



LIGO
Scientific
Collaboration



Suche nach Neutrinos aus der Verschmelzung von Schwarzen Löchern

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914Neutrino/index.php>

Im Februar 2016 verkündigte [LIGO](#) den [ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen](#) aus der Verschmelzung von zwei [Schwarzen Löchern](#). Diese Entdeckung, die wir GW150914 nennen, stellt auch die erste direkte Beobachtung von Schwarzen Löchern dar, sowie den ersten Beweis dafür, dass zwei Schwarze Löcher zusammenstoßen und verschmelzen können. Um so viel wie möglich über die beteiligten Schwarzen Löcher und ihre Umgebung zu erfahren, suchten wir auch nach anderen Signalen als Gravitationswellen, die mit der Kollision in Verbindung gebracht werden könnten, insbesondere elektromagnetischen Wellen und [Neutrinos](#). Dieser Artikel konzentriert sich auf die Suche nach Neutrinos in zeitlicher und räumlicher Übereinstimmung mit GW150914.

Was sind Neutrinos, und was haben sie mit verschmelzenden Schwarzen Löchern zu tun?

Neutrinos sind winzige Teilchen ohne elektrische Ladung, die auf natürliche Weise erzeugt werden, wie z.B. durch explodierende Sterne ([Supernovae](#)), [in unserer Sonne](#), durch kosmische Strahlen in der Erdatmosphäre und bei Zerfall von radioaktiven Elementen, oder durch künstliche Quellen wie Kernreaktoren und Teilchenbeschleuniger. Erst vor kurzem wurden hochenergetische Neutrinos unbekannter astrophysikalischer Herkunft [erstmals nachgewiesen](#). Eine Möglichkeit ist, dass diese Neutrinos aus den Regionen um Schwarze Löcher abgestrahlt werden. Schwarze Löcher verschlingen Gas oder Staub aus der Nähe, dieser Prozess ist als [Akkretion](#) bekannt. Während dieses Prozesses können einige der Materieteilchen entweichen, die dann die Umgebung des Schwarzen Lochs mit sehr hohen Geschwindigkeiten verlassen. Bei diesem schnellen Austritt können energetische Neutrinos entstehen, die wichtige Informationen über das Schwarze Loch und dessen Umgebung mit sich tragen. (Siehe Abbildung 1.) Wir erwarten, dass die meisten Zusammenstöße von Schwarzen Löchern nicht mit genug Gas umgeben sind, um nachweisbare Neutrino-Strahlung zu erzeugen. Wir könnten jedoch ein Signal nachweisen, falls die Verschmelzung nahe am Zentrum einer Galaxie statt findet. Die einzige Möglichkeit, diese theoretischen Vorhersagen zu testen, ist Ereignisse wie GW150914 zu beobachten, und zu sehen was wir finden.

Wie können wir Neutrinos nachweisen?

Obwohl Gravitationswellen und Neutrinos sehr unterschiedliche Phänomene sind, haben sie eine wichtige Eigenschaft gemeinsam: sobald sie produziert werden, sind sie in der Lage, sich nahezu

völlig unbeeinflusst von Galaxien, Sternen, Gas und Staub durch das Universum fortzubewegen. Dies macht sowohl Gravitationswellen als auch Neutrinos besonders gut geeignet, um uns über die astrophysikalischen Systeme zu informieren, in denen sie entstehen. Leider haben sie auch einen sehr schwachen Einfluss auf Objekte auf der Erde, was sie notorisch schwer nachzuweisen macht. Die beiden Neutrino-Detektoren, die wir für diese Suche verwenden, messen extrem seltene Wechselwirkungen zwischen auf sie treffenden Neutrinos und den Molekülen von flüssigem Wasser oder Eis. Um eine gute Chance zu haben, um irgendwelche Neutrinos zu messen, werden sehr große Detektoren benötigt. Der größte Detektor der Welt, [IceCube](#), befindet sich tief im Eis am Südpol. Sein Gesamtvolumen beträgt einen Kubikkilometer, was in etwa dem [gesamten Wasserverbrauch der Vereinigten Staaten an einem Tag](#) entspricht. Der zweitgrößte Detektor, [ANTARES](#), befindet sich am Meeresboden des Mittelmeers, südlich von Frankreich. Abbildung 2 zeigt die beiden LIGO-Detektoren zusammen mit IceCube und ANTARES. Für weitere Informationen über Neutrinos und deren Nachweis, siehe: <https://icecube.wisc.edu/outreach/neutrinos>

Was haben wir gefunden?

