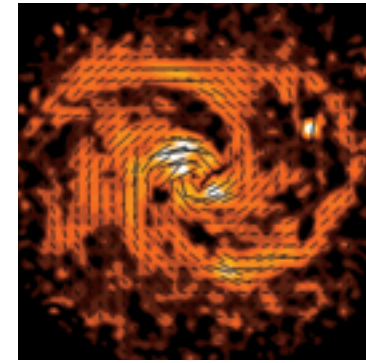


Radioaugen mustern Magnetfelder im Weltall



Sie sind im wahrsten Sinn „All“-gegenwärtig: Ob bei der Sonne oder dem Planeten Jupiter, ob bei Sternen, in der Milchstraße oder in fernen Galaxien – überall im Kosmos findet man Magnetfelder. Der folgende Bericht fasst die neuesten Ergebnisse der **ARBEITSGRUPPE „RADIOKONTINUUM“** am Bonner **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR RADIOASTRONOMIE** zusammen.

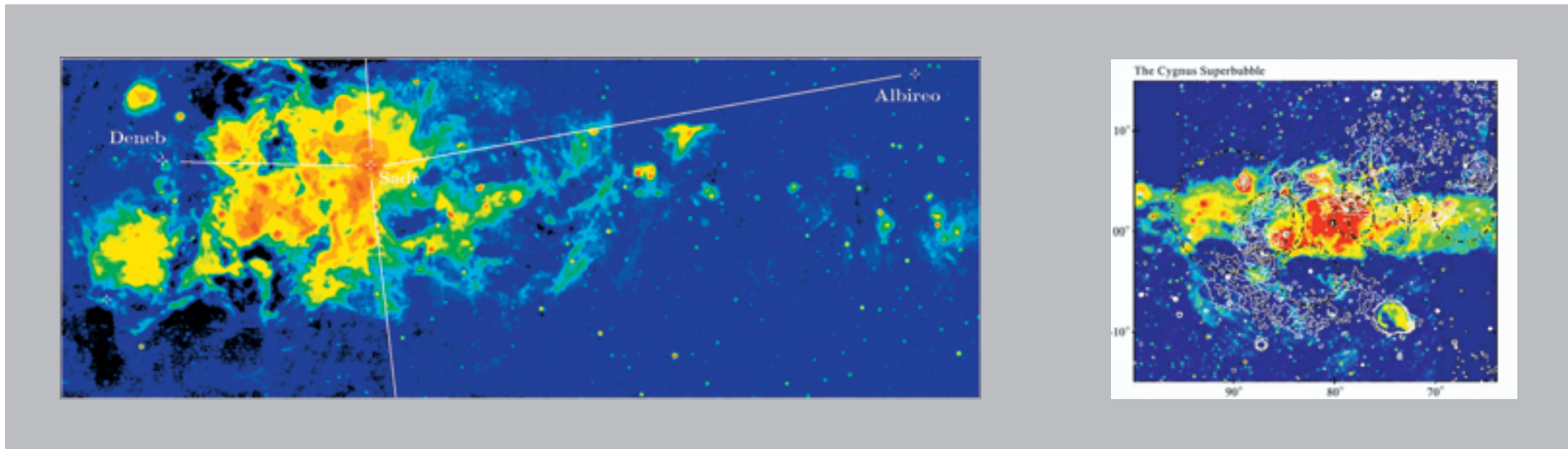


Abb. 1: Radiostrahlung aus der Richtung des Sternbilds Schwan (Cygnus) bei 11 Zentimeter Wellenlänge.

Abb. 2: Überlagerung von Radiostrahlung bei 21 Zentimeter Wellenlänge (farbiges Bild) und Röntgenstrahlung (ROSAT, weiße Konturen).

Welche Rolle spielen Magnetfelder bei der Entwicklung von Galaxien und Galaxienhaufen? Waren sie von Anfang an vorhanden oder sind sie erst im Lauf der Zeit entstanden? Welchen Einfluss haben sie auf die Entstehung neuer Sterne? Wie wirken die Stoßwellen explodierender Sterne auf das Magnetfeld ihrer Umgebung und der gesamten Milchstraße? Antworten auf diese Fragen zu finden ist Sache der Radioastronomie. Denn Magnetfelder lassen sich am besten mit Radioteleskopen untersuchen, deren „Augen“ den langwelligen Bereich des Spektrums sehen, wie etwa die 100-

Meter-Antenne des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg nahe Bonn.

