

Eine systematische Suche nach Gammastrahlenausbrüchen im Zusammenhang mit Gravitationswellen-Ereignissen während O3

Die Gravitationswellen-Ereignisse, die die LIGO- und Virgo-Detektoren bisher beobachtet haben, waren alle samt Verschmelzungen kompakter Objekte. Jedes entdeckte Signal erzählt eine kurze Geschichte von zwei massereichen Objekten (entweder Schwarzen Löchern oder Neutronensternen), die einander immer enger und schneller umrundeten, bis sie schließlich zusammenstießen und zu einem einzigen verschmolzen. Eine gewaltige Energiemenge wurde in Form von Gravitationswellen freigesetzt, als die Objekte schließlich unter dem Einfluss ihrer starken Anziehungskraft zusammenstürzten. Deshalb waren unsere Gravitationswellen-Detektoren in der Lage, sie zu entdecken, obwohl die meisten von ihnen Milliarden von Lichtjahren entfernt waren.

Die Wissenschaftler*innen der LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)-Kollaboration und viele andere Astronom*innen und Astrophysiker*innen möchten wissen, ob sich einige der Ereignisse, die wir entdecken, auch mit anderen

Teleskopen oder Instrumenten beobachten lassen. Diese „Multi-Messenger-Astronomie“ umfasst Beobachtungen von vielen verschiedenen Forschungsgruppen und hatte im Jahr 2017 mit der Entdeckung von GW170817 einen spektakulären Erfolg: eine vergleichsweise nahe (nur 130 Millionen Lichtjahre entfernte!) Verschmelzung von zwei Neutronensternen. Neben dem charakteristischen Gravitationswellen-Signal erzeugte die Quelle von GW170817 etwa 2 Sekunden später auch einen Blitz von Gammastrahlen (der energiereichsten Form elektromagnetischer Strahlung). Danach folgte andere elektromagnetische Strahlung über das gesamte Spektrum hinweg: von Röntgenstrahlen bis hin zu Radiowellen. Aus diesem Ereignis, das das bisher das einzige beobachtete seiner Art ist, haben wir viel gelernt. Es gab zwar vereinzelte Berichte über möglicherweise mit Gravitationswellen-Ereignissen zusammenhängende Signale, aber es gab kein weiteres, eindeutiges elektromagnetisches Signal. Der dritte Beobachtungslauf (O3) von LIGO und Virgo, der von April 2019 bis März 2020 dauerte, lieferte etwa achtmal so viele entdeckte Ereignisse wie die früheren LIGO- und Virgo-Beobachtungsläufe zusammen. Deswegen gibt es nun viele weitere Gravitationswellen-Ereignisse zu untersuchen.

Nun hat ein Team von Astronom*innen gemeinsam mit LVK-Forschenden Daten zweier großer NASA-Missionen verwendet, um systematisch nach Gammastrahlen-Signalen zu suchen, die mit Gravitationswellen-Ereignissen während O3 zusammenhängen könnten. Die NASA-Weltraumteleskope Fermi und Swift befinden sich beide in Umlaufbahnen um die Erde. Dort können auch die hochenergetischen

