

ASTROPHYSIK

Das größte Teleskop der Welt

Mit dem Radioteleskop LOFAR (LOW Frequency ARray) beginnt eine neue Ära der Radioastronomie.

Marcus Brüggem

LOFAR ist ein europäisches Netzwerk von Radioteleskopen, das dank des innovativen Designs das größte Teleskop der Welt bilden wird. Mit ihm lässt sich der Himmel in einem Frequenzband beobachten, das bislang kaum erforscht ist. Somit öffnet LOFAR ein neues Fenster zum Universum, das es erlaubt, in eine frühe Phase des Universums zu blicken, kosmische Magnetfelder zu messen und Millionen von neuen Galaxien zu entdecken.

Für den größten Teil der elektromagnetischen Strahlung, die uns aus den Tiefen des Weltalls erreicht, ist unsere Atmosphäre undurchlässig. Ausnahmen sind der Bereich des sichtbaren Lichts und ein großer Teil der Radiowellen. Doch während die Beobachtung mit optischen Teleskopen auf eine mittlerweile vierhundertjährige Geschichte zurückblicken kann, begannen Astronomen erst nach dem Zweiten Weltkrieg damit, die Radiostrahlung aus dem Universum zu untersuchen. Zu den bemerkenswertesten Entdeckungen gehören die Pulsare, relativistische Teilchen, die in der Nähe von riesigen Schwarzen Löchern entstehen, organische Moleküle im Weltraum und nicht zuletzt die kosmische Hintergrundstrahlung. Mit dem Einsatz satellitengestützter Observatorien öffneten sich weitere Fenster im elektromagnetischen Spektrum, wie z. B. Röntgen- und Gammastrahlung. Doch ein spektrales Fenster blieb bis heute fast geschlossen und damit unerforscht: der langwellige Radiobereich. Dies liegt sowohl daran, dass unsere Radio- und Fernsehsender in diesem Bereich funken und die Signale stören, die wir aus dem Weltall empfangen wollen, als auch an dem Einfluss der höheren Atmosphäre (oder Ionosphäre), die die Wellen aus dem All verzerrt. Mit neuester Technologie kann man diese Probleme nun umgehen.

Die frühesten Radioteleskope waren nicht mehr als einfache Antennenkonstruktionen. Ihnen folgten, wie bei den meisten optischen Teleskopen auch, Parabolspiegel, die der scheinbaren Bahn einer Radioquelle am Himmel nachgeführt werden. Da sich das Auflösungsvermögen eines Teleskops nach λ/D berechnet (λ : Wellenlänge, D : Durchmesser der Apertur) und somit das Auflösungsvermögen mit steigender Wellenlänge abfällt, müssten Radioteleskope für den langwelligen Radiobereich einen Durchmesser von vielen Kilometern haben, um eine vergleichbare Auf-



Abb. 1 Das LOFAR-Netzwerk soll sich von den Niederlanden und Deutschland aus in weitere europäische Länder ausdehnen. Die gelben Punkte zeigen die Orte der LOFAR-Stationen, die gelben Linien die Datenverbindungen.

lösung wie optische Teleskope erreichen zu können. Diese Schwierigkeit lässt sich aber durch die sog. Apertursynthese umgehen, bei der mehrere Radioteleskope zusammengeschaltet werden. Diese bilden zusammen ein „virtuelles Riesenteleskop“, in dem die Radiosignale der einzelnen Teleskope miteinander korreliert bzw. interferiert werden. Mit dem Abstand der Radioteleskope nimmt die Auflösung des Riesenteleskops zu.

KOMPAKT

- Das digitale Radioteleskop LOFAR besteht aus einem Netzwerk fest installierter Radioantennen und kommt ohne bewegliche Teile und Motoren aus. Sein Beobachtungsfeld lässt sich allein mit Hilfe von Software steuern.
- Höchstleistungsrechner und schnelle Datenleitungen ermöglichen es, die Messdaten der verschiedenen Stationen zu korrelieren und Störsignale herauszufiltern.
- Damit lässt sich der bislang vernachlässigte Radiobereich mit Frequenzen von 10 bis 270 MHz beobachten.
- Beginnend mit Stationen in den Niederlanden (2006) und Deutschland (2007) soll das Netzwerk in weitere europäische Länder ausgedehnt werden. Damit wachsen Empfindlichkeit und Auflösungsvermögen.

Prof. Dr. Marcus Brüggem, Jacobs Universität Bremen, Campus Ring 1, 28759 Bremen

1) Mehr Informationen unter www.lofar.de und www.lofar.org.

