



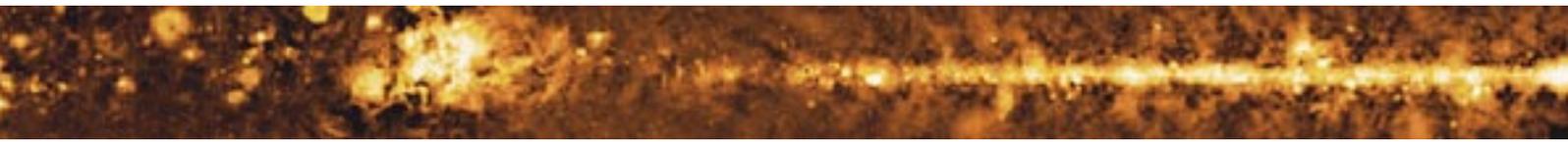
# LOFAR – das »Low Frequency Array«

## Neue Perspektiven der Radioastronomie

VON HEINO FALCKE

Mit der Verwirklichung neuer Projekte, wie z. B. ALMA (Atacama Large Millimeter Array), SKA (Square Kilometer Array) und LOFAR (Low Frequency Array) steht in der Radioastronomie ein neuer Quantensprung bevor. LOFAR – ein als Vorläufer von SKA im Meterwellenbereich operierendes Teleskop – wird sich direkt vor unserer Haustür befinden und ein neues Fenster zum Universum aufstoßen.





**B**asierend auf modernster Daten-Netztechnik und digitalen Empfängern, wird LOFAR größtenteils aus Software bestehen – es erreicht damit eine noch nie gekannte Flexibilität und Empfindlichkeit. Es kann in mehrere Richtungen zugleich schauen und mit einem Trick sogar auf eine bestimmte Richtung schwenken, kurz bevor dort ein plötzliches, explosives Ereignis eintritt. Wissenschaftliches Hauptziel ist die Epoche der Reionisation – in dieser Frühphase des Kosmos ereignete sich der Übergang von neutraler Materie zu den ersten Sternen und Schwarzen Löchern. Aufgrund seiner Flexibilität ist LOFAR aber ein zutiefst interdisziplinäres Instrument, das Kosmologie, Astroteilchenphysik, Sonnen-, Plasma- und sogar Geophysik verbindet. Im Folgenden lasse ich zunächst die Entwicklung der Radioastronomie Revue passieren und beschreibe dann LOFAR und seine Wissenschaft genauer.

### Frühe Erfolge der Radioastronomie

Viele der frühen radioastronomischen Entdeckungen haben sich später als grundlegend erwiesen. Nicht umsonst ist die Radioastronomie mit vier Nobelpreisen der erfolgreichste Teil der beobachtenden Astronomie (siehe Kasten unten).

Die erste, vom Radiopionier Karl Jansky in den dreißiger Jahren nachgewiesene Radioquelle war der Zentralbereich unserer Galaxis. Später wurde die Milchstraße in eine Unzahl interessanter Details aufgelöst (Abb. 1), und schon in den fünfziger Jahren wurde das Galaktische Zentrum aufgrund seiner hellen Radiostrahlung als Punktquelle identifiziert und als Ursprung des galaktischen Koordinatensystems gewählt – im opti-

schon Bereich ist es wegen starker Absorption durch interstellaren Staub nicht sichtbar. Heute noch ist das Galaktische Zentrum ein vorrangiges Ziel von Radio-Beobachtungen, und mit hochfrequenter Radiointerferometrie schicken sich Astronomen an, den Ereignishorizont des zentralen Schwarzen Lochs abzubilden. [1]

### Kosmische Hintergrundstrahlung

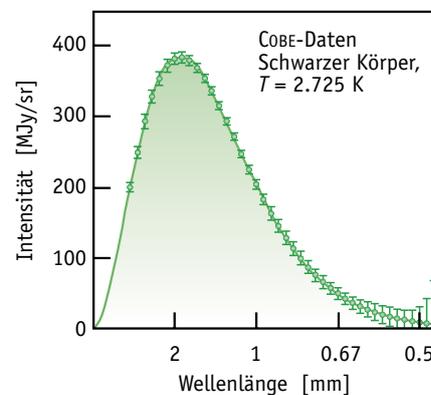
1963 erkannten Arno A. Penzias und Robert W. Wilson (Nobelpreis 1978), dass das ständige Radorauschen in den Empfängern einen astrophysikalischen Ursprung hatte. Diese kosmische Hintergrundstrahlung ist das rotverschobene und erkalte Glimmen des Urknalls aus der Zeit, als das Universum von einem photonendominierten in einen materiedominierten Zustand wechselte (Abb. 2). Messungen dieses Hintergrunds durch die Satelliten COBE und WMAP [3], sowie moderne Hochfrequenz-Radiomessungen mittels Höhenballons [4] aus der Atacama-Wüste [5] und aus dem Weltraum bilden heute die Grundlage für die Vermessung der Geometrie des Universums und die Bestimmung seiner fundamentalen Konstanten (Dichte der Dunklen Materie, Dunkle Energie, Krümmungsradius, etc.).

### Pulsare und Gravitationswellen

Auch ein weiterer signifikanter Sprung gelang eher zufällig. Bei der Suche nach variablen, durch den Einfluss des interplanetaren Mediums szintillierenden Radioquellen entdeckten Jocelyne Bell und Antony Hewish die ersten Pulsare und damit eine neue Form von Materie – die Neutronensterne. Diese Sterne mit Massen von ca. 1.4 Sonnenmassen haben Durchmesser von nur wenigen Kilometern und bestehen aus dicht gepackten Neutronen

▲ Abb. 1: Radiopanorama der Milchstraße (nördliche Hälfte), aufgenommen bei 2.7 GHz mit dem 100-m-Radioteleskop in Effelsberg. Das Galaktische Zentrum (Sgr A) ist ganz rechts zu sehen, der helle Bereich im rechten Drittel des Bildes ist die Cygnus-Region – Durchstoßpunkt eines Spiralarmes.

▼ Abb. 2: Himmelskarte der kosmischen Radiostrahlung aus Messungen des Satelliten WMAP (unten) bei 41 GHz [2] nach Abzug der Strahlung aus der Milchstraße und anderer Effekte. Die Struktur der Hintergrundstrahlung gibt Auskunft über die Geometrie des Universums. Die Strahlung ist die eines idealen schwarzen Körpers der Temperatur  $T = 2.725$  K mit einem Maximum bei 150 GHz. Kleines Bild: Spektrum der Hintergrundstrahlung, gemessen vom Satelliten COBE der NASA. Die Fehlerbalken wurden 400-fach überhöht eingezeichnet, um sie sichtbar zu machen.



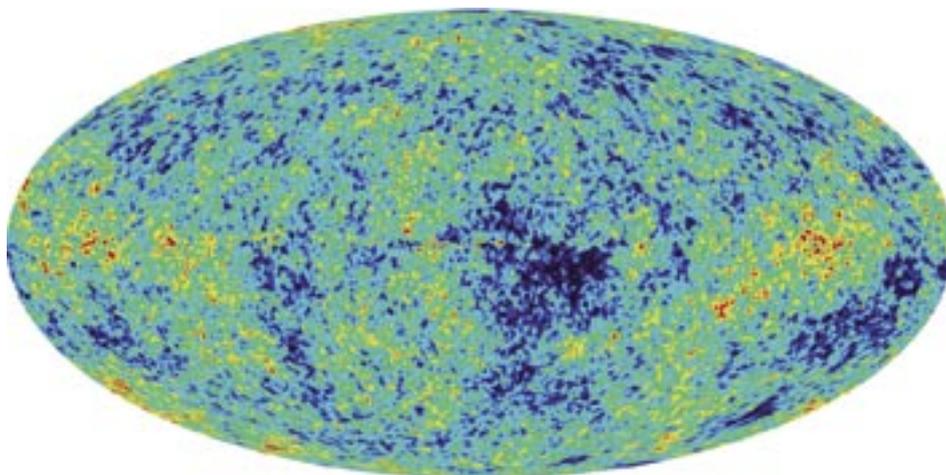
## Nobelpreise in der Radioastronomie

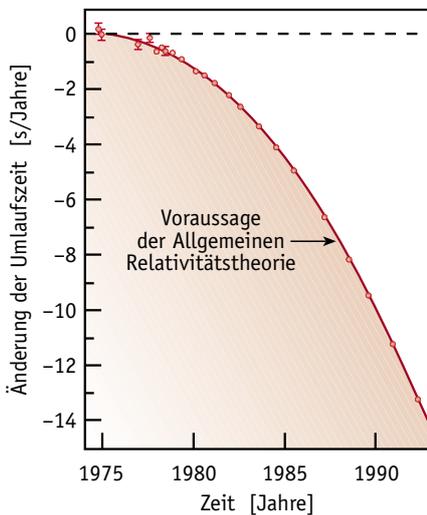
**Sir Martin Ryle:** Apertursynthese – Grundlagen der Radiointerferometrie (1974)

**Antony Hewish:** Pulsare und Neutronensterne (1974).

**Arno A. Penzias und Robert W. Wilson:** Kosmische Hintergrundstrahlung (1978).

**Russell A. Hulse und Joseph H. Taylor Jr.:** Binärpulsar und Gravitationswellen (1993).





▲ Abb. 3: Messung der Orbitaländerung (Phase) des von Hulse und Taylor untersuchten Pulsars als Funktion der Zeit (Punkte) und die vorhergesagte Änderung aufgrund der Abstrahlung von Gravitationswellen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie (durchgezogene Linie).

