



Milchstraße en miniature: Das rund 40 Millionen Lichtjahre entfernte Objekt UGC 5340 gehört zur Klasse der Zwerggalaxien. Diese zeigen eine Vielfalt an Formen – elliptisch, sphärisch, spiralig oder irregulär – und entstanden in kleinen Halos aus dunkler Materie. Zwerggalaxien enthalten die ältesten bekannten Sterne.

# GEBURTSHELFER IM GALAXIENZOO

TEXT: THOMAS BÜHRKE

BILD: NASA, ESA & LEGUS TEAM



31

Sterne sammeln sich in Galaxien mit völlig unterschiedlichen Formen und Größen. Es gibt elliptische, kugel-, linsen- und spiralförmige Galaxien, manche haben gar keine regelmäßige Gestalt. Nach den Ursachen dieser Vielfalt suchen Nadine Neumayer am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und Ralf Bender am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching. Einen entscheidenden Akteur haben sie bereits ausgemacht: dunkle Materie.

Die Natur hat auf unserem Planeten eine geradezu überbordende Vielfalt hervorgebracht. Allein der Einfallsreichtum in der Pflanzen- und Tierwelt scheint unerschöpflich. Am Beginn des naturwissenschaftlichen Erkundens dieser Mannigfaltigkeit stand stets die Systematisierung. So schuf der schwedische Naturforscher Carl von Linné im 18. Jahrhundert mit seinen Klassifizierungswerken die Grundlagen der modernen Botanik und Zoologie.

Im vergangenen Jahrhundert entdeckten Astronomen auch im Reich der Galaxien eine Fülle an Formen und Größen. Hier war es Edwin Hubble, der Mitte der 1920er-Jahre eine Systematik einführte. In diesem von ihm selbst so genannten „Stimmgabel-Diagramm“ ordnete er die elliptischen Galaxien nach ihrem Abplattungsgrad an. Bei den runden verzweigte sich das Schaubild, und es folgten auf einem oberen Ast Spiralen mit kompaktem Kern und auf dem unteren solche mit zentralem Balken. Von links nach rechts bezeichnete der Forscher die Galaxien als frühe und späte Typen, sah hierin aber nicht unbedingt eine zeitliche Entwicklung.

32 Die Idee eines evolutionären Zusammenhangs zwischen den beiden Grundtypen kam später auf. „Als ich Mitte der 1980er-Jahre mit meiner Forschung begann, waren viele davon überzeugt, dass riesige elliptische Galaxien entstehen, wenn zwei Spiralen zusammenstoßen und miteinander verschmelzen“, sagt Ralf Bender, der seit 2002 Direktor am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching ist. Tatsächlich beobachten die Astronomen solche Kollisionen im heutigen Universum, und Computersimulationen bestätigen die damalige Theorie.

## Kollision mit der Andromedagalaxie

In einigen Milliarden Jahren wird auch unsere Milchstraße mit der derzeit rund zweieinhalb Millionen Lichtjahre entfernten Andromedagalaxie zusammenstoßen und zu einer elliptischen Galaxie verwirbeln. „Auf diese Weise können allerdings nur die kleinen und mittelgroßen Ellipsen entstanden sein, nicht aber die ganz großen“, sagt Bender. Insbesondere Altersbestimmungen, die er mit seinem Team seit Langem vornimmt, haben das bisherige Bild ins Wanken gebracht. Aber wie findet man das Alter einer Galaxie heraus? Im Urknall entstanden nach heutigem Wissen nur die leichten Elemente, fast ausschließlich Wasserstoff und Helium. Erst im heißen Innern von Sternen und bei Sternexplosionen wurden die schwereren Elemente gebacken. Sie gelangten ins All und bildeten



FOTO: PETER FRIEDRICH

Der Evolution auf der Spur: Ralf Bender beschäftigt sich mit der Entstehung und Entwicklung von Galaxien. Der Direktor am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik beobachtet uralte, leuchtkräftige Sternsysteme, die als Vorläufer der heutigen Riesenellipsen gelten.

