



Wissenschaft in die Schulen!

Didaktisches Material zu
diesem Beitrag:
www.wissenschaft-schulen.de



Galaxien und Dunkle Materie: neue Sichtweisen

VON ULI KLEIN, GYULA JÓZSA, FRANZ KENN UND TOM OOSTERLOO

Neue Beobachtungen mit der Methode der Radiointerferometrie liefern wichtige Erkenntnisse zur Verteilung der Dunklen Materie in Scheibengalaxien. Die Resultate können mit numerischen Simulationen verglichen werden. Messungen vor allem mit Hilfe des interstellaren Wasserstoffs (HI-Linie) ermöglichen mittlerweile genaue Untersuchungen der Galaxienkinematik bis in den Außenbereich von Scheibengalaxien, weit über die stellare Scheibe hinaus. Die klassische Technik der Vermessung von Galaxien-Rotationskurven hat der Galaxienforschung aufgrund der gesteigerten Messgenauigkeit neue Impulse gegeben.

Unser Bild von den Galaxien hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten grundlegend verändert. Wir haben uns daran gewöhnen müssen, dass das, was wir von ihnen sehen, also Sterne, Gas, Plasma, Staub und kosmische Strahlung, lediglich etwa zehn Prozent ihrer Gesamtmasse ausmacht. Aus der Sicht eines Kosmologen könnte man überspitzt formulieren, dass diese »ba-

ryonische« Materie, die sich neben ihrer Gravitation auch durch die Emission elektromagnetischer Strahlung (Licht, Radiowellen) bemerkbar macht, lediglich dazu dient, Galaxien oder Galaxienhaufen aufzuspüren und anhand ihrer beobachteten Kinematik (der Bewegung ihrer Komponenten) die dortigen Gravitationsfelder zu studieren, die aber im Wesentlichen von der unsichtbaren, so-

genannten Dunklen Materie dominiert werden.

Ganz so kosmologisch nüchtern stellen sich Galaxien aber nach wie vor nicht dar; denn erstens spielen die Baryonen, Teilchen wie wir sie aus dem Alltag kennen, im Zuge der Entwicklung stellarer Systeme doch eine wichtige Rolle, und zweitens wirft das in der Fachliteratur als »concordance model« (also ein Modell, das allgemeine Zustimmung findet) bezeichnete Paradigma der Kalten Dunklen Materie bislang ungelöste Fragen auf, da ihm einige Beobachtungsfakten widersprechen. Es ist ziemlich wahrscheinlich, dass erst die adäquate Berücksichtigung der baryonischen Materie zumindest einige der Probleme lösen wird.

Auf jeden Fall hatten die jüngsten Entwicklungen für die moderne Galaxienforschung zweifellos eine »Katalysatorwirkung«. Selten zuvor haben sich Fortschritte in Theorie und Beobachtungen gegenseitig dermaßen befrucht-

◀ Abb. 1: Die Spiralgalaxie NGC 5055 im sichtbaren Licht (Bild: SUBARU-Teleskop, Japan)

▶ Abb. 2: Die hohen Geschwindigkeiten der Galaxien im Coma-Haufen bereiteten Fritz Zwicky schon vor gut 70 Jahren arges Kopfzerbrechen. (Bild: 2MASS)



tet. Galaxien erhielten dabei neben ihren klassischen »Gesichtern« noch ganz andere. Die Anforderungen an die Qualität der Beobachtungen sind dadurch allerdings wesentlich höher geworden.

Revolutionen

Wissenschaft und insbesondere Astronomie kann verdammt spannend sein! Das hat man zum Beispiel sehr schnell nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Weltraumteleskops HUBBLE oder der Röntgenteleskope der neuesten Generation (XMM-NEWTON, CHANDRA) erleben können [1, 2]. Aber auch »kleine« Forschungssatelliten wie etwa BOOMERANG oder WMAP zur Erkundung der Anisotropie des Mikrowellenhintergrundes haben die Astrophysiker regelrecht in Aufregung versetzt [3]. Sie trugen wesentlich zu unserem heutigen Verständnis des Kosmos als Ganzes bei, seiner Entstehungsgeschichte und der dabei wirkenden Kräfte. So haben die vergangenen zwei Dekaden im Bereich der Astrophysik revolutionäre Erkenntnisse hervorgebracht, von denen einige sicherlich noch längere Zeit für Stirnrunzeln unter den Experten sorgen werden.

Aber es lag nicht nur an der Anwendung komplizierter und neuer Messverfahren und den hieraus resultierenden spektakulären Beobachtungen, dass Astronomie oder Astrophysik in der jüngsten Zeit so spannend wurde. Auch auf dem Gebiet numerischer Simulationen konnten aufgrund der immer noch anhaltenden »Quantensprünge« in der Computer- und Chip-Technologie Fortschritte erzielt werden, die es erstmals erlaubten, den Beobachtungen Modelle gegenüberzustellen, zum großen Teil unter Verwendung ganz konventioneller Computer.

Galaxien haben heutzutage zwei Gesichter: Das eine ist das althergebrachte, »ästhetische«, im Fall der Scheibengalaxien ist es geprägt von einer großräumigen, sehr regelmäßigen Spiralstruk-

tur, welche die Gebiete neu entstehender Sterne, aber auch das interstellare Medium ausweist (Abb. 1); bei Elliptischen Galaxien ist es charakterisiert durch den von innen nach außen monoton abfallenden Lichtverlauf, der von Milliarden alter Sterne bewirkt wird.

Das andere, neue Gesicht ist ein unsichtbares (deshalb gibt es von ihm auch keine Bilder!); wenn die Vorstellungen der modernen Astrophysik der Wahrheit entsprechen, dann sind Galaxien überwiegend aus einem für alle Detektoren dieser Welt (noch) unsichtbaren »Material« zusammengesetzt, welches gemeinhin als »Dunkle Materie« bezeichnet wird. Und es möchte dem Astronomie-Interessierten überhaupt nicht so recht ins Konzept passen, dass das, was wir von den Galaxien mit unseren vielseitigen Messinstrumenten sehen, nur kleine »Beigaben« sind, während sie zum größten Teil aus etwas bestehen, das zur Zeit nur in den Köpfen der Experten existiert und wonach von Experimentalphysikern in Beschleunigerexperimenten fieberhaft gesucht wird, bisher ohne Erfolg [4].

Es besteht die Hoffnung, dass es mit der Inbetriebnahme des Teilchenbeschleunigers LHC am CERN im Jahr 2007 endlich möglich sein wird, ein von Theoretikern vorhergesagtes Teilchen zu erzeugen und nachzuweisen, das die Eigenschaften der Dunklen Materie hat: ein supersymmetrisches Neutralino, das nur mit einer verschwindend geringen

Wahrscheinlichkeit mit Teilchen sichtbarer Materie reagiert.

Doch der Reihe nach: Wie kam es zu diesem heutigen Kenntnisstand, und warum müssen wir uns immer mehr damit anfreunden, dass der überwiegende Teil der Materie im Kosmos in einer Form vorliegt, die uns im Alltag nie begegnet, und deren Entdeckung in Physikalischen Labors nach wie vor auf sich warten lässt? Der erste Astronom, der von Dunkler Materie sprach, war der Niederländer Jan Oort. Auf die Idee kam er Anfang der dreißiger Jahre des letzten Jahrhunderts bei seiner Untersuchung der Bewegung von Sternen in unserer näheren galaktischen Umgebung. Über die Doppler-Verschiebung der Spektrallinien von Sternen bestimmte er deren Geschwindigkeiten in der galaktischen Scheibe.

