



LIGO
Scientific
Collaboration



Auf der Suche nach einem Multi-Messenger-Geheimnis: Gravitationswellen von Gammastrahlenausbrüchen im zweitem LIGO-Beobachtungslauf

Helle Lichtblitze im Dunkeln

Gammastrahlenausbrüche (Gamma Ray Bursts, GRBs) sind helle Blitze hochenergetischen Lichts, die bei den energiereichsten Sterntoden des Universums entstehen. Diese Phänomene beginnen mit einem hellen Blitz und leuchten dann viele Monate lang. Sie treten am Lebensende bestimmter exotischer Himmelskörper auf. GRBs werden grob in zwei Klassen eingeteilt: Kurze GRBs, deren Gammastrahlen nur eine oder zwei Sekunden lang leuchten, können auftreten, wenn zwei Neutronensterne kollidieren. Man nimmt an, dass lange GRBs, die Gammastrahlen für Tausende von Sekunden aussenden, durch den Zusammenbruch von Sternkernen in bestimmten Arten massereicher Sterne verursacht werden. Beide GRB-Klassen werden mit Satelliten und Teleskopen betrachtet, zuerst mit Gammastrahlen und dann allmählich über das gesamte elektromagnetische Spektrum, während sich ihre hell strahlenden Feuerbälle ausdehnen und abkühlen. Sie sind nicht nur allein aufgrund des Lichts interessant, sondern gehören auch zu den faszinierendsten astronomischen Ereignissen für Untersuchungen mittels *Gravitationswellen*.

Wir können eine Menge lernen, wenn wir GRBs mit unseren Teleskopen *sehen*. Die Gammastrahlung gibt Auskunft über die Energie der Ereignisse, das Röntgenlicht gibt Auskunft über ihren Entwicklungsprozess und die Radiowellen teilen uns mit was sie hinterlassen. Aber es gibt viele Dinge, die das Licht allein nicht untersuchen kann, zum Beispiel, was tief im Inneren dieser katastrophalen Ereignisse passiert. Dies liegt daran, dass sich das Licht trotz aller seiner Beobachtungsvorteile leicht abschirmen lässt. Sie müssen beispielsweise nur Ihre Hand hoch halten, um Ihre Augen vor Sonnenlicht zu schützen. Das Licht von GRBs kann auf ähnliche Weisedurch das während der Explosion ausstoßgestoßene Materiel abgeschirmt werden! Darüber hinaus wird die vom GRB abgestrahlte Gammastrahlung in einen schmalen, stark gebündelten Strahl abgegeben. Wir sehen es nur, wenn es auf uns gerichtet ist!

Hier kommen Gravitationswellen ins Spiel. Dieser aufregende neue Zweig der Astronomie bietet eine neue Möglichkeit, diese phänomenal interessanten Ereignisse zu beobachten. Licht wird von der Oberfläche von Objekten abgestrahlt, Gravitationswellen stehen jedoch in direktem Zusammenhang mit der Bewegung von Masse und Energie im Inneren des Objekts. Darüber hinaus sind Gravitationswellen so gut wie unmöglich abzuschirmen. Da GRBs heftige, energiereiche Ereignisse sind, an denen sehr massereiche kompakte Objekte, wie Neutronensterne und Sternkerne, beteiligt sind, sind sie die hervorragende Kandidaten für die Abstrahlung von Gravitationswellen! Das bedeutet, dass

