

ASTROPHYSIK

Der Satellit mit den Röntgenaugen

Das europäische Röntgenobservatorium XMM-Newton liefert seit zehn Jahren faszinierende Einblicke in die heißesten Regionen des Universums.

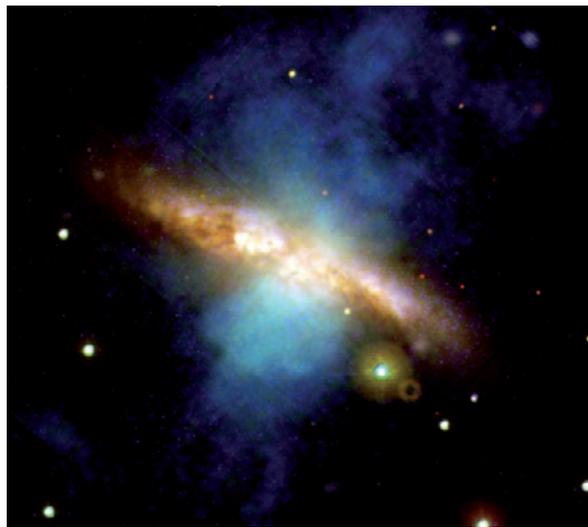
Norbert Schartel und Matthias Ehle

Röntgenstrahlung erlaubt es Astrophysikern, die „Extreme“ des Universums zu erforschen – Materie, die in Schwarze Löcher fällt oder die in starken Gravitations- bzw. Magnetfeldern um einen kollabierten Stern gefangen ist, oder Schockwellen heißen Gases in abgelegenen Galaxienhaufen. Erkenntnisse über solch exotische Prozesse lassen sich nur durch Beobachtungen aus dem Weltraum gewinnen, da die Erdatmosphäre für Röntgenstrahlung undurchlässig ist.

Das Röntgenobservatorium XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Satellite [1]) der Europäischen Weltraumorganisation ESA gehört mit seinem NASA-Pendant Chandra zu den Speerspitzen der astrophysikalischen Forschung. Beide nahmen vor zehn Jahren ihren Betrieb auf. Während XMM-Newton die größte Lichtsammelnde Fläche aller derzeitigen Röntgensatelliten aufweist, gestatten Chandras Spiegel besonders hochaufgelöste Abbildungen. Konzertierte Beobachtungen mit beiden Satelliten erlauben somit eine bislang unerreichte Auflösung sowohl in räumlicher, zeitlicher, als auch spektraler Hinsicht [2]. Der Blick von XMM-Newton reicht dabei von den Planeten unseres Sonnensystems über Galaxien (Abb. 1) bis hin zu den entferntesten aktiven galaktischen Kernen.

Selbst von der Erde fängt das Observatorium etwas auf. Denn auch in der äußersten Schicht der Atmosphäre, der Exosphäre, entsteht Röntgenlicht: An der Grenze zum umgebenden Weltraum kommt es zu Wechselwirkungen der Gasteilchen mit den energiereichen Partikeln des Sonnenwinds.

Dass auch Kometen Röntgenstrahlung aussenden, entdeckten Astronomen erst 1996. Dies war völlig unerwartet, denn solch energiereiche Strahlung stammt typischerweise von Quellen, die heißer als eine Million Grad sind. Kometen sind jedoch kalte Objekte, die man gerne auch als schmutzige Schneebälle bezeichnet. Anhand der mit XMM-Newton aufgenommenen Spektren gelang es, den zugrundeliegenden Emissionsvorgang zu identifizieren, bei dem es sich um einen Ladungsaustausch handelt: Hochionisierte Kohlenstoff- und Sauerstoffatome des Sonnenwinds übernehmen dabei Elektronen von ungeladenen Atomen aus dem Gas des Kometen. Die Ionen binden die Elektronen zunächst in angeregten Zuständen, von wo sie durch Emission von Röntgenphotonen auf Niveaus niedrigerer Energie fallen.



P. Rodriguez, ESA

Abb. 1 Die „Zigarrengalaxie“ M 82 wird durch die Gravitation ihrer Nachbarin M 81 (nicht im Bild) so stark beeinflusst, dass die Sternentstehungsrate in der galaktischen Scheibe (weiß: optisch/UV) außergewöhnlich stark ansteigt. Erst die Röntgenstrahlung (blau) verrät das aus der Galaxis herausströmende Plasma der entstehenden und sterbenden Sterne.

XMM-Newton gelang es auch, von Mars, Jupiter und Saturn Röntgenstrahlung aufzufangen (Abb. 2). Planeten wie Erde oder Jupiter, die ein starkes Magnetfeld aufweisen, emittieren sie während erhöhter Polarlichtaktivitäten. Chandra und XMM-Newton entdeckten mindestens zwei zeitlich variable Komponenten von entsprechender Emission am bzw. nahe des Jupiterpols. Diese stammt aus den äußeren Bereichen der Magnetosphäre, die – im Gegensatz zur Aurora selbst – keine

KOMPAKT

- Das ESA-Observatorium XMM-Newton startete 1999. Es hat die größte lichtsammelnde Fläche aller bisherigen Röntgensatelliten und kann daher besonders schwache Objekte aufspüren oder bei helleren schnelle zeitliche Änderungen feststellen.
- Beobachtete Quellen sind Kometen und Planeten im Sonnensystem, Millionen Grad heißes Gas in den Koronas von Sternen, Akkretionsscheiben, Supernova-Überresten oder in Galaxienhaufen. Außerdem hochrelativistische Elektronen, die bei Ablenkung durch Magnetfelder Synchrotronstrahlung emittieren.
- Treten keine Schäden auf, kann der Satellit bis zum Ende des Treibstoffvorrats seinen Dienst versehen, etwa bis zum Jahr 2020.

