

GWTC-4.0: ERWEITERUNG DES KATALOGS MIT BEOBACHTUNGEN AUS DEM ERSTEN TEIL DES VIERTEN LIGO-VIRGO-KAGRA BEOBACHTUNGSLAUFES

Im August 2025 hat die [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) Kollaboration die gemessene [interferometrische Dehnung](#) aus dem ersten Teil des vierten Beobachtungslaufs (O4a) veröffentlicht. Dieser lief von Mai 2023 bis Januar 2024. In diesen Daten haben wir 128 neue gesicherte Signale von [Gravitationswellen](#) (GW) entdeckt, die aus zusammenstoßenden [Schwarzen Löchern](#) und [Neutronensternen](#) stammen. Neben diesen Daten veröffentlichen wir Version 4.0 des „Katalogs kurzlebiger Gravitationswellenereignisse“ (GWTC-4.0), welcher aus einer Liste aller Signale, sowie der berechneten Eigenschaften der Himmelskörper, die als Quelle der Signale identifiziert wurden, besteht. Dem Katalog begleitend wurde eine Reihe wissenschaftlicher Artikel zur Veröffentlichung als Sonderausgabe bei der Zeitschrift „Astrophysical Journal Letters“ eingereicht. Hier werden die ersten drei dieser Artikel, die sich der Vorbereitung von GWTC-4.0 und dessen Ergebnisse widmen, zusammengefasst.

Einleitung

Der erste Artikel, „GWTC-4.0: An Introduction to Version 4.0 of the Gravitational-Wave Transient Catalog“, gibt eine Übersicht der Veröffentlichung, einige Details der anderen Artikel, sowie wichtigen Kontext und Information, um die Nomenklatur des Forschungsgebiets zu verstehen.

Was steckt im Namen?

Wir nutzen den Zeitpunkt, an dem eine Gravitationswelle entdeckt wurde, um sie mittels der [Koordinierten Weltzeit](#) (UTC) zu benennen. Die (chronologisch) erste neue Gravitationswelle in unserem Katalog, GW230518_125908, wurde am 18. Mai 2023 um 12:59:08 UTC gemessen. Der Präfix GW wird allen gemessenen Signalen gegeben (das haben wir früher etwas anders gemacht – nun werden auch Signale in den Katalog einbezogen, bei denen nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie terrestrischen Ursprungs sind. Dazu werden jedoch die Gründe erläutert, warum es sich dabei möglicherweise nicht um echte Gravitationswellen handelt).

Kumulative Kataloge

Der GW Katalog ist kumulativ – in anderen Worten enthält GWTC-4.0 nicht nur die neuen Signale, die in O4a beobachtet wurden, sondern auch alle Daten aus vorherigen Versionen. **Abbildung 1** zeigt eine Zeitleiste, in der alle Beobachtungsläufe in farbigen Bändern zu sehen sind, sowie die Zeitspanne aller Kataloge. Wie man schnell erkennen kann, folgen Kataloge der Namenskonvention GWTC- \langle groß \rangle - \langle klein \rangle , wobei die große Zahl erhöht wird, wenn neue Daten verfügbar gemacht werden, und die kleine wenn Analysen erneuert werden, z.B. mit neuen Methoden (wie für [GWTC-2.1](#)) oder Beschreibungen der Daten. In der Vergangenheit wurde jedoch die kleine Zahl oft nur implizit genutzt wenn sie Null war, was zu viel Verwirrung bezüglich GWTC-2 als GWTC-2.0 oder GWTC-2.1 geführt hat. Deshalb werden wir von nun an die Kataloge immer mit beiden Zahlen bezeichnen, und nur die große Zahl alleine nutzen, wenn lediglich die Zeitspanne gemeint ist (siehe **Abbildung 1**). Im Gegensatz zum vorherigen Beobachtungslauf O3 basieren die Daten von O4a ausschließlich auf Messungen der beiden LIGO-Detektoren. KAGRA hat zwar am Anfang des Laufes kurz Daten gemessen, doch diese waren unzureichend genau um zum Katalog beizutragen.

