

Magnetfelder in Spiralgalaxien

R. Beck

1 Einleitung: Das magnetische Universum

Wir leben in einem magnetischen Universum. Fast die gesamte im Weltall sichtbare Materie, die Sterne und das interstellare Gas zwischen den Sternen sind elektrisch geladen und werden von Magnetfeldern durchsetzt und beeinflusst. Magnetfelder erfüllen Sternsysteme (*Galaxien*) und vermutlich auch den intergalaktischen Raum dazwischen.

Die Existenz galaktisch großräumiger Magnetfelder verdanken wir einer Asymmetrie des Elektromagnetismus: Magnetische Potentialdifferenzen lassen sich nicht durch einen Strom von Ladungsträgern abbauen, da bisher keine magnetischen Ladungen (*Monopole*) gefunden wurden. Elektrische Potentialdifferenzen können dagegen durch strömende elektrische Ladungen abgebaut werden. Daher gibt es messbare elektrische Felder im Kosmos nur in dichten Plasmen und Grenzschichten auf kleinen räumlichen Skalen (z. B. in Magnetosphären von Planeten, Pulsaren oder Quasaren und bei Sonneneruptionen), während Magnetfelder fast überall im Universum anzutreffen sind. Sie können durch *Diffusion* („Auseinanderfließen“) abgeschwächt und durch *magnetische Rekonnexion* drastisch verändert oder sogar ausgelöscht werden. Dabei wird magnetische Energie in thermische Energie, Strahlungsenergie und kinetische Energie umgewandelt. Für die Erzeugung, Verstärkung und Regeneration kosmischer Magnetfelder werden *Dynamos* verantwortlich gemacht.

2 Dynamos: Ordnung aus dem Chaos

Kosmische Magnetfelder entstehen durch Selbsterregung aufgrund der Bewegung elektrisch geladener Teilchen (*magnetische Induktion*; vgl. den Beitrag von Glaßmeier und Heyner in diesem Heft). In Galaxien gibt es keine großräumigen elektrischen Ströme, die Magnetfelder erzeugen könnten. Allerdings lässt sich mechanische Energie im sogenannten α - Ω -Dynamo durch turbulente Gasbewegungen in elektrisch geladenen Körpern, die mit einer Winkelgeschwindigkeit Ω rotieren, in magnetische Energie umwandeln, wie z. B. in Planeten [1,6], in Sternen [4] und in unserer Sonne [4-6]. Im turbulenten Gas werden Magnet-

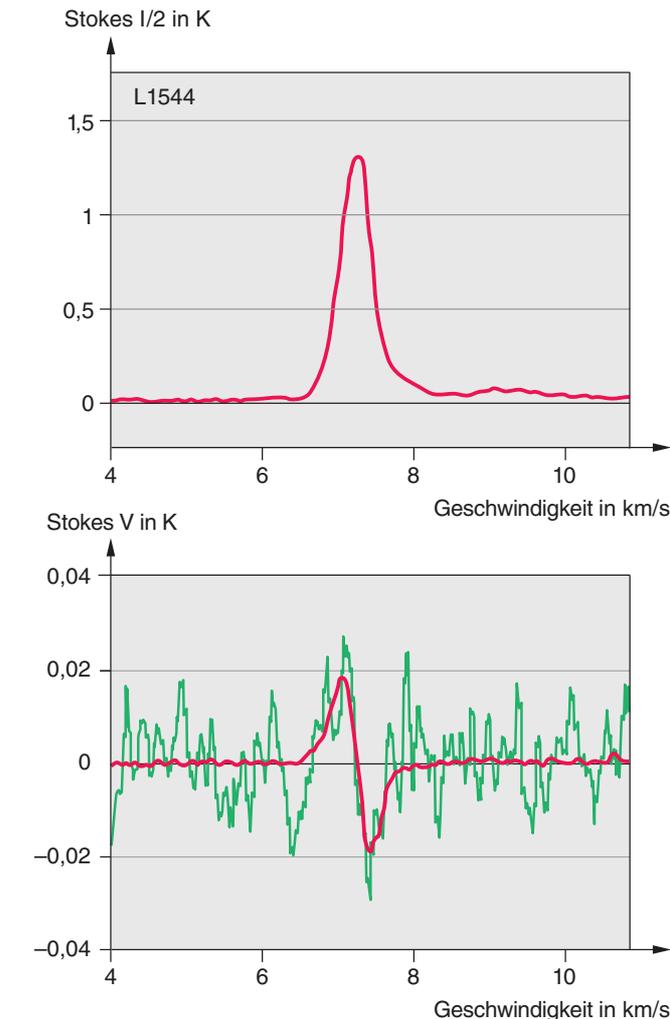


Abb. 1: Messung der Zeeman-Aufspaltung der OH-Linie bei 18,0 cm in der dichten Gaswolke L1544. Die obere Abbildung zeigt die Gesamtstrahlung der Linie als Funktion der Frequenz, umgerechnet in die Geschwindigkeit relativ zur Sonne (Doppler-Effekt), die untere Abbildung zeigt ihre zirkulare Polarisation (Stokes-Parameter V). Die gemessene Magnetfeldstärke beträgt 11 μG (1,1 nT) (aus [9]).

felder durch die Coriolis-Kräfte der großräumigen Rotation schraubenförmig verdreht (*helikale Turbulenz* α). Die Überlagerung vieler solcher Bewegungen kann Magnetfelder mit galaktischen Ausmaßen erzeugen [1,3,6,7]. Die Dynamo-Verstärkung großräumiger, durch den Vektor der magnetischen Feldstärke \vec{B} charakterisierter Magnetfelder im Geschwindigkeitsfeld (Vektor \vec{v}) des rotierenden Körpers wird beschrieben durch die Gleichung:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{rot}(\vec{v} \times \vec{B}) + \text{rot}(\alpha \vec{B}) - \text{rot}(\eta \text{rot} \vec{B})$$

Der Einfluss helikaler, turbulenter Strömungen geht dabei in die Tensorgröße α ein. Der Tensor η beschreibt die Diffusionsprozesse des Magnetfeldes in diesem Medium. Die obige Dynamo-Gleichung lässt sich unter anderem in Kugelkoordinaten lösen. Die diskreten Lösungen sind charakterisiert durch Quantenzahlen, die

den Grad der Symmetrie bezüglich Radius, Azimut- und Höhenwinkel beschreiben. Die einfachste Feldstruktur ist ein *Dipol* für kugelförmige Objekte (wie Sterne und Planeten) oder ein *Quadrupol* für abgeflachte Objekte (wie Galaxien). Bei starker Anregung können verschiedene Moden gleichzeitig angeregt werden. Asymmetrien in der Gasdichte oder Geschwindigkeit sowie Wechselwirkungen mit anderen Körpern können bestimmte Moden unterdrücken.

