

## BEOBACHTUNG DER GRAVITATIONSWELLEN VON DER VERSCHMELZUNG ZWEIER SCHWARZER LÖCHER

Albert Einsteins vor einem Jahrhundert veröffentlichte Allgemeine Relativitätstheorie wurde vom Physiker Max Born einst als „die wohl größte Leistung des menschlichen Denkens über die Natur“ beschrieben. Wir vermelden nun zwei bedeutende wissenschaftliche Durchbrüche bezüglich zweier Schlüsselvorhersagen aus Einsteins Theorie: den ersten direkten Nachweis von **Gravitationswellen** und die erste Beobachtung der Kollision und Verschmelzung eines Paares zweier **Schwarzer Löcher**.

Dieses katastrophale Ereignis erzeugte das Gravitationswellensignal **GW150914** und geschah in einer mehr als eine Milliarde Lichtjahre von der Erde entfernten Galaxie. Beobachtet wurde es am 14. September 2015 von den zwei Detektoren des **Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO)**, wohl den empfindlichsten je konstruierten wissenschaftlichen Instrumenten. LIGO ermittelte, dass die maximale Leistung in Gravitationswellen, die während der letzten Augenblicke der verschmelzenden Schwarzen Löcher ausgestrahlt wurde, mehr als zehnfach höher war als die gesamte Leuchtkraft aller Sterne und Galaxien im beobachtbaren Universum. Diese bemerkenswerte Entdeckung läutet eine neue Ära der Astronomie ein, indem wir ein völlig neues (Gravitationswellen-)Fenster ins Universum öffnen.

### EINLEITUNG UND HINTERGRUND

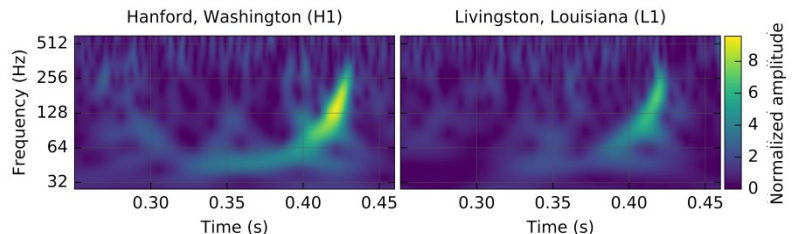
**Gravitationswellen** sind „Kräuselungen“ der Raumzeit, die von einigen der gewaltigsten Ereignisse im Kosmos erzeugt werden, etwa der Kollision und Verschmelzung massiver, kompakter Sterne. Einstein sagte sie 1916 voraus, als er zeigte, dass die Beschleunigung massiver Objekte so an der Raumzeit rüttelt, dass Wellen verzerrten Raumes abgestrahlt werden. Diese Verzerrungen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit durchs Universum und tragen dabei Informationen über ihre katastrophalen Ursprünge mit sich, sowie wertvolle Hinweise auf die Natur der Gravitation selbst.

In den letzten Jahrzehnten haben Astronomen bereits starke Hinweise auf die tatsächliche Existenz der Gravitationswellen

gesammelt, vor allem anhand ihrer Auswirkung auf die Bewegungen eng gebundener Doppelsterne in unserer Milchstraße. Diese indirekten Untersuchungen stimmen äußerst genau mit Einsteins Theorie überein – die Umlaufbahnen schrumpfen, genau wie vorhergesagt, durch die Abstrahlung von Energie als Gravitationswellen. Jedoch wurde der **direkte** Nachweis von Gravitationswellen, wenn sie die Erde erreichen, von der Wissenschaft weiterhin gespannt erwartet. Denn dieser Durchbruch wird neue und genauere Überprüfungen der Allgemeinen Relativitätstheorie unter den extremsten Bedingungen ermöglichen, und einen neuartigen Weg zur Erkundung des Universums aufzeigen.