Dank erheblicher Fortschritte in der Beobachtungstechnik gewannen die Wissenschaftler in den vergangenen Jahren immer feinere Einblicke in kosmische Magnetfelder. Die Untersuchung von polarisierten (also in einer bestimmten Ebene schwingenden) Radiowellen und von Magnetfeldern sowohl in unserer Milchstraße als auch in anderen Galaxien ist Schwerpunkt der Arbeitsgruppe „Radiokontinuum“ unter Richard Wielebinski, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie

in Bonn. Unsere kosmische Heimat, die Milchstraße, birgt etwa 200 Milliarden Sonnenmassen sichtbarer Materie; mehr als 95 Prozent davon führen die Astronomen auf Sterne zurück, der Rest ist interstellare Materie. Denn der Raum zwischen den Sonnen ist angefüllt mit Wolken von Gas und Staub. Aus diesen Wolken werden noch heute Sterne geboren. Am Ende ihres Lebens explodieren massereiche Sterne als Supernovae und schleudern dabei eine große Menge ihres Materials in den interstellaren Raum zurück. Ein derart gewaltsamer „Tod“ setzt eine unvorstellbar große Energie frei, die sich

auf Gas und Staub überträgt und auf diese Weise chaotische turbulente Bewegungen im interstellaren Raum antreibt. Diese wiederum halten den „galaktischen Dynamo“ in Schwung, ohne den es keine Magnetfelder gäbe (MPG-SPIEGEL 2/1996, Seite 8 f.).

Vor allem das Gas lässt sich mit Radiowellen gut erfassen. Dabei entsteht diese Strahlung auf zwei Arten: 1. Durch freie Elektronen, die sich in der Umgebung junger Sterne im elektrischen Feld von Protonen bewegen und dabei so genannte thermische Radiostrahlung aussenden. 2. Durch hoch energetische Elektronen, die aus den Überresten explo-

dierter Sterne herrühren und auf ihrer Reise im interstellaren Magnetfeld „Synchrotronstrahlung“ aussenden.

Um neue Erkenntnisse über Magnetfelder in unserem Milchstraßensystem (Galaxis) zu gewinnen, „scannen“ die Astronomen ausgedehnte Himmelsbereiche bei verschiedenen Wellenlängen. Solche Kartierungen, so genannte Surveys, erlauben detaillierte Analysen der galaktischen Ebene. In der vom Radioteleskop empfangenen Gesamtstrahlung steckt stets auch ein gewisser Anteil an polarisierter – in einer Schwingungsebene ausgerichtet – Strahlung. Dabei funktioniert

der stabförmige Dipol im Empfänger des Teleskops im Prinzip ähnlich wie die Antenne eines Kofferradios: Nur wenn sie exakt auf die jeweilige Schwingungsrichtung der Radiowellen zeigt, empfängt sie die polarisierte Strahlung eines bestimmten Senders; sonst hört man lediglich Rauschen.

STRAHLUNG AUS DER CYGNUS-REGION

Besonders deutlich sichtbar wird das galaktische Gas in Richtung des Sternbilds Schwan (lat. Cygnus). Hier beobachten die Astronomen sich überlagernde Objekte in Richtung des benachbarten Spiralarms, des „Orion-Arms“ der Milchstraße, was zu einer sehr komplexen Struktur der Radiostrahlung in diesem Bereich führt. Eine Darstellung der Cygnus-Region aus der Radiokartierung bei 11 Zentimeter Wellenlänge mit dem 100-Meter-Teleskop zeigt Abbildung 1. Diese Radiokarte ist übrigens das Motiv einer der Wohlfahrtsmarken zum Thema „Der Kosmos“ aus dem Jahr 1999 (MAXPLANCKFORSCHUNG 2/2000, S. 64).

Erst vor kurzem wurde eine neue Untersuchung der Milchstraße in Richtung des Sternbilds Schwan veröffentlicht (ASTRONOMY & ASTROPHYSICS 371, 675, 2001). Sie vergleicht Radio- und Röntgenbeobachtungen und zeigt ein kompliziertes Bild aus vielen Blasen heißen Gases („Bubbles“) sowie dazwischen liegendem, dichterem Material (Abb. 2).

Die polarisierte Radiostrahlung stammt von Supernova-Überresten wie dem bekannten „Cygnus Loop“, aber auch von ausgedehnten Strukturen nördlich und südlich der galaktischen Ebene.

