

Zeitschrift:	Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri
Herausgeber:	Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe
Band:	54 (1976)
Heft:	2
Artikel:	Radioastronomie
Autor:	Klinger, Hans-Herbert
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-875817

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Radioastronomie¹

Hans-Herbert KLINGER, Bremen

Zusammenfassung. Zuerst werden die Aufgaben der Radioastronomie erläutert. Nachdem die Technik und die verschiedenen Mittel wie Radioteleskope, Parabolantennen, Radiointerferometer und die verschiedenen Empfangseinrichtungen behandelt wurden, wird über die verschiedenen Strahlungsquellen- und -arten berichtet. Die Bedeutung der flare-Sterne, Pulsare, Quasare und der Emissionen von Planeten in der Radioastronomie ist ebenfalls erörtert.

1 Aufgaben der Radioastronomie

Die Aufgabe der Radioastronomie ist die Beobachtung und Untersuchung extraterrestrischer Radio(frequenz)-strahlung, die von Radiosternen (Sonne, flare Sterne, Pulsare), Radiogalaxien, Planeten sowie ganz allgemein von der Milchstrasse und aussergalaktischen Sternensystemen ausgesendet wird. Die Anfänge der Radioastronomie gehen auf 1931 zurück. Bei Untersuchungen über die Herkunft atmosphärischer Funkstörungen bei $\lambda = 14,6$ m stellte der amerikanische Ingenieur K. G. Jansky fest, dass eine Komponente der Störstrahlung, die in empfindlichen Kurzwellenempfängern als Rauschen oder Zischen hörbar ist, seinen Ursprung in unserer Galaxis hat. Diese bedeutsame astrophysikalische Entdeckung wurde seinerzeit kaum beachtet. Erst rund zehn Jahre später begann sich die Wissenschaft für dieses Phänomen zu interessieren, als auch Radiowellen solarer Herkunft im Bereich der Meter- und Zentimeter-Wellen beobachtet wurden. Aus Geheimhaltungsgründen wurde über diese Beobachtungen erst nach Ende des Zweiten Weltkrieges berichtet. In Australien, Grossbritannien, den Niederlanden, Frankreich, Kanada und USA entstanden bald nach Kriegsende Zentren für Radioastronomie. Heute wird radioastronomische Forschung auf internationaler Grundlage betrieben und in fast allen Ländern gibt es Radioobservatorien.

Zur Beobachtung kosmischer Radiowellen kommt hauptsächlich der Wellenbereich zwischen etwa 10 Meter und wenigen Millimeter Wellenlänge in Betracht. Wellen länger als 20 bis 25 m werden von der Ionosphäre in den Weltraum zurückgestrahlt, können also die Erdoberfläche nicht erreichen, während Wellen kleiner als 1 cm durch atmosphärische Gase und Dämpfe (O_2, H_2O, CO_2) absorbiert werden. Trotz dieser Einschränkung ist das radioastronomische Fenster rund 10 Oktaven breiter als das optische Fenster, das der visuellen Beobachtung des Weltraumes zur Verfügung steht. *Figur 1* gibt eine grobe Übersicht über die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die verschiedenen Wellenbereiche des elektromagnetischen Spektrums.

Die Radioastronomie befasst sich heute unter anderem mit folgenden Aufgaben:

1. Untersuchung solarer Radiowellen

¹ Prof. Dipl.-Ing. H.-H. Klinger, Hochschule für Technik, Freie Hansestadt Bremen

Radio-astronomie

Résumé. L'auteur explique d'abord les tâches de la radio-astronomie. Après l'exposé des techniques et des divers moyens mis en œuvre, tels que les radiotélescopes, les antennes paraboliques, les radio-interféromètres et les installations techniques, on présente les différents genres et sources de rayonnement. Le rôle joué en radio-astronomie par les étoiles «flare», les pulsars, les quasars et les rayonnements émis par les planètes est également commenté.

Radioastronomia

Riassunto. Anzitutto vengono spiegati i compiti che incombono alla radioastronomia. Dopo aver trattato la tecnica e i vari mezzi disponibili, come radiotelescopi, antenne paraboliche, radiointerferometri e diversi altri impianti riceventi, si descrivono le molteplici sorgenti e i differenti generi di radiazioni. Si discute anche il significato che hanno nella radioastronomia le stelle «flare», le pulsar, le quasar e le emissioni di pianeti.

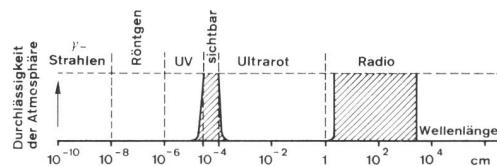


Fig. 1
Durchlässigkeit der Atmosphäre für elektromagnetische Wellen

2. Messung der nichtthermischen kosmischen Kontinuumstrahlung
3. Beobachtung von Radiosternen, zum Beispiel flare Sterne und Pulsare
4. Beobachtung von Radiogalaxien und Quasaren
5. Messung der selektiven Emission und Absorption des interstellaren Wasserstoffs und anderer Moleküle
6. Beobachtung planetarischer Radiostrahlung.

2 Die Technik der Radioastronomie

Die experimentellen Methoden und Hilfsmittel der Radioastronomie entstammten anfangs der Radartechnik, die die Radioastronomie eingeleitet und ermöglicht hat. Standen ursprünglich jene Probleme und Aufgaben im Vordergrund, die mit den bekannten Hilfsmitteln gelöst werden konnten, so hat die Radioastronomie im Laufe ihrer Entwicklung eine selbständige Technik und Arbeitsmethodik hervorgebracht.

21 Radioteleskope

In einem Radioteleskop wird die ankommende Radiofrequenzstrahlung gesammelt. Von dort wird das Signal über eine Leitung einem Empfänger zugeführt, der je nach Frequenzbereich von unterschiedlicher Bauart ist. Schliesslich werden die Ausgangsdaten zur weiteren Bearbeitung gespeichert und von einer Datenverarbeitungsanlage ausgewertet.

Parabolantennen

Die Antennen eines Radioteleskops sind im Prinzip Richtantennen, die sich von jenen der Richtfunktechnik durch grössere Empfangsflächen unterscheiden. Bei Meter-Wellen sind diese Antennen meist Dipolwände oder Yagiantennen, bei Dezimeter-, Zentimeter- und Millimeter-Wellen Parabolantennen. Im Spiegelbrennpunkt liegt entweder ein auf die

zu beobachtende Wellenlänge abgestimmter Halbwellendipol oder ein Horn als Empfangsantenne. Moderne Parabolantennen für Radioteleskope können sowohl um eine horizontale Achse als auch vertikal gegen den Himmel geschwenkt werden, so dass jede Radioquelle am Himmel angepeilt und ständig verfolgt werden kann. Hierzu ist eine aufwendige Steuerungs- und Regeltechnik erforderlich.

Die Eigenschaften eines Radioteleskops kennzeichnet man durch dessen Auflösungsvermögen α beziehungsweise durch den Raumwinkel Ω des Antennen-Richtdiagramms und durch den Gewinn $G = 4\pi/\Omega$. Er gibt an, um welchen Betrag sich die entnehmbare Empfangsleistung ändert, wenn die Richtantenne anstelle einer isotropen Bezugsantenne bei konstanter Feldstärke verwendet wird. Die Größen Ω und G hängen vom Verhältnis der Antennenwirkfläche A zur Wellenlänge λ ab, gemäss

$$\Omega = \frac{\lambda^2}{A} \quad G = 4\pi \frac{A}{\lambda^2}$$

Bei Parabolspiegeln und Dipolwänden ist die Grösse von A etwa das 0,5- bis 0,7fache der geometrischen Antennenfläche. Das Auflösungsvermögen einer Parabolantenne mit einem mittleren Spiegeldurchmesser $D \sim \sqrt{A}$, definiert als Winkelabstand zwischen Hauptmaximum und erstem Beugungsminimum des Antennendiagramms, ist angenähert

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad \text{oder} \quad 70^\circ \frac{\lambda}{D}$$

Vielfach gibt man statt des Auflösungsvermögens (Winkelauflösung), also der Fähigkeit des Radioteleskops zwei benachbarte Quellen getrennt beobachten zu können, die sogenannte Halbwertsbreite an, das heisst den Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten des Antennendiagramms, in denen die Empfindlichkeit auf die Hälfte des Maximums gesunken ist. Für Parabolspiegel mit kreisförmiger Begrenzung ist die Halbwertsbreite

$$2\alpha_{1,2} = 1,05 \frac{\lambda}{D} \quad \text{oder} \quad 59^\circ \frac{\lambda}{D}$$

Im Vergleich zur visuellen Astronomie ist das Auflösungsvermögen eines Radioteleskops wegen der gegenüber Lichtwellen rund millionenfach grösseren Wellenlängen allerdings recht bescheiden, zum Beispiel hat ein Parabolspiegel von 7,5 m Durchmesser bei $\lambda = 1$ m ein Auflösungsvermögen von nur 10° (Halbwertbreite des Antennendiagramms 8°). Das mit ihm zu erhaltende Raster am Himmelsgewölbe ist also sehr grob, hat doch die sichtbare Sonnenscheibe einen Durchmesser von nur $0,5^\circ$. Um eine Bündelung von 1° zu erreichen, müsste bei gleicher Wellenlänge ein 80-m-Spiegel verwendet werden. Wollte man das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges von 1 Bogenminute erreichen, so wäre hierzu sogar ein Antennenspiegel von 5 km Durchmesser bei $\lambda = 1$ m erforderlich.