Im selben Jahr, in dem Einstein die Gravitationswellen vorhersagte, zeigte der Physiker Karl Schwarzschild, dass Einsteins Werk auch die Existenz **Schwarzer Löcher** erlaubt: bizarrer Objekte, die so dicht und kompakt sind, dass nicht einmal Licht ihrem Gravitationsfeld entkommen kann. Obwohl wir also kein Licht aus Schwarzen Löchern direkt „sehen“ können, haben Astronomen reichhaltige indirekte Hinweise auf ihre Existenz erlangt, indem sie die Einwirkung möglicher Schwarzer Löcher auf ihre nähere Umgebung untersuchten. Beispielsweise wird angenommen, dass die meisten Galaxien, auch unsere Milchstraße, in ihrem Zentrum ein **Supermassives Schwarzes Loch** enthalten – mit Massen millionen- oder milliardenfach größer als die der Sonne. Es gibt auch viele Kandidaten für Schwarze Löcher mit weit niedrigeren Massen (von wenigen bis einigen Dutzend Sonnenmassen), von denen man vermutet, dass sie die Überreste massiver Sterne sind, nachdem diese in einer katastrophalen Explosion vergingen: einer **Kern-Kollaps-Supernova**.

Neben diesen erheblichen Fortschritten in der indirekten *Beobachtung* Schwarzer Löcher gab es auch eine dramatische Verbesserung unseres *theoretischen* Verständnisses dieser bizarren Objekte. Im letzten Jahrzehnt beinhaltete dies einige bemerkenswerte Fortschritte in der Modellierung von Paaren zweier Schwarzer Löcher (Binärsysteme), über mehrere enge Umläufe hinweg, bis hin zur endgültigen Verschmelzung. Diese Computermodelle erlauben uns die Berechnung präziser **Gravitationswellenformen**. So bezeichnet man das Muster der Gravitationswellen, die die Schwarzen Löcher abstrahlen, während sie sich immer näher kommen und schließlich zu einem einzigen, größeren Schwarzen Loch verschmelzen – gemäß den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die direkte Beobachtung verschmelzender Schwarzer Löcher bietet somit ein wertvolles kosmisches Labor, um Einsteins Theorie zu überprüfen.



**Abbildung 1.** (basiert auf Fig.1 aus dem Fachartikel). Das Gravitationswellen-Ereignis GW150914, beobachtet von den Detektoren LIGO Hanford (H1, links) und LIGO Livingston (L1, rechts). Die zwei Diagramme zeigen die vom Ereignis verursachte Gravitationswellen-Dehnung („Strain“, s.u.) in jeweiligen LIGO-Detektor in Abhängigkeit von Zeit (in Sekunden) und Frequenz (in Hertz, die Anzahl der Wellenzyklen pro Sekunde). Beide Diagramme zeigen, wie die Frequenz von GW150914 scharf ansteigt: von etwa 35 Hz bis 150 Hz in zwei Zehntelsekunden. GW150914 erreichte zuerst L1 und dann, etwa sieben Tausendstelsekunden später, H1 – übereinstimmend mit der Zeit, die Licht oder eben Gravitationswellen von Detektor zu Detektor benötigen.

Besuchen Sie uns auf  
<http://www.ligo.org/>



#GravitationalWaves

#BinaryBlackHole

#EinsteinWasRight

## DIE LIGO-DETEKTOREN

LIGO ist das größte Gravitationswellen-Observatorium und eines der ausgeklügeltsten physikalischen Experimente weltweit. Bestehend aus zwei **Laserinterferometern**, die in den USA tausende Kilometer voneinander entfernt in Livingston (Louisiana) und Hanford (Washington) liegen, nutzt LIGO die physikalischen Eigenschaften des Lichtes und des Raumes selbst, um Gravitationswellen nachzuweisen – ein Konzept, das zuerst in den frühen 1960ern und 1970ern vorgeschlagen wurde. Ein erstes Netzwerk von Interferometern stand in den frühen 2000ern bereit: TAMA300 in Japan, GEO600 in Deutschland, LIGO in den USA und Virgo in Italien. Gemeinsame Beobachtungen zwischen 2002 und 2011 konnten noch keine Gravitationswellen entdecken. Nach grundlegenden Verbesserungen nahmen die LIGO-Detektoren 2015 als **Advanced LIGO** den Betrieb auf: die ersten in einem weit empfindlicheren weltweiten Netzwerk fortgeschrittener Detektoren.

