

Didaktisches Material zu diesem Beitrag: www.wissenschaft-schulen.de

Röntgenpulsare

Sie gehören zu den hellsten Röntgenguellen des Milchstraßensystems. Der zeitliche Verlauf ihrer gepulsten Strahlung weist eine für den jeweiligen Pulsar charakteristische Form auf. Während gut verstanden ist, wie die Röntgenstrahlung entsteht, gibt die Interpretation der Pulsformen noch Rätsel auf.

m Frühjahr 1971 beobachteten Riccardo Giacconi und seine Mitarbeiter mit dem Röntgensatelliten UHURU eine bereits seit einigen Jahren bekannte helle Röntgenquelle. Dabei stellten sie fest, dass diese Quelle mit einer Periode von knapp fünf Sekunden und großer Regelmäßigkeit pulsiert. Mit Centaurus X-3 hatten sie den ersten Röntgenpulsar entdeckt.

Diese Entdeckung, die gerade einmal 35 Jahre her ist, fällt gleichwohl noch in die Anfangszeit der Röntgenastronomie. Da Röntgenstrahlen aus dem Weltraum in der Erdatmosphäre vollständig absorbiert werden, erfordert ihre Beobachtung nämlich hochfliegende Raketen oder Satelliten. Geeignete Raketen standen erstmals nach dem zweiten Weltkrieg zur Verfügung. Raketenflüge bestätigten zunächst die theoretisch vorhergesagte Röntgenstrahlung der Sonnenkorona und führten dann im Laufe der 60er Jahre zur Entdeckung zahlreicher heller Röntgenquellen außerhalb des Sonnensystems. Ab 1971 ermöglichten satellitengebundene Teleskope längere und immer genauere Beobachtungen bis hin

zu den hochaufgelösten Lichtkurven und Spektren, die heute mit modernen Satelliten wie XMM oder INTEGRAL gewonnen werden.

Neutronensterne in Doppelsternsystemen

Die seit den sechziger Jahren in immer größerer Zahl entdeckten hellen diskreten Quellen sind sehr viel stärkere Röntgenstrahler als normale Sterne. Es gab schon bald theoretische Überlegungen, dass solche extrem hohen Röntgenleuchtkräfte in Doppelsternen entstehen könnten, wenn die eine Komponente des Systems ein Neutronenstern ist. Diese Vorstellungen waren jedoch hypothetisch und galten als recht spekulativ. Immerhin hatte die Entdeckung der Radiopulsare im Jahr 1967 und deren Deutung als rotierende Neutronensterne bereits eine Bestätigung für die Existenz dieser zunächst theoretisch vorhergesagten kompakten Objekte erbracht. Die pulsierenden Röntgenquellen lieferten nun überzeugende Hinweise darauf, dass ihre Strahlung tatsächlich von einem Neutronenstern in einem Doppelsternsystem stammt.

Genaue Messungen der Pulsperiode von Centaurus X-3 zeigten bald, dass diese regelmäßigen Schwankungen unterworfen ist. Im Laufe von zwei Tagen variiert sie mit einer Amplitude von sieben Millisekunden sinusförmig um ihren Mittelwert von knapp fünf Sekunden. Ein solches Verhalten erwartet man von einer Quelle, die einen Begleitstern umkreist: Wegen des Dopplereffekts erscheint die Pulsperiode verkürzt, wenn die Quelle sich dem Beobachter nähert, und verlängert, wenn sie sich von ihm entfernt.

In vielen Fällen konnte der jeweilige Begleitstern des Pulsars durch optische Beobachtungen identifiziert werden. Dass der gefundene Stern tatsächlich zur Röntgenquelle gehört und nicht nur zufällig in einer ähnlichen Richtung am Himmel steht, ist daran zu erkennen, dass auch er sich in einer Umlaufbahn bewegt, und zwar mit derselben Periode wie die Röntgenquelle. Diese Bewegung erschließt man aus der Beobachtung der Spektrallinien, die aufgrund des Dopplereffekts um eine mittlere Wellenlänge periodisch schwanken.

