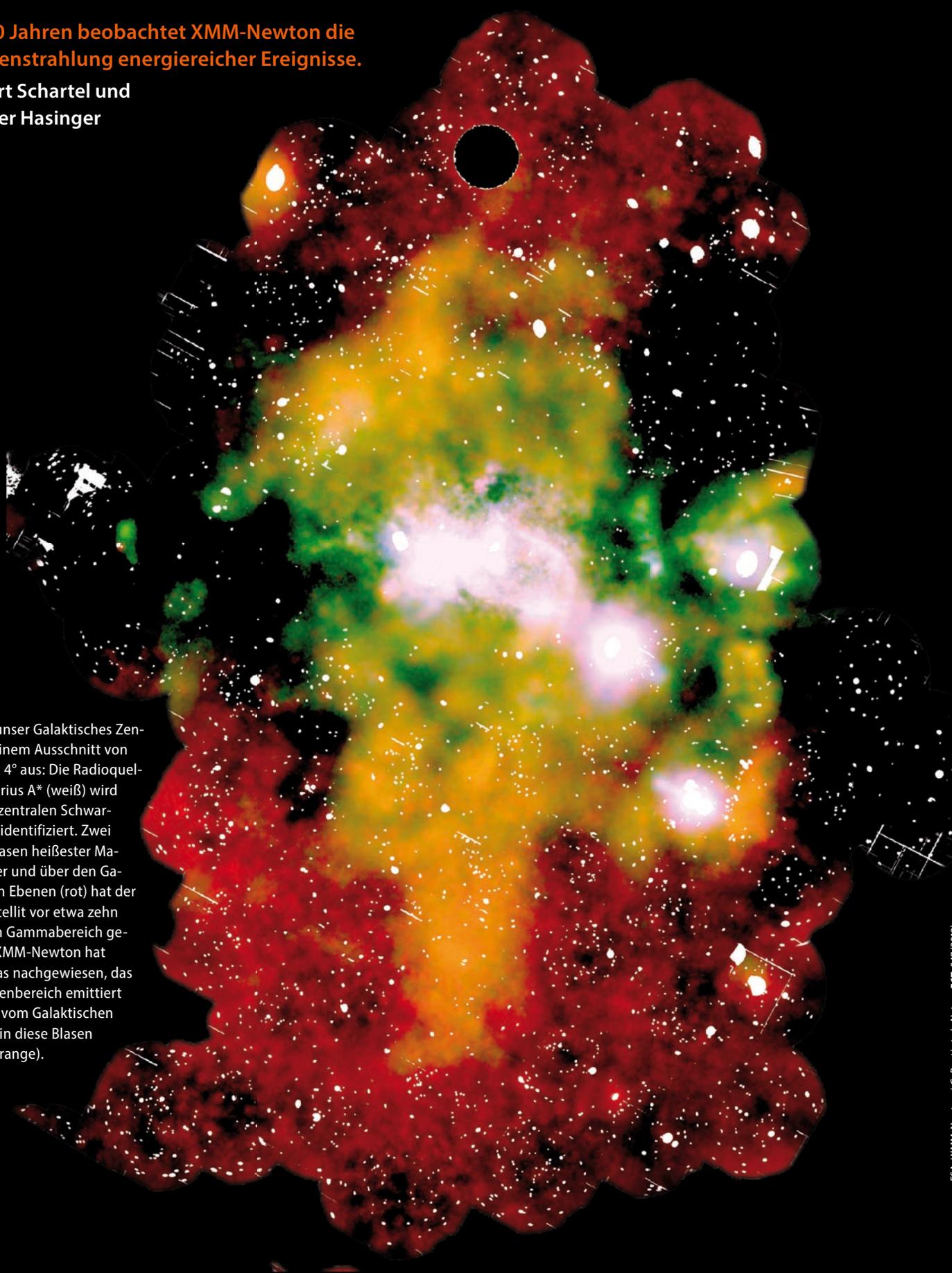


Blick ins heiße Universum

Seit 20 Jahren beobachtet XMM-Newton die Röntgenstrahlung energiereicher Ereignisse.

Norbert Schartel und
Günther Hasinger

So sieht unser Galaktisches Zentrum in einem Ausschnitt von etwa $2^\circ \times 4^\circ$ aus: Die Radioquelle Sagittarius A* (weiß) wird mit dem zentralen Schwarzen Loch identifiziert. Zwei riesige Blasen heißester Materie unter und über den Galaktischen Ebenen (rot) hat der Fermi-Satellit vor etwa zehn Jahren im Gammabereich gefunden. XMM-Newton hat heißes Gas nachgewiesen, das im Röntgenbereich emittiert wird und vom Galaktischen Zentrum in diese Blasen strömt (orange).



Alle Teilgebiete der Astronomie setzen heute Beobachtungen im Röntgenlicht ein. Sie helfen, die Fragen zu beantworten, ob ein Exoplanet bewohnbar ist, wie Neutronensterne und Schwarze Löcher Materie akkretieren und was die Dunkle Materie ist. Da die Erdatmosphäre hochenergetische Strahlung absorbiert, lässt sich der Röntgenhimmel nur vom Weltall aus beobachten, beispielsweise seit 20 Jahren mit dem Röntgenobservatorium XMM-Newton.

