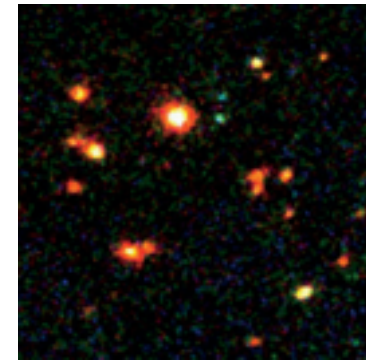
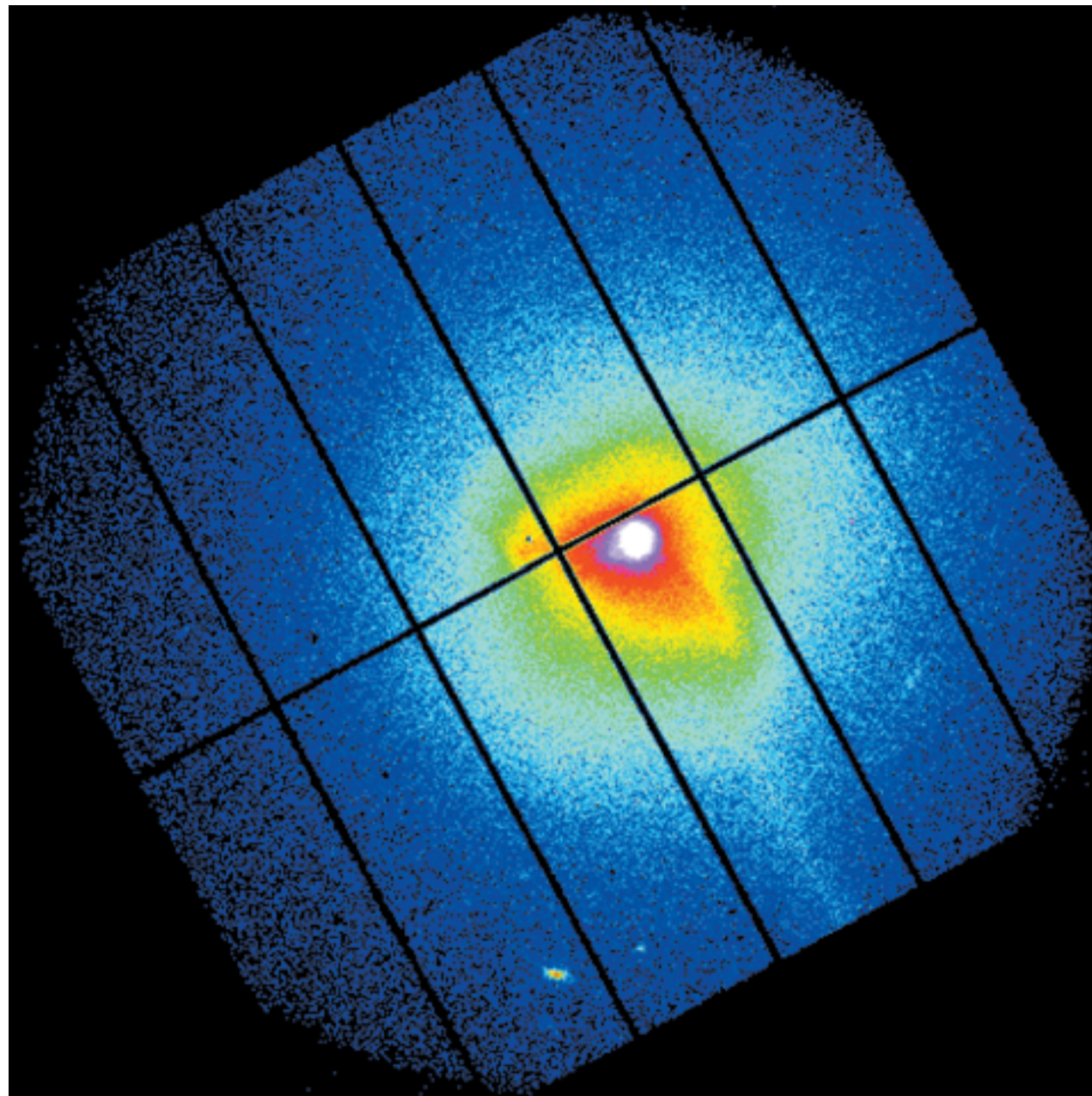


Schwarze Löcher als **galaktische** Gasheizung



Schwarze Löcher, Millionen bis Milliarden Mal massereicher als die Sonne, befinden sich wahrscheinlich in den Zentren der meisten Galaxien. Eine Vielzahl an wissenschaftlichen Daten haben die Astronomen mittlerweile über diese Exoten im Universum gesammelt. Doch erst in jüngster Zeit wird immer deutlicher, dass Schwarze Löcher eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung der Galaxien gespielt haben. Max-Planck-Forscher brachten mit Hilfe des europäischen Röntgenobservatoriums **XMM-NEWTON** mehr Licht in diese dunkle Seite des Universums.