**„Entscheidend waren Größe und Dichte der Halos.“**

RALF BENDER

den Rohstoff für die nächste Sternengeneration. Diese Entwicklung setzte sich von Generation zu Generation fort. Je mehr schwere Elemente ein Stern enthält, desto später in der Evolution des Kosmos ist er geboren, desto jünger ist er also aus heutiger Sicht.

Vor diesem Hintergrund beobachtete Ralf Bender leuchtkräftige elliptische Galaxien, deren Licht neun Milliarden Jahre benötigt, um uns zu erreichen. Die Forschenden blickten damit weit in die Vergangenheit zurück, als das Universum knapp fünf Milliarden Jahre alt war. Diese Galaxien, so eine theoretische Analyse, sind die Vorläufer heutiger Riesenellipsen, die bis zu eine Billion Sterne umfassen. Aus den gemessenen Elementhäufigkeiten der damaligen und heutigen Galaxien schlossen Bender und seine Kollegen, dass diese riesigen Sternsysteme sich etwa zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall formiert haben und der Großteil der darin befindlichen Sterne innerhalb von nur einer Milliarde Jahren geboren war. Nach diesem frühzeitigen heftigen Babyboom gingen die Sterngeburten zurück und kamen bald ganz zum Erliegen. In heutigen elliptischen Galaxien findet sich deshalb eine überalterte Sternpopulation. Sie sind gewissermaßen die Seniorenheime im All.

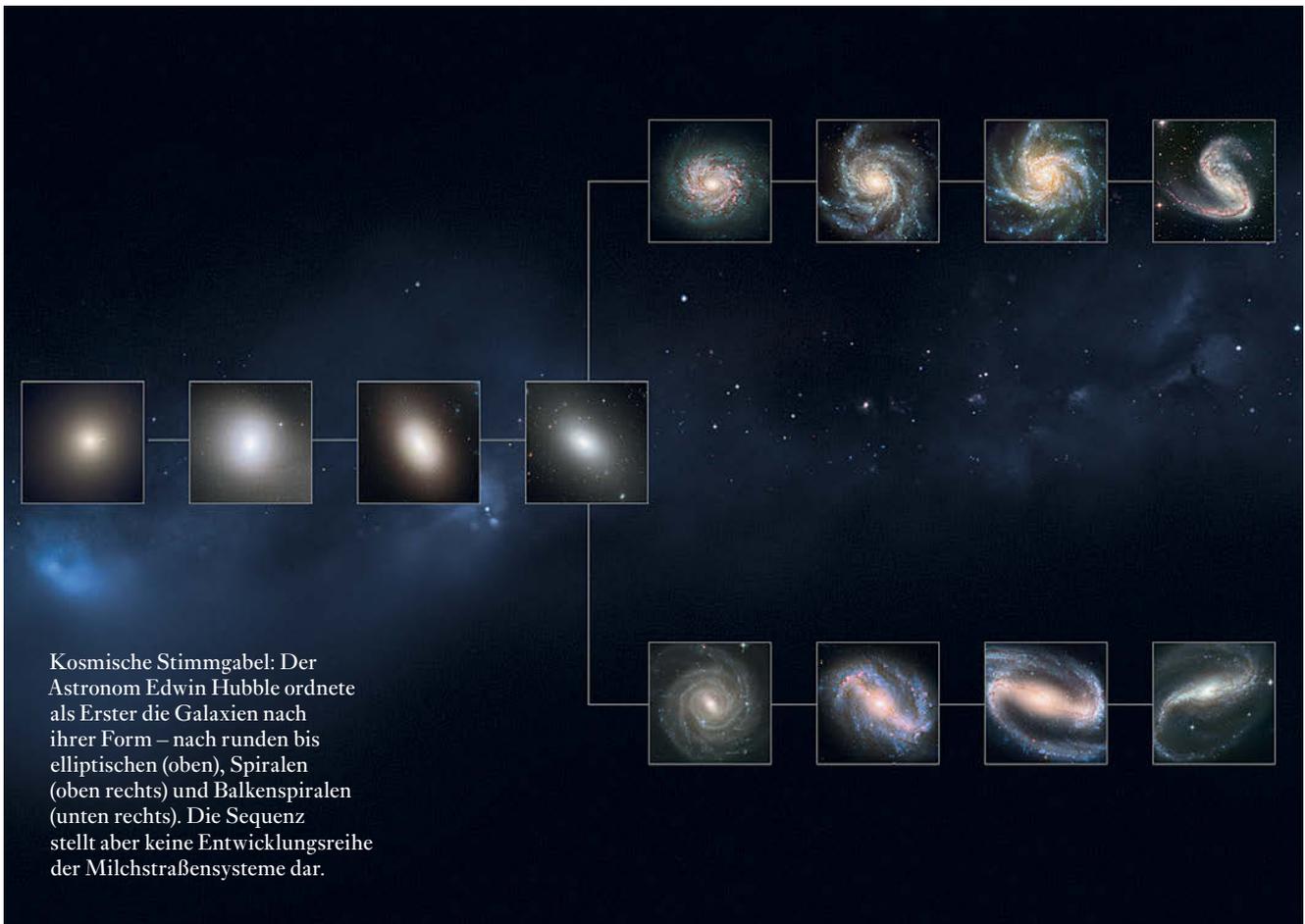
Ganz anders haben sich Spiralgalaxien wie unsere Milchstraße entwickelt. Sie formten sich über einen längeren Zeitraum, und in ihnen entstehen nach wie vor neue Sterne. Außerdem sind selbst die größten bekannten Spiralgalaxien nicht massereich genug, um als verschmelzendes Paar eine Riesenellipse zu bilden. „So wie sich der Mensch nicht aus den heutigen Affen entwickelt hat, sondern aus weiterentwickelten Hominini, sind elliptische Galaxien nicht aus den Vorgängern der heutigen Spiralen entstanden“, sagt Ralf Bender. „Denkbar ist es aber schon, dass sie aus dem Verschmelzen von sehr großen und dichten Sternsystemen hervorgegangen sind.“

