

Eine lange und intensive Suche nach dem Überrest von GW170817

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:
<https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817PostMergerLong/index.php>

Am 17. August 2017 gelang weltweit zusammenarbeitenden Astronomen eine der aufregendsten Entdeckungen unserer Zeit: [GW170817](#), die [erste sogenannte „Multi-Messenger“-Beobachtung](#) zweier verschmelzender [Neutronensterne](#). Als diese zwei ultrakompakten Objekte, jedes schwerer als unsere Sonne, sich einander immer schneller annäherten, strahlten sie in der letzten Minute dieses Tanzes ein klares und eindeutiges Gravitationswellensignal ab, das die drei Detektoren von [LIGO](#) und [Virgo](#) aufzeichneten. Nachdem die beiden Sterne schließlich zusammenstießen und miteinander verschmolzen, sandten sie auch einen grellen [Gammablit](#) aus, den die Weltraumteleskopen [Fermi](#) und [INTEGRAL](#) beobachteten. Kurz darauf entdeckten Teleskope in Chile auch eine entsprechende Quelle im sichtbaren Licht. Es folgten viele weitere Beobachtungen mit Teleskopen auf der Erde und im Weltall, die fast das gesamte elektromagnetische Spektrum abdecken.

Dieses einmalige Ereignis hat bereits eine Vielzahl neuartiger wissenschaftlicher Erkenntnisse ermöglicht, aber eine besonders naheliegende Frage bleibt weiterhin unbeantwortet: was für ein Überrest ist bei der Verschmelzung zurückgeblieben? Waren die beiden Neutronensterne zusammen schwer genug, sodass der Überrest in kürzester Zeit zu einem [Schwarzen Loch](#) zusammenfiel? Oder verschmolzen sie zu einem neuen Neutronenstern, schwerer als seine beiden „Eltern“ aber doch stabil? Die Suche nach möglichen Gravitationswellensignalen von einem solchen Überrest bietet eine Möglichkeit, diese Frage zu beantworten. In einer [ersten Analyse](#) konnten wir (die LIGO- und Virgo-Kollaborationen) keine solchen Signale nachweisen. Nun haben wir diese Frage in einem weiteren, [kürzlich online gestellten Artikel](#) erneut aufgegriffen, in dem wir in den Gravitationswellendaten nach Signalen von einem möglichen langlebigen Neutronenstern-Überrest suchen.

Einleitung: Was gibt es über den Überrest herauszufinden, und warum wissen wir es noch nicht?

Es gibt vier Möglichkeiten für einen Überrest von GW170817:

1. direkter Kollaps zu einem Schwarzen Loch
2. ein „hypermassiver“ Neutronenstern
3. ein „supramassiver“ Neutronenstern
4. ein stabiler Neutronenstern

Der schwerste bekannte Neutronenstern ist etwa doppelt so schwer wie unsere Sonne, und es ist nicht bekannt ob noch massivere kompakte Objekte — wie ein aus zwei Neutronensternen entstandener Überrest von GW170817 — noch stabil sein können. Die mögliche Höchstmasse hängt dabei von den – noch unbekanntenen – Eigenschaften ab, die Materie unter extremen Dichten annimmt. Wenn das Verschmelzungsergebnis also zu schwer ist, folgt als

erstes Szenario der direkte Kollaps zu einem Schwarzen Loch. Als zweite Möglichkeit kann ein kurzlebiger „hypermassiver“ Neutronenstern gebildet werden, der anfangs durch seine schnelle Eigendrehung stabilisiert wird. Dabei drehen sich die verschiedenen Schichten seines Inneren verschieden schnell; diese „differentielle Rotation“ verlangsamt sich jedoch in kürzester Zeit, und der Stern fällt schließlich doch unter seiner eigenen Schwerkraft zusammen. Obwohl einige elektromagnetische Beobachtungen dieses Szenario zu bevorzugen scheinen, ist deren eindeutige Interpretation schwierig, und Experten sind noch zu keinem abschließenden Konsens gekommen. So bleiben auch noch die anderen beiden Optionen im Spiel, bei denen der neu entstandene Neutronenstern weniger schwer ist und daher länger überleben kann. Auch solch ein leichterer Überrest würde sich anfangs schnell drehen und dann durch Abstrahlung von Gravitations- und elektromagnetischen Wellen abbremsen. Abhängig von seiner genauen Masse und seinem inneren Aufbau könnte er dann letztlich wiederum zu einem Schwarzen Loch zusammenfallen, sobald er eine gewisse kritische Drehgeschwindigkeit unterschreitet. Diesen Fall nennen wir einen „supramassiven“ Neutronenstern. Oder der Stern könnte sogar dauerhaft stabil bleiben.

Um herauszufinden, welches dieser Szenarien für GW170817 zutrifft, haben wir im Jahr 2017 bereits eine erste [Analyse von „Post-Merger