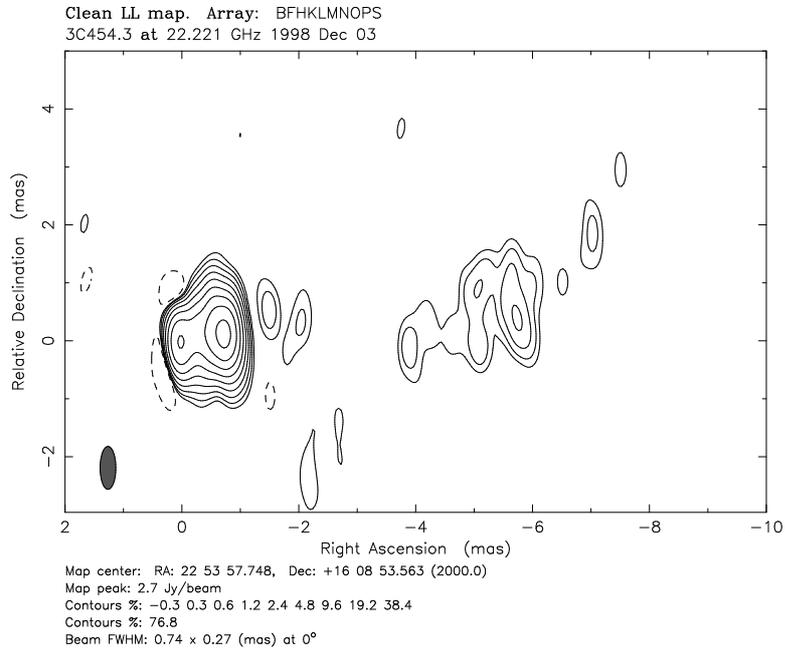
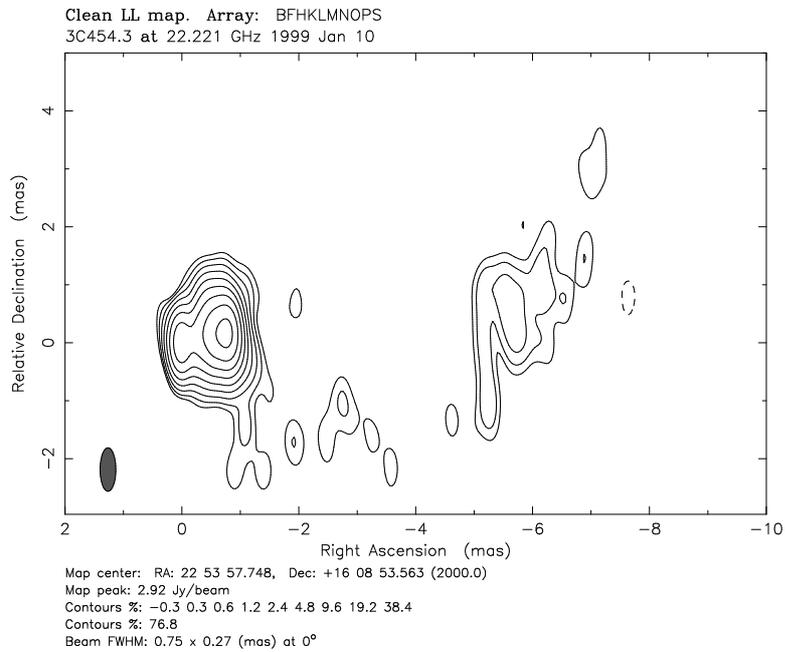


Abbildung A.12:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Oktober 1998

**Abbildung A.13:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Dezember 1998

**Abbildung A.14:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Januar 1999

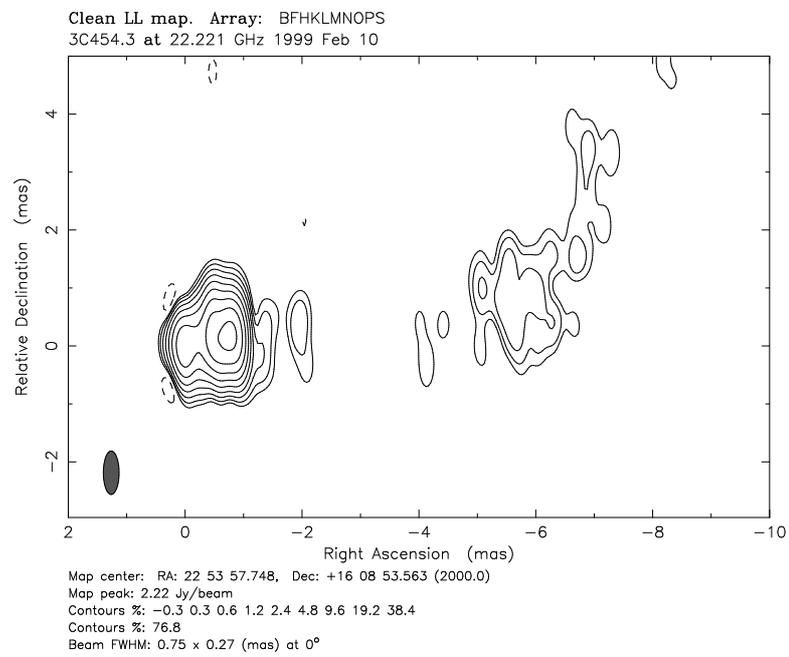


Abbildung A.15:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 10. Februar 1999

Anhang B

Epochen von 3C 454.3 bei 22 GHz

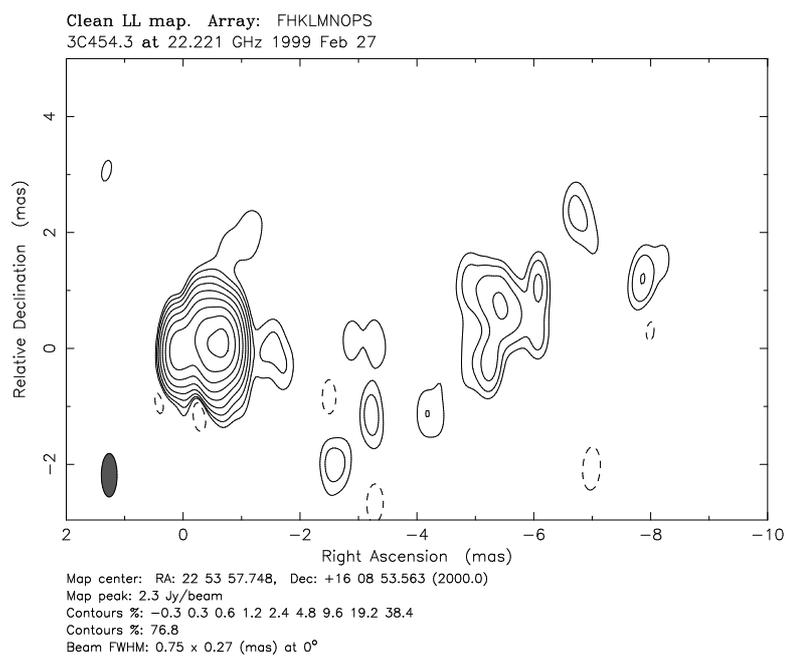
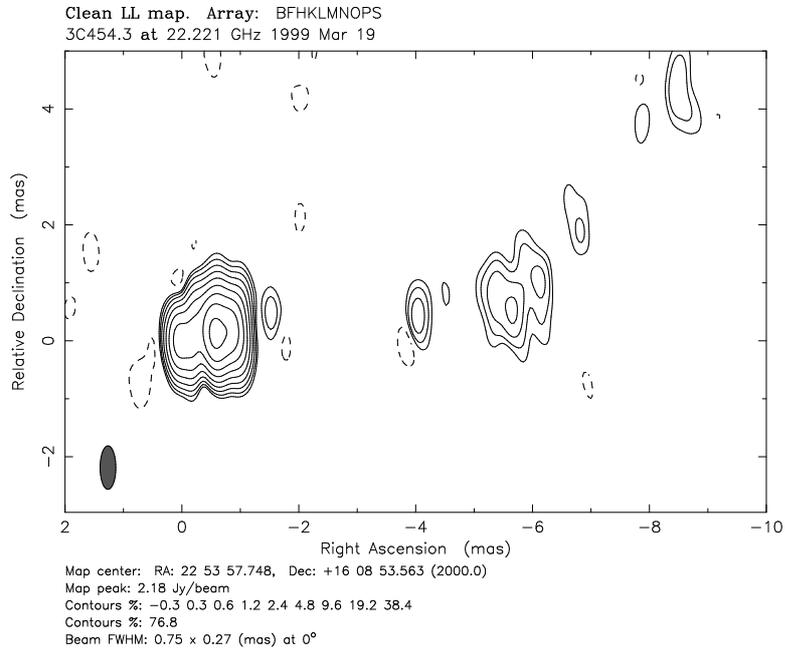
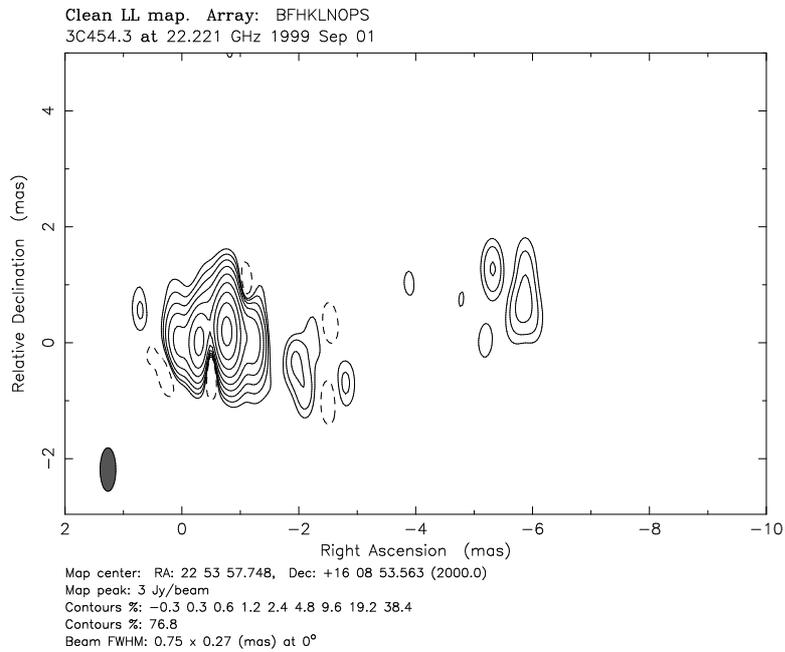


Abbildung B.1:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 27. Februar 1999

**Abbildung B.2:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im März 1999

**Abbildung B.3:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im September 1999

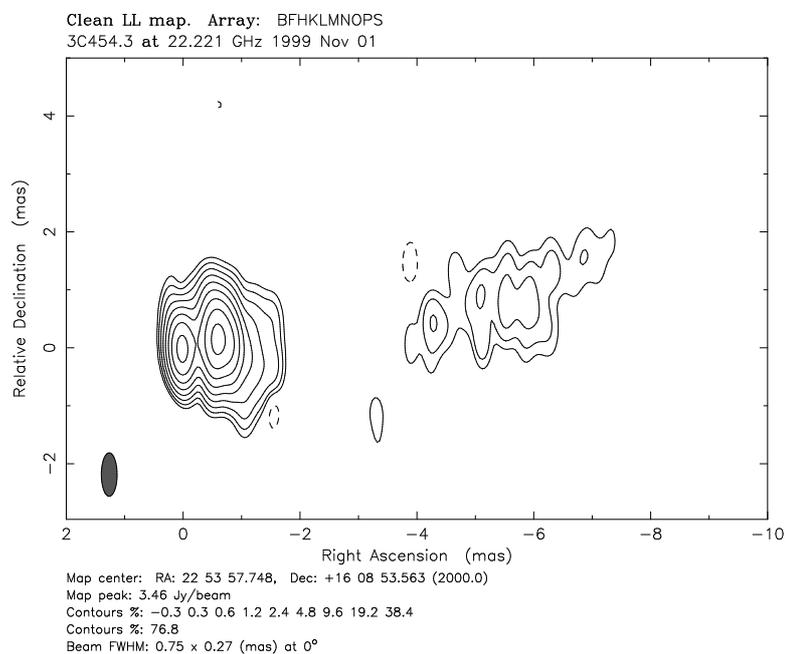


Abbildung B.4:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im November 1999

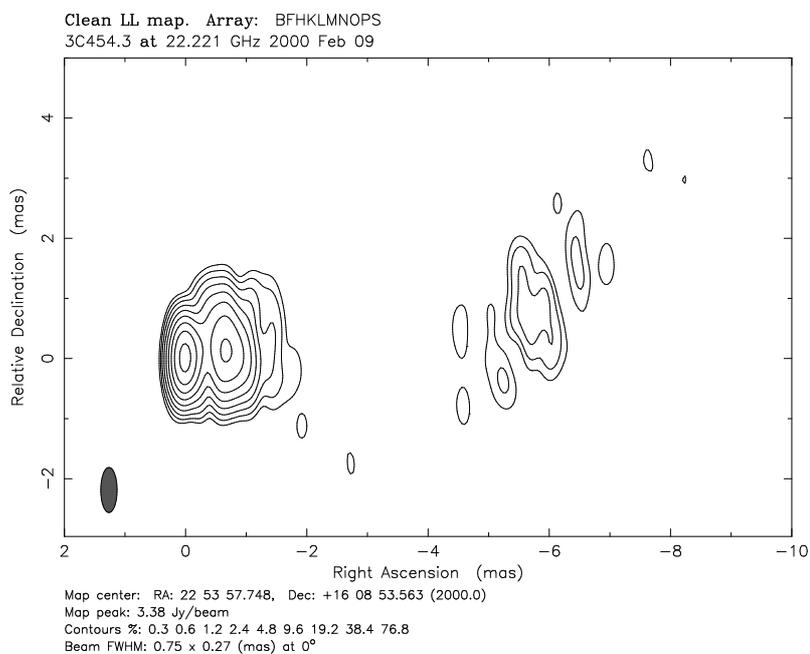
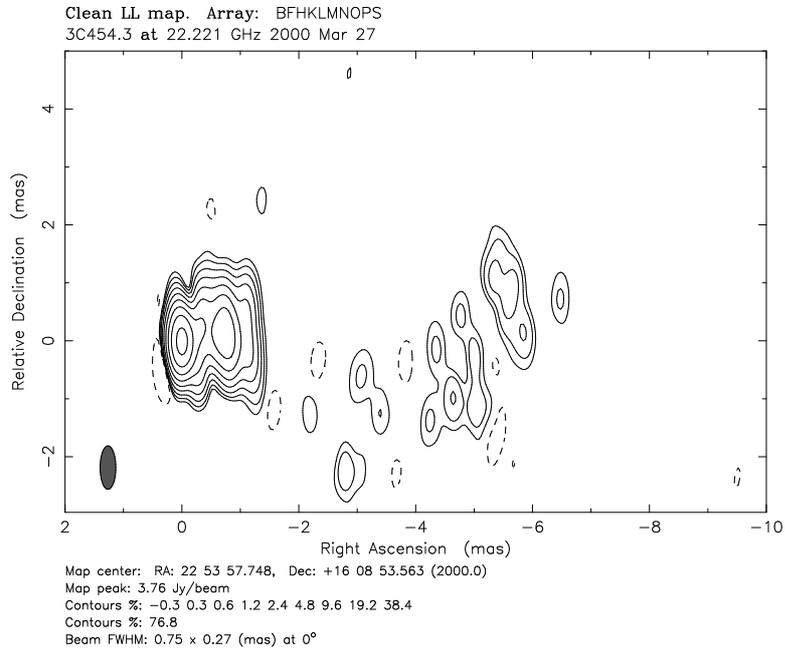
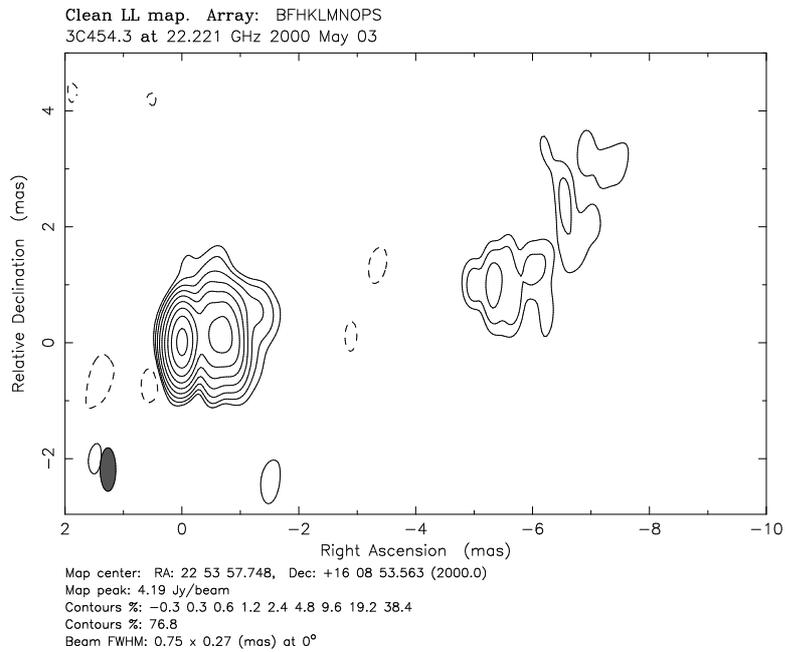


Abbildung B.5:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Februar 2000

**Abbildung B.6:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im März 2000

**Abbildung B.7:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 3. May 2000

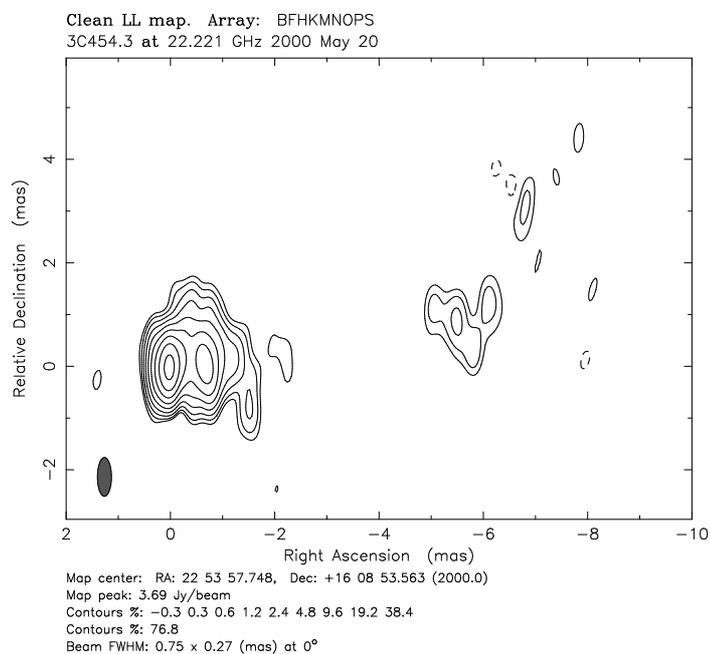


Abbildung B.8:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 20. May 2000

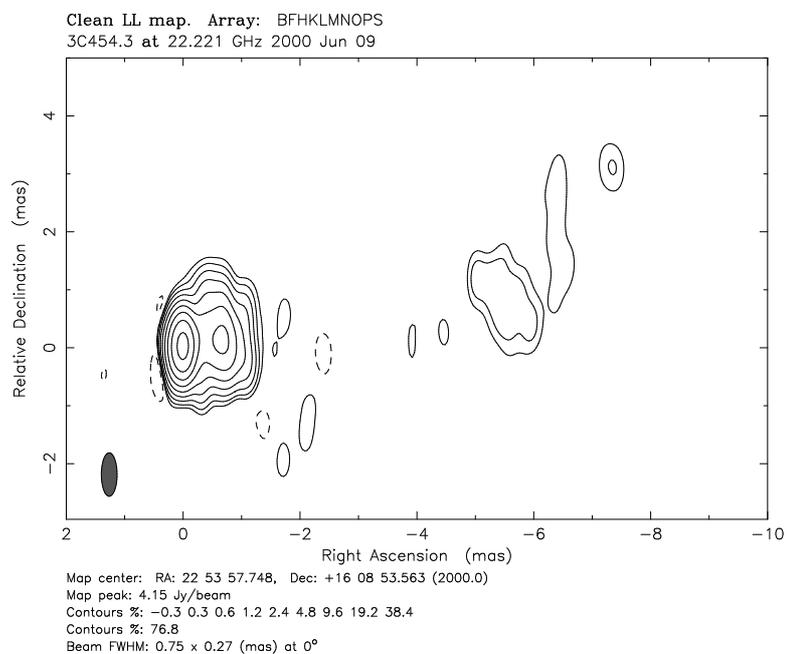
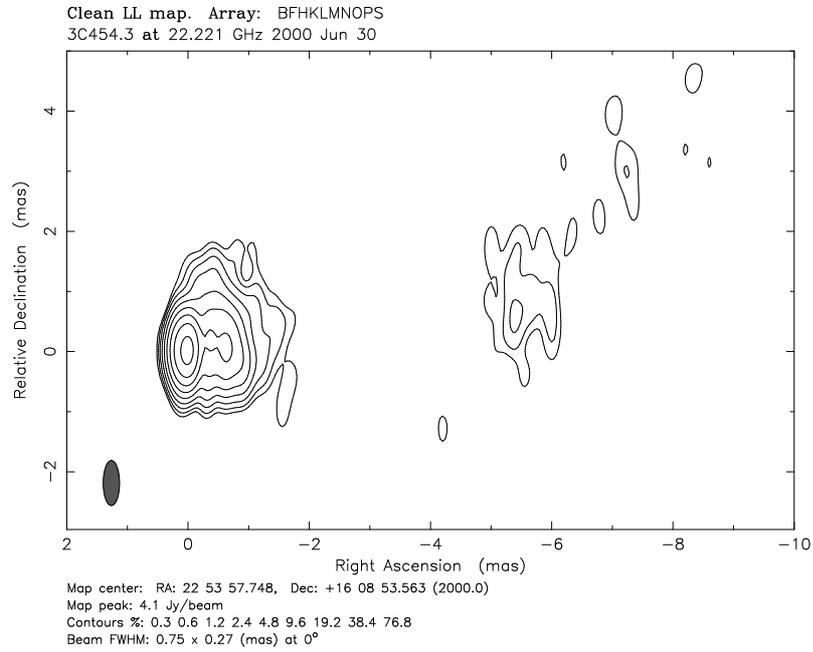
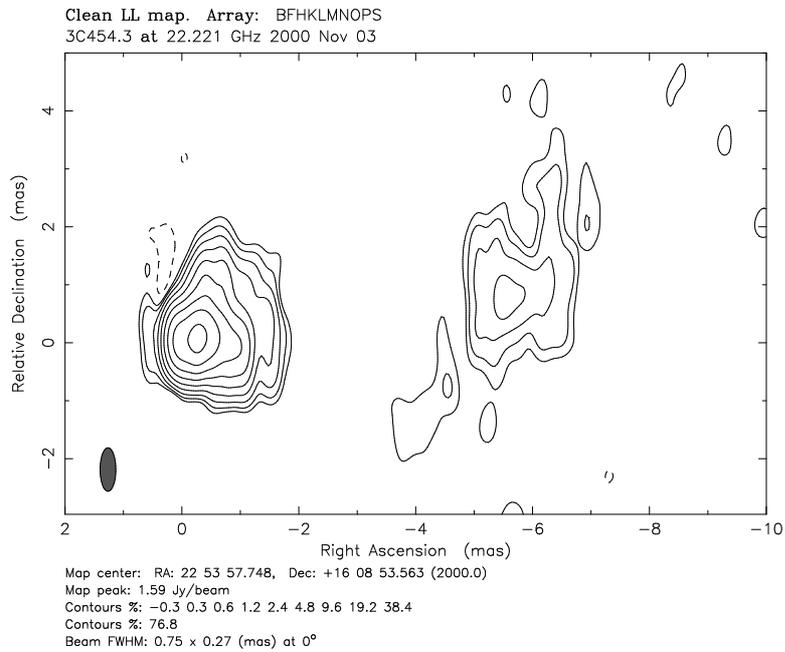


Abbildung B.9:

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 9. Juni 2000

**Abbildung B.10:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 30. Juni 2000

**Abbildung B.11:**

Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im November 2000

Anhang C

Epochen von 3C 454.3 bei 43 GHz

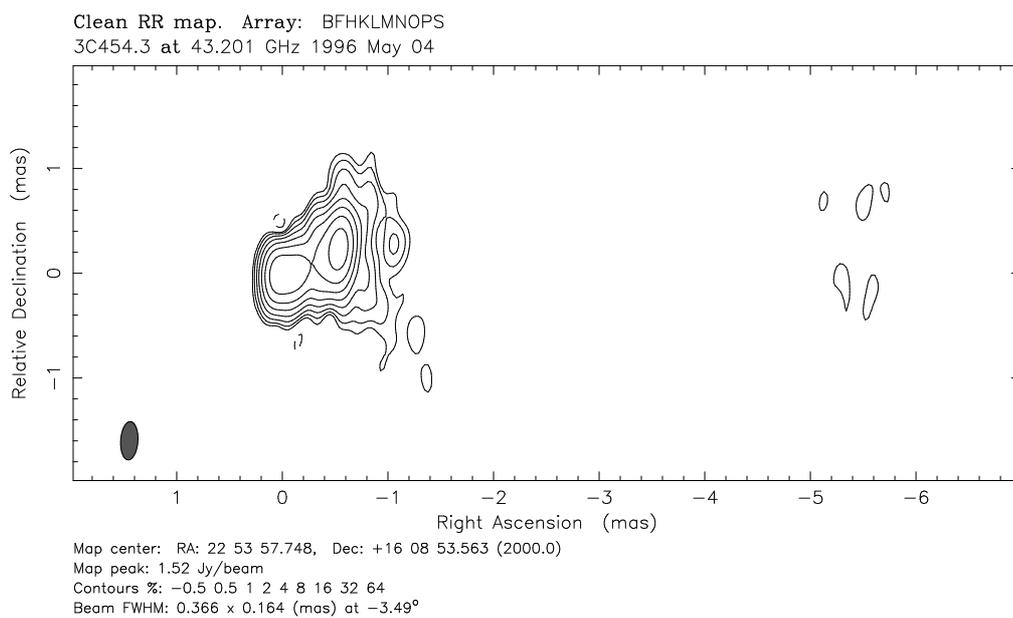
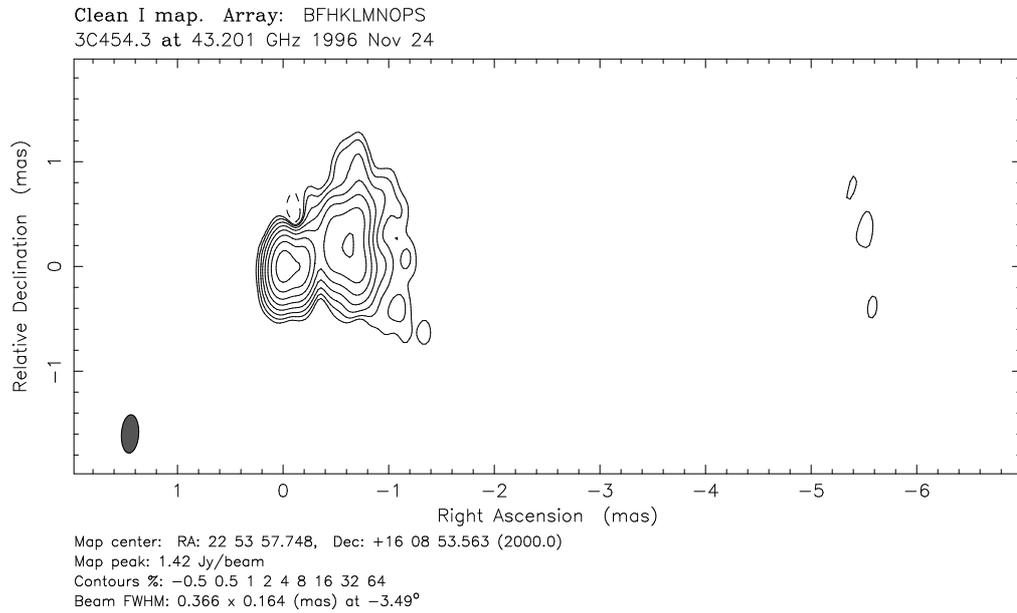
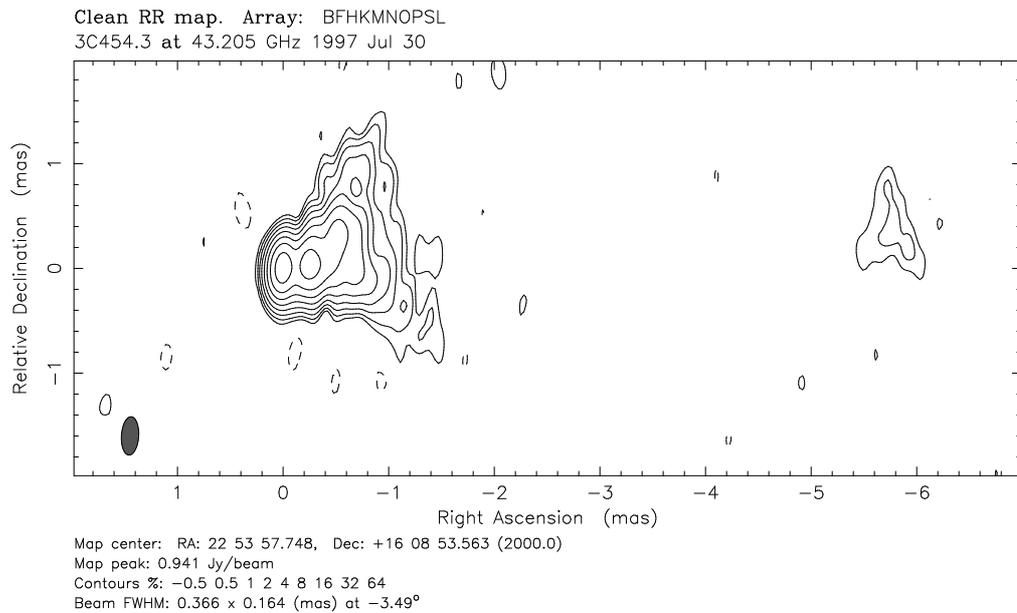