Der α - Ω -Dynamo ist ein langsamer Prozess und benötigt zum Aufbau großräumiger Magnetfelder viele Rotationsperioden, in Galaxien also einige Milliarden Jahre. Zum Glück gibt es noch einen schnelleren Dynamo (α^2 -Dynamo), der kleinräumige Magnetfelder aus turbulenten Gasbewegungen erzeugen kann. Dieser Dynamo arbeitete vermutlich bereits in jungen Galaxien, als die Gasturbulenz besonders stark

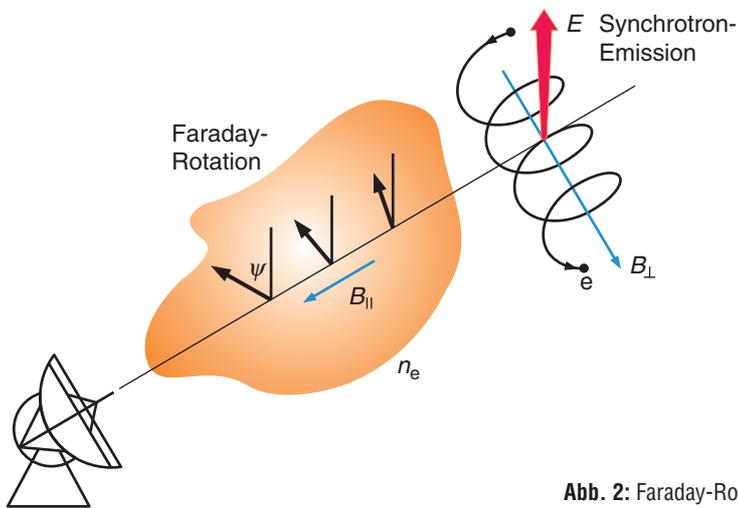


Abb. 2: Faraday-Rotation (Grafik: MPIfR)

war und produzierte starke turbulente Felder, die vermutlich die weitere Entwicklung der Galaxien beeinflusst haben.

Ohne Anfangsfeld (d.h. $\vec{B} = 0$) ist nach der Dynamo-Gleichung keine Magnetfelderzeugung möglich. Das notwendige magnetische Saatfeld erfordert Ladungstrennungen, eine „Batterie“. Ludwig Biermann schlug 1950 erstmals vor, dass solche Batterien im Kosmos durch Relativbewegungen von Protonen und Elektronen aufgrund ihrer unterschiedlichen Massen entstehen könnten. Analoge Laborexperimente geben Hinweis auf die Rolle von nicht parallelen Druck- und Dichtegradienten in Stoßfronten [6,7], wie sie in jungen Galaxien vorkamen. Auch das heiße turbulente Gas in jungen Galaxien ist ideal zur Produktion von Saatfeldern, wie Reinhard Schlickeiser von der Universität Bochum 2012 gezeigt hat.

3 Messung galaktischer Magnetfelder

Magnetfelder in Galaxien sind nicht leicht zu messen. Längliche Staubpartikel im interstellaren Raum können sich quer zu den Feldlinien ausrichten und dadurch das Licht der dahinterliegenden Sterne schwach polarisieren [8]. Die Untersuchung der globalen Struktur des Magnetfeldes unserer Milchstraße ist allerdings mühsam, weil die Polarisation des Lichtes von Tausenden von Sternen gemessen werden muss.

Der Zeeman-Effekt basiert auf der Aufspaltung von Spektrallinien proportional zur Magnetfeldstärke. Bei der Beobachtung entlang eines ausgerichteten Magnetfeldes sind zwei Linien mit entgegengesetzter zirkularer Polarisation zu sehen. Mit diesem Verfahren lassen sich die starken solaren Magnetfelder von einigen Zehntel Tesla eingehend untersuchen. In der Milchstraße wird die Aufspaltung der stärksten Radiolinien des neutralen Was-

serstoffs bei 21,1 cm und des OH bei 18,0 cm benutzt, um Magnetfeldstärken in Gaswolken zu messen [2,9] (Abb. 1). In Wolken ge-

ringer Dichte beträgt die mittlere Stärke des ausgerichteten Feldes etwa 0,6 nT (Nanotesla), entsprechend 6 μ G (Mikrogauss); bei Dichten von mehr als rund 1000 Wasserstoffatomen pro Kubikzentimeter nimmt die Feldstärke etwa mit der Quadratwurzel aus der Dichte zu.

Die erfolgreichste Methode zur Messung von Feldstärken im interstellaren Medium basiert auf der diffusen Radiostrahlung, die in einem weiten Wellenlängenbereich von Metern bis zu Zentimetern beobachtet wird [10]. Die nahezu lichtschnellen Elektronen der Kosmischen Strahlung laufen auf Spiralbahnen um die Magnetfeldlinien und senden dabei Radiowellen aus (Synchrotron-Strahlung). Die Intensität dieser Radiostrahlung ist ein Maß für die Stärke des gesamten (d.h. des turbulenten + ausgerichteten) Magnetfeldes. Die Radiokarte ei-

Abb. 3: Das 100-m-Radioteleskop Effelsberg (Foto: N. Tacke, MPIfR)



ner Galaxie zeigt uns also die Verteilung der gesamten Magnetfelder, die von den Elektronen „beleuchtet“ werden (Abb. 5, 6, 8-10). Die typischen interstellaren Feldstärken betragen rund 1 nT (10 μ G). Das irdische Magnetfeld hat, zum Vergleich, eine mittlere Stärke von rund 30 μ T (0,3 G).

Die magnetische Energiedichte im interstellaren Raum ist vergleichbar mit der kinetischen Energiedichte der turbulenten Bewegungen der Gaswolken [7] und reicht aus, um die Bildung neuer Sterne in kollabierenden Gaswolken zu unterstützen. Dabei wirkt das Magnetfeld als „magnetische Bremse“, transportiert Drehimpuls aus den inneren in die äußeren Bereiche der Wolke, verlangsamt die Rotationsgeschwindigkeit des Wolkenkerns und ermöglicht den weiteren Kollaps.

