



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Max-Planck-Institut
für Radioastronomie



Aktive Galaxienkerne

A. Witzel, S. Britzen, D. Graham, T. P. Krichbaum and K. Standke

Schwarze Löcher — kaum ein anderer Begriff aus der Astronomie hat in den letzten Jahren das Interesse einer weiten Öffentlichkeit so sehr gefunden und zu Spekulationen und Phantasien Anlaß gegeben. Ob diese exotischen Objekte bisher wirklich nachgewiesen sind, zum Beispiel als unsichtbare Partner in Doppel- oder Mehrfachsternsystemen, oder in ihrer massereicheren Variante als Zentralobjekte von Galaxien, wird noch immer zum Teil leidenschaftlich diskutiert. Sicher ist aber die Mehrzahl der Astrophysiker bereit, sehr massereiche Schwarze Löcher als die Zentren von Aktiven Galaxienkernen (AGK) anzusehen, die für die Erzeugung der gigantischen Energiemengen in diesen energiereichsten Objekten im Kosmos verantwortlich sind.

Aktive Galaxienkerne werden außerordentlich starke Strahlungsquellen in großen Entfernungen von der Erde genannt, deren optisches Erscheinungsbild zumeist eher unauffällig ist, und deren Erforschung erst durch die Entdeckung der für die Klasse archetypischen Quasare — quasistellare Radioquellen — mit extremem Energieausstoß initiiert wurden. Die AGK, d.h. Quasare und die im Mittel wohl etwas weniger weit entfernten BL Lacertae Objekte — benannt nach dem 1927 fälschlicherweise als variabler Stern identifizierten Objekt im Sternbild Eidechse — wurden in früheren kosmologischen Zeiten gebildet und sind wegen der Expansion des Weltalls und der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit bis zu Milliarden von Lichtjahren weit von den Beobachtern auf der Erde entfernt. Daher braucht man für Forschungen, die in einigem Detail die Strukturen von AGK und deren zeitliche Veränderlichkeit untersuchen wollen, Instrumente von sehr hohem Auflösungsvermögen. Diesem Anspruch wird zur Zeit nur im Radiobereich von Interferometern mit Basislinien, die nahe an den Erddurchmesser heranreichen, genügt. Die seit mehr als zwei Jahrzehnten im Dezimeter und Zentimeter-Wellenlängenbereich durchgeführten VLBI (Very Long Baseline Interferometry) Beobachtungen verfügen über ein Auflösungsvermögen im Bereich von einigen Tausendstel Bogensekunden (zum Vergleich: das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges beträgt etwa eine Bogenminute). Eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögens ist sowohl durch eine Vergrößerung der Basislinien, d.h. durch Einschluß weltraumgebundener Radioteleskope, als auch durch eine Verminderung der Beobachtungswellenlängen zu erreichen. Diese letztere Methodik, d.h. der Übergang zu Millimeter-Wellenlängen hat speziell für die Untersuchung hochkompakter AGK-Zentralregionen den entscheidenden Vorteil, daß nur in diesem Wellenlängenbereich eine "freie Sicht" in die Kernregionen möglich ist, die durch Selbstabsorption bei längeren Wellenlängen nicht zugänglich sind.

Die Methode der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) synthetisiert ein weder technisch mögliches noch gar finanziell erschwingliches Riesenteleskop, das einen Durchmesser hat, der dem Abstand der beiden am weitesten voneinander entfernten Antennen des VLB-Interferometers entspricht. Die Qualität und auch die

