

Interstellares Medium

Magnetfelder

Grundlagen aus dem ersten Semester:

[10-Interstellares Medium \(Seite 6\)](#)

[07-Eigenschaften der Sterne \(Seite 7 - 8\)](#)

Magnetfelder kommen im Universum häufig vor, zum Beispiel in Supernovaüberresten, stellaren Winden oder Sternentstehungsregionen. Das liegt daran, dass in diesen Gebieten viele Teilchen ionisiert und dadurch magnetisch nicht mehr neutral sind.

Diese ionisierten Teilchen können andere ionisierte Teilchen anziehen bzw. von ihnen angezogen werden - sie haben also eine Energie. Die Energie haben sie unter anderem durch die Rotationsenergie von Galaxien und durch die Expansionsenergie von Supernovae. Die Energiedichte der Magnetfelder ist dadurch auch vergleichbar mit der Energiedichte dieser Phänomene.

1 Grundlagen des Magnetismus

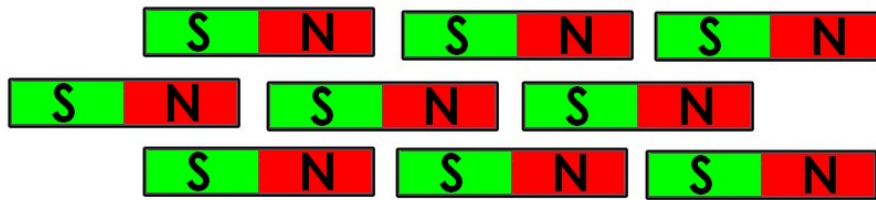
Alle Atome bestehen aus positiv geladenen Protonen und negativ geladenen Elektronen.

Wenn in einem Atom mehr Protonen als Elektronen sind, ist das Atom positiv geladen und zieht so lange negativ geladene Elektronen an, bis die negative Ladung der Elektronen die positive Ladung der Protonen ausgleicht und es wieder neutral ist.

Hat ein Atom mehr Elektronen als Protonen, ist es negativ geladen und stößt so lange negativ geladene Elektronen ab, bis die negative Ladung der Elektronen nur noch so groß wie die positive Ladung der Protonen ist. Das Atom ist wieder neutral. Durch diese Vorgänge sind die meisten Atome insgesamt neutral.

Magnete

Ein negativ und ein positiv geladenes Atom ziehen einander an. Dadurch entsteht der kleinstmögliche Magnet aus einem positiven und einen negativen Atom. Dieser Magnet zieht andere Magnete an. Da sich ungleichgeladene Seiten abstoßen und gleich geladene Seiten anziehen richten sich alle Magnete in die selbe Richtung aus und bilden so einen großen Magneten.



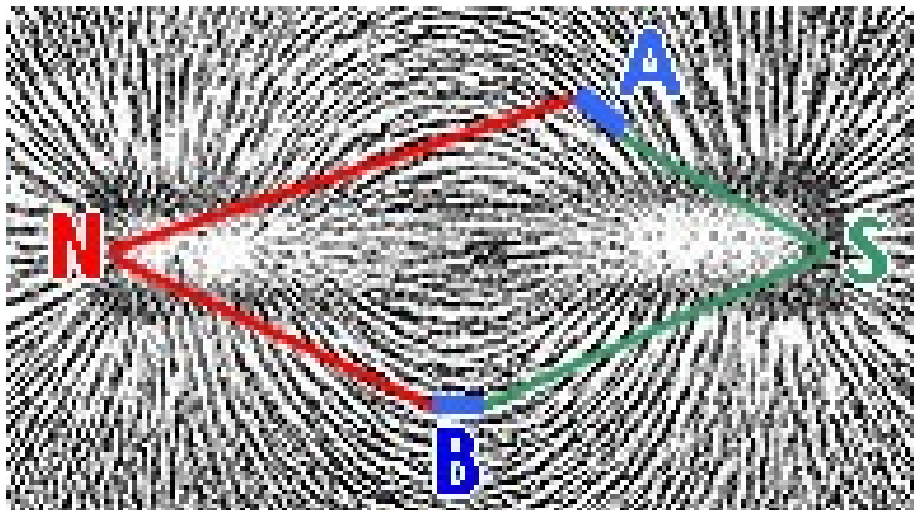
In unserer Grafik sind die Teilchen so ausgerichtet, dass die positivste Seite nach rechts schaut. Ganz rechts am Magnet adieren sich folglich die positiven Ladungen aller Teilchen und es entsteht dort die stärkste positive Ladung. Man bezeichnet diese Stelle als Nordpol.