XMM-Aufnahme des Gebietes um die Galaxie M 87.
Das umgebende Gas besitzt eine nahezu gleichförmige
Verteilung und ist deutlich heißer als zehn Millionen Grad.



Galaxien wie unsere Milchstraße sind keine Einzelgänger. Sie haben sich in großen Gruppen angesammelt, die im Extremfall mehrere tausend Mitglieder umfassen können. Nahe am Zentrum fast jedes großen Haufens befindet sich eine Riesengalaxie. Der Raum zwischen den Galaxien ist nicht gänzlich leer, wie es auf Bildern im Bereich des sichtbaren Lichts den Anschein hat. Vielmehr existiert dort ein sehr fein verteiltes Gas. Da es viele Millionen Grad heiß ist, strahlt es jedoch ausschließlich im Röntgenlicht – ein beobachterisch schwer zugänglicher Bereich, da die Erdatmosphäre diese energiereiche Strahlung absorbiert.

Die Entdeckung dieses intergalaktischen Gases in den siebziger Jahren führte zehn Jahre später zu einer Theorie, die bis heute heiß umstritten blieb: Britische Astrophysiker zogen damals den Schluss, dass das Gas zunächst in das Zentralgebiet des Haufens strömt, wo die massereiche Galaxie mit ihrem starken Schwerefeld ihre Umgebung dominiert. Dort kühlt es sich innerhalb von höchstens einer Milliarde Jahren ab und „kondensiert“ zu neuen Sternen aus. Die Fachleute sprachen von cooling flows. Aus den damals vorhandenen Messdaten schätzten die Forscher ab, dass auf diese Weise in Extremfällen jedes Jahr mehr als tausend neue Sterne in den cooling flows entstehen. Eine unglaublich hohe Rate im Vergleich zu einer

durchschnittlichen Spiralgalaxie wie der Milchstraße, in der jährlich etwa ein neuer Stern aufleuchtet. Dieser prognostizierte Vorgang müsste demnach die Entwicklung von Galaxienhaufen ganz erheblich beeinflussen.

Diese Aufsehen erregende Theorie hatte indes einen Haken: Weder das kühle Gas selbst noch die darin entstehenden jungen Sterne ließen sich nachweisen. Verfechter der Theorie erdachten daher immer neue Hypothesen, um die Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung zu erklären. So wurde beispielsweise vermutet, dass die Sternentstehung in den cooling flows anders abläuft als es von unserer Milchstraße und anderen Galaxien her bekannt ist. Insbesondere sollten fast ausschließlich massearme Sterne entstehen, die sich aus größerer Entfernung nicht von einer alten Sternpopulation unterscheiden lässt, wie sie in der Zentralgalaxie vorhanden ist. Das widersprach hingegen aller Erfahrung.

