



## Millimeterwellen- und Weltraum-VLBI: ein neues Kapitel der Radioastronomie

J.A. Zensus, E. Preuss, A. Witzel, T. Krichbaum, A. Lobanov

**Einleitung.** VLBI (Very-Long-Baseline Interferometry) oder Radiointerferometrie mit großen Basislängen ist eine Methode zur Verknüpfung von geographisch weit verteilten Radioantennen zu einem Verbundnetzwerk, das von Astronomen praktisch wie ein einziges Riesenradioteleskop genutzt werden kann. Der Durchmesser solcher Netzwerke reicht von einigen 100 km bis zum Erddurchmesser und erreicht sogar 30000 km beim aktuellen Stand der Weltraum-VLBI. Die im cm- und mm-Wellenbereich betriebenen VLBI-Netzwerke sind die größten abbildenden Teleskope, die je in den Weltraum hinausgeschaut haben. "Größe" meint hier nicht nur Abmessung in Kilometern sondern auch Durchmesser, gemessen in Beobachtungswellenlängen, und die damit erreichbare Winkelauflösung im Bereich von Tausendstel Bogensekunden und besser.

Der Anstoß für die Entwicklung der VLBI kam aus der astrophysikalischen Forschung; kompakte, nicht aufgelöste Radioquellen wurden als die energiereichsten Objekte im Kosmos identifiziert. Diese sogenannten "Aktiven Galaxienkerne" lassen sich nur detailliert auf ihre Struktur und deren Veränderlichkeit hin mittels VLBI untersuchen. Ähnliches gilt für molekulare Maser unserer Galaxis und in einigen Nachbarsystemen. Aber auch die Gravitationsphysik und die Geophysik bedienen sich der VLBI, um z.B. Schwankungen der Erdrotation und Plattentektonik einerseits und andererseits Effekte der Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne zu studieren.

Auch eine klassische Aufgabenstellung der Astronomie, nämlich die Festlegung eines Himmels-Koordinatensystems, kann durch die hochpräzise Messung absoluter Positionen von sehr weit entfernten - und daher keine störenden Eigenbewegungen aufweisenden - Aktiven Galaxienkernen entscheidend gefördert werden.

Charakteristisches Merkmal der VLBI-Methode ist der durch die großen Antennenabstände erzwungene Verzicht auf jegliche kohärente Echtzeitverbindung im gesamten interferometrischen Netzwerk während der Messung. Die Vernetzung ist also zunächst nur "virtuell" vorhanden. Dies war die erste Herausforderung bei der technischen Realisierung der Methode. Sie gelang erstmals 1967 fast zeitgleich in Kanada bei 75-cm- und in den USA bei 50-cm-Wellenlänge. Der jetzt beginnende Ausbau der mm-Wellen- und Weltraum-VLBI markiert zwei vorläufige Höhepunkte dieser Entwicklung, die allerdings nur erste, wenn auch bedeutende Schritte in einen neuen Entwicklungsabschnitt sind. Das Potential der VLBI-Methode ist auch heute bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Das 100-m-Radioteleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie wird seit 1973 für astronomische VLBI von Wissenschaftlern des Instituts und Kollegen aus aller Welt genutzt. Das Instrument ist in jedem zur Zeit denkbaren cm- und mm-Wellen-Netzwerk eines der empfindlichsten Interferometerelemente und spielt daher gerade in der jetzt beginnenden Ära von mm-Wellen- und Weltraum-VLBI eine wichtige Rolle. Ähnliches gilt für die deutsch-französisch-spanische 30-m-Antenne bei Granada im mm-Wellenbereich.

Die folgende Beschreibung beschränkt sich auf für die Astronomie wichtige Aspekte der Methode. Alle hier gezeigten Abbildungen von astronomischen Objekten entstammen Arbeiten der Bonner VLBI-Gruppe.