Klar war für ihn zunächst, dass diese Sterne im Verbund für die lokal vorhandene Schwerkraft verantwortlich sein müssten, damit die galaktische Scheibe nicht »nach oben und unten auseinander fliegt«. Zu seinem Erstaunen fand er aber, dass die Masse der Sterne, die man aus ihrem Masse-Leuchtkraft-Verhältnis berechnen kann, um etwa einen Faktor drei zu klein war, um die gemessenen Geschwindigkeiten der Sterne als gebundene Bewegung zu erklären.

Ähnlich erstaunt war der Schweizer Astronom Fritz Zwicky. Ihm fiel bei seiner Untersuchung des Coma-Galaxienhaufens (Abb. 2) auf, dass auch hier mit

der Massenbilanz etwas nicht stimmt: Er war der Ansicht, dass man die Gesamtmasse des Galaxienhaufens erhalten müsste, wenn man die gesamte Leuchtkraft der Galaxien im Coma-Haufen mit dem stellaren Masse-Leuchtkraft-Verhältnis multipliziert.

Diese Gesamtmasse bestimmt aber wiederum die Geschwindigkeiten, mit welchen sich die Galaxien im Haufen bewegen – man spricht hier von der Geschwindigkeitsdispersion (Streuung der Geschwindigkeiten). Diese bestimmte Zwicky durch die Messung der einzelnen Radialgeschwindigkeiten und stieß dabei auf einen krassen Widerspruch: Die aus der beobachteten Geschwindigkeitsdispersion gefolgerte Gesamtmasse war im Vergleich zur erwarteten um einen Faktor zehn zu hoch! Er musste also schließen, dass es in den Galaxien-

haufen (weit überwiegend) Materie gibt, die zur Leuchtkraft der Haufen nicht beiträgt.

Schnell bürgerte sich der Begriff »Halo Dunkler Materie« ein, womit eine sphärische (kugelförmige) oder annähernd sphärische Verteilung der Dunklen Materie um die Galaxie gemeint ist. Aus heutiger Sicht ist das recht sinnvoll: Wenn es sich um exotische Teilchen wie beispielsweise WIMPs handelt (englisch für »*weakly interacting massive particles*«, also schwach wechselwirkende, masse-reiche Teilchen), dann sollte die einzige wirksame Kraft, die solche Teilchen spüren, die Gravitation sein. Sie unterlägen somit keiner Reibung und müssten als Teilchensystem ihre Energie behalten (siehe Kasten unten), würden also im Gegensatz zur baryonischen Materie nicht zu einer Scheibe kollabieren.

Neues zum Thema Dunkle Materie gab es wiederum in den sechziger Jahren. Als es Vera Rubin und Mitarbeitern erstmals gelang, die Kinematik von Galaxien durch Messungen der Radialgeschwindigkeiten in der H α -Linie des ionisierten, rekombinierenden interstellaren Wasserstoffs zu testen, erkannte man schnell, dass auch auf der Skala einzelner Galaxien die Massenbilanz nicht stimmig ist.

Misst man die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne oder des Gases als Funktion des Abstands vom Zentrum einer Galaxie, so findet man überraschenderweise nach einem anfänglichen Anstieg weiter außen eine konstante Rotationsgeschwindigkeit, was der Erwartung vollkommen widerspricht [4]. Wenn nämlich – so war die korrekte Denkweise – das aufsummierte Licht der Sterne nach außen schnell abnimmt (in Spiralgalaxien entsprechend einem Exponentialgesetz), so würde man jenseits der letzten erkennbaren Sterne auch keine gravitativ wirksame Materie mehr erwarten, und die Rotationsgeschwindigkeit der Galaxien sollte abfallen. Dies müsste entsprechend der sogenannten Kepler-Rotation erfolgen, welche sich direkt aus der Gleichheit von Gravitationskraft und Zentrifugalkraft ergibt (siehe Kasten rechts oben).

Ende der siebziger Jahre zeigte sich dann das große Potential der Radioastronomie. Albert Bosma, damals Doktorand am Kapteyn-Institut der Rijksuniversiteit Groningen, beobachtete mit dem neu in Betrieb genommenen WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope, siehe [5]) eine größere Stichprobe von Galaxien in der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs, (auch HI-Linie genannt). Wie man seit jener Arbeit weiß, ist der Vorteil hierbei, dass das Wasserstoffgas auch noch weit außerhalb der im Optischen sichtbaren stellaren Scheibe vorhanden ist. (Es sei aber hier schon klar gestellt, dass der interstellare Wasserstoff für das Massendefizit, also die Dunkle Materie, nicht erhalten kann. Seine Gesamtmasse ist viel zu gering!)

Bosma fand nun systematisch flache Rotationskurven bis weit über die damals bekannten Peripherien der Galaxien hinaus (Abb. 3), während Rubin und Mitarbeiter bei ihren Beobachtungen der H α -Linie auf die stellare Scheibe eingeschränkt waren. Und so viel sei schon vorweg gesagt: So weit man bislang nach außen vorgestoßen ist (bis zu ca. 50 kpc vom Zentrum entfernt) – es wurde noch keine einzige Galaxie gefunden, in der die gemessenen Rotationsgeschwindigkeiten einen Abfall nach außen zeigen, welcher auf ein Ende des Halos aus Dunkler Materie hinweisen würde!

Reibung und Scheibenbildung

Galaxien entstehen durch einen Kollaps von Gaswolken. Für eine einfache Gaswolke gibt es im Wesentlichen zwei Mechanismen, die für ihren Zustand von Bedeutung sind: Die Gravitation wirkt in Richtung des Zentrums der Wolke, der innere Druck wirkt dieser entgegen. Ist die Gravitation stärker als der Druck, so kollabiert die Wolke. Ein solcher Kollaps kann aber nicht ewig voranschreiten, denn gleichzeitig wird das Gas komprimiert und dies führt wiederum zu einem erhöhten Druck. Daher kommt der Kollaps bei Erreichen eines Kräftegleichgewichts zwischen Druck und Gravitation zum Stillstand.

Das Gesetz der Energieerhaltung erfordert nun, dass die Gaswolken, aus denen Galaxien entstanden sind, ihre Energie irgendwann abgegeben haben müssen, um weiter kollabieren zu können. Die einfache Erklärung ist, dass durch Reibung, also beim Zusammenstoß von Partikeln und deren gegenseitige Abbremsung, Strahlung entsteht, welche Energie aus der Wolke heraus transportiert. Hierfür ist es notwendig, dass zwischen den Teilchen eine elektromagnetische Wechselwirkung stattfindet, die ebendiese Strahlung erzeugt. Sterne und Gaswolken leuchten, weil beim Zusammenstoß der Partikel, aus denen sie bestehen, elektromagnetische Strahlung ausgesendet wird. Dadurch verlieren sie Energie.

Fehlt den Teilchen aber die Möglichkeit der elektromagnetischen Wechselwirkung, so können sie auch nicht effektiv miteinander zusammenstoßen und die Möglichkeit der Abstrahlung von En-

ergie besteht nicht. Dunkle Materie hat daher nicht die Möglichkeit, Bewegungsenergie aufgrund von Reibung abzustrahlen und kollabiert deshalb auch nicht.