Sind die Magnetfeldlinien in einem Raumbereich gleich orientiert, so schwingt die Synchrotron-Strahlung in einer Vorzugsrichtung, ist also linear polarisiert. In einem vollständig geordneten Magnetfeld beträgt der Polarisationsgrad etwa 75%. Die Schwingungsebene der Polarisation ist dabei senkrecht zur Magnetfeldorientierung in der Himmelsebene. Eine Karte der bei kurzen Wellenlängen gemessenen polarisierten Radiostrahlung (Abb. 7) zeigt die Verteilung und Orientierung der geordneten Magnetfelder. Die in Abb. 5-10 gezeigten Striche geben Feldorientierungen ohne Richtungspfeil an, denn es sind keine Vektoren.

Die Schwingungsebene der polarisierten Radiostrahlung kann in magnetischen Plasmawolken auf dem Weg zu uns gedreht werden (*Faraday-Rotation*) (Abb. 2). Der Drehwinkel (in rad) beträgt

$$\Delta\psi = 0,81 \lambda^2 \int n_e B_{\parallel} dl,$$

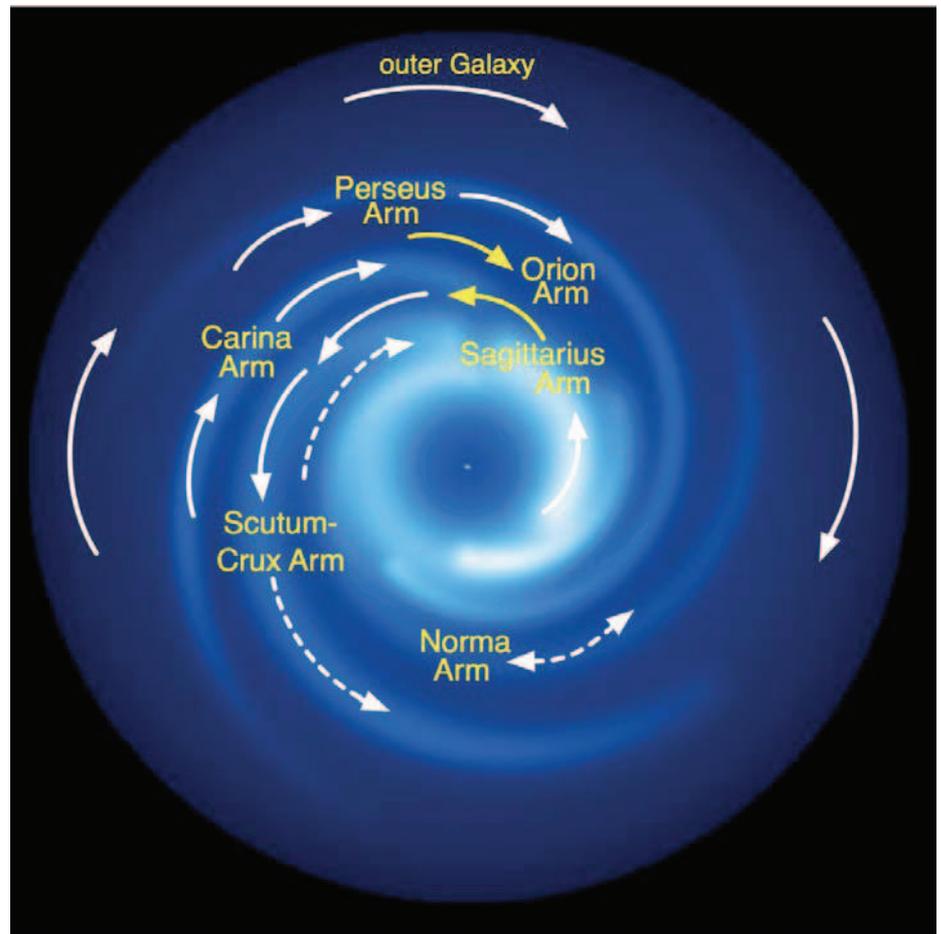


Abb. 4: Die Struktur des Magnetfeldes unserer Milchstraße, abgeleitet aus Messungen der Faraday-Rotation von 194 Pulsaren nahe der Ebene. Die Bögen geben die ungefähre Lage von vier bekannten Spiralarmen an (von unten nach oben: Norma, Crux-Scutum, Carina, Sagittarius, Orion und Perseus). Die Position der Sonne ist im Orion-Arm. Die Pfeile markieren die Richtung der Magnetfelder (aus [11]).

wobei die Wellenlänge λ in Metern, die Elektronendichte n_e in cm^{-3} und die Stärke B_{\parallel} der Magnetfeld-Komponente entlang der Sichtlinie in μG gemessen wird. Die Integration ist entlang der Sichtlinie von der Quelle bis zum Teleskop auszuführen. Im interstellaren Medium ist der Drehwinkel

$\Delta\psi$ bei Wellenlängen unterhalb von etwa 5 cm vernachlässigbar klein, kann aber bereits bei 20 cm über 90° betragen; zusätzlich wird die Strahlung depolarisiert. Die Richtung der Faraday-Rotation (entgegen oder mit dem Uhrzeigersinn) erlaubt die Aussage, ob das Feld auf uns zu (+) oder von uns

Abb. 5: Gesamt-Radiostrahlung (Farbe) und Magnetfeldorientierungen (schwarze Striche) der Andromeda-Galaxie M 31, beobachtet bei 6 cm Wellenlänge mit dem Radioteleskop Effelsberg, korrigiert für die Faraday-Rotation in unserer Milchstraße (Winkelauflösung $3'$). (R. Gießübel & R. Beck, MPIfR Bonn).

