

Die Hintergrundsymphonie der Gravitationswellen von verschmelzenden Neutronensternen und Schwarzen Löchern

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:
<https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Stochastic/index.php>

Einführung

Die Ära der Gravitationswellenastronomie begann mit der Entdeckung des Verschmelzens von zwei Schwarzen Löchern, [GW150914](#), durch [Advanced LIGO](#). Seitdem wurden drei weitere solche Paare verschmelzender [Schwarzer Löcher](#) beobachtet: [GW151226](#), [GW170104](#) und [GW170814](#). Das jüngste dieser Ereignisse wurde gemeinsam von Advanced LIGO und [Advanced Virgo](#) erfasst. Am 17. August 2017 beobachteten Advanced LIGO und Virgo zusammen eine völlig neue Art von Gravitationswellen: die Kollision zweier [Neutronensterne](#). Dieses Ereignis, bekannt als [GW170817](#), verheißt uns bemerkenswerte Erkenntnisse über unser Universum. Es wird uns helfen, unser Verständnis der Schwerkraft zu testen; zu erforschen, wie sich Materie unter unvorstellbar hohen Temperaturen und Drücken verhält; und sogar, wie die schwersten chemischen Elemente entstehen.

Stochastische Gravitationswellen-Hintergrund-Strahlung

So wie ein Mikrofon nur die am nächsten stehenden Sprecher deutlich aufnimmt, sind Advanced LIGO und Virgo am empfindlichsten für Verschmelzungen von Schwarzen Löchern und/oder Neutronensternen im relativ nahen Universum. Für jede solche aus der Nähe stammende Kollision gibt es jedoch viele weitere, die zu weit entfernt sind, um für sich allein entdeckt zu werden. Mit unseren gegenwärtigen Detektoren kann keine dieser entfernten Kollisionen einzeln beobachtet werden, aber zusammen ergeben sie einen sogenannten *stochastischen* (zufälligen) Hintergrund von Gravitationswellen. Wie ein Mikrofon, welches das kollektive Murmeln eines Publikums aufnimmt, können Advanced LIGO und Virgo diesen kombinierten, stochastischen Hintergrund entfernter Signale messen. Die ersten Entdeckungen verschmelzender Schwarzer Löcher durch Advanced LIGO und Virgo ermöglichten uns die Stärke (oder die [Energiedichte](#)) des stochastischen Hintergrundes, der von Doppelsystemen Schwarzer Löcher stammt, abzuschätzen (siehe zum Beispiel [hier](#) und [hier](#)). Nun, mit unserer ersten Beobachtung einer Neutronensternkollision, können wir auch abschätzen, in welchem Ausmaß solche Doppelsysteme von Neutronensternen zum stochastischen Hintergrund beitragen.

Abbildung 1 zeigt unsere Schätzung für die Gesamtstärke des astrophysikalischen stochastischen Hintergrunds (blaue Kurve) sowie die einzelnen Beiträge der Kollisionen von Neutronensternen (rot) und Schwarzen Löchern (grün). Obwohl Neutronensternkollisionen „leiser“ sind als das Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher, wird angenommen, dass sie viel häufiger auftreten. Dies bedeutet, dass binäre Neutronensterne und binäre Schwarze Löcher ungefähr gleich viel zum stochastischen Gesamthintergrund von Gravitationswellen beitragen.

Abbildung 1 zeigt auch die Empfindlichkeit der Detektoren von Advanced LIGO und Virgo für vergangene und zukünftige Beobachtungsläufe (schwarze Kurven). Wenn der stochastische Hintergrund in diesem Diagramm höher als die schwarzen Kurven liegt, sollte er von LIGO und Virgo nachweisbar sein. Wir sehen, dass die Detektoren bei Erreichen ihrer planmäßigen vollen Empfindlichkeit (der sogenannten „Design“-Empfindlichkeit) eine Chance haben werden, den stochastischen Hintergrund nachzuweisen.

Was bedeutet das alles?