Was hindert nun eine Wolke aus elektromagnetisch wechselwirkender Materie daran, immer weiter in sich zusammenzufallen? Ähnlich der Energie gibt es noch eine andere Erhaltungsgröße: den Drehimpuls. Jeder sich drehende Gegenstand wird sich immer weiter in der selben Richtung drehen, wenn er seinen Drehimpuls nicht abgeben kann. Ein Fahrrad rollt (mit und ohne Fahrer) aufrecht weiter, bis seine Räder ihren Drehimpuls durch Reibung verloren haben. Bei der Gaswolke, aus der die Galaxie entstehen soll, verhält es sich genauso: Ihre Teilchen wirbeln zum großen Teil ungeordnet durcheinander, aber wenn man alle Teilchen zusammennimmt, kann sie doch eine Komponente geregelter Rotation, also einen Drehimpuls, besitzen.

Während der Reifen seinen Drehimpuls unmerklich an die Luft oder die Erde abgibt, kann die Galaxienwolke ihren Drehimpuls nicht loswerden. Und so kommt es zur Bildung einer Scheibe, die genau so rotiert, wie es die Wolke als Ganzes vorher getan hat. Das Gas kann Energie abstrahlen, aber nicht den Drehimpuls. So kann Material senkrecht zur Rotationsebene kollabieren, aber nicht radial auf das Rotationszentrum zu. Das Endprodukt ist eine Scheibe, auf der sich das Material kreisförmig bewegt, da bei einer Kreisbewegung am wenigsten Energie benötigt wird, um den Drehimpuls zu erhalten.

Rotationskurven

Die Gleichung (1) beschreibt die Bewegung einer Masse m , etwa eines Sterns oder einer Gaswolke, die sich mit der Geschwindigkeit $v(R)$ im Abstand R um das Zentrum einer Galaxie mit der Gesamtmasse M bewegt. Die Größe G ist die Gravitationskonstante. Trägt man die Rotationsgeschwindigkeit $v(R)$ gegen R auf, so erhält man sogenannte Rotationskurven (vgl. Abb. 3). Man sieht sofort, dass $M(R)$ – also die innerhalb des Radius R liegende Masse der Galaxie –

proportional zu R sein muss, wenn $v(R)$ konstant ist, somit also die Gesamtmasse der Galaxie nach außen immer weiter zunimmt – und das weit außerhalb der stellaren Scheibe.

$$\frac{m v^2(R)}{R} = \frac{G m M(R)}{R^2} \quad (1)$$

$$v(R) = \sqrt{\frac{G M(R)}{R}}$$

Es soll auch nicht verschwiegen werden, dass es alternative Theorien gibt, welche die Dunkle Materie – zumindest für Galaxien – überflüssig machen. So gibt es beispielsweise die sogenannte MOND-Theorie, deren Name eine Abkürzung für »*MODified Newtonian Dynamics*« ist: Sie stellt eine Modifikation der Newtonschen Gravitationstheorie dar. Nach bisherigem Kenntnisstand sieht es jedoch so aus, als führe spätestens auf ganz großen, also kosmologischen, Größenskalen kein Weg an der Dunklen Materie vorbei.

Das wissen wir, seit mit Hilfe des Satelliten COBE erstmals die Schwankungen in der Temperatur des Mikrowellenhintergrundes gemessen werden konnten. Bestünde unser Weltall nur aus Baryonen, so wäre die erwartete Stärke dieser Schwankungen nämlich etwa 100-mal größer, als die Messungen ergeben. Lässt man jedoch zu, dass die sichtbaren Galaxien von Halos aus Dunkler Materie umgeben sind, so lassen sich die meisten Beobachtungen erklären.

Simulierte Galaxien

Und nun kommen die eingangs erwähnten Computersimulationen ins Spiel. Etwa seit den neunziger Jahren haben verschiedene Gruppen numerische Experimente auf leistungsfähigen Rechnern durchgeführt, um die Struktur im Weltall auf der Basis der sogenannten Kalten Dunklen Materie zu untersuchen. Diese hat die Eigenschaft, dass ihre entsprechenden hypothetischen Teilchen schwer sind und nur gravitativ wechselwirken. Ihre implizierte Masse bewirkt, dass ihre Geschwindigkeiten nicht relativistisch sind, daher bezeichnet man sie – im Gegensatz zu relativistischen, »heißen« Teilchen – als »kalt« (siehe Kasten rechts).

Es zeigte sich bei den Simulationen nämlich schnell, dass numerische Experimente mit solchen kalten, das heißt langsamen Teilchen die großräumigen

Strukturen im Weltall (Galaxiengruppen, -haufen und -superhaufen) weit besser zu erklären vermögen, als solche mit warmer oder heißer Dunkler Materie aus schnellen Teilchen. Man bezeichnet die Dunkle Materie, so wie sie heute für die Simulationen angenommen wird, in der Fachwelt nach dem englischen Begriff »*Cold Dark Matter*« auch kurz als CDM oder, wenn man deren Entwicklung in einem von Dunkler Energie (repräsentiert durch die kosmologische Konstante Λ) dominierten Universum berechnet, als Λ -CDM.

Neben der Suche nach Kandidaten für Dunkle Materie in irdischen Labors (Beschleuniger-Experimente, unterirdische Tanks, zum Beispiel im Gran Sasso [4]) dienen die numerischen Simulationen letztlich auch dazu, die Eigenschaften der Teilchen der Dunklen Materie immer besser einzuschränken. Indem man beispielsweise ihre Massen oder Reaktionswahrscheinlichkeiten verändert und die resultierenden großräumigen Strukturen mit den Beobachtungen vergleicht, schafft man so eine zweite Schiene, ihre Natur zu ergründen.

Die Computersimulationen beginnen mit der Berechnung der Struktur im frühen Universum, kurz nach der Entkopplung von Photonen und (baryonischer) Materie, als die heu-

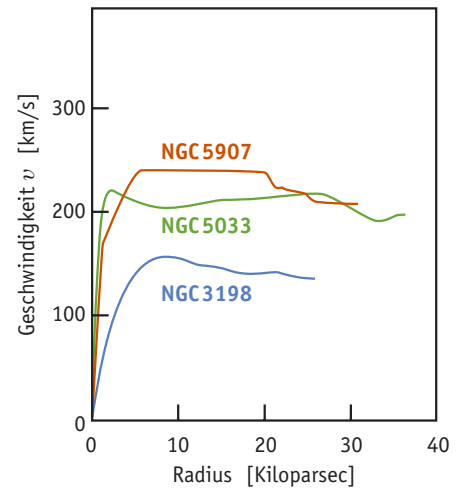


Abb. 3: Diese von Albert Bosma im Jahre 1981 bestimmten (flachen!) Rotationskurven zeigten erstmals, dass Galaxien auch weit über ihre optisch sichtbaren Grenzen hinaus Dunkle Materie beherbergen.

ter als Mikrowellenhintergrund messbare Hintergrundstrahlung entstand [6]. Die vorhandenen Dichteschwankungen vergrößerten sich durch sukzessive Ansammlungen immer größerer Mengen Dunkler Materie, was man im englischen Fachjargon auch als »*Merging*« bezeichnet. Dieses Verschmelzen von kleinen zu immer größeren Einheiten beobachten wir auch heute noch im lokalen Universum immer dann, wenn sich zwei Galaxien zu nahe kommen und sich aufgrund ihrer Gravitationswirkung vereinigen (Abb. 4).

