

# Pulsare als Gravitationswellen-Detektoren

Viele mit dem Gammastrahlen-Observatorium Fermi entdeckte Punktquellen haben sich als Pulsare erwiesen. Diese könnten nun in einer Art galaktischem GPS zur genauen Positionsbestimmung der Erde dienen – und damit zum Nachweis von Positionsänderungen durch Gravitationswellen.

Von Georg Wolschin

Indem Russell Hulse und Joseph Taylor mit dem Arecibo-Radioteleskop auf Puerto Rico die Abnahme der Umlaufperiode zweier umeinanderkreisender Neutronensterne maßen, gelang ihnen 1974 der erste indirekte Nachweis von Gravitationswellen. Das ermutigte zu Versuchen, die von Albert Einstein schon 1916 vorhergesagten periodischen Verzerrungen der Raumzeit auch direkt zu beobachten.

Die größten Hoffnungen ruhen dabei auf Interferometern, die nach minimalen Änderungen im Abstand zweier weit entfernter Fixpunkte suchen (Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48). Doch seit etwa zehn Jahren diskutieren Astrophysiker auch eine andere Möglichkeit: die genaue Bestimmung von winzigen Verschiebungen in der Position der Erde

durch Gravitationswellen mit Hilfe einer Art von galaktischem GPS.

Als Bezugspunkte – analog den GPS-Satelliten – könnten dabei Pulsare dienen. Diese senden wie kosmische Leuchttürme in regelmäßigen Abständen ein kurzes Radarsignal. Besonders geeignet für den Nachweis von Gravitationswellen sind Millisekunden-Pulsare; denn ihre Radarblitze folgen sehr schnell aufeinander und sind äußerst regelmäßig, so dass sich ihre Ankunft auf der Erde hochpräzise bestimmen lässt.

Millisekunden-Pulsare erreichen ihr rasantes Rotationsstempo über Akkretionsprozesse in Binärsystemen: Durch gravitative Wechselwirkung zieht ein Neutronenstern (oder Weißer Zwerg) nach und nach Materie von einem normalen Stern an sich und wird dabei wie eine Eiskunstläuferin bei der Pirouette in immer

schnellere Drehung versetzt (Bild unten). Jetzt haben Astronomen in weniger als drei Monaten 17 neue solche Objekte entdeckt – unter Rückgriff auf Beobachtungen durch das Gammastrahlen-Observatorium Fermi der US-Weltraumbehörde NASA (Bild rechts oben).

Eigentlich durchmustert dieser Satellit den Himmel nach Gammastrahlenquellen, von denen er bisher rund 100 neue aufgespürt hat. Deren systematische Untersuchung mit Hilfe von fünf großen Radioteleskopen ergab jedoch, dass es sich bei einem Sechstel von ihnen zugleich um Millisekunden-Pulsare handelt. Vier davon sind »Schwarze Witwen«, die sich das Material ihres Begleitsterns völlig einverleibt haben.

»Radioastronomen haben den ersten Millisekunden-Pulsar vor 28 Jahren entdeckt«, berichtet Paul Ray vom Naval Research Laboratory in Washington. »Die Suche bei Himmelsdurchmusterungen mit Hilfe von Radioteleskopen erfordert viel Zeit und enormen Aufwand, und wir haben seitdem in unserer Milchstraße nur 60 gefunden. Jetzt zeigt uns Fermi die möglichen Quellen: Das ist wie eine Karte zur Schatzsuche«, meint der Forscher begeistert.

Ein Pulsar ist ein rotierender Neutronenstern, dessen Strahlungskegel periodisch auf die Erde trifft. Seine Rotations- und Emissionsfrequenz nimmt mit der Zeit ab. Bildet er jedoch ein Paar mit einem normalen Stern, kann er von diesem Gas abziehen und seine Rotation wieder bis auf mehrere hundert Umdrehungen pro Sekunde beschleunigen. Dann wird er zum Millisekunden-Pulsar.

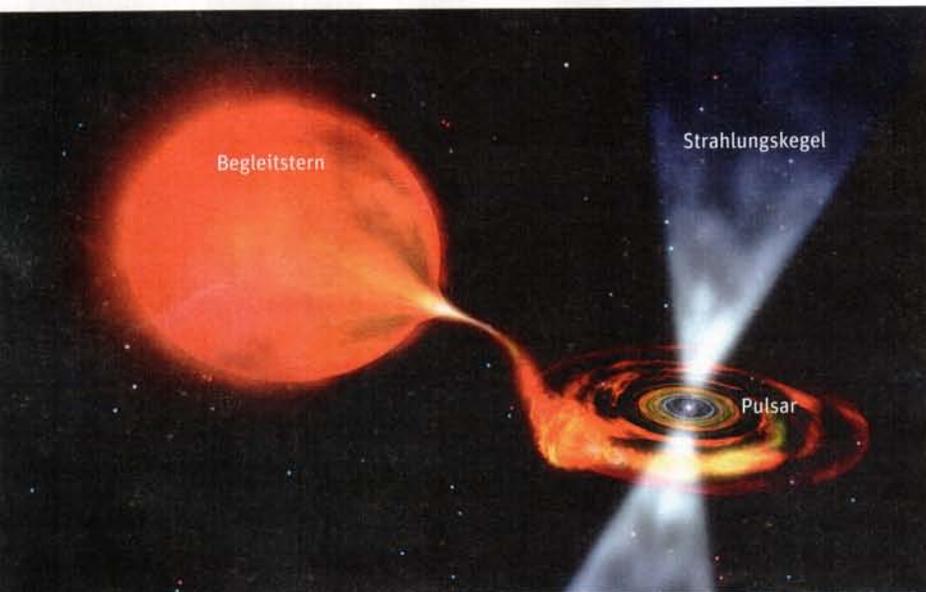
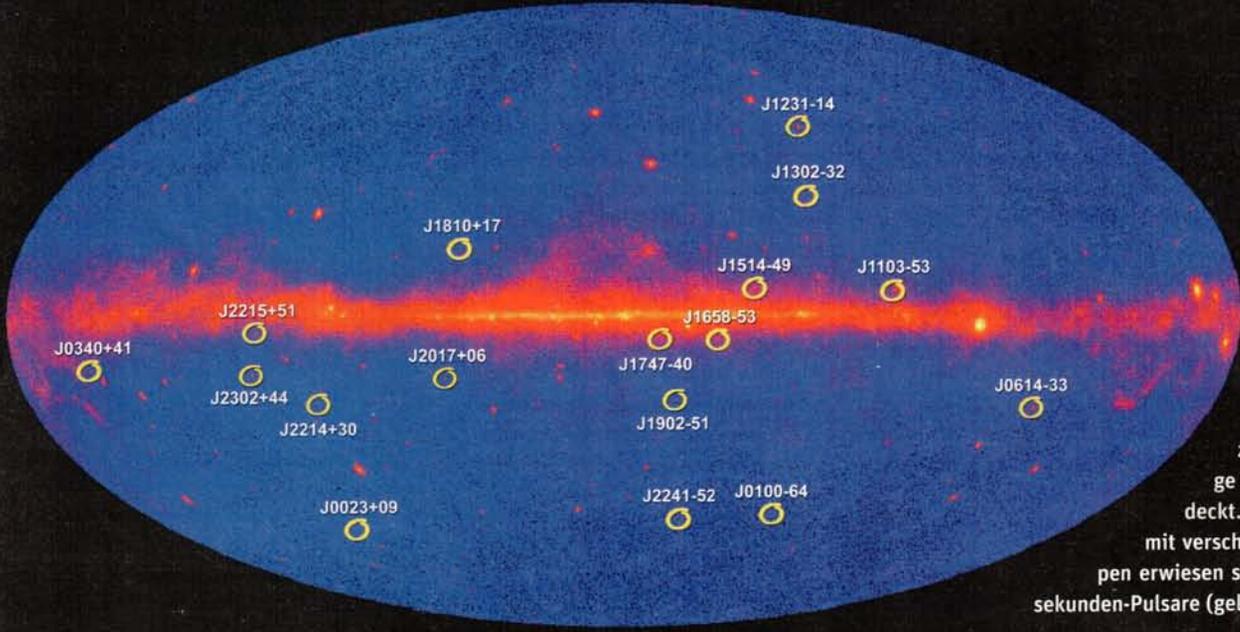


ILLUSTRATION: NASA / JAMES BEBRY



Das Fermi-Gammastrahlen-Observatorium der NASA hat zahlreiche punktförmige Strahlungsquellen entdeckt. Bei Untersuchungen mit verschiedenen Radioteleskopen erwiesen sich 17 davon als Millisekunden-Pulsare (gelbe Kreise).

NASA / DOE / FERMI LAT COLLABORATION

Millisekunden-Pulsare sind die genauesten Taktgeber der Natur. Mit langfristigen Schwankungen von weniger als einer millionstel Sekunde erreichen sie fast die Präzision menschengemachter Atomuhren. Beim Global Positioning System (GPS) nutzt man Laufzeitbestimmungen der Signale von Satelliten, um beispielsweise festzustellen, wo sich ein Fahrzeug auf der Erdoberfläche befindet. Analog lässt sich durch genaues Registrieren der Zeitunterschiede in den Ankunftssignalen von Millisekunden-Pulsaren die exakte Position der Erde ermitteln; Abweichungen vom Erwartungswert weisen auf die Einwirkung von Gravitationswellen hin (Bild rechts unten).

Schon Ende der 1970er Jahre berechneten unabhängig voneinander Mikhail V. Sazhin von der Lomonossow-Universität Moskau und Steven Detweiler von der Yale University in New Haven (Connecticut) die zu erwartenden Verschiebungen der Signalankunftszeiten von Pulsaren beim Durchgang einer Gravitationswelle durch die Milchstraße. Theoretisch würden vier solche Quellen ausreichen. In der Praxis sind jedoch weitaus mehr nötig, damit sich ein schlüssiges Bild ergibt, da aus vielen Gründen Irregularitäten bei

den Pulsankunftszeiten auftreten können. Nur eine gemeinsame Verschiebung bei allen Pulsarsignalen zeigt eine Verzerrung der Raumzeit am Ort der Erde an.

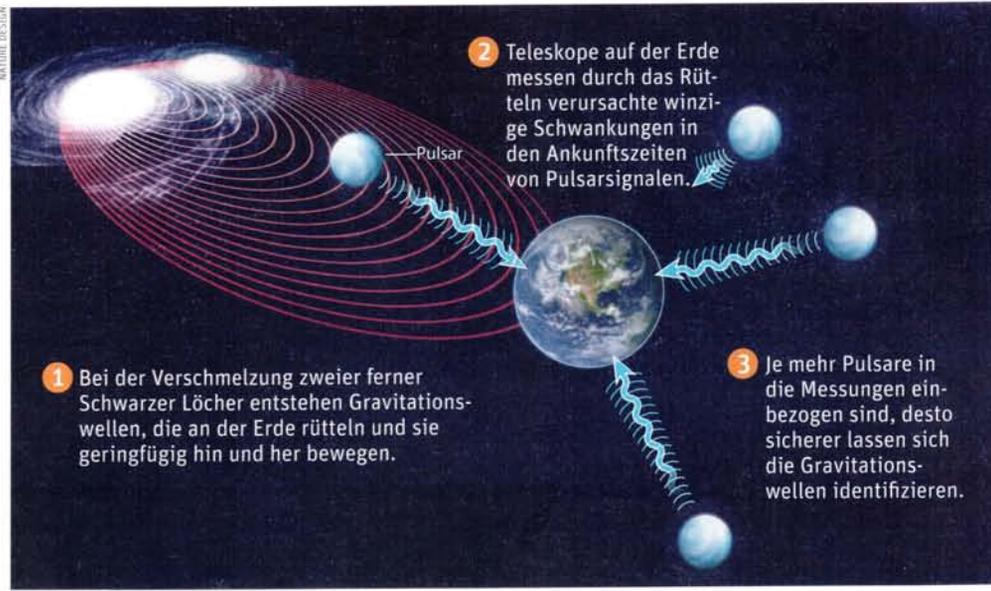
### Ein internationales Projekt

Für die Suche danach wurde inzwischen das International Pulsar Timing Array Project gegründet. Seine Teilnehmer sind optimistisch, innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre die erste Gravitationswelle zu entdecken. Auch Europa spielt hier eine wichtige Rolle: Das LEAP-Projekt (*Large European Array for Pulsars*) kombiniert die Signale von fünf großen europäischen Radioobservatorien, womit die Genauigkeit eines 200-Meter-Teleskops erreicht wird. 2018 soll das neue internationale Square Kilometer Array Radioteleskop mit einer Ausdehnung von einem Quadratkilometer in Betrieb gehen.

Allerdings lassen sich per Pulsar-GPS nur Gravitationswellen mit sehr niedrigen Frequenzen im Bereich von etwa  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  Hertz nachweisen. Auslöser dafür könnte die Verschmelzung extrem massereicher schwarzer Löcher in den Zentren entfernter Galaxien sein. In Frage kommen aber auch Phasenübergänge im frühen Universum, insbesondere die Vereinigung von Quarks und Gluonen zu den Hadronen – stark wechselwirkenden Teilchen, aus denen die Kerne der Atome aufgebaut sind.

Damit ergänzt das Pulsar Timing auf ideale Weise die anderen Möglichkeiten zum Nachweis von Gravitationswellen. Bei noch niedrigeren Frequenzen bis hinunter zu  $10^{-18}$  Hertz erwarten Kosmologen Signale von Fluktuationen der Gravitation, die verstärkt wurden, als der Kosmos in der Inflationsphase kurz nach

Gravitationswellen, wie sie beispielsweise bei der Verschmelzung extrem massereicher Schwarzer Löcher in entfernten Galaxien erzeugt werden, können die Position der Erde verschieben. Das wirkt sich auf die Ankunftszeiten von Pulsarsignalen auf unserem Planeten aus: Sie variieren periodisch, was zum direkten Nachweis der Gravitationswelle dienen kann.



dem Urknall rasch expandierte. Sie könnten sich in der Polarisation des kosmischen Mikrowellenhintergrunds zu erkennen geben.

Bei Frequenzen von  $10^{-4}$  bis 1 Hertz wird das Weltraumobservatorium LISA operieren, das jedoch frühestens 2018 starten soll. Es eignet sich beispielsweise zum Nachweis von Gravitationswellen, die eng umeinanderkreisende stellare Schwarze Löcher aussenden. Deren Verschmelzung wenige Wochen später sollte Signale bei höheren Frequenzen bis  $10^4$

Hertz liefern, die sich mit erdgebundenen Interferometern und Resonatoren messen lassen – insbesondere mit dem amerikanischen LIGO-Detektor und im Rahmen der europäischen Projekte VIRGO und GEO600. In diesem Frequenzbereich gibt es noch viele andere astrophysikalische Quellen für Gravitationswellen wie etwa Supernova-Explosionen.

Bisher erwartete man den ersten direkten Nachweis einer Gravitationswelle von den Detektoren am Erdboden und im All. Nach der überraschenden Viel-

zahl neuer Millisekunden-Pulsare, die mit Hilfe von Fermi entdeckt wurden, kommt ihnen nun womöglich die Pulsar-Timing-Methode zuvor. Doch selbst in diesem Fall werden die anderen Nachweisverfahren keineswegs obsolet, sondern bleiben die Voraussetzung für eine alle Frequenzbänder umfassende Gravitationswellen-Astronomie der fernen Zukunft.

---

**Georg Wolschin** lehrt als Privatdozent an der Universität Heidelberg theoretische Physik.