Zuverlässigkeit der mit einem solchen Instrument gewonnenen Bilder kosmischer Objekte hängt selbstverständlich kritisch von der Anzahl und der Güte der beteiligten Teleskope ab. Ein Maß für die Bildqualität ist der Dynamikbereich, d.h. der Quotient der hellsten zur schwächsten nachweisbaren Intensität. Von ausschlaggebender Bedeutung für die Gewinnung verlässlicher Bilder mit hohem Dynamikbereich mittels eines VLBI-Antennennetzes ist es, mindestens zwei empfindliche Antennen mit großer Reflektorfläche zu benutzen. Der Grund hierfür ist, daß der gesamte hochspezialisierte mathematische Algorithmus zur Bildgewinnung nur dann auf die Daten angewandt werden kann, wenn das Objekt auf zumindest einer Basislinie (Kombination von zwei Teleskopen) zweifelsfrei nachgewiesen ist. Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie besitzt mit der 100-m-Antenne das größte vollbewegliche Radioteleskop der Welt, das bis zu einer Grenzwellenlänge von 3,5 mm betrieben werden kann. Errichtet wurde es mit Mitteln der Volkswagen-Stiftung, wie auch das 30-m-Millimeterwellenlängen-Radioteleskop auf dem Pico Veleta nahe Granada, das zweifelsfrei beste Instrument seiner Art weltweit. Das 100-m-Radioteleskop in Effelsberg und das 30-m-Teleskop bilden die leistungsstärkste Antennenkombination, die in Zusammenarbeit mit anderen kleineren Instrumenten die Möglichkeit bietet, eine große Anzahl von Objekten zu untersuchen, deren Intensität deutlich geringer ist als die früheren Untersuchungen zugänglichen Quellen.

Die Untersuchung von AGK mittels mm-VLBI führt zu wertvollen Ergänzungen und wichtigen Verfeinerungen für das Bild, das die Astrophysiker für die Erklärung physikalischer Vorgänge in Quasaren und ähnlichen Objekten machen: in dem extrem kompakten Kerngebiet, vermutlich einem Schwarzen Loch von typischerweise 10^6 - 10^8 Sonnenmassen und 3×10^{11} — 3×10^{13} cm Durchmesser — wird die Energie des Systems produziert. Umgeben wird das Schwarze Loch von einer Akkretionsscheibe, in der sich Materie anhäuft, um sodann vom Zentrum "verschluckt" zu werden. In zwei düsenstrahlähnlichen Jets, deren Richtung senkrecht zur Hauptachse der Rotationsachse ist, wird Energie nach außen transportiert, mit in Kernnähe hochrelativistischen Geschwindigkeiten, bis hin zu den äußersten Regionen der Objekte, die in Entfernungen von Millionen von Lichtjahren von dem Zentrum mit Radioteleskopen nachgewiesen werden können (Abbg. 1).

