



LIGO
Scientific
Collaboration



Wie wir nach verschmelzenden Schwarzen Löchern suchten, und GW150914 fanden

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914CBC/index.php>

Am 14. September 2015 gelang die erste direkte Beobachtung von Gravitationswellen mit den LIGO-Observatorien in Hanford und Livingston (USA). Dieses Ereignis mit dem Namen GW150914 wurde durch zwei verschmelzende Schwarze Löcher abgestrahlt, die jeweils etwa die 30-fache Masse der Sonne hatten, und etwa eine Milliarde Lichtjahre entfernt waren. Wir haben einen Fachartikel veröffentlicht, der Angaben darüber enthält, wie GW150914 in den LIGO-Daten gefunden und bestätigt wurde.

Die LIGO-Observatorien bestehen aus zwei senkrechten, 4km langen Armen, in denen ein Laserstrahl verläuft, mit dem winzige Längenänderungen gemessen werden. Wenn eine Gravitationswelle einen Detektor passiert, streckt und quetscht sie den Raum nur um ein sehr geringes Maß – mit dieser Messung hat LIGO GW150914 entdeckt. Aber wie genau gelangen wir von dieser sehr genauen Entfernungsmessung zur Bestätigung einer astronomischen Entdeckung?

Angepasste Filterung (Matched Filtering)

Das Signal wurde anfangs durch eine sogenannte „Burst“-Suche entdeckt, die nach allen Arten von Signalen sucht, die das allgemeine Muster einer Gravitationswelle aufweisen. Wir wissen, dass ein Gravitationswellensignal von zwei kompakten Objekten (Schwarze Löcher oder Neutronensterne) ausgesendet wird: wenn sich die Objekte zur Verschmelzung annähern, steigt die Frequenz und Stärke der ausgesendeten Wellen; dies wird als „Chirp“-Signal bezeichnet. Anstatt nach allgemeinen Chirp-ähnlichen Signalen zu suchen, können wir unsere Daten zur genaueren Analyse auch mit sorgfältig berechneten Mustern (engl. „templates“) vergleichen. Die Form eines Chirp-Signals hängt von den Eigenschaften des System ab - die wichtigsten sind die Massen der Objekte und wie schnell sie sich drehen.

Eine Technik, die als „angepasste Filterung“ (oder „optimaler Filter“, engl. „matched filtering“) bekannt ist, wird verwendet, um zu überprüfen, ob Signale in unseren Daten enthalten sind, die einem der vorberechneten Muster ähnlich sind. Da diese Muster die Gravitationswellenformen für unterschiedliche Systeme verschmelzender Objekte beschreiben, wie wir sie zu finden erwarten, sollte jedes ausreichend laute Signal mit dieser Methode gefunden werden. Ein echtes Signal sollte auch übereinstimmend in beiden Detektoren innerhalb der Zeit gefunden werden, die es benötigt, um die Strecke zwischen ihnen zurückzulegen. Da wir wissen, dass sich Gravitationswellen mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, können wir diese Zeit berechnen: etwa 15 Millisekunden oder weniger (abhängig von der Himmelsrichtung, von der das Gravitationswellensignal ausgeht).

Wir haben zwei separate Programme zur angepassten Filterung (auch als „pipelines“ bezeichnet) namens PyCBC und GstLAL verwendet, um die von LIGO gesammelten Daten vom 12. September bis 20. Oktober 2015 zu analysieren. Während dieser 38,6 Tage gab es etwa 17,5 Tage, an denen beide LIGO-Detektoren gleichzeitig in Betrieb waren und qualitativ hochwertige Daten lieferten, die wir analysieren konnten.

PyCBC

PyCBC ist eine Software, die angepasste Filterung unter Verwendung von Gravitationswellenformen als Funktion der Frequenz durchführt und so ein [Signal-zu-Rausch-Verhältnis](#) (engl. „signal-to-noise ratio“, SNR) für jeden Detektor und jede Wellenform berechnet. Die SNR ist ein Maß dafür, wie laut ein Ereignis im Vergleich zum Hintergrundrauschen des Detektors ist. Der Anteil der Daten, der eine ausreichend hohe SNR aufweist, durchläuft dann einen sogenannten „[Chi-Quadrat-Test](#)“, der die Beiträge verschiedener Frequenzbereiche vergleicht. Dies ist notwendig, da instrumentale Störimpulse („Glitches“) oft hohe SNR-Werte ergeben können, jedoch nur über einen engen Frequenzbereich. Wir prüfen also mit diesem Test, ob die SNR aus dem richtigen Frequenzbereich für ein echtes Signal kommt, und nicht von einem Störimpuls.

