

Blick in das kalte Weltall: Was Radio- und Infrarotastronomie uns lehren

Mezger, Peter G.

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1993 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.147-160



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

PETER G. MEZGER, Bonn

Blick in das kalte Weltall: Was Radio- und Infrarotastronomie uns lehren*

I. Die frühen Jahre der Radio- und Infrarotastronomie

1. Radioastronomie

Die Geburtsstunde der Radioastronomie läßt sich ziemlich genau angeben. Anfang der 30er Jahre erhielt der Radioingenieur Karl Guthe Jansky von seinem Arbeitgeber, den Bell Telephone Laboratories in New Jersey, USA, den Auftrag, die Natur der atmosphärischen Störungen in dem damals für interkontinentale Nachrichtenverbindungen sehr wichtigen Kurzwellenband um 14.5 Meter-Wellenlänge zu untersuchen. Neben den erwarteten Störungen, z. B. durch Blitzentladungen, fand Jansky 1932 noch eine breitbandige Kontinuumstrahlung, die täglich ein Maximum erreichte, dessen Auftreten sich pro Tag jeweils um rund 4 Minuten verschob. Das ist – wie Jansky richtig erkannte – das Merkmal einer Strahlungsquelle, die sich außerhalb des Sonnensystems befindet. Später konnte Jansky noch nachweisen, daß das Intensitätsmaximum der Strahlung mit dem vermuteten Zentrum des Milchstraßensystems zusammenfiel: Er hatte – wie wir heute wissen – die Synchrotronstrahlung der Milchstraße entdeckt.

Damals aber konnte niemand die Natur dieser Radiostrahlung deuten. Janskys Entdeckung wurde wohl auch deshalb erst ein halbes Jahrzehnt später wieder von dem Radioingenieur und Amateurastronomen Grote Reber aufgegriffen, der im Garten seines Hauses in einem Vorort Chicagos sein eigenes Radioteleskop baute, aufstellte und damit die ersten systematischen Himmelsdurchmusterungen durchführte, die er 1943 veröffentlichte. Der Durchbruch für die Radioastronomie kam mit dem Kriegsende, als die bis dahin hochgeheimen Radar-Laboratorien sich öffneten und eine Schar hochqualifizierter und motivierter Ingenieure und Physiker entließen, die ihr erworbenes Wissen bei der

* Vortrag bei der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 11. Juni 1993.

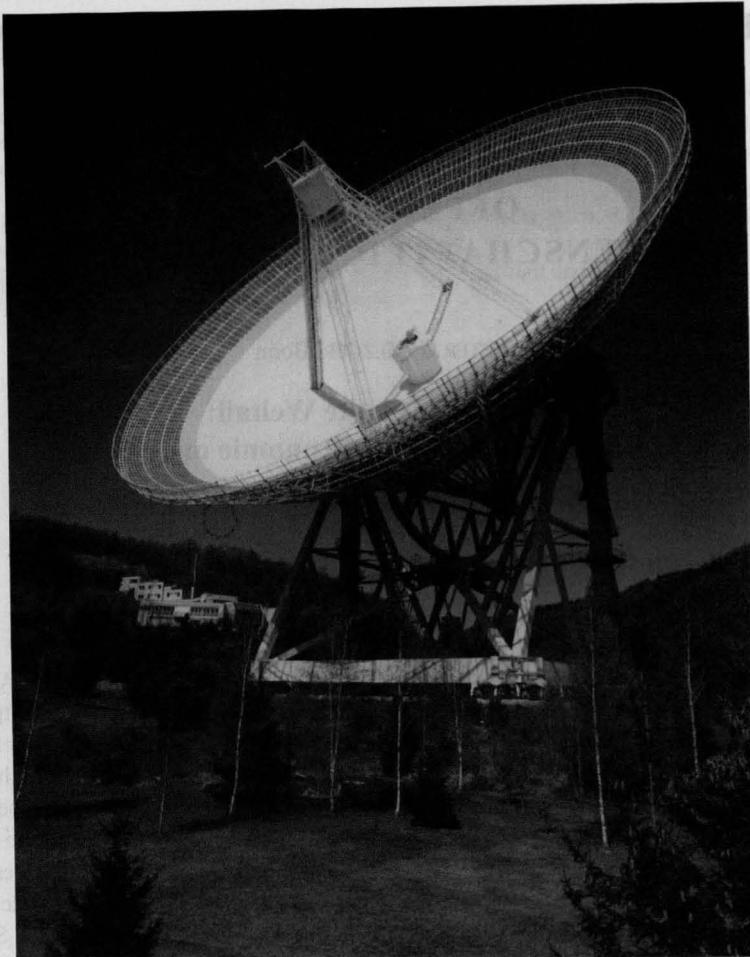


Abbildung 1:

Das 100 m-Radioteleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg, südwestlich von Bonn. Dieses aus Mitteln der VW-Stiftung gebaute Teleskop wird routinemäßig für Beobachtungen bis zu kürzesten Wellenlängen von 7 Millimetern eingesetzt und ist das wichtigste Einzelteleskop in dem internationalen Netz der Radiointerferometrie mit transkontinentalen Basislängen (s. Abb. 3).

Entwicklung von Radargeräten nun auf den Bau von Teleskopen und empfindlichen Empfängern für radioastronomische Beobachtungen anwendeten. Und als im Jahre 1951 die von dem damaligen holländischen Astronomiestudenten Hank van de Hulst bereits in den letzten Kriegsjahren vorhergesagte 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs entdeckt wurde, erkannten auch die meisten Astronomen die Bedeutung dieses neuen Zweigs der beobachtenden Astronomie.