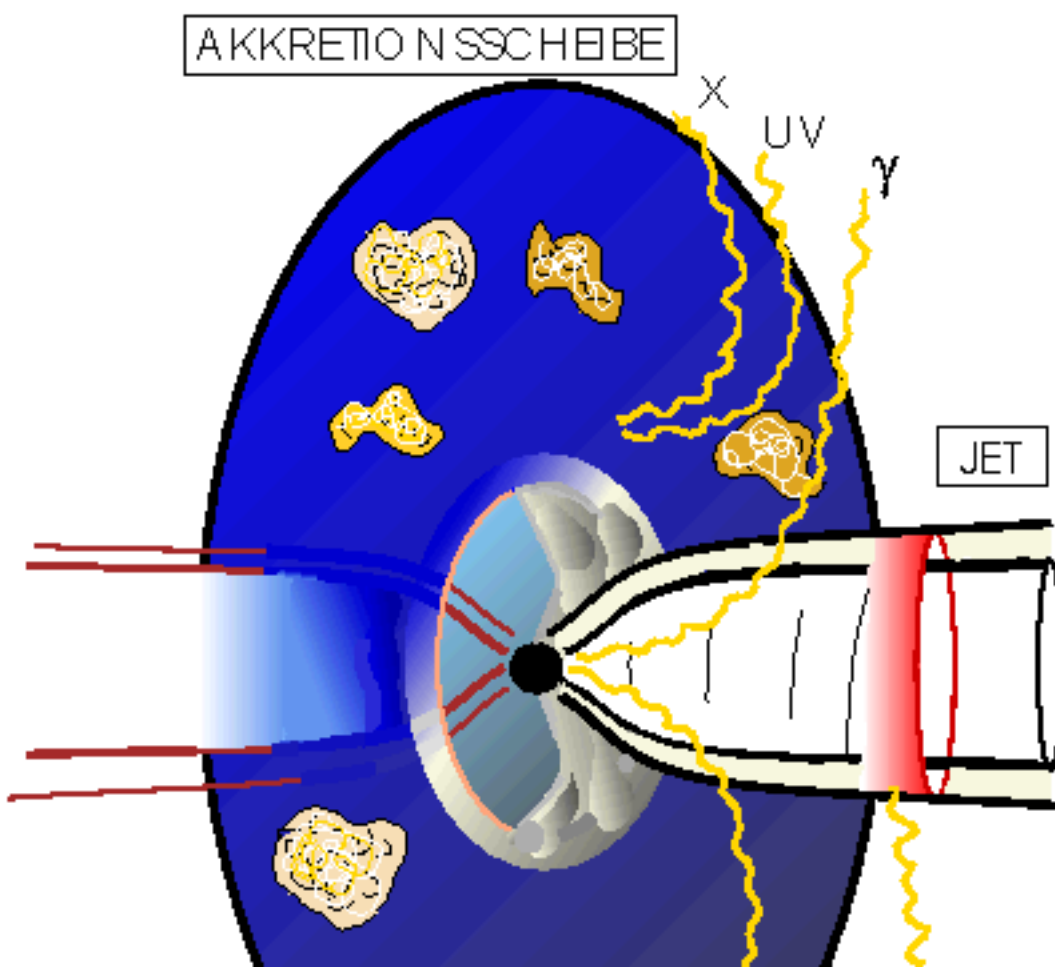
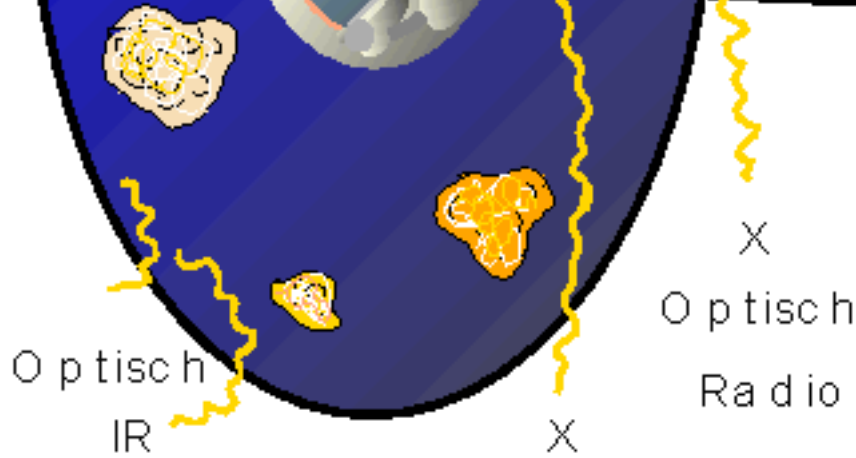


Abb. 1:
Stark
schematisierte
Darstellung
der
Zentralregionen
in einem
Quasar
nach
heute
gängigen
Vorstellungen.
Die
wesentlichen
Elemente
dieses
Standardmodells
für einen
Quasarkern
sind: (1)
ein
supermassives
rotierendes
oder
nicht



rotierendes
'Schwarzes
Loch' mit
einer
Masse
von
einigen
 10^8 - 10
Sonnenmassen,
(2) eine
das
Schwarze
Loch'

umgebende Akkretionsscheibe, in der sich aufheizende Materie zum Zentrum hin spiraliert, bevor sie im 'Schwarzen Loch' verschwindet, (3) und zwei einander entgegengerichtete hochrelativistische Plasmajets, in denen ein Teil der vom 'Schwarzen Loch' aufgesogenen Materie entlang der Rotationsachse der Akkretionsscheibe ausgestoßen, beschleunigt, und bis zu einigen hunderttausend Lichtjahren weit transportiert wird.

Unterschiedliche Bereiche dieses Akkretionsscheibe-Jet-Systems strahlen Energie in den verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums ab. Die extrem kurzwellige Gamma- und Röntgen-(X)-Strahlung liefert Information aus den innersten Gebieten, der unmittelbaren Umgebung des 'Schwarzen Loches'. Ultraviolette, optische, und Radiostrahlung stammt aus den etwas weiter entfernt liegenden Regionen der Akkretionsscheibe und aus dem Jet, der allerdings auch noch in größerer Entfernung vom Kern, durch sogenannte "Schockwellen" im Jet-Plasma Röntgen- und vielleicht sogar Gamma-Strahlung produzieren kann. Vor allem VLBI-Beobachtungen im Millimeter-Wellenlängenbereich erlauben die direkte Untersuchung dieser kernnahen Jet-Regionen und der in ihnen unter extremen Bedingungen ablaufenden physikalischen Prozesse, die sich nur im Rahmen der allgemeinen Einsteinschen Relativitätstheorie verstehen und beschreiben lassen.