Dr. Norbert Schartel und Dr. Matthias Ehle, XMM-Newton SOC, ESA, Villafranca del Castillo, Apartado 78, 28691 Villanueva de la Cañada, Madrid, Spanien

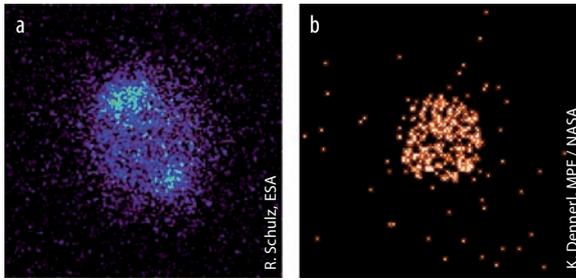


Abb. 2 Bei Jupiter (a) erkennt XMM-Newton verstärkte Emission in den Polregionen, im Chandra-Röntgenbild des Mars (b) fällt der ausgedehnte Halo (einzelne Messpunkte) um das Planetenscheibchen auf.

Röntgenphotonen abgeben sollte. Wahrscheinlich geht die gefundene Strahlung auf ein kompliziertes System elektrischer Ströme in der Polarregion von Jupiters Magnetosphäre zurück.

Beim Mars ließen sich mit XMM-Newton schwache Röntgenhalos entdecken, die sich bis zum Achtfachen des Planetenradius ausdehnen [3]. Als Ursache dafür erwiesen sich auch hier Ladungsaustauschprozesse in der dünnen Exosphäre (Abb. 3). Die durch solche Prozesse verursachte Röntgenstrahlung konnte hier erstmals in der äußeren Atmosphäre eines anderen Planeten nachgewiesen werden.

Vom Aufleuchten ...

Die magnetischen Strukturen der Sonne entstehen und verändern sich gängigen Annahmen zufolge durch Dynamo-Prozesse. Hochauflösende Röntgenspektroskopie ermöglicht es, die Spektrallinien, Linienprofile und -verschiebungen zu beobachten, die wichtige Rückschlüsse auf Dichte, Temperatur und Zusam-

mensetzung des heißen koronalen Gases erlauben [4]. Der Vergleich von zuvor modellierten Spektren der stellaren Korona mit den nun verfügbaren Daten warf mehrere interessante Fragen auf. So zeigte sich in den Koronaspektren kühler Sterne eine Korrelation zwischen Elementvorkommen und magnetischer Aktivität und zeitlicher Entwicklung. Der Quotient der Häufigkeiten von Neon und Eisen steigt um eine Größenordnung, wenn wir die Korona während der am wenigsten aktiven Phase mit der aktivsten vergleichen. Das Verhältnis Ne/Fe verändert sich sogar durch einzelne Eruptionen merklich. Dieser Effekt ist unerwartet und noch nicht verstanden.

Die Röntgenemission massereicher heißer Sterne stammt vermutlich von kollidierenden Stoßwellen des stellaren Winds weit entfernt von der Sternoberfläche. Aufnahmen mit den beiden Observatorien bestätigen einige Aspekte dieses Modells, zeigen aber auch seine Grenzen auf: Beispielsweise verlieren massereiche Sterne weniger Materie als zuvor angenommen und großräumige Stoßwellen in magnetisch eingeschlossenem heißen Plasma spielen eine wichtigere Rolle als bislang vermutet.

In Sternentstehungsgebieten existieren neu entstandene Sonnen zusammen mit Protosternen und Wolken molekularen Gases. Mit XMM-Newton führten Astrophysiker eine umfangreiche Untersuchung in der Taurus-Molekülwolke durch. Diese enthält eine Vielzahl von T-Tauri-Sternen, einer Klasse junger Objekte, die noch kontrahieren. Sie sammeln Material aus der Molekülwolke auf, das dabei eine Akkretionsscheibe um den Stern bildet. Beobachtungen zeigten, dass es sich dort erhitzt und intensive Röntgenstrahlung abgibt, wenn es letztendlich in die Oberfläche des Sternes hineinstürzt [5]. Diese Emission spielt vermutlich auch eine tragende Rolle bei der Entstehung und weiteren Entwicklung von Planetensystemen um junge Sterne.

