



LIGO
Scientific
Collaboration



Die Suche nach verborgenen Gravitationswellen von Gammastrahlenausbrüchen während O3a

Gammastrahlenausbrüche (englisch: gamma-ray burst, kurz GRB) sind extrem helle Blitze hochenergetischer Gammastrahlen aus den Tiefen des Alls, die ungefähr einmal täglich beobachtet werden. Die Gammastrahlen sind dabei in schmalen Kegeln gebündelt und so hell, dass wir sie über Milliarden von Lichtjahren nachweisen können.

Es gibt mindestens zwei verschiedene Arten astrophysikalischer Ereignisse, die einen GRB erzeugen können. „Lange“ GRBs sind häufiger (etwa 70 % aller beobachteten Ereignisse) und werden mit Supernova-Explosionen in Verbindung gebracht. Das unterstützt die Idee, dass diese Art von Ausbrüchen von massereichen sterbenden Sternen stammt, wenn deren Kerne zusammenbrechen. Die auf diese Weise erzeugten GRBs dauern in der Regel von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten an.

Ein „kurzer“ GRB kann von einigen Millisekunden bis zu einigen Sekunden dauern. Wir nehmen an, dass die meisten, wenn nicht sogar alle kurzen GRBs durch die Kollision extrem dichter Sterne, so genannter Neutronensterne, verursacht werden. Eine andere Möglichkeit wäre das Zerreißen eines Neutronensterns bevor dieser von einem Schwarzen Loch verschlungen wird. In beiden GRB-Szenarien kann eine sehr große Materiemenge auf eine Art und Weise heftig beschleunigt werden, die Gravitationswellen erzeugen könnte. Ein Beispiel dafür war GW170817, ein Gravitationswellenereignis, das einen kurzen Gammastrahlenblitz aus einer nahen Galaxie begleitete.

Daher ist es sehr wichtig, dass die Gravitationswellen-Astronom*innen die GRB-Messungen von Fermi und dem Neil-Gehrels-*Swift*-Observatorium, zwei Gammastrahlen-Weltraumteleskopen, beobachten. Wenn diese berichten, dass ein neuer Gammastrahlenblitz entdeckt wurde, können wir überprüfen, ob in den LIGO- und Virgo-Daten Gravitationswellen vorhanden sind, die aus der gleichen Richtung und zur gleichen Zeit kommen. Mit diesem Ansatz lassen sich schwache Gravitationswellen erkennen, die sonst möglicherweise übersehen würden.

Wie wir Gravitationswellen jagen

Wir verwenden zwei verschiedene Methoden, um nach diesen Signalen zu suchen. Für die erste Methode ist es irrelevant, welche Form eine Gravitationswelle hat. Es ist nur wichtig, dass sie in den Observatorien LIGO und Virgo übereinstimmend erscheint. Diese Methode kann Gravitationswellen finden, die von Neutronensternkollisionen oder kollabierenden Sternen erzeugt werden. Wir bezeichnen diese Suchmethode als „generisch“ und wir verwenden sie immer dann, wenn ein Gammastrahlenblitz auftritt und unsere Gravitationsobservatorien Daten aufnehmen.

Unsere zweite Methode sucht nur nach Signalen mit einer bestimmten Wellenform, dem so genannten Zirpen. Diese Signalklasse wird erzeugt, wenn sich Paare dichter stellarer Objekte spiralförmig umrunden und schließlich verschmelzen; dazu zählen Paare von Neutronensternen oder ein Paar aus einem Schwarzen Loch und einem Neutronenstern. Aus diesem Grund verwenden wir diese „modellierte“ Suche nur bei kurzen Gammastrahlenblitzen, die durch solche Kollisionen erzeugt werden. Wir haben uns entschieden einen GRB mit einer Dauer von weniger als 4 Sekunden als kurz zu betrachten. So wollten wir vermeiden, dass wir einen kurzen GRB versehentlich übergehen.