**VLBI-Netzwerke als Riesenradioteleskope.** Heutige VLBI-Netzwerke bestehen meist aus 10 bis 20 Radioteleskopen, die jeweils für ein bestimmtes Beobachtungsprojekt aus einem weltweit vorhandenen "Vorrat" von ungefähr 40 Antennen ausgewählt werden. Bei der Weltraum-VLBI wird im einfachsten Fall, wie zur Zeit bei der Mission VSOP (VLBI Space Observatory Program), eine satellitengestützte Radioantenne in Erdumlaufbahn als weitere Netzwerkantenne hinzugeschaltet. Durch Ausnutzen der Erdrotation und, im Fall der Weltraum-VLBI, der zusätzlichen Orbitalbewegung der Raumantenne wird aus dem Netzwerk in einem mehrstündigen Meßlauf, bei dem alle Antennen auf das Meßobjekt gerichtet sind, effektiv ein einziges Riesenradioteleskop. Erddrehung und Orbitalbewegung ändern, vom weit entfernten Meßobjekt aus (in Projektion) gesehen, ständig die gegenseitigen Abstände der Netzwerkantennen sowie die entsprechenden "Aspektwinkel". Auf diese Weise werden zu einem Großteil die jeweils momentan vorhandenen großen Lücken im Netzwerk geschlossen und es wird so gewissermaßen eine Riesenantenne von kontinentalem oder sogar planetarem Ausmaß synthetisiert. Die Radiosignale an jeder Station werden völlig unabhängig, von einem atomaren Zeit- und Frequenznormal gesteuert, empfangen und in digitaler Form auf einen Datenträger abgespeichert. Erst nach Abschluß der Messungen werden die Primärdaten von allen Stationen in einer Korrelationsanlage paarweise zur Interferenz gebracht. In einem dritten und letzten Schritt wird dann aus den geeichten Interferometerdaten die Intensitätsverteilung, also das Radiobild des Meßobjekts errechnet ("restauriert").

Der Verbundbetrieb von geographisch weit verteilten Antennen erfordert zudem einen erheblichen organisatorischen Aufwand. Das VLBA (VLBA Array) mit seinen zehn über das gesamte Territorium der USA verteilten 25-m-Antennen ist das bisher einzige (*dedizierte*) VLBI-Netzwerk - speziell in regelmäßigen "Zusammenschaltungen" mit dem 100-m-Teleskop ein machtvoll Instrument. Weitere Organisationen, die mehrmals pro Jahr Radioteleskope für VLBI-Messungen vernetzen, sind: a) das Europäische VLBI-Netzwerk (EVN), ein Zusammenschluß von 11 Instituten, davon zwei in China, b) das Asia Pacific Telescope (APT) und c) das Coordinated Millimeter VLBI Array (CMVA). Antennen aus verschiedenen Organisationen werden häufig auch zu *globalen* Netzwerken zusammengeschaltet. Leistungsstarke Korrelatoren für astronomische Zwecke werden vom MPI für Radioastronomie, und auch dem VLBA, dem EVN und vom US Naval Observatory betrieben.

Mit dem Start der vom Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan, initiierten und geführten Weltraummission VSOP (VLBI Space Observatory Program) im Februar 1997 wurde die Ära der Weltraum-VLBI eröffnet. Um die Orbitalantenne von 8-m-Durchmesser als weiteres Interferometer-Element mit erdgebundenen Netzwerken zu vereinigen, werden vier über die Erde verteilte Kontrollstationen benötigt. Sie stellen sicher, daß das Empfangssystem der Raumantenne zu jedem Zeitpunkt der Messung phasenstabil an einen auf der Erde befindlichen Wasserstoffmaser angebunden ist und der bei der Raumantenne anfallende Signalstrom (128 Millionen Bit/s) empfangen und abgespeichert wird.

**Kompakte Radioquellen als astronomische Sonden.** Die stärksten kompakten extragalaktischen Quellen finden sich in den Zentren von "Aktiven Galaxien" wie Radiogalaxien, Blasare und Quasare. Sie emittieren Radiostrahlung in einem breiten Wellenlängenbereich ("Kontinuumsstrahlung"). Ein schwarzer Körper müßte bis zu 100 Milliarden Grad heiß sein, um mit gleicher Intensität zu strahlen. Dabei handelt sich mit hoher Sicherheit um Synchrotronstrahlung von relativistischen (fast lichtschnellen) Elektronen. Die kompakten Quellen sind assoziiert mit stark gebündelten Plasmastrahlen, sogenannten "Jets", die aus dem Inneren der Muttergalaxien mit relativistischen Geschwindigkeiten herausschießen und oft weit außerhalb des Mutterobjekts riesige Doppelquellen im Radiobereich erzeugen. - Viel diskutiert wurden die scheinbar überlichtschnellen Bewegungen im Kernjet vieler aktiver Galaxien, die befriedigend als das Ergebnis einer kinematischen Illusion erklärt werden konnten -. Vieles deutet daraufhin, daß die Jets von magnetisierten rotierenden Akkretionsscheiben erzeugt werden, in denen sich die auf ein kompaktes massereiches Zentralobjekt (z.B. Schwarzes Loch?) einstürzende Materie sammelt. Bei diesen Objekten werden mm-VLBI und Weltraum-VLBI benötigt, um durch direkte Abbildung möglichst nahe an das Ursprungsgebiet der Jets heranzukommen. Die Begründung hierfür ist nicht nur in dem gesteigerten Winkelauflösungsvermögen bei höheren Frequenzen und Basislängen zu suchen: Je kürzer die Beobachtungswellenlänge ist, desto weniger störend ist die Selbstabsorption in der Quelle und desto tiefer kann der Beobachter eindringen.