Erstens erwarten wir jetzt, dass der stochastische Hintergrund etwa doppelt so laut sein kann, wie wir es zuvor geschätzt hatten! Dies bedeutet, dass wesentlich weniger Zeit benötigt wird, um den stochastischen Hintergrund statistisch nachzuweisen. Insbesondere das kombinierte Signal aus binären Neutronensternen und binären Schwarzen Löchern sollte in den nächsten Jahren nachweisbar werden. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt, die zeigt, wie sich eine als [Signal-zu-Rausch-Verhältnis](#) (oder SNR für englisch: signal-to-noise ratio) bezeichnete Größe erhöht, wenn wir mehr Daten aufnehmen. Die SNR misst die Stärke des stochastischen Hintergrunds relativ zum zufälligen „Rauschen“ in den LIGO- und Virgo-Detektoren: eine sehr niedrige SNR bedeutet, dass der Hintergrund immer noch unter unserem Detektor-Rauschen verborgen ist, während eine sehr hohe SNR bedeutet, dass wir sehr zuversichtlich sein können, dass uns ein Nachweis gelungen ist.

Dieses Diagramm zeigt, dass wir eine SNR von 3 (das im Allgemeinen angesetzte Niveau, um einen vorläufigen Nachweis zu vermelden) in ungefähr 40 Messmonaten erhalten können. Mit bisher nur wenigen beobachteten binären Schwarzen Löchern und einem einzelnen beobachteten Doppel-Neutronenstern bleibt die Gesamtenergie des stochastischen Hintergrund jedoch noch sehr unsicher. Diese Unsicherheit wird durch die grauen Bänder in Abbildung 1 und 2 dargestellt; obwohl wir eine fundierte Annahme über die Stärke des stochastischen Hintergrund haben, könnte die richtige Antwort irgendwo innerhalb dieses Bandes liegen. Da LIGO und Virgo in Zukunft weitere Verschmelzungen von Schwarzen Löchern und auch von Neutronensternen entdecken werden, werden wir zunehmend genauere Vorhersagen über die Stärke des stochastischen Hintergrunds treffen können. (Und über die benötigte Zeit bis zum erwarteten Nachweis.)

Zweitens erwarten wir, obwohl die Beiträge zum Gesamthintergrund von Neutronensternen und Schwarzen Löchern ähnlich groß sind, dass sie sehr verschieden „klingen“. Signale von zwei Schwarzen Löchern (wie GW150914) sind laut, kurz und ziemlich selten. Wenn viele solcher Signale kombiniert werden, ähnelt dies Maiskörnern, die in der Mikrowelle knallen (wir nennen dies daher einen „Popcorn“-Hintergrund). Die Signale von binären Neutronensternen sind dagegen lang, eher leise, und häufiger, sodass zu jedem gegebenen Zeitpunkt mehrere Signale einander überlagern können. Der Hintergrund dieser Quellen ähnelt daher viel mehr einem [weißen Rauschen](#) - ein stetiges Brummen, ohne wahrnehmbare Pausen oder einzelne „Knälle“. Wir veranschaulichen den Unterschied zwischen diesen beiden Fällen in Abbildung 3. Dies zeigt ein Beispiel für ein stochastisches Signal aufgrund vieler entfernter Neutronensterne in Rot und das Signal von Schwarzen Löchern in Grün. Alternativ können Sie auch ein [Audio-Beispiel](#) des kombinierten Hintergrunds anhören.

Fazit

Jenseits der lautesten, nahegelegenen Ereignisse im lokalen Universum können Advanced LIGO und Virgo möglicherweise auch einen kombinierten stochastischen Hintergrund von weiter entfernten Gravitationswellenquellen erkennen. Nach dem historischen ersten Nachweis einer Neutronensternverschmelzung, GW170817, haben wir die Stärke des stochastischen Signals aufgrund von anderen Verschmelzungen von Neutronenstern-Doppelsystemen im ganzen Universum abgeschätzt. Wir stellen fest, dass das gesamte stochastische Signal stärker als bisher erwartet ist: es ist stark genug, dass es in naher Zukunft von LIGO und Virgo entdeckt werden kann!