Das Röntgenobservatorium XMM-Newton der Europäischen Raumfahrtagentur startete am 10. Dezember 1999 und ist seither zusammen mit Chandra, dem Röntgenobservatorium der NASA, die instrumentelle Basis der Hochenergieastrophysik. Die hohe effektive Sammelfläche von XMM-Newton und die hohe räumliche Auflösung von Chandra ergänzen sich perfekt, um einmal aufgespürte Röntgenquellen im Detail zu untersuchen. Mit XMM-Newton lassen sich Planeten und Kometen im Sonnensystem, aber auch die aktiven galaktischen Kerne weit entfernter Galaxien beobachten. Einen Schwerpunkt bilden dabei heiße Plasmen mit Temperaturen von einigen 10^5 bis 10^8 K (**Infokasten**). Typische Beobachtungsprogramme drehen sich um Fragen zu den heißen Koronen von Sternen, zu kompakten Objekten wie Neutronensternen und Schwarzen Löchern und zu den tiefen Gravitationspotentialen Dunkler Materie in Galaxienhaufen. Darüber hinaus zählt XMM-Newton zu den Wegbereitern der Multiwavelength- oder Multimessenger-Astronomie.

Bereits 2002 waren erstmals gemeinsame Programme mit weiteren Satelliten oder Teleskopen möglich. Heute erlaubt es die Zusammenarbeit mit neun verschiedenen Observatorien, Strahlungsquellen im TeV-, Gamma-, Röntgen-, optischen und Radiobereich gleichzeitig zu beobachten. Dazu gehören insbesondere das Neil Gehrels Swift Observatory, das kurze Beobachtungen im Röntgen- und Gammabereich mit sehr schneller Reaktionszeit erlaubt, und das Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR)

mit einem abbildenden Teleskop für Energien von 3 bis 60 keV. Derzeit steht für gemeinsame Untersuchungen etwa ein Viertel der Beobachtungszeit von XMM-Newton zur Verfügung.

Im Folgenden illustrieren wir einige ausgesuchte Bereiche, in denen es in den letzten zehn Jahren besondere Fortschritte gab [2]. Wir gehen von nahen Objekten zu immer weiter entfernten, was gleichzeitig zur Diskussion von immer massereicheren Objekten führt. Anschließend werfen wir einen Blick in die nahe sowie die ferne Zukunft der Röntgenastronomie.

Exoplaneten

Die Erforschung der Exoplaneten ist das am schnellsten wachsende Teilgebiet der Astrophysik. Bis auf wenige Ausnahmen lassen sich Exoplaneten nur indirekt beobachten, beispielsweise durch die Verdunklung des Zentralgestirns während einer Eklipse (Transitmethode) oder durch die Oszillation des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt (Radialgeschwindigkeitsmethode). Weil Sterne im Röntgenbereich sehr variabel sind, ist es hier besonders interessant, Exoplaneten zu erforschen. Erste Studien deuten an, dass die Röntgenaktivität von Zentralgestirnen von Exoplanetensystemen mit heißen Jupitern höher ist als bei Sternen ohne Planetensystem [3]. Die Röntgenaktivität beruht auf der Rotation des Zentralgestirns, die anscheinend durch die heißen Jupiter langsamer abnimmt. Eventuell führt die Gezeitenwechselwirkung dazu, dass Drehimpuls vom planetaren Orbit auf die stellare Rotation übergeht. Ein interessantes Beispiel ist der Stern HD 189733 mit Röntgenausbrüchen während bestimmter Phasen des Orbits seines etwa Jupiter-schweren Exoplaneten [4]. Vermutlich löst der Planet die Ausbrüche immer dann aus, wenn er in die Nähe eines lokal hohen Sternmagnetfelds kommt (**Abb. 1**).

Eines der Kernziele heutiger astronomischer Forschung besteht darin, bewohnte Exoplaneten zu finden. Das kürzlich entdeckte System Trappist-1 besitzt sieben erdgroße

XMM-Newton: Mission und Instrumentierung

Die **Mission X-Ray Multi-Mirror Newton**, kurz XMM-Newton, gilt als zweiter Pfeiler des Wissenschaftsprogramms „Horizont 2000“ der Europäischen Raumfahrtorganisation. Mit einem Gewicht von 3,8 Tonnen, einer Länge von 10,75 m und einer Breite von 16,16 m ist XMM-Newton der größte europäische Wissenschaftssatellit. Die Dornier Satelliten-Systeme GmbH (DASA, heute Airbus) hat ihn gemeinsam mit mehr als 40 europäischen Firmen gebaut. Eine Ariane 504-Trägerrakete transportierte den Satelliten am 10. Dezember 1999 um 14:32 Uhr (GMT) von Kourou in Französisch-Guayana aus in einen hochelliptischen Orbit (Perigäum: 7000 km, Apogäum: 114 000 km) mit einer Umlaufzeit von 48 Stunden.