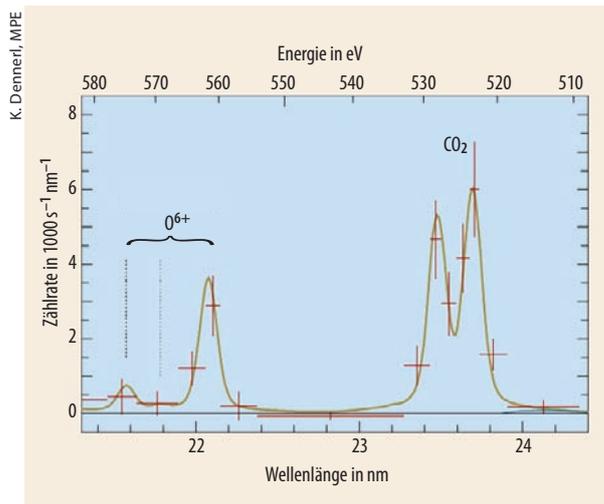


Abb. 3 Mit dem Reflexionsgitterspektrometer konnte XMM-Newton im Licht der Marsscheibe Sauerstofflinien nachweisen. Sie stammen zum einen vom Ladungsaustausch mit ionisiertem Sauerstoff aus dem Sonnenwind (links). Dabei treten Resonanz-, Interkombinations- bzw. verbotene Linien auf. Zum anderen gibt es Fluoreszenz von gebundenem Sauerstoff in der hauptsächlich aus CO₂ bestehenden Marsatmosphäre (rechts). Die durchgezogene Linie repräsentiert Modellrechnungen.

... und Nachglühen der Sterne

Enge Doppelsternsysteme aus einem Weißen Zwerg und einem „normalen“ Stern haben einen so geringen Abstand, dass Wasserstoff vom Stern zum nur erdgroßen Weißen Zwerg hinüberströmt. Dabei kommt es schließlich zu einem enormen Helligkeitsausbruch (Nova), verursacht durch ein explosiv fortschreitendes Wasserstoffbrennen der auf der Oberfläche des Weißen Zwergs angesammelten Materie. Ein Beobachtungsprogramm von XMM-Newton konnte bei der Andromeda-Galaxie zeigen, dass viele der im Optischen gefundenen Novae auch Röntgenquellen sind, zum Teil sogar über lange Zeiträume (Abb. 4) [6]. Die Anzahl derer mit sehr weichem Röntgenspektrum – charakteristisch für eine bestimmte Entwicklungsstufe der Novae, die als superweiche Phase bezeichnet wird – ist deutlich höher als erwartet [7].

Besonders massereiche Sterne beenden ihre Entwicklung, wenn die Kernfusion im Innern zum Erliegen kommt. Der zentrale Bereich des Sterns kollabiert

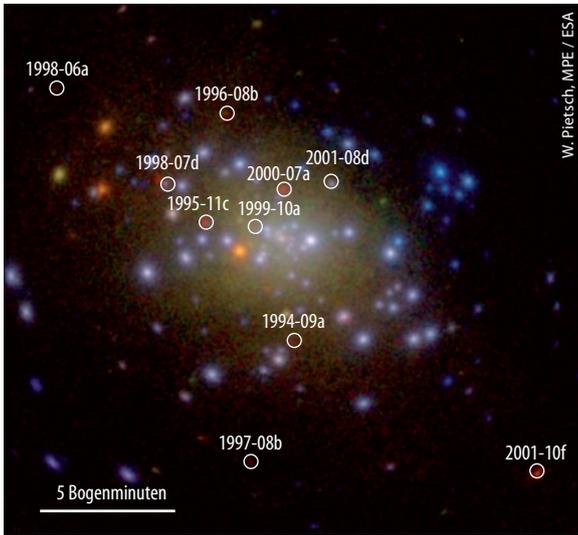


Abb. 4 Optische Novae lassen sich auch auf diesem Röntgenbild der Zentralregion des großen Andromedanebels (M 31) ausmachen. Ihre Positionen sind mit Kreisen markiert. Die Falschfarbencodierung reicht von weicher (rot) über mittlere (grün) bis zur härteren Röntgenstrahlung (blau).

abrupt und es entsteht ein Neutronenstern oder, bei ausreichender Masse, ein Schwarzes Loch. Die hierbei freiwerdende Gravitationsenergie führt zu einer gewaltigen Supernova-Explosion, die große Teile des ursprünglichen Sterns mit tausenden Kilometer pro Sekunde ins All hinausschleudert. Der sich ausdehnende Überrest (Super-Nova Remnant, SNR) verteilt die im Stern erbrüteten schweren Elemente und erzeugt heftige Stoßwellen. Diese erhitzen sowohl das ausgeworfene Material als auch das umgebende interstellare Gas auf mehrere Millionen Grad und bewirken, dass SNRs noch Jahrtausende nach der Explosion intensiv im Röntgenbereich leuchten.

XMM-Newton und Chandra ermöglichen detaillierte Studien der Temperatur, chemischen Zusammensetzung und Struktur von SNRs. Sie erfassen dabei nicht nur die thermische Emission des heißen Gases, sondern weisen auch nichtthermisches Synchrotronlicht nach, das entsteht, wenn Magnetfelder relativistische Elektronen ablenken.

