

## Ergebnisse des O<sub>3</sub>-GEO-KAGRA-Beobachtungslaufs

### Einführung

KAGRA ist ein neuer Gravitationswellendetektor (GW-Detektor) in Japan, der seit Oktober 2019 zusammen mit Advanced LIGO und Advanced Virgo dem internationalen Detektornetzwerk angehört. KAGRA sollte gemeinsame Beobachtungen mit Advanced LIGO und Advanced Virgo im April 2020, dem letzten Monat des dritten Beobachtungslaufs (O<sub>3</sub>), beginnen. Aufgrund der COVID-19-Pandemie mussten Advanced LIGO und Advanced Virgo jedoch am 27. März 2020 ihre Beobachtungen beenden. Glücklicherweise fand KAGRA mit GEO 600 (in diesem Dokument als GEO abgekürzt) in Deutschland einen Partner, der im Rahmen der LIGO-Kollaboration dauerhaft in Betrieb ist.

Im April 2020 nahmen GEO und KAGRA zwei Wochen lang gemeinsam Beobachtungsdaten auf. Wir nennen diesen gemeinsamen GEO-KAGRA-Beobachtungslauf „O<sub>3</sub>GK“. Die Ergebnisse wurden in einem Fachartikel veröffentlicht. Aufgrund der geringen Empfindlichkeit der beiden Detektoren gab es keinen sicheren Nachweis von Gravitationswellen. Während der zwei Wochen wurden jedoch mehrere Gammastrahlenausbrüche (englisch: gamma-ray bursts, GRBs) von Astronom:innen beobachtet, und die LIGO-Virgo-KAGRA- (LVK)-Kollaboration führte einige Suchen nach damit verbundenen Gravitationswellensignalen durch: Suchen am gesamten Himmel nach Verschmelzungen von Neutronensternpaaren und nach allgemeineren nicht modellierten Ausbrüchen sowie gezielte Suchen nach Verschmelzungen kompakter Objekte und nach nicht modellierten Ausbrüchen, die mit den während des Laufs gemeldeten GRBs in Verbindung stehen könnten (Suchen nach Gravitationswellen von GRBs).

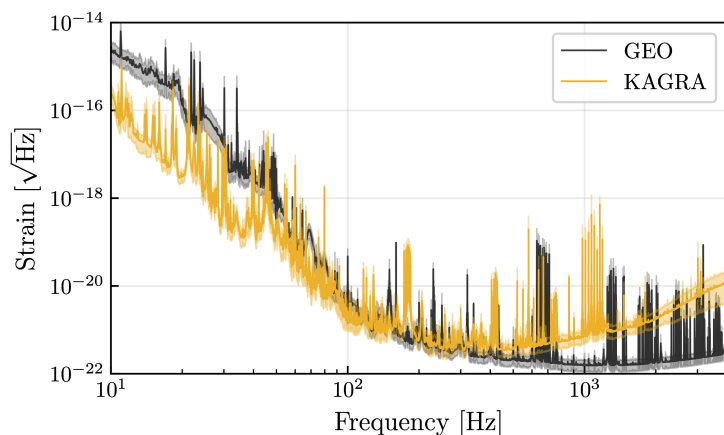


Abb. 1: (Der linke Teil von Abb. 1 aus unserer Veröffentlichung) Das Diagramm zeigt die typische Empfindlichkeit von KAGRA (gelb) und GEO (schwarz) während des gemeinsamen Beobachtungslaufs. Die vertikale Achse zeigt das durchschnittliche Detektorrauschen, das ein Maß dafür ist, wie stark sich die Spiegel typischerweise in Abhängigkeit von der Frequenz (horizontale Achse) bewegen. Die durchgezogenen Kurven zeigen die mittlere Empfindlichkeit als Funktion der Frequenz und die schattierten Bereiche zeigen das 5. und 95. Perzentil der Rauschverteilung über den gesamten Zeitraum.

Es wurden keine Gravitationswellen-Signale identifiziert, was aufgrund der Empfindlichkeit der Detektoren zu erwarten war. Die Untersuchungen zeigen aber, dass die Methoden der Datenanalyse bereit dafür sind, auch KAGRA-Daten einzubeziehen. Das wird von zunehmender Bedeutung sein, wenn KAGRA sich seiner geplanten höheren Designempfindlichkeit nähert.