In den Nachkriegsjahren war der deutsche Beitrag zur Entwicklung der Radioastronomie eher passiver Natur. Die deutsche Luftwaffe hatte über tausend Radargeräte vom Typ Würzburg-Riese als Feuerleitgeräte für die Flugzeugabwehr herstellen lassen, deren tiefgezogene 7.5 Meter-Antennen nun die Grundausstattung der meisten radioastronomischen Gruppen in Europa bildeten. In der Bundesrepublik wurde das erste international konkurrenzfähige Radioteleskop mit einem Durchmesser von 25 Metern auf Initiative des damaligen Forschungs-Staatssekretärs Leo Brandt auf dem Stockert, ca. 40 km westlich von Bonn errichtet, und 1956 von der Sternwarte der Universität Bonn in Betrieb genommen. Eine Denkschrift zur Lage der Astronomie, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft initiiert und Anfang der 60er Jahre unter der Leitung von Prof. H. H. Voigt in die Tat umgesetzt, führte unter anderem zur Gründung des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn. Mit großzügiger Unterstützung der VW-Stiftung (vormals: Stiftung Volkswagenwerk) wurde von dem Firmenkonsortium Krupp/MAN, in Zusammenarbeit mit dem MPIfR, das größte vollbewegliche Radioteleskop der Welt mit einem Durchmesser von 100 Metern im ca. 60 km südwestlich von Bonn gelegenen Ort Effelsberg gebaut. Es wurde Anfang der 70er Jahre in Betrieb genommen (Abb. 1).

2. Infrarot-Astronomie

Ausgangspunkt für die Radioastronomie war die völlig unerwartete Entdeckung der Synchrotronstrahlung unserer Milchstraße durch Karl Guthe Jansky. Die Beobachtung, daß Sterne und Planeten einen beträchtlichen Anteil ihrer Leuchtkraft im Nahen Infrarot (NIR, Wellenlänge 0.7–5 μm) emittieren, war dagegen nicht sehr überraschend. Man wußte, daß diese kosmischen Objekte näherungsweise wie schwarze Körper strahlen, deren Spektrum nur durch ihre Oberflächentemperatur und das Plancksche Strahlungsgesetz bestimmt wird. Und so ließ sich leicht abschätzen, daß insbesondere relativ kalte Sterne mit ausgedehnten Atmosphären, aber auch die viel kälteren Planeten im Nahen und Mittleren Infrarot (MIR, Wellenlänge 5–30 μm) lohnende Beobachtungsobjekte sein würden.

Dennoch führten die Beobachtungen von Sternen im NIR zu unerwarteten Ergebnissen. Die bahnbrechenden Arbeiten des amerikanischen Astronomen Robert Trumpler hatten gezeigt, daß der Raum zwischen den Sternen mit kleinsten Staubteilchen ausgefüllt ist, die optisches Licht sehr effizient streuen und absorbieren. Dieser kombinierte Effekt wird in der Astronomie als Staubextinktion bezeichnet. Sie beschränkt optische Beobachtungen in unserer Milchstraße auf Entfernungen von einigen 1.000 Lichtjahren. Da die Staubextinktion mit zunehmender Wellenlänge aber sehr rasch abnimmt, ist ihre Wirkung im Infraroten viel geringer. Es zeigte sich so, daß man im NIR bis in das Zentrum der Milchstraße sehen kann – ein Anblick, der dem optischen Astronomen auf immer verschlossen sein wird.

Als ebenso wichtig sollte sich eine andere Konsequenz der Staubabsorption erweisen, auf die Hank van de Hulst schon 1942 in seiner – allerdings erst 1946 publizierten – Doktorarbeit hingewiesen hatte. Staubteilchen absorbieren Sternlicht sehr effizient und

werden dadurch aufgeheizt. Die mittlere Strahlungsdichte des „verdünnten“ Sternlichts entspricht der einer Planckschen Strahlung von drei Kelvin. Da aber Staubteilchen im optischen Bereich viel effizienter absorbieren als sie im langwelligen Bereich emittieren können, müssen sie sich auf höhere Temperaturen um etwa 20 K erwärmen, um das absorbierte Sternlicht wieder abstrahlen zu können. Dort, wo Staub von der Sternstrahlung weitgehend abgeschirmt ist, z. B. im Inneren riesiger Molekülwolken, ist die Staubtemperatur noch wesentlich niedriger. Die Strahlung des kalten Staubs, deren Bedeutung für die Diagnostik des physikalischen Zustands dichter Wolkenkerne erst in den letzten Jahren richtig erkannt wurde, läßt sich daher am besten im Fernen Infrarot (FIR, Wellenlänge 30–350 μm) beobachten. Nur in der unmittelbaren Umgebung massereicher und daher leuchtstarker Sterne steigen die Staubtemperaturen bis zu einigen hundert Kelvin. Dieser warme Staub läßt sich am besten im MIR beobachten.