Das relativ häufige Vorkommen von kompakten Kontinuumsstrahlern beruht darauf, daß sie nahezu "ständige Begleiter" von hochenergetischen Prozessen sind, die relativistische Elektronen in kleinen Raumbereichen freisetzen, die dann über Synchrotronstrahlung ihre Energie abgeben. Gewissermaßen über einen Nebeneffekt werden die niederenergetischen Radiophotonen so zur Sonde für die Untersuchung von energiereichen Prozessen, deren Energie in der Hauptsache *nicht* in Radiostrahlung konvertiert wird. Wenn die Energiedichte der Synchrotronstrahlung einen bestimmten Wert überschreitet, führt die Wechselwirkung der Elektronen mit den von ihnen erzeugten Radiophotonen auch zur Emission hochenergetischer Röntgen- oder sogar Gamma-Strahlung (inverser Compton-Effekt). Komplementäre Beobachtungen in diesen Spektralbereichen liegen daher nahe und werden auch bereits durchgeführt. VLBI-Beobachtungen bei kurzen cm-Wellen und im mm-Wellenbereich erreichen heute routinemäßig bereits eine Winkelauflösung von wenigen Zehntausendstel Bogensekunden. Der beste bisher bei 3,5 mm erreichte Wert beträgt etwa 50 Millionstel Bogensekunde. Dies ist der Winkeldurchmesser eines 10 cm großen Steins auf dem Mond von der Erde aus gesehen.

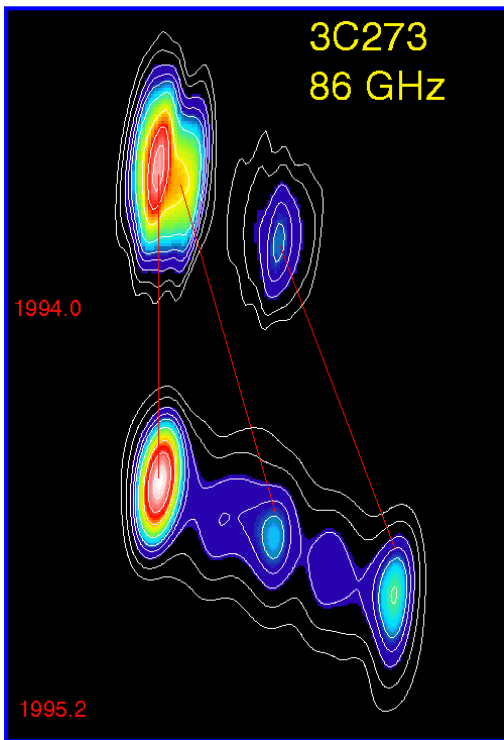
Auch VLBI-Experimente, die nicht die kontinuierliche Strahlung sondern die Linienemission analysieren, werden regelmäßig durchgeführt. Die stärksten kompakten Radioquellen innerhalb unserer Galaxis sind molekulare Maser, die Linienstrahlung sehr hoher Intensität aussenden. Einige von ihnen gehören zu den brillantesten Quellen am Radiohimmel. Ihre scheinbare Helligkeit übertrifft oft noch die der hellsten extragalaktischen Quellen. Die stärkste Maserstrahlung geht aus von folgenden Molekülen bzw. Radikalen: Wasser ( $H_2O$ , 1,3 cm), Hydroxyl (OH, 18 cm), Siliziummonoxyd ( $SiO$ , 7 mm) und Methylalkohol ( $CH_3OH$ , 5 cm). In Klammern ist jeweils neben der chemischen Formel die Wellenlänge der stärksten Spektrallinie angegeben. Die Erforschung der Sternhüllen aber auch das Studium der Entfernungen und Dynamik von Sternentstehungsgebieten haben durch die VLBI-Beobachtungen sehr gewonnen.