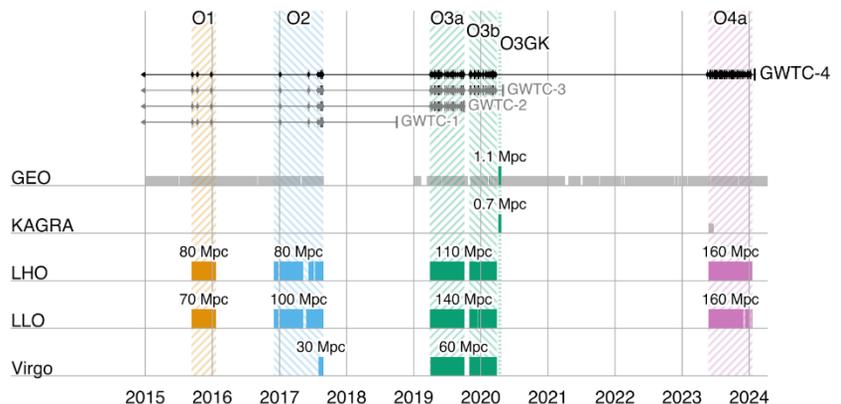


Abbildung 1: Eine Zeitspanne der Beobachtungsläufe zeigt an, wann die Datennahme der Gravitationswellen-Observatorien [GEO](#), [KAGRA](#), [LIGO-Hanford](#) (LHO), [LIGO-Livingston](#) (LLO), und [Virgo](#) stattgefunden hat. Die Zahlen über den farbigen Blöcken zeigen die ungefähre Distanz an, bei der eine typischerweise erwartete Verschmelzung zweier Neutronensterne gemessen werden könnte, was ein Maß für die Empfindlichkeit ist. Im oberen Teil wurden Balken hinzugefügt, die zeigen, welche Zeitspanne zu welchem Katalog beiträgt.

FINDE MEHR HERAUS:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu



Innerhalb dieses einführenden Artikels liefern wir zum ersten Mal eine detaillierte Beschreibung der Entwicklung der individuellen Detektoren. Wir hoffen, dass die Sammlung all dieser Information am selben Ort die astronomische Gemeinschaft, die unsere Beobachtungen erforscht, sowie experimentell-ausgelegte Gruppen, die solche Detektoren bauen, vernetzen kann.

In die Dunkelheit spähen

Wir können das 4-dimensionale Volumen in Zeit **und** Raum, das von den Observatorien gesehen wurde (wir nennen es ein 'Hypervolumen', weil es in mehr als drei Dimensionen existiert), bestimmen, indem wir Signale simulieren und anschließend überprüfen, ob sie sichtbar gewesen wären, was mit unserem Wissen über den [Tastgrad](#) der Detektoren kombiniert wird. **Abbildung 2** zeigt eine Näherung dieses Hypervolumens gegen die kumulative Anzahl der gemessenen Signale, denen wir eine Wahrscheinlichkeit von mindestens 50% zuweisen können, dass sie tatsächlich astrophysikalischen Ursprungs sind. Man sieht dadurch auch, wie viele Signale in welchen Zeitspannen entdeckt wurden. Dadurch wird deutlich, dass wir in O4a die Anzahl der gemessenen Gravitationswellen im Vergleich zu GWTC-3.0 verdoppelt haben! Die blauen Bänder sind ein Maß der Unsicherheit: Obwohl den meisten Signalen eine nahezu hundertprozentige Wahrscheinlichkeit eines astrophysikalischen Ursprungs zugewiesen wurde, könnten jene mit einer 50% Wahrscheinlichkeit genauso gut eine bloße [Störgeräuschschwankung](#) sein. Die Bänder zeigen also an, wie diese möglichen Schwankungen unsere Messungen maximal beeinflussen können.