Das Bestreben, das Auflösungsvermögen von Radioteleskopen zu verbessern, hat zu einer ständigen Vergrösserung der Antennenspiegel einerseits und zu Beobachtungen bei möglichst kurzen Wellen (Zentimeter- und Millimeter-Wellen) anderseits geführt. Die Figuren 2...4 sind Beispiele moderner Radioteleskope. Figur 2 zeigt den Radiospiegel des Radioteleskops des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie, das in der Eifel errichtet wurde. Der Spiegel weist einen Durchmesser von 100 m auf mit einem Verhältnis Brennweite zu Durchmesser $f/D = 0,3$ und wird zur wahlweisen

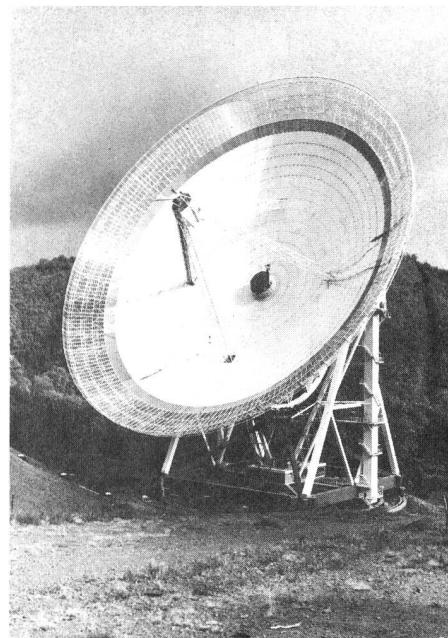


Fig. 2
100-m-Radiospiegel des Max Planck-Instituts für Radioastronomie

Beobachtung bei den Wellenlängen 21 cm, 11 cm, 2,8 cm und 1,8 cm verwendet. Figur 3 zeigt den 64-m-Spiegel des Radioteleskops in Parkes (Australien), mit dem die Radiostrahlung aus dem Kosmos bei 10 cm beobachtet wird. Figur 4 stellt den 22-m-Reflektor des Lebedev-Instituts für Physik, Moskau, dar, der zum Empfang kosmischer Radiowellen von 8 mm dient. Der Bau derartiger Radioteleskope stellt höchste Anforderungen, da die Spiegelfläche um nicht mehr als $\lambda/16$ von der exakten parabolischen Form abweichen darf. Andernfalls sind die im Spiegelbrennpunkt eintreffenden Wellenzüge nicht mehr in Phase und die Signale können sich dann nicht mehr konstruktiv addieren.

Radio-Interferometer

Um das Auflösungsvermögen radioastronomischer Empfangsanlagen zu steigern, ohne dass riesenhafte Antennenspiegel benutzt werden müssen, hat man das Prinzip des Mi-

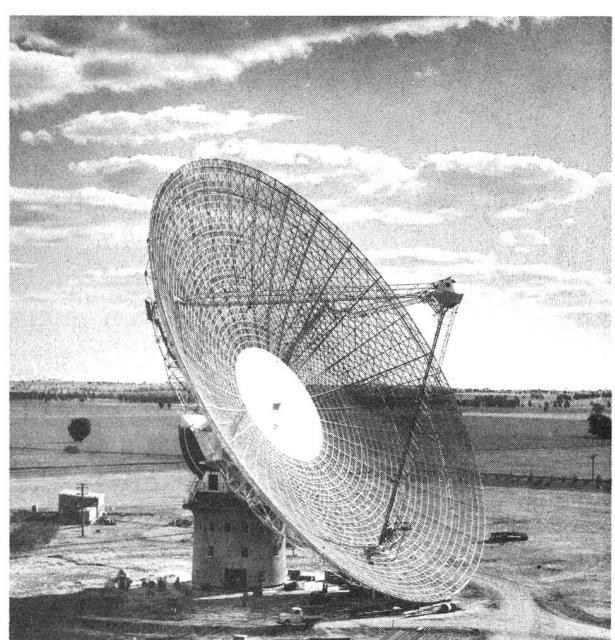


Fig. 3
64-m-Radioteleskop in Parkes (Australien)

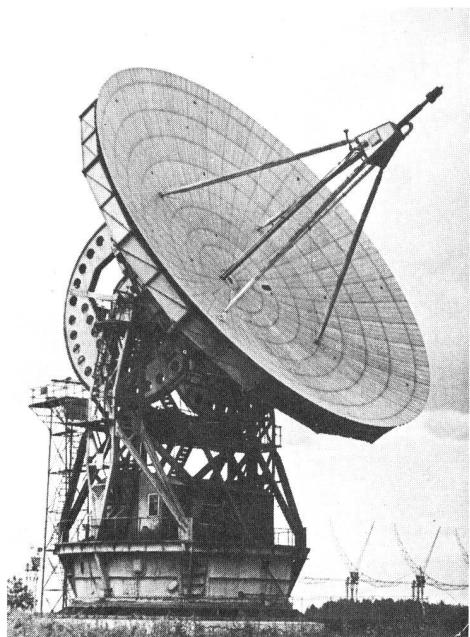


Fig. 4
22-m-Spiegel des Lebedev-Instituts der Universität Moskau für 8-mm-Wellen

chelsonschen Fixsterninterferometers auf die Radioastronomie übertragen. Im einfachsten Fall besteht ein solches Radio-Interferometer aus zwei Richtantennen, beispielsweise Parabolantennen, die im Verhältnis zur Wellenlänge in einem grossen Abstand voneinander in Ost-West-Richtung auf der Erdoberfläche stehen (Fig. 5). Beide Anlagen sind durch eine Hochfrequenzleitung mit einem gemeinsamen Empfänger verbunden, der sich in der Mitte zwischen beiden Antennen befindet. Wenn die angepeilte kosmische Radioquelle im Meridian steht, fallen beide Wellenstrahlen 1 und 2 mit gleicher Phase ein und verstärken sich im Empfänger. Wird das Richtdiagramm der beiden Antennen durch die Erdrotation gegen den Himmel geschwenkt, so treffen die beiden Wellenstrahlen 1 und 2 von der Radioquelle unter den Winkel ϑ mit dem Wegunterschied $x = d \sin \vartheta$ ein. Ist dieser Wegunterschied (Gangunterschied) gleich $\lambda/2$, so sind beide Wellenzüge gegenphasig und heben sich am Empfangsort auf. Bei weiterer Zunahme des Gangunterschiedes wiederholt sich der Vorgang. Während des Durchgangs einer kosmischen Radioquelle durch den Meridian nimmt somit die vom Empfänger angezeigte Intensität periodisch zu und ab.

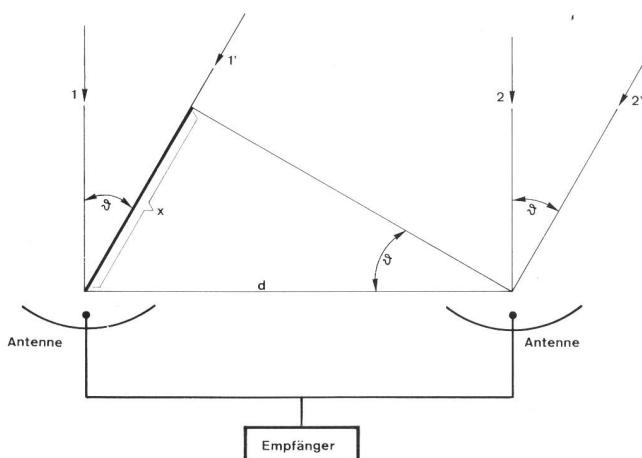


Fig. 5
Prinzip eines Zweiantennen-Radio-Interferometers

Aus dem Zeitpunkt, zu dem die Schwankungen ihr Maximum haben, lassen sich die Rektaszension der Quelle aus der zeitlichen Folge der Maxima deren Deklination bestimmen.

