

Kosmische Magnetfelder

Beck, Rainer

Max-Planck-Institut für Radioastronomie

Arbeitsbereich - Die Milchstraße, Pulsare und nahe Galaxien

Forschungsgebiet: Astronomie/Astrophysik

Korrespondierender Autor: Beck, Rainer

E-Mail: rbeck@mpifr-bonn.mpg.de

Zusammenfassung

Magnetfelder sind überall im Kosmos anzutreffen, aber ihre Rolle bei der Bildung von Galaxien, Spiralarmen und Sternen ist noch immer unverstanden. Neue Radiokarten, gemessen am 100-m-Teleskop Effelsberg und kombiniert mit Daten vom Very Large Array/USA, zeigen eine enge Verbindung zwischen turbulenten interstellaren Magnetfeldern und kalten Gaswolken. Ausgerichtete Magnetfelder sind dagegen zwischen den Spiralarmen oder sogar quer zu diesen orientiert. - Aus neuen Messungen der Faraday-Rotation von Pulsar-Signalen konnte die Struktur des lokalen Magnetfeldes in unserer Milchstrasse bestimmt werden. In einem ausgewählten Gebiet wurde nachgewiesen, dass eine heisse Gaswolke das Magnetfeld verbiegt.

Abstract

Magnetic fields exist everywhere in our Universe, but their role for the formation of galaxies, spiral structure and stars is still not understood. New radio maps, obtained from data of the Effelsberg 100-m and VLA radio telescopes, revealed a close connection between turbulent magnetic fields and cold gas clouds. Regular fields, on the other hand, are concentrated between the spiral arms or even cross these. - New Faraday rotation data of pulsar signals allowed to determine the structure of the local magnetic field in our Galaxy, showing a field reversal. In a selected region the deflection of the field by a hot gas cloud was observed.

99% der sichtbaren Materie ist im Plasmazustand und kann daher durch magnetische Kräfte beeinflusst werden. Eines der Ziele der Forschungsarbeiten am MPIfR ist, die Bedeutung der kosmischen Magnetfelder zu klären. Dafür eignen sich besonders Radiowellen: Hochenergetische Elektronen aus den Stoßfronten der Überreste explodierter Sterne (Supernovae) breiten sich im interstellaren Raum aus, werden von interstellaren Magnetfeldern eingefangen und emittieren auf Spiralbahnen um die Feldlinien linear polarisierte *Synchrotronstrahlung*. Dabei ist die Stärke der Radiostrahlung ein Maß für die Magnetfeldstärke, und aus der Polarisationsrichtung lässt sich die Orientierung des Magnetfeldes bestimmen. Radioteleskope sind daher exzellente Magnetometer und erlauben es, Magnetfelder sowohl in unserer Milchstraße wie auch in entfernten Galaxien aufzuspüren.

Um die vollständige Magnetfeldstruktur in *Galaxien* zu erfassen, bedienen wir uns eines Tricks: Messungen mit dem Effelsberger 100-Meter-Radioteleskop, welche die volle Ausdehnung erfassen („Weitwinkel“), kombinieren wir mit Beobachtungen eines Radiointerferometers, wie des VLA (Very Large Array) in Socorro/New Mexico oder des ATCA (Australia Telescope Compact Array) in Narrabri/

Australien, diese zeigen dann die Details („Teleobjektiv“). Auf diese Weise haben wir die Magnetfeldstrukturen von sehr vielen Galaxien vermessen (www.mpifr-bonn.mpg.de → Forschung → Atlas of Magnetic Fields).