Ebenso wie die Radiotechnologie im dm- und cm-Wellenlängenbereich, hatte auch die Technologie der Infrarot-Detektoren im Zweiten Weltkrieg einen enormen Auftrieb erfahren, hauptsächlich jedoch im Nahen und Mittleren Infrarot. Infrarot-Beobachtungen in diesen Wellenlängenbereichen wurden in den Nachkriegsjahren mit bodengestützten Teleskopen und kommerziell verfügbaren Detektoren aufgenommen. Dagegen ist die Erschließung des FIR-Bereichs fast ausschließlich das Verdienst des amerikanischen Physikers Frank Low. Er entwickelte in den 60er Jahren zunächst bei der Halbleiterfirma Texas Instruments und später am National Radio Astronomy Observatory (NRAO) in Green Bank, West Virginia, USA, das mit Gallium dotierte Germanium-Bolometer, das noch heute der Standard-Detektor im FIR-Bereich ist. Bei diesen Wellenlängen ist die Erdatmosphäre undurchlässig und Beobachtungen müssen von Raumplattformen oder Forschungsflugzeugen oberhalb der Troposphäre (die je nach Jahreszeit und geografischer Breite 10 bis 14 km hoch liegt) ausgeführt werden. Das Kuiper Airborne Observatory (KAO) – eine umgebaute vierstrahlige Düsen-Transportmaschine mit einem 90 cm-Teleskop an Bord – und der 1983 gestartete Infrared Astronomical Satellite (IRAS) der NASA – wenn auch mit Photoleitern anstatt der kältetechnisch wesentlich anspruchsvolleren Bolometer ausgerüstet – verhalfen der Infrarotastronomie zum endgültigen Durchbruch. IRAS entdeckte während seiner anderthalbjährigen Lebenszeit mehr als 250.000 IR-Quellen. Das KAO ist auch heute noch eines der erfolgreichsten raumgestützten Teleskope. Es soll in den nächsten Jahren durch einen leistungsfähigeren B747-„Jumbo-Jet“ abgelöst werden. An diesem Projekt – SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) – will sich auch die Bundesrepublik mit ca. 20% der Kosten beteiligen.

II. Was lehren uns Radio- und Infrarotastronomie

1. Sterne und interstellare Materie

Nach unserem derzeitigen Erkenntnisstand begann das Weltall vor 10 bis 15 Milliarden Jahren aus einem Zustand extrem hoher Dichte und Temperatur zu expandieren – ein Ereignis, das man als Urknall oder „Big Bang“ bezeichnet. Als Folge der Expansion kühlte sich das Weltall mit der Zeit stetig ab. Man versteht heute die physikalischen Vorgänge, die etwa eine Sekunde nach dem Urknall und später abliefen. Für eine annahmefreie Beschreibung der physikalisch außerordentlich wichtigen Vorgänge während der ersten Sekunde fehlt noch die Kenntnis der Physik bei extrem hohen Temperaturen und Dichten. Trotzdem ist das Gedankengebäude der heutigen Kosmologie nicht auf Sand gebaut. Während der ersten 300.000 Jahre seiner Entwicklung befand sich das Weltall im thermodynamischen Gleichgewicht – abgesehen von seiner Expansion sowie dem durch Temperaturabfall bedingten Ausfrieren der stabilen Elementarteilchen Baryonen (Kernbausteine) und Elektronen und einer geringfügigen Asymmetrie von Materie und Antimaterie. Erst wenn bei Temperaturen von einigen 1.000 K Atomkerne – zu diesem Zeitpunkt hauptsächlich Wasserstoff- und Heliumkerne – sich mit freien Elektronen zu Atomen vereinigen und als Folge davon Strahlung und Materie entkoppeln, beginnen diese ihr Eigenleben in dem expandierenden Weltall zu führen. Die als „primordial“ bezeichnete Strahlung, die nach einer weiteren Expansion des Weltalls von 10 bis 15 Milliarden Jahren nun auf 2,7 K über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt ist, wurde 1965 völlig unerwartet von den amerikanischen Radioastronomen Penzias und Wilson entdeckt. Der endgültige Nachweis, daß es sich wirklich um die primordiale Strahlung handelte, gelang erst zehn Jahre später mit einem auf einer Ballongondel stationierten Bolometer, das mit einem Fourierspektrometer kombiniert das gesamte Spektrum dieser kosmischen Hintergrundstrahlung vermaß. Es entspricht – innerhalb der sehr hohen Meßgenauigkeit – exakt dem Spektrum eines schwarzen Körpers von 2,7 K.

Das Photonengas der Hintergrundstrahlung erfüllt das Weltall zu jedem Zeitpunkt gleichmäßig. Dagegen verstärkten sich statistische Schwankungen der Materie, die schon vor der Entkopplung von Strahlung und Materie existiert haben mußten, nach der Entkopplung unter dem Einfluß der Schwerkraft immer mehr, bis einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall die Protogalaxien – d. h. die Vorläufer unserer heutigen Galaxien – entstanden. Wie das genau verlief, ist noch Gegenstand kontrovers geführter Diskussionen. Die heute bevorzugte Hypothese ist, daß die Protogalaxien durch Zusammenballung kleinerer und größerer Materie-Kondensationen entstanden, die zusammen aber nur einige Prozent der Gesamt-Massendichte des Weltalls ausmachen. Der überwiegende Anteil der Massendichte wird in diesem Modell von nichtbaryonischer Materie – d. s. vermutlich noch gar nicht entdeckte exotische Elementarteilchen – beigetragen. Diese nicht-baryonische Masse wird häufig als „Dunkle Materie“ bezeichnet.