LOFAR (Abb. 1) hingegen ist ein völlig neuartiges, digitales Radioteleskop, das keine beweglichen Teile und Motoren benötigt.¹⁾ Möglich wird dies durch moderne Höchstleistungscomputer und schnelle Datenverbindungen. Ein weitgespanntes Netz fest installierter Antennen, die in Fußballfeld-großen Feldern angeordnet sind, empfängt die Radiowellen. Solch ein Radioteleskop nennt man Phased Array (Infokasten). LOFAR erlaubt einen Blick in das Universum im Frequenzband von 10 bis 270 MHz, in dem Auflösung und Sensitivität bislang viel geringer sind als in anderen Bereichen des Spektrums [1]. Das Frequenzband von LOFAR wird dabei in zwei Bereiche aufgeteilt, unterhalb von 80 MHz bzw. oberhalb von 110 MHz, weil im UKW-Bereich dazwischen die meiste terrestrische Störstrahlung angesiedelt ist. Da die Plasmafrequenz der Ionosphäre um die 10 MHz beträgt, reflektiert diese alle Wellen mit niedrigeren Frequenzen, sodass sich diese von der Erdoberfläche aus nicht beobachten lassen. Selbst Radiowellen mit höheren Frequenzen werden von der Ionosphäre, die das „Weltraumwetter“ direkt beeinflusst, verzerrt. Aus diesen Gründen hat die Radioastronomie diese niedrigen Frequenzen bisher gemieden.

Da nun alle Signale digitalisiert sind, lassen sie sich bearbeiten, bevor sie zu einem Gesamtbild korreliert werden. Dabei besteht nun die Möglichkeit, Stör-signale herauszufiltern und den Einfluss der Ionosphäre mithilfe von Computermodellen zu korrigieren. Dies

funktioniert ähnlich wie bei adaptiven Optiksyste-men, die den Spiegel verformen, um die Luftunruhe auszu-gleichen. Nur ist es bei LOFAR nicht nötig, etwas me-chanisch zu verformen. Die Phasenunterschiede zwi-schen den Signalen der Einzelantennen werden hierbei elektronisch verändert.

Je nach Frequenzbereich verwendet LOFAR zwei Antennentypen: Für Frequenzen von 10 bis 80 MHz kommen einfache Drahtantennen in Form einer Pyra-mide zum Einsatz, bei 110 bis 270 MHz handelt es sich um zusammengesetzte Antennenelemente („tiles“), die aus 16 einzelnen gekreuzten Dipolen bestehen. Jede Station besitzt ein Antennenfeld für den höheren sowie eins für den niedrigen Frequenzbereich.

Die digitalisierten Signale von tausenden Antennen gelangen über Gigabit-Datenleitungen quer durch Europa zum zentralen Rechner Blue Gene/P an der Universität von Groningen, der die Signale auf seinen rund 12 000 Prozessoren verarbeitet. Seine Rechen-leistung von 27 Teraflops reicht aus, um die gewaltige Datenrate von 500 Gbit/s, die ständig von den Statio-nen eingeht, in Echtzeit zu korrelieren und daraus Ges-ambilder zusammzusetzen. LOFAR kann dabei in bis zu acht Richtungen gleichzeitig schauen. Auch hier ist es allein die Software, welche diese acht „beams“ über den Himmel führt. Lediglich der Datentransport und die Computerleistung begrenzen die Anzahl die-ser „beams“. Prinzipiell kann man auch alle Rohdaten

PHASED ARRAY

Ein **Phased Array** (oder **Aperture Ar-ray**) besteht aus einer großen Zahl von einfachen Antennen, die fest auf dem Boden montiert sind. Die Phasen der auf die einzelnen Antennen eintref-fenden Wellen werden dabei derart verändert, dass die Empfindlichkeit des Arrays in einer gewissen Raumrichtung maximiert und in andere Richtungen minimiert wird. Schließlich erhält man ein Antennenfeld mit räumlich ausge-richteter Empfindlichkeit.

Grafisch lässt sich diese Richtemp-findlichkeit als keulenförmiger Seh-strahl („Beam“) darstellen (Abb. i). Der Öffnungswinkel des Beams wird kleiner, wenn der Radius des Antennenfelds wächst oder die Wellenlänge abnimmt. Der Abstand der äußersten Dipole bzw. Stationen bestimmt dabei die Auf-lösung des Gesamteleskops.

Das digitale Korrelationssignal ent-spricht dem Muster bei der Interferenz optischer Strahlung. Der Beam wird elektronisch durch Phasenverzöge-rungen zwischen den Elementen er-zeugt (Abb. ii): Radiowellen von einer Quelle, die in einem Winkel θ von der Vertikalen beobachtet werden, müssen eine Wegstrecke δl weiter zurücklegen, um die linke Antenne zu erreichen. Die-se Signale kommen daher eine Zeit $c \delta l$ später an als an der rechten Antenne (c ist die Lichtgeschwindigkeit). Das

Signal an der rechten Antenne gilt es daher künstlich um dieselbe Zeit zu verzögern, um die Signale zu konstruk-tiver Interferenz zu bringen. Alle Quel-len, deren Winkel innerhalb eines ge-wissen Bereichs um θ liegen, produzie-ren dann Interferenzmuster. Indem man die Zeitverzögerung δt verändert, ändert sich die Blickrichtung des Tele-skops.

