

Karl-Heinz Schmidt

Die Lokale Galaxiengruppe

Historisches

Als Edwin Hubble 1936 in seinem Buch „The Realm of Nebulae“ (deutsch: Das Reich der Nebel, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1938) die Ergebnisse seiner umfangreichen Untersuchungen zu extragalaktischen Sternsystemen in den 1920-er und 1930-er Jahren mit dem damals größten Teleskop, dem 2.5m-Hooker-Spiegel, einem breiten Publikum darlegte, verwendete er die Bezeichnung „Lokale Galaxiengruppe“ für jene Sternsysteme in der Umgebung des Milchstraßensystems, die mit diesem vermutlich eine physikalisch gebundene Einheit bilden. Damals zählte Hubble neben dem Milchstraßensystem mit seinen beiden Begleitern, der Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke, den Andromedanebel Messier 31 und dessen Satelliten Messier 32 und NGC 205 sowie das im Sternbild Triangulum zu findende Spiralsystem Messier 33 und die beiden unregelmäßigen Zwerggalaxien NGC 6822 und IC 1613 zu dieser Gruppierung. Als wahrscheinliche Mitglieder sah Hubble außerdem drei in niedrigen galaktischen Breiten stehende – und damit erheblich durch interstellaren Staub innerhalb des Milchstraßensystems in ihrer Sichtbarkeit beeinträchtigte – Systeme an, von denen sich aber später nur IC 10 zur Lokalen Gruppe gehörig herausstellte, während die beiden anderen weiter entfernt sind. Bereits damals fiel auf, dass sich die Mehrzahl der Mitglieder um die beiden größten Systeme, den Andromedanebel und das Milchstraßensystem, scharen, es also zwei Untergruppen gibt, während mehrere kleine – meist unregelmäßige – Galaxien vor allem die Außenbereiche der Lokalen Gruppe bevölkern.

Im Laufe der Zeit wurden teils zufällig, aber auch durch systematische Suche weitere Mitglieder der Lokalen Gruppe gefunden. Dabei handelte es sich stets um kleinere Systeme. So erkannte Harlow Shapley (Harvard Obs. Bull. 908, 1) 1938 einen neuen Typus wenig auffälliger Galaxien. Wegen ihrer äußeren Form bezeichnet man diese Galaxien als sphäroidale Zwergsysteme. Sie sind den elliptischen Galaxien ähnlich, aber kleiner und besitzen geringe

Flächenhelligkeiten. Da sich in der Nachbarschaft der beiden größten Mitglieder offensichtlich mehrere Begleiter befinden, konzentrierte sich die Suche vor allem auf die Umgebung des Andromedanebels. Zunächst erkannten N. U. Mayall und W. Baade 1943 die Zugehörigkeit der beiden sphäroidalen Galaxien NGC147 und NGC 185 zur Andromeda-Untergruppe. Ab 1955 wurden die Aufnahmen der Palomar Himmelsdurchmusterung systematisch abgesucht, wobei zahlreiche kleine Systeme gefunden wurden, die vermutlich Mitglieder der Lokalen Gruppe sind. Insgesamt werden gegenwärtig etwa 35 Objekte zur Lokalen Gruppe gezählt, wobei die Zugehörigkeit der weiter außen liegenden Mitglieder von den einzelnen Autoren unterschiedlich beurteilt wird.

Da der Andromedanebel und das Milchstraßensystem die größten und vermutlich auch massereichsten Mitglieder sind, bestimmen sie die Lage des Schwerpunktes der Gruppe. Unter der Annahme, dass die Untergruppe um Messier 31 im virialen Gleichgewicht und die beobachtete Streuung der Radialgeschwindigkeiten der Mitglieder dieser Untergruppe isotrop ist, ergibt sich für sie eine Masse von $(1.15 - 1.50) 10^{12}$ Sonnenmassen. Der entsprechende Wert für das Milchstraßensystem und dessen Begleiter beläuft sich auf $(0.46 - 1.25) 10^{12}$ Sonnenmassen (D. Zaritsky et al., *Astrophys. J.* 345, 759, 1989). Da die Entfernung des Andromedanebels 760 kpc beträgt, liegt der Schwerpunkt des Systems M 31/Milchstraßensystem und – da die übrigen Mitglieder der Gruppe nur wenig zur Gesamtmasse beitragen – auch der gesamten Lokalen Gruppe etwa 440 kpc vom Milchstraßenzentrum in Richtung zum Andromedanebel.