Ein besonders schönes Beispiel für die Wirksamkeit der Supernova-Überreste als Beschleuniger von Ionen und Elektronen ist die Sternexplosion aus dem Jahre 1006, der Prototyp eines schalenartigen SNR. Beobachtungen von SN 1006 zeigen, dass die nichtthermische Strahlung das harte Röntgenspektrum ($> 2 \text{ keV}$) dominiert (Abb. 5). Kombinierte XMM-Newton- und Chandra-Aufnahmen des Supernova-Überrests RCW 86 belegen, dass auch bei diesem SNR im Außenbereich ein Wechsel von thermischer zu synchrotron-dominiertem Röntgenstrahlung stattfindet. Dieser Effekt lässt sich mit lokal erhöhter Geschwindigkeit der Stoßfronten und einem verstärkten Magnetfeld erklären.

Damit bei einer Supernova ein Neutronenstern entsteht, muss der Kern des Vorläufersterns im Rahmen gängiger Modelle zwischen 1,4 und etwa 3 Sonnenmassen schwer sein. Liegt seine Masse darüber, entsteht ein Schwarzes Loch, liegt sie darunter, erfolgt keine Ex-

plosion. Vielmehr strömen die äußeren Sternschichten als Planetarischer Nebel davon und lassen im Zentrum einen etwa erdgroßen Weißen Zwerg zurück.

Neutronensterne mit einem starken Magnetfeld machen sich oft als Pulsare bemerkbar. Dafür verantwortlich ist letzten Endes die Rotationsenergie: Das Herumschleudern von Protonen und Elektronen durch das Magnetfeld beschleunigt sie und über den magnetischen Polen geben sie gerichtete Synchrotronstrahlung ab. Die Achse des Magnetfelds bestimmt die Richtung des Lichtkegels, und es tritt ein „Leuchtturmeffekt“ auf, wenn Rotations- und Magnetfeldachse nicht übereinstimmen. Zeigt der Strahlungskegel einmal pro Umdrehung in Richtung der Erde, beobachten wir einen Lichtpuls.

Pulsare werden seit mehr als 40 Jahren im Radiobereich untersucht, aber nun tragen auch Röntgenbeobachtungen dazu bei, neue Erkenntnisse über den physikalischen Ursprung der Strahlung und den Zusammenhang mit Entwicklungsstufen oder Wechselwirkungen des Neutronensternes zu erforschen. Periodendauern von Röntgenpulsaren liegen zwischen Bruchteilen einer Sekunde und mehreren Minuten.

Beobachtungen mit XMM-Newton zeigten für mehrere Neutronensterne eine Abhängigkeit des Röntgenspektrums von der Pulsphase. Dieses Verhalten erfordert ein weitaus komplexeres Modell für die Magnetfeldkonfiguration und Verteilung der Oberflächentemperatur als zurzeit verfügbar ist. So lässt sich eine Komponente der thermischen Röntgenstrahlung des Geminga-Pulsars (Periodendauer: 0,237 s) mit einem nur zirka 1,1 ha großen heißen Fleck nahe der Oberfläche erklären, der nur während bestimmter Phasen sichtbar ist und mit einer der heißen Polkappen identifizierbar sein könnte [8].

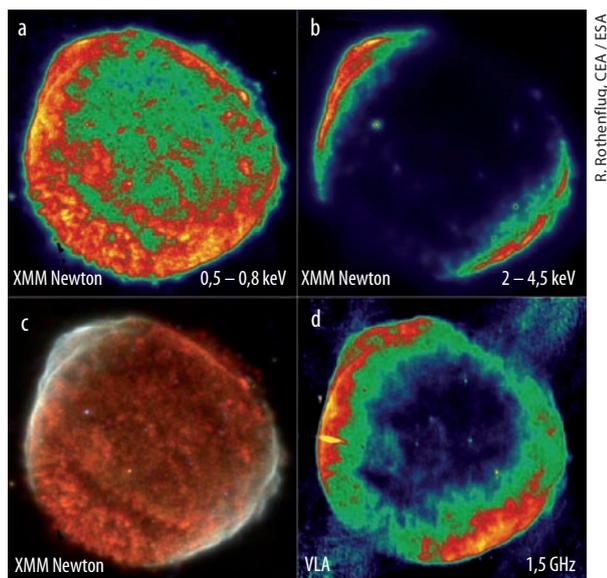


Abb. 5 XMM-Newton-Bilder der Supernova SN 1006 zeigen die Verteilung der Röntgenstrahlung: weiche thermische Emission des heißen Gases (a), harte Synchrotronstrahlung durch TeV-Teilchen (b) und die Kombination von weichen (rot), mittleren (grün) und harten (blau) Röntgenquanten (c). Hier zeigt sich eine beeindruckende Übereinstimmung mit der Radiokarte (d), erstellt mit dem Very Large Array (VLA) in New Mexico, USA.

Daten von einem weiteren Neutronenstern zeigen über einen Zeitraum von viereinhalb Jahren eine sinusförmige Variation der abgeleiteten Temperatur und der Ausdehnung des Emissionsgebietes. Dies lässt sich durch Präzession sowie durch das Vorhandensein von zwei unterschiedlich heißen Flecken in nicht exakt diametraler Lage erklären – weitere Befunde, die auf eine komplizierte Magnetfeldkonfiguration hindeuten [9].