Besonders starke Maserquellen ("Mega-Maser") hat man auch in den Zentren anderer Galaxien gefunden und zwar Wasserdampfmaser vorwiegend in nahen, schwach aktiven Galaxien und Hydroxyl-Maser in meist weiter entfernten Galaxien, die im Infrarotbereich extrem stark strahlen. In der nahen Galaxie NGC4258 gelang erstmals durch Beobachtung der Wasserdampfmaser der Nachweis einer zentralen rotierenden molekularen Scheibe, die Bestimmung der Masse im Scheibenzentrum zu 30 Millionen Sonnenmassen sowie die Messung der Entfernung. Objekte dieser Art eröffnen die Möglichkeit, Akkretionsscheiben direkt zu untersuchen. Dabei wird Weltraum-VLBI eine wichtige Rolle spielen.

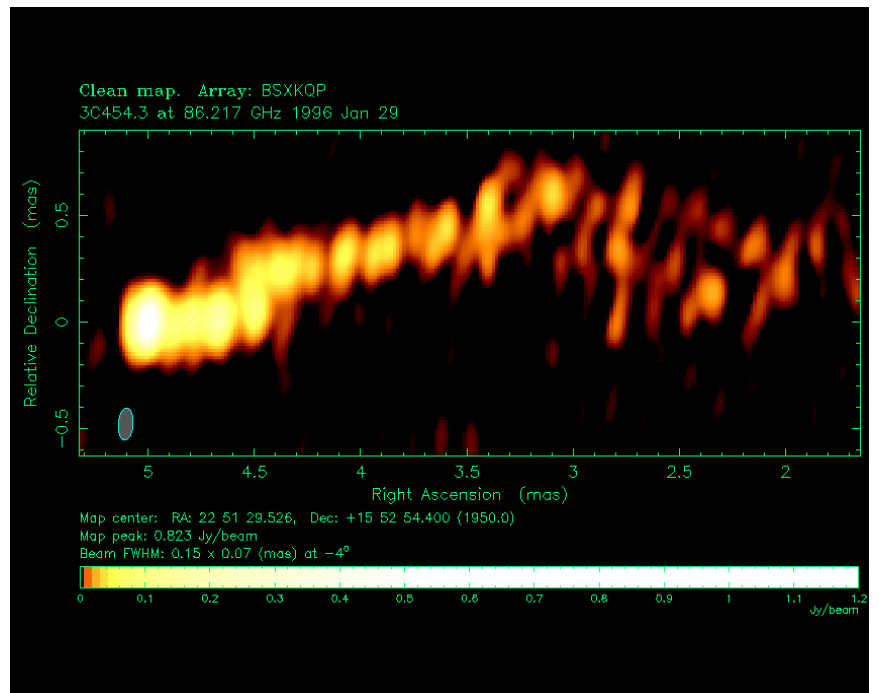
**Fortschritte bei der Millimeter-VLBI.** Wissenschaftler des MPI für Radioastronomie haben von Anfang an bei der Erschließung des mm-Wellenbereichs für VLBI-Beobachtungen entscheidend mitgewirkt. Das wurde begünstigt durch die besondere Beziehung des MPIfR zu den drei leistungsfähigsten mm-Teleskopen in Europa. Dies sind die 100-m-Antenne, die, obwohl als cm-Instrument geplant, noch bei 3,5 mm eine beachtliche Wirkfläche hat; die 30-m-Antenne bei Granada, das weltweit größte Einzelteleskop bei 1,3-mm-Wellenlänge sowie das mm-Interferometer auf dem Plateau de Bure bei Grenoble, bestehend aus 5 (demnächst 6) Antennen zu je 15-m-Durchmesser und 1,3-mm-Grenzwellenlänge.

