

ASTROPHYSIK

Ein Teleskop mit 100 000 Antennen

Das europäische Radioteleskop LOFAR hat erste Ergebnisse geliefert.

Marcus Brüggem

Astronomische Beobachtungen sind längst nicht mehr auf sichtbare Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums begrenzt. Bei Radiostrahlung hat man das Bild von riesigen Parabolspiegeln vor Augen, die das langwellige Licht auf kleine Empfangselemente fokussieren. Dass es auch anders geht, zeigt die Ansicht eines Antennenfeldes von LOFAR. Die großflächigen Anlagen mit vielen tausend Antennen stellen Astronomen aber vor große technische Herausforderungen, wenn der Radiohimmel mit hoher Auflösung durchmustert wird.

Auf einem Feld in Norderstedt stehen seit Dezember letzten Jahres knapp zweihundert einfache Antennensegmente, die Radiosignale aus den Tiefen des Weltalls empfangen. Was auf den ersten Blick eher unscheinbar wirkt, ist Teil des derzeit größten Radioteleskops der Welt – des Low Frequency Array (LOFAR), das 2012 seinen regulären Betrieb aufgenommen hat.¹⁾ Trotz des scheinbar simplen Aufbaus ist die wissenschaftliche Vielfalt wahrscheinlich unerreicht: Das Teleskop dient zur Messung von kosmischen Strahlen [1]; man beobachtet die Sonne, Magnetfelder in fernen Galaxien und Galaxienhaufen, Pulsare, neutralen Wasserstoff in der Epoche des Universums, bevor es die ersten Sterne gab, und vieles mehr. Selbst die Ursache von Gewittern ließ sich damit untersuchen [2].

Das Zentrum des Teleskops befindet sich mit 38 Stationen im Norden der Niederlande, nahe der deutschen Grenze [3]. Deutschland ist mit sechs Stationen in Effelsberg, Jülich, Tautenburg, Bornim, Unterweilenbach und Norderstedt größter Partner. Weitere Anlagen stehen in Großbritannien, Schweden und Frankreich (Abb. 1). Vor kurzem wurde die erste polnische Station in Baldy eröffnet. Mit zwei weiteren Anlagen in Polen wird sich LOFAR nach Osten erweitern und dann aus mehr als 100 000 Einzelantennen bestehen. Alle Stationen sind über spezielle Glasfaserkabel, die Übertragungsgeschwindigkeiten von 10 Gb/s erlauben, mit einem Großrechner in Groningen verbunden.

Anders als bei einem herkömmlichen Radioteleskop gibt es bei LOFAR keinen Parabolspiegel, der Radiowellen auf ein Empfangselement fokussiert. Damit entfällt auch die Ausrichtung des Teleskops auf eine Quelle am Himmel und das Nachjustieren zum Ausgleich der scheinbaren Bewegung der Quelle. Als „Phased-



Das derzeit größte Radioteleskop der Welt LOFAR setzt sich aus fünfzig Feldern zusammen, auf denen jeweils mehrere hundert Dipolantennen stehen.

Array-Interferometer“ verwendet LOFAR statische Empfangselemente, die am Boden befestigt sind und jedes für sich die Radiostrahlung des gesamten Himmels empfangen. Die Radiowellen einer bestimmten Quelle kommen bei den verschiedenen Einzelantennen zu leicht unterschiedlichen Zeiten und damit unterschiedlichen Phasen an. Prägt man jedem Einzelsignal digital eine Zeitverzögerung so auf, dass sich untereinander konstruktive Interferenz ergibt, richtet man das Interferometer entlang eines virtuellen Sehstrahls aus. Diese „Blickrichtung“ des Antennenfelds nennen die Radioastronomen Empfangskeule. Dieses Prinzip kommt auch bei modernen Radaranlagen zum Einsatz. Wählt man einen anderen Satz von Zeitverzögerungen, verändert sich der Sehstrahl und damit die Blickrich-

1) www.lofar.org, vgl. auch *Physik Journal*, Oktober 2008, S. 29

KOMPAKT

- Das Radioteleskop LOFAR besteht aus rund 100 000 fest installierten Dipolantennen an fünfzig Standorten. Die Beobachtungsrichtung des Teleskops wird mithilfe von Software eingestellt.
- Um niedrigfrequente Radiostrahlung (30 bis 240 MHz) zu beobachten, ist es erforderlich, terrestrische Störsignale mittels aufwändiger Algorithmen auszusortieren.
- Mithilfe von LOFAR lassen sich u. a. das magnetische Universum, die Bildung der ersten Sterne sowie kosmische Strahlen untersuchen.
- LOFAR ist Pathfinder für das Square Kilometre Array, das internationale Zukunftsprojekt der Radioastronomen.