– einem einzigen, gigantischen, elektrisch neutralen Atomkern. Die Rotation des Neutronensterns liefert ein ultrapräzises Zeitsignal im Radiobereich. Die darauf folgende Entdeckung eines Doppelpulsars und seiner Periodenänderung führte sogar zum Nachweis von Gravitationswellen (Abb. 3, vgl. [6]). Heute gehören Pulsarmessungen und auch die Radiointerferometrie zu den mit Abstand präzisesten astronomischen Messmethoden, mit denen fundamentale Aussagen der Physik getestet werden können.

Natürlich hat es in der Radioastronomie nicht nur Nobelpreis-Arbeiten gegeben. Sie umfasst Forschungsthemen aus der gesamten modernen Astronomie – einige dieser Highlights sind im nebenstehenden Kasten zusammengefasst.

### Die technologische Entwicklung

Die ersten Radioteleskope waren noch einfache Konstruktionen aus Draht und Holz, im Prinzip nicht viel anders als ein simpler Dipol. Eine gewisse Richtcharakteristik erreichte man mit etwas ausgefeilteren Antennentypen, z. B. einer Yagi-Antenne, wie manche sie noch als Fernsehantenne auf dem Dach haben. Durch die Entwicklung des Radars begünstigt, wurden nach dem Zweiten Weltkrieg bei höheren Frequenzen einsetzbare Parabolspiegel entwickelt. Was mit Kriegstechnologie begann (wie z. B. dem deutschen »Würzburg-Riesen« [7]), entwickelte sich bald zu immer größeren universell einsetzbaren Radioteleskopen. Die Giganten unter ihnen stehen heute

in Deutschland (100-m-Teleskop in Effelsberg bei Bonn) und den USA (Green-Bank-Teleskop, 101 m effektiver Durchmesser; sowie das nicht-schwenkbare Teleskop von Arecibo, Puerto Rico, mit 305 m Öffnung).

Die ersten Beobachtungen wurden im Bereich unterhalb von 100 MHz durchgeführt, aber schon bald erweiterte sich das Frequenzspektrum nach oben. Damals galten 408 MHz als ultrahohe Frequenz (UHF), inzwischen gibt es erfolgreiche Beobachtungen bis hoch zu 1 THz. Damit erstreckt sich der von der Radioastronomie abgedeckte Frequenzbereich über fünf Zehnerpotenzen. Kaum eine andere astronomische Disziplin kann dabei mithalten. Für Beobachtungen bei den höchsten Frequenzen, d. h. bei Submillimeter-Wellenlängen, sind spezielle Empfänger und Teleskope mit extrem genauer Oberfläche erforderlich. Beispiele für solche Submillimeter-Teleskope sind das Heinrich-Hertz-Teleskop auf dem Mt. Graham (Arizona), das kürzlich auf Hawaii in Betrieb genommene Square Kilometer Array [8] oder das in Chile im Aufbau befindliche Teleskop APEX (Atacama Pathfinder Experiment) des MPI für Radioastronomie. Die Spannweite der Empfangstechnologien ist zu einer größeren Herausforderung für die radioastronomische »Community« geworden.

Ein weiterer Quantensprung in der Entwicklung der Radioastronomie war die Realisierung der Interferometrie und der Apertursynthese. Sie liegt heute fast jedem neuen radioastronomischen Großprojekt zugrunde und spielt auch bei op-

tischen Teleskopen eine immer wichtigere Rolle. Dabei werden zwei oder mehrere Teleskope direkt oder virtuell (mittels Datenleitungen oder Speichermedien) miteinander gekoppelt. Die Radiosignale werden an einer zentralen Stelle miteinander korreliert, d. h. zur Interferenz gebracht. Das elektronisch aufgenommene Interferogramm enthält Informationen über die Struktur und Position der Radioquelle. Mittels Rechnerprogrammen können diese Informationen in eine detaillierte Karte der Radioemission am Himmel umgewandelt werden. Die erreichbare Bildschärfe nimmt mit dem Abstand der einzelnen Teleskope und der empfangenen Frequenz zu. Verbindet man Radioteleskope auf verschiedenen Kontinenten, so spricht man von interkontinentaler Radiointerferometrie oder VLBI (Very Long Baseline Interferometrie). Sie liefert die höchste in der Astronomie verfügbare räumliche Auflösung – tausendfach so hoch wie das Weltraumteleskop HUBBLE –, die der Auflösung eines virtuellen Einzelteleskops mit dem Durchmesser der Erde entspricht. Die kleinste bisher aufgelöste Struktur hat eine Größe von 18 Mikrobogensekunden am Himmel – das entspricht dem Winkel, unter dem uns eine auf dem Mond liegende Erdnuss erscheinen würde, und stellt den unangefochtenen Weltrekord dar.

### Neue Schritte in die Zukunft

Vergangene Großtaten sind kein Grund, sich auf Lorbeeren auszuruhen. Auch für die Radioastronomie bietet sich aufgrund des technologischen Fortschritts und

## Meilensteine der Radioastronomie

**Entdeckung der Quasare:** Die Lokalisierung der Radioquelle 3C 273 durch eine Mondbedeckung und nachfolgende optische Spektroskopie führte zur Entdeckung der Quasare bei kosmologischen Rotverschiebungen. Mit Quasaren als kosmische Leuchtfeuer lieferte die 3C-Durchmusterung des Himmels die Grundlage für die ersten kosmologischen Studien und die Expansion des bekannten Universums.

**Dunkle Materie:** Die Entdeckung der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs mittels Radiospektroskopie ermöglichte die Vermessung von Rotationskurven von Galaxien zu großen Radien und führte zur Entdeckung der Dunklen Materie.

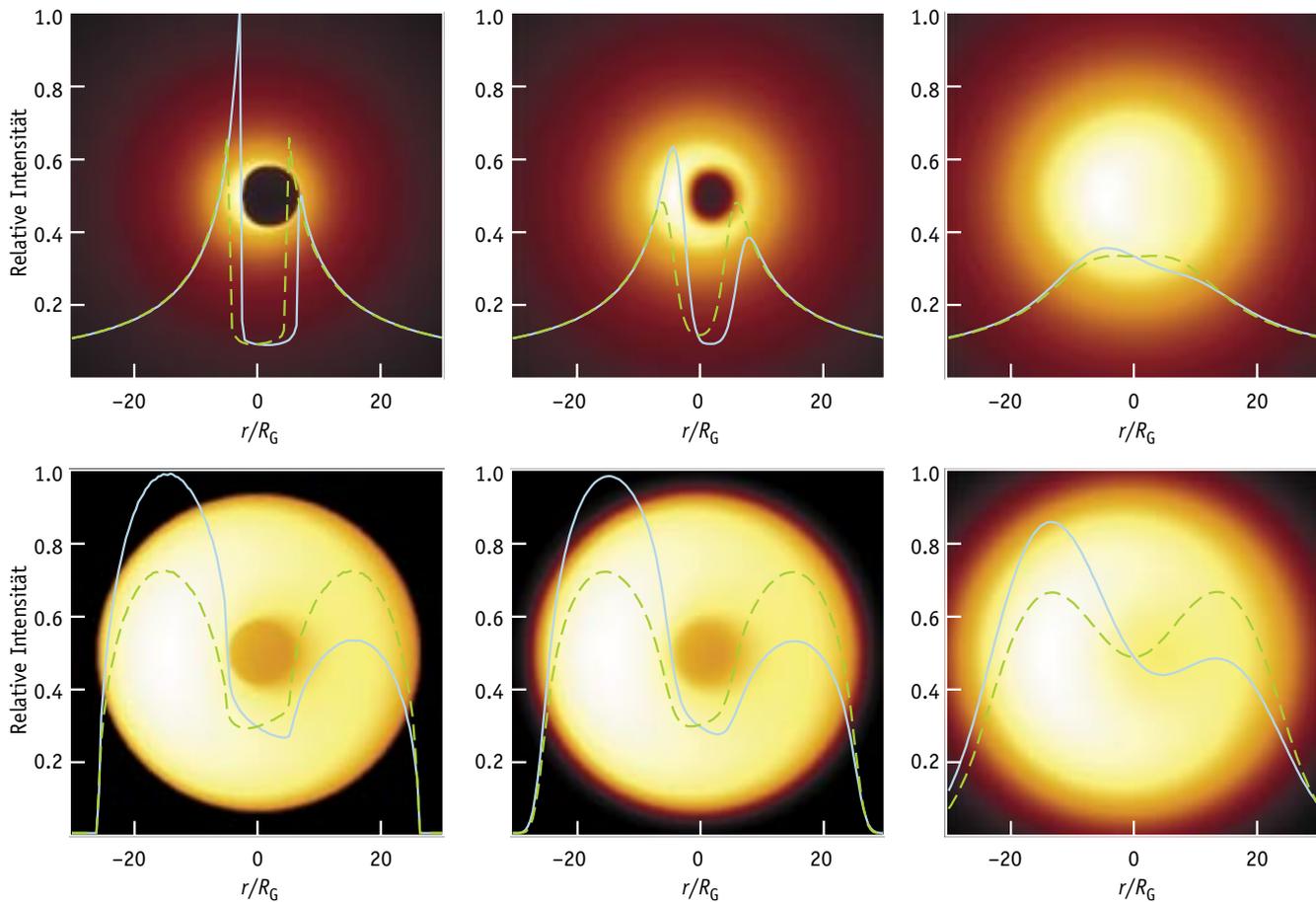
**Relativistische Jets:** Mit kontinentaler Radiointerferometrie wurden Radiojets entdeckt, die mit annähernd Lichtgeschwindigkeit aus der direk-

ten Umgebung Schwarzer Löcher kommen. Diese Jets sind die Hauptquellen hochenergetischer kosmischer Teilchen und Photonen.