Wie immer es zu ihrer Entstehung kam, die Protogalaxien, also die Vorgänger unserer heutigen Sternsysteme, dürften etwa hundert Millionen Jahre nach Beginn der Expansion als rotierende Gaskugeln – im wesentlichen aus Wasserstoff und Helium beste-

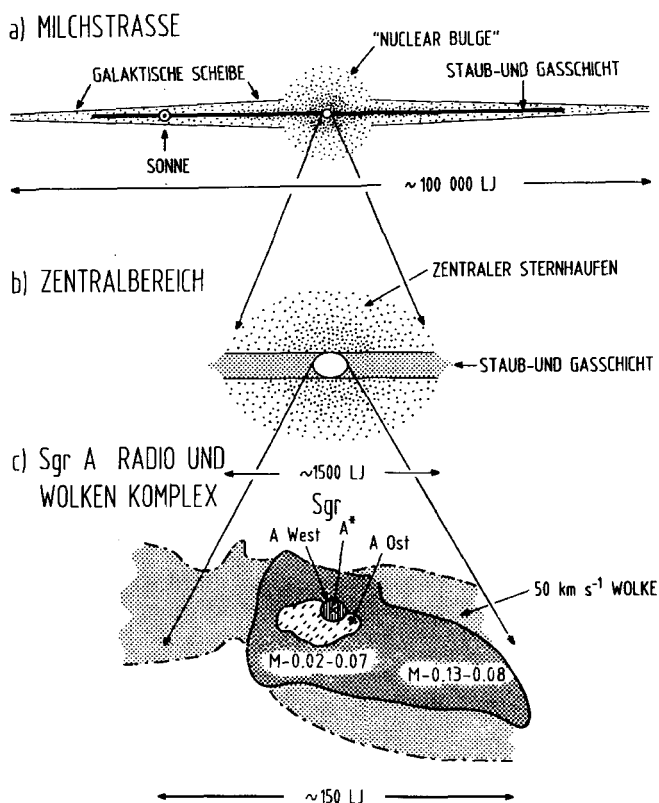


Abbildung 2

- a) Die Galaktische Scheibe von der Seite gesehen. Diese Scheibe ist in einen im Bild nicht gezeigten nahezu kugelförmigen Halo eingebettet, der etwa die gleiche Masse wie die galaktische Scheibe hat.
- b) Der Zentralbereich, der eine intensive Radio- und Infrarotstrahlung emittiert, hat einen Durchmesser von etwa 1.500 Lichtjahren.
- c) Der Radio- und Wolkenkomplex Sgr A hat einen Durchmesser von etwa 150 Lichtjahren. Er besteht aus der Synchrotronpunktquelle Sgr A*, die das Zentrum bildet und in die H⁺-Region Sgr A West eingebettet ist. Östlich davon liegt die ausgedehnte Synchrotron-Radioquelle Sgr A Ost, die ihrerseits in eine kompakte Riesen-Molekülwolke eingebettet ist.

hend – ihren Entwicklungsweg begonnen haben. Als die Schwerkraft den inneren Druck der sich abkühlenden Gaskugeln überstieg, begannen diese zu kollabieren. Die Erhaltung des Drehimpulses erzwang dabei den Zusammensturz des Gases parallel zur Rotationsachse und führte dadurch fast zwangsläufig zu der scheibenförmigen Struktur der Spiralgalaxien (siehe Abb. 2a). Der Zusammensturz des Gases erfolgt aber auch auf viel kleineren Masseskalen und endet schließlich in der Bildung von Sternen, bei denen – wie im Kern unserer Sonne – die Verschmelzung von vier Wasserstoffkernen in einen He-

liumkern die Energie liefert, um Schwerkraft und inneren Druck im Gleichgewicht zu halten. Sterne bildeten sich aber schon, bevor aus der rotierenden Protogalaxie eine scheibenförmige Spiralgalaxie wurde. Diese Sterne der ersten Generation bilden den nahezu kugelförmigen (in der schematischen Darstellung Abb. 2a nicht gezeigten) Halo. Gegen das Zentrum der rotierenden Galaxie steigt die Sterndichte an. Das Zentrum des als „nuclear bulge“ bezeichneten Sternenvulsts bildet der in Abb. 2b gezeigte zentrale Sternhaufen. Die interstellare Materie, ein Gemisch aus Wasserstoff (~ 70 %), Helium (28%) und schwereren Elementen (2 %), die zum Teil als Staubeilchen auskondensiert sind, ist zu einer dünnen Scheibe zusammengepreßt.

Sterne sind also rotierende Plasmakugeln mit einem Fusionsreaktor im Zentrum. Die Plasmatemperatur fällt nach Außen stetig ab und erreicht an der Sternoberfläche – je nach Sternmasse – Werte zwischen 3.000 und 50.000 K. Mehr als 95 % des ursprünglichen Wasserstoff- und Heliumgases ist in unserer Milchstraße heute in Sterne mit Massen zwischen $\frac{1}{10}$ und hundert Sonnenmassen transformiert worden. Dabei haben die massereichen Sterne mit ihrem hohen Energieverbrauch eine kurze Lebenszeit von nur einigen Millionen Jahren. In ihren Spätstadien laufen noch weitere Kernreaktionen ab. Die äußeren Hüllen der so mit schwereren Elementen angereicherten Sterne werden vor dem Sterntod an die interstellare Materie zurückgegeben, die auf diese Weise bis heute mit massenmäßig einigen Prozent schwereren Elementen angereichert wurde.