Auf der gegenüberliegenden Seite adieren sich alle negativen Ladungen und es entsteht ein Südpol.

Aufgrund der Ausrichtung ihrer Teilchen haben Magnete, die aus mehr als einem Atom bestehen, immer sowohl einen Nord- als auch einen Südpol. Selbst wenn man einen Magnet in der Mitte auseinanderschneidet entstehen zwei Magnete die ihrerseits einen Nord- und einen Südpol haben.

Magnetfeldlinien

Wenn man magnetische Teilchen in die Nähe eines Magneten legt, werden diese Teilchen so gedreht, dass deren Nordpol möglichst in Richtung des Südpol des Magnets und deren Südpol möglichst in Richtung des Nordpol des Magnets schaut.



In dieser Grafik ist die Ausrichtung von Teilchen im Magnetfeld dargestellt. Teilchen A wäre, wenn es nur nach der Kraft am Südpol geht genau entlang der roten Linie (kürzeste Entfernung zum Nordpol) ausgerichtet, wenn es nur nach der Kraft am Nordpol ginge entlang der grünen Linie (kürzeste Entfernung zum Südpol). Da der Südpol jedoch deutlich näher ist, ist die Kraft am Nordpol deutlich stärker und die

Ausrichtung orientiert sich fast nur nach der grünen Linie.

Teilchen B ist von beiden Polen gleich weit entfernt, folglich ist auch die Kraft, die auf die beiden Pole wirkt, gleich groß. Das Teilchen ist deshalb so ausgerichtet, dass beide Pole gleich weit von der direkten Richtung zu den Polen entfernt sind.

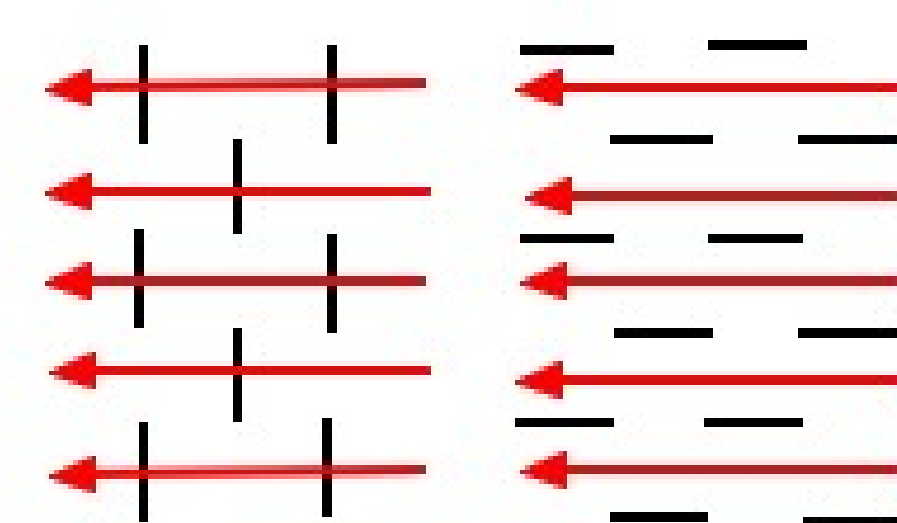
Neben den Teilchen A und B sind in der Grafik ganz viele Teilchen in schwarz eingezeichnet, die nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten ausgerichtet sind. Man erkennt, dass diese Teilchen entlang von Linien aufgelegt sind. Diese Linien werden als Magnetfeldlinien bezeichnet.

