



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Max-Planck-Institut
für Radioastronomie



Magnetfelder und Gas in Galaxien

R. Beck, E.M. Berkhuijsen, Chr. Nieten, R. Wielebinski

mit

N. Neininger, Radioastronomisches Institut der Universität Bonn

M. Guélin, H. Ungerechts, R. Lucas, IRAM

M. Ehle, MPE, Garching

V. Shoutenkov, Pushchino Radio Astronomy Station/Rußland

A. Shukurov, University of Newcastle/Großbritannien

D. Sokoloff, Moscow State University/Rußland

Die Untersuchung von Galaxien ist in ein neues Stadium eingetreten. Waren in früherer Zeit Informationen über Galaxien mit sehr unterschiedlicher räumlicher Auflösung in den verschiedenen Spektralbereichen den Astronomen zugänglich, so sind jetzt durch die konsequente Entwicklung neuer Teleskope (insbesondere neuer Radioteleskope) Daten von vergleichbarer Güte verfügbar. Mit diesen Daten können die physikalischen Vorgänge in Galaxien besser interpretiert werden.

Im Radiokontinuum entstanden durch die Verknüpfung von Beobachtungen mit dem 100-m-Radioteleskop Effelsberg und dem Very Large Array in den USA ausgezeichnete Radiokarten von nahen Galaxien. Diese Karten verfügen über die gute räumliche Auflösung des Interferometer-Arrays sowie über die hohe Empfindlichkeit des Einzelteleskops, das große Strukturen besser erfassen kann. Insbesondere wurden erfolgreiche Untersuchungen in den nahen Galaxien M51 (**Abb. 1**), M31 (**Abb. 4**, oben), M83 und NGC 6946 durchgeführt.

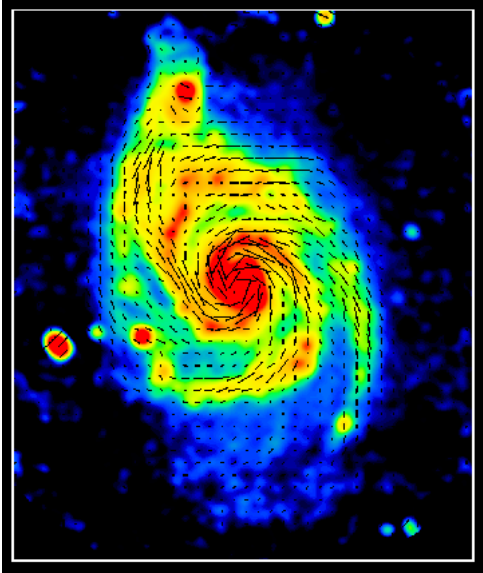


Abbildung 1: Gesamte Radiostrahlung der Galaxie M51 bei 6-cm-Wellenlänge, kombiniert aus Beobachtungen mit dem 100-m Teleskop Effelsberg und mit dem VLA (USA). Die Striche geben die Richtung der Magnetfeldlinien wieder.

Eine neue Arbeitsrichtung dieses Forschungsgebietes ist die Untersuchung von Magnetfeldern in Balkengalaxien. Eine große Zahl von Galaxien besitzt eine balkenförmige Anordnung der Sterne. Das unsymmetrische Schwerkraftfeld einer solchen Balkengalaxie führt zu stark elliptischen Umlaufbahnen für die Sterne und das Gas um das Zentrum der Galaxie. Im Balken kommt es dadurch zu Stauungen des Gases, sogenannten Stoßwellen. Das in den Balken einströmende Gas setzt seine Bahn nicht abgebremst in gleicher Richtung fort (wie in einem Verkehrsstau), sondern wird stark abgelenkt und strömt am Rand des Balkens nach innen.

Das Gas im Balken ist kalt (unter 40 K) und tritt daher fast nur in molekularer Form auf. Seine Bewegung entlang des Balkens mit etwa 100 km/sec läßt sich im Prinzip mit Hilfe des Doppler-Effektes von Moleküllinien im hochfrequenten Radiobereich messen, allerdings nur die Komponente der Geschwindigkeit entlang der Sichtlinie. Jetzt gibt es eine neue Methode, die Gasströmung in einem Balken zu untersuchen: Polarisierete Radiostrahlung, ausgesandt von Elektronen der kosmischen Strahlung, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit um galaktische Magnetfelder spiralisieren, zeigt die Stärke und Richtung der Magnetfelder. Da die Magnetfelder in der Gasströmung eingefroren sind, ist eine Karte der Polarisationsrichtungen gleichzeitig eine Momentaufnahme des Strömungsfeldes in der Himmelsebene (senkrecht zur Sichtlinie). Es lassen sich also gerade die Komponenten der Geschwindigkeit untersuchen, die spektroskopisch unbeobachtbar sind.