Abbildung C.1:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Mai 1996

**Abbildung C.2:***Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im November 1996***Abbildung C.3:***Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Juli 1997*

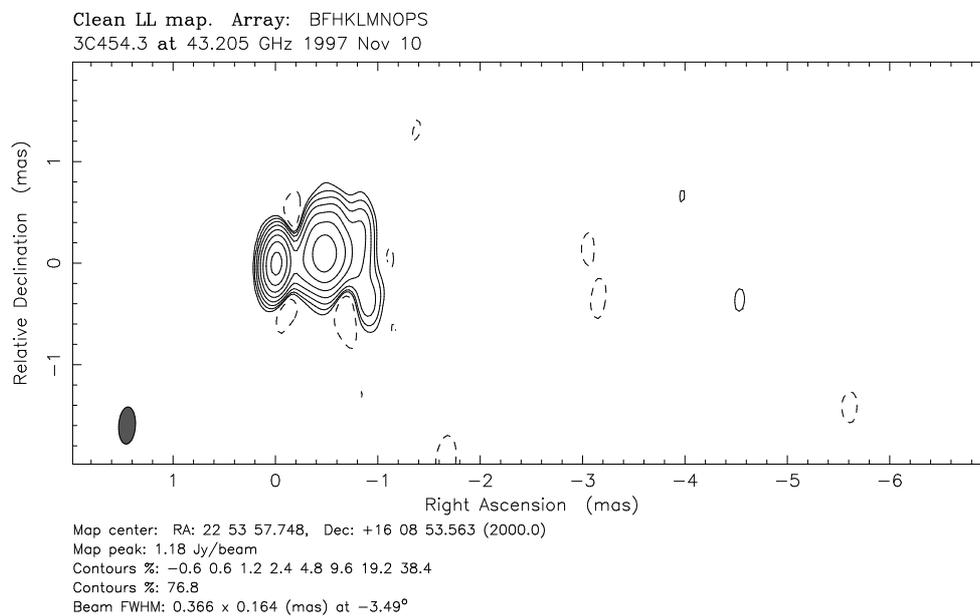


Abbildung C.4:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im November 1997

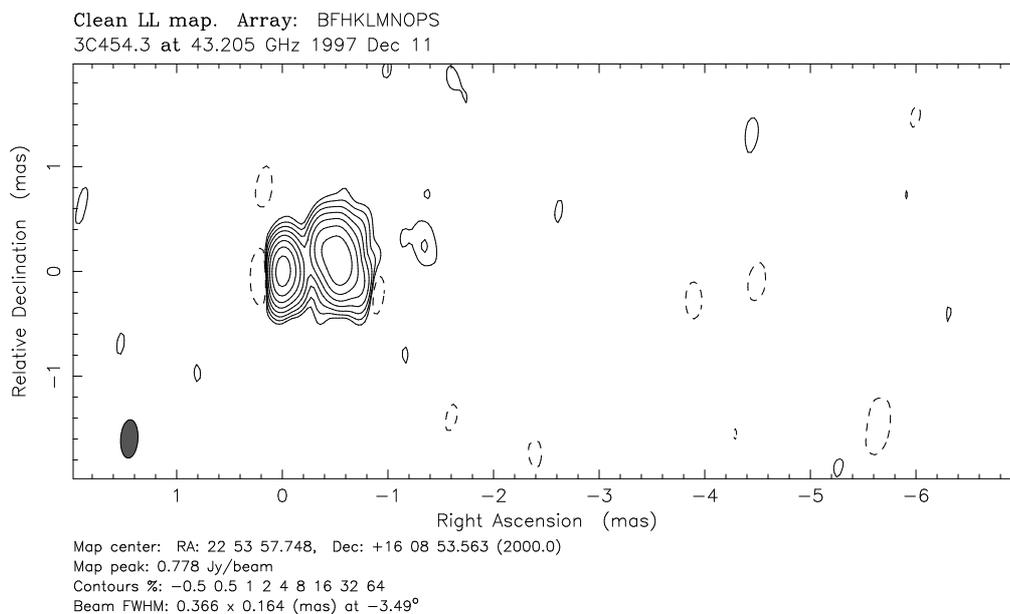
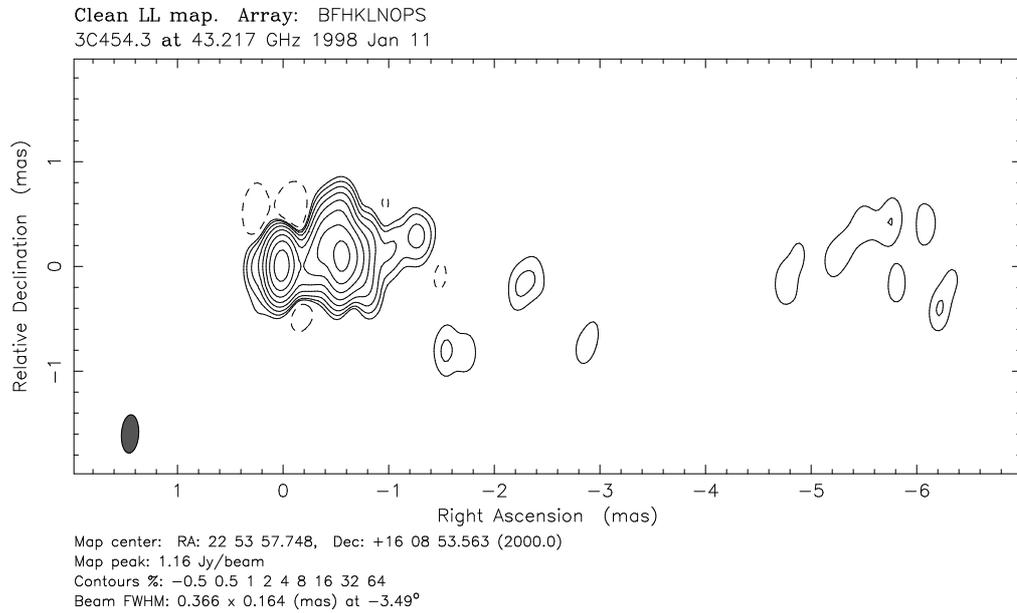
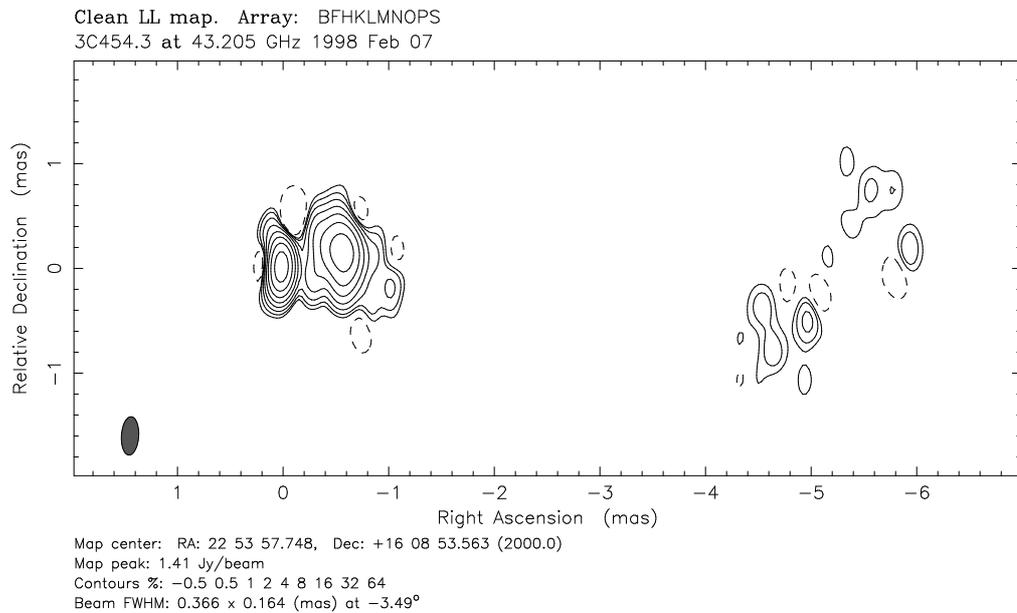


Abbildung C.5:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Dezember 1997

**Abbildung C.6:***Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Januar 1998***Abbildung C.7:***Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Februar 1998*

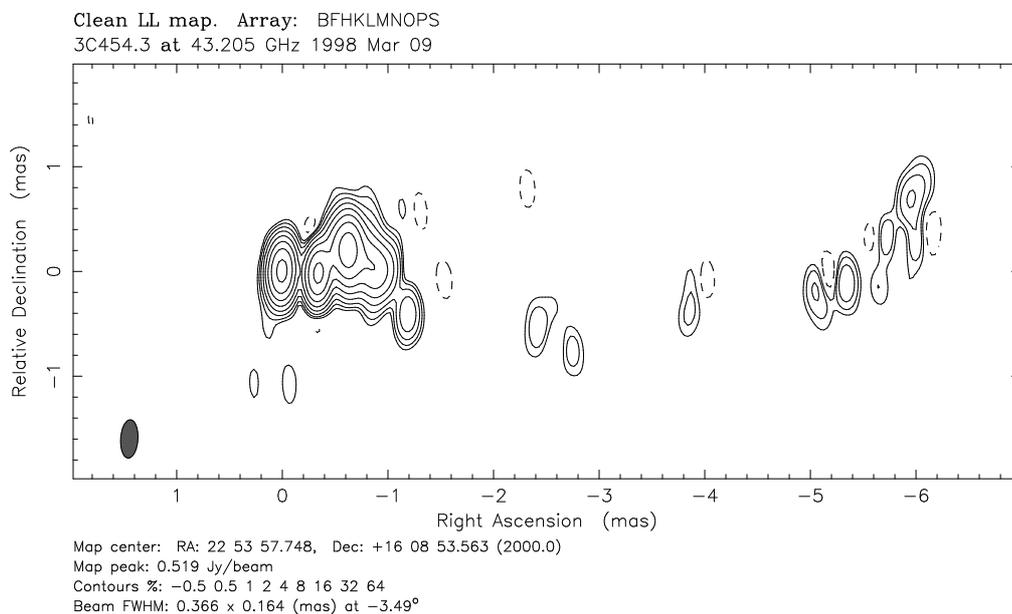


Abbildung C.8:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im März 1998

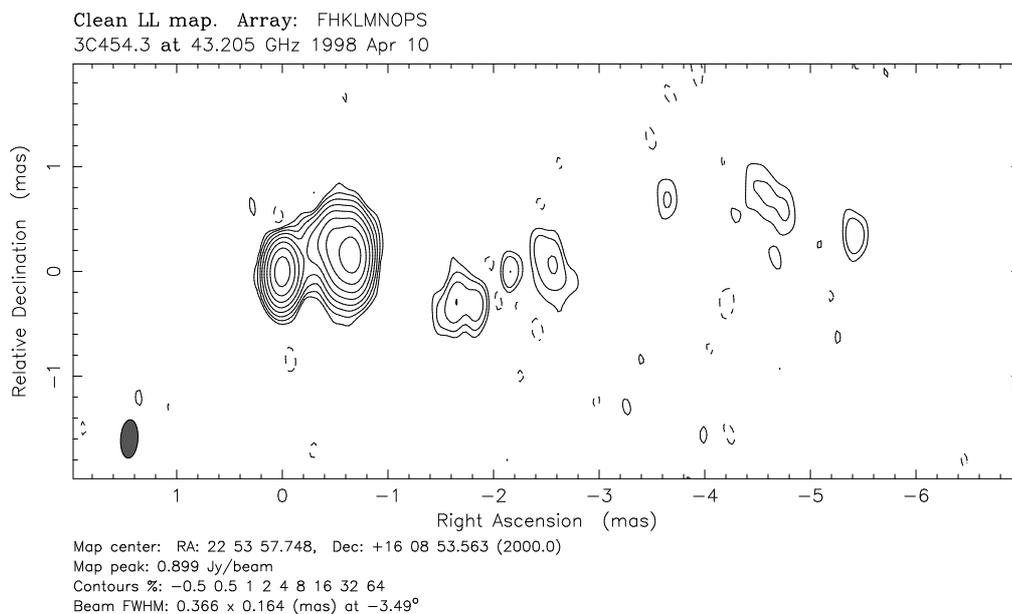
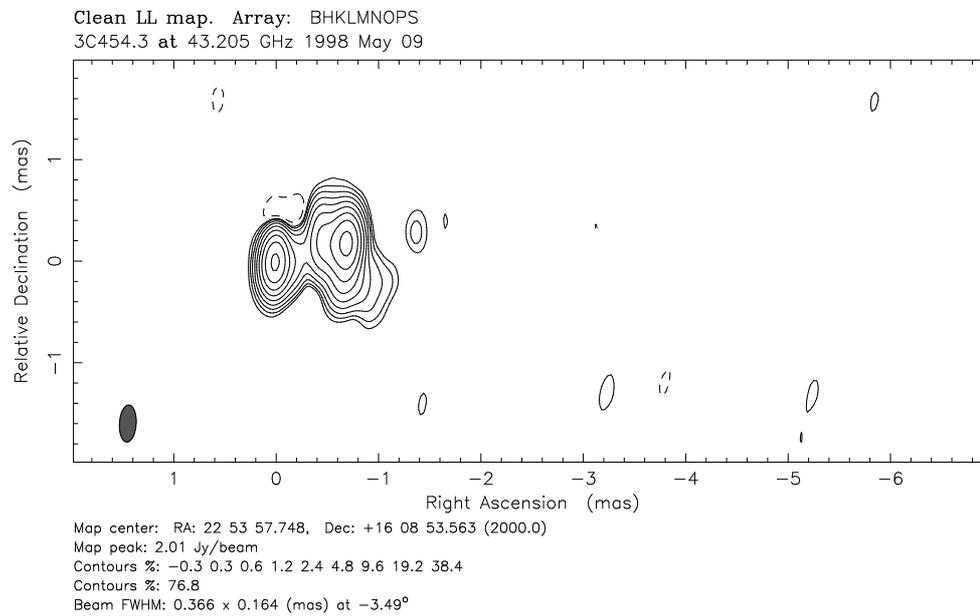
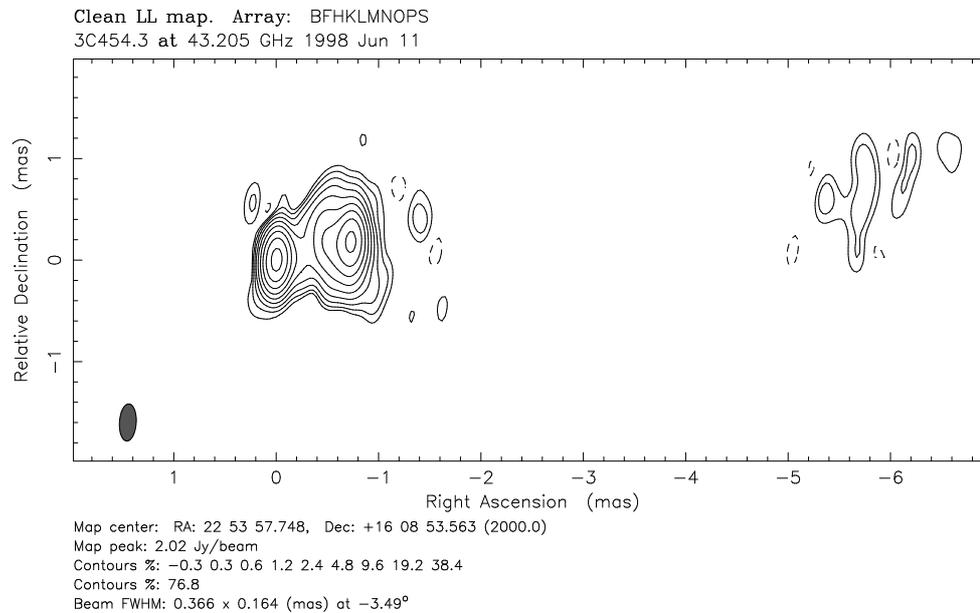


Abbildung C.9:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im April 1998

**Abbildung C.10:***Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Mai 1998***Abbildung C.11:***Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Juni 1998*

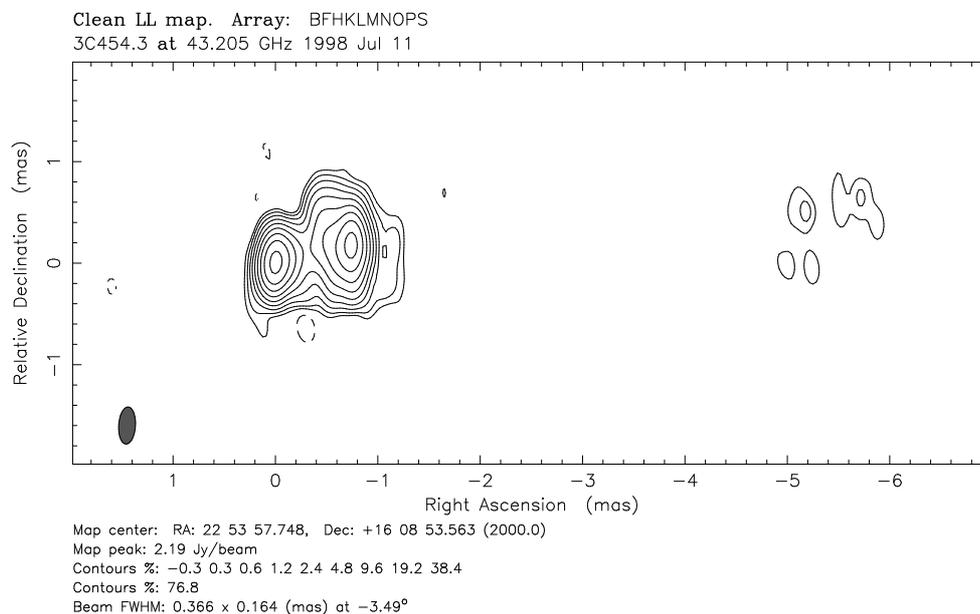


Abbildung C.12:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Juli 1998

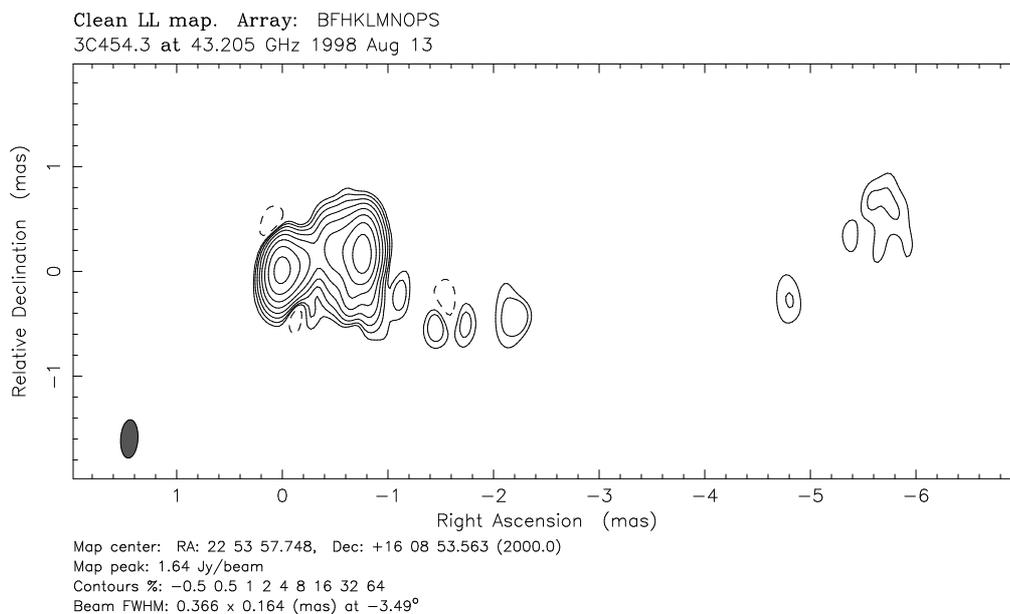
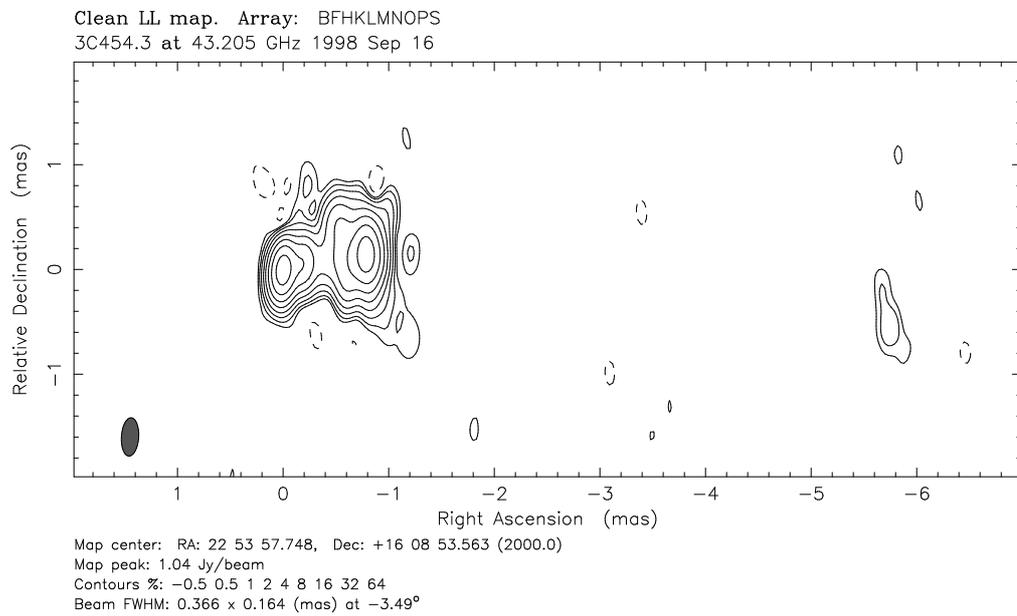
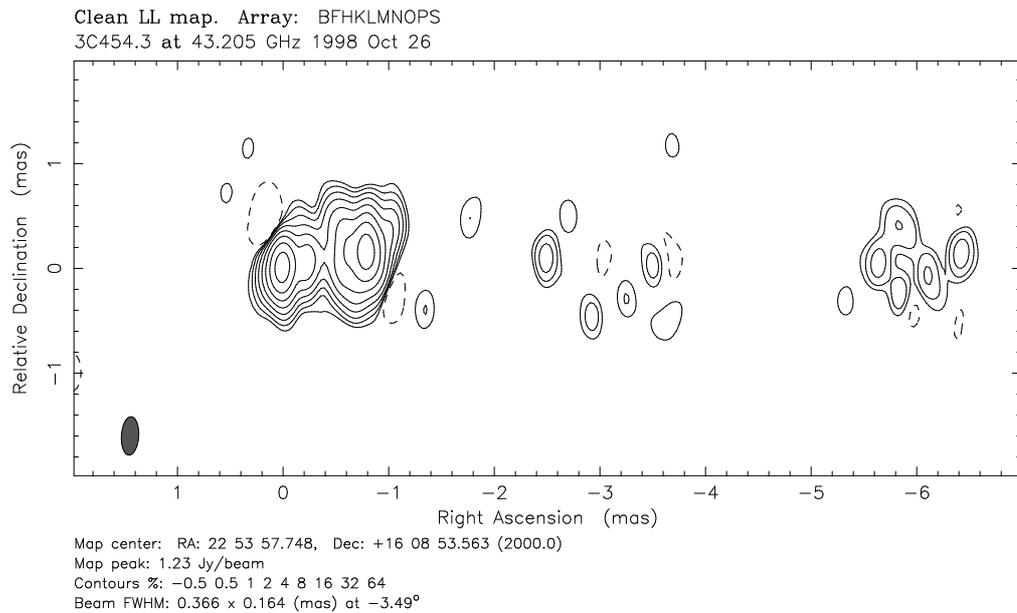


Abbildung C.13:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im August 1998

**Abbildung C.14:**

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im September 1998

**Abbildung C.15:**

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Oktober 1998

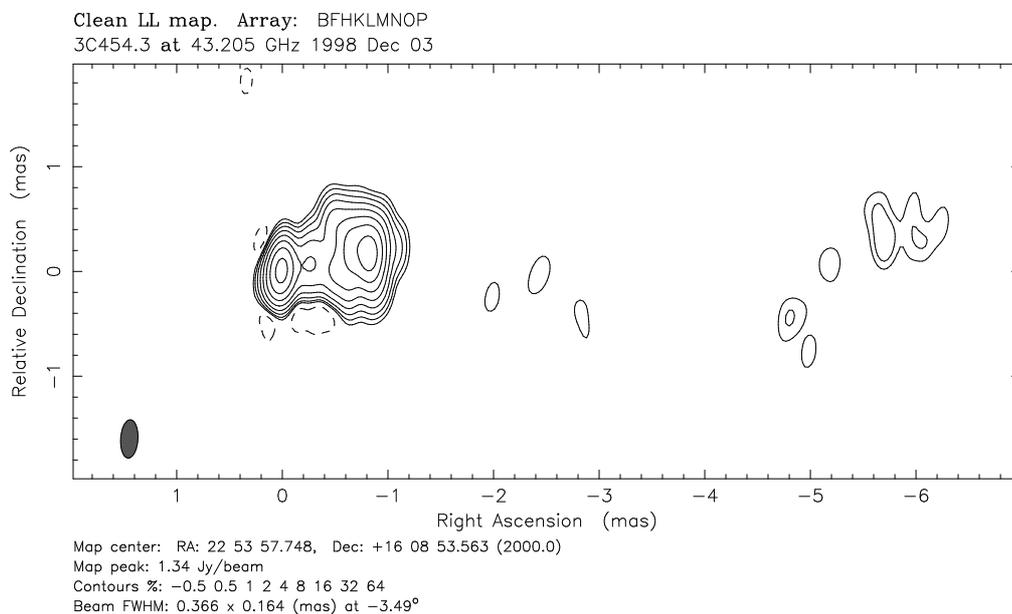


Abbildung C.16:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Dezember 1998

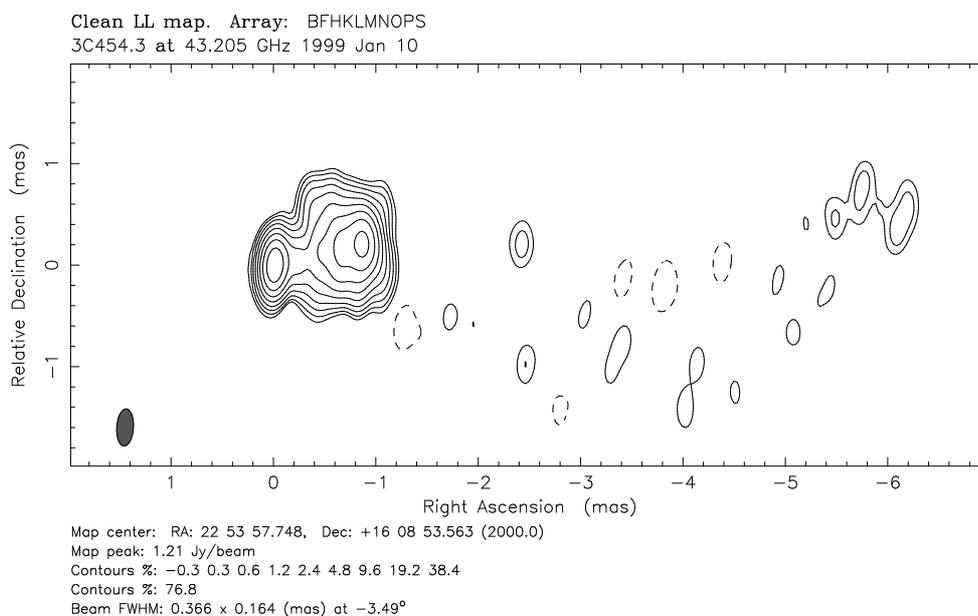


Abbildung C.17:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Januar 1999

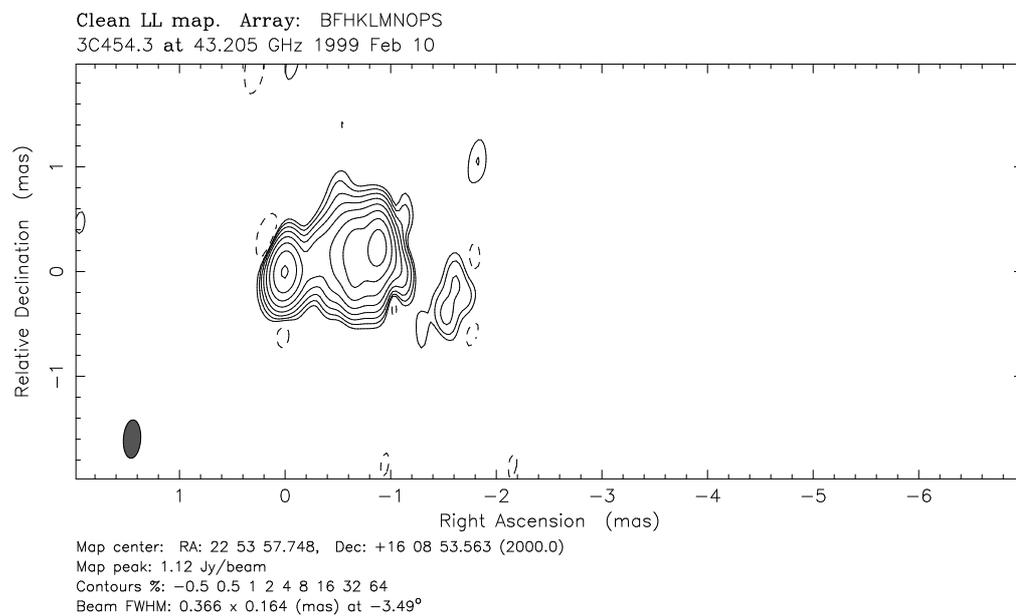


Abbildung C.18:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 10. Februar 1999