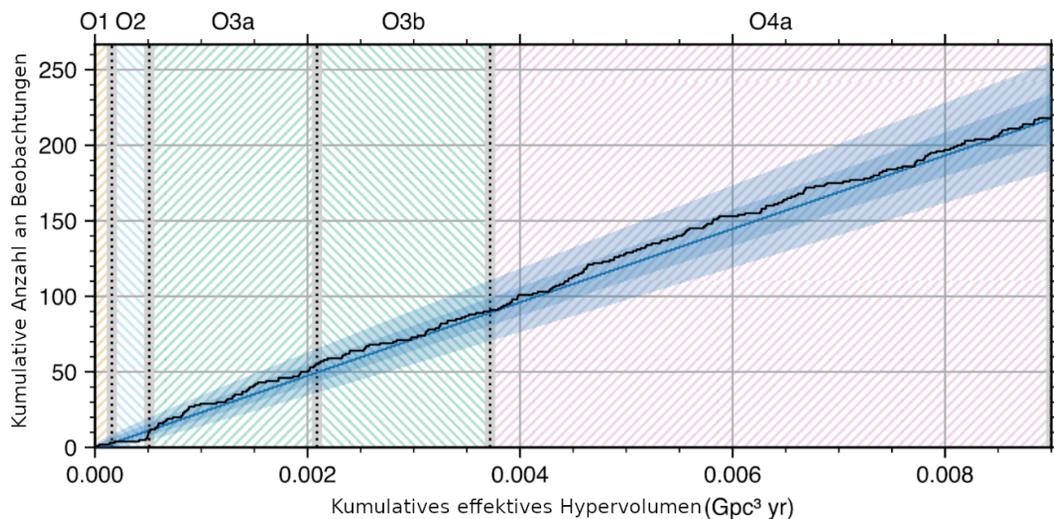


Abbildung 2: Die kumulative Anzahl an entdeckten Gravitationswellen (Signale bei denen wir uns um mindestens 50% sicher sein können, dass es sich um echte Gravitationswellen handelt) gegen das ungefähre Raum-Zeit Hypervolumen unserer Beobachtungen.

Im weiteren Verlauf des Artikels bewerten wir alle bisher identifizierten [Quellen von Gravitationswellen](#) und enden mit einer Zusammenfassung. Unser Ziel ist es nicht, bestehende Lehrbücher zu ersetzen, sondern eine kurze Einleitung in die Sprache und Mathematik zu geben, die wir verwenden, um diese Quellen zu beschreiben. Dies gewährleistet eine einheitliche Notation und schafft einen einheitlichen Bezugspunkt für alle an diesem Gebiet interessierten Personen. Als Anhang fügen wir außerdem eine Tabelle der am häufigsten verwendeten Akronyme, Glossardefinitionen und eine kurze Diskussion der Konventionen unserer Datenanalyse bei.

Obwohl dieser einleitende Artikel keine eigenen Ergebnisse liefert, bildet er die Grundlage für die übrigen Veröffentlichungen. Er soll Redundanzen zwischen den anderen Artikeln vermeiden, deren Konsistenz sicherstellen und klare Definitionen für das Fachgebiet bereitstellen.

METHODEN

Der zweite Artikel, "GWTC-4.0: Methods for identifying and characterising gravitational-wave transients", beschreibt alle Details der Methodik, die genutzt wurde, um GWTC-4.0 zu produzieren. Er startet mit der Entwicklung von theoretischen Modellen zur Beschreibung der [Wellenform](#) der Verschmelzung von Schwarzen Löchern und Neutronensternen, gefolgt von einer Diskussion der verschiedenen [Such-Algorithmen](#), die aus den Rohdaten die erste Kandidatenliste generieren. Jeder Kandidat, der durch unsere verschiedenen Qualitätstests und Prüfungen bestätigt wird, untergeht anschließend einer [Parameterschätzung](#), die es uns letztendlich ermöglicht, die Eigenschaften der Quellen zu verstehen. Darüber hinaus ermöglicht diese Schätzung weitere Konsistenztests, um die Gültigkeit unserer unterliegenden Annahmen zu überprüfen.

Wir legen noch einen Zahn zu: unsere bisher komplizierteste Analyse

Seit dem Ende von O3 und der Veröffentlichung von GWTC-3.0 haben wir viel Arbeit in die Verbesserung unserer Analysen gesteckt. Unsere neuen Wellenformmodelle beschreiben die zugrundeliegende Physik präziser und sind rechnerisch

effizienter. Insgesamt nutzen wir vier verschiedene solche Modelle in unseren Analysen, doppelt so viel wie in GWTC-3.0. Das führt zu einem besseren Verständnis der Ungenauigkeiten in den Modellen. Die Such-Algorithmen wurden auch verbessert und nutzen neue Methoden, um die Empfindlichkeit der Detektoren zu verbessern. Viele dieser Verbesserungen haben auch die Komplexität der Herstellung des Katalogs erhöht, weshalb wir weiterhin an Technologien forschen, um unsere Analysen möglichst zu automatisieren. Das macht es auch einfacher, unsere Ergebnisse zu reproduzieren.