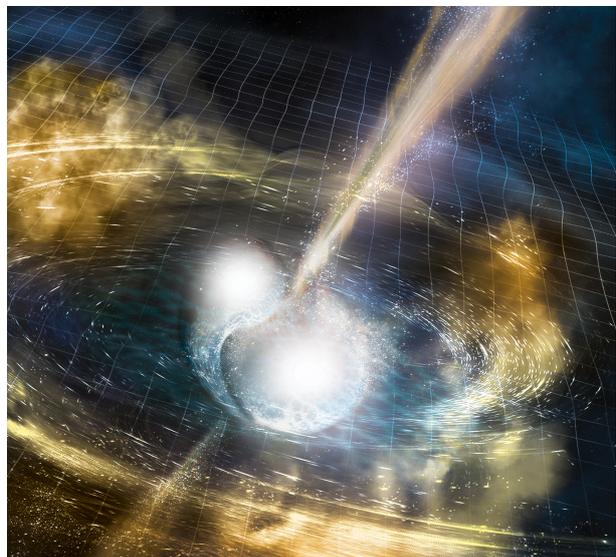


Abb. 1: Künstlerische Darstellung zweier verschmelzender Neutronensterne. Die schmalen Strahlen stellen den Gammastrahlenausbruch dar, während das wellige Raumzeitgitter die isotropen Gravitationswellen anzeigt, die eine Verschmelzung charakterisieren. Bildnachweis: National Science Foundation / LIGO / Sonoma State University / A. Simonnet.

Gravitationswellen es uns ermöglichen, GRBs auf eine neue und zum Licht komplementäre Weise zu untersuchen.

Wie wir nach Gravitationswellen von GRBs suchen

Die zwei großen Klassen von GRBs (kurz und lang) erfordern ganz unterschiedliche Überlegungen für die Suche nach ihren Gravitationswellensignalen. Im Fall von kurzen GRBs können sie aus zwei Neutronensternen entstehen (oder vielleicht aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch), die wir sehr effizient modellieren können. Eine genaue Modellierung ermöglicht es uns, äußerst empfindliche Suchmethoden zu verwenden. Diese Modellvorhersagen verbessern unsere Chancen Signale zu erkennen. Wir bezeichnen das Durchsuchen unserer Daten nach Gravitationswellensignalen mit diesen Methoden als „modellierte Suche“.

Andererseits wird angenommen, dass lange GRBs mit dem Zusammenbruch des extrem massereichen Sternkerns zu einem Neutronenstern oder schwarzen Loch beginnen. Auf den Zusammenbruch des Kerns folgt dann eine komplizierte Periode der Abstrahlung elektromagnetischer Wellen und Gravitationswellen, da die Überreste des Sterns, die bei der ursprünglichen Explosion nicht abgestoßen wurden, auf das zentrale kompakte Objekt zurückfallen. Diese komplexen Systeme lassen sich nur schwierig modellieren. Dadurch können wir die empfindlichsten Methoden bei der Suche nach Gravitationswellen nur eingeschränkt einsetzen. Wir verwenden stattdessen Methoden, die minimale Annahmen über die Art des Signals erfordern (wir bezeichnen diese als „unmodellierte Suchen“). Was diese Methoden an Empfindlichkeit einbüßen, gewinnen sie in ihrer Fähigkeit viele verschiedene Arten von Gravitationswellensignalen zu erfassen!

Wir fassen hier unsere Ergebnisse für die Gravitationswellenabstrahlung aller GRBs zusammen, die von den Satelliten Swift und Fermi während des zweiten Beobachtungslaufs von LIGO (den wir kurz „O2“ nennen) entdeckt wurden. Es ist nicht das erste Mal, dass LIGO eine solche Suche veröffentlicht (siehe unsere O1-GRB-Suche sowie andere frühere Suchen). Im Gegensatz zu früheren Bemühungen, Gravitationswellen von GRBs nachzuweisen, die keinen direkten Nachweis ergaben, ist die O2-Suche das erste Mal, dass wir einen zuverlässigen Nachweis geltend machen können!

Eine Geschichte von zwei Signalen

Gegen Ende des zweiten Beobachtungslaufes im August 2017, kurz nach dem sich der gerade ausgebaute Advanced-Virgo-Detektor dem Beobachtungslauf von LIGO angeschlossen hatte, erschien ein faszinierendes Signal in unseren Detektoren. Dieses Gravitationswellensignal mit dem Namen GW170817 (er bezeichnet das Datum des Auftretens, 17. August 2017) zeigte sich deutlich in den LIGO-Detektoren (und *sehr* schwach im Virgo-Detektor). Bemerkenswerterweise wurde nur zwei Sekunden nach dem Gravitationswellensignal ein GRB von den Gammastrahlensatelliten Fermi/GBM und INTEGRAL nachgewiesen. Dieses elektromagnetische Signal, GRB170817A, kam aus derselben kleinen Ecke des Kosmos wie der Gravitationswellennachweis. Es waren zwei verschiedene Signale desselben kosmischen Ereignisses, eines in Form von Gravitationswellen und das andere in Form von Gammastrahlung. Dies war die erste „Multi-Messenger“-Beobachtung eines Gammastrahlensausbruchs!