Glossar

- **Neutronenstern (Neutron star)**: Ein extrem dichtes Objekt, das aus dem Kollaps eines massereichen Sterns übrig geblieben ist. Neutronensterne sind die dichtesten Objekte im bekannten Universum; ein Teelöffel Material aus einem Kern eines Neutronensterns hat mehr Masse als alle Menschen auf der Welt zusammen!
- **Schwarzes Loch (Black hole)**: Eine kompakte Region der Raumzeit mit einer so starken Schwerkraft, dass sie verhindert, dass ihr irgendetwas, einschließlich Licht, entweichen kann.
- **Binäres Schwarzes Loch (Binary Black Hole, BBH)**: Ein Doppelsystem, das aus einem Paar von Schwarzen Löchern besteht, die einander umkreisen.
- **Binärer Neutronenstern (Binary Neutron Star, BNS)**: Ein Doppelsystem, das aus einem Paar von Neutronensternen besteht, die einander umkreisen.
- **Stochastisch (Stochastic)**: Zufälligen Regeln folgend; ein Zufallsmuster aufweisend, das statistisch analysiert werden kann, aber nicht exakt vorhergesagt werden kann.
- **Stochastischer Gravitationswellenhintergrund (stochastic gravitational wave background)**: Ein Gravitationswellensignal aus der Kombination von vielen einzelnen *unbestimmten* Quellen. Quellen sind nicht einzeln zu bestimmen, wenn sie zu schwach sind, um direkt beobachtet zu werden, oder wenn sich zu viele auf einmal überlagern, wie das kollektive Summen eines flüsternden Publikums.
- **Beobachtungslauf oder Beobachtungskampagne (observation run)**: Ein Zeitraum, in dem die LIGO- und Virgo-Detektoren planmäßig „eingeschaltet“ sind, um nach Gravitationswellen zu lauschen. Weitere Details zu aktuellen und zukünftigen Beobachtungsläufen sind [hier](#) verfügbar,
- **Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Signal-to-noise ratio, SNR)**: Ein Maß dafür, ob ein bestimmtes Signal auf einem statistisch signifikanten Niveau nachgewiesen wurde, oder nicht. Niedrige Werte der SNR bedeuten, dass ein Signal nicht sicher festzustellen ist, während sehr hohe Werte eine nahezu sichere Detektion bedeuten.
- **Popcorn-Hintergrund (Popcorn background)**: Die besondere Art eines stochastischen Hintergrunds, der von verschmelzenden Schwarzen Löchern erzeugt wird. Die Gravitationswellensignale von binären Schwarzen Löchern sind laut, kurz, und zeitlich getrennt. Sie kommen zu zufälligen, eher weit auseinander liegenden Zeiten auf der Erde an und erzeugen einen stochastischen Hintergrund, der wie das Knallen einzelner Körner von Mais klingt.

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN:

- Der vollständige Fachartikel ist [hier](#) gratis abrufbar und wurde in der Zeitschrift „Physical Review Letters“ [veröffentlicht](#).
- Websites von LIGO und Virgo: <https://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- [Beschreibung der Beispiel-Tondatei eines kombinierten BNS- und BBH-Hintergrunds](#)
- LIGO Open Science Center mit Zugang zu den Rohdaten von GW17081: <https://losc.ligo.org>

- Allgemeinverständliche Zusammenfassungen weiterer Veröffentlichungen über die Entdeckung und Bedeutung von GW170817:
 - [GW170817: Gravitationswellenbeobachtung eines Doppel-Neutronenstern-Systems](#)
 - [Multi-Messenger-Beobachtungen eines verschmelzenden Doppelneutronensterns](#)
 - [Gravitationswellen und Gamma-Strahlen von verschmelzenden Neutronensternen: GW170817 und GRB 170817A](#)
 - [Messung der Expansion des Universums mit Gravitationswellen](#)
 - [Suche nach dem Überrest von GW170817: Neutronenstern oder Schwarzes Loch?](#)
 - [Vorhersage der Folgen der Neutronensternkollision, die GW170817 produzierte](#)
 - [Die Herkunft von GW170817: Neutronensterne, Supernovae und Billard-Tricks](#)
 - [Suche nach hochenergetischen Neutrinos vom verschmelzenden Doppelneutronenstern GW170817 mit ANTARES, IceCube und dem Pierre-Auger-Observatorium](#)

Abbildungen aus dem Fachartikel

Weitere Informationen, wie diese Darstellungen erzeugt wurden und deren Bedeutung finden sich im [vollständigen Artikel](#).