Ein Interferometer wie LIGO besteht aus zwei „Armen“ (jeder 4 km lang) in rechtem Winkel zueinander. Ein Laserstrahl wird die Arme entlang geschickt, den (als **Testmassen** aufgehängte) Spiegel an jedem Ende reflektieren. Wenn eine Gravitationswelle einläuft, bringt das Dehnen und Quetschen des Raumes die Interferometerarme dazu, sich abwechselnd auszudehnen und zu schrumpfen: einer wird länger und der andere kürzer, und umgekehrt. Wenn sich die Länge der Interferometerarme ändert, braucht der Laserstrahl unterschiedlich lang für die Durchquerung jedes Arms. Dies bedeutet, dass die zwei Strahlen nicht mehr „im Takt“ (oder „in **Phase**“) sind und ein sogenanntes **Interferenzmuster** entsteht. Eben deshalb nennen wir die LIGO-Detektoren „Interferometer“.

Der Unterschied der beiden Armlängen ist proportional zur Stärke der einlaufenden Gravitationswelle, auch „**Strain**“ (Dehnung / Streckung / Belastung) genannt, und diese ist äußerst niedrig. Für eine typische detektierbare Gravitationswelle erwarten wir, dass der „Strain“ nur etwa einem **Zehntausendstel der Größe eines Protons** entspricht! Aber die LIGO-Interferometer sind so empfindlich, dass sie selbst solch winzige Änderungen messen können.

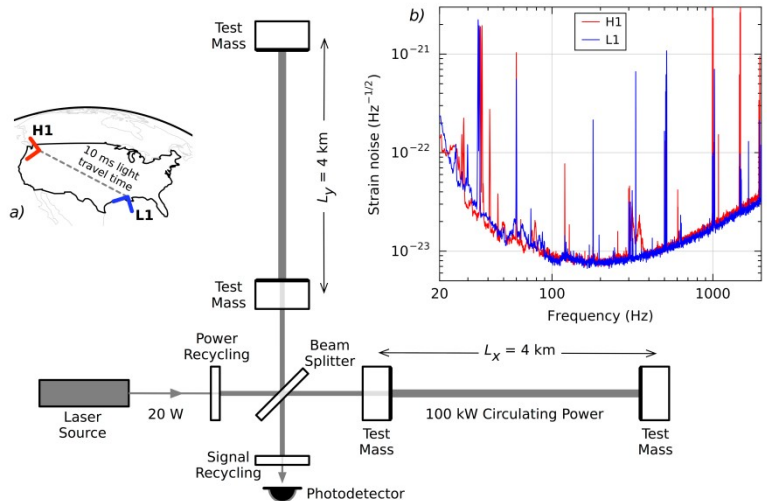
Um erfolgreich ein Gravitationswellen-Ereignis wie GW150914 nachzuweisen, müssen die LIGO-Detektoren ihre erstaunliche Grundempfindlichkeit damit ergänzen, **echte** Signale von Quellen **instrumenteller Störungen** trennen zu können: winzige Störungen z.B. durch Umgebungseinwirkungen oder das Verhalten der Geräte selbst könnten das typische „Strain“-Muster, nach dem wir suchen, nachahmen oder gar völlig überdecken. Dies ist ein Hauptgrund dafür, dass es zwei Advanced-LIGO-Detektoren gibt; denn dies ermöglicht es uns, Gravitationswellen von lokalen instrumentellen oder Umgebungseffekten zu unterscheiden. Nur ein echtes Gravitationswellen-Signal erscheint in **beiden** Detektoren – wenn auch um ein paar Tausendstel Sekunden verschoben, entsprechend der Zeit, die Licht (oder eine Gravitationswelle) braucht, um vom einen zum anderen Detektor zu gelangen.