GstLAL

Im Gegensatz zu PyCBC basiert die angepasste Filterung in der GstLAL-Software auf der Zeitabhängigkeit der Wellenform-Vorlagen, wobei Streaming-Techniken verwendet werden, die es ermöglichen, die Suche beinahe in Echtzeit durchzuführen. Ähnlich wie PyCBC findet GstLAL alle Sektionen von Daten mit hoher SNR, und anschließend wird eine Größe Chi-Quadrat berechnet, die dem gleichen Zweck dient wie der Chi-Quadrat-Test in der PyCBC-Analyse.

Suchergebnisse

GW150914 wurde als das signifikanteste Ereignis in beiden Analysen identifiziert. Es stellte sich heraus, dass in beiden Analysen die gleiche Wellenform mit Massen von 47,9 Sonnenmassen und 36,6 Sonnenmassen und einem effektiven Spin von 0,2 am besten mit den Daten übereinstimmte. Um ein besseres Bild davon zu bekommen, welche Art von Quelle wir damit entdeckt haben, mussten wir noch eine weitergehende Parameterschätzung des Signals durchführen. Tabelle 1 unserer Veröffentlichung zeigt die Massenschätzungen, die durch diese anschließende Analyse erhalten wurden. Weitere Informationen zur Parameterschätzung finden sich in der Zusammenfassung „[Die erste Messung der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher und ihre Bedeutung](#)“.

Neben GW150914 wurde ein zweiter Kandidat für eine Gravitationswelle aufgezeichnet: LVT151012. Dieses Ereignis hatte eine SNR von 9,6 in der PyCBC Analyse, und Untersuchungen des Detektor-Status haben keinen instrumentellen oder umweltbezogenen Ursachen gefunden, die verantwortlich für diese Ereignis sein könnten. Wir können jedoch eine Fehlalarmwahrscheinlichkeit (engl. „false alarm probability“, FAP) für diesen Kandidaten berechnen, was die Wahrscheinlichkeit abschätzt, mit der eine zufällige Fluktuation des Rauschens im Detektor (d.h. ein „falscher Alarm“) ein echtes Gravitationswellensignal mit dieser SNR nachahmen könnte. Aus den PyCBC- und GstLAL-Analysen haben wir die Fehlalarmwahrscheinlichkeit (FAP) auf etwa 2% bzw. 5%

geschätzt. In beiden Fällen war diese FAP nicht ausreichend niedrig, um das Ereignis mit Sicherheit als ein echtes Gravitationswellensignal zu bestätigen. Falls LVT151012 jedoch astrophysikalischen Ursprungs sein sollte, können seine Eigenschaften ebenfalls durch Parameterschätzung bestimmt werden; diese werden auch in Tabelle 1 unserer Veröffentlichung gezeigt.

Wir haben also mit sehr hoher Sicherheit gezeigt, dass GW150914 ein echtes Gravitationswellensignal ist, das unabhängig mit zwei verschiedenen Methoden der angepassten Filterung gefunden wurde. Dies ist eine entscheidende Bestätigung der ursprünglichen Entdeckung, die durch die modellunabhängige „Burst“-Suche gemacht wurde, und bestätigt, dass LIGO in der Tat zwei verschmelzende Schwarze Löcher gehört hat, die mehr als eine Milliarde Lichtjahre entfernt waren.

Weiterführende Informationen:

- Vollständiger Fachartikel: [First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO](#)
- Hauptartikel zur Entdeckung: [Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger](#) (allgemeinverständliche Zusammenfassung: [auf Deutsch](#))
- [Zusammenfassung zur Parameterabschätzung und astrophysikalischer Interpretation.](#)
- LIGO Open Science Center (freier Zugang zu Rohdaten von [Rohdaten von GW150914](#)): <https://losc.ligo.org>

Abbildungen aus dem Fachartikel

Abbildung 1: Die Gravitationswelle GW150914 als Funktion der Zeit. Ganz oben wird der Verlauf der Kollision gezeigt. In der Mitte wird die aus der Messung rekonstruierte Längen-änderung (engl. „strain“) mit den Vorhersagen der am besten passenden Wellenform, wie sie aus der allgemeinen Relativitätstheorie berechnet wurde, verglichen. (Beides für LIGO Hanford). Ganz unten wird gezeigt, was mit den Abständen und den Geschwindigkeiten der Schwarzen Löcher geschieht.