Lange wurde bezweifelt, dass sich derart riesige Sternansammlungen im frühen Universum bilden konnten, doch jüngste Entdeckungen bestätigen dies. So haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg eine scheibenförmige Galaxie entdeckt, die bereits 1,5 Milliarden Jahre nach dem Urknall die beträchtliche Masse von 70 Milliarden Sonnenmassen erreicht hatte. Sie kommt damit in den Größenbereich unserer Milchstraße. Und ein internationales Team fand jüngst mit dem Millimeter- und Submillimeter-Array ALMA der Europäischen Süd-



Überraschende Verwandtschaft: Spiralen (links) gehören zu den klassischen Galaxien – das wissen die Astronomen schon lange; unsere Milchstraße sieht, von außen betrachtet, ähnlich aus. Neu ist hingegen die Erkenntnis, dass auch Kugelsternhaufen (rechts) zu dieser Familie zählen – als die Kerngebiete ehemaliger Zwerggalaxien.





Kosmische Stimmgabel: Der Astronom Edwin Hubble ordnete als Erster die Galaxien nach ihrer Form – nach runden bis elliptischen (oben), Spiralen (oben rechts) und Balkenspiralen (unten rechts). Die Sequenz stellt aber keine Entwicklungsreihe der Milchstraßensysteme dar.

sternwarte (ESO) rund hundert große, weit entwickelte Galaxien aus der Zeit eine bis eineinhalb Milliarden Jahre nach dem Urknall. Alle diese Beobachtungen zwingen die Kosmologen zum Umdenken. Nach der klassischen Lehrmeinung gab es anfänglich nur viele kleine Sternansammlungen, die zusammenstießen, miteinander verschmolzen und langsam wuchsen. In diesem sogenannten hierarchischen Szenario kann es große Galaxien erst in einer späteren Phase des Universums geben. Doch dies ist definitiv widerlegt. Bleibt also die Frage: Was bestimmt darüber, welcher Galaxientyp entsteht? Die Antwort: dunkle Materie.

ausschließlich über ihre Schwerkraftwirkung bemerkbar machen. Insbesondere üben die Teilchen untereinander keine abstoßenden elektrischen Kräfte aus. Das war am Beginn des Weltalls entscheidend.

