

Eine GEO600-Suche nach Gravitationswellen im Zusammenhang mit galaktischen Schnellen Radioblitzen von SGR 1935+2154

Schnelle Radioblitze (englisch: fast radio bursts, FRBs) sind energiereiche Radiosignale, die typischerweise etwa eine Tausendstelsekunde dauern. Der größte Teil der vielen Tausend beobachteten Schnellen Radioblitze erreicht die Erde aus sehr großen Entfernungen – von außerhalb unserer eigenen Galaxie. Dass wir extragalaktische Schnelle Radioblitze aufspüren können, hängt mit ihrer extrem hohen Leistung zusammen: Ein Schneller Radioblitz kann für einen Sekundenbruchteil etwa 100.000 bis 10 Billionen Mal heller sein als unsere Sonne! In einigen Fällen kommen mehrere Schnelle Radioblitze von derselben Stelle am Himmel. Zwischen den Ausbrüchen liegen Ruhephasen, die Minuten bis Jahre dauern. Das deutet darauf hin, dass die physikalischen Prozesse, die Schnelle Radioblitze erzeugen, ihre Quellen nicht vollständig zerstören (auch wenn sie enorm viel Energie freisetzen).

Wir wissen nicht genau, woher Schnelle Radioblitze kommen, gehen aber davon aus, dass sie von explosiven Ereignissen in der unmittelbaren Umgebung von Neutronensternen stammen. Einige Neutronensterne weisen die stärksten bekannten Magnetfelder im Universum auf – das Billiardenfache (10^{15}) des Erdmagnetfeldes – und werden daher „Magnetare“ genannt. Das Magnetfeld eines Magnetars durchzieht sein Inneres, durchdringt seine Oberfläche und erstreckt sich über große Entfernungen. Dabei bildet es eine Atmosphäre mit extrem geringer Dichte, die „Magnetosphäre“, die der Magnetosphäre der Erde oder der Sonne ähnelt. Magnetare sind extreme Objekte, die nicht nur Schnelle Radioblitze verursachen, sondern auch anderweitig aktiv sind: Sie erzeugen Röntgenausbrüche, d. h. helle Blitze im Röntgenbereich, und „glitches“ – plötzliche Beschleunigungen ihrer Rotation.

Ein Schneller Radioblitz vom galaktischen Magnetar SGR 1935+2154 lieferte am 28. April 2020 einen wichtigen Hinweis auf den Ursprung von Radioblitzen. Es war das erste Mal, dass ein Schneller Radioblitz aus unserer eigenen Galaxie kam, und auch das erste Mal, dass Schnelle Radioblitze und Röntgenausbrüche gleichzeitig beobachtet wurden. In weniger als drei Jahren hat diese besondere Quelle drei weitere Schnelle Radioblitze erzeugt: am 8. Oktober 2020, am 14. Oktober 2022 und am 1. Dezember 2022.

Schnelle Radioblitze und Röntgenausbrüche von Magnetaren hängen möglicherweise zusammen. Allerdings kann ein Magnetar auch Schnelle Radioblitze ohne Röntgenausbrüche erzeugen und umgekehrt. Auch bei SGR 1935+2154 ist dies der Fall. Ein von vielen Forschenden akzeptiertes Modell erklärt die Entstehung der Röntgenausbrüche durch seismische Aktivität in der Magnetar-Kruste. Bei ausreichend starker Verformung reißt diese Kruste wie die Erdkruste bei einem Erdbeben. Die enorme Energie, die dabei freigesetzt wird, wirkt sowohl auf das Innere des Neutronensterns als auch auf die ihn umgebende Magnetosphäre. Die Energie, die in die Magnetosphäre gelangt, kann letztendlich einen Röntgenausbruch erzeugen und/oder einen Schnellen Radioblitz auslösen. Der Rest der Energie (der größte Teil) geht in das Innere des Neutronensterns. Er versetzt es in Schwingungen bei sehr speziellen Frequenzen, den sogenannten quasi-normalen Schwingungsmoden.

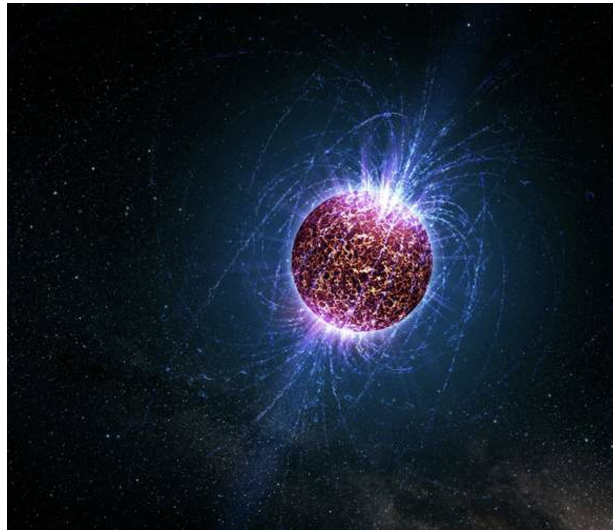


Abbildung 1: Künstlerische Darstellung eines Magnetars, einer möglichen Quelle für Schnelle Radioblitze. Bildnachweis: NASA

Die Suche nach Gravitationswellen

Gravitationswellen sind Schwingungen der Raumzeit. Sie tragen Energie von ihren Quellen in den Rest des Universums. Die Schwingungen im Inneren des Magnetars, die durch das Brechen seiner Kruste entstehen, sind eine potenzielle Quelle für Gravitationswellen. Diese könnten zusammen mit Schnellen Radioblitz entstehen. Die Eigenschaften dieser Gravitationswellen hängen von der Beschaffenheit des Neutronensterns und seines Magnetfelds ab. Forschende hoffen seit langem auf eine nahezu zeitgleiche Beobachtung von Röntgenausbrüchen und Gravitationswellen, bisher ist dies allerdings noch nicht gelungen. Theoretische Modelle sagen voraus, dass die Energie, die bei Schwingungen von Magnetaren in Form von Gravitationswellen freigesetzt wird, im Vergleich zu den bereits beobachteten Quellen von Gravitationswellen (wie Verschmelzungen Schwarzer Löcher) relativ gering sein könnte. Deswegen dürften die derzeitigen Gravitationswellen-Detektoren nicht empfindlich genug sein, um sie nachzuweisen. Auch wenn eine Messung von Gravitationswellen im Zusammenhang mit Magnetar-Aktivität wissenschaftlich von großer Bedeutung wäre, erlaubt uns eine Nicht-Messung, einen oberen Grenzwert für die in Form von Gravitationswellen freigesetzte Energie abzuschätzen. Damit erhalten wir Informationen über die Gültigkeit der physikalischen Modelle, mit denen wir die Beschaffenheit von Magnetaren beschreiben. In dieser Publikation berichten wir über die Nicht-Beobachtung von Gravitationswellen bei den Schnellen Radioblitzen, die vom galaktischen Magnetar SGR 1935+2154 beobachtet wurden.

Je weiter die Quelle der Gravitationswellen entfernt ist, desto schwächer ist das auf der Erde messbare Signal. Selbst gigantische Energiemengen, wie sie in gewaltigen astrophysikalischen Ereignissen freigesetzt werden, erzeugen auf der Erde winzige Effekte – so klein, dass wir extrem empfindliche und komplexe Detektoren einsetzen müssen. Wir beobachten Gravitationswellen mit Hilfe von Lasern. Sie überwachen die Bewegung von aufgehängten Spiegeln in den Observatorien LIGO, Virgo und KAGRA, sowie bei GEO600. Es ist vorteilhaft mit mehr als einem Gravitationswellen-Detektor gleichzeitig zu beobachten, um falsche Signale auszuschließen, die Gravitationswellen ähneln. Wenn eine Gravitationswelle einen Detektor durchläuft, werden ähnliche Signale zu leicht unterschiedlichen Zeiten in den verschiedenen Detektoren auf der Erde erwartet.

Wenn ein Schneller Radioblitz eines bekannten Magnetars beobachtet wird, suchen wir in den Gravitationswellen-Daten nach möglichen zugehörigen Signalen zur gleichen Zeit. Die vom galaktischen Magnetar SGR 1935+2154 erzeugten Schnellen Radioblitze traten zu Zeiten auf, als die Detektoren von LIGO und Virgo nicht im Beobachtungsmodus waren. Glücklicherweise war GEO600 – auch wenn es nicht so empfindlich wie LIGO und Virgo ist – während drei der vier Schnellen Radioblitze von SGR 1935+2154 in Betrieb und sammelte nützliche Gravitationswellen-Daten.

Mit Daten von nur einem Detektor zu arbeiten, bringt einige Herausforderungen mit sich. Erstens wird die Unterscheidung zwischen echten Signalen und falschen von zufälligem Rauschen verursacht, wie oben erläutert. Zweitens ist es schwieriger, sich auf den Himmelsbereich zu konzentrieren, von dem der Schnelle Radioblitz kam, da es nicht möglich ist, für die Lokalisierung Daten von mehreren Gravitationswellen-Observatorien zu kombinieren. Drittens ist die Empfindlichkeit von GEO600 geringer als die der LIGO- und Virgo-Detektoren. Das führt dazu, dass Gravitationswellen im Frequenzbereich unter etwa 1 kHz nur äußerst schwer nachzuweisen sind. Glücklicherweise dürften die Gravitationswellen, die durch schnelle Schwingungen im Inneren des Magnetars erzeugt werden, nach den theoretischen Vorhersagen bei hohen Frequenzen (1-3 kHz) auftreten.

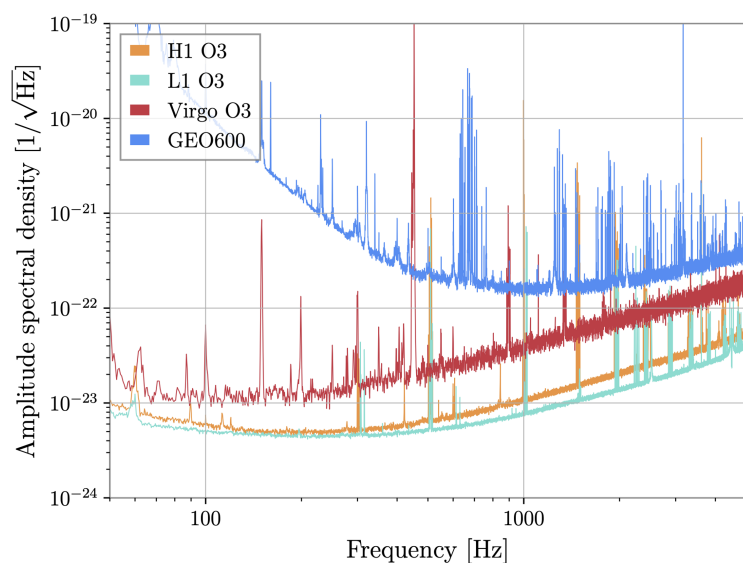


Abbildung 2: Empfindlichkeitskurven von LIGO (orange, blaugrün) und Virgo (rot) im Vergleich zu GEO600 (blau) in Abhängigkeit von der Gravitationswellen-Frequenz. Je niedriger die Kurve, desto empfindlicher ist der Detektor bei dieser Frequenz.

In diesem Bereich hat GEO600 seine höchste Empfindlichkeit.

Anders als bei Verschmelzungen von Schwarzen Löchern ist die genaue Form der erwarteten Gravitationswellen-Signale unbekannt. Daher verwenden wir generische „Wellenformen“. Sie stellen unsere beste Vermutung für das tatsächliche Aussehen dar. Wir führen eine „minimal modellierte“ Suche durch. Das bedeutet, dass sie einen gewissen Spielraum für die Entdeckung von solchen Signalen hat, die nicht perfekt mit den theoretischen Wellenformen übereinstimmen. Wir haben zwei verschiedene Software-Pakete für die Analyse verwendet: eines für die Suche nach kurzen Signalen (Dauer unter einer Sekunde) und ein anderes für längere Signale (Dauer von ein bis zehn Sekunden). Wir haben während der Schnellen Radioblitz und der zeitlich zusammenhängenden Röntgenereignisse von SGR 1935+2154 nach Gravitationswellen-Signalen gesucht.

Ergebnisse und Blick in die Zukunft

Selbst wenn wir berücksichtigen, dass SGR 1935+2154 die (bisher) nächstgelegene Quelle von Schnellen Radioblitzen ist, konnten wir keine Gravitationswellen im Zusammenhang mit den ihnen nachweisen. Um die Empfindlichkeit unserer Untersuchung zu bestimmen, haben wir künstliche Daten erzeugt, die Gravitationswellen mit plausiblen Eigenschaften beinhalten. Wir haben die Amplitude (die „Lautstärke“ der Gravitationswellen) ermittelt, ab der unsere Suche diese simulierten Gravitationswellen nachweisen kann. Anschließend haben wir diese Amplituden verwendet, um Obergrenzen für die in Form von Gravitationswellen abgestrahlte Energie zu bestimmen: Ein Signal hätte weniger Energie haben müssen als unsere Obergrenze, um nicht nachweisbar zu sein. Diese Grenzen sind um vier Zehnerpotenzen niedriger als die Obergrenzen, die zuvor von der LVK-Kollaboration bestimmt wurden. Sie beruhen auf einer Untersuchung von Schnellen Radioblitzen aus dem Jahr 2019. Wir ermitteln auch leicht niedrigere Obergrenzen für das Verhältnis von in Gravitationswellen freigesetzter Energie zu der in Radiowellen während des Schnellen Radioblitzes freigesetzten Energie.

Alle Vorhersagen für die Energie, die im Zusammenhang mit Schnellen Radioblitzen in Form von Gravitationswellen freigesetzt wird, liegen unterhalb unserer ermittelten Obergrenzen. Damit sind unsere neuesten Grenzwerte nicht restriktiv genug, um zwischen den verschiedenen theoretischen Vorhersagen für Gravitationswellen im Zusammenhang mit Schnellen Radioblitzen von Magnetaren unterscheiden zu können. Diese Obergrenzen schränken dennoch die Möglichkeiten ein, wie die Abstrahlung von Gravitationswellen mit Schnellen Radioblitzen zusammenhängen kann. Zudem helfen sie Theoretiker*innen bei ihrer Suche nach verbesserten Modellen von FRBs.

Da die Gravitationswellen-Detektoren der LIGO-Virgo-KAGRA-Kollaboration bis Mitte 2025 beobachtet werden können wir – falls SGR 1935+2154 (oder ein anderer galaktischer Magnetar) erneut FRBs erzeugt – mit empfindlicheren Detektoren nach Gravitationswellen suchen. Das würde uns eine weitere Gelegenheit bieten, diese extremen astrophysikalischen Phänomene besser zu verstehen.

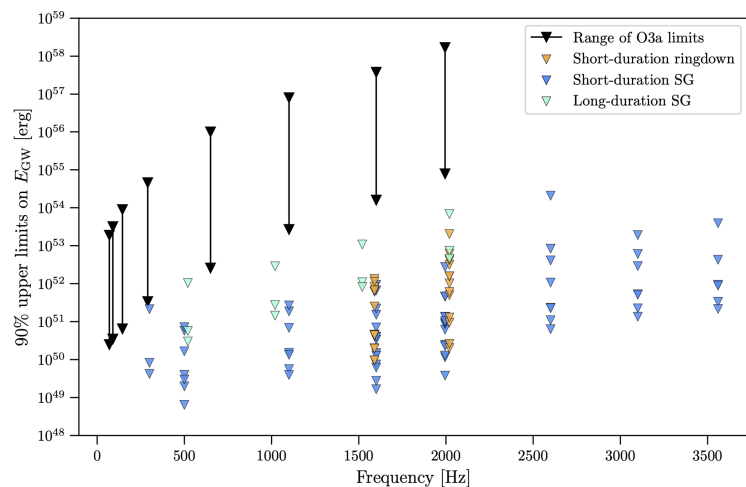


Abbildung 3: Obergrenzen für die bei Schnellen Radioblitzen freigesetzte Gravitationswellen-Energie. Auf der vertikalen Achse sind diese Obergrenzen in der Einheit erg dargestellt, auf der horizontalen Achse ist die Frequenz der Gravitationswellen angegeben. Farbige Dreiecke stellen unsere neuen Grenzwerte für verschiedene Frequenzen und Modelle dar. Schwarze Pfeile zeigen die Intervalle der älteren Grenzwerte. Unsere neuen Grenzwerte sind deutlich niedriger.

Weiterführende Informationen

Besuchen Sie unsere Internetseiten:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Lesen Sie eine frei verfügbare Vorabversion des vollständigen wissenschaftlichen Fachartikels:

<https://dcc.ligo.org/P2400192/public> oder <https://arxiv.org/abs/2410.09151>

Die englische Originalfassung dieser Science Summary finden Sie auf

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