2. Radioastronomie und optische Astronomie konkurrieren nicht, sondern ergänzen sich

Was beobachtet nun der Radioastronom und was der optische Astronom? Eine prinzipielle Antwort darauf gibt das Plancksche Strahlungsgesetz, das besagt, daß ein schwarzer Körper mit der Temperatur T bei der Wellenlänge $\lambda_{\max} = 5300/T$ mit maximaler Intensität strahlt. Setzt man hier die Oberflächentemperaturen von Sternen ein, dann ergibt sich, daß deren maximale Intensität zwischen $1.3 \mu\text{m}$ und $0.1 \mu\text{m}$ erreicht wird, also den gesamten Bereich des sichtbaren Lichts ($\sim 0.3 \div 0.7 \mu\text{m}$) und Teilbereiche des NIR und Ultravioletten einschließt. Die interstellare Materie dagegen, die aus Staub und Gas besteht, erreicht – abgesehen von der unmittelbaren Umgebung sehr heißer und massereicher Sterne – Temperaturen von nur einigen zehn K über dem absoluten Nullpunkt. Während der Staub, wie bereits erwähnt, eine Kontinuumstrahlung emittiert, die sich näherungsweise durch das Plancksche Strahlungsspektrum darstellen läßt, emittiert das Gas Spektrallinien von Spurenmolekülen wie CO, CS, NH₃ und H₂CO, deren Rotationspektren im mm- und submm-Bereich einsetzen. Das häufigste Molekül, H₂, hat selbst keine beobachtbaren Spektrallinien. Das „Kalte Weltall“ läßt sich daher nur im Ferninfrarot- und Millimeterwellenbereich untersuchen. Die niedrigste Gleichgewichtstemperatur im Weltall ist durch die 2.7-K-Hintergrundstrahlung bestimmt. Diese erreicht ihr Maximum bei der Wellenlänge 2 mm.

Man könnte so zu dem Schluß kommen, daß im Bereich der Radiowellen keine astrophysikalisch interessanten Objekte beobachtet werden könnten, hätte nicht Jansky 1932 die Existenz einer kosmischen Radiostrahlung im Kurzwellen-Radiobereich bei 14.5 m-

Wellenlänge entdeckt. In den Nachkriegsjahren zeigten dann die Beobachtungen im Wellenlängenbereich der „klassischen“ Radioastronomie – d. h. bei $\lambda > 1$ cm – daß die Intensität dieser Radiostrahlung mit abnehmender Wellenlänge sehr stark abnimmt; ein Hinweis darauf, daß es sich hierbei nicht um die Strahlung schwarzer Körper handeln kann. Aber erst in den 50er Jahren wurde erkannt, daß diese Kontinuum-Radiostrahlung aus zwei Komponenten besteht, die beide von – im allgemeinen durchsichtigen – kosmischen Plasmen emittiert werden. Als Plasma bezeichnet man ganz allgemein ein ionisiertes Gas. In der Umgebung massereicher heißer Sterne ionisiert z. B. deren UV-Strahlung das Gas, dessen Plasmatemperatur dann bei etwa 10.000 K liegt. Die abgestrahlte Kontinuumstrahlung wird als Frei-Frei-Strahlung oder thermische Plasmastrahlung bezeichnet. Sie entsteht, wenn ein Elektron im Coulombfeld eines positiv geladenen Ions abgelenkt wird. Solche thermischen Plasmen strahlen auch im optischen Bereich und haben als Gasentladungsröhren eine wichtige Anwendung gefunden.

In nicht-thermischen oder „relativistischen“ Plasmen dagegen werden die Elektronen durch heute noch nicht voll verstandene Prozesse bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Gelangen sie in ein Magnetfeld, dann werden diese relativistischen Elektronen auf Spiralbahnen abgelenkt und emittieren dabei eine „Synchrotronstrahlung“, deren Strahlungstemperatur Werte bis zu 10^{12} K erreichen kann. Der Name rührt daher, daß diese Strahlung erstmals in Elektronenbeschleunigern, den sog. Synchrotronmaschinen, als bläuliches Licht entdeckt wurde. Solche Synchrotron-Strahlungsquellen spielen heute als Ultraviolett- und Röntgenquellen in der experimentellen Laborphysik aber auch in der medizinischen und technologischen Anwendung eine wichtige Rolle.

III. Die Entwicklung der modernen Radioastronomie

Zwei Ziele bestimmten die Entwicklung der modernen Radioastronomie: Die Verbesserung des Winkelaufklärungsvermögens und die Ausdehnung des Beobachtungsbereichs hin zu immer kürzeren Wellenlängen.

1. Radiointerferometrie

Als Winkelaufklärungsvermögen bezeichnet man den kleinsten Winkelabstand, in dem zwei Punktquellen am Himmel gerade noch als zwei getrennte Quellen beobachtet werden können. Es wird durch das Verhältnis von Wellenlänge zum Reflektordurchmesser bestimmt. Das 100 m-Teleskop in Effelsberg (Abb. 1) z. B. hat bei 1 cm-Wellenlänge ein Auflösungsvermögen von etwa 1 Bogenminute. Das menschliche Auge hat trotz seines Linsendurchmessers von nur wenigen Millimetern wegen der 10.000 mal kleineren Wellenlänge dasselbe Winkelaufklärungsvermögen. Das Auflösungsvermögen der größten optischen Teleskope liegt – bedingt durch die Turbulenz der Erdatmosphäre – bei einigen zehntel Bogensekunden.

Die Radioastronomie schien so gegenüber der optischen Astronomie hoffnungslos benachteiligt zu sein. Denn bei den noch viel längeren Wellenlängen und kleineren Ra-