### KAGRA und GEO600

O<sub>3</sub>GK war die erste gemeinsame Beobachtung von KAGRA mit einem anderen Gravitationswellendetektor. KAGRA ist ein laserinterferometrischer Gravitationswellendetektor mit 3 Kilometer langen Armen, der sich in Kamioka, Gifu, Japan befindet. KAGRA befindet sich unterirdisch in einem Bergwerk und verwendet kryogene Spiegel für vier Testmassen, was seismisches und thermisches Rauschen reduziert. Im April 2019 war der Großteil der Komponenten des Interferometers installiert, und die Inbetriebnahme (d.h., das genaue Einstellen der Detektoren für eine höhere Empfindlichkeit) be-

gann. Nach der Inbetriebnahme wurde die Empfindlichkeit von KAGRA verbessert, so dass bis Ende März 2020 Signale verschmelzender Neutronensterne in Entfernungen von bis zu rund 1 Megaparsec (3,26 Millionen Lichtjahre) hätten aufgespürt werden können. Da es sich bei KAGRA um einen neuen Detektor handelt, an dem noch Verbesserungen vorgenommen werden, hat er noch nicht seine geplante Designempfindlichkeit erreicht.

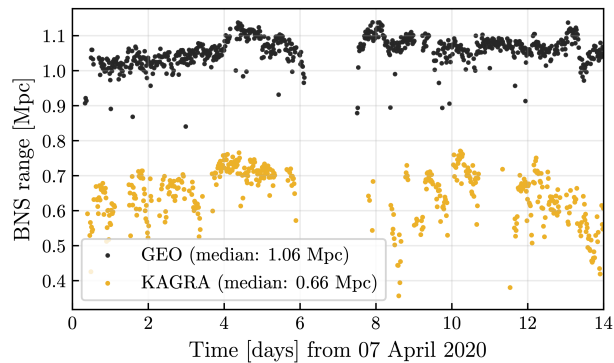


Abb. 2: (Der rechte Teil von Abb. 1 aus unserer Veröffentlichung) Die Entfernungen, in denen KAGRA (gelb) und GEO (schwarz) während des gemeinsamen Beobachtungslaufs Signale verschmelzender Neutronensterne aufspüren können. Dargestellt ist die Entwicklung der Entfernungen während des Beobachtungslaufs. Die Lücke um den 6. und 7. Tag herum wurde durch schlechtes Wetter an beiden Detektoren verursacht, so dass diese nicht gemeinsam beobachten konnten. Die mittlere Entfernung beträgt 0,66 Megaparsec für KAGRA und 1,06 Megaparsec für GEO.

Abbildung 1 zeigt die typische Empfindlichkeit der beiden Detektoren während des gemeinsamen Beobachtungslaufs. Geringere Werte bedeuten eine höhere Empfindlichkeit. Bei niedrigen Frequenzen ist KAGRA empfindlicher, während GEO bei höheren Frequenzen empfindlicher ist. Während des Beobachtungslaufs hätte KAGRA Verschmelzungen von Neutronensternpaaren aus Entfernungen von bis zu rund 0,8 Megaparsec (2,6 Millionen Lichtjahre) und GEO aus Entfernungen von etwa 1,1 Megaparsec (3,6 Millionen Lichtjahre) nachweisen können.

Abbildung 2 zeigt die Entfernungen, aus denen die beiden Detektoren während des gemeinsamen Laufs Verschmelzungen von Neutronensternpaaren nachweisen konnten.

## Gesamthimmel-Suche

Die LVK-Kollaboration führte eine Suche nach Signalen von Doppelsystemen und kurzen Ausbrüchen aus allen Himmelsrichtungen durch (Gesamthimmel-Suche). Die Gesamthimmel-Suche nach Doppelsystemen arbeitet mit Optimalfiltern: die Daten werden mit einer Reihe von Musterwellenformen verglichen, die auf theoretischen Modellen der Gravitationswellen basieren, die von einer Verschmelzung kompakter Objekte erwartet werden. Die Suche nach kurzen Ausbrüchen am gesamten Himmel ist eine Suche nach unmodellierten vorübergehenden Gravitationswellen-Signalen. Die Ergebnisse der beiden Gesamthimmel-Suche zeigen, dass keine Signale entdeckt wurden. Eine Darstellung der Ergebnisse findet sich in **Abbildung 3**.