Die wichtigsten Beobachtungswellenlängen in der mm-VLBI sind: 7 mm (43 GHz), 3,5 mm (86 GHz) und 1,4 mm (215 GHz). Die Reihenfolge entspricht abnehmender Routine bei der Datenauswertung und zunehmender Anforderung an methodisch-technische Kenntnisse der Beobachter. 7-mm-VLBI ist schon Teil des Normalbetriebs von VLBA und EVN, während 1,4-mm-VLBI sich noch in einer Versuchsphase befindet. Beobachtungen bei 3,5 mm erfordern noch ein erhebliches Maß an Expertenwissen. Das CMVA stützt sich zur Zeit auf 12 Antennen zu beiden Seiten des Atlantiks. Das Fortschritttempo der mm-VLBI wird entscheidend bestimmt durch die Verfügbarkeit von rauscharmen und phasenstabilen Empfangssystemen an den einzelnen Stationen, die erst in der letzten Zeit mit der erforderlichen Qualität verfügbar werden.

**Abbildung 1** demonstriert den jetzt erreichten Stand bei der Erstellung von hochaufgelösten 3,5-mm-Bildern von starken kompakten Radioquellen am Beispiel des nächsten hellen Quasars 3C273, 1,6 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt (Hubble-Konstante = 100 km/s/Mpc, Bremsparameter = 0,5, auch im folgenden), und des Quasars 3C454.3, 10 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt.



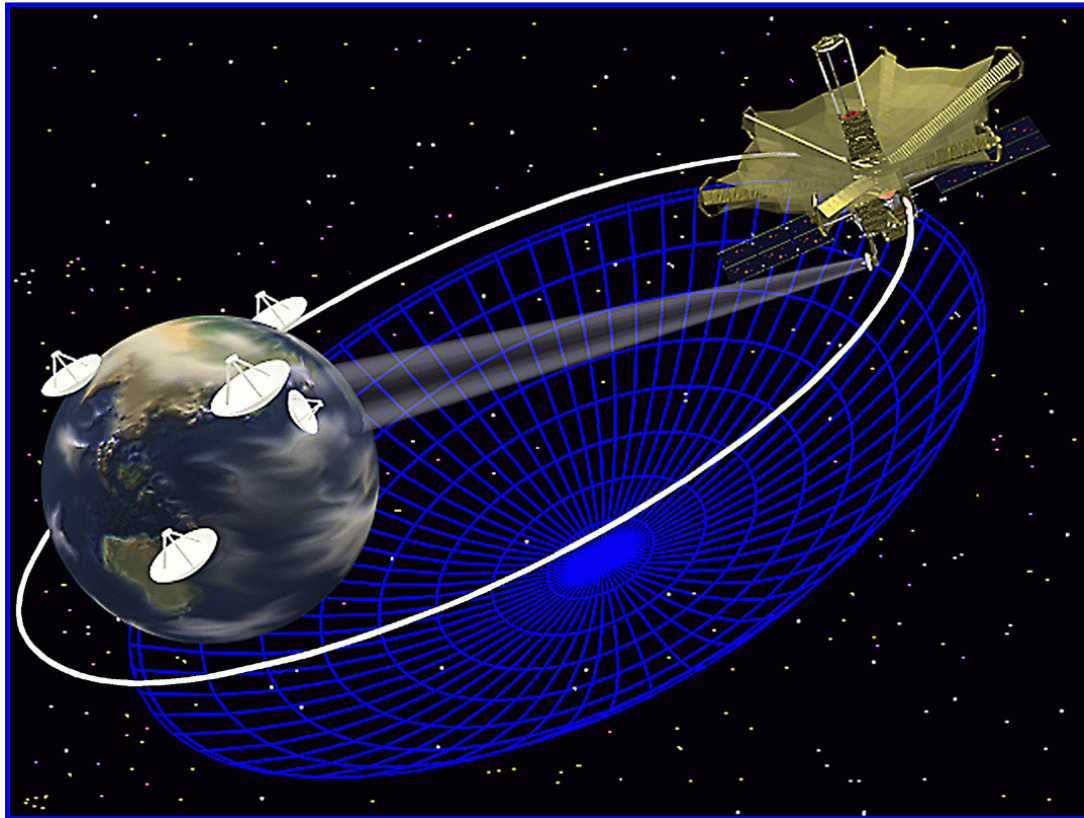
**Abbildung 1a** zeigt die Intensitätsverteilung bei 3,5 mm im Zentrum des Quasars 3C273 für 2 Epochen. Die Winkelauflösung beträgt 0,15 x 0,60 Millibogensekunden in N/S- bzw. O/W-Richtung; dies entspricht einer Auflösung von 0,9 x 3,6 Lichtjahren. Die beiden Bilder sind abgeleitet von Messungen mit (nur) drei (1994) und vier Stationen (1995), so daß nur die hellsten Teile der Quelle zu sehen sind. Man sieht deutlich die Bewegung von Strahlungskomponenten, die entlang der Quellenachse (= Jet-Richtung) mit scheinbarer Überlichtgeschwindigkeit erfolgt. Rückwärts-Extrapolation ergibt, daß die Ejektion der Komponenten in zeitlicher Nähe eines Gammastrahlen-Ausbruchs erfolgte, dem auch ein starker Anstieg der gesamten Energieflußdichte im cm- und mm-Wellen-Bereich folgte.