Die Ergebnisse unserer Gravitationswellen-Suchen

Zwischen April und September 2019 führten LIGO und Virgo einen Beobachtungslauf (eine Phase der wissenschaftlichen Datenaufnahme) durch, die als O3a bezeichnet wird. Während dieser Zeit identifizierten wir 105 GRBs, bei denen wir mit der generischen Methode nach Gravitationswellen

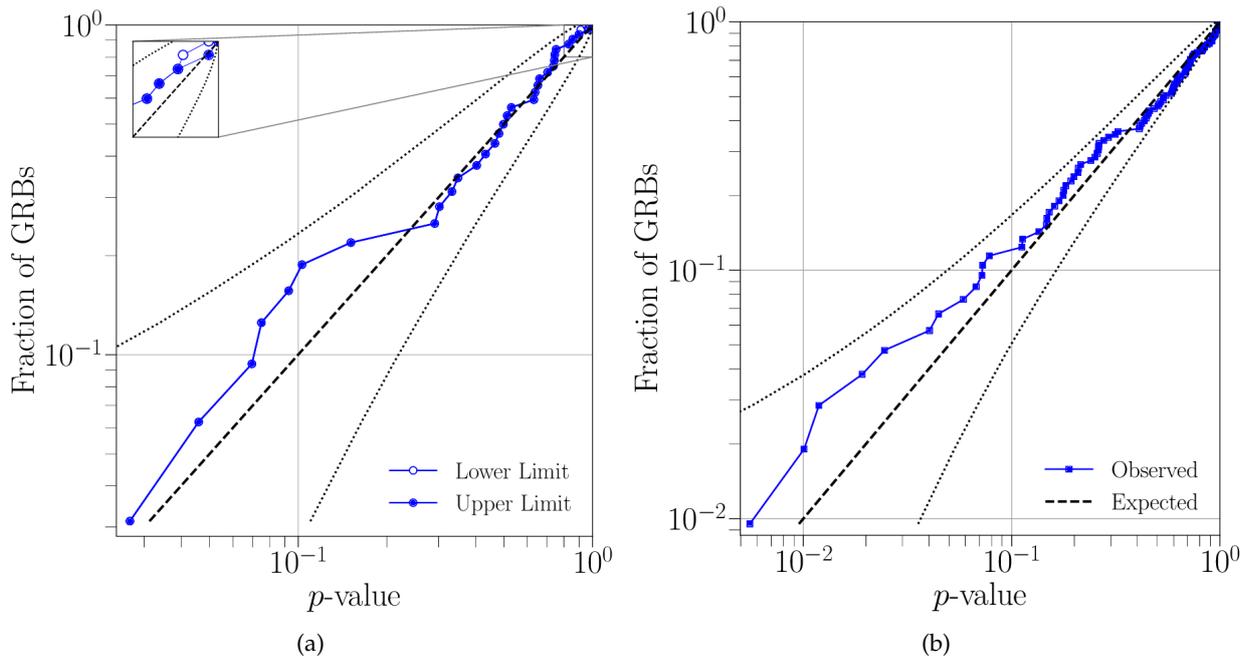


Abb. 1: (a) Die modellierte Suche ermittelt den besten Gravitationswellen-Kandidaten für jeden kurzen GRB, zusammen mit einem Maß für ihre Stärke. Wir vergleichen dieses Ergebnis mit Daten von anderen Zeiträumen, um die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, dass der Kandidat allein vom Rauschen verursacht wurde und nicht eine Gravitationswelle ist. Dies wird durch den p -Wert dargestellt. Diese Abbildung stellt unsere 32 Kandidaten (verbundene Punkte) dar, wobei die horizontale Achse die p -Werte der Kandidaten und die vertikale Achse den Anteil der Kandidaten mit einem niedrigeren p -Wert anzeigt. Die gestrichelte Linie zeigt die Kurve, die man allein aufgrund des Hintergrund-Detektorrauschens und zufälligen Schwankungen (in Abwesenheit von Gravitationswellen-Signalen) erwarten würde. Je größer der p -Wert eines Kandidaten (weiter rechts), desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um ein Rauschereignis und nicht um Gravitationswellen handelt. Die gestrichelten Linien zeigen die Grenzen für das erwartete statistische Verhalten des Rauschens in unseren Suchen. Wir sehen, dass sich alle Kandidaten innerhalb der gepunkteten Linien befinden, d. h. alle stimmen mit dem überein, was man von reinem Detektor-Hintergrundrauschen erwartet. (b) Dieses Diagramm zeigt ähnliche statistische Ergebnisse wie in (a), aber für die generischen Suchen zu 105 Gammastrahlenausbrüchen.

suchten, und bei den 32 kürzesten GRBs davon, bei denen wir mit der modellierten Methode nach Gravitationswellen suchten.