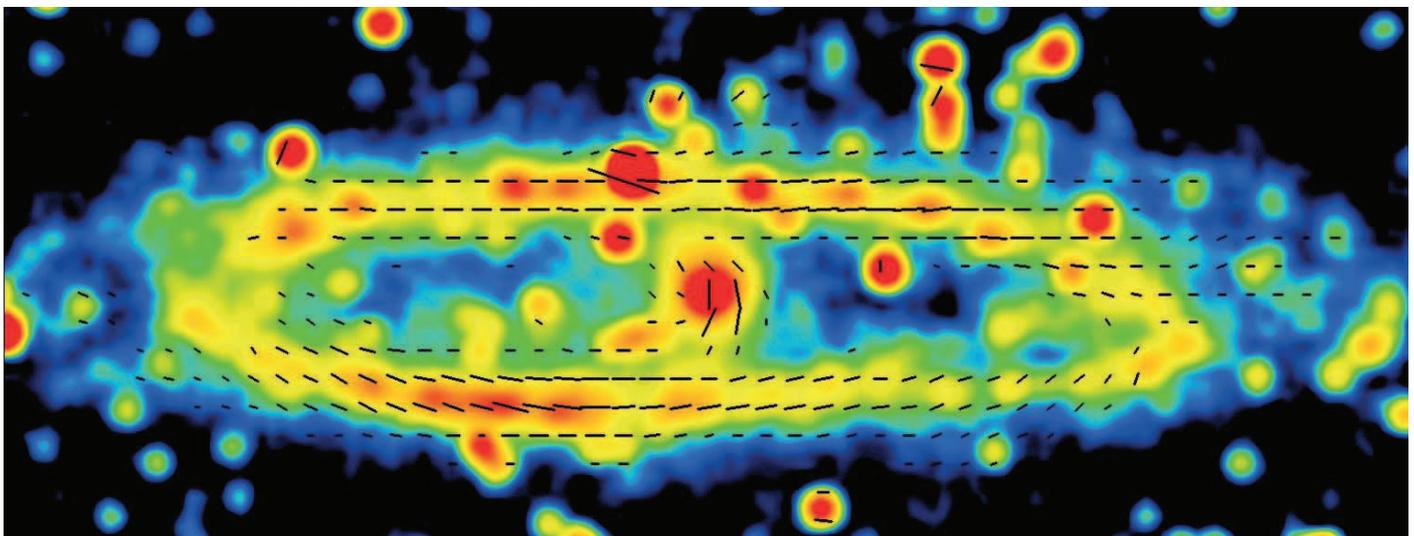




Abb. 6: Gesamt-Radiostrahlung (weiße Konturlinien) und Magnetfeldorientierungen (gelbe Striche) der Spiralgalaxie M 51, kombiniert aus Beobachtungen bei 6 cm Wellenlänge mit den Radioteleskopen VLA und Effelsberg (Winkelauflösung $15''$). Das farbige optische Bild im Hintergrund wurde mit dem Hubble Space Telescope aufgenommen. (A. Fletcher, Univ. Newcastle & R. Beck, MPIfR Bonn, Grafik: Sterne und Weltraum).

weg (–) gerichtet ist. Die Faraday-Rotation kann daher als „kosmischer Kompass“ genutzt werden.

Auch die polarisierten Radiosignale von *Pulsaren* (magnetische Neutronensterne als Überreste von Supernova-Explosionen) unterliegen auf dem Weg durch das interstellare Medium unserer Milchstraße der Faraday-Rotation. Da die Entfernungen der Pulsare ungefähr bekannt sind, ist die Vermessung der Magnetfelder unserer Milchstraße in der näheren Umgebung der Sonne mit Pulsaren möglich (Abb. 4). In anderen Galaxien wurden, abgesehen von zwei Pulsaren in der nahegelegenen Großen

Magellanschen Wolke, bisher keine Pulsare gefunden, die zur Messung der dortigen Magnetfelder herangezogen werden könnten. Dazu sind Radioteleskope mit höherer Empfindlichkeit nötig (s. Kapitel 9).

Das weltweit empfindlichste Instrument zum Nachweis polarisierter Radiostrahlung ist das 100-m-Radioteleskop bei Bad Münstereifel-Effelsberg [12] (Abb. 3). Es war von 1971 bis 2000 das größte voll bewegliche Teleskop der Welt und wird seitdem knapp übertroffen vom Greenbank Radioteleskop in West Virginia/USA. Fast alle großen Milchstraßensysteme bis zu einer Entfernung von etwa 30 Millionen

Lichtjahren, die von der geografischen Breite Effelsbergs aus zugänglich sind, wurden beobachtet (z. B. Abb. 5-8).

Trotz seiner enormen Größe erreicht der Effelsberger Spiegel bei einigen Zentimetern Wellenlänge gerade die Winkelauflösung des menschlichen Auges. Damit sind nur in den nächsten Galaxien Spiralarme erkennbar (leider nicht mit bloßem Auge, weil das Licht der Spiralarme viel zu schwach ist). In größeren Entfernungen hilft die Zusammenschaltung vieler Radioteleskope zu einem *Interferometer* weiter. Das „Very Large Array“ (VLA) in der Wüste von Neumexiko (USA) besteht aus 27 Einzelspiegeln von je 25 m Durchmesser auf drei Y-förmigen Schienen, die es erlauben, die Teleskope jedes Armes bis zu 21 km weit auseinanderzufahren. Damit erhält man ein „Zoom“-Teleskop für den Radiobereich. Die kombinierten Daten der beiden Teleskope VLA und Effelsberg liefern die bisher schärfsten und zugleich empfindlichsten „Magnetbilder“ von Spiralgalaxien (Abb. 6 und 7).

4 Unser Nachbar: die Andromeda-Galaxie

Die Andromeda-Galaxie (Messier 31) ist die nächste Spiralgalaxie in einer Entfernung von etwa 2 Millionen Lichtjahren und die erste Galaxie, deren Radiostrahlung bereits 1950 nachgewiesen werden konnte. Ihre Radiowellen stammen vor allem aus einem „Ring“ in rund 30000 Lichtjahren Abstand vom Zentrum (Abb. 5), der sich infolge der starken Neigung von M 31 gegen die Sichtlinie nicht in einzelne Spiralarme auflösen lässt. Im „Ring“ befinden sich zahlreiche helle Radioquellen, die Sternentstehungsgebiete markieren. Sterne entstehen in kalten, dichten Gaswolken, in denen Magnetfelder verankert sind. Die Sterne selbst sind im Radiobereich unsichtbar. Einige der massereichsten Sterne erscheinen bei ihrer Explosion als Supernovae. In den Stoßfronten der Explosionswolken werden die Teilchen der Kosmischen Strahlung beschleunigt.

Die Ergebnisse der Polarisationsmessungen (Striche in Abb. 5) zeigen ein großräumig geordnetes Magnetfeld, das ungefähr entlang des „Ringes“ verläuft, so wie es die Dynamo-Theorie vorhersagt. In Anbetracht der chaotischen Gasstruktur von M 31 ist die hohe Symmetrie des Magnetfeldes bemerkenswert. Ein globaler Mechanismus wie ein galaktischer Dynamo kann also „Ordnung aus dem Chaos“ hervorbringen.

Die Rotationsgeschwindigkeit des Gases ist in M 31 und vielen anderen Galaxien

nahezu unabhängig vom Abstand zum Zentrum. Das wird im Allgemeinen auf die Existenz von „Dunkler Materie“ zurückgeführt. Ein Teil dieses Effektes könnte allerdings von Magnetfeldern verursacht werden, denn die Magnetfeldstärke in M 31 nimmt nur langsam nach außen ab und könnte in den Außenbereichen auch eine dynamische Rolle spielen.