Einblendung (b) in Abbildung 2 zeigt das instrumentelle Störgeräusch der LIGO-Detektoren in Abhängigkeit von der Frequenz. Wie man sieht, ist das Störgeräusch in einem Bereich von wenigen Hundert Hertz am niedrigsten, aber nimmt zu niedrigen wie hohen Frequenzen jeweils steil zu. Es gibt auch einige schmale Spitzen, bei denen das Störgeräusch besonders stark ist, z.B. durch Vibrationen der Fasern, an denen die Spiegel und Testmassen jedes Interferometers aufgehängt sind.

Diese weit höhere Empfindlichkeit für Advanced LIGO zu erreichen, erforderte eine Überholung beinahe jedes Teils des ursprünglichen LIGO-Bauplans. Diese Verbesserungen beinhalteten:

- signifikante Erhöhung der Laserleistung, um hochfrequente Störungen zu reduzieren
- Veränderung der Recycling-Hohlräume, um das Laserlicht räumlich besser zu verteilen
- größere, schwerere Testmassen aus verschmolzenem Silika zur Reduzierung zufälliger Spiegelbewegungen
- Aufhängung der Testmassen mit Silika-Fasern zur Reduzierung thermischer Störungen
- Aufhängung der Testmassen an einem vierfachen Pendel für bessere seismische Isolierung
- eine aktive „Messen-und-Ausgleichen“-Strategie, um Bodenbewegungen abzuschwächen

Der Betrieb eines Netzwerks aus zwei oder mehr Detektoren erlaubt es uns auch, per „Triangulation“ die Herkunftsrichtung einer Gravitationswelle am Himmel zu bestimmen, indem wir die Ankunftszeit an jedem Detektor vergleichen. Je mehr Detektoren ein Netzwerk bilden, desto besser kann der Herkunftsort eine Gravitationswelle am Himmel bestimmt werden. 2016 wird der Detektor „Advanced Virgo“ in Italien dem globalen Netzwerk beitreten – und weitere fortgeschrittene („advanced“) Detektoren sind für die Zukunft in Planung. Weitere Details finden sich z.B. unter <http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>.



**Abbildung 2.** Vereinfachtes Diagramm eines Advanced-LIGO-Detektors (nicht maßstabsgetreu), das einige der entscheidenden Verbesserungen gegenüber dem Grundaufbau zeigt: ein **optischer Hohlraum**, der das Laserlicht in jedem Arm mehrfach hin und her reflektiert und so den Effekt der Gravitationswelle auf die Phase des Laserlichts vervielfältigt; einen Leistungs-Wiederverwertungsspiegel (**power recycling**) der die Laserleistung im Interferometer insgesamt erhöht; einen Signal-Wiederverwertungsspiegel (**signal recycling**) der das Signal weiter optimiert, das am **Photodetektor** abgenommen wird. Diese Verbesserungen erhöhen die Laserleistung im optischen Hohlraum um das 5000-fache und verlängern die Gesamtzeit, die das Signal im Interferometer zirkuliert.

Einblendung (a), links, zeigt die Lage und Ausrichtung der zwei LIGO-Detektoren und die Lichtlaufzeit von 10 ms zwischen ihnen. Einblendung (b) zeigt das instrumentale Störgeräusch („**Strain noise**“) in jedem Detektor in Abhängigkeit von der Frequenz, zum Zeitpunkt des Signals GW150914. Je niedriger das Störgeräusch, desto höher die Empfindlichkeit des Detektors. Die herausragenden Spitzen sind schmale Frequenzbereiche, in denen das instrumentale Störgeräusch besonders stark ist.

Mehr über die bemerkenswerte Technologie von Advanced LIGO unter:

<http://tinyurl.com/ALIGO-upgrades-pdf>

## UNSERE LIGO-BEOBACHTUNGEN UND IHRE BEDEUTUNG

Am 14. September 2015 um 10:50:45 Mitteleuropäischer Zeit beobachteten die LIGO-Detektoren in Hanford und Livingston beide das Signal GW150914. Es wurde zuerst durch sogenannte *low-latency*-Suchmethoden identifiziert, die entwickelt wurden, um die Detektordaten möglichst schnell zu analysieren, indem sie nach gravitationswellenartigen Mustern suchen, ohne jedoch die genauen Details der Wellenform zu modellieren. Diese zeitnahen Suchen meldeten den Ereigniskandidaten nur **drei Minuten**, nachdem das Signal an den Detektoren eintraf. Die von den LIGO-Interferometern aufgenommenen Gravitationswellen-„Strain“-Daten wurden dann mit einer umfassenden Datenbank theoretisch vorhergesagter Wellenformen verglichen – eine als **angepasster Filter** bekannte Methode – um so die theoretische Wellenform zu finden, die am besten zu den Messdaten passt.