2 Entdeckung kosmischer Magnetfelder

Es gibt eine Vielzahl von Phänomenen, die auf die Existenz von Magnetfeldern im Universum hindeuten.

Polarisation

Die Staubeilchen im interstellaren Medium sind magnetisch geladen und richten sich daher entlang der Magnetfeldlinien aus. Je nach Ausrichtung verschlucken die Teilchen unterschiedlich viel Licht aus unterschiedlichen Richtungen.



In der linken Grafik sind die Staubeilchen (schwarz dargestellt) so polarisiert, dass sie normal auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts (rot dargestellt) stehen. In der rechten Grafik stehen sie senkrecht dazu. Man erkennt, dass die roten Pfeile in der linken Grafik die Staubkörner viel häufiger überqueren als in der rechten Grafik. Folglich wird links auch viel mehr Licht extinktiert.

Auf der Erde erkennt man, dass die Lichtwellen vermehrt aus der Himmelsrichtung kommen, die parallel zur Ausrichtung der Staubteilchen im Magnetfeld ist. Je nachdem wie groß und wie stark das Magnetfeld ist, ist dieser Effekt besonders deutlich. Die Deutlichkeit dieses Effekts wird mit zwei Maßeinheiten angegeben: Dem Rotations- und dem Dispersionsmaß.

Das Rotationsmaß (RM) dient in erster Linie dazu, anzugeben, in welcher Richtung das Licht polarisiert ist. Dafür definiert man den Polarisationswinkel β als Winkel zwischen den Koordinatenlinien und der Richtung, aus der das meiste Licht kommt (das entspricht der Richtung, in der die Staubteilchen polarisiert werden).

Die Definition des Rotationsmaßes lautet

$$RM = \frac{\beta}{\lambda^2} \quad (2.1)$$

wobei λ die Wellenlänge, bei der die Polarisation gemessen wird beschreibt. (Da die Staubteilchen bei unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich viel Licht extinktieren ist die Stärke des Dispersionsmaß bei unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich. Für Anwendungen gemeinsam mit dem Dispersionsmaß erleichtert die Normierung mit dem Quadrat der Wellenlänge das Rechnen).

Man kann auch feststellen, wie das Rotationsmaß mit den Eigenschaften des Magnetfeldes zusammenhängt

$$RM = 0,81 \int B n_e ds \quad (2.2)$$

In dieser Formel steht B für die Stärke des Magnetfelds in Richtung der Magnetfeldlinien in Mikrogauß und n_e für die Anzahl der Elektronen pro cm^3 . Das Integral erfolgt über das gesamte Magnetfeld.

Das Dispersionsmaß ist dazu da, um anzugeben, wie stark die Polarisation ist. (Um wie viel mehr Elektronen in Polarisationsrichtung als in andere Richtungen kommen). Es ist so definiert dass gilt

$$DM = \int n_e ds \quad (2.3)$$

Durch Umformung dieser beiden Formeln kann man nur aus Rotations- und Dispersionsmaß sowohl die Richtung des Magnetfelds als auch die Elektronendichte berechnen.

An dichten Stellen muss man zusätzlich beachten, dass die Staubteilchen durch Kollisionen mit anderen Teilchen wie zum Beispiel Gasmolekülen oder Photonen abgelenkt werden. Besonders häufig kommt es zu solchen Zusammenstößen, wenn die Staubteilchen selber die Photonen emittieren.

Bis sich die Staubteilchen nach diesen Zusammenstößen wieder nach den Magnetfeldlinien ausgerichtet haben, dauert es: Zunächst wirkt die Magnetkraft, sodass

die Teilchen sich Richtung Magnetfeldlinien drehen. Dort angekommen rotieren sie jedoch aufgrund der Trägheit weiter. Wie weit sie sich drehen, hängt vom Trägheitsmoment I und der Winkelgeschwindigkeit ω ab. Es gilt die Formel

$$E = \frac{I\omega^2}{2} \quad (2.4)$$

Wie groß das Trägheitsmoment ist und wie schnell sich das Teilchen drehen kann, hängt nur von der Beweglichkeit der Teilchen, also der Temperatur T ab. Man kann also die Formel auch in Abhängigkeit von der Temperatur

$$E = kT \quad (2.5)$$

angeben, wobei k die Boltzmannkonstante ($1,4 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$) ist.