In Abbildung 3 geht der Blick des 100-Meter-Radioteleskops in eine ganz andere Richtung. Das dargestellte Gebiet überdeckt die Region

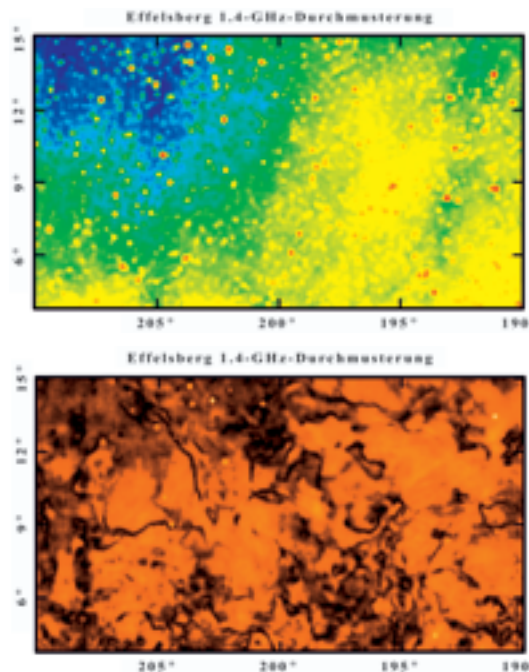


Abb. 3: Radiostrahlung bei 21 Zentimeter Wellenlänge aus einem großen Gebiet im Bereich des galaktischen Antizentrums (oben: gesamte Radiostrahlung, unten: polarisierter Anteil der Radiostrahlung). Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus dem Effelsberger „1,4 GHz Medium Galactic Latitude Survey“.

des galaktischen „Antizentrums“ bei 21 Zentimeter Wellenlänge. Die Gesamtintensität (Abb. 3, oben) zeigt gleichmäßig abfallende Emission mit zunehmender Breite, daneben aber nur wenige Schwankungen (Fluktuationen) auf großen Skalen. Das entspricht der Abnahme der turbulenten Magnetfeldstärke mit wachsendem Abstand von der Milchstraßenebene. Die vielen Punktquellen stammen von Objekten außerhalb der Galaxis – von fernen Quasaren und Radiogalaxien.

Ein völlig anderes Bild liefert die Verteilung der polarisierten Inten-

sität (Abb. 3, unten). Hier brachten die Messungen mit dem Effelsberger 100-Meter-Radioteleskop eine Überraschung: Außer den polarisierten Einzelquellen, wie zum Beispiel Supernova-Überresten, fanden die Forscher auch ausgedehnte Polarisationsmuster, die keine Übereinstimmung mit der Gesamtintensität der Radiostrahlung zeigen und sicher nicht von Einzelquellen herrühren. Was verbirgt sich dahinter?

Bei der Interpretation der Polarisationsmessungen spielt die „Faraday-Drehung“ eine wesentliche Rolle: Die Polarisationsrichtung der Strahlung wird durch eine in der Sichtlinie liegende Wolke aus ionisiertem Gas gedreht, wobei das Ausmaß dieser Drehung von physikalischen Eigenschaften – wie Elektronendichte und Magnetfeldstärke – der Wolke abhängt. Laufen die Radiowellen durch viele galaktische Wolken, werden die Schwingungsrichtungen der Wellen unterschiedlich stark gedreht: Im Teleskop kommt schließlich eine ungeordnete Mischung an, die Schwingungsrichtungen sind chaotisch verteilt, die Wellen erscheinen durch die Überlagerung unpolarisiert und treten somit als dunkle Bereiche in der polarisierten Intensität auf. „Wir erwarten aus den Daten neue Erkenntnisse über die dreidimensionale Struktur der galaktischen Magnetfelder und über die Verteilung der interstellaren Materie in der Milchstraße“, sagt Wolfgang Reich von der Arbeitsgruppe „Radiokontinuum“.

