

Der massereiche Pulsar PSR J0348+0432, der nach Art eines kosmischen Leuchtturms stark gebündelte Radiostrahlung in zwei entgegengesetzte Richtungen aussendet, bildet mit einem Weißen Zwerg ein Doppelsternsystem. Die starke Krümmung der Raumzeit durch den kompakten Pulsar ist in dieser Illustration schematisch als grünes Koordinatensystem dargestellt.

Animation des Doppelsystems aus Pulsar und Weißem Zwerg
www.eso.org/public/germany/videos/eso1319a/



Ein Pulsar-Schwergewicht bestätigt Einstein

Es ist ein ungewöhnliches Doppelsternsystem: Ein massereicher Pulsar und ein Weißer Zwerg umkreisen einander in nur 2,5 Stunden. Das System sendet Gravitationswellen aus – und ist dadurch ein Modellfall für einen Test der allgemeinen Relativitätstheorie unter extremen Bedingungen.

Schon in den 1930er Jahren spekulierten Astrophysiker über kompakte Sterne, die fast nur aus Neutronen bestehen und etwa die Masse der Sonne in einer Kugel von nur 20 Kilometer Durchmesser vereinen. Dass es solche Neutronensterne gibt, zeigte sich 1967, als die Radioastronomen Jocelyn Bell und Antony Hewish ein erstes Exemplar in Form eines Radiopulsars entdeckten (wofür Antony Hewish 1974 den Physik-Nobelpreis erhielt).

Radiopulsare sind rotierende Neutronensterne, die entlang ihrer Magnetpole gebündelte Radiostrahlung aussenden und so im Raum orientiert sind, dass der Strahlungskegel in regelmäßigen Abständen die Erde trifft. Manche dieser »kosmischen Leuchttürme« rotieren sehr stabil – die auf der Erde empfangenen Pulse liefern Zeitsignale, deren Ganggenauigkeit mit den besten irdischen Atomuhren vergleichbar ist. Durch Vermessen der Ankunftszeiten der Pulsarsignale mit der Atomuhr an einem Radioteleskop können die Rotationseigenschaften von Pulsaren mit extremer Genauigkeit ermittelt werden. Es gibt Pulsare, bei denen die Rotationsperiode bis auf wenige Attosekunden genau gemessen ist. (Eine Attosekunde entspricht 10^{-18} Sekunden.)

Mittlerweile sind rund 2000 Radiopulsare bekannt. Etwa ein Zehntel von ihnen sind keine Einzelobjekte, sondern befinden sich mit einem anderen Stern in einem Doppelsternsystem. Solche Doppelsternpulsare haben inzwischen einen ausgezeichneten Ruf, was Präzisionstests zur allgemeinen Relativitätstheorie (ART) angeht. Berühmt wurde der Hulse-Taylor-Pulsar, mit dessen Hilfe der erste, wenn auch indirekte Nachweis von Gravitationswellen gelang. (Die Entdecker Russell Hulse und Joseph Taylor erhielten dafür 1993 den Physik-Nobelpreis.)

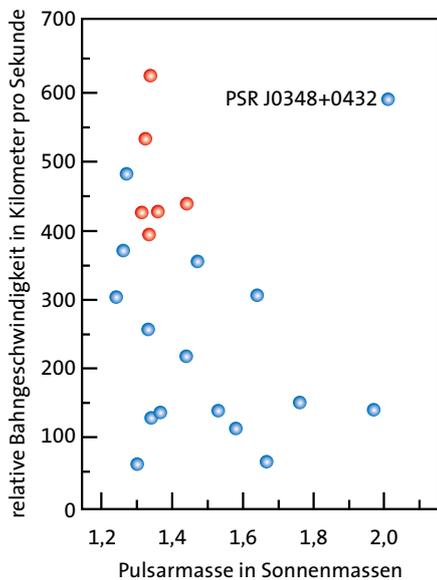
Im Jahr 2003 wurde dann ein Doppelsternsystem aus zwei aktiven Radiopulsaren entdeckt. Mit diesem Doppelpulsar konnte die Gültigkeit der ART mit einer Genauigkeit von besser als 0,05 Prozent verifiziert werden. Das Interessante daran ist, dass hier die Bewegung von Massen getestet wird, die extrem starke Gravitationsfelder haben. Die Raumzeit in der Umgebung eines Neutronensterns ist um viele Größenordnungen stärker gekrümmt als in unserem Sonnensystem. Folglich lässt sich mit Pulsaren in Doppelsternsystemen präzise vermessen, ob Einsteins Relativitätstheorie auch die Dynamik einer solchen Raumzeit korrekt beschreibt.