**Abbildung 1b** zeigt die Intensitätsverteilung bei 3,5 mm den Quasar in 3C454.3. Das Bild basiert auf Beobachtungen, Anfang 1996, mit einem 6-Stationen-Netzwerk, mit je drei Stationen in Europa und den USA. Die Winkelauflösung beträgt 70 Millionstel Bogensekunden entsprechend 1 Lichtjahr. Die Bilddynamik beträgt 200:1. Der "Jet" ist in transversaler Richtung aufgelöst. Die Linie größter Helligkeit entlang des Jets verläuft gekrümmt und weist transversale Oszillationen und Versetzungen (Knicke) auf Muster, die typisch sind für Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten in einer relativistischen Strömung.

In den letzten Jahren gab es bereits mehrere erfolgreiche Pilotmessungen bei 1,4-mm-Wellenlänge. Dabei gelang u.a. der erstmalige Nachweis der ultrakompakten Quelle in Sgr A\* auf der 1150 km langen Interferometerbasis zwischen Granada und dem Plateau de Bure. Die Meßdaten reichten noch nicht aus zur Erstellung eines Radiobildes. Aber sie enthalten die interessante Information, daß im Meßobjekt auf der Winkelskala von Zehntausendstel Bogensekunden Struktur vorhanden ist, und sie erlaubten eine erste Abschätzung für den Durchmesser von Sgr A\* zu etwa 20 Schwarzschildradien, wenn sich im Inneren der Quelle ein Schwarzes Loch von 2,6 Millionen Sonnenmassen befindet. Erste VLBI-Messungen mit einem transatlantischen 5-Stationen-Netzwerk bei 1,4-mm-Wellenlänge wurden kürzlich durchgeführt und befinden sich noch in der Auswertung.