Für die Beobachtung polarisierter Radiostrahlung sind zwei Parameter entscheidend, nämlich Wellenlänge und Winkelauflösung, die miteinander gekoppelt sind und für ein gegebenes Radioteleskop in einem festen Verhältnis stehen. Zum Beispiel kann die 100-Meter-Antenne in Effelsberg bei einer Wellenlänge von 2,8 Zentimetern noch Objekte im Abstand von rund einer Bogenminute trennen – was ziemlich genau der „Sehschärfe“ des menschlichen Auges, also seiner Auflösung für sichtbares Licht, gleichkommt. Das Ausmaß der geschilderten Faraday-Drehung

wächst quadratisch mit der Wellenlänge. Daher gestatten erst Beobachtungen bei kleineren Wellenlängen (und damit höheren Frequenzen) Rückschlüsse auf die ursprüngliche Ausrichtung der Magnetfelder in unserer Galaxis. Die „Sehtiefe“ für die ursprüngliche Polarisationsrichtung in der galaktischen Ebene ist bei Wellenlängen von 21 oder 11 Zenti-

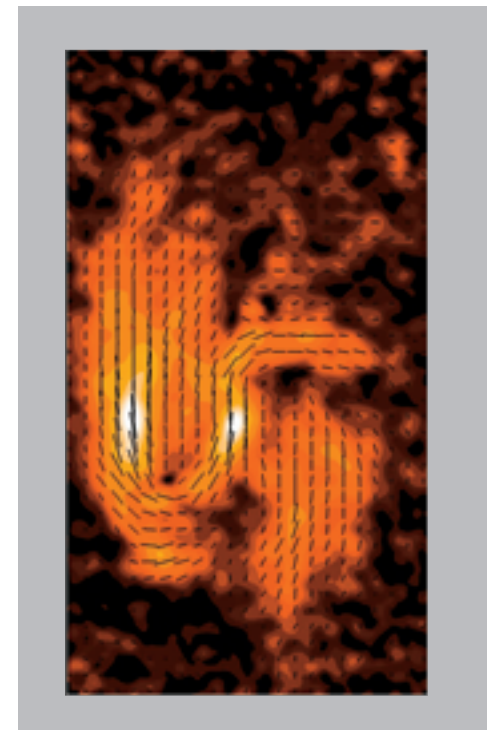


Abb. 4: Polarisierte Radiostrahlung der Spiralgalaxie NGC 3627 bei 3,6 Zentimeter Wellenlänge.

metern vergleichsweise gering. Erst deutlich unterhalb von 10 Zentimeter Wellenlänge schauen die Astronomen tiefer in die Milchstraße hinein und erreichen bei 9 Millimeter Wellenlänge ihren zentralen Bereich in etwa 25.000 Lichtjahre Entfernung.

Das macht die Kartierungen großer Gebiete in der Milchstraße sehr aufwändig. Denn um ein und dieselbe Fläche am Himmel zu „scannen“, bedarf es bei einer Halbierung der Wellenlänge bereits der vierfachen Messzeit. Dieses Problem tritt nicht bei der Beobachtung extragalaktischer Systeme und deren Magnetfelder auf. Doch erscheinen ferne Gala-

xien am irdischen Firmament nur unter einem Winkel von wenigen Bogenminuten. Da reicht selbst die Winkelauflösung des 100-Meter-Radioteleskops oft nicht mehr aus, um Einzelheiten in der Magnetfeldstruktur dieser Sternsysteme zu erfassen.

BLICK AUF FERNE GALAXIEN

Daher bedienen sich die Astronomen des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie eines Tricks: Sie kombinieren Messungen mit der Ef-

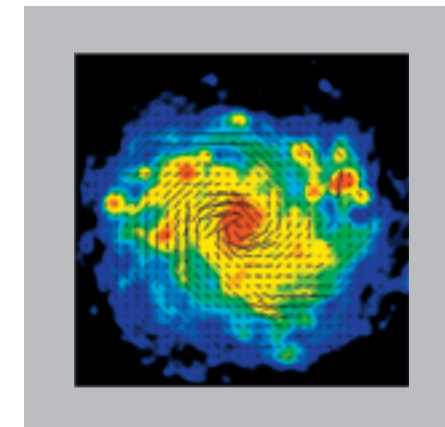
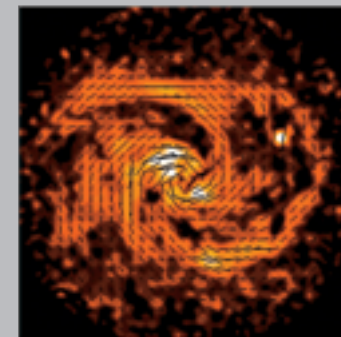


Abb. 5: Polarisierte Radiostrahlung der Spiralgalaxie NGC 6946 bei 6 Zentimeter Wellenlänge (rechts: gesamte Radiostrahlung, links: polarisierter Anteil der Radiostrahlung).

felsberger Antenne, welche die unterliegende Struktur und die komplette Radiostrahlung erfasst, mit Beobachtungen mittels eines Radiointerferometers, wie beispielsweise des VLA (Very Large Array) in Socorro im US-Bundesstaat New Mexico, das die Details in der Radiostrahlung bei wesentlich höherer räumlicher Auflösung zeigt. Auf diese Weise haben die Wissenschaftler die Magnetfeldstrukturen vieler Radiogalaxien untersucht. Ergebnis dieser Arbeiten ist der „Atlas of Magnetic Fields in Galaxies“.