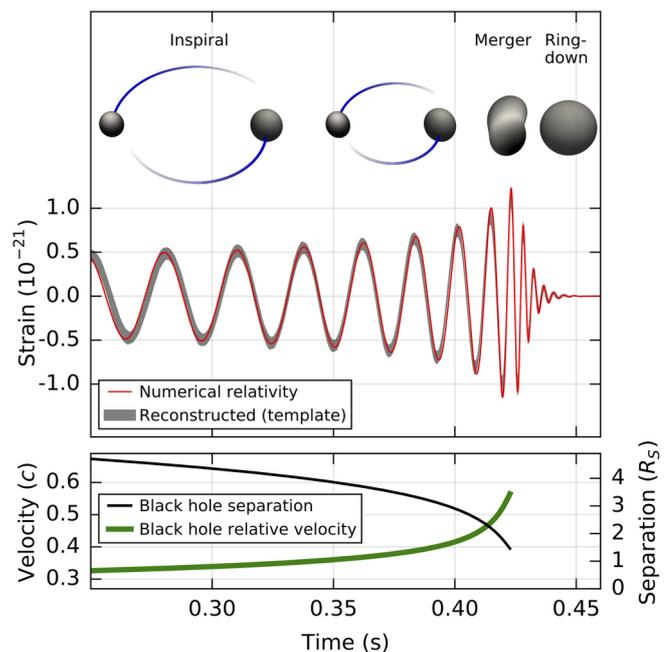


Abbildung 2: Der Katalog an Wellenform-Vorlagen (engl. „template bank“), der für die angepasste Filterung verwendet wurde. Der Kreis zeigt das Vorlagenmuster, das am besten mit GW150914 übereinstimmt.

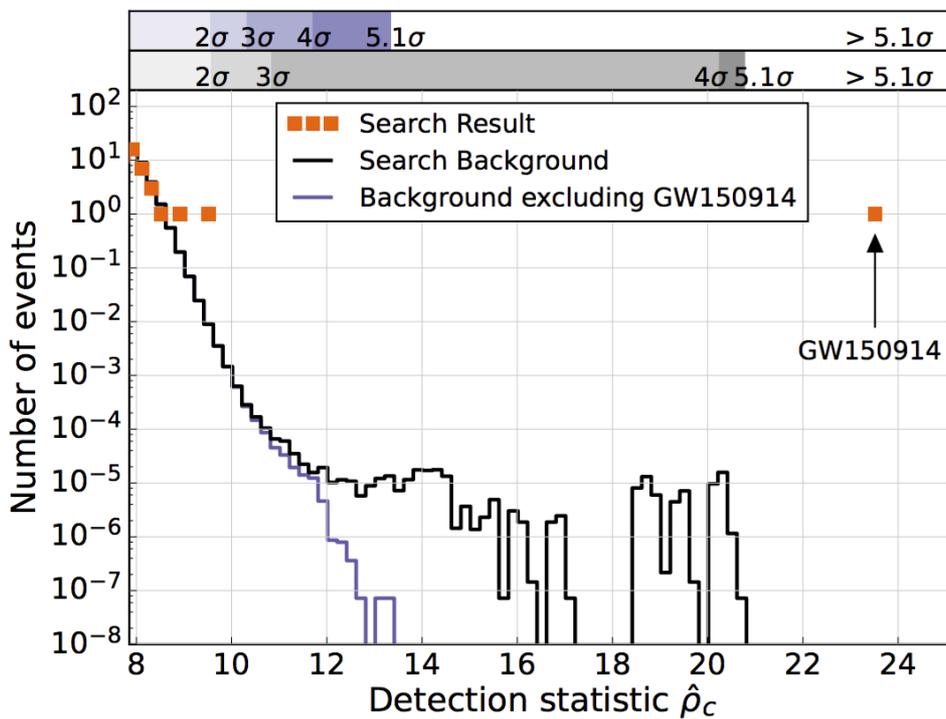
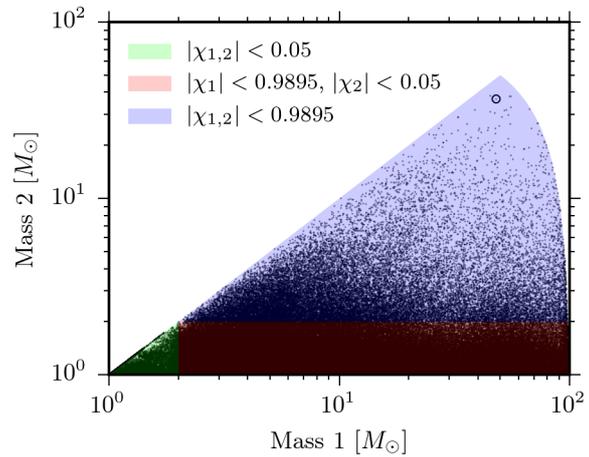