**Kosmische Magnetfelder:** Mit Radiopolarisationsmessungen wurden erstmalig galaktische und auch intergalaktische Magnetfelder gefunden und vermessen.

**Organische Moleküle:** Mittels Spektroskopie bei hohen Frequenzen wurden im Weltall unzählige organische Moleküle gefunden, welche auf der Erde die Grundlage des Lebens bilden.

**Koordinatenreferenz:** Das genaueste und als fundamentale Referenzsystem definierte Koordinatensystem beruht auf astrometrischen Vermessungen der Radioemission von Quasaren mit Hilfe der interkontinentalen Radiointerferometrie.



der engen Verbindung mit industrierelevanter Forschung eine Vielzahl von Richtungen an, in die es vorzustößen gilt. Es lassen sich grob vier Linien angeben:

■ **Erweiterung des Frequenzspektrums:** Die Erschließung des gesamten von der Erde zugänglichen Frequenzbereiches war lange Zeit eine der größten Herausforderungen. Erst vor kurzem ist es gelungen bis zu 1 THz vorzustößen – noch weiter, und der Bereich der Infrarot-Astronomie ist erreicht. Damit ist der größtmögliche Frequenzbereich nach oben hin erschlossen; allerdings steckt die Technik der höchsten Frequenzen noch in den Kinderschuhen. Hier liegen zahlreiche Emissionslinien von Molekülen und Atomen, deren Vermessung einen Zugang zur kosmischen Chemie liefern wird. Das Projekt ALMA der ESO wird zum Verständnis dieser Vorgänge entscheidend beitragen. Aber auch die Frequenzen im MHz-Bereich, am untersten Ende des Radiospektrums, liegen seit Jahrzehnten brach und bieten hochinteressanten Stoff für eine neue Forschergeneration (siehe unten).

■ **Räumliche Auflösung:** Ein weiterer Treiber wissenschaftlicher und technischer Entwicklung ist die Jagd nach immer höherer räumlicher Auflösung. Dies kann entweder durch Vergrößern des Abstands von Teleskopen in einem Interferometer – der sogenannten Basislinie

– oder durch die Erhöhung der Beobachtungsfrequenz geschehen. Die endliche Größe der Erde setzt der maximalen Basislänge aber eine Grenze, zu deren Überwindung nur Satelliten in Frage kommen. Tatsächlich hat es (mit dem japanischen Satelliten HALCA/VSO) erste erfolgreiche Weltraum-VLBI-Experimente gegeben, und kommende Missionen können darauf aufbauen. Der technologische und finanzielle Preis für diese Technik ist naturgemäß hoch.

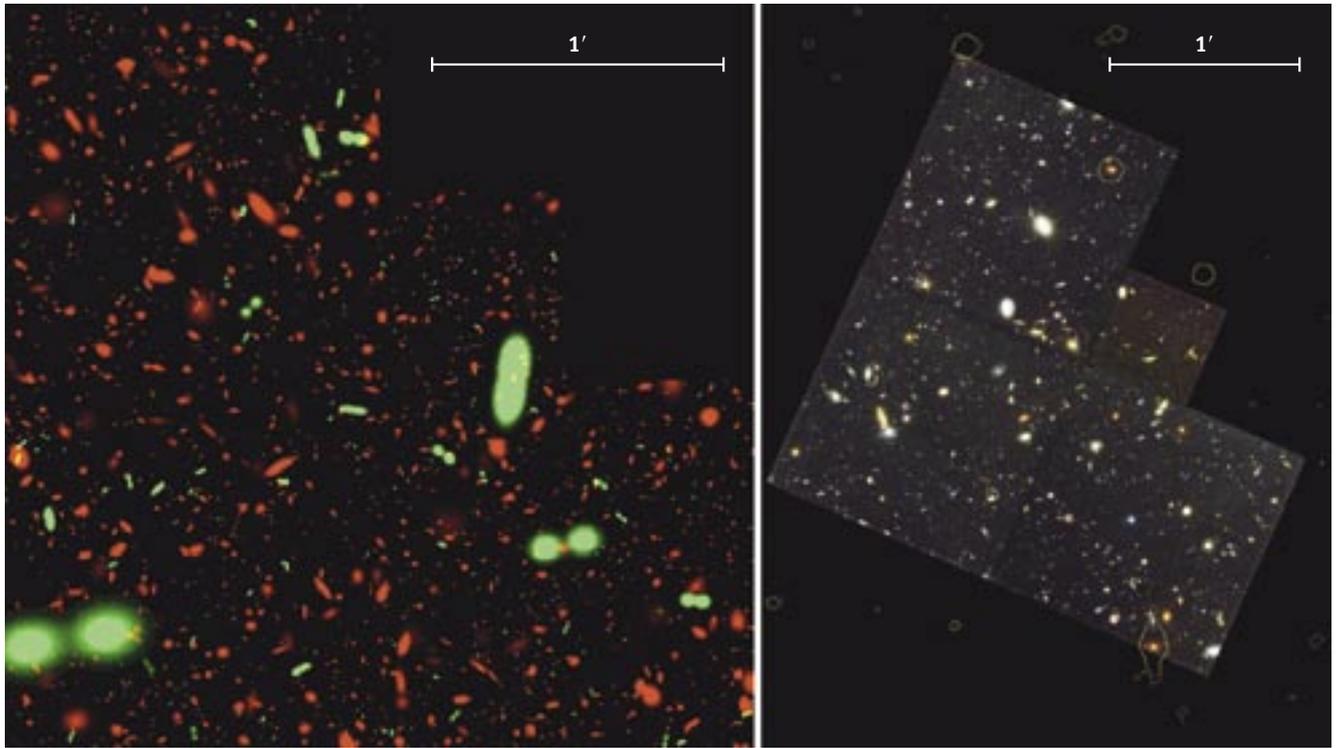
Auch eine Erhöhung der Beobachtungsfrequenzen ist in vollem Gange. Die Methode wird, nach den verwendeten kurzen Wellenlängen, als Millimeter- bzw. Submillimeter-VLBI bezeichnet. Mittelfristig wird dabei die VLBI-Technik von den großen Millimeterwellen-Projekten wie z. B. ALMA profitieren. Diese Technik hat zu dem oben erwähnten Auflösungsrekord geführt und wird in absehbarer Zeit als einzige in der Lage sein, direkte Abbildungen von Schwarzen Löchern zu liefern. Eine Computersimulation von hochauflösenden Radiobeobachtungen des Schwarzen Lochs im Milchstraßenzentrum zeigt den klar sichtbaren Schatten des Ereignishorizonts und verspricht somit eine grundlegende physikalische Entdeckung (Abb. 4).

Schon jetzt ist man bei einigen Quellen bis auf einen Abstand von 10 bis 1000 Schwarzschild-Radien vom zentralen Schwarzen Loch vorgedrungen, und es

▲ Abb. 4: Computersimulation von Radiobeobachtungen des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße, die mit der nächsten Generation von Radioteleskopen möglich sein werden [9]. Die Abszisse gibt die räumliche Skala in Einheiten des Gravitationsradius an, die Ordinate relative Intensitätswerte für vertikale (gestrichelte Linie) und horizontale (durchgezogene Linie) Querschnitte durch das Bild. Die obere Reihe zeigt ein rotierendes, die untere Reihe ein nichtrotierendes Schwarzes Loch. Die mittlere und rechte Spalte zeigen Bilder, wie man sie mit VLBI bei 0.6 bzw. 1.3 mm für ein optisch dünnes Emissionsgebiet um das Schwarze Loch erwarten würde.

lassen sich Messungen höchster Präzision durchführen: Die Bestimmung der Eigenbewegungen und Parallaxen vieler galaktischer Objekte, Zeitraffer-Filme von Supernova-Explosionen und Pulsationen von Sternatmosphären, Eigenbewegungen von Galaxien in der Lokalen Gruppe, etc.

■ **Empfindlichkeit:** Ein dringender Wunsch der Astronomen aller Wellenlängenbereiche ist stets der nach höherer Empfindlichkeit. Sie lässt uns tiefer



und weiter in Raum und Zeit schauen und erlaubt das Studium ganz neuer Phänomene. Als Faustregel gilt, dass die Teleskope jeder neuen Generation mindestens zehnmal so empfindlich sein sollten wie ihre Vorgänger. In der langwelligen Radioastronomie konzentrieren sich die Planungen daher auf das SKA, dessen Sammelfläche einen ganzen Quadratkilometer beträgt. Mit einer Sammelfläche von 0.008 km<sup>2</sup> gehört aber schon das 100-m-Radioteleskop in Effelsberg zu den heutigen Giganten. Noch deutlich größere Einzelteleskope scheinen aber auf absehbare Zeit nicht sinnvoll zu sein. Es kommen nur weit verteilte Netzwerke zusammenschalteter Teleskope in Frage, wie die erfolgreichen Beispiele des amerikanischen Very Large Array (VLA) oder des niederländischen Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) bereits zeigen. Die genaue Anzahl und Größe der Einzelteleskope des SKA ist eine Frage der günstigsten Kalkulation und rangiert zur Zeit noch zwischen 4400 12-m-Teleskopen und dreißig 200-m-Teleskopen. Pilotprojekte in aller Welt dienen nun zur Bestimmung einer optimalen Variante.