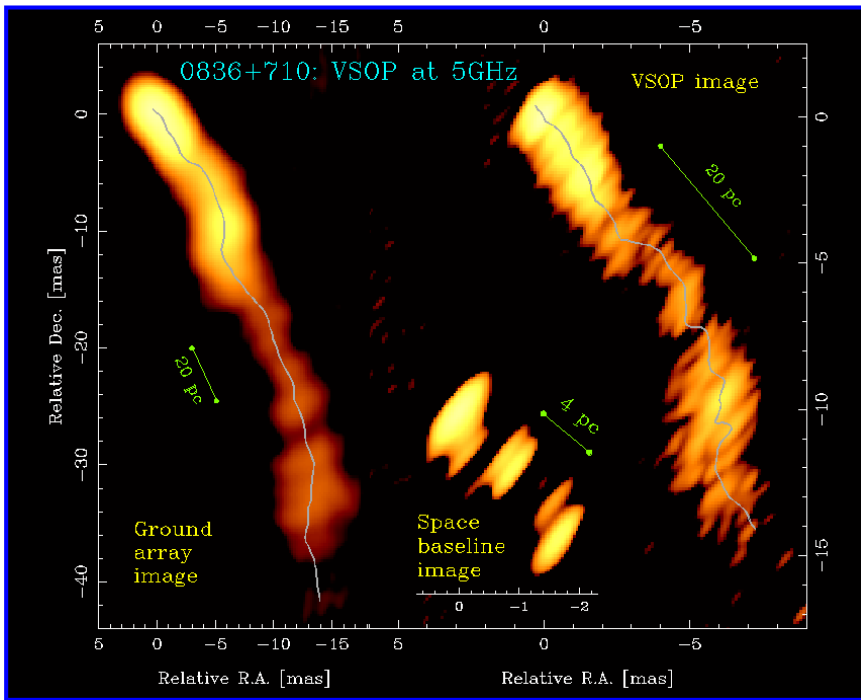
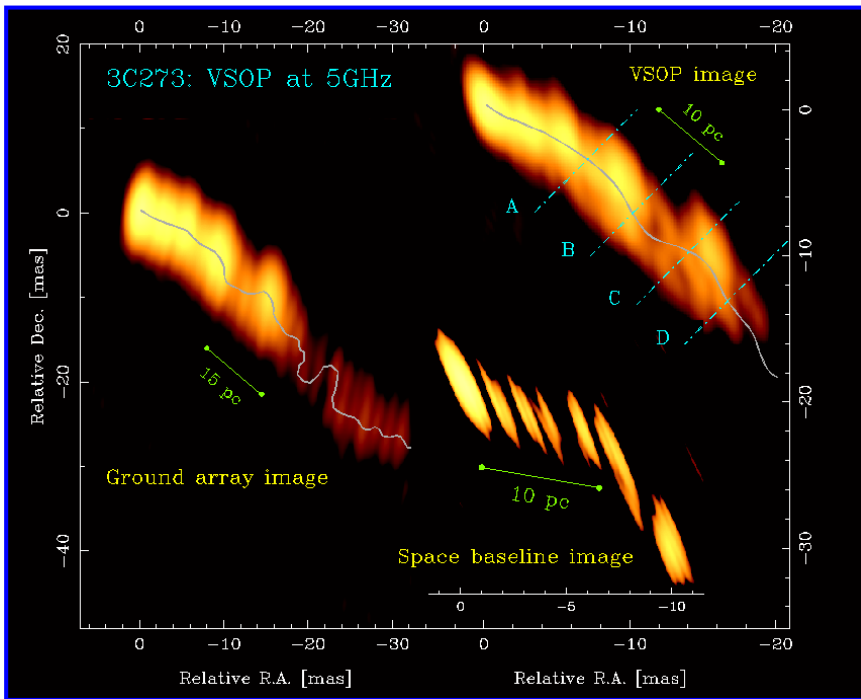
**Weltraum-VLBI - Radioteleskope größer als die Erde.** Die Idee, eines Tages eine oder mehrere Antennen in Erdumlaufbahn mit Radioteleskopen auf der Erde interferometrisch zu vernetzen, ist fast so alt wie die VLBI-Interferometrie selber. Die technische Machbarkeit wurde erstmals 1986/88 mit Hilfe eines der TDRSS-Satelliten (Tracking and Data Relay Satellite System der NASA) demonstriert. Im September 1997 nahm das japanische Projekt VSOP mit seiner 8-m-Antenne in erdnaheer Umlaufbahn (**Abb. 2**) seinen regulären Beobachtungsbetrieb bei 18 cm und 6 cm auf. Das 1,3-cm-Empfangssystem ist leider durch Beschädigung beim Start ausgefallen.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Mission VSOP. Die VSOP-Antenne umrundet die Erde auf einer elliptischen Bahn in 6,3 Stunden. Der erdfernste Punkt der Bahn ist 21440 km, der erdnächste 540 km von der Erdoberfläche entfernt. Die Bahnneigung zum Äquator beträgt 31,5 Grad. Der größte Abstand zwischen der Raumantenne und einer erdgebundenen Antenne kann bis zu etwa 30000 km betragen. Das ist etwa drei bis viermal mehr als in typischen erdgebundenen Netzwerken. Die kurze Umlaufzeit des Satelliten bedeutet, daß das "Superteleskop" von 30000 km Durchmesser in relativ kurzer Zeit "synthetisiert" werden kann. Die Nachweisgrenze für Interferenzsignale zwischen der VSOP-Antenne und dem 100-m-Teleskop liegt bei etwa 0.005 Jansky.

Unmittelbare allgemeine Ziele der VSOP-Mission sind: die Gewinnung von Radiobildern von Aktiven Galaktischen Kernen, die Messung der Strukturvariationen in Objekten mit überlichtschneller Komponentenbewegung, die Messung der Eigenbewegung dieser Komponenten als Funktion der Entfernung, die Bestimmung der "Feinstruktur" von Hydroxyl-Masern und die Bestimmung der Emissionsstruktur von Radiosternen. Diese Aufzählung umfaßt u.a. Objekttypen wie Quasare, Blasare, Radiogalaxien, Gravitationslinsen, OH-Maser, Pulsare und Radiosterne. 15% der Zeit sind reserviert für eine VLBI-Durchmusterung einer größeren Gesamtheit von extragalaktischen Quellen. Ziel dieses Programms ist die Erstellung eines homogenen Datensatzes als Grundlage für statistische Untersuchungen zu Fragen der Physik von starken Radioquellen und ihrer kosmologischen Entwicklung. Einige wichtige spezielle Fragen, die am MPI für Radioastronomie verfolgt werden, sind folgende: Wird die aufgrund des inversen Compton-Effektes erwartete obere Grenze für die Strahlungstemperatur von  $10^{12}$  Grad Kelvin in kompakten Radioquellen tatsächlich erreicht? Wodurch unterscheiden sich kompakte Radioquellen mit starker Gammastrahlung von solchen ohne diese Strahlung? Was ist die detaillierte räumliche Struktur der Radioemission näher am Ursprung der Jets? Was ist die physikalische Natur der Emissionskomponenten? Handelt es sich um bewegte materielle Gebilde oder um Strahlungsmuster, die z.B. von bewegten oder stehenden Schockwellen erzeugt werden?