Mit dem Phased Array lässt sich in mehreren Richtungen gleichzeitig und

völlig unabhängig voneinander beo-bachten. Bei niedrigen Frequenzen (< 100 MHz) besteht ein Phased Array (wie bei LOFAR) aus einem Feld von einfachen Dipolantennen aus Metall-draht oder Metallstangen. Jeder Dipol empfängt Radiostrahlung des gesamen Himmels. Die Beams einer Station werden elektronisch in der Stations-Zentraleinheit erzeugt und vom Zentralrechner des Gesamteleskops gesteuert.

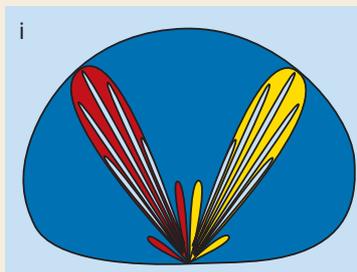
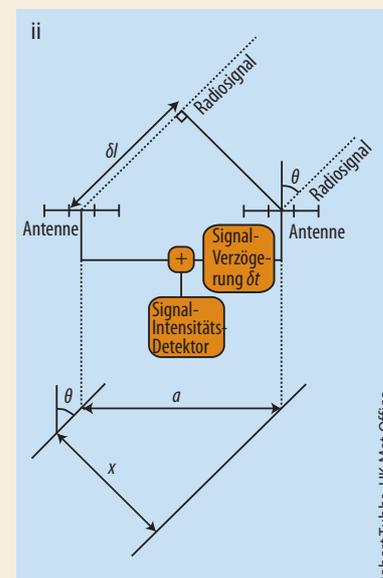


Abb. i Blau markiert ist die räumliche Empfindlichkeitsverteilung einer einzigen Antenne. Die gelben und roten Felder zeigen die Keulen oder Sehstrahlen, die aus den Antennen einer einzigen LOFAR-Station gebildet werden. Sind die Signale aller Stationen miteinander korreliert, dann haben die Keulen die Form der dünnen hellblauen Muster (synthesized beams).
Abb. ii Funktionsprinzip des Phased Array (vgl. Text).



Robert Tubbs, UK Met Office

speichern und zu einem späteren Zeitpunkt jeden beliebigen Punkt des Himmels beobachten. Lediglich die verfüg- und bezahlbare Speicherkapazität begrenzt dieses Unterfangen. Zurzeit ist geplant, mit einem Datenspeicher von 1 Petabyte (10^{15} Byte) einen Teil der Daten zwischenzuspeichern, um plötzliche Ereignisse, wie z. B. Supernova-Explosionen oder Gammastrahlen-Blitze, noch im Nachhinein beobachten zu können.

Die ersten 96 Antennen des Kerns von LOFAR stehen seit 2006 in der Nähe des kleinen Städtchens Exloo in der niederländischen Provinz Drenthe, 20 Kilometer westlich der Grenze zu Deutschland. Die erste Himmelskarte dieser Station ist bereits veröffentlicht. Weitere 6 Stationen folgen innerhalb eines Umkreises von 350 Meter, 12 weitere in bis zu zwei Kilometer Abstand, weitere 18 in bis zu 100 Kilometer Entfernung und mindestens 12 in benachbarten Ländern. Die erste deutsche LOFAR-Station wird vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn betrieben und steht neben dem 100-Meter-Radioteleskop in Effelsberg (Abb. 2). Sie hat ihren Betrieb im Dezember 2007 aufgenommen. Weitere Stationen werden zur Zeit vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, vom Astrophysikalischen Institut Potsdam und von der Thüringer Landessternwarte Tautenburg gebaut sowie eine weitere gemeinsam von den Universitäten Bochum, Bonn, Hamburg und der Jacobs University Bremen.

Mit den immer größeren Abständen des wachsenden LOFAR-Netzwerks steigt auch die Auflösung immer weiter: Die Antennen im 350-Meter-Umkreis um das Zentrum der Installation liefern bei einer Frequenz von 200 MHz eine Auflösung von 15 Bogenminuten, das entspricht gerade einmal dem halben Durchmesser des Mondes am Himmel. Bei 2 Kilometer Abstand zum Kern erreicht man schon 2,5 Bogenminuten, bei 100 Kilometer 3 Bogensekunden und bei europäischen Stationen in bis zu 1000 Kilometer Entfernung liegt sie bei 0,3 Bogensekunden.