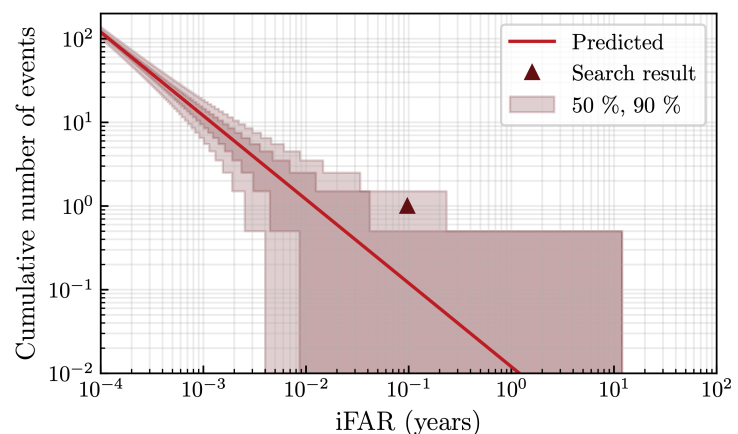


Abb. 3: (Abb. 5 aus unserer Veröffentlichung) Die kumulative Anzahl von Ereignissen als Funktion der inversen Falschalarmrate (iFAR), die bei generischen Suchen nach Ausbrüchen am ganzen Himmel gefunden wurde. Es wird nur ein einziges Ereignis identifiziert (Dreieck), und zwar das lauteste Ereignis. Es liegt innerhalb des 90 %-Intervalls, was bedeutet, dass es als Rauschen betrachtet wird. Die schattierten Bereiche zeigen die 50 %- und 90 %-Poisson-Unsicherheiten.

GEO ist einer der ältesten interferometrischen Gravitationswellendetektoren. Er spielt, obwohl er ein kleinerer Detektor mit 600 Meter langen Armen ist, eine wichtige Rolle als Prüfstand für neue Detektortechnologien. Denn die Empfindlichkeit der Gravitationswellendetektoren wird durch das von den Instrumenten selbst erzeugte Rauschen begrenzt.

Zusätzlich zu einem Grundrauschen, das im Wesentlichen über die gesamte Zeit gleich bleibt, gibt es vorübergehende instrumentelle Artefakte in den Daten, die wir als Störimpulse (englisch: glitches) bezeichnen. Obwohl große Anstrengungen unternommen werden, um das Rauschen so gering und so gleichbleibend wie möglich zu halten, können diese Störungen vorübergehende Gravitationswellen-Signale imitieren. Durch den gleichzeitigen Betrieb von zwei Detektoren können wir die Anzahl der Störungen, die sich mit echten Signalen verwechseln lassen, erheblich reduzieren.

## Suche nach Gravitationswellen von GRBs

Während des Beobachtungslaufs gab es einige interessante astronomische Ereignisse. Gammastrahlenausbrüche (GRBs), die von anderen Observatorien beobachtet wurden und die Gravitationswellen begleitet haben könnten. Die Daten der Gravitationswellendetektoren in zeitlicher Nähe zu diesen Ereignissen wurden genauer untersucht. Vier GRBs, darunter zwei lange GRBs (mit einer Dauer von mehr als zwei Sekunden) und zwei kurze GRBs (mit einer Dauer von weniger als zwei Sekunden), ereigneten sich, während sowohl KAGRA als auch GEO wissenschaftliche Daten aufnahmen. Die LVK-Kollaboration führte in Zusammenhang mit diesen GRBs Suchen nach Verschmelzungssignalen und Gravitationswellenausbrüchen durch, die den Zeitraum und den Himmelsort analysierten, die elektromagnetische Beobachtungen der GRBs eingrenzen. Die LVK-Kollaboration kommt zu dem Schluss, dass es keine Anzeichen abgestrahlter Gravitationswellen im Zusammenhang mit einem der vier GRBs gibt – weder bei der Suche nach Verschmelzungssignalen noch bei der nach kurzen Ausbrüchen.

Einer der untersuchten GRBs, GRB 200415A, wurde mit einem Riesenflare eines Magnetars in der Sculptor-Galaxie (NGC 253) in einer Entfernung von 3,5 Megaparsec in Verbindung gebracht.