PARADOXON ZWISCHEN HEISS UND KALT

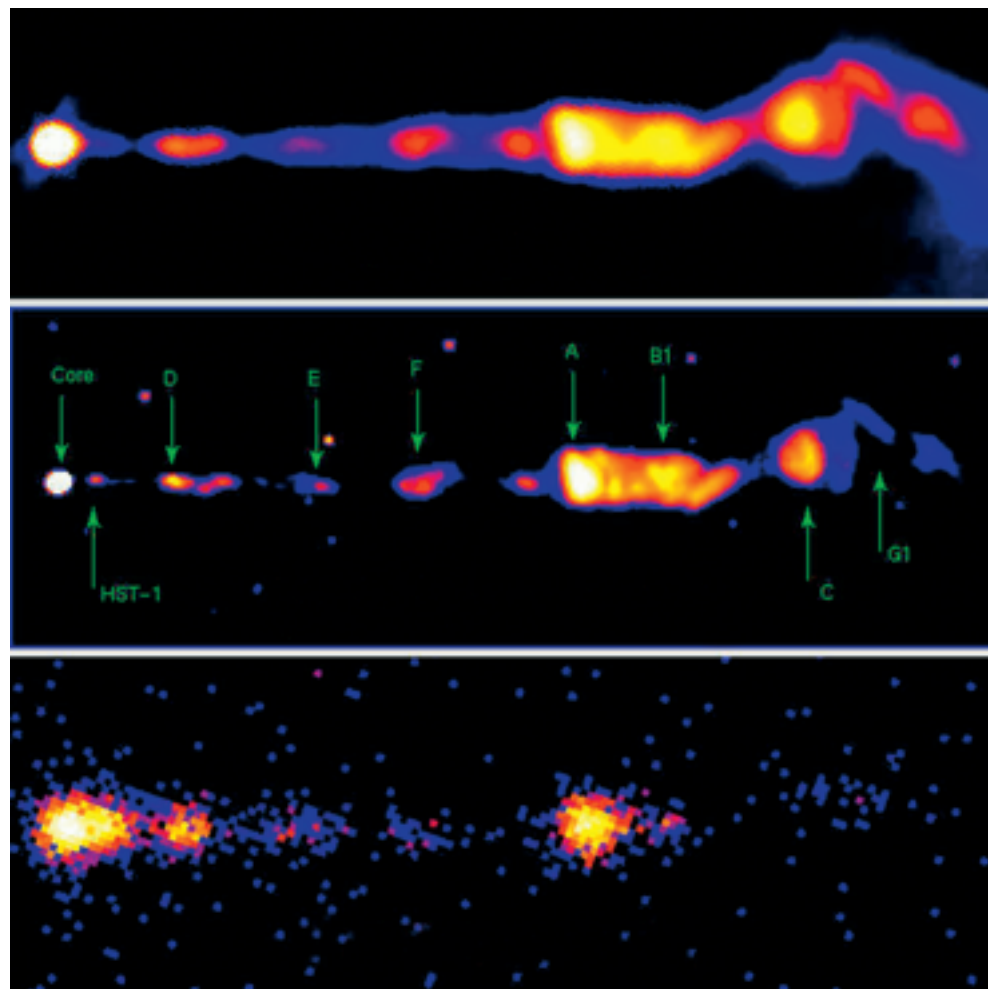
Das Paradoxon blieb bestehen: Das heiße Gas war eindeutig vorhanden und nach allen Regeln der Physik müsste es sich auch abkühlen. Offenbar tut es das aber nicht. Warum?

Alle bisherigen Beobachtungen litten darunter, dass die Röntgenteleskope zum einen keine hohe Auflösung besaßen, also keine Details im Innern der Galaxienhaufen zeigten.

Zum anderen gab es keinen empfindlichen Spektrographen. Ein solches Instrument ist aber nötig, beispielsweise um Gastemperaturen zu messen. Beide Möglichkeiten bietet das Ende 1999 gestartete europäische Röntgenobservatorium XMM-Newton.

Im Jahr 2000 beobachteten Hans Böhringer und Kollegen vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching mit XMM-Newton die Zentralgalaxien von insgesamt drei Galaxienhaufen, um nach den cooling flows zu suchen. Die besten Daten erhielten die Forscher von dem etwa 50 Millionen Lichtjahre entfernten Virgo-Galaxienhaufen und dessen Zentralgalaxie Messier 87 (kurz M 87). Sie zählt zu den massereichsten bekannten Galaxien. Auffällig an ihr ist ein gebündelter Gasstrahl, ein so genannter Jet, der vom Zentrum ausgeht und über eine Strecke von etwa 5000 Lichtjahren ins All hinaus schießt.

Über elf Stunden lang mussten die Astronomen das Teleskop auf die Galaxie ausrichten, bis sie ein exzellentes Spektrum hatten. In ihm fanden sich die Signaturen unterschiedlicher chemischer Elemente in Form von Emissionslinien. Sie entstehen, wenn Stoffe sich in einer heißen und strahlungsreichen Umgebung befinden und darin selbst zum Leuchten angeregt werden. Die Emissionslinie des Eisens war besonders deutlich und diente den Astronomen gewissermaßen als Thermometer für das



Der Jet der Galaxie M 87, aufgenommen im Radiobereich, mit dem Weltraumteleskop Hubble und dem Röntgenteleskop Chandra (von oben).