Eine weitere, bisher nahezu ungenutzte Untersuchungsmöglichkeit der Kernbereiche von AGK stellt die astronomische Auswertung von Datenbasen, die im Verlauf geodätischer VLBI-Kampagnen angelegt worden sind: seit etwa 15 Jahren werden weltweit seitens geodätischer Forschungsgruppen VLBI Beobachtungen bei 13- und 3.6-cm Wellenlänge von ausgewählten, möglichst ultrakompakten AGK vorgenommen, um durch genaue Analysen des Beobachtungsmaterials Aussagen zu gewinnen über zum Beispiel die Kontinentaldrift, Polbewegungen etc., bis hin zur Voraussage von Erdbeben.

Bei diesem interdisziplinären Forschungsvorhaben können die Positionsastronomen (Astrometer) Kenntnisse über die Positionen der beobachteten kosmischen Objekte erlangen, Angaben die für die Erstellung eines inertialen himmlischen Koordinatensystems genutzt werden können. Ein solches Koordinatensystem soll das z. Z. benutzte Rektaszension/Deklinationssystem ablösen, das von den nicht mit höchster Genauigkeit voraussagbaren Bewegungen des Frühlingspunktes abhängig ist.

Wie oben erwähnt, wären die idealen Objekte für diese Forschungen aus astrometrischer als auch aus geodätischer Sicht, starke, punktförmige, sehr weit entfernte Strahlungsquellen. Die AGK erfüllen aber von den drei Bedingungen nur zwei, die der großen Entfernung und die der großen Intensität. Trotz ihrer großen Entfernungen hat sich bis heute keine ideale Punktquelle (vor allem bei kürzeren Wellenlängen) finden lassen, die auch für Radiointerferometer mit sehr großen Basislinien unaufgelöst ist. Das heißt, alle AGK zeigen im Bereich von Lichtmonaten bis Lichtjahren deutliche Strukturierungen, zumeist Jets, d.h. düsenstrahlähnliche

Vorzugsrichtungen der Emission, die zudem mit der Zeit veränderlich sind. Aus astrophysikalischer Sicht sind es diese Jets, die das höchste Interesse verdienen, da sie Auskunft geben über die Mechanismen des Energietransports auf dem Wege vom hypothetischen Schwarzen Loch hin zu den Millionen von Lichtjahren entfernten Außenbezirken. Aus geodätischer Sicht stellen die Strukturen von AGK Fehlerquellen für die genaue Positionsbestimmung dar, die allerdings vernachlässigt werden können, wenn genaue Kenntnis der Strukturen und ihrer zeitlichen Veränderungen eine Korrektur in den entsprechenden Auswertungsalgorithmen erlaubt. Aus der Mannigfaltigkeit geodätischer VLBI-Kampagnen werden am Korrelator des VLBI Auswertezentrums am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn regelmäßig die Experimente EUROPE (Netzwerk aus 9 europäischen Radioteleskopen unter Beteiligung der 100-m-Antenne in Effelsberg) und IRIS (International Radio Interferometric Surveying mittels 6 weltweit verteilten Stationen) ausgewertet.

In beiden Kampagnen werden etwa 20 AGK in regelmäßigen Abständen — IRIS alle 4 Wochen, EUROPE 4 mal pro Jahr — simultan bei 3.6 und 13 cm beobachtet. Die Gesamtzahl der in den letzten 15 Jahren hierbei untersuchten Objekte ist etwa 50 — wegen der starken Intensitätsvariabilität müssen von Zeit zu Zeit AGK, deren Helligkeit zu stark abgenommen hat, gegen andere ausgetauscht werden.