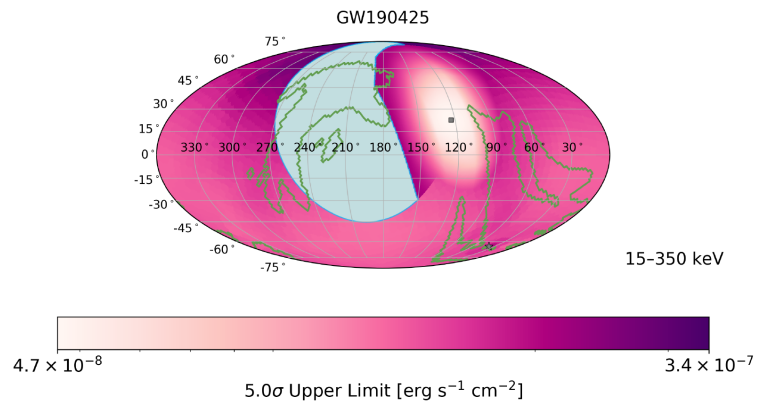


Abbildung 1: (nach Abbildung 6 der Veröffentlichung) Himmelskarte, die die Obergrenze des Energieflusses zeigt, der beim Ereignis GW190425, einer von LIGO und Virgo entdeckten Verschmelzung von zwei Neutronensternen, beobachtet wurde. Für dieses Ereignis wurde (anders als bei GW170817, einer weiteren Neutronensternverschmelzung) bisher kein zugehöriges elektromagnetisches Signal nachgewiesen. Auch diese Untersuchung findet keines. Das große Oval stellt den gesamten Himmel dar. Die Zahlenangaben in Grad sind die Koordinaten am Himmel: Rektaszension und Deklination. Die hellblaue Fläche ist der Bereich, der aus der Sicht von Fermi von der Erde verdeckt wurde und der außerhalb des Sichtfeldes des Swift-BAT-Instruments liegt. Die grünen Konturen zeigen die Himmelsbereiche, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % den wahren Ort des Gravitationswellen-Signals enthalten. So lässt sich mit den Daten von Fermi-GBM und Swift-BAT der Energiefluss über den größten Teil des Himmels einschränken. Für den Bereich, den die Gravitationswellen-Detektoren für dieses Ereignis identifiziert haben, gilt dies nur teilweise.

Formen des Lichts (Gamma- und Röntgenstrahlen, die als einzelne Lichtteilchen, Photonen, aus den Tiefen des Alls ankommen) sie erreichen, ohne dass die irdische Atmosphäre diese absorbiert.

Beide Missionen verfügen über Instrumente, die große Himmelsbereiche ständig auf Gammastrahlenausbrüche überwachen: der Gamma-ray Burst Monitor (GBM) an Bord von Fermi und das Burst Alert Telescope (BAT) an Bord von Swift. Sie entdecken und melden routinemäßig Gammastrahlenblitze (GRBs). Dafür werden ihre Daten sowohl an Bord als auch auf der Erde untersucht. Die Anwendung bestimmter Kriterien stellt sicher, dass ihre Entdeckungen sehr verlässlich sind. Die LVK-Wissenschaftler*innen hatten bereits früher sorgfältig nach Gravitationswellen-Signalen gesucht, die zeitlich nah an beobachteten Gammastrahlenausbrüchen während O3 sowie während früherer Beobachtungsläufe auftraten. Die neue Untersuchung überprüft umfassend, ob es Gammastrahlen-Signale gibt, die übersehen worden sein könnten. Das wäre möglich, wenn sie zu schwach oder nicht eindeutig genug waren, um die üblichen Kriterien für Gammastrahlenausbrüche zu erfüllen. Sie könnten aber interessanter sein, wenn sie im Zusammenhang mit einem Gravitationswellen-Ereignis stünden. Diese potenziellen Signale werden wir hier als „Gammastrahlenausbrüche“ bezeichnen, obwohl sie Gamma- und Röntgen-Photonen enthalten können.

Für diese Analyse wurden 79 wahrscheinliche Ereignisse aus O3 untersucht. Sie sind definiert als Kandidaten, die mit einer geschätzten Wahrscheinlichkeit von mehr als 50% astrophysikalischen Ursprungs sind (im Gegensatz zu einem Ursprung in rein zufälligen Schwankungen des Detektorrauschens). Die Eigenschaften dieser Ereignisse wurden von der LVK-Kollaboration in zwei Katalogen und Updates veröffentlicht. Sechs grenzwertig schwache Gravitationswellen-Kandidaten wurden ebenfalls untersucht. Nur bei einer Handvoll der Verschmelzungsereignisse waren Objekte mit geringen Massen beteiligt, bei denen es sich vermutlich um Neutronensterne handelt. Sie sind vielversprechende Quellen für Gammastrahlung, wenn ein einzelner oder ein Paar von Neutronensternen (wie im Fall von GW170817) vor oder während der Verschmelzung durch Gezeitenkräfte zerrissen wird. Bei allen anderen Ereignissen handelt es sich wahrscheinlich um Verschmelzungen Schwarzer Löcher. Bei ihnen ist es nach Ansicht von Theoretiker*innen unwahrscheinlich, dass sie Gammastrahlenausbrüche erzeugen, außer in bestimmten, ungewöhnlichen kosmischen Umgebungen. Während die spezifischen Eigenschaften der Gammastrahlenausbrüche bei verschiedenen Verschmelzungsarten unterschiedlich sein könnten, wurden alle Gravitationswellen-Ereignisse in dieser Untersuchung gleich behandelt.