Die Besonderheit von XMM-Newton sind seine **sechs Instrumente**, die alle gleichzeitig beobachten [1]: zwei Röntgen-Reflexions-Spektrometer,

drei CCD-Röntgen-Kameras und ein optisches Teleskop [1]. Die Wolter-Typ-1-Röntgenteleskope bestehen aus je 58 Spiegelschalen und liefern eine räumliche Auflösung von 5 Bogensekunden FWHM (Full Width Half Maximum) bzw. 12 Bogensekunden HEW (Half Energy Width). Hinter zwei Röntgenteleskopen befinden sich Reflexionsgitter-Spektrometer (Reflection Grating Spectrometer, RGS), die es erlauben, Photonen mit Energien von 0,5 bis 2,1 keV mit einer spektralen Auflösung von 250 bei 15 Å zu beobachten.

Die European Photon Imaging Camera (EPIC) besteht aus zwei EPIC-MOS- und einer EPIC-pn-Kamera. Die EPIC-MOS-Kameras arbeiten hinter den Reflexionsgittern mit der 0-ten Ordnung und registrieren Photonen mit Energien von 0,2 bis 12 keV. Die FWHM der spektralen Auflösung beträgt 80 eV bei 1,5 keV und 145 eV bei 5,9 keV.

Die EPIC-pn-Kamera ist das fokale Instrument des dritten Röntgenteleskops. Sie arbeitet bei Energien von 0,2 bis 12 keV mit einem spektralen Auflösungsvermögen von 120 eV bei 1,5 keV und 180 eV bei 5,9 keV. Hervorzuheben ist ihre große effektive Sammelfläche von 1400 cm² bei 1,5 keV und 880 cm² bei 5,9 keV.

Ein Optical Monitor besteht aus einem Ritchey-Chretien-Teleskop. Mikrokanalplatten verstärken die Signale der Photonen für die CCDs. Der Optical Monitor besitzt verschiedene optische und UV-Filter, die in der Astronomie gebräuchlich sind.



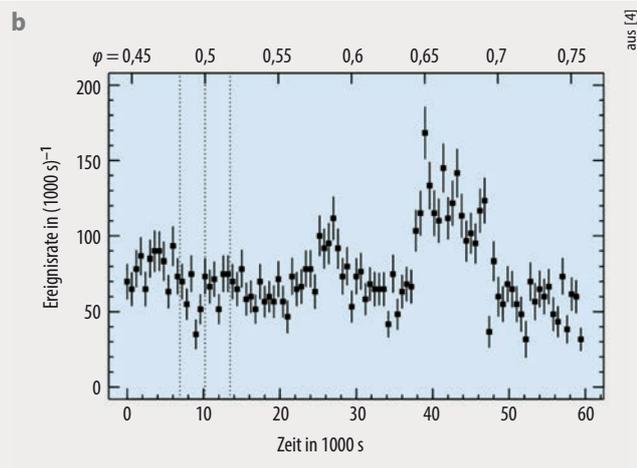
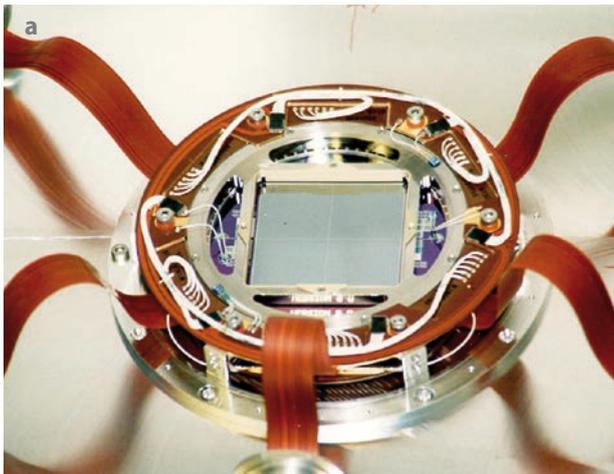


Abb. 1 Die pn-CCD-Kamera (a), entwickelt am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik und am Astronomischen Institut der Universität Tübingen, erlaubte es, beim Stern HD 189733 das stellare Aufblitzen unmittelbar nach der Verdunklung durch einen umlaufenden Planeten (b, $\varphi = 0,55 - 0,65$) zu beobachten.

Planeten, von denen drei in der habitablen Zone liegen. Aus Beobachtungen mit XMM-Newton leitete sich die Röntgenleuchtkraft des Zentralgestirns ab. Sie ist so groß, dass sie die Atmosphäre dieser drei Planeten signifikant beeinflussen sollte [5]. Denn ultraviolette und Röntgenstrahlung sind für die Photodissoziation von Wasser in der Stratosphäre verantwortlich, und dieser Prozess ist entscheidend für das Entweichen von Wasser aus Planetenatmosphären [6]. Daher sind die drei Planeten in der habitablen Zone von Trappist-1 wahrscheinlich komplett ausgetrocknet und eignen sich nicht für terrestrische Lebensformen.

Bisher kennen wir nur sehr wenige Exoplanetensysteme, die zu Studien im Röntgenbereich dienen können. Diese Situation ändert sich zurzeit dramatisch, vor allem durch den im letzten Jahr gestarteten Transiting Exoplanet Survey Satellite der NASA. Diese Mission wird etwa 200 000 nahe Sterne untersuchen und die Zahl der bekannten Exoplanetensysteme vervielfachen. Im Jahr 2026 soll die Exoplaneten-Mission PLATO der ESA folgen und ebenfalls tausende neuer Planeten entdecken. Somit eröffnet sich in den nächsten Jahren ein reiches Feld für Röntgenstudien von planetaren Systemen.