Den entscheidenden Hinweis auf die Natur des Röntgensterns liefert die Pulsperiode der Röntgenstrahlung. Rechnet man die aufgrund der Bahnbewegung entstehenden Dopplervariationen heraus, so erweist sich die Pulsperiode als außerordentlich regelmäßig und stabil. Der einzige bekannte Mechanismus für einen

- Abb. 1: Ein Röntgenpulsar ist ein rotierender, stark magnetisierter Neutronenstern, auf den Gas aus der Hülle eines Begleitsterns überströmt. Das Gas nähert sich dem Neutronenstern spiralförmig innerhalb einer flachen Scheibe, um schließlich auf seine Oberfläche hinabzustürzen. (Bild: Roland Speith)
- Abb. 2: Für sechs Neutronensterne in bedeckenden Systemen ließen sich die Bahnparameter und Massen bestimmen. Wesentlich genauer bekannt sind die Massen von vier Neutronensternen in binären Radiopulsaren; diese liegen innerhalb des durch die gestrichelten Linien markierten schmalen Bereichs.

derart stabilen periodischen Vorgang ist eine Rotation. So dreht sich also der Neutronenstern im System Centaurus X-3 innerhalb von knapp fünf Sekunden einmal um seine Achse. Es gibt aber auch noch kürzere Perioden: Der schnellste derzeit bekannte Röntgenpulsar dieses Typs ist der Ende 2004 entdeckte IGR J00291+5934. Seine Periode beträgt nur 1.7 Millisekunden.

Ein normaler Stern könnte so schnell nicht rotieren. Die Grenze ist dann erreicht, wenn die Rotationsperiode des Sterns derjenigen Zeit entspricht, die ein frei fallender Körper benötigt, um ihn in der Nähe seiner Oberfläche einmal zu umrunden. Im Fall der Sonne wären das etwa 10 000 Sekunden. Würde sie sich in kürzerer Zeit um ihre Achse drehen, so flögen ihre äußeren Gasschichten davon. Eine Umdrehung in Bruchteilen einer Sekunde ist bei normalen Sternen also nicht möglich; es muss sich bei der Röntgenquelle um ein wesentlich kompakteres Objekt handeln.

Drei Möglichkeiten kommen in Betracht: Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher. Schwarze Löcher kann man ausschließen: Ein rotierendes Schwarzes Loch ist axialsymmetrisch und kann deshalb keine regelmäßigen Pulse produzieren. Zwar gibt es auch diskrete, helle Röntgenquellen, hinter denen man Schwarze Löcher vermutet, bei diesen fluktuiert die Helligkeit jedoch aperiodisch. Die Entdeckung von regelmäßigen Pulsen ist ein sicheres Zeichen dafür, dass eine Röntgenquelle kein Schwarzes Loch ist. Weiße Zwerge können mit Perioden von wenigen Sekunden rotieren. Für Centaurus X-3 käme ein Weißer Zwerg nach



diesem Kriterium also in Frage (und das war auch die erste Vermutung der Entdecker), für die schneller rotierenden Pulsare allerdings nicht. Neutronensterne schließlich können Rotationsperioden bis hinab zu etwa einer Millisekunde aufweisen. Das umfasst die Perioden aller bisher entdeckten Röntgenpulsare.

Wie wir noch sehen werden, passen sowohl die Leuchtkraft als auch das Magnetfeld des Röntgensterns zwanglos zu den Eigenschaften von Neutronensternen und lassen sich mit Weißen Zwergen nicht gut vereinbaren. Deshalb geht man heute davon aus, dass sich hinter jedem binären Röntgenpulsar ein Neutronenstern in einem Doppelsternsystem verbirgt.

Eine kosmische Röntgenröhre

Die Dopplervariationen der Spektrallinien beziehungsweise der Pulsperiode verraten aber noch weit mehr über das Doppelsternsystem. Sie zeigen nicht nur, dass die beiden Sterne umeinander kreisen, sondern auch, wie schnell sie sich bewegen. Daraus wiederum kann man auf ihre Massen und ihren Abstand schließen. Allerdings liefert die Dopplerverschiebung zunächst nur die Radialgeschwindigkeit (die Komponente in Richtung der Sichtlinie). Um auf die reale Geschwindigkeit der Sterne zu schließen, müssten wir wissen, wie steil oder wie flach wir auf die Bahnebene blicken.

Es gibt einige wenige Systeme, bei denen dies recht genau bekannt ist: Hier blicken wir unter einem so flachen Winkel auf die Bahnebene, dass der Begleiter die Röntgenquelle zeitweise verdeckt. Bei Centaurus X-3 zum Beispiel setzen die Röntgenpulse alle zwei Tage für einen halben Tag aus, während der Neutronenstern von uns aus gesehen hinter seinem Begleiter vorbeiläuft. Hier beträgt die Inklination also nahezu 90 Grad (aus der beobachteten Dauer der Bedeckung kann man sie noch genauer bestimmen), und wenn dann noch die beiden Dopplervariationen und die Bahnperiode bekannt sind, liegen alle nötigen Informationen vor, um die kompletten Bahnparameter zu bestimmen. Insbesondere erhält man die Masse des Neutronensterns und den Abstand der beiden Sterne. Die Massen der Neutronensterne in den heute bekannten bedeckenden Systemen liegen zwischen einer und 1.9 Sonnenmassen (Abb. 2).