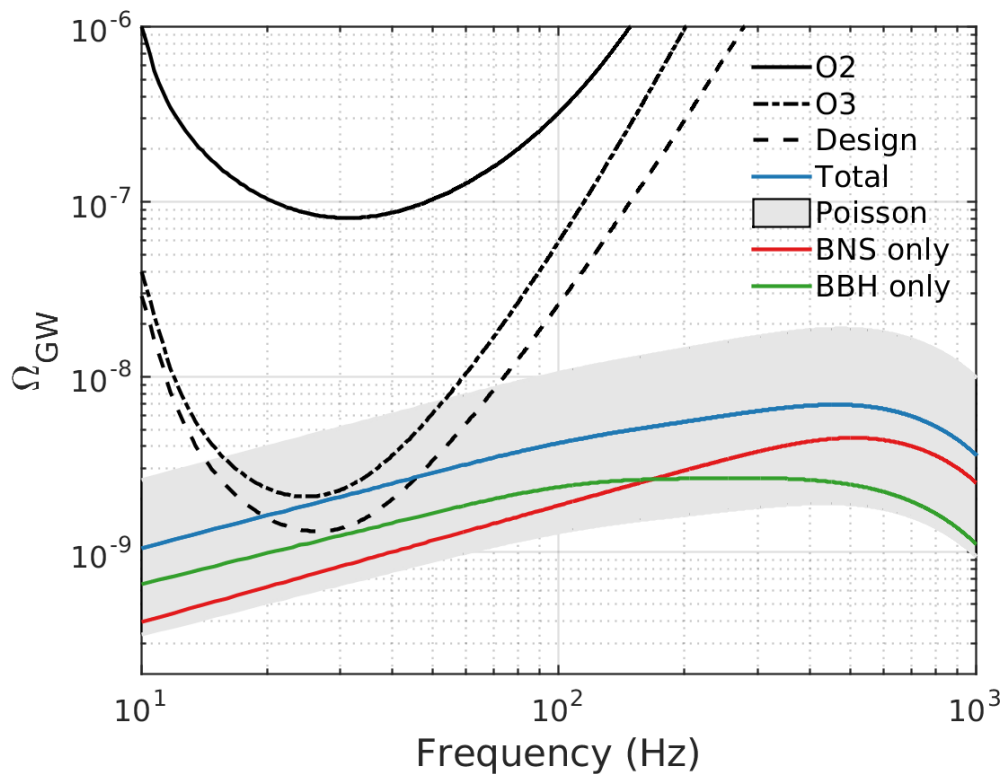


Abbildung 1: Diese Abbildung zeigt den vorhergesagten stochastischen Hintergrund von binären Neutronensternen (rot) und binären Schwarzen Löchern (grün), sowie den kombinierten Hintergrund beider Quellen (blau). Da wir nicht genau wissen, wie oft Neutronensterne und Schwarze Löcher im Universum kollidieren, besteht eine gewisse *Unsicherheit* über das Gesamtvolumen des Hintergrunds. Diese Unsicherheit wird durch das graue Band dargestellt. (In der Legende als „Poisson“, nach den statistischen Eigenschaften, bezeichnet.) Wir zeigen auch die vorhergesagten Empfindlichkeiten der LIGO- und Virgo-Detektoren während der Beobachtungsläufe O2 (gerade abgeschlossen) und O3 (in naher Zukunft) sowie bei Erreichen ihrer endgültigen Design-Empfindlichkeiten. Die Empfindlichkeitskurven für O3 (und darüber hinaus) reichen weit in unser „Unsicherheitsband“ hinein und übertreffen sogar unserer besten Prognose für die Stärke des gesamten stochastischen Hintergrunds. Dies deutet darauf hin, dass es LIGO und Virgo bald gelingen könnte, den kombinierten stochastischen Hintergrund zu vermessen.