Bis sich die Staubteilchen wieder nach den Magnetfeldlinien ausgerichtet haben, passiert unter Umständen schon wieder der nächste Zusammenstoß. Wenn sich alle umliegenden Teilchen bewegen, wenn die Staubteilchen also in einem strömenden Medium sind, kommen diese Zusammenstöße sehr oft vor. Die Teilchen sind in dem Fall hauptsächlich in die Strömungsrichtung gedreht.

Zeemann-Effekt

Zur Erklärung des Zeemann-Effekts wird ein neues Koordinatensystem eingeführt: Die π -Koordinaten befinden sich in Richtung der Magnetfeldlinien und die σ -Koordinaten normal darauf.

Da die Elektronen negativ geladen sind, werden diese auch vom Magnetfeld beeinflusst und die Bahn des Elektrons wird leicht in Richtung der σ -Komponente zum Magnetfeld gezogen.

Dadurch spalten sich auch die Spektrallinien auf: Wenn sich die Verbindungslinie zwischen Elektron und Atomkern genau in Richtung der σ -Komponente befindet, ist die Auslenkung am stärksten und die Wellenlänge der Photonen, die absorbiert oder extinktiert werden, verändert sich am stärksten.

Ist die Verbindungslinie hingegen genau entlang der π -Komponente, verändert sich die Auslenkung nicht und die Spektrallinien erscheinen so wie immer.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Auslenkung immer so groß ist, wie die σ -Komponente des Verbindungsvektors zwischen Elektron und Atomkern.

Gyroemission

Das Magnetfeld wechselwirkt auch mit den freien Elektronen (negativ geladen), die in Richtung des positiven Pols beschleunigt werden. Wie immer, wenn Ladungen beschleunigt werden, entsteht dabei Strahlung. Man bezeichnet diese Strahlung als Gyroemission.

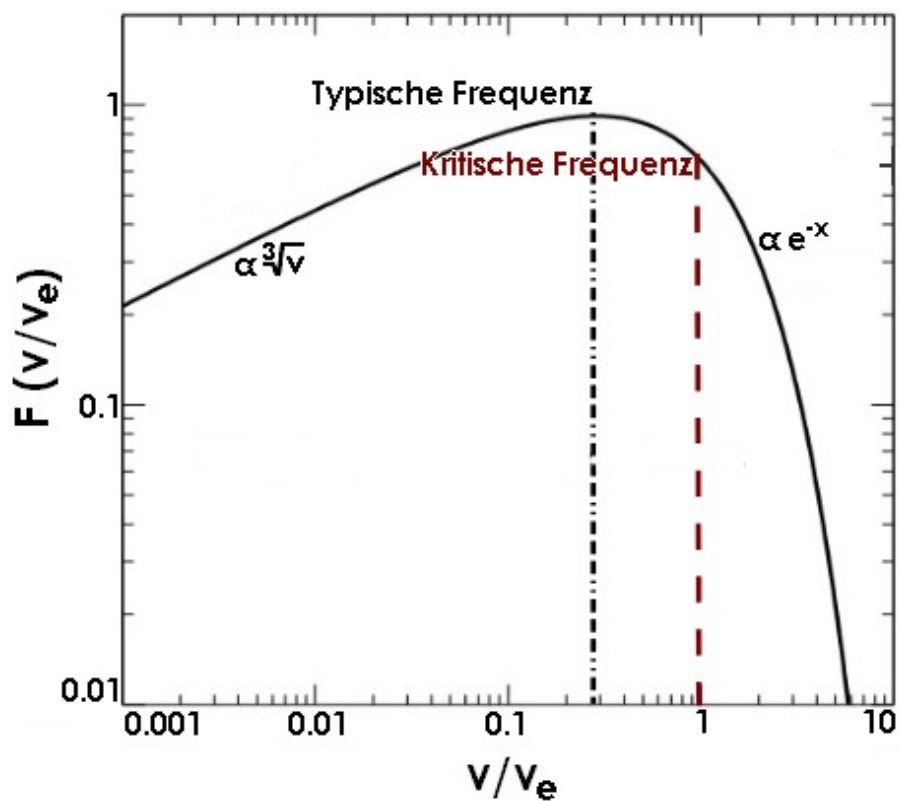
Da sich die Elektronen entlang der Magnetfeldlinien zum positiven Pol bewegen, ist die Gyroemission so wie die Staubeilchen polarisiert. So kann man diese auch von der restlichen Strahlung unterscheiden. Ein Beispiel für ein Gebiet mit viel Gyroemission ist der Krebsnebel.