Blick ins dunkle Zeitalter des Universums

In den nächsten Jahren wird LOFAR einen großen Einfluss auf fast jedes Gebiet der Astronomie haben. Zu den zahlreichen wissenschaftlichen Zielen von LOFAR gehört die Erforschung der „Epoche der Reionisation“, welche die Entwicklung des Universums nachhaltig geprägt hat und zu den großen kosmologischen Rätseln gehört [2]. Der erste neutrale Wasserstoff im Universum bildete sich ungefähr eine Million Jahre nach dem Urknall (dies entspricht einer Rotverschiebung z von ca. 1100), als die Temperatur des Universums durch seine Expansion auf unter 3000 Kelvin sank. Dann konnten Protonen und Elektronen zu Wasserstoff rekombinieren. Heute ist das Universum allerdings fast ausschließlich ionisiert. Es muss also eine Episode in der Geschichte des Universums gegeben haben, in der das Universum wieder ionisiert wurde. Über die Epoche der Reionisation des intergalaktischen Mediums



W. Reich / MPIFR

Abb. 2 Die erste deutsche LOFAR-Station besteht aus 96 Antennen (im Vordergrund) für den Frequenzbereich von 10 bis 80 MHz und befindet sich in unmittelbarer Nähe des 100-Meter-Radioteleskops in Effelsberg.

ist noch wenig bekannt. Insbesondere ist nicht klar, welche Quellen die Reionisation verursachen und wie dieser Prozess vor sich ging. Vermutlich begann dieser, als sich die ersten Sterne und Schwarzen Löcher bildeten, deren UV- und Röntgenstrahlung den neutralen Wasserstoff wieder ionisierte.

Erste Hinweise auf die Epoche der Reionisation liefern die Spektren weit entfernter Quasare, die keine Absorption durch neutralen Wasserstoff zeigen, solange sie eine Rotverschiebung von $z < 6$ haben [3]. Also muss die Reionisation früher, d. h. bei höheren Rotverschiebungen, stattgefunden haben. Auch die Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Satelliten (WMAP) liefert weitere Hinweise: Nach der Reionisation streuten die freien Elektronen an Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Dies führte zur Glättung der Temperaturanisotropien auf kleinen Skalen und auch zu einer teilweisen Polarisation der Hintergrundstrahlung. Die Daten einer dreijährigen Messreihe mit WMAP weisen auf eine Rotverschiebung der Reionisation zwischen 15 und 7 hin. Dies entspricht einem Alter des Universums zwischen 270 und 780 Millionen Jahren [4].

Neutraler Wasserstoff sendet Radiowellen mit einer Wellenlänge von 21 cm aus, was einer Frequenz von 1420 MHz entspricht. Die Frequenz dieser Hyperfeinstrukturlinie, verursacht durch das „Umklappen“ von Spins („spin-flip“), wird durch die Ausdehnung des Universums rotverschoben. Neutraler Wasserstoff bei einer Rotverschiebung von z. B. 10 lässt sich also bei einer Frequenz von rund 130 MHz beobachten. LOFAR ist dafür konzipiert, genau in diesem Frequenzbereich optimal zu arbeiten und die Emissionslinie des neutralen Wasserstoffs aus der Frühzeit des Universums zu messen. Aus der Frequenz, bei der die Emissionslinie erscheint, ergibt sich direkt die Rotverschiebung der Epoche der Reionisation. Die 21-cm-Emissionslinie des neutralen Wasserstoffs im frühen intergalaktischen Medium würde somit wertvolle

Information über die Verteilung und Entwicklung des neutralen Wasserstoffs liefern und erlaubt zum ersten Mal, die zeitliche Entwicklung des Reionisationsprozesses zu verfolgen.

Allerdings ist die Helligkeit des Wasserstoffs pro Raumwinkel sehr klein und lässt sich nur gemittelt auf Skalen von einigen Bogenminuten messen [5]. Daher benötigt man zur Untersuchung der Reionisation eine große Konzentration von Antennen in einem ungefähr zwei Quadratkilometer großen Gebiet. Diese Konfiguration liefert eine Auflösung von rund 3,5 Bogenminuten. Ein viel größeres Problem ist es, alle Vordergrundquellen zu extrahieren, die das Signal verfälschen. Mit den deutschen Stationen sollen dem LOFAR-Netzwerk die längsten Basislinien zur Verfügung stehen, die eine Auflösung im Bereich von Bogensekunden ermöglichen. Das ist notwendig, um Punktquellen im Vordergrund abziehen zu können und die Expansion von Ionisationsgebieten um die allerersten Sterne und Galaxienkerne im Universum beobachten zu können.