Magnetare

Manche Neutronensterne besitzen ein etwa tausendmal stärkeres Magnetfeld als üblich. Bei Werten von etwa 10^{11} bis 10^{12} Tesla heißen sie Magnetare und machen etwa ein Prozent der 3000 bekannten Neutronensterne aus. Ihre Existenz wurde postuliert, um sich wiederholende Gammastrahlenausbrüche (Soft Gamma Repeaters, SGR) zu erklären. Der erste Nachweis erfolgte 1998. Mit XMM-Newton lässt sich die Rotationsperiode von Magnetaren bestimmen und über deren Änderung die Feldstärke des Dipolmagneten. Im Juni 2009 überraschte der Neutronenstern SGR 0418+5729 [7], da in den Monaten nach dem Gammastrahlenausbruch die beobachtete Periodenänderung nur auf ein schwaches Magnetfeld von $B = 6 \times 10^8$ T hindeutete [8]. Das stellte die Annahme infrage, dass Gamma-

strahlenausbrüche in Zusammenhang mit Brüchen in der äußeren Neutronensternkruste stehen. Die große Sammelfläche von XMM-Newton erlaubte es, die registrierten Photonen phasenaufgelöst zu spektroskopieren (Abb. 2). Dabei zeigte sich deutlich eine Absorptionslinie [9]. Falls diese durch Protonen in einem starken Magnetfeld entsteht, lässt das auf eine Feldstärke von 2×10^{10} bis 1×10^{11} T schließen. Das Magnetfeld von SGR 0418+5729 ähnelt wohl demjenigen der Sonne während einer Eruption: Ein schwaches globales Dipolfeld wird von einem starken, aber lokalisierten (Eruptions-)Magnetfeld überlagert.

Heute beobachten XMM-Newton und NuSTAR Magnetare nach einem Ausbruch meist simultan, um die Modelle für die Röntgenemission der Oberfläche und des extremen Magnetfelds einzuschränken.

Ultraleuchtkräftige Röntgenquellen

In einer typischen Galaxie gibt es wenige ultraleuchtkräftige Röntgenquellen, in der näheren Umgebung der Milchstraße wurden diese schon in den 1980er-Jahren entdeckt. Die Leuchtkraft dieser Quellen übersteigt 10^{32} W und lässt

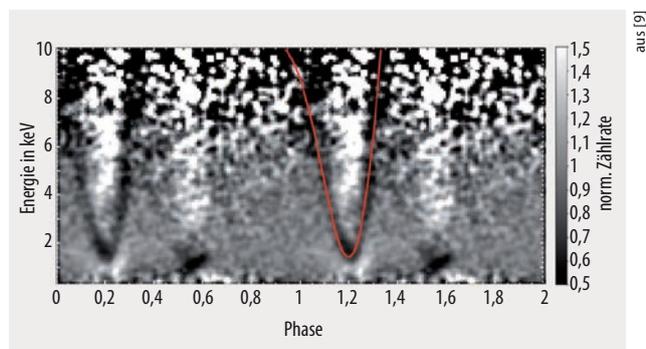


Abb. 2 Eine Absorptionslinie in der normalisierten Zählrate der CCD-Röntgenkameras von XMM-Newton lässt sich in einem Protonen-Zyklotron-Modell (rot) auf einen Plasmabogen an der Oberfläche des Magnetars SGR 0418+5729 zurückführen.

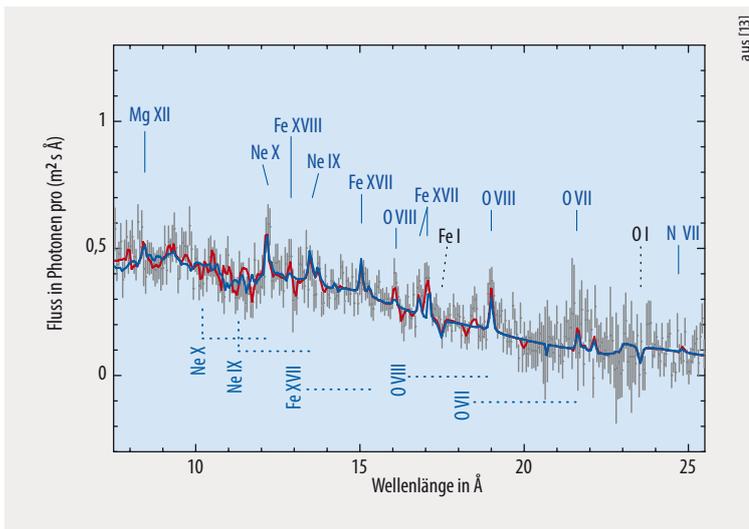


Abb. 3 Im hochaufgelösten Reflexionsgitterspektrum der ultraleuchtkräftigen Röntgenquelle NGC 1313 X-1 (grau) sind die Wellenlängen der prominentesten Emissionslinien im Ruhesystem und diejenigen einiger blauverschobener Absorptionslinien eingezeichnet. Die gestrichelten Linien zeigen die Doppler-Verschiebung für $v = 0,2c$ an. Fits mit geringer (rot) und großer Linienbreite (blau) passen ähnlich gut zu den Daten.