Die Schwerkraft versuchte nämlich, dieses Materiegemisch zu großen Klumpen zu verdichten. Doch die Wasserstoff- und die Helium-Atomkerne waren elektrisch geladen und stießen einander ab. Dadurch wurde die Komprimierung des heißen Gases verhindert. Die Dunkle-Materie-Teilchen üben dagegen keine elektri-

## Dunkle Materie wirkt nur über die Schwerkraft

Nach dem Urknall vor 13,8 Milliarden Jahren bildeten das überwiegend aus Wasserstoff und Helium bestehende Urgas einerseits sowie die dunkle Materie andererseits einen ziemlich gleichmäßig verteilten Nebel. Zwar wissen die Forscher nach wie vor nicht, worum es sich bei der dunklen Materie handelt; gegenwärtig deutet aber alles darauf hin, dass dahinter eine unbekannte Form von Elementarteilchen steckt, die sich

**„Wir haben drei unterschiedlich alte Populationen identifiziert.“**

NADINE NEUMAYER

schen Kräfte aus und ballten sich zu riesigen Wolken und langen Filamenten zusammen. Astronomen sprechen von Dunkle-Materie-Halos, die wie Schwerkraftfallen wirkten und die normalen Gasteilchen ansaugten. Die sammelten sich wie Murmeln in einer Mulde und verdichteten sich zu den ersten Sternen und Galaxien.

„Eine entscheidende Rolle für die Vielfalt der Galaxientypen spielten die Größe und Dichte dieser Halos sowie deren Verteilung“, sagt Ralf Bender. Je dichter ein Halo war, desto schneller kollabierte er, und desto schneller zog er das Gas mit. Wenn nun zudem mehrere Halos miteinander verschmolzen, konnten sich schon in dieser turbulenten Anfangsphase riesige Galaxien bilden, in denen schlagartig sehr viele Sterne entstanden. Auf diese Weise formierten sich schon bald nach dem Urknall elliptische Galaxien, in denen die Sterne bis heute auf allen möglichen Bahnen um das Zentrum laufen. Spiralgalaxien dagegen benötigen viele Milliarden Jahre, um ihre gleichmäßige Struktur auszubilden und zu erhalten. „Spiralgalaxien müssen in Ruhe gelassen werden und dürfen keine größeren Kollisionen erleiden“, so Bender.

Demnach sind Spiralgalaxien in Halos entstanden, die so weit verteilt waren, dass sie einander nicht in die Quere kamen. „Man sieht das noch heute an unserer Milchstraße“, sagt der Max-Planck-Forscher. „Sie bildet zusammen mit der Andromedagalaxie und ein paar weiteren Sternensystemen die Lokale Gruppe, die insgesamt eine sehr geringe Durchschnittsdichte aufweist.“ In Bereichen mit großen, dichten Halos hingegen entstand etwa der Coma-Haufen mit zwei riesigen elliptischen Galaxien.

Während sich Ralf Bender mit den massereichsten Galaxien beschäftigt, widmet sich Nadine Neumayer, die am Max-Planck-Institut für Astronomie eine Lise-Meitner-Gruppe leitet, den kleinen Vertretern: den Zwerggalaxien. Lange Zeit galten diese als graue Mäuse im Universum. Auch sie weisen ellipsoide, sphärische, spiralige und irreguläre Formen auf, wegen ihrer Lichtschwäche lassen sich aber nur die nahe gelegenen beobachten. Derzeit kennen die Forscher 24 Zwerggalaxien, die unsere Milchstraße umkreisen.

Ihre Entstehung fügt sich konsistent in das Dunkle-Materie-Szenario ein: Während in den großen Halos die großen Galaxien entstanden, strömte in die kleinen nur wenig Materie hinein, die sich dann zu Sternen verdichtete. Je nach der Enge der Halos stürzten kleine in große hinein und lösten sich auf oder blieben als Satelliten erhalten. „Da der Materiestrom in diese kleinen Halos sehr schnell versiegte, fehlte auch der Nachschub für neue Sterne“, sagt Neumayer. „Aus diesem Grund finden wir in den Zwerggalaxien auch die ältesten Sterne, wie sich an den Elementhäufigkeiten ablesen lässt.“

