

# Keine kontinuierlichen Gravitationswellen von 45 bekannten Pulsaren in O4a-Daten

Die LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)-Kollaboration hat kürzlich eine neue Suche nach extrem schwachen kontinuierlichen Gravitationswellen von Neutronensternen durchgeführt. Für ihre Suche verwendeten die Forschenden Daten aus dem ersten Teil des vierten Beobachtungslaufs (O4a). Sie ist ein weiterer Schritt auf dem Weg zum Nachweis von Gravitationswellen, die von stabilen, isolierten Objekten und nicht von dramatischen Ereignissen wie den Verschmelzungen Schwarzer Löcher abgestrahlt werden. Kontinuierliche Gravitationswellen sind schwache, dauerhafte, fast periodische Signale. Sie können uns etwas über das Innere von Neutronensternen verraten. Sie sind die dichtesten Objekte im Universum, abgesehen von Schwarzen Löchern.



## Was sind kontinuierliche Gravitationswellen, und warum sind sie wichtig?

Gravitationswellen sind Schwingungen der Raumzeit. Sie entstehen, wenn sich massereiche Objekte beschleunigt bewegen. Bislang hat die LVK-Kollaboration Beobachtungen von fast 100 Gravitationswellen-Signalen veröffentlicht, die zumeist von verschmelzenden Paaren Schwarzer Löcher stammen. Im Gegensatz zu diesen explosiven Ereignissen gehen Astronom\*innen davon aus, dass kontinuierliche Gravitationswellen von einzelnen Neutronensternen mit winzigen „Unvollkommenheiten“ kommen. Neutronensterne sind Überreste massereicher Sterne nach Supernova-Explosionen. Dabei bleibt ein unglaublich dichter Kern mit nur 20 Kilometern Durchmesser zurück, der mehr als unsere Sonne wiegen kann. Wenn ein Neutronenstern eine winzige Beule oder Verformung aufweist, könnte er schwache, periodische Gravitationswellen aussenden, während er um seine Achse rotiert. Die Entdeckung dieser Wellen wäre ein Durchbruch, denn sie würde es den Forschenden ermöglichen, die „Steifigkeit“ und den Aufbau von Neutronensternen zu untersuchen. So ließen sich neue Informationen über Materie unter Extrembedingungen gewinnen.

Abbildung 1: Aufnahme des Krebsnebels im sichtbaren Licht und im Röntgenbereich. Der Krebs-Pulsar befindet sich in der Mitte des Bildes. Bildnachweis: Röntgenstrahlung: NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.; sichtbares Licht: NASA/HST/ASU/J. Hester et al.

## Warum Pulsare?

Pulsare sind besonders interessante Ziele für die Suche nach kontinuierlichen Gravitationswellen. Sie sind Neutronensterne mit starken Magnetfeldern, die gebündelte elektromagnetische Wellen in verschiedenen Frequenzbereichen (Radiowellen, Röntgen- und Gammastrahlung) aussenden. Während sie rotieren, überstreichen diese Strahlen wie ein kosmischer Leuchtturm das All und erzeugen jedes Mal, wenn sie uns auf der Erde treffen, ein Aufleuchten.

Beobachtungen von Pulsaren im elektromagnetischen Spektrum mit verschiedenen Observatorien liefern genaue Informationen über ihre Position am Himmel, ihre Rotationsfrequenz und deren zeitliche Entwicklung. Diese Informationen machen Pulsare zu erstklassigen Kandidaten für die Suche nach kontinuierlichen Gravitationswellen, da wir uns genau

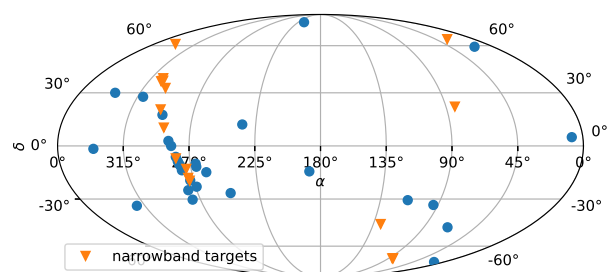


Abbildung 2: Himmelspositionen der analysierten Zielobjekte in äquatorialen Koordinaten.

auf den Frequenzbereich konzentrieren können, in diese auftreten könnten. Bei dieser Suche konzentrierten sich die LVK-Wissenschaftler\*innen auf 45 bekannte Pulsare (siehe Abbildung 2), um nach ihrer schwachen, kontinuierlichen Abstrahlung zu suchen. Das Team untersuchte zwei verschiedene theoretische Modelle für die Abstrahlung. Eines sagt eine Abstrahlung kontinuierlicher Gravitationswellen beim Doppelten der Rotationsfrequenz vorher (Modell mit einer Harmonischen). Das andere Modell sagt eine Abstrahlung kontinuierlicher Gravitationswellen sowohl beim Einfachen als auch beim Doppelten der Rotationsfrequenz vorher (Modell mit zwei Harmonischen).

## Wie die Suche funktioniert

Die LVK-Kollaboration nutzt einige der empfindlichsten Instrumente der Welt, um nach Gravitationswellen zu suchen. Diese Detektoren, bei denen es sich um hochentwickelte Interferometer handelt, können unglaublich kleine Verzerrungen in der Raumzeit aufspüren. Aber selbst mit ihrer Empfindlichkeit ist der Nachweis von kontinuierlichen Gravitationswellen extrem schwierig. Sie sind so schwach, dass sie im Hintergrundrauschen der Instrumente verborgen sein dürften. Daher müssen sich die Wissenschaftler\*innen auf ausgeklügelte Algorithmen und Datenanalyse-Techniken verlassen, um im Rauschen verborgene Signale „auszugraben“.

Das Team nutzte detaillierte Informationen über die Position und die Rotation der einzelnen Pulsare, die mit verschiedenen Observatorien für elektromagnetische Strahlung gewonnen wurden. Diese Herangehensweise wird als Multi-Messenger-Astronomie bezeichnet: Elektromagnetische Wellen stellen Informationen für die Suche nach kontinuierlichen Gravitationswellen bereit, um deren Entdeckungschancen zu verbessern. Dafür wird die Suche speziell auf die einzigartigen Merkmale jedes Pulsars abgestimmt. Solche gezielten Suchen unterscheiden sich von Suchen am gesamten Himmel, bei denen die Wissenschaftler\*innen nach einem beliebigen Signal am gesamten Himmel suchen – ohne zu wissen, woher es kommen könnte. Bei einer gezielten Suche können sich die Forschenden anhand bekannter Pulsare auf die Frequenzbereiche konzentrieren, in denen eine kontinuierliche Gravitationswelle zu erwarten ist. Sie ist die empfindlichste Untersuchung, hängt aber stark von dem betrachteten Modell für die Abstrahlung ab, also von dem physikalischen Mechanismus, der die kontinuierlichen Gravitationswellen erzeugt und die Eigenschaften der erwarteten Signale bestimmt.

## Was haben wir herausgefunden?

Bei der Analyse der O4a-Daten fand die LVK-Kollaboration keine eindeutigen kontinuierlichen Gravitationswellen-Signale, die von den untersuchten 45 Pulsaren stammen. Trotzdem sind unsere Ergebnisse wertvoll. Durch die Analyse der Daten konnten wir neue Obergrenzen für die Abweichung von der Kugelform oder „Elliptizität“ dieser Neutronensterne bestimmen, ohne dass sie nachweisbare kontinuierliche Gravitationswellen aussenden (diese Obergrenzen finden sich auch in Abbildung 3). Damit können die Wissenschaftler\*innen nun die maximal mögliche Verformung dieser Pulsare genauer abschätzen, selbst wenn ihre jeweilige Abweichung von der Kugelform nicht groß genug ist, um ein nachweisbares Signal zu erzeugen. Für den hellen Millisekundenpulsar J0437-4715 in vergleichsweise geringer Entfernung zur Erde beträgt die strengste Obergrenze der Elliptizität etwa 9 Teile pro Milliarde, was einer Verformung von weniger als 100 Mikrometern entspricht, wenn man einen Neutronensternradius von 10 Kilometer annimmt!

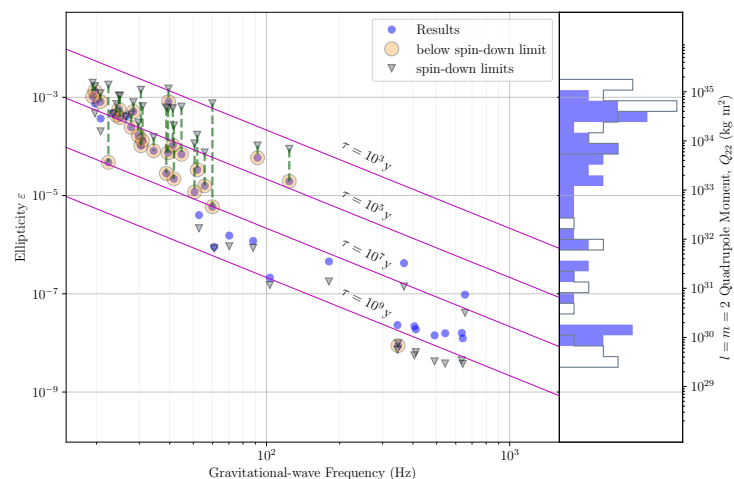


Abbildung 3: Blaue Kreise: Experimentelle Obergrenze der Elliptizität für jeden Pulsar in Abhängigkeit von der erwarteten Frequenz der kontinuierlichen Gravitationswellen. Graue Dreiecke: Theoretische Obergrenze für die Elliptizität unter der Annahme, dass die Abnahme der Rotationsfrequenz der Pulsare vollständig auf die Abstrahlung kontinuierlicher Gravitationswellen zurückzuführen ist.

Abbildung 3: Blaue Kreise: Experimentelle Obergrenze der Elliptizität für jeden Pulsar in Abhängigkeit von der erwarteten Frequenz der kontinuierlichen Gravitationswellen. Graue Dreiecke: Theoretische Obergrenze für die Elliptizität unter der Annahme, dass die Abnahme der Rotationsfrequenz der Pulsare vollständig auf die Abstrahlung kontinuierlicher Gravitationswellen zurückzuführen ist.

## Was sind die nächsten Schritte?

Obwohl sich kontinuierliche Gravitationswellen nach wie vor nicht direkt nachweisen lassen, bringt uns jede Suche ihrer zukünftigen Entdeckung näher. Jede Verbesserung der Empfindlichkeit erhöht die Chance eines Tages ein kontinuierliches Gravitationswellen-Signal nachzuweisen. Damit könnten wir das Universum auf eine neue Art erforschen. Die LVK-Kollaboration wird ihre Techniken weiter verfeinern und die Empfindlichkeit der Detektoren in zukünftigen Beobachtungsläufen erhöhen, um dem Tag näher zu kommen, an dem ein kontinuierliches Gravitationswellen-Signal entdeckt werden könnte. Auf dem Weg dahin können auch ausbleibende Gravitationswellen-Nachweise sehr interessant sein, weil sie unser Wissen über die größtmögliche Verformung von Neutronensternen weiter verbessern.

Die Suche nach kontinuierlichen Gravitationswellen ist ein langwieriges Unterfangen, und jede Forschungsrunde bringt uns dem Nachweis dieser schwachen, dauerhaften Gravitationswellen von Neutronensternen näher. Wenn diese Wellen entdeckt werden, könnten sie einen stetigen Strom von Informationen über einige der geheimnisvollsten Objekte im Universum liefern und uns helfen, grundlegende Fragen darüber zu beantworten, was mit der Materie bei extremer Dichte passiert.

## Glossar

**Elliptizität:** Ein Maß dafür, wie stark die Form eines Neutronensterns von einer perfekten Kugel abweicht. Dies kann dazu führen, dass er Gravitationswellen aussendet.

**Kontinuierliche Gravitationswellen:** Dauerhafte Gravitationswellen, die in der Regel von rotierenden Neutronensternen mit winzigen Verformungen erzeugt werden.

**Neutronensterne:** Unglaublich dichte Überreste massereicher Sterne, die als Supernovae explodiert sind.

**Pulsare:** Eine Art Neutronenstern mit starken Magnetfeldern. Er sendet, während er rotiert, regelmäßig gebündelte elektromagnetische Strahlung aus. Dies erzeugt bei der Beobachtung von der Erde aus ein Pulsieren.

## Weiterführende Informationen

**Besuchen Sie unsere Internetseiten:**

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

**Lesen Sie eine frei verfügbare Vorabversion des vollständigen wissenschaftlichen Fachartikels:**

<https://dcc.ligo.org/P2300352/public> oder <https://arxiv.org/abs/2501.01495>

**Die englische Originalfassung dieser Science Summary finden Sie auf**

<https://ligo.org/science-summaries/O4aKnownPulsars/>.