Über die Magnetfelder von Balkengalaxien war bisher fast nichts bekannt. Daher begann im Jahr 1996 unser Team aus Deutschland, Russland und Australien mit der Beobachtung der Radiostrahlung der 20 radio-hellsten Balkengalaxien am Himmel. Sie benutzten dabei (je nach Winkelausdehnung und Lage eines Objektes am Himmel) neben dem Effelsberger 100-m-Radioteleskop das "Very Large Array" (New Mexiko, USA) und das "Australia Telescope Compact Array" (Narrabri, Australien). Die höchste Polarisation wurde in der südlichen Balkengalaxie NGC 1097 gefunden (**Abb. 2**), die rund 50 Millionen Lichtjahren entfernt ist und sich gerade noch mit dem VLA beobachten läßt. Der Balken liegt fast genau in der Himmelsebene, so daß eine Strömung entlang des Balkens spektroskopisch nicht nachweisbar ist.

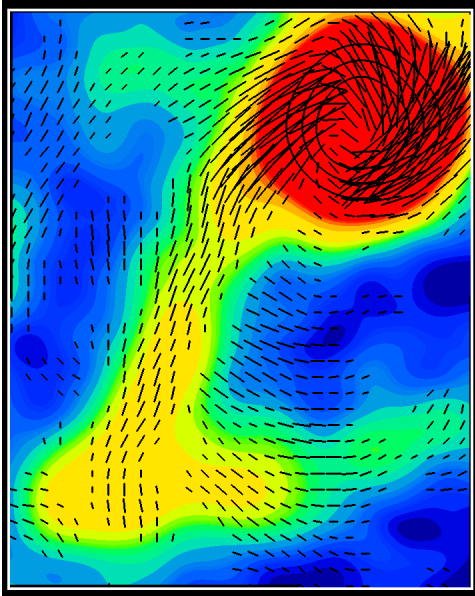


Abbildung 2: Gesamte Radiostrahlung aus der Südhälfte der Balkengalaxie NGC 1097 bei 3,5-cm-Wellenlänge, beobachtet mit dem VLA. Die Striche geben die Richtung der Magnetfeldlinien wieder. Der zentrale Ring ist ebenfalls eingezeichnet.

Die Magnetfelder in NGC 1097 werden von der schnellen Gasströmung mitgerissen und machen erstmals die Stoßfront im Balken von einigen zehntausend Lichtjahren Länge unmittelbar sichtbar (**Abb. 2**). Dort ändert sich die Richtung der Magnetfelder abrupt um etwa 70 Grad. Die Stoßfront befindet sich am rechten Rand des Radio-Balkens. Im Gegensatz dazu ergaben Computersimulationen solcher Strömungen, daß sich die Stoßfront am linken Balkenrand befinden sollte. Leider gibt es bisher keine Simulationen zur Gasströmung in Balkengalaxien, die auch Magnetfelder mitberücksichtigen, deren Einfluß eine Erklärung für die beobachtete Abweichung liefern könnte.

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. Ein Teil des Gases bildet dort neue Sterne (**Abb. 3**). Im Zentrum selbst wird ein Schwarzes Loch vermutet, dessen Umgebung sich durch starke Radio- und Röntgenstrahlung bemerkbar macht. Daher wurde NGC 1097 auch mit dem Röntgensatelliten ROSAT beobachtet. Die stärkste Röntgenstrahlung kommt wie erwartet aus dem Zentrum, aber es gibt auch eine dünne Gashülle um die gesamte Galaxie. Dies ist ein Hinweis auf einen heißen Wind, der vom Zentrum nach außen weht, umgekehrt zum Strom des kalten Gases.

Jedes Schwarze Loch muß regelmäßig mit frischer Masse gefüttert werden, sonst kommt die Strahlung aus seiner Umgebung rasch zum Erliegen. Oft werden Schwarze Löcher als überdimensionale "Kosmische Staubsauger" angesehen, die alle Materie aus ihrer Umgebung verschlucken. Das stimmt aber nicht. Auch wenn wir anstelle der Sonne ein Schwarzes Loch gleicher Masse (aber nur noch weniger als 3 km groß) ins Zentrum des Planetensystems setzen würden, bliebe alles beim alten: Alle Planeten würden sich wie vorher auf stabilen Bahnen um den Zentralkörper bewegen. Es ist gar nicht einfach, kreisende Materie so abzubremsen, daß sie in ein Schwarzes Loch hineinstürzen kann.

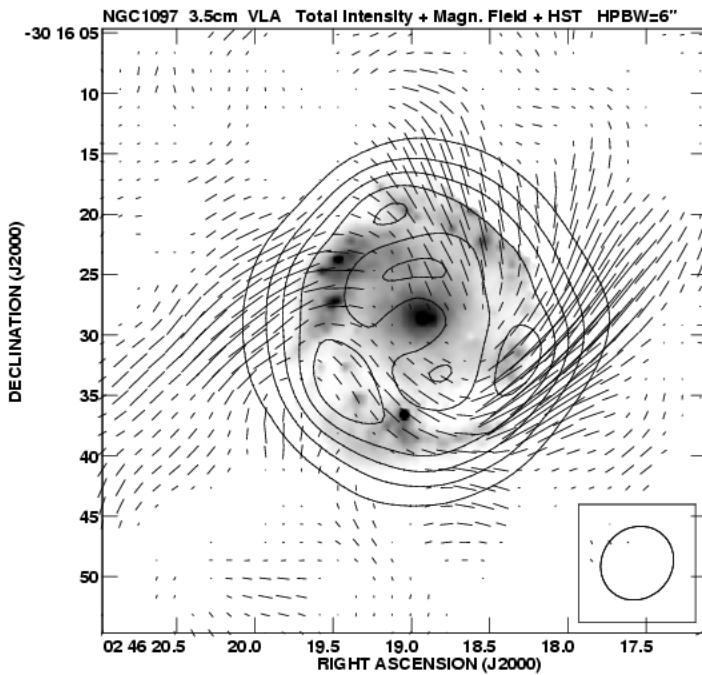


Abbildung 3: Der zentrale Gasring in NGC 1097: Gesamte Radiostrahlung bei 3,5-cm-Wellenlänge (Konturlinien) und Magnetfeldlinien (Striche), überlagert einem optischen Bild, aufgenommen mit dem Hubble Space Telescope (HST) von A. Barth (Cambridge/USA).

Auch der zentrale Ring in der Galaxie NGC 1097 ist 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 neuen Radiobeobachtungen (**Abb. 3**) zeigen eine mögliche Lösung dieses Problems: Das Magnetfeld im zentralen Ring hat die Form einer Spirale. Wir vermuten, daß dort ein Dynamo arbeiten kann und ein Spiralfeld erzeugt, ähnlich wie es auf größeren Skalen in Spiralgalaxien stattfindet (**Abb. 1**).

Anders als im Balken steht das Magnetfeld im zentralen Ring also in einem Winkel zur Bewegung des Gases. Dadurch treten magnetische Kräfte auf, die ausreichen, um etwa eine Sonnenmasse an Gas pro Jahr in Richtung zum Zentrum abzulenken - genug, um das Schwarze Loch mit Nachschub zu versorgen. Das Foto des Hubble-Teleskops zeigt dünne, spiralförmige Staub-Filamente innerhalb des Ringes, die diese Idee unterstützen. Bisher wurde vermutet, daß die Fütterung des zentralen Schwarzen Loches vor allem durch Gas und Sterne erfolgt, die von außen in die Galaxie einfallen, z. B. durch die Anziehung einer kleinen Nachbargalaxie ("Kosmischer Kannibalismus"). Zumindestens die Balkengalaxien sind nicht auf solche seltenen Ereignisse angewiesen, sondern können ihr Schwarzes Loch selbst füttern.

Der Andromeda-"Nebel", eine Spiralgalaxie, auch bekannt unter ihrer Katalognummer M31, ist mit einer Entfernung von etwa 2 Millionen Lichtjahren der nächste große Nachbar der Milchstraße. Mit den Teleskopen Effelsberg und VLA haben wir eine neue Radiokarte erstellt (**Abb. 4, oben**). Die dort gezeigte kontinuierliche Radiostrahlung stammt vor allem aus einem Ring in rund 30 000 Lichtjahren Abstand vom Zentrum. Dort sitzen die Überreste von Supernova-Explosionen, die Quellen der "Kosmischen Strahlung", das sind fast lichtschnelle, geladene Teilchen. Die Elektronen der Kosmischen Strahlung laufen auf Spiralbahnen um Magnetfeldlinien und senden dabei die Radiostrahlung aus. Die Radiokarte zeigt also die ringförmige Verteilung des Magnetfeldes in M31, das durch einen gigantischen Dynamo aufrechterhalten wird.

In Galaxien finden wir eine beträchtliche Masse molekularen Gases. Eine neuartige Untersuchung des molekularen Gases in der Andromeda-Galaxie M31 (**Abb. 4**) liefert

mit einer bisher nicht erreichten Menge an Detailinformationen einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Sternentstehung in Galaxien. Ein deutsch-französisches Forscherteam hat im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) und dem Centre National de la Recherche (CNRS) zum ersten Mal eine lückenlose Karte großer Teile dieser Galaxie mit hoher Genauigkeit erstellt. Mit diesem Blick auf den Andromeda-Nebel können jetzt Zusammenhänge der Sternentstehung in einer Art studiert werden, die bei der Beobachtung unserer Milchstraße nicht möglich ist. Mit der Kartierung des von M31 wurde eine Galaxie in ihrer Gesamtheit bis hinunter zu einzelnen Sternentstehungsgebieten für weitere Untersuchungen zugänglich. Unsicherheiten, die die Analysen in unserer eigenen Milchstraße erschweren, wie z.B. bei der Entfernungsbestimmung, entfallen.

M31 zeigt ein beeindruckendes spiralförmiges Muster von jungen Sternen und Staubstreifen. Die Geburt dieser Sterne zu verstehen, ist ein wichtiges Forschungsgebiet der modernen Astronomie. In allen gasreichen Galaxien bilden sich immer wieder neue Sterne. Heute weiß man, daß die Sterne im Inneren von relativ dichten Wolken aus Wasserstoff-Molekülen entstehen, aber man weiß nur wenige Einzelheiten. Deshalb untersucht man vorzugsweise solche Wolken, die sich auf Fotoplaten als dunkle Stellen vor dem hellen Hintergrund der Sterne abzeichnen. Diese Absorption des Lichts ist eigentlich ein Nebeneffekt, der dort entsteht, wo sich Gas und Staub gemischt haben.

Ein Teil des Gases, der atomare Wasserstoff, läßt sich mit Hilfe der 21-cm-Radiolinie messen (**Abb. 4, Mitte**). Leider ist aber der größte Anteil dieser Wolken, der molekulare Wasserstoff, so gut wie unsichtbar, und auch der enthaltene Staub ist schwer zu messen. Insbesondere ist nicht klar, in welchem Verhältnis Staub und Gas in den Wolken enthalten sind. Deshalb wird als Indikator für den Wasserstoff eine Emissionslinie des viel selteneren Kohlenmonoxid-Moleküls (CO) beobachtet. Diese Linie wird von den CO-Molekülen bei einer Frequenz von 115 GHz abgestrahlt (das entspricht einer Wellenlänge von 2,6 mm). Die Häufigkeit des CO beträgt zwar nur etwa ein Zehntausendstel der des Wasserstoffs, aber dennoch ist diese Strahlung relativ stark und daher gut zu beobachten. Darüber hinaus sind beide Molekülanteile sehr gut gemischt. Daher kann man von den gemessenen Eigenschaften des Kohlenmonoxids auf die des optisch nicht sichtbaren Wasserstoffs schließen. Wirklich gesichert ist dieser Zusammenhang bisher allerdings nur für einige wenige Gebiete in unserer Milchstraße, die vielleicht sehr untypische Eigenschaften haben könnten.