sich nicht durch die Akkretion von Materie auf ein stellares Schwarzes Loch erklären. Denn die maximale Leuchtkraft eines solchen Schwarzen Lochs hängt von seiner Masse ab. Die Strahlung übt eine Kraft auf die Materie aus, die vom Schwarzen Loch akkretiert wird. Überwiegt diese Kraft die gravitative Anziehung, kommt die Akkretion zum Erliegen. Dieser sogenannte Eddington-Grenzwert reicht bei den typischen Massen stellarer Schwarzer Löcher von etwa zehn Sonnenmassen nicht aus, um die beobachtete Leuchtkraft zu erreichen. Dazu wären einige hundert bis tausend Sonnenmassen notwendig – und die ultraleuchtkräftigen Quellen könnten das Bindeglied zwischen stellaren Schwarzen Löchern und den millionenfach schwereren Schwarzen Löchern in den Zentren von Galaxien darstellen. Die Masse einer ultraleuchtkräftigen Röntgenquelle in der Galaxie NGC 7793 ließ sich auf weniger als 15 Sonnenmassen einschränken [10].

Außerdem zeigte sich, dass verschiedene Eigenschaften stark variabler ultraleuchtkräftiger Röntgenquellen in der Andromeda-Galaxie denjenigen von Röntgendoppelsternen ähneln [11]. Für drei ultraleuchtkräftige Röntgenquellen gelang es, periodische Signale zu detektieren [12]. Dies deutet auf die Existenz eines Neutronensterns hin, weil Schwarze Löcher aufgrund der fehlenden festen Oberfläche keine streng periodischen Signale erzeugen können. Starke multipolare Magnetfelder, die Akkretionsraten weit oberhalb des Eddington-Grenzwerts erlauben könnten, kommen als Erklärung für die hohen Leuchtkräfte infrage. Winde, die sich mit 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit von zwei der kompakten Quellen wegbewegen, untermauern diese Interpretation (**Abb. 3**) – nur die hochauflösenden Reflexionsgitter von XMM-Newton ermöglichen derzeit solche Beobachtungen [13]. Im Allgemeinen scheinen ultraleuchtkräftige Röntgenquellen also nicht die Verbindung zwischen stellaren und superschweren Schwarzen Löchern darzustellen.

Aktive galaktische Kerne

Vermutlich enthält jede Galaxie in ihrem Zentrum ein superschweres Schwarzes Loch mit einigen Zehntausend bis Milliarden Sonnenmassen. Diese Masse und die Gesamtmasse der Galaxie hängen voneinander ab: Das zentrale Schwarze Loch und die Galaxie wachsen gekoppelt. Außerdem ist die maximale Größe der beobachteten Galaxien kleiner, als es Simulationen vorhersagen. Ein Mechanismus, der beide Phänomene erklärt, sollte immer dann aktiv sein, wenn die superschweren Schwarzen Löcher Materie akkretieren und als aktive galaktische Kerne zu beobachten sind. Dieses Szenario ist als kosmologischer Feedback bekannt. Um ihn im Detail zu beobachten und physikalisch zu erklären, hat XMM-Newton nahe aktive galaktische Kerne beobachtet und bei fast 40 Prozent der Kerne ultraschnelle Ausströmungen entdeckt [14]. In den Röntgenspektren finden sich Absorptionslinien von hochionisiertem Eisen (Fe^{24+} und Fe^{25+}), das sich mit bis zu $0,3c$ vom aktiven Kern entfernt. Wahrscheinlich emittiert die innere Akkretionsscheibe in der Nähe des superschweren Schwarzen Lochs die Ausströmungen – initiiert von magnetischen Feldern und weiter beschleunigt durch den hohen Lichtdruck. Die damit verbundene mechanische Leistung kann einen signifikanten Anteil des kosmologischen Feedbacks erklären [15]. Im Detail untersuchte XMM-Newton beispielsweise den aktiven galaktischen Kern der Galaxie IRAS 13224-3809 [16]. Die Äquivalenzweite der Absorptionslinie verringert sich, wenn der Röntgenfluss der inneren Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch ansteigt. Entweder hängt die Ionisation der ausströmenden Materie vom Röntgenfluss ab oder die Lage der Korona, welche die Röntgenstrahlung emittiert, verschiebt sich mit der Leuchtkraft. Weitere Beobachtungen an Objekten in größeren Entfernungen und mit höheren Leuchtkräften sind in Vorbereitung.

Fehlende Baryonen

Basierend auf der Elementverteilung nach der primordialen Nukleosynthese, den Dichteschwankungen in der kosmologischen Hintergrundstrahlung und Beobachtungen von Absorptionssystemen bei hoher Rotverschiebung lässt sich die Anzahl der Baryonen im Universum sehr gut abschätzen. In unserem lokalen Universum fehlen demnach etwa 30 bis 40 Prozent dieser normalen Materie. Diesem „missing baryon“-Problem widmete sich auch XMM-Newton vor dem Hintergrund, dass die „fehlenden“ Baryonen bei einer Temperatur von 10^5 bis 10^7 K vorliegen könnten und sich daher nur in Röntgenspektren zeigen.