Die Frequenz der Gyroemission ω_c hängt vom magnetischen Fluss B , der Energie E und der Elektronenmasse m_e ab:

$$\omega_c = \frac{E^2 B e}{m_e^3 c^4} \quad (2.6)$$

Mit der Zeit werden die Elektronen so in Strahlung umgewandelt. Die durchschnittliche Lebensdauer τ eines Elektrons im Magnetfeld beträgt

$$\tau = \frac{1}{B^2 E} \quad (2.7)$$



In dieser Grafik ist die Stärke des Spektrums der Synchrotronstrahlung im Vergleich zur Frequenz der Synchrotronstrahlung aufgetragen. Die Stelle mit dem stärksten Spektrum bezeichnet man als typische Frequenz. Davor nimmt sie proportional zur $\sqrt[3]{\nu}$ zu, danach nimmt sie exponentiell ab.

Wenn man die Frequenz an der braunen Linie abliest, bekommt man genau die Frequenz des Elektrons ν_e (da diese allgemeine Grafik mit ν/ν_e skaliert ist, befindet sich diese Stelle genau bei $\frac{\nu_e}{\nu_e} = 1$). Man bezeichnet diese Stelle als kritische Frequenz.

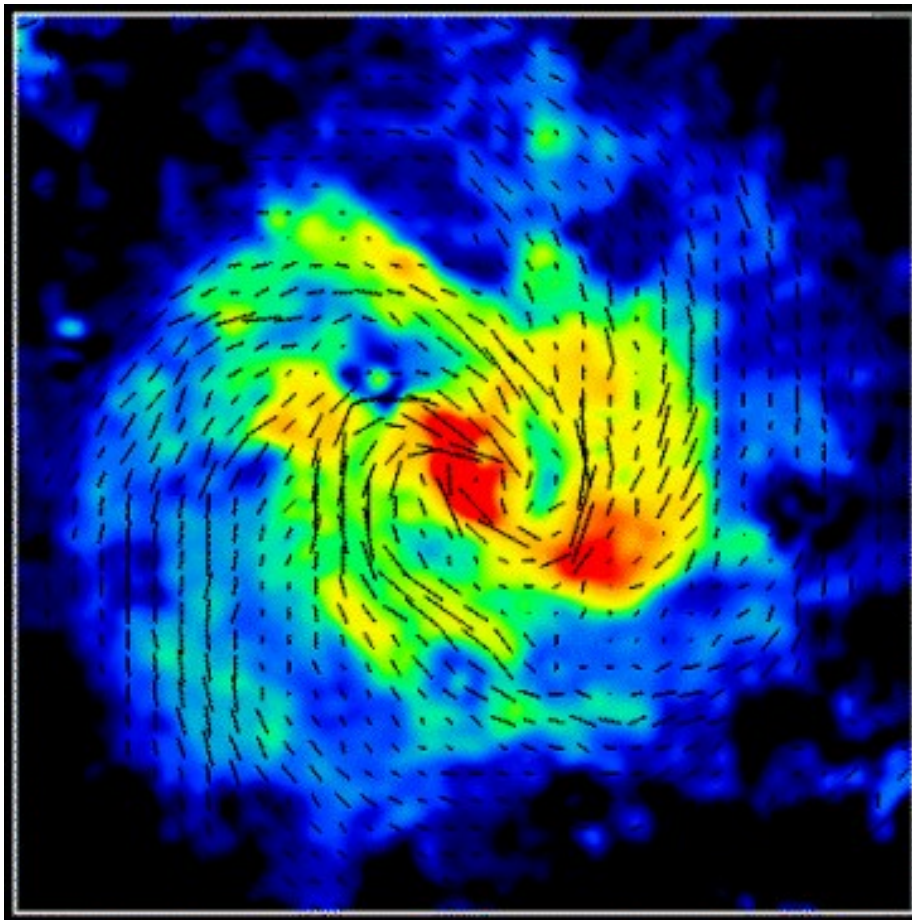
3 Orte