**Abbildung 3** zeigt beispielhaft als erste Ergebnisse von VLBI-Messungen unter Einschluß der VSOP-Antenne Radiobilder eines relativ nahen und eines weit entfernten Quasars. Bei 3C273 (Abb. 3a) beträgt die Winkelauflösung quer zur Jetrichtung etwa 0.3 bis 0.5 Millibogensekunden oder 1/7 bis 1/5 der Jetbreite. Eine genaue Analyse des Intensitätsprofils entlang der Schnitte A bis D zeigt das Vorhandensein von bis zu drei Maxima, wobei das mittlere dominiert. Dies könnte ein Indiz dafür sein, daß sich hier eine sehr schnelle zentrale Strömung durch eine langsamere hindurchbewegt, wie nach einigen Modellvorstellungen vorgeschlagen. Die Radiobilder von 0836+710 (Abb. 3b) lassen sich deuten als Nahaufnahmen von Instabilitäten in einer relativistischen Plasmaströmung. Nimmt man an, daß die beobachteten Versetzungen durch den am schnellsten wachsenden Mode einer Kelvin-Helmholtz-Instabilität bedingt sind, erhält man 6 als Wert für die Machzahl der Strömung, d.h. für das Verhältnis von Geschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit. Dies impliziert auch einen Betrag der Schallgeschwindigkeit in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit.



**Abbildung 3** zeigt Radiobilder der beiden Quasare 3C273 (Abb. 3a, oben) und 0836 +710 (Abb. 3b, unten) bei 6-cm-Wellenlänge. Sie sind das Resultat von VLBI-Messungen mit der VSOP-Antenne in Kombination mit dem 100-m-Teleskop und dem VLBA. Die Beobachtungen fanden im Dezember bzw. Oktober 1997 statt. Die Wirkung der zugeschalteten Raumantenne wird deutlich durch Vergleich der jeweils drei Teilbilder für jedes Objekt. Beim Teilbild ( $\alpha$ ) sind jeweils nur die Daten des erdgebundenen Netzwerks verwendet, beim Teilbild ( $\beta$ ) sind alle Interferometerdaten und beim Teilbild ( $\gamma$ ) nur die Kombinationen Boden-Raum verwendet. Die Zahlenwerte am Bildrahmen bedeuten Relativabstände in Millibogensekunden. Die Werte für die Bilddynamik der Teilbilder ( $\alpha$ ) und ( $\beta$ ) betragen für 3C273: 4500 und 2100; für 0836 +710: 4600 und 900.

Der nächste sehr deutliche Schritt vorwärts in Richtung hundertmal höherer Empfindlichkeit und sehr viel höherer Winkelauflösung kann durch das bereits erwähnte Projekt ARISE erreicht werden. Dessen Kernstück ist eine 25-m-Antenne in einem elliptischen Erdborbit mit einer Apogäumhöhe im Bereich 40000 bis 100000 km. Der vorgeschlagene Frequenzbereich beträgt 8 bis 86 GHz, die erzielbare Winkelauflösung etwa 15 Millionstel Bogensekunde oder besser. Startzeitpunkt könnte das Jahr 2008 sein. Das generelle Hauptziel der Mission ist die Mehrung unseres Verständnisses von Schwarzen Löchern und den durch die gewaltigen Gravitationskräfte in ihrer Umgebung hervorgerufenen Phänomenen.

Max-Planck-Gesellschaft Jahrbuch 1999. Copyright © 1999 Max-Planck-Institut f. Radioastronomie.

▲ MPIfR-Home

ute\_at\_mpifr-bonn.mpg.de