Wesentlich genauer ließen sich die Massen der Neutronensterne in binären Radiopulsaren bestimmen (mehr dazu im Beitrag von Michael Kramer auf S. 30ff. in diesem Heft). Im Rahmen der Fehlergrenzen sind fünf der für Röntgenpulsare ermittelten Massen mit denen der Radiopulsare gut vereinbar. Die Masse des Neutronensterns von Vela X-1 scheint allerdings größer zu sein, möglicherweise aufgrund fortgesetzter Akkretion von Materie (siehe unten). Die Begleitsterne weisen zwischen zwei und 25 Sonnenmassen auf. Abb. 3 zeigt die Bahnen mehrerer Neutronensterne um ihre Begleiter im Vergleich. Mit einem Abstand in der Größenordnung von hundert Lichtsekunden ist jeder dieser Neutronensterne seinem Begleiter näher als Merkur der Sonne.

»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht 🛛 🛛 🔟 🗖

Als Ergänzung zu diesem Beitrag zeiadresse www.wissenschaft-schulen.de, wie man aus den Original-Beobachtungsdaten des ersten entdeckten Röntgenpulsars Centaurus X-1 mit Schulmitteln die Massen der beiden Sterne und ihren Abstand recht gut abschätzen kann. Weitere Themen sind die extremen Eigenschaften von Neutronensternen und die gravitative Ablenkung von Licht, das nahe an einem Neutronenstern vorbeikommt.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.



samten Wellenlängenbereich. Um diese Leuchtkraft zu erzeugen, ist die Akkretion von sieben Milliardsteln einer Sonnenmasse pro Jahr erforderlich – eine Rate, die der Begleitstern problemlos über lange Zeiträume liefern kann.

Ein Neutronenstern mit starkem Magnetfeld

Da wir die Röntgenstrahlung gepulst sehen, wenn der Neutronenstern rotiert, strahlt er offensichtlich nicht in alle Richtungen gleichmäßig ab. Um das zu erklären, wurde schon bald angenommen, dass der Neutronenstern in einem Röntgenpulsar ein starkes magnetisches Feld besitzt. Beobachtungen bestätigten diese Annahme später anhand des Röntgenspektrums. Das Magnetfeld sorgt dafür, dass das überströmende Gas nicht gleichmäßig auf der ganzen Oberfläche des Neutronensterns niedergeht, sondern gebündelt in der Nähe des magnetischen Nord- und Südpols auftrifft.

Der Grund hierfür liegt darin, dass das überströmende Gas ionisiert ist. In einem Magnetfeld kann es sich deshalb längs der Feldlinien frei bewegen, quer dazu aber nicht: Die Lorentzkraft zwingt jedes geladene Teilchen, sich auf einer Spiralbahn um die Magnetfeldrichtung zu bewegen. Für das überströmende Gas bedeutet das, dass es weit entfernt vom Neutronenstern wie oben beschrieben in einer flachen Scheibe kreist, dass diese Bewegung aber in der Nähe des Neutronensterns durch das Magnetfeld zunehmend gestört und dann ganz aufgebrochen wird. In einer Übergangszone am Innenrand der Scheibe, etwa 1000 Kilometer vom Neutronenstern entfernt. tritt das ionisierte Gas in die Magnetosphäre des Neutronensterns über und folgt nun den magnetischen Feldlinien bis zur Sternoberfläche (Abb. 4). Dort trifft es auf zwei kleinen Flächen mit einer Ausdehnung von wenigen Quadratkilometern in der Nähe der beiden magnetischen Pole auf (Abb. 5). Wenn sich der Neutronenstern dreht, wirken die beiden kleinen Emissionsgebiete wie rotierende Scheinwerfer und die Röntgenquelle erscheint gepulst - als »kosmischer Leuchtturm«.