Prof. Dr. Marcus Brüggem, Universität Hamburg, Gojenbergsweg 112, 21029 Hamburg

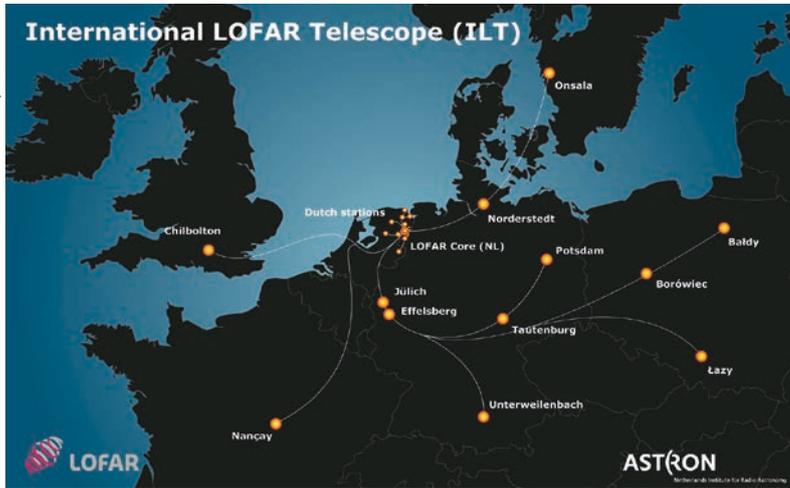


Abb. 1 Institute aus sechs europäischen Ländern gehören dem Konsortium „International LOFAR Telescope“ an. Sie sind verantwortlich für Aufbau und Betrieb der Antennenstationen und Großrech-

ner. Die meisten Stationen befinden sich in den Niederlanden im LOFAR Core. Die deutschen Aktivitäten koordiniert das German Long Wavelength Konsortium, dem elf Institute angehören.²⁾

2) www.glowconsortium.de

nung des Teleskops, ohne dass sich eine Antenne bewegt (**Abb. 2**). Mit unterschiedlichen Zeitverzögerungen kann LOFAR also gleichzeitig verschiedene Quellen beobachten.

Die Signale jeder einzelnen LOFAR-Station lassen sich auf dem Computer paarweise zur Interferenz bringen und mittels Fourier-Transformation in ein Bild des Himmels verwandeln. Die Auflösung des Teleskops hängt vom Abstand der äußersten Stationen – der Basislinie – ab und ist umso besser, je länger die Basislinie ist. Bei LOFAR ist sie mehr als tausend Kilometer lang und ermöglicht eine Winkelauflösung, für die ein Parabolspiegel mit einem Durchmesser von über tausend Kilometer erforderlich wäre. Für ein „Phased-Array-Interferometer“ ist es auch wichtig, dass die Stationen entlang der Basislinie gleichmäßig verteilt sind. Gibt es große Lücken in der Verteilung der Stationen, ist das Interferometer auf bestimmten Winkelskalen „blind“. Dies führt dann zu Bildfehlern.

So genannte „Transient Buffer Boards“ speichern die Rohdaten für einige Sekunden lokal an den Stationen. Damit lässt sich die Entwicklung von Ereignissen verfolgen, die bis zu fünf Sekunden in der Vergangenheit liegen, beispielsweise Schauer kosmischer Strahlung. Darüber hinaus ist es möglich, die Signale auf verschiedene Arten zu kombinieren, sodass das Teleskop gleichzeitig in verschiedene Richtungen schauen kann. Allein die Leistungsfähigkeit der Computer begrenzt die Anzahl der gleichzeitigen Blickrichtungen.