5 Klassische Spiralgalaxien: M 51 und NGC 6946

Die wohl schönste Spiralgalaxie ist M 51 im Sternbild Jagdhunde. Eine nahe Begleitgalaxie regt starke Dichtewellen im Gas an, die außergewöhnlich helle Spiralarme im Optischen wie im Radiobereich produzieren (Abb. 6). Die Dichtewellen komprimieren das Magnetfeld an der Innenseite der Arme, wodurch polarisierte Radiostrahlung beobachtet wird. Allerdings gibt es auch zwischen den Armen homogene Magnetfelder, die vermutlich in einem *Dynamo*-prozess erzeugt werden.

Eine typische Spiralgalaxie ist NGC 6946 im nördlichsten Winkel des Sternbildes Schwan in rund 30 Millionen Lichtjahren Entfernung. Sie ist im Radiobereich eine der hellsten Galaxien am Himmel. Im optischen Spektralbereich ist sie schwierig zu beobachten, weil sie sich hinter einem Vor-

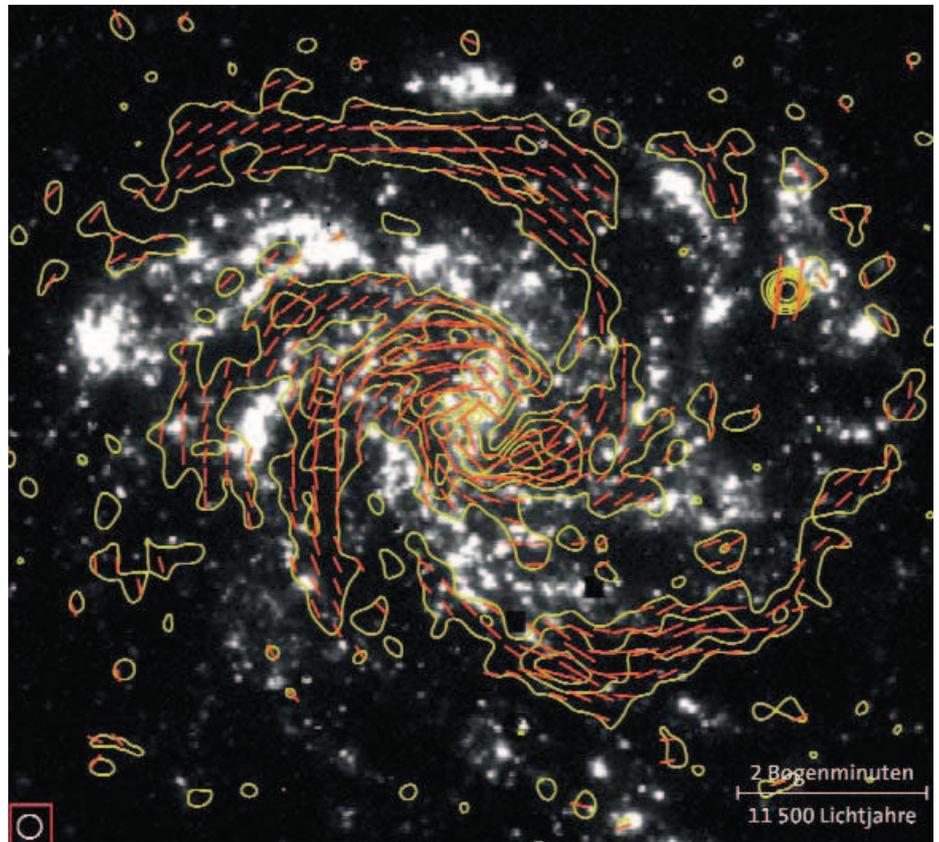
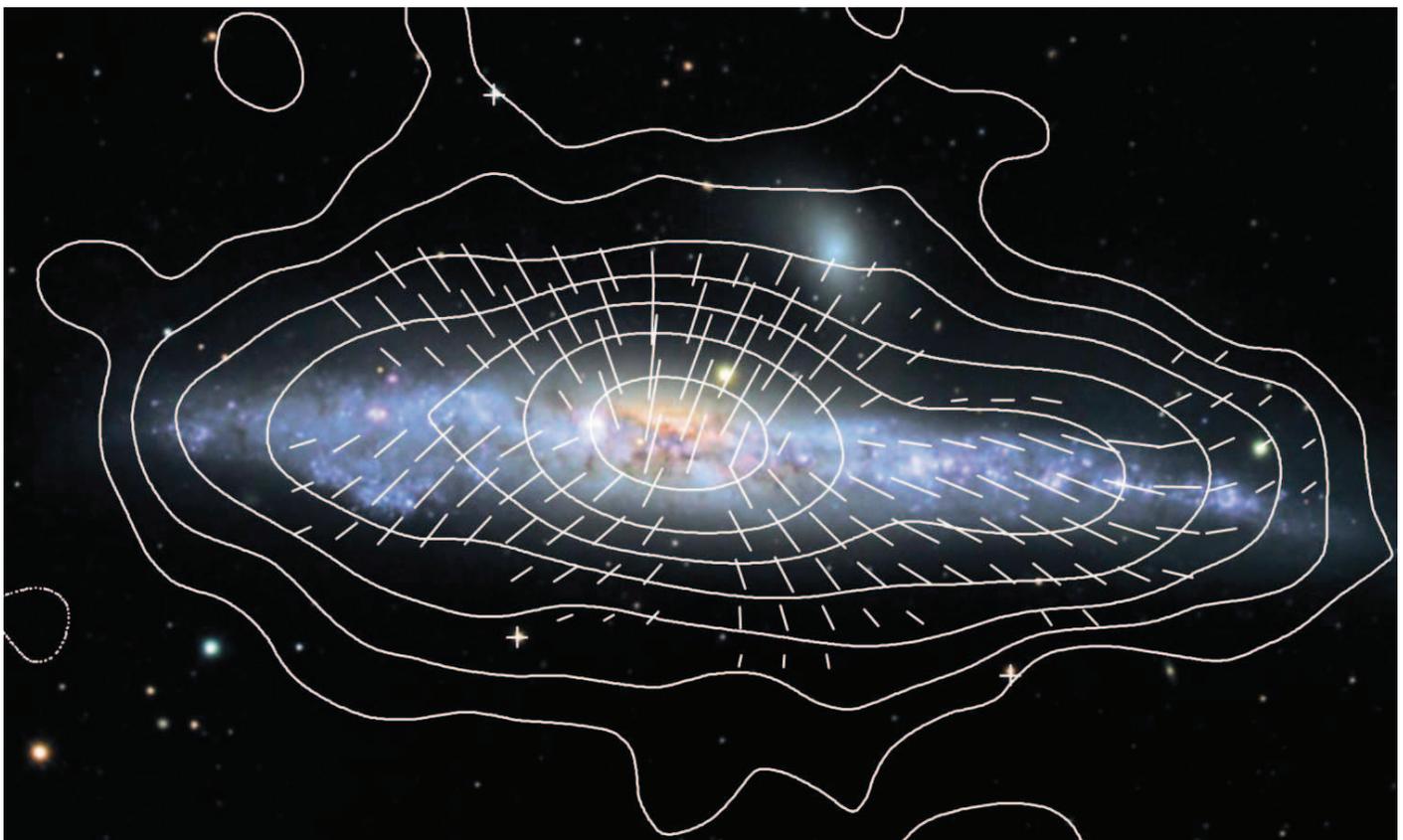


