



Der Orionnebel ist eines der aktivsten Sternentstehungsgebiete in unserer galaktischen Nachbarschaft. Das schwarze Rechteck markiert eine Region, den so genannten Kleinmann-Low-Infrarotnebel, in der die Sternentstehungsaktivität ähnlich hoch ist wie in der Zentralregion der Galaxie J1148+5251 – allerdings auf ein ungleich kleineres Volumen beschränkt.

Sternentstehung mit höchster Effizienz

Als sich im jungen Kosmos die ersten Galaxien formten, entstanden die Sterne darin so schnell, wie es nach den Gesetzen der Physik gerade noch zulässig ist.

Es müssen nicht gleich die künftigen Speerspitzen der Forschung wie das James Webb Space Telescope oder das European Extremely Large Telescope sein – auch durch die schrittweise Weiterentwicklung bereits vorhandener irdischer Teleskope werden immer wieder neue Arten von Beobachtungen möglich. Ein Paradebeispiel liefert die gerade erschienene Arbeit einer internationalen Forschergruppe unter der Leitung von Fabian Walter vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg: Dem Team gelangen mit der aktuellen Ausbaustufe des Radiointerferometers IRAM auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen Beobachtungen, die noch vor ein paar Jahren unmöglich gewesen wären.

Beobachtungsziel war eine ferne Galaxie, die heutigen Astronomen so erscheint, wie sie 870 Millionen Jahre nach dem Urknall aussah. Im Gegensatz zu vorherigen Messungen gelang es, nicht nur

die allgemeine Sternentstehungsaktivität, sondern auch die Ausdehnung des betreffenden Sternentstehungsgebiets zu messen, die nur rund 4000 Lichtjahre beträgt. Erst diese zusätzliche Information ermöglicht die Abschätzung der Sternentstehungsraten pro Volumen und den Vergleich mit Sternentstehungsmodellen.

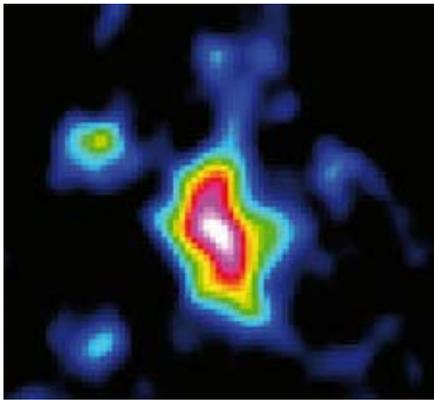
In einer Welt vor 12,8 Milliarden Jahren

Messungen wie die von Walter und seinen Kollegen stellen in vielerlei Hinsicht eine technische Herausforderung dar. Wie immer in der Kosmologie gilt auch hier: Wer kosmische Objekte in der Frühzeit ihrer Entwicklung beobachten will, muss in die Ferne schauen. Walter und seine Kollegen wählten als Beobachtungsziel eine der fernsten bekannten aktiven Galaxien, den Quasar J1148+5251. Licht von dieser Galaxie erreicht die Erde erst nach einer Reisezeit von 12,8 Milliarden Jahren ($z = 6,42$);

heutigen Beobachtern erscheint diese Galaxie dementsprechend so, wie sie vor 12,8 Milliarden Jahren aussah.

Durch die gewaltigen Mengen an Strahlung, die in der Akkretionszone rund um das zentrale Schwarze Loch von J1148+5251 freigesetzt werden, ist der Quasar auch über die größten Distanzen im Universum hinweg nachweisbar. Der Nachteil: Dadurch wird die ungleich schwächere Strahlung der rund um den Kern gruppierten Sternentstehungsgebiete schlichtweg überstrahlt.

Allerdings gibt es eine bestimmte Wellenlänge, bei der die Strahlung der Sternentstehungsregionen stärker ist als die des Quasars. Damit Gas- und Staubwolken überhaupt zu Sternenvorläufern kollabieren können, müssen sie bereits etwas Energie abgeben. Doch wie schon die bloße Präsenz von Spektrallinien anzeigt, gelten für die Strahlungsaussendung durch Atome sehr restriktive Regeln. Die Wol-



Die Galaxie J1148+5251 ist etwa 12,8 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt. In einem Zentralgebiet von 4000 Lichtjahren Durchmesser entstehen tausendmal mehr Sterne als in unserem Milchstraßensystem. Die Falschfarbenaufnahme entstand mit den Radioteleskopen des Very Large Array in New Mexiko.

ken, um die es hier geht, bestehen zum größten Teil aus molekularem Wasserstoff, dem es unter den herrschenden Bedingungen praktisch unmöglich ist, elektromagnetische Strahlung auszusenden.