Die Orientierung der Magnetfeldlinien folgt im Allgemeinen der optischen Spiralstruktur; die stärksten ausgerichteten Magnetfelder (hoher Polarisationsgrad der Radiostrahlung) liegen allerdings zwischen den Spiralarmen (**Abb. 1**), bisweilen auch quer zu diesen (**Abb. 2**). In den Spiralarmen sind die Magnetfelder sehr stark, aber weitgehend turbulent (geringer Polarisationsgrad). Dort entstehen Sterne aus kalten Gaswolken. Die Feldstärke steigt mit zunehmender Gasdichte an, als ob die Feldlinien in den Gaswolken verankert sind - eine scheinbar paradoxe Situation, denn kaltes Gas enthält kaum freie Ladungen. Eine Beeinflussung der Magnetfelder wie in heißen Gaswolken (siehe Abb. 6) sollte daher nicht möglich sein. Allerdings ionisiert das Licht junger Sterne die äußeren Gebiete der kalten Gaswolken, und dort könnten die Feldlinien angekoppelt sein. Unterstützt wird diese Idee durch unsere Beobachtung, dass die Radiokarten den Karten der Infrarot-Strahlung in allen bisher untersuchten Galaxien verblüffend ähnlich sind. Infrarot-Strahlung wird von warmem Staub emittiert, der zusammen mit warmem Gas in der Nähe junger Sterne auftritt. Diese Korrelation konnten wir durch ein neuartiges mathematisches Verfahren, der „Wavelet-Analyse“, statistisch untermauern.

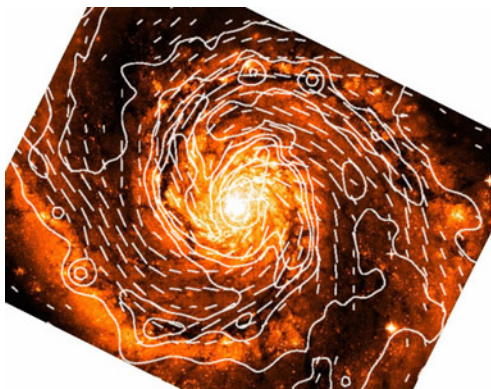


Abb. 1: Gesamte Radiostrahlung (Konturlinien) und polarisierte Radiostrahlung (Striche) aus der Galaxie M 51, gemessen mit den Radioteleskopen Effelsberg und VLA bei 3.6-cm-Wellenlänge. Das optische Bild im Hintergrund wurde vom Hubble Space Telescope der NASA/ESA aufgenommen.

Möglicherweise spielen Magnetfelder auch bei der Bildung der Spiralarme eine wichtige Rolle. Wir haben herausgefunden, dass die magnetische Energiedichte in den Spiralarmen von NGC 6946, einer typischen Spiralgalaxie, größer ist als die thermische Energie des Gases und vergleichbar mit der Energiedichte der turbulenten Bewegung der Gaswolken in den Spiralarmen. Das legt die Vermutung nahe, dass die für die Produktion von Magnetfeldern (*Dynamo*) und für die Bildung von Spiralarmen verantwortlichen Prozesse kooperieren oder sogar identisch sind.

Die Galaxie mit den schönsten Spiralarmen ist M 51 im Sternbild der Jagdhunde. Aus Messungen mit dem Effelsberger 100-m-Teleskop und mit dem VLA bei 3.6-cm-Wellenlänge entstand eine neue Radiokarte (Abb. 1) mit einer Winkelauflösung von 8", was rund 1000 Lichtjahren in der Entfernung von etwa 30 Millionen Lichtjahren entspricht, doppelt so scharf wie die vorhergehende Karte (s. MPG Jahrbuch 1999, S. 723). Die gesamte Radiostrahlung stammt vor allem aus den Spiralarmen, wo Staub und molekulares Gas konzentriert sind. Die Magnetfeldstärken in den dichten Staubwolken (oben in Abb. 1) erreichen 30 MikroGauss (3 nT). Das ist rund 10-mal stärker als im lokalen Spiralarm unserer

Milchstraße (siehe Abb. 4) und der höchste bisher in Spiralarmen gemessene Wert. Der Polarisationsgrad ist dort allerdings gering, weil dieses starke Magnetfeld weitgehend turbulent ist. Die polarisierte Strahlung (also die homogenen Magnetfelder) zeigt keine Konzentration auf die Spiralarme, wie es nach der Theorie der Dichtewellen erwartet worden war. Das Magnetfeld unterliegt keiner Kompression. Das spiralförmige Magnetfeld ist erstaunlich gleichförmig und reicht bis ins Zentrum der Galaxie, wo es von uns nicht mehr aufgelöst werden kann.