Abbildung 3 zeigt einige Schlüsselergebnisse dieser ausführlichen Analyse, die allesamt eindeutig darauf hindeuten, dass GW150914 von zwei verschmelzenden Schwarzen Löchern ausgestrahlt wurde. Der mittlere Teil der Abbildung zeigt unsere Rekonstruktion des Gravitationswellen-„Strain“, gemessen vom Hanford-Detektor. Bemerkenswert ist die beeindruckende Übereinstimmung zwischen diesem gemessenen Muster (in Grau) und einer zu diesen Daten passenden Wellenform (in Rot), wie sie aus der Allgemeinen Relativitätstheorie berechnet wurde.

Die Horizonte der Schwarzen Löcher während bestimmter Phasen dieser Berechnung sind oben in der Abbildung dargestellt: die **Inspiral**-Phase, in der die beiden Schwarzen Löcher sich spiralförmig einander annähern; die Verschmelzung (**Merger**) wenn die Schwarzen Löcher sich vereinen; und das anschließende Abklingen (**Ringdown**), bei dem das neugebildete einzelne Schwarze Loch kurz oszilliert und dann zur Ruhe kommt.

Ein Vergleich der „Strain“-Daten mit theoretischen Vorhersagen ermöglicht es uns, zu überprüfen, ob die Allgemeine Relativitätstheorie das Ereignis vollständig beschreiben kann. Einsteins Theorie besteht diesen Test mit Bravour: alle Beobachtungen stimmen mit ihren Vorhersagen überein. Wir können mit diesen Daten auch spezifische Eigenschaften der Quelle von GW150914 ermitteln: u.a. die Massen der beiden Schwarzen Löcher vor der Verschmelzung, die Masse des verbleibenden Schwarzen Loches und unsere Entfernung zur Quelle.

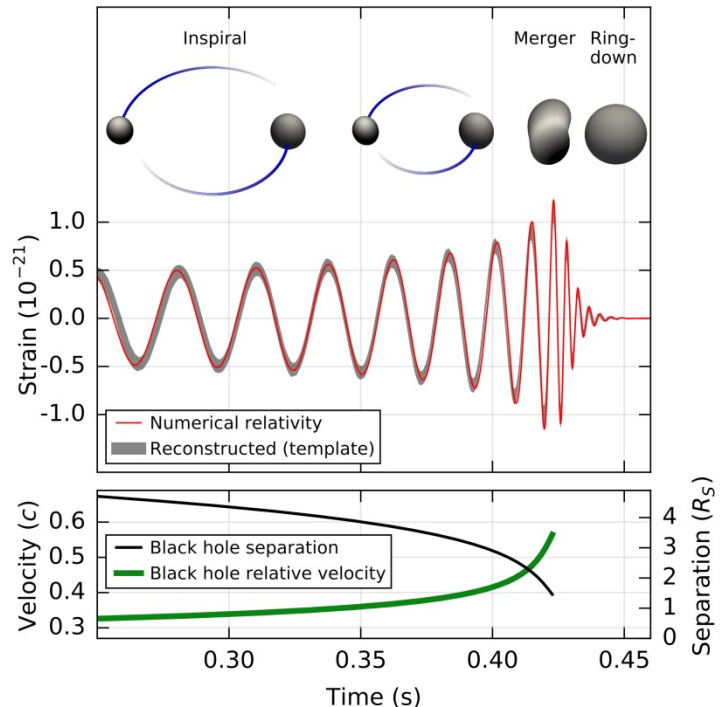
Unsere Ergebnisse zeigen, dass GW150914 von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher stammt, die **36-fach** bzw. **29-fach** so schwer wie unsere Sonne waren, und am Ende das verschmolzene Schwarze Loch eine Masse vom **62-fachen** der Sonne hat. Wir konnten außerdem ableiten, dass das verbleibende Schwarze Loch „Spin“ besitzt, also um die eigene Achse rotiert. Die Existenz Schwarzer Löcher mit Spin wurde in der Theorie erstmals 1963 vom Mathematiker Roy Kerr vorhergesagt. Schließlich zeigen unsere Ergebnisse, dass die Quelle von GW150914 in einer Entfernung von mehr als **einer Milliarde Lichtjahren** lag. Somit haben die LIGO-Detektoren ein wirklich bemerkenswertes Ereignis beobachtet – es geschah vor langer Zeit in einer weit, weit entfernten Galaxis!