Damit wird ein weiterer Wolkenbestandteil wichtig: einfach ionisierter Kohlenstoff (CII). Dieser macht zwar nur einen Bruchteil der Wolkenmaterie aus, bietet aber eine direkte Möglichkeit, Energie in Strahlung umzusetzen. Dementsprechend wird ein Großteil der beim Kollaps freigesetzten Energie bei einer ganz bestimmten, für diese Ionen charakteristischen Frequenz abgestrahlt: als extrem helle Emissionslinie bei einer Wellenlänge von 158 Mikrometern, also mitten im Infrarotbereich. Mag die Leuchtkraft des Quasars insgesamt auch ungleich größer sein – bei dieser einen Frequenz strahlen die Materiewolken heller als der Quasar. Und da die Abstrahlung ein direktes Maß für die in der Anfangsphase der Sternentstehung freigesetzte Energie darstellt, ist diese Emissionslinie für den Nachweis von Sternentstehungsgebieten ideal geeignet.

Die schlechte Nachricht: Strahlung dieser Wellenlänge wird von der Erdatmosphäre vollständig absorbiert. Sie kann zwar mit Satellitenteleskopen nachgewiesen werden; diese erreichen allerdings nur eine sehr begrenzte Auflösung.

Günstigerweise kommt mit der kosmologischen Rotverschiebung ein weiterer Effekt ins Spiel. Im Zuge der kosmischen Expansion wird die Wellenlänge der charakteristischen Infrarotstrahlung der Sternentstehungsgebiete von J1148+5251 auf ihrem Weg zur Erde um den Faktor 7,4 vergrößert. Sie erreicht die Erde in Form von kurzweiliger Radiostrahlung mit einer Wellenlänge von ungefähr einem Millimeter.

Solche Strahlung ist von der Erdoberfläche aus nachweisbar – zumindest unter günstigen atmosphärischen Bedin-

gungen. Bleibt die Frage nach einem hinreichend guten Auflösungsvermögen: Um die Messungen mit den astrophysikalischen Modellen vergleichen zu können, ist es nötig, die Sternentstehungsdichte zu messen (wieviele Sterne entstehen dort pro Jahr in welchem Volumen?). Dazu wiederum muss das Entstehungsgebiet aufgelöst werden.

Interferometer erforderlich

Die von Walter und seinen Kollegen beobachtete Region hat einen Durchmesser von nur 4000 Lichtjahren. Bei einer Entfernung von rund 13 Milliarden Lichtjahren entspricht das einem Winkeldurchmesser von nur 0,27 Bogensekunden – so groß wie eine aus rund 18 Kilometer Entfernung betrachtete Ein-Euro-Münze. Das entspricht in etwa dem Auflösungsvermögen des Weltraumteleskops Hubble im optischen Bereich. Allerdings ist die höchste

erreichbare Auflösung von der Wellenlänge abhängig. Um die gleiche Auflösung zu erreichen wie ein optisches Fernrohr, muss ein Teleskop, das bei einem Millimeter Wellenlänge arbeitet, einen rund tausendmal größeren Durchmesser aufweisen.

Bis Ende 2006 waren Beobachtungen bei dieser spezifischen Wellenlänge mit der nötigen Detailschärfe mangels geeignetem Instrument nicht möglich. Dann allerdings erhielten die sechs Einzelantennen des IRAM-Interferometers neue, weiterentwickelte Detektoren, mit denen sich die Ein-Millimeter-Strahlung nachweisen lässt. Am Standort des Interferometers in 2550 Meter Höhe herrschen nur in wenigen Monaten pro Jahr hinreichend günstige atmosphärische Bedingungen.

Für Interferometer werden Einzelteleskope so kombiniert, dass das Leistungsvermögen eines weit größeren Teleskops erreicht wird. Insbesondere ist für das erreichbare Auflösungsvermögen nicht der Durchmesser der Einzelteleskope, sondern der größte Abstand der beteiligten Teleskope – die Basislänge des Interferometers – ausschlaggebend. Im Jahr 2005 wurde die Basislänge des IRAM-Interferometers auf 760 Meter erweitert. Damit waren die nötigen Voraussetzungen geschaffen, um Sternentstehungsgebiete in fernen Galaxien mit ausreichender Präzision abzubilden. Das Forscherteam aus Wissenschaftlern der Max-Planck-Insti-



Mit dem IRAM-Interferometer auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen gelangen die hochaufgelösten Beobachtungen im Bereich von einem Millimeter Wellenlänge.

tute für Astronomie und Radioastronomie, vom Argelander Institut, von Caltech, NRAO, IRAM und dem italienischen Istituto Nazionale di Astrofisica hatte mit J1148+5251 ein vielversprechendes Ziel im Auge: eine von nur zwei Galaxien mit hoher Rotverschiebung, bei denen sich die CII-Spektrallinien nachweisen lassen.