100 Millionen Radioquellen

Eines der wichtigsten Projekte von LOFAR ist eine Radiodurchmusterung des gesamten nördlichen Himmels. Da LOFAR in mehreren elektronisch gesteuerten „Beams“ beobachtet und keine mechanischen Teile zu bewegen sind, lässt sich der Himmel viel schneller durchmusteren als mit traditionellen Radioteleskopen (Abb. 3). Ziel ist es, mehr als 100 Millionen Radioquellen aufzuspüren. Das würde alle bisher verfügbaren Himmelskataloge um einen Faktor von mehr als zehn übertreffen. Hierzu sind allerdings nicht nur viele

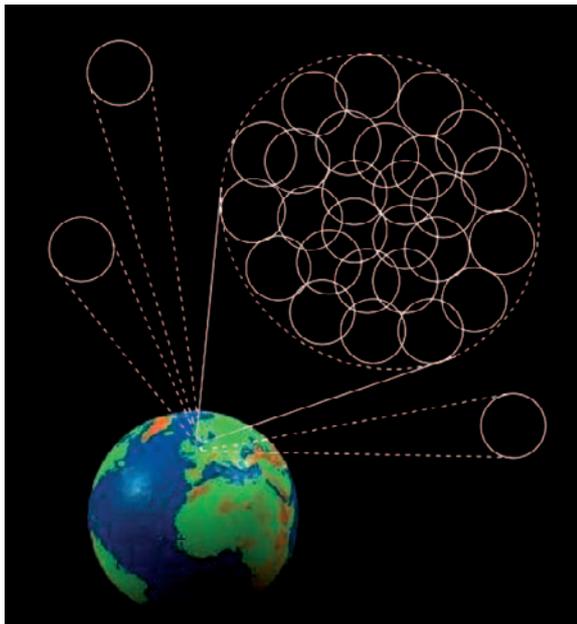


Abb. 3 LOFAR erlaubt verschiedene Beobachtungsmodi. Die Fähigkeit von LOFAR, mehrere weite Felder am Himmel gleichzeitig zu scannen, ermöglicht lange gezielte Beobachtungen bestimmter Objekte und gleichzeitig tägliche Himmeldurchmusterungen [8].

Antennen nötig, um die entsprechende Empfindlichkeit zu erreichen, sondern auch eine Winkelauflösung im Bereich einiger Bogensekunden, um Quellen, die am Himmel nah beieinander liegen, unterscheiden zu können. Um diese ehrgeizigen Ziele zu erreichen, müssen die größten Abstände zwischen den Antennen mehrere hundert Kilometer betragen.

Zu erwarten ist, dass LOFAR bei niedrigen Frequenzen mehr Quellen finden wird als bei höheren. Dies liegt an der Natur der Strahlung. Die meiste Radiostrahlung im Universum entsteht, wenn sehr schnelle Ladungen um Magnetfeldlinien kreisen, wie es z. B. in Galaxien geschieht (Synchrotronstrahlung). Das Spektrum der Synchrotronstrahlung folgt einem Potenzgesetz, sodass die Helligkeit mit sinkender Frequenz zunimmt. Für den Energiefluss der Strahlung pro Frequenzintervall gilt

$$F_\nu \propto \nu^{-\alpha} \quad (1)$$

wobei α bei den meisten extragalaktischen Radioquellen zwischen 0,5 und 2 liegt [6]. Da LOFAR bei niedrigeren Frequenzen als andere Radioteleskope operiert, kann es somit schneller mehr Quellen entdecken.

Die häufigsten Radioquellen sind Galaxien, die gerade eine Episode starker Sternbildung durchleben („starburst galaxies“). Unter den Sternen, die in einer solchen Galaxie entstehen, sind auch viele mit großer Masse. Diese sind besonders kurzlebig und enden in einer Supernova, welche relativistische Elektronen produzieren, die dann Synchrotronstrahlung aussenden. Die Beobachtung von Starburst-Galaxien verspricht grundlegende Einblicke in die Geschichte der Sternbildung und damit der Galaxienentwicklung im Universum. Es gibt Hinweise darauf, dass massereiche Galaxien früher Sterne bilden als weniger massereiche. Eine der offenen Fragen ist, warum und wann diese Galaxien aufhören, Sterne zu bilden. Radiostrahlung ist ein wesentlich besserer Indikator für die Sternbildung als z. B. optische Strahlung, die sehr stark von Staub im Universum beeinträchtigt wird.