Die Ergebnisse der anschließenden Analyse, die Beiträge von LIGO, Virgo und über 70 astronomischen Beobachtungspartnern umfasste, sind gut dokumentiert. Überzeugen Sie sich selbst in unseren zahlreichen wissenschaftlichen Zusammenfassungen zu diesem Ereignis! Es eröffnete eine völlig neue Welt, und die Entdeckung beantwortete viele seit langem bestehenden Fragen. Es bewies überzeugend, dass (zumindest einige) GRBs durch das Verschmelzen zweier Neutronensterne entstehen und dass diese Ereignisse wahrscheinlich kurz sein würden. Es erlaubt uns, die Expansionsrate des Universums zu messen und die Geschwindigkeit der Schwerkraft mit der Geschwindigkeit des Lichts zu vergleichen (Auflösung: Sie sind gleich). Nachfolgende Multi-Messenger-Beobachtungen zeigten, dass Ereignisse wie dieses helfen, den Ursprung der schweren Elemente des Universums (wie beispielsweise Gold) zu erklären. All diese faszinierenden Ergebnisse wurden durch die Tatsache ermöglicht, dass wir dieses Ereignis *sowohl* mit Teleskopen *als auch* mit Gravitationswellendetektoren erfassen konnten.

Die auf GRBs fokussierte Analyse, die wir hier beschreiben, konnte GW170817 sowohl mit modellierten als auch mit unmodellierten Suchen eindeutig und sicher nachweisen. Unsere Ergebnisse stimmen voll und ganz mit denen überein, die zuvor veröffentlicht wurden. Dies ist nicht nur ein weiterer Beweis für den Nutzen GRBs auf diese Weise zu untersuchen, sondern es ist auch ein ausgezeichnete Test für diese Methoden, die wir verwenden.

Viele weitere GRBs...

GRB170817A war nicht der einzige GRB, der während unseres zweiten Beobachtungslaufs auftrat. Insgesamt gab es von November 2016 bis August 2017 242 GRBs, die wir auf die genau gleiche Weise untersucht haben! Aber nicht alle dieser GRBs traten zu Zeiten auf, als Gravitationswellen-Daten aufgenommen wurden. Darüber hinaus enthalten die von unseren Detektoren erzeugten Daten auch dann komplizierte Details, wenn keine Gravitationswellensignale erfasst wurden. (Tatsächlich können viele Dinge neben Gravitationswellen Abweichungen in unseren Daten hervorrufen, zum Beispiel: Erdbeben, Wind, Meereswellen, Verkehr, landwirtschaftliche Tätigkeiten, sogar die Schwingungen von Molekülen der LIGO-Spiegel!) Das Vorhandensein dieses allgegenwärtigen „Hintergrundrauschens“ verringerte die Anzahl der zu analysierenden Ereignisse weiter. Von den insgesamt 242 GRBs gibt es für 98 Ereignisse ausreichend hochwertige Daten für die Analyse. Alle wurden mit der unmodellierten Suche untersucht und 42 wurden mit der modellierten Suche weiter analysiert.

Wie bei früheren Suchen dieser Art, haben wir keine zusätzlichen Gravitationswellensignale gefunden, mit Ausnahme von GW170817 und dem dazugehörigen GRB-Signal GRB170817A. Das ist nicht ganz überraschend. GRB170817A war insofern einzigartig, dass es sich in unmittelbarer Nähe befand, etwa 140 Millionen Lichtjahren von der Erde entfernt. (Das ist astronomisch gesehen gleich auf der anderen Straßenseite!) Die meisten GRBs sind viel weiter entfernt (im Durchschnitt Billionen von Lichtjahren, wenn man die Expansion des Universums berücksichtigt) und ihre Gravitationswellen sind daher viel schwieriger nachzuweisen. Dennoch können wir wichtige Schlussfolgerungen über die 97 GRBs ziehen, die kein nachweisbares Gravitationswellensignal erzeugt haben: Sie alle waren nicht in unmittelbarer Nähe! Die in dieser Zusammenfassung enthaltenen Diagramme zeigen die sogenannte „Ausschlussentfernung“ für alle untersuchten Ereignisse. Die Ausschlussentfernung bestimmt die Entfernung, über die wir sagen können: „Wir sind sicher, dass diese GRBs mindestens so weit entfernt waren.“ Wir tun dies für verschiedene Modelle der Abstrahlung von Gravitationswellen, einschließlich der Verschmelzung von zwei Neutronensternen, der Verschmelzung eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch, sowie zwei Familien von Signalmodellen, die versuchen die Abstrahlung bei einem Kernzusammenbruch in langen GRBs näherungsweise zu beschreiben.