Abb. 7: Polarisierte Radiostrahlung (gelbe Konturlinien) und Magnetfeldorientierungen (rote Striche) der Spiralgalaxie NGC 6946, kombiniert aus Beobachtungen bei 6 cm Wellenlänge mit den Radioteleskopen VLA und Effelsberg (Winkelauflösung 15''). Das optische Bild im Hintergrund zeigt die Verteilung des ionisierten Gases. (R. Beck & P. Hoernes, MPIfR Bonn, Grafik: Sterne und Weltraum).

Abb. 8: Gesamt-Radiostrahlung (weiße Konturlinien) und Magnetfeldorientierungen der Galaxie NGC 4631, beobachtet bei 3.6 cm Wellenlänge mit dem Radioteleskop Effelsberg (Winkelauflösung 84''). Das farbige optische Bild im Hintergrund wurde am Misti Mountain Observatorium aufgenommen. (M. Krause, MPIfR Bonn).



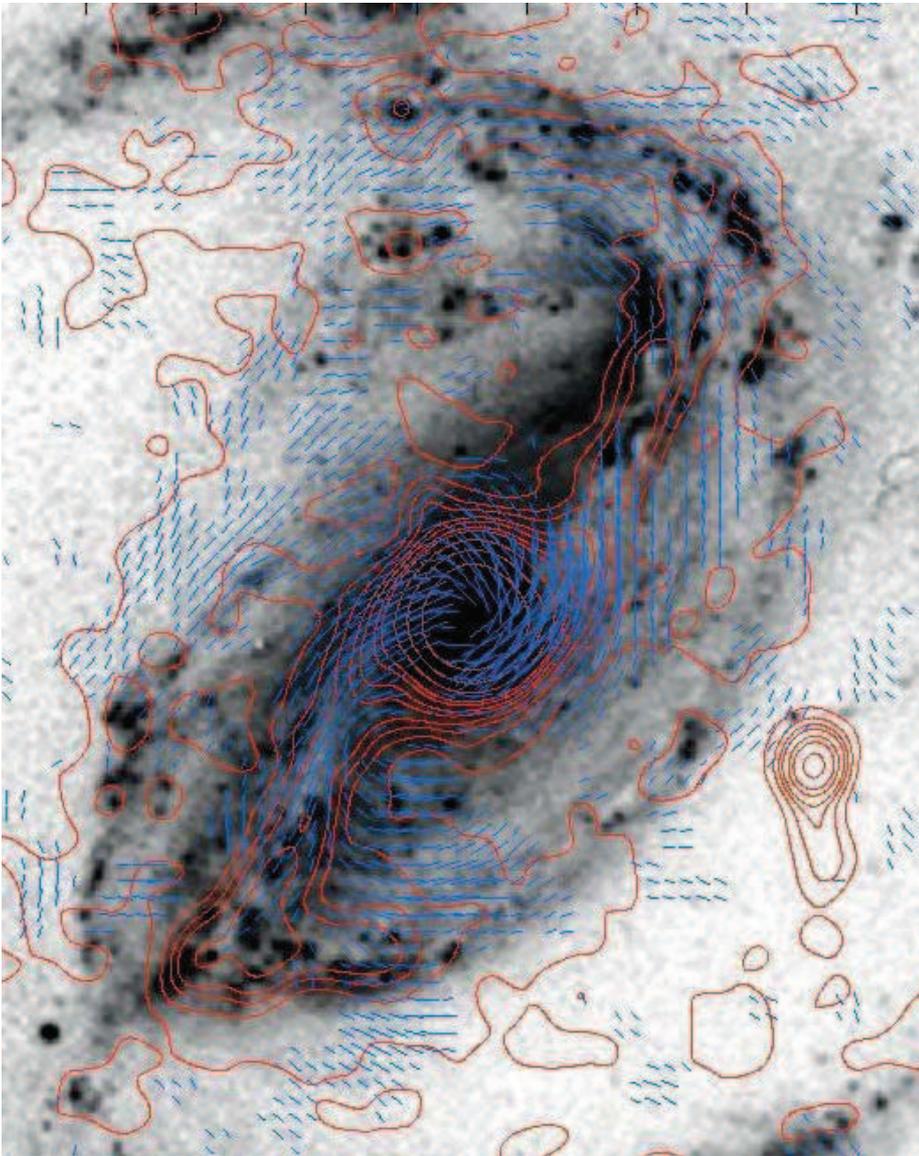


Abb. 9: Gesamt-Radiostrahlung (rote Konturlinien) und Magnetfeldorientierungen (blaue Striche) der Balkengalaxie NGC 1097, beobachtet bei 6 cm Wellenlänge mit dem Radioteleskop VLA (Winkelauflösung $10''$). Das optische Bild im Hintergrund wurde am Cerro Tololo Observatorium aufgenommen. (R. Beck, MPIfR Bonn & V. Shoutenkov, Radio-Observatorium Pushchino).

hang aus Gas und Staub in unserer eigenen Milchstraße befindet, der sichtbares Licht im Unterschied zu Radiowellen zurückhält.

Im Radiobereich besitzt NGC 6946 zwei riesige „magnetische Spiralarme“ (Abb. 7), die viel regelmäßiger sind als ihre zerfranst-optischen Gegenstücke im optischen Licht. Sie erstrecken sich am Himmel über einen Winkel von rund 10 Bogenminuten, was einem Drittel des scheinbaren Monddurchmessers entspricht. Die geordneten Magnetfelder liegen nicht wie in M 51 an der Innenkante der optischen Spiralarme, sondern fast genau dazwischen, also in Gebieten geringster Gas- und Sterndichte. In den optischen Spiralarmen ist der Polarisationsgrad der Radiostrahlung sehr gering, weil die Magnetfelder durch die starke Sternbildungsaktivität verwirbelt werden.