Die Interferenzmaxima sind um so schärfer, und der Augenblick des Meridiandurchgangs einer kosmischen Radioquelle kann um so genauer bestimmt werden, je grösser das Verhältnis der Basisbreite d zur Beobachtungswellenlänge λ ist. Mit zunehmender Basislänge der beiden Antennen wird gleichzeitig auch eine genauere Bestimmung der Deklination der Quelle möglich, weil dann mehr und schärfere Maxima als bei kleinerer Basislänge zustande kommen. In vielen Fällen muss die Winkelauflösung des Interferometers wesentlich kleiner als eine Bogensekunde sein, wie dies zum Beispiel zur Bestimmung von Grösse und Struktur von Quasaren notwendig ist. Die erforderlichen Basislängen von Radio-Interferometern betragen hierbei 100 km und mehr. Anstelle von Kabeln, die beide Antennen verbinden, arbeitet man bei grossen Basislängen mit Richtfunkstrecken. Neuerdings hat man die Basislänge von Radio-Interferometern sogar über ganze Kontinente (einige tausend km) ausgedehnt, wobei die erforderliche Phasenstarrheit der von beiden Antennen empfangenen Signale dadurch erhalten wird, dass extrem frequenzstabile Oszillatoren, die von Atomuhren gesteuert werden, dieselbe Vergleichsfrequenz für jede Antenne liefern. Die entstehende Zwischenfrequenz wird auf Magnetband aufgenommen und beide Bandaufnahmen werden später analysiert und zur Erzeugung des gewünschten Interferometer-Ausgangssignals gemeinsam abgespielt.

Radio-Interferometer gibt es in mehreren Abarten. Während beim zuvor erörterten System die Phase der Wellenzüge von einer kosmischen Radioquelle relativ zueinander verändert wird, indem durch die Erdrotation das Richtdiagramm beider Antennen gegen den Himmel geschwenkt wird, wird beim *swept lobe interferometer* das Richtdiagramm elektronisch geschwenkt. Dabei kann das Richtdiagramm beispielsweise 25mal je Sekunde über die angepeilte Radioquelle hinweglaufen. Auf diese Weise ist es möglich, interferometrische Messungen an Radioquellen vorzunehmen, die kurzlebige Radiobursts emittieren. Statt der Phase lässt sich auch die Frequenz variieren, auf welchem Prinzip das *swept frequency interferometer* beruht.

Synthese-Radio-Interferometer

Ein wichtiger Fortschritt im Blick auf die erzielbare Auflösung der Struktur entfernter Radioquellen wurde durch das Prinzip der sogenannten Apertursynthese eingeleitet. Es beruht darin, dass eine grosse Öffnungsfläche (Apertur) eines Radioteleskops simuliert wird. Zu diesem Zweck werden zwei oder mehrere relativ kleine Antennen eines Radio-Interferometers so kombiniert, dass alle relativen Abstände erfasst werden, die in der gedachten grossen Antennenöffnung vorkommen.

Im einfachsten Fall lässt sich die Apertursynthese mit einem Zweiantennen-Interferometer durchführen, wobei beide voll schwenkbaren Antennen (zum Beispiel Parabolantennen) in Ost-West-Richtung auf der Erdoberfläche mit variabler Basislänge installiert werden. In 24 Stunden rotiert die Interferometerbasis einmal auf der Erde, so dass beide Antennen A und B alle relativen Positionen durchlaufen, die auf einem Kreise mit dem Durchmesser AB vorkommen (Fig. 6). Sodann ändert man die Basislänge durch Änderung des Abstandes AB, wodurch ein Kreis mit anderm Durchmesser überstrichen wird. Die Anwendung immer anderer

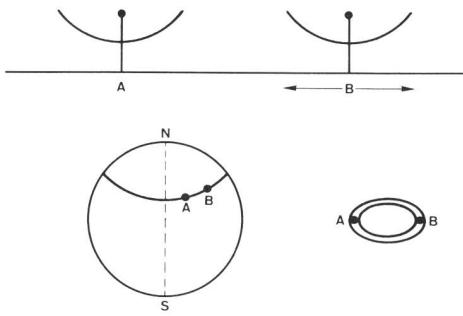


Fig. 6
Prinzip der Apertursynthese, das von der englischen Forschergruppe Cambridge angewendet wird

Basislängen gestattet, immer mehr Kreise zu überdecken, bis schliesslich eine volle Kreisfläche ausgefüllt (synthetisiert) ist. Zur Herabsetzung der Beobachtungszeit können zusätzliche Antennen benutzt werden. Als Beispiel zeigt *Figur 7* das aus acht 13-m-Parabolspiegeln bestehende Synthese-Radio-Interferometer der englischen Forschungsgruppe *Inter Ryle* in *Cambridge*. Die Antennen sind längs einer Wegstrecke von etwa 5 km in Ost-West-Richtung aneinander gereiht, wobei vier davon ortsfest sind, während die übrigen auf Schienen bewegt werden können. Bei der Synthese wird jedes Signal von jeder der vier ortsfesten Antennen mit dem der vier beweglichen kombiniert, so dass insgesamt 16 unabhängige Interferometerbasen gleichzeitig verfügbar sind. Bei der kürzesten Beobachtungswellenlänge von 3 cm ist die Auflösung der Synthese etwa 1''. Mit diesem Interferometer können ausserdem astronomische Positionsbestimmungen am Himmel mit einer Genauigkeit innerhalb etwa 0,1'' erhalten werden.

Auf gleichem Prinzip beruht auch das Radio-Interferometer in *Westerbork*, Holland (*Fig. 8*). Es benutzt zwei variable und zehn ortsfeste Parabolantennen von jeweils 25 m Durchmesser, die längs einer Strecke von 1600 m angeordnet sind. Bei einer Beobachtungswellenlänge von 20 cm beträgt dessen Auflösungsvermögen etwa 25'' und bei 6 cm etwa 8''.

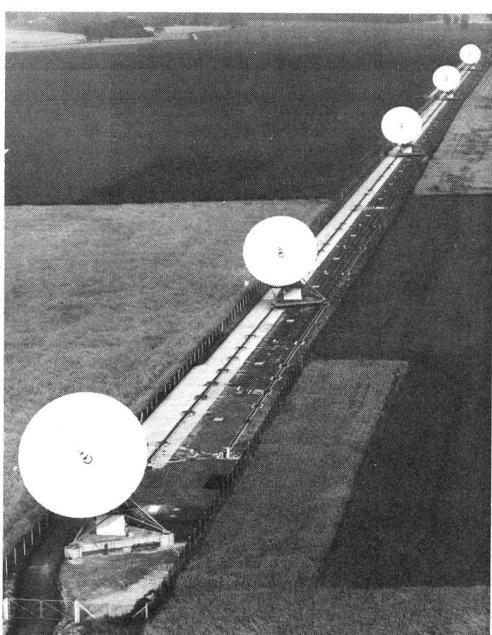


Fig. 7
Antennenspiegel des Synthese-Radio-Interferometers des Mullard radioastronomischen Observatoriums Cambridge

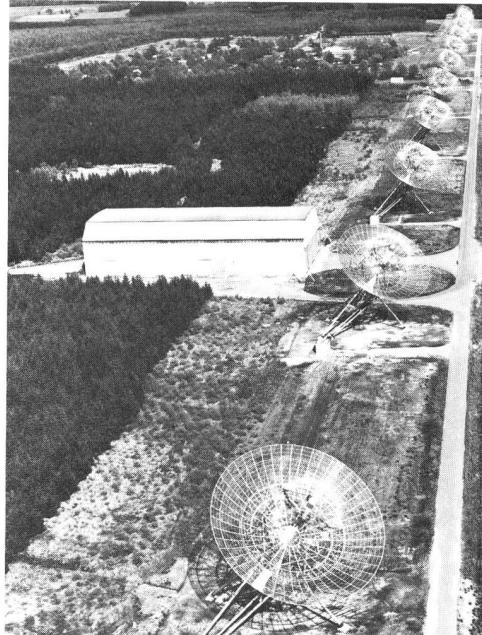


Fig. 8
25-m-Antennenspiegel des holländischen Synthese-Radio-Interferometers Westerbork

22 Empfänger

Die Radiofrequenzstrahlung aus dem Kosmos hat Rauschcharakter, das heisst, ihre Intensität schwankt statistisch nach der Zeit (kosmisches Rauschen). Das Rauschen erweist sich vom gleichen Charakter wie jenes, das in der Empfangsanlage selbst erzeugt wird. Das von der Antenne des Radioteleskops empfangene Rauschen kann hinsichtlich des Messvorgangs so interpretiert werden, als sei es in einem Abschlusswiderstand R bei der Temperatur T erzeugt.