Eine Bestätigung für die vermutete Existenz des starken Magnetfelds wurde erstmals 1987 im Spektrum von Hercules X-1 gefunden: eine Absorptionslinie bei einer Photonenenergie von etwa 40 keV (40000 Elektronenvolt). Diese Linie kommt dadurch zustande, dass ein Elektron im Magnetfeld, klassisch betrachtet, einer spiralförmigen Bahn um die Magnetfeldrichtung folgt. Es kreist dabei mit der so genannten Zyklotronfrequenz, die proportional zur magnetischen Feldstärke ist. Strahlung, deren Frequenz mit der Zyklotronfrequenz übereinstimmt, wird an dem Elektron resonant gestreut. Die Linie im Spektrum zeigt also die Zyklotronfrequenz an, aus der man auf das Magnetfeld schließen kann: 40 keV entsprechen einem Magnetfeld von 300 Millionen Tesla. Zum Vergleich: Die

In einem derart engen Doppelsternsystem kommt es zu einem Materieüberstrom von der Hülle des Begleiters auf den Neutronenstern. Das überströmende Gas stammt entweder aus dem Wind des Begleitsterns, durch den sich der Neutronenstern hindurch bewegt, oder es kommt zum so genannten »Roche-Überstrom«: Wenn der Punkt zwischen Neutronenstern und Begleiter, an dem sich die Schwerkraft der beiden Sterne gerade die Waage hält, auf dem Rand des Begleitsterns liegt, dann kann Gas über diesen Sattelpunkt des Potenzials in den Potenzialtopf des Neutronensterns strömen. Um diesen bildet sich eine dünne Scheibe aus, in der sich das Gas dem Neutronenstern in engen Spiralen allmählich nähert, um schließlich auf seine Oberfläche hinabzustürzen (siehe Abb. 1). Beim freien Fall auf einen Neutronenstern von 1.4 Sonnenmassen und einem Radius von zehn Kilometern erreicht ein Teilchen 65 Prozent der Lichtgeschwindigkeit.

Feldlinien bis zur Sternoberfläche. (Der Außenrand der Scheibe ist nicht maßstabsgerecht gezeichnet; er würde weit außer-

halb des Bildes liegen.)

Beim Auftrefen des Gases auf den Stern wird seine Bewegungsenergie wie in einer gigantischen Röntgenröhre in Strahlung umgewandelt. Diese kinetische Energie beträgt ungefähr ein Drittel der Ruheenergie des Gases – die Akkretion ist ein extrem effizienter Mechanismus zur Erzeugung einer hohen Strahlungsleistung. Die Röntgenleuchtkraft von Centaurus X-3 beträgt 10³¹ Watt, das entspricht der 20000-fachen Strahlungsleistung der Sonne im geFeldstärke des Erdmagnetfeldes beträgt fünf hunderttausendstel Tesla, im Labor kann man statische Felder von einigen zehn Tesla erzeugen. In den letzten Jahren wurden in zahlreichen weiteren Röntgenpulsaren Zyklotronlinien entdeckt, die allesamt Magnetfelder von 100 Millionen Tesla und mehr anzeigen.

Die Pulsformen

Nicht nur die Spektren, auch die Pulsformen wurden in den 35 Jahren seit der Entdeckung des ersten Röntgenpulsars mit immer höherer Genauigkeit beobachtet. Heute sind etwa 80 akkretierende Röntgenpulsare bekannt, mit Pulsperioden zwischen 1.7 Millisekunden und 10000 Sekunden. Die meisten befinden sich im Milchstraßensystem, einige in den Magellanschen Wolken. Die von Röntgenpulsaren empfangene Strahlung weist eine große Vielfalt von Pulsformen auf, wie Abb. 6 anhand einiger Beispiele zeigt. Die Pulsformen sind nicht nur von Quelle zu Quelle sehr unterschiedlich, sondern variieren im Allgemeinen auch mit dem Energiebereich der Strahlung (Abb. 6a, b).

»Zum jetzigen Zeitpunkt kann kein theoretisches Modell die beobachteten Pulsformen reproduzieren«, schrieben Stuart Shapiro und Saul Teukolsky im Jahr 1983 ([1]). Mittlerweile haben wir zwar viel darüber gelernt, welche Faktoren zur Entstehung der Pulsformen beitragen – doch der obige Satz gilt im Grunde nach wie vor: Ein umfassendes Modell, das alle bekannten Pulsformen reproduzieren könnte, ihre Unterschiede Abb. 5: In der Nähe der magnetischen Pole prallt überströmendes Gas auf den Neutronenstern. In jeder Sekunde stürzen hundert Milliarden Tonnen Gas mit mehr als der halben Lichtgeschwindigkeit auf eine Fläche von wenigen Quadratkilometern.

erklären würde und aus dem man weitere Informationen über den Neutronenstern oder die Akkretion ableiten könnte, existiert bis heute nicht. Viele wesentliche Einzelteile des Puzzles wurden jedoch inzwischen genauer untersucht.