Der Röntgenblick zum Ereignishorizont

Momentan erlauben nur Röntgenbeobachtungen, die physikalischen Bedingungen nahe der Ereignishorizonte Schwarzer Löcher zu studieren. Sie werden mithilfe der Variation und vor allem der Profilform der Eisen-K α -Fluoreszenzlinie bei 6,4 keV vermessen [10]. So zeigt die rund hundert Millionen Lichtjahre entfernte Seyfert-Galaxie MGC-6-30-15 ein spezifisches Linienprofil im Spektrum, das sich nur durch relativistische Effekte plausibel erklären lässt: Gravitationsrotverschiebung und Doppler-Boosting führen hier zu einer asymmetrisch verbreiterten Linienform.

Eine große Überraschung war auch das Spektrum einer weiteren aktiven Galaxie, 1H 0707-495 (Abb. 6). Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie konnten außer bei der Eisen-K α - zum ersten Mal auch bei den Eisen-L-Linien nachgewiesen werden. Das Röntgenspektrum verrät somit zusammen mit dem beobachteten zeitlichen Verhalten der L-Linie ein Emissionsgebiet von wenigen Lichtsekunden Ausdehnung um den Ereignishorizont eines schnell rotierenden Schwarzen Loches [11].

Die meisten Galaxien beherbergen in ihrem Zentrum ein supermassives Schwarzes Loch (englisch abgekürzt SMBH) von bis zu mehreren Milliarden Sonnenmassen. Dieser Wert korreliert jeweils mit der Masse der galaktischen Zentralregion (dem „Bulge“), was auf eine gemeinsame Entwicklung von Galaxie und zentralem Objekt hinweist. Das Exemplar im

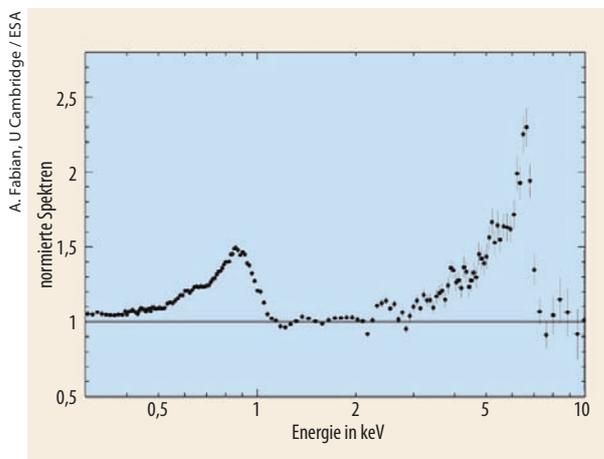
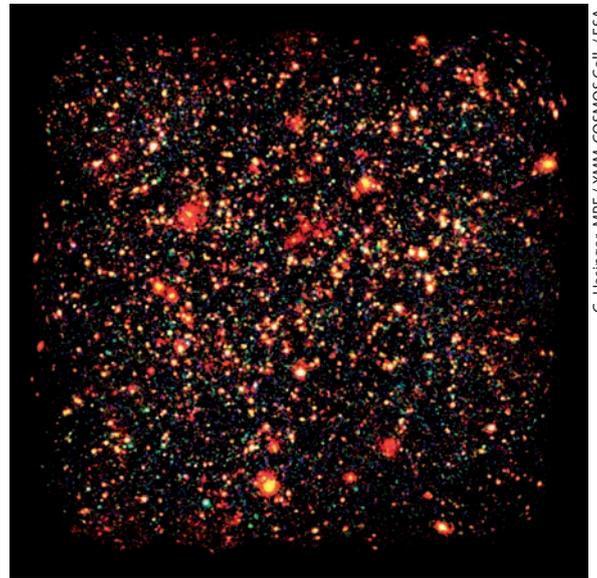


Abb. 6 Das Spektrum der aktiven Galaxie 1H 0707-495, normiert mit dem Ergebnis eines einfachen Modells aus Potentialfunktion, Schwarzkörperstrahlung und breiten Emissionslinien. Die Energien der L- und K-Emissionslinien entsprechen ionisiertem Eisen und liegen bei 0,9 bzw. 6,5 bis 6,7 keV im Ruhesystem [11].



G. Hasinger, MPE/ XMM-COSMOS Coll./ ESA

Abb. 7 Das COSMOS-Feld ist die zurzeit tiefste Beobachtung eines über 1 Quadratgrad großen Himmelsbereichs und zeigt etwa 2000 Punktquellen, meist AGNs, sowie mehr als hundert ausgedehnte Galaxienhaufen. Es besteht aus einem Mosaik von 55 XMM-Newton-Aufnahmen bei 0,5 bis 2 (rot), 2 bis 4,5 (grün) und 4,5 bis 10 keV (blau).

Zentrum der Milchstraße zeigt sich als Radioquelle Sagittarius A* und besitzt „nur“ gut $4 \cdot 10^6$ Sonnenmassen. Chandra und XMM-Newton verzeichneten eine schwache permanente Röntgenstrahlung, die von ihm ausgeht, sowie ein unregelmäßiges, gelegentliches Aufflackern, was auf den Einfall von Materiekumpen zurückzuführen ist.