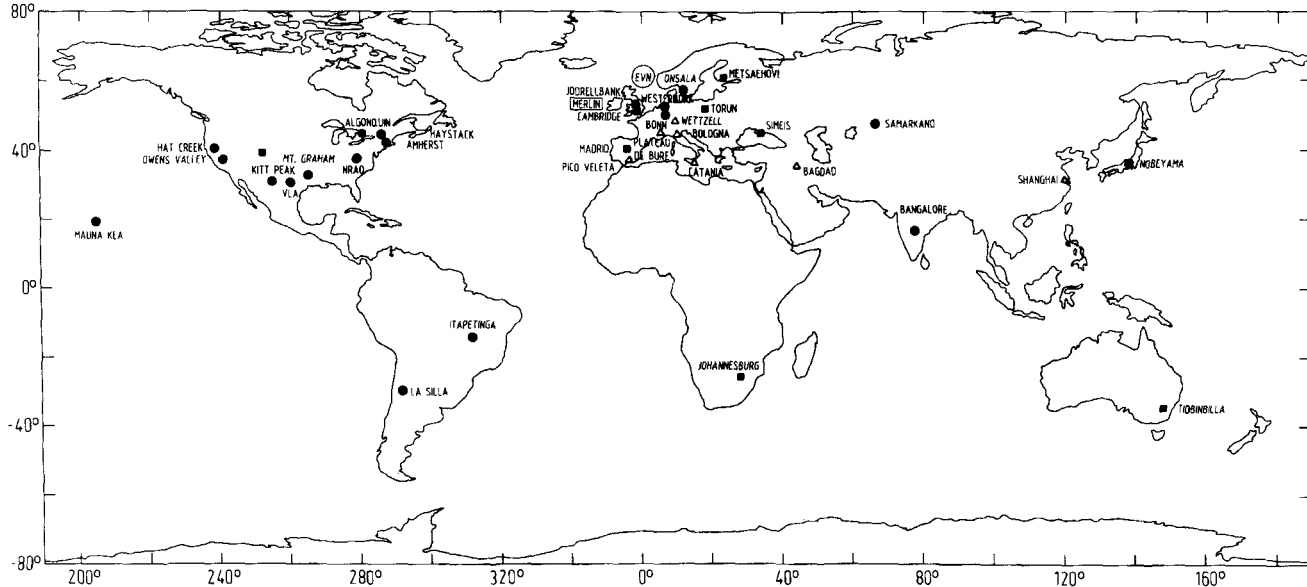


Abbildung 3:

*Schematische Darstellung der Radioteleskope, die das Netzwerk „Interferometrie mit interkontinentalen Basislängen“ bilden.
Diese Teleskope werden überwiegend als Einzelteleskope betrieben.
Der zeitweise Zusammenschluß zu einem Array stellt einen der bemerkenswertesten Erfolge wissenschaftlicher Selbstorganisation dar.*

dioteleskopen der Gründerjahre waren Winkelauflösungsvermögen im Bogengradbereich die Norm. Doch die Einführung des Interferometrieprinzips veränderte diese Situation – erst in kleinen Schritten, dann in dramatischer Weise. Zwei Antennen, im Abstand d Meter voneinander plazierte, die dieselbe Radioquelle beobachten und in geeigneter Weise zusammengeschaltet sind, ergeben im Prinzip dieselbe Information über die Größe einer Radioquelle wie ein einzelnes Radioteleskop mit dem Reflektordurchmesser $D = d$ Meter. Die konsequente Anwendung dieses Prinzips führte zur Entwicklung der Array-Teleskope mit Winkelauflösungsvermögen von einigen zehntel Bogensekunden und schließlich zur transkontinentalen Interferometrie, wo Radioteleskope in verschiedenen Kontinenten zu einem Array-Teleskop zusammengeschaltet werden. Abbildung 3 zeigt ein schematisches Bild des Very Long Baseline Interferometry-(VLBI)-Netzwerkes. Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn spielt in diesem Netzwerk eine zentrale Rolle und betreibt zudem das europäische Auswertezentrum für VLBI-Beobachtungen. Mit diesem Interferometrie-Verfahren werden heute Winkelauflösungsvermögen von weniger als einer tausendstel Bogensekunde erreicht. Der beobachtenden Radioastronomie werden dadurch Phänomene zugänglich, die optischen Beobachtungen für immer verschlossen bleiben werden.

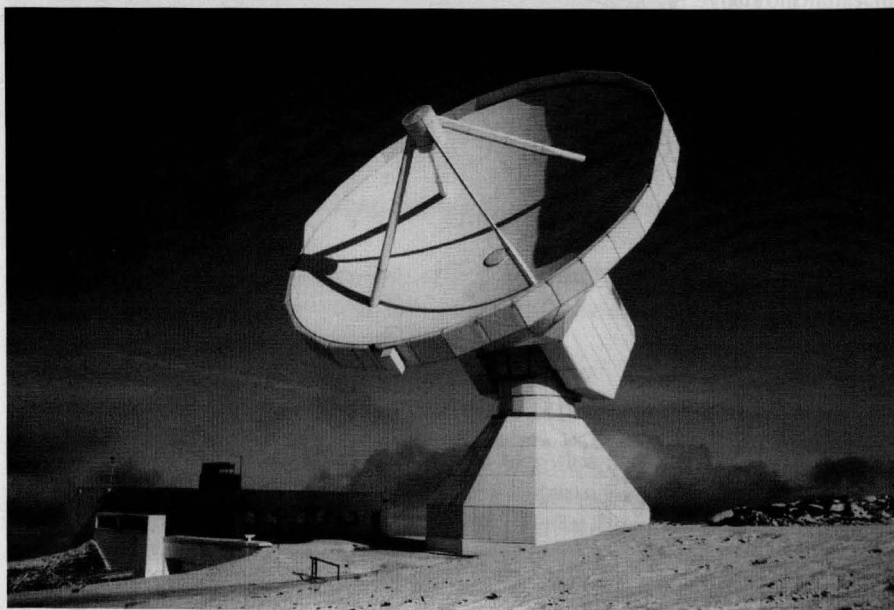


Abbildung 4:

Das vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie mit dem Firmenkonsortium Krupp/MAN auf dem Pico Veleta in der südspanischen Sierra Nevada erbaute 30 m-Teleskop ist das zur Zeit leistungsstärkste Instrument im Bereich um 1 Millimeter-Wellenlänge. Es wurde von der VW-Stiftung finanziell gefördert und wird von dem deutsch-französisch-spanischen Institut für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM) betrieben.