Die Herkunft der Strahlung: Wenige Quadratkilometer am magnetischen Pol

Die Röntgenstrahlung entsteht wie oben beschrieben nahe der beiden magnetischen Pole, wo das akkretierende Gas abgebremst wird (Abb. 5). Dort treffen auf eine Fläche von wenigen Quadratkilometern 100 Milliarden Tonnen Materie pro Sekunde mit einer Geschwindigkeit von 200000 Kilometern pro Sekunde auf. Bei den weniger leuchtkräftigen Quellen befindet sich das Gas bis zur Sternoberfläche praktisch im freien Fall. Es entsteht ein so genannter »heißer Fleck« auf der Sternoberfläche, der bei etwa zehn Millionen Grad Röntgenstrahlung emittiert.

Ist die Leuchtkraft höher, dann trägt die von unten entweichende Strahlung dazu bei, das herabstürzende Gas bereits abzubremsen, bevor es den Stern ganz erreicht hat. Im untersten Teil des Gas-



Abb. 6: Die Signalformen der von verschiedenen Röntgenpulsaren empfangenen Pulse unterscheiden sich beträchtlich voneinander. Dargestellt sind die Pulse jeweils über zwei Pulsperioden. Die Pulsform variiert im Allgemeinen auch mit dem Energiebereich der Strahlung (a, b). (Quellen der Daten: Nagase et al. 1992, ApJ **396**, 147 [a, b]; Kahabka 1987, MPE-Report 204 [c]; Greenhill et al. 1998, Publ. Astron. Soc. Aust. 15, 254 [d]; Levine et al. 1988, ApJ 327, 732 [e]; Parmar et al. 1989, ApJ 338, 373 [f])





Abb. 7: Das grundlegende Modell für die Entstehung der Pulsformen der emittierten Röntgenstrahlung geht von zwei kleinen Emissionsgebieten aus, die sich an den beiden magnetischen Polen befinden. Rotiert der Stern, so wandern die Gebiete durch das Sichtfeld, sodass die beobachtete Gesamthelligkeit variiert. Das vom Modell vorhergesagte Pulsprofil ist in jedem Bild rechts oben eingeblendet; der senkrechte Strich markiert die zum Bild gehörige Pulsphase. Links ist ein Modell mit zwei Akkretionssäulen dargestellt, wobei der Neutronenstern etwas mehr als eine Vierteldrehung ausführt. Die rechte Spalte zeigt dasselbe Modell inklusive Lichtablenkung.

stroms sinkt das Gas dann langsam zu Boden. Es hat sich bei der Abbremsung stark aufgeheizt; die Röntgenstrahlung entweicht seitlich aus diesem heißen, abgebremsten Gasstrom, der so genannten »Akkretionssäule«. Das einfachste Modell für die Entstehung der Pulse besteht also in zwei heißen Flecken beziehungsweise zwei Akkretionssäulen an den beiden magnetischen Polen, die bei der Rotation des Sterns zeitweise sichtbar und zeitweise hinter dem Stern verborgen sind. Abb. 7 (links) zeigt eine Vierteldrehung für ein Modell mit zwei Akkretionssäulen.

Zur Verdeutlichung trägt der schematisch dargestellte Neutronenstern ein Muster aus $30^{\circ} \times 30^{\circ}$ großen Karos, die um die Rotationsachse angeordnet sind. Der Pulsarist in diesem Modell hell, wenn beide Akkretionssäulen von der Seite gesehen werden (1. Bild). Etwas später verschwindet die hintere Akkretionssäule hinter dem Neutronenstern (2. Bild) und bald darauf wird die helle Seitenfläche der vorderen ebenfalls unsichtbar. Von oben gesehen ist die Akkretionssäule dunkel, da die Strahlung gegen das nachströmende Gas nicht entweichen kann.