Das Ergebnis der Suche nach GRB 200415A ist in **Abbildung 4** dargestellt. Die Ausschlussentfernung auf Grundlage unserer Analyse beträgt nur wenige Kiloparsec und reicht nicht aus, um einen Ursprung in einer Verschmelzung kompakter Objekte auszuschließen und die Hypothese des Magnetar-Riesenflares zu überprüfen. Das Ergebnis der Suche nach generischen Gravitationswellenausbrüchen nach GRBs ist in **Abbildung 5** dargestellt. Für jeden GRB wird eine Ausschlussentfernung berechnet.

## Zukunftsaussichten

Mit den hier vorgestellten Analysen hat die LVK-Kollaboration gezeigt, dass KAGRA ein vielversprechender Teil des Detektornetzwerks werden kann. Die LVK-Detektoren sind jetzt nicht im Messbetrieb, um Verbesserungen vor dem bevorstehenden vierten Beobachtungslauf (O4) vorzunehmen, dessen Beginn derzeit für Mitte Dezember 2022 geplant ist (<https://www.ligo.org/scientists/GWEMalerts.php>).

Sobald KAGRA in der geplanten Designkonfiguration betriebsbereit ist, wird er eine Empfindlichkeit erreichen, die mit der der advanced-LIGO- und advanced-Virgo-Detektoren vergleichbar ist; KAGRA wird dann eine wesentliche Rolle bei der Entdeckung von Gravitationswellen-Signalen spielen. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass weitere Detektoren Teil des Netzwerks werden, um zusätzliche Informationen zu erhalten und unsere Fähigkeit zu verbessern, die Richtung zu

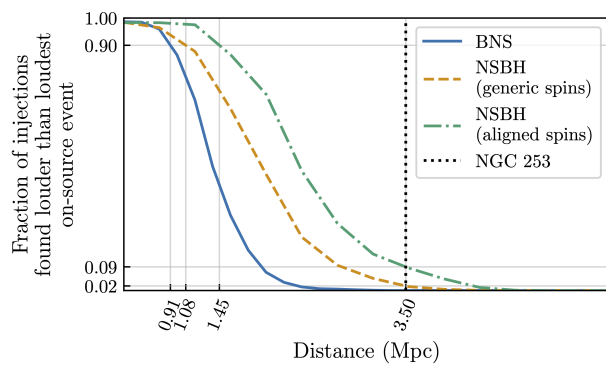


Abb. 4: (Abb. 7 aus unserer Veröffentlichung) Ausschlussentfernungen für GRB 200415A, aus der Suche nach Gravitationswellen im Zusammenhang mit GRBs, wenn man Signale von einer Doppelneutronensternverschmelzung (BNS) oder der Verschmelzung eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch (NSBH) annimmt. Die Kurven entsprechen drei betrachteten Populationen: BNS (blau durchgezogen), NSBHs mit allgemein ausgerichteten Spins (orange gestrichelt) und NSBH mit am Bahndrehimpuls ausgerichteten Spins (grün gestrichelt). Die 90%-Ausschlussentfernungen von 0,91 Megaparsec, 1,08 Megaparsec und 1,45 Megaparsec sind durch die vertikalen Linien markiert, und die Entfernung zu NGC 253 (3,5 Megaparsec) ist ebenfalls dargestellt. Die Konfidenzwerte, die der Entfernung zu NGC 253 für BNS, NSBH (generische Spins) und NSBH (ausgerichtete Spins) entsprechen, sind durch die horizontalen Linien gekennzeichnet: 0 %, 2 % bzw. 9 %. Die Suchempfindlichkeit ist also nicht ausreichend, um verschmelzende kompakte Objekte auszuschließen.

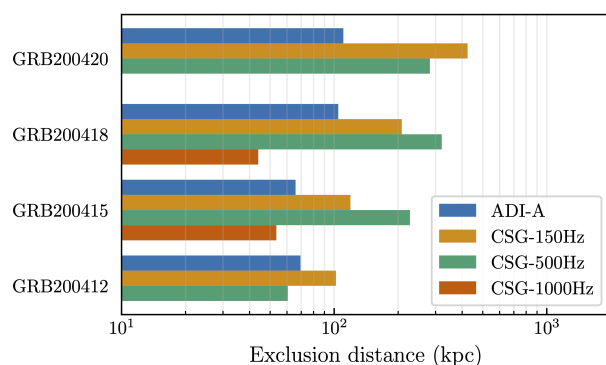


Abb. 5: (Abb. 8 aus unserer Veröffentlichung) Ausschlussentfernung für jeden der vier GRBs, die mit der generischen Suche nach Gravitationswellenausbrüchen im Zusammenhang mit GRBs analysiert wurden. Hier entspricht jeder Wert einem Modell für Gravitationswellen von der Akkretionsscheibeninstabilität (ADI) oder zirkulären Sinus-Gauß-Signalen (CSG) mit den Zentralfrequenzen 150 Hz, 500 Hz und 1000 Hz.

bestimmen, aus der die Gravitationswellen kommen. Die Tatsache, dass die Arme von KAGRA anders ausgerichtet sind als die der anderen Detektoren, macht seinen Beitrag umso wichtiger.