Einfache Dipole für höchste Empfindlichkeit

LOFAR beobachtet den Radiohimmel im niedrigfrequenten Bereich von 30 bis 240 MHz, der bislang relativ unerforscht ist. Dafür gibt es zwei Gründe: Zum einen wird dieser Frequenzbereich für terrestrische Kommunikation genutzt, also beispielsweise UKW-Radio, Digitalfernsehen und Funkverkehr. Zum ande-

ren verzerrt die Ionosphäre, eine Atmosphärenschicht ab etwa 100 Kilometer Höhe, die Radiowellen aus dem Weltall. Ursache ist die Plasmafrequenz der Ionosphäre, die etwa 10 MHz beträgt und alle Wellen unterhalb dieser Frequenz reflektiert. Bei Frequenzen unterhalb von 100 MHz werden langwellige Radiostrahlen merklich gebrochen, sodass die Phasenunterschiede der Wellen, die an den einzelnen Stationen ankommen, nicht mehr stabil bleiben.

Beobachtungen mit LOFAR sind technisch sehr schwierig, weil der Rechenaufwand, um Bilder zu erzeugen, enorm ist und die Softwareentwicklung anfänglich den Anforderungen hinterher hinkte. Nach einigen Anlaufschwierigkeiten liefert das Teleskop nun aber spektakuläre Ergebnisse. Neueste Computertechnologie erlaubt es, den Himmel bei diesen niedrigen Frequenzen zu beobachten. Aufwändige Algorithmen sind in der Lage, einzelne der vielen hundert Frequenzkanäle im Empfangsband für eine bestimmte Zeit auszublenden („Flagging“). Terrestrische Störsignale treten z. B. sehr intensiv in einem schmalen Frequenzband auf oder sind nur in den Signalen einzelner Antennen zu finden. Die Ionosphäre variiert zeitlich, sodass es für die Bilderzeugung notwendig ist, diese Variationen zu jedem Zeitpunkt zu modellieren und damit die Bildverzerrungen rückgängig zu machen. Ansonsten würden die Quellen auf den Bildern wild umher „wabern“ und sowohl ihre Position als auch ihre Helligkeit verändern. Ähnlich arbeiten adaptive Spiegel bei optischen Teleskopen, die durch mechanische Verformungen die Verzerrungen durch die turbulente Atmosphäre ausgleichen.

Diese Prozesse stellen große Anforderungen an Hard- und Software, da LOFAR gigantische Datenmengen ansammelt: Bei einer typischen Beobachtung

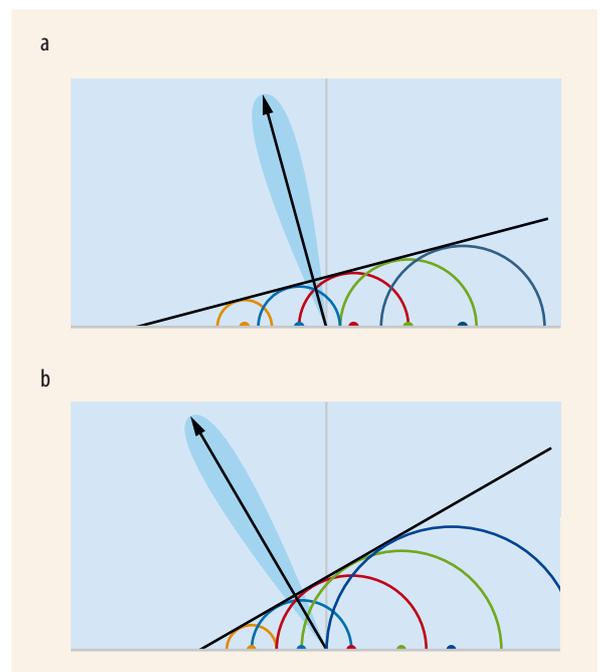


Abb. 2 Der Sehstrahl (Pfeil) steht senkrecht auf der Wellenfront, die sich als Einhüllende der einzelnen Signale (farbig) ergibt (a). Unterschiedliche Phasenverzögerungen der einzelnen Signale verändern die Richtung des Sehstrahls (b).

von acht Stunden fallen etwa vier Terabyte korrelierter Daten an. Die Menge der Rohdaten vor der Korrelation fällt um einen Faktor 10 bis 100 höher aus. Die Hamburger Sternwarte leistet einen großen Teil der Softwareentwicklung für die Durchmusterungen und einen Teil der Datenverarbeitung. Eine Software-Gruppe programmiert beispielsweise so genannte Pipelines, um die Beobachtung großer Felder und ausgedehnter Quellen zu ermöglichen. Die Pipelines sollen es erlauben, automatisiert die Rohdaten in möglichst fertige Bilder umzuwandeln – ein Prozess, der zurzeit noch viel manuelle Interaktion erfordert.

LOFAR besteht aus zwei Arten von Antennen: Die Low-Band-Antennen (LBA) empfangen Frequenzen von 30 bis 80 MHz, die High-Band-Antennen (HBA) zwischen 120 und 240 MHz. Die HBA-Antennen erreichen im Frequenzband zwischen 120 und 180 MHz und einer effektiven Bandbreite von 48 MHz ein Rauschen von 0,07 Millijansky.³⁾ Bei noch niedrigeren Frequenzen von 30 bis 60 MHz sollte ein Rauschen von 15 mJy möglich sein. Solche Empfindlichkeiten sind in diesem Frequenzbereich bislang unerreicht. Beide Antennenarten sind einfache Dipole, die auf dem Boden stehen und relativ kostengünstig sind. Dieses kostengünstige Design hat es auch erlaubt, dass sich in Deutschland viele Universitätsinstitute – größtenteils mit Förderung durch die Verbundforschung – an diesem Großforschungsprojekt beteiligen konnten.

Für die Projektpartner von LOFAR, beispielsweise die Betreiber der Stationen, gibt es garantierte Beobachtungszeit. Für den offenen Anteil an Messzeit können sich Astronomen weltweit mit einem Antrag bewerben.

Kosmische Zahnbürsten

Besonders imposante Quellen im niedrigfrequenten Radiohimmel sind Radiorelikte. Das sind riesige, ausgedehnte Radioquellen, die oft mehrere Millionen Lichtjahre messen und ausschließlich an den Rändern von Galaxienhaufen vorkommen. Ihre Oberflächenshelligkeit ist so gering, dass bislang nur einige Dutzend dieser Objekte bekannt sind. Ihr Spektrum verrät uns, dass ihre Radiowellen aus Synchrotronstrahlung entstehen, welche relativistische Elektronen in Magnetfeldern aussenden. Warum es am Rand von Galaxienhaufen Elektronen und Magnetfelder mit Stärken von einigen Mikrogauß auf diesen großen Längenskalen gibt, ist bisher ein Rätsel. Riesige kosmische Stoßwellen, wie sie bei der Kollision von Galaxienhaufen entstehen, könnten die Elektronen bis auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Diese diffuse Schockbeschleunigung oder Fermi-I-Beschleunigung ist von Supernovaresten bekannt, die jedoch viel höhere Mach-Zahlen (Verhältnis von Teilchengeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit) aufweisen als die Stoßwellen in Galaxienhaufen. Laut Theorie sollten solche schwachen Stoßwellen sehr ineffizient in der Beschleunigung von relativistischen Teilchen sein. Erst jetzt beginnen

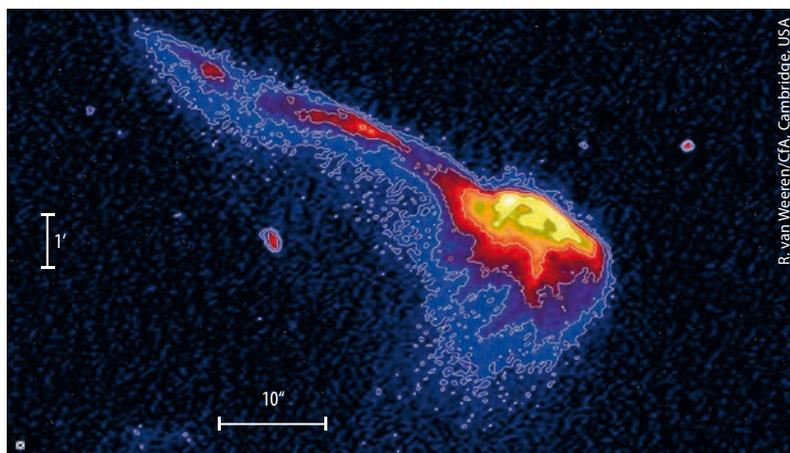


Abb. 3 Das LOFAR-Bild des Toothbrush-Relikts im Galaxienhaufen RX J0603.3+4214, aufgenommen bei einer Frequenz von 120 bis 181 MHz, besitzt eine Winkelauflösung von vier Bogensekunden. Der Galaxienhaufen (unten) besteht aus zwei Teilen, die in der Ebene des Himmels in Nord-Süd-Richtung kollidieren.

Theoretiker, diese Beschleunigungsprozesse an Großrechnern zu simulieren. Erste Modelle erklären die hohe Effizienz der Beschleunigung der Elektronen durch einen Prozess, der „Shock-Drift Acceleration“ heißt. Er kommt durch das Zusammenspiel von elektrischen und magnetischen Feldern in einer Stoßwelle zustande.

Das bisher größte Radiorelikt haben Wissenschaftler der Universitäten Hamburg und Leiden entdeckt. Aufgrund seiner Form heißt es Toothbrush-Relikt. Diese „kosmische Zahnbürste“ befindet sich im Galaxienhaufen RX J0603.3+4214 im Sternbild des Fuhrmanns. Mit drei Megaparsec oder etwa 10 Millionen Lichtjahren Ausdehnung ist das Radiorelikt etwa hundertmal größer als die Milchstraße und bemerkenswert gerade (Abb. 3) [4]. Die Aufnahme dieses Relikts ist die bei weitem höchstauflöste bei 150 MHz und erlaubt es, die Beschleunigungsprozesse in dem dünnen Plasma, das den Galaxienhaufen füllt, detailliert zu untersuchen. Dies ist ein sehr schönes Beispiel, wie astronomische Beobachtungen auf unvorstellbar großen Längenskalen Aufschluss geben über mikroskopische plasmaphysikalische Prozesse.

Radiorelikte haben Spektren, die mit zunehmender Frequenz stark abfallen. Dadurch sind sie bei niedrigen Frequenzen heller als bei hohen. Mit LOFAR sollten sich dank des Gesichtsfeldes von mehreren Grad gerade diese ausgedehnten Objekte besonders gut finden lassen. Zum Vergleich: Der Vollmond hat einen Winkeldurchmesser von etwa einem halben Grad. Die gerade angelaufenen Himmelsdurchmusterungen mit LOFAR könnten hunderte solcher Quellen aufspüren. Dies wird unser Verständnis von den Prozessen in sehr dünnen magnetisierten Plasmen einen großen Schritt nach vorne bringen.

Ein Radiopanorama des Himmels

Darüber hinaus ist eine vollständige Durchmusterung des Radiohimmels eines der Schlüsselprojekte von LOFAR. Ziel dabei ist es, den gesamten Nordhimmel in

3) Einheit für die spektrale Flussdichte:
1 Jy = 1 Jansky =
 $10^{-26} \text{ W}/(\text{Hz} \cdot \text{m}^2)$

verschiedenen Frequenzbändern zu kartieren (Abb. 4). Wie bei allen Himmelsdurchmusterungen verfolgt das LOFAR-Survey ein ganzes Portfolio an wissenschaftlichen Zielen: Dazu gehört die Entdeckung ultrasteiler Radioquellen, die bei niedrigen Frequenzen sehr viel heller sind als bei hohen. Diese Quellen könnten die ersten Radiogalaxien im Universum sein und sich in den Vorläufern von Galaxienhaufen befinden [5]. Ein weiteres Ziel ist es, eine mysteriöse Klasse von Radioobjekten zu entdecken, die Radiohalos. Da die Astronomen mit LOFAR auch die Polarisation der Radiostrahlung messen, erhoffen sie sich Aufschluss über Magnetfelder in Galaxien, aktiven Galaxienkernen und Galaxienhaufen. Denn aus der Polarisation leitet sich die Richtung und Stärke der Magnetfelder ab. Außerdem sucht man den Ursprung von Magnetfeldern in der großskaligen Struktur des Universums.

Die Untersuchung des Boötes-Felds durch Wendy Williams von der Universität Leiden ist das erste Beispiel einer großflächigen Analyse des Radiohimmels (Abb. 4). Diese Ansammlung mehrerer tausend Radioquellen befindet sich im Sternbild Bärenhüter am nördlichen Nachthimmel. Dieses Feld wurde bereits in vielen anderen Wellenlängenbereichen detailliert untersucht, sodass es einen großen Fundus an Vergleichsdaten gibt. Das ist unter anderem wichtig, um die Entfernungen der einzelnen Quellen zu bestimmen. Bemerkenswert ist das große Gesichtsfeld dieser Beobachtungen mit Durchmessern von mehreren Grad bei zugleich sehr guter Winkelauflösung (Abb. 5). Das Gesichtsfeld der Wide Field Camera an Bord des Hubble-Weltraumteleskops beträgt im Durchmesser dagegen nur 2,5 Bogenminuten. Diese Aufnahme des Boötes-Felds enthält tausende Radioquellen und ist die bislang tiefste Beobachtung bei dieser Wellenlänge. Neben Galaxien, in denen eine große Sternbildungsrate für die Emission der Radiowellen sorgt, finden sich auch Quellen diffuser Strahlung aus Galaxienhaufen. Zum größten Teil handelt es sich um Radiogalaxien, eine Form der aktiven Galaxien.

In aktiven Galaxien emittieren die zentralen Regionen mehr Energie als alle Sterne in dieser Galaxie zusammen. Massereiche Schwarze Löcher im Zentrum der Galaxie mit einer Masse von einigen Milliarden Sonnenmassen treiben nach heutigem Kenntnisstand diese Form der Aktivität an. Die zeitliche Entwick-

lung von aktiven Galaxienkernen und der Ursprung dieses Phänomens sind jedoch noch weitgehend unverstanden. Tiefe Beobachtungen mit LOFAR liefern einen Blick weit zurück ins Universum. Diese großen Stichproben enthalten Radiogalaxien zu allen Zeiten und in allen Phasen ihrer Existenz. Dies wird entscheidend dazu beitragen, die offenen Fragen um aktive Galaxienkerne zu lösen, z. B. die Ursachen für die Aktivität.

Kohlenstoff außerhalb der Milchstraße

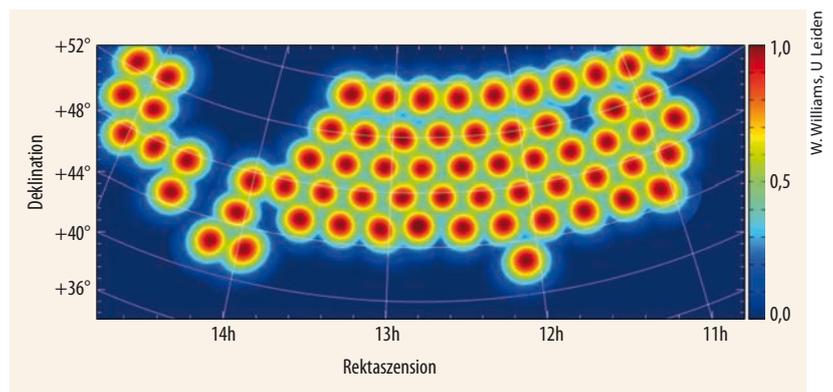
Ein weiteres Ergebnis bei den Himmelsdurchmusterungen war die Entdeckung von extragalaktischen Rekombinationslinien von Kohlenstoff [7]. Die Absorptionslinie mit einer Frequenz von 55 MHz fand sich in der Galaxie M82. Diese Spiralgalaxie im Sternbild Großer Bär zeigt somit die erste Radio-Rekombinationslinie außerhalb der Milchstraße, die nicht von Wasserstoff stammt.

Radio-Rekombinationslinien entstehen, wenn Atome freie Elektronen auf Orbitalen mit sehr hohen Hauptquantenzahlen von mehreren hundert einfangen. Die dabei ausgesendeten Photonen sind entsprechend niederenergetisch und im Radiobereich zu beobachten. Radio-Rekombinationslinien von Kohlenstoff sind besonders interessant, weil sie aus einer sehr kalten Phase des interstellaren Gases stammen, die sonst sehr schwer zu beobachten ist. Die Atome, die diese Rekombinationslinien verursachen, heißen Rydberg-Atome und sind „merkwürdige Geschöpfe“, da sie fast makroskopische Ausmaße annehmen. So stammt die beobachtete Kohlenstofflinie von Atomen mit Hauptquantenzahlen von 468 bis 504 und mit Bohr-Radien von etwa 70 Mikrometern, was etwa der Dicke eines menschlichen Haares entspricht.

Radiostrahlung erhellt dunkle Epoche

Weitere Schlüsselprojekte sind die Beobachtung der Sonne, die Epoche der Reionisation des Universums, das magnetische Universum und die komischen Strahlen. Mit besonderer Spannung wird der Nachweis von neutralem Wasserstoff aus dem dunklen Zeitalter des

Abb. 4 Bei einer Durchmusterung wird ein großer Ausschnitt des Himmels mit ähnlichen Beobachtungsdauern abgedeckt. Die längsten Beobachtungen bei 150 MHz sind rot eingezeichnet. Blau erscheinen Bereiche, die bisher nicht untersucht wurden [6].



W. Williams, U Leiden

Universums erwartet, in dem die ersten Sterne entstanden sind. Neutraler Wasserstoff sendet schwache Radiostrahlung aus. Die enge Emissionslinie besitzt eine Frequenz von 1,4 GHz und ist als 21-Zentimeter-Linie bekannt. Durch die Ausdehnung des Universums wird diese charakteristische Emissionslinie zu immer längeren Wellenlängen rotverschoben. Je weiter die Quelle der Strahlung von uns entfernt ist, desto stärker ist die Verschiebung. Beobachtungen in großen Entfernungen bedeuten immer einen Blick zurück in frühere Zeiten. Neutraler Wasserstoff aus dem dunklen Zeitalter ist bei Rotverschiebungen von mehr als $z \approx 12$ zu erwarten, sodass die 21-Zentimeter-Linie mit einer Frequenz von 120 MHz auf der Erde ankommen müsste. Das liegt mitten im empfindlichen Bereich des LOFAR-Teleskops.

Hier liefert sich LOFAR ein Wettrennen mit einigen internationalen Konkurrenzexperimenten: Im australischen Outback arbeitet das „Murchison Widefield Array“ nach dem gleichen Prinzip und besitzt ähnliche Forschungsschwerpunkte. Das „Precision Array for Probing the Epoch of Reionization“ der UC Berkeley hat sich ganz der Suche nach der 21-Zentimeter-Linie verschrieben. Beide Anlagen sind Teil der ersten Phase der Roadmap „Hydrogen Epoch of Reionization Array“. Noch hüllen sich die beteiligten Forscher in Schweigen. Vermutlich dürfte es noch mindestens ein Jahr dauern, bis sie die ersten Ergebnisse auf diesem Feld verkünden können.

Der Weg zum Square Kilometre Array

Während LOFAR erste Ergebnisse liefert, planen Radioastronomen schon in den nächsten Dimensionen von Auflösung und Empfindlichkeit: ein gigantisches Interferometer, das sich über Afrika und Australien erstreckt und fast den gesamten Frequenzbereich von Radiowellen abdeckt. Dieses Square Kilometre Array⁴⁾ soll 2021 seinen Beobachtungsbetrieb aufnehmen. Die Anlagen in Australien decken den niedrigfrequenten Teil des Radiospektrums ab, die in Südafrika den hochfrequenten.

Das Square Kilometre Array (SKA) bedeutet einen weiten Sprung nach vorne in puncto Auflösung und Empfindlichkeit. Damit wird es die gesamte Astronomie revolutionieren. Ziele sind zum Beispiel die Kartierung des neutralen Wasserstoffs über die 21-Zentimeter-Linie im gesamten Universum, der Nachweis von Gravitationswellen mit Hilfe von Laufzeitunterschieden der Radiostrahlung von Pulsaren sowie die Vermessung intergalaktischer Magnetfelder.

So greift das Square Kilometre Array die Erfahrungen bei der Entwicklung von Technik und Software von LOFAR auf. Was heute noch technisches Neuland ist, soll bei SKA routinemäßig Anwendung finden. Auf diese Weise tragen 100 000 einfache Dipolantennen dazu bei, dass wir den Sternenhimmel auch in Radiofrequenzen bewundern können.

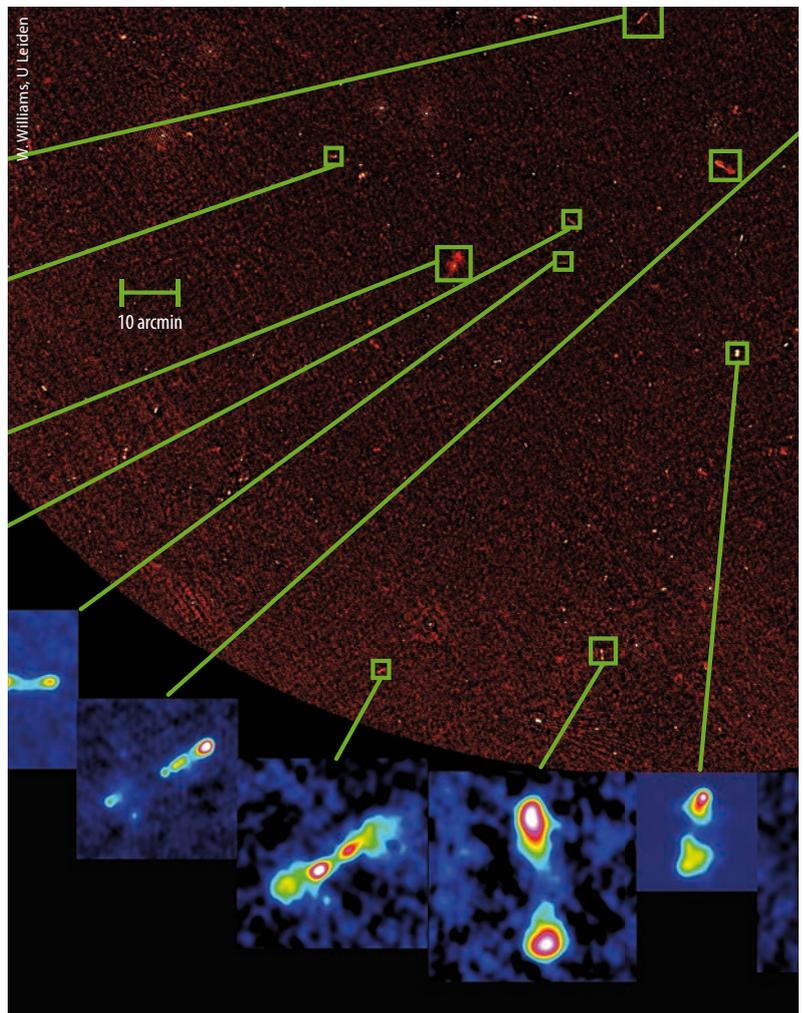


Abb. 5 Das LOFAR-Teleskop untersucht das Boötes-Feld mit einem Gesichtsfeld von fast fünf Grad. Selbst in dem kleinen Ausschnitt lassen sich zahlreiche Radioquellen direkt erkennen, in der Mehrheit Radiogalaxien.

Literatur

- [1] P. Schellart et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 5001 (2015)
- [2] S. Buitink et al., submitted (2015)
- [3] M. van Haarlem et al., Astron. Astroph. **556**, 2 (2013)
- [4] R. van Weeren et al. Astroph. J., submitted (2015)
- [5] H. J. A. Röttgering et al., Astron. Astroph. Suppl. Ser. **108**, 79 (1994)
- [6] W. Williams et al., Month. Not. Roy. Astr. Soc., submitted (2015)
- [7] L. Morabito et al., Astroph. J. **795**, L33 (2014)

4) www.skatelescope.org

DER AUTOR

Marcus Brüggemann hat an der University of Cambridge (GB) Physik studiert und promoviert. Danach war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Er war Professor an der Jacobs University Bremen und ist seit 2012 Professor für Extragalaktische Astrophysik und Kosmologie an der Universität Hamburg. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören die Hochenergie-Astrophysik und die numerische Astrophysik. Zusammen mit Stephan Rosswog hat er ein Lehrbuch über „High-Energy Astrophysics“ verfasst.