Anhang D

Epochen von 3C 454.3 bei 43 GHz

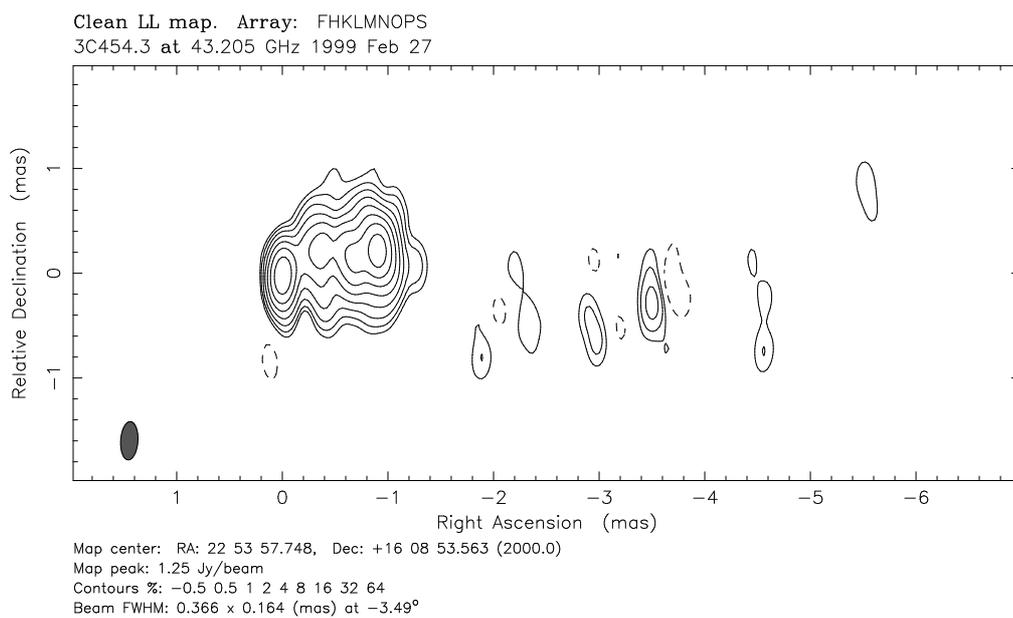
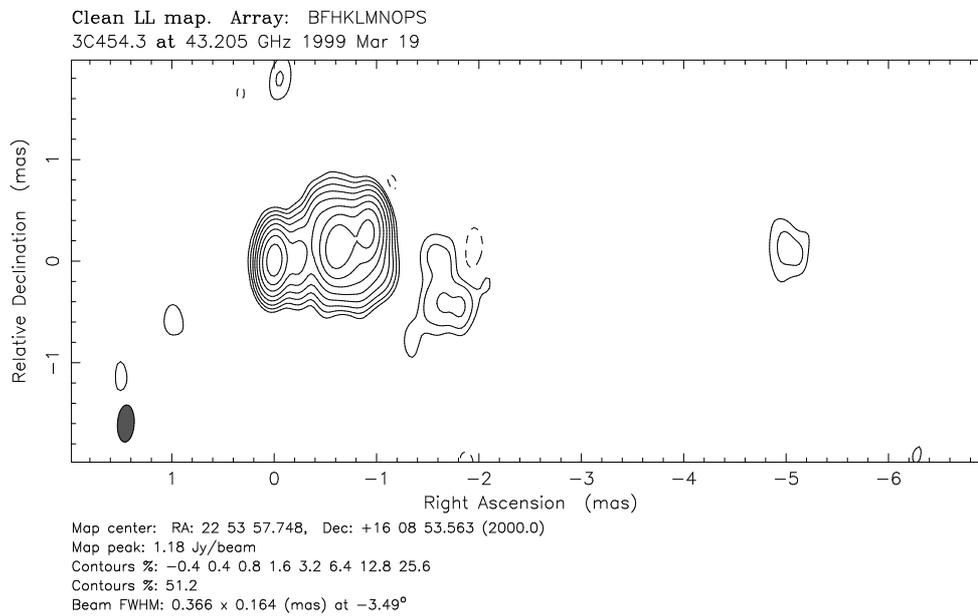
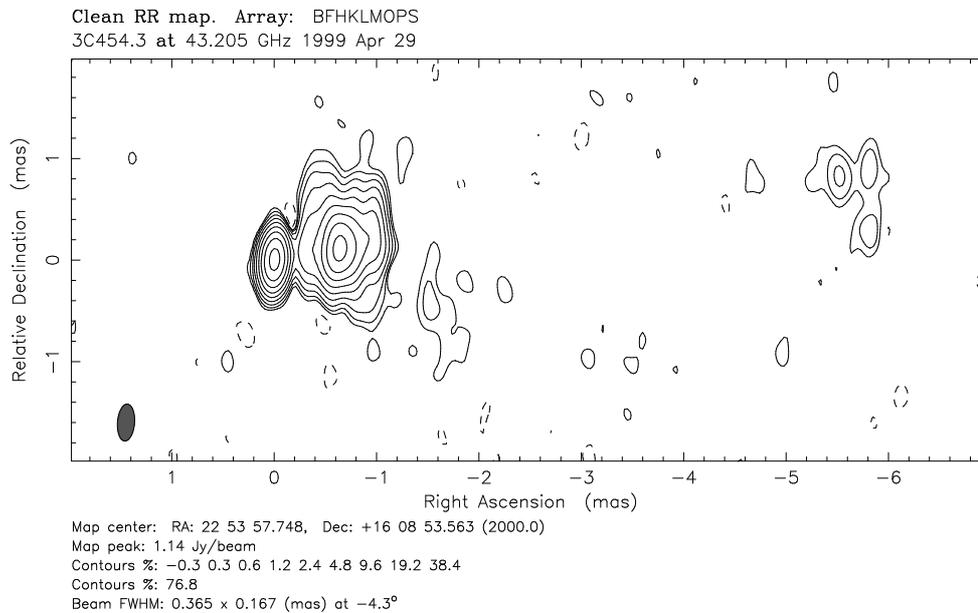


Abbildung D.1:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 27. Februar 1999

**Abbildung D.2:**

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im März 1999

**Abbildung D.3:**

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im April 1999

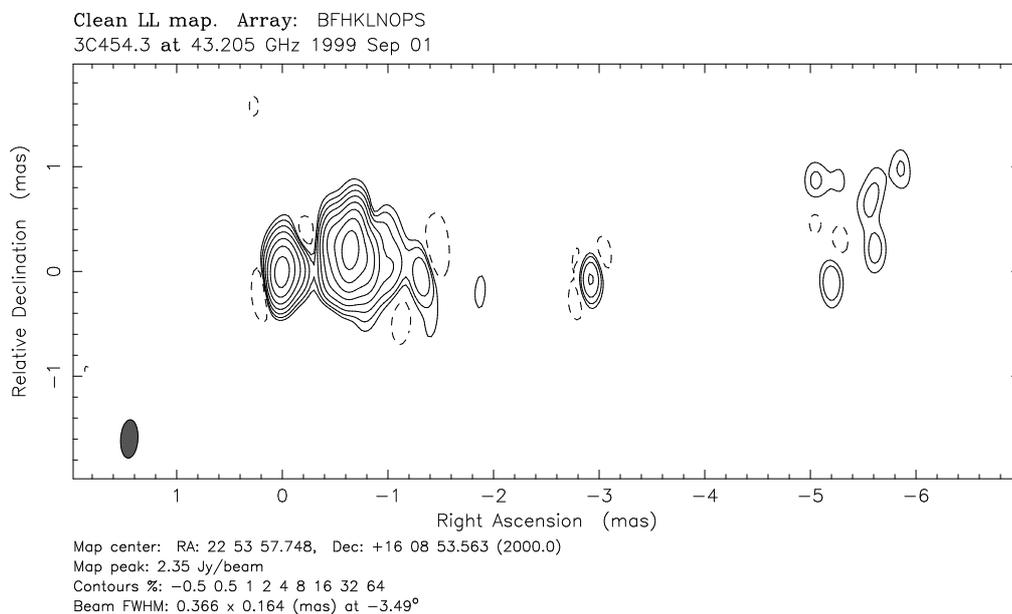


Abbildung D.4:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im September 1999

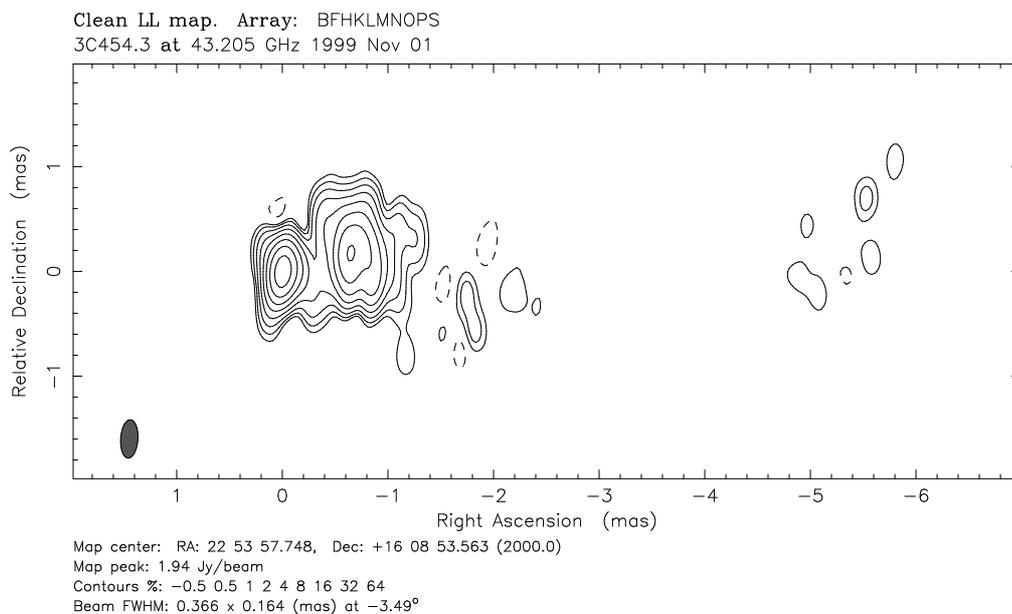
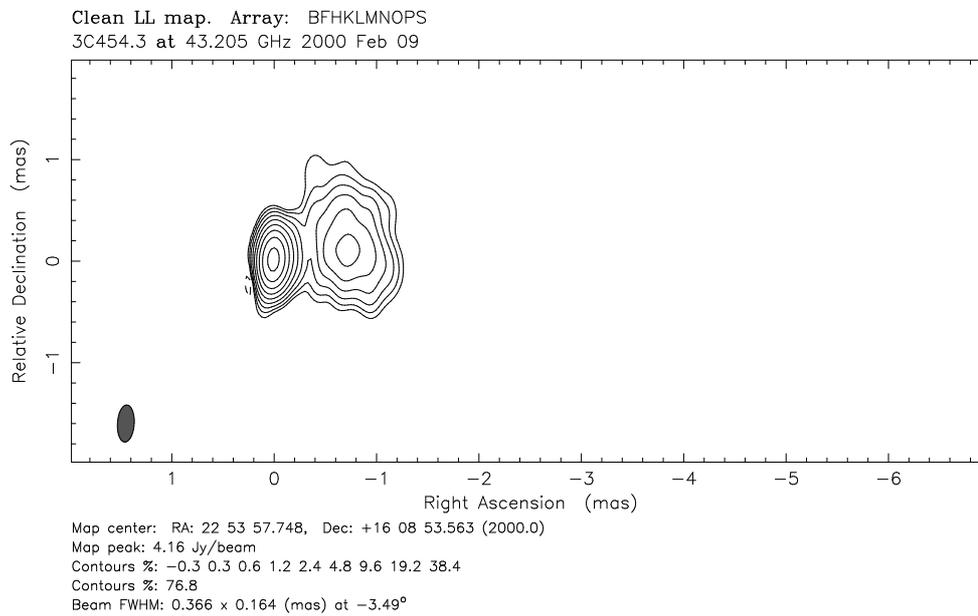
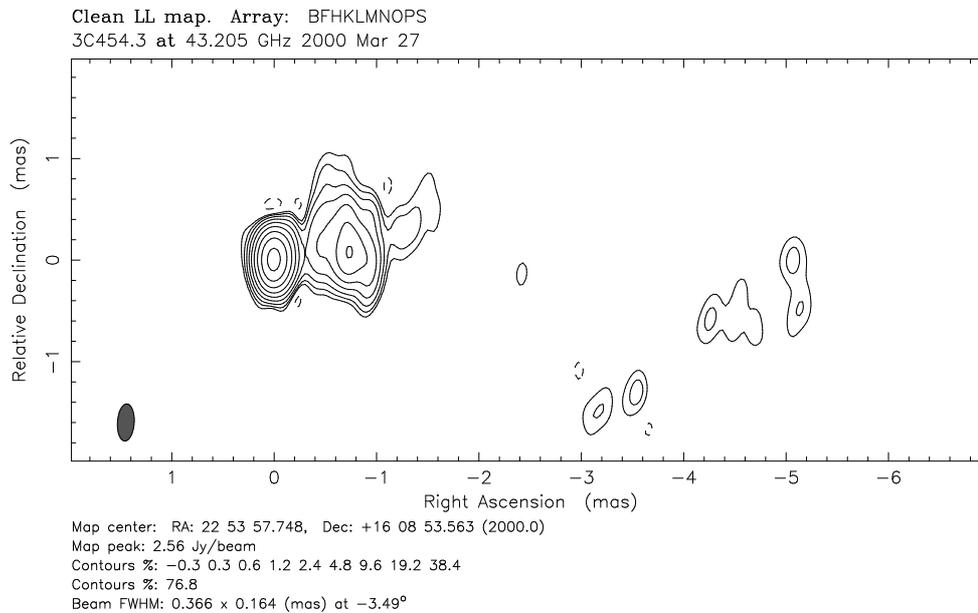


Abbildung D.5:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im November 1999

**Abbildung D.6:**

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Februar 2000

**Abbildung D.7:**

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im März 2000

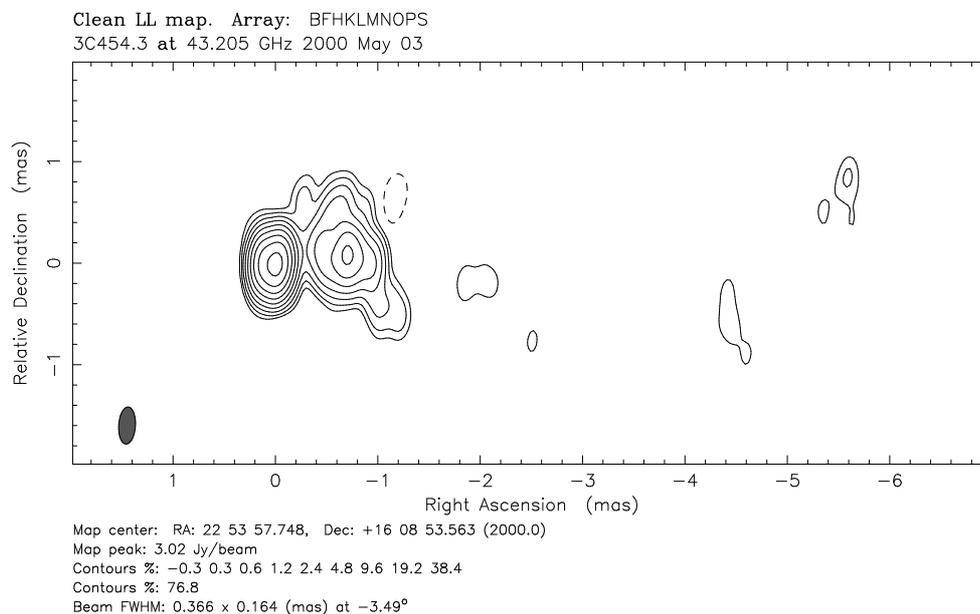


Abbildung D.8:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 3. May 2000

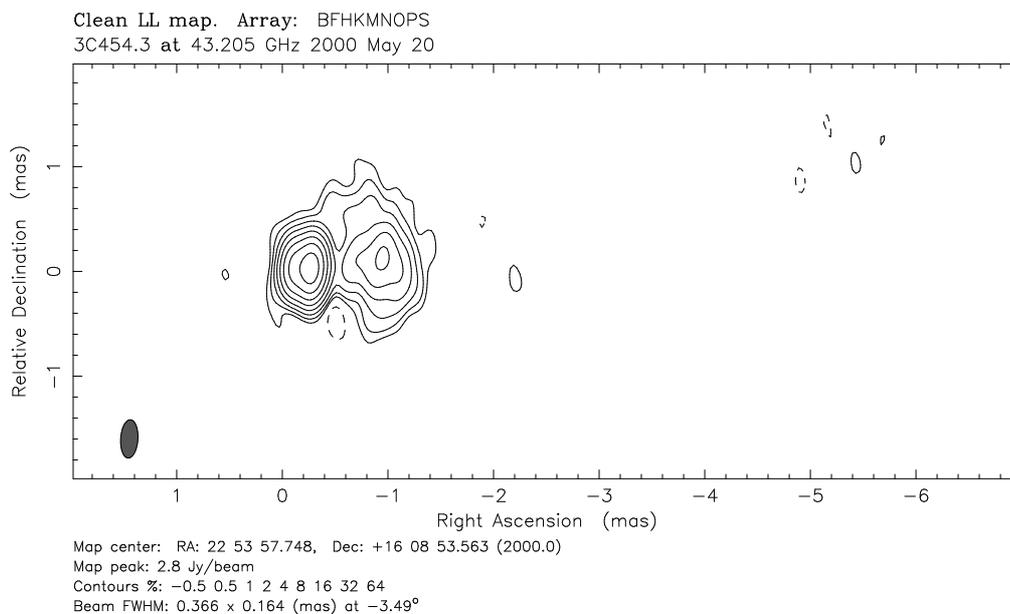
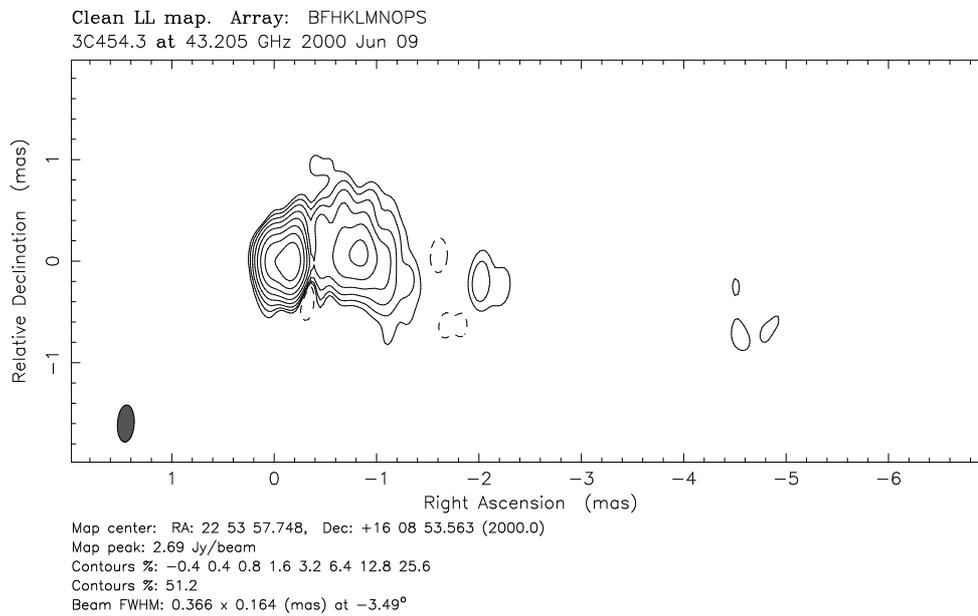
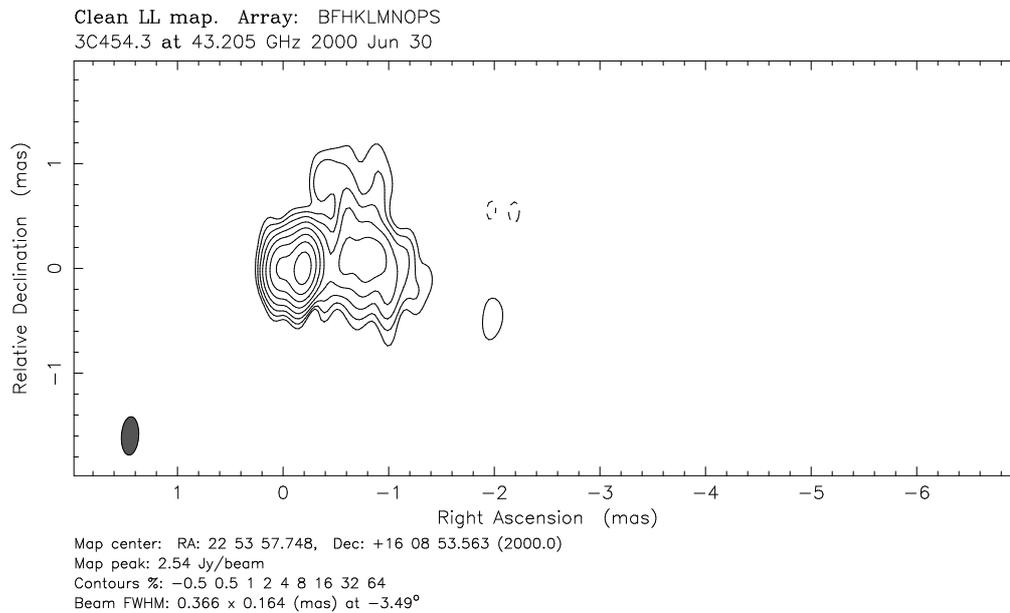


Abbildung D.9:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 20. May 2000

**Abbildung D.10:**

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 9. Juni 2000

**Abbildung D.11:**

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 30. Juni 2000

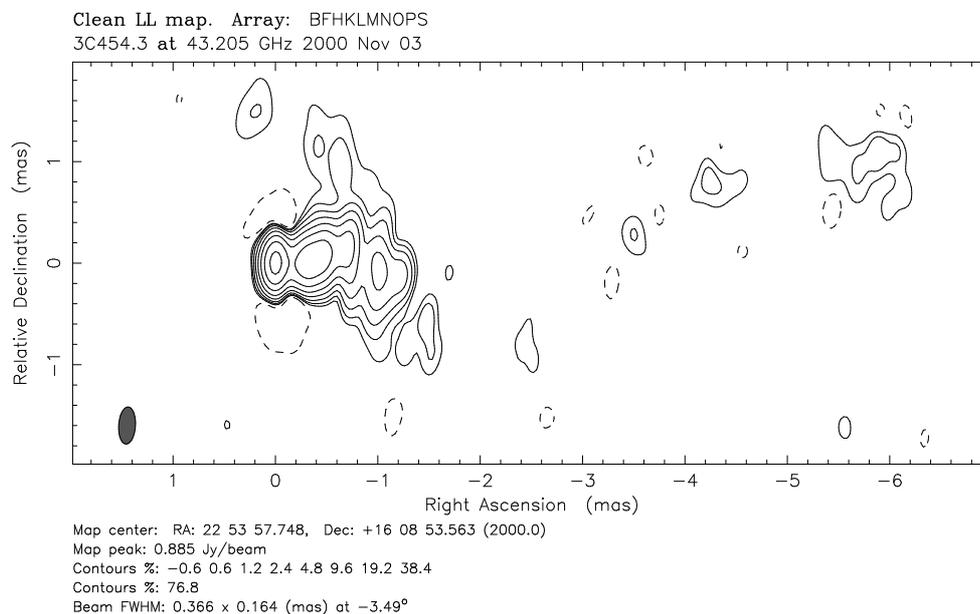


Abbildung D.12:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im November 2000

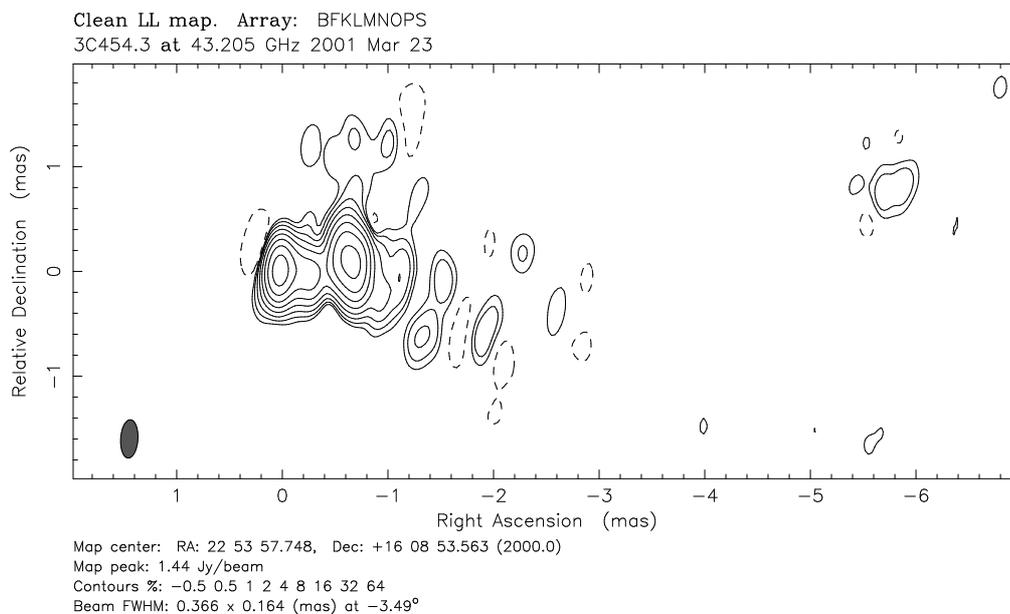


Abbildung D.13:

Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im März 2001

Anhang E

Epochen von 3C 454.3 bei 86 GHz

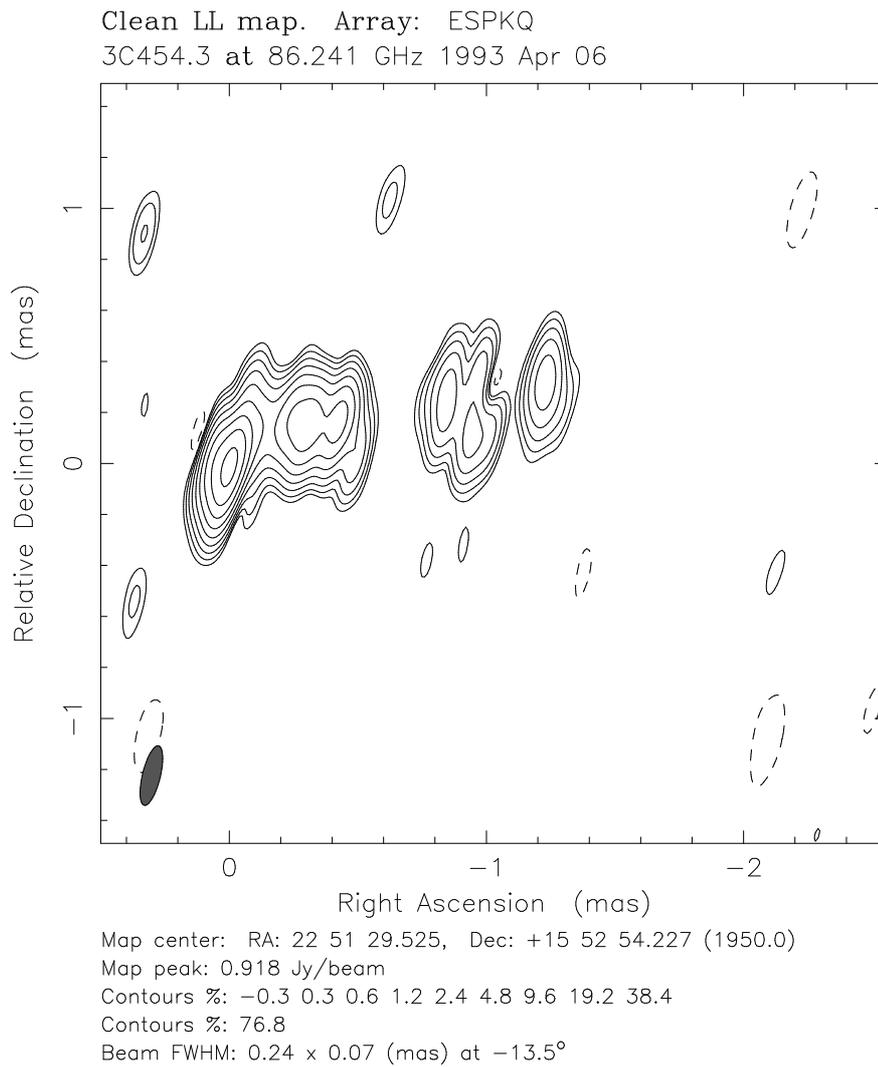


Abbildung E.1:

3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im April 1993

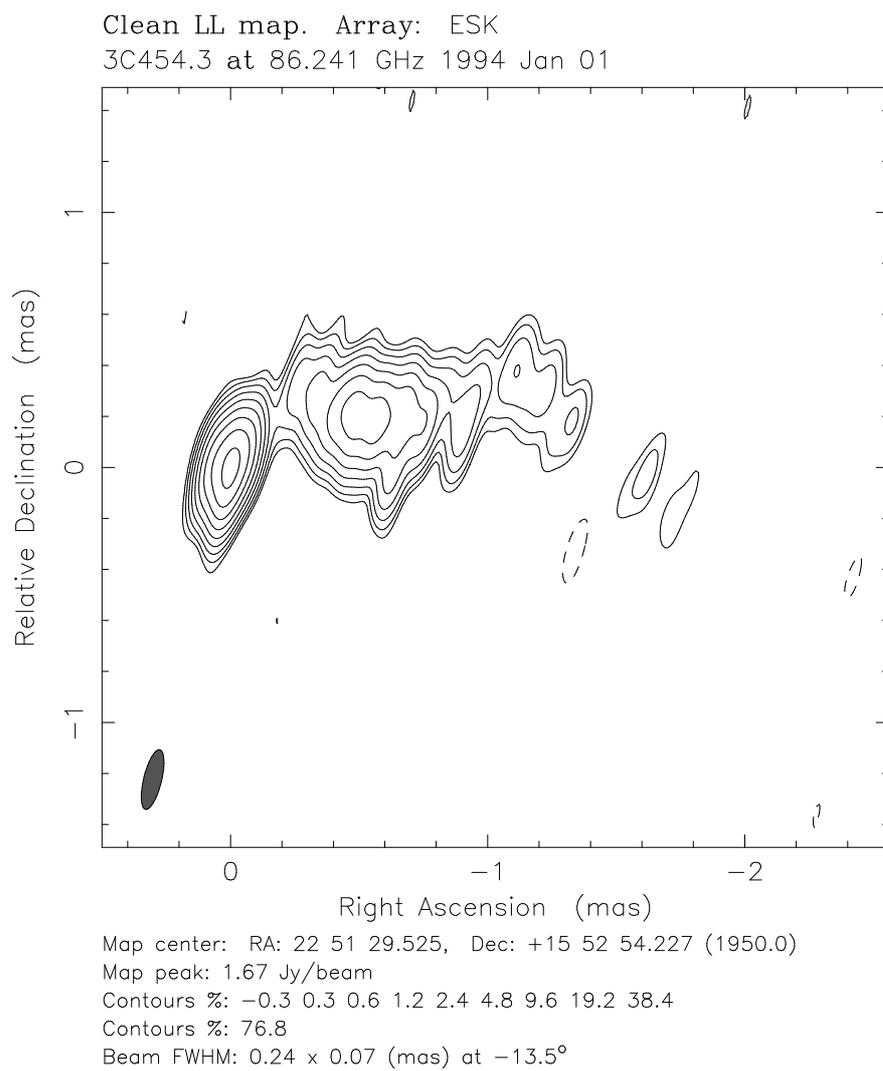
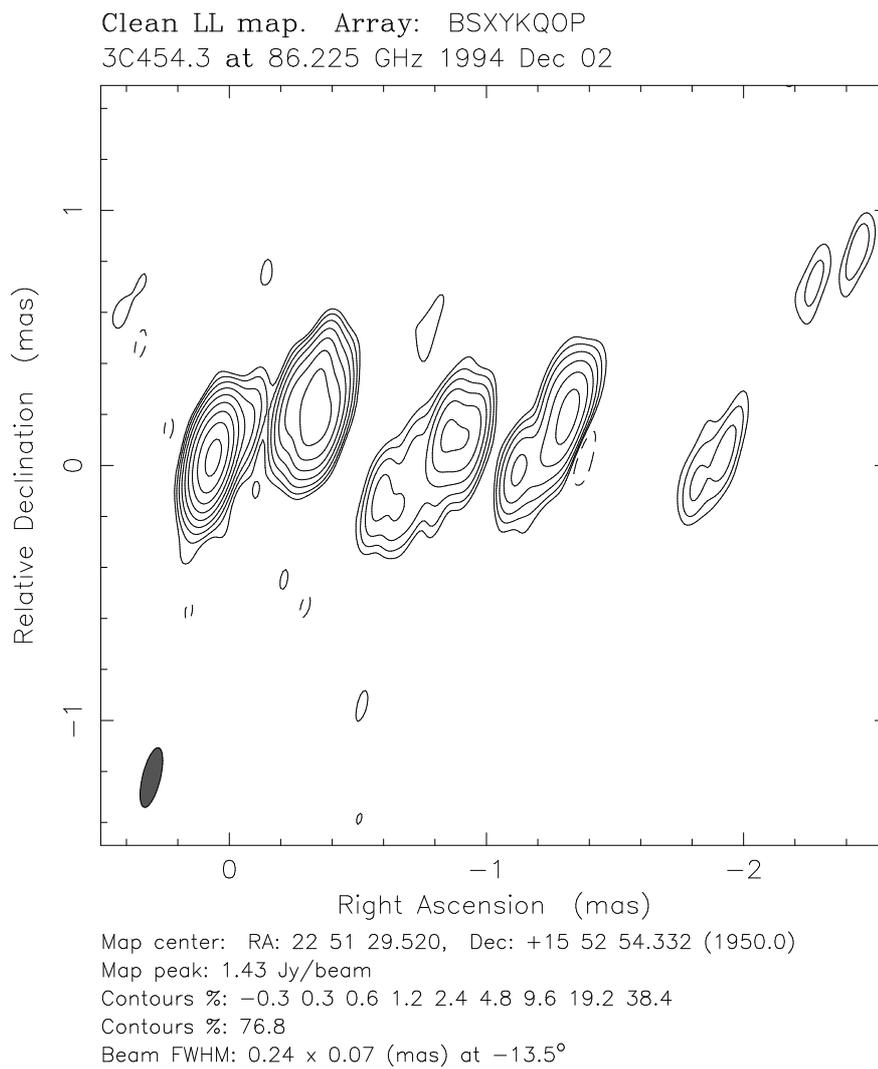


Abbildung E.2:

3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Januar 1994

**Abbildung E.3:**

3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Dezember 1994

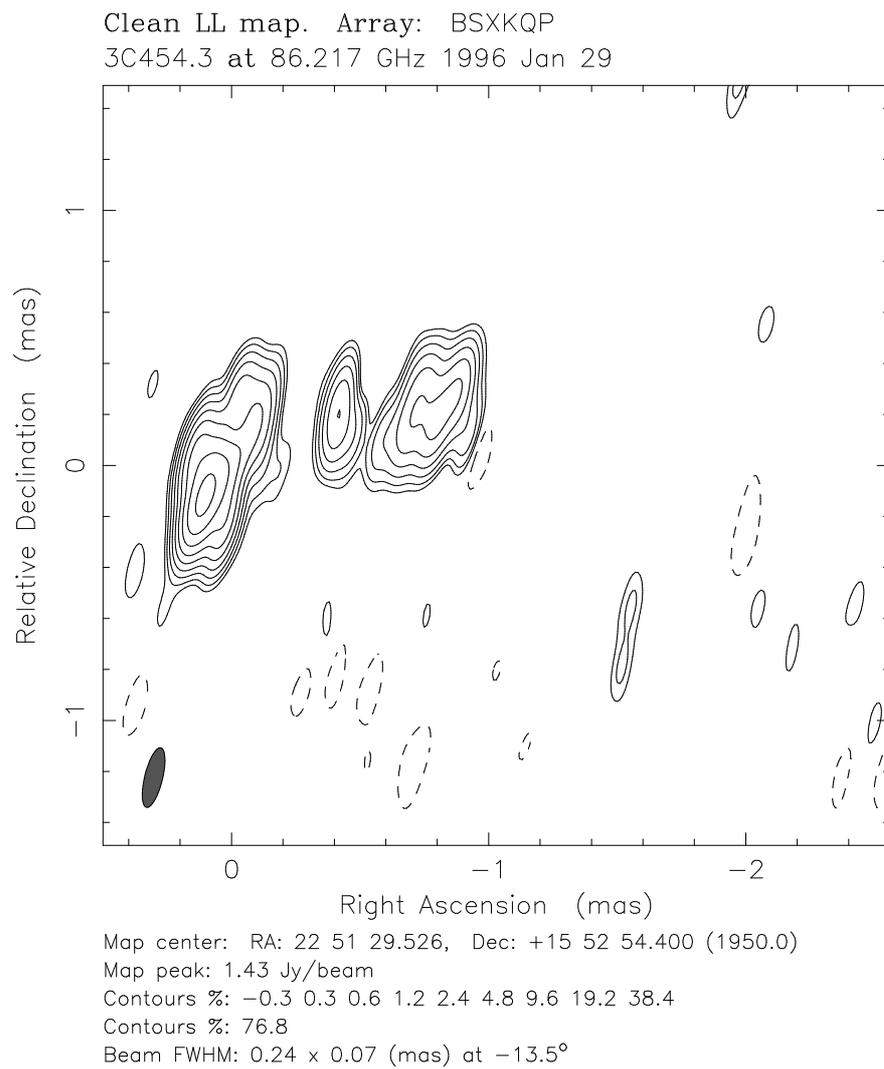


Abbildung E.4:

3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Januar 1996

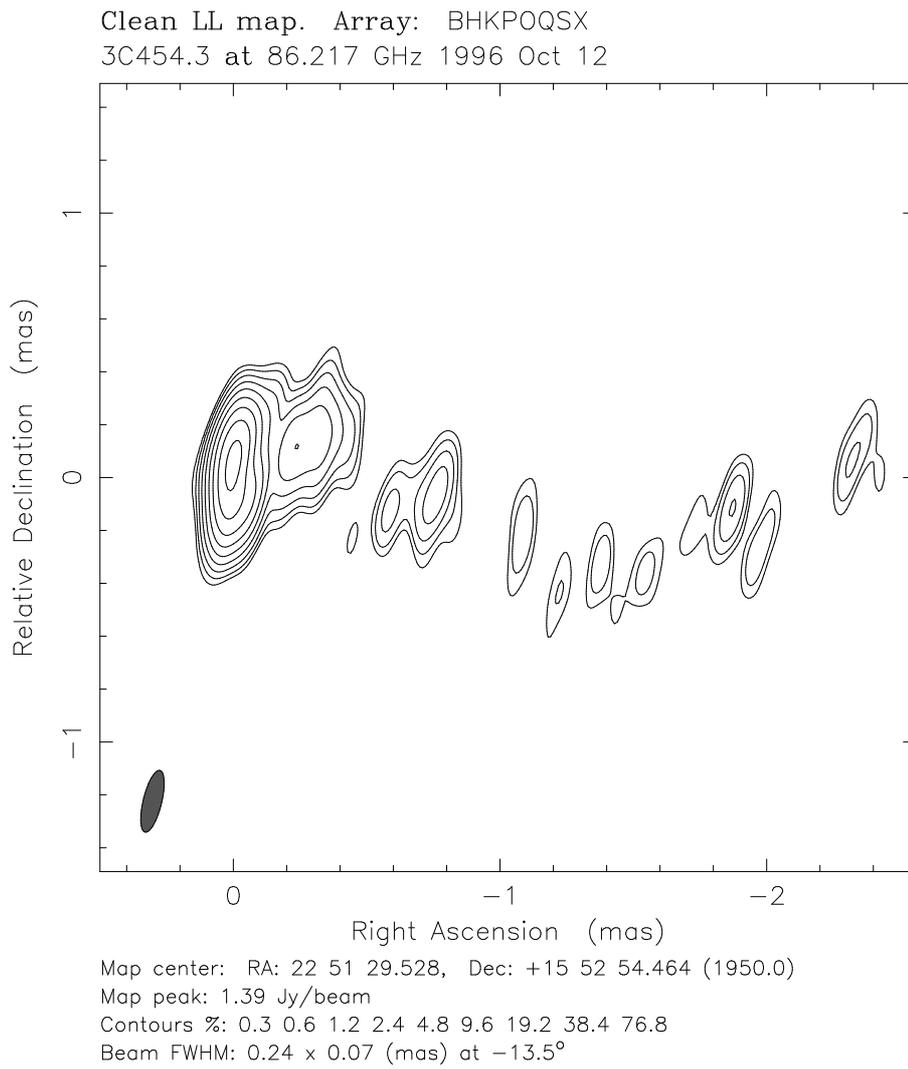


Abbildung E.5:

3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Oktober 1996

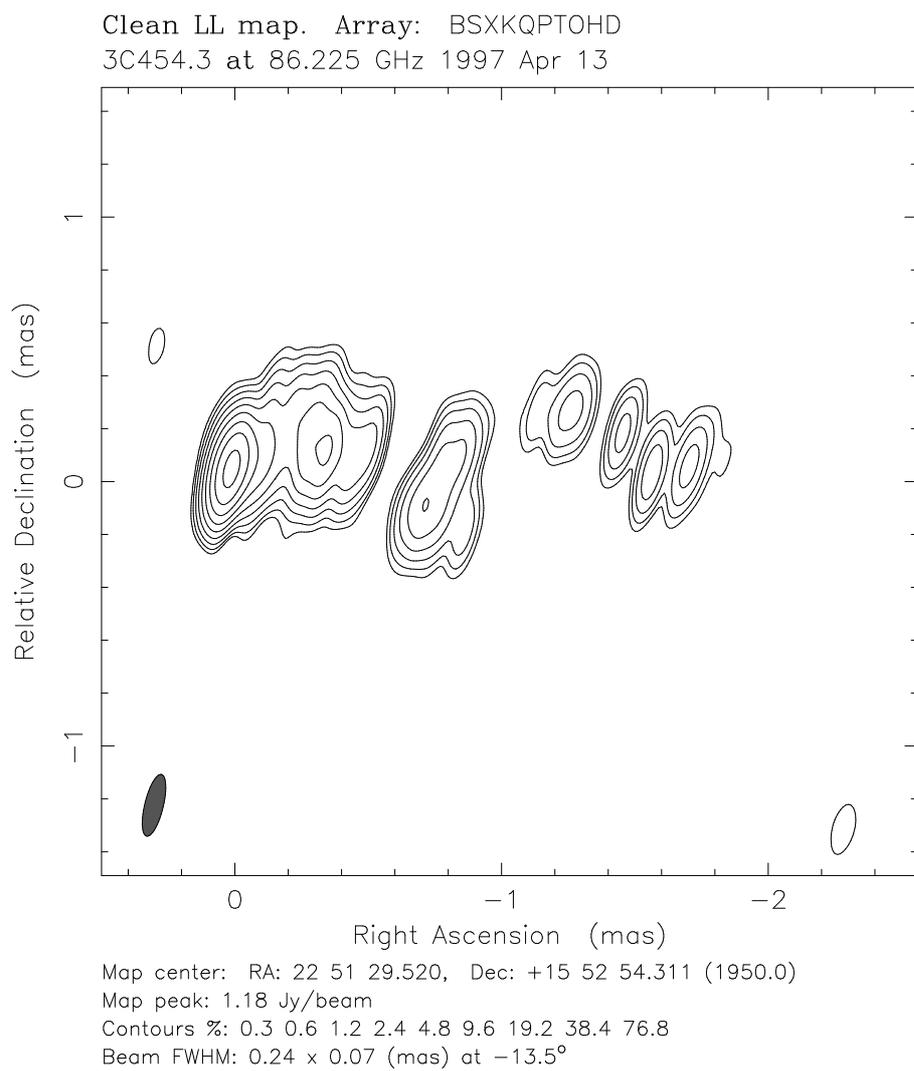
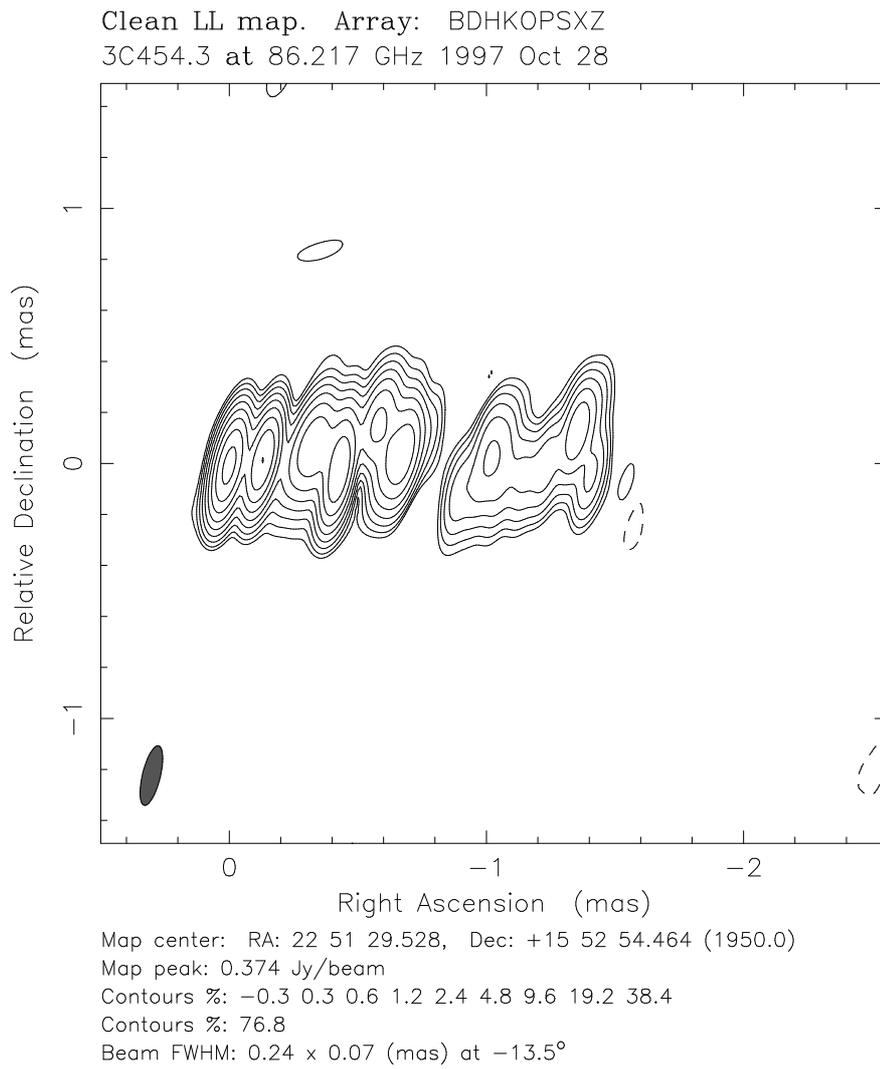


Abbildung E.6:
3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im April 1997

**Abbildung E.7:**

3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Oktober 1997

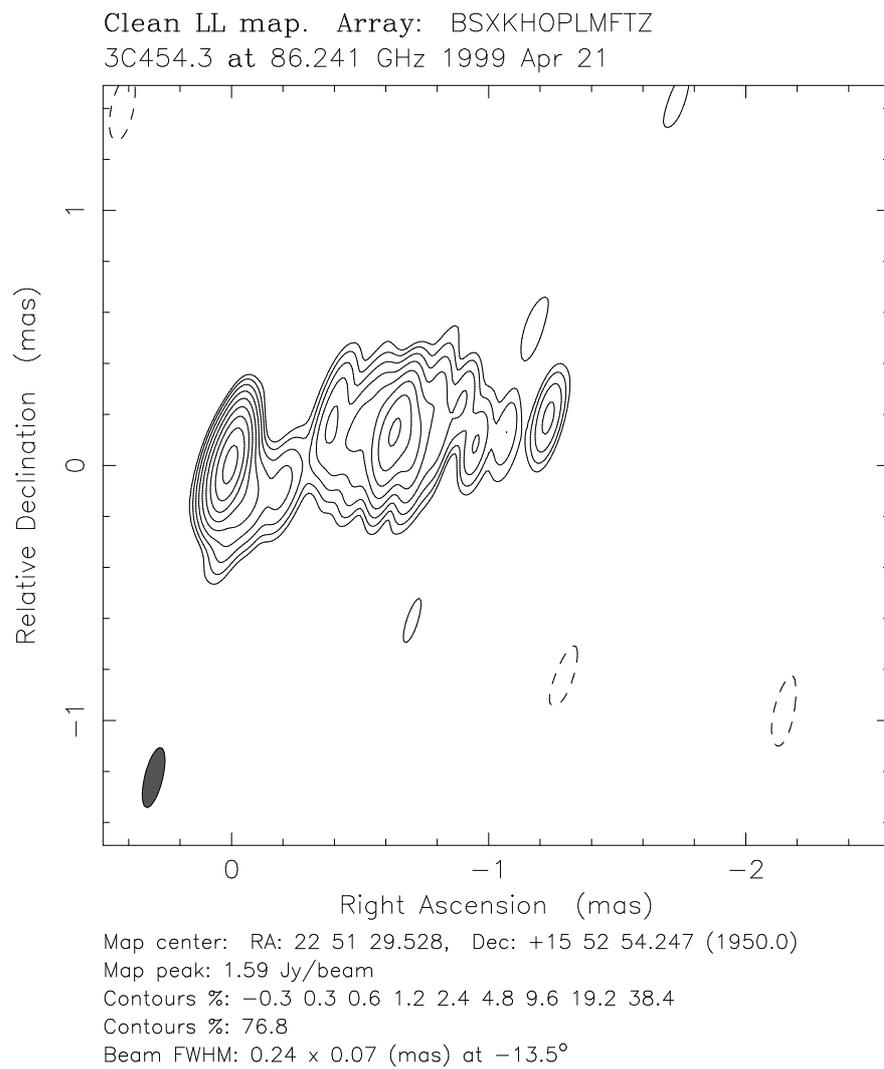


Abbildung E.8:
3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im April 1999

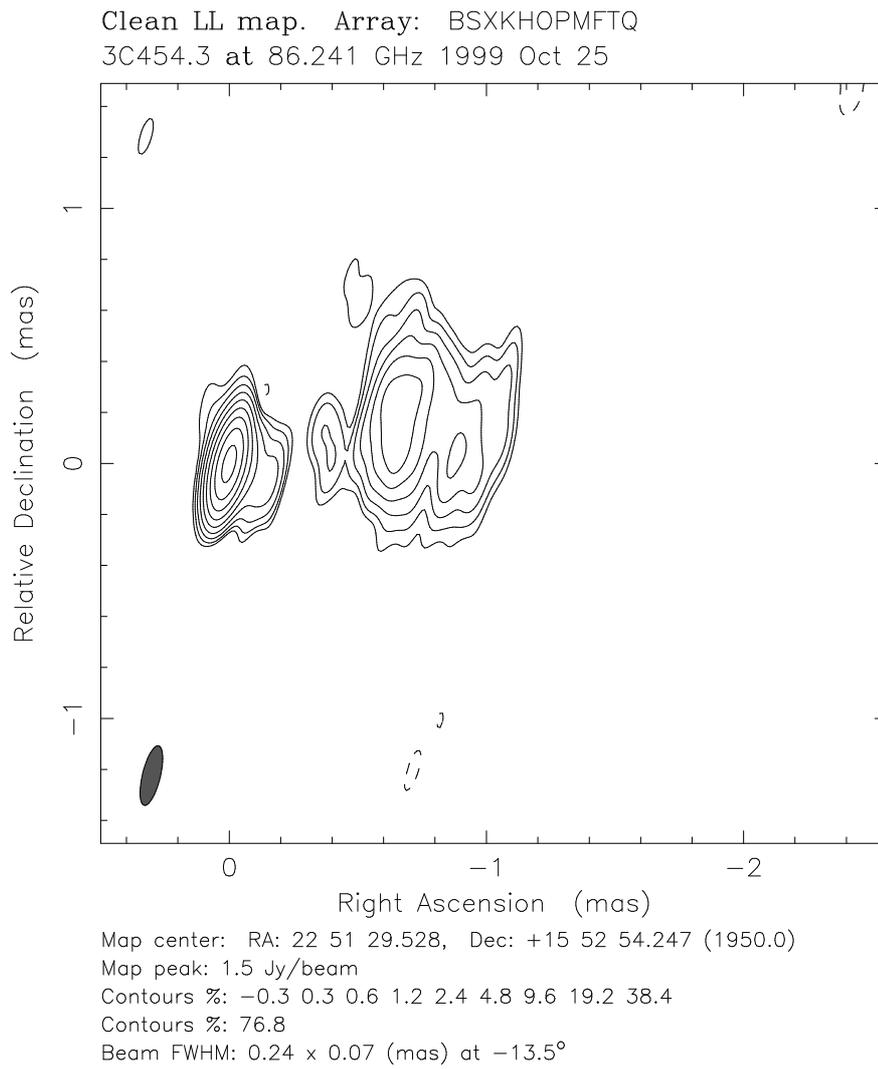


Abbildung E.9:
3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Oktober 1999

Anhang F

Spektralindexkarten von 3C 454.3 aus 22 und 43 GHz

Die in diesem und dem folgenden Kapitel vorgestellten Karten sind aus den Daten der Anhänge A-D errechnet. Die Karten decken einen Bereich von 20 x 20 Millibogensekunden ab, wobei sich jeweils der Kern der Quelle in der Mitte der Karte befindet. Für die Berechnung der Spektralindexkarten wurden die Daten aus den Anhängen A-D mit dem gleichen *Beam* (22 GHz Größe) gefaltet. Im Farbbalken auf der linken Seite der Karten gibt den Spektralindex kodiert wieder. Die zwei stationären Komponenten bei 5 und ~ 0.9 mas treten in allen Karten deutlich als Regionen mit flachem bzw. positivem Spektralindex hervor, was auf eine geringe optische Dicke für hochfrequente Strahlung hinweist. In den Randregionen des Jets ist der Spektralindex meist negativ, was durch die deutlich großskaligere Struktur bei 22 GHz zu erklären ist.