Nach der Entdeckung des Gravitationswellensignals GW150914 suchten LIGO- und [Virgo](#)-Wissenschaftler in Zusammenarbeit mit IceCube und ANTARES nach energiereichen Neutrinos, die von der Kollision der beiden Schwarzen Löcher stammen, die GW150914 erzeugt hat. Der erste Schritt bestand darin, festzustellen, ob IceCube oder ANTARES überhaupt irgendwelche Neutrinos etwa zur gleichen Zeit aufgezeichnet hatten, wie die von LIGO nachgewiesenen Gravitationswellen. Wir identifizierten drei Neutrinos, die von IceCube in einem Fenster von 1000 Sekunden um die Gravitationswellendetektion entdeckt wurden. In ANTARES gab es zur Zeit von GW150914 keine Neutrino-Ereignisse.

Der nächste Schritt war, die Himmelsrichtung zu bestimmen, aus der die Gravitationswellen uns erreichten, und sie mit der Richtung der Herkunft der drei Neutrinos von IceCube zu vergleichen. Wenn die gleichen Schwarzen Löcher den Zusammenstoß von GW150914 und auch eines oder mehrere dieser Neutrinos erzeugt haben, müssen die Signale aus der gleichen Himmelsrichtung kommen. GW150914 erreichte das LIGO-Observatorium in Livingston (Louisiana), etwa 7 Millisekunden bevor es im Observatorium in Hanford (Washington), eintraf. Da sich Gravitationswellen mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, hat diese Verzögerung uns geholfen- zu rekonstruieren, wo die Wellen am Himmel entstanden sind. Eine detailliertere Analyse ergab die rot umrandete Region in Abbildung 3. Vergleicht man diese Region mit den Ursprüngen der drei IceCube-Neutrinos (ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt), sehen wir, dass es keine Überschneidung gibt. Dies deutet darauf hin, dass die Ankunftszeit der Neutrinos und die Ankunftszeit der Gravitationswellen lediglich ein zufälliges Zusammentreffen waren.

Was kommt als nächstes?

Während es diesmal keine gemeinsame Entdeckung gab, stellt die gemeinsame Suche nach Gravitationswellen und Neutrinos aus den energiereichsten kosmischen Phänomenen eine aufregende neue Richtung für die Hochenergie-Astrophysik dar. In den nächsten Jahren wird das globale Netzwerk von Gravitationswellendetektoren deutlich verbessert: als erstes nimmt [Advanced Virgo](#) in Italien den wissenschaftlichen Betrieb auf, dann [Kagra](#) in Japan und später eine [dritter LIGO-Detektor in Indien](#). Diese zusätzlichen Detektoren werden unsere Fähigkeit deutlich verbessern, die

Positionen von Gravitationswellenquellen am Himmel zu lokalisieren, und dies wiederum wird unsere Fähigkeit verbessern, gemeinsam nach Gravitationswellen und Neutrinos zu suchen. Diese Suche könnte uns helfen zu verstehen, wie Schwarze Löcher mit der Strahlung dieser energiereichen Elementarteilchen verbunden sind, die jeden Tag aus dem Kosmos eintreffen.

Weiterführende Informationen:

- [Fachartikel zur Entdeckung von GW150914](#)
- [Fachartikel zur Neutrinosuche](#)