Abb. 8: a) Aufgrund der gravitativen Ablenkung der Lichtstrahlen kann ein entfernter Beobachter 84 Prozent der Oberfläche eines Neutronensterns mit 1.4 Sonnenmassen und zehn Kilometern Radius einsehen.
b) Auch eine Lichtquelle, die

b) Auch eine Lichtquelle, die sich von einem Beobachter aus gesehen hinter einem Neutronenstern befindet, kann sichtbar sein; in diesem Fall ist ein Doppelbild möglich. Abb. 9: a) Jede Akkretionssäule ist von einem leuchtenden Röntgenhalo umgeben. Wandert der Akkretionsstrom durch die Sichtlinie, verdeckt er zeitweise die Akkretionssäule und den Halo (Bild b und c).

Nach einer Vierteldrehung erscheint der Pulsar dunkel (4. Bild). Dieses einfachste Modell ist noch sehr unvollständig und in einem wichtigen Aspekt sogar völlig falsch.

Relativistische Lichtablenkung

Das bisher betrachtete Modell berücksichtigt nämlich nicht, dass relativistische Effekte bei so kompakten Objekten wie Neutronensternen eine große Rolle spielen. Für die Entstehung der Pulsformen ist insbesondere die Lichtablenkung entscheidend.

Dies illustriert Abb. 8: Ein Beobachter empfängt Strahlung nicht nur von der ihm zugewandten Hälfte des Neutronensterns, sondern kann ein Stück weit »um den Stern herum sehen« (Abb. 8a). Von der Oberfläche einer masselosen Kugel könnte ein sehr weit entfernter Beobachter 50 Prozent einsehen. Hat die Kugel jedoch eine Masse, dann sieht er mehr: Von der Oberfläche der Sonne sind aus großer Entfernung 50.0002 Prozent sichtbar, von der eines Neutronensterns mit 1.4 Sonnenmassen und zehn Kilometern Radius aber 84 Prozent. Aufgrund der Lichtablenkung kann auch eine Quelle, die sich aus der Perspektive eines Beobachters hinter dem Neutronenstern befindet, sichtbar sein (Abb. 8b); in diesem Fall können Doppelbilder entstehen.

Wie stark die Lichtablenkung die Pulsformen beeinflusst, illustriert die rechte Spalte der Abb. 7: Dargestellt ist dasselbe Modell wie in der linken Spalte, jedoch unter Berücksichtigung der Lichtablenkung. Anhand des Karomusters des Sterns ist zu erkennen, dass mehr als die Hälfte der Oberfläche sichtbar ist. Zudem erscheint der Stern größer, als er tatsächlich ist. Die hintere Säule bleibt sichtbar, wenn sie hinter den Stern wandert: Sie wird länglich verzerrt (3. Bild), dann entsteht ein Doppelbild (4. Bild). Befindet sie sich von uns aus gesehen genau hinter dem Stern, sehen wir sie als geschlossenen Ring (5. Bild).

Am hellsten erscheint die Akkretionssäule dann, wenn sie sich mitten auf der abgewandten Seite des Neutronensterns befindet! Das erzeugt ein Maximum im Pulsprofil – dort, wo man ohne Lichtablenkung ein Minimum vorhersagen würde. Dass dieses Maximum so ausgeprägt ist, liegt an der speziellen Wahl der Blick-





richtung, bei der im 5. Bild die Achse der beiden Akkretionssäulen genau mit der Blickrichtung zusammenfällt. Bereits bei einer kleinen Abweichung von dieser Blickrichtung ist das Maximum deutlich kleiner oder verschwindet ganz.

Bemerkenswert ist auch, dass es keinen Zeitpunkt mehr gibt, zu dem der Pulsar dunkel ist. Wenn man von dem schmalen Maximum einmal absieht, ist das Pulsprofil wesentlich weniger stark moduliert, als man es ohne Lichtablenkung vorhergesagt hätte. Dies ist auch anschaulich klar, da man ja »fast immer alles sieht« – hinter einem Neutronenstern kann man eben kaum etwas verstecken!

Realistischere Modelle: Reprozessierung ...

Um dieses einfachste Modell realistischer zu gestalten, sind zahlreiche weitere Aspekte zu berücksichtigen. Zunächst einmal entweicht die Strahlung aus der Akkretionssäule gewiss nicht isotrop. Ihre Richtungsverteilung und ihr Spektrum zu bestimmen ist ein hochkompliziertes gekoppeltes Problem der Abbremsung des Gases, der Strahlungsentstehung und der Strahlungsausbreitung, zu dem es zahlreiche Untersuchungen gibt, das aber in voller Allgemeinheit (zeitabhängig und dreidimensional) nicht gelöst ist. Die aus der Akkretionssäule entweichende Strahlung verlässt den Röntgenpulsar nur zum



Abb. 10: a) Hohle Akkretionssäule, b) Akkretionsvorhang. In Bild b ist die Röntgenstrahlung im Energiebereich 1.5–7.5 keV farbkodiert dargestellt: Der Strahlung niedriger, mittlerer bzw. hoher Energie entspricht die Farbe Rot, Grün bzw. Blau.