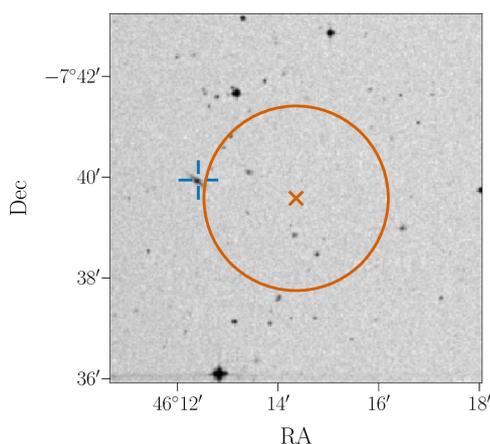


Abb. 2: In dieser Darstellung zeigt der große Kreis die Fehlerbox für GRB190610A, einen Gammastrahlenausbruch, der möglicherweise innerhalb einer Galaxie in einer Entfernung von 165 Mpc (etwa 600 Millionen Lichtjahre) auftrat. Diese ist durch das Fadenkreuz markiert.

Wir fanden keine Gravitationswellen, die zu einem dieser GRBs gehören (s. Abbildung 1 für weitere Details). Das ist aus zwei Gründen nicht unbedingt unerwartet. Erstens: Da die Strahlung in engen Gammastrahlenkegeln abgegeben wird, verfehlt ein großer Teil die Erde. Zweitens: Da die meisten Gammastrahlenblitze sehr weit entfernt stattfinden, ist es selten, dass einer aus einer Entfernung stammt, aus der unsere Observatorien Gravitationswellen nachweisen können.

Wenn wir kein Gravitationswellensignal finden, das zu einem GRB gehört, messen wir die Entfernung, bis zu der unsere Observatorien verschiedene Arten von Signalen zuverlässig erkennen würden. Dazu fügen wir in unsere Daten simulierte Gravitationswellen ein und ermitteln, welche davon unsere Methoden finden. Auf diese Weise können wir für jeden untersuchten Gammastrahlenblitz sagen, dass – wenn der Gammastrahlenblitz auch eine bestimmte Art von Gravitationswellen produzierte – dieses Ereignis jenseits einer bestimmten Entfernung geschehen sein muss. Wäre es in geringerer Entfernung geschehen, hätten wir die Gravitationswellen des Ereignisses sehen müssen. Die Ergebnisse all unserer Suchen ergeben ein Maß für diese

Größe, die wir „Ausschlussentfernung“ nennen. Diese ist in den Abbildung 3 dargestellt.

Der Fall GRB 190610A

Auch ohne bekannte Entfernung lassen sich mit unseren Schätzungen Grenzen für Gammastrahlenblitze setzen. Für einen großen Anteil der GRBs ist die Entfernung unbekannt. Ein interessanter Fall ist GRB 190610A. Für diesen ergibt unsere modellierte Suche unter der Annahme, dass er von zwei kollidierenden Neutronensternen erzeugt wurde, eine Entfernung von höchstwahrscheinlich mehr als 63 Mpc (etwa 200 Millionen Lichtjahre). Dieser GRB kam aus einer Richtung in der auch eine Galaxie liegt, die 165 Mpc (etwa 600 Millionen Lichtjahre) entfernt ist, so dass wir bei unserer Analyse nicht ausschließen können, dass ein Neutronensternpaar in dieser Galaxie kollidierte und den GRB erzeugte (siehe Abbildung 2).

Ausblick

Obwohl im O3a-Beobachtungslauf keine Gravitationswellen in Zusammenhang einem Gammastrahlenblitz nachgewiesen wurden (wie es im August 2017 geschah, als wir GW170817 beobachteten), sind Pläne und Arbeiten zur Verbesserung unserer Detektoren im Gange. Da die Gravitationswellen-Observatorien immer empfindlicher werden, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, weitere Gravitationswellen im Zusammenhang mit Gammastrahlenblitzen zu entdecken. Das Zusammenführen der Informationen, die wir von den einzelnen Gravitationswellen und Gammastrahlenblitzen erhalten, kann wertvolle neue Erkenntnisse über die Mechanismen und Eigenschaften dieser rätselhaften Gammastrahlenausbrüche liefern.