Trotz ihrer Erfolge sahen sich die CDM-Simulationen sehr bald mit Problemen konfrontiert, die sich vor allem auf kleineren Skalen, das heißt innerhalb der Galaxien, einstellen. Eines dieser Probleme ist, dass sich in den Zentren der simulierten, überwiegend aus Dunkler Materie bestehenden Galaxien wesentlich höhere Dichten als in den tatsächlich beobachteten Galaxien ergeben. Warum ist das wichtig? Nun, wenn der generelle Aufbau

Kalte und warme Teilchen

Erwärmt man eine Gaswolke, so erhöht man die Bewegungsenergie ihrer Teilchen, welche dann im Mittel schneller werden, was einer Temperatursteigerung entspricht. Bei gleicher Bewegungsenergie fliegt ein massearmes Teilchen mit hoher Geschwindigkeit, während ein massereicherer Teilchen langsamer fliegt. Sehr massearme Kandidaten für die Teilchen der Dunklen Materie, wie zum Beispiel das Neutrino, werden da-

her im Mittel eine hohe Geschwindigkeit erreichen, die an die Lichtgeschwindigkeit heranreicht.

Man bezeichnet solche Dunkle Materie als heiß oder auch relativistisch, weil für sie aufgrund der hohen Geschwindigkeit relativistische Effekte eine Rolle spielen. Hingegen bezeichnet man die Dunkle Materie, wenn sie aus massereichen Teilchen besteht, als nicht-relativistisch oder kalt.



von Galaxien nur durch die Dunkle Materie vorgegeben wäre, dann müssten sich die im Computer berechneten Galaxien schon so verhalten wie die realen – ansonsten wären irgendwelche Annahmen bezüglich der Eigenschaften der Dunklen Materie beziehungsweise der Teilchen, die sie ausmachen, falsch. An den kosmologischen Anfangsparametern ist nämlich nicht mehr viel zu drehen – deren Werte wurden in jüngster Zeit mit ziemlich hoher Genauigkeit bestimmt.

Beobachtete Galaxien

Um der Natur der Dunklen Materie auf astrophysikalischem Wege auf die Spur zu kommen, ist die Kenntnis ihrer Verteilung, die man aus Messungen der Kinematik erhält, sowie deren Vergleich mit den numerischen Simulationen von entscheidender Bedeutung. Die Kinematik von Galaxien beobachtet man am leichtesten über die Bewegung des Gases, das einerseits recht gleichmäßig verteilt ist (so dass man über die gesamte Galaxie verteilt Messpunkte erhält) und andererseits auch genügend empfindliche Messungen zulässt.

Am besten ist hier der neutrale Wasserstoff geeignet, der zudem, wie schon erwähnt, bis weit über die optisch sichtbare Peripherie der Galaxien hinaus nachgewiesen werden kann. Nach wie vor sind aber auch optische Beobachtungen im $H\alpha$ -Licht sinnvoll, zum Beispiel in den Zentralbereichen von Galaxien, wo es auf eine hohe Winkelauflösung ankommt. Daneben hält hier auch immer mehr die Beobachtung des Kohlenmonoxid-Moleküls (CO) Einzug; man misst dessen Spektrallinien bei hohen Radiofrequenzen

(115, 230, 345, ... GHz), womit sich ebenfalls eine hohe Winkelauflösung ergibt.

Heute lassen sich – nach dem nunmehr 35 Jahre alten Vorbild von Vera Rubin – die Rotationskurven von Galaxien aus ganz unterschiedlichen Beobachtungen ableiten und mit theoretischen Vorhersagen vergleichen. Dazu benötigt man zusätzlich Breitbandphotometrien, am besten im nahen Infrarot, aus denen sich die Verteilung des stellaren Lichtes, und daraus wiederum (über das Masse-Leuchtkraft-Verhältnis) die stellare Massenverteilung ableiten lässt. Wenn man die Rotationskurve aus Messungen der HI-Linie bestimmt, erhält man gleichzeitig den Beitrag des atomaren interstellaren Wasserstoffs.

Verwendet man die CO-Linie, so kann man sogar die Verteilung des molekularen Wasserstoffs abschätzen, der zumindest innerhalb der stellaren Scheiben einen gewissen Beitrag zum Massenbudget liefern kann. Aus der so erhaltenen Verteilung der Massendichte lassen sich die Kreisbahngeschwindigkeiten vorhersagen, die man aufgrund der rein baryonischen Masse erwarten würde. Bei dem Vergleich mit Modell-Rotationskurven, die sich aus empirischen Massenmodellen oder solchen der CDM-Simulationen ergeben, kann man dann quantitativ entscheiden, welche der Simulationen die Beobachtungen am besten wiedergeben. In der Praxis geht man meist so vor, dass man bei diesen Anpassungen der Modelle an die Beobachtungen das Masse-Leuchtkraft-Verhältnis als freien Parameter behandelt.

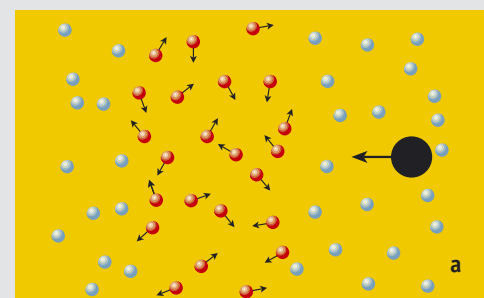
Wie das Beispiel in Abb. 5 zeigt, tut sich im zentralen Bereich der Galaxien

in der überwiegenden Zahl der Fälle eine Diskrepanz zwischen den Beobachtungen und den CDM-Simulationen auf. Die aus den gemessenen Rotationskurven abgeleiteten Dichteprofile sind dort flacher als die CDM-Profile, oder, anders ausgedrückt, die beobachteten Rotationsgeschwindigkeiten steigen weniger schnell an als die erwarteten. Die aus den Λ -CDM-Simulationen resultierenden Dichteprofile nennt man nach ihren »Erfindern« Julio Navarro, Carlos Frenk und Simon White beziehungsweise Ben Moore auch NFW- oder Moore-Profile.

Vor etwa zehn Jahren stellte Andreas Burkert ein empirisches Modell vor, das den Verlauf der gemessenen Rota-

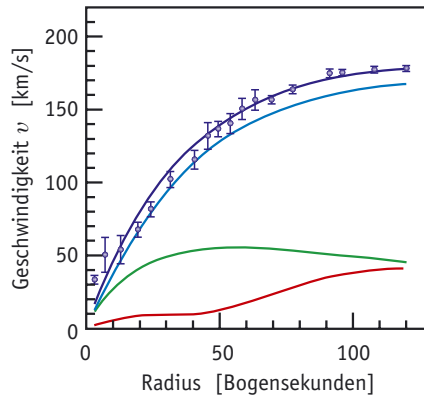
Dynamische Reibung

Die dynamische Reibung ermöglicht es einem Teilchen, berührungsfrei kinetische Energie abzugeben (siehe Abbildung unten). Sie tritt immer dann auf, wenn man es mit Systemen aus vielen Teilchen zu tun hat. In einem Sternhaufen beispielsweise sind die Sterne praktisch kollisionsfrei und





◀ Abb. 4: Die beiden Spiralgalaxien NGC 2207 und IC 2163 stehen unmittelbar vor der Verschmelzung («Merging»). (Bild: HST/STScI)



▲ Abb. 5: Beispiel für die Anpassung verschiedener Massenmodelle an gemessene Rotationskurven. (Bild: G. Gentile, Dissertation, Univ. Bonn)

tionskurven wesentlich besser wiedergibt. Ähnliches gilt für die von Paolo Salucci eingeführte »Universelle Rotationskurve«, die ebenfalls ein semi-empirisches Modell darstellt. Keinesfalls lässt sich die Diskrepanz zwischen beobachteter und CDM-Rotationskurve durch Ungenauigkeiten in den Messungen erklären. Ist damit die Theorie der Kalten Dunklen Materie in ihren Grundfesten erschüttert? Eine solche Einschätzung wäre eindeutig verfrüht!