Teil auf direktem Wege. Der andere Teil wird reprozessiert, wenn er auf den Neutronenstern oder auf den Akkretionsstrom trifft.

Die nach unten entweichende Strahlung trifft rings um die Akkretionssäule auf den Neutronenstern auf und erhitzt dort die Oberfläche, wodurch diese ihrerseits Röntgenstrahlung aussendet: Jede Akkretionssäule ist von einem ausgedehnten, leuchtenden Röntgenhalo umgeben (Abb. 9a). Strahlung, die steil nach oben entweicht, kann auf den Strom des herabstürzenden Gases treffen, denn da das Gas den Feldlinien folgt, ist der Gasstrom wie ein Trichter oben breiter als unten (Abb. 4 und 5). Diese Strahlung wird an dem herabstürzenden Gas gestreut. Aus der Sicht des Beobachters: Wenn der Akkretionsstrom durch die Sichtlinie wandert, verdeckt er zeitweise die Akkretionssäule und den Halo (Abb. 9b und c). Dies wird als möglicher Grund für die scharfen Minima im Pulsprofil von GX 1+4 diskutiert (Abb. 6 d).

... und Geometrie des Akkretionsstroms

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die geometrische Form des Akkretionsstroms. Das herabstürzende Gas folgt den Feldlinien des Magnetfeldes vom Innenrand der Akkretionsscheibe zum Stern (Abb. 4). In den bisher gezeigten Modellen wurde angenommen, dass der gesamte Trichter innerhalb dieser Feldlinien gleichmäßig mit Gas gefüllt ist. Das ist aber alles andere als selbstverständlich: Die zentrale Feldlinie, die genau durch den magnetischen Pol verläuft, ist radial nach außen gerichtet und trifft überhaupt nicht auf die Scheibe. Die polnahen Feldlinien treffen weit draußen auf die Scheibe, wo die magnetische Feldstärke schwach ist und die Bewegung des Gases in der Scheibe noch kaum beeinflusst. Nur die Feld-

> Abb. 11: Ein Symmetriepunkt im Pulsprofil entsteht, wenn der hier gezeigte Neutronenstern durch die Position b rotiert. Die Position c ist das Spiegelbild der Position a. Somit sind die in beiden Positionen beobachteten Röntgenflüsse gleich groß, und das Pulsprofil ist symmetrisch um den Punkt b.



linien am Rand des Trichters treffen die Scheibe in der Nähe des Innenrands, wo Gas in die Magnetosphäre eintritt.

Ein gefüllter Trichter setzt also voraus, dass sich das Gas in der Magnetosphäre nach innen umverteilt. Findet eine solche Umverteilung nicht oder nur in geringem Maße statt, dann ist der Trichter hohl. In diesem Fall käme die Strahlung von einer hohlen Akkretionssäule, würde zum Teil durch die Innenwand entweichen und die Sternoberfläche auch im Innern der hohlen Säule aufheizen (Abb. 10 a).

Neben hohlen Akkretionssäulen wird auch der so genannte »Akkretionsvorhang« diskutiert. Damit ist ein Abschnitt einer Hohlsäule gemeint, der zustande kommen könnte, wenn die magnetische Achse nicht allzu steil auf der Scheibe steht, etwa wie in Abb. 4. Wenn man den oberen magnetischen Pol betrachtet, dann kann Gas von der rechten Seite der Scheibe längs der Feldlinien auf ziemlich direktem Wege auf den Neutronenstern gelangen, Gas von der linken Seite jedoch nicht. Es erscheint daher plausibel, dass auch nur von der rechten Seite akkretiert wird, so dass die Hohlsäule nicht geschlossen ist (Abb. 10b).