Alle bisher entdeckten Pulsare in Doppelsternsystemen haben aber eine entscheidende Limitierung: Sie haben entweder eine relativ kleine Masse von etwa 1,4 Sonnenmassen, oder sie sind Mitglied von Doppelsternsystemen, die für Präzisionstests der ART ungeeignet sind. Die Frage, ob auch die massereichsten bekannten Neutronensterne – mit ihrer extremen Materiekonzentration in einem besonders tiefen Gravitationspotenzial – sich gemäß der ART verhalten, konnte daher bisher nicht beantwortet werden.

Unter Einsatz einer ganzen Reihe an optischen und Radioteleskopen ist es nun einer internationalen Kollaboration unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn gelungen, diese Lücke zu schließen. Diese Arbeit erschien am 26. April im Fachjournal »Science«.

Ein rekordverdächtiger Pulsar

Im Jahr 2007 entdeckten US-Kollegen unter Führung von Ryan Lynch mit Hilfe des Radioteleskops in Green Bank einen Pulsar mit einer Rotationsperiode von 39 Millisekunden, der gemäß seiner Position am Himmel die Bezeichnung PSR J0348+0432 erhielt. Während die gemessene Rotationsperiode zunächst nichts



Norbert Wex (MPIfR) / SuW-Grafik

Die bisher bekannten Pulsare in Doppelsystemen haben entweder große Massen und geringe Bahngeschwindigkeiten oder kleine Massen und hohe Bahngeschwindigkeiten. Der neue Pulsar PSR J0348+0432 kombiniert erstmals eine hohe Masse mit einer hohen Bahngeschwindigkeit, was eine qualitative neue Überprüfung der allgemeinen Relativitätstheorie erlaubt. In Rot sind Pulsare mit einem Neutronenstern als Begleiter eingezeichnet, in Blau Pulsare mit einem Weißen Zwerg als Begleiter; Fehlerbalken wurden der Übersichtlichkeit wegen weggelassen.

Außergewöhnliches vermuten ließ, zeigten anschließende Vermessungen der Ankunftszeiten der Radiopulse, dass sich PSR J0348+0432 in nur 2,5 Stunden um einen Begleiter bewegt (genauer: um den gemeinsamen Schwerpunkt).

Um der Natur des Begleiters auf die Spur zu kommen, wurden optische Beobachtungen zu Rate gezogen. In den Archiven des Sloan-Digital-Sky-Surveys zeigte sich ein Weißer Zwerg von etwa 21. Größenklasse. Da das nicht der erste Pulsar mit einem gut sichtbaren Weißen Zwerg als Begleiter war, war das weitere Vorgehen klar vorgezeichnet: Spektroskopie mit einem großen Teleskop, damit man aus der Dopplerverschiebung in den Spektrallinien die Bewegung des Sterns ermitteln und zusätzlich dessen Masse bestimmen konnte. Letztere ergibt sich aus der Oberflächengravitation, die aus der Druckverbreiterung der Spektrallinien abgeleitet werden kann. Hat man diese beiden Informationen, so kann man daraus die Masse des Pulsars berechnen.

Ende Dezember 2011 führte John Antoniadis, Doktorand am Max-Planck-Institut für Radioastronomie, die entsprechenden Beobachtungen mit einem der vier Hauptteleskope des Very Large Telescope der ESO in Chile durch. Bereits die erste Analyse der Daten vor Ort zeigte eine Sensation: Der Pulsar hat eine Masse von $2,01 \pm 0,04$ Sonnenmassen. Das ist der höchste je für einen Neutronenstern verlässlich gemessene Wert.

Mit der Masse des Pulsars und derjenige des Weißen Zwergs (0,172 Sonnenmassen) lässt sich der Verlust an Energie durch das Abstrahlen von Gravitationswellen

berechnen. Die daraus resultierende Abnahme der Bahnperiode beträgt gemäß der ART 8,2 Mikrosekunden pro Jahr. Ein solcher Betrag sollte sich mit Hilfe der hochpräzisen Vermessung der Ankunftszeiten der Pulsarsignale feststellen lassen.

Test von Einsteins Theorie

Bis Anfang 2013 wurden fast 10000 Pulsankunftszeiten für PSR J0348+0432 gesammelt, vor allem mit dem 305-Meter-Radioteleskop auf Puerto Rico und dem 100-Meter-Radioteleskop bei Effelsberg in Deutschland. Für manche dieser Ankunftszeiten wurde eine Genauigkeit von wenigen Mikrosekunden erreicht. Die Auswertung der Daten zeigte, dass die Umlaufperiode stetig abnimmt und PSR J0348+0432 seit seiner Entdeckung gegenüber einer gleichförmigen Bewegung in seiner Bahn einen Vorsprung von mehr als 20 Kilometern hat. Im Rahmen der Messgenauigkeit stimmt dieser Wert mit der Vorhersage der ART überein. In dem gleichen Zeitraum ist die Bahn des Pulsars um etwa 23 Zentimeter geschrumpft. Dieser Wert ist allerdings nicht direkt zu beobachten.

Warum ist diese Bestätigung der ART so wichtig? Wie unterscheidet sie sich von den bisherigen Tests? Mit seinen zwei Sonnenmassen verursacht PSR J0348+0432 eine deutlich stärkere Krümmung der Raumzeit als der Hulse-Taylor-Pulsar oder der Doppelpulsar. Mathematisch ausgedrückt: PSR J0348+0432 hat ein doppelt so tiefes Gravitationspotenzial.

Was ändert das? Bei den starken Gravitationsfeldern eines Neutronensterns verhält sich die Natur sehr nichtlinear, und

kleine Änderungen im Gravitationspotenzial könnten bereits zu starken Abweichungen von der ART führen, was in der Tat von einigen alternativen Theorien vorhergesagt wird. Derartige Abweichungen wirken sich unmittelbar auf die Erzeugung von Gravitationswellen und damit auf die Rate aus, mit welcher der Orbit des Systems auf Grund des Energieverlusts durch die Abstrahlung von Gravitationswellen schrumpft.

Somit war anfangs nicht klar, ob die ART nach all den anderen Pulsartests auch diesen bestehen würde. Die Übereinstimmung der beobachteten Veränderung in der Bahnperiode mit der Vorhersage der ART bei PSR J0348+0432 ist somit nicht nur eine qualitative neue Bestätigung für Einsteins Gravitationstheorie, sondern bedeutet auch das Aus für all jene alternativen Theorien, die für derartige Systeme mit starker Raumzeitkrümmung andere Vorhersagen machen.

Und wie ist es um die Zukunft dieses Systems bestellt? Die Emission von Gravitationswellen lässt die Bahn weiter schrumpfen, bis in etwa 400 Millionen Jahren der Weiße Zwerg dem Neutronenstern so nahe kommt, dass er durch die Gezeitenkräfte zerrissen wird. An dieser Stelle wird es spannend, wo genau die Massengrenze für Neutronensterne liegt. Denn wenn die vom Neutronenstern aufgesammelten Überreste des Weißen Zwergs ihn über diese Grenze treiben, dann wird er zu einem Schwarzen Loch kollabieren.

MICHAEL KRAMER ist Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn. Sein Hauptarbeitsgebiet ist die radioastronomische Fundamentalphysik.

NORBERT WEX forscht in der Abteilung von Michael Kramer am MPIfR über die relativistischen Effekte von Neutronensternen und Schwarzen Löchern.

Literaturhinweise

Antoniadis, J. et al.: A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary. In: Science 340, 1233232, 2013

Kramer, M.: Pulsare als kosmische Uhren. Tests für die Allgemeine Relativitätstheorie. In: Sterne und Weltraum 10/2006, S. 30–37