Zur Einordnung der heute erreichten Empfindlichkeiten muss man sich vergegenwärtigen, dass in den Anfängen der Radioastronomie die Flussdichte der beobachteten Quellen im Bereich 10 Jy bis 1000 Jy (1 Jy = Jansky = 10<sup>-26</sup> W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>) lag; heute liegt sie im Bereich weniger Milli-Jansky (mJy), und Mikro-Jansky (μJy). Derart geringe Flussdichten werden bei langen Beobachtungszeiten durchaus nachgewiesen. Das SKA soll nun in den Nano-Jansky-Bereich (nJy) vordrin-

gen. Zusätzlich zur Vergrößerung der Sammelfläche der Teleskope gelingt dies durch breitbandigere Empfänger und Korrelatoren, die für einen größeren Teil des Frequenzspektrums auf einmal empfindlich sind.

Das Vordringen in das nJy-Universum ermöglicht nicht nur die Entdeckung bislang unbekannter Quellen (man erwartet bis zu 100 Millionen extragalaktischer Quellen) – es verheißt auch einen qualitativen Sprung. Bislang waren insbesondere bei der hochaufgelösten Beobachtung nur extragalaktische Quellen der sogenannten nicht-thermischen Strahlung nachweisbar: Synchrotronstrahlung von Elektronen, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit durch Magnetfelder bewegen. Thermische Emission von heißem Gas ist viel schwächer und oft nur bei großen ausgedehnten Quellen nachweisbar.

Die Fähigkeit eines Teleskops, thermische Quellen zu entdecken und aufzulösen, wird mit einer Grenzhelligkeitstemperatur angegeben: Sie gibt an, wie heiß eine gerade noch räumlich aufgelöste Quelle sein muss, damit sie auch nachgewiesen werden kann. Heute liegt diese Grenzhelligkeitstemperatur bestenfalls bei einer Million Grad – einer Temperatur, die selbst die heißesten Sterne nicht erreichen. Das SKA verspricht dagegen Empfindlichkeiten bis hinunter zu 10000 Kelvin. Damit wird der Radioastronomie mit ihrer unerreicht hohen Auflösung im Millibogensekunden-Bereich die thermische Welt der Sterne und Gasnebel erschlossen. War bislang der Radiohimmel noch relativ leer im Vergleich zu manchen optischen Beobachtungen, so werden die

▲ Abb. 5: Links das simulierte Ergebnis einer achtstündigen Beobachtung des Radiohimmels in einer willkürlichen Richtung mit dem SKA. Rote Symbole bezeichnen Galaxien mit Sternentstehung, grüne sind Radiogalaxien mit aktiven Kernen. Rechts das HUBBLE Deep Field (mehrere Wochen Integrationszeit), überlagert mit einer tiefen Radiokarte des VLA (Konturlinien). Deutlich ist der enorme Zuwachs an Radioquellen beim SKA im Vergleich zur herkömmlichen Radiotechnik und zu optischen Bildern – auch wenn es sich nicht um den gleichen Himmelsausschnitt handelt. ([www.skatelescope.org](http://www.skatelescope.org))

▶ Abb. 6: Prinzip eines »Phased Array«. Ein normales Radioteleskop (links) sammelt Photonen auf einer großen Fläche und reflektiert sie auf einen Punkt. Beim »Phased Array« (rechts) sammeln mehrere Einzelantennen Signale auf, die anschließend durch passend gewählte elektrische (oder digitale) Verzögerungen (»Delay«) phasenrichtig vereinigt werden.

Radiokarten in Zukunft auch den mit dem Weltraumteleskop HUBBLE aufgenommenen Bildern – wie z. B. dem HUBBLE Deep Field – selbst nach relativ kurzer Integrationszeit in nichts nachstehen (Abb. 5). Hinzu kommt, dass das SKA ein unglaublich effizientes Durchmusterungsteleskop ist und große Teile des Himmels in kurzer Zeit abbilden kann. Es kann schnell den größten Teil aller normalen Galaxien mit- samt ihrer Entfernung entdecken und deren Entfernung bestimmen, und wird somit zu einer der wichtigsten Messmaschinen für die Kosmologie der Zukunft.

■ **Flexibilität:** Eine völlig neuartige Erweiterungsmöglichkeit bietet sich der Radioastronomie zurzeit aufgrund einer fast unbegrenzten Flexibilität durch die direkte digitale Bearbeitung der Radiowellen. Damit verbunden ist die Möglichkeit, ein Teleskop fast komplett in Software zu realisieren. Hat man nämlich die Radiophotonen, welche die Antennen erreichen, digitalisiert, so kann man ihren Strahlengang (insbesondere ihre relative Verzögerung), so wie er in einer Antennenschüssel verlaufen würde, im Rechner nachbilden und beliebig verändern, bevor man die Photonen in einem digitalen Brennpunkt zusammenführt (Abb. 6). Radiophotonen können digitalisiert werden, weil sie aufgrund ihrer Vielzahl den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik gehorchen und Quanteneffekte keine große Rolle spielen.

Die einmal digital vorliegenden Wellen können verlustfrei kopiert und reproduziert werden. Damit lassen sich dann zusätzliche virtuelle Antennen nachbilden – im Englischen wird dies »Multi-Beam- ing« genannt. Allein begrenzt durch die (immer weiter steigende) Rechnerleistung, kann man so in beliebig viele Rich-

tungen gleichzeitig schauen, seine Blick- richtung in Sekundenbruchteilen exakt ändern (entsprechend dem Schwenken eines herkömmlichen Teleskops), und – falls man die Daten eine zeitlang speichert – auch noch ein paar Minuten in die Vergangenheit schauen (»retrospective Beamforming«) und den Himmel kurz vor einem plötzlich eingetretenen Ereignis studieren.

Bei herkömmlichen Radioteleskopen, die aus einer einzigen Antenne mit Parabolspiegel bestehen, kann man durch mechanisches Schwenken des Parabolspiegels in verschiedene Richtungen schauen. Die Oberfläche des Spiegels ist so gewählt, dass alle Photonen »phasengleich« am Empfänger ankommen, d. h. der Weg zum Fokus ist von jeder Stelle aus der gleiche (Abb. 6, links). Bei einem »Phased Array« stehen über die ganze Fläche verteilt Antennen und Empfänger, welche die Radiowellen aufnehmen und diese dann elektrisch zu einem Punkt weiterleiten, in dem sie vereinigt werden (Abb. 6, rechts). Ebene Wellen von einem entfernten Objekt, das nicht senkrecht über der Array-Ebene steht, werden aus geometrischen Gründen am dem Objekt abgewandten Ende später ankommen als am Objekt zugewandten Ende. Zur Kompensation wird für jedes Empfangselement eine elektrische Verzögerung (»Delay«), eingebaut, so dass die Wellen am Ausgang des Arrays doch wieder phasengleich ankommen. Die Elektronik dieses so genannten »Beamformers« tut somit das gleiche wie die geneigte und gekrümmte Oberfläche der Antennenschüssel. Durch Einstellung des Delays kann man die Empfindlichkeitsrichtung des Arrays beliebig wählen und somit in alle Richtungen schauen. Durch Duplizieren der Eingangssignale und den Einbau weiterer Beamformer ist

es sogar möglich, in mehrere Richtungen gleichzeitig zu schauen – natürlich nur innerhalb des Gesichtsfeldes der primären Empfangselemente, aus denen das Array aufgebaut ist. Geschah dies früher durch Analogtechnik, so kann man diese Vorgänge heute komplett im Rechner erledigen.

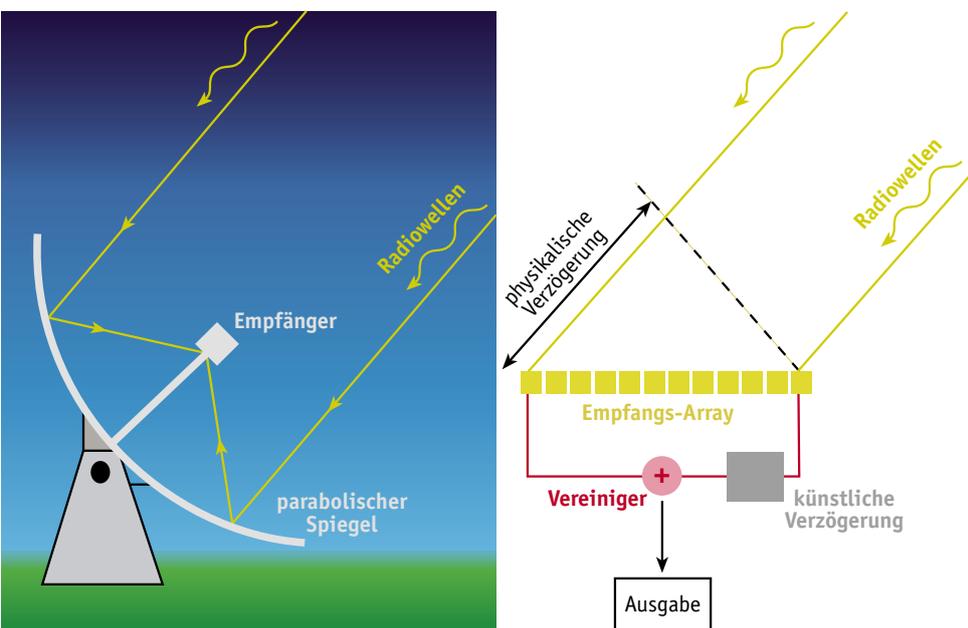
Ein weiterer Vorteil der digitalen Technik ist, dass man artifizielle Störsender (TV, Mobilfunk, etc.) leicht herausfiltern kann. Filter müssen nicht mehr für jeden Sender gelötet werden, sondern können per Software im Rechner realisiert werden. Die neuesten Konzepte für Radioteleskope setzen genau auf diese neuen Freiheiten des digitalen Multibeaming: Für das Square-Kilometer-Array wurde diese Technik vorgeschlagen und für LOFAR (das LOW-Frequency-ARRAY) ist sie zum Herzstück des Konzepts geworden. LOFAR – ursprünglich als SKA-Vorgänger bei den niedrigsten Frequenzen gedacht – hat sich inzwischen zu einem eigenständigen, sehr interessanten Projekt entwickelt, dessen Realisierung in relativ kurzer Zeit zu erwarten ist und daher exemplarisch im Folgenden genauer diskutiert werden soll.