Zwischen der Rauschleistung P und der absoluten Temperatur T (Umgebungstemperatur des Widerstandes R) besteht der Zusammenhang

$$P = k \cdot T \cdot \Delta f$$

Es bedeuten:

$$\begin{aligned} k &= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K} \text{ (Boltzmann-Konstante)} \\ T &= \text{absolute Temperatur K} \\ \Delta f &= \text{Frequenzbereich Hz} \end{aligned}$$

Die von der Antenne empfangene Strahlung wird entweder mit einem Koaxialkabel oder einem Hohlleiter dem Empfänger zugeleitet, der aus einem rauscharmen Verstärker und einem Gleichrichter (Detektor) besteht. Der Detektor wandelt das hochfrequente Signal in einen Gleichstrom um, der einem Anzeigegerät zur Registrierung zugeführt wird. Die empfangene Leistung kann durch Vergleich mit einer Rauschquelle bekannter Leistung (Vergleichsquelle) gemessen werden, die nach Belieben an den Empfängereingang angeschlossen werden kann (*Fig. 9*).

Das kleinste in einem Radioteleskop beobachtete Signal hängt von der Eigenrauschen-Temperatur des Empfängers, der Antenne (Temperatur des Systemrauschen), der Empfänger-Bandbreite und der Zeitkonstante des Detektors ab. Zwischen der nachzuweisenden Rauschtemperatur des Signals T_{obs} und diesen Grössen besteht der Zusammenhang

$$T_{obs} = k \frac{T_{sys}}{(\Delta f \cdot \tau)^{\frac{1}{2}}}$$

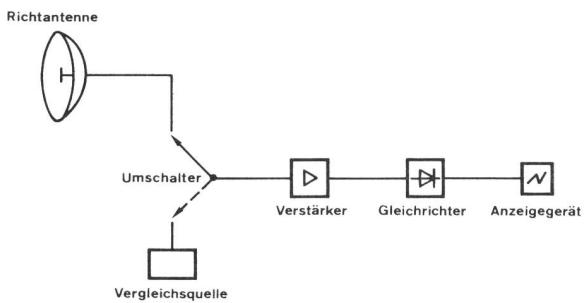


Fig. 9
Prinzip einer radioastronomischen Empfangsanlage

wobei $k > 1$ ein Faktor ist, der vom jeweiligen Empfängertyp abhängt. Es gilt die Regel, dass zur eindeutigen Beobachtung einer kosmischen Rauschquelle $T > 5 T_{\text{obs}}$ sein muss. Die Temperatur des Systemrauschens setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

$$\begin{aligned} T_{\text{sys}} &= T_A + T_L + T_E \\ T_A &\text{ Temperatur des Antennenrauschens} \\ T_L &\text{ Rauschen der Antennenzuleitung} \\ T_E &\text{ Empfängerrauschen} \end{aligned}$$

Die Wahl des Empfängers für eine bestimmte Frequenz richtet sich nach den relativen Werten T_A , T_L und T_E . Je nach dem zu beobachtenden Frequenzbereich unterscheiden sich die Empfänger in ihrer Konstruktion. Für den Bereich 10 MHz...150 MHz verwendet man gewöhnliche Transistor-empfänger, da in diesem Falle der Pegel des nachzuweisenden kosmischen Rauschens merklich höher ($T_A \approx 1000 \text{ }^{\circ}\text{K}$ bei 100 MHz) als jenes eines Transistor-Kaskadeneingangs ($T_E \approx 150 \text{ }^{\circ}\text{K}$) ist. Wegen der schnellen Zunahme des Transistorrauschens bei höhern Frequenzen einerseits und der entsprechenden Abnahme des Antennenrauschens (Signalrauschens) anderseits, werden bei höheren Frequenzen (Dezimeter-, Zentimeter- und Millimeter-Wellen) wesentlich rauschärmere Empfänger benötigt. Die rauschärmsten sind solche mit Maser-Verstärker bestückt. Bei Frequenzen um 3000 MHz wurden damit minimale Rauschtemperaturen von $T_E \approx 3,5 \text{ }^{\circ}\text{K}$ erreicht. Technischer Aufwand und Kosten sind jedoch erheblich. Hinzu kommt, dass die Bandbreite eines Maser-Verstärkers relativ sehr begrenzt ist. Daher benutzt man zur rauscharmen Verstärkung in radioastronomischen Empfangsanlagen meist gekühlte parametrische Verstärker. Die Kühlung erstreckt sich dabei nicht nur auf die aktiven Bauelemente, sondern auch Antennenzuleitung und Zirkulator am Eingang des Empfängers müssen zur Reduktion des Systemrauschens auf kleinstmögliche Werte gekühlt werden. Cryogenische Kühlaggregate gehören heute zur Standardausrüstung radioastronomischer Empfangsanlagen. Das Diagramm in Figur 10 vermittelt einen Eindruck über die mit verschiedenen Verstärkern erzielbaren Rauschtemperaturen. Das Rauschen der passiven Bauelemente ist im Diagramm nicht berücksichtigt. Rauscharme Verstärker stehen heute bis zu Wellenlängen von etwa 1 cm zur Verfügung. Auch für Millimeter-Wellen wurden in letzter Zeit im Bau rauscharmer Empfänger Fortschritte erzielt. Dieser Wellenbereich hat in den letzten Jahren mehr und mehr Bedeutung erlangt, weil darin zahlreiche Spektrallinien interstellarer Moleküle beobachtet werden, die für die Astrochemie Bedeutung haben.

23 Datenverarbeitung

Moderne radioastronomische Observatorien sind mit umfangreichen Datenverarbeitungsanlagen ausgestattet. Das Erfassen der radioastronomischen Daten mit Hilfe eines

Schreibgerätes, dessen Ausschlag der Intensität des empfangenen Radiosignals proportional ist, wird heute meist durch digitale Datenverarbeitungssysteme bewerkstelligt. Hierbei werden nicht allein die vom Empfänger gelieferten Daten auf Magnetband gespeichert, sondern für deren Auswertung in einem grossen Computer werden auch alle Informationen über Datum und Zeit, Teleskop-Position als Funktion der Zeit sowie sämtlichen weiteren vom Beobachter eingegebenen Operationen benötigt. Alle Angaben werden vom Programm zusammen mit den Messdaten automatisch auf Magnetband geschrieben und können zu einer späteren Zeit abgerufen und ausgewertet werden.

3 Solare Radiowellen

Die Radio(frequenz)strahlung der Sonne wird seit Jahren im Bereich der Meter-, Dezimeter-, Zentimeter- und Millimeter-Wellen von Observatorien der ganzen Welt laufend überwacht. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen werden gesammelt und zusammen mit anderen geophysikalischen Daten in verschiedenen Bulletins publiziert. Die Radiostrahlung der Sonne weist mehrere Anteile auf, die auf unterschiedlichen Mechanismen beruhen. Neben einer thermischen Grundstrahlung, die ständig von der ganzen Sonne ausgesendet wird, tritt während Zeiten von Sonnenaktivität (Sonnenflecke, Wasserstoffereptionen) eine unter Umständen sehr viel intensivere Störstrahlung auf, die nichtthermischer Natur ist und der ihrerseits verschiedenenartige Mechanismen zugrunde liegen können.

31 Thermische Radiostrahlung der «ruhigen» Sonne

Sie hat ihre Ursache in der Ablenkung und Bremsung freier Elektronen im Coulombschen Feld der Protonen der ionisierten Sonnenatmosphäre. Man spricht von *Bremsstrahlung*. Für jedes ionisierte Gas (Plasma) gibt es je nach Elektronendichte eine maximale Wellenlänge (Grenzwellenlänge), bei der das Plasma für elektromagnetische Wellen gerade noch durchlässig ist. Wellenlängen, die grösser als die Grenzwellenlänge sind, können sich in diesem Plasma nicht ausbreiten. Es zeigt sich, dass die Radiostrahlung hauptsächlich aus jenem Gebiet der Sonnenionosphäre kommt, das für die beobachtete Wellenlänge undurchlässig ist. Die Sonnenatmosphäre wirkt dort wie ein «schwarzer Körper». Im Meterwellenbereich ist das die Korona, bei Zentimeter-Wellen hauptsächlich die obere Chromosphäre und bei Millimeter-Wellen die untere Chromosphäre.

