

■ Besser als Atomuhren?

Radioastronomen ermitteln, warum Pulsare manchmal vor- und manchmal nachgehen.

Mehr als 40 Jahre nach ihrer Entdeckung im Jahr 1967 durch Jocelyn Bell und Antony Hewish ist der Strahlungsmechanismus der Radiopulsare immer noch nicht vollständig verstanden. Sie entstehen in Supernova-Explosionen massereicher Sterne, deren Kern von zirka 1,5 Sonnenmassen auf einen Radius von zehn Kilometern und zu einer Dichte von einer Milliarde Tonnen pro Kubikzentimeter kollabiert. Diese Objekte bestehen wahrscheinlich aus einem Plasma aus superfluiden Neutronen und Protonen, dessen genaue Eigenschaften unbekannt sind, umgeben von einer Kruste normaler Materie. Da der Drehimpuls des kollabierenden stellaren Kerns erhalten bleibt, rotieren junge Neutronensterne mit Perioden um 30 ms.

Kürzlich haben Andrew Lyne (Jodrell Bank Observatory der University of Manchester) und Kollegen wichtige neue Erkenntnisse zur Rotation von Neutronensternen und ihrer Strahlungserzeugung veröffentlicht [1]. Generell führt die schnelle Rotation zu Strömen im Inneren des Sternrests, die ein starkes Magnetfeld mit Stärken um 10^8 T erzeugen. Nach dem vorherrschenden Modell von Gold-

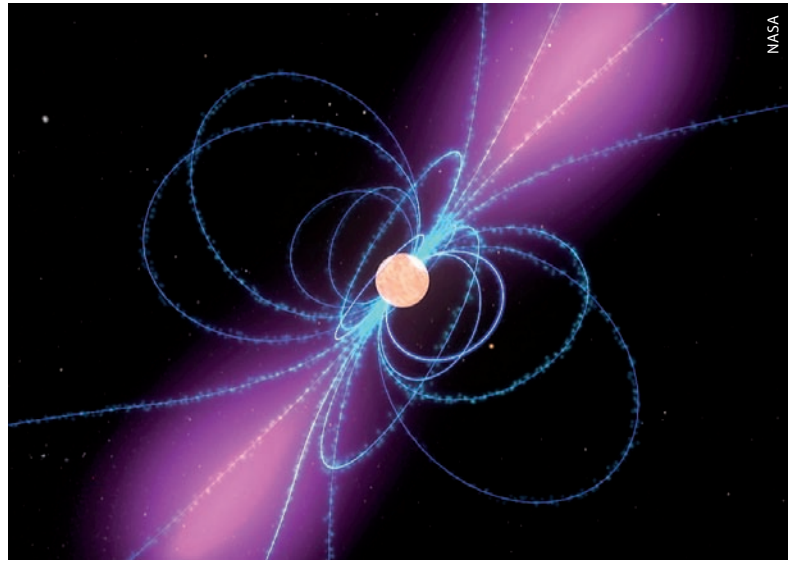


Abb. 1 Wolken geladener Teilchen bewegen sich um die Magnetfeldlinien (blau) eines schnell rotierenden Neutronensterns und sorgen für die Ausbildung

zweier Strahlungskegel. Wie bei einem Leuchtturm sehen wir von der Erde aus charakteristische Strahlungsblitze.

reich und Julian ist das dadurch entstehende elektrische Feld mit einigen 10^{10} V/m an der Sternoberfläche groß genug, dass Elektronen die Austrittsarbeit überwinden und aus der Kruste entweichen können [2]. Sie werden dann vom Neutronenstern weg beschleunigt und erreichen relativistische Geschwindigkeiten, sodass eine nicht isotrope Synchrotronstrahlung entsteht. Dieser „Leuchtturm“ ist

für Beobachter auf der Erde daher nur sichtbar, wenn mindestens einer der Strahlungskegel die Erde überstreicht (Abb. 1). Der Beobachter sieht dann ein periodisches – „pulserendes“ – Signal, daher der Name Pulsar. Einzelne Lichtblitze derselben Quelle haben dabei sehr unterschiedliche Profile. Mittelt man sie jedoch über einige Drehungen, ergibt dies eine charakteristische Pulsform, quasi einen „Fingerabdruck“ des jeweiligen Objektes, der sich häufig über Jahre hinweg so gut wie nicht ändert.

Die von einem Radiopulsar abgestrahlte Leistung stammt letzten Endes aus der Rotationsenergie des Neutronensterns. Sie ergibt sich zu

$$dE_{\text{rot}}/dt = I \Omega \dot{\Omega} \quad (1)$$

wobei $I \sim 1,4 \times 10^{38}$ kg m² das Trägheitsmoment und Ω die Rotationsfrequenz des Pulsars ist. Aufgrund des Energieverlusts durch Abstrahlung vergrößert sich die Rotationsdauer; da $dE_{\text{rot}}/dt < 0$ ist $\dot{\Omega} < 0$. Betagte Vertreter mit einem Alter von einigen 10^7 bis 10^8 Jahren drehen sich daher nur noch einmal pro Sekunde. Der junge Pulsar im Krebsnebel – Produkt der Supernova von 1054 – hat hingegen eine Rotationsperiode von nur 33 ms.

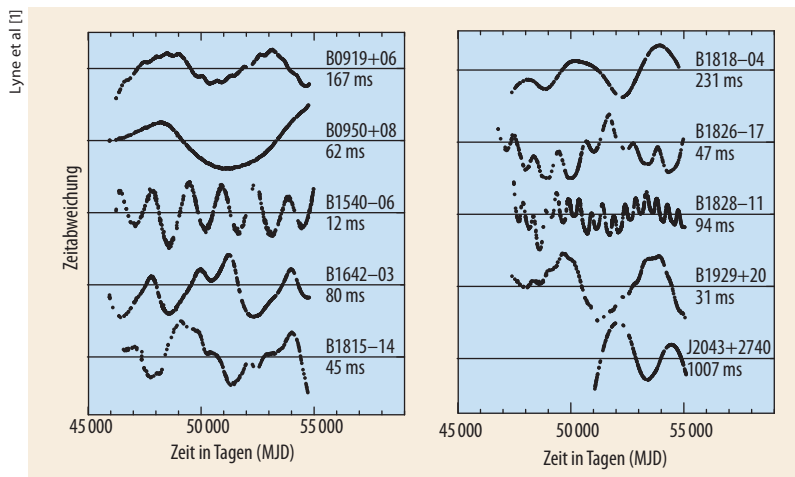


Abb. 2 Der „timing noise“ bei Pulsaren ist die irreguläre Abweichung der tatsächlichen Pulsankunftszeit und damit der Rotationsfrequenz Ω von der mithilfe von Gl. (2) berechneten Zeit. Die gemessenen Ω -Werte schwanken auf Zeitskalen von wenigen Monaten (B1828-11) bis

einigen Jahren (B0950+08), wobei die angegebene Zeit die Differenz zwischen größter und kleinster Zeitabweichung ist. Beim modifizierten Julianischen Datum (MJD) entspricht der Tag 50 000 dem 9. Oktober 1995.

Aufgrund ihres extrem hohen Trägheitsmoments gehören Neutronensterne zu den stabilsten Rotatoren im Universum. Messungen der mittleren Ankunftszeit der Radiopulse erlauben es, die zeitliche Entwicklung von Ω sehr genau zu bestimmen und die Ankunft von Blitzen zu einem fraglichen Zeitpunkt vorherzuberechnen. Deshalb gibt es schon seit 1983 die Idee, ein Netzwerk von Pulsaren für die Detektion niederfrequenter Gravitationswellen einzusetzen [3]. Deren Durchgang verzerrt die Raumzeit und ändert somit die Lichtlaufzeit. Dadurch sollte sich die Ankunftszeit der betroffenen Pulse verschieben.

Aber gehen die kosmischen Uhren dafür genau genug? Die mittlere Periodenentwicklung eines Großteils der Radiopulsare lässt sich mit einem Modell der Form

$$\Omega(t) = \Omega_0 + \dot{\Omega}_0 (t - t_0) + \dots \quad (2)$$

sehr gut beschreiben. Für die besonders schnell rotierenden Millisekundenpulsare ergeben sich Genauigkeiten, die mit der Langzeitstabilität von Atomuhren vergleichbar sind oder diese sogar übertreffen. So besteht bei PSR B1855+09 und PSR B1937+21 zwischen Pulsarzeit und Atomzeit (UTC) für den Zeitraum von 1986 bis 1993 eine rms-Abweichung von lediglich $0,17 \mu\text{s}$ [4].

Allerdings tritt bei vielen Exemplaren in $\Omega(t)$ auch eine irreguläre

Komponente mit einer Amplitude von einigen 10 ms auf, der „timing noise“ (Abb. 2). Ursprünglich hielt man die Abweichungen für ein zufälliges Rauschen, wobei die verschiedensten Ursachen diskutiert wurden, angefangen von Instabilitäten im Inneren des Neutronensterns bis hin zu Störungen seiner Magnetosphäre aufgrund verdampfender Asteroiden. 2006 stellte sich bei einem der extremsten Vertreter, PSR B1931+24, heraus, dass seine Abweichungen aber vielmehr einer bestimmten Systematik unterliegen: Dieser Pulsar zeigt aktive Phasen von fünf bis zehn Tagen Dauer, gefolgt von Perioden, in denen er quasi ausgeknipst ist. Kramer et al. fanden, dass B1931+24, während er Lichtblitze aussendet, um 50 % stärker verlangsamt als während seiner Ruhephasen [5]. Dies gilt als erster direkter Beweis für die Existenz der von Goldreich und Julian vorhergesagten Abbremsung des Neutronensterns aufgrund der Abstrahlung des relativistischen Windes, der während Phasen der Inaktivität deutlich schwächer sein muss.

Lyne et al. greifen in ihrer Untersuchung auf Daten mit einer Zeitbasis von fast 40 Jahren zurück. Daran zeigen sie, dass es sich bei B1931+24 nicht um einen Einzelfall handelt, sondern dass viele weitere Pulsare ebenfalls ein vergleichbares bimodales Verhalten zeigen. Die Änderungen von $\dot{\Omega}$ weisen vielfach

quasi-periodisches Verhalten mit zwei typischen Werten auf. Bei sechs Pulsaren sind diese Variationen auch noch mit Änderungen im Pulsprofil korreliert, die im Extremfall zu den in B1931+24 beobachteten Inaktivitätsphasen führen können.

Diese Analyse belegt erstmalig, dass die Arbeitsweise vieler magnetisierter Neutronensterne innerhalb von Tagen von einem in einen anderen Modus „umschaltet“, um darin dann über Monate oder gar Jahre hinweg stabil zu laufen. Aufgrund dieses Resultats sollte es zum einen möglich sein, für eine große Zahl von Pulsaren das „Rauschen“ direkt mit einem physikalischen Modell zu verbinden, und zum anderen aus beobachteten Pulsprofilen auf das momentane $\dot{\Omega}$ zu schließen. Mit einer Gruppe von Objekten ließe sich somit nun ein vollständig stabiler Zeitstandard definieren, mit dem auch der vorgeschlagene Nachweis von Gravitationswellen in greifbare Nähe rückt.

Jörn Wilms

Prof. Dr. Jörn Wilms, Dr.-Karl-Reimei-Sternwarte, Astronomisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg und Erlangen Centre for Astroparticle Physics, Sternwartstr. 7, 96049 Bamberg

- [1] A. Lyne et al., *Science* **329**, 408 (2010)
- [2] P. Goldreich und W. H. Julian, *Astrophys. J.* **157**, 869 (1969)
- [3] R. W. Hellings und G. S. Downs, *Astrophys. J.* **265**, L39 (1983); G. Hobbs et al., *Class. Quantum Grav.* **27**, 084013 (2010)
- [4] A. E. Rodin, *Month. Not. Royal Astron. Soc.* **387**, 1583 (2008)
- [5] M. Kramer et al., *Science* **312**, 549 (2006)

KURZGEFASST

■ Tau-Neutrino erwischt

Obwohl sie im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik masselos sein sollten, gibt es inzwischen keine Zweifel mehr daran, dass Neutrinos eine endliche Masse haben. Daher kann z. B. ein Myon- (ν_μ) in ein Tau-Neutrino ν_τ „oszillieren“. Nachdem bereits einige Experimente das Verschwinden von Myon-Neutrinos gezeigt haben, hat der Opera-Detektor im italienischen Gran-Sasso-Tunnel nun vermutlich erstmals das Auftauchen eines ν_τ nachgewiesen. Seit 2006 erzeugt das CERN in Genf einen auf das 730 Kilometer entfernte Gran-Sasso-Labor gerichteten ν_μ -Strahl. Wandeln sich während der nur 2,4 ms langen Reise Myon- in Tau-Neutrinos um, so können diese in dem rund 1200 Tonnen schweren geschichteten Detektor aus dünnen Bleiplatten und Emulsions-

filmen τ -Leptonen erzeugen, von denen nun eines nachgewiesen wurde. N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration), *Phys. Lett. B* **691**, 138 (2010)

■ Frequenzkamm im UV

Frequenzkämme haben die Laserspektroskopie revolutioniert, da sie es erlauben, optische Frequenzen mit bislang unerreichter Präzision zu messen. Nun haben holländische Physiker einen Frequenzkamm im extremen Ultraviolett (XUV) bei 51 nm realisiert und damit die Ionisierungsenergie von Helium im Grundzustand zehnmal genauer als bisher gemessen. Um die XUV-Strahlung zu erzeugen, haben die Forscher zwei aufeinander folgende Pulse eines Infrarot-Frequenzkamms verstärkt und auf einen Strahl aus Krypton-Atomen fokussiert. Durch nichtlineare Prozesse

entstanden dabei höhere Harmonische bis zur 15. Ordnung bei 51 nm. D. Z. Kandula et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 063001 (2010)

■ Element 114 in Darmstadt

Durch den Beschuss eines Plutonium-Targets mit Calcium-Ionen ist es am GSI-Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt gelungen, 13 Kerne des superschweren Elements 114 zu erzeugen. Damit wird es wahrscheinlicher, dass die IUPAC dieses vor zehn Jahren erstmals in Dubna erzeugte Element anerkennt. Die Darmstädter Apparatur TASCA soll es erlauben, noch schwerere Elemente zu erzeugen und diese auch chemisch, atom- und kernphysikalisch zu charakterisieren. Ch. E. Düllmann et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 252701 (2010)