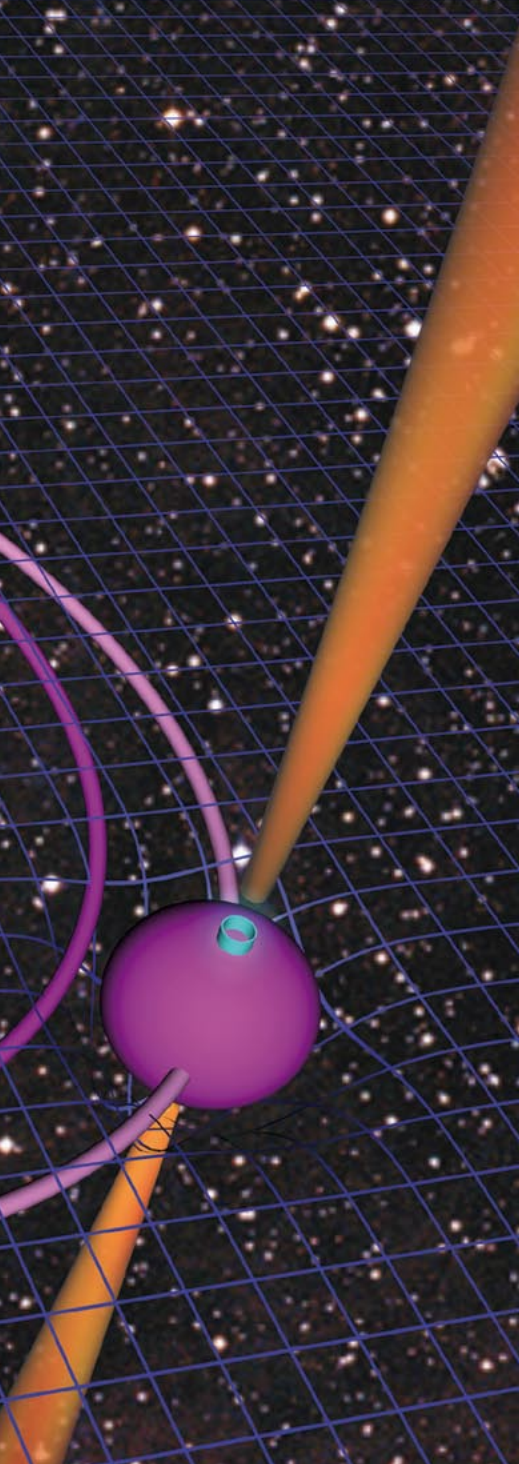


Pulsare als kosmische Uhren

Tests für die Allgemeine Relativitätstheorie

VON MICHAEL KRAMER

Neutronensterne bestehen aus der dichtesten Materie, die wir im Universum erforschen können. Sie sind kompakte Überreste massereicher Sterne und erzeugen – nach den Schwarzen Löchern – die stärksten Gravitationsfelder. Als Radiopulsare senden sie regelmäßige Pulse aus, die als hochgenaue Uhren Testobjekte der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellen.



◀ Abb. 1: Diese Computergraphik verdeutlicht die beobachteten Eigenschaften des einzigen bekannten Doppelpulsars: Zwei aktive Radiopulsare mit Perioden von 22 Millisekunden bzw. 2,7 Sekunden umkreisen den gemeinsamen Schwerpunkt in nur 147 Minuten und ermöglichen dabei die Untersuchung so vieler relativistischer Effekte wie kein anderes System. Diese lassen sich durch Messungen der Pulsankunftszeiten mit hoher Präzision untersuchen: Die Rotationsfrequenz des Millisekundenpulsars wurde bestimmt zu $44.054069392744 \pm 0.000000000002$ Hz, die Umlaufzeit zu $147.24224997 \pm 0.00000007$ Minuten und die Gesamtmasse der beiden Pulsare zu 2.5871 ± 0.0002 Sonnenmassen.

abgelenkt werden. Dementsprechend sollte während einer totalen Sonnenfinsternis eine scheinbare Positionsverschiebung von Sternen, die sich am Himmel unweit der verfinsterten Sonne befinden, zu beobachten sein. Die experimentelle Bestätigung der Vorhersage Einsteins gelang während einer Sonnenfinsternis im Jahre 1919 und gilt als erste experimentelle Überprüfung der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART).

Auch weitere Tests hat die ART bislang mit Bravour bestanden. Die genauesten Messungen ermöglichten Raumsonden, Reflexionen von Radarstrahlen an Planeten [2] oder Laserreflektoren, die APOLLO-Astronauten auf dem Mond aufgestellt hatten. Jedoch konnten diese erfolgreichen Experimente im Sonnensystem nicht die Frage beantworten, ob die ART tatsächlich die korrekte Theorie der Schwerkraft ist.

Tests der ART bis zum äußersten...

In der Tat sind wir nahezu sicher, dass die ART nicht die endgültige Theorie der Schwerkraft ist und daher unter bestimmten Bedingungen versagt. Der Grund für diese Vermutung ist einfach: Zwar beschreibt die ART die Natur auf großen räumlichen Skalen gut. Wir wissen aber, dass sie mit den Gesetzen der Quantenmechanik unvereinbar ist. Deshalb versuchen Physiker weltweit der Quantengravitation auf die Spur zu kommen, also jener Theorie, die schließlich die Welt der Gravitation mit jener der Quantenphysik vereinen soll. Wo aber sollten wir den Zusammenbruch der ART vermuten?

Alternativen Theorien zufolge verliert die ART in sehr starken Gravitationsfeldern ihre Gültigkeit. Denkbar wäre zum Beispiel, dass eine umfassendere Gravitationstheorie die ART als Grenzfall für schwache Felder enthält. Abweichungen von den Voraussagen der ART würden somit nur bei Messungen innerhalb starker Felder auffallen. In der Tat weist das Sonnensystem nur sehr schwache Felder auf – selbst an der Oberfläche der Sonne. Den Maßstab bestimmen hier die Schwerefelder von Neutronensternen und Schwarzen Löchern, die hunderttausend Mal stärker sind als das der Sonne. Entscheidend hierfür ist nicht nur die Gesamtmasse des Objekts, sondern auch seine Kompaktheit.

Der Kompaktheitsgrad k eines Körpers mit der Masse M und dem Radius R ist das Verhältnis aus seiner Gravitationsenergie $G M^2/R$ und seiner Ruheenergie $M c^2$, wobei G die Gravitationskonstante und c die Lichtgeschwindigkeit ist. Für einen Neutronenstern ($R = 10$ km) ist $k = 0.15$, und für ein Schwarzes Loch mit dem Schwarzschildradius $R = 2 G M/c^2$ ist $k = 0.5$. Diese Objekte besitzen die größtmögliche Kompaktheit. Im Vergleich zu ihnen ist die Kompaktheit der Sonne gering: $k = 10^{-6}$.

Um die Grenzen der ART auszuloten, sollte man also Experimente am besten in der Nähe von Schwarzen Löchern oder Neutronensternen planen. In der Tat werden bis jetzt (und vielleicht auf absehbare Zeit) die besten Tests in den starken Schwerefeldern von Neutronensternen durchgeführt. Dazu bedienen sich die Astronomen der Radiopulsare.

Radiopulsare

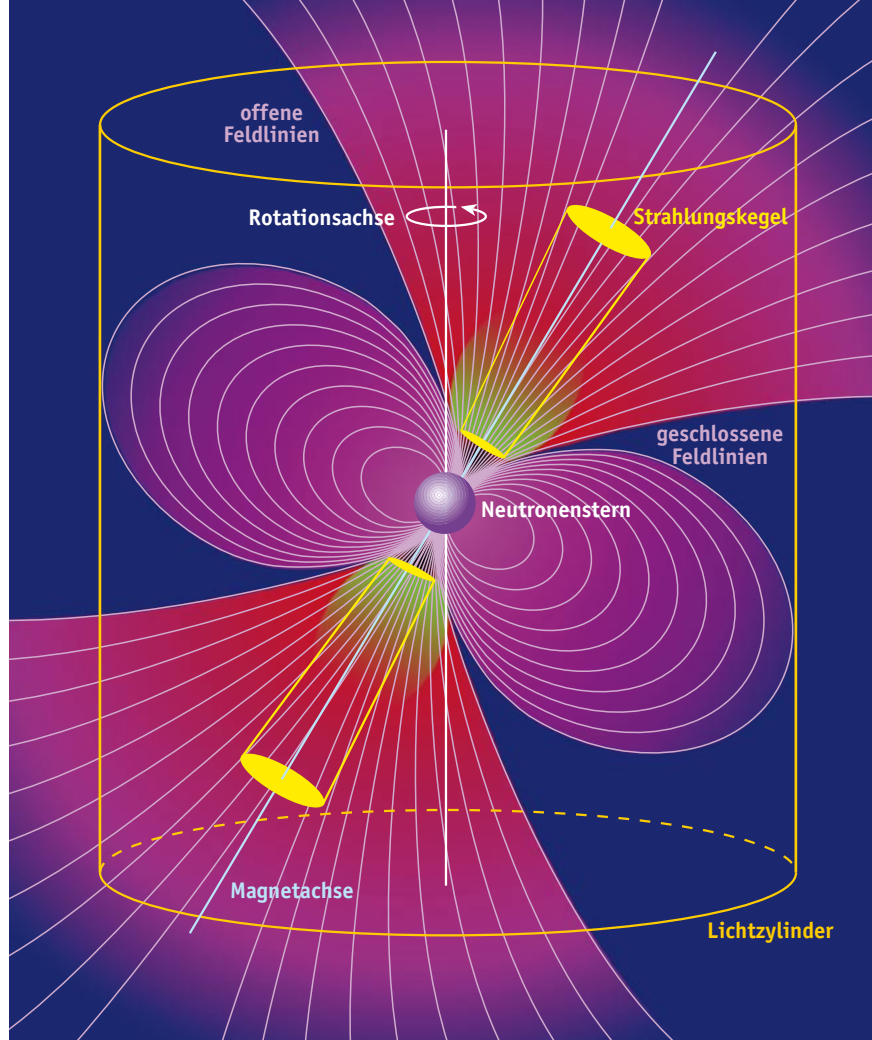
1967 untersuchten Jocelyn Bell und ihr Doktorvater Antony Hewish in Cambridge die Radiostrahlung von Quasaren. In den kilometerlangen Ausdrücken ihrer Datenrekorder fielen ihnen gepulste, streng periodische Signale auf. Schnell wurde klar, dass es sich um extraterrestrische Signale natürlichen Ursprungs handelte, aber ihre genaue Herkunft blieb zunächst rätselhaft. Ein Reporter des Daily Telegraph erfand damals den Namen »Pulsar«, abgeleitet vom englischen Ausdruck »Pulsating Source of Radio«. Schließlich lieferte die Entdeckung eines Pulsars im Zentrum des Krebsnebels den entscheidenden Hinweis darauf, dass Pulsare hochmagnetisierte, schnell rotierende Neutronensterne sind.

Bereits in den dreißiger Jahren hatten Lew Dawidowitsch Landau (1908–1968), Walter Baade (1893–1960) und Fritz Zwicky (1898–1974) Neutronensterne als mögliche Endprodukte von Supernovaexplosionen betrachtet. Die Entdeckung

Rund drei Jahrhunderte lang beschrieben die Astronomen kosmische Bewegungsabläufe allein mit Hilfe der Gesetze Keplers und Newtons. Doch die Allgemeine Relativitätstheorie Albert Einsteins (1879–1955) hob diese Gesetze aus den Angeln und revolutionierte unser Verständnis des Universums. Raum und Zeit vereinte sie zur Raumzeit, die sich in der Gegenwart von Massen verformt. Diese Krümmung der Raumzeit bestimmt wiederum die Bewegung von materiellen Körpern und die Ausbreitung des Lichts [1]. Um diese Effekte nachweisen zu können, reichen die in physikalischen Laboren verfügbaren Massen jedoch nicht aus: Man muss Himmelskörper zur Hilfe nehmen.

Einstein erkannte, dass Lichtstrahlen beim Durchlaufen eines Schwerefeldes

► Abb. 2: Ein Pulsar ist ein rotierender Neutronenstern (hier vergrößert dargestellt) mit einem starken Magnetfeld. Er ist von einem Teilchenplasma umgeben, das aufgrund der Stärke des Magnetfeldes von mindestens 100 Millionen Tesla gezwungen ist, mitzurotieren. In der Nähe der magnetischen Pole werden Teilchen auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigt, bevor sie dann in einiger Entfernung einen kegelförmigen Radiostrahl entlang der Magnetfeldachse abstrahlen. Da der Neutronenstern rotiert, ist der Strahl wie bei einem Leuchtturm als pulsierendes Radiosignal zu beobachten.



des Pulsars im Zentrum des Krebsnebels lieferte einen Hinweis auf die tatsächliche Existenz dieser Objekte. Als man dann noch feststellte, dass die kurze Pulsperiode des Krebspulsars von nur 33 Millisekunden um rund 89 Nanosekunden pro Tag zunahm, war klar, dass Pulsare Neutronensterne sind, die aufgrund des Aussendens von elektromagnetischer Strahlung langsam Rotationsenergie verlieren. Ihr pulsierender Charakter entsteht durch einen Leuchtturmeffekt, bei dem ein gebündelter Radiostrahl entlang der Achse des Magnetfeldes ausgestrahlt wird. Letztere ist gegen die Rotationsachse geneigt, so dass der Strahl einmal pro Umdrehung über die Erde streichen kann (Abb. 2).

Heute sind rund 1800 Pulsare bekannt. Diese stellen nur einen Teil der bislang entdeckten Neutronensternfamilie dar. Neben Radiopulsaren kennen wir mittlerweile Neutronensterne in Röntgen-Doppelsternsystemen, Magnetare [3] und seit neuestem auch RRATs (Rotating Radio Transients). Die Energiequellen des von diesen Objekten abgestrahlten Lichts sind unterschiedlicher Natur: Radiopulsare beziehen ihre Energie aus der Rotation des Sterns, Röntgenpulsare aus dem Gravitationsfeld bei der Akkretion von Gas auf die Magnetpole, und Magnetare schließlich aus ihrem enorm starken Magnetfeld. Während Röntgenpulsare die Beobachtung einiger Effekte der ART erlauben (siehe Seite 34 ff.), bedarf es der Radiopulsare, um die Gültigkeit der Theorie innerhalb starker Schwerfelder mit höchster Genauigkeit zu überprüfen.

Pulsare als kosmische Uhren

Die Nützlichkeit der Pulsare für Tests der ART beruht auf ihrer Verwendbarkeit als genaue kosmische Uhren. Aufgrund ihrer großen Masse von etwa 1.4 Sonnenmas-

sen und ihrer Kompaktheit sind Pulsare mit mächtigen Schwungrädern vergleichbar, die nur sehr schwer aus dem Tritt zu bringen sind. Wegen der Regelmäßigkeit ihrer Rotation registriert ein Beobachter ihr Radiosignal ähnlich dem Ticken eines Chronometers, dessen Genauigkeit in vielen Fällen mit derjenigen einer hochpräzisen Atomuhr vergleichbar ist. Allerdings verstehen wir bis heute nicht – 40 Jahre nach Entdeckung der Pulsare – wie ihre Radiostrahlung entsteht. Zwar erzielen die Astrophysiker Fortschritte beim Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Vorgänge [4], jedoch gibt es kein Modell, das die Eigenschaften der kohärenten und hochpolarisierten Strahlung erklärt. Glücklicherweise lässt der Emissionsmechanismus der Strahlung die meisten Tests der ART unbeeinflusst – solange die Pulse nur regelmäßig kommen.

Zwei Varianten von Pulsaruhren sind heute bekannt. »Normale« Pulsare senden Signale mit einer typischen Periode von einer Sekunde aus. Als Uhren für Tests der ART sind sie jedoch zu ungenau. Hingegen zeigen »Millisekunden-Pulsare« gleich bleibende Rotationsperioden mit einer Dauer von nur 1.4 bis 60 Millisekunden. Der kürzlich entdeckte am schnellsten rotierende Pulsar dreht sich rund 40000 Mal pro Minute [5]! Doch es sind keine kleinen Objekte,

die so schnell rotieren: Ihr Durchmesser entspricht dem einer Großstadt, etwa zwanzig Kilometer. Zudem sind sie rund 40 Prozent massereicher als die Sonne. Wie wir gleich sehen werden, verdanken sie ihre kurzen Rotationsperioden einer Sternentwicklung, während der sie auch als Röntgenpulsare sichtbar sein können.

Doppelneutronensterne

Pulsare entstehen in Supernovaexplosionen. Der Materieverlust und ein Rückstoß, der dem neu entstandenen Neutronenstern mitgegeben wird, reichen in der Regel aus, um den Pulsar von einem möglichen Begleitstern zu trennen. In den rund zwanzig Prozent aller Fälle, in denen ein Doppelsternsystem die Explosion überlebt, entsteht ein System aus einem »normalen« Pulsar und seinem Begleiter (Abb. 3). Der Pulsar bleibt rund zehn Millionen Jahre lang als Radiopulsar aktiv, bevor er »stirbt«. Sein Begleiter entwickelt sich irgendwann schließlich zum Riesenstern und überträgt in einem Akkretionsprozess Materie auf den toten Pulsar. Während dieser Phase, in der das System als Röntgendoppelsternsystem sichtbar sein kann (siehe Seite 38), erhält der Pulsar ein zusätzliches Drehmoment, wodurch seine Rotationsgeschwindigkeit zunimmt. Die Periode erreicht schließlich die Dauer einiger

Millisekunden und führt zu einer Reaktivierung («Recycling») des toten Pulsars als aktiver Millisekundenpulsar. Ist der Begleiter nach dem Materietransfer noch massereich genug, um als Supernova zu explodieren, bildet sich ein zweiter Neutronenstern. Überlebt das System auch diese zweite Explosion, so entsteht eines der seltenen Doppel-Neutronenstern-Systeme (DNS) – die Kronjuwelen für Tests der ART.

Ein DNS besteht typischerweise aus einem alten Millisekundenpulsar mit einer Periode von 20 bis 50 Millisekunden und seinem Begleiter, der in der Regel nicht als Pulsar sichtbar ist. Dies hat mehrere Gründe: Aufgrund der relativ kurzen Lebensdauer eines Pulsars ist es unwahrscheinlich, dass der junge Neutronenstern gerade dann als Pulsar aktiv ist, wenn wir das System beobachten. Im Vergleich dazu lebt ein Millisekundenpulsar mindestens mehrere Milliarden Jahre lang. Aber selbst wenn der junge Neutronenstern einen Radiostrahl aussenden würde, so sollte dieser relativ schmal sein. Der Grund hierfür liegt im trichterförmigen Verlauf der magnetischen Feldlinien in der Nähe der Pole. Je schneller der Pulsar rotiert, desto größer ist sein Öffnungswinkel. Der Strahl

eines schnell rotierenden Millisekundenpulsars ist deshalb viel breiter und streift die Erde daher mit einer viel größeren Wahrscheinlichkeit als derjenige eines jungen, relativ langsamen Begleiters.

Der Hulse-Taylor-Pulsar

Derzeit sind nur acht Doppel-Neutronenstern-Systeme bekannt. Tatsächlich sind diese Systeme also relativ selten. Das erste entdeckten 1974 Russel Hulse und Joe Taylor. Der sichtbare Neutronenstern, PSR B1913+16 (so benannt nach seinen Himmelskoordinaten), ist ein reaktivierter Pulsar mit einer Periode von 59 Millisekunden. Er war der erste Pulsar überhaupt, bei dem ein Begleiter entdeckt wurde, und Hulse und Taylor waren sich der Bedeutung dieses Systems sofort bewusst. Bereits bei der Bekanntgabe der Entdeckung wiesen die Forscher darauf hin, dass PSR B1913+16 hervorragend zur Prüfung der ART geeignet ist. In der Tat umkreisen sich hier zwei Neutronensterne, also Objekte mit extrem starken Gravitationsfeldern, von denen einer als Radiopulsar sichtbar ist und somit eine hochgenaue Uhr darstellt. Diese erlaubt es uns, ihre Schläge in der Form von Radiopulsen zu verfolgen, während sie mit ihrem unsichtbaren Begleiter um den ge-

meinsamen Schwerpunkt kreist. Indem wir feststellen, wie sich die Laufzeit der Pulse während eines Umlaufs verändert, können wir die Raumzeit genau ausmessen.

Für die regelmäßigsten Pulsare können wir heute Variationen in der Ankunftszeit der Pulse mit einer Genauigkeit von mehreren hundert Nanosekunden oder besser messen! Diese Variation entspricht einer Pfadverlängerung oder -verkürzung von nur 30 Metern. Mit dieser Präzision können wir die Position des Pulsars über tausende von Lichtjahren hinweg auf seiner Bahn bestimmen. Eine solche Genauigkeit konnten Taylor und Kollegen zwar noch nicht erreichen, doch über die Jahre hinweg konnten sie verfolgen, wie der Bahnradius des Pulsars um rund einen Zentimeter pro Tag schrumpft. Diese Verkleinerung des Abstands der beiden Neutronensterne, und die damit einhergehende Abnahme der Bahnperiode (Abb. 4), entspricht genau den Vorhersagen der ART! Diese sagt voraus, dass zwei sich umkreisende Massen Gravitationswellen aussenden. Die Energie hierfür entstammt der Umlaufbewegung, und somit schrumpft die Bahn. Diese Messung der Verkleinerung der Bahnachse war der erste Beweis für das Vorhandensein von

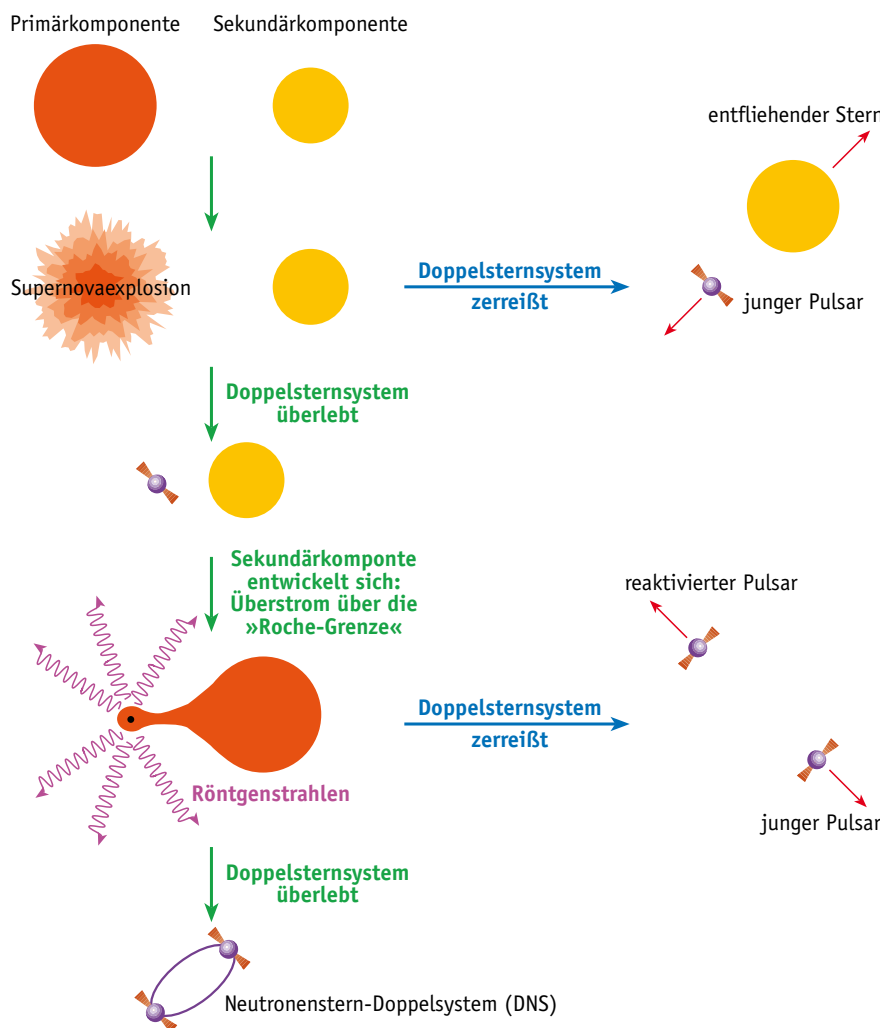


Abb. 3: In der Regel bricht ein Doppelsternsystem bei einer der beiden Supernovaexplosionen seiner Komponenten auseinander. Nur in seltenen Fällen überlebt das System beide Ereignisse. In diesem Fall entsteht ein Doppelpulsar.

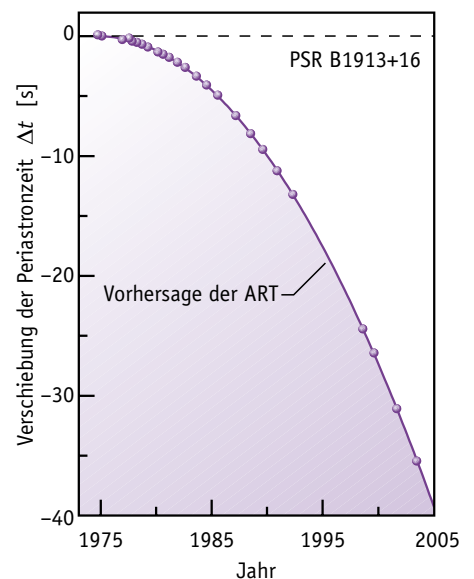
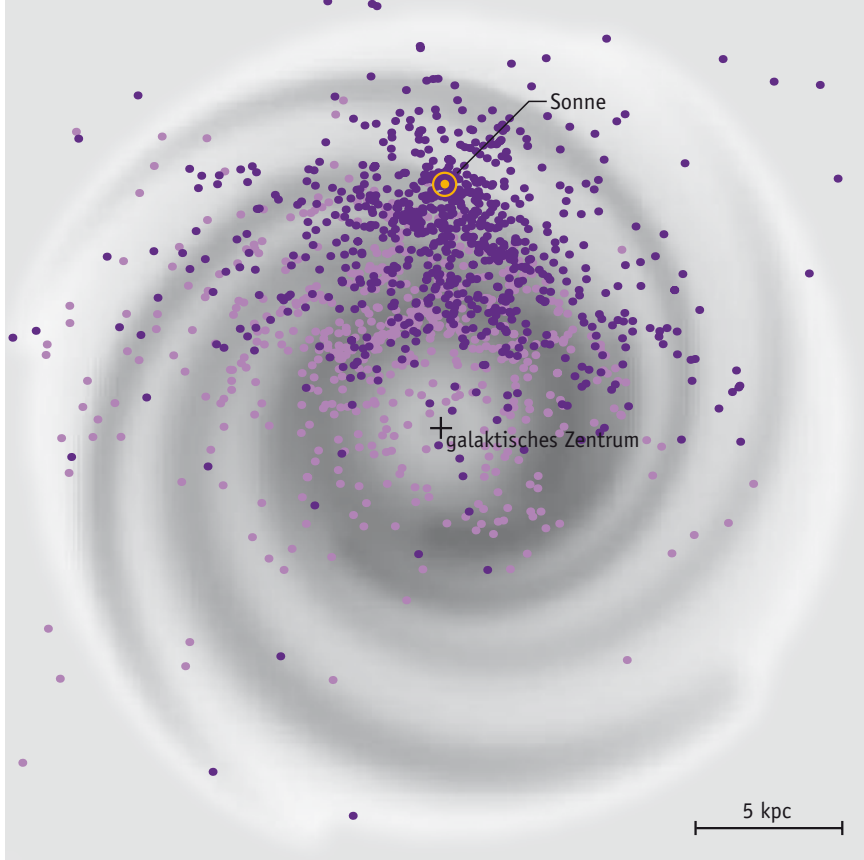


Abb. 4: Der von Hulse und Taylor untersuchte Pulsar strahlt Gravitationswellen ab, wodurch seine Bahnperiode abnimmt (Bild: J. Taylor und J. Weisberg).



▲ Abb. 5: Hier ist die heute bekannte Verteilung der Pulsare (helle und dunkle Punkte) unserer Galaxis zu sehen. In der Mitte befindet sich das Galaktische Zentrum, den Ort der Sonne markiert ein Kreis. Die als helle Punkte dargestellten Objekte fanden die Astronomen im Rahmen jener Durchmusterungen, die zur Entdeckung des Doppelpulsars führten. Die grauen Flächen deuten die Dichte der freien Elektronen im interstellaren Medium an (Bild Daten: Bernd Klein)

Gravitationswellen. Deshalb erhielten Hulse und Taylor für die Entdeckung von PSR B1913+16 im Jahre 1993 den Nobelpreis für Physik (SuW 11/1993, S. 770).

Der erste Doppelpulsar!

Dreißig Jahre lang galt der »Hulse-Taylor-Pulsar« als das Non-plus-ultra für Tests der ART in starken Schwerfeldern. Während dieser Zeit bestimmten die Astronomen die Abnahme der Bahnperiode auf 0,2 Prozent genau. Innerhalb dieser Fehlergrenzen stimmte ihr Ergebnis mit dem auf der Grundlage der ART berechneten Wert hervorragend überein. Erst im Frühjahr 2003 wurde ein System entdeckt, das PSR B1913+16 in den Schatten stellen sollte.

In Zusammenarbeit mit Kollegen in Australien, Italien, Kanada und den USA führten Astronomen des Jodrell-Bank-Observatoriums der Universität Manchester eine Durchmusterung der Milchstraße und von Teilen des Südhimmels

zur Suche nach neuen Pulsaren durch. Dazu verwendeten sie das 64-m-Radioteleskop in Parkes, Australien, und einen neuartigen Empfänger, der es ihnen ermöglichte, nicht nur jeweils eine einzige Position am Himmel zu betrachten, sondern 13 benachbarte Positionen gleichzeitig. Dies führte zur Entdeckung von rund 800 Pulsaren und damit zur Verdopplung der zuvor bekannten Anzahl (Abb. 5).

Bei einer derart großen Anzahl neuer Quellen steigt natürlich auch die Wahrscheinlichkeit, recht seltene Objekte – und somit auch DNS – zu finden. Tatsächlich wurden gleich drei neue DNS entdeckt, von denen eines besonders interessant war. Dieses System besteht aus einem 22-Millisekunden Pulsar, der sich in nur 147 Minuten mit seinem Begleiter um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegt. Seine Bahnperiode ist somit viel kürzer als jene des Hulse-Taylor-Pulsars mit einer Dauer von 8,5 Stunden.

Die eigentliche Sensation kam indes ein paar Monate nach der Entdeckung dieses Systems, als plötzlich ein weiteres pulsierendes Signal in den Daten gefunden wurde. Es gehörte zu einem 2,77-Sekunden-Pulsar, der sich offenbar um den gleichen Massenschwerpunkt bewegte. Man hatte die Radiosignale des begleitenden Neutronensterns entdeckt und damit das erste Doppelsternsystem mit zwei aktiven Radiopulsaren (siehe Abb. 1) – den ersten Doppelpulsar! Der offizielle Name dieses einzigartigen Paares ist PSR J0737–3039A (für den 22-Millisekunden-Pulsar) und PSR J0737–3039B (für den 2,7-Sekunden-Pulsar), während

Fachastronomen einfach nur vom »Doppelpulsar« sprechen.

Eine Frage stellte sich natürlich: Warum hatte man das Signal von B zunächst übersehen? Es stellte sich heraus, dass B an nur zwei Stellen seiner Umlaufbahn starke Radiosignale aussendet. Beim Durchlaufen aller übrigen Bahnabschnitte ist seine Strahlung sehr schwach und somit nur schwer nachzuweisen. Im Nachhinein ist man immer schlauer, und so hätte man erwarten können, dass A wegen seiner hundertfach schnelleren Rotation einen »Pulsarwind« von Strahlung und Teilchen aussendet, der tausendfach stärker ist, als der von B zu erwartende.

Der Wind von A kollidiert mit der Magnetosphäre des rund 1,3 Sonnenradien entfernten Pulsars B – also jener Umgebung des Pulsars, die mit Plasma gefüllt ist und von dessen starkem Magnetfeld dominiert wird – und bläst etwa die Hälfte davon weg. Dieser Mechanismus verhindert das normale Entstehen der Radiostrahlung. Nur dann, wenn die Pulsare in ihrer Umlaufbahn so zur Erde orientiert sind, dass wir die windabgewandte Seite von »B« sehen, erhalten wir von ihm starke Radiopulse. Nach dieser Lektion suchten die Forscher bei allen anderen bekannten DNS nochmals nach einer möglichen Radioemission des jeweiligen Begleiters. Das Ergebnis war jedoch negativ, und so bleibt der Doppelpulsar einzigartig – in mehrfacher Hinsicht.

Ein einzigartiges Labor für die ART

Der Doppelpulsar PSR J0737–3039A/B ist das System, in dem relativistische Effekte am deutlichsten zutage treten. Reizvoll für die Astronomen ist nicht nur die Anzahl der zu beobachtenden Effekte, sondern auch die hohe Genauigkeit, mit der sie nachweisbar sind. Zusätzlich beobachten wir hier nicht nur eine einzige Uhr, sondern gleich zwei. Die Einzigartigkeit dieses Systems liegt darin, dass sich durch seine Beobachtung Randbedingungen festlegen lassen, die von der Gestalt der Theorie unabhängig sind, und somit nicht nur die ART, sondern auch jede ihrer Alternativen vor einen harten Test stellen.

■ Experiment 1: Die Periheldrehung.

Der erste relativistische Effekt fiel bereits am zweiten Tag nach der Entdeckung des Doppelpulsars auf: Die Ankunftszeiten der Signale des Pulsars »A« waren nur unter der Annahme zu verstehen, dass sich die Orientierung seiner Umlaufbahn im Raum stetig änderte, und zwar mit einer Rate von 17 Grad pro Jahr. Eine solche Präzession der Bahn sagt die ART voraus: So hatte der erste Triumph der ART darin

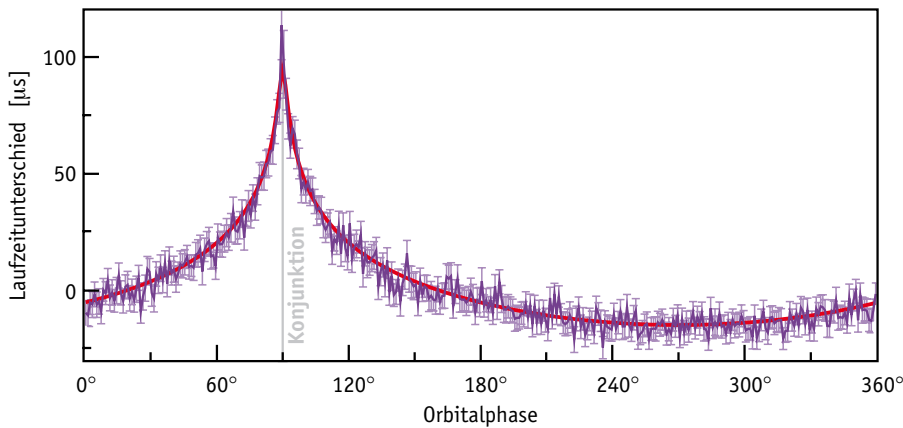


Abb. 6: Der Einfluss der Raumkrümmung um den Pulsar B wird deutlich, wenn die Pulse von A dessen Oberfläche in einer Distanz von nur 30 000 Kilometern passieren. Für ihren Weg durch den gekrümmten Raum benötigen diese Pulse eine zusätzliche Zeit von rund 100 Mikrosekunden. Die Orbitalphase bezeichnet den Winkelabstand vom aufsteigenden Knoten, sodass die Pulsare bei 90 Grad in Konjunktion stehen.

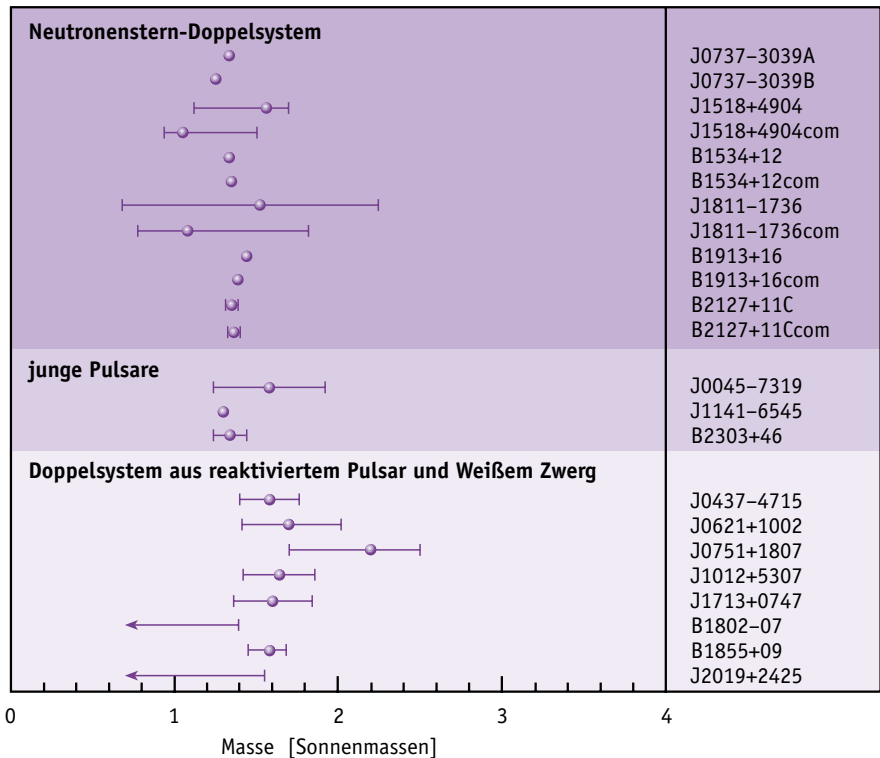
bestanden, die beobachtete Periheldrehung des Merkur von 0.012 Grad/Jahrhundert erklären zu können.

Im Vergleich zu Merkur ist die Orbitaldrehung des Doppelpulsars jedoch rasant: Während sich die Bahn des sonnennächsten Planeten innerhalb von rund drei Millionen Jahren einmal um sich selbst dreht, benötigt diejenige Bahn des Doppelpulsars hierfür nur 20 Jahre! Somit können die Astronomen innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne von allen Seiten auf die Bahn des Pulsarpaars blicken – so, als flögen sie in einem Raumschiff einmal um das System herum. Mittlerweile vermaßen sie diese Drehung der Doppelpulsarbahn mit einer Genauigkeit von 0.004 Prozent.

Experiment 2: Die Zeitdehnung. Ein zweiter von der ART vorhergesagter Effekt ist die Dehnung der Zeit und damit der verlangsamte Gang von Uhren innerhalb eines starken Schwerfelds: Stellen Sie sich einen Wolkenkratzer auf einem Neutronenstern vor. Für eine Person, die im Erdgeschoss lebt, läuft die Uhr nachweislich langsamer als für jemanden im Dachgeschoss – von Strahlungs- und Temperatureinflüssen, die den Gang der Uhr verändern könnten, einmal abgesehen.

Dieser Effekt ließ sich bereits auf der Erde mit Hilfe von Atomuhren in Flugzeugen demonstrieren. In der Umgebung Schwarzer Löcher führt er zu interessanten Phänomenen. Im Fall des Doppelpulsars bedeutet er, dass sich der Takt der Pulsaruhren periodisch ändern muss – je nachdem, wie weit die Komponenten innerhalb ihrer elliptischen Umlaufbahnen voneinander entfernt sind. Dies resultiert in einer Variation in den Ankunftszeiten der beobachteten Pulse von 386 Mikrosekunden, gemessen mit einer Genauigkeit von 0.7 Prozent.

Experiment 3: Die Raumkrümmung. Der dritte beim Doppelpulsar nachweisbare relativistische Effekt entsteht durch die Krümmung der Raumzeit in der Nähe von Massen. War es bereits unwahr-



scheinlich, einen Doppelpulsar überhaupt zu entdecken, so ermöglicht ein noch unwahrscheinlicherer Umstand eine weitere Untersuchung: Während die Bahnen von Doppelsternsystemen bezüglich der Himmelsebene willkürlich geneigt sein können, sind die Bahnen des Doppelpulsars zufällig so orientiert, dass wir sie von der Kante sehen. Dies führt zu Verfinsterungen der Pulsarsignale während der Konjunktion, die rund 30 Sekunden andauern. Zudem bedeutet es, dass die Radiopulse den Begleiter sehr nahe an seiner Oberfläche passieren, das heißt mit einem Abstand von nur rund 30 000 Kilometern. Da die Raumzeit in der Umgebung der Pulsare jedoch gekrümmt ist, benötigt das Radiosignal für diesen zusätzlichen Weg etwas länger, als wenn die Raumzeit flach wäre. Letzteres ist jedoch nur in größerer Entfernung zum Pulsar der Fall. Während einer Konjunktion registriert man das Pulsarsignal daher um etwa 100 Mikrosekunden verzögert (Abb. 6). Das Ausmaß der Verzö-

Abb. 7: Die mit der Methode des Pulsar-Timings gemessenen Massen verschiedener Neutronensterne liegen nahe am theoretisch zu erwartenden Wert von 1.4 Sonnenmassen.

gerung hängt von der Orbitalphase und der genauen Orientierung der Bahnebene zur Erde ab, also ihrem Neigungswinkel zur Himmelsebene, sowie von der Masse des Begleiters. Beide Größen lassen sich aus den Ankunftszeiten der Pulse bestimmen. Hieraus ergibt sich der Sinus des Neigungswinkels zu 0.99974, mit einer Genauigkeit von 0.04 Prozent. Tatsächlich liegt der diesem Wert entsprechende Neigungswinkel von 88.7 Grad erstaunlich nahe bei 90 Grad.

Experiment 4: Die Suche nach Gravitationswellen. Der vierte nachweisbare Effekt ist das Schrumpfen der Bahn aufgrund der Emission von Gravitationswellen. Die Abnahme der Bahnperiode

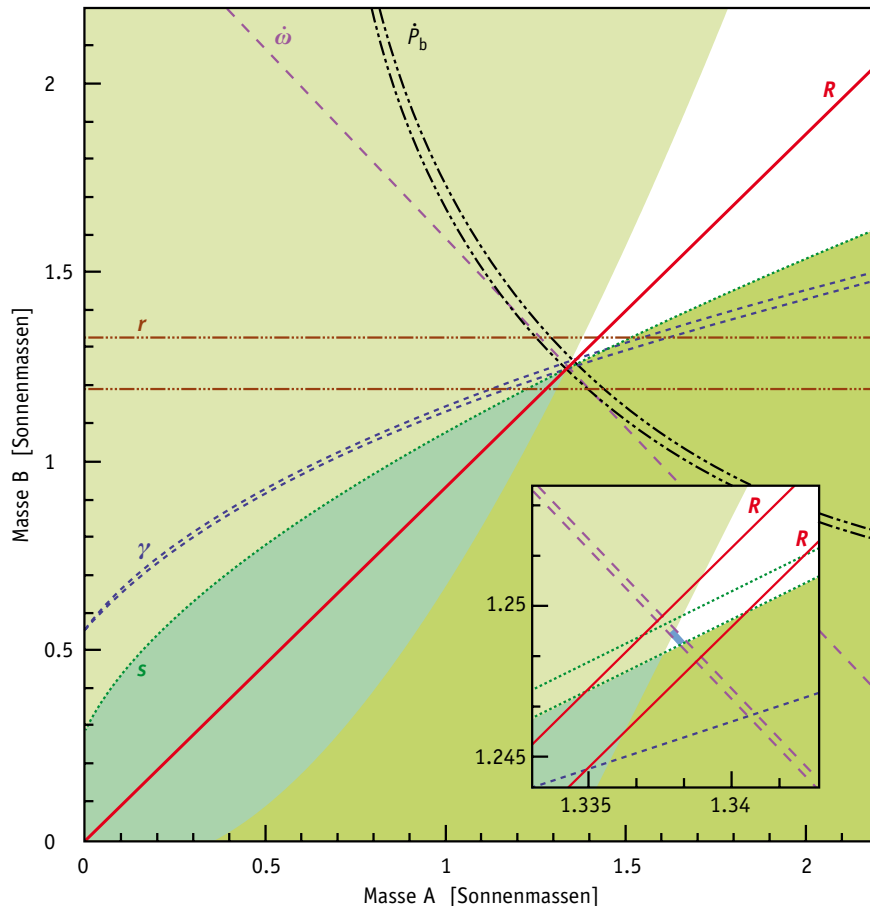
um 100 Nanosekunden pro Tag und des Bahnradius um sieben Millimeter pro Tag – gemessen über eine Distanz von rund 1600 Lichtjahren hinweg – ließ sich mit einer Genauigkeit von 1.3 Prozent beobachten. Jeder der bisher genannten Effekte der ART (weitere werden zukünftig zu messen sein), hängt von der Größe der Pulsarmassen und den Parametern der Umlaufbahnen ab. Sind die Massen bekannt, so kann man die zu erwartenden Größen der relativistischen Effekte berechnen und mit den beobachteten vergleichen. Die hierfür benötigten Bahnparameter sind so genau bestimmt, dass ihre Messungenauigkeiten vernachlässigbar sind. So beträgt zum Beispiel der Messfehler der Umlaufperiode nur vier Mikrosekunden.

Natürlich sind die Pulsarmassen zunächst nicht bekannt. Bestimmt man jedoch mindestens zwei relativistische Effekte, dann lässt sich ein entsprechendes Gleichungssystem formulieren und nach den beiden Massen auflösen. Für die Komponenten A und B des Doppelpulsars ergeben sich Werte von 1.3381 ± 0.0007 Sonnenmassen, beziehungsweise 1.2489 ± 0.0007 Sonnenmassen. Hierbei wird deutlich, dass die Zeitmessung der Pulssignale eine hochgenaue Bestimmung der Massen von Neutronensternen erlaubt (Abb. 7). Sie ermöglicht es, die anderen Messgrößen unter Annahme der ART vorherzusagen und mit den Beobachtungen zu vergleichen.

Ist die ART korrekt?

Der Test der ART lässt sich graphisch darstellen, indem man die relativistischen Effekte als Funktionen der Massen von »A« und »B« in ein Diagramm einzeichnet (Abb. 8). Die ART sagt dann für jeden Effekt einen ganz bestimmten Kurvenverlauf innerhalb dieses Masse-Masse-Diagramms voraus. Da in der Natur nur ein Wertepaar von Massen richtig sein kann, sollten sich alle Kurven in einem einzigen Punkt (M_A, M_B) schneiden. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ist die Theorie falsch und zu verwerfen.

Bislang überstanden einige Alternativen zur ART solche Tests durch den Hulse-Taylor-Pulsar. Hierbei gab es drei Kurven des Masse-Masse-Diagramms, und manche Theoretiker waren in der Lage, ihre Theorien so zu modifizieren, dass sich die Kurven zwar in einem anderen Schnittpunkt trafen als in jenem, welcher der ART entspricht, aber dennoch alle in einem Masse-Masse-Punkt zusammenfielen. Für den Doppelpulsar gab es jedoch fünf solcher Kurven. Hierbei liefert die Krümmung der Raumzeit zwei Kurven statt nur einer, da die Zeitverzögerung sowohl vom Neigungswinkel



als auch von der Masse des Begleiters abhängt. Nachdem zwei Kurven den Schnittpunkt festlegten, ist nun jede andere Kurve theoretisch in der Lage, den Schnittpunkt zu verfehlen, und die ART außer Kraft zu setzen. Es kommt aber noch besser: Durch den zweiten Pulsar ist die Größe beider Bahnbewegungen bekannt. Gemäß dem 3. Keplerschen Gesetz liegt der Massenschwerpunkt nun so, dass das Verhältnis der beiden Bahnhalfachsen gleich dem umgekehrten Verhältnis der Massen ist. Es zeigt sich, dass dieses einfache Gesetz im Wesentlichen für alle Gravitationstheorien gelten muss. Da man das Verhältnis nun einfach messen kann, liefert es innerhalb des Masse-Masse-Diagramms eine Gerade, deren Verlauf von der Theorie unabhängig ist. Somit muss jede Theorie – die ART wie auch ihre Alternativen – einen Schnittpunkt erzeugen, der auf dieser Geraden liegt. Insgesamt sind dadurch vier unabhängige Tests der ART gegeben. Die ART übersteht alle wieder mit Bravour – den besten davon mit einer Genauigkeit von 0.05 Prozent!

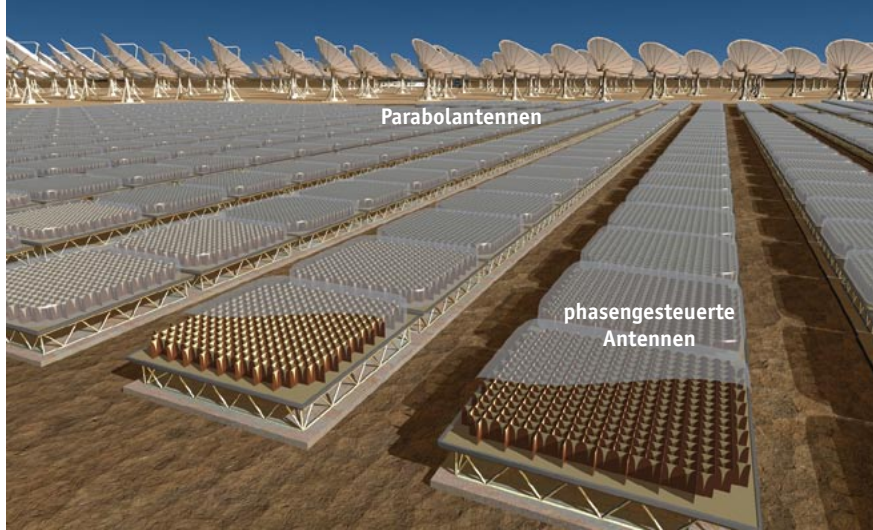
Damit ist der Doppelpulsartest nach nur drei Jahren deutlich effizienter als derjenige mit dem Hulse-Taylor-Pulsar nach 30 Jahren. Dementsprechend wird die Genauigkeit des Doppelpulsartests mit der Zeit sogar noch zunehmen. Wir erwarten, dass er in wenigen Jahren die Genauigkeit der in den schwachen Feld-

▲ Abb. 8: Mit Hilfe von Doppelpulsaren bekannter Masse lassen sich die Vorhersagen der ART überprüfen: Nicht alle Kombinationen der Massen M_A und M_B für die Komponenten des Doppelpulsars sind möglich. Der grüne Bereich im Diagramm ist aufgrund der Keplerschen Gesetze ausgeschlossen. Jedes der gezeigten Linienpaare entspricht der Messung eines relativistischen Effekts, wobei die Messgenauigkeit dem Abstand des jeweiligen Linienpaars entspricht. Eine Ausnahme bildet das rote Paar R . Dieses ergibt sich aus dem 3. Keplerschen Gesetz und dem Umstand, dass zwei aktive Pulsare innerhalb eines Systems zu beobachten sind. Die Linienverläufe entsprechen den Vorhersagen der ART als Funktion der Systemparameter und der Massen der Komponenten A und B. Alle Kurven schneiden sich konsistent in einem Punkt (siehe blaues Feld im vergrößerten dargestellten Bereich des Schnittpunkts). Dementsprechend sind die Massen von A und B zu 1.3371 ± 0.0007 und 1.2489 ± 0.0007 Sonnenmassen bestimmt. Die ART ist mit einer Genauigkeit von 0.05 Prozent bestätigt.

ern unseres Sonnensystems durchgeführten Experimente übertrifft. Vielleicht wird sich dann eine Abweichung der Beobachtungen von den Vorhersagen der ART zeigen. Es ist aber möglich, dass wir noch weiter gehen müssen. Um dies zu erreichen, müssten wir das letzte Objekt entdecken, nach dem die Pulsarforscher mit Leidenschaft suchen: einen Pulsar, der ein Schwarzes Loch umkreist. Damit ließe sich die Raumzeit um das Schwarze Loch ausmessen und mit den Voraussagen der ART vergleichen. Die ART beschreibt ein Schwarzes Loch als sehr einfaches Objekt, das durch seine Masse, seinen Eigendrehimpuls und seine Ladung bereits vollständig charakterisiert wird: »Schwarze Löcher haben keine Haare«, wie es der amerikanische Theoretiker John A. Wheeler einmal bildlich ausdrückte.

Es geht noch genauer

Da Masse, Dreh- und Quadrupolmoment eines Schwarzen Lochs im Prinzip messbar wären, könnte man das Keine-Haare-Theorem ebenso überprüfen wie das Theorem der »Kosmischen Zensur«, wonach es uns durch den Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs verwehrt ist, die in seinem Inneren befindliche Singularität zu beobachten. Solche Messungen sind nicht einfach und bedürften einer



▲ Abb. 9: Die Gesamtfläche des Square Kilometre Array (SKA) wird etwa dem Hundertfachen des 100-m-Radioteleskops in Effelsberg entsprechen. Die im Vordergrund sichtbaren phasengesteuerten Antennen ermöglichen den gleichzeitigen Blick auf den gesamten Himmel im Frequenzbereich um 1 GHz. Die konventionellen Parabolspiegel im Hintergrund beobachten den Himmel bis zu Frequenzen von 20 GHz. Die Kombination dieser komplementären Technologien verleiht dem SKA eine maximale Flexibilität hinsichtlich der Frequenz- und Himmelsabdeckung.

weiteren Steigerung der Empfindlichkeit unserer Teleskope und damit der Genauigkeit der Zeitmessung. Zunächst muss man aber ein geeignetes System entdecken!

Innerhalb unserer Galaxis mag es vielleicht rund zehn derartige Systeme geben, und man muss wahrscheinlich alle Pulsare darin finden, um eines aufzuspüren. Genau dies ist es, was die Astronomen mit Hilfe des größten Teleskops, das es jemals auf der Erde gab, in den nächsten 15 Jahren vorhaben! Der Bau dieses »Square-Kilometre-Array« (SKA, Abb. 9) soll in rund sechs Jahren beginnen und nach seiner Fertigstellung um das Jahr 2020 Radiostrahlung mit einer rund hundert Mal so großen Empfangsfläche nachweisen, wie das 100-m-Radioteleskop in Effelsberg [6]! Das SKA sollte in der Lage sein, nahezu alle Pulsare unserer Galaxis zu finden, deren magnetische Achse so orientiert ist, dass ihr Radiostrahl die Erde überstreicht. Neben diesen rund 30 000 neuen galaktischen Quellen sollten sich auch in der Andromedagalaxie und sogar im Virgo-Haufen einige Pulsare aufspüren lassen. Nicht nur die Pulsarastronomie, sondern auch die Astrophysik und Physik im Allgemeinen wird das SKA in vielen Bereichen revolutionieren. Die Tests der ART anhand des Doppelpulsars mögen dann ein aufregender Schritt gewesen sein, doch vielleicht werden sie einst genauso verblassen, wie es derzeit dem Hulse-Taylor-Pulsar zu drohen scheint. □



Michael Kramer ist Professor für Astrophysik an der Universität Manchester. Er ist am Jodrell-Bank-Observatorium tätig und studiert Pulsare, Neutronensterne und ihre Anwendungen in der Physik und Astrophysik. Sein besonderes Interesse gilt dabei Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Literaturhinweise

- [1] Einführende Informationen des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik über die Allgemeine Relativitätstheorie: www.einstein-online.info
- [2] Homepage des Radioobservatoriums Arecibo, Puerto Rico: www.naic.edu
- [3] **Chryssa Kouveliotou, Robert C. Duncan, Christopher Thompson:** Magnetare. Spektrum der Wissenschaft, 5/2003, S. 56
- [4] **Thomas Kunzl, Axel Jessner und Harald Lesch:** Gleichschritt im All – wie entsteht die Radiostrahlung von Pulsaren? SuW 11/2000, S. 36
- [5] **Andreas Bauswein:** Drall-Rekord im All – Neutronenstern rotiert mit 716 Hertz. SuW 7/2006, S. 14
- [6] **Rainer Beck:** Das Square Kilometre Array – Ein Radioteleskop der Superlative. SuW 9/2006, S. 22
- [7] **Duncan R. Lorimer:** »Binary and Millisecond Pulsars«, Living Rev. Relativity 8, [2005], www.livingreviews.org/lrr-2005-7
- [8] **Ingrid H. Stairs:** »Testing General Relativity with Pulsar Timing«, Living Rev. Relativity 6, [2003], www.livingreviews.org/lrr-2003-5
- [9] **Duncan R. Lorimer und Michael Kramer:** Handbook of Pulsar Astronomy, Cambridge University Press, Cambridge 2005
- [10] **Ulrich Bastian:** Die ersten Planeten außerhalb des Sonnensystems. – Das Planetensystem des Neutronensterns PSR 1257+12. SuW 11/1994, S. 774
- [11] **Jerome Novak:** Neutronensterne: Ultradichte Exoten. Spektrum der Wissenschaft, 3/2004, S. 34
- [12] **Clifford M. Will:** The Confrontation between General Relativity and Experiment. Living Reviews in Relativity, <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2006-3/>
- [13] **Gerhard Mühlbauer:** Ultrakurze Pulse vom Pulsar. SuW 7/2003, S. 19
- [14] **Sebastian Jester:** Geburt eines Millisekundenpulsars. SuW 6/2002, S. 20
- [15] **The Sounds of Pulsars:** Audiodateien des Jodrell Bank Observatory: www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/sounds.html