Wenn wir die Massen der Schwarzen Löcher vor und nach der Verschmelzung vergleichen, zeigt sich, dass dieses Ereignis **das Dreifache der Sonnenmasse** (oder fast **sechs Milliarden Milliarden Kilogramm**) in Gravitationswellenenergie umgewandelt hat, wovon das meiste in nur einem Bruchteil einer Sekunde ausgestrahlt wurde. Zum Vergleich wandelt die Sonne pro Sekunde lediglich **zwei Milliardstel eines Billionstels** ihrer Masse in elektromagnetische Strahlung um. Tatsächlich war die Leistung von GW150914 in Gravitationswellen für einen kurzen Augenblick mehr als zehnmals höher als die gesamte Leuchtkraft **aller Sterne und Galaxien im beobachtbaren Universum**.

### WIESO WISSEN WIR, DASS GW150914 DIE VERSCHMELZUNG ZWEIER SCHWARZER LÖCHER WAR?

Die von uns ermittelten Massen der zwei Komponenten von GW150914 vor der Verschmelzung liefern ein starkes Argument dafür, dass beide Schwarze Löcher waren – besonders, wenn wir die enorme Geschwindigkeit und den winzigen Abstand zwischen den beiden Komponenten berücksichtigen, wie er im unteren Teil von Abbildung 3 gezeigt ist. Die Geschwindigkeiten erreichten nennenswerte Anteile der Lichtgeschwindigkeit, und die Entfernung entsprach nur einem geringen Vielfachen der charakteristischen Größe Schwarzer Löcher, auch **Schwarzschild-Radius** genannt.

Diese Diagramme implizieren, dass die beiden Objekte nur wenige hundert Kilometer trennten, kurz bevor es zur Verschmelzung kam, also als die Gravitationswellen-Frequenz etwa 150 Hz betrug. Schwarze Löcher sind die einzigen bekannten Objekte, die kompakt genug sind, um einander so nahe kommen zu können, ohne bereits zu verschmelzen. Von der aus den Messungen bestimmten Gesamtmasse des Binärsystems ausgehend wäre selbst ein Paar von **Neutronensternen nicht massiv genug**, und ein Paar aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch wäre bereits bei einer *niedrigeren* Frequenz als 150 Hz verschmolzen.



**Abbildung 3.** Einige Schlüsselergebnisse unsere Analyse von GW150914: Vergleich des rekonstruierten Gravitationswellen-„Strain“ (gemessen von H1 in Hanford) mit den Vorhersagen der am besten passenden Wellenform gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie. Dies zeigt die drei Stufen des Ereignisses: „Inspiral“ (Annäherung), „Merger“ (Verschmelzung) und „Ringdown“ (Abklingen). Außerdem sind der Abstand („Separation“) und die Geschwindigkeit („Velocity“) der Schwarzen Löcher dargestellt, mit ihrer Entwicklung während des Ereignisses.

## SIND WIR SICHER, DASS GW150914 EIN ECHTES ASTROPHYSIKALISCHES EreIGNIS WAR?

Die kurze Antwort lautet: „Ja!“ Aber natürlich ist dies eine entscheidende Frage und die LIGO Scientific Collaboration und Virgo Collaboration haben zusammen größte Anstrengungen unternommen, um sie zu beantworten. Eine Vielzahl unabhängiger und gründlicher Überprüfungen trugen dazu bei, unseren Nachweis von GW150914 zu stärken.