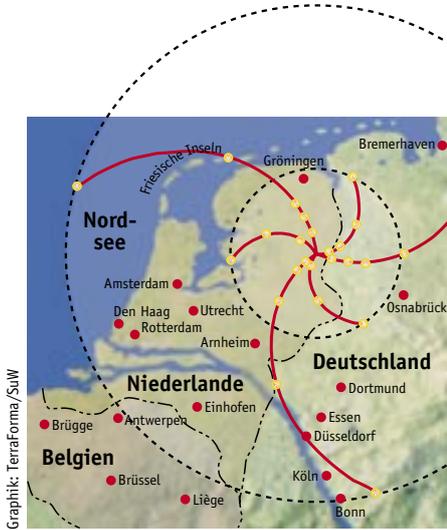
## LOFAR und das Breitband-Internet der nächsten Generation

Das Radioteleskop LOFAR wird nach dem Prinzip eines »Phased Array« gebaut und verspricht nicht weniger als eine komplette Revolution der Radioastronomie bei niedrigen Frequenzen. Sein Einsatzbereich wird zwischen 10 MHz und 220 MHz liegen und liefert bei den niedrigsten Frequenzen eine effektive Sammelfläche von einem Quadratkilometer. LOFAR besteht aus 100 Stationen, die in einer logarithmischen Spirale angeordnet und über 350 Kilometer verteilt sind (Abb. 7).

Das Herz der Anlage soll im schwach besiedelten Gebiet in der Nähe des Radioteleskops in Westerbork nahe der deutsch-holländischen Grenze liegen, die weitere Verteilung der Stationen ist noch nicht genau festgelegt. Sie können sich aber in Deutschland über einen Raum bis nach Potsdam oder Bonn erstrecken.

Jede Station beherbergt jeweils 100 nicht bewegliche einfache Dipole des Typs »Invertiertes V« (plus Bodenabschirmung und Elektronik) sowie Analog/Digital-Wandler, die über hyperschnelle Glasfaserkabel – das Internet der nächsten Generation mit bis zu einigen Terabit pro Sekunde – mit einem zentralen Superrechner verbunden sind (dessen Rechenleistung entspricht der von 10000 PCs). Aufgrund dieser Anordnung erlauben die Stationen eine Auflösung von bis zu einer Bogensekunde. Das Herzstück des Arrays bildet ein virtueller Kern aus mindestens einem Viertel aller Antennen, die zu einer





▲ Abb. 7: Oben links: Schematische Darstellung der Anordnung der Stationen von LOFAR. Der Durchmesser des Kreises beträgt 350 km. Oben rechts: Eine zukünftige LOFAR-Station (künstlerische Darstellung) besteht aus Dipolantennen des Typs »Inverted V«. Unter jeder Antenne befindet sich ein flacher runder Reflektor. Unten rechts: Photo von installierten Antennen auf einem Testfeld in Exloo, Holland.

Superstation zusammenschaltet werden.

Begrenzt durch die Rechnerleistung – aber später flexibel erweiterbar – liefert das Teleskop gleichzeitig acht Antennenkeulen, mit denen man in beliebige Richtungen am Himmel schauen kann, wobei die Empfindlichkeit bei niedrigen Elevationen naturgemäß abnimmt. Die erwartete Empfindlichkeit im Zenit beträgt bei 120 MHz bis zu 2.4 mJy in nur einer Sekunde und bis zu 5  $\mu$ Jy in 100 Stunden – eine aufgrund von Multi-Beaming durchaus vernünftige Integrationszeit. Bei niedrigeren Frequenzen ist die Empfindlichkeit aufgrund des galaktischen Hintergrundes geringer (68 mJy in einer Sekunde bei 30 MHz). Insgesamt sind die erreichbaren Empfindlichkeiten – insbesondere bei den niedrigen Frequenzen – um mehrere Größenordnungen besser als alles bisher verfügbare (Abb. 8). Eine Extrapolation von Quellenstatistiken (in erster Linie normaler Galaxien) zeigt, dass LOFAR bei diesen Empfindlichkeiten schon in den ersten Monaten bis zu 100 Millionen neuer Quellen entdecken wird.

### Generisches Sensorennetzwerk – das nächste Internet

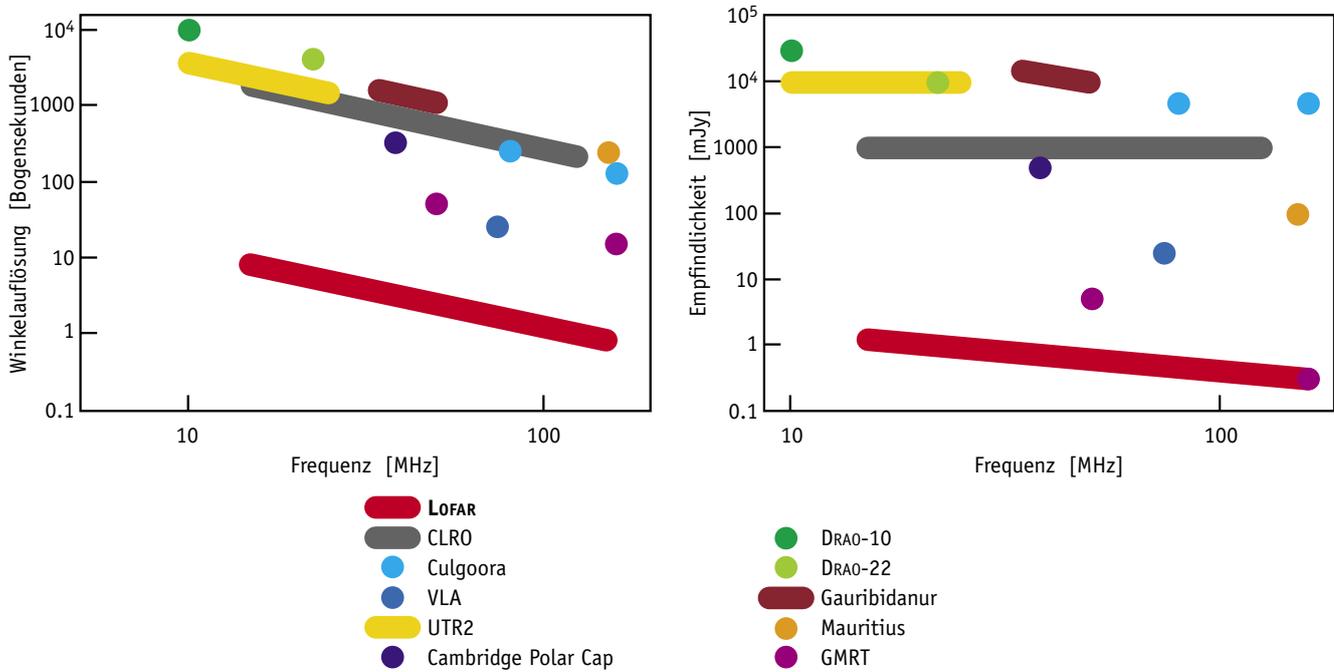
Ein höchst interessanter Aspekt von LOFAR liegt in der Datenverarbeitung. Tatsächlich steckt bei diesem Teleskop das meiste Geld im Datennetzwerk, in den Computern und in der Software. Die eigentlichen Empfänger – Dipole, Verstärker, und A/D-Wandler – enthalten preiswerte

Komponenten heutiger Alltagstechnik. Sie produzieren allerdings Datenraten in bisher nicht gekanntem Ausmaß, die in Echtzeit verarbeitet werden müssen. Dies erfordert eine Netzwerktechnik, die um eine Größenordnung schneller sein muss als die bisher verfügbare, und in Zusammenarbeit mit Industriepartnern entwickelt wird. Die Verlegung von Glasfaserkabeln über weite Entfernungen ist ein geringeres Problem, da noch viele im Rahmen des Internetbooms vergrabene Kabel unbenutzt im Boden liegen (»Dark fibers« – Aktienbesitzer unter den Lesern werden sich schmerzhaft erinnern), man muss nur wissen, wo. Ist das Netz einmal aufgebaut, so kann es auch für andere, z. B. kommerzielle Zwecke benutzt und vermietet werden.