Es ist inzwischen evident, daß die Strukturveränderungen in AGK vielfach zeitlich so rasch erfolgen, daß eine Beobachtungsfrequenz von z.B. einmal jährlich — ein für die globalen VLB-Netzwerke eher günstiger Wert — nicht ausreicht, um zweifelsfrei Bewegungsphänomene zu analysieren. Speziell die teils sehr häufige Entstehungsrate bzw. Auswurfsrate neuer Kondensationen im Kernjet erschwert oder verhindert die eindeutige Identifizierung von Jetknoten und das Studium ihrer Entwicklung. Die monatliche Beobachtungsfrequenz der IRIS-Beobachtungen hingegen erlaubt in den bisher untersuchten Objekten eine solche eindeutige Komponentenzuordnung.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der für die Analyse und Interpretationen geodätischer VLBI-Daten spricht, ist darin zu sehen, daß gerade durch die kürzlichen Entdeckungen in anderen Wellenlängenbereichen, wie z.B. der Röntgen und Gamma-Astronomie, das Interesse an den Objekten verstärken, die über den gesamten Wellenlängenbereich extreme Eigenschaften zeigen: nämlich den Aktiven Galaxienkernen. Für mehrere Quasare mit extrem hoher Gammastrahlungsaktivität konnte die Struktur und Strukturveränderlichkeit im Radiowellenlängenbereich durch die Analyse der synchron zu den Gamma-beobachtungen unabhängig durchgeführten IRIS-Beobachtungen studiert werden. Als Beispiele können die Quasare 0420-014 und 0528+134 dienen, die scheinbar überlichtschnelle Expansionsbewegungen zeigen und ebenso die eindeutige Korrelation zwischen dem Ausstoß neuer Jetkomponenten und Maxima in der Helligkeit bei kurzen Radiowellenlängen.

Bedingt durch die Beobachtungsmethodik sind die geodätischen VLBI-Beobachtungen zwar in hervorragend kurzen Abständen durchgeführt, die Beobachtungsdauer der einzelnen Objekte hingegen ist deutlich kürzer als bei astronomischer VLBI. Das führt dazu, daß zwar die grundsätzlichen Strukturen einer Quelle zweifelsfrei erkannt werden können, daß aber schwächere Details sich im Normalfall dem Nachweis und somit der Analyse entziehen. Der Dynamikbereich, d.h. das Verhältnis der stärksten und schwächsten nachweisbaren Strukturen, ist auf etwa 50:1 begrenzt. Schon aus diesem Grunde ist ein Vergleich mit dediziert astronomischen Kartierungen wesentlich. Erst die Kombination von zeitlich dicht beieinanderliegenden Karten mittleren Dynamikbereichs mit zeitlich deutlich gespreizten Untersuchungen mit hohem Dynamikbereich, erlaubt eine wirklich detaillierte Analyse der Kinematik in kernnahen Jets von AGK. Besonders profitabel hat sich hierbei die Kombination der 3.6cm-Karten von "IRIS-Quellen" mit parallelen mm-VLBI Beobachtungen derselben Objekte erwiesen.

Vor allem technische Fortschritte haben in den letzten Jahren eine deutliche

Verbesserung auf Seiten der Radiointerferometrie mit sehr langen Basislinien im mm-Wellenlängenbereich ermöglicht: rauschärmere Empfänger, Aufnahmeterminals mit größeren Bandbreiten und vor allem die Nutzbarmachung neuer leistungsstarker mm-Wellenlängen-Radioteleskope. Zur Zeit sind die in Europa angesiedelten Empfangsstationen weltweit führend: das 30-m-Radioteleskop auf dem Pico Veleta nahe Granada im Verbund mit einem der 15-m-Teleskope auf dem Plateau de Bure in Frankreich, kann bis zu einer Grenzwellenlänge von 1 mm betrieben werden. Und zum ersten Mal haben Beobachtungen bei 1.3-mm-Wellenlänge Ende 1994 erfolgreich fringes (= Interferenzstreifenmuster) gezeigt, die als Beweis dienen, daß auch bei so kurzen Wellenlängen VLBI möglich ist.

Bei den Wellenlängen 7 und 3 mm ist auch das 100-m-Radioteleskop in Effelsberg einsetzbar. 7-mm-Beobachtungen, die ein Auflösungsvermögen von 0.1 mas (entsprechend 1,3 Lichtjahren für eine Radioquelle in 17 Milliarden Lichtjahre Entfernung) erlauben, werden seit kurzem routinemäßig durchgeführt und ergeben Karten mit Dynamikbereichen von bis zu 500:1. 3-mm-Beobachtungen sind von der Logistik her noch schwieriger, werden aber inzwischen ein bis zweimal pro Jahr von hochspezialisierten wissenschaftlich-technischen Teams unternommen. Das Auflösungsvermögen ist hierbei in etwa doppelt so groß wie bei 7 mm, allerdings ist der Dynamikbereich z.Z. auf 50:1 begrenzt.