Das rätselhafte intergalaktische Medium

Struktur im Universum bildet sich „hierarchisch“, das heißt, kleinere Objekte verschmelzen unter dem Einfluss der Gravitation zu größeren. Die größten gravitativ gebundenen Strukturen im Universum sind Galaxienhaufen, die durch Filamente von Galaxien verbunden sind. Der Raum zwischen den Galaxien ist mit einem dünnen, heißen Gas gefüllt, dem intergalaktischen Medium. In Galaxienhaufen ist dieses Medium mit Temperaturen von über 10 Millionen Kelvin sehr heiß und lässt sich durch Röntgenbeobachtungen nachweisen. Allerdings sagen Computersimulationen voraus, dass bis zur Hälfte allen Gases in unserem Universum zwischen 100 000 K und 10 Millionen K heiß ist [7]. Dieses Gas, „warm-hot intergalactic medium“ genannt, ist sehr schwer nachzuweisen und bis jetzt gibt es nur wenige Beobachtungen, die auf seine Existenz



Abb. 4 Mit Radioteleskopen lassen sich z. B. Magnetfelder in Galaxien beobachten. Zu sehen sind hier die Radioemission (Konturen) und die Magnetfeldvektoren der polarisierten Emission bei einer Wellenlänge von 6 cm, empfangen vom Very Large Array in New Mexiko und vom Effelsberg-Radioteleskop. Das Hintergrundbild stammt vom Hubble-Weltraumteleskop.

hindeuten. Dieses Gas wird in Galaxienfilamenten erwartet und enthält wahrscheinlich relativistische Elektronen. Diese entstehen an Schockfronten, die auftreten, wenn umliegendes, kaltes Gas in die Galaxienfilamente einfällt, und senden schwache, diffuse Synchrotronstrahlung aus. Mit LOFAR erhalten wir die ersten Beobachtungen dieses Mediums, das einen Großteil unseres Universums ausmacht. Speziell erhoffen sich Astrophysiker Erkenntnisse über Natur, Verteilung und das Magnetfeld dieses Gases.

Kosmischer Magnetismus

Alle astrophysikalischen Objekte scheinen Magnetfelder zu beherbergen: Planeten, Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen und auch das diffuse intergalaktische Medium. Die meisten Informationen über astrophysikalische Magnetfelder erhalten wir aus dem Studium von Radiowellen. Die Intensität der Synchrotronstrahlung gibt Auskunft über die Feldstärke, während die Polarisation unter anderem die Orientierung des Magnetfelds in der Himmelsebene verrät [9].

Beobachtungen mit dem Very Large Array (VLA) in New Mexico weisen z. B. nach, dass Elektronen in Galaxien und Galaxienhaufen in einem Magnetfeld von 5 μG ($5 \times 10^{-11} \text{ T}$) emittiert werden (Abb. 4). Woher diese Magnetfelder stammen, ist bislang größtenteils unverstanden. Felder dieser Größe wurden in der Milchstraße, Galaxienscheiben und hellen Galaxien-

haufen nachgewiesen. Allerdings reicht dies nicht, um Magnetfelder in den emissionschwächeren Synchrotrongebieten zu messen. Elektronen niedrigerer Energie, die eine längere Synchrotron-Lebensdauer haben und sich daher in größerer Entfernung von ihrer Quelle beobachten lassen, senden niedrigfrequente Radiostrahlung aus. Die Beobachtung bei einer um einen Faktor zehn niedrigeren Frequenz erlaubt es, ungefähr fünfmal schwächere Magnetfelder zu messen (bei einem Spektralindex von $\alpha = 0,8$, siehe Gl. 1).

Eine Messung der Rotation der Polarisations Ebene (Infokasten „Faraday-Rotation“) gibt zudem Aufschlüsse über die Feldkomponente in der Richtung der Sichtlinie. LOFAR kann hierbei kleinste Drehungen der Polarisations Ebene bestimmen (bis zu $0,1 \text{ rad m}^{-2}$) und schwächste Magnetfelder und Elektronendichten nachweisen, die bei höheren Frequenzen nicht beobachtbar sind. Damit wird LOFAR die schwächsten je gemessenen kosmischen Magnetfelder detektieren. Felder von der Größe von 1 bis 10 nG werden z. B. entlang der Filamente mit Elektronendichten von 10^{-5} cm^{-3} erwartet [10], was einem Rotationsmaß von $0,1$ bis 1 rad m^{-2} entspricht. Mit Hilfe der Faraday-Rotation lassen sich nun zum ersten Mal intergalaktische Magnetfelder entdecken und studieren. Davon verspricht man sich Aufschlüsse über den Ursprung kosmischer Magnetfelder: Wurden die ersten Magnetfelder in Phasenübergängen kurz nach dem Urknall gebildet oder liegt ihr Ursprung in plasmaphysikalischen Effekten? Welche Rolle spielen Sterne und schwarze Löcher bei der Entstehung von Magnetfeldern?