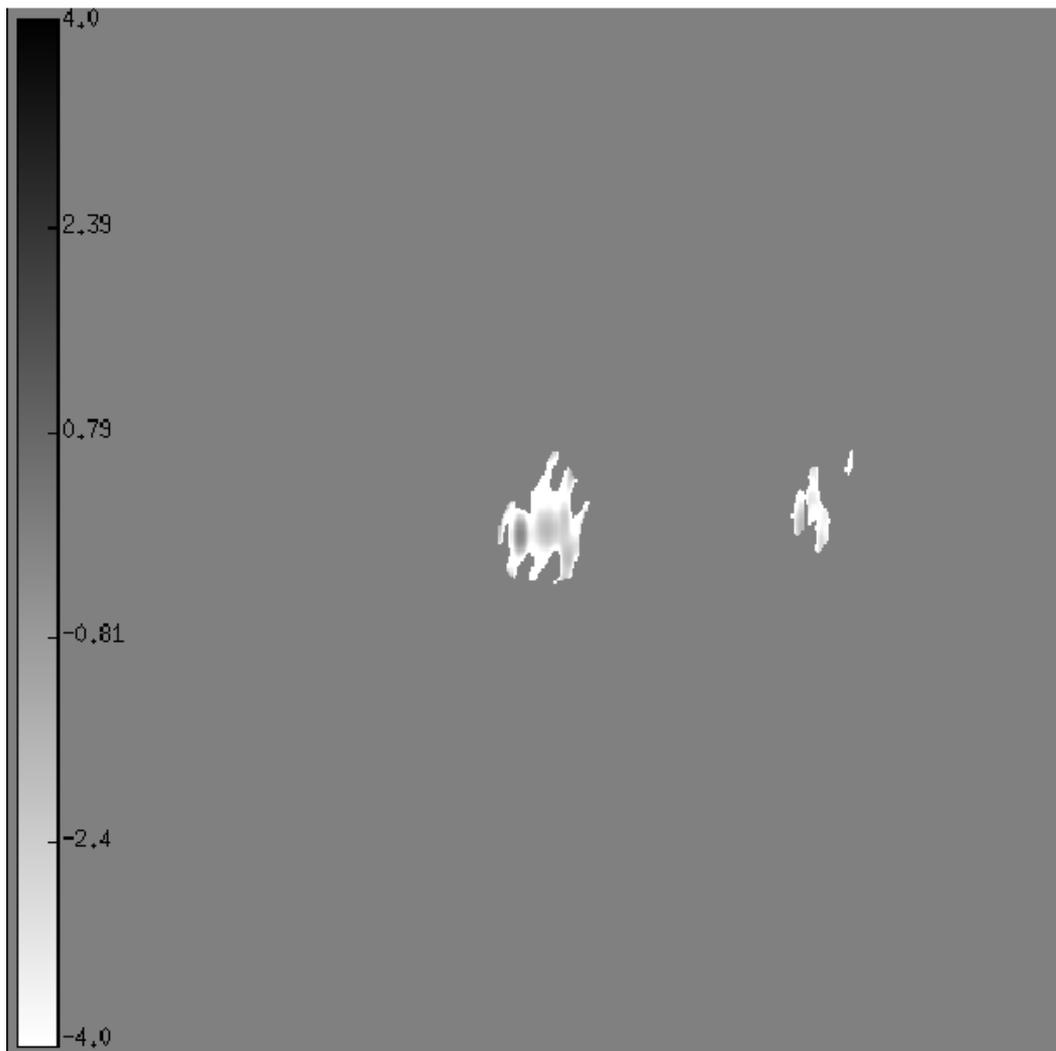


Abbildung F.1:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von November 1997

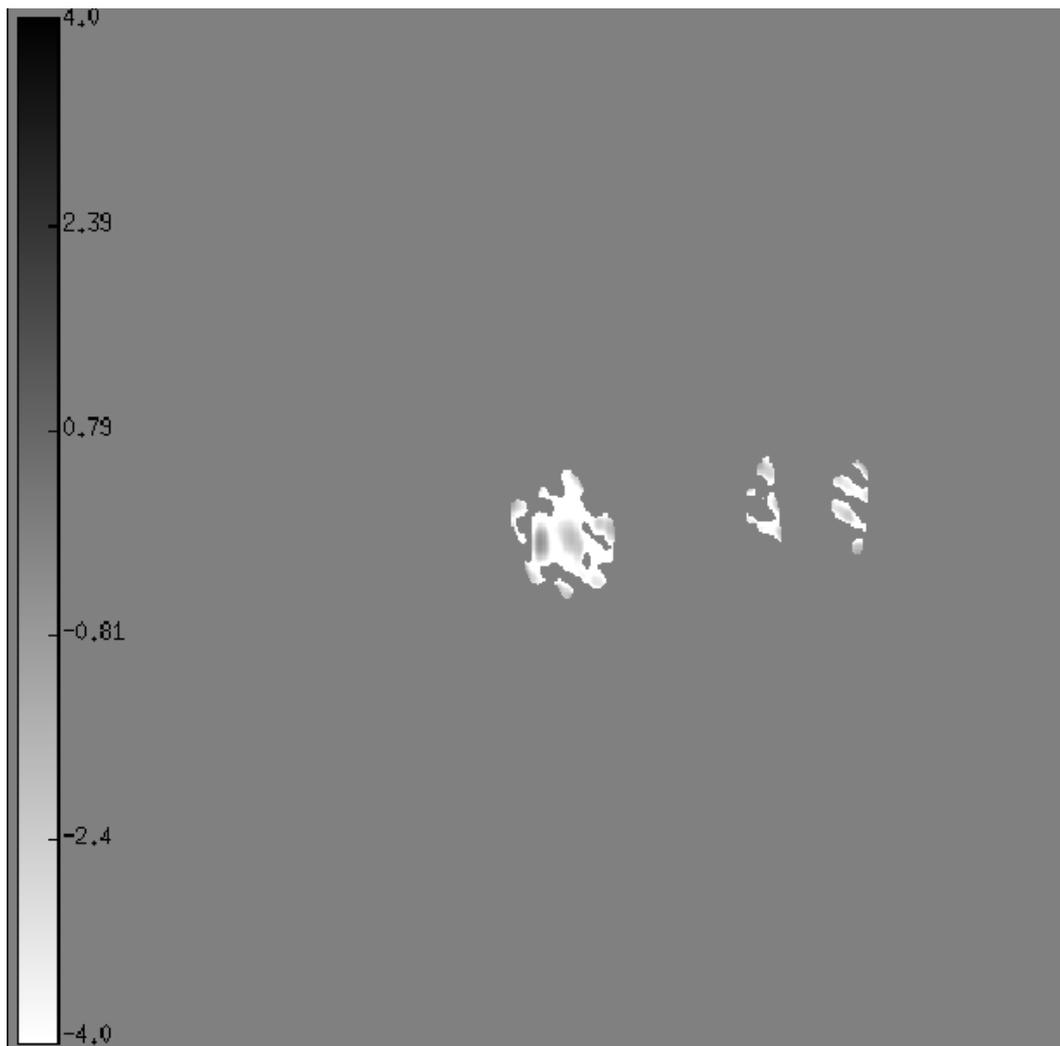


Abbildung F.2:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Dezember 1997

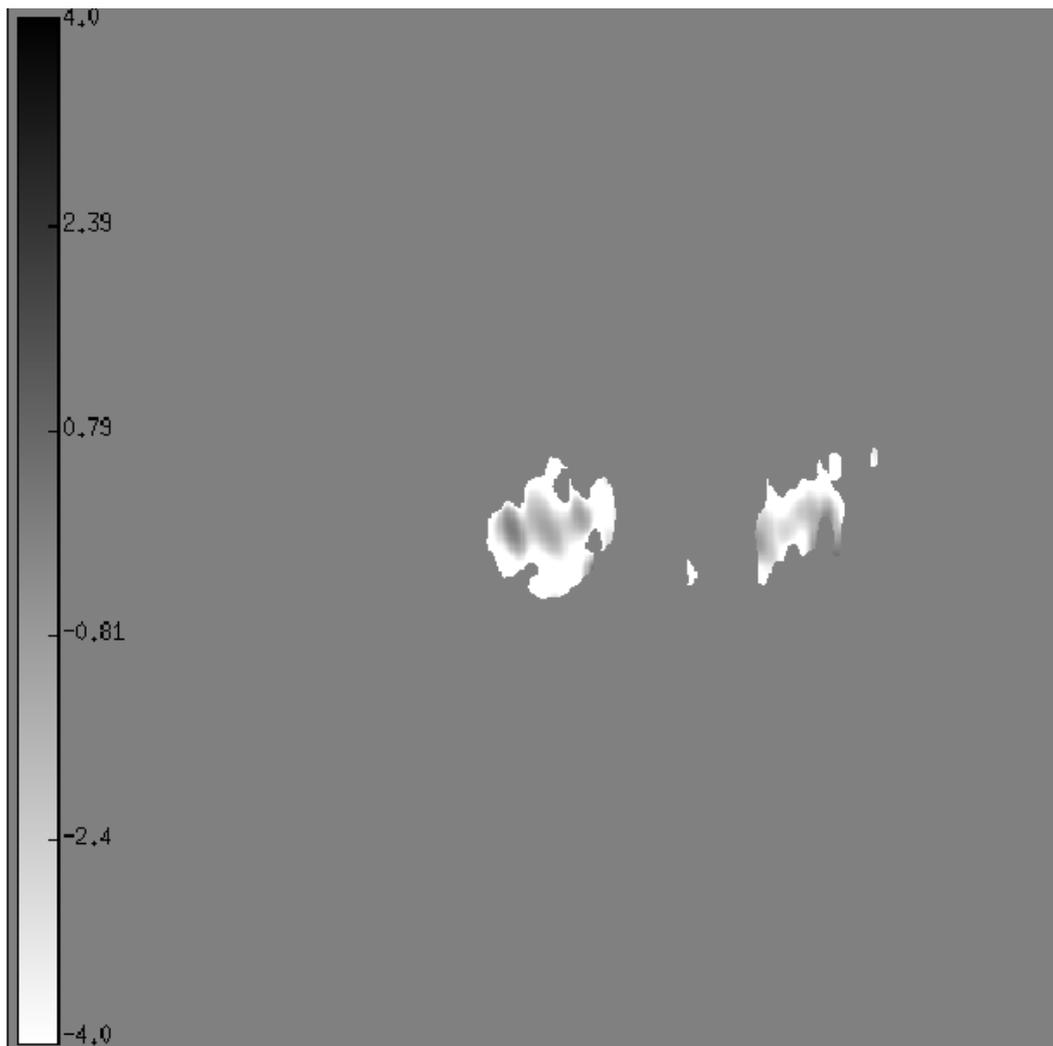


Abbildung F.3:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Januar 1998

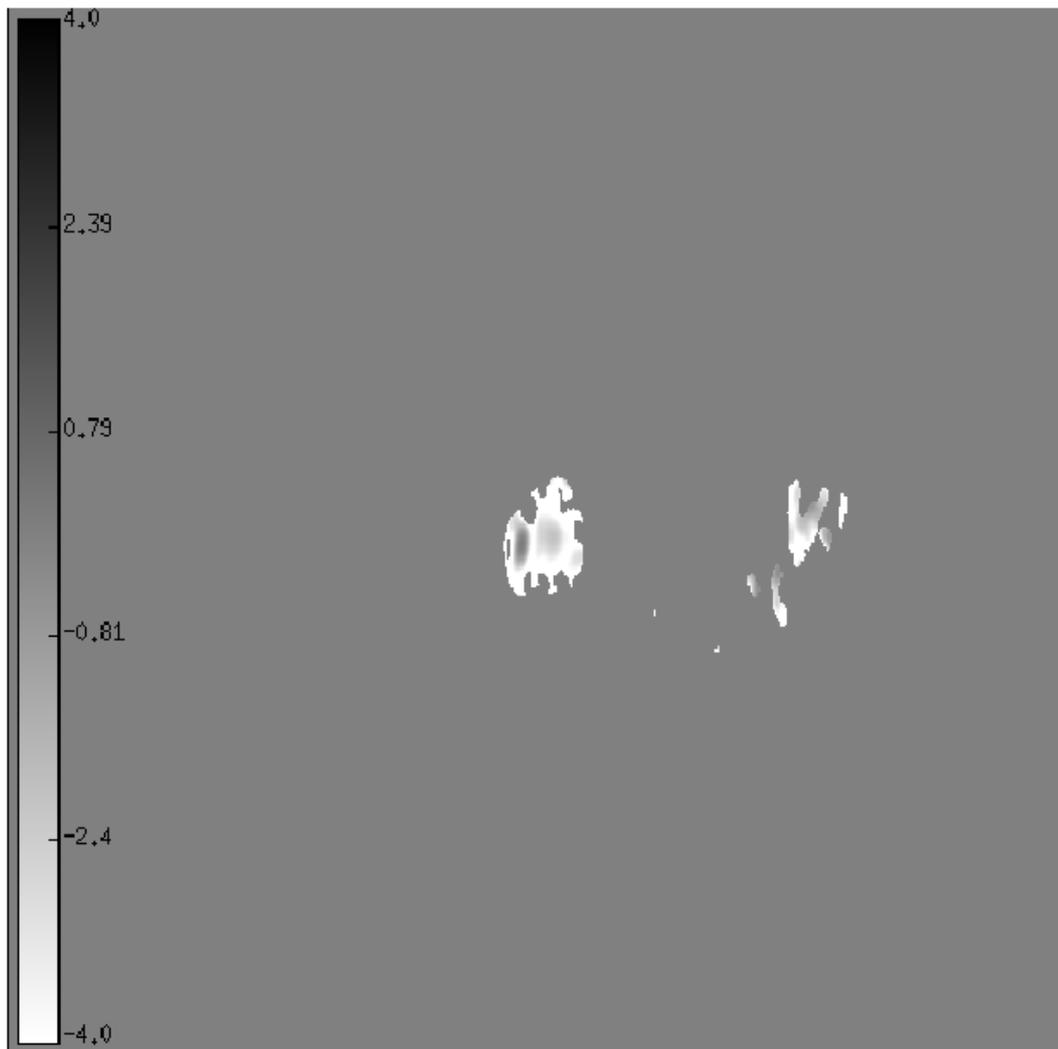


Abbildung F.4:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Februar 1998

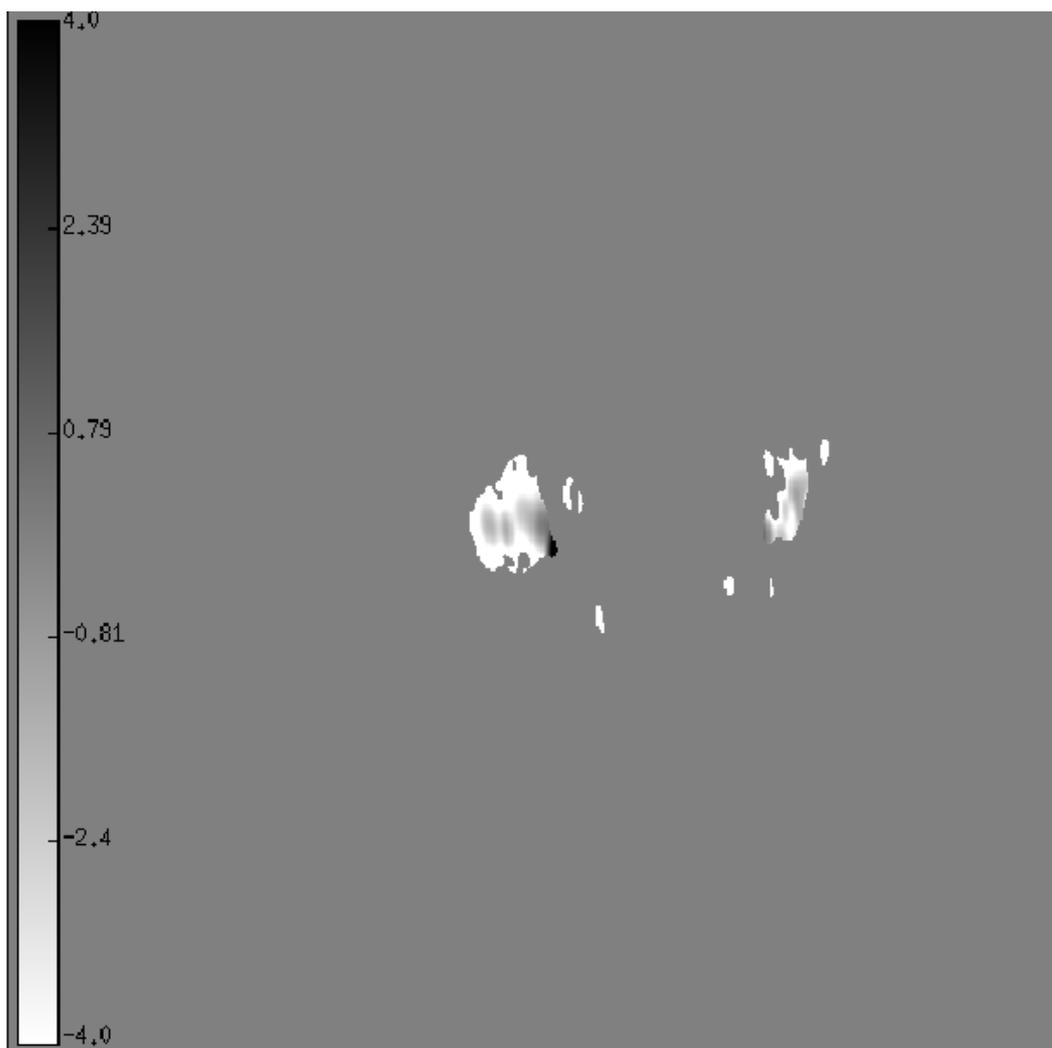


Abbildung F.5:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von März 1998

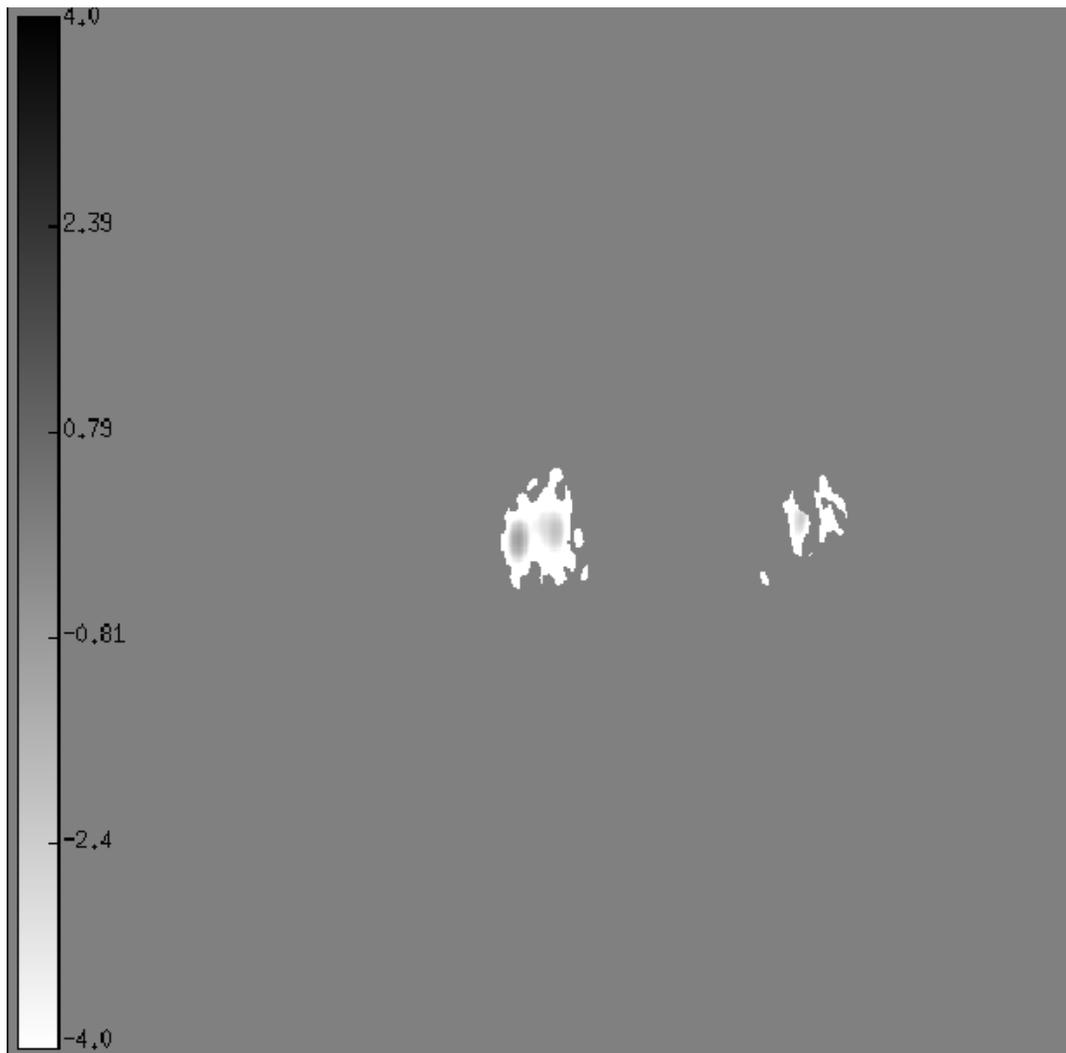


Abbildung F.6:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von April 1998

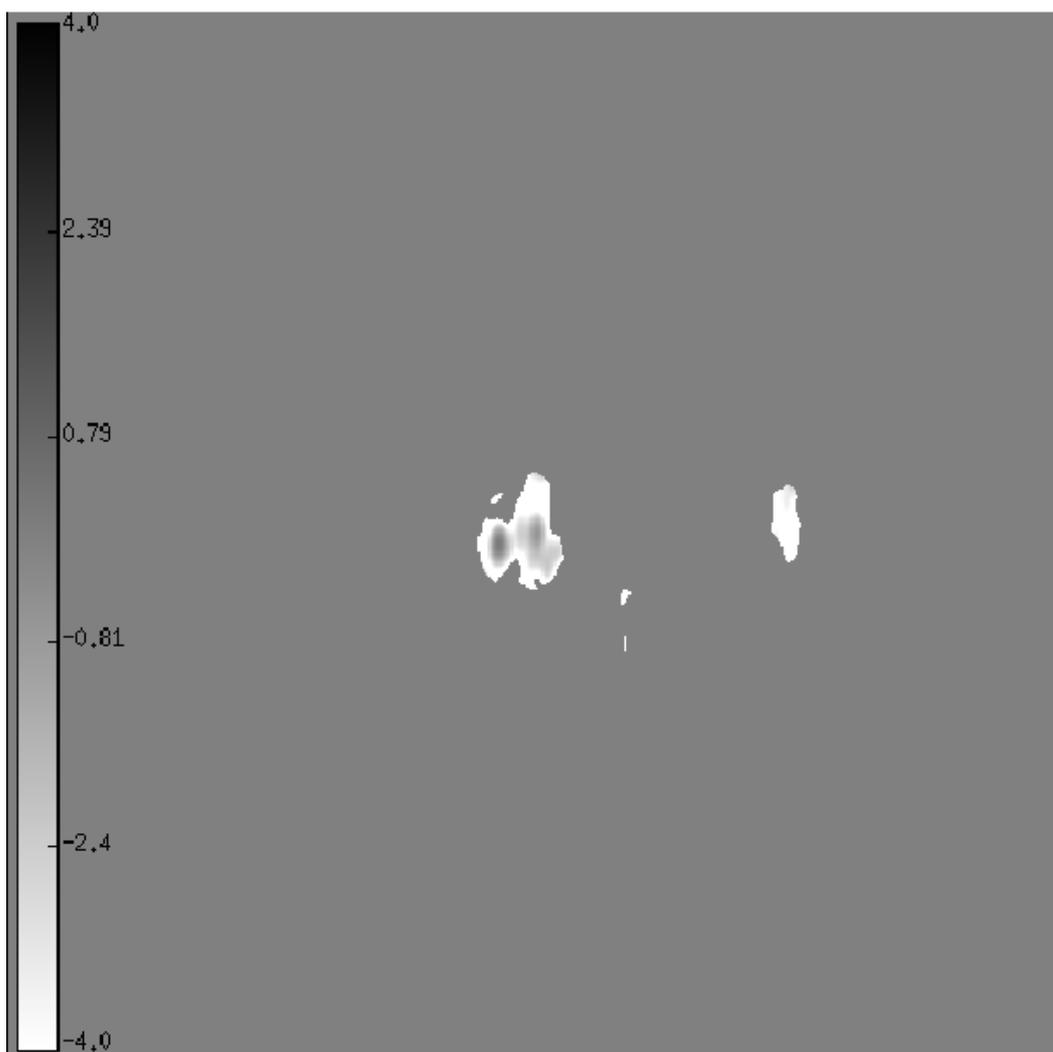


Abbildung F.7:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Mai 1998

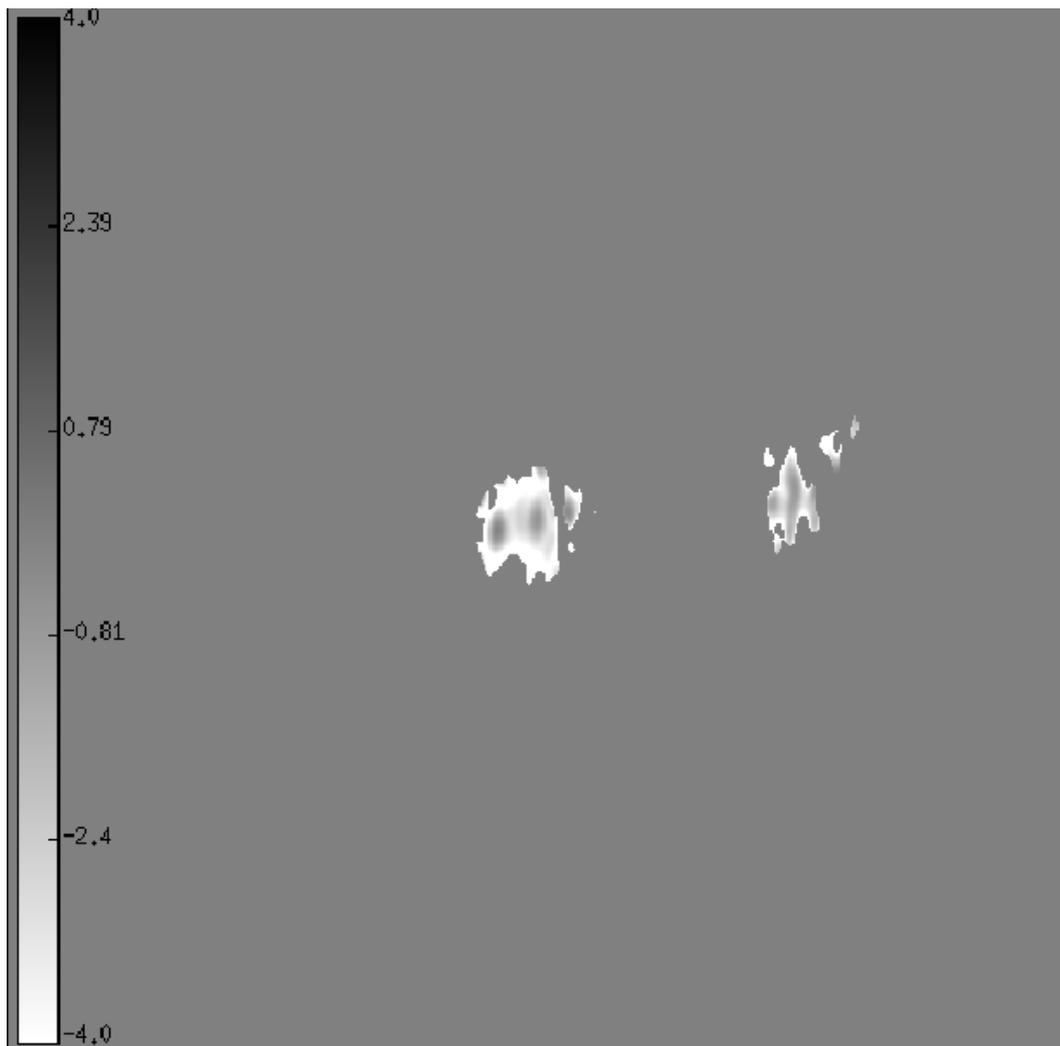


Abbildung F.8:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Juni 1998

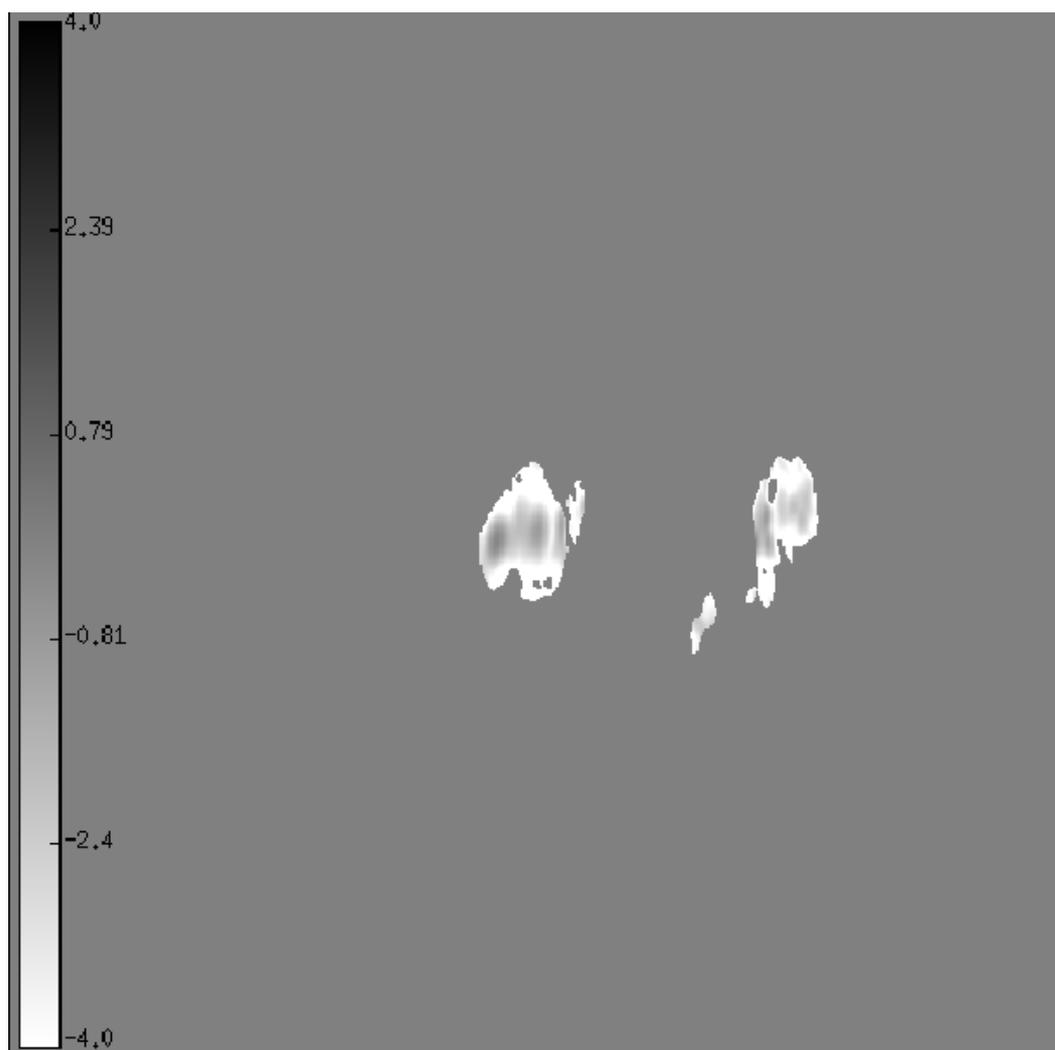


Abbildung F.9:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Juli 1998

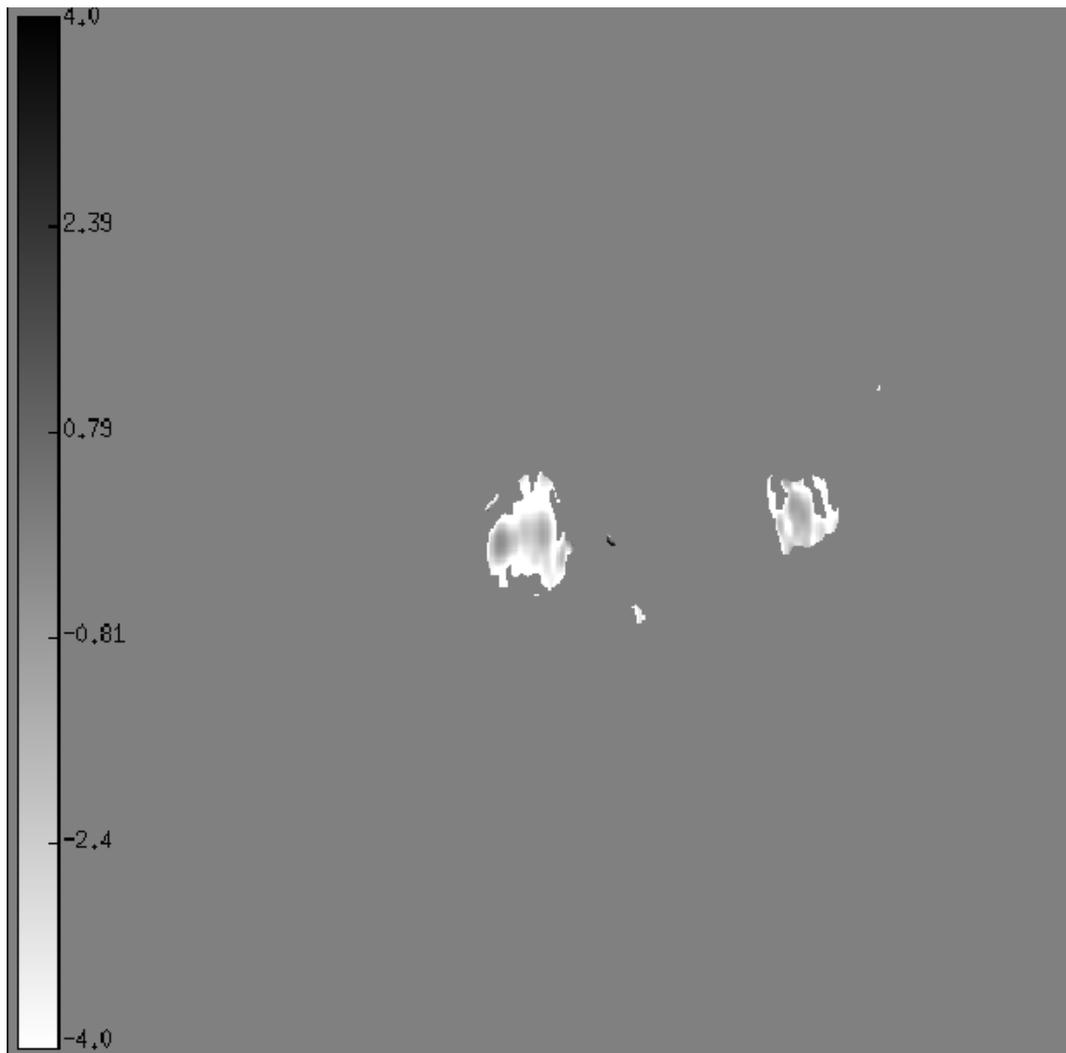


Abbildung F.10:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von August 1998