Gas im Zentrum des Virgo-Galaxienhaufens. Wenn das Modell der cooling flows stimmte, müsste es in der Umgebung von M 87 Regionen stark verwirbelten Gases mit sehr unterschiedlichen Temperaturen geben. Nichts davon war indes in den Spektren zu erkennen. Sie ließen sich am einfachsten mit einer nahezu einheitlichen hohen Temperatur von mehr als zehn Millionen Grad erklären und sprechen eindeutig gegen das Cooling-flow-Modell. Um wirklich sicher zu gehen, überprüften die Max-Planck-Wissenschaftler auch sehr spezielle Modelle, die ihre Beobachtungen im Rahmen des Cooling-flow-Modells erklären könnten, zum Beispiel eine starke Absorption

des Röntgenlichts, die ganz selektiv nur in den kühlen Bereichen auftritt. „Aber auch diese Möglichkeit scheidet unserer Meinung nach aus“, sagt Hans Böhringer.

Unterstützt werden die Garching Astronomen von ihren Kollegen aus den USA. Sie haben mit ihrem Röntgenteleskop Chandra sehr hoch aufgelöste Bilder von der Umgebung der Galaxie M 87 erhalten und finden ebenfalls keinerlei Hinweise auf große kühle Wolken. Lediglich in den Zentralgebieten einiger Haufen lassen sich kleinere Regionen mit etwas kühlerem Gas ausmachen. Sie sind jedoch zehn- bis hundertmal massärmer als es die Befürworter des Cooling-flow-Modells voraussagen. Wenn sich aber das eindeutig vorhandene heiße Gas nicht abkühlt, muss es konstant geheizt werden. Diese „Heizung“ muss überdies sehr

fein auf ihre Aufgabe abgestimmt sein: Ist sie zu stark, treibt sie das intergalaktische Gas aus den Zentren der Galaxienhaufen hinaus – was nicht beobachtet wird. Ist sie zu schwach, kühlen sich die riesigen Gasmassen über längere Zeit dennoch ab. Für die Garching Forscher kommt hier nur eine Möglichkeit in Frage: Schwarze Löcher in den Zentren aktiver Galaxien.

Die Astronomen sind sich heute ziemlich sicher, dass fast jede Galaxie in ihrem Zentrum ein Schwarzes Loch birgt. Diese Gebilde können einige Millionen bis Milliarden Mal massereicher sein als die Sonne. Umgeben sind sie von heißen Gasscheiben, aus denen Materie langsam in das zentrale Schwarze Loch hineinstrudelt und dort auf ewig verschwindet. Vermutlich rotieren diese kosmischen Mahlströme und verdrillen Magnetfeldlinien, die sich entlang ihrer Rotationsachsen – senkrecht zur Scheibenebene – ins All winden. Entlang dieser Feldlinien werden laut Theorie elektrisch geladene Teilchen, vermutlich Elektronen und deren Antiteilchen (Positronen), in den Raum geschossen. Unterstützt wird dieses Szenario von Tübinger Astronomen, die mit XMM-Newton den Bereich in der unmittelbaren Umgebung eines Schwarzen Lochs studiert haben.

JETS AGIEREN ALS ENERGIETRÄGER

Diese Materiestrahlen (oder Jets) können sich bis zu eine Million Lichtjahre weit in den Raum erstrecken. Dort stoßen sie auf das Haufengas und verwirbeln in großen, sich ständig ausdehnenden Wolken. Die Jets stellen einen erheblichen Energiestrom dar. Es ist somit denkbar, dass die expandierenden Gasblasen diese Energie zum Teil auf das intergalaktische Gas übertragen und es damit heizen. Diese Art der Wechselwirkung konnten Astronomen jetzt mit Chandra direkt nachweisen.

Eugene Churazov vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in

Garching entwickelt derzeit ein Computermodell, um den Energieeintrag der Jets in das heiße Gas zu simulieren. Eine einfache Abschätzung der reinen Zahlen deutet aber bereits darauf hin, dass die Garching Forscher auf dem richtigen Weg sind. Der Jet von M 87 beispielsweise liefert etwa doppelt so viel Energie wie alle Sterne unserer Milchstraße zusammen abstrahlen. Die Zentralgalaxien in den Perseus- und Hydra-A-Galaxienhaufen sind sogar noch zehnmal energiereicher. Ein Ver-

gleich mit der theoretischen Kühlrate des Gases zeigt, dass die Jets Energie genau in der richtigen Größenordnung liefern – ein überraschendes „Fine tuning“.