Kriterien für die Mitgliedschaft

Zur Entscheidung über die Zugehörigkeit einer Galaxie zur Lokalen Gruppe wurden verschiedene Kriterien angewendet. Eines dieser Kriterien ist der Abstand eines Objekts vom Schwerpunkt der Gruppe. Als Grenze der Lokalen Gruppe wird dabei jener Abstand $r(0)$ angesehen, bei dem sich die Gravitationskraft der Gruppe und die der nach außen gerichteten kosmischen Expansion entsprechende Kraft die Waage halten. Nach D. Lynden-Bell (*Observatory* 101, 111, 1981) ist

$$\log r(0) \sim 1/3 \{ \log M - 2 \log H(0) \},$$

wobei M die Gesamtmasse der Lokalen Gruppe und $H(0)$ den heutigen Wert der Hubble-Konstante in der beobachteten Beziehung zwischen der Entfernung r eines Objekts und seiner Radialgeschwindigkeit V

$$V = H(0) r$$

bedeuten. Mit dem aus dem Virialsatz bei Annahme einer isotropen Geschwindigkeitsverteilung der 27 Mitglieder, für die Radialgeschwindigkeiten bekannt sind, folgenden Wert der Gesamtmasse der Lokalen Gruppe von $(2.3 \pm 0.6) 10^{12}$ Sonnenmassen (S. Courteau & S. van den Bergh, *Astron. J.* 118, 337, 1999) und dem Wert der Hubble-Konstante von $H(0) = 65$ km/s/Mpc ergibt sich $r(0) = 1.26$ Mpc. Da die Werte sowohl für die Masse als auch die Hubble-Konstante noch mit erheblicher Unsicherheit behaftet sind, ist auch die Größe $r(0)$ unsicher. So gibt E. K. Grebel (*Rev. Mod. Astron.* 10, 29, 1997) abweichend vom genannten Wert $r(0) = 1.8$ Mpc an. Tatsächlich strebt die kumulative Anzahl der Mitglieder jenseits von 1.0 Mpc einem Grenzwert zu, so dass man wohl alle Objekte, die sich in größeren Abständen als etwa 1.5 Mpc vom Gravitationszentrum der Lokalen Gruppe befinden, nicht zu ihr rechnen kann.

Ein zweites Kriterium, das von A. Yahil, G.A. Tammann und A. Sandage (*Astrophys. J.* 217, 903, 1977) zuerst angewendet wurde, macht von den beobachteten heliozentrischen Radialgeschwindigkeiten der Galaxien Gebrauch. Dabei muss man beachten, dass sich die Sonne relativ zu den benachbarten Sternen mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 km/s bewegt und die gesamte Sonnenumgebung um das Zentrum des Milchstraßensystems rotiert, wobei die Geschwindigkeit zwischen 200 und 300 km/s liegt. Diese Bewegungen spiegeln sich in den beobachteten Geschwindigkeiten der Galaxien wider, von denen aber nur die radiale Komponente messbar ist. Ein Sternsystem, das in der Bewegungsrichtung der Sonne steht, kommt auf uns zu, in der entgegengesetzten Richtung wird eine von uns weggerichtete Radialgeschwindigkeit gemessen. Dieser durch die Bewegung der Sonne in der Galaxis von der Blickrichtung abhängigen Geschwindigkeit überlagern sich die individuellen Radialgeschwindigkeiten der Sternsysteme.

In einem Diagramm, in dem über dem Kosinus der Winkelabstände vom Zielpunkt der Sonnenbewegung die Radialgeschwindigkeiten aufgetragen sind, ordnen sich die Sternsysteme längs einer Diagonalen an. Die Geschwindigkeitsstreuung der 27 Mitglieder der Lokalen Gruppe, für die die entsprechenden Messwerte vorliegen, um die Nulllinie beträgt 61 km/s. Dieser Wert ist vermutlich charakteristisch für die individuellen Radialgeschwindigkeiten der Galaxien.

Galaxien in größeren Entfernungen – jenseits der Lokalen Gruppe – weisen wegen des Hubble-Effekts größere Radialgeschwindigkeiten auf und befinden sich im Diagramm oberhalb des von den Mitgliedern eingenommenen

Streifens. Sie verraten sich durch ihre Position im Diagramm als nicht zur Lokalen Gruppe gehörende Objekte.

Räumliche Verteilung der Mitglieder

Aus der Kartierung ihrer Positionen wird die räumliche Verteilung der Mitglieder der Lokalen Gruppe sichtbar. Man erkennt die oben erwähnte Konzentrierung in den beiden Untergruppen um den Andromedanebel und das Milchstraßensystem sowie eine lockere Verteilung in den Außenbereichen der Lokalen Gruppe. Die Doppelstruktur bedingt eine Häufigkeitsverteilung der Abstände vom Schwerpunkt der Gruppe, in der das Maximum zwischen 300 und 500 kpc liegt. Lediglich drei Objekte weisen größere Zentrumsabstände als 900 kpc auf. Aus der kumulativen Verteilung der Entfernungen vom Schwerzentrum geht hervor, dass sich die Hälfte aller Mitglieder innerhalb eines Zentrumsabstands von 450 kpc befindet.