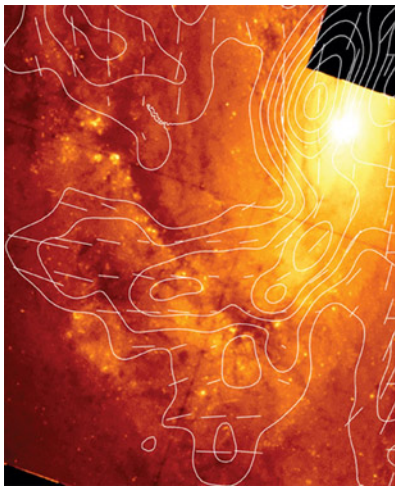


Abb. 2: *Polarisierte Radiostrahlung (Konturlinien und Striche) aus der Galaxie NGC 3627, gemessen mit den Radioteleskopen Effelsberg und VLA bei 3.6-cm-Wellenlänge. Die Richtung des Magnetfeldes (nach aussen oder in die Galaxie hinein) bleibt mit dieser Messung unbestimmt und erfordert zusätzliche Messungen der Faraday-Rotation wie in der Milchstraße (s. Abb. 4). Das optische Bild im Hintergrund wurde vom Hubble Space Telescope der NASA/ESA aufgenommen.*

Magnetfelder bilden jedoch nicht immer ein gleichmäßiges Spiralmuster. In der Spiralgalaxie NGC 3627 haben wir einen „magnetischen Spiralarm“ entdeckt, der quer zu einem massiven Spiralarm aus Sternen, Gas und Staub verläuft (Abb. 2), vermutlich das Resultat einer Wechselwirkung mit einer anderen Galaxie. Magnetfelder werden nicht einfach vom Gas mitgeschleppt, sondern besitzen eine eigene Dynamik.

Magnetfelder können also für die Suche nach gravitativen Störungen eingesetzt werden. Der Galaxienhaufen im Sternbild Jungfrau (Virgo) ist ein Ort intensiver Wechselwirkungen. Ein Beispiel ist die Spiralgalaxie NGC 4569, die sich durch das dichte Gas zwischen den Galaxien bewegt. Dadurch wird Gas und Magnetfeld aus der Galaxie herausgerissen, beobachtbar als Region hoher Radio-Polarisation in bis zu 100 000 Lichtjahren Abstand von der optischen Scheibe (**Abb. 3**).

Radiomessungen geben wichtige Hinweise darauf, wie der Dynamo zur Verstärkung von Magnetfeldern funktioniert. Die Energie stammt aus turbulenten Gasbewegungen, die wiederum von Sternwinden und Supernova-Explosionen in den aktiven Sternbildungsregionen der Spiralarme angetrieben werden, und aus der allgemeinen Rotation einer Galaxie.

Unsere Kartierungen kleiner irregulärer Galaxien zeigen unpolarisierte Synchrotronstrahlung, also turbulente Magnetfelder, in solchen Objekten, in denen die Sternbildungsrate pro Volumen einen bestimmten Grenzwert übersteigt, sodass der Dynamo arbeiten kann. Geordnete Magnetfelder

(polarisierte Radiostrahlung) fehlen jedoch in den meisten Fällen, denn irreguläre Galaxien rotieren nicht schnell genug. Bleibt die Sternbildungsrate unter dem Grenzwert, so kann keine Synchrotronstrahlung (d.h. keine Magnetfelder) nachgewiesen werden.



Abb. 3: Polarisierte Radiostrahlung (Konturlinien und Striche) aus der Galaxie NGC 4569, gemessen mit dem Radioteleskop Effelsberg bei 6.2-cm-Wellenlänge. Das optische Bild im Hintergrund stammt aus dem Digitized Sky Survey des Space Telescope Science Institute.

Unsere Messungen von Galaxien mit plötzlichem Sternbildungs-Ausbruch (*Starburst*) zeigen, dass der Dynamo eine gewisse Zeit benötigt, um Magnetfelder aufzubauen. In einigen Fällen konnten wir trotz hoher Sternbildungs-Aktivität keinerlei Radiostrahlung nachweisen, da die Ausbruchphase offensichtlich noch zu jung ist.