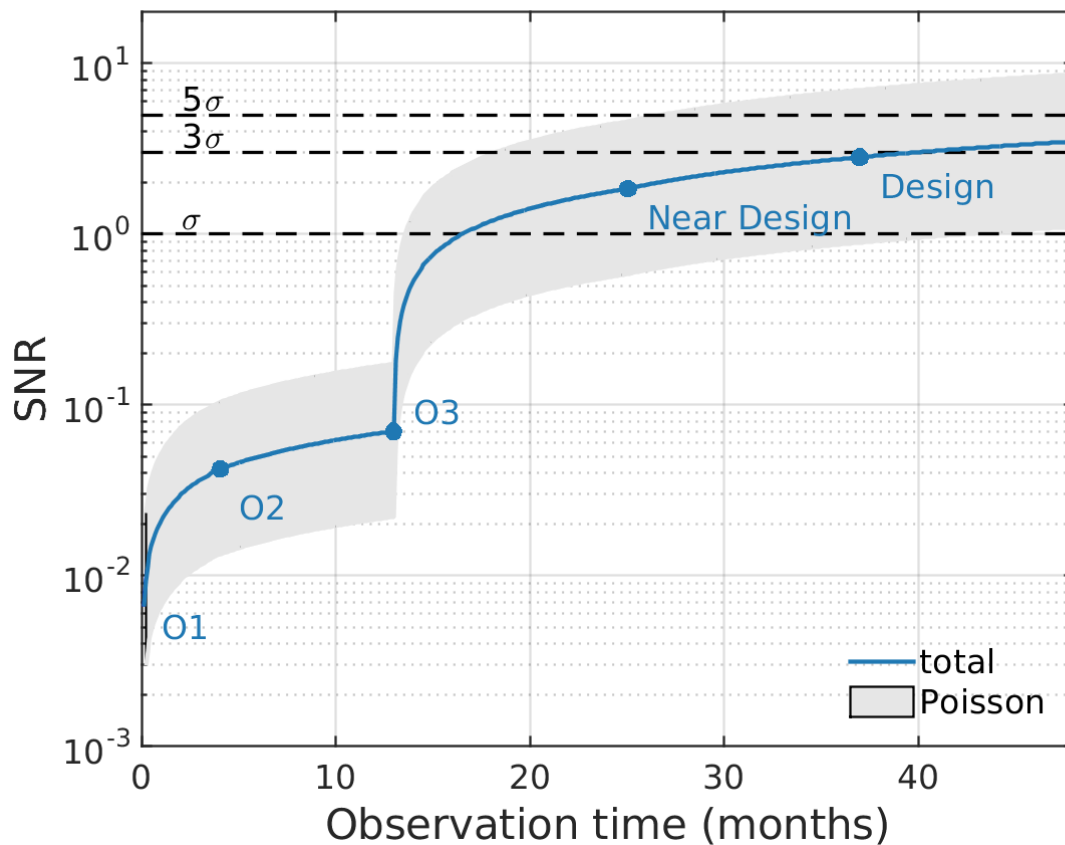


Abbildung 2: Hier zeigen wir, wie das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) des stochastischen Hintergrunds mit der Beobachtungszeit zunimmt. Die SNR beziffert die Stärke des detektierten Signals im Vergleich zum zufälligen „Rauschen“ in unseren Detektoren. Wie in Abbildung 1 führt unsere Unsicherheit in der Stärke des stochastischen Hintergrunds zum hier gezeigten grauen „Poisson-“Unsicherheitsband. Wir sagen voraus, dass der gesamte stochastische Hintergrund wahrscheinlich nach etwa 40 Monaten Beobachtungszeit mit einer signifikanten SNR (SNR = 3) detektiert werden kann, nachdem das LIGO-Virgo-Netzwerk seine endgültige Design-Empfindlichkeit erreicht hat, was für 2022-2024 geplant ist. Im optimistischsten Fall kann der Hintergrund auch schon nach nur 18 Monaten Beobachtungszeit, während des O3-Beobachtungslaufes (2018-2019), nachgewiesen sein. Die Markierungen zeigen den jeweiligen Beginn der Beobachtungsläufe.