Wie das funktioniert, könnte ein selbst regulierender Mechanismus erklären. Hierbei nimmt man an, dass das intergalaktische Gas auf das Schwerpunktzentrum, das Schwarze Loch, zuströmt. Einen Teil dieses Gases wird der dunkle Riese verschlucken, der andere Teil wird entlang der Magnetfelder in die Jets

eingeschossen. Je mehr Gas außen vorhanden ist, desto mehr Materie strömt auf das Schwarze Loch zu und umso mehr Energie liefern die Jets. Die ist gleichzeitig auch nötig, weil der Heizbedarf mit der Masse des umgebenden Gases steigt. Ist weniger Gas vorhanden, bekommt das Schwarze Loch auch weniger Nahrung und heizt seine Umgebung

Die XMM-Aufnahme zeigt eine Fülle aktiver Galaxien und Quasare. Die Farben geben den Energiebereich an: Von Rot über Grün zu Blau nimmt die Energie des abgestrahlten Röntgenlichts zu.

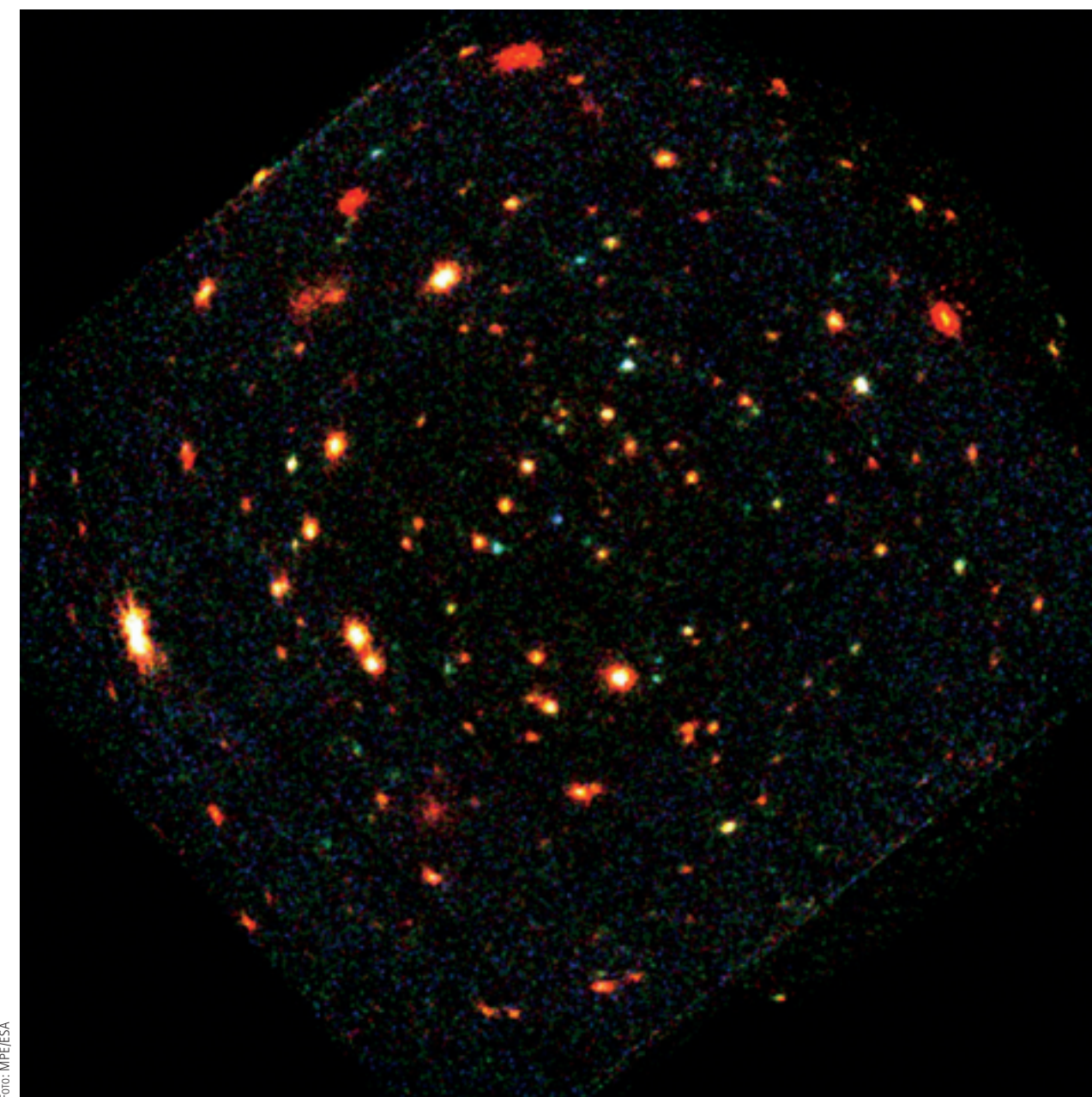
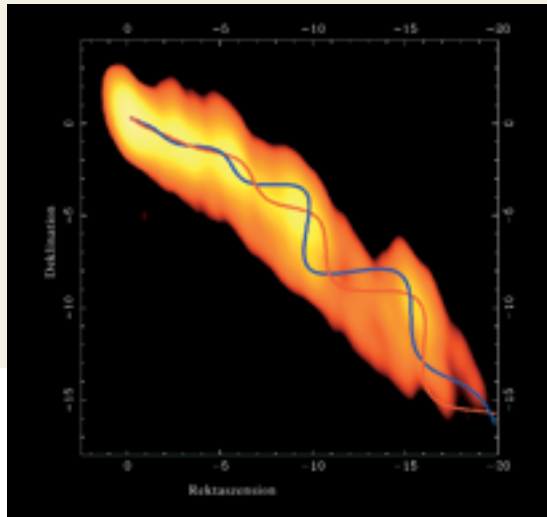