## Glossar

**Ausschlussentfernung:** Die Ausschlussentfernung ist der Abstand, innerhalb dessen 90 % einer Population von simulierten Signalen mit mindestens der gleichen Sicherheit wiedergefunden würden wie das lauteste Kandidateneignis, das durch Detektorrauschen in zeitlicher Nähe zum GRB verursacht wurde.

**Beobachtbarer Bereich für Doppelneutronensterne:** Ein Standardmaß für die Empfindlichkeit von Gravitationswellendetektoren. Es gibt die Entfernung an, bis zu der das Verschmelzen zweier Neutronensterne mit einem Signal-Rausch-Verhältnis von 8 (mit Optimalfilter) nachgewiesen werden kann.

**Beobachtungslauf:** Ein Zeitraum, in dem Gravitationswellendetektoren Beobachtungsdaten aufnehmen.

**Doppelneutronenstern:** Ein System, das aus zwei Neutronensternen besteht, die sich in einer engen Umlaufbahn umeinander befinden. (Siehe hier)

**Empfindlichkeit:** Eine Beschreibung der Fähigkeit eines Detektors, ein Signal zu erkennen. Detektoren mit geringerem Rauschen sind in der Lage, schwächere Signale zu erkennen und haben daher eine höhere (oder größere) Empfindlichkeit.

**Fehlalarmrate:** Diese Rate misst, wie oft eine zufällige Schwankung des Detektorrauschens ein Signal erzeugen könnte, das dem betrachteten Kandidateneignis ähnelt. Je kleiner diese Fehlalarmrate ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass es sich um ein astrophysikalisches Ereignis handelt.

**Gammastrahlen:** Extrem energiereiche Photonen, noch energiereicher als Röntgenstrahlen.

**Gammastrahlenausbruch (GRB):** Ein Gammastrahlenblitz, der von einer weit entfernten astrophysikalischen Quelle ausgeht und bis zu Hunderte von Sekunden andauert, in vielen Fällen jedoch weniger als ein paar Sekunden.

**Gesamthimmel-Suchen:** Dies sind die Standardsuchen. Für die O3GK-Daten hat die LVK-Kollaboration eine Suche mit Optimalfiltern nach verschmelzenden Neutronensternen und generischen, unmodellierten Ausbrüchen durchgeführt.

**GEO600:** Der GEO-Detektor ist ein interferometrischer Gravitationswellendetektor nahe Hannover, Deutschland.

**Gravitationswellenform:** Eine Darstellung der Entwicklung eines Gravitationswellensignals über die Zeit.

**KAGRA:** Der KAGRA-Detektor ist ein unterirdischer interferometrischer Gravitationswellendetektor in der Kamioka-Mine in Gifu, Japan. Das Interferometer hat 3 Kilometer lange Arme und Spiegel, die durch die Kühlung auf sehr niedrige Temperatur bestimmte Rauschquellen reduzieren.

**Kiloparsec (kpc):** Das Tausendfache eines Parsec; dies entspricht einer Entfernung von etwa 3260 Lichtjahren.

**Kompaktes Objekt:** Ein extrem dichtes astrophysikalisches Objekt wie ein Schwarzes Loch, ein Neutronenstern oder ein Weißer Zwerg.

**Kurzer GRB:** Gammastrahlenausbrüche mit einer Dauer von weniger als 2 Sekunden. Man geht davon aus, dass sie durch das Verschmelzen von kompakten Objekten (zwei Neutronensternen oder einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch) entstehen.

**Langer GRB:** Die Dauer ist länger als 2 Sekunden. Man geht davon aus, dass diese Signale beim Kernkollaps massereicher Sterne entstehen.

**Lichtjahr:** Eine Entfernungseinheit, die der Strecke entspricht, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Ein Lichtjahr entspricht ungefähr 9,46 Billionen Kilometern (oder etwa 5,88 Billionen Meilen).