2. mm/submm-Teleskope

Der Ausdehnung radioastronomischer Beobachtungen hin zu den kürzeren Wellenlängen des submm- und FIR-Bereichs stehen zwei Hindernisse entgegen: Die Durchlässigkeit der Erdatmosphäre nimmt im Millimeterbereich immer stärker ab; unterhalb von 0.35 mm-Wellenlänge ist die Atmosphäre undurchlässig und Beobachtungen sind nurmehr von Raumplattformen – hochfliegenden Forschungsflugzeugen, Ballonen und Satelliten – oberhalb der Troposphäre aus möglich. Doch schon in den „Fenstern“ der längeren Wellenlängen im mm-Bereich wird die Durchlässigkeit durch den Wasserdampfgehalt der Erdatmosphäre bestimmt, weshalb mm/submm-Teleskope in Höhen zwischen 3–4.000 Meter stationiert werden. Außerdem darf die Oberfläche des Parabolreflektors nur weniger als $\frac{1}{20}$ der Wellenlänge von einer Parabolform abweichen. Das erfordert z. B. für ein Teleskop, mit dem bei 1 mm-Wellenlänge beobachtet werden soll, eine Reflektorgenauigkeit von 50 μm .

Abbildung 4 zeigt eines der leistungsstärksten Radioteleskope für Beobachtungen im mm-Bereich mit einem Reflektordurchmesser von 30 Metern. Es wurde mit Mitteln der VW-Stiftung gefördert und von einer Projektgruppe, bestehend aus dem Firmenkonsortium Krupp und MAN, zusammen mit dem MPIfR entwickelt und Anfang der 80er Jahre auf der Schulter des Pico Veleta in der spanischen Sierra Nevada in knapp 3.000 m Höhe errichtet. Es wird heute von dem deutsch-französisch-spanischen Institut für Radioastronomie im mm-Bereich (IRAM) als internationale Kooperation betrieben. Abbildung 5 zeigt ein noch genaueres Teleskop von 10 m-Durchmesser, das von derselben Projektgruppe entwickelt und Anfang der 90er Jahre auf dem 3.200 m hohen Mt. Graham im US-Bundesstaat Arizona errichtet wurde und gemeinsam mit der Universität von Arizona betrieben werden wird. Der Bau dieses Teleskops, bei dem erstmals konsequent der Verbundwerkstoff kohlefaserverstärkter Kunststoff eingesetzt wurde, wurde von der Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung finanziell gefördert. Es soll den gesamten submm-Bereich für die Radioastronomie erschließen.

Für noch kürzere Wellenlängen müssen, wie bereits erwähnt, Teleskope auf hochfliegenden Flugzeugen und auf Satelliten eingesetzt werden. Auch hier ist die Astronomie der BRD über die Raumfahrtagenturen ESA und NASA stark engagiert. Doch die Kosten von Satellitenexperimenten sind sehr hoch und die derzeitige Finanzlage in den europäischen Ländern ebenso wie in den USA verzögert die Realisierung der meisten geplanten Projekte immer weiter.

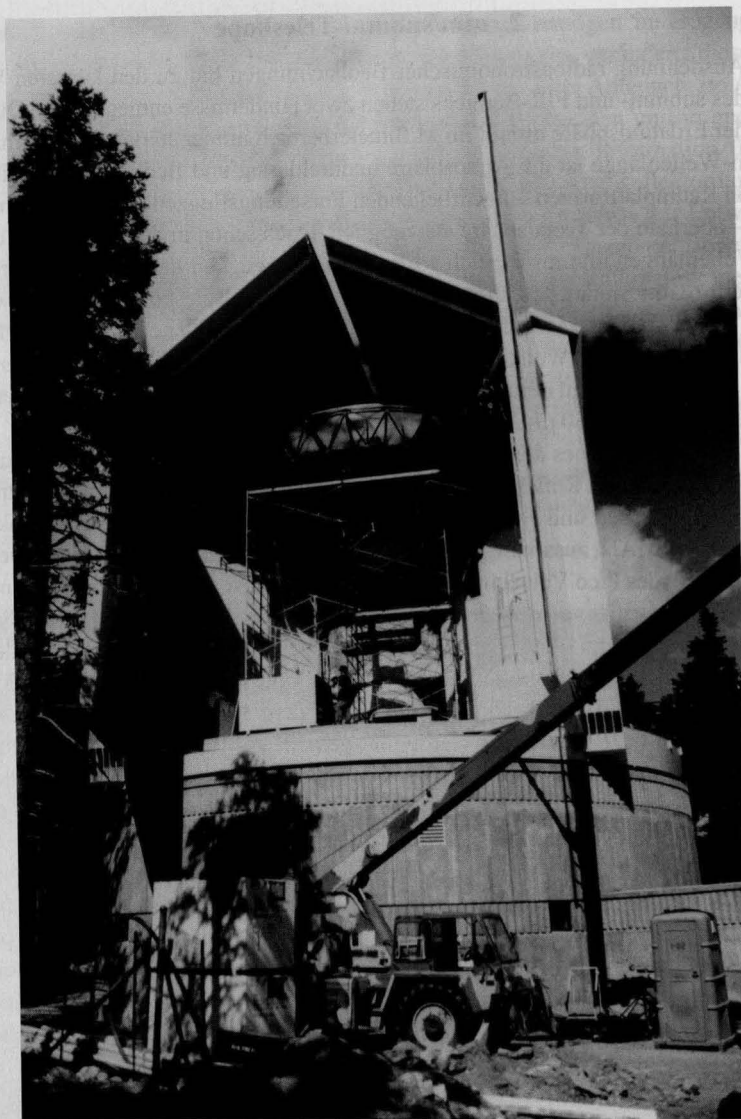


Abbildung 5:

Das vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie mit dem Firmenkonsortium Krupp/MAN auf dem Mt. Graham im US-Bundesstaat Arizona erbaute 10 m-Teleskop soll nach seiner Inbetriebnahme durch MPIfR und das Steward Observatorium der Universität von Arizona das leistungsfähigste Teleskop im submm-Bereich werden. Die Aufnahme zeigt das Teleskop während der Montage im Sommer 1993. Man erkennt das Fachwerk der Reflektor-Tragekonstruktion mit den aufgelegten Paneelen, deren Oberfläche den Parabolreflektor bilden. Fachwerk und Panele sind aus kohlefaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Die metallisierte Reflektoroberfläche wird durch einen bei schlechtem Wetter verschleißbaren Astrodom geschützt. Im Bild erkennt man die aufklappbaren Dachflügel.

IV. Blick in das Zentrum der Milchstraße

Die schematische Darstellung unserer Milchstraße (Abb. 2a) illustriert auch die Schwierigkeit der Erforschung ihrer Struktur von unserem Beobachtungsstandort aus. Der Durchmesser der Milchstraße beträgt etwa 100.000 Lichtjahre, die Sonne ist weit vom Zentrum aber mitten in der dünnen Schicht aus Staub und Gas positioniert. Die Extinktion des Staubs beschränkt optische Beobachtungen in der Milchstraßenebene auf einen Umkreis von wenigen tausend Lichtjahren. Die Erforschung der großräumigen Struktur unseres Sternsystems wird deshalb hauptsächlich mit den Methoden der Radio- und Infrarotastronomie betrieben.

Den Zentralbereichen von Galaxien gilt in jüngster Zeit das besondere Interesse der Astronomen. Aktive Galaxien, die einige Prozent aller Galaxien ausmachen, erzeugen in ihren Zentren – auf Raumskalen von weniger als einem Lichtjahr Durchmesser – Energien, die die Gesamtleuchtkraft der Rest-Galaxie weit übertreffen können. Als „Energieerzeugungsmaschine“ vermutet man ein massereiches Schwarzes Loch, das von einer rotierenden Akkretionsscheibe mit Materie „gefüttert“ wird. Die dabei freigesetzte Gravitationsenergie wird so effizient in Strahlung umgesetzt, daß bis zu 30% der von dem Schwarzen Loch verschluckten Materie in Energie umgewandelt wird. Eine der aktuellsten astrophysikalischen Fragen ist, ob möglicherweise alle Galaxien in ihren Zentren massereiche Schwarze Löcher haben, aber der Grad der Aktivität einer speziellen Galaxie davon abhängt, wie effizient ihr zentrales Schwarzes Loch mit Materie gefüttert wird.

Unsere Milchstraße hat mit Sicherheit keinen aktiven Kern. Radio- und Infrarotbeobachtungen zeigen eine komplexe Struktur der innersten 150 Lichtjahre (Abb. 2c). Die Dichte der Sterne und der interstellaren Materie erreicht dort extrem hohe Werte und im unmittelbaren Zentralbereich finden sich relativistische (in der Abb. als Sgr A Ost bezeichnet) und thermische (Sgr A West) Plasmen, die durch ihre Radiospektren identifiziert wurden. Die mit Hilfe von Spektrallinien und deren Dopplerverschiebung erforschte Dynamik des ionisierten und neutralen Gases im Zentralbereich zeigt, daß sich an der mit Sgr A* bezeichneten Position ein kompaktes Objekt von etwa zwei Millionen Sonnenmassen befindet.

Dieses Beobachtungsergebnis löste eine Suche aus. Die Radioquelle Sgr A*, 1975 mit der Methode der transkontinentalen Interferometrie (VLBI) entdeckt und als kompakte Synchrotron-Radioquelle identifiziert, erwies sich als der beste Kandidat für ein Schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße. Die Anzeichen mehren sich, daß es sich hierbei um ein „hungerndes“ Schwarzes Loch handelt, das mit viel zu wenig Materie gefüttert wird, um seine maximal mögliche Leuchtkraft von etwas mehr als zehn Milliarden Sonnenleuchtkräften zu erreichen. Die Untersuchung der Radioquelle stagnierte dann für Jahre weil es sich herausstellte, daß die VLBI-Beobachtungen nicht die wahre Struktur zeigten, sondern ein durch Elektronenstreuung verzerrtes Bild. Die Erforschung von Sgr A* entwickelte erst wieder neue Dynamik, als die Beobachtungen in den mm- und submm-Bereich vorstießen. So wurde es in den letzten Jahren u. a. dank einer großzügigen Projektförderung durch die VW-Stiftung möglich, VLBI-Beobachtungen in den

mm-Wellenlängenbereich auszudehnen. Das damit erreichte Winkelauflösungsvermögen von einigen zehntausendstel Winkelsekunden, zusammen mit einem Streueffekt an freien Elektronen, der mit dem Quadrat der Wellenlänge abnimmt, machen es nun erstmals möglich, die physikalischen Vorgänge in der unmittelbaren Umgebung eines Schwarzen Lochs zu erforschen.

Die Abbildungen wurden – mit freundlicher Genehmigung der Deutschen Verlagsanstalt – dem Buch „Blick in das kalte Weltall“ entnommen.

Peter G. Mezger
Max-Planck-Institut für Radioastronomie
Auf dem Hügel 69 · 53121 Bonn