Tausendmal effizienter als das Milchstraßensystem

Das Ergebnis war überraschend. Nicht, dass es unerwartet gewesen wäre, dass sich im Kern von J1148+5251 zu jener Zeit, weniger als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall, viele Sterne bildeten – zu ähnlichen Ergebnissen hatten schon andere Studien junger Galaxien geführt. Doch diesmal ließ sich auch die Ausdehnung des Entstehungsgebiets bestimmen, die nur 4000 Lichtjahre beträgt. Auf – galaktisch gesehen – sehr kleinem Raum produzierte J1148+5251 Sterne mit insgesamt über tausend Sonnenmassen pro Jahr. Zum Vergleich: Die Produktionsrate der Milchstraße beträgt lediglich eine Sonnenmasse pro Jahr.

Hinzu kommt der Umstand, dass sich kollabierende Gas- und Staubwolken erwärmen, was wiederum den weiteren Kollaps und damit die Bildung neuer Sterne erschwert. Daraus ergibt sich eine Obergrenze für die Sternentstehungsrate in einem gegebenen Volumen. Die Zentralregion von J1148+5251 erreicht diese Obergrenze: In ihr bilden sich neue Sterne so schnell wie physikalisch überhaupt möglich.

Zwar gibt es weitere Beispiele für diese Art maximal zulässiger Sternentstehung. Der Kleinmann-Low-Infrarotnebel in der Orion-Molekülwolke beispielsweise (von der Erde aus hinter dem Orion-Nebel gelegen) erreicht diese Obergrenze ebenfalls (siehe Bild auf S. 20). Auf galaktischen Größenskalen konnten solche extreme Verhältnisse dagegen vorher noch nicht nachgewiesen werden – tatsächlich liefen Schätzungen für die maximale Sternentstehungsrate auf einen zehnmal kleineren Grenzwert hinaus.

Dass es gelang, die Sternentstehung in einer Zentralregion zu lokalisieren, ist bereits für sich genommen von Interesse. Bislang ist noch nicht geklärt, ob die Sterne in jungen Galaxien im Allgemeinen über ein großes Volumen verteilt entstehen, oder ob sich zunächst vornehmlich in einem zentralen Kern Sterne bilden und der mit Sternen gefüllte Zentralbe-

reich erst mit der Zeit, durch Kollisionen und Verschmelzungen mit anderen Galaxien, die ungleich größere Ausdehnung erreicht, die für ältere Galaxien charakteristisch ist. J1148+5251 als Galaxie, deren Sterninventar beginnend mit einer Kernregion von innen heraus entsteht, liefert für die Modelle der Galaxienentstehung einen wichtigen Datenpunkt.

Zu den Ergebnissen von Walter und seinen Kollegen werden sich in den nächsten Jahren hoffentlich noch viele weitere Erkenntnisse über die frühen Phasen der Galaxienentwicklung gesellen. Dass sich die CII-Linie, wie hier erstmals praktisch

demonstriert, zum Nachweis von Sternentstehungsgebieten in stark rotverschobenen Galaxien einsetzen lässt, ist dabei von großem Interesse für im Aufbau befindliche Teleskopprojekte wie ALMA, wo diese Beobachtungstechnik ebenfalls eingesetzt werden soll. MARKUS PÖSSEL

Literaturhinweis

Walter, F. et al.: A kiloparsec-scale hyperstarburst in a quasar host less than one gigayear after the Big Bang. In: Nature 457, S. 699–701, 2009.

ZUM NACHDENKEN

Sternentstehungsrate



Verglichen mit dem Quasar J1148+5251 ist unser Milchstraßensystem ein harmloser Ort. Während unsere Galaxis eine mittlere Sternentstehungsrate von nur etwa einer Sonnenmasse pro Jahr ($\dot{M}_M = 1 M_\odot/a$) aufweist, wurde jetzt diejenige in J1148+5251 erstmals bestimmt: Sie liegt an der theoretischen Obergrenze von etwa 1700 Sonnenmassen pro Jahr ($\dot{M}_j = 1700 M_\odot/a$).

Die große Rotverschiebung $z = 6,42$ des Quasars zeigt an, dass sein Licht 12,8 Milliarden Jahre zu uns unterwegs war. Da das Alter des Universums 13,7 Milliarden Jahre beträgt, sehen wir deshalb Eigenschaften, die der Quasar im geringen Alter von nur etwa einer Milliarde Jahre besaß. In dieser frühen Phase hat J1148+5251 offenbar äußerst heftige Sternentstehung zu verzeichnen.