Da das Winkelaufklärungsvermögen des VLB-Interferometers mit kürzer werdender Beobachtungswellenlänge zunimmt, lassen sich bei den nun neu zugänglich gemachten Beobachtungswellenlängen von 7-mm- und 3-mm-Wellenlänge (und in naher Zukunft auch 1 mm) Radiokarten erstellen, die es erlauben, wesentlich "schärfer" in die bei längeren Wellenlängen selbstabsorbierten, Energie produzierenden Aktiven Galaxienkerne zu blicken, d.h. mehr und vor allem neue Details in deren innersten Bereichen zu erkennen: In der hellsten Radiogalaxie im Sternbild des Perseus (Perseus A = NGC 1275) konnten z.B. trotz der riesigen Entfernung von 330 Millionen Lichtjahren Jetknoten mit einer Ausdehnung von nur 60 Lichttagen in nur 90 Mikrobogensekunden Abstand vom Kern nachgewiesen werden. Diese kleinen, aber sehr leuchtkräftigen Gebiete innerhalb des komplexen und 40-50 Lichtjahre langen Jets von NGC 1275 scheinen mit einer Geschwindigkeit von 30000 km pro Sekunde aus dem zentralen Schwarzen Loch ausgestoßen zu werden, um nach einer zurückgelegten Strecke von ca. 1-2 Lichtjahren durch einen z.Z. noch recht unverstandenen Prozess auf das Fünffache ihrer Ursprungsgeschwindigkeit beschleunigt zu werden.

Ein möglicher Schlüssel zum Verständnis der beobachteten Geschwindigkeitsänderungen in den kernnahen Bereichen der Jets der Aktiven Galaxienkerne wird uns durch den Beobachtungsbefund der "helikal" (d.h. spiralförmig) gekrümmten Jets gegeben.

Ein überraschendes Ergebnis der mm-VLBI-Beobachtungen ist das Fehlen gradliniger Ausbreitung nahe dem Zentrum. Tatsächlich sind die Trajektorien der Jetkondensationen in allen hinreichend genau studierten AGK gekrümmt; wir beobachten quasisinusförmige Bahnen und es scheint verlockend, diese Muster als zweidimensionale Manifestationen von helikalen Raumbewegungen zu interpretieren, wie sie in hydrodynamischen oder magnetohydrodynamischen Modellen der Jetbewegungen von theoretischen Astrophysikern vorausgesagt werden. Zusätzlich haben die Beobachtungen eine Fülle von Details gezeigt, die sich z.Z. noch nicht alle kategorisieren lassen. Erwähnenswert zum Beispiel ist das Faktum, daß die einzelnen ausgestoßenen Komponenten sich zwar alle auf gekrümmten Bahnen zu bewegen scheinen, daß diese Bahnen aber nicht für jede einzelne Komponente die gleichen sein müssen. Die Geschwindigkeiten der Expansionsvorgänge sind, wie wir es aus Beobachtungen im cm-Wellenlängenbereich kennen, scheinbar überlichtschnell und können somit als Nachweis von hochrelativistischen Kernbewegungen gedeutet werden. Dies bedeutet aber, daß die beobachteten Phänomene mit den Gesetzen der

Einsteinschen Relativitätstheorie beschrieben werden müssen. Somit kommen Effekte wie Zeitdilatation, Längenkontraktion und scheinbare Intensitäts- und Geschwindigkeitsvergrößerungen ins Spiel, mit denen es in der Tat möglich ist, die Beobachtungsbefunde weitgehend zu erklären.