Eine historische Perspektive

Sie werden wahrscheinlich überrascht sein, in dem Artikel Beschreibungen der Geschichte verschiedener Algorithmen bis hin zur ersten Beobachtung zu finden. Diese sind aufgrund der kumulativen Natur des Katalogs nötig: Es ist für uns wichtig, dass ältere Ergebnisse reproduzierbar bleiben, z.B. falls ein Nutzer den Ursprung älterer Ergebnisse (die mit heutigen Methoden anders aussehen können) untersuchen möchte. Aus diesen Gründen geben wir eine historische Perspektive und beschreiben alle Verbesserungen der neuen Methodik.

Zusammenfassend: der zweite Artikel stellt die verwendeten Arbeitsgänge vor, zeigt den Einsatz von [online/offline](#) Analysen, vorläufige Studien, und wie durch gewissenhafte Prüfung die Qualität unserer Endergebnisse gesichert wird.

Ergebnisse

Mehr Signale, mehr Vielfalt

Wir haben 128 neue Kandidaten gefunden, die mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 50% als astrophysikalisch eingestuft werden können. Das bringt die neue Gesamtanzahl innerhalb des Katalogs auf 218, eine Verdoppelung! Zusätzlich stellen wir detaillierte Analysen von 86 dieser neuen Signale vor. Die Gründe für den deutlichen Anstieg in der Anzahl an Signalen sind Verbesserungen unserer Detektoren sowie neue Analysen, die Signale im Rauschen besser finden können. Es ist aufregend so viele neue Beobachtungen zu haben, weil bei den neuen Ereignissen sowohl Verschmelzungen schwarzer Löcher dabei sind, als auch Systeme mit Verschmelzungen eines schwarzen Loches mit einem Neutronenstern, die keinem bisher beobachteten System ähnlich sind.

Von online zu offline

Während O4 haben wir so schnell wie möglich öffentliche Online-Warnmeldungen zu wahrscheinlichen Kandidaten veröffentlicht. Diese ermöglichen Astronomen Folgebeobachtungen, um nach mit Verschmelzungen assoziiertem Licht zu suchen. In O4a gab es 1697 solcher Meldungen, von denen 82 als hochwertig und astrophysikalisch relevant eingestuft wurden. Der neue Katalog umfasst allerdings 128 neue Kandidaten: die restlichen stammen aus langsameren aber komplexeren sogenannten "offline" Analysen. Nur Acht der 128 Kandidaten wurden überhaupt nicht von den online Analysen gefunden, was zeigt, dass die online Analysen den Großteil der relevanten Informationen schnell bereitstellen.

Fokusbereich

Zwei der Kandidaten scheinen aus hybriden Verschmelzungen von Schwarzen Löchern mit Neutronensternen zu stammen. Diese Ereignisse sind besonders interessant, denn im Gegensatz zu Verschmelzungen zweier Schwarzer Löcher kann sich in ihrer astrophysikalischen Umgebung deutlich mehr Materie befinden, die das Signal potenziell beeinflussen können. In diesen beiden Signalen haben wir leider keine Anzeichen für diese Effekte gefunden, aber es wird immer wahrscheinlicher, dass wir sie bald beobachten können.

Effekt der Massen

Wir können die Massen beider verschmelzender Objekte nahezu direkt aus den Signalen ablesen. **Abbildung 3** zeigt für all unsere Kandidaten, welches die wahrscheinlichsten assoziierten Massen sind. Darin sehen wir sofort, dass wir zwar keine neuen binären Neutronensterne gefunden haben, aber einige hybride Verschmelzungen und Schwarze Löcher mit mehr als 150 Sonnenmassen beobachtet haben!