In unserer Milchstraße lässt sich die Struktur des Magnetfeldes auf der Skala von Lichtjahren mithilfe der Synchrotronstrahlung sehr gut messen (s. MPG Jahrbuch 2001, S. 672), aber dafür ist die großräumige Struktur schwierig zu erfassen. Eine erfolgreiche Methode nutzt die Radiostrahlung der *Pulsare*.

Pulsare sind rotierende Neutronensterne, die in der Milchstraße entlang der galaktischen Ebene verteilt sind. Durch das extrem starke Magnetfeld des Pulsars von bis zu 10 Billionen Gauss (GigaTesla) ist die Radiostrahlung sehr hoch polarisiert. Die Polarisations Ebene erleidet auf dem Weg durch das interstellare Medium, entlang des Magnetfeldes unserer Milchstraße, eine Faraday'sche Drehung. Der Rotationswinkel ist ein Maß für die Stärke des lokalen Magnetfeldes, die Drehrichtung zeigt die Richtung des Magnetfeldes.

Von rund 200 der uns bekannten etwa 1500 Pulsare ist bisher das Rotationsmaß bekannt. Das Radioteleskop Effelsberg ist ein ideales Instrument, um diesen Parameter zu messen. Die Pulsargruppe des MPIfR hat in den beiden letzten Jahren neue Daten für 25 Pulsare gesammelt. Damit konnte die Ausrichtung des großräumigen Magnetfeldes in der Sonnenumgebung festgestellt werden (**Abb. 4**). Das Magnetfeld wechselt seine Richtung zwischen den beiden der Sonne benachbarten Spiralarmen. Es

wurden aber keine weiteren Umkehrungen der Magnetfeldrichtung, wie sie früher vermutet wurden, festgestellt.

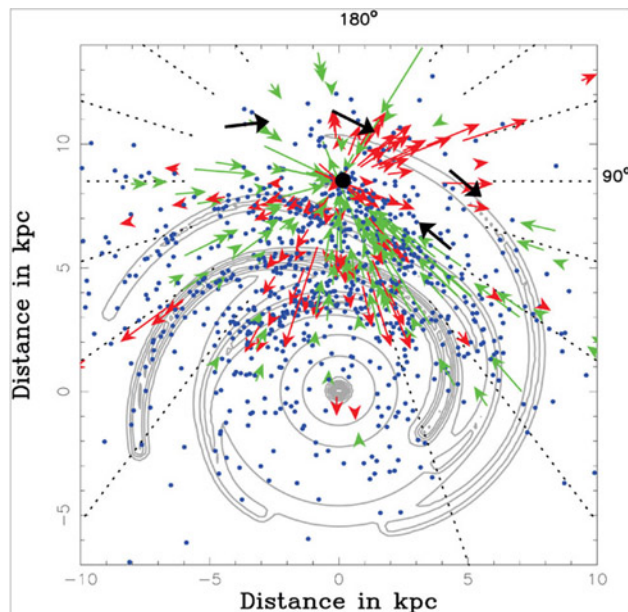


Abb. 4: Magnetfeldstruktur in der Sonnenumgebung aufgrund von Rotationsmaßen von Pulsaren. Das Bild zeigt einen Blick "von oben" auf die Ebene des Milchstraßensystems bis zu einem Abstand von 10 Kiloparsec (rund 33.000 Lichtjahre) von der Sonne. Die Sonne befindet sich in der Mitte des Bildes, etwa 28.000 Lichtjahre vom Zentrum des Milchstraßensystems (im unteren Teil des Bildes) entfernt. Die ungefähre Lage der Spiralarme (Konturen) wurde durch Messungen der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs ermittelt. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für die Stärke der auf uns zu (grün) oder von uns weg (rot) gerichteten Magnetfeldkomponenten. Die dicken schwarzen Pfeile geben die daraus bestimmte Richtung des lokalen Magnetfeldes an. Die blauen Punkte markieren die Lage der Pulsare, deren Rotationsmaß noch nicht gemessen wurde.