Neu ist nun ein Zusammenhang zwischen Zwerggalaxien und Kugelsternhaufen. Auch Letztere umkreisen große Galaxien; so sind derzeit etwa 150 dieser Haufen als Satelliten der Milchstraße bekannt. Sie zählen jedoch nicht zu der Gattung der Galaxien. Ehemals galten sie als älteste Objekte im Universum, in denen seit Langem keine Sterne mehr entstehen. Doch dieses Bild wandelt sich gerade. Schlüsselobjekt ist eine erst in den 1990er-Jahren entdeckte Zwerggalaxie im Sternbild Schütze.

Diese Sagittarius-Zwerggalaxie befindet sich außerhalb der Scheibenebene unserer Milchstraße. Wie Astronomen des Heidelberger Max-Planck-Instituts erst in den vergangenen Jahren herausfanden, besitzt sie einen langen Schweif an Sternen. Dieser entstand, weil die kleine Galaxie die Milchstraße auf einer Bahn umkreist, die nahezu senkrecht auf der Scheibenebene steht. In den vergangenen Jahrtausenden hat sie die Scheibe mehrmals durchquert, wobei die Sterne aus dem Außenbereich gleichsam abgestreift wurden und nur die fester im zentralen Bereich gebundenen Sterne beisammenblieben. Besonders interessant ist nun, dass die Kernregion der Sagittarius-Zwerggalaxie ein Kugelsternhaufen ist. Seine alte Bezeichnung Messier 54 zeigt, dass er schon vor mehr als 200 Jahren entdeckt wurde, die ihn umgebende Zwerggalaxie aber unerkannt blieb.

Eine Analyse der Elementhäufigkeiten in Messier 54 offenbarte kürzlich – abweichend von der bisherigen Standarderklärung für Kugelsternhaufen – eine lebhaftere Geschichte. „Wir haben drei unterschiedlich alte Sternpopulationen identifiziert, die rund 2,2 und 4,3 sowie 12,2 Milliarden Jahre alt sind“, sagt Nadine

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Neue Beobachtungen und Computersimulationen sprechen zunehmend für ein Szenario, wonach große Wolken (Halos) aus dunkler Materie nach dem Urknall als Schwerkraftfallen wirkten, in denen sich Galaxien aller Größen bildeten.

Die riesigen elliptischen Galaxien entstanden ebenfalls schon früh nach dem Urknall.

Zwerggalaxien können in große Galaxien eintauchen und dabei ihre äußeren, leicht gebundenen Sterne abstreifen. Übrig bleibt ein kompakter Kugelsternhaufen, wie er sich auch im Zentrum unserer Milchstraße befindet.

Neumayer. Zusammen mit Messungen der Sternbahnen ergab sich folgende Erklärung: Die ältesten Sterne formten sich keine zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall. Die jüngeren Gestirne könnten entstanden sein, als die Zwerggalaxie die Milchstraßenebene durchquerte und dabei Gas aufsammlte, aus dem sich neue Sterne bildeten. Nach weiteren zukünftigen Passagen durch die Milchstraße wird die Zwerggalaxie ihre ganze Hülle abgestreift haben, und übrig bleibt der Kugelsternhaufen. „Ein ganz ähnliches Szenario vermuten wir auch für den Kugelsternhaufen Omega Centauri“, sagt Neumayer. Dieser mit 3,5 Millionen Sonnenmassen größte Vertreter seiner Art weist ebenfalls ein komplexes Entwicklungsszenario auf, zudem wurde kürzlich andeutungsweise ein abgestreifter Sternstrom entdeckt.