So ist es beispielsweise gelungen, aus der beobachteten Jetkinematik und dem spiralförmigen Jetverlauf im Quasar 3C345 die geometrisch bedingten und zeitlich variablen relativistischen Korrekturterme vollständig abzuleiten, und damit die zeitliche Entwicklung der im Jet fliegenden PlasmaWolken (Regionen verstärkter Teilchen- und Magnetfelddichte) frei von den relativistischen Korrekturen darzustellen. Dabei zeigte sich, daß der *wahren* zeitliche Ablauf der Helligkeitsentwicklung in einem Jetknoten sich sehr stark von dem *scheinbaren* beobachteten Ablauf unterscheidet, was erhebliche Auswirkungen auf das theoretische Verständnis der physikalischen Prozesse in Jets hat (Abb. 2)

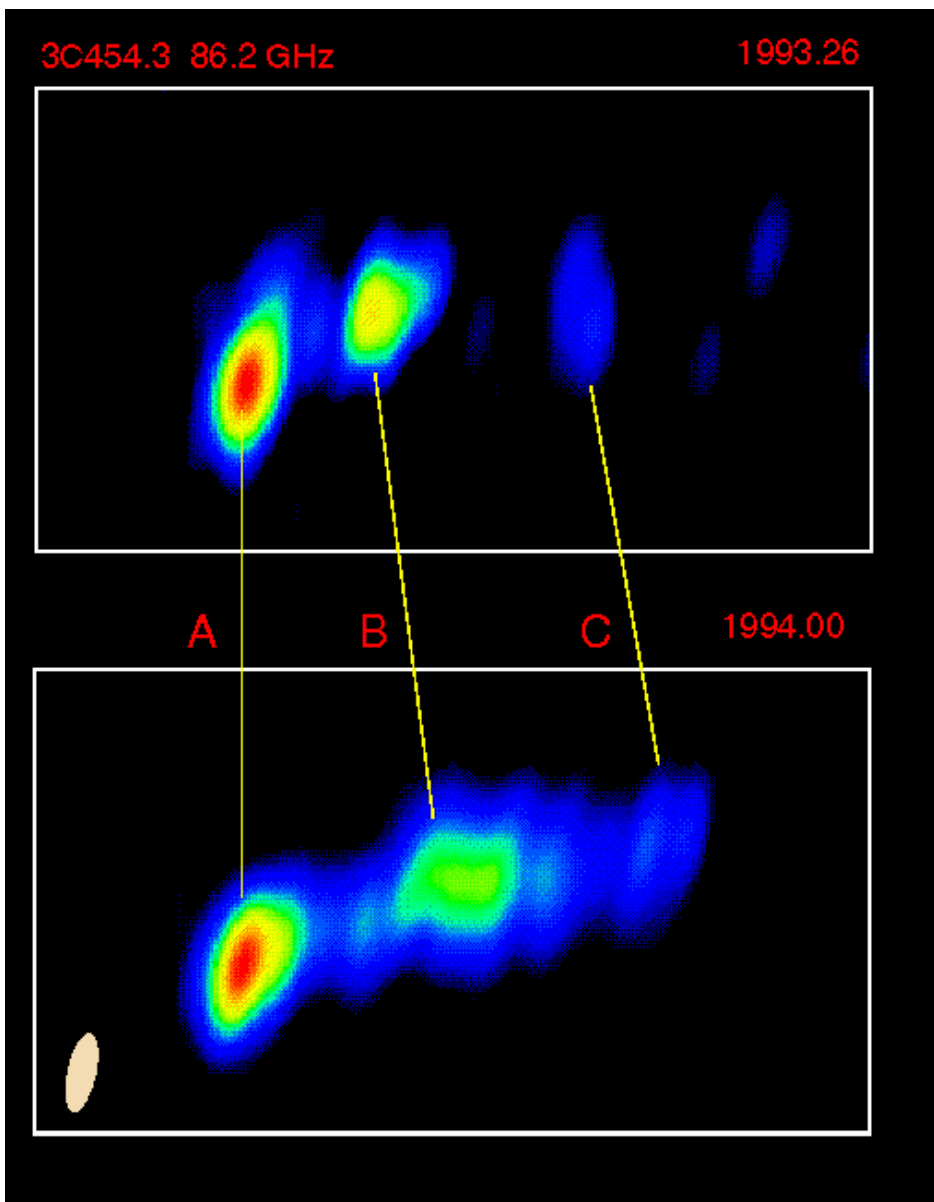


Abb. 2: Der besonders aktive Quasar 3C454.3 befindet sich in einer kosmologischen Entfernung von 1,4 Milliarden Lichtjahren. Er zeichnet sich durch seine extreme Leuchtkraft und eine besonders starke Variabilität seiner Helligkeit im Radio-, optischen und Gamma-Bereich aus. VLBI-Beobachtungen bei 3,5 mm Wellenlänge ermöglichen nun erstmals die detaillierte Untersuchung der hochenergetischen Phänomene in Quasaren mit der extrem hohen Winkelauflösung von bis zu 50 Mikrobogensekunden (1 Mikro-Bogensekunde = 10^{-6} Bogensekunden). Damit läßt sich die unmittelbare Umgebung der Quasar, dem