Wir haben aber nicht bei der Suche nach offensichtlichen Gravitationswellensignalen aufgehört,

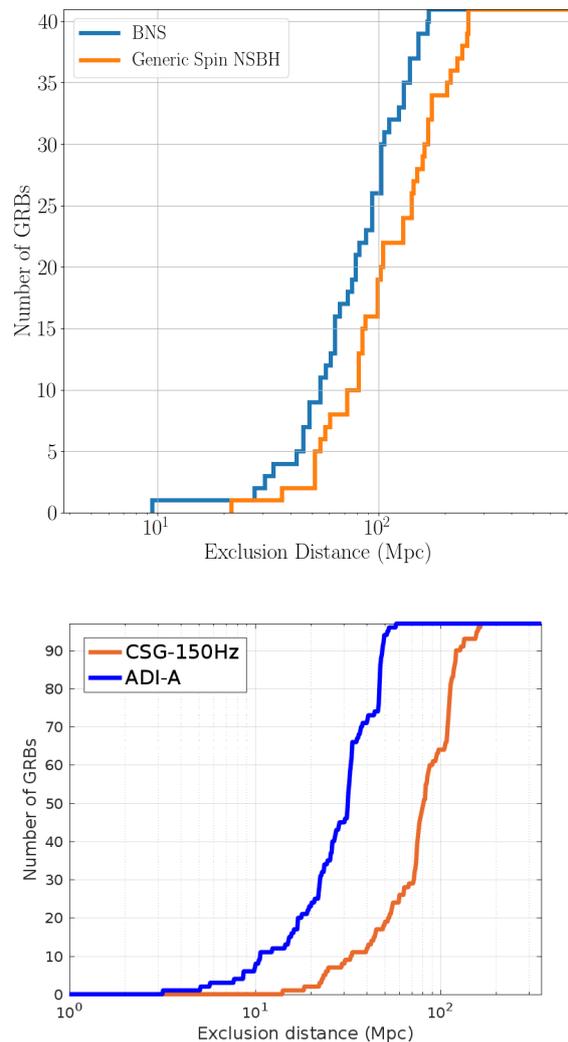


Abb. 2: Diese Abbildungen zeigen die „Ausschlussentfernungen“, zuerst für die modellierte Suche, dann für die nicht modellierte Suche. Diese Diagramme erfassen die „physikalischen“ Ergebnisse unserer Suche und ermöglichen uns Aussagen wie „Wir sind sicher, dass die von uns gemessenen GRBs mindestens eine bestimmte Entfernung von uns haben“. Sie wurden erzeugt, indem simulierte Signale in vielen unterschiedlichen Stärken (was unterschiedlichen Entfernungen entspricht) in unseren Daten versteckt wurden. Die farbigen Linien stellen die Entfernungen dar, bei denen 90 % dieser „injizierten“ Signale aufgespürt wurden. Jeder Suchtyp verfügt über Ausschlussentfernungsdigramme für die zwei Signaltypen. Die modellierte Suche zeigt die Verschmelzungen von zwei Neutronensternen (blau) und die Verschmelzung von einem Neutronenstern mit einem Schwarzes Loch (orange). Ihre mittleren Ausschlussentfernungen betragen 80 bzw. 105 Megaparsec. (Eine Megaparsec ist eine Entfernungseinheit, die 3,2 Millionen Lichtjahren entspricht.) Die unmodellierte Suche zeigt Ausschlussentfernungen für eine bestimmte Art von Instabilität. Sie kann auftreten bei Akkretionsscheiben (blau) und im theoretischen „kreisförmigen Sinus-Gauß-Modell“ (orange), welches einen „gewöhnlichen Ausbruch“ von Gravitationswellen repräsentiert. Ihre mittleren Ausschlussentfernungen betragen 32 bzw. 81 Megaparsec.