Aufgabe 1: Wie lange würde es dauern, bis unser Milchstraßensystem bei der oben angegebenen Sternentstehungsrate \dot{M}_M seinen kompletten Wasserstoffvorrat in Sterne prozessiert hätte? Die Masse des Wasserstoffs beträgt $M_{M,H_2} = 2,5 \cdot 10^9 M_\odot$. Die gesamte zur Sternbildung beitragende Gasmasse ist um den Faktor $q = 2$ größer. Man muss außerdem die Rückflussrate $k = 2$ berücksichtigen, die beschreibt, dass von den Sternen, etwa durch Supernova-Explosionen, Materie an die Umgebung zurückgegeben wird, die zur

erneuten Sternentstehung beitragen kann.

Aufgabe 2: Die Masse des Wasserstoffs in J1148+5251 beträgt $M_{j,H_2} = 2 \cdot 10^{10} M_\odot$. Wie lange würde in diesem Fall der Wasserstoffvorrat ausreichen? Man verwende für den Masseanteil des H_2 am gesamten Gasvorrat $q = 1$.

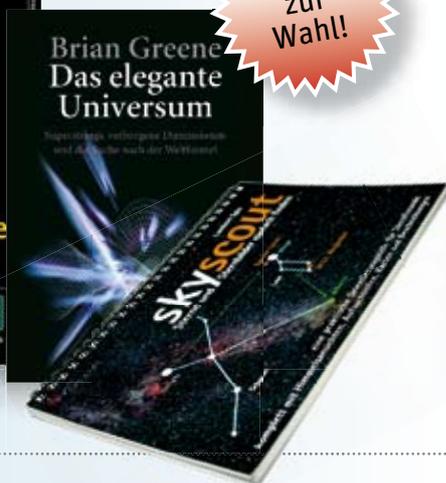
Aufgabe 3: Eine grobe Abschätzung der maximal möglichen Sternentstehungsrate \dot{M}_{\max} im Quasar J1148+5251 erhält man unter der Annahme, dass die gesamte Gasmasse M_{Gas} der involvierten Region im freien Fall zusammenstürzt und keinem äußeren Druck unterliegt:

$$\dot{M}_{\max} = M_{\text{Gas}}/t_{\text{ff}}$$

Das Ergebnis wird in Sonnenmassen pro Jahr erwartet. Die Freifallzeit t_{ff} ist gegeben durch: $t_{\text{ff}} \approx G^{-1/2} \rho^{-1/2}$. Die Gasmasse sei $M_{\text{Gas}} \approx M_{j,H_2}$. Die Gravitationskonstante ist $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. Die mittlere Dichte ρ der Region betrage $\rho = 40 H_2$ -Moleküle pro cm^3 . $m_{H_2} = 2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. AMQ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **16. März 2009** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: (+49) 0 62 21–52 82 46. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern Preise verlost: siehe Seite 116.

ALS ABONNENT HABEN SIE VIELE VORTEILE!



Präsent
zur
Wahl!

ABONNIEREN

>>> Sie zahlen im Inland nur € 85,20 für das Jahresabonnement von **Sterne und Weltraum** (12 Ausgaben). Als Schüler, Student, Azubi, Wehr- oder Zivildienstleistender zahlen Sie auf Nachweis sogar nur € 64,-.

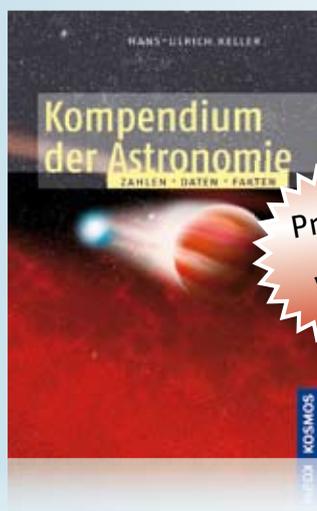
>>> Unter www.astronomie-heute.de/archiv haben Sie freien Zugriff auf alle Heftartikel seit 2005.

>>> Für Ihre Bestellung bedanken wir uns mit einem Präsent Ihrer Wahl.

Weitere
Prämien
finden Sie im
Internet

EMPFEHLEN

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient und können zwischen mehreren Geschenken wählen.



Buch »Kompedium der Astronomie«
Mit über 100 farbigen Illustrationen, zahlreichen Tabellen und Verweisen, ist das Buch das ideale Nachschlagewerk zur Astronomie.

Präsent
zur
Wahl!



DVB-T-Stick

Der DVB-T-Stick sorgt für hervorragende Bilder und eine hohe Auflösung. USB-2.0 High-Speed Verbindung.



VERSCHENKEN

Verschenken Sie ein Jahr Lesevergnügen! Das erste Heft des Abonnements verschicken wir mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Abonnieren können Sie unter:

www.astronomie-heute.de/abo

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissen aus erster Hand

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße
3-5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751
service@spektrum.com