Für eine gegebene Wellenlänge ist die Intensität der thermischen Strahlung proportional der absoluten Temperatur T des ionisierten Gases und umgekehrt proportional dem

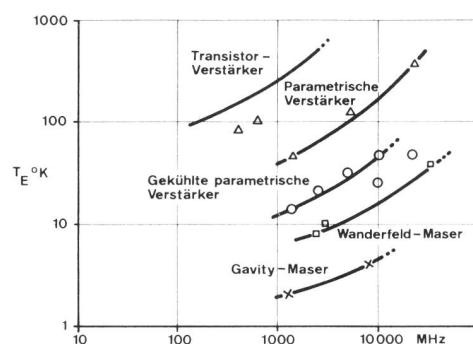


Fig. 10
Rauschtemperaturen verschiedener Verstärker

Quadrat der Wellenlänge λ

$$I = \alpha \cdot \frac{k \cdot T}{\lambda^2}$$

wobei α ein vom Absorptionsvermögen des Plasma abhängender Faktor ist, der für undurchlässiges Gas den Wert 1 hat. Immer, wenn Strahlung beobachtet wird, deren Intensitätsverhalten durch diese Gesetzmässigkeit dargestellt werden kann, handelt es sich um einen thermischen Strahlungsvorgang.

Die Temperatur der Elektronen in der Korona beträgt rund 1 Million °K, in der äussern Chromosphäre etwa 80000 °K und in der unteren Chromosphäre etwa 10000 °K. Dementsprechend ist die der Korona entstammende Meterwellenstrahlung intensiver als die aus den darunter liegenden Sonnenschichten herrührende im Bereich der Zentimeter- und Millimeter-Wellen. Im Vergleich hierzu weist die sichtbare Photosphäre der Sonne eine Temperatur von 6000 °K auf. Im Radiowellenbereich ist die Sonne also «heisser» als im Sichtbaren.

Die Untersuchung der thermischen Grundstrahlung im Radiowellenbereich gibt Aufschluss über die Verteilung von Elektronendichte und Elektronentemperatur in der Sonnenatmosphäre. Die Ergebnisse dieser Radiobeobachtungen haben die Aussagen verfeinert, die aus optischen Beobachtungen ermittelt wurden.

32 Radiostrahlung der «aktiven» Sonne

Bei Sonnentätigkeit, wenn also auf der Sonne Flecken, Wasserstoffausbrüche (flare) und andere eruptive Vorgänge beobachtet werden, überlagern sich der thermischen Strahlung der «ruhigen Sonne» andere Strahlungsanteile, die sich wesentlich von der ungestörten thermischen Strahlung unterscheiden. *Figur 11* vermittelt einen groben Überblick über die bei Sonnentätigkeit zu beobachtenden radiofrequenten Strahlungsarten. Die interessantesten sind die «Radioausbrüche» und «Radiostürme» (Rauschstürme). Beide zeigen entgegengesetzte spektrale Intensitätsverläufe zur Strahlung der ruhigen Sonne und deuten an, dass ihnen nichtthermische Strahlungsmechanismen zugrunde liegen.

Man klassifiziert die verschiedenen Strahlungsarten durch Typ I, II, III und IV. Ein «Radiosturm» besteht aus vielen einzelnen Radioausbrüchen des Typs I. Kennzeichnend für Typ-I-Radioausbrüche ist, dass sie eine Dauer von Bruchteilen einer Sekunde bis etwa 1 Sekunde haben und sich über ein relativ schmales Frequenzspektrum erstrecken. Die aus ihnen bestehenden Radiostürme können über Stunden und Tage anhalten. Sie entstammen grossen Sonnenfleckengebieten und treten besonders ausgeprägt im Meterwellenbereich auf. Die Radiostürme sind vorwiegend zirkular polarisiert und zeigen die weitere Besonderheit, dass sie scharf gebündelt aus den Fleckengebieten abgestrahlt werden, so dass sie nur beobachtbar sind, wenn sie den Zentralmeridian der Sonnenscheibe passieren. Die zirkulare Polarisation weist darauf hin, dass die Radiostürme mit kreisenden Elektronen in den Magnetfeldern der Sonnenflecke zusammenhängen. Was die «Radioausbrüche» betrifft, zeigen sie ein noch verwickelteres Verhalten. Man charakterisiert sie durch Typ II, III oder IV. Typ II zeichnet sich dadurch aus, dass sich während der Zeitdauer des beobachteten Radioausbruchs die Strahlungsfrequenz von höheren nach niedrigeren Werten verschiebt. Zur Untersuchung werden Radio-Spektrographen benutzt, mit denen die Sonne über 24 Stunden täglich innerhalb eines breiten Frequenzbereiches, zum Beispiel 30...1000 MHz, überwacht werden kann.

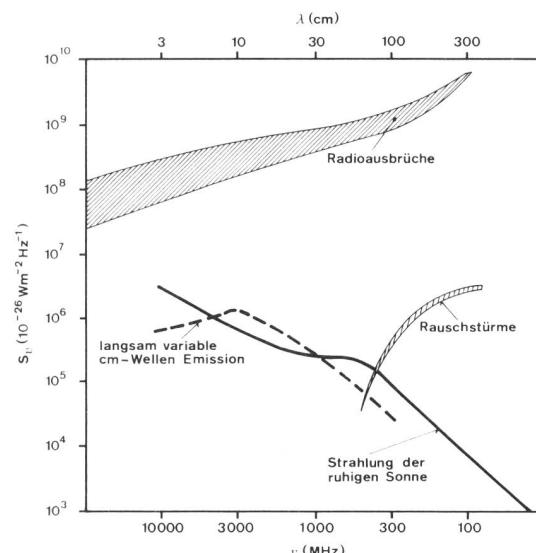


Fig. 11
Radiofrequente Strahlungsanteile der Sonne

Die Frequenzverschiebung im dynamischen Spektrum eines Typ-II-Ausbruchs beträgt etwa 1 MHz. Die allgemein angenommene Erklärung über das Zustandekommen dieser Radiostrahlung ist, dass sie durch einen Partikelstrom erzeugt wird, der mit einer Geschwindigkeit von etwa 500...1000 km/s die Sonnenatmosphäre durchfliegt und darin *Plasmaschwingungen* anregt. Man beobachtet also die radiofrequente Plasmastrahlung in der Front von Stosswellen in der Korona. Die Frequenz der angeregten Plasmaschwingungen (Plasmafrequenz) beträgt

$$\nu_p = 0,009 \cdot \sqrt{N_e} \quad \text{MHz}$$

wobei N_e die Elektronendichte je cm^3 ist.

Da die Elektronendichte in der Sonnenatmosphäre mit zunehmender Höhe abnimmt und damit auch die Plasmafrequenz, die identisch mit der Frequenz der abgestrahlten Radiowelle ist, ist es verständlich, dass beim Typ-II-Ausbruch die beobachtete Radiostrahlung sich von höheren nach niedrigeren Frequenzen verschiebt. Die örtliche Verschiebung der Radioquelle in der Sonnenatmosphäre ist auch radiointerferometrisch nachgewiesen. Ein charakteristisches Merkmal, dass Typ-II-Ausbrüche durch Plasmaschwingungen angeregt werden, ist das Auftreten der Grundschwingung und der ersten Harmonischen bei der doppelten Frequenz im dynamischen Spektrum (*Fig. 12*).

Von ähnlicher Natur wie die Strahlungsausbrüche vom Typ II erweisen sich die des Typs III. Ihr wesentlicher Unterschied besteht darin, dass deren Frequenzverschiebung von etwa 20 MHz sich viel schneller als beim Typ II vollzieht, was einer Aufwärtsbewegung der die Sonnenatmosphäre zu Plasmaschwingungen anregenden Partikel mit Geschwindigkeiten von einem Fünftel bis zur Hälfte der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Auch bei Ausbrüchen des Typs III beobachtet man neben der Grundfrequenz die erste Harmonische (*Fig. 12*). Man nimmt an, dass solche Emissionen durch Elektronen mit relativistischer Geschwindigkeit¹ verursacht werden, während jene des Typs II von Teilchen niedriger Geschwindigkeit herrühren.

Von besonderem astrophysikalischen Interesse sind die Radioausbrüche Typ IV, die mit Wasserstofferuptionen

¹ Teilchen haben relativistische Geschwindigkeit, wenn sie schneller als $1/10 c$ (c = Lichtgeschwindigkeit) oder wenn ihre Masse grösser als ihre Ruhmasse ist. Man spricht kurz von relativistischen Teilchen.