An den Stellen, an denen sich mehr Teilchen befinden, befinden sich auch mehr ionisierte Teilchen und dadurch auch stärkere Magnetfelder. Starke Magnetfelder gibt es daher in der Galaktischen Scheibe, aber auch im dunkle-Materie-Halo einer Galaxie. Selbst in Wolken aus interstellarem Gas außerhalb der Galaxien können sich Magnetfelder bilden.

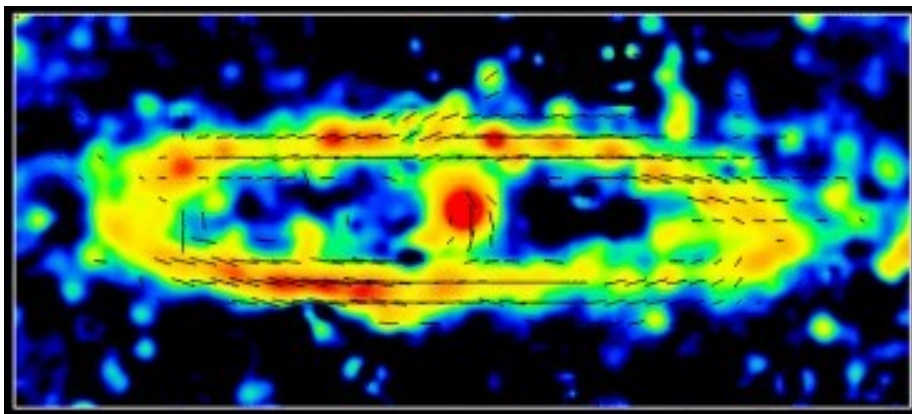
Galaktische Scheibe

Die Magnetfelder in der galaktischen Scheibe kann man am besten durch die Beobachtung von Gyroemission im Radiobereich messen. Man erkennt, dass die Stärke des Magnetfelds in etwa so groß wie die Energie der Supernovae innerhalb der Galaxie ist.

Die Magnetfelder haben manchmal die Form eines S und manchmal die Form eines ϕ



In dieser Grafik ist das Magnetfeld von M86 dargestellt. Es handelt sich dabei um ein typisches Beispiel für ein S-förmiges Magnetfeld. Die Stärke des Magnetfeldes ist in der Grafik farbig markiert: Je heller die Farbe desto stärker das Magnetfeld. Die Richtung der Pfeile gibt die Richtung des Magnetfeldes an.