Mit ihrer großräumigen Symmetrie und ihrer Richtung liefern die magnetischen Arme in NGC 6946 einen wichtigen Hinweis auf die Funktionsweise eines galaktischen Dynamos. Da sie einen ähnlichen Öffnungswinkel haben wie die optischen Spiralarme, muss es einen Zusammenhang zwischen beiden Phänomenen geben. Die Dichtewelle des Gases und die Dynamo-Welle des Magnetfeldes arbeiten vermutlich in einer Art Resonanz. Magnetische Arme gibt es auch in vielen anderen Galaxien. Sie liefern den Schlüssel zum besseren Verständnis galaktischer Dynamos und der Bildung von Spiralstrukturen.

6 Radio-Halos

Im Seitenanblick erscheinen Galaxien auf optischen Bildern abgeflacht, weil die Gra-

vation die meisten Sterne in einer Scheibe bindet. Heißes Gas und Kosmische Strahlung können jedoch infolge ihrer geringen Dichten die Galaxienscheibe verlassen, sofern es die magnetischen Kräfte zulassen, und bilden einen Halo aus Synchrotron-Strahlung.

NGC 4631 ist eine Galaxie, die wir fast genau von der Seite sehen. In optischen Spektralbereichen ist die Struktur chaotisch, mit mehreren getrennten Gebieten hoher Sternbildungsrate. Ihr Radiohalo ist mit über 75000 Lichtjahren Durchmesser der größte bisher bekannte aller Spiralgalaxien (Abb. 8). Mit dem 100-m-Radioteleskop Effelsberg wurde hoch polarisierte Strahlung (bis zu 50%) im Halo entdeckt, was auf ein weitgehend geordnetes Magnetfeld hinweist. Die Magnetfeldlinien im Halo von NGC 4631 (und vielen weiteren Galaxien) haben „X-Form“: Im Zentralgebiet stehen die Feldlinien fast genau senkrecht auf der Galaxienebene. Ein galaktischer Wind bläst vermutlich entlang der Feldlinien heißes Gas und Kosmische Strahlung bis in eine große Höhe. Aus der Größe des Radiohalos und der Lebensdauer der kosmischen Elektronen, die aus der Magnetfeldstärke folgt, lässt sich die Windgeschwindigkeit zu 200-300 km/s bestimmen.

Galaktische Winde sind wichtig für die Funktionsweise des α - Ω -Dynamos. Dieser erzeugt großräumige Magnetfelder mit magnetischer Helizität einer bestimmten Richtung. Da die gesamte magnetische Helizität jedoch eine Erhaltungsgröße ist, muss die Galaxie kleinräumige Magnetfelder der umgekehrten Helizität loswerden, z. B. durch einen Ausfluss ins intergalaktische Medium. Wenn Dynamos seit Jahrmilliarden arbeiten, so sollte ein erheblicher Teil des intergalaktischen Mediums magnetisiert worden sein.

7 Balkengalaxien

Ein Balken aus Sternen verändert das Gravitationsfeld und verformt die Umlaufbahnen von Gas und Sternen zu Ellipsen. Die Magnetfelder werden vom Gas mitgerissen und machen die Strömung sichtbar, wie in der Galaxie NGC 1097 mit einem Balken von einigen zehntausend Lichtjahren Länge (Abb. 9). Am inneren Rand des Balkens ändert sich die Richtung der Magnetfeldlinien um etwa 70° . Wir vermuten, dass sich die Gasströmung unter dem Einfluss der Magnetfelder verändert.

Gas und Magnetfelder in NGC 1097 strömen entlang des Balkens nach innen und sammeln sich in einem Ring von rund 5000 Lichtjahren Durchmesser um das Zentrum

(Abb. 10). Ein Teil des Gases bildet dort neue Sterne. Im Zentrum von NGC 1097 wird ein Schwarzes Loch vermutet, dessen Umgebung sich durch starke Radio- und Röntgenstrahlung bemerkbar macht. Jedes Schwarze Loch muss andauernd mit Masse „gefüttert“ werden, sonst käme die Strahlung aus seiner Umgebung rasch zum Erliegen. Der zentrale Ring einer Galaxie ist jedoch eine schlechte „Futterquelle“ für ihr zentrales Schwarzes Loch, denn Gas und Sterne im Ring rotieren auf stabilen Kreisbahnen. Ein Bremsmechanismus zum Abtransport des Drehimpulses ist nötig; Reibungskräfte allein reichen nicht aus. Die Radiobeobachtung zeigt die wahrscheinliche Lösung dieses Problems: Das Magnetfeld im zentralen Ring hat die Form einer Spirale (Abb. 10), vermutlich das Ergebnis eines zentralen Dynamos. Die Lorentzkraft $\vec{v} \times \vec{B}$ zwischen der Gasbewegung und den turbulenten Magnetfeldern führt zu einer Ablenkung eines kleinen Teils des Gases nach innen, was zur „Fütterung“ des Schwarzen Loches ausreicht.

8 Galaxien-Kerne

Das Kerngebiet von M 31 ist eine starke Radioquelle (Abb. 5), vermutlich erzeugt dort ein effektiver Dynamo starke Magnetfelder. In den meisten Galaxien wird ein Schwarzes Loch im Zentrum vermutet. Der Einsturz von Materie lässt die Kernquelle hell aufleuchten, wie in NGC 1097 (Abb. 10). Noch wesentlich heller sind die Kerne in Quasaren [13] und in Radiogalaxien [14], die Folge komprimierter Magnetfelder im Gaswirbel um das Schwarze Loch (Akkretionsscheibe). Ein Schlauch aus Magnetfeldern erlaubt einem kleinen Teil des Gases, das Kerngebiet mit hoher Geschwindigkeit senkrecht zur Akkretionsscheibe zu verlassen – ein Jet entsteht, der riesige Radioblasen mit starker Synchrotronstrahlung produzieren kann [15].