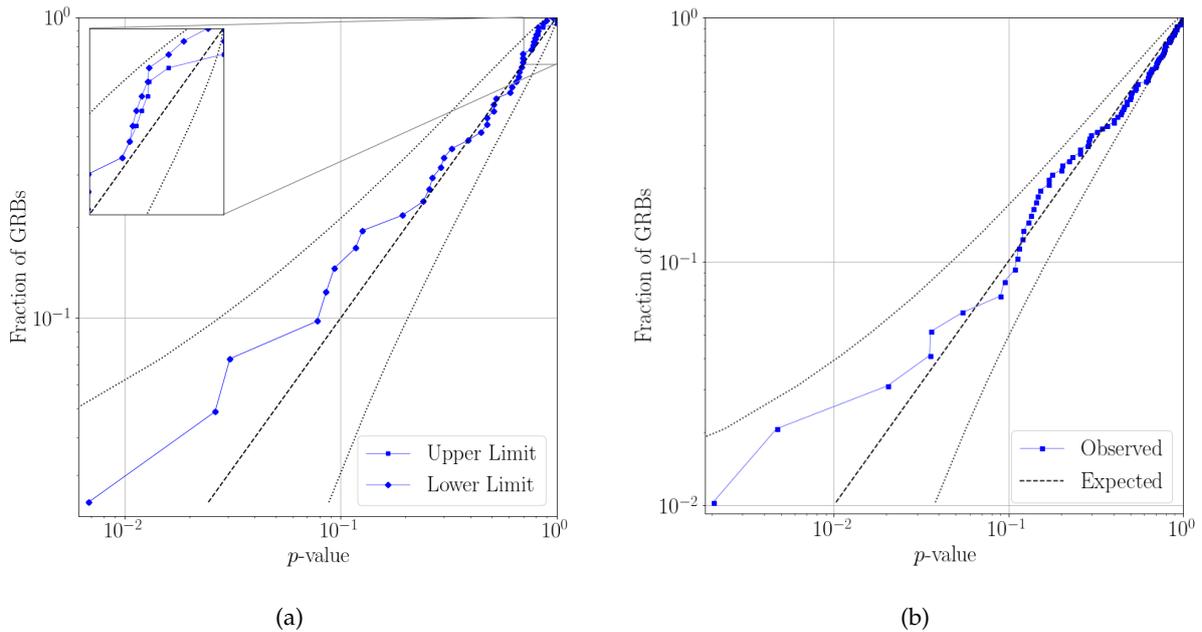


Abb. 3: Während die ersten beiden Abbildungen unsere physikalischen Ergebnisse darstellen, fassen die nächsten beiden Abbildungen die statistischen Ergebnisse zusammen. Diese Diagramme enthalten die zugrunde liegenden statistischen Prinzipien, die uns erlauben das Vertrauen in unsere Ergebnisse zu messen. Kurz gesagt: Jedes Mal, wenn wir nach einem Ereignis suchen, liefern unsere Datenanalyse-Programme ein Maß für die statistische Signifikanz, den sogenannten „p-Wert“. Diese Diagramme zeigen den Anteil der GRBs in unserer Stichprobe (der vertikalen Achse) als Funktion des p-Werts. Wir können sehen, dass die meisten GRBs hohe p-Werte haben, was bedeutet, dass die meisten unserer Ergebnisse mit dem Hintergrundrauschen übereinstimmen. Möglicherweise stellen Sie jedoch auch fest, dass ein kleiner Teil der GRBs niedrige p-Werte aufweist. Dies bedeutet nicht unbedingt, dass diese Ereignisse durch Gravitationswellen hervorgerufen wurden! Dies liegt daran, dass das Hintergrundrauschen unserer Detektoren zufälliger Natur ist. Obwohl Sie die meiste Zeit erwarten würden, dass der Hintergrund hohe p-Werte erzeugt, kann er manchmal niedrige p-Werte erzeugen. Je mehr Suchvorgänge Sie ausführen, desto wahrscheinlicher ist es, dass mindestens einer von ihnen zufällig einen niedrigen p-Wert erzeugt! Wir berücksichtigen dies, indem wir das erwartete statistische Verhalten für eine Suche wie diese (gestrichelte schwarze Linie) in den obigen Abbildungen zusammen mit der Fehlerquote für diese Erwartungen (gepunktete schwarze Linien) aufzeichnen. Solange die blauen Punkte innerhalb der gepunkteten Linien liegen, schließen wir, dass unsere Ergebnisse mit dem Hintergrundrauschen übereinstimmen und daher keinen Hinweis auf ein Signal geben. In diesen beiden Darstellungen ist GW170817A nicht enthalten, welcher als extremer Ausreißer gezeigt werden würde. (Der p-Wert betrug für die modellierte Suche ungefähr $9,38 \cdot 10^{-5}$; und für die unmodellerte Suche $3,11 \cdot 10^{-4}$)

