

Langwellig, aber keineswegs langweilig: LOFAR – das neue Software-Teleskop für Radiowellen

Beck, Rainer; Verbiest, Joris P. W.; Anderson, James M.; Kramer, Michael

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

Korrespondierender Autor

Email: rbeck@mpifr-bonn.mpg.de

Zusammenfassung

Das neue Radioteleskop LOFAR für Meterwellen, entworfen von ASTRON in den Niederlanden, ist das online-vernetzte Teleskop mit der weltweit größten Sammelfläche. Es besteht aus Stationen in den Niederlanden, Deutschland, Frankreich, Schweden und Großbritannien, gemeinsam betrieben als Internationales LOFAR Teleskop (ILT). Es erschließt viele neue Möglichkeiten. Das MPI für Radioastronomie erforscht damit Pulsare und Magnetfelder in unserer Milchstraße und Galaxien. Mit dem 100m-Spiegel und der LOFAR-Station in Effelsberg können Pulsprofile von 9 mm bis 10 m Wellenlänge gemessen werden.

Abstract

The new digitally steered meter-wave radio telescope LOFAR (Low Frequency Array), designed by ASTRON/Netherlands, has fibre-connected stations in the Netherlands, Germany, France, Sweden, and the UK. Jointly operated as the International LOFAR Telescope (ILT), it has the world's largest collecting area. It opens up new possibilities in many astronomical research areas. The MPI for Radio Astronomy investigates the emission of pulsars and to measure magnetic fields in pulsar-wind nebulae, in our Milky Way and in external galaxies.

Ein neues Teleskop für lange Radiowellen

Kosmische Radiowellen sind Boten ungewöhnlicher Objekte im Weltall. Sie stammen von kalten Gaswolken, aus denen die Sterne entstehen, von den Überresten von Supernova-Explosionen, aus den Magnetfeldern zwischen den Sternen, von den aktiven Kernen von Galaxien und aus

daraus gespeisten Radiogalaxien. Seit über 40 Jahren empfangen die Astronomen des MPI für Radioastronomie (MPIfR) Bonn mit den Parabolspiegeln in Effelsberg, auf dem Pico Veleta (IRAM) und in der Atacama (APEX) Radiosignale vom Dezimeterwellen- (Gigahertz) bis zum Submillimeterbereich (Terahertz). Nun steht ihnen auch ein Teleskop für die längsten Wellen, die noch vom Erdboden empfangen werden können, zur Verfügung: LOFAR, das *Low Frequency Array*.

LOFAR ist ein reines Software-Teleskop, konstruiert von ASTRON in den Niederlanden. Es ist das erste einer neuen Generation und Vorläufer für das geplante *Square Kilometre Array*. LOFAR arbeitet in einem bisher wenig erforschten Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 240 MHz (1,25 bis 30 Meter Wellenlänge) und besteht aus einfachen, unbeweglichen Dipolantennen, die in Stationen von 2x55 Metern Durchmesser angeordnet sind. Jede Station besteht aus 48x2 oder 96x2 Dipolen für den Bereich 10–80 MHz sowie 48x16 oder 96x16 Antennen für den Bereich 110–240 MHz. Die Richtwirkung wird durch Phasenverzögerungen zwischen den Antennen erreicht.



Abb. 1: Die erste deutsche LOFAR-Station in Effelsberg. Im Vordergrund die 96 Antennen für den Bereich 10–80 MHz ("Lowband"), aus je vier aufgespannten Drähten (2 Dipole). Die 96x16 Antennen für 110–240 MHz ("Highband") im Hintergrund sind in Styroporkästen eingelassen und mit Folie abgedeckt. In der Bildmitte rechts ist der Container mit der Elektronik für die Digitalisierung und Phasenverzögerung der Daten zu erkennen.