Die zentralen Schwarzen Löcher wachsen somit sowohl durch eine kontinuierliche Akkretion als auch durch episodenhaftes Einverleiben großer Materiemengen, z. B. ganzer Sterne. Für die ansonsten normale Galaxie RX J1242.6-1119A konnten der frühere deutsche Röntgensatellit ROSAT, Chandra und XMM-Newton ein plötzliches Aufleuchten des Zentrums sowie einen kontinuierlichen Abfall über die folgenden Jahre nachweisen [12]. Dies entspricht genau den Vorhersagen für den Fall, dass ein Stern aufgrund der Gezeitenkräfte in der unmittelbaren Nähe des supermassiven Schwarzen Loches zerfällt.

Eine der wichtigsten Entdeckungen ist die kosmologische Entwicklung aktiver galaktischer Kerne (Active Galactic Nuclei, AGN). Die entsprechenden Arbeiten bestätigen Vermutungen, welche die Astronomen schon anhand von ROSAT-Daten anstellten [13]: AGNs mit einer sehr hohen Leuchtkraft (z. B. Quasare) zeigen die höchste Raumdichte bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 2$, während solche mit einer geringeren Leuchtkraft (z. B. Seyfert-Galaxien) ihre maximale Raumdichte bei deutlich niedrigeren Rotverschiebungen ($z < 1$) aufweisen (Abb. 7). AGNs hoher Leuchtkraft entstehen durch Zusammenstöße und anschließenden Vereinigungen von massereichen Galaxien, während weniger dramatische, galaxieinterne Ereignisse für das Entstehen leuchtschwächerer Kerne verantwortlich sind.

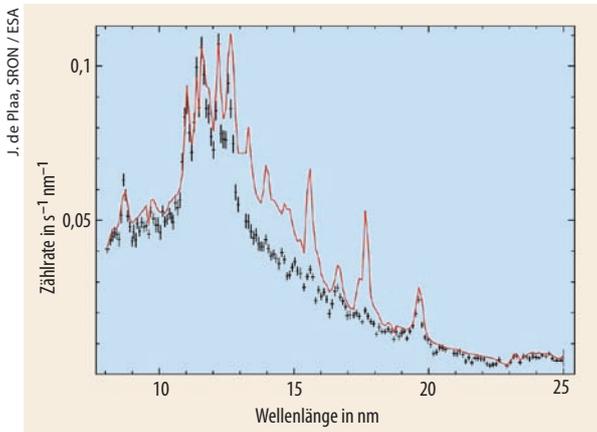


Abb. 8 Im Spektrum des Galaxienhaufens 2A 0335+096 (schwarz) fehlen im Vergleich zu einem „cooling flow“-Modell (rot) die Fe-XVII-Linien, da das Zentrum des Clusters viel langsamer kühlt als vom Modell erwartet.

Kühlung für Galaxienhaufen

Neben AGNs sind Galaxienhaufen – die größten gravitations-gebundenen Strukturen im Universum – die wichtigste extragalaktische Objektklasse. Sie können jeweils bis zu einige tausend Galaxien enthalten. Diese tragen aber nur etwa fünf Prozent zur Haufenmasse bei, der größte Teil ihrer Masse, etwa 80 %, besteht aus Dunkler Materie, und etwa 15 % aus heißem Gas, das den Raum zwischen den Galaxien füllt.

Dieses heiße Gas hat Temperaturen von einigen Millionen Grad und emittiert somit intensive Röntgenstrahlung. Bislang ging man davon aus, dass es im Zentrum von Galaxienhaufen zu einem „cooling flow“ kommt. Denn mit zunehmender Tiefe des Gravitationspotentials nimmt nach dem Virialsatz zunächst die Gastemperatur zu. Ab einer bestimmten Energie treten in den Atomen jedoch vermehrt Übergänge auf, die eine effizientere Kühlung erlauben. Dies sollte zu einer Temperaturabnahme bei gleichzeitiger Erhöhung der Gasdichte führen. Somit erwarteten die Astrophysiker einerseits die Entstehung neuer Sterne aus dem kondensierenden Gas, andererseits ein Nachströmen von Gas aus der Peripherie hinein in das Haufenzentrum. Diese Cooling-Flow-Modelle dominierten die wissenschaftliche Diskussion der letzten 25 Jahre.

Die ersten hochauflösten XMM-Newton-Spektren von Galaxienhaufenzentren waren deshalb eine große Überraschung, da sie die vorhergesagten weichen Röntgenlinien nicht oder nur sehr schwach aufweisen (Abb. 8). Sie legen somit enge obere Grenzen für das Vorhandensein von Plasma mit Temperaturen unter 10^7 K fest. Da die Kühlung physikalisch zwingend ist, muss also eine weitere Energiequelle vorhanden sein, die das Gas auf Temperatur hält.