wir haben uns intensiv mit den Daten befasst, um festzustellen, ob es Anzeichen von Ereignissen gibt, die zu schwach sind um unsere Schwellenwerte für den Nachweis zu überschreiten. Diese „Signale unterhalb der Nachweisschwelle“ können auftreten, wenn GRBs knapp außerhalb des Reichweite unserer Detektoren auftreten, sodass sie zu schwach sind, um als eindeutige Signale in unseren Analysen nachgewiesen zu werden. Wir suchen mit komplexen statistischen Werkzeugen nach Signalen unterhalb der Nachweisschwelle: Diese vergleichen Ereigniskandidaten mit dem erwarteten Verhalten unserer Gravitationswellendetektoren, und beurteilen dann, ob sie besser durch Rauschartefakte oder das Vorhandensein eines Signals unterhalb der Nachweisschwelle erklärt werden können. Das Ergebnis dieser Analyse ergab keine Hinweis auf solche Signale in den Daten des Beobachtungslaufs.

All diese Bemühungen zusammen geben uns einen umfassenderen Überblick von Gammastrahlenausbrüchen und die dabei möglicherweise erzeugten Gravitationswellensignale. Auf diese Weise können wir abschätzen, wie oft wir damit rechnen können, dass solche Ereignisse eintreten. Für den dritten Beobachtungslauf (O3), der von 2019 bis 2020 durchgeführt wird, werden voraussichtlich 1 bis 30 Verschmelzungen von zwei Neutronensternen nachgewiesen. (Tatsächlich nehmen wir an, bereits eine gefunden zu haben!) Die Anzahl wird sich erhöhen, wenn Wissenschaftler*innen sowohl LIGO als auch Virgo verbessern um ihre endgültigen „Design-Empfindlichkeiten“ zu erreichen. Dann können wir jedes Jahr zwischen 4 und 97 Verschmelzungen von zwei Neutronensternen nachzuweisen! (Das könnte bedeuten, alle paar Tage ein solches Ereignis aufzuspüren!) Aber nicht alle werden von einem nachweisbaren GRB begleitet werden. Die Wahrscheinlichkeit eines gemeinsamen Nachweises eines Gravi-

tationswellenereignisses und eines GRBs (wie im Fall von GW170817) ist viel geringer, da es etwas Glück erfordert, dass der GRB so ausgerichtet ist, dass wir den gebündelten Strahl der Gammastrahlung sehen können. Wir erwarten in unserem dritten Beobachtungslauf weniger als zwei gemeinsame Nachweise; mit Erreichen der Design-Empfindlichkeit können es jedoch bis zu drei oder vier gemeinsame Nachweise pro Jahr sein.

Die Zukunft ist strahlend, und nicht nur aufgrund der Gammastrahlung!