Als mögliche Aufenthaltsorte kamen galaktische Halos infrage. Die Emissionslinien von ionisiertem Sauerstoff im Halo der Milchstraße passten jedoch ebenso wenig zu dieser Annahme wie die Messergebnisse aus den Halos anderer großer Spiralgalaxien [17]. Gestützt durch kosmologische Simulationen stellt ein Netzwerk dünner Gasfilamente, das den Kosmos durchzieht und die Galaxien verbindet, eine weitere Möglichkeit dar. Um diese Filamente nachzuweisen, beobachtete XMM-Newton einen Monat lang das im Röntgenlicht hellste und weit entfernte bekannte Objekt:

den Blazar IES 1553+113. Blazare gehören zu den aktiven galaktischen Kernen und zeichnen sich durch strukturlose Spektren aus. Im hochaufgelösten Reflexionsspektrum von XMM-Newton gibt es aber an zwei Stellen Absorptionslinien von hochionisiertem Sauerstoff (**Abb. 4**). Diese korrelieren mit Galaxienkonzentrationen entlang der Sichtlinie, die auch in den Simulationen auftreten [18]. Die Spektren bestätigten die Vermutung, dass sich die fehlenden Baryonen in einem Netzwerk dünner, heißer Gasfilamente aufhalten. Wie dieses genau aufgebaut ist, sollen zukünftige Beobachtungen mit XMM-Newton weiterer Absorptionssysteme erklären.

Kosmologie

Die Planck-Mission der ESA hat die kosmische Hintergrundstrahlung bei 2,7 K genau untersucht. Das ermöglichte es, die kosmologischen Parameter, welche die Materie- und Energiebilanz des Universums beeinflussen, genau zu bestimmen. Demnach liegen etwa fünf Prozent als gewöhnliche baryonische Materie vor, etwa 25 Prozent sind Dunkle Materie und etwa 70 Prozent Dunkle Energie. Mit Röntgenspektren lassen sich die kosmologischen Parameter im heutigen Universum bestimmen, während im Gegensatz dazu die Hintergrundstrahlung Informationen für den Zeitpunkt ihrer Emission liefert – als das Universum mit nur 380 000 Jahren noch sehr jung war. Außerdem ist es möglich, die Dunkle Materie physikalisch besser zu verstehen.

Um kosmologische Parameter zu messen, benutzen Astronomen sogenannte Standardkerzen: Sie vergleichen die beobachtete Helligkeit in einem bestimmten Spektralbereich mit der erwarteten Helligkeit für eine bestimmte Entfernung des Objekts und können diese so ermitteln. Im Röntgenbereich sind Galaxienhaufen mögliche Standard-

kerzen. Dort liegt ein Großteil der baryonischen Materie als sehr heißes Gas im tiefen Gravitationspotential der Dunklen Materie vor, wobei Temperatur und Röntgenleuchtkraft miteinander korreliert sind. Die damit berechneten kosmologischen Parameter zeigen eine Differenz von etwa drei Standardabweichungen zu den Resultaten der Planck-Mission [19]. Diese Diskrepanz könnte auf eine zeitliche Entwicklung der kosmologischen Parameter hindeuten. Um diese These zu erhärten, wäre es nötig, die kosmologischen Parameter als Funktion des Alters des Universums zu messen. Dies erfordert genügend leuchtkräftige Standardkerzen in großer Entfernung. Kürzlich ist es gelungen, Quasare – die leuchtkräftigsten astronomischen Objekte – als Standardkerzen einzuführen [20], weil ihre Leuchtkraft mit dem Verhältnis der emittierten UV- und Röntgenstrahlung verknüpft ist. Bei der Leuchtkraftbestimmung der Quasare tritt zwar eine größere Streuung auf als bei anderen Standardkerzen. Dennoch sind sie bisher unverzichtbar, weil sie ein Alter des Universums testen, für das keine andere Methode zur Verfügung steht.

Neue Emissionslinien im Röntgenbereich könnten ein Hinweis auf den Zerfall oder die Annihilation von Dunkler Materie sein. In Richtung der Andromeda-Galaxie [21] und in den addierten Spektren einer großen Zahl von Galaxienhaufen [22] fand sich eine solche Linie bei einer Energie von 3,5 keV (**Abb. 5**). Diese könnte auf sterile Neutrinos mit einer Masse von 7 keV hindeuten. Allerdings bestätigte eine etwa einmonatige Beobachtung der Zwerggalaxie Draco, die einen sehr hohen Anteil von Dunkler Materie besitzt, die Linie nicht. Nun stellt sich die Frage, welche astrophysikalischen oder teilchenphysikalischen Ursachen die verschiedenen Resultate erklären können. Beispielsweise wäre für Zwerggalaxien kein Signal zu erwarten, falls der Prozess nur in Gegenwart eines dritten, baryonischen Teilchens stattfinden kann.