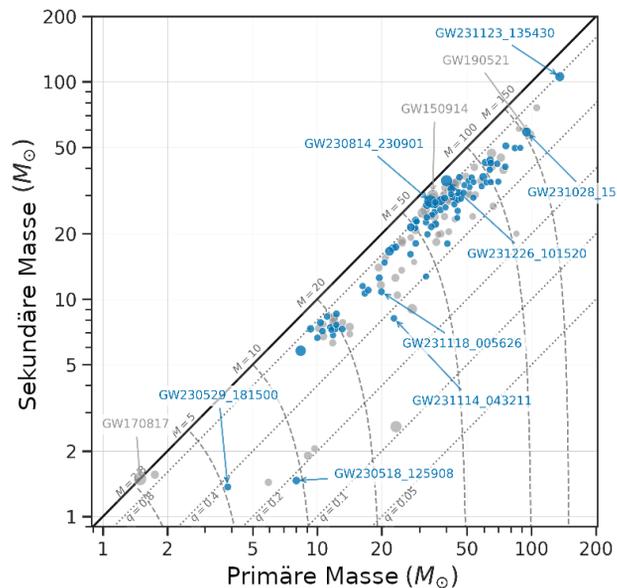


Abbildung 3: Diese Masse-Masse Graphik zeigt die neuen Kandidaten aus O4a in blau mit den älteren Kandidaten in grau. Diese Punkte zeigen lediglich die wahrscheinlichsten Ergebnisse, es fehlt also hier viel Information. Die Größe der Punkte ist dem [Signal-Rausch-Verhältnis](#) proportional. Die gepunkteten Linien zeigen konstante Massenverhältnisse zwischen den beiden Objekten und gestrichelte Linien zeigen verschiedene Werte der Gesamtmasse der Systeme. Alle Massen sind in Einheiten der [Sonnenmasse](#). (Quelle: G. Ashton, Royal Holloway University of London.)

Der richtige 'Spin'

Wir können in der Regel zwei Eigenschaften der Schwarzen Löcher oder Neutronensterne, die Teil einer Verschmelzung sind, messen: deren Massen, und ob sie [rotieren](#). Falls letzteres der Fall ist, können wir die Geschwindigkeit dieser Rotation messen, sowie die Winkel zwischen den jeweiligen Rotationsachsen. Wir berechnen einen Wert namens "effektiver Spin", der für jedes Signal eine nützliche Zusammenfassung der Effekte der Rotation beider Objekte darstellt. Ein hoher effektiver Spin bedeutet, dass mindestens eines der Objekte schnell in dieselbe Richtung rotiert wie die Umlaufbahn der Objekte umeinander. Ein negativer effektiver Spin bedeutet das Gegenteil: mindestens ein Objekt rotiert entgegen seiner Umlaufbahn.

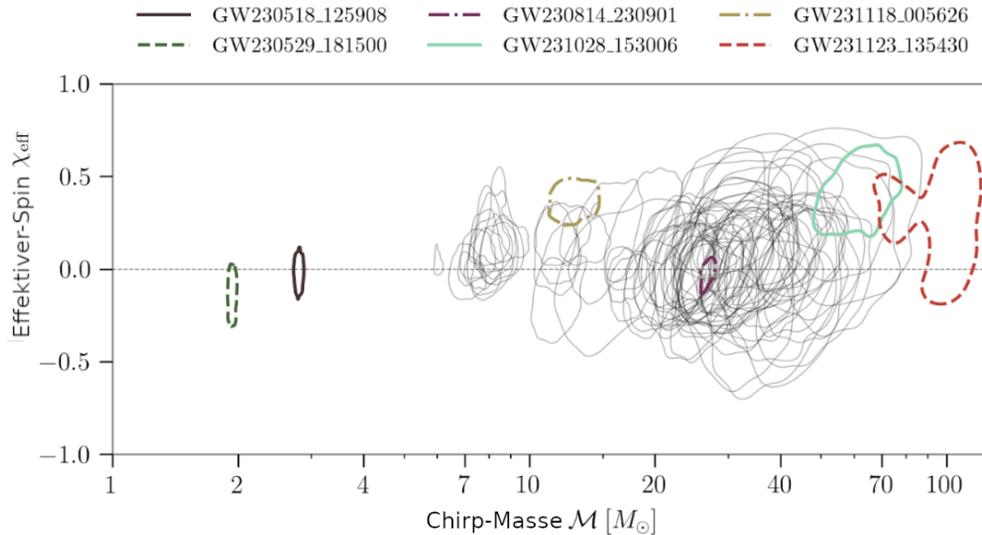


Abbildung 4: Der effektive Spin gegen die "Chirp-Masse" aller neuen Kandidaten in GWTC-4.0, wobei besonders interessante Kandidaten farblich dargestellt sind. Jede Kontur umfasst das 90% Konfidenzniveau der abgeschätzten Werte des Kandidaten.