Mit immer eindrucksvollerem Aufwand verbessern die Theoretiker nämlich ihre Simulationen, indem sie beispielsweise die baryonische Materie mit berücksichtigen. Diese kann gerade in den

Zentren der Galaxien über die sogenannte dynamische Reibung (siehe Kasten unten) die Verteilung der Dunklen Materie durchaus beeinflussen; denn in den Galaxienzentren bestimmt die dort vorherrschende hohe *stellare* Massendichte das Geschehen!

Taumelnde Halos Dunkler Materie und verbogene Galaxien

Bislang haben wir geschildert, was derzeit über die Verteilung der Materie im Innern von Galaxien bekannt ist. In jüngster Zeit sind Galaxien jedoch auch in ihrer Peripherie sehr interessant geworden. So stand schon lange die (nach wie vor unbeantwortete) Frage im Raum, »wo Gala-

xien enden«. In diesem Zusammenhang stellt auch die Massenbestimmung ein Problem dar; denn, so paradox es klingt, wir können trotz der hohen Messgenauigkeit die Gesamtmasse von Galaxien nur dann messen, wenn ihre Rotationsgeschwindigkeit irgendwo einmal auf Null absinkt. Und das ist bis dato leider noch nicht beobachtet worden – die Rotationskurven bleiben, so weit hinaus man sie auch verfolgt, flach!

Als bestes Werkzeug zur Erkundung der Galaxienkinematik auch weit außerhalb der stellaren Scheibe hat sich wegen seiner Allgegenwärtigkeit und der großen Messempfindlichkeit für seine Radioemissionslinie bei einer Wellenlänge von 21 cm der neutrale Wasserstoff erwiesen. Beobachtet man so die Gasverteilung in anderen Galaxien oder auch in unserer eigenen Milchstraße, so stellt man fest, dass dieses Gas zwar im inneren Bereich, wo Sterne vorherrschen, zusammen mit diesen eine flache Scheibe bildet, in den Außenbereichen jedoch, dort, wo kaum noch Sterne existieren, ganz auffällig aus dieser Ebene wegknickt (Abb. 6).

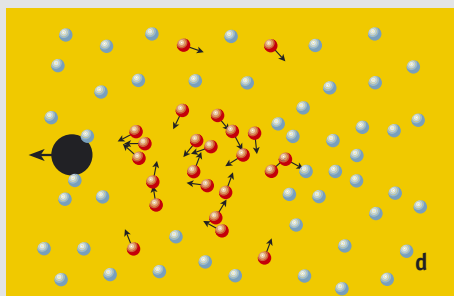
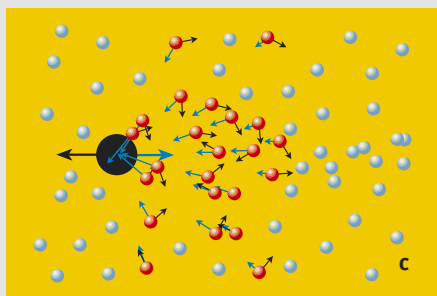
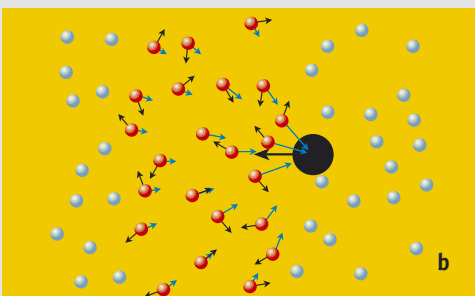
Mittlerweile scheint klar zu sein, dass Galaxien dieses Phänomen fast immer zeigen, wenn man sie nur genügend weit außen beobachtet. Im Fachjargon spricht man von »Warps« (engl. für Wölbung), und entsprechend sind Galaxien außen »gewarpt«. Solche Verwölbungen der Galaxienscheibe stellten bislang ein ziemlich großes Hindernis bei der Untersuchung der Galaxienkinematik dar, da sich dort, wo der Warp beginnt, die gesamte Projektion der Galaxie ändert. (Wir können am Himmel ja nur eine zweidimensionale Projektion beobachten.) Mit neu entwickelten Computer-

»sehen« sich gegenseitig nur über ihre Gravitation.

a) Bevor der Körper eine bestimmte Stelle des Mediums durchquert, sind alle Teilchen gleich verteilt und bewegen sich ungeordnet ((a) schwarze Pfeile). Beim Eintritt in einen bestimmten Bereich des Mediums übt der Körper eine gravitative

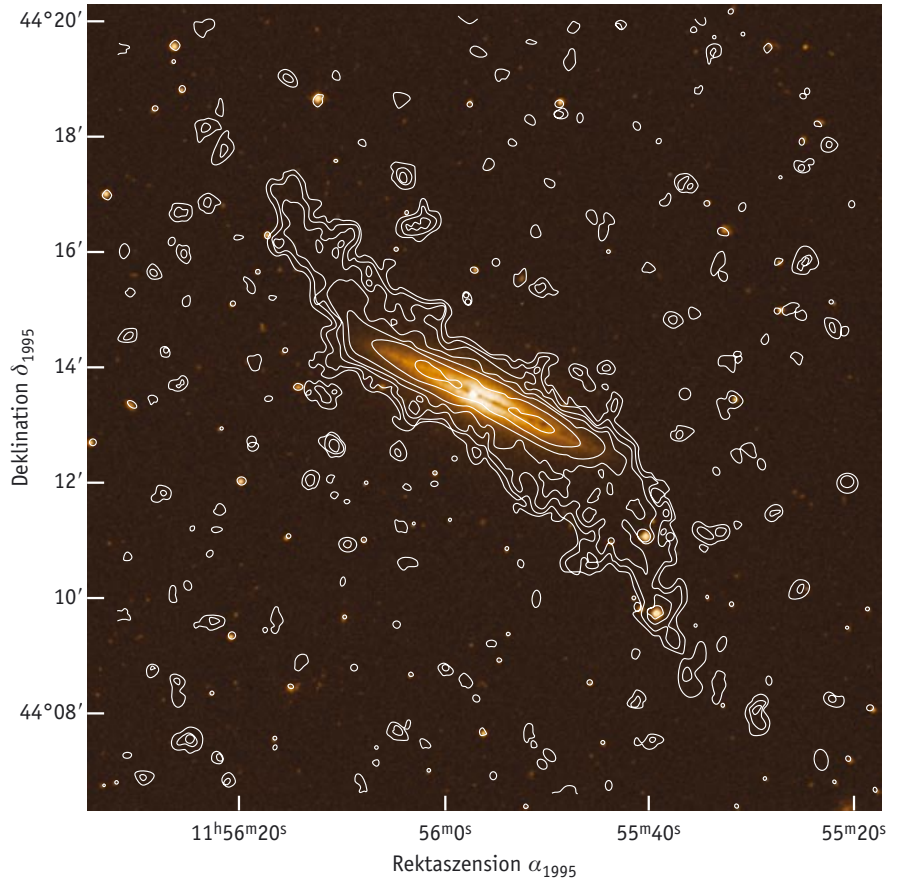
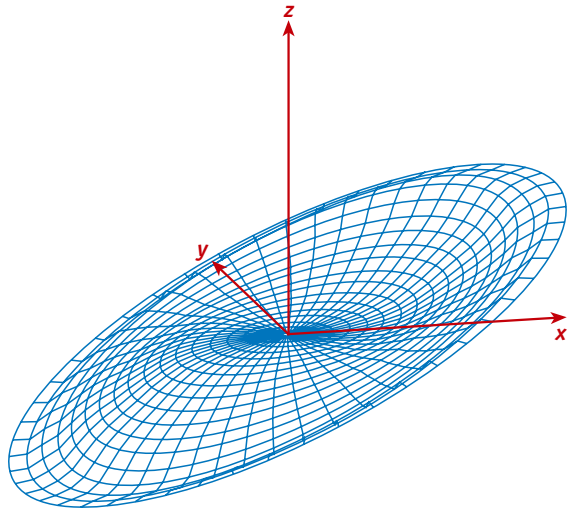
Anziehungskraft auf die Teilchen in diesem Bereich aus ((b) blaue Pfeile). Hierdurch werden die Teilchen in Richtung des Körpers abgelenkt. Das führt zu einer erhöhten Sterndichte, die der Verursacher spürt, sobald er dieses Gebiet passiert hat (c): nunmehr wirkt die hinter ihm erhöhte Sterndichte mit ihrer Gravitationskraft als