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

**Magnetar:** Ein Neutronenstern, dessen starkes Magnetfeld ungewöhnliche Phänomene, wie kurze Ausbrüche, hervorruft.

**Magnetar-Riesenflare:** Eine viel energiereichere Version eines kurzen Magnetar-Ausbruchs, die in weniger als einer Sekunde die Energiemenge abgibt, die die Sonne in 100.000 Jahren erzeugen würde.

**Megaparsec (Mpc):** Eine Entfernungseinheit. Eine Million Mal so viel wie ein Parsec; das entspricht rund 3,26 Millionen Lichtjahren.

**Neutronenstern:** Äußerst dichtes Objekt, das nach dem Zusammenbruch eines massereichen Sterns zurückbleibt. Ein Neutronenstern ist so dicht, dass einzelne Atome nicht existieren können und der ganze Stern einem riesigen Atomkern gleicht. Sie haben etwa die 1- bis 2-fache der Masse der Sonne, haben aber nur einen Radius von etwa 10 Kilometer.

**Neutronenstern-Schwarzes Loch-Doppelsystem:** Ein System, das aus einem Schwarzen Loch und einem Neutronenstern besteht, die sich in einer engen Umlaufbahn umeinander befinden. (siehe hier)

**Optimalfilter:** Eine Methode zum Nachweis von Signalen, die in verrauschten Daten verborgen sind. Aus der allgemeinen Relativitätstheorie berechnete Gravitationswellenformen werden mit den Daten verglichen und auf Übereinstimmung überprüft.

**Parsec (pc):** Eine in der Astronomie häufig verwendete Entfernungseinheit, die etwa 3,26 Lichtjahren entspricht. Sie entspricht ungefähr 31 Billionen Kilometern.

**Rauschen:** Schwankungen im Signal der Gravitationswellenmessung, die auf verschiedene instrumentelle und umweltbedingte Effekte zurückzuführen sind. Die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors ist durch das Rauschen begrenzt.

**Schwarzes Loch:** Eine Region mit extrem verformter Raumzeit, die durch eine extrem kompakte Masse verursacht wird, deren Schwerkraft so stark ist, dass nichts, auch kein Licht, sie verlassen kann.

**Signal-Rausch-Verhältnis:** Das Verhältnis der Signalleistung zur Rauschleistung, das zum Vergleich des Signalpegels mit dem Rauschpegel verwendet wird. Es misst die Stärke des Signals im Vergleich zu den Rauschquellen, die es potenziell überlagern könnten.

**Stärke (von Gravitationswellen):** Die Änderung der Länge der Detektorarme aufgrund der Verformung der Raumzeit durch Gravitationswellen, die einen Detektor durchlaufen, geteilt durch die Gesamtlänge eines Arms.

**Suche nach Ausbrüchen:** Eine Suche nach übereinstimmenden Energieüberschüssen in einem Netz von GW-Detektoren, die ohne Annahme eines bestimmten Wellenformmodells arbeitet.

**Suchen nach Gravitationswellen von GRBs:** Dies sind gezielte Suchen nach Gravitationswellen-Signalen, die mit GRBs in Verbindung stehen, die während des Beobachtungslaufs beobachtet wurden. Indem wir uns auf die Zeiten und Himmelspositionen von GRBs konzentrieren, können wir möglicherweise schwächere Gravitationswellen-Signale aufspüren, als dies bei einer Suche über den gesamten Himmel der Fall wäre. Für die O3GK-Daten hat die LVK-Kollaboration eine Suche mit Optimalfiltern für Signale verschmelzender Doppelneutronensterne und Verschmelzungen eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch und für generische, nicht modellierte Ausbrüche durchgeführt.

**Virgo:** Der Virgo-Detektor ist ein interferometrischer Gravitationswellendetektor in Cascina, Italien, in der Nähe von Pisa.

## Lesen Sie die Mitteilung auf unseren Websites:

### Alle aktuellen News auf unseren Websites:

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

<https://www.geo600.org/100861/news>

### Lesen Sie den vollständigen wissenschaftlichen Artikel:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100286/public>

### Veröffentlichung der O3GK-Daten:

<https://www.gw-openscience.org/>

## Besuchen Sie unsere Websites:

<https://www.ligo.org/>

<https://www.virgo-gw.eu/>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>