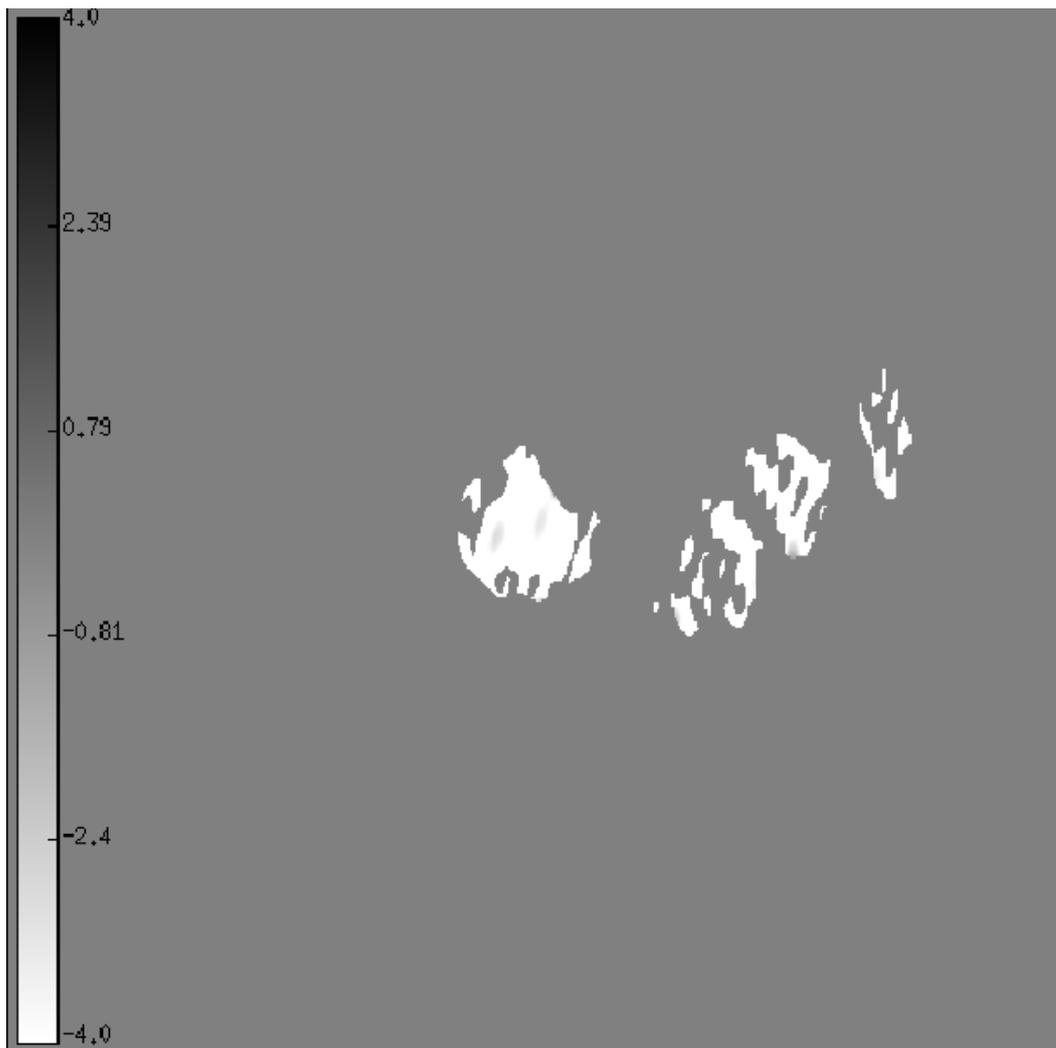


Abbildung F.11:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von September 1998

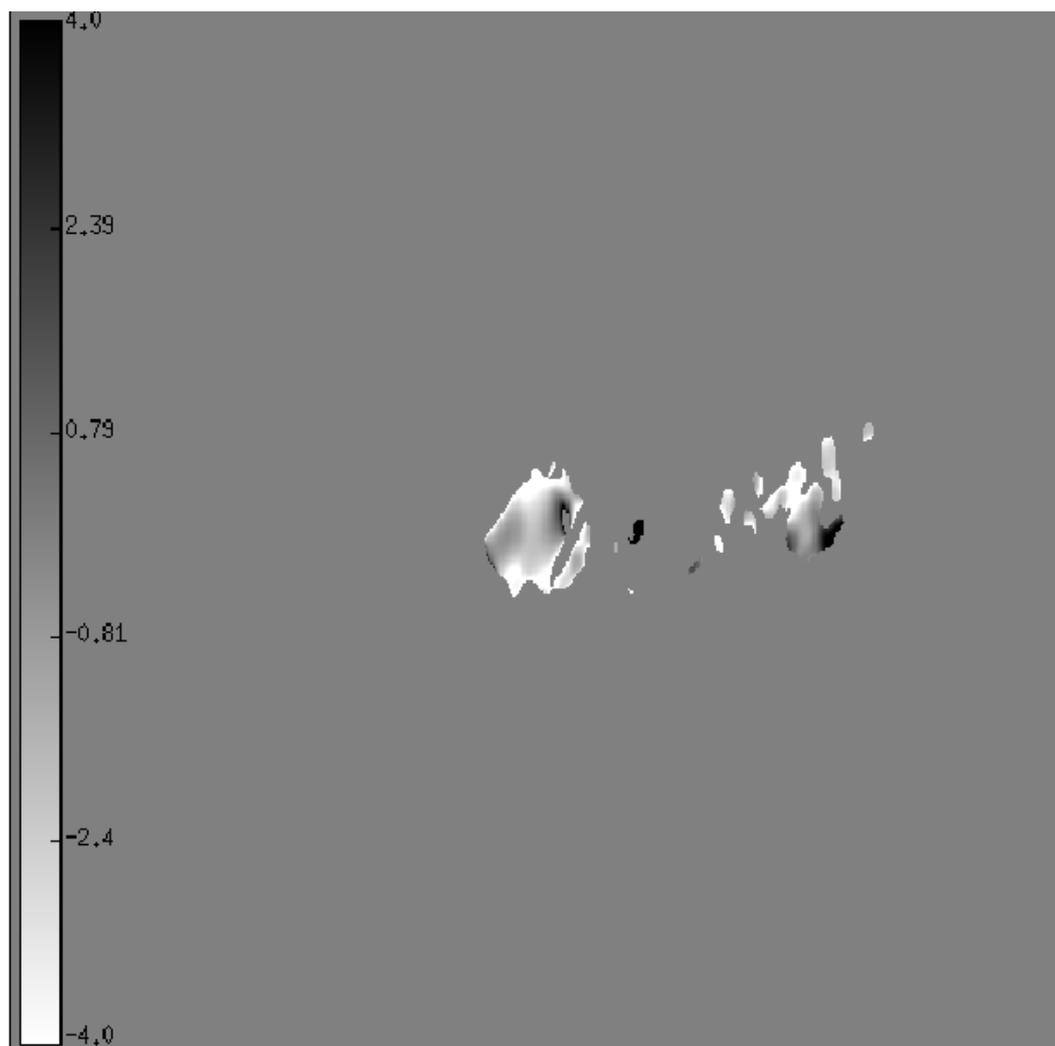


Abbildung F.12:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Oktober 1998

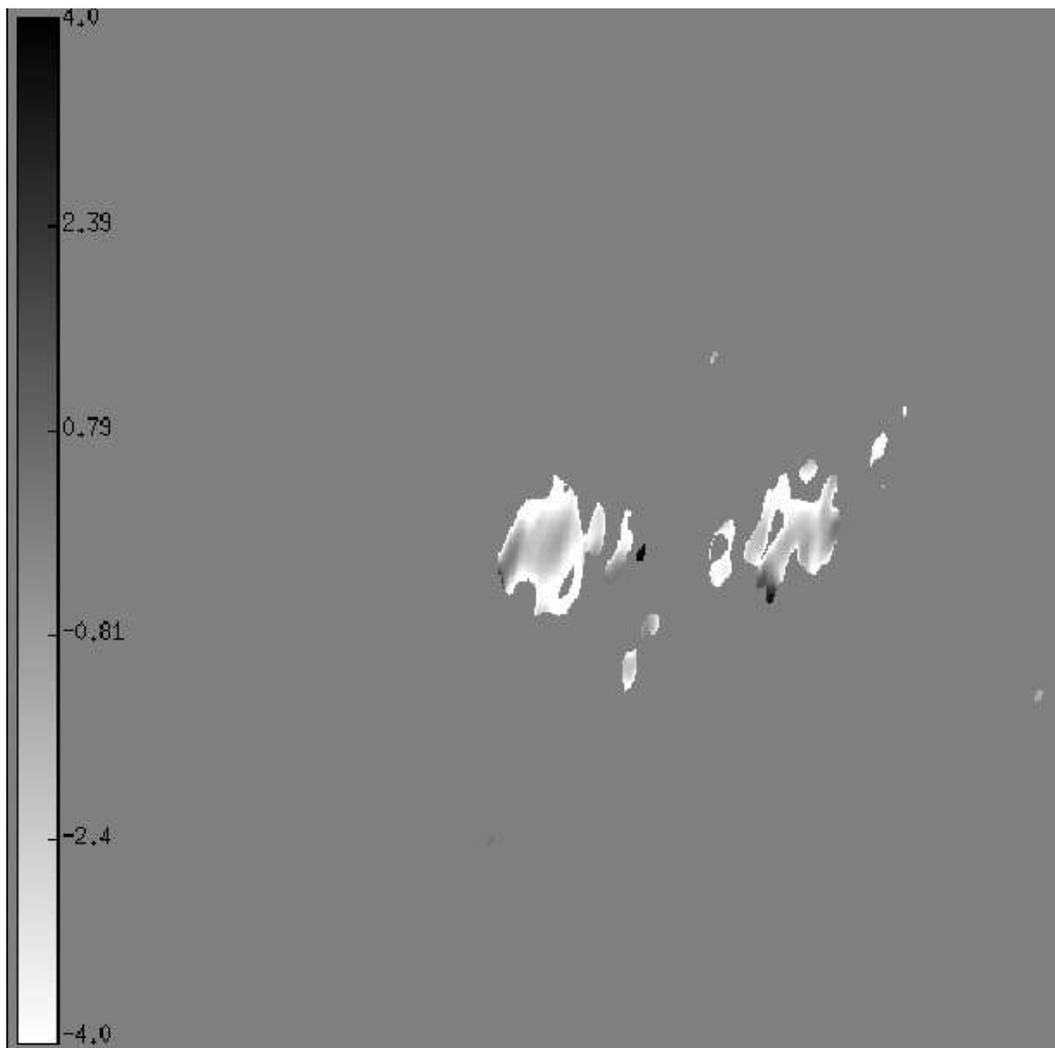


Abbildung F.13:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Dezember 1998

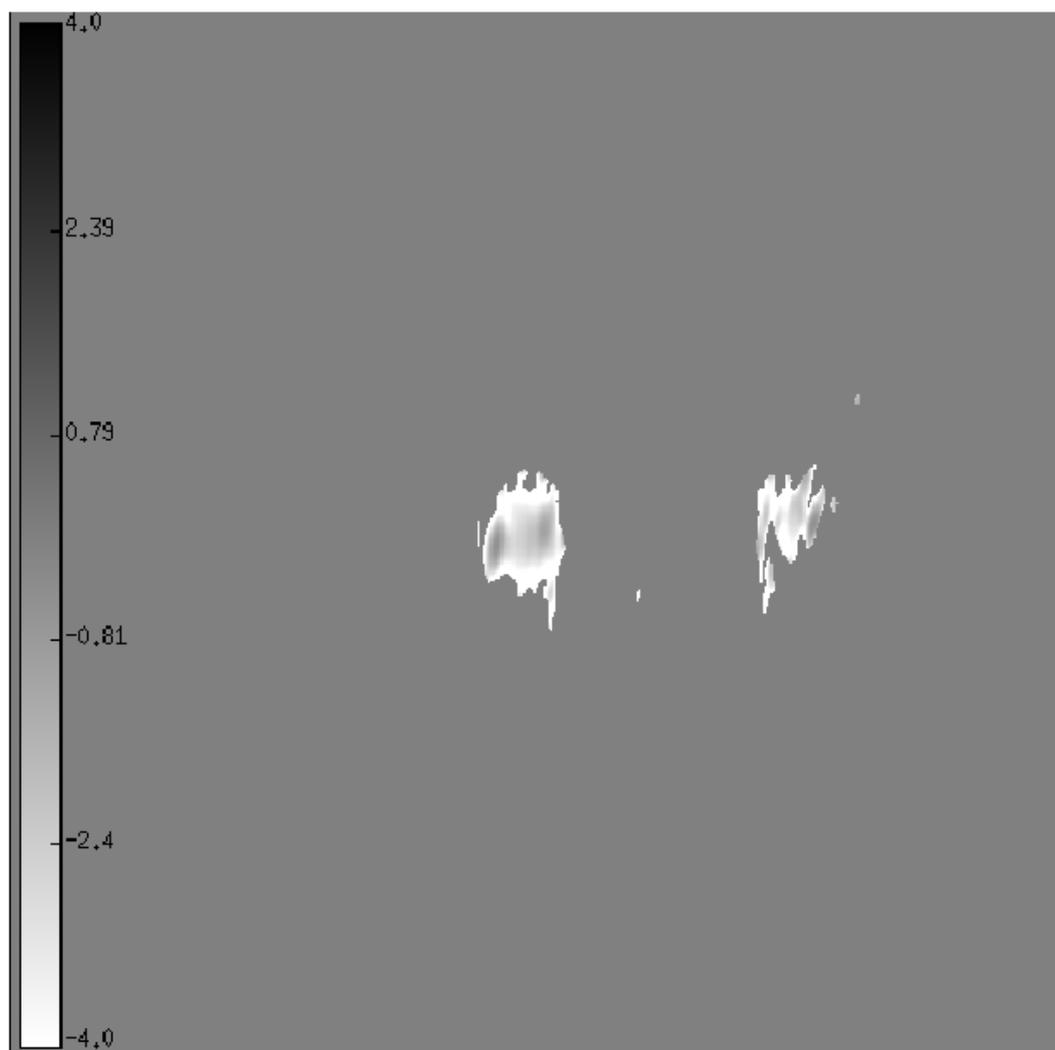


Abbildung F.14:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Januar 1999

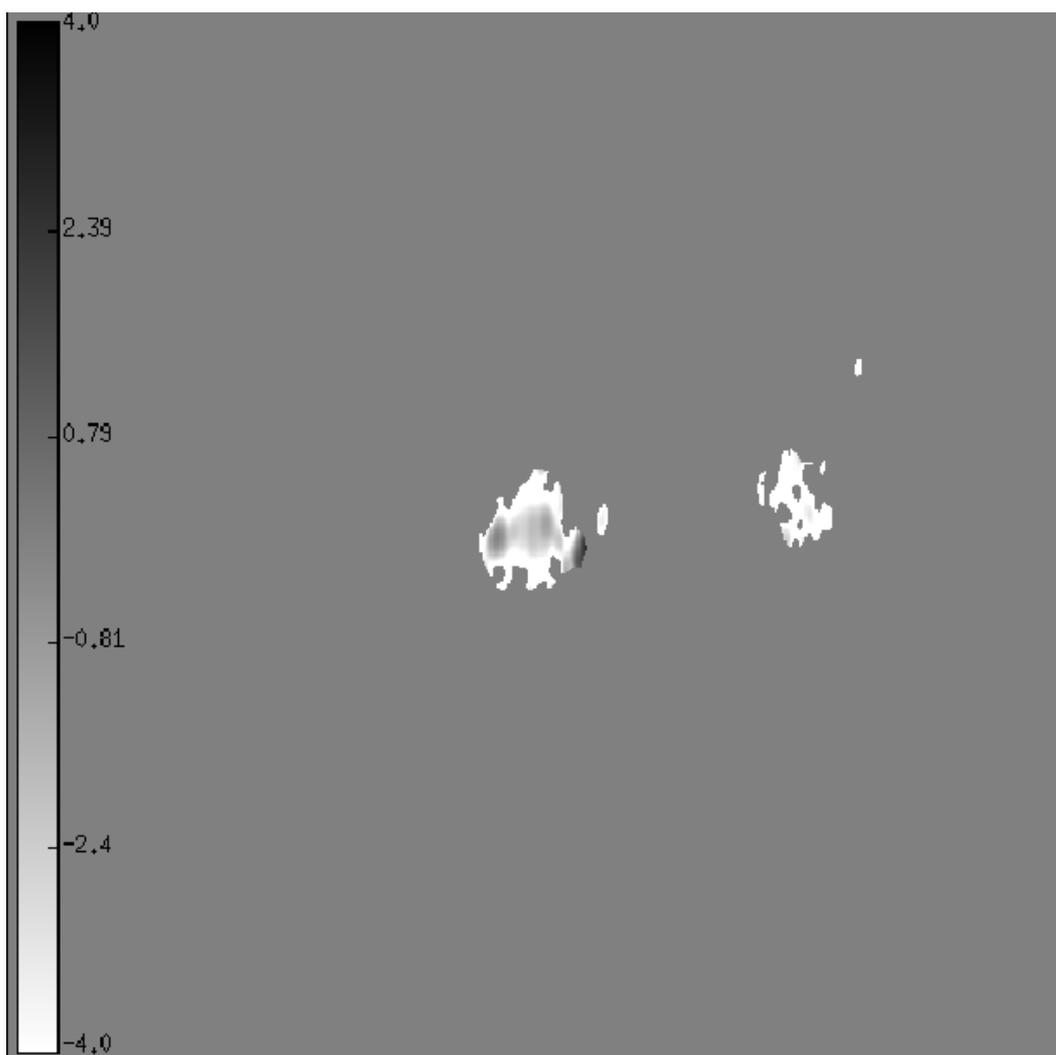


Abbildung F.15:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten vom 10. Februar 1999

Anhang G

Spektralindexkarten von 3C 454.3 aus 22 und 43 GHz

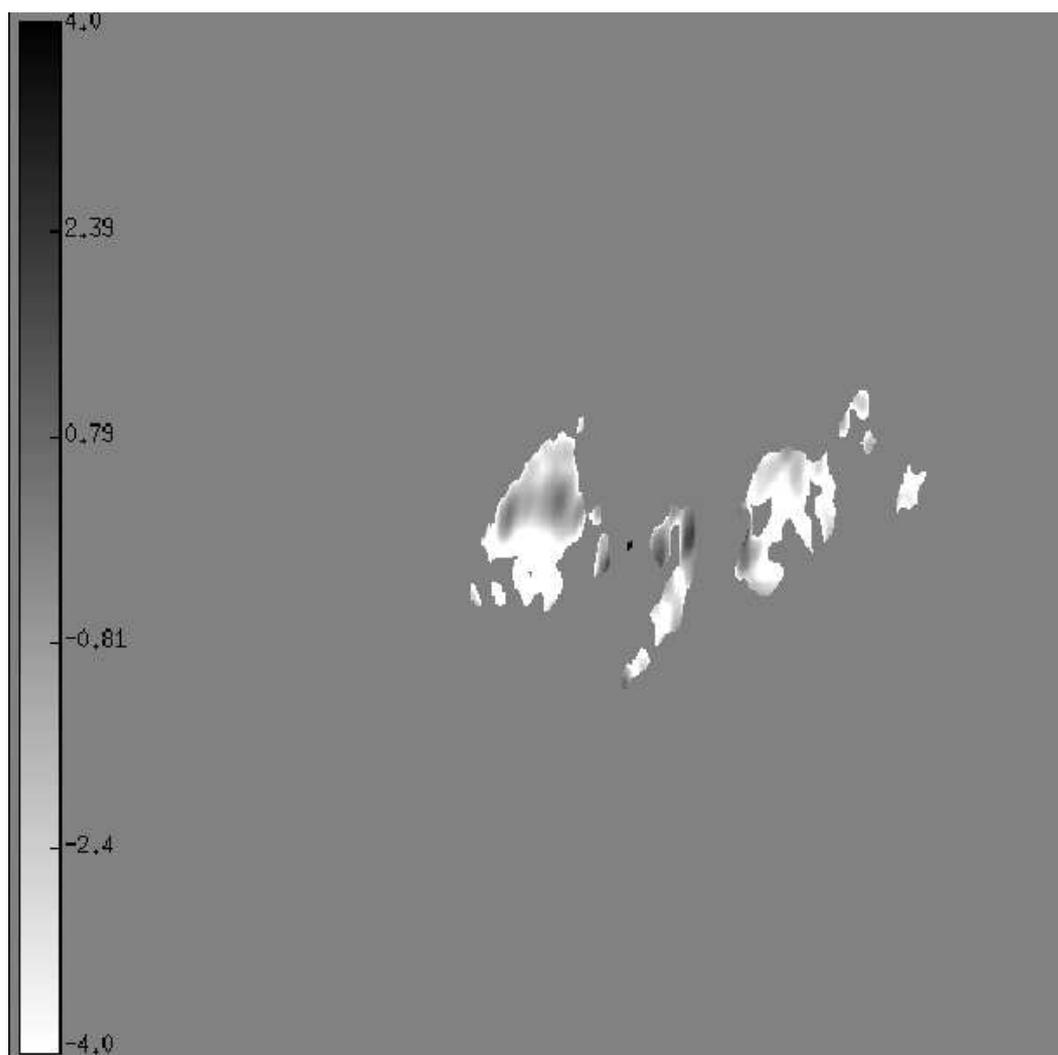


Abbildung G.1:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten vom 27. Februar 1999

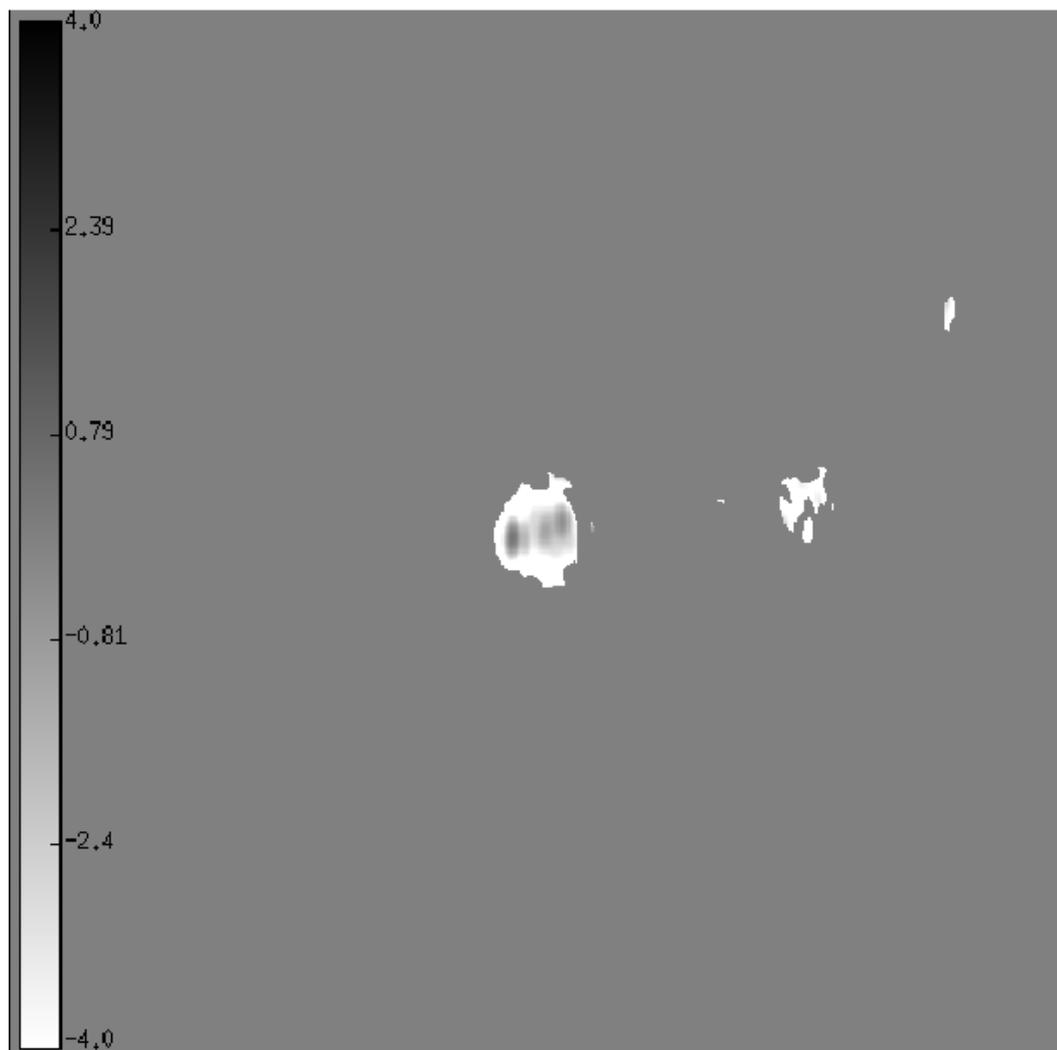


Abbildung G.2:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von März 1999

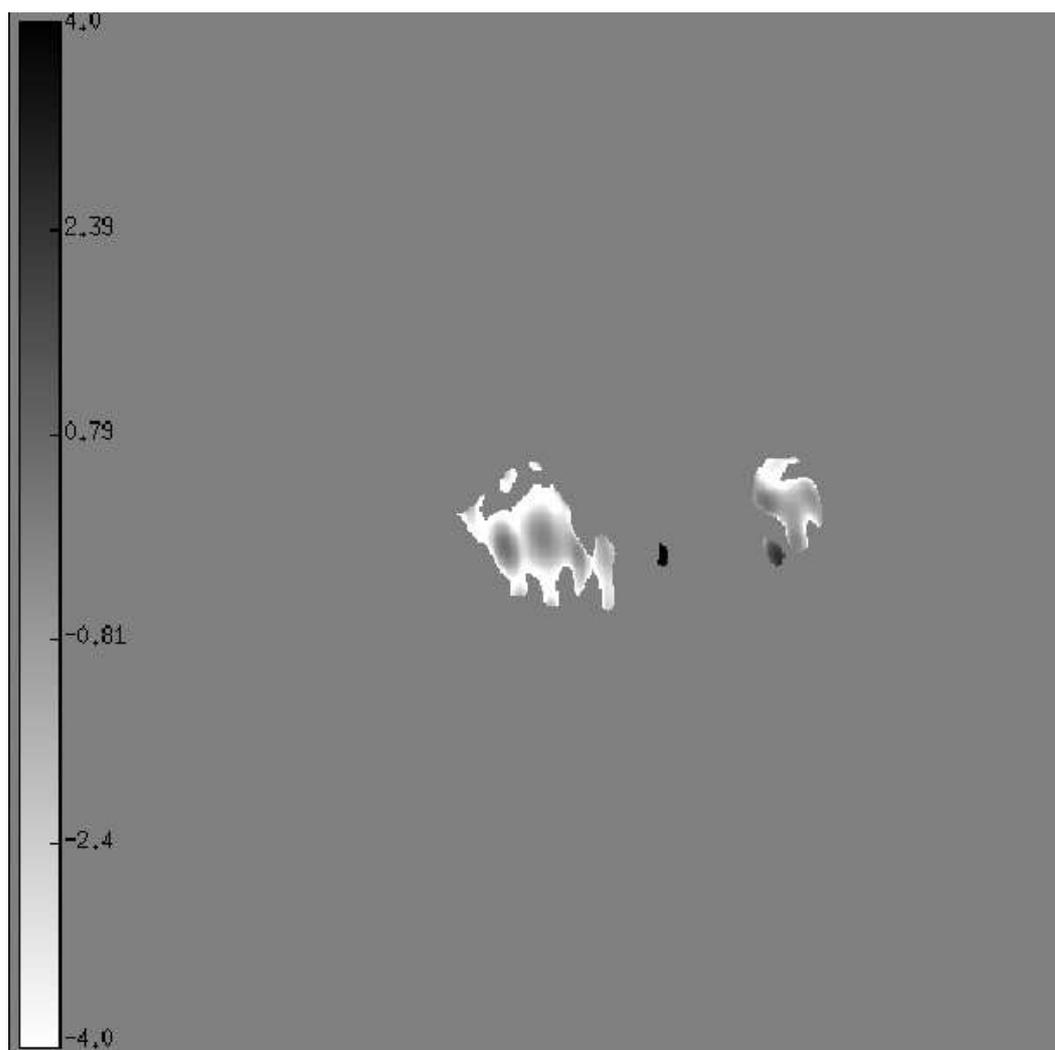


Abbildung G.3:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von September 1999