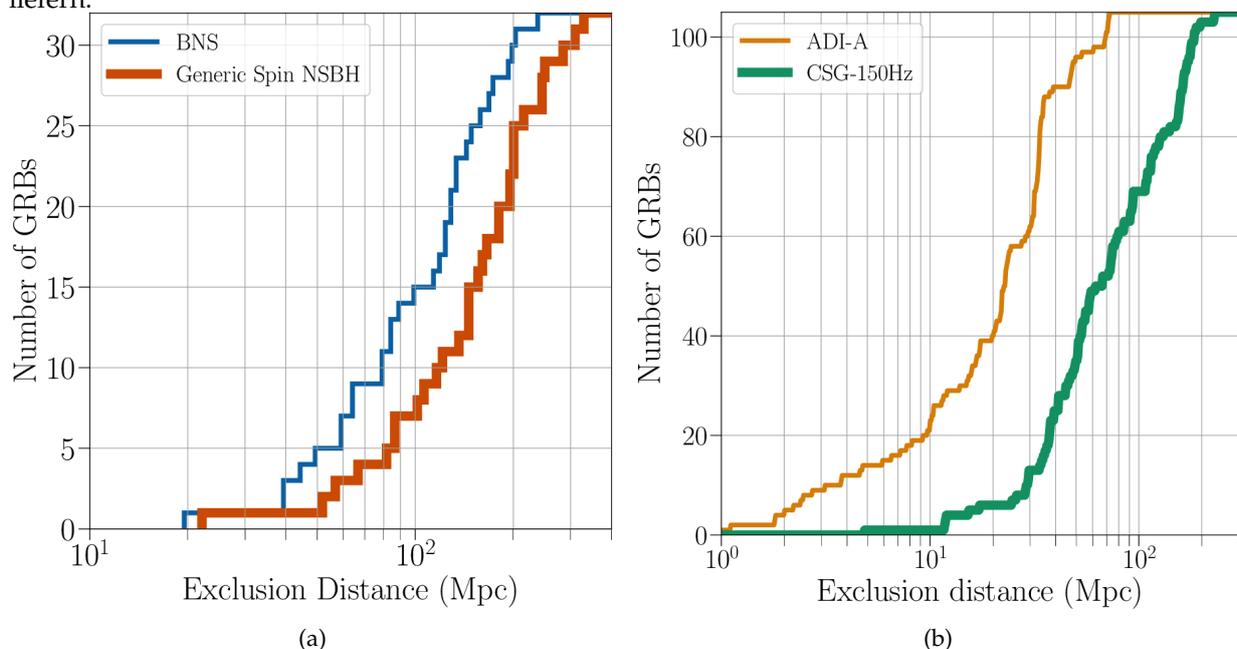


Abb. 3: (a) In diesem Diagramm zeigen wir die Anzahl der Gammastrahlenausbrüche mit Ausschlussdistanzen bis zu einem bestimmten Wert, wie von unserer modellierten Suche ermittelt. Die Ausschlussdistanz für jede Suche sagt uns, wie nah ein Gammastrahlenausbruch gewesen sein könnte, ohne dass eine Gravitationswelle (unter der Annahme eines bestimmten Modells) entdeckt wurde. Wir berechnen diese Entfernungen, indem wir simulierte Gravitationswellensignale unterschiedlicher Stärke in die Daten rund um das Auftreten eines bestimmten Gammastrahlenausbruchs einfügen. Der nächstgelegene Abstand, bei dem weniger als 90 % dieser simulierten Signale gefunden werden, ist die Ausschlussdistanz, und sagt uns, dass unter der Annahme eines bestimmten Gravitationswellensignaltyps, d. h. einer Neutronensternverschmelzung (BNS, dünne Linie) oder einer Verschmelzung eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch (NSBH, dicke Linie), der Gammastrahlenausbruch außerhalb dieses Abstands stattgefunden haben muss. Die Abstandssache ist in Einheiten von Megaparsec (Mpc) angegeben. (b) Die gleiche Art der Darstellung wie in Abbildung (a), aber für eine allgemeinere Methode, die keine zirkulären Signale voraussetzt. Die diesmal verwendeten simulierten Gravitationswellensignale basieren auf zwei möglichen Modellen von Gammastrahlenausbrüchen. Das erste Modell heißt ADI-A und modelliert die Gravitationswellenstrahlung von einem großen Materiekumpen innerhalb einer Materiescheibe um ein Schwarzes Loch. Das zweite, CSG, stellt ein zirkuläres Sinus-Gauß-Signal dar, eine einfache Annäherung an einen Gravitationswellenausbruch. Die Entfernungssache ist in Einheiten von Megaparsec (Mpc) angegeben.