Während wir hier nur einen einzigen Nachweis präsentieren können (was an sich eine bemerkenswerte Leistung ist), gibt es noch viel, was wir über GRBs und ihre Gravitationswellen-Abstrahlung (oder deren Abwesenheit) lernen können. Unsere Ergebnisse aus dem zweiten Beobachtungslauf weisen auf eine vielversprechende Zukunft der Multi-Messenger-Astronomie im dritten Beobachtungslauf und darüber hinaus hin. Es gibt noch viele ungeklärte Fragen rund um diese extremen und energiereichen Ereignisse. Während sich unsere Gravitationswellen-Detektoren weiter verbessern und wir immer mehr dieser faszinierenden Phänomene beobachten können, werden wir mehr dieser Fragen beantworten. In der Zwischenzeit ist eines klar: Dies ist eine aufregende Zeit für die Astronomie.

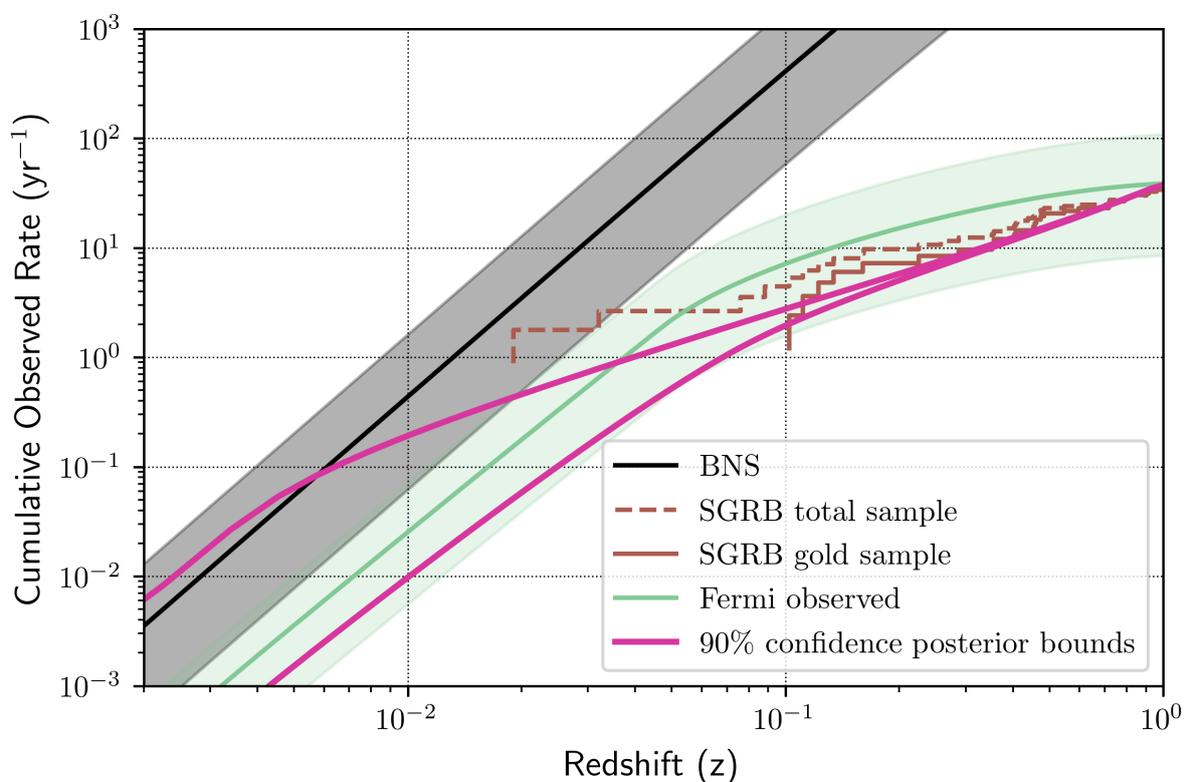


Abb. 4: Diese letzte Abbildung fasst die erwartete Nachweisrate als Funktion der Entfernung (hier dargestellt durch die „Rotverschiebung“). Diese Beobachtungsgröße entspricht der Entfernung auf kosmischen Skalen) zusammen. Obwohl wir nur ein Ereignis nachgewiesen haben (GW170817/GRB170817A), können wir die vorhergesagte Ereignisrate auf Grundlage dessen, was wir nicht erkannt haben, beschränken. Der wesentliche Teil dieses Diagramms sind die magentafarbenen Linien, die den Bereich der Ereignisraten darstellen, die mit unseren Ergebnissen verträglich sind. Insbesondere: wie viele GRBs, die durch Verschmelzung von zwei Neutronensternen erzeugt werden, sollten sich pro Jahr in einem bestimmten Abstand beobachten lassen? Dieser magentafarbene statistische „Konfidenzbereich“ kann mit anderen wichtigen Vorhersagen der Rate verglichen werden. In schwarz ist die (optimistische) Ereignisrate, die aus der Beobachtung von Doppelneutronensternen (aber ohne GRBs) in unserer Galaxie extrapoliert werden kann. In grün ist die Rate angegeben, die aus Beobachtungen kurzer GRBs durch den Fermi-Satelliten abgeleitet wurde. In braun sind die Raten angegeben, die durch den Nachweis von GW170817/GRB170817A bestimmt wurden. Unsere magentafarbenen Linien stimmen mit anderen Beobachtungen überein und stützen die Hypothese, dass kurze GRBs typischerweise aus der Verschmelzung von zwei Neutronensternen entstehen.

Glossar

Gammastrahlenausbruch (Gamma-Ray Burst, GRB): Ein hochenergetisches stellares Todesereignis, das auftritt, wenn zwei kompakte Objekte kollidieren oder wenn der Kern bestimmter exotischer massereicher Sterne

