

# GW231123: Das schwerste Paar Schwarzer Löcher, das bislang mit Gravitationswellen entdeckt wurde

Am 23. November 2023 um 13:54:30 UTC beobachtete die LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)-Kollaboration mit GW231123 ein Gravitationswellen-Signal, das wahrscheinlich von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher stammt. Unter den von der LVK-Kollaboration identifizierten Systemen hat es die bislang höchste Gesamtmasse. Die Schwarzen Löcher müssen unglaublich schnell rotiert haben. Ihre individuellen Massen scheinen in einen Bereich zu fallen, der bestehende Theorien der Entwicklung und des Endes massereicher Sterne in Frage stellt.

## Nachweis des Signals

Die beiden Advanced LIGO-Detektoren in Hanford und Livingston haben diese Gravitationswelle während des ersten Teils des vierten LVK-Beobachtungslaufs (O4a) beobachtet. Die kohärente Beobachtung des Signals in beiden Observatorien war entscheidend, um einen sicheren Nachweis zu machen. Wie sich in **Abbildung 1** erkennen lässt, dauerte das Signal etwa eine Zehntelsekunde. Es sticht klar aus dem typischen Detektorrauschen heraus und ist etwa **20-mal lauter** als dieses. Wir haben sorgfältige statistische Tests durchgeführt, um sicherzustellen, dass es sich nicht um einen zufälligen Ausreißer in den Daten handelte. Wir haben Methoden eingesetzt, die Messdaten mit einer Dauer von Tausenden von Jahren simulieren. Damit konnten wir zeigen, dass ein Signal wie GW231123 von zufälligen Schwankungen des Rauschens weniger als einmal in 10.000 Jahren imitiert wird! Dies macht uns sehr sicher, dass das Gravitationswellen-Signal nicht irdischen Ursprungs und damit echt ist.

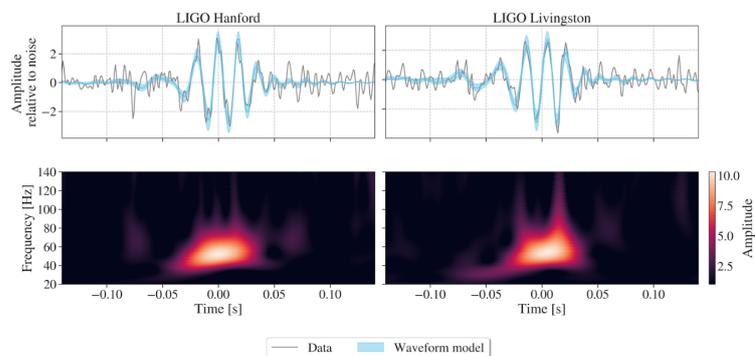


Abbildung 1: Das Signal GW231123 in den Daten der LIGO-Detektoren in Hanford (links) und in Livingston (rechts). Die oberen Diagramme zeigen die Amplitude der Messdaten (graue Linien) als Funktion der Zeit. Das blau schattierte Band zeigt unsere Schätzung des wahren Signals. Die unteren Diagramme sind Spektrogramme. Sie zeigen die Amplitude als Funktion der Zeit (horizontale Achse) und der Frequenz (vertikale Achse). Hellere Farben stehen für ein stärkeres Signal.

## Die Quelle hinter dem Signal

Die Daten deuten stark darauf hin, dass das Signal von der heftigen Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher stammt. Um zu erfahren wie schwer die Schwarzen Löcher waren und wie schnell sie rotierten, haben wir verschiedene Modelle, die auf Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie basieren, verwendet. Mit ihnen haben wir simuliert, wie ein solches Signal für unterschiedliche Paare Schwarzer Löcher aussehen würde.

Wir verglichen diese Modelle mit den Messdaten und fanden heraus, dass die Schwarzen Löcher etwa 137- bzw. 103-mal die Masse unserer Sonne hatten. Berücksichtigen wir alle Unsicherheiten, so lag ihre Gesamtmasse wahrscheinlich zwischen 190 und 265 Sonnenmassen. Damit wird GW190521 als das bisher massereichste beobachtete Paar Schwarzer Löcher vom Thron gestoßen.

Als ob das nicht schon beeindruckend genug wäre, rotierten beide Schwarze Löcher wahrscheinlich fast so schnell um ihre Achsen, wie es überhaupt theoretisch möglich ist. **Dadurch ist GW231123 nicht**

**nur das bislang massereichste, sondern auch das am schnellsten rotierende Binärsystem Schwarzer Löcher, das mit Gravitationswellen nachgewiesen wurde.**

Bei der Verschmelzung entstand ein Schwarzes Loch mit einer Masse, die wahrscheinlich zwischen 182 und 251 Sonnenmassen liegt. Damit gehört es zu den seltenen Exemplaren der sogenannten „mittelschweren Schwarzen Löchern“. Sie sind schwerer als solche, die beim Kollaps von Sternen entstehen, aber viel leichter als die extrem massereichen Schwarzen Löcher, die in den Zentren von Galaxien lauern. Die Überreste der Verschmelzung von GW231123 und GW190521 sind die deutlichsten auf Gravitationswellen basierenden Nachweise dieser seltenen, mittelschweren Schwarzen Löcher.