Entscheidend für die weitere Interpretation wurden Chandra-Beobachtungen zweier leuchtschwacher Gebiete innerhalb des Perseus-Clusters, die ROSAT eine Dekade zuvor entdeckt hatte [14]. Diese bilden eine hantelförmige Struktur, in deren Mitte der zentrale AGN des Galaxienhaufens sitzt. Radiobeobachtungen zeigten, dass beide Gebiete mit Blasen von relativis-

tischen, Synchrotronstrahlung emittierenden Elektronen gefüllt sind. Während diese Blasen wachsen, drücken sie das heiße Intra-Cluster-Gas zur Seite. Die Blasen selbst sind die Überreste von immer wieder auftretenden Jet-Emissionen der zentralen aktiven Galaxie. Chandra-Aufnahmen zeigen quasi-sphärische wellenförmige Strukturen, die, wenn wir sie als Schallwellen interpretieren, genügend Energie bereitstellen, um die Kühlung zu kompensieren.

Mit diesen Resultaten haben die beiden Satelliten entscheidend zur Entwicklung des „Feedback-Szenarios“ [15] beigetragen: Im Zentrum des Galaxienhaufens kühlt das heiße Plasma ab und fällt zum Kern des AGN, der ein rotierendes, supermassives Schwarzes Loch enthält. Die Akkretion nahe des Ereignishorizonts führt zur Emission relativistischer Teilchen in Form eines Jets, der das kühlende Gas heizt. Dadurch bricht der Cooling-Flow zusammen, was die Akkretion und somit auch den Jet stoppt, sodass ein neuer Zyklus beginnt. Obwohl viele Einzelheiten noch nicht im Detail verstanden sind, verbindet das „Feedback-Szenario“ erstmals die beiden extragalaktischen Objektklassen und erklärt ihr Wachstum sowie ihre Regulation. Es hat somit das Potenzial, für die extragalaktische Astrophysik eine ähnliche Bedeutung zu erlangen, wie die Fusion für die Sterne und deren Entwicklung.

Das dunkle Universum kartieren

Galaxienhaufen sind die wichtigsten Fixpunkte zur Vermessung des Universums. Gestützt auf eine Vielzahl astronomischer Beobachtungen hat sich während der letzten Dekade das „Einheitsmodell des Universums“ herauskristallisiert. Nach diesem besteht es zu 4 % aus normaler baryonischer Materie, zu 23 % aus Dunkler Materie und zu 73 % aus Dunkler Energie. Röntgenbeobachtungen der Galaxienhaufen haben

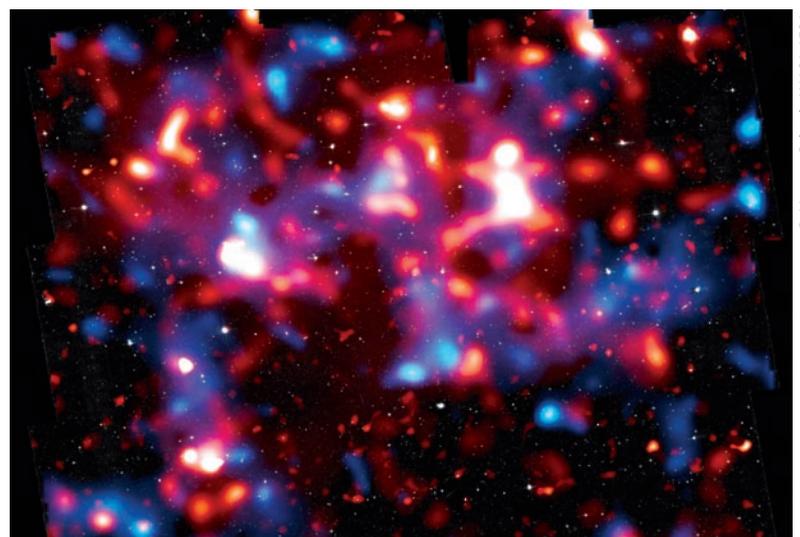


Abb. 9 Der heiße baryonische Anteil (rot) der dreidimensionalen großräumig verteilten Materie wurde mit XMM-Newton gemessen. Zu sehen ist außerdem die Dunkle Materie (blau) und die kalte baryonische Materie (dunkler Hintergrund). Die Verteilung der gesamten Materie (dunkle und baryonische) wurde aus den Gravitations-Beugungsbildern der Hubble-Beobachtungen berechnet.

R. Massey, Caltech / NASA / ESA

entscheidend zu der Entwicklung dieser Theorie beigetragen.

Die gewaltigen Zusammenballungen Dunkler Materie in solchen Haufen sind ideale Labore, um sie zu studieren. Zum Beispiel erlaubt die Abwesenheit von Zerfallslinien in den XMM-Newton-Spektren der Coma- und Virgo-Cluster, die Mischungswinkel hypothetischer steriler Neutrinos einzuschränken, die als Erklärung für die Dunkle Materie infrage kommen. Daten von XMM-Newton und Chandra zeigen, dass ungestörte Galaxienhaufen die gleiche Massenverteilung aufweisen. Das schließt selbst-wechselwirkende sowie adiabatisch-kontrahierende Zustandsgleichungen für die Dunkle Materie aus.