Abbildungen aus dem Fachartikel

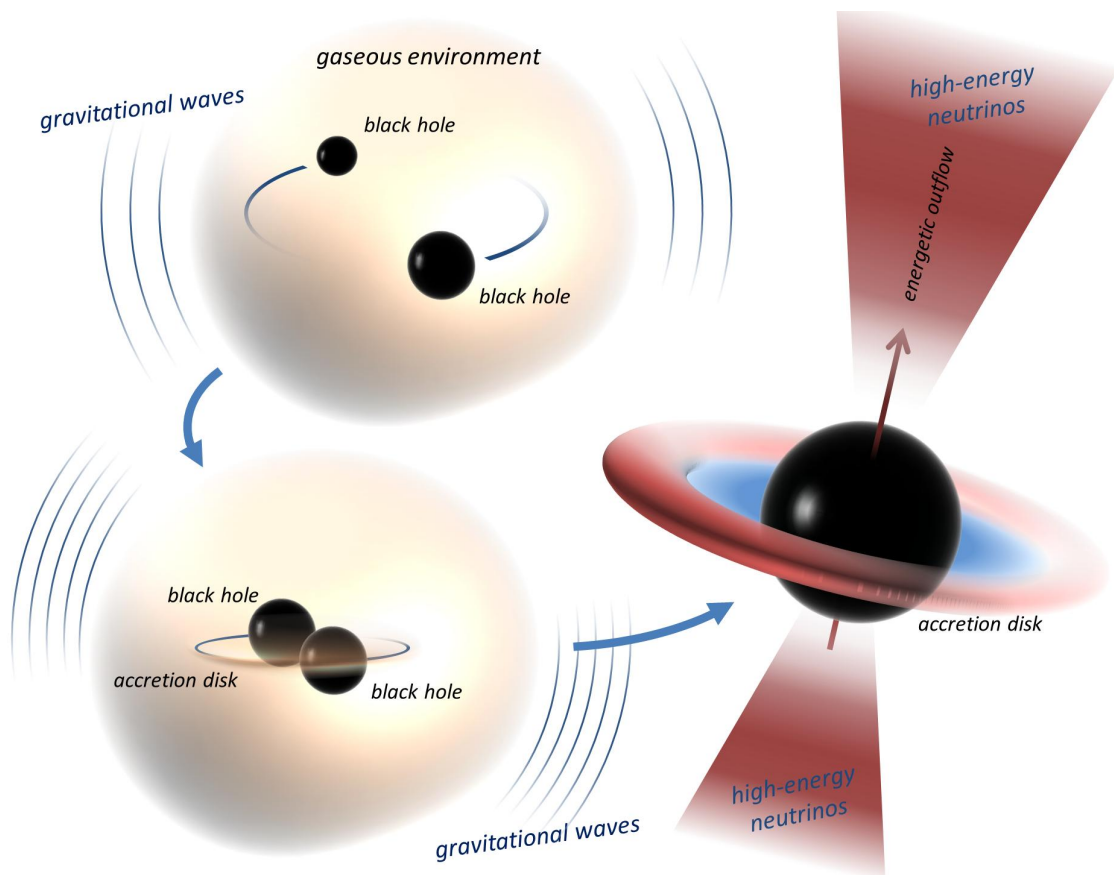


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern in einer gashaltigen Umgebung. Zuerst werden die beiden Schwarzen Löcher gezeigt, die sich gegenseitig umkreisen, und sich dabei langsam nach innen bewegen. Hierbei werden Gravitationswellen ausgesendet. Mit sich verringerndem Abstand umkreisen sie sich immer schneller und strahlen stärkere Gravitationswellen mit höherer Frequenz ab. In der Zwischenzeit kann sich Gas langsam nach innen bewegen und sich in der Nähe der Schwarzen Löcher ansammeln. Schließlich, wenn die beiden Schwarzen Löcher zu einem größeren Schwarzen Loch verschmelzen, wird Gas in dieses Schwarze Loch fallen, und eine so genannten Akkretionsscheibe bildet sich. Ein Teil dieser Materie wird in energetischer Strahlung entweichen und energiereiche Neutrinos erzeugen.

Bildrechte: I. Bartos (2016).



Abbildung 2: Die vier Detektoren, die an der gemeinsamen Suche teilgenommen haben. Die Neutrino-Detektoren IceCube und ANTARES sind oben links bzw. unten rechts gezeigt, während die Gravitationswellendetektoren LIGO-Hanford und LIGO-Livingston oben rechts und unten links gezeigt sind. Bildrechte: IceCube Collaboration, LIGO / Caltech, F. Montanet.

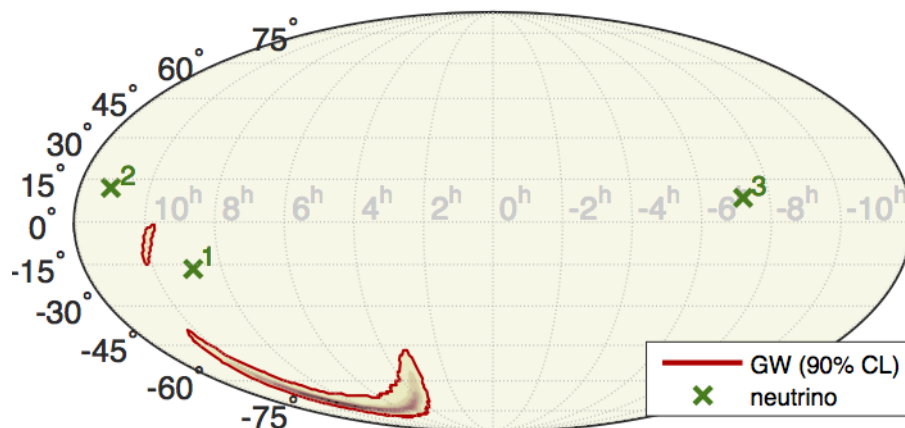


Abbildung 3: (Angepasst von Abb. 1 des Fachartikels.) Erwartete Himmelspositionen des LIGO-Gravitationswellensignals und der drei IceCube-Neutrinos. Die rote Linie umreißt den Bereich, aus dem die Gravitationswellen (mit 90% Wahrscheinlichkeit) stammen. Die grünen „x“-Symbole zeigen die Ursprungsrichtung der drei Neutrinos an. Da keines der Neutrinos im rot umrandeten Bereich entstanden ist, schließen wir, dass der gleichzeitige Nachweis mit GW150914 nur eine zufällige Überschneidung war.