9 Zukunft

Dynamos arbeiten universell: in Planeten, Sternen und Galaxien – vielleicht sogar auf noch größeren Skalen, in Galaxienhaufen. Kosmische Magnetfelder haben fast überall ihre Hand im Spiel der kosmischen Kräfte, insbesondere bei der Bildung der Galaxien und Sternen. Ihre volle Bedeutung ist aber noch längst nicht verstanden. Das neue Radioteleskop Low Frequency Array (LOFAR) [16] und das geplante Square Kilometre Array (SKA) [17] widmen sich unter anderem der Erforschung galaktischer Magnetfelder. Etliche überraschende Entdeckungen dürfen in Zukunft erwartet werden. ■

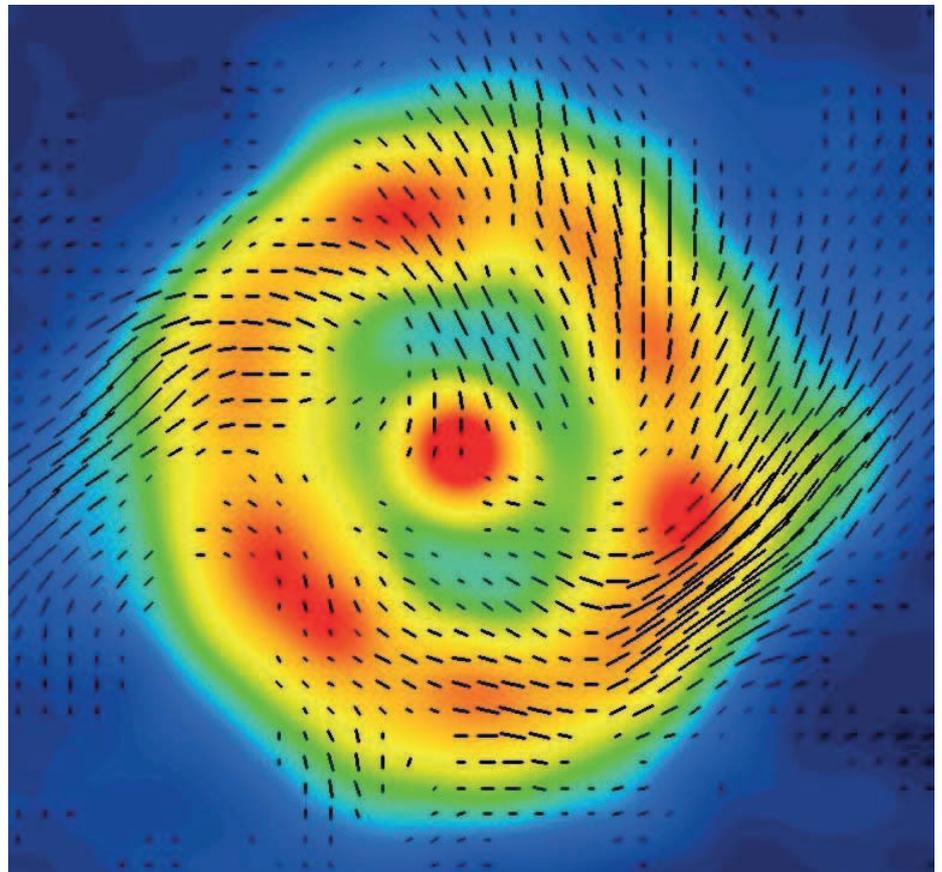


Abb. 10: Gesamt-Radiostrahlung (Farbe) und Magnetfeldorientierungen im zentralen Ring der Balken-galaxie NGC 1097, beobachtet bei 3 cm Wellenlänge mit dem Radioteleskop VLA (Winkelaufösung 3''). (R. Beck & V. Shoutenkov, Radio-Observatorium Pushchino)

Literatur

Allgemein

- [1] Parker, E.N.: *Kosmische Magnetfelder, Spektrum der Wissenschaft* 10/1983, S. 82
 [2] Verschuur, G.L. (1993): *Hidden Attraction*, Oxford University Press, Oxford
 [3] Rüdiger, G., Hollerbach, R. (2004): *The Magnetic Universe*, Wiley-VCH, Weinheim
 [4] Strassmeier, K.G.: *Kosmische Magnetfelder, Sterne und Weltraum* 9/2008, S. 34
 [5] Zirker, J.B. (2009): *The Magnetic Universe*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore
 [6] von Kusserow, U. (2013): *Magnetischer Kosmos*, Springer-Verlag, Berlin (s. auch <http://KosmischeMagnetfelder.wordpress.com> und <http://uvkusserow.magix.net/website/startseite.0.html#Artikel>)
 [7] Beck, R., Wielebinski, R. (2013): *Magnetic Fields in Galaxies*, in: *Planets, Stars and Stellar Systems*, Vol. 5, Springer-Verlag, New York, S. 641

Speziell

- [8] Fischer, O.: *Interstellare Polarisation*, *Astronomie und Raumfahrt* 6/2001, S. 27
 [9] Crutcher, R.M., Troland, T.H. (2000): *Astrophysical Journal*, Vol. 537, S. L139
 [10] Reich, W. (1999): *Die Milchstraße im Radio*, *Astronomie und Raumfahrt*, Vol. 36, S. 4
 [11] Van Eck, C.L., Brown, J.C., Stil, J.M., et al. (2011): *Astrophysical Journal*, Vol. 728, S. 97

[12] R. Wielebinski, N. Junkes, B.H. Grahl: *Radioteleskop Effelsberg, Sterne und Weltraum* 9/2012, S. 36

[13] Disney, M.: *Quasare - die kosmischen Mahlströme*, *Spektrum der Wissenschaft* 8/1998, S. 40

[14] Miley, G.K., Chambers, K.C.: *Die fernsten Radiogalaxien*, *Spektrum der Wissenschaft* 3/1993, S. 38

[15] Falcke, H.: *Jets in aktiven galaktischen Kernen*, *Sterne und Weltraum* 8-9/1997, S. 736

[16] Falcke, H.: *Das Low Frequency Array*, *Sterne und Weltraum* 5/2004, S. 24 (s. auch www.lofar.org und www.lofar.de)

[17] Beck, R.: *Das Square Kilometre Array*, *Sterne und Weltraum* 9/2006, S. 22 (s. auch www.skatelescope.org und www.scholarpedia.org/article/Square_kilometre_array)

Danksagung: Der Autor dankt Nobert Junkes, Marita Krause und Ulrich von Kusserow für die kritische Durchsicht des Manuskriptes sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung im Rahmen der Forschergruppe „Kosmischer Magnetismus“ (FOR1254).

Anschrift des Verfassers

Dr. Rainer Beck, MPI für Radioastronomie, Auf dem Hügel 69, 53121 Bonn, E-Mail: rbeck@mpifr-bonn.mpg.de