

Gravitationswellen und Gamma-Strahlen von verschmelzenden Neutronensternen: GW170817 und GRB 170817A

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:
<https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817GRB/index.php>

Das Gravitationswellensignal GW170817 wurde am 17. August 2017 von den Detektoren Advanced [LIGO](#) und [Virgo](#) entdeckt. Es wird angenommen, dass dies das erste Signal von der Verschmelzung zweier Neutronensterne ist. Nur 1,7 Sekunden nachdem das Gravitationswellensignal aufgezeichnet wurde, detektierten der [Fermi Gamma-ray Burst Monitor \(GBM\)](#) und das [Anticoincidence Shield for the SPECTrometer for the INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory \(INTEGRAL SPI-ACS\)](#) einen kurzen Gammastrahlenausbruch, GRB 170817A. Schon seit Jahrzehnten vermuteten Astronomen, dass kurze Gammastrahlenausbrüche durch die Fusion von zwei Neutronensternen, oder eines Neutronensterns und eines Schwarzen Loches, produziert werden. Die Kombination von GW170817 und GRB 170817A stellt den ersten direkten Beweis dar, dass kollidierende Neutronensterne in der Tat kurze Gammastrahlenausbrüche produzieren können.

Einführung

Gammastrahlenausbrüche oder [Gammablitze](#) (abgekürzt GRBs für Englisch „Gamma-Ray Bursts“) gehören zu den energiereichsten Ereignissen, die in der Natur beobachtet werden können. Sie geben in der Regel so viel Energie in nur wenigen Sekunden frei wie unsere Sonne während ihrer gesamten Lebensdauer von 10 Milliarden Jahren. Sie treten etwa einmal pro Tag auf, und kommen aus zufälligen Himmelsrichtungen. Diese GRBs können von Bruchteilen von Sekunden bis zu Tausenden von Sekunden dauern. In der Regel teilen wir sie jedoch in zwei Gruppen ein, ungefähr gemäß ihrer Dauer, wobei die Teilung bei der 2-Sekunden-Marke liegt (obwohl auch komplexere Merkmale bei der Klassifizierung berücksichtigt werden). Lange GRBs (> 2 Sekunden) entstehen durch den Kernzusammenfall schnell rotierender massereicher Sterne. Dagegen haben wir nun den Beweis dafür, dass kurze GRBs (<2 Sekunden) auf das Verschmelzen zweier [Neutronensterne](#) zurückzuführen sind; zusätzlich können sie vielleicht auch (wenn auch noch nicht direkt beobachtet) von der Verschmelzung eines Neutronenstern mit einem [Schwarzen Loch](#) stammen.

Signale von Gravitationswellen und Gammablitzen

Gravitationswellenbeobachtung: Die zwei Advanced-LIGO-Detektoren und der Virgo-Detektor beobachteten das Gravitationswellensignal GW170817 mit einem kombinierten Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 32,4; es ist damit das lauteste Gravitationswellensignal, das bisher aufgezeichnet wurde. Die Datenanalyse der Gravitationswellen ergab, dass das Signal mit den Erwartungen für die Verschmelzung zweier Neutronensterne übereinstimmt, mit Massen zwischen der 0,86- und 2,26-fachen Sonnenmasse, über hundert Millionen Lichtjahre

entfernt. Dies macht GW170817 zum uns nächsten Gravitationswellenereignis, das jemals beobachtet wurde. Die [Triangulation](#) zwischen den drei Detektoren ermöglichte die Lokalisierung des Signals innerhalb eines Himmelsbereichs von 28 Quadratgrad mit 90% Wahrscheinlichkeit. Dies ist der kleinste Lokalisierungsbereich für eine Quelle, den LIGO und Virgo jemals ermittelt haben, siehe Abbildung 1. Ein Zeit-Frequenz-Diagramm von GW170817 ist im unteren Bereich von Abbildung 2 zu sehen.

Beobachtung von Gammastrahlenausbrüchen: Die Gammastrahlenemission wurde unabhängig von [Fermi](#)-GBM und [INTEGRAL](#) erfasst, zwei Gammastrahlen-Observatorien die die Erde umkreisen. GRB 170817A wurde eigenständig durch Fermi-GBM in 3 von 12 Natriumiodid-(NaI)-Detektoren erfasst; das Signal zeigt offensichtlich zwei unterschiedliche Komponenten. Das anfängliche Signal, das etwa eine halbe Sekunde dauerte, zeigt typische Merkmale eines kurzen GRB, und wird im zweiten Feld von Abbildung 2 dargestellt. Darauf folgte noch eine schwächere Strahlungskomponente bei niedriger Energie, die einige Sekunden dauerte; sie wird im ersten Feld von Abbildung 2 gezeigt. Anhand der Charakteristika von GRB 170817A war dies dreimal wahrscheinlicher ein kurzer GRB als ein langer GRB.

Fermi-GBM lokalisierte GRB 170817A (mit 90% Wahrscheinlichkeit) auf 1100 Quadratgrad. Die routinemäßige, ungezielte Suche nach kurzen Ereignissen mit INTEGRAL SPI-ACS identifizierte GRB 170817A ebenfalls, wie im dritten Feld von Abbildung 2 dargestellt. Fermi-GBM und INTEGRAL SPI-ACS erkennen häufig gemeinsam kurze GRBs; es wurde (mit hoher Wahrscheinlichkeit) bestätigt, dass dies dann auch tatsächlich dieselben Ereignisse sind. Mit Hilfe des Unterschieds in den Ankunftszeiten von GRB 170817A in INTEGRAL SPI-ACS und Fermi-GBM kann eine gemeinsame Lokalisierung erfolgen. Diese Lokalisierung, sowie die durch Fermi-GBM allein und die von LIGO und Virgo, sind in Abbildung 1 dargestellt.

Trotz der überlappenden Himmelslokalisierung, die mit den Gravitationswellendetektoren und den Gammastrahlen-Satelliten ermittelt wurden, und der engen zeitlichen Beziehung der beiden Signale bleibt die Frage, ob GW170817 und GRB 170817A aus derselben Quelle stammen. Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei unabhängige Signale so eng im Raum und Zeit überlappen, beträgt 1 zu 20 Millionen. Daher ist es sehr wahrscheinlich, dass die beiden Signale auf die gleiche Neutronensternverschmelzung zurückzuführen sind.

Was kann uns diese gemeinsame Beobachtung lehren?

Die gemeinsame Gravitationswellen- und GRB-Beobachtung bietet eine völlig neue Möglichkeit, die inneren Vorgänge von kurzen GRBs zu studieren und ermöglicht es uns, eine Reihe grundlegender Konzepte der Physik, sowie die Eigenschaften der kollidierten Neutronensterne zu untersuchen. All dies erfolgt unter Berücksichtigung (1) der 1,7 Sekunden Abstand zwischen GW170817 und GRB 170817A, (2) der beiden Signale, die mehr als einhundert Millionen Lichtjahre zurücklegten, und (3) unseren Erwartungen, wann die beiden Signale während einer Neutronensternverschmelzung jeweils entstanden sein sollten.

Unsere derzeitige beste Gravitationstheorie, Einsteins [Allgemeine Relativitätstheorie](#), sagt voraus, dass die Geschwindigkeit von Gravitationswellen, Gammastrahlen und Licht identisch ist. Indem wir die Zeitverzögerung zwischen den beiden Signalen betrachten, können wir den Unterschied zwischen der Geschwindigkeit der Schwerkraft und des Gamma-Lichts testen. Der Bruchteil der Differenz zwischen der Geschwindigkeit der Schwerkraft und des Lichts liegt sehr nahe bei Null, zwischen $-0,0000000000000003$ und

0,000000000000000007! Wir waren damit auch in der Lage, das [Äquivalenzprinzip](#) und die [Lorentz-Invarianz](#) zu testen, zwei der grundlegenden Prinzipien in Einsteins Theorie.

GRB 170817A im Vergleich mit anderen GRBs

GRB 170817A ist 100-mal näher als typische von Fermi-GBM beobachtete GRBs. Es ist auch viel dunkler (weniger leuchtkräftig) im Vergleich zu anderen kurzen oder auch langen GRBs. Diess bedeutet, dass GRB 170817A weniger energetisch ist: zwischen 100- bis 1.000.000-mal weniger Energie als andere kurze GRBs. Da angenommen wird, dass Gammastrahlenausbrüche eng gebündelt abgestrahlt werden („Beaming“), ist eine mögliche Erklärung für die Leuchtschwäche dieses GRB, dass sich die Erde am Rande des Strahlenbündels befand. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass der Strahl nicht gleichmäßig hell war. Angesichts der beobachteten Leuchtschwäche von GRB 170817A und der Annahme, dass er relativ nahe war, stellt sich folgende Frage: Gibt es eine Population von ähnlich dunklen und sich in der Nähe befindlichen GRBs, die bisher verpasst wurden (aufgrund der begrenzten Empfindlichkeit von Gammastrahleninstrumenten), oder fehlinterpretiert als weiter entfernt als sie es in Wirklichkeit sind (aufgrund von Voreingenommenheiten bei der Bestimmung der Ursprungsgalaxie oder einfach weil deren Entfernung unbekannt ist - dies ist der Fall für die meisten kurzen GRBs)? Zukünftige gemeinsame Gammastrahlen- und Gravitationswellenbeobachtungen werden diese Punkte direkt untersuchen.

Wie viele gemeinsame Beobachtungen können wir in den kommenden Jahren erwarten?

GRB 170817A ist nur der Beginn einer neuen Ära der gemeinsamen Gammastrahlen- und Gravitationswellenbeobachtungen, die helfen werden, die außergewöhnliche Physik von Neutronensternen und Gammablitzern aufzudecken. LIGO und Virgo werden zur Zeit überholt, um ihre Leistung weiter zu verbessern. In Anbetracht der erwarteten Empfindlichkeit dieser Detektoren im nächsten Beobachtungslauf (geplant für Ende 2018), werden zwischen 1 und 50 Gravitationswellensignale aus Neutronensternverschmelzungen pro Jahr erwartet. Zusammen mit Fermi-GBM werden jährlich zwischen 0,1 und 1,4 gemeinsame Gravitationswellen- und GRB-Beobachtungen erwartet. Wenn die Gravitationswellendetektoren ihre angestrebte volle Empfindlichkeit erreichen (circa 2020), steigt die erwartete Anzahl von detektierbaren Gravitationswellensignalen auf 6 bis 120 und die Anzahl der gemeinsamen Entdeckungen mit Fermi-GBM auf 0,3 bis 1,7 pro Jahr.

Das globale Netzwerk von Gravitationswellendetektoren und Weitfeld-Gammastrahlenobservatorien, wie Fermi-GBM und INTEGRAL SPI-ACS, wird für die Zukunft der Gravitationswellen-GRB-Astronomie entscheidend sein.

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN:

- Der vollständige Fachartikel ist [hier](#) gratis abzurufen und wurde in der Zeitschrift „The Astrophysical Journal“ [veröffentlicht](#).
- Websites von LIGO und Virgo: <https://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- LIGO Open Science Center mit Zugang zu den Rohdaten von GW17081: <https://losc.ligo.org>

Allgemeinverständliche Zusammenfassungen weiterer Veröffentlichungen über die Entdeckung und Bedeutung von GW170817:

- [GW170817: Gravitationswellenbeobachtung eines Doppel-Neutronenstern-Systems](#)
- [Multi-Messenger-Beobachtungen eines verschmelzenden Doppelneutronensterns](#)
- [Messung der Expansion des Universums mit Gravitationswellen](#)
- [Suche nach dem Überrest von GW170817: Neutronenstern oder Schwarzes Loch?](#)
- [Vorhersage der Folgen der Neutronensternkollision, die GW170817 produzierte](#)
- [Die Herkunft von GW170817: Neutronensterne, Supernovae und Billard-Tricks](#)
- [Die Hintergrundsymphonie der Gravitationswellen von verschmelzenden Neutronensternen und schwarzen Löchern](#)
- [Suche nach hochenergetischen Neutrinos vom verschmelzenden Doppelneutronenstern GW170817 mit ANTARES, IceCube und dem Pierre-Auger-Observatorium](#)

Glossar

- **Gammastrahlen:** elektromagnetische Strahlung mit der höchsten Energie im elektromagnetischen Spektrum.
- **Neutronenstern:** Extrem dichtes Objekt, das nach dem Zusammenbruch eines massiven Sterns übrig bleibt. Ein typischer Neutronenstern wiegt eine halbe Million mal die Masse der Erde, hat aber nur einen Durchmesser von unter 30 km.
- **Schwarzes Loch:** Eine Region der Raumzeit, in der durch eine extrem kompakte Masse die Schwerkraft so stark ist, dass alles, einschließlich Licht, daran gehindert wird, zu entkommen.
- **Signal-zu-Rausch-Verhältnis:** Das Verhältnis der Signalleistung zur Rauschleistung in einem Detektor. Es misst die Stärke des Signals im Vergleich zu den Quellen des Rauschens, von denen es möglicherweise kontaminiert werden könnte.
- **Beobachtungslauf:** Ein Beobachtungszeitraum, in dem Gravitationswellendetektoren Daten aufnehmen.

Abbildungen aus dem Fachartikel

Weitere Informationen über die Bedeutung dieser Abbildungen finden sich in der [vollständigen Veröffentlichung](#).

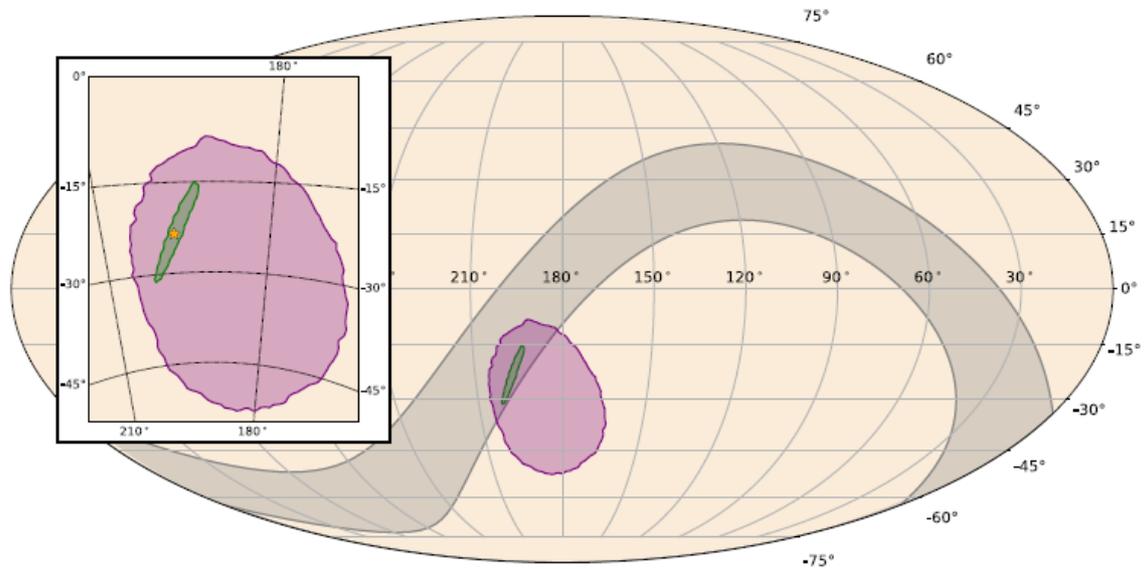


Abbildung 1 : Die endgültige Lokalisierung der Quelle, die GW170817 und GW170817A produziert hat. Alle Konturen entsprechen 90% Wahrscheinlichkeit. Die Kontur der von LIGO-Virgo hergestellte Himmelskarte ist in grün dargestellt. Die Lokalisierung anhand einer gezielten Suche mit Fermi-GBM ist in lila überlagert. Zeitabgleich zwischen Fermi und INTEGRAL ergab die in grau dargestellte Region. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt auch die Position der optischen Gegenstücke, als gelber Stern gekennzeichnet. Die Achsen sind [Rektaszension](#) und [Deklination](#) im [Äquatorial-Koordinatensystem](#).

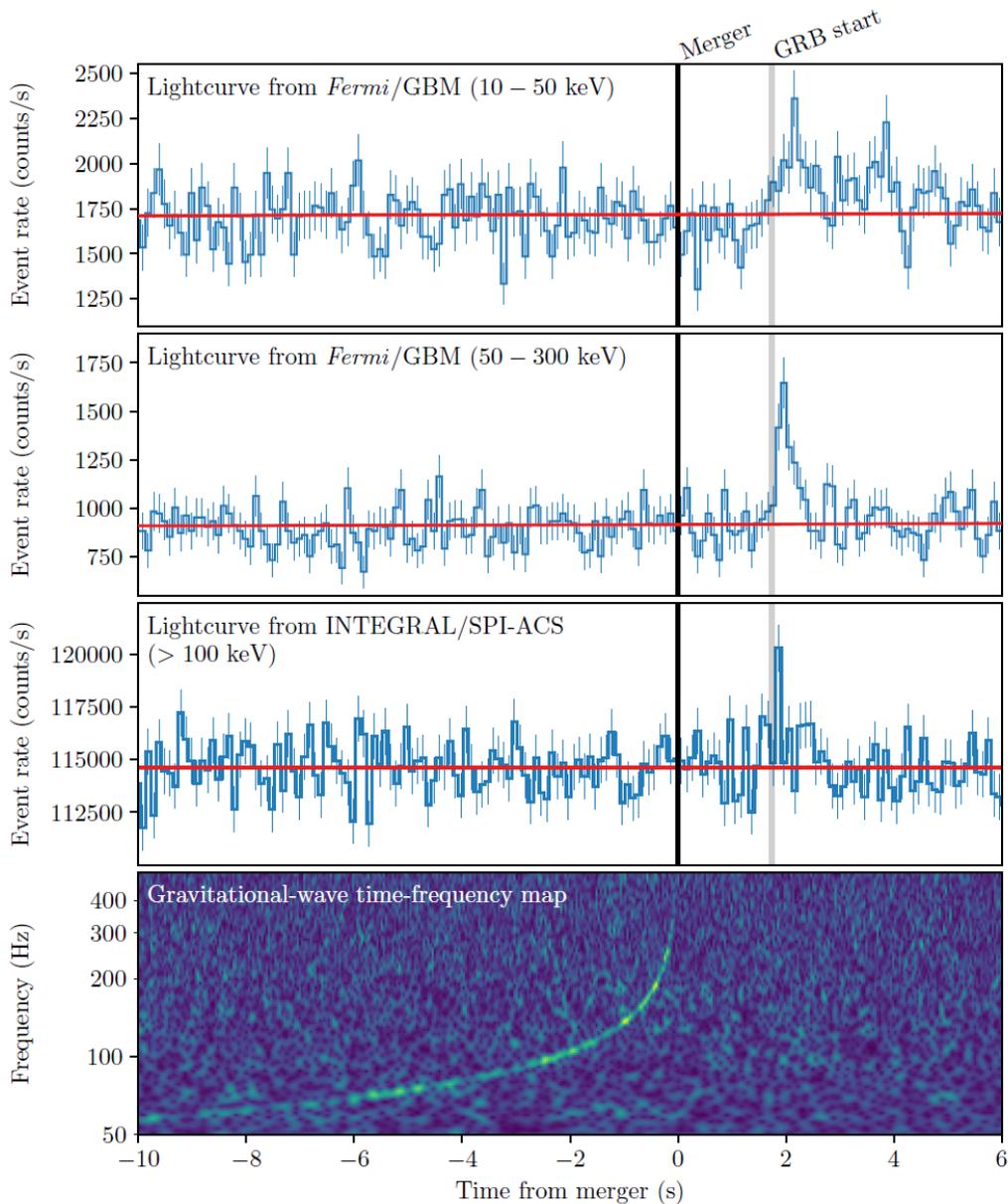


Abbildung 2 : Die gemeinsame Entdeckung von GW170817 und GRB 170817A.

Erstes Teilbild: Die summierte Fermi-GBM-Lichtkurve für Natriumiodid-(NaI)-Detektoren 1, 2 und 5 für GRB 170817A zwischen 10 und 50 keV, übereinstimmend mit den 100-ms-Zeitintervallen der Daten von INTEGRAL SPI-AC. Die Hintergrundschätzung ist rot überlagert.

Zweites Teilbild: Das gleiche wie im ersten Teilbild, aber im Energiebereich von 50-300 keV.

Drittes Teilbild: Die Lichtkurve von INTEGRAL SPI-AC mit einem Energiebereich von etwa 100 keV bis 80 MeV.

Viertes Teilbild: Zeit-Frequenz-Diagramm von GW170817, ermittelt durch kohärente Kombination von Daten der beiden Detektoren LIGO Hanford und LIGO Livingston.