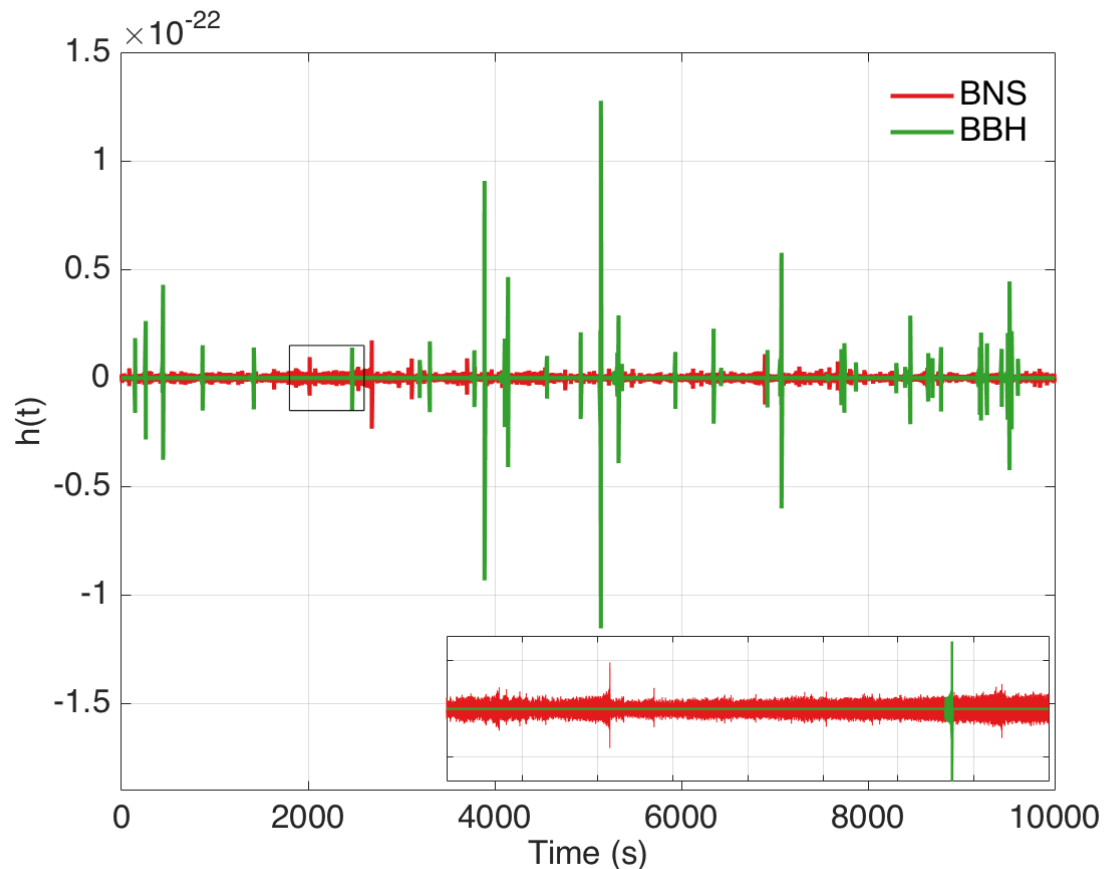


Abbildung 3: Beispielsimulation eines astrophysikalischen stochastischen Hintergrundsignals. Das Signal von binären Schwarzen Löchern ist in Grün dargestellt, während das von Doppelneutronensternen in Rot dargestellt ist. Der Einschub vergrößert einen kleinen Bereich von 1800 bis 2600 Sekunden. Man kann sehen, dass Schwarze Löcher (grün) einen „Popcorn“-Hintergrund erzeugen: sehr kurze, laute Ausbrüche, die zeitlich sauber voneinander getrennt sind. Der Neutronensternhintergrund (rot) dagegen enthält viele überlappende Signale und erscheint daher als ein kontinuierliches Band ohne viele klare Maxima oder Minima in der Signalstärke.

Wichtig zu betonen ist, dass dies ein *simuliertes Beispiel* für die Art von Signal ist, die wir erwarten; das reale stochastische Signal ist völlig zufällig und kann daher im Voraus nicht genau vorhergesagt werden. Die [Audiodatei](#) demonstriert den Klang des kombinierten Hintergrunds von allen Doppelsystemen aus Neutronensternen und Schwarzen Löchern.