Um diesen Kenntnisstand zu verbessern, mußte man möglichst viele kosmische Molekülwolken und ihre Umgebung erfassen. In unserer Milchstraße sind im Prinzip viele Gebiete bekannt und oft auch im Detail kartiert worden. Doch erschwert unsere konkrete Position innerhalb der Milchstraße, ihre Strukturen in ihrer Gesamtheit zu identifizieren und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Gebieten herauszufinden. Hingegen ist der Andromeda-Nebel für eine solche Studie ideal geeignet: Er ist relativ nah und zeigt - von der Erde aus gesehen - eine deutliche Spiralstruktur aus jungen Sternen und Staubgebieten. Der Blick von außen ermöglicht es, zusammengehörige Teile der Galaxie miteinander zu vergleichen, und das sowohl in der Größenordnung einzelner Regionen (30 Lichtjahre) als auch in der Dimension der gesamten Galaxie von etwa 100.000 Lichtjahren.

Ein internationales Team von Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn (MPIfR), der Universität Bonn (RAIUB) und des Instituts für Millimeter-Radioastronomie (IRAM) in Grenoble und Granada benutzte für die umfangreiche Kartierung des Andromedanebels (**Abb. 4, unten**) das IRAM 30-m Radioteleskop auf dem Pico Veleta in Südspanien und das IRAM Radiointerferometer auf dem Plateau de Bure. Die Beobachtungen wurden dadurch erschwert, daß der Andromeda-Nebel wegen seiner geringen Entfernung zur Erde sehr ausgedehnt am Himmel erscheint. Deshalb mußte eine neue Beobachtungsmethode angewandt

werden, bei der die Schnelligkeit der Messungen erhöht wird, ohne die bisher erreichte hohe Empfindlichkeit der Radiomessungen zu vermindern. Statt die Galaxie Punkt für Punkt zu vermessen, wie das bei solchen Wellenlängen im Millimeterbereich bislang üblich war, wurden deshalb große Gebiete kontinuierlich abgetastet, ähnlich wie der Elektronenstrahl in einem Fernsehgerät das Bild erzeugt. Voraussetzung für den Erfolg dieser Methode war, daß die Empfänger extrem stabil sind und daß der Durchfluß und die Speicherung der Daten möglichst schnell erfolgen kann.

Diese Probleme konnten bei IRAM gelöst werden. Nunmehr profitieren die Radioastronomen von einer Methode, die etwa zehnmals so schnell ist wie das bisherige Verfahren. Damit wurde mittlerweile schon mehr als die Hälfte des Andromeda-Nebels kartiert (50.000 Meßpunkte) - und das in einer Beobachtungszeit von weniger als 300 Stunden. Die neue Radiokarte (**Abb. 4, unten**) verbindet in bislang nicht gekannter Weise eine hohe räumliche Auflösung mit einer hohen Empfindlichkeit. Sie zeigt daher Einzelheiten der Spiralarmstruktur sowohl für die ganze Galaxie als auch in einzelnen Sternentstehungsgebieten.