## Unsichtbarer Riese inmitten eines dichten Sternhaufens

36 Ob tatsächlich alle Kugelsternhaufen Kerngebiete ehemaliger Zwerggalaxien sind, lässt sich derzeit nicht nachweisen. Doch dass diese für weitere Überraschungen gut sind, zeigte sich vor wenigen Jahren. Damals beobachtete ein internationales Team mit Nadine Neumayers Beteiligung eine Zwerggalaxie, die sich nahe am Zentrum der großen elliptischen Galaxie Messier 60 befindet. Innerhalb eines relativ kleinen Volumens mit 160 Lichtjahren Durchmesser beinhaltet dieses ultrakompakte System mehr als hundert Millionen Sterne. In ihrem Zentrum aber entdeckten die Forscher ein schwarzes Loch mit 21 Millionen Sonnenmassen. In keiner anderen Galaxie besitzt ein derartiges zentrales Objekt einen ähnlich hohen Anteil an der Gesamtmasse. „Interessanterweise liegt im Zentrum der Milchstraße ein ähnliches Masseverhältnis vor“, sagt die Max-Planck-Astronomin.

Im galaktischen Zentrum sitzt ein vier Millionen Sonnenmassen schweres schwarzes Loch. Für dessen detaillierte Untersuchung erhielten Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik und die US-Amerikanerin Andrea Ghez den diesjährigen Physik-Nobelpreis. Dieser dunkle Riese sitzt inmitten eines ultrakompakten Sternhaufens mit etwa 25 Millionen Mitgliedern. Aus Messungen der Elementhäufigkeiten leitete Nadine Neumayer ab, dass die meisten Sterne des Haufens vor mehr als acht Milliarden Jahren entstanden sind. Es gibt aber auch eine junge Generation, die sich vor etwa einer Milliarde Jahren innerhalb einer recht kurzen Zeitspanne gebildet hat.

Nadine Neumayer geht der These nach, dass es sich hierbei um verschmolzene massereiche Kugelsternhaufen handelt, die ins Zentrum gesunken sind und in denen sich anschließend weitere Sterne gebildet haben. Hinter dieser Forschung steckt auch die Frage, wie die supermassereichen schwarzen Löcher entstanden sind. Jüngste Untersuchungen, auch von Heidelberger Astronomen, belegen, dass schon ein bis zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall schwarze Löcher existierten, die bis zu zehn Milliarden Sonnenmassen enthielten. Es ist heute eine der interessantesten Fragen der Kosmologie, wie diese Giganten so rasch zu dieser enormen Größe anwachsen konnten und welchen Einfluss sie auf die Entwicklung der Galaxien hatten.

Eine Hypothese besagt, dass es schon früh mittelschwere schwarze Löcher mit vielleicht zehntausend Sonnenmassen gab, die durch Verschmelzen mit anderen

Forschen in der Bibliothek:  
Nadine Neumayer (rechts)  
leitet am Max-Planck-Institut  
für Astronomie eine  
Lise-Meitner Gruppe.  
Zusammen mit ihrem  
Team untersucht sie Zwerg-  
galaxien und Sternhaufen.



schwarzen Löchern und Aufsaugen von Gas anwachsen. Bisher ließ sich jedoch kein Vertreter dieser Spezies zweifelsfrei nachweisen. „Solche mittelschweren schwarzen Löcher sollte es in den Zentren von Kugelsternhaufen geben“, sagt Nadine Neumayer, „mit den derzeitigen Teleskopen können wir sie dort aber nicht nachweisen.“

Die Forscherin setzt ihre Hoffnung auf ein Instrument namens MICADO, das an dem künftig größten Teleskop der Erde – dem Extremely Large Telescope der ESO – hypergenaue Bilder liefern wird. Es entsteht in einem internationalen Konsortium unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik mit wesentlichen Beiträgen des Max-Planck-Instituts für Astronomie. Mit diesem Megateleskop wird für die Wissenschaft eine neue Ära beginnen – auch für Ralf Bender und Nadine Neumayer.

[www.mpg.de/podcasts/vielfalt](https://www.mpg.de/podcasts/vielfalt)



#### DUNKLE MATERIE

Rund 27 Prozent des Weltalls bestehen aus einem unsichtbaren Stoff, der nur über die Gravitation wirkt. Bisher konnten die Forschenden diese Materie nicht entschlüsseln. Als Kandidaten gelten unter anderem Axionen, WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles) oder sterile Neutrinos.

#### HALO

Eine annähernd kugelförmige Region, in der eine Galaxie eingebettet ist. Halos bestehen aus unterschiedlicher Materie, etwa aus heißem Gas (Röntgenhalos) oder dunkler Materie.