Eigenschaften der Mitglieder: Typen, Durchmesser, Leuchtkräfte und Massen

Wie bereits oben erwähnt wurde, sind der Andromedanebel Messier 31 und das Milchstraßensystem die größten Objekte der Lokalen Gruppe. Beide sind – wie auch die drittgrößte Galaxie der Gruppe – Spiralsysteme. Von den übrigen 32 Mitgliedern sind zehn – darunter die beiden Magellanschen Wolken – unregelmäßige Objekte, 20 sind elliptische Objekte oder gehören der von Harlow Shapley entdeckten Klasse der sphäroidalen Zwergsysteme an, während zwei Galaxien eine Zwischenstellung zwischen den unregelmäßigen und den sphäroidalen Objekten einnehmen.

Spiralsysteme und irreguläre Galaxien besitzen einen Massenanteil von 5 bis 50 % an interstellarer Materie, aus der Sterne entstehen. Elliptische Systeme und sphäroidale Objekte sind dagegen fast vollständig frei von interstellarem Gas und Staub, so dass sie nahezu ausschließlich aus alten Sternen bestehen.

Die Größenunterschiede zwischen den Mitgliedern sind erheblich. So hat M 31 einen Durchmesser von nahezu 50 kpc, das Milchstraßensystem ist nur wenig kleiner. Die größeren unregelmäßigen Galaxien weisen Ausdehnungen von einigen kpc auf, während für die sphäroidalen Zwergsysteme Durchmesser von lediglich 100 bis 300 pc charakteristisch sind.

Eine wesentliche Beobachtungsgröße eines Sternsystems ist die in der Zeiteinheit von ihm abgegebene Strahlungsmenge. Diese Größe bezeichnet man in der Astronomie als Leuchtkraft, die sich aus Helligkeitsmessungen

unter Berücksichtigung der Entfernung ergibt. Die beiden größten Mitglieder, Andromedanebel und Milchstraßensystem, haben Strahlungsleistungen von etwa 3 bzw. 2×10^{10} Sonnenleuchtkräften. Bei etwa 3×10^5 Sonnenleuchtkräften liegt eine ziemlich scharfe untere Grenze, die die kleinsten bekannten sphäroidalen Zwergsysteme aufweisen. Es erhebt sich allerdings die Frage, ob damit eine tatsächliche Grenze gegeben ist oder weniger leistungsfähige Mitglieder nur noch nicht entdeckt wurden.

Die Massen der Galaxien lassen sich aus ihren Gravitationswirkungen erschließen. Die großen Mitglieder der Lokalen Gruppe – die drei Spiralsysteme, aber auch einige irreguläre Galaxien – rotieren um ihre kleinen Symmetrieachsen. Die Geschwindigkeiten von auf Kreisbahnen umlaufenden Körpern nehmen – wenn die Gesamtmasse eines Systems in seinem Zentrum vereinigt wäre – entsprechend den Keplerschen Gesetzen nach außen ab. Aus der jeweiligen Geschwindigkeit und dem zugehörigen Zentralabstand lässt sich die Masse innerhalb dieses Abstands berechnen. Diese idealisierende Annahme ist nur näherungsweise gegeben, indem im Zentralkörper einer Galaxie eine starke Massenkonzentration beobachtet wird. Die Rotationsgeschwindigkeiten, die meist aus Messungen des interstellaren Gases gewonnen wurden, nehmen sowohl beim Andromedanebel als auch beim Milchstraßensystem nach außen viel weniger ab, als die Massenverteilung der sichtbaren Masse – also der Sterne und des interstellaren Gases und Staubes – erwarten lässt. Dieser Befund spricht für die Existenz von verborgener oder dunkler Masse, deren Anteil den der sichtbaren Massen um etwa das Zehnfache übersteigt.

Die Massen der kleineren Systeme, die keine Rotation aufweisen, lassen sich aus der beobachteten Geschwindigkeitsstreuungen der Sterne in den Galaxien mit Hilfe des Virialsatzes abschätzen. Wie bei den größeren Mitgliedern der Lokalen Gruppe übersteigen die erhaltenen Werte die Massen der sichtbaren Sterne in den Systemen: abermals ein Hinweis auf die Existenz von Dunkler Materie.