zusammenbricht. Es wird angenommen, dass dies zu den beiden Klassen von GRBs führt, die wir beobachten: kurze GRBs stammen aus der Verschmelzung kompakter Objekte (wahrscheinlich zwei Neutronensterne), während lange GRBs aus dem Zusammenbruch massereicher Sterne stammen.

Gravitationswelle: Winzige Schwankungen der Schwerkraft („keine Wellen in der Struktur der Raumzeit“), die durch die Bewegung von massereichen astronomischen Objekten verursacht werden.

Kompaktes Objekt: Ein Sammelbegriff für sehr dichte, sehr kleine Objekte stellarer Masse wie Neutronensterne und schwarze Löcher. Aber wenn wir „klein“ sagen, meinen wir es nur im astronomischen Sinne! Diese Objekte haben alle *mindestens* die Masse unserer Sonne, die auf einen Durchmesser in der Größenordnung von wenigen oder einigen zehn Kilometern verdichtet ist.

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

LIGO: Das Laser-Interferometer-Gravitationswellen-Observatorium (LIGO) besteht aus zwei Gravitationswellendetektoren auf der Erde (einer in Livingston, Louisiana, USA, und einer in Hanford, Washington, USA).

Neutronestern: Ein „kompaktes Objekt“, das ein exotischen Sterntyp aus neutronenreicher Materie ist. Diese Objekte sind etwa so massereich wie unsere Sonne, haben aber einen Durchmesser von nur ein einigen Kilometern!

Parsec/Megaparsec: Eine Entfernungseinheit, die ungefähr 3,26 Lichtjahren (31 Billionen Kilometer) entspricht. Eine Megaparsec ist eine Million Parsec.

p-Wert: Ein Maß für die statistische Signifikanz einer Messung. Verallgemeinert beantwortet der p-Wert die Frage „Wie wahrscheinlich ist es, dass dieses Messergebnis die Folge zufälligen Hintergrundrauschens ist?“ Ereignisse mit niedrigem p-Wert werden wahrscheinlicher durch tatsächliche Gravitationswellensignale verursacht.

Schwarzes Loch: Ein „kompaktes Objekt“, das so dicht ist, dass nicht einmal Licht seiner Anziehungskraft entgehen kann. Die Arten schwarzer Löcher, die LIGO und Virgo nachweisen, haben Massen von ungefähr der 5-fachen bis 50-fachen Masse unserer Sonne oder mehr!

Virgo: Der Virgo-Detektor ist ein Laser-Interferometer-Gravitationswellen-Observatorium auf der Erde in Casina, Italien, in der Nähe von Pisa.

Weiterführende Informationen

Besuchen Sie unsere Webseiten: <https://www.ligo.org> und <http://www.virgo-gw.eu>.

Lesen Sie den vollständigen Artikel kostenlos auf <https://arxiv.org/abs/1907.01443>.