Abbildung 3: Suchergebnisse der PyCBC-Analyse. Die horizontale Achse ist ein Maß dafür, wie „laut“ ein Ereignis ist. Die Linien zeigen an, wie viele Ereignisse wir für eine gegebene Lautstärke erwarten würden, wenn nur Hintergrundrauschen im Detektor vorhanden ist. Die orangen Quadrate zeigen, dass wir viele relativ leise Ereignisse sahen, die mit der Hintergrundvorhersage übereinstimmen; doch GW150914 ist äußerst unwahrscheinlich durch Rauschen zu erklären - weniger als ein derartiges Vorkommnis in ungefähr 200.000 Jahren vergleichbarer Datennahme - ein Wert, der einer [statistischen Signifikanz](#) von mehr als „5 Sigma“ entspricht.

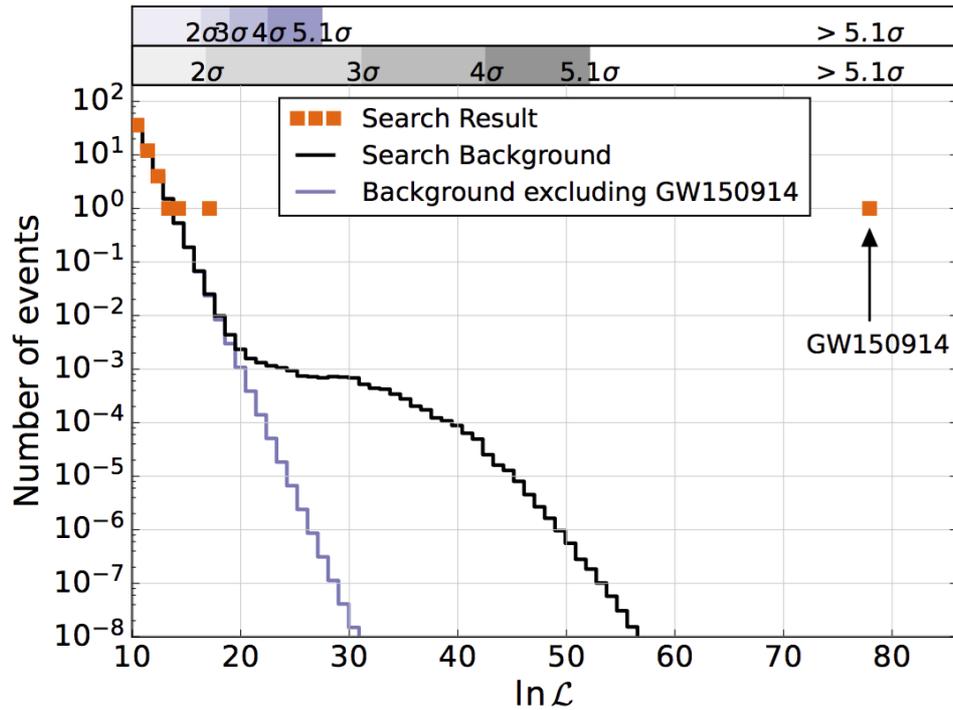


Abbildung 4: Suchergebnisse der GstLAL-Analyse. Diese Abbildung ist dem PyCBC-Suchergebnis sehr ähnlich, außer dass GstLAL eine andere Größe (auf der horizontalen Achse) verwendet, um herauszufinden, wie laut ein Ereignis ist. Wieder sehen wir, dass GW150914 mit ziemlicher Sicherheit einen echten astrophysikalischen Ursprung hat.