Foto: MPE/ESA

DIE DOPPELHELIX IN 3C273

Aus den Zentren von Radiogalaxien und Quasaren hervorschießende Jets sind schon seit Jahrzehnten bekannt. Wie sie entstehen und auf welche Weise die Teilchen darin beschleunigt werden, ist aber noch weitgehend offen. Andrei Lobanov und Anton Zensus vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn haben kürzlich in dem Jet des Quasars 3C273 eine wellenförmige Struktur entdeckt, die an die doppelt gewundene Helix der DNS erinnert – freilich auf ganz anderen Größenskalen von einigen hundert Lichtjahren. Vermutlich entsteht dieses Phänomen dadurch, dass sich der Jet durch ein umgebendes Gas hindurchbohrt, das ihn von außen zusammendrückt. Ähnlich wie in einem Wasserstrahl bilden sich dann auch in dem Gasstrahl periodische Instabilitäten. Mit einem theoretischen Modell gelang es den Bonner Astronomen, die innere Struktur des Jets bis herunter zu Größenordnungen von wenigen hundertstel Bogensekunden, entsprechend etwa 1000 Lichtjahren, zu erklären. Gleichzeitig lieferte das Modell wichtige physikalische Größen. Demnach besitzt der Jet nur ein Viertel der Dichte des



umgebenden Gases. Das Helix-Muster bewegt sich mit etwa 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit vom Zentrum der Galaxie fort. Damit macht das Modell Voraussagen, die sich mit zukünftigen Beobachtungen überprüfen lassen. Möglich wurden die Beobachtungen durch eine bisher einmalig eingesetzte Technik. Im Jahr 1997 hatten japanische Forscher ein acht Meter großes Radioteleskop, genannt HALCA, in eine Erdumlaufbahn geschossen. Damit ließ sich erstmals die auf der Erde schon lange praktizierte Radiointerferometrie (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) auf den Weltraum ausdehnen. Hierbei wird ein Himmelskörper gleichzeitig von mehreren weltweit verteilten Radioteleskopen beobachtet. Anschließend kombinieren die Forscher die Daten in einem Spezialrechner miteinander. Diese „Weltraum-VLBI“ ermöglicht Beobachtungen mit einer vierfach höheren Auflösung als mit erdgebundenen Teleskopen allein. Für die Untersuchung des Jets von 3C273 waren zehn amerikanische Antennen sowie das 100-m-Radioteleskop in Effelsberg im Einsatz. THOMAS BÜHRKE

MPI FÜR RADIOASTRONOMIE

auch weniger auf. Dieser Mechanismus erklärt nicht nur die Heizung des intergalaktischen Gases. Er hat auch zur Folge, dass die Schwarzen Löcher dadurch wachsen. M 87 beispielsweise sollte jährlich etwa Materie in der Größenordnung einer hundertstel Sonnenmasse verschlingen. Über einen Zeitraum von zehn Milliarden Jahren ergäbe dies hundert Millionen Sonnenmassen. Dennoch kann dieser Vorgang nicht alleinige Ursache für die Größe dieses Schwarzen Lochs sein, denn es besitzt etwa drei Milliarden Sonnenmassen.