Abb. 10b veranschaulicht, wie die Reprozessierung der Strahlung und die geometrische Form des Akkretionsstroms die Energieabhängigkeit der Pulsprofile beeinflussen. Die Röntgenstrahlung ist hier im Energiebereich 1.5 - 7.5 keV farbkodiert dargestellt. Die Farben Rot, Grün bzw. Blau entsprechen der Strahlung

niedriger, mittlerer bzw. hoher Energie. Der Halo ist rötlich, strahlt also hauptsächlich bei den niedrigeren Energien. Die Akkretionssäule ist weiß, erscheint aber orange, wenn man sie durch den Akkretionsstrom hindurch ansieht, da der Akkretionsstrom für die niederenergetische Strahlung durchsichtiger ist als für die höherenergetische. Rot kommt also durch, während Grün und Blau aus der Sichtlinie herausgestreut werden. Die Pulsprofile rechts im Bild zeigen die Energieabhängigkeit für dieses Modell.

Ein verzerrtes magnetisches Dipolfeld?

Alle bisher gezeigten theoretischen Pulsprofile haben eine Symmetrieeigenschaft gemeinsam: Es gibt Punkte, um die das Pulsprofil spiegelsymmetrisch ist. Und zwar genau zwei Punkte pro Pulsperiode, die eine halbe Pulsperiode auseinanderliegen. Es ist leicht zu erkennen, wie diese Symmetrie zustande kommt. Abb. 11 stellt einen Neutronenstern mit zwei Akkretionssäulen zu drei Zeitpunkten während seiner Rotation schematisch dar. Das erste und das dritte Bild sind offensichtlich spiegelsymmetrisch zueinander. Beobachtet man den Pulsar aus großer Entfernung, sodass er im Teleskop punktförmig erscheint, dann ist er in den Positionen a und c gleich hell. Die Position b entspricht damit einem Symmetriepunkt im Pulsprofil.

Die Beobachtungen lieferten einige Pulsprofile mit einer solchen Symmetrie Abb. 12: Liegen die beiden magnetischen Pole einander nicht genau gegenüber, sind die Pulsprofile asymmetrisch. Die Farbkodierung ist analog zu Abb. 10 b.

(z.B. Abb. 6e). Diese sind jedoch nicht die Regel, sondern die Ausnahme. Die meisten beobachteten Pulsprofile sind stark asymmetrisch (z.B. Abb. 6 b, c). Hierfür gibt es verschiedene mögliche Gründe. Eine plausible Möglichkeit ist eine leichte Abweichung des Magnetfelds von einem Dipolfeld in der Art, dass die beiden magnetischen Pole einander nicht genau gegenüberliegen. Das ist beispielsweise beim Magnetfeld der Erde der Fall, wo der magnetische Südpol etwas von dem Punkt, der dem magnetischen Nordpol gegenüberliegt, abweicht. Bei Modellrechnungen von Pulsprofilen stellt sich heraus, dass bereits eine Abweichung von 10 bis 15 Grad aus der symmetrischen Lage zu deutlich asymmetrischen Pulsprofilen führt (Abb. 12).

Ausblick

Was erwartet man aus den Pulsformen zu lernen, wenn es gelingt, sie mit erweiterten und verfeinerten Modellen genauer zu reproduzieren? Solche Modelle würden Einblicke in den Akkretionsvorgang geben: Wo liegt der Innenrand der Akkretionsscheibe? Liegt ein heißer Fleck oder eine Akkretionssäule vor? Zudem würde ein Modell für die Pulsformen interessante Aussagen über den Neutronenstern ermöglichen: Es würde seinen Radius liefern, von dem das Ausmaß der Lichtablenkung empfindlich abhängt. Auch sein Magnetfeld würde das Modell charakterisieren, da es die Orientierung des Feldes relativ zur Rotationsachse und gegebenenfalls eine versetzte Position der Pole beschreibt.

Wie ein Pulsar pulst, können Sie in bewegten Bildern unter **www.tempoli mit-lichtgeschwindigkeit.de** betrachten. Dort, in der Online-Version dieses Beitrags, finden Sie Filmsequenzen zu Abb. 7, 9, 10a und b sowie zu Abb.12. □

Ich danke Roland Speith, Universität Tübingen, der Abb. 1 zur Verfügung gestellt hat.

Weitere Informationen

- Stuart Shapiro, Saul Teukolsky: Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars, Wiley-VCH 1983
- [2] Ute Kraus, Corvin Zahn: Visualisierungen zur relativistischen Physik, www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de
- [3] Andrew Lyne, Francis Graham-Smith: Pulsar Astronomy. Cambridge Astrophysics Vol. 38. Cambridge University Press, 3. Auflage 2006



Ute Kraus ist Privatdozentin an der Universität Tübingen. Ihre Arbeitsgebiete sind Astrophysik und Physikdidaktik.