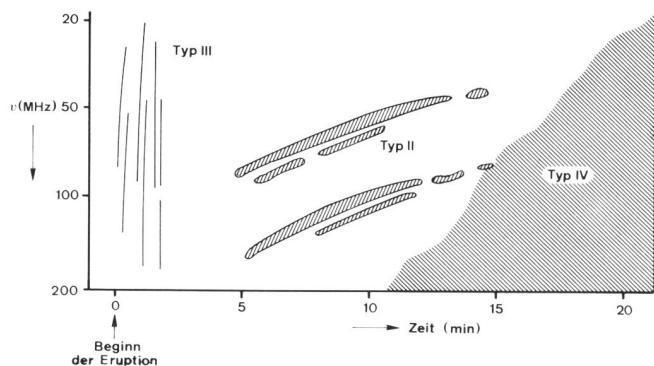


Fig. 12
Dynamisches Spektrum solarer Radio-Bursts

(Protonen-flares) auf der Sonne einhergehen und innerhalb eines breiten Radiofrequenzspektrums zur gleichen Zeit beobachtet werden und bis etwa eine halbe Stunde andauern können. Als Beispiel zeigt Figur 13 Registrierkurven eines Typ-IV-Ausbruchs auf neun verschiedenen Frequenzen am 7. August 1972 aufgenommen. Es gibt Typ-IV-Ausbrüche, die sich auf den Bereich der Meter- und Dekameter-Wellen beschränken und solche, deren Ausstrahlung von Dekameter-Wellen bis zu Millimeter-Wellen reicht sowie relativ schmalbandige Typ-IV-Bursts, die auf den Dezimeter-Wellenbereich beschränkt sind. In verschiedenen Fällen wird einige Zeit nach Auftreten eines intensiven Typ-IV-Radioausbruchs ein Anstieg der solaren Teilchenstrahlung auf der Erde beobachtet. Je intensiver der Radioausbruch ist und je mehr er auch im Bereich der kürzesten Radiowellen auftritt, desto enger ist die Korrelation zwischen flares und auf der Erde nachweisbarer solarer Protonenstrahlung. Dass Protonen-flares anderseits auch Quellen von Röntgenstrahlung sind, ist aus Satellitenbeobachtungen bekannt.

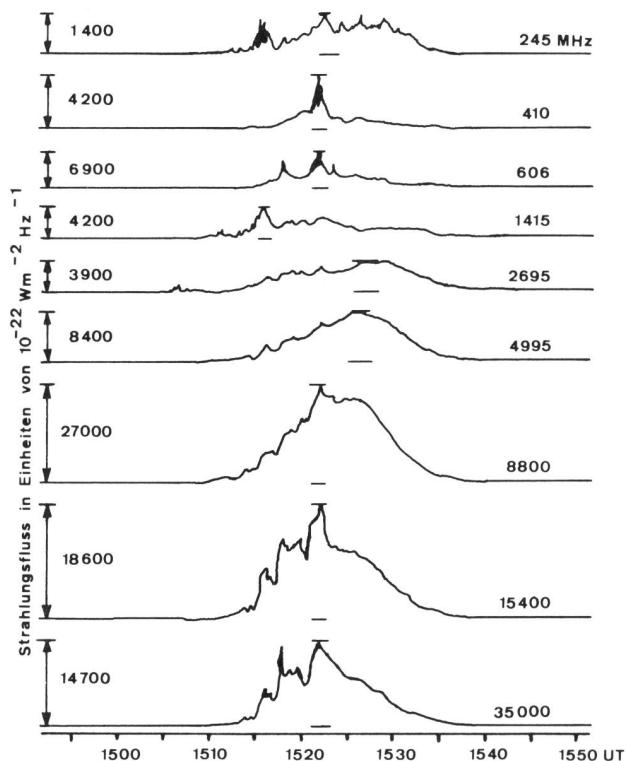


Fig. 13
Radioausbruch am 7. August 1972 nach Beobachtungen am Sagamore Hill Radio Observatorium Hamilton, Mass.

Man hat gute Gründe, anzunehmen, dass es sich bei Typ-IV-Radioausbrüchen um eine *Synchrotronstrahlung* relativistischer Teilchen handelt. Wenn sich zum Beispiel Elektronen senkrecht zu einem Magnetfeld bewegen, werden sie auf Kreisbahnen umgelenkt. Vom Standpunkt eines äussern Beobachters erfahren sie dann eine Beschleunigung zum Kreismittelpunkt hin. Nach der Elektrodynamik ist mit dieser Radialbeschleunigung eine Emission elektromagnetischer Strahlung verknüpft, deren Frequenz gleich der Umlauffrequenz der Elektronen auf der Kreisbahn (Zyklotronfrequenz) ist. Die Strahlung erfolgt senkrecht zur Beschleunigungsrichtung, im Fall nichtrelativistischer Elektronen (Elektronengeschwindigkeit klein gegenüber Lichtgeschwindigkeit), also senkrecht zur Kreisfläche. Anders erfolgt die Strahlung für relativistische Elektronen. Nach wie vor wird sie senkrecht zur Richtung der Elektronenbeschleunigung emittiert, doch ist sie in Flugrichtung der Elektronen konzentriert, also in Richtung der Kreisbahntangente (Fig. 14). Der aussenstehende Beobachter (Radioteleskop) empfängt dann nur zu jenen Zeiten Strahlung, wenn die Bewegung des Elektrons auf ihn gerichtet ist. Bei jedem Umlauf des Elektrons empfängt also der Beobachter einen einzelnen Strahlungsimpuls. Jeder einzelne Impuls setzt sich aus einem kontinuierlichen Frequenzspektrum zusammen, das von Radiowellen- bis zu Röntgenstrahlungsfrequenzen reichen kann. Die Grenzfrequenz ist ungefähr gleich dem reziproken Wert der Impulsdauer. Diese Strahlung wurde erstmals am Synchrotron, einem Elektronenbeschleuniger, beobachtet, daher ihre Bezeichnung.

Die «Synchrotronstrahlung» zeigt die Besonderheit, dass sie linear polarisiert ist. Die Polarisationsebene ist mit der Bahnebene der kreisenden Elektronen identisch, was leicht zu verstehen ist, weil der Beobachter (Radioteleskop) die kreisenden Elektronen bei Beobachtung von Synchrotronstrahlung von der Kreiskante her als gerade Linie sieht (Fig. 15).

Ausser den Radioausbrüchen und Radiostürmen, die mehr oder weniger sporadisch und eruptiv auftreten, sendet die Sonne bei Zentimeterwellen noch eine langsam variable Strahlung aus, die eine enge Korrelation mit der von Flecken bedeckten Sonnenoberfläche hat. Sie entstammt Gebieten von Sonnenfackeln. Der spektrale Intensitätsverlauf dieser Komponente ist in Figur 11 eingezeichnet. Er weist darauf hin, dass es sich bei ihr um eine thermische Strahlung handelt, die aus koronalen Gebieten oberhalb von Sonnenflek-

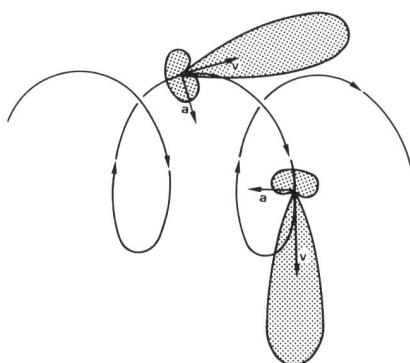


Fig. 14
Synchrotronstrahlung eines Elektrons in einem Magnetfeld. Die Winkelverteilung der Strahlungsintensität ist für zwei Orte des Elektrons auf der Spiralbahn eingezeichnet

a Richtung der Geschwindigkeit des Elektrons
v Richtung der Beschleunigung des Elektrons

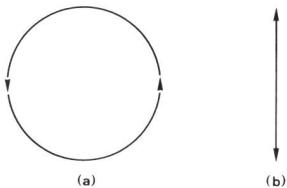


Fig. 15
Polarisation durch Kreisbewegung von Elektronen im Magnetfeld

- (a) Elektron kreist um ein senkrecht zur Zeichenebene verlaufendes Magnetfeld. Das Elektron strahlt eine zirkulär polarisierte Welle ab
 (b) Von der Kante her betrachtet, erscheint der Kreis als gerade Linie. Die vom Elektron abgestrahlte Welle ist aus dieser Richtung gesehen linear polarisiert (Synchrotronstrahlung)

ken (koronale Kondensationsgebiete) emittiert wird, wo die Elektronendichte so hohe Werte erreicht, dass sie für Zentimeterwellen wie «schwarze Körper» wirken.