Erstens ist, wie erwähnt, die Zeitverzögerung zwischen den Beobachtungen in jedem der beiden LIGO-Detektoren verträglich mit der Lichtlaufzeit zwischen den beiden Orten. Außerdem zeigen, wie in Abbildung 1 zu sehen, die Signale in Hanford und Livingston ähnliche Muster, wie angesichts der fast gleichen Ausrichtung der beiden Detektoren zu erwarten. Beide waren stark genug, klar aus dem Hintergrund-Rauschen um das Ereignis herum herauszuragen – wie ein lautes Lachen aus den Hintergrundgesprächen in einem gedrängten Raum.

Dieses Hintergrundrauschen zu verstehen, ist ein essentieller Teil unserer Analyse und erfordert die Überwachung einer großen Menge an **Umgebungsdaten**, die an beiden Orten aufgezeichnet werden: u.a. Bodenbewegungen sowie Schwankungen in der Temperatur und im Stromnetz. Parallel dazu überwachen viele weitere Datenkanäle in Echtzeit den **Status der Interferometer** – sie überprüfen z.B., ob die Laserstrahlen korrekt zentriert sind. Falls irgendwelche dieser Umgebungs- oder Instrumentierungs-Kanäle ein Problem anzeigen, werden die Detektordaten verworfen. Trotz eingehender Untersuchungen konnten für die Zeit des Ereignisses keine solchen Datenprobleme festgestellt werden.

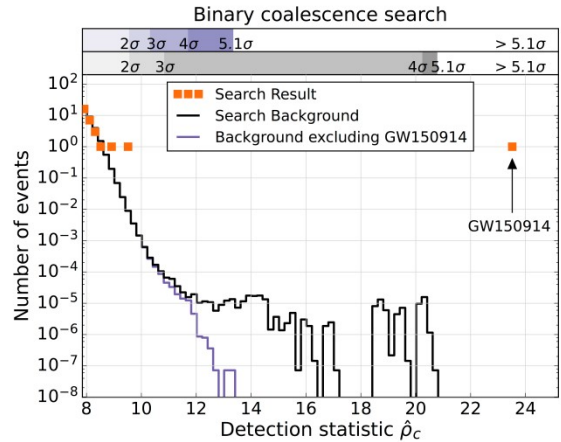
Aber vielleicht war GW150914 ja nur eine seltene Schwankung im Störrauschen, die zufällig mit ähnlichen Eigenschaften in beiden Detektoren auftrat? Um diese Möglichkeit auszuschließen, mussten wir ermitteln, wie selten und unwahrscheinlich eine solche Fluktuation sein müsste: je seltener sie zufällig auftreten kann, desto sicherer können wir dieses Szenario zugunsten der Alternative ausschließen – dass GW150914 tatsächlich eine echte astrophysikalische Gravitationswelle war.

Für diese statistische Analyse nutzten wir effektiv 16 Tage stabiler „Strain“-Daten guter Qualität aus dem Monat um das und nach dem Ereignis. GW150914 war tatsächlich in jedem Detektor das bei Weitem stärkste beobachtete Signal während dieser Zeit. Wir fügten künstliche Zeitverschiebungen zwischen den Daten von H1 und L1 ein, was einen effektiv weit verlängerten Datensatz ergab, in dem wir dann nach scheinbaren Signalen suchen konnten, die so stark wie oder noch stärker als GW150914 wären. Indem wir nur Zeitverschiebungen von mehr als 10 Millisekunden nutzten (entsprechend der Lichtlaufzeit zwischen den Detektoren), stellten wir sicher, dass diese künstlichen Datensätze keine echten Signale enthielten, sondern nur zufällig aufeinander treffende Störsignale. Aus diesem sehr langen künstlichen Datensatz konnten wir dann berechnen, wie selten eine GW150914 nachahmende Zufallskombination auftreten würde. Diese Analyse liefert eine **Fehlalarmrate**: wie oft würden wir erwarten, solch ein scheinbar lautes Ereignis zu messen, das aber in Wirklichkeit nur eine Fluktuation des Störrauschens ist. (Also ein „falscher Alarm“.)