Die Anschubfinanzierung für LOFAR kam daher auch aus Töpfen der Industrieförderung. Auch die weitere Finanzierung des Netzwerks kann man als In-

vestition betrachten, die sich über die nächsten zehn Jahre wieder bezahlt macht. Vor diesem Hintergrund ist nun ein großer Antrag über 52 Mio. Euro vom niederländischen Staat genehmigt worden. Dabei geht es um Gelder, die z. T. aus Überschüssen der Öl- und Gasförderung im Nordosten Hollands kommen. Weitere internationale Partner stehen in Verhandlungen. Seitens der Industrie wurde mit IBM ein Vertrag unterzeichnet, den Prototypen eines neuen Superrechners (Projekt BLUE GENE) mit ca. 25 Tfllop Rechenleistung (konzipiert als Petaflop-Rechner) mit LOFAR zu testen.

LOFAR kann man aber noch allgemeiner als ein generisches Sensorennetzwerk betrachten. Hierbei sind eine Vielzahl von »Fühlern« – es müssen ja nicht nur Radioantennen sein – miteinander verknüpft, die permanent Umwelteinflüsse messen, sie über das Netzwerk mitteilen und das Gesamtsystem darauf reagieren las-



sen können. Als zusätzliche Fühler sind Wetterstationen, Geophone und auch Teilchendetektoren geplant. Mit den Geophonen sollen seismische Veränderungen kontinuierlich studiert werden und Wetter- und Bodensensoren sollen helfen Präzisions-Landwirtschaft zu entwickeln, den Grundwasserspiegel zu überwachen und Vorhersagen für Windkraftwerke zu verbessern. Der Aufbau weiterer solcher Netze ist mit LOFAR relativ kostengünstig zu machen und erlaubt einen einzigartigen interdisziplinären Zugang zu unserer Welt und unserer Umgebung.

### Von der Kosmologie zur Klimatologie – Wissenschaft mit LOFAR

Es ist klar, dass die Erschließung eines neuen Frequenzraumes und eine signifikante Steigerung der Empfindlichkeit und der Auflösung immer auch in astronomisches Neuland führen. Trotzdem soll man sich bereits im Vorfeld über die zu erwartenden Ergebnisse Gedanken machen, um ein Teleskop auch entsprechend auslegen zu können. Im Folgenden wird eine Reihe wissenschaftlicher Anwendungen von LOFAR diskutiert.

■ **Das Zeitalter der Reionisation:** Die Kosmologie hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht, und trotzdem sind wir immer noch am Anfang. Eine große Frage ist diejenige nach dem Zeitpunkt der ersten Sternentstehung im Universum, als aus dem turbulenten, erkalteten Plasma des Urknalls plötzlich etwas qualitativ Neues entstand: selbstleuchtende, energieverwendende Materieballen – die Sterne.

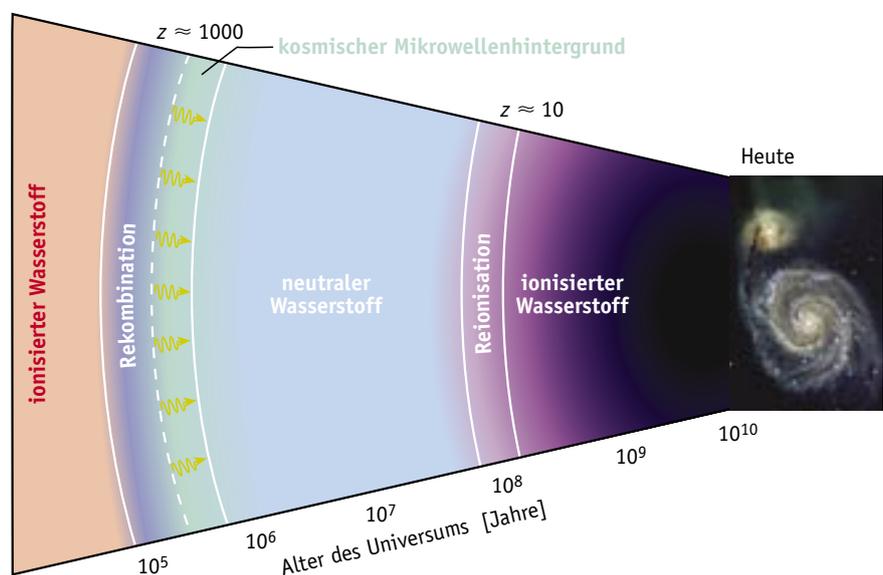
Nach dem Urknall kühlte das Plasma im jungen Universum schnell ab, bis es

schließlich zur Rekombination von Elektronen und Protonen kam, die als erste Elemente Wasserstoff und Helium bildeten. Aus diesem neutralen Material entstanden dann die allerersten Sterne und Galaxien, die das Gas ihrer Umgebung durch ihre Strahlung wieder aufheizten und ionisierten. Diese Epoche der ersten Sternentstehung (u. U. auch der Entstehung der ersten Schwarzen Löcher) nennt man das »Zeitalter der Reionisation« (Abb. 9). Sie gilt als eine der letzten unentdeckten Epochen in der Standard-Kosmologie, und ihr genaues Alter ist ein wichtiger, aber noch unbekannter Parameter.

Die optische Spektroskopie von Quasaren grenzt diese Epoche auf eine kosmologische Rotverschiebung von  $z > 7$  ein, kann aber nicht weiter vordringen, da schon geringste Mengen neutralen Gases bei höheren Rotverschiebungen das Universum im visuellen Bereich optisch dick erscheinen lassen. Die neuesten Er-

▲ Abb. 8: Das räumliche Auflösungsvermögen (links) und die Empfindlichkeit (rechts) sind bei LOFAR erheblich größer als bei allen Vorgängerteleskopen. Unterhalb von 74 MHz beträgt der Zuwachs bei Auflösung und Empfindlichkeit drei Größenordnungen, darüber mindestens eine. Dies ist bezogen auf nur eine Beobachtungsrichtung.

▼ Abb. 9: Nach dem Urknall kam es zur Abkühlung und Rekombination des Urplasmas. Die erste Generation von Sternen heizte es wieder auf. Es entstanden Sterne und Galaxien sowie das ionisierte intergalaktische Medium. Dieses Zeitalter der Reionisation kann mit Hilfe der rotverschobenen 21-cm-Wasserstofflinie von LOFAR untersucht werden.



gebnisse des Experiments WILKINSON MAP der NASA [3] im Bereich von 22 GHz bis 90 GHz haben das überraschende Ergebnis erbracht, dass diese Epoche wahrscheinlich noch erheblich früher eingesetzt hat als bislang angenommen – vielleicht bei  $z = 12$  bis 20. Warum dem so ist, bleibt noch im Dunkeln, aber LOFAR kann hier den entscheidenden Durchbruch bringen.

Neutrales atomares Gas produziert die bekannte 21-cm-Wasserstofflinie. Bei einer Rotverschiebung von  $z > 7$  wird diese Linie in den Frequenzbereich unterhalb von 200 MHz verschoben und kann von LOFAR nachgewiesen werden. Zusätzlich kann LOFAR auch die räumliche Struktur im Zeitalter der Reionisation statistisch untersuchen, ähnlich dem, was bei Untersuchungen der kosmischen Hintergrundstrahlung im hochfrequenten Radiobereich bereits geschieht.

Das erwartete Signal ist allerdings sehr klein (20 mK bei einem Hintergrundrauschen von 300 K) und man benötigt schon viele Monate – wenn nicht Jahre – Integrationszeit, um sinnvolle statistische Aussagen über die räumliche Verteilung zu ermöglichen. Mit LOFAR ist dies kein wirkliches Problem, da man für ein so wichtiges Experiment ohne weiteres eine der acht Antennenkeulen zur Verfügung stellen kann. In der Ära der Präzisions-Kosmologie wäre dann auch der letzte große Parameter festgeklopft. Hochfrequenz- und Niederfrequenz-Radioastronomie hätten damit die fundamentalen Beiträge zur Kosmologie geliefert.

■ **Entstehung der ersten Schwarzen Löcher und Galaxien.** Nach dem Urknall, der Rekombination und der Reionisation bildeten sich Galaxien und Galaxienhaufen, und die ersten Schwarzen

Löcher nahmen ihre Aktivität auf. Wie wir heute wissen, haben sich Schwarze Löcher und Galaxien eng gekoppelt zusammen weiterentwickelt. Sowohl die Sternentstehung als auch die Aktivität Schwarzer Löcher sind eng mit der Produktion von Radiostrahlung verbunden. Ihre Intensität ist ein sehr gutes Maß für die jeweilige Aktivität.

Das emittierte Radiospektrum steigt zu niedrigen Frequenzen hin stark an. Bei der niedrigen Auflösung bisheriger Niederfrequenz-Teleskope war es aber kaum möglich, einzelne Galaxien voneinander zu unterscheiden. LOFAR, mit seiner hohen Auflösung und Empfindlichkeit, ist ideal geeignet, um viele dieser Quellen zu lokalisieren. Eine Starburst-Galaxie mit einer moderaten Sternentstehungsrate (SER) von fünf Sonnenmassen pro Jahr lässt sich mit LOFAR noch bis zu einer Rotverschiebung von  $z = 2$  erkennen, helle Starburst-Galaxien sogar bis zum Rand des Universums. (Abb. 10)

■ **Radiorekombinationslinien – Rydberg-Atome im dünnen interstellaren Medium.** Nicht nur im Kontinuum lässt sich die Entstehung von Sternen und Galaxien studieren, sondern auch im Licht bestimmter Emissionslinien. Jede Galaxie ist durchzogen von einem interstellaren Medium aus Plasma, neutralem Gas und Staub, aus dem sich immer wieder neue Sterne bilden. Bekannt sind die vielen Emissions- und Absorptionslinien im dichten Gas der Molekülwolken, die besonders gut im Submillimeter-Bereich, z. B. mit ALMA, zu untersuchen sind.