Als aktuelles Beispiel sei eine eben erschienene Arbeit herausgegriffen, veröffentlicht von der Bonner Gruppe gemeinsam mit Kollegen der Universität von Krakau. Sie betrifft NGC 3627, eine wechselwirkende Galaxie im Leo-Triplett im Sternbild Löwe (ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, Vol. 378,

40, 2001). Die Abbildung 4 zeigt die polarisierte Radiostrahlung und die Ausrichtung der Magnetfeldlinien in dieser Galaxie bei 3,6 Zentimeter Wellenlänge. Zu einem großen Teil folgt die Orientierung der Magnetfeldlinien der optischen Spiralstruktur. In der südöstlichen Region tritt allerdings eine deutliche Abweichung auf: Hier „kreuzen“ die Magnetfeldlinien die optische Spiralstruktur. Die beobachtete Struktur des Mag-

netfelds in NGC 3627 erklären die Forscher durch die Überlagerung zweier Magnetfeldkomponenten – die eine das Ergebnis eines Dynamos, die andere vermutlich das Resultat einer Wechselwirkung mit einer anderen Galaxie. Während die eine Komponente dem optisch sichtbaren Gas und Staub folgt, „stellt“ sich die andere vermutlich als Ergebnis der Wechselwirkung „quer“.

Wesentlich symmetrischer erscheint das Magnetfeld in der nahen Spiralgalaxie NGC 6946 (Abb. 5): Die Orientierung der Magnetfeldvektoren zeichnet sehr schön die Spiralstruktur nach. Allerdings verlaufen die „magnetischen Arme“ genau zwischen den optischen Spiralarmen. „Die Magnetfelder werden nicht einfach vom Gas mitgeschleppt, sondern entfalten durchaus ihre eigene Dynamik“, sagt Rainer Beck von der

Arbeitsgruppe „Radiokontinuum“. Möglicherweise spielen Magnetfelder bei der Bildung der Spiralarme und der Entwicklung der Galaxien insgesamt eine wichtige Rolle (MPG-SPIEGEL 2/1996, S. 8 f.).

Auf den ersten Blick besteht zwischen den Beobachtungen von Magnetfeldern in der Milchstraße und in anderen Galaxien eine Diskrepanz. In unserer Galaxis werden Turbulenzen ohne zusammenhängende größere Struktur sichtbar, während die polarisierte Radiostrahlung von externen Galaxien im Wesentlichen geordnet erscheint und den Verlauf der Spiralstruktur der Galaxien aufzeigt. Dieser Widerspruch besteht jedoch nur scheinbar: Die Astronomen führen ihn zum einen auf die unterschiedliche räumliche Auflösung von galaktischen und extragalaktischen Magnetfeldbeobachtungen zurück, zum anderen auf das unterschiedliche Erscheinungsbild in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Faraday-Rotation). Denn bei den Kartierungen des Magnetfelds ausgedehnter Bereiche der galaktischen Ebene dominieren die längeren Wellenlängen, bei denen der Faraday-Effekt sehr stark zuschlägt, bei den extragalaktischen Messungen dagegen die kürzeren Wellenlängen, mit denen auch die räumliche Auflösung entsprechend ansteigt.

Es ist davon auszugehen, dass beide Resultate miteinander vergleichbar sind: Die Messungen der Magnetfeldstruktur von Spiralgalaxien wie NGC 6946 geben einen Eindruck davon, wie auch unsere Milchstraße aus großer Entfernung aussehen würde. Und die galaktischen Polarisationsmessungen zeigen die Magnetfeldstruktur räumlich so detailliert, wie es für Galaxien in größerer Entfernung nicht erreicht werden kann. Erst beides zusammen liefert ein vollständiges Bild der Magnetfeldstruktur von Galaxien – und beide Ansätze zur Untersuchung von Magnetfeldern in Galaxien werden in der „Kontinuumsgruppe“ am Max-Planck-Institut für Radioastronomie erfolgreich betrieben.

NORBERT JUNKES