## Warum sind diese Eigenschaften so interessant?

Nach aktuellen Theorien zur Entwicklung von Sternen sollten Schwarze Löcher mit Massen zwischen etwa 60 und 130 Sonnenmassen selten oder gar nicht existieren. Forschende nehmen an, dass spezielle Arten von Sternexplosionen diesen „verbotenen“ Massenbereich verursachen, den sie als „Massenlücke Schwarzer Löcher“ bezeichnen. Diese Explosionen zerstören schwere Sterne (Paarinstabilitätssupernovae) vollständig oder sie stoßen einen erheblichen Teil der Sternmasse vor dem Kollaps ab (pulsierende Paarinstabilitätssupernovae). Das verhindert die Entstehung eines schweren Schwarzen Lochs.

GW231123 stellt diese Annahmen in Frage. Die Masse des leichteren Schwarzen Lochs fällt fast sicher innerhalb die Massenlücke (mit einer Wahrscheinlichkeit von 83 %), während die Wahrscheinlichkeit dafür beim schwereren Schwarzen Loch bei 26 % liegt. Das deutet darauf hin, dass die klassische Sternentwicklung die Entstehung der Schwarzen Löcher vielleicht nicht vollständig erklären kann.

Ein spannender Erklärungsansatz ist, dass eines oder beide Schwarze Löcher bei einer früheren Verschmelzung von leichteren Schwarzen Löchern entstanden sind. Dies würde die hohen Massen und Spins erklären. Es würde außerdem darauf hindeuten, dass sich die Schwarzen Löcher in einer extrem dichten astrophysikalischen Umgebung befunden haben. Das könnte ein Sternhaufen nahe dem Zentrum einer Galaxie oder ein aktiver Galaxienkern gewesen sein, wo Schwarze Löcher mit größerer Wahrscheinlichkeit zusammenstoßen. Diese dichten Umgebungen können auch dazu führen, dass sich Schwarze Löcher auf langgestreckten oder exzentrischen Bahnen umrunden.

In unseren Modellen nehmen wir derzeit jedoch an, dass sich die Schwarzen Löcher auf nahezu kreisförmigen Bahnen bewegen, die allmählich durch die Abstrahlung von Gravitationswellen schrumpfen. Diese Annahme dient dazu, die Komplexität der Modelle zu begrenzen. Sind die Bahnen jedoch stark exzentrisch – insbesondere kurz vor der Verschmelzung – könnte dies die Form der abgestrahlten Gravitationswellen auf eine Art und Weise beeinflussen, die unsere Modelle nicht erfassen können. Für GW231123 bleibt diese Möglichkeit bestehen. Es erfordert fortgeschrittenere Modelle, um sie zu prüfen.

Es gibt alternative Szenarien, die ein solches Signal hervorgerufen haben könnten. Sie sind astrophysikalisch allerdings weniger wahrscheinlich als die oben genannten. Zu diesen Szenarien zählen Gravitationslinsen, primordiale schwarze Löcher, Kernkollaps-Supernovae, verschmelzende Bosonen-Sterne und kosmische Strings.

## Die letzten Momente der Verschmelzung

Bei den meisten Verschmelzungen von Schwarzen Löchern, die die LVK-Kollaboration beobachtet – zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments sind es fast 300 –, sind die Detektoren am empfindlichsten für die erste Phase des Signals. Dabei umrunden die Schwarzen Löcher einander spiralförmig, bevor sie schließlich verschmelzen. Aufgrund der großen Masse bot uns GW231123 hingegen den bislang klarsten Blick auf das große Finale: die Verschmelzung und die Abklingphase (englisch: ringdown). Dabei strahlt das neu entstandene Schwarze Loch Energie in Form von Gravitationswellen ab, vibriert und nimmt schließlich einen stabilen Zustand ein. Das ist vergleichbar einer geläuteten Glocke, die ausklingt.

Wir haben diesen letzten Teil des Signals mit den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie für das Abklingen eines Schwarzen Lochs verglichen und eine große Übereinstimmung zwischen der Theorie und unseren Messdaten festgestellt. Die extremen Eigenschaften von GW231123 bringen unsere Modelle jedoch an ihre Grenzen. Sie lassen einige subtile Details unerklärt und weisen auf Bereiche hin, in denen sich unsere Wellenformen verbessern lassen.

## Zusammenfassung

Vor ein paar Jahren haben wir in unserer Science Summary zum Signal GW190521 geschrieben, dass Rekorde dazu da sind, gebrochen zu werden – und GW231123 hat genau das getan. Dieses Ereignis ist außergewöhnlich und seine Interpretation schwierig, denn es hat Eigenschaften, die darauf hinweisen, dass die Massen der Schwarzen Löcher in der Massenlücke liegen und ihre Spins nahe der theoretischen Obergrenze. Deswegen müssen wir alternative Wege für die Entstehung von Schwarzen Löchern erforschen, die über das traditionelle Verständnis der Sternentwicklung hinausgehen. Das Ereignis zeigt die Grenzen unserer derzeitigen Wellenformmodelle auf. GW231123 ist eine eindringliche Erinnerung daran, dass der Kosmos noch viele Überraschungen für uns bereithält und dass wir gerade erst damit beginnen, sie zu entdecken.

## Weiterführende Informationen

### **Besuchen Sie unsere Internetseiten:**

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

Lesen Sie eine frei verfügbare Vorabversion des vollständigen wissenschaftlichen Fachartikels unter <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500026/public>.

Die Daten des Gravitationswellen-Open-Science-Centers für GW231123 sind verfügbar unter [https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/O4\\_Discovery\\_Papers/](https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/O4_Discovery_Papers/).

### **Die englische Originalfassung dieser Science Summary finden Sie auf**

<https://ligo.org/science-summaries/GW231123/>.