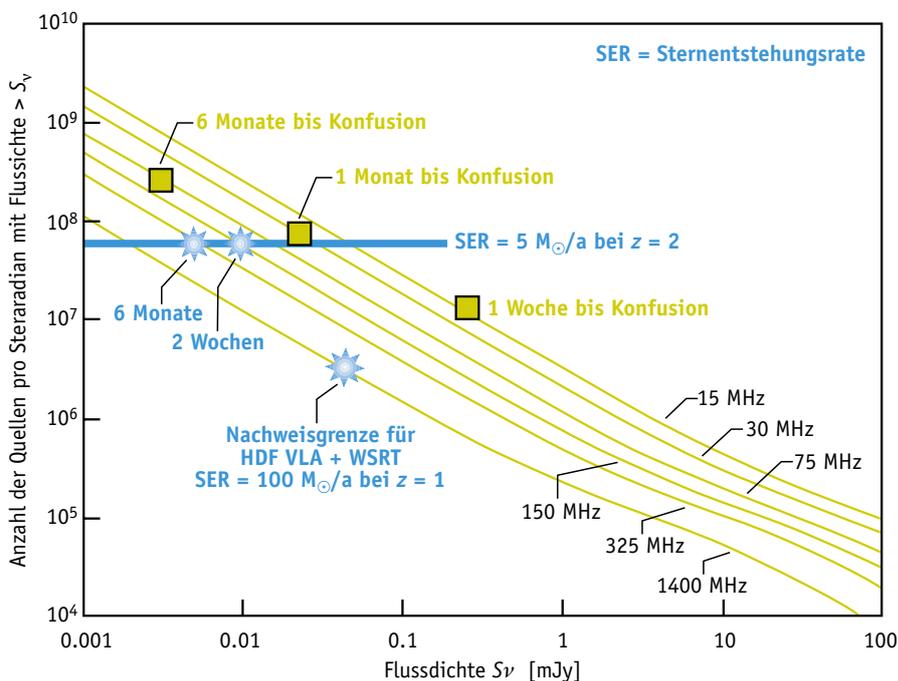
Aber auch das andere Extrem ist höchst interessant: Dünnes Gas, welches Sternentstehungsgebiete und Galaxien auf großen Skalen umgibt. Wegen sei-

ner geringen Dichten ist es nur schwer zu entdecken. In einer solchen Umgebung können extreme Rydberg-Atome bestehen, bei denen einzelne Atome (bzw. deren Elektronenorbits) makroskopische Durchmesser von zehntel Millimetern erreichen können. Quantenübergänge zwischen diesen fast schon freien Elektronenorbits von Wasserstoff führen dann zu sehr niederfrequenten Linien im potentiellen LOFAR-Bereich von 14 MHz bis 242 MHz – viele davon wurden bis heute nicht nachgewiesen. Diese Linien können entscheidende Informationen über physikalische Parameter (Dichte, Temperatur, etc.) innerhalb dünner Bereiche von Sternentstehungsregionen liefern, die uns derzeit nicht zugänglich sind.

■ **Transienten: Explosionen, Ausbrüche, Kosmische Teilchen und Neutrinos.** Eine der ganz besonderen Eigenschaften von LOFAR besteht in seiner Fähigkeit, transiente, also sehr kurzzeitige, Phänomene zu entdecken und darauf zu reagieren. Mit acht unabhängigen und innerhalb von Millisekunden über den ganzen Himmel verteilbaren Antennenkeulen kann LOFAR in kürzester Zeit auf Ereignisse am Himmel reagieren.

Die bekanntesten solcher Ereignisse sind Supernovae (Sternexplosionen) und Gamma-ray-bursts (GRBs) die mit der Entstehung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern (ggf. auch deren Verschmelzung) in Verbindung gebracht werden. Insbesondere bei Gamma-ray-bursts kommt es inzwischen auf Sekunden an, und noch kein Radioteleskop konnte bisher die »prompte« GRB-Emission, geschweige denn die Emission des Vorgänger-Objekts messen. Mit LOFAR ist aufgrund seines Datenpuffers

▶ Abb. 10: Extrapolierte Anzahl  $N$  der mit LOFAR nachweisbaren Starburstgalaxien als Funktion der Beobachtungsfrequenz (1400 MHz–15 MHz), des erreichbaren Flussdichtelimits  $S$  und der Dauer der Durchmusterung. Die Tiefe der Durchmusterung wird dadurch begrenzt, dass nach einer bestimmten Integrationszeit die Dichte von neuen Quellen derart groß ist, dass diese sich am Himmel zu überlappen beginnen – dies nennt man Quellen-Konfusion. Nur eine Steigerung der Auflösung durch zusätzliche entfernte Stationen kann dann noch helfen.



letzteres tatsächlich möglich: Bei schnellen Vorwarnungen (z. B. von einem Röntgensatelliten, einem Gravitationswellendetektor oder einem Neutrino-Teleskop) kann man die wenige Sekunden oder Minuten zuvor aufgenommenen Rohdaten noch einmal prozessieren und im Nachhinein eine Antennenkeule auf die Explosionsstelle richten. Damit lässt sich noch der Zeitraum vor und während der Explosion abbilden – eine in der Astronomie bisher einmalige Eigenschaft.

Da LOFAR im Prinzip den ganzen sichtbaren Himmel in seinem Sichtfeld hat, kann man auch regelmäßig Himmelskarten erstellen und im Radiobereich nach neuen Objekten Ausschau halten. Es ist z. B. bekannt, dass Röntgenausbrüche von stellaren Schwarzen Löchern (Mikroquasaren, Röntgendoppelsternen) – für die spezielle Röntgensatelliten gebaut werden – mit Radioausbrüchen einhergehen. Ungefähr einmal im Monat würde LOFAR ein solches Ereignis finden können.

Schließlich lässt sich diese Flexibilität sogar für Teilchenexperimente nutzen. Es ist z. B. bekannt, dass kosmische Strahlung (Teilchen mit extrem hohen Energien bis hin zu  $10^{20}$  eV, die in kosmischen Quellen beschleunigt werden und auf die Erde prasseln) beim Eintritt in die Erdatmosphäre einen Radioimpuls (vermutlich Geosynchrotronstrahlung) aussendet. Für wenige Nanosekunden ist dieser Radioblitz die hellste Radioquelle am Firmament. Normale Radioteleskope könnten allerdings niemals in so kurzer Zeit reagieren, dies geht nur mit den virtuellen Antennenkeulen von LOFAR. Interessanterweise erwartet man solche Radioblitze auch von extrem hochenergetischen kosmischen Neutrinos, wenn sie denn existieren. Man sollte daher in den Rohdaten von LOFAR eine Vielzahl solcher kosmischen Teilchen- und ggf. auch Neutrino-Ereignisse finden können. Diese müssen dann nur mit einer entsprechenden Software herausgefiltert werden. LOFAR wird damit – fast ungewollt – zu einem wichtigen Astroteilchenphysik-Experiment. Ein vorbereitendes Experiment dafür (LOPES) läuft in Zusammenarbeit mit dem Luftschauerexperiment KASCADE (jetzt KASCADE GRANDE) an. (Abb. 11)

Übrigens können, wie jeder Funkamateure weiß, kurzfristige erdnahe Signale (z. B. Radarechos) nicht nur von kosmischen Teilchen, sondern auch von Meteoroiden und Mikrometeoroiden beim Eintritt in die Atmosphäre produziert werden. Wissenschaftlich ist das durchaus interessant, um z. B. alte Kometenschweife oder gar Staubströme des interstellaren Mediums zu entdecken.

Insgesamt ist die Möglichkeit, Transienten im Radiobereich auf Zeitskalen



▲ Abb. 11: Das Luftschauerexperiment KASCADE (jetzt KASCADE GRANDE) im Forschungszentrum Karlsruhe. Hier werden kosmische Teilchenschauer gemessen. Zur Zeit wird dort ein LOFAR-Prototyp (LOPES) errichtet, um die Radioemission dieser Schauer in Koinkidenz zu messen. Mit dieser Kreuzkalibration lässt sich hinterher LOFAR auch als kosmisches Teilchenexperiment betreiben.

von Nanosekunden bis hin zu Jahren aufzuspüren, eine faszinierende Erweiterung des bislang fast unerforschten Parameterraumes. Es mag durchaus sein, dass die spannendsten Entdeckungen in diesem Bereich noch vor uns liegen.

■ **Sonnensystem, Weltraumwetter und Planeten.** Ein ergiebiger Anwendungsbeereich der niederfrequenten Radioastronomie ist das Sonnensystem. Sonneneruptionen kann man schon mit relativ simplen Antennen sehr schön hinsichtlich ihrer Zeitabhängigkeit und Frequenzentwicklung studieren. Solche Ausbrüche haben einen signifikanten Einfluss auf die Erde, was unter dem Begriff »Weltraumwetter« bekannt geworden ist. Im schönsten Fall kann dies zu herrlichen Nordlichtern und im schlimmsten Fall zum Totalverlust von Satelliten führen.