DIE BELICHTUNGSZEIT BETRÄGT 16 TAGE

Die Frage, wie sich diese kosmischen Riesen gebildet haben und welche Rolle sie bei der Entstehung und Entwicklung der Galaxien gespielt haben, gehört zu den spannendsten Kapiteln der heutigen Astrophysik. Auch hierzu hat XMM-Newton bereits ganz wesentlich bei-

getragen. Als zu Beginn der sechziger Jahre raketentragene Detektoren erstmals Röntgenstrahlung aus dem Universum empfingen, fiel bereits eine diffuse Hintergrundstrahlung auf. Sie ließ sich keinen Einzelquellen zuordnen. Erst das deutsch-britische Röntgenteleskop ROSAT brachte in den neunziger Jahren dank seiner wesentlich erhöhten Empfindlichkeit und Abbildungsschärfe Licht ins Dunkel: Demnach stammt rund Dreiviertel dieses Strahlungsfelds von weit entfernten aktiven Galaxien und Quasaren, also Galaxien, die – ähnlich wie M 87 – ein Schwarzes Loch im Zentrum bergen. 16 Tage lang mussten Astronomen das Teleskop für diese Beobachtung auf ein bestimmtes Himmelsareal ausrichten, um zu dieser Erkenntnis zu gelangen. Das ist sicher eine der am längsten belichteten astronomischen Aufnahmen aller Zeiten. Schon bald danach tauchte die Vermutung auf, dass es sich auch bei den restlichen unidentifizierten Quellen

um aktive Galaxien handelt. Hintergrund dieser Vermutung war ein neues Modell aktiver Galaxien, das sich aus anderen Beobachtungen ergeben hatte. Demnach sollten die Schwarzen Löcher in den Galaxienzentren nicht nur von einer heißen Scheibe, sondern in größerer Entfernung auch von einem Staubring umgeben sein. Der verdeckt dann den Blick auf das Zentrum, wenn man eine Galaxie zufällig von der Seite beobachtet. Allerdings kann der Staub nur energiereiche Röntgenstrahlung verschlucken. Energiereichere sollte diesen Vorhang durchdringen können. ROSAT war für diesen Energiebereich nicht empfindlich, wohl aber XMM-Newton. Also richtete ein internationales Team unter der Leitung von Günther Hasinger, dem neuen Direktor am MPE, das Instrument auf dasselbe Gebiet aus wie zuvor ROSAT. Das Ergebnis dieser rund 28-stündigen Belichtung war erstaunlich. Das gesamte Bildfeld war übersät mit Galaxien. Auf einer Fläche

von einem viertel Quadratgrad, entsprechend der Vollmondfläche, zählten die Astronomen etwa 500 Röntgenquellen. Dank der Energieauflösung des am MPE entwickelten Röntgen-CCD-Detektors ließ sich ermitteln, dass wie erwartet etwa ein Viertel aller Quellen nur im energiereichen Röntgenlicht erkennbar sind. Unter diesen Quellen befinden sich weit entfernte Quasare und miteinander kollidierende Galaxien, wie sich mit spektroskopischen Beobachtungen im sichtbaren Licht nachweisen ließ.

Damit ist klar: Der gesamte Röntgenhintergrund stammt von aktiven Galaxien, von denen viele nur im energiereichen Röntgenlicht nachweisbar sind. Rechnet man die mit XMM-Newton auf einer kleinen Fläche gefundene Zahl an Objekten auf die gesamte Himmelskugel hoch, so kommt man zu einer Gesamtzahl von rund hundert Millionen. Eine Überschlagsrechnung führt damit zu der erstaunlichen Erkenntnis, dass mindestens ein Fünftel aller Strahlung im gesamten Universum von Schwarzen Löchern erzeugt wird. Von jenen Himmelskörpern also, die gerade dafür berühmt sind,

dass sie Licht verschlucken. Diese neue Erkenntnis deutet schon darauf hin, dass Schwarze Löcher die Entwicklung des Universums maßgeblich beeinflusst haben müssen. Doch der aufgegriffene Faden lässt sich noch weiter verfolgen. So fanden Astronomen des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg und Kollegen aus den USA den bislang am weitesten entfernten Quasar (siehe hierzu auch den Beitrag auf Seite 22ff. in diesem Heft). Er sandte das heute von ihm empfangene Licht zu einer Zeit aus, als das Universum erst etwa 700 Millionen Jahre alt war.