wahrscheinlichen Sitz von Milliarden Sonnemassen schwerer "Schwarzer Löcher", genaueren astrophysikalischen Studien zugänglich machen. Die Abbildung zeigt zwei im Abstand von ca. 8 Monaten aufgenommene Radiokarten des kernnahen, ca. 1,5 Millibogensekunden langen Jets von 3C454.3 bei 3,5 mm Wellenlängen. Die Winkelauflösung in beiden Radiokarten beträgt 70 Mikro-Bogensekunden in Ost-West Richtung und 200 Mikro-Bohensekunden in Nord-Süd Richtung (siehe gelbe Ellipse links im unteren Bild). Mit dieser Auflösung lassen sich Strukturen von nur 1,9 Lichtjahren Größe erkennen. Deutlich sichtbar ist die durch die gelben Linien angedeutete zeitliche

Veränderung im Jet. Zwischen April 1993 (oberes Bild) und Januar 1994 (unteres Bild) haben sich die markierten hellen Jetkomponenten B und C relativ zum Kern A bewegt. Die Geschwindigkeit dieser Jetexpansion beträgt etwa das 12fache der Lichtgeschwindigkeit. Die zeitliche Rückextrapolation der hier gefundenen Bewegungen läßt es wahrscheinlich erscheinen, daß der Auswurf zumindest der Jetkomponente B mit einer durch den Compton/Gamma-(CGRO) Satelliten gemessenen Strahlungsexplosion im Gamma-Strahlungsbereich in direktem Zusammenhang steht. An den VLBI-Beobachtungen waren neben dem 100-m-Teleskop des MPIfR in Effelsberg und dem IRAM 30-m-Teleskop auf dem Pico Veleta (Spanien) auch ein schwedisches Radio-Teleskop (in Onsala bei Göteborg) und zwei amerikanische Radio-Antennen (in Massachussetts) beteiligt. Die VLBI-Daten wurden am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn korreliert und ausgewertet.

Die seit kurzem im Röntgen und Gamma-Wellenlängenbereich arbeitenden Satelliten ROSAT (Röntgen Satellite) und CGRO (Compton-Gamma Ray Observatory) haben festgestellt, daß die Aktiven Galaxienkerne und Quasare in diesen extremen Energiebereichen des elektromagnetischen Spektrums besonders hell und extrem variabel sind. Der Grund hierfür ist möglicherweise in der Wechselwirkung zwischen zentraler Akkretionsscheibe und hochrelativistischem Jet zu suchen. Neueste mm-VLBI Beobachtungen der im Gamma-Wellenlängenbereich besonders hellen Quasare 0528 +134 und 3C454.3 bestätigen nun in der Tat den bereits vorher vermuteten Zusammenhang zwischen Intensitätsausbrüchen im Gamma- und Millimeterwellenlängenbereich und der Erzeugung neuer, scheinbar überlichtschneller Jetkomponenten, die in unmittelbarer Nachbarschaft zum zentralen energieerzeugendem Objekt (50 Mikrobogensekunden Kerndistanz) durch mmVLBI-Karten sichtbar gemacht werden konnten.

Generell sind die neuen Beobachtungen im mm-Wellengebiet in guter Übereinstimmung mit den Untersuchungen bei längeren Wellenlängen, zeigen aber mehr Details und vor allem beschreiben sie einen dichter an dem Energiezentrum liegenden Teil des Jets. Wir sind also dem potentiellen Schwarzen Loch noch näher gekommen ohne aber seine Existenz bisher zweifelsfrei nachweisen zu können

Max-Planck-Gesellschaft Jahrbuch 1995. Copyright © 1995 Max-Planck-Institut f. Radioastronomie.