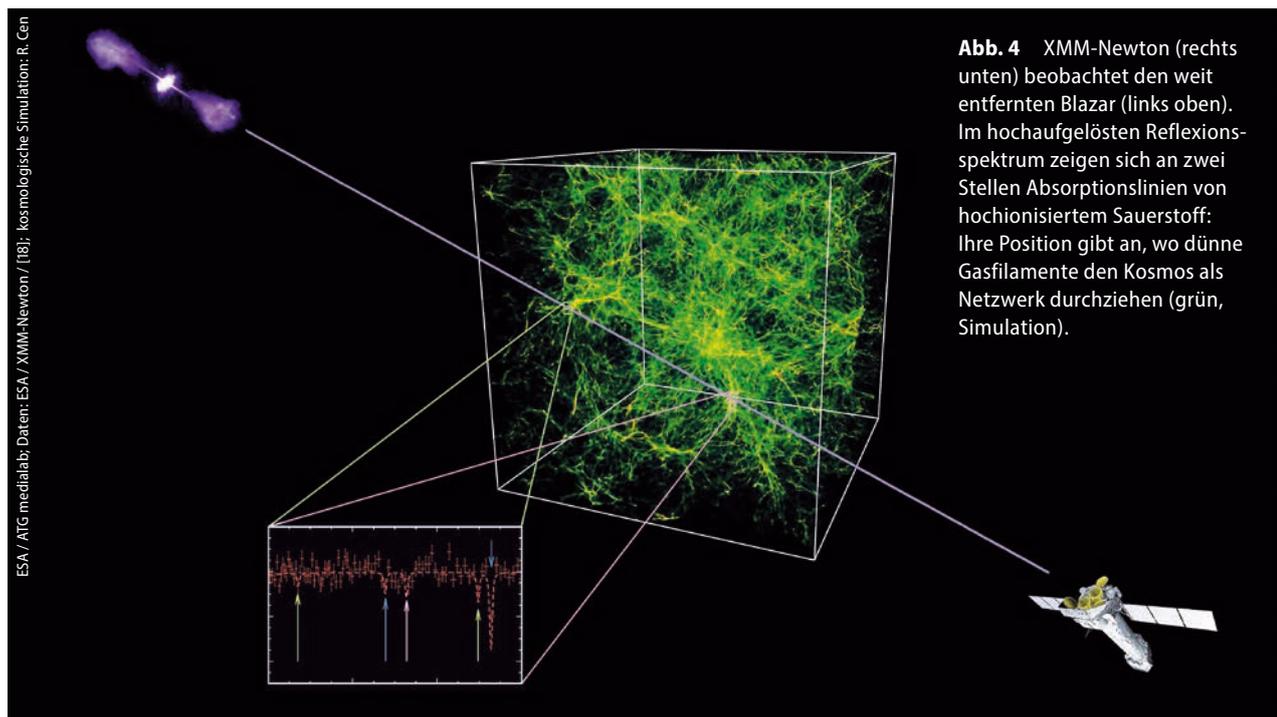


Abb. 4 XMM-Newton (rechts unten) beobachtet den weit entfernten Blazar (links oben). Im hochaufgelösten Reflexionsspektrum zeigen sich an zwei Stellen Absorptionslinien von hochionisiertem Sauerstoff: Ihre Position gibt an, wo dünne Gasfilamente den Kosmos als Netzwerk durchziehen (grün, Simulation).

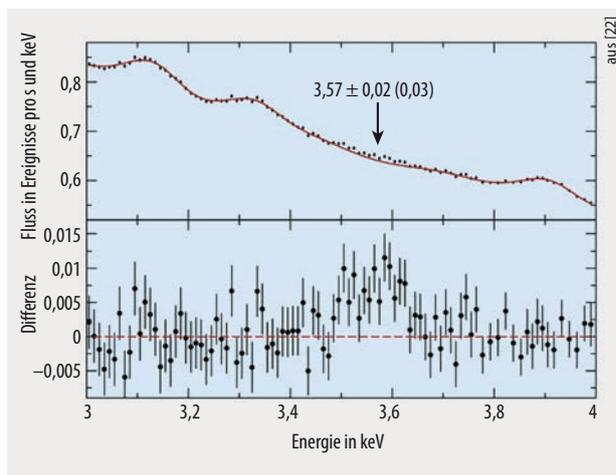


Abb. 5 In den aufaddierten Spektren von Galaxienhaufen zeigt sich eine Emissionslinie bei 3,57 keV, die von Teilchen der Dunklen Materie stammen könnte.

Neue und zukünftige Missionen

Das „extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array“ (eROSITA) ist das Hauptinstrument des russischen Satelliten „Spektrum-Röntgen-Gamma“, der im Juli dieses Jahres gestartet ist [23]. Das Teleskop besteht aus sieben identischen Wolter-1-Spiegelmodulen, die jeweils 54 ineinander verschachtelte Spiegelschalen enthalten. Das Detektorsystem, entwickelt am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, baut auf der Technologie der pn-CCD-Kamera von XMM-Newton auf. Während XMM-Newton zum Beobachten von Punktquellen und mäßig ausgedehnten Quellen (< 25 Bogenminuten) optimiert ist, deckt eROSITA weite Felder optimal ab: Die effektive Sammelfläche von eROSITA ist bis etwa 3 keV deutlich größer. Nach vier Jahren soll eROSITA acht vollständige Himmelsdurchmusterungen im mittleren Röntgenbereich bis 10 keV durchgeführt haben. Ziel ist es, viele hochvariable und aufblitzende Quellen zu detektieren: bis zu 100 000 Galaxienhaufen und -gruppen, bis zu 3 Millionen aktive galaktische Kerne und eine vergleichbar hohe Zahl galaktischer Quellen.