Bremse (d) – ein der Reibung vergleichbarer Effekt. Auf diese Weise können auch Teilchen, die keine echten Reibungsverluste erfahren (die nicht dissipativ sind, wie der Physiker es ausdrückt), über lange Zeiträume hinweg ihre kinetische Energie verlieren, allerdings nur an andere Teilchen.



▶ Abb. 6: Eine von der Seite («edge-on») betrachtete Galaxie mit Warp. (Bild: R. Bottema, 1995)

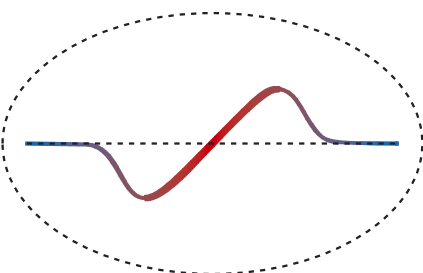
▼ Abb. 7: Scheibengalaxien lassen sich mittels eines Tilted-Ring-Modells darstellen. (Bild: Y. Revez, Genf)



▼ Abb. 8: Die Form eines Warps ähnelt auf den ersten Blick einem Integralzeichen (links). Schaut man sich Galaxien jedoch genauer an, dann besitzen die Warps der Gasscheiben die Form eines Integralzeichens mit Serifen (rechts).



▼ Abb. 9: Die innere, stellare Scheibe ist gegen den triaxialen Halo gekippt. Im Außenbereich der Galaxie ist die Scheibe weniger dicht und masseärmer; sie gehorcht daher dem Gravitationspotential des Dunklen Halos.

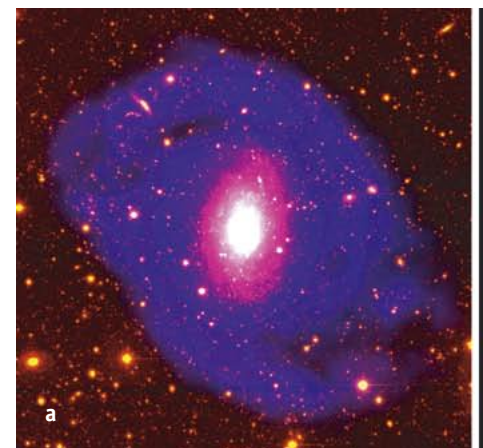


programmen sind wir aber mittlerweile in der Lage, diese Analysen mit der erforderlichen Deprojektion über die gesamte Ausdehnung der Galaxie durchzuführen. Dies geschieht mittels einer Modellrechnung, welche die Galaxie in eine große Zahl gegeneinander geneigter Ringe aufteilt («Tilted-Ring-Modell», Abb. 7). Gleichzeitig ermöglicht dies eine eingehende Untersuchung der Eigenschaften von Warps.

Die Form dieser Verwölbung gleicht zunächst der des mathematischen Symbols für das Integral (Abb. 8). Erstmals wurde man Ende der fünfziger Jahre auf Verbiegungen galaktischer Scheiben aufmerksam, und zwar in unserem eigenen Milchstraßensystem. Wesentlich besser erkennt man das Phänomen, wenn man von außen auf Galaxien schaut. Es waren sogenannte Edge-On-Galaxien (solche, die man recht genau von der Seite sieht), in deren Außenbereichen Renzo Sancisi 1976 solche Warps erkannte, und zwar in vier von fünf untersuchten Fällen. Über die Ursache dieses Phänomens haben sich die Astronomen seither viele Gedanken gemacht, eine eindeutige Lösung des Problems ist aber noch nicht in Sicht. Eine Möglichkeit ist die der Gezeitenwirkung von benachbarten Galaxien. Jedoch findet man auch in isolierten Galaxien klar ausgebildete Warps.

Eine andere mögliche Erklärung für dieses Phänomen liefern sogenannte triaxiale Halos Dunkler Materie. Gemäß

der aktuellen Vorstellung wird jede Galaxie von einem riesigen Halo, einer Wolke aus jenen ominösen Dunkle-Materie-Teilchen, eingehüllt. Wenn man einen solchen Halo nicht als kugelförmig annimmt, sondern mit zwei oder gar drei unterschiedlich langen Achsen ausstattet (daher der Name «triaxial»), so dass er abgeflacht und unter Umständen gegen die stellare Scheibe geneigt ist, wird das Gas im Innenbereich der Galaxie dem Schwerfeld der Sterne Folge leisten, während außen das Gravitationsfeld des »schiefen« Halos die Kinematik und Verteilung des Gases unter Kontrolle hat (Abb. 9). Dieses Bild wird durch Beobachtungen unterstützt: Die Warps setzen nämlich immer genau dort an, wo die stellaren Scheiben enden.



Wie kann die unterschiedliche Orientierung von stellarer Scheibe und nicht-sphärischem Dunklen Halo zustande kommen? Um eine Scheibe zu verbiegen oder neu zu orientieren, bedarf es offenbar einer äußeren Krafteinwirkung, wie sie zum Beispiel beim Merging, der gravitativen »Verschmelzung« zweier Galaxien, auftritt: Wenn sich beispielsweise eine kleinere Satellitengalaxie mit einer größeren »Schwester« auf Kollisionskurs befände, würde sie allmählich auf einer Spiralbahn in deren Zentrum stürzen (Abb. 10). Dadurch würde Drehimpuls übertragen, der ausreicht, um den inneren Bereich der Scheibe gegen die Hauptrichtung des nicht kugelförmigen Dunklen Halos zu kippen.