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis dieser statistischen Auswertung für eine der Suchen, die wir mit unseren Detektordaten durchführten. Die durchgezogenen schwarzen und lila Linien stellen den „Hintergrund“ dar: die Anzahl zusammentreffender Stör-„Ereignisse“, die wir (mit leicht modifizierten Annahmen) für verschiedene Signalstärken abschätzen. Die orangefarbenen Quadrate zeigen die tatsächlichen Messergebnisse ohne die künstlichen Zeitverschiebungen. Die Hauptkenntnis aus dieser Abbildung ist, wie weit das beobachtete Ereignis GW150914 vom Hintergrund des Störrauschens entfernt liegt. Dies bedeutet, dass ein GW150914 vortäuschendes Störsignal *außerordentlich selten* sein müsste – ein so starkes Ereignis wie GW150914 erwarten wir durch zufällige Fluktuationen nur einmal in 200.000 Jahren derartiger Daten! Diese Fehlalarmrate lässt sich auch als Anzahl von „Sigmas“ (geschrieben als  $\sigma$ ) ausdrücken, was Standard ist, um die statistische Signifikanz eines Nachweises zu messen. Diese Suche konnte GW150914 als ein echtes astrophysikalisches Ereignis identifizieren, mit Signifikanz über 5 Sigma.

## FAZIT UND AUSBLICK

Der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen und die erste Beobachtung der Verschmelzung binärer Schwarzer Löcher sind äußerst bemerkenswerte Errungenschaften, aber sie sind auch nur die erste Seite in einem aufregenden neuen Kapitel der Astronomie. Im nächsten Jahrzehnt werden wir weitere Verbesserungen der Advanced-LIGO-Detektoren erleben, ebenso wie eine Erweiterung des globalen Detektor-Netzwerks um Advanced Virgo in Italien, KAGRA in Japan, und möglicherweise einen dritten LIGO-Detektor in Indien. Dieses aufgewertete globale Netzwerk wird unsere Fähigkeiten deutlich verbessern, die Quellen von Gravitationswellen am Himmel zu lokalisieren, sowie ihre physikalischen Eigenschaften genauer zu ermitteln. Das aufstrebende Feld der Gravitationswellenastronomie steht vor einer strahlenden Zukunft!



**Abbildung 4.** (basiert auf Fig.4 aus dem Fachartikel). Ergebnisse unserer Suche nach Binärsystem-Verschmelzungen, die quantifizieren, wie selten GW150914 im Vergleich zu falschen „Ereignissen“ war, die aus Fluktuationen des Störrauschens entstehen. Diese Suche ergab, dass ein GW150914 entsprechendes scheinbares Ereignis extrem selten wäre – seltener als ein einziges solches Ereignis in 200.000 Jahren ähnlicher Messdaten. Dieser Wert entspricht einer Detektions-Signifikanz von über „5 sigma“.

## WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

Homepage der LIGO Scientific Collaboration: <http://www.ligo.org>

Homepage von Advanced Virgo: <http://public.virgo-gw.eu/language/en/>

Haupt-Fachartikel in Physical Review Letters: [doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)

Einige Begleit-Publikationen:

- *Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions:* <https://dcc.ligo.org/P1500229/>
- *GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO:* <https://dcc.ligo.org/P1500269/>
- *Astrophysical implications of the binary black hole merger GW150914:* <https://dcc.ligo.org/P1500262/>
- *Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave candidate G184098:* <https://dcc.ligo.org/P1500227/>
- *Tests of general relativity with GW150914:* <https://dcc.ligo.org/P1500213/>
- *The rate of binary black hole mergers inferred from Advanced LIGO observations surrounding GW150914:* <https://dcc.ligo.org/P1500217/>
- *Properties of the binary black hole merger GW150914:* <https://dcc.ligo.org/P1500218/>

LIGO Open Science Center (Messdaten für GW150914): <https://losc.ligo.org/about/>

Homepage des Albert-Einstein-Instituts: <http://www.aei.mpg.de/>