In der Sonnennähe liegende heiße Gaswolken (**Abb. 5**), Produkte starker Sternbildung, sind für drastische Richtungsänderungen des Magnetfeldes verantwortlich (**Abb. 6**). Wir vermuten, dass eine rotierende Gaswolke, in der das Magnetfeld verankert ist, das Magnetfeld „mitzieht“.

Auch polarisierte extragalaktische Quellen (Quasare) können zur Untersuchung des Magnetfeldes herangezogen werden. In Kanada wird zur Zeit der „International Galactic Plane Survey“, eine Radiodurchmusterung der Milchstraße bei 21-cm-Wellenlänge unter Einbeziehung des Effelsberg-Surveys, durchgeführt. In Zusammenarbeit mit diesen Wissenschaftlern in Kanada haben wir die Rotationsmaße von über 1000 extragalaktischen Quellen ermittelt und mit den Resultaten für Pulsare verglichen. Da die extragalaktischen Quellen weit außerhalb der Milchstraße liegen, kann so auch das Magnetfeld in den äußeren Bereichen der Milchstraße untersucht werden.

Magnetfelder haben eine wichtige Rolle im Spiel der kosmischen Kräfte. Die genaue Struktur der Magnetfelder ist allerdings noch unbekannt. Polarisationsmessungen im Radiobereich werden bei der Lösung der offenen Probleme weiterhin die zentrale Rolle spielen. Die am Effelsberger Teleskop gewonnenen Erfahrungen fließen zurzeit in die Planungen der großen internationalen Radioteleskope des nächsten Jahrzehntes ein, wie dem „Square Kilometer Array“.

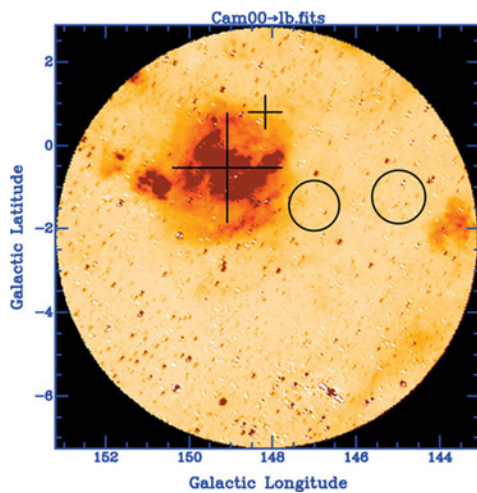


Abb. 5: Pulsar-Rotationsmaß in einem kleinen Ausschnitt der Milchstraße im Sternbild Giraffe. Kreuze kennzeichnen ein auf uns zu gerichtetes, Kreise ein von uns weg gerichtetes Magnetfeld. Das unterliegende Bild zeigt heisses Gas in der rund 3000 Lichtjahre Entfernung liegenden Gaswolke (HII-Region) S205, die vermutliche Ursache für die Magnetfeldverbiegung (s. Abb. 6).

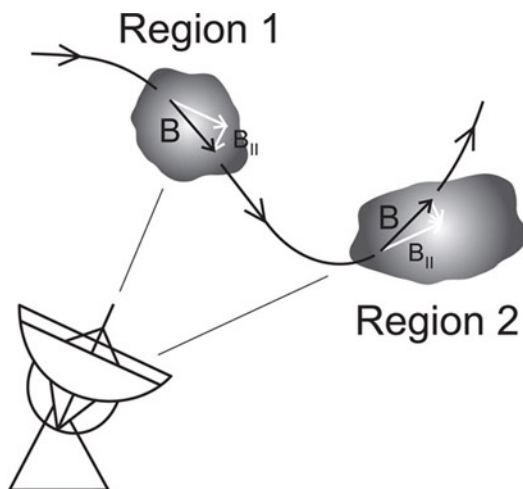


Abb. 6: Modell der Verbiegung des lokalen Magnetfeldes durch die Gaswolke S025 (s. Abb. 5).