LOFAR kann nicht nur diese Ausbrüche sofort nachweisen, sondern auch die weitere Entwicklung der durch das Sonnensystem eilenden Plasmaturbulenzen tomographisch abbilden. Das ausgestoßene heiße Sonnenplasma führt nämlich dazu, dass kosmische Hintergrundquellen im Radiolicht zu flimmern anfangen (»interplanetare Szintillation«, Abb. 12). Durch die schnelle Beobachtung vieler Hintergrundquellen, wie es mit LOFAR möglich (und zur Kalibration auch nötig) ist, lässt sich die räumliche Verteilung und Dichte des Sonnenwindes zeitlich verfolgen. Eine noch weitergehende Untersuchung des Sonnenwindplasmas lässt sich im Prinzip erreichen, wenn man Radarwellen ge-

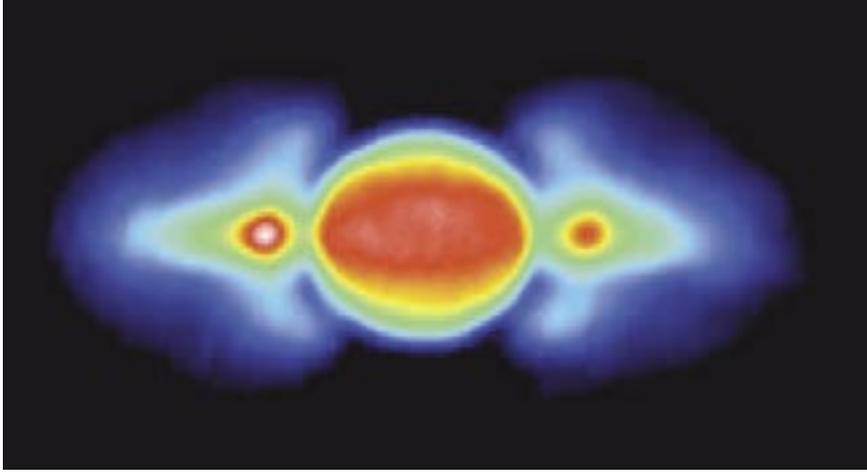


▲ Abb. 12: Diese dreidimensionale Verteilung des dichten Sonnenwindplasmas, welches auf die Erde zurast, wurde durch die Beobachtung der interplanetaren Szintillation im Radiobereich gewonnen (Jackson et al. 1997). Die zeitliche Entwicklung lässt sich sehr genau verfolgen. Ein entsprechender Film findet sich im Internet [10].

zielt in Richtung Sonne strahlt und deren Streuung mit LOFAR wieder empfängt. Dies wird im Rahmen des Projekts LOIS (LOFAR-Outrigger In Sweden, [11]) in Zusammenhang mit LOFAR versucht werden.

Nicht nur die Sonne ist ein starker Radiostrahler. Auch Jupiter emittiert eine extrem helle Radiostrahlung (Zyklotronstrahlung), die in Ausbrüchen bis zu einem Mega-Jansky bei 10 MHz betragen kann und deren Flussdichte zu hohen Frequenzen hin stark abnimmt (Abb. 13). Diese Emission ist eine Funktion des Magnetfeldes und kann im Prinzip auch zu höheren Frequenzen hin verschoben werden. Insofern ist diese Radioemission auch eine neuartige Möglichkeit, um jupiterähnliche Planeten außerhalb des Sonnensystems direkt zu entdecken.

Erdähnliche Planeten sind damit nicht zu finden. Dies ginge nur dann, wenn es dort Bewohner mit UKW-Funk oder sogar starken niederfrequenten Radarsendern gäbe. Schon lange suchen SETI-Begeisterte (SETI = Search for Extraterrestrial Intelligence) international nach solchen



◀ Abb. 13: Radiobild des Jupiter bei  $\lambda = 13$  cm, aufgenommen mit ATCA (Australia Telescope Compact Array). Aufgrund der schnellen Rotation Jupiters ist auch eine 3D-Abbildung der Radioemission leicht möglich (siehe [13] für eine animierte Darstellung). Auch extrasolare Planeten ließen sich durch eine derartige Radiostrahlung direkt entdecken.

Signalen. Im Prinzip wäre LOFAR dafür ein perfekt geeignetes Instrument – allerdings gibt es zu wenig spleenige, reiche Europäer, die eine solche LOFAR-Anwendung finanzieren würden.

■ **Atmosphäre und Ionosphäre.** Zum Schluss sollte man noch einen weiteren interessanten Nebeneffekt von LOFAR nicht vergessen. Zwar kann man niederfrequente Radiostrahlung auch problemlos bei Regen beobachten (in Holland und Deutschland ein wichtiges Thema!), aber dennoch wird die empfangene Strahlung über alle Frequenzen hinweg von der Atmosphäre beeinflusst – bei hohen Frequenzen werden die Wellenfronten bekanntlich in der Troposphäre, bei niedrigen Frequenzen in der Ionosphäre verändert. Dieser Effekt muss korrigiert werden, um die Radiointerferometrie zu ermöglichen. Dazu werden mit LOFAR (dank elektronischem Beamforming) in schnellem Wechsel viele bekannte Radio-

quellen als Kalibratoren beobachtet. Damit lässt sich der Zustand der Ionosphäre permanent mit hoher Genauigkeit modellieren und überwachen. Externe Einflüsse, wie z. B. die starken Einwirkungen der Sonnenstürme, können damit direkt verfolgt werden. Vor kurzem wurde sogar gezeigt, dass selbst kosmische Gamma-Ausbrüche unsere äußere Atmosphäre verändern können [12]. Das Magnetfeld unserer Erde und die Ionosphäre bilden einen wirksamen Schutzschild gegen kosmische Teilchen. Zur Zeit wird aber kontrovers diskutiert, inwiefern diese kosmischen Teilchen zur Wolkenbildung und damit auch zu unserem Gesamtklima beitragen.

Aber nicht nur Atmosphärenforscher, sondern auch Plasmaphysiker nutzen diese Informationen. Sie interessieren besonders, wie sich Plasmaturbulenzen in den extrem dünnen oberen Schichten unserer Atmosphäre fortpflanzen. Dazu kann man Turbulenzen abwarten, oder solche

gezielt erzeugen, etwa durch Zünden von Steuerraketen des SPACE SHUTTLES oder durch starke Radarstrahlen.

### Die Zukunft der Radioastronomie

Nach den großen Erfolgen der Vergangenheit hat die Radioastronomie nun eine große Zukunft. Nach dem Zweiten Weltkrieg stellte sie neben der traditionellen optischen Astronomie die erste große Erweiterung im beobachtbaren Frequenzspektrum dar. Sie hat uns eine völlig neue Welt erschlossen: eine Welt der relativistischen Plasmen, der Magnetfelder, der Hochenergie-Teilchen, der ultrakompakten Objekte, der Riesenatome und Moleküle und der Untersuchung des frühen Universums. Heute sind neue Disziplinen, wie z. B. Infrarot-, Röntgen- und Gamma-Astronomie, hinzugekommen, und oft ist es nur in der Zusammenschau aller Wellenlängen möglich, die Physik des Universums zu entschlüsseln.

Als die »Älteste unter den Neuen« steht die Radioastronomie dabei in einer besonderen Verantwortung, der sie sich mit einer Reihe von Großprojekten stellt. ALMA und LOFAR sind auf gutem Wege, während sich mit SKA eine Vision für die weitere Zukunft konkretisiert. Die speziellen, klassischen Eigenschaften der Radiowellen werden es auch in Zukunft erlauben, fundamentale Probleme in einzigartiger Weise zu lösen – wie das Beispiel LOFAR zeigt, manchmal sogar mit einer Technik, die im Prinzip in jedem modernen Haushalt zu finden ist: Radioempfänger und Internet. □

## Informationsquellen

- [1] **Heino Falcke, Karl M. Menten:** Ein Schwarzes Loch und seine Umgebung im Radiolicht. SuW 8/2003, S. 29.
- [2] **Lyman Page et al.:** First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations. Astrophysical Journal Supplement Series, 148, S. 233–241.
- [3] **Martin J. Neumann:** Neues vom Rand des Kosmos. SuW 4/2003, S. 20.
- [4] **Daniel Fischer:** BOOMERANG sieht eine flache Welt. SuW 10/2000, S. 834.
- [5] Cosmic Background Imager: [www.astro.caltech.edu/~tjp/CBI/](http://www.astro.caltech.edu/~tjp/CBI/)
- [6] **Gerhard Schäfer, Norbert Wex:** Binärpulsare testen Einsteins Gravitationstheorie. SuW 11/1993, S. 770.
- [7] **Peter G. Mezger, Rolf Schwarz:** Radioastronomie in Deutschland. SuW 8-9/1983, S. 403.
- [8] **Henrik Beuther:** Das Submillimeter-Array auf dem Mauna Kea, SuW 3/2004, S. 36.
- [9] **Falcke et al.** 2000, ApJL.
- [10] [http://cassfos02.ucsd.edu/solar/tomography/slow\\_stel\\_1884.html](http://cassfos02.ucsd.edu/solar/tomography/slow_stel_1884.html)
- [11] LOIS (LOFAR Outrigger in Scandinavia): <http://lois-space.org/>
- [12] Inan et al. 1999, <http://www.stanford.edu/~hail/gammaray.html>
- [13] <http://www.atnf.csiro.au/research/solarsys/jupiter/movies/>
- [14] SuW-Special »Das junge Universum«. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. ISBN 3-936278-30-X.
- [15] SuW-Special »Der heiße Kosmos«. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. ISBN 3-936278-54-7.
- [16] Homepage des Projekts LOFAR: [www.lofar.org](http://www.lofar.org)



**Heino Falcke** ist »Bijzonder Hoogleraar« (außerordentlicher Professor) für Hochenergie-Astrophysik an der Universität Nijmegen (Niederlande) und »Senior Scientist« am Radio-Observatorium Westerbork (Astron) in Dwingeloo (NL).