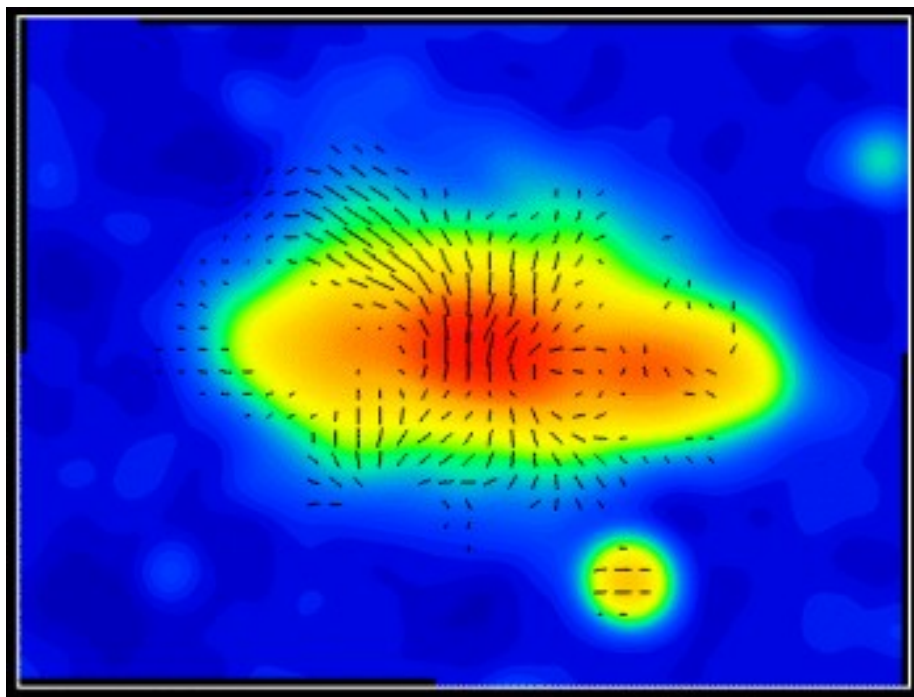
In dieser Grafik ist das Magnetfeld von M31 dargestellt. Es handelt sich dabei um

ein typisches Beispiel für ein ϕ -förmiges Magnetfeld. Der mittlere Strich geht durch die Galaxie durch, der Rest bildet einen Ring mit einem Radius von 10kpc um M31.

Galaktischer Halo

Das Magnetfeld eines galaktischen Halos kann man nur messen, wenn die Beobachtungsrichtung normal auf die Scheibe ist. In allen anderen Fällen kommt die Gyroemission, die durch das Magnetfeld der galaktischen Scheibe ausgelöst wird, aus der selben Richtung wie die Gyroemission, die durch das Magnetfeld des Halo ausgelöst wird, sodass man diese Effekte nicht getrennt untersuchen kann.

Die Energie des Magnetfeldes des Halos kommt oft auch aus der Energie des Magnetfeldes der galaktischen Scheibe. Teile des Magnetfeldes werden nämlich von galaktischen Winden aus der Galaxie herausgeweht. Das Magnetfeld nimmt mit der Entfernung von der Galaxie ab. Bis zu einer Entfernung von ungefähr 10kpc von der Galaxie ist es messbar. Manchmal verbinden sich auch die Magnetfelder von Halos mehrerer Galaxien zu intergalaktischen Magnetfeldern.



In dieser Grafik ist das Magnetfeld des Halos der Galaxie NGC4631 samt Satellitengalaxie dargestellt. Es handelt sich dabei um ein typisches Magnetfeld eines Halos.

Interstellare Wolken

Die interstellaren Wolken werden nicht nur durch die Gravitation, sondern auch durch die magnetische Kraft zusammengehalten. Dementsprechend gibt es eine Korrelation zwischen dem Aufbau des Magnetfeldes und der Dichtefluktuations innerhalb

der Wolke.

Im Allgemeinen ist das Magnetfeld in der Mitte der Wolke am stärksten und nimmt mit $\frac{1}{r^2}$ nach außen ab. Da die Dichte auch durch die Gravitation zunimmt, ist sie noch stärker zentriert: Sie nimmt sogar mit $\frac{1}{r^3}$ nach außen ab.

Falls eine Interstellare Wolke kollabiert nimmt das Magnetfeld zunächst durch die Dichtezunahme zu. Da die Atome nun dichter beisammen sind, können sie leichter Elektronen einfangen und das Magnetfeld nimmt wieder ab. In sehr kompakten Wolken beträgt die Feldstärke daher nur einige Milligauß.