Mit dem „Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics“ (ATHENA) will die ESA voraussichtlich 2031 das nächste große Röntgenteleskop starten und XMM-Newton ersetzen. Hauptsächlich soll ATHENA die kosmologische Strukturbildung erforschen, beispielsweise das Wachstum von Galaxien und Galaxienhaufen sowie deren Wechselwirkung mit galaktischen Kernen. Als Spiegelfläche sind 1,4 m² bei 1 keV geplant, also etwa zehnmals so viel wie bei XMM-Newton. Ein Mikrok calorimeter soll für höchste spektrale Auflösung sorgen, während ein Wide Field Imager, den das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik entwickelt, ausgedehnte Quellen und Felder beobachten kann.

Parallel dazu arbeitet die NASA an einem Konzept für die Mission LYNX. Neben hoher Sammelfläche und Instrumenten der nächsten Generation liegt der Fokus dabei auf maximaler räumlicher Auflösung. Ziel ist es, die ersten Schwarzen Löcher zu entdecken und die Zeit der Reionisation zu beobachten. Die NASA tritt mit der

nächsten Satellitengeneration technisches Neuland, weil sie die Mission für sehr lange Verweildauern und die Instandhaltung im Weltraum konzipiert. Beispielsweise soll es möglich sein, LYNX zu betanken. Diese Entwicklung ist sicherlich eine Folge der 20 Jahre langen, kontinuierlich hohen wissenschaftlichen Produktivität von XMM-Newton und Chandra [24].

Literatur

- [1] N. Schartel und M. Dahlem, *Physikalische Blätter* **56**, 37 (2000)
- [2] N. Schartel und M. Ehle, *Physik Journal*, Oktober 2010, S. 29
- [3] K. Poppenhaeger und S. J. Wolk, *A&A* **565**, L1 (2014)
- [4] I. Pillitteri et al., *ApJ* **785**, 145 (2014)
- [5] P. J. Wheatley et al., *MNRAS* **465**, L74 (2017)
- [6] E. Bolmont et al., *MNRAS* **464**, 3728 (2017)
- [7] N. Rea et al., *Science* **330**, 944 (2010)
- [8] N. Rea et al., *ApJ* **770**, 65 (2013)
- [9] A. Tiengo, *Nature* **500**, 312 (2013)
- [10] C. Motch et al., *Nature* **514**, 198 (2014)
- [11] M. Middleton et al., *Nature* **493**, 187 (2013)
- [12] G. L. Israel et al., *Science* **355**, 817 (2017); F. Fürst et al., *ApJL* **831**, L14 (2016)
- [13] C. Pinto et al., *Nature* **533**, 64 (2016)
- [14] F. Tombesi et al., *A&A* **521**, A57 (2010)
- [15] F. Tombesi et al., *MNRAS* **422**, L1 (2012)
- [16] M. L. Parker et al., *Nature* **543**, 83 (2017)
- [17] J.-T. Li et al., *ApJL* **855**, L24 (2018); A. Bogdán et al., *ApJ* **850**, 98 (2017)
- [18] F. Nicastro et al., *Nature* **558**, 406 (2018)
- [19] F. Pacaud et al., *A&A* **592**, A2 (2016) & Planck Collaboration, *A&A* **594**, A24 (2015)
- [20] G. Risaliti und E. Lusso, *Nat. Astron.* **3**, 272R (2019)
- [21] A. Merlani et al., *MNRAS* **437**, 3550 (2014)
- [22] E. Bulbul et al., *ApJ* **789**, 13 (2014)
- [23] P. Predehl, *AN* **338**, 159 (2017)
- [24] N. Schartel, *AN* **333**, 209 (2012)

Die Autoren

Norbert Schartel (FV Extraterrestrische Physik sowie FV Gravitation und Relativitätstheorie) studierte Physik an der TH Darmstadt, arbeitete am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) und promovierte 1995 an der LMU München über ROSAT-Beobachtungen. Seit 1994 ist er für die Europäische Weltraumorganisation ESA tätig und seit 2004 als Project Scientist von XMM-Newton verantwortlich für alle wissenschaftlichen Aspekte der Mission. Er erforscht vor allem die Röntgenspektren aktiver Galaxien.



Günther Hasinger studierte Physik an der LMU München und promovierte dort 1984 mit einer am MPE angefertigten Arbeit. Nach Gastdozenturen in den USA war er Direktor des Astrophysikalischen Instituts Potsdam und Professor an der U Potsdam. Danach war er Direktor der Hochenergie-Gruppe am MPE, wissenschaftlicher Direktor am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und Direktor des Instituts für Astronomie der Universität von Hawaii. Seit 2018 ist er Wissenschaftsdirektor der ESA.



C. Mukherjee

Dr. Norbert Schartel und **Dr. Günther Hasinger**, ESA – ESAC, Camino bajo del Castillo s/n, Urbanización Villafranca del Castillo, Villanueva de la Cañada, E-28692 Madrid, Spanien