Die gewonnenen Massenwerte erstrecken sich über einen Bereich zwischen 10^7 Sonnenmassen – bei den kleinsten bekannten sphäroidalen Zwerggalaxien – und einigen 10^{11} Sonnenmassen, welche die beiden größten Mitglieder besitzen.

Stellare Zusammensetzung und Rate der Sternentstehung

Die verschiedenen Galaxientypen unterscheiden sich nicht nur nach Form, Größe, Masse und Strahlungsleistung, sondern auch in den stellaren Zusam-

mensetzungen. So findet man in den Spiralarmen der drei großen Systeme blaue leuchtkräftige Sterne als auffällige Population, in den Zentralkörpern dagegen dominieren helle rote Sterne. Dieser Befund im Andromedanebel veranlasste Walter Baade (*Astrophys. J.* 100, 137, 147, 1944) zur Einführung des Begriffes der Sternpopulationen. Aus der Theorie der Sternentwicklung ist bekannt, dass helle blaue Sterne jung – etwa 10^6 bis 10^7 Jahre –, die roten hellen Sterne wesentlich älter sind. Demzufolge sind Spiralarme Orte, an denen Sterne aus interstellarem Gas und Staub entstehen. Irreguläre Zwergsysteme weisen eine ähnliche Zusammensetzung in der Sternbevölkerung auf wie die Spiralarme der großen Systeme. Auch ist dort viel Gas und Staub vorhanden. Bei den sphäroidalen Objekten fehlen dagegen junge Sterne, es gibt auch kaum interstellares Gas, aus dem sich Sterne bilden könnten: sphäroidale Systeme bestehen allein aus alten Sternen.

Die Mitglieder der Lokalen Gruppe sind uns nahe genug, um sie mit den größten Teleskopen in Einzelsterne aufzulösen und so wenigstens die helleren Sterne photometrisch zu untersuchen. Diese Aufgabe wurde von zahlreichen Autoren für die meisten Objekte bearbeitet. Durch Vergleich mit den Ergebnissen aus der Theorie der Sternentwicklung ließ sich das jeweilige Alter der Sterne abschätzen und zusammen mit den Häufigkeiten der verschiedenen Sterntypen Aussagen über die Rate der Sternentstehung in der Vergangenheit treffen. Weiterhin konnte eine grobe Angabe der chemischen Zusammensetzung – ausgedrückt durch das Häufigkeitsverhältnis zwischen Eisen und Wasserstoff – gewonnen werden. Eva Grebel (*Rev. Modern Astronomy* 10, 29, 1997) und Mario Mateo (*Ann. Rev. Astron., Astrophys.* 36, 435, 1998) fassten die in der Literatur verstreut vorliegenden Ergebnisse zusammen. Auffällig ist, dass in den sphäroidalen Galaxien eine starke anfängliche Rate der Sternentstehung vorlag, die dann vollständig erlosch. Über die Ursache hierfür kann zunächst nur spekuliert werden. Vermutlich wird durch heftige Supernovaeausbrüche oder auch durch Begegnungen mit anderen Galaxien die noch vorhandene interstellare Materie aus den betreffenden Systemen hinausgetrieben und stand dann nicht mehr für die weitere Bildung von Sternen zur Verfügung. Bei den irregulären Systemen dauert im Gegensatz dazu der Prozess der Sternentstehung noch an. Der Verlauf der Sternentstehungsrate ist von Galaxie zu Galaxie unterschiedlich: Zeitabschnitte intensiver Sternbildung wechseln mit geringer Sternentstehung ab.

Während der Entwicklung eines Sterns laufen in seinem Inneren Kernprozesse ab, die seine Energieabstrahlung decken. Im längsten Lebensabschnitt wird dabei Wasserstoff in Helium umgewandelt, in späteren Entwicklungs-

stadien werden schwerere chemische Elemente aufgebaut. Ein sehr massereicher Stern endet schließlich in einer Supernovaexplosion, in der der größte Teil der Sternmasse mit Geschwindigkeiten bis zu 10000 km/s in den interstellaren Raum abgeblasen wird. Die abgegebene Masse vermischt sich mit der interstellaren Materie, aus der Sterne späterer Generationen – nun mit einem größeren Anteil an schweren chemischen Elementen (in der Astrophysik kurz als „Metalle“ bezeichnet) – entstehen. So sind Sterne einer späteren Generation meist metallreicher als die der ersten Generation. Diese Vorgänge lassen sich in der von Paul Hodge (Ann. Rev. Astron. Astrophys. 27, 139, 1989) vorgeschlagenen „Populationsbox“ anschaulich darstellen, in der die relative Sternentstehungsrate über der Zeit und der „Metallhäufigkeit“ aufgetragen ist. Die beiden Typen von Zwerggalaxien – sphäroidale und irreguläre – unterscheiden sich in ihren Populationsboxen in der oben skizzierten Weise.