4 Flare-Sterne

Bald nachdem sich herausstellte, dass solare flares mit intensiven radiofrequenten Strahlungsausbrüchen einhergehen, wurde vermutet, dass von «flare-Sternen», die aus optischen Beobachtungen bekannt sind, entsprechende Radioausbrüche beobachtet werden sollten. Da «flare-Sterne» viel entfernter als die Sonne sind, müsste diese Radiostrahlung viel intensiver sein als die solarer Radioausbrüche, um auf der Erde beobachtet werden zu können. In der Tat blieben zunächst alle Versuche zum Nachweis einer Radiostrahlung von «flare-Sternen» erfolglos. Erst nach Verbesserung der radioastronomischen Beobachtungstechnik gelang deren Nachweis in den letzten Jahren. Als Beispiel zeigt *Figur 16* einen Radioausbruch auf dem Roten Zwergstern UV CETI, aufgenommen 408 MHz am 11. Oktober 1972. Dem Radioausbruch geht ein visueller Helligkeitsausbruch um etwa 8 Minuten voraus. Dies deutet darauf hin, dass sich die Strahlung anregende Quelle aus dem Innern des Sterns nach aussen bewegt. Es ist dies ein ähnliches Verhalten, wie man bei solaren Radioausbrüchen der Typen II und III beobachtet. Die Radiostrahlung könnte durch Plasmaschwingungen zustandekommen; die lineare Polarisation dieses Ausbruchs deutet anderseits auf Synchrotronemission hin. Es wird vermutet, dass «flare-Sterne» wie solar flares Quellen kosmischer Ultrastrahlung sind.

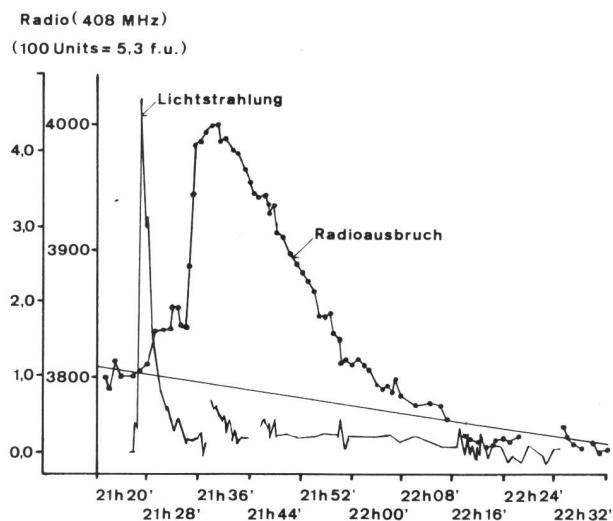


Fig. 16
Radioausbruch bei der Frequenz 408 MHz und Lichtausbruch auf flare-Stern UV CETI am 11. Oktober 1972 (nach Lovell, Marridis und Contadakis, *Nature*, Vol. 250, Nr. 5462 (1974) 124)

5 Pulsare

Die Sonne und «flare-Sterne» sind zwei verschiedene Beispiele für *Radiosterne*. Ein weiterer Typ von Radiosternen sind *Pulsare*. Sie wurden im Jahre 1967 von der englischen Radioastronomin *Bell* entdeckt.

Die Radiofrequenzstrahlung von Pulsaren erfolgt pulsförmig in sehr regelmässiger Folge, mit stark variabler Intensität. Die Pulsperioden der bekannten Pulsare liegen vorwiegend zwischen 0,25 und 2 s. Die Pulssignale werden innerhalb eines verhältnismässig breiten Frequenzbandes, etwa zwischen 100 und 1000 MHz, emittiert, wobei sich die Strahlung als vorwiegend linear polarisiert erweist. Am bekanntesten ist der Pulsar im Krebsnebel (Crabb-Nebel). Der Krebsnebel ist eine Supernova, das heisst ein ehemaliger Stern, dessen Explosion im Jahre 1054 von chinesischen Astronomen beobachtet und überliefert wurde. Es ist von äusserstem Interesse, dass der Pulsar im Krebsnebel gleichzeitig mit Radiofrequenzimpulsen auch optische und Röntgenstrahlimpulse ausgesendet (*Fig. 17*). Die über das gesamte elektromagnetische Spektrum ausgestrahlte Energie dieses Pulsars beträgt etwa das Hundertfache der Sonnengesamtstrahlung. Alle Strahlungsanteile erweisen sich als linear polarisiert. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass für die elektromagnetische Strahlung die Synchrotronstrahlung Ursache ist. Die Polarisationsebene dieser linear polarisierten Strahlung ist die Bahnebene der kreisenden Elektronen. Das Magnetfeld müsste also senkrecht dazu stehen. Andeutungen hierfür hat man beim Krebsnebel in einer faserigen Struktur, die senkrecht zur Polarisationsrichtung orientiert ist und als «eingefrorenes» Magnetfeld in einem hochionisierten Plasma interpretiert wird.

Man glaubt, dass es sich bei Pulsaren um rotierende Neutronensterne handelt, deren Durchmesser von der Grössenordnung 10 km ist. In ihnen ist die Dichte der Materie so gross, dass sich die Protonen und Elektronen zu Neutronen

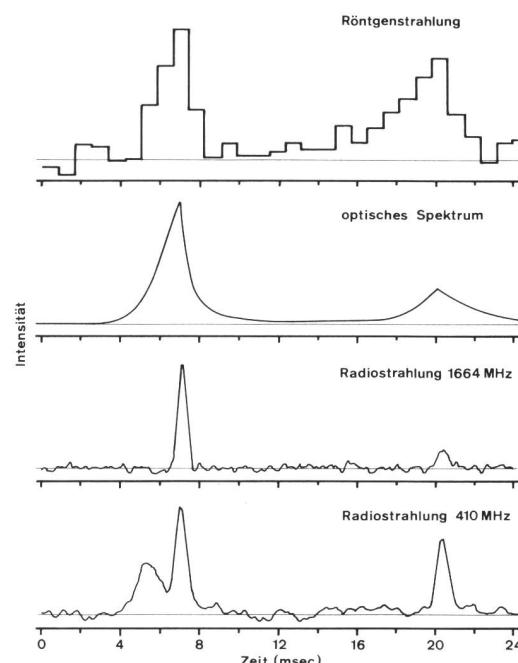


Fig. 17
Integrierte Profile der radiofrequenten, sichtbaren und Röntgen-Puls-Strahlung vom Pulsar im Krebsnebel (nach R. N. Manchester, *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy*, Springer Verlag, S. 145)

verschmelzen. Die Radioimpulse entstehen vermutlich, weil aus der aktiven Quelle des Pulsars eine gebündelte Strahlung ausgeht, die einmal bei jeder Rotation des Pulsars der Erde zugerichtet ist.

6 Radiogalaxien und Quasare

Seit den frühen zwanziger Jahren ist bekannt, dass es außer unserer Milchstrasse unzählige andere Galaxien gibt. Die meisten haben ähnlich unserer Milchstrasse Spiralstruktur, andere sind elliptisch-scheibenförmig oder weisen Kugelsymmetrie auf. Viele – wenn nicht alle – dieser normalen Galaxien emittieren Lichtwellen, und Radiowellen, wobei jedoch die Radioemission relativ schwach ist.

Im Gegensatz hierzu gibt es extragalaktische Quellen, die ungewöhnlich starke Radiostrahler sind. Man nennt sie allgemein *Radiogalaxien*. Ihre Entfernungn belaufen sich auf mehrere hundert Millionen Lichtjahre. Nachdem mit Hilfe hochauflösender Radio-Interferometer ihre Positionen genau bestimmt werden konnten, sind viele Radiogalaxien mit bemerkenswerten sichtbaren Objekten identifiziert worden, die auf langbelichteten fotografischen Aufnahmen grosser optischer Teleskope erkennbar sind.

Eine der intensivsten Radiogalaxien ist Cygnus A. Untersuchungen dieser Quelle mit dem Synthese-Radio-Interferometer der Cambridge Forschungsgruppe bei $\lambda = 6$ cm ergaben, dass es sich um eine Doppel-Radiogalaxis handelt. In *Figur 18* ist die Verteilung deren «Radiohelligkeit» am Himmel dargestellt. Die Radiostrahlung röhrt hauptsächlich von den beiden kompakten Quellen im Bild links unten und rechts oben her. In der Mitte zwischen ihnen befindet sich eine schwächere kompakte Radioquelle, die mit der optisch sichtbaren Galaxis übereinstimmt. Diese Struktur ist für viele bekannte Radiogalaxien typisch. Cygnus A ist annähernd 1 Milliarde Lichtjahre entfernt. Der Durchmesser der Quelle beträgt etwa 400000 Lichtjahre, die ausgesendete Radiofrequenzenergie beträgt etwa 10^{38} W/s, ist also entsprechend etwa der Energie, die bei der Zerstrahlung von 1 Million Sterne frei wird.