Das Weltraumteleskop Hubble und XMM-Newton beobachteten beide eine 1,6 Quadratgrad große Himmelsregion [16], um sowohl die Dunkle als auch die baryonische Materie dreidimensional zu kartographieren. Hierbei wird der gesamte Materieinhalt durch Gravitationsbeugungsbilder, die kalte baryonische Materie durch optische Flüsse und die heiße baryonische Materie durch Röntgenmessungen bestimmt. Die gefundene großräumige kosmische Struktur besteht aus einem Netzwerk loser Filamente (Abb. 9). Mit zunehmendem kosmologischem Alter wachsen die Filamente mehr und mehr zusammen, wobei die Strukturen größer und dichter werden. Die röntgenhellen Galaxienhaufen befinden sich an den Kreuzungs- und Verbindungspunkten des Netzwerks, d. h. allein die Röntgenquellen reichen aus, um die großräumige Struktur des Kosmos abzubilden.

Gute Aussichten für die zweite Halbzeit

XMM-Newton ist eine der erfolgreichsten Astronomiemissionen der ESA, jährlich arbeiten zwischen 1500 bis 2000 Forscher mit ihren Daten. In allen bisherigen neun Vergaben von Beobachtungszeit konnte nur etwa jedes siebte Proposal akzeptiert werden.

Technisch gesehen ist das Observatorium in einem exzellenten Zustand und läuft nach wie vor mit den primären Komponenten – wobei alle „lebenswichtigen Organe“ doppelt ausgelegt sind. Die Alterungseffekte der Instrumente entsprechen den Erwartungen und sind seit 2004 extrem gering, sodass wir mit keinen wissenschaftlich relevanten Beeinträchtigungen rechnen. Die erreichbare Missionsdauer ist aufgrund des mitgeführten Treibstoffvorrats bis etwa zum Jahr 2020 begrenzt. Die größte Gefahr geht von Mikrometeoriten aus – hier kann man nur die Daumen drücken – und auf die nächsten großen Entdeckungen gespannt sein [17]. Von besonderem Interesse sind weiterhin die Geburt von Sternen und die Entstehung von Planetensystemen. Röntgenmessungen im Vergleich mit Infra-

rot- und Submillimeterdaten von Herschel und ALMA versprechen einen Durchbruch im Verständnis der Materieakkretion auf junge Sterne und proto-planetare Scheiben sowie der damit verbundenen Emissionsprozesse und Jets.

Ebenso bildet sicher die dunkle Seite des Kosmos weiterhin einen Schwerpunkt. Die ESA-Mission Planck wird viele neue und vor allem hoch rotverschobene Galaxienhaufen entdecken. Mit ihrer Hilfe wird XMM-Newton sehr genau das Zusammenspiel von Dunkler Materie und Energie sowie dessen Variation über kosmologische Zeitskalen vermessen können.

Literatur

- [1] N. Schartel und M. Dahlem, Physikal. Blätter, Februar 2000, S. 37
- [2] M. Santos-Lleo et al., Nature 462, 997 (2009)
- [3] K. Dennerl et al., A&A 451, 709 (2007)
- [4] M. Güdel und Y. Naze, Astron. Astrophys. Rev. 17, 309 (2009)
- [5] J. H. M. M. Schmitt et al., A&A 432, L35 (2005)
- [6] W. Pietsch et al., A&A 465, 375, 2007
- [7] Supersoft X-ray Sources – New Developments, Astron. Nachr. 331, Heft 2 (2010)
- [8] P. A. Caraveo et al., Science 305, Issue 5682, 376 (2004)
- [9] F. Haberl et al., A&A 451, L17 (2006)
- [10] Variable and broad iron lines around black holes, Astron. Nachr. 327, Heft 10 (2006)
- [11] A. C. Fabian et al., Nature 459, 540 (2009)
- [12] S. Komossa et al., ApJ 603, L17 (2004)
- [13] G. Hasinger, T. Miyaji und M. Schmidt, A&A 441, 417 (2005)
- [14] H. Böhringer et al., MNRAS 264, L25 (1993)
- [15] A. Cattaneo et al., Nature 460, 213 (2009)
- [16] R. Massey et al., Nature 445, 286 (2007)
- [17] XMM-Newton: The Next Decade, Astron. Nachr. 329, Heft 2 (2008)

DIE AUTOREN

Norbert Schartel (FV Extraterrestrische Physik und im FV Gravitation und Relativitätstheorie) ging nach dem Studium an der TH Darmstadt ans Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) in Garching und promovierte 1995 an der LMU München über ROSAT-Beobachtungen.



Seit 1994 arbeitet er für die Europäische Weltraumorganisation ESA, zunächst mit dem International Ultraviolet Explorer (IUE), später für XMM-Newton. Hier ist er seit 2004 Project Scientist und somit für alle wissenschaftlichen Aspekte der Mission verantwortlich. Sein Forschungsschwerpunkt sind die Röntgenspektren aktiver Galaxien.

Matthias Ehle leitet die Arbeitsgruppe zur Benutzerunterstützung und Beobachtungsplanung mit XMM-Newton. Nach dem Studium in Köln und Bonn und der Promotion am dortigen MPI für Radioastronomie war er als DFG-Stipendiat an der Australia Telescope National Facility in Sydney tätig. Von 1997 an arbeitete er in der Röntgenastronomiegruppe am MPE, bevor er 2000 zur ESA nach Madrid wechselte. Er befasst sich mit nahen Galaxien und deren Wechselwirkung mit dem umgebenden Medium.