ASTRONOMEN BEOBACHTEN „FRÜHGEURTEN“

Die Forscher gehen davon aus, dass die Mehrzahl der riesigen Schwarzen Löcher innerhalb der ersten Milliarden Jahre nach dem Urknall bereits existiert hat. Und ein weiteres Ergebnis gibt zu denken: Man hat herausgefunden, dass die Schwarzen Löcher um so größer sind, je massereicher das sie umgebende Sternsystem ist. Es muss somit einen entwicklungs-geschichtlichen Zusammenhang zwischen Schwarzen Löchern und Galaxien geben.

Alles deutet daher darauf hin, dass die Schwarzen Löcher nicht mehr länger nur als faszinierende, aber exotische Gebilde angesehen werden dürfen. Vielmehr müssen sie gemeinsam mit den Galaxien entstanden sein. Es ist sogar denkbar, dass sie gewissermaßen als Kondensationskeime der Galaxien fungiert haben. „Wir erleben derzeit tatsächlich einen Paradigmenwechsel in der Entwicklung der Galaxien. Offenbar haben die Schwarzen Löcher hierbei eine wesentlich größere Rolle gespielt als wir bislang vermutet haben“, resümiert Günther Hasinger.

Die weitere Forschung muss nun die Frage angehen, wie sich die Schwarzen Löcher gebildet haben. Besaßen sie anfänglich nur etwa zehn Sonnenmassen, wie es die heutigen Theorien erwarten lassen, und sind sie erst durch einen beständigen Materiestrom gewachsen? Oder gab es einen noch unbekannteren Vorgang, der es ermöglicht hat, dass gleich Schwarze Löcher mit etwa einer Million Sonnenmassen entstehen konnten? Diese Fragen werden die Astrophysiker noch lange begleiten.

THOMAS BÜHRKE

XMM-NEWTON – EUROPAS RÖNTGENOBSERVATORIUM

Im Dezember 1999 startete die Europäische Weltraumbehörde ESA ihren bislang größten Wissenschaftssatelliten: das elf Meter lange und vier Tonnen schwere Röntgenobservatorium XMM-Newton (X-ray Multi Mirror). Der Satellit ist mit drei parallel angeordneten, 60 Zentimeter langen Teleskopen ausgestattet. Jedes von ihnen besteht aus 58 ineinander geschachtelten und vergoldeten Röhren mit Durchmessern von 70 bis 30 Zentimetern. Die Spiegelsysteme ermöglichen es, mit drei verschiedenen Detektoren in deren Brennebenen gleichzeitig zu arbeiten: einer Kamera sowie zwei Spektrometern. Erstmals kamen bei XMM-Newton röntgenempfindliche Halbleiterdetektoren, Charge Coupled Devices (CCD), zum Einsatz – entwickelt und gebaut am Garching Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik. Mit ihnen lässt sich die Energie der einfallenden Röntgenphotonen feststellen. Damit ist es möglich, „Farbbil-



der“ im Röntgenbereich aufzunehmen. Die Spektrometer sind für die moderne Astrophysik unerlässliche Instrumente. In dem nach Wellenlängen zerlegten Röntgenlicht finden sich „Fingerabdrücke“ einzelner chemischer Elemente. Sie geben Aufschluss über wichtige physikalische Größen wie Temperatur, Dichte, Bewegungszustand oder chemische Zusammensetzung der Materie. Die Astronomen hoffen, mit XMM-Newton innerhalb von zehn Jahren mehr als eine Million noch unbekannt Röntgenquellen zu entdecken und mehr als 30.000 Himmelskörper zu spektroskopieren. Deutschland war wesentlich an XMM-Newton beteiligt. Gebaut wurde das 460 Millionen Mark teure High-Tech-Instrument unter der Leitung der Dornier Satellitensysteme (heute Astrum) in Friedrichshafen, die Firma Carl Zeiss war entscheidend am Bau der Spiegel beteiligt. Der empfindlichste Röntgendetektor in der Fokalebene wurde im Garching Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik entwickelt. THOMAS BÜHRKE

Foto: ESA