Glossar

Elektromagnetische Strahlung: Strahlung, die allgemein als Licht bekannt ist, obwohl nur ein kleiner Teil davon für das menschliche Auge sichtbar ist. In der Reihenfolge der Energie umfasst das elektromagnetische Spektrum: Radiowellen, sichtbare (optische) Strahlung, UV- (ultraviolette), Röntgen- und Gammastrahlen.

Gammastrahlen: Elektromagnetische Strahlung mit der höchsten Energie im elektromagnetischen Spektrum.

Gammastrahlenblitze: Kurze Ausbrüche sehr energiereicher Photonen namens Gammastrahlen. Gammastrahlenausbrüche (GRB) dauern in der Regel bis zu einigen zehn Sekunden.

Kernkollaps eines massereichen Sterns: Massereiche Sterne produzieren durch Kernfusion Eisen. Das erzeugte Eisen sinkt in das Zentrum des Sterns und bildet seinen Kern. Sobald dieser Eisenkern schwer genug ist, fällt er unter seinem eigenen Gewicht und dem Druck von außen zusammen, was zum Kollaps des ganzen Sterns führt.

Lichtjahr: Eine Entfernungseinheit, die der Entfernung entspricht, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Ein Lichtjahr entspricht ungefähr 9,46 Billionen Kilometer.

LIGO: Das Laserinterferometer-Gravitationswellen-Observatorium besteht aus zwei 4 km langen interferometrischen Gravitationswellendetektoren, die etwa 3000 km voneinander entfernt sind und sich in Livingston, LA, und Hanford, WA, in den Vereinigten Staaten befinden.

Megaparsec (Mpc): Eine astronomische Entfernungseinheit, die etwa 3,26 Millionen Lichtjahren entspricht.

Neutronenstern: Extrem dichtes Objekt, das nach dem Kollaps eines massereichen Sterns zurückbleibt. Ein typischer Neutronenstern hat eine halbe Million Mal so viel Masse wie die Erde, ist aber nur etwa 30 km groß.

p-Wert: Ein Maß für die statistische Signifikanz einer bestimmten Messung. Grob gesagt beantwortet der p-Wert die Frage: „Wie wahrscheinlich ist es, dass dieses Ergebnis einfach nur Hintergrundrauschen ist?“ Ereignisse mit niedrigem p-Wert werden mit größerer Wahrscheinlichkeit durch tatsächliche Gravitationswellensignale verursacht.

Schwarzes Loch: Ein durch eine extrem kompakte Masse verursachter Bereich der Raumzeit, in dem die Gravitation so stark ist, dass sie alles, auch Licht, am Entkommen hindert.

Supernova: Eine heftige Explosion, bei der oft ein schnell erscheinendes helles Objekt am Himmel gesichtet wird, das dann verblasst. Eine Supernova kann heller als eine ganze Galaxie leuchten. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Supernovae. Einige entstehen durch den Kollaps massereicher Sterne, andere durch die Kollision zweier Weißer Zwerge.

Virgo: Der Virgo-Detektor ist ein interferometrischer Gravitationswellen-Detektor in Casina, Italien, in der Nähe von Pisa.

Zirpen: Ein Zirpen (englisch: chirp) ist der Name des Gravitationswellensignals oder der Wellenform, die wir typischerweise beobachten, wenn ein Paar von extrem dichten Objekten, wie Schwarzen Löchern oder Neutronensternen einander vor dem Verschmelzen umrunden und dabei aufeinander zufallen. In einem solchen Zirp-Signal nimmt die Frequenz und Amplitude mit der Zeit zu.

Weiterführende Informationen

Besuchen Sie unsere Websites: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

Lesen Sie einen kostenlosen Vorabdruck des vollständigen wissenschaftlichen Artikels unter <https://dcc.ligo.org/P2000040/public>.