Neben den Radiogalaxien gibt es noch einen andern Typ vergleichbar intensiver extragalaktischer Radioquellen, die mit sehr hellen sternartigen Objekten mit grossen Rotverschiebungen ihrer Spektrallinien identifiziert wurden. Die optische Strahlung ist besonders stark im blauen und Ultraviolet-Bereich. Diese Radioquellen nennt man *Quasare* (quasi stellar radio sources). Bei einigen findet man die von Radiogalaxien bekannten Doppelquellen. Aufgrund der Rotverschiebung hat man berechnet, dass die Quasare sehr weit, etwa 3000 bis 10000 Millionen Lichtjahre entfernt sind. Die Rotverschiebung der Quasare muss jedoch nicht allein in der Expansion des Universums seinen Grund haben, sondern kann auch durch Energieverlust der Strahlung in einem starken Gravitationsfeld verursacht werden. Es ist sogar wahrscheinlich, dass die Rotverschiebung der Quasarstrahlung vor allen Dingen hierauf beruht. Wenn dies zutrifft, sind Quasare viel näher gelegene Quellen, als man bisher angenommen hat.

Es steht außer Zweifel, dass die Strahlung von Radiogalaxien und Quasaren Synchrotronstrahlung relativistischer Partikel in stellaren oder interstellaren Magnetfeldern ist. Die Frage ist, wie die gewaltigen Strahlungsleistungen dieser Quellen entstehen. Eine Antwort dürfte wohl nur im Um-

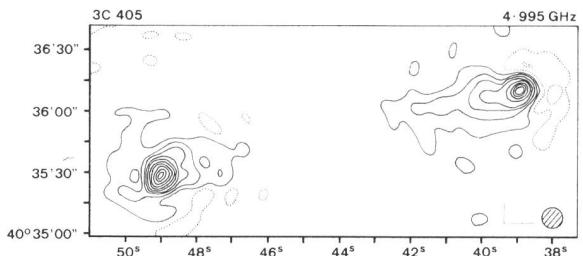


Fig. 18

Verteilung der Radiohelligkeit der Radiogalaxis Cygnus A bei $\lambda = 6$ cm nach Beobachtungen mit dem Cambridge Synthese-Radio-Interferometer (nach Mitton und Ryle, Monthly Not. Roy. Astr. Soc. 146 (1969) 221)

wandlungsverfahren von Gravitationsenergie in Strahlung zu finden sein. Nach Einsteins Masse-Energie-Relation $E = mc^2$ sind Energie und Masse einander äquivalent. Man stelle sich vor, dass das infolge des Gravitationskollapses entstehende «schwarze Loch»¹ einen erheblichen Teil seiner Masse, die der Energie seines Gravitationsfeldes entspricht, in Materie (Elektronen) und Antimaterie (Positronen) zerstrahlt. Bei diesem Prozess müssen die Erhaltungsgesetze der Physik gewahrt bleiben. Wenn wir daraufhin die Doppelstruktur von Radiogalaxien betrachten, wie sie in *Figur 18* für die Cygnus A-Quelle zum Ausdruck kommt, so sieht man, dass für die beiden Quellen, die offensichtlich (mit relativistischer Geschwindigkeit) auseinanderstreben, der Impulssatz gewahrt bleibt. Die Erhaltung der elektrischen Ladung anderseits verlangt, dass vor und nach der Zerstrahlung des Gravitationsfeldes die elektrische Gesamtladung null ist. Vor der Zerstrahlung ist die elektrische Ladung null und nach der Zerstrahlung ist die Ladung (Summe der positiv und negativ geladenen Teilchen) ebenfalls null. Die Energiebilanz kann dadurch erfüllt werden, dass eine wesentliche Masse des Gravitationsfeldes zerstrahlt. Da das «schwarze Loch» nach der Zerstrahlung seines Gravitationsfeldes eigentlich kein «schwarzes Loch» mehr ist, kann nunmehr in ihm eingefangenes Licht und andere elektromagnetische Strahlung entweichen. Das ist in Einklang mit der Beobachtung. Wir können also vermuten, dass eine der beiden Radiogalaxien in *Figur 18* eine Anti-Radiogalaxis ist. Wir hätten somit in den Radiogalaxien die von verschiedenen Astrophysikern, wie dem schwedischen Nobelpreisträger H. Alfvén seit langem vermuteten Galaxien aus Antimaterie.

7 Radioemission von Planeten

Alle Planeten unserer Milchstrasse sind Temperaturstrahler und emittieren daher auch im Radiowellenbereich. Radiomessungen gestatten die Bestimmung deren Oberflächentemperatur. Bei einigen Planeten, wie Jupiter und neuerdings Saturn, werden außerdem Radioausbrüche beobachtet, die vermutlich auf der Synchrotronstrahlung relativistischer Elektronen im Magnetfeld dieser Planeten beruhen und in Gebieten ähnlich dem *Van-Allen-Gürtel* der Erdionosphäre eingefangen sind.

¹ Unter einem «schwarzen Loch» versteht der Astrophysiker den Zustand eines Sterns, der eine so hohe Dichte erreicht, dass sein Radius kleiner als ein kritischer Wert (Schwarzschild-Radius, im Falle der Sonne 3 km) wird. In diesem Fall wird das Gravitationsfeld dieses «Sterns» so stark, dass alles Licht, das von ihm emittiert, wieder in ihn zurückgezogen wird. Der Stern ist also für einen äussern Beobachter unsichtbar, lediglich sein Gravitationsfeld (Gravitationswellen) tritt nach aussen hin in Erscheinung.

8 Radiofrequente Spektrallinien interstellarer Moleküle

Während die zuvor erörterte kosmische Radiofrequenzstrahlung innerhalb eines mehr oder weniger breiten Spektralbereiches beobachtbar ist, wurden auch diskrete Emissionsfrequenzen nachgewiesen, die von interstellaren Molekülen herrühren und in Quantenübergängen in diesen Molekülen ihre Entstehung haben. *Tabelle I* gibt einen Überblick über einige nachgewiesene Spektrallinien interstellarer Moleküle. Die Entdeckung dieser Linien, die erst in jüngster Zeit dank den technischen Fortschritten in der Radioastronomie ermöglicht wurden, war eine grosse Überraschung, da man nicht geglaubt hat, dass es außer Wasserstoff so zahlreiche andere Moleküle im interstellaren Raum geben würde. Zu diesen Molekülen gehören auch solche, die für biologische Prozesse wichtig sind. Diese Moleküle werden vorzugsweise in der Umgebung von HII-Gebieten beobachtet, also dort, wo die Bildung von Sternen, und damit von Planeten, vermutet wird. Der Nachweis biologisch wichtiger interstellarer Moleküle erhärtet die Vorstellung, dass viele Planeten biologisches Leben beherbergen könnten.

Durch die Radioastronomie ist nicht nur unser Wissen vom Kosmos und von den sich dort abspielenden astrophys-

Tabelle I. Radiofrequente Spektrallinien interstellarer Moleküle

Molekül	Wellenlänge
H (neutral)	21,1 cm
OH	18 cm
NH ₂	1,3 cm
H ₂ O	1,35 cm, 6 cm
H ₂ CO	6,2 cm, 2 cm
CO	2,6 mm
CN	2,7 mm
HCN	3,4 mm
HCOOH	18 cm
CS	2 mm
NH ₂ CHO	6,5 cm
SiO	2,3 mm, 6,95 mm
OCS	2,5 mm
CH ₃ CN	2,7 mm
HNCO	3,5 mm
CH ₃ CHO	28 cm
H ₂ S	1,8 mm
CH ₂ NH	5,7 cm

sikalischen Prozessen in unvorausgesehener Weise erweitert worden, sondern sie leistet auch entscheidende Entwicklungsbeiträge für künftige Nachrichtenübertragungssysteme, wie zwischen künstlichen Weltrauminseln, einzelnen Planeten und der Erde.

Die nächste Nummer bringt unter anderem Vous pourrez lire dans le prochain numéro

- H. Probst Der neue Genfer Wellenplan für Lang- und Mittelwellen
 Le nouveau plan des fréquences de Genève pour ondes longues et moyennes
- C. Bremenson L'accès multiple dans les télécommunications par satellite
- M. Schneider Die Entwicklung eines Gerätes zur Messung nichtlinearer Verzerrungen
 bei variabler Signalspannung