Mit GWTC-4.0 verdoppelt sich die Zahl der bekannten Gravitationswellensignale: eine fantastische Leistung! Das zeigt, wie stark die Detektoren verbessert wurden. Die neuen Signale liefern uns spannende Erkenntnisse über Schwarze Löcher und Neutronensterne, die die Fachwelt begeistern und eine ganze Reihe neuer Studien anstoßen werden.

MEHR RAUSFINDEN:

Unsere Webseiten:

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Die vollen wissenschaftlichen Artikel sind hier frei verfügbar

- Einführung: [hier](#) oder auf [arxiv](#).
- Methoden: [hier](#) oder auf [arxiv](#).
- Ergebnisse: [hier](#) oder auf [arxiv](#).

Die Daten von GWTC-4.0 sind durch das „Gravitational-Wave Open Science Centre“ [hier](#) verfügbar.

GLOSSAR

Schwarzes Loch: Eine Region der Raumzeit mit so extremer Gravitation, dass nichts – nicht einmal Licht – ihr entkommen kann. Schwarze Löcher gibt es in verschiedenen Größen: Stellare Schwarze Löcher entstehen durch den Kollaps massiver Sterne und haben Massen von einigen bis etwa 65 Sonnenmassen, mittelschwere Schwarze Löcher liegen im Bereich von etwa 100 bis 10⁵ Sonnenmassen, supermassive Schwarze Löcher beginnen bei über 10⁵ Sonnenmassen und können mehr als 10⁹ Sonnenmassen erreichen.

Chirp-Masse: Eine mathematische Kombination der Massen der beiden kompakten Objekte in einem binären System. Die Chirp-Masse bestimmt die führende Ordnung der Bahnentwicklung des Systems durch den Energieverlust durch Gravitationswellen.

Konfidenzniveau: Die Wahrscheinlichkeit, mit der der wahre Wert innerhalb des angegebenen Bereichs liegt.

Taktgrad: Der Anteil einer Beobachtungsperiode, in dem ein Signal oder System aktiv ist.

Effizienz: Der Anteil der detektierten simulierten Signale, angenommen bei zufälliger Ankunftsrichtung und -zeit. Wird als Funktion des Wellensignaltyps und der Signalstärke ausgedrückt.

Gravitationswellen: Krümmungen der Raumzeit, die durch einige der gewalttätigsten Prozesse im Universum erzeugt werden, wie die Verschmelzung von Neutronensternen oder Schwarzen Löchern.

Neutronenstern: ein Überrest eines massereichen Sterns. Wenn der Stern seinen nuklearen Brennstoff aufgebraucht hat, endet sein Leben in einer Supernova, die einen Neutronenstern hinterlassen kann: ein so extrem dichtes Objekt, dass Atome ihre normale Struktur verlieren. Neutronensterne haben etwa die Masse unserer Sonne, aber einen Radius von nur etwa zehn Kilometern.

Rauschen: Schwankungen im Gravitationswellensignal, verursacht durch instrumentelle und Umwelteinflüsse. Die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors wird durch Rauschen begrenzt.

Offline-Suche: Analysen, die nachträglich auf Daten aus früheren Beobachtungsperioden angewendet werden – meist während Pausen, in denen die Detektoren für Wartung oder Upgrades abgeschaltet sind. Sie ergänzen die Echtzeitanalysen (Online-Analysen), die während der Beobachtungsphasen durchgeführt werden.

Parameterschätzung: Eine statistische Methode, um die astrophysikalischen Parameter eines Gravitationswellensignals zu erschließen.

Such-Algorithmus: Computergestützte Programme, die Daten für die Analyse aufbereiten, filtern und verschiedene Größen berechnen, um Störsignale auszuschließen und die Signifikanz potenzieller astrophysikalischer Ereignisse zu bewerten.

Spin (Drehimpuls): Der Drehimpuls eines rotierenden Schwarzen Lochs; eine der definierenden Eigenschaften von Schwarzen Löchern, neben Masse und Ladung.

Dehnung: Die relative Änderung des Abstands zwischen zwei Referenzpunkten durch die Verformung der Raumzeit durch eine Gravitationswelle. Selbst die stärksten auf der Erde messbaren Gravitationswellen verursachen eine Dehnung von weniger als 10⁻²¹.

Wellenform: Der zeitliche Verlauf der Amplitude eines Gravitationswellensignals.