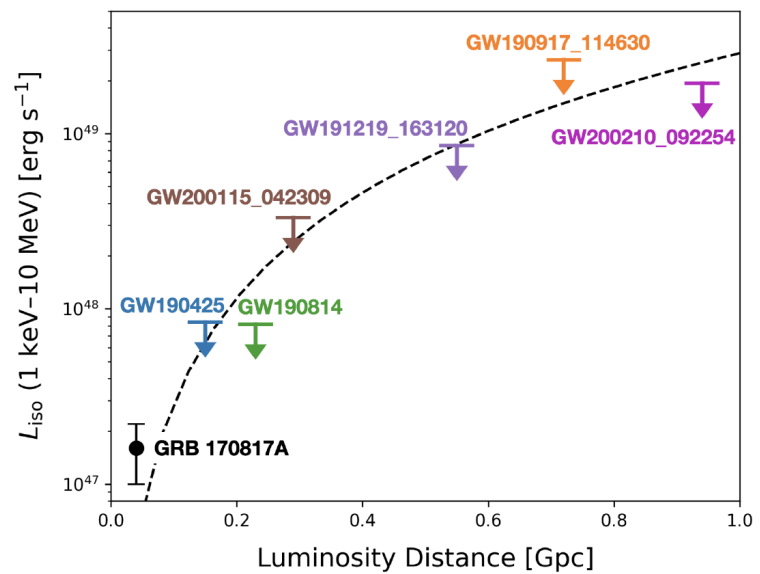


Abbildung 2: (nach Abbildung 5 der Veröffentlichung) Die kurzen horizontalen Linien mit den nach unten zeigenden Pfeilen stellen für sechs Gravitationswellen-Ereignisse die Obergrenzen der im Röntgen- und Gammastrahlenbereich abgestrahlten Energie dar. Diese sechs Ereignisse sind von besonderem Interesse, da in diesen Fällen das verschmolzene Binärsystem entweder einen oder zwei Neutronensterne gehabt haben kann. Die vertikale Achse misst die „Luminosität“, d. h. die von der Quelle pro Sekunde abgestrahlte Energie. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass in alle Richtungen die gleiche Energie abgestrahlt wurde. Die direkt aus den Fermi-GBM- und Swift-BAT-Daten ermittelten Obergrenzen für den Energiefluss wurden in Obergrenzen für die Luminosität umgewandelt. Dafür wurden die geschätzten Entfernungen zu den Quellen des jeweiligen Gravitationswellen-Ereignisses verwendet, die auf der horizontalen Achse in Gigaparsec angegeben sind (ein Gigaparsec entspricht etwa 3,26 Milliarden Lichtjahren). Die gestrichelte Linie ist ein einfaches Modell für die Empfindlichkeit von Fermi-GBM. Sie steigt in der Grafik an, weil die verbauten Gammastrahlen-Detektoren einen kleineren Teil der Energie von weit entfernten Quellen erfassen. Zum Vergleich ist der Gammastrahlenausbruch, der 2017 zusammen mit der Neutronensterneverschmelzung GW170817 beobachtet wurde, als Punkt mit Fehlerbalken dargestellt. GW170817 war viel näher, so dass die anderen sechs hier gezeigten Gravitationswellen-Ereignisse nur dann nachweisbar gewesen wären, wenn ihre Leuchtkraft viel größer gewesen wäre als die, die bei GRB 170817A gemessen wurde.