Die Faraday-Rotation ermöglicht zudem die Kartierung von Magnetfeldern in Halos von Galaxien in recht großer Entfernung von der Scheibe, wo die Elektronendichte niedrig ist, und in peripheren Regionen von Galaxienhaufen. LOFAR lässt statistische Untersuchungen von galaktischen Magnetfeldern zu, um u. a. Dynamo-Theorien zu testen. So können z. B. die dominanten azimuthalen Moden in einer großen Anzahl von Galaxien bestimmt und mit theoretischen Modellen verglichen werden [11].

FARADAY-ROTATION

Viele astrophysikalische Quellen, wie z. B. Jets in aktiven Galaxienkernen, senden linear polarisierte Strahlung aus. Linear polarisierte elektromagnetische Strahlung lässt sich in rechts- und links-zirkulär polarisierte Wellenkomponenten aufsplitten. In einem magnetischen Plasma breiten sich diese beiden Anteile mit unterschiedlicher Phasengeschwindigkeiten aus. Dies führt dazu, dass der Polarisationswinkel der Welle rotiert wird (Faraday-Rotation), und zwar um einen Winkel

$$\Delta\psi = \frac{e^3 \lambda^2}{2\pi m_e^2 c^4} \int_0^L n_e(l) B_p(l) dl,$$

wobei λ die Wellenlänge, n_e die Anzahldichte der Elektronen und B_p die Magnetfeldstärke entlang der Ausbrei-

tungsrichtung der Welle ist. Alle anderen Symbole haben ihre übliche Bedeutung. Das Integral wird entlang der Sichtlinie mit Länge L berechnet. Man kann es auch schreiben als

$$\Delta\psi = \lambda^2 RM,$$

mit dem Rotationsmaß RM . Dieses lässt sich berechnen, wenn man die polarisierte Strahlung einer Quelle bei verschiedenen Wellenlängen misst. Ist die Dichte des Mediums bekannt (etwa durch andere Beobachtungen), das die Strahlung von ihrer Quelle bis zu uns durchquert, kann man über das Rotationsmaß Informationen über die Magnetfeldkomponente entlang der Sichtlinie erhalten.

► **Abb. 5** Die erste Aufnahme mit allen 96 LOFAR-Antennen in Effelsberg bei 7 m Wellenlänge (42 MHz) zeigt den Verlauf der Milchstraße und starke Einzelquellen (Cygnus A, Cassiopeia A).

Ein weiteres Forschungsfeld von LOFAR sind Galaxienhaufen. Diese beherbergen in ihren Zentren gewaltige Radioquellen, die enorme Mengen an relativistischem Plasma mit Gesamtenergien von über 10^{72} eV in Form großer Blasen emittieren. Radiogalaxien dürften zudem den Schlüssel zum Verständnis der großskaligen Strukturbildung darstellen: Die Rückkopplung von zentralen aktiven Galaxienkernen mit ihren supermassiven Schwarzen Löchern steuert das Wachsen von Galaxien und Galaxienhaufen [12]. LOFAR soll

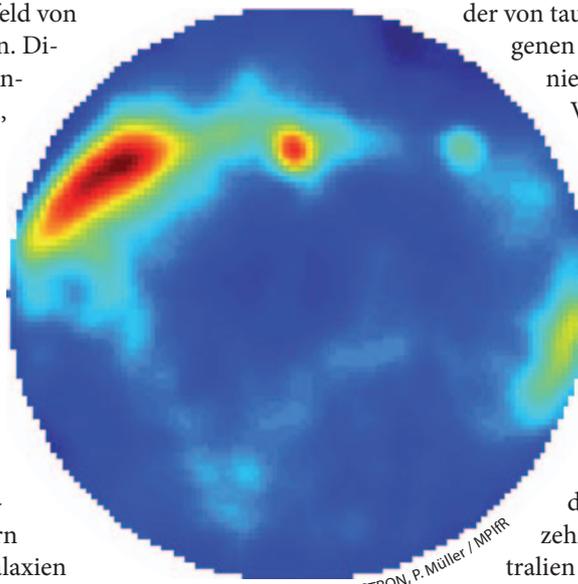
hier entscheidende Antworten liefern, da es ideal für die Beobachtung von Quellen mit steilem Spektrum und niedriger Oberflächenhelligkeit ist. Die Radioblasen können auch eine entscheidende Rolle in der Magnetisierung des Intracluster-Mediums spielen, das von Magnetfeldern mit Stärken von bis zu $50 \mu\text{G}$ durchdrungen ist. Die Radioblasen sind mit magnetisiertem Plasma gefüllt und können eine der Ursachen für das Haufenmagnetfeld sein. LOFAR wird zum ersten Mal eine genügende Anzahl von Hintergrundquellen entdecken, die nötig sind, um Faraday-Rotationsmaße in einer großen Zahl von Galaxienhaufen zu kartieren.