Auffallend ist eine Beziehung zwischen der mittleren „Metallhäufigkeit“ eines Systems und seiner Leuchtkraft und damit seiner Masse: leuchtkraftschwache Objekte weisen geringere „Metallhäufigkeiten“ auf, leuchtkräftige besitzen dagegen einen großen Anteil an schweren chemischen Elementen. Dabei ist noch ein Unterschied zwischen irregulären und sphäroidalen Systemen zu beobachten. Vermutlich ist dieser Befund darauf zurückzuführen, dass die Anziehungskraft massearmer Objekte nicht ausreichte, um das interstellare Gas bei Supernovaeausbrüchen im System zu halten. In massereichen Galaxien ist das von den Supernovae abgeblasene, an schweren chemischen Elementen angereicherte Gas wenigstens zum Teil im System verblieben und stand zur weiteren Sternentstehung zur Verfügung. Der Anteil des zurückgehaltenen Gases der Supernovae hängt von der Galaxienmasse ab. Auf diese Weise stellte sich die beobachtete Beziehung ein. Der Unterschied zwischen sphäroidalen und irregulären Galaxien erklärt sich durch die relativ große Anzahl leuchtkräftiger heißer junger Sterne in den unregelmäßigen Objekten, während Sterne dieses Typs in den sphäroidalen Zwergsystemen fehlen. Bei gleicher Masse – und auch gleicher mittlerer Metallhäufigkeit – übersteigen daher die Leuchtkräfte der irregulären Objekte die der sphäroidalen Galaxien.

Die Untersuchungen von Grebel und Mateo belegen, dass sowohl mit Ausnahme der sphäroidalen Zwerggalaxie Leo I alle Sternsysteme der Lokalen Gruppe anfangs – d.h. nach den gegenwärtigen Erkenntnissen vor etwa 14 Milliarden Jahren – eine Phase intensiver Sternentstehung erfahren haben, die bei den sphäroidalen Systemen sehr schnell verebbte, bei jenen Galaxien, die noch lange Zeit einen großen Vorrat an interstellarem Gas und Staub behielten, aber anhielt, manchmal mit mehr oder weniger deutlichen Einschnitten.

Diese Ergebnisse lassen sich sicher verallgemeinern und auf weiter entfernte Sternsysteme übertragen. Ebenso bietet die Nähe der Mitglieder der Lokalen Gruppe Möglichkeiten zu Kalibrierungen etwa der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung von Delta-Cephei-Veränderlichen, Novae und Planetarischer Nebel, die wesentlich für die Bestimmung der extragalaktischen Entfernungsskala sind. Allein an diesem Beispiel wird die Notwendigkeit der Beschäftigung mit der Lokalen Galaxiengruppe ersichtlich.

Vergleich mit anderen Galaxiengruppen

Abschließend seien die charakteristischen Daten der Lokalen Gruppe zusammengestellt: Gegenwärtig sind rund drei Dutzend Mitglieder bekannt. Etwa 86 % der Gesamtmasse, die 2.3×10^{12} Sonnenmassen ausmacht, sind in den beiden größten Mitglieder konzentriert. Davon sind nur rund 10 % als sichtbare Masse in Sternen und interstellarer Materie organisiert. Der Radius der Gruppe beträgt rund 1.2 Mpc.

Naturgemäß ist die Lokale Gruppe die am besten untersuchte Galaxiengruppierung. Da offensichtlich die Mehrzahl der Galaxien in Gruppen und Haufen unterschiedlicher Größe organisiert ist – nur zwischen 20 und 40 % aller Sternsysteme sind isoliert –, ist ein Vergleich mit anderen Gruppen sinnvoll. Die Lokale Gruppe befindet sich in einem relativ dünn bevölkerten Bereich, in dem in einem Umkreis von rund 7 Mpc mehr als 200 Galaxien gezählt wurden. Außer der Lokalen Gruppe gibt es in diesem Gebiet sieben Gruppen, die ihr nach Größe und Mitgliederanzahl vergleichbar sind. Immer wird eine zentrale Konzentration von einer Schar lichtschwächerer Galaxien umgeben. In einigen Fällen – z.B. der M 81-Gruppe – fällt das größte System mit dem Schwerpunkt der Gruppe zusammen. Andererseits gibt es Gruppen – wie die Gruppe um NGC 5128 und Messier 83, die eine Doppelstruktur aufweisen.