Die Teammitglieder analysierten die verfügbaren Daten der Fermi-GBM- und Swift-BAT-Instrumente, um nach Ausbrüchen zu suchen, die mit den ausgewählten Gravitationswellen-Ereignissen in Zusammenhang stehen könnten. Die Fermi-GBM-Daten für einzelne Gammaphotonen werden routinemäßig zur Erde übertragen und archiviert. Diese Daten wurden nun mit zwei Methoden untersucht, die empfindlicher sind als die Analyse an Bord von Fermi. Bei der „ungezielten Suche“ werden alle Daten erneut analysiert. Dabei wird ein breiterer Bereich von Annahmen über die Photonenenergien und die Dauer möglicher Gammastrahlenausbrüche zugrunde gelegt, um eine erweiterte Liste von möglichen Signalen zu ermitteln. Die „gezielte Suche“ führt eine kohärente Analyse der Daten aller 14 Szintillatordetektoren von GBM durch. So soll nach einem schwachen, aber konsistenten Signal in zeitlicher Nähe zu jedem Gravitationswellen-Ereignis gesucht werden. Dabei werden Dauern von 0,064 bis 8 Sekunden berücksichtigt, die typisch für „kurze“ Gammastrahlenblitze sind, die mit Verschmelzungen zusammenhängen. Das Swift-BAT-Instrument sendet keine Einzelphoton-Daten zur Erde, es sei denn, es wird an Bord ein vermutliches Signal identifiziert oder ein spezieller Befehl gesendet. Allerdings werden verarbeitete Daten von Swift-BAT zur Erde gesendet und archiviert. Sie messen die Photonen-Zählraten in vier Energiebereichen. Diese Daten wurden analysiert, um nach Zeiträumen erhöhter Photonen-Zählraten in zeitlicher Nähe zu den Gravitationswellen-Ereignissen zu suchen.

Bei diesen Untersuchungen wurden keine Gammastrahlenausbrüche gefunden, die mit einem Gravitationswellen-Ereignis während O3 in Verbindung lassen. Dennoch ist das Fehlen eines Gammastrahlen-Signals auch eine wissenschaftliche Erkenntnis. Das Analyse-Team berechnete für jedes Ereignis Obergrenzen für den Energiefluss im Gammastrahlenbereich. Sie ermittelten, wie viel Gammastrahlen-Energie vorhanden gewesen sein könnte, ohne in den durchgeführten Analysen als Signal zu erscheinen. Diese Obergrenzen sind richtungsabhängig, da sowohl Fermi-GBM als auch Swift-BAT eine richtungsabhängige Empfindlichkeit haben. Sie hängt von der Ausrichtung des Weltraumteleskops zum Zeitpunkt des Ereignisses und der Position des Satelliten über der Erde ab, welche die einfallende Gammastrahlung blockiert. Die Obergrenzen werden deswegen in einer Himmelskarte dargestellt. Darüber hinaus wurden marginalisierte Obergrenzen berechnet. Dafür wird ein gewichteter Durchschnitt über die Wahrscheinlichkeitskarte des Gravitationswellen-Ereignisses gebildet. So soll die beste Schätzung der