Ein gleichermaßen prototypisches wie einprägsames Beispiel ist das der Galaxie NGC 5055 (siehe Titelbild). Schon ohne genaue Analyse mit ausgefeilten Computerprogrammen sieht man auf Anhieb, dass es eine innere und eine äußere Scheibe gibt. Interessanterweise zeigen die neuesten numerischen CDM-Simulationen in der Tat, dass das kontinuierliche Merging von Galaxien zu nicht-sphärischen Endzuständen führt!

Da also Warps ein spannendes Forschungsfeld sind und versprechen, Informationen über Dunkle Materie in Galaxien zu liefern, machten wir uns in den letzten Monaten auf, neue Erkenntnisse über dieses Phänomen zu sammeln. Unsere Überlegung war recht einfach: Wenn Galaxien einen extrem ausgeprägten Warp besitzen, müssten auch die Charakteristika, die für Warps typisch sind, entsprechend stark ausgeprägt sein (vorausgesetzt, die Entstehung von Warps folgt stets den gleichen Regeln).

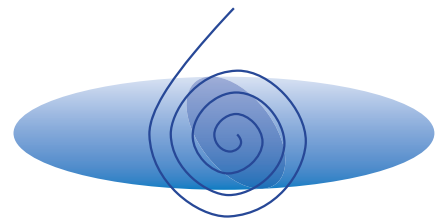
Hochempfindliche Interferometer-Beobachtungen solcher Galaxien in der HI-Linie bei 21 Zentimeter Wellenlänge sollten in Verbindung mit von uns speziell entwickelter Software neue Erkenntnisse zu Tage bringen. Was das Instrument betrifft, so entschieden wir uns für die Benutzung des WRST. Seine vor einigen

Jahren erfolgte Ausstattung mit neuen, sehr hoch auflösenden Spektrometern erlaubt die Vermessung der Galaxienrotation mit sehr hoher Geschwindigkeitsauflösung: die Rotationsgeschwindigkeit des Wasserstoffgases von bis zu 250 Kilometern pro Sekunde kann mit einer Abtastgenauigkeit von 2,5 Kilometer pro Sekunde erfasst werden.

Die erzielte Winkelauflösung ($12''$... $20''$) reicht für die Untersuchung der Außenbereiche von Galaxien vollkommen aus. Bei Bedarf können wir die in der HI-Linie gemessenen Rotationskurven mit solchen der CO- und/oder der H α -Linie verknüpfen, um so in den zentralen Gebieten der Galaxien eine höhere räumliche Auflösung zu erzielen. Als erste Stichprobe suchten wir uns sechs Galaxien aus, deren stellare Scheiben bereits Warps aufweisen. Eine siebte gesellte sich hinzu, als unsere HI-Beobachtungen, die wir zum Zweck der Messung ihrer Rotationskurve durchgeführt hatten, auch in dieser einen starken Warp zeigten.

Die Überraschung war groß, als wir schon bei dieser ersten Galaxienstichprobe, die wir mit unseren neuen Methoden untersuchten, Strukturen feststellen konnten, die bis dato noch nicht bekannt waren. Es scheint, dass diese Galaxien aus zwei gegeneinander geneigten Scheiben bestehen, die durch den Warp miteinander verbunden sind. Während die Existenz der inneren Scheibe wohl bekannt ist, weil sie hell leuchtet, wusste bis dato niemand von einer äußeren Scheibe. Abb. 11 zeigt eine dieser Galaxien. Es ist sicher anzunehmen, dass sich diese Zweiteilung auch bei vielen anderen Galaxien zeigen wird.

Man muss nur »genügend genau hinschauen«, das heißt ausreichend empfindliche Beobachtungen der Gasscheiben von Galaxien durchführen und – nicht zu unterschätzen – wissen, wonach man sucht. Es sind die sehr empfindlichen Radiobeobachtungen in der HI-Linie (siehe auch [5]), welche die gesamte Ausdehnung sowie die wahre Struktur der Warps



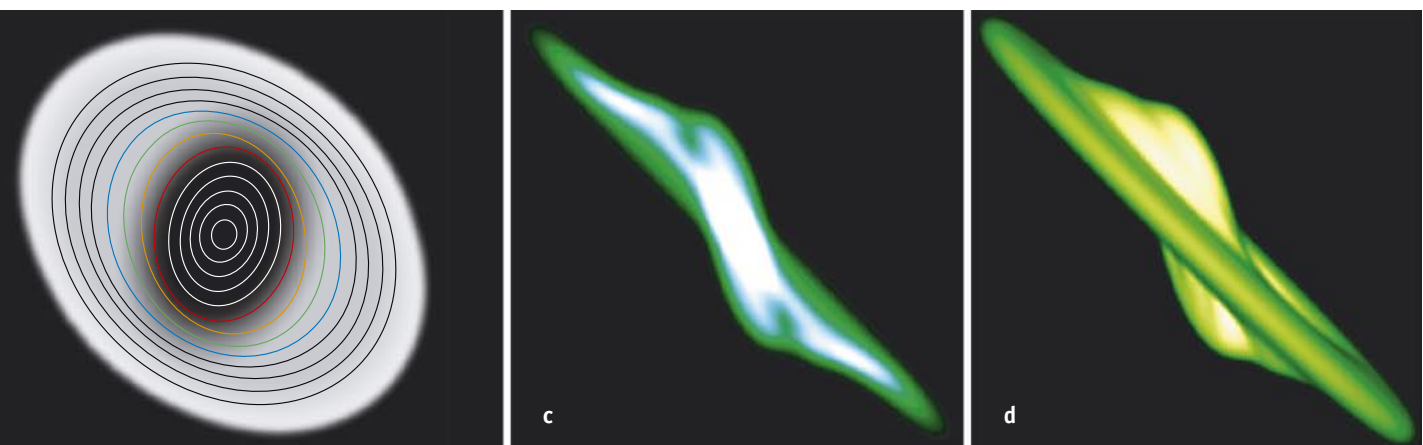
▲ Abb. 10: Eine auf eine größere Scheibengalaxie stürzende Zwerggalaxie könnte dafür sorgen, dass der innere Teil der Scheibe eine neue Ausrichtung erhält.

▼ Abb. 11: NGC 5204, eine etwa 9 Millionen Lichtjahre entfernte Mini-Spiralgalaxie, weist einen starken Warp auf. In der Abb. werden die Beobachtungen im Infraroten und im Radiobereich mit Modellrechnungen verglichen.

a) Überlagerung eines sehr lange belichteten Infrarotbildes mit einer Karte des neutralen Wasserstoffs (blau). Man sieht, dass die Wasserstoffkomponente zwei- bis dreimal so groß ist wie die Sternenscheibe.

b) Anhand unseres Tilted-Ring-Modells ist zu erkennen, dass die Gasscheibe der Galaxie hauptsächlich aus zwei gegeneinander geneigten Scheiben besteht. Weiße Ringe gehören zur inneren Scheibe, schwarze zur äußeren, bunte zu einem Übergangsbereich.

c) Modell derselben Galaxie, wie man sie von einem anderen Standpunkt aus mit einem Radioteleskop beobachtet. Von der Seite betrachtet, ähnelt die Galaxie einem Integralzeichen. Man erkennt jedoch auch, dass sich ganz außen die Krümmung der Projektion wieder ändert – ein Zeichen für eine äußere Scheibe. d) Plastisches Modell aus der gleichen Perspektive (so würde man eine Galaxie niemals direkt beobachten.)