© Max-Planck-Institut für Radioastronomie / Anderson

Die sechs zentralen Stationen bei Exloo im Osten der Niederlande stehen auf einem künstlichen Hügel von etwa 300 Metern Durchmesser. Weitere 24 niederländische Stationen stehen innerhalb eines Radius von zwei Kilometern und zusätzliche 16 bis in einer Entfernung von 120 Kilometern. Die erste deutsche Station wurde von der MPG finanziert und neben dem 100m Radioteleskop Effelsberg aufgebaut (**Abb. 1**); sie wurde im Juli 2009 fertiggestellt. Die zweite Station steht bei Tautenburg (Thüringer Wald). Die dritte deutsche Station, ebenfalls von der MPG finanziert, gehört dem MPI für Astrophysik Garching, steht bei Unterweilenbach und ist seit 2010 in Betrieb. Die Stationen in Bornim bei Potsdam und in Jülich arbeiten seit 2011. Eine sechste deutsche Station bei Hamburg ist in Planung. Im Forschungszentrum Jülich

laufen die Daten der deutschen Stationen zusammen und werden von dort aus in die Niederlande weitergeleitet. Weitere Stationen arbeiten in Chilbolton (Südengland), in Nançay (Zentral-Frankreich) und Onsala (Südwestschweden). In Polen, Finnland, Großbritannien, Irland, Italien und Lettland sind zusätzliche Stationen in Planung. Mit seiner enormen Sammelfläche ist LOFAR das weltweit größte online-vernetzte Teleskop.

Die digitalen Signale gelangen über Hochleistungsverbindungen zu einem Supercomputer in Groningen (Niederlande) und werden dort online verarbeitet. Die Gesamtrechenleistung beträgt 27 Teraflops (27 Billionen Gleitkommaoperationen pro Sekunde), der Datendurchsatz rund 300 Gigabit pro Sekunde [1,2]. Während eine einzelne Station eine Winkelauflösung am Himmel von lediglich 1,5 Grad aufweist, erlaubt die Kombination der Daten aller Stationen eine Steigerung auf weniger als eine Bogensekunde.

LOFAR wurde am 12. Juni 2010 von der niederländischen Königin offiziell eröffnet. Der volle Betrieb ist ab 2013 mit 40 Stationen in den Niederlanden und 9 internationalen Stationen vorgesehen [3].

Lange Radiowellen haben ein großes Potenzial für neue Entdeckungen. LOFAR soll z. B. hoch rotverschobene Signale von Wasserstoffwolken aus der "Epoche der Re-Ionisation" rund 1 Milliarde Jahre nach dem Urknall aufspüren, unter Beteiligung des MPI für Astrophysik in Garching. LOFAR kann Radio-Eruptionen der Sonne sehr viel genauer messen als bisher möglich und deren Auswirkungen auf die Erde untersuchen. Die Wissenschaftler des MPIfR Bonn richten ihr Augenmerk vor allem auf Pulsare und galaktische Magnetfelder. Später sollen auch aktive galaktische Kerne und Radiogalaxien untersucht werden. Die zwölf an LOFAR beteiligten deutschen Institute sind in GLOW, dem *German Long Wavelength Consortium*, zusammengeschlossen.

Pulsare

Die ersten mit der Effelsberger LOFAR-Station beobachteten Radioquellen waren Pulsare. Diese sind das Endprodukt von Explosionen massereicher Sterne als Supernovae. Dabei wird der größte Teil des stellaren Materials in das Weltall hinausgeschleudert, während der Kern implodiert und extrem kompakt wird. Falls die Kerndichte einen kritischen Wert erreicht, so dass sogar Licht nicht entweichen kann, entsteht ein Schwarzes Loch. In den weniger extremen Fällen bleibt ein Neutronenstern (Pulsar) übrig. Als Konsequenz ihrer Entstehungsgeschichte weisen Pulsare sehr starke Magnetfelder und hohe Rotationsraten auf, die zwischen einer Millisekunde (also Tausend Umdrehungen pro Sekunde) und etwa 10 Sekunden liegen. Schnelle Rotation und Erzeugung von Strahlung in einem nur kleinen Gebiet der Pulsar-Magnetosphäre führen zu einem gebündelten Strahl, der wie bei einem Leuchtturm

durch den Raum "fegt" und den Pulsaren ihren Namen gab [4].

Trotz intensiver Erforschung seit ihrer Entdeckung im Jahr 1967 ist der Emissionsmechanismus der Pulsare bisher weitgehend unverstanden. Pulsare stellen eines der wissenschaftlichen Schlüsselprojekte für LOFAR dar; hier werden mit LOFAR wesentliche Fortschritte erwartet. Zum einen erweitert LOFAR den Bereich der beobachtbaren Wellenlängen enorm (**Abb. 2**, links). Mit den beiden Effelsberger Teleskopen des MPIfR (100m und LOFAR-Station) können die Variation der Pulsprofile und deren Polarisation nun erstmals über einen Wellenlängenbereich von 9 Millimetern bis 10 Metern gemessen werden. Pulsar-Strahlung ist stark wellenlängenabhängig und bei langen Wellenlängen besonders intensiv. Schon die ersten Ergebnisse der mit LOFAR gemessenen Pulsprofile passen nicht zu den Vorhersagen der allgemein akzeptierten Theorien, so dass Revisionen dieser Theorien unumgänglich sind.

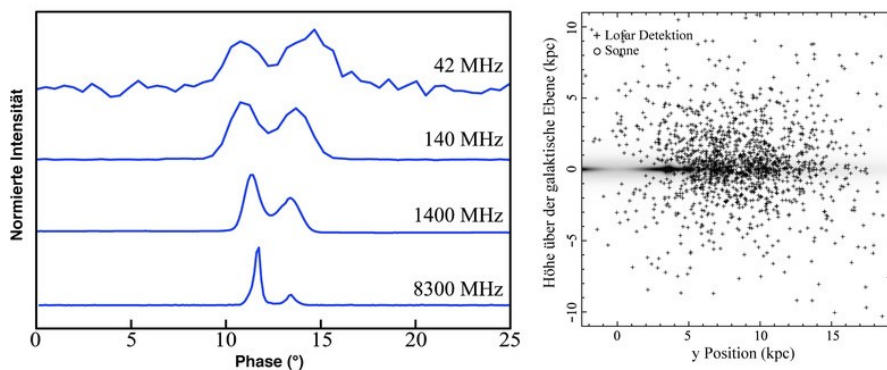


Abb. 2: Links: Pulsformen des Pulsars PSR B1133+16 bei verschiedenen Frequenzen (42 MHz: Effelsberger LOFAR-Station mit 36 MHz Bandbreite, 140 MHz: Zentrale LOFAR-Stationen mit 48 MHz Bandbreite, 1.400 MHz: Jodrell Bank/Großbritannien mit 512 MHz Bandbreite, 8.300 MHz: Effelsberg 100m mit 1 GHz Bandbreite). Die Messung bei 42 MHz stammt aus der Anfangsphase von LOFAR und weist erhöhtes Rauschen auf [5]. Rechts: Simulation der Pulsare in unserer Milchstraße, die mit LOFAR entdeckt werden können. Die X-Achse verläuft entlang der Ebene der Milchstraße, die Y-Achse senkrecht zur Ebene. Die Einheit ist Kiloparsec (ca. 3.260 Lichtjahre). Das Zentrum der Milchstraße liegt bei (0|0), die Sonne bei (8,5|0) [6].

© Max-Planck-Institut für Radioastronomie; Universität Amsterdam / van Leeuwen

Zum anderen können dank der großen Empfindlichkeit und des riesigen Gesichtsfeldes von LOFAR erstmals alle Pulsare in der Scheibe der Milchstraße in Entfernungen bis zu einigen Hundert Lichtjahren von der Sonne (außerhalb der Scheibe sogar bis zu Tausenden von Lichtjahren) gefunden werden (Abb. 2, rechts). Dazu muss der gesamte Himmel abgesucht werden, denn Pulsare können bei der Supernova-Explosion aus ihrem Entstehungsort herausgeschossen werden und sich weit von der Milchstraßenebene entfernen. Mit den winzigen Gesichtsfeldern klassischer Radioteleskope wäre das unmöglich.

Nahe der Milchstraßenebene ist die Entdeckung von Pulsaren schwierig. Pulsar-Strahlung wird im ionisierten interstellaren Gas gestreut und der Puls dadurch zeitlich verschmiert. Außerdem führt das gleiche Gas zu "Dispersion", d.h. die Pulse kommen bei langen Wellenlängen später beim Beobachter an als bei kurzen Wellenlängen. Beide Effekte nehmen stark mit der

Wellenlänge zu, so dass die Strahlung von Pulsaren hinter dichten Gaswolken nicht mehr als pulsierend erkennbar ist. Bei weniger verzerrten Pulsaren erlaubt die hohe Frequenzauflösung von LOFAR eine außerordentlich genaue Messung dieser Effekte und damit die Bestimmung der mittleren Elektronendichte im interstellaren Medium entlang der Sichtlinie zum Pulsar. Die Korrektur der Effekte steigert die Präzision von Messungen der Puls-Ankunftszeiten für Messungen bei allen Wellenlängen.

Eine weitere, sehr nützliche Eigenschaft der Pulsare ist ihr hoher Grad an linearer Polarisation. Die Polarisationssebene wird im Magnetfeld des ionisierten interstellaren Gases gedreht. Diese "Faraday-Rotation" ist bei langen Wellenlängen besonders hoch und kann daher mit LOFAR präzise gemessen werden, um daraus die mittlere Stärke und Richtung des Magnetfeldes zwischen dem Pulsar und der Erde zu bestimmen. Mit einer ausreichend großen Zahl von Pulsaren in verschiedenen Entfernungen lässt sich eine genaue dreidimensionale Karte des Magnetfeldes der Milchstraße erstellen. Erstmals kann auch die Feldkomponente senkrecht zur Milchstraßenebene gemessen werden, die für die Bildung des Halos aus Kosmischer Strahlung und für den Weg der extragalaktischen ultra-hochenergetischen Kosmischen Strahlung in der Milchstraße wichtig ist.

Der Windnebel eines Pulsars

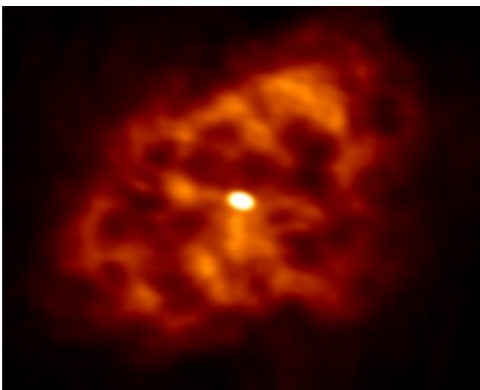


Abb. 3: Erste LOFAR-Aufnahme des "Krebsnebels". Bei diesem Objekt handelt es sich um den Überrest einer Supernova-Explosion im Sternbild Stier, die im Jahr 1054 unter anderem in China beobachtet wurde. Die Explosionswolken haben sich inzwischen so weit ausgedehnt, dass sie trotz der großen Entfernung von gut 6.000 Lichtjahren am Himmel inzwischen etwa 1/5 so groß wie der Vollmond erscheinen. Im Zentrum des Nebels ist der Pulsar zu erkennen, der etwa 30 mal pro Sekunde rotiert. Dieses Bild wurde im Februar 2011 aus Beobachtungen im Frequenzbereich 115–150 MHz erstellt. Hierfür wurde ein Teil des internationalen LOFAR-Verbunds verwendet. Die Winkelauflösung beträgt 9×14 Bogensekunden, die Kartengröße rund 7,5x6 Bogenminuten.

© Argelander-Institut für Astronomie der Universität Bonn / Wucknitz

Die Stoßfronten einer Supernova-Explosion komprimieren interstellare Magnetfelder. Darin werden Teilchen beschleunigt, die wiederum Synchrotron-Strahlung aussenden – ein Supernova-Überrest erscheint. Zusätzlich beschleunigen die extremen Magnetfelder des

zentralen Pulsars geladene Teilchen bis fast auf Lichtgeschwindigkeit. Besonders energiereiche Pulsare können so einen Wind aus geladenen Teilchen produzieren, der hell im Radiobereich aufleuchtet (**Abb. 3**).

Kosmische Magnetfelder

Magnetismus ist eine der fundamentalen Kräfte im Universum, aber wir wissen noch sehr wenig über seine Bedeutung, zum Beispiel bei der Bildung von Sternen und Galaxien. Mit Messungen der linear polarisierten Radiostrahlung am 100m Teleskop Effelsberg und anderen Radioteleskopen im Bereich der Zentimeterwellen konnten großräumig geordnete Magnetfelder in unserer Milchstraße und in vielen anderen Galaxien nachgewiesen werden [7]. Langwellige Radiostrahlung stammt von niederenergetischen Elektronen in schwachen Magnetfeldern, die eine lange Lebensdauer haben und sich daher weit von ihren Ursprungsorten, den Supernova-Überresten, entfernen können. Im internationalen LOFAR-Schlüsselprojekt "Kosmische Magnetfelder", geleitet vom MPIfR Bonn, sollen magnetische Felder zwischen den Galaxien mit Hilfe von Radiowellen nachgewiesen und deren Ursprung ergründet werden.

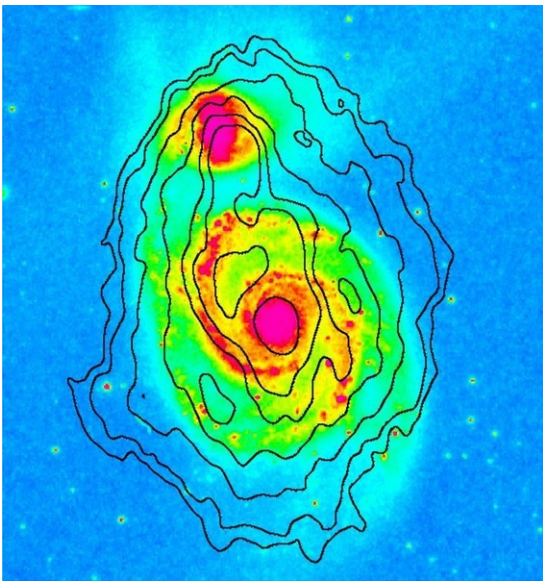


Abb. 4: Radiostrahlung der Spiralgalaxie M51 bei 145 MHz (Bandbreite 0,4 MHz), gemessen mit den Antennen des niederländischen LOFAR-Verbundes. Die Winkelauflösung beträgt 61x30 Bogensekunden, die Kartengröße rund 12x11 Bogenminuten. Das farbige Bild im Hintergrund stammt aus dem Digital Sky Survey.

© Max-Planck-Institut für Radioastronomie / Mulcahy

Eine der ersten mit LOFAR beobachteten Galaxien war M51 im Sternbild Jagdhunde, der Prototyp eines Spiralsystems. Die Radiokarte (**Abb. 4**) zeigt die Strahlung der Elektronen der Kosmischen Strahlung, die von ihren Ursprungsorten, den Supernova-Überresten in den Spiralarmen, bis weit ins intergalaktische Medium vorgedrungen sind und sich um die Feldlinien

der intergalaktischen Magnetfelder bewegen. Sobald LOFAR die volle Empfindlichkeit erreicht hat, soll die Ausdehnung solcher Radiohüllen in vielen Galaxien gemessen werden.

Der nächste Schritt: Das Square Kilometre Array

LOFAR ist ein "Pfadfinder"-Teleskop für ein noch wesentlich größeres Radioteleskop, das als internationales Projekt ab 2016 in Australien oder in Südafrika aufgebaut werden soll: das *Square Kilometre Array* (SKA), mit einer Sammelfläche von einem Quadratkilometer und einer Ausdehnung von mehr als 3.000 Kilometern. In "Phase 1" sind Parabolspiegel von etwa 15 Metern Durchmesser für den Wellenlängenbereich von 10–60 Zentimeter und LOFAR-ähnliche Dipolanordnungen für 0,7–4 Meter geplant. Der europäische Projektwissenschaftler für das SKA und sein Stellvertreter sind am MPIfR Bonn stationiert. Kollegen aus rund 30 deutschen Instituten haben gemeinsam ein "White Paper" verfasst, das die Breite der geplanten Wissenschaft beschreibt und 2012 erscheinen wird. Die MPG hat ihr Interesse bekundet, dass Deutschland unter der Federführung des Bundesministeriums dem Gründungskonsortium für das SKA beitrifft.

Literaturhinweise

- [1] Beck, R.; Reich, W.
LOFAR – eine neue Generation von Radioteleskopen
MPG Jahrbuch (2006)
- [2] Falcke, H.; Beck, R.
Per Software zu den Sternen
Spektrum der Wissenschaft, Juli 2008, S. 26
- [3] Hoeft, M.; Beck, R.
LOFAR läuft!
Sterne und Weltraum, Juni 2010, S. 20
- [4] Kramer, M.
Pulsare als kosmische Uhren
Sterne und Weltraum, Oktober 2006, S. 30
- [5] Stappers, B.W. und 93 weitere Autoren
Observing pulsars and fast transients with LOFAR
Astronomy and Astrophysics 530, A80 (2011)

- [6] van Leeuwen, J.; Stappers, B. W.
Finding pulsars with LOFAR
Astronomy and Astrophysics 509, A7 (2010)
- [7] Beck, R.
Kosmische Magnetfelder
MPG Jahrbuch (2003)