Wenn Emission und Faraday-Effekt im selben Medium stattfinden, wie z. B. in unserer Galaxie, ermöglicht es die spektrale Auflösung, Magnetfelder dreidimensional zu untersuchen. Dies wird neue Aufschlüsse über die physikalischen Eigenschaften von Plasmen liefern, die weder in Laboratorien noch mit Computersimulationen zu erforschen sind. Die Untersuchung von kosmischen Magnetfeldern mittels LOFAR wird von deutscher Seite vorangetrieben.²⁾

Revolutionäre Ausblicke

Nicht nur für die genannten Gebiete lässt LOFAR spektakuläre neue Einblicke erwarten. Auch die Sonnenphysik oder die Planetenforschung werden von diesem neuartigen Radioteleskop profitieren. LOFAR ist auch ein wichtiges Instrument für die Astroteilchenphysik, da es die kohärenten, langwelligen Radiowellen, die von ultra-hochenergetischer kosmischer Strahlung in der Erdatmosphäre ausgesendet werden, messen kann.

Die deutsche LOFAR-Station konnte im November 2007 innerhalb einer Sekunde eine erste Aufnahme des ganzen Himmels im langwelligen Radiobereich aufnehmen (Abb. 5). Für das nächste Jahr verspricht die erste Himmelsdurchmusterung mit dem bis dahin fertig gestellten LOFAR-Netz bereits eine Million Quellen. Das wird die Astronomie revolutionieren und vor neue Herausforderungen stellen. Die Korrelation



der von tausenden Antennen empfangenen Radiowellen in so einem niedrigen Frequenzband, die Verarbeitung von solch gewaltigen Datenmengen und die Nutzbarmachung für die astronomische Community sind informationstechnologische Herausforderungen. Somit ist LOFAR auch ein Wegbereiter für die nächste Generation von Radioteleskopen, die mit dem Square Kilometre Array (SKA) bereits in Planung ist. SKA, das ab Mitte des nächsten Jahrzehnts in Südafrika oder in Australien stehen könnte, soll eine Sammelfläche von einem Quadratkilometer

besitzen und aus kleinen Radioschüsseln und LOFAR-ähnlichen phased arrays zusammengesetzt sein. Es wird fast das gesamte von der Erde aus beobachtbare Radiospektrum von 70 MHz bis 10 GHz abdecken und einen noch tieferen Blick ins Weltall bieten als jemals zuvor [13].

Literatur

- [1] M. Brüggén et al., GLOW White Paper (2005): www.mpifr-bonn.mpg.de/public/pr/white.paper.oct6.pdf
- [2] V. Bromm, Physik Journal, April 2008, S. 29
- [3] R. H. Becker et al., Astron. J. **122**, 2850 (2001)
- [4] D. N. Spergel et al., Astrophys. J. (Suppl.) **170**, 377 (2007)
- [5] B. Ciardi und P. Madau, Astrophys. J. **596**, 1 (2003)
- [6] S. Rosswog und M. Brüggén, Introduction to High-Energy Astrophysics, Cambridge University Press, Cambridge (2007)
- [7] R. Cen und J. P. Ostriker, Astrophys. J. **514**, 1 (1999)
- [8] P. Best et al., LOFAR UK White paper (2008): <http://arxiv.org/abs/0802.1186v1>
- [9] R. Wielebinski und R. Beck (Hrsg.), Cosmic Magnetic Fields, Springer, Berlin (2005)
- [10] M. Brüggén et al., Astrophys. J. **631**, L21 (2005a)
- [11] R. Beck et al., Ann. Rev. Astron. Astrophys. **34**, 155 (1996)
- [12] M. Brüggén und C. R. Kaiser, Nature **418**, 301 (2002)
- [13] R. Beck, Das Square Kilometre Array, Sterne und Weltraum, September 2006, S. 22

DER AUTOR

Marcus Brüggén ist seit 2001 Associate Professor of Astrophysics an der Jacobs University Bremen. Nach Physikstudium und Promotion an der University of Cambridge (UK) forschte er zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und war dann Junior Research Fellow am Churchill College. Seine Forschung beschäftigt sich hauptsächlich mit der Physik der Galaxienhaufen, dem intergalaktischen Medium und der Wechselwirkung zwischen Schwarzen Löchern und ihrer Umgebung. Marcus Brüggén ist Vizepräsident des German Long Wavelength (GLOW) Konsortiums, das die LOFAR-Aktivitäten in Deutschland koordiniert.



2) Das sog. Key Science Project Cosmic Magnetism wird von Rainer Beck am Max-Planck Institut für Radioastronomie in Bonn geleitet.