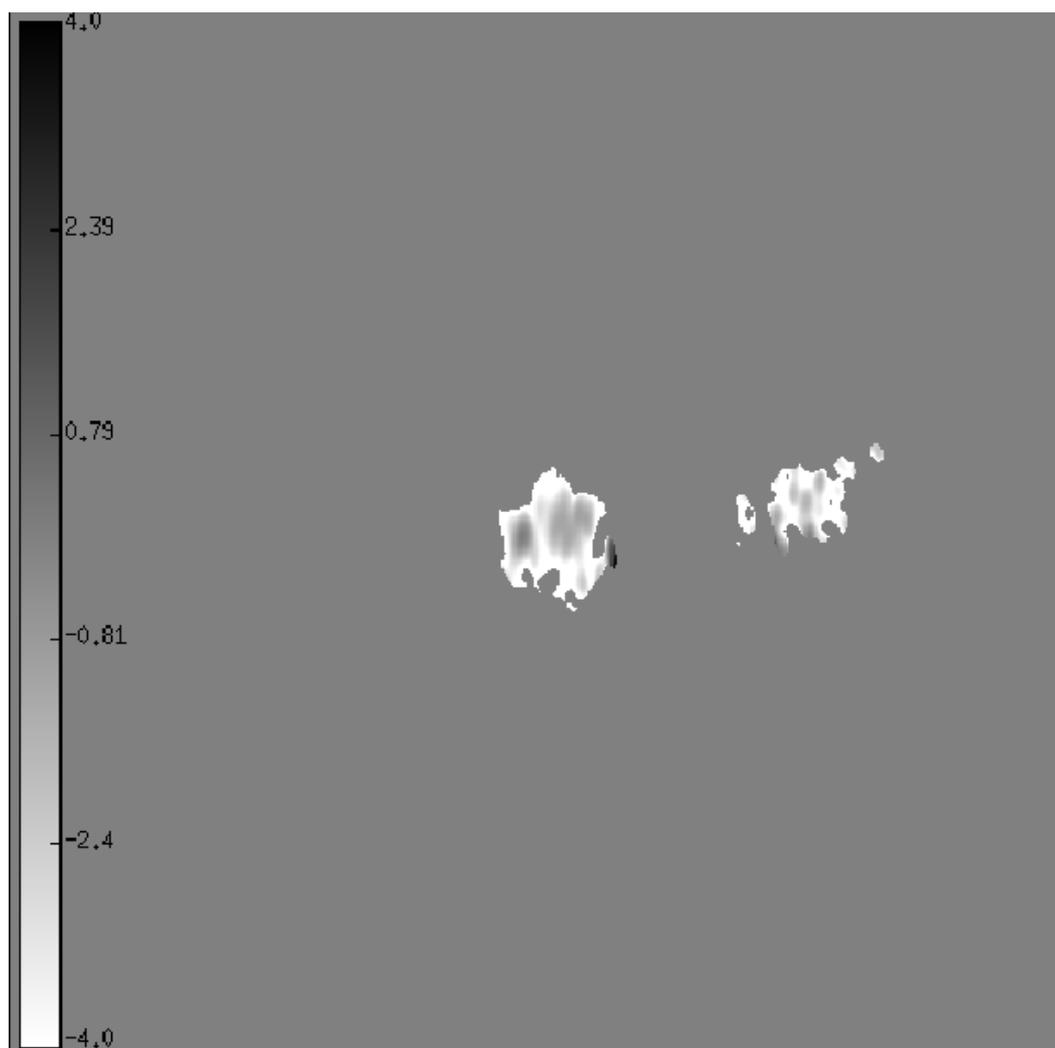


Abbildung G.4:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von November 1999

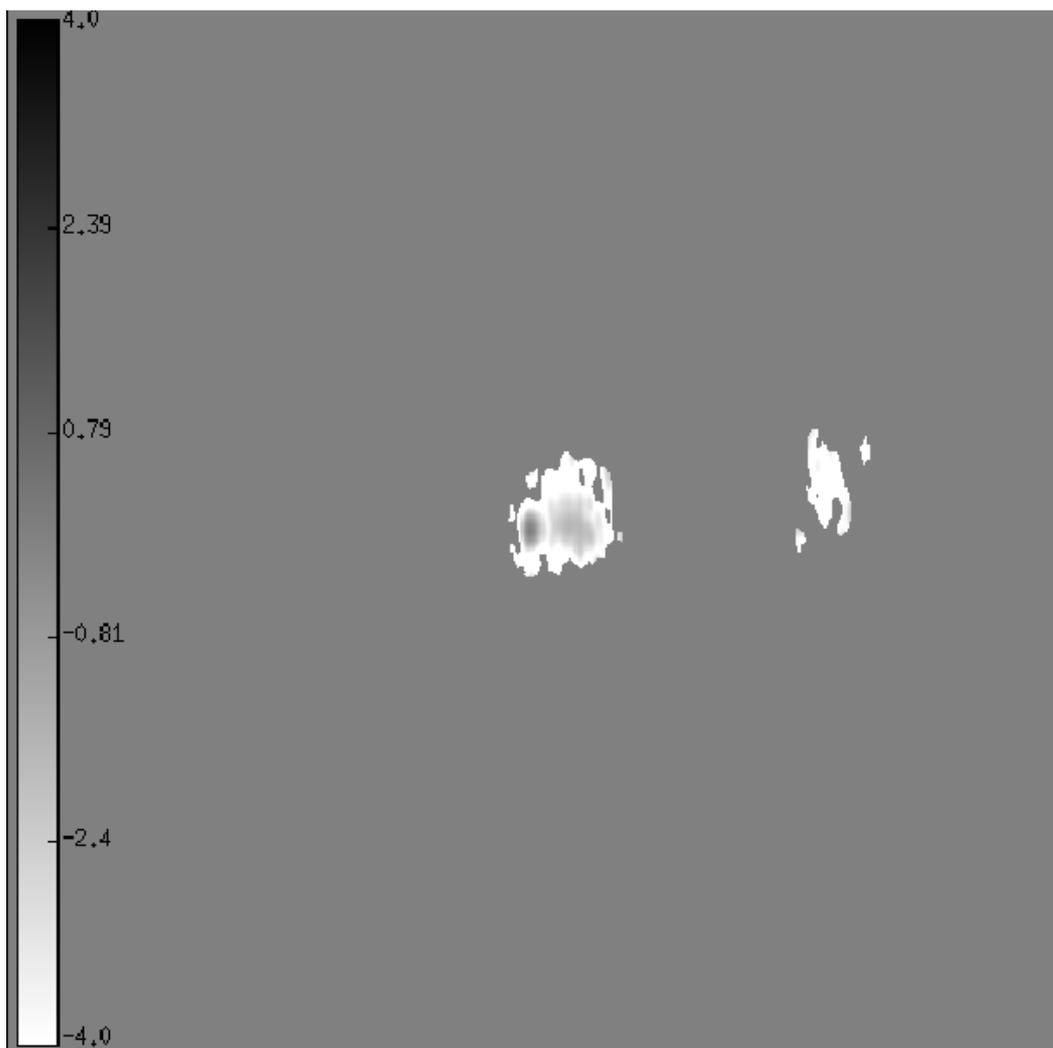


Abbildung G.5:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von Februar 2000

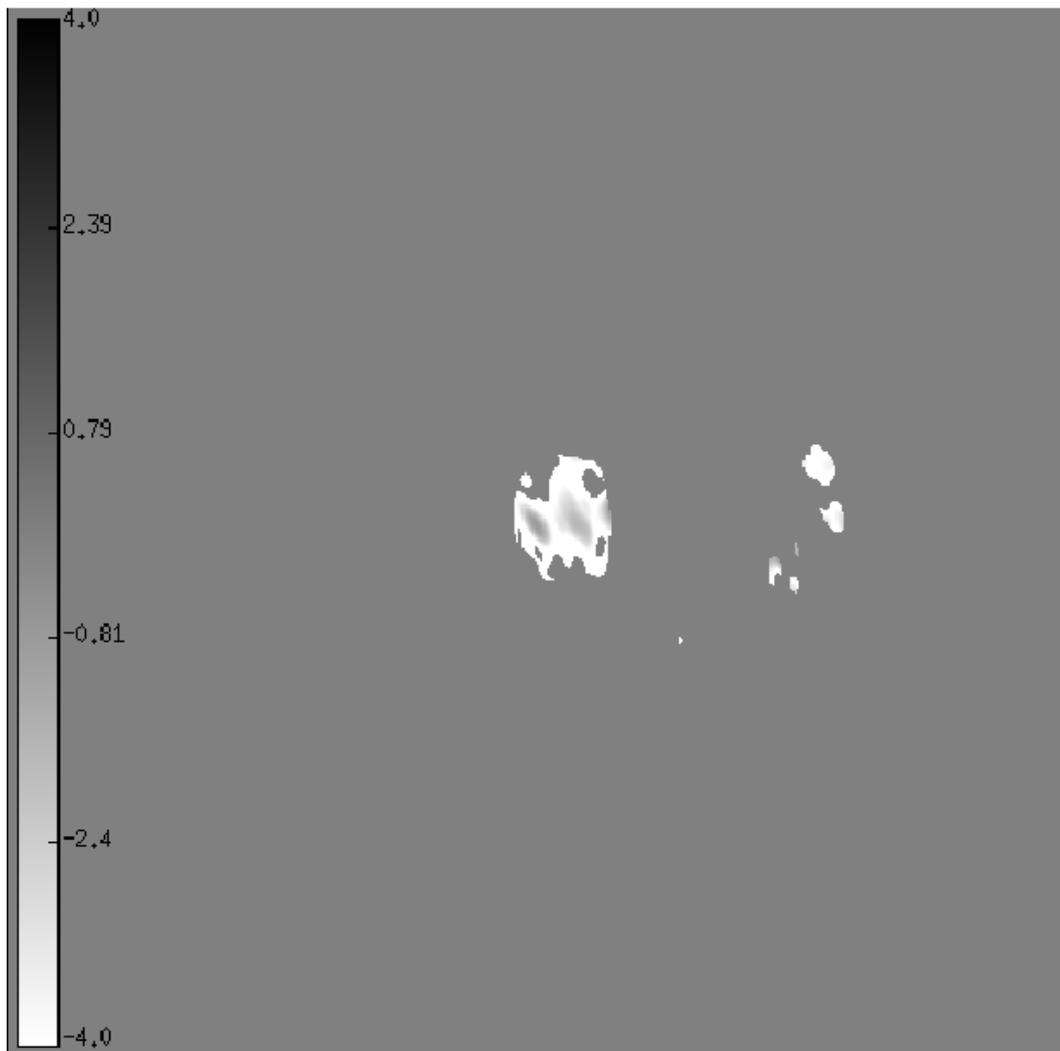


Abbildung G.6:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von März 2000

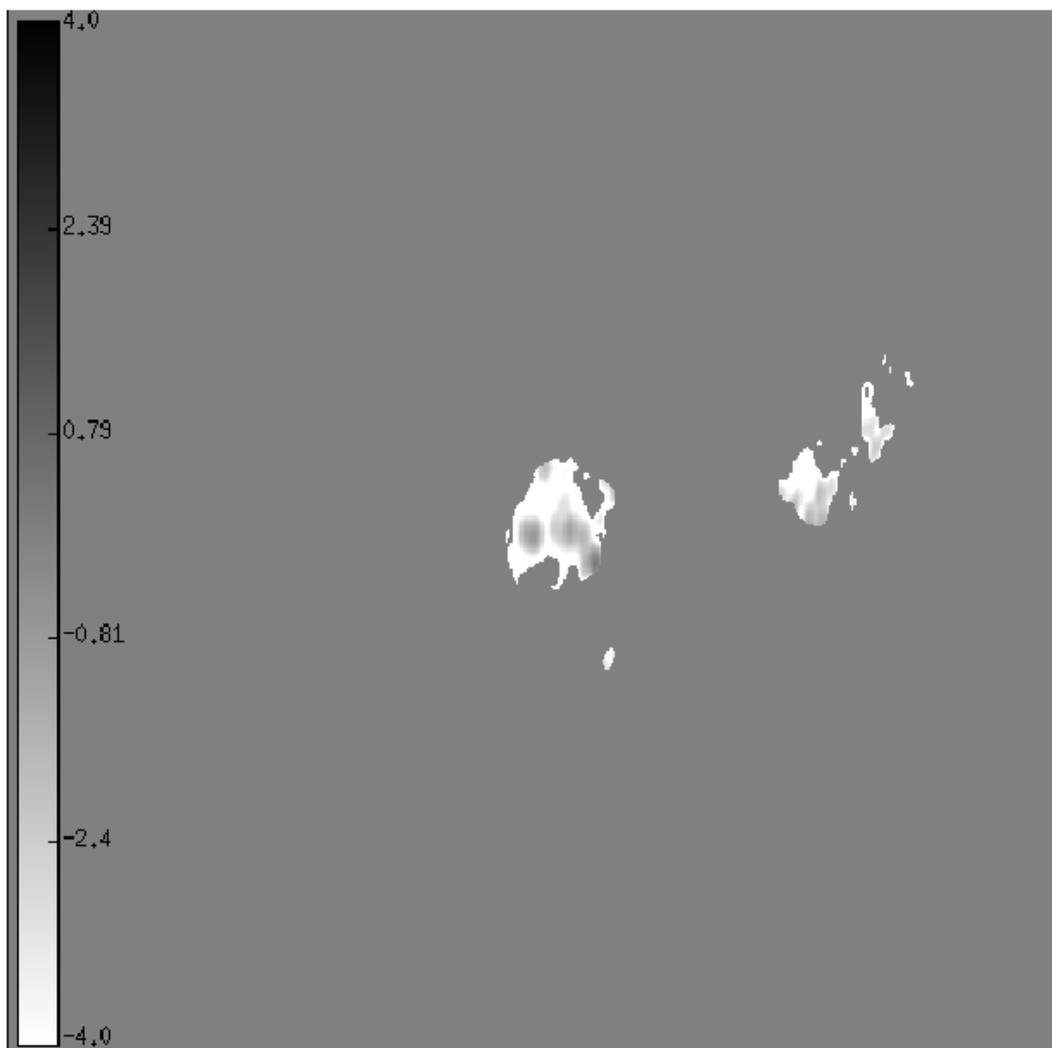


Abbildung G.7:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten vom 3. May 2000

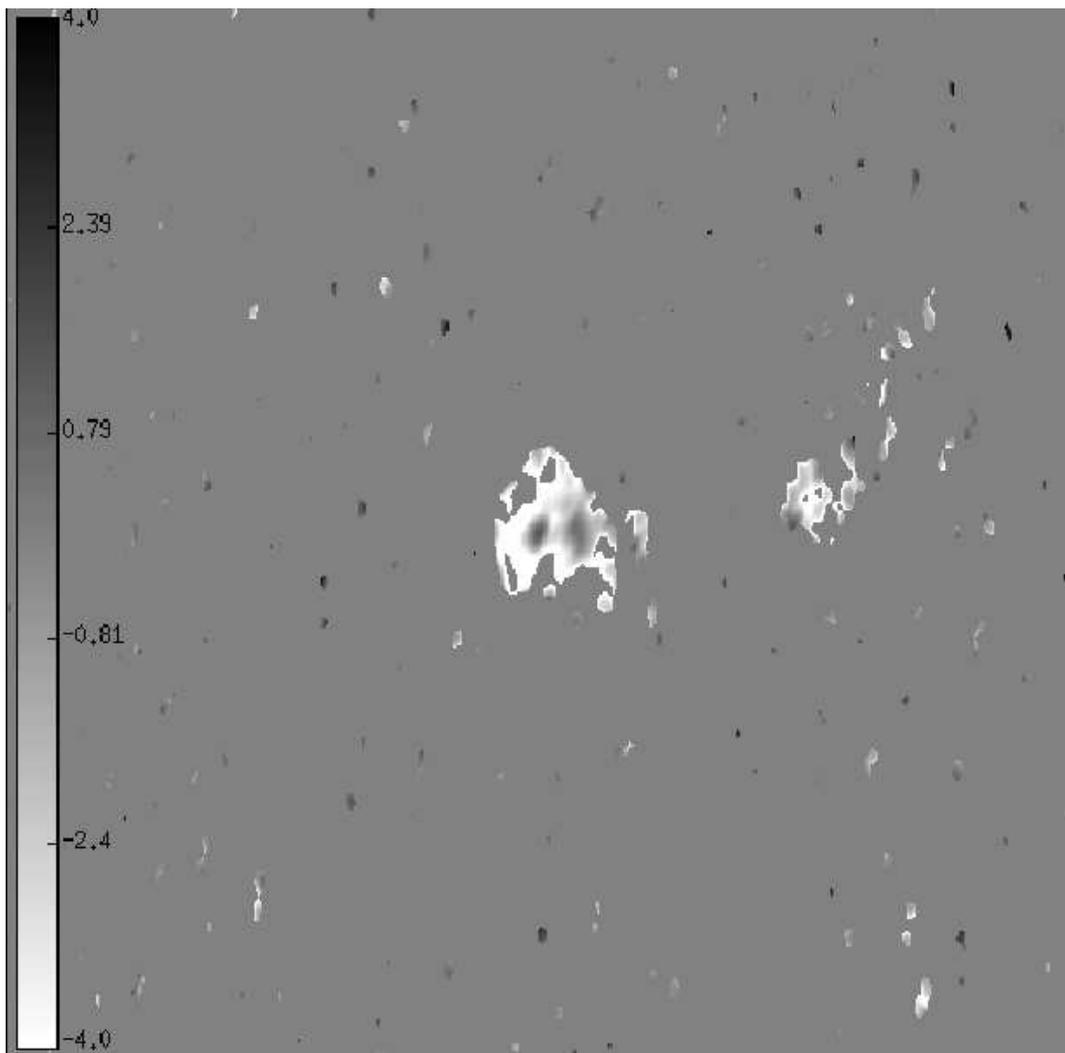


Abbildung G.8:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten vom 20. May 2000

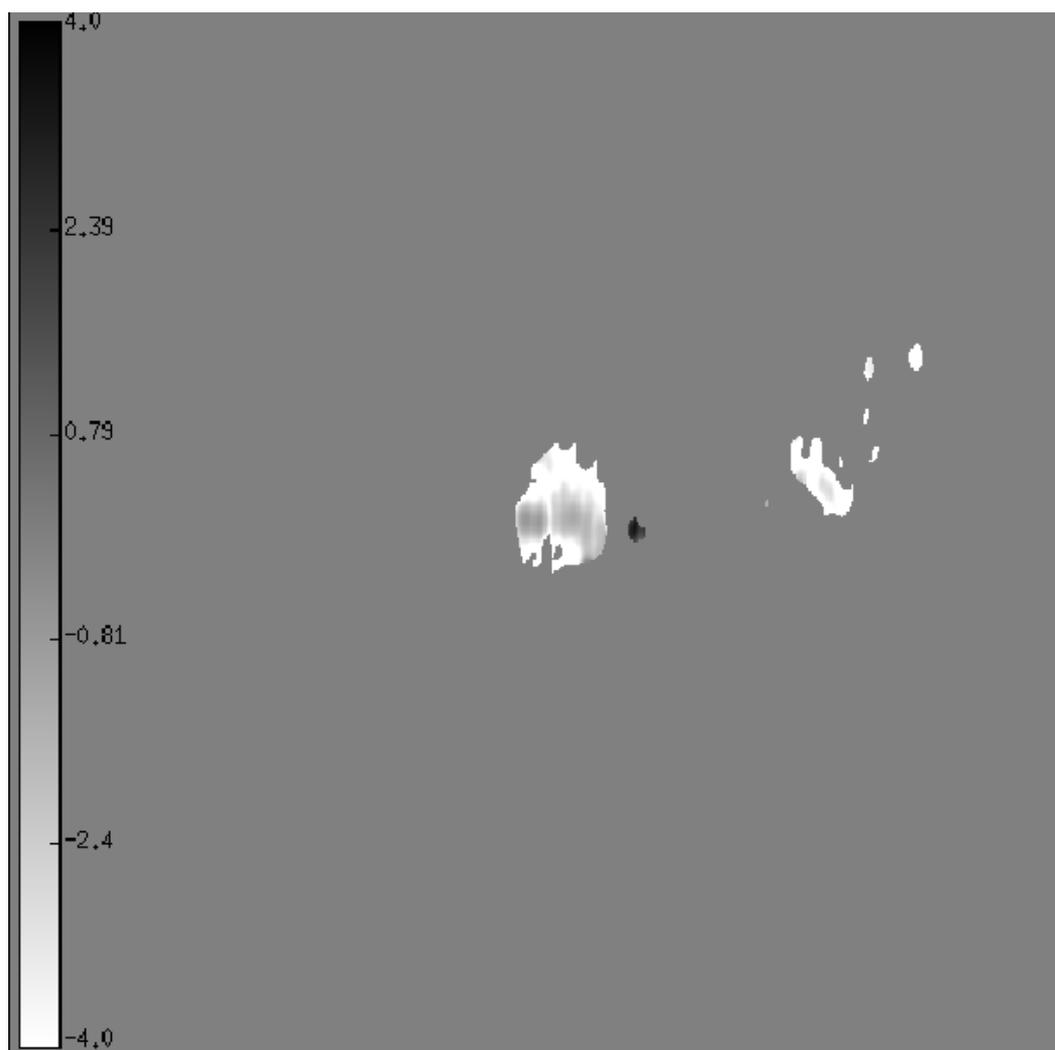


Abbildung G.9:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten vom 9. Juni 2000

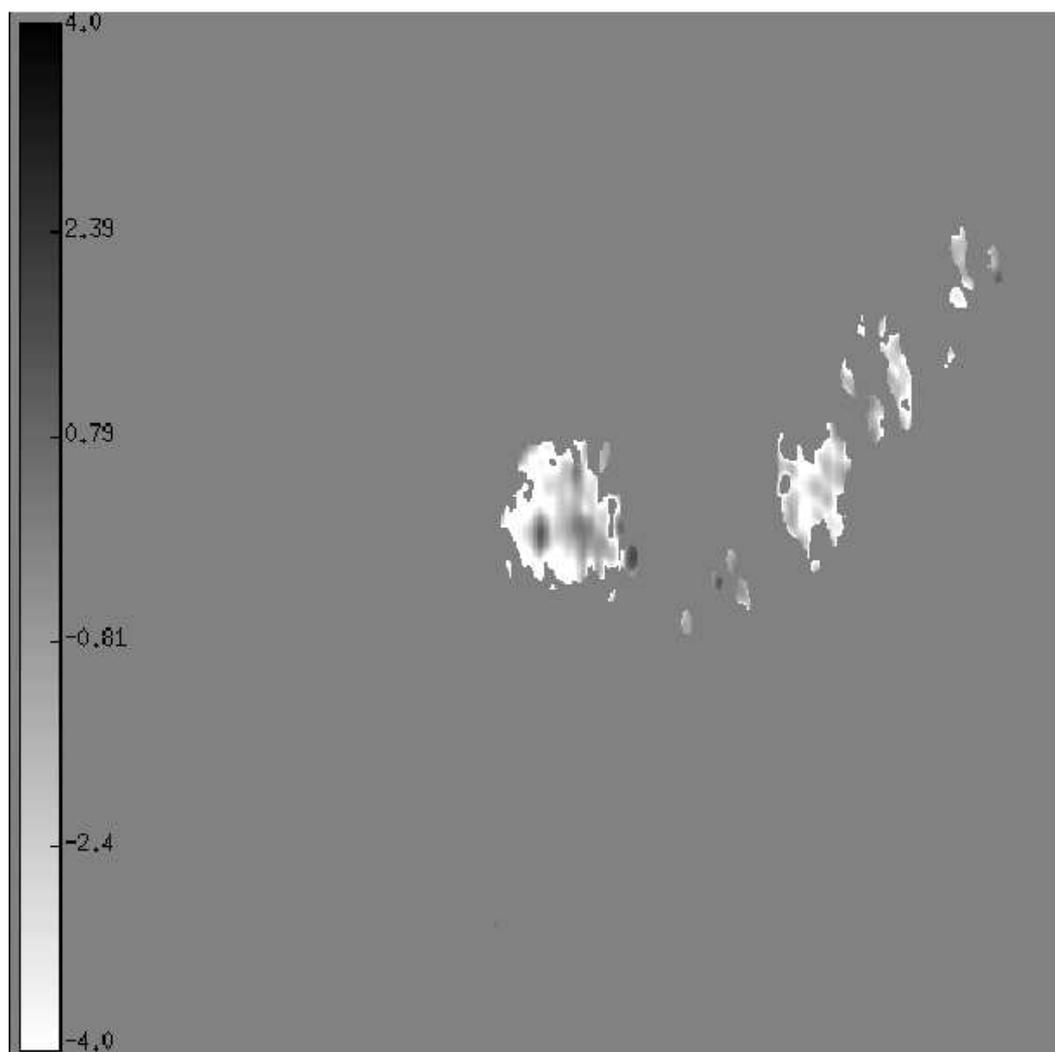


Abbildung G.10:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten vom 30. Juni 2000