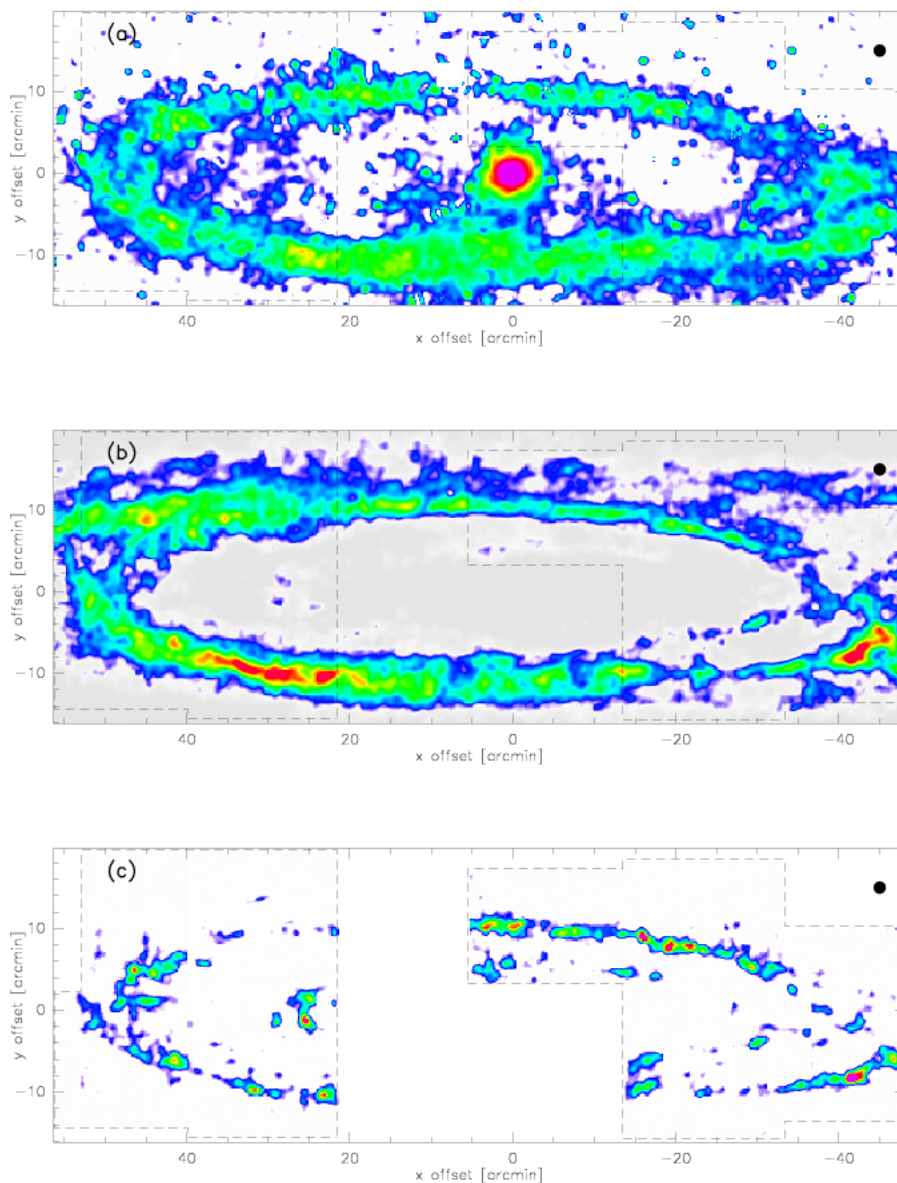


Abbildung 4: Die Radiostrahlung des Andromeda-Nebels. Oben: Radiokontinuum bei 20-cm-Wellenlänge (Effelsberg und VLA), Mitte: neutraler Wasserstoff HI (Westerbork), unten: CO-Molekül (IRAM). Die CO-Karte soll demnächst komplettiert werden; sie stellt einen Meilenstein in der Untersuchung von Molekülwolken in nahen Galaxien dar.

In einigen der beobachteten Regionen gab es allerdings Hinweise auf ungewöhnlich turbulente Bewegungen der Molekülwolken. Diese Gebiete wurden deshalb zusätzlich mit dem IRAM Interferometer auf dem Plateau de Bure untersucht. Bei diesem Gerät ist zwar das Gesichtsfeld relativ klein (nur etwa doppelt so groß wie der Durchmesser eines einzelnen Meßpunktes des 30-m-Teleskops). Dafür ist die räumliche Auflösung zehn- bis zwanzig Mal besser, was durch das Zusammenschalten von insgesamt fünf 15-m-Antennen erreicht wird. Diese verfügen zusammen über das Auflösungsvermögen eines Radioteleskops von über 400 Metern Durchmesser. Mit diesen Messungen konnte erstmals klar gezeigt werden, daß es verschiedene Strukturen von Molekülwolken gibt und daß ihre Eigenschaften wesentlich von jungen Sternen in ihrer Nähe beeinflußt werden.

Zwischen der Absorption von Licht durch den kosmischen Staub in diesen Wolken und der Emission des Kohlenmonoxids bei Radiowellenlängen besteht ein sehr enger Zusammenhang. Damit ist es jetzt möglich, die Verteilung des praktisch unsichtbaren molekularen Wasserstoffs, aus dem sich solche Molekülwolken hauptsächlich zusammensetzen, mit zwei voneinander unabhängigen Methoden zu bestimmen und ihre Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Die neue, detaillierte CO-Karte des Andromeda-Nebels erlaubt es nun zum ersten Mal, solche Verfahren zu prüfen und letztlich einen zuverlässigen Wert für die Gesamtmasse dieser Galaxie zu erhalten. Durch die gleichzeitige Beobachtung einzelner Details und großer Strukturen der Galaxie können wesentliche Voraussetzungen für die Entstehung von Sternen aufgeklärt und untersucht werden.

Max-Planck-Gesellschaft Jahrbuch 1999. Copyright © 1999 Max-Planck-Institut f. Radioastronomie.

 MPIfR-Home

ute_at_mpifr-bonn.mpg.de