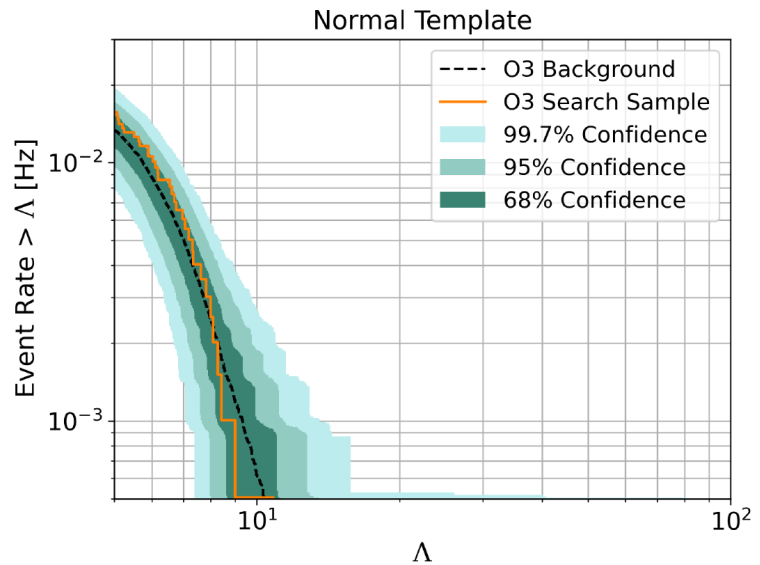


Abbildung 3: (nach Abbildung 2 der Veröffentlichung) Diese Art von Diagramm wurde entwickelt, um zu überprüfen, ob von vielen Ereignissen alle mit einer Hypothese übereinstimmen, oder ob eine Teilmenge von ihnen als deutlich ungewöhnlich heraussticht. Hier wurde für jedes Gravitationswellen-Ereignis ein „Lambda“-Wert (Λ) berechnet. Er ist ein Maß dafür, wie wahrscheinlich es ist, dass es sich bei dem Ereignis um einen echten Gammastrahlenausbruch handelt und nicht nur um eine zufällige Schwankung des Rauschens in den Daten des Gammastrahleninstruments. (Ein größerer Wert von Λ bedeutet dabei eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass es sich um ein echtes Ereignis handelt.) Aufgrund der statistischen Schwankungen in den Signalen und des zufälligen Rauschens erwartet man eine große Bandbreite von Lambda-Werten. Die 79 Werte der Suche in O3-Daten wurden sortiert und kumulativ von rechts nach links als orangefarbene Treppenlinie aufgetragen. Jeder Schritt nach oben erfolgt an der Position des nächsten Lambda-Werts in der sortierten Liste. (Da die vertikale Skala logarithmisch ist, scheinen die vertikalen Stufen nach oben hin immer kleiner zu werden, aber in Wirklichkeit sind alle Stufen gleich groß). Der größte Lambda-Wert ist größer als 10. Das wäre ziemlich signifikant, wenn die Sortierung nicht den größten der 79 Fälle hervorheben würde. Der eigentliche Test auf Signifikanz besteht darin, die beobachtete Verteilung mit derjenigen zu vergleichen, die sich unter der Annahme ergibt, dass keines der Gravitationswellen-Ereignisse ein zugehöriges Gammastrahlen-Signal hat. Dies wird durch die gestrichelte Linie mit der Aufschrift „O3 Background“ dargestellt, die auf die gleiche Weise sortiert wurde (allerdings mit kleineren vertikalen Schritten, da hier eine größere Anzahl von Stichproben verwendet wurde). Die farbigen Bänder zeigen die Schwankungsbreite um die gestrichelte Linie, die in einem bestimmten Prozentsatz der Zeit allein aufgrund von zufälligen Schwankungen zu erwarten ist. Da die orangefarbene Treppenkurve in dieser Darstellung selbst bei den größten Lambda-Werten nicht weit von der gestrichelten Linie abweicht, können wir schlussfolgern, dass die Ereignisstichprobe mit dem Hintergrund übereinstimmt. Das heißt, es gibt hier keinen überzeugenden Beweis dafür, dass es für eines der Gravitationswellen-Ereignisse ein zugehöriges Gammastrahlen-Signal gibt.

Obergrenze des Energiefluss erhalten werden, wenn man annimmt, dass die Gammastrahlung mit dem Gravitationswellen-Ereignis in Verbindung stand. Diese Obergrenzen werden mit Hilfe verschiedener theoretischer Modelle interpretiert, die zeigen, wie eine Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern Gammastrahlung erzeugen könnte. Denkbar wäre z. B. die Übertragung von Energie aus dem Drehimpuls („Spin“) des Schwarzen Lochs, aus elektrischen Ladungen im Binärsystem oder durch einen intensiven Neutrino-Ausbruch, der mit dem Material um die Schwarzen Löcher herum wechselwirkt und dabei Photonen hoher Energie erzeugt.

Selbst bei der Verschmelzung von zwei Neutronensternen könnte die Entdeckung eines Gammastrahlenausbruchs ein seltenes Ereignis sein. Denn die Helligkeit der Gammastrahlung hängt wahrscheinlich von der Entfernung zur Erde, den Eigenschaften der Neutronensterne und der Ausrichtung ihrer Umlaufbahn ab. Bei üblichen Gammastrahlenblitzen ist die Gammastrahlung bekanntermaßen in zwei Strahlenkegeln konzentriert. So besteht nur eine geringe Chance, dass einer der Kegel zufällig in Richtung Erde zeigt. Bei verschmelzenden Schwarzen Löchern kommt die Ungewissheit hinzu, ob überhaupt Gammastrahlung erzeugt wird, und wenn ja, ob sie hell genug ist, um sie aus großer Entfernung entdecken zu können. Glücklicherweise werden die LIGO-, Virgo- und KAGRA-Detektoren in zukünftigen Beobachtungsläufen viele weitere Verschmelzungen nachweisen, was viele Gelegenheiten bietet, einen Gammastrahlenausbruch zu beobachten und mehr über diese gewaltigen, weit entfernten astrophysikalischen Ereignisse zu erfahren sowie verschiedene Modelle für ihre Abstrahlung zu testen.

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/P2100436/public> oder <https://arxiv.org/abs/2308.13666>

Die englische Originalfassung dieser Science Summary finden Sie auf

<https://ligo.org/science-summaries/O3GammaRayFollowUp/>.