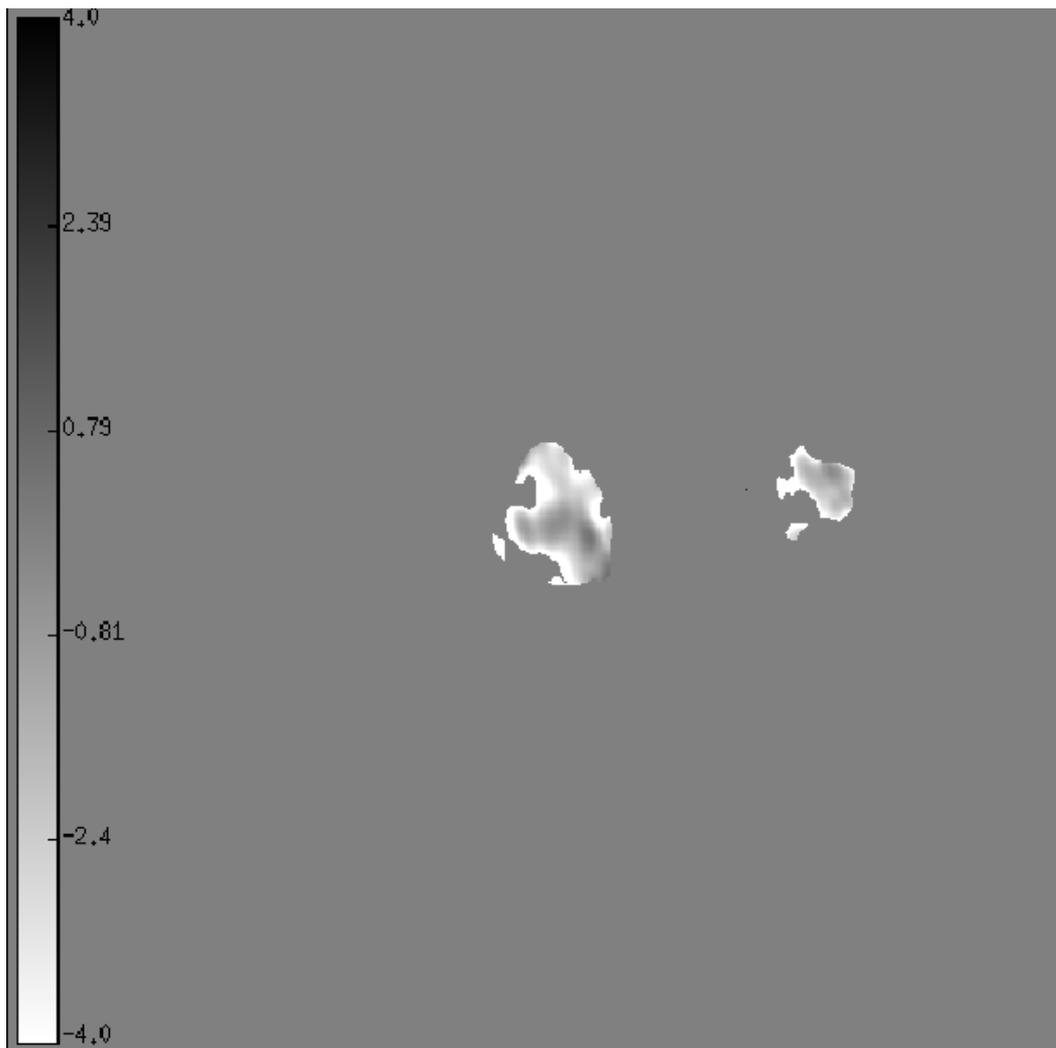


Abbildung G.11:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von November 2000

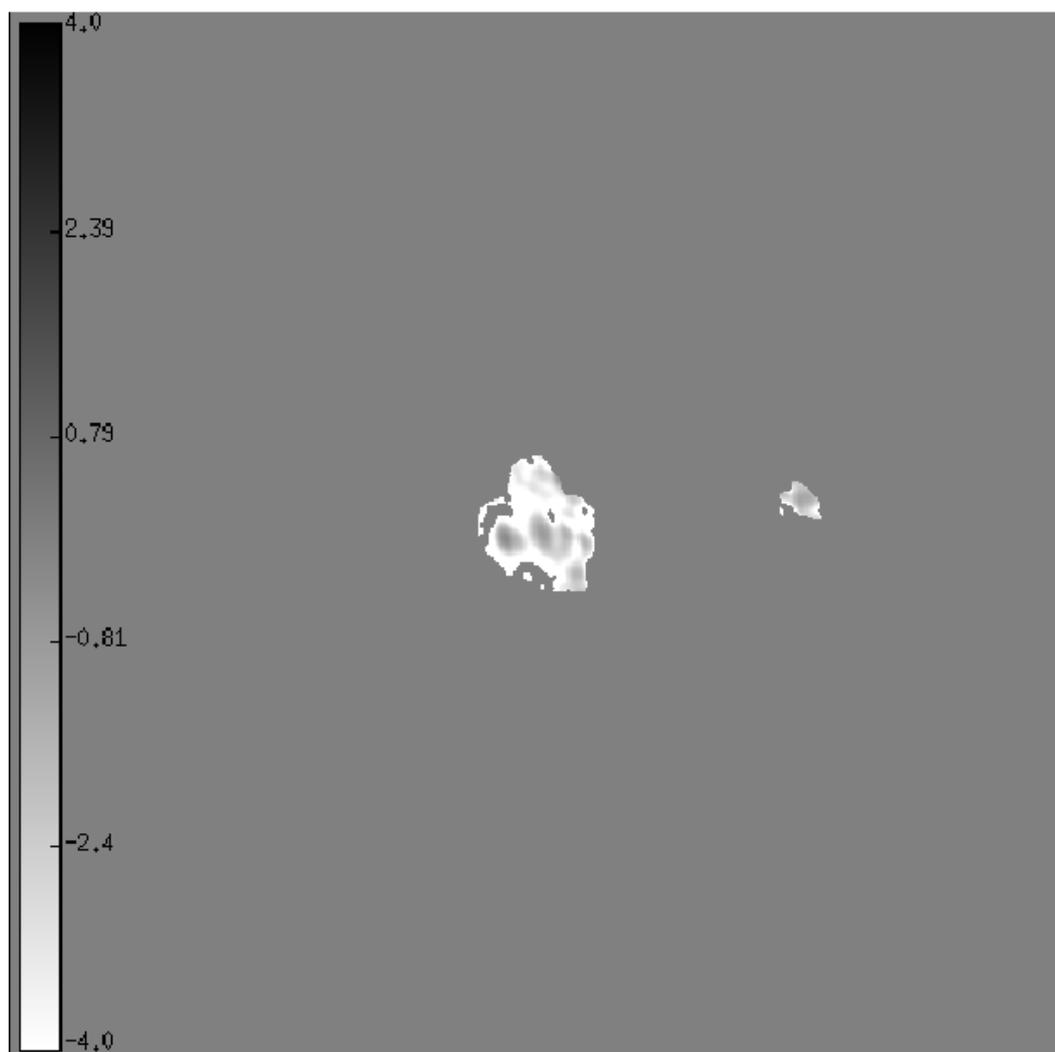


Abbildung G.12:

Spektralindexkarte von 22 und 43 GHz aus den Daten von März 2001

Literaturverzeichnis

- Alberdi, A., Krichbaum, T. P., Graham, D. A., Greve, A., Grewing, M., Marcaide, J. M., Witzel, A., Booth, R. S., Baath, L. B., Colomer, F., Doeleman, S., Marscher, A. P., Rogers, A. E. E., Schalinski, C. J., und Standke, K. (1997). *A&A*, **327**, 513–521.
- Alef, W., Preuss, E., Kellermann, K. I., und Gabuzda, D. (1998). In: *ASP Conf. Ser. 144: IAU Colloq. 164: Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources*, 129–+.
- Antonucci, R. (1993). *ARA&A*, **31**, 473–521.
- Arshakian, T. G. (2005). *A&A*, **436**, 817–824.
- Attridge, J. M., Wardle, J. F. C., und Homan, D. C. (2005). *ApJ*, **633**, L85–L88.
- Bååth, L. B., Rogers, A. E. E., Inoue, M., Padin, S., Wright, M. C. H., Zensus, A., Kus, A. J., Backer, D. C., Booth, R. S., Carlstrom, J. E., Dickman, R. L., Emerson, D. T., Hirabayashi, H., Hodges, M. W., Kobayashi, H., Lamb, J., Moran, J. M., Morimoto, M., Plambeck, R. L., Predmore, C. R., Ronnang, B., und Woody, D. (1992). *A&A*, **257**, 31–46.
- Belsole, E., Sauvageot, J. L., Böhringer, H., Worrall, D. M., Matsushita, K., Mus-hotzky, R. F., Sakelliou, I., Molendi, S., Ehle, M., Kennea, J., Stewart, G., und Vestrand, W. T. (2001). *A&A*, **365**, L188–L194.
- Blandford, R. D. und Znajek, R. L. (1977). *MNRAS*, **179**, 433–456.
- Braatz, J. A., Wilson, A. S., und Henkel, C. (1996). *ApJS*, **106**, 51–+.
- Britzen, S., Witzel, A., Krichbaum, T. P., Campbell, R. M., Wagner, S. J., und Qian, S. J. (2000). *A&A*, **360**, 65–75.

- Britzen, S., Witzel, A., Krichbaum, T. P., Qian, S. J., und Campbell, R. M. (1999). *A&A*, **341**, 418–426.
- Cawthorne, T. V. und Gabuzda, D. C. (1996). *MNRAS*, **278**, 861–868.
- Chen, Y.-J., Jiang, D.-R., und Zhang, F.-J. (2001). *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, **1**, 507–513.
- Cornwell, T. J. (1989). *Science*, **245**, 263–269.
- Denn, G. R., Mutel, R. L., und Marscher, A. P. (2000). *ApJS*, **129**, 61–92.
- Dent, W. A., Odea, C. P., Balonek, T. J., Hobbs, R. W., und Howard, R. J. (1983). *Nature*, **306**, 41–+.
- Dhawan, V., Kellerman, K. I., und Romney, J. D. (1998). *ApJ*, **498**, L111+.
- Dunn, R. J. H., Fabian, A. C., und Sanders, J. S. (2006). *MNRAS*, 150–+.
- Fanaroff, B. L. und Riley, J. M. (1974). *MNRAS*, **167**, 31P–36P.
- Fey, A. L. und Charlot, P. (1997). *ApJS*, **111**, 95–+.
- Forman, W., Nulsen, P., Heinz, S., Owen, F., Eilek, J., Vikhlinin, A., Markevitch, M., Kraft, R., Churazov, E., und Jones, C. (2005). *ApJ*, **635**, 894–906.
- Fuhrmann, L., Cucchiara, A., Marchili, N., Tosti, G., Nucciarelli, G., Ciprini, S., Molinari, E., Chincarini, G., Zerbi, F. M., Covino, S., Pian, E., Meurs, E., Testa, V., Vitali, F., Antonelli, L. A., Conconi, P., Cutispoto, G., Malaspina, G., Nicastro, L., Palazzi, E., und Ward, P. (2006). *A&A*, **445**, L1–L4.
- Goetz, M. M. A., Preuss, E., Alef, W., und Kellermann, K. I. (1987). *A&A*, **176**, 171–174.
- Gómez, J.-L., Marscher, A. P., und Alberdi, A. (1999). *ApJ*, **522**, 74–81.
- Greve, A., Könönen, P., Graham, D. A., Wiik, K., Krichbaum, T. P., Conway, J., Rantakyrö, F., Urpo, S., Grewing, M., Booth, R. S., Zensus, J. A., John, D., Navarro, S., Mujunen, A., Ritakari, J., Peltonen, J., Sjöman, P., Oinaskallio, E., und Berton, M. (2002). *A&A*, **390**, L19–L22.

- Henkel, C., Guesten, R., Downes, D., Thum, C., Wilson, T. L., und Biermann, P. (1984). *A&A*, **141**, L1–L3.
- Homan, D. C. und Wardle, J. F. C. (1999). *AJ*, **118**, 1942–1962.
- Hong, X. Y., Jiang, D. R., Gurvits, L. I., Garrett, M. A., Garrington, S. T., Schilizzi, R. T., Nan, R. D., Hirabayashi, H., Wang, W. H., und Nicolson, G. D. (2004). *A&A*, **417**, 887–904.
- Jorstad, S., Marscher, A., McHardy, I., Markowitz, A., Clements, D., und Janes, K. (2005). *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, **207**, –+.
- Jorstad, S. G., Marscher, A. P., Mattox, J. R., Aller, M. F., Aller, H. D., Wehrle, A. E., und Bloom, S. D. (2001). *ApJ*, **556**, 738–748.
- Kellermann, K. I., Lister, M. L., Homan, D. C., Vermeulen, R. C., Cohen, M. H., Ros, E., Kadler, M., Zensus, J. A., und Kovalev, Y. Y. (2004). *ApJ*, **609**, 539–563.
- Kellermann, K. I., Vermeulen, R. C., Zensus, J. A., und Cohen, M. H. (1998). *AJ*, **115**, 1295–1318.
- Kemball, A. J., Diamond, P. J., und Pauliny-Toth, I. I. K. (1996). *ApJ*, **464**, L55+.
- Krichbaum, T. P., Britzen, S., Standke, K. J., Witzel, A., Schalinski, C. J., und Zensus, J. A. (1995). *Proceedings of the National Academy of Science*, **92**, 11377–11380.
- Lister, M. L. und Homan, D. C. (2005). *AJ*, **130**, 1389–1417.
- Lister, M. L. und Smith, P. S. (2000). *ApJ*, **541**, 66–87.
- Lobanov, A. P. und Roland, J. (2005). *A&A*, **431**, 831–846.
- Marscher, A. P., Moore, E. M., Marchenko, S. G., Gomez, J. L., Marti, J. M., Ibanez, J. M., Bloom, S. D., Wehrle, A. E., und Xu, W. (1997). *Bulletin of the American Astronomical Society*, **29**, 847–+.
- Marshall, H. L., Schwartz, D. A., Lovell, J. E. J., Murphy, D. W., Worrall, D. M., Birkinshaw, M., Gelbord, J. M., Perlman, E. S., und Jauncey, D. L. (2005). *ApJS*, **156**, 13–33.

- Mason, R. E., Geballe, T. R., Packham, C., Levenson, N. A., Elitzur, M., Fisher, R. S., und Perlman, E. (2006). *ApJ*, **640**, 612–624.
- Middelberg, E., Roy, A. L., Walker, R. C., und Falcke, H. (2005). *A&A*, **433**, 897–909.
- Murphy, D. W., Browne, I. W. A., und Perley, R. A. (1993). *MNRAS*, **264**, 298–+.
- Owen, F. N., Eilek, J. A., und Kassim, N. E. (2000). *ApJ*, **543**, 611–619.
- Pagels, A., Krichbaum, T. P., Graham, D. A., Alef, W., Kadler, M., Kraus, A., Klare, A., Witzel, J. A., Zensus, A., Greve, A., Grewing, M., Booth, R., und Conway, J. (2004). In: Bachiller, R., Colomer, F., Desmurs, J.-F., und de Vicente, P.(eds.) *European VLBI Network on New Developments in VLBI Science and Technology*, 7–10.
- Pauliny-Toth, I. I. K. (1998). In: *ASP Conf. Ser. 144: IAU Colloq. 164: Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources*, 75–+.
- Pauliny-Toth, I. I. K., Porcas, R. W., Zensus, J. A., Kellermann, K. I., und Wu, S. Y. (1987). *Nature*, **328**, 778–782.
- Rantakyro, F. T., Baath, L. B., Backer, D. C., Booth, R. S., Carlstrom, J. E., Emerson, D. T., Grewing, M., Hirabayashi, H., Hodges, M. W., Inoue, M., Kobayashi, H., Krichbaum, T. P., Kus, A. J., Moran, J. M., Morimoto, M., Padin, S., Plambeck, R. L., Predmore, R., Rogers, A. E. E., Schalinski, C., Witzel, A., Woody, D., Wright, M. C. H., und Zensus, A. (1998). *A&AS*, **131**, 451–467.
- Readhead, A. C. S., Hough, D. H., Ewing, M. S., Walker, R. C., und Romney, J. D. (1983a). *ApJ*, **265**, 107–131.
- Readhead, A. C. S., Mason, C. R., Mofett, A. T., Pearson, T. J., Seielstad, G. A., Woody, D. P., Backer, D. C., Plambeck, R. L., Welch, W. J., Wright, M. C. H., Rogers, A. E. E., Webber, J. C., Shapiro, I. I., Moran, J. M., Goldsmith, P. F., Predmore, C. R., Baath, L., und Romang, B. (1983b). *Nature*, **303**, 504–506.
- Roberts, D. H., Gabuzda, D. C., und Wardle, J. F. C. (1987). *ApJ*, **323**, 536–542.
- Rottmann, H., Mack, K.-H., Klein, U., und Wielebinski, R. (1996). *A&A*, **309**, L19–L22.

- Siebenmorgen, R., Haas, M., Krügel, E., und Schulz, B. (2005). *A&A*, **436**, L5–L8.
- Sillanpaa, A., Haarala, S., Valtonen, M. J., Sundlius, B., und Byrd, G. G. (1988). *ApJ*, **325**, 628–634.
- Teräsranata, H., Achren, J., Hanski, M., Heikkilä, J., Holopainen, J., Joutsamo, O., Juhola, M., Karlamaa, K., Katajainen, S., Keinänen, P., Koivisto, P., Koskimies, M., Könönen, P., Lainela, M., Lähtenmäki, A., Mäkinen, K., Niemelä, T., Nurmi, P., Pursimo, T., Rekola, R., Savolainen, T., Tornikoski, M., Torppa, J., Valtonen, T., Varjonen, N., Vilenius, E., Virtanen, J., und Wiren, S. (2004). *A&A*, **427**, 769–771.
- Urry, C. M. und Padovani, P. (1995). *PASP*, **107**, 803–+.
- Vermeulen, R. C., Readhead, A. C. S., und Backer, D. C. (1994). *ApJ*, **430**, L41–L44.
- Villata, M., Raiteri, C. M., Balonek, T. J., und for the WEBT collaboration (2006). *The unprecedented optical outburst of the quasar 3C 454.3. The WEBT campaign of 2004-2005*.
- Walker, R. C. und Anantharamaiah, K. R. (2003). *AJ*, **125**, 1756–1761.
- Wiik, K., Valtaoja, E., und Leppänen, K. (2001). *A&A*, **380**, 72–80.
- Yu, Q., Lu, Y., und Kauffmann, G. (2005). *ApJ*, **634**, 901–909.
- Zhang, S., Collmar, W., und Schönfelder, V. (2005). *A&A*, **444**, 767–775.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Standardmodell AGN	2
2.1	Prinzip eines Zwei-Elemente-Interferometers	9
3.1	18 cm Beobachtung von 0234+285	23
3.2	2 cm Beobachtung von 0234+285	24
3.3	3 mm Beobachtungen von 0234+285	25
3.4	15 GHz Beobachtungen von 3C 84	27
3.5	86 GHz Beobachtungen von 3C 84	29
3.6	Modellkomponenten von 3C 84	32
3.7	86 GHz Beobachtungen von NRAO 150	34
3.8	86 GHz Beobachtungen von 3C111	36
3.9	86 GHz Beobachtung von 0420-014	39
3.10	86 GHz Beobachtung von 0528+143	43
3.11	Konversionskurve Winkelausdehnung gegen Rotverschiebung	44
3.12	86 GHz Beobachtung von 0607-157	46
3.13	86 GHz Beobachtung von 0827+243	48
3.14	86 GHz Beobachtung von OJ287	50
3.15	86 GHz Beobachtungen von 4C 39.25 im Dezember 1994	52

3.16	86 GHz Beobachtungen von 4C 39.25 im Januar 1996	53
3.17	86 GHz Beobachtungen von 4C 39.25 im Oktober 1996	53
3.18	86 GHz Beobachtung von 1156+295	55
3.19	86 GHz Beobachtung von 3C 273B	57
3.20	86 GHz Beobachtung von 3C274	59
3.21	86 GHz Beobachtung von 3C274 : Sketch	59
3.22	86 GHz Beobachtung von 1546+027	61
3.23	86 GHz Beobachtung von 1611+343	63
3.24	86 GHz Beobachtung von 1633+38	65
3.25	86 GHz Beobachtung von 3C345	67
3.26	86 GHz Beobachtungen von NRAO530	70
3.27	86 GHz Beobachtung von 1749+096	72
3.28	86 GHz Beobachtung von 2145+067	73
3.29	86 GHz Beobachtungen von BL Lac	76
3.30	86 GHz Beobachtung von 2201+315	78
3.31	86 GHz Beobachtungen von CTA 102	80
4.1	Lichtkurven von 3C 454.3 in den Frequenzen 90, 150 und 230 GHz . . .	87
4.2	Lichtkurven von 3C 454.3 in den Frequenzen 22, 37 und 90 GHz . . .	88
4.3	Verhältnis der Flussdichten 22 zu 37, 150 zu 230 GHz	90
4.4	Verhältnis der Flussdichten 22 zu 37, 150 zu 230 GHz	91
4.5	Vergleich Flussdichte- und Spektralindexverlauf	92
4.6	Quellstruktur von 3C 454.3 bei 22 GHz	95
4.7	Struktur von 3C 454.3 bei 43 GHz	97
4.8	Struktur von 3C 454.3 bei 43 GHz	98

4.9	Kernflussdichten bei 22 und 43 GHz	108
4.10	3C454.3 bei 43 und 86 GHz	109
4.11	Quellstruktur von 3C 454.3 bei 86 GHz zwischen 1994 und 1999 . . .	110
4.12	Overlay <i>Chandra</i> -VLA	111
4.13	<i>Chandra</i> -Beobachtungen von 3C454.3	112
4.14	Röntgenspektrum aufgenommen von <i>Chandra</i>	113
A.1	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im November 1997	116
A.2	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Dezember 1997	116
A.3	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Januar 1998	117
A.4	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Februar 1998	117
A.5	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im März 1998	118
A.6	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im April 1998	118
A.7	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Mai 1998	119
A.8	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Juni 1998	119
A.9	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Juli 1998	120
A.10	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im August 1998	120
A.11	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im September 1998	121
A.12	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Oktober 1998	121
A.13	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Dezember 1998	122
A.14	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Januar 1999	122
A.15	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 10. Februar 1999	123
B.1	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 27. Februar 1999	125
B.2	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im März 1999	126
B.3	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im September 1999	126

B.4	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im November 1999	127
B.5	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im Februar 2000	127
B.6	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im März 2000	128
B.7	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 3. May 2000	128
B.8	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 20. May 2000	129
B.9	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 9. Juni 2000	129
B.10	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 am 30. Juni 2000	130
B.11	Beobachtung bei 22 GHz von 3C 454.3 im November 2000	130
C.1	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Mai 1996	131
C.2	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im November 1996	132
C.3	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Juli 1997	132
C.4	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im November 1997	133
C.5	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Dezember 1997	133
C.6	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Januar 1998	134
C.7	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Februar 1998	134
C.8	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im März 1998	135
C.9	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im April 1998	135
C.10	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Mai 1998	136
C.11	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Juni 1998	136
C.12	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Juli 1998	137
C.13	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im August 1998	137
C.14	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im September 1998	138
C.15	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Oktober 1998	138
C.16	Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Dezember 1998	139

C.17 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Januar 1999	139
C.18 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 10. Februar 1999	140
D.1 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 27. Februar 1999	141
D.2 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im März 1999	142
D.3 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im April 1999	142
D.4 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im September 1999	143
D.5 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im November 1999	143
D.6 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im Februar 2000	144
D.7 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im März 2000	144
D.8 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 3. May 2000	145
D.9 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 20. May 2000	145
D.10 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 9. Juni 2000	146
D.11 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 am 30. Juni 2000	146
D.12 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im November 2000	147
D.13 Beobachtung bei 43 GHz von 3C 454.3 im März 2001	147
E.1 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im April 1993	150
E.2 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Januar 1994	151
E.3 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Dezember 1994	152
E.4 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Januar 1996	153
E.5 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Oktober 1996	154
E.6 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im April 1997	155
E.7 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Oktober 1997	156
E.8 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im April 1999	157
E.9 3 mm Beobachtung von 3C 454.3 im Oktober 1999	158

F.1	Spektralindexkarte November 1997	160
F.2	Spektralindexkarte Dezember 1997	161
F.3	Spektralindexkarte Januar 1998	162
F.4	Spektralindexkarte Februar 1998	163
F.5	Spektralindexkarte März 1998	164
F.6	Spektralindexkarte April 1998	165
F.7	Spektralindexkarte Mai 1998	166
F.8	Spektralindexkarte Juni 1998	167
F.9	Spektralindexkarte Juli 1998	168
F.10	Spektralindexkarte August 1998	169
F.11	Spektralindexkarte September 1998	170
F.12	Spektralindexkarte Oktober 1998	171
F.13	Spektralindexkarte Dezember 1998	172
F.14	Spektralindexkarte Januar 1999	173
F.15	Spektralindexkarte 10. Februar 1999	174
G.1	Spektralindexkarte 27. Februar 1999	176
G.2	Spektralindexkarte März 1999	177
G.3	Spektralindexkarte September 1999	178
G.4	Spektralindexkarte November 1999	179
G.5	Spektralindexkarte Februar 2000	180
G.6	Spektralindexkarte März 2000	181
G.7	Spektralindexkarte 3. May 2000	182
G.8	Spektralindexkarte 20. May 2000	183
G.9	Spektralindexkarte 9. Juni 2000	184

G.10 Spektralindexkarte 30. Juni 2000	185
G.11 Spektralindexkarte November 2000	186
G.12 Spektralindexkarte März 2001	187

Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften der CMVA-Antennen	12
2.2	Eigenschaften der GMVA-Antennen	14
3.1	Analysierte Quellen bei 86 GHz.	18
3.2	Epochen bei 86 GHz	19
3.3	Nichtdetektierte Quellen bei 86 GHz	20
3.4	Punktquellen-Flussdichte bei 86 GHz	21
3.5	Eigenschaften der Komponenten der Quelle 0234+285 bei 86 GHz	22
3.6	Eigenschaften des Kerns der Quelle NRAO 150 bei 86 GHz	33
3.7	Modellkomponenten der Quelle NRAO 150 bei 86 GHz	34
3.8	Eigenschaften des Kerns der Quelle 3C 111 bei 86 GHz.	36
3.9	Modellkomponenten der Quelle 3C 111 bei 86 GHz.	37
3.10	Eigenschaften des Kerns der Quelle 0420-014 bei 86 GHz	38
3.11	Modellkomponenten der Quelle 0420-014 bei 86 GHz	40
3.12	Eigenschaften des Kerns der Quelle 0528+143 bei 86 GHz	41
3.13	Modellkomponenten der Quelle 0528+143 bei 86 GHz	42
3.14	Eigenschaften des Kerns der Quelle 0607-157 bei 86 GHz	45
3.15	Eigenschaften der Komponenten der Quelle 0827+243 bei 86 GHz.	47
3.16	Eigenschaften des Kerns der Quelle OJ 287 bei 86 GHz	51

3.17	Eigenschaften des Kerns der Quelle 4C 39.25 bei 86 GHz	52
3.18	Eigenschaften der Komponenten der Quelle 1156+295 bei 86 GHz. . .	54
3.19	Eigenschaften des Kern der Quelle 3C 273B bei 86 GHz	55
3.20	Eigenschaften der Modellkomponenten der Quelle 3C 273B bei 86 GHz	56
3.21	Eigenschaften des Kerns der Quelle 3C 274 bei 86 GHz.	58
3.22	Eigenschaften der Komponenten der Quelle 1546+027 bei 86 GHz. . .	60
3.23	Eigenschaften des Kerns der Quelle 1611+343 bei 86 GHz	62
3.24	Eigenschaften der Komponenten der Quelle 1611+343 bei 86 GHz . .	63
3.25	Eigenschaften des Kerns der Quelle 1633+38 bei 86 GHz	64
3.26	Eigenschaften der Modellkomponenten der Quelle 1633+38 bei 86 GHz	64
3.27	Eigenschaften des Kerns der Quelle 3C 345 bei 86 GHz	68
3.28	Eigenschaften des Kerns der Quelle NRAO 530 bei 86 GHz	69
3.29	Eigenschaften der Komponenten der Quelle 1749+076 bei 86 GHz. . .	71
3.30	Eigenschaften des Kerns der Quelle 2145+067 bei 86 GHz	72
3.31	Eigenschaften der Komponenten der Quelle 2145+067 bei 86 GHz . .	73
3.32	Eigenschaften des Kerns der Quelle BL Lac bei 86 GHz	74
3.33	Eigenschaften der Modellkomponenten der Quelle BL Lac bei 86 GHz	75
3.34	Eigenschaften Komponenten der Quelle 2201+315 bei 86 GHz.	77
3.35	Eigenschaften des Kerns der Quelle CTA 102 bei 86 GHz	79
4.1	Beobachtungsdauer der Quelle 3C 454.3	94
4.2	Vorzugsjetrichtung bei 43 GHz ab 0.9 mas Kernabstand	99
4.3	Fitparameter	103

Danksagung

Ich möchte mich zuerst bei den Gutachtern dieser Arbeit, Prof. Uli Klein und Priv. Doz. Maria Massi bedanken, die viel Geduld bezüglich des Abgabetermins hatten.

Desweiteren danke ich Prof. Herzog und Prof. Bott für die Teilnahme in der Promotionskommission.

Mein Dank gilt auch Herrn Anton Zensus, der mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Promotion am Max-Planck-Institut für Radioastronomie anzufertigen.

Ebenfalls danke ich meinem Betreuer Herrn Thomas Krichbaum, der mir immer wieder den Wert von Selbständigkeit und Integrität verdeutlicht hat.

Rupal Mittal und Krisztina Gabanyi danke ich für zwei Jahre unübertroffene Büroatmosphäre und Walter Alef und Alex Kraus für die Beantwortung unzähliger Fragen nach dem Korrelator.

Besonders danke ich Herrn Stephan Stanko für die Unterstützung beim Installieren, Deinstallieren, Uminstallieren meines Rechners sowie die anschließende Hilfe, wenn es nicht funktionierte.

Ich danke Herrn Helmut Essen für den fast täglichen Ansporn, diese Arbeit fertigzustellen.

Vor Allem danke ich Jürgen Kerp, der durch seine unerschöpfliche Kritik, aber auch durch viele Diskussionen und einem gnadenlosen Korrekturstift zu dieser Arbeit beigetragen hat.

Ich möchte betonen, dass diese Arbeit von den freizugänglichen Daten im Internet sowie der Auskunftsfreudigkeit vieler nicht direkt beteiligter Wissenschaftler sehr profitiert hat. Dankeschön!