Literaturhinweise und Internetadressen

- [1] **Norbert Schachtel, Michael Dahlem:** XMM-NEWTON – der europäische Röntgensatellit, SuW 6/2000, S. 428–435.
- [2] **Daniel Fischer:** Riesen-Röntgensatellit CHANDRA gestartet, SuW 9/1999, S. 730–731.
- [3] **Götz Höppe:** »In diesen sechs Zahlen steckt eine neue Physik«, SuW 11/2004, S. 24–31.
- [4] **Wolfgang Rau:** Auf der Suche nach der Dunklen Materie, SuW 1/2005, S. 32–42.
- [5] **Michael Dahlem, Elias Brinks:** Radiobeobachtungen – Eigenschaften und Funktionsweise von Interferometern, SuW 6/1994, S. 446–452.
- [6] **Matthias Bartelmann:** Der Kosmische Mikrowellen-Hintergrund, SuW 5/2000, S. 330–337.

Bilder und Videos von numerischen Simulationen der Strukturbildung im frühen Universum und kollidierender Galaxien findet man beispielsweise auf den Homepages von Volker Springel: <http://www.mpa-garching.mpg.de/~volker/gadget/index.html> (unter »Pictures« bzw. »Movies«)

oder auf der Homepage von Matthias Steinmetz: <http://www.aip.de/People/MSteinmetz/Movies.html>

Homepage des WSRT: <http://www.astron.nl/p/observing.htm>

aufdecken. Hier ist das »runderneuerte« WSRT (s.o.) mit seinen insgesamt vierzehn 25-m-Spiegeln gegenwärtig das ideale Instrument: vor allem seine hohe Geschwindigkeitsauflösung ist genau das, was wir für unsere Zwecke benötigen!

Und tatsächlich, wenn wir uns nun alte Beobachtungen der Wasserstofflinie in Galaxien anschauen, so erkennen wir schon recht häufig die Signatur, die man bei Anwesenheit einer äußeren Scheibe ausmachen würde: Die Krümmung der Scheibe ändert zum beobachtbaren Rand der Galaxien hin ihr Vorzeichen, als ob das Integralzeichen, welches die Form eines Warps beschreibt, Serifen bekommen hätte (Abb. 8). Weitere Untersuchungen werden zeigen, ob sich dieses Phänomen für alle Scheibengalaxien bestätigen lässt.

Ein Warp wäre dann ein Übergang vom »sichtbaren« in das rein »dunkle« Regime. Diese Hypothese hätte die interessante Konsequenz, dass sich aus der Beobachtung der Warps bestimmen ließe, wo die stellare Scheibe endet und wo der Halo der Dunklen Materie die Kinematik endgültig kontrolliert. Bereits im Jahre 1983 äußerten Avishai Dekel und Izhak Shlosman sowie Alar Toomre auf der IAU-Konferenz Nr. 83 gleichzeitig die Idee, dass Warps das Resultat eines abgeplatteten Halos Dunkler Materie sein könnte, wenn dieser gegenüber der stellaren Scheibe geneigt ist und deren Masse deutlich übertrifft.

Um solche Fragen zu beleuchten, nutzt man die Rechenleistung von Computern. Auf den heute verfügbaren Rechnern lassen sich in kurzer Zeit sehr viele numerische Simulationen durchführen. Man verändert die Anfangsbedingungen so lange, bis man die beobachtete Situation naturgetreu wiedergibt. Man kann dann

zumindest behaupten, eine Möglichkeit für die Entstehung von Warps gefunden zu haben. Schon seit geraumer Zeit sind nämlich die theoretischen Astrophysiker in der Lage, sehr auffällige Galaxiensysteme im Computer zu reproduzieren.

So gelang es Alar Toomre bereits in den siebziger Jahren, die berühmte »Antennengalaxie« (NGC 4038/4039) – das sind zwei Galaxien im fortgeschrittenen Verschmelzungsstadium – sehr überzeugend zu simulieren. Verschmelzungsszenarien zur Erzeugung von Warps werden zur Zeit zum Beispiel auch vom Schweizer Yves Revaz an der Universität Genf unter die Lupe genommen. Er simuliert, wie sich unter bestimmten Bedingungen Galaxienkollisionen abspielen. Das Spezielle an seinen Simulationen ist, dass er als Eingangsszenarien nicht nur Situationen verwendet, die dem kosmologischen Standardmodell entsprechen, sondern auch solche, die nicht in Einklang mit den etablierten Vorstellungen stehen.

Im Idealfall sollte sich zeigen, dass die stellaren Scheiben immer dann, wenn sie eine kleine Zwerggalaxie verspeist haben, eine ganze Weile ihren alles dominierenden Dunklen Halos »hinterher eiern« und dabei die aus unseren Beobachtungen hervorgegangenen Merkmale zeigen. Rezente Unterstützung findet ein solches Szenarium in den neuesten numerischen Simulationen, wie sie beispielsweise von Matthias Steinmetz (Astrophysikalisches Institut Potsdam) und Mitarbeitern durchgeführt werden. Diese Modelle beschreiben mittlerweile auch die Entwicklung der Struktur und Kinematik von Gasscheiben (also von baryonischer Materie) in CDM-Halos, und interessanterweise zeigt sich mit einer ho-

hen Wahrscheinlichkeit eine gegenseitige Neigung der nichtsphärischen CDM-Halos gegen die baryonischen Scheiben um etwa 10 bis 20 Grad. Das würde genau zu den »Warps mit Serifen« passen!

Somit dienen unsere HI-Beobachtungen von Warps in Galaxienscheiben als Prüfstein unserer Vorstellung von Galaxienentstehung und Galaxienstruktur. Auf jeden Fall wird uns Radioastronomen die »gute, alte HI-Linie« noch lange ein sehr wichtiges Werkzeug sein, bevor sie in vielleicht 15 Jahren, wenn das »Square Kilometer Array« (SKA) errichtet sein wird, sogar ein Revival erfahren wird. Dieses Riesenteleskop mit einer äquivalenten Sammelfläche von einem Quadratkilometer wird von seinem wahrscheinlichen Standort in Westaustralien aus weit ins Universum schauen und die HI-Linie bis in bislang nicht erreichbare Entfernungen beobachten können. Und vorher können wir unsere Studien durch Beobachtungen der CO-Linienemission mit dem riesigen Radiointerferometer ALMA in der chilenischen Atacama-Wüste bereits ins fernere Universum ausdehnen. □

Ulrich Klein ist geschäftsführender Direktor des Radioastronomischen Instituts der Universität Bonn. Er erforscht die Kinematik der Galaxien und ihre interstellare Materie.



Gyula Józsa (links) und **Franz Kenn** (unten) sind Doktoranden am selben Institut. Gyula Józsa beobachtet die Kinematik von Scheibengalaxien sowohl mit Radio-

interferometern als auch mit optischen Teleskopen. Franz Kenn hat Algorithmen zur Gewinnung von Bilddaten aus Interferometermessungen optimiert.



Tom Oosterloo erforscht am WSRT und am Kapteyn-Institut in Groningen die Kinematik und Struktur von Galaxien, vor allem anhand der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs.