

Radioquellen im Katalog

Der LOFAR Two-Metre Sky Survey hat einen zweiten Datenkatalog veröffentlicht.

Jürgen Kerp

Himmelsdurchmusterungen bei Wellenlängen im Meterbereich haben das Potenzial, unsere Sichtweise auf die Objekte im Universum grundsätzlich zu verändern. Karl Jansky entdeckte bei einer Wellenlänge von 14,6 Metern, dass intensive Radiostrahlung außerhalb des Sonnensystems entsteht und dass dieses Phänomen mit der Milchstraße assoziiert ist [1]. Grote Reber, der erste Radioastronom, vermaß vollständig die Radiostrahlung des nördlichen Himmels bei einer Wellenlänge von 1,9 Metern und identifizierte einen Zusammenhang zwischen der Intensität der Radiostrahlung und der Verteilung der Sterne, ohne den Emissionsprozess der Radiostrahlung selbst ergründen zu können [2].

Rund ein Jahrzehnt nach Janskys Entdeckung und Rebers ersten systematischen Durchmusterungen erklärten Dmitri D. Iwanenko und Isaak Pomeranchuk die Quelle dieser „nichtthermischen“ Radiostrahlung durch den Synchrotronprozess [3]. Im Gegensatz zur thermischen Strahlung ($I_\nu \approx \nu^2$) ist diese kontinuierliche Radiostrahlung bei niedrigen Frequenzen hell ($I_\nu \approx \nu^{-0,7}$). In den folgenden Jahren zeigte sich, dass die entferntesten Objekte im Universum durch ihre starke Synchrotronemission auffindbar ist [4].

Seit 2012 durchmustert das Low Frequency Array (LOFAR) in einem Wellenlängenbereich zwischen 1,25 und 30 Metern den nördlichen Himmel. Mit seiner sammelnden Oberfläche von rund 300 000 Quadratmetern ist es das größte Radiointerferometer der Welt und umfasst mehr als 50 Stationen über Europa verteilt. Für eine möglichst scharfe Abbildung muss das Winkelauflösungsvermögen $\theta \propto \lambda/D$ (Wellenlänge λ und Aperturdurchmesser D) maximal sein. Die 14 europäischen LOFAR-Stationen befinden sich daher bis zu 1000 Kilometer von ihrem Zentrum mit 38 Stationen in

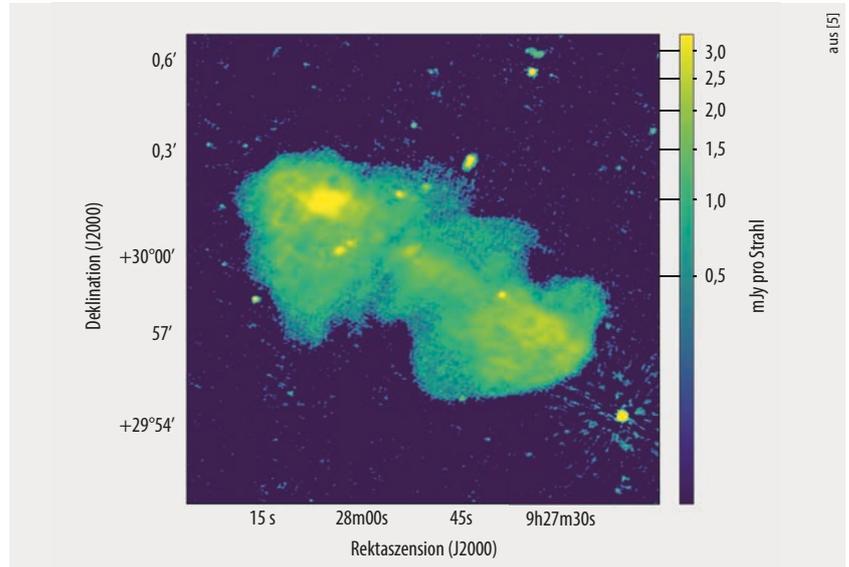


Abb. 1 Die Daten des LOFAR Two-Metre Sky Survey erlauben es, nahe Objekte detailliert zu studieren. Farblich kodiert ist die Helligkeitsverteilung der Radiogalaxie B2 0924+30. Eine reiche Vielfalt an Strukturen innerhalb der Galaxie ist zu erkennen. Artefakte treten nur noch um die hellsten, nicht aufgelösten Quellen auf. Allerdings lässt sich der Gesamtfluss dieser ausgedehnten Objekte nur unzureichend rekonstruieren.

den Niederlanden entfernt. Die verschiedenen Antennen werden zusammengeschaltet und bilden zusammen ein „virtuelles Riesenteleskop“, in dem die Radiosignale der einzelnen Teleskope miteinander interferiert werden. Mit dem Abstand der einzelnen Antennen steigt die Auflösung des gesamten Teleskops.

Rund 80 Jahre nach Grote Reber haben nun bei fast gleicher Wellenlänge die Autor:innen des LOFAR Two Metre Sky Survey (LoTSS) ihren zweiten Datenkatalog vorgelegt (**Abb. 1**) [5]. Diese Veröffentlichung katalogisiert rund 4,4 Millionen Radioquellen in einem Himmelsbereich, der rund 27 Prozent des nördlichen Himmels umfasst. Die Daten besitzen eine Winkelauflösung von 6 Bogensekunden; dies entspricht der scheinbaren Größe eines Fußballs in rund sieben Kilometer Entfernung. Schon die Zahlen allein beeindruckend. Wichtiger ist jedoch, dass eine solche Analyse erst heute technologisch möglich ist: Sie ist alles andere als trivial.

Wie schnell die Entwicklung in der langwelligen Radioastronomie derzeit verläuft, zeigt der Vergleich dreier Veröffentlichungen von LOFAR: 2017 betrug die Zahl der entdeckten Quellen 44 500 [6], 2019 waren es 326 000 [7], nun sind es 4,4 Millionen. Basis dieser dramatischen Steigerung ist die Entwicklung der digitalen Datenverarbeitung. Machine learning und KI-Technologien erlauben es, mit den gleichen Rohdaten Ungeahntes zu enthüllen. Rund zwei Drittel der notwendigen Datenreduktion haben Kolleg:innen des Forschungszentrums Jülich geschultert. Neben der räumlichen Nähe zu den Niederlanden sorgt vor allem die konsequente Weiterentwicklung der Rechner am FZ Jülich für diese herausragende Stellung.

Allerdings verhindert es die inhomogen entwickelte technische Infrastruktur in Europa, das volle Datenpotential der LOFAR-Beobachtungen zu nutzen. So blieben die Daten der 14 Stationen außerhalb der Niederlande für LoTSS ungenutzt. Gerade die

internationalen Stationen mit ihren großen Abständen zwischen den Teleskopen – den Basislinien – könnten aber die statistische Signifikanz der Daten wesentlich erhöhen, um die Quellen schärfer abzubilden.

Der Schatz, den das LoTSS-Team gehoben hat, birgt eine ganze Reihe von Erkenntnissen. Um einen Faktor 8 in der Anzahl der katalogisierten Quellen übertrifft der neue Katalog den bisherigen „Goldstandard“ des NRAO VLA Sky Survey [8]. Insbesondere Aktive Galaktische Kerne mit supermassereichen Schwarzen Löchern in ihren Zentren enthüllen nun ihre statistisch erforschbaren Eigenschaften auf neuem Signifikanzniveau. Neben der schieren Anzahl der Quellen ist es vor allem ihre Homogenität, die den Datensatz auszeichnet.

Die Sternentstehungsaktivität normaler Galaxien lässt sich jetzt als Funktion der Rotverschiebung bis $z \approx 1$ untersuchen. Bereits heute ist die Software genügend ausgefeilt, um neben den extragalaktischen Objekten auch großskalige Strukturen in der Milchstraße zu erforschen (Abb. 2). Dies ist sehr zu begrüßen, denn mehr und mehr setzt sich die Erkenntnis durch, dass die Komplexität des Milchstraßenvordergrunds es systematisch verhindert, beispielsweise die Polarisation des kosmischen Mikrowellenhintergrunds des frühen Universums zu erforschen.

Hier setzt LoTSS neue Maßstäbe, da Intensität und Polarisation der Radiostrahlung rekonstruiert werden. Aus der anzunehmenden statistischen Verteilung der Polarisationsseigenschaften der unterschiedlichsten Aktiven Galaktischen Kerne lässt sich auf die Struktur des Magnetfelds der Milchstraße schließen, die alles einhüllt.

Dennoch liegt noch ein weiter Weg vor den Forschenden. Auch der LoTSS ist konfusionslimitiert¹⁾: Die Quellen liegen noch viel dichter als bislang beobachtet. Die unzureichende Winkelauflösung der Teleskope verschmiert die Strahlung dieser Quellen zu einem scheinbar diffusen Hintergrund. Daher besteht der nächste Schritt zwingend darin, die verfügbaren internationalen Stati-

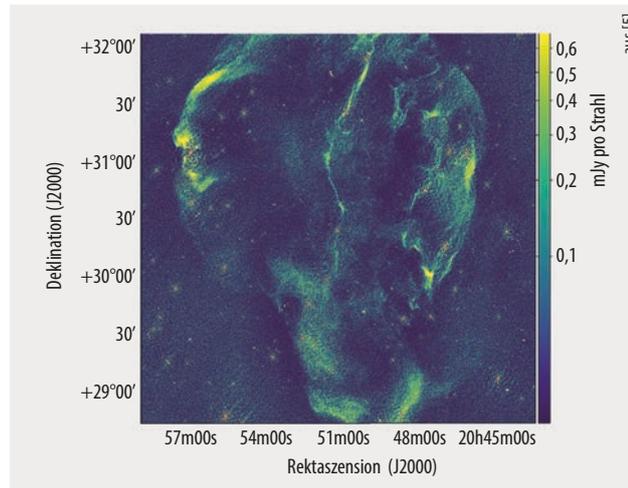


Abb. 2 Die Datenreduktion erlaubt es, erstmalig auch ausgedehnte Quellen, die sich über viele Quadratgrad am Himmel erstrecken, quantitativ zu erfassen. Dargestellt ist der Überrest einer Supernova in Richtung des Sternbilds Schwan, der Cygnus Loop. Über 45 verschiedene Kalibrationsrichtungen gingen in dieses Bild ein.

onen von LOFAR einzubinden. Darüber hinaus gilt es, den Strahlungsfluss der ausgedehnten Quellen besser zu bestimmen. Betragen die Unsicherheiten bei nicht aufgelösten Quellen akzeptable 10 Prozent des Signals, so bleibt bei ausgedehnten Quellen aktuell rund ein Drittel des Flusses unberücksichtigt ($60\% \pm 6\%$). Dabei ermöglichen vor allem die nahen und damit ausgedehnten Quellen detaillierte Einzelstudien.

Wie bei allen Durchmusterungen von Quellen mit einem kontinuierlichen Strahlungsspektrum müssen auch hier optische Spektralbeobachtungen die LoTSS-Daten komplementieren, um ihre Rotverschiebung zu ermitteln. Die Kreuzkorrelation der LoTSS-Datenbasis mit diversen Durchmusterungen vom Röntgen- bis in den Radiobereich ist daher essenziell und bereits weitgehend von den

Autor:innen initiiert, um die Natur der Quellen zu erschließen. Ungehoben ist derzeit noch ein weiterer Schatz: die Information über die zeitliche Variabilität der Quellen.

- [1] K. G. Jansky, *Popular Astronomy* **41**, 548 (1933)
- [2] G. Reber, *ApJ* **100**, 279 (1944)
- [3] D. Iwanenko und I. Pomeranchuk, *Phys. Rev.* **65**, 343 (1944)
- [4] M. Schmidt, *Nature* **197**, 1040 (1963)
- [5] T. W. Shimwell et al., *A&A* **659**, A1 (2022)
- [6] T. W. Shimwell et al., *A&A* **598**, A104 (2017)
- [7] T. W. Shimwell et al., *A&A* **622**, A1 (2019)
- [8] J. J. Condon et al., *AJ* **115**, 1693 (1998)

Der Autor

Priv.-Doz. Dr. Jürgen Kerp, Argelander-Institut für Astronomie, Auf dem Hügel 71, 53121 Bonn

Kurzgefasst

Hundertfache Wiederholrate

Einer Gruppe des Max-Born-Instituts Berlin ist es zusammen mit Kolleg:innen der Colorado State University, USA, gelungen, Attosekunden-Laserpulse im extremen Ultraviolett mit einer Wiederholrate von 100 kHz zu erzeugen. Das ist hundertmal mehr als bisher und erlaubt es, Pump-Probe-Spektroskopie entsprechend schneller durchzuführen. Um das zu erreichen, koppelten die Forschenden Pulse von 7 fs Dauer in eine 1-Meter-lange Hohlfaserkapillare ein, „Gechirpte“ dielektrische Spiegel komprimierten die Pulse auf 3,3 fs und ermöglichten so die höhere Wiederholrate.

T. Witting et al., *Optica* **9**, 145 (2022)

Mikroplastik überall

Gemeinsam mit Forschenden aus Norwegen, Kanada und den Niederlanden hat das Alfred-Wegener-Institut in einer Studie gezeigt, dass sich Mikroplastik mittlerweile in allen Lebensräumen der Arktis findet: im Wasser des Arktischen Ozeans und auf dem Meeresboden, an unbewohnten Stränden, in Flüssen sowie selbst in Eis und Schnee. Neben den Folgen des Klimawandels stelle das die größte Bedrohung für das einzigartige Ökosystem dar. Ursache seien neben lokalen Quellen wie Fischerei-Netzen u. a. auch Einträge aus den Flüssen Sibiriens.

M. Bergmann et al., *Nat. Rev. Earth Environ.* (2022), DOI: 10.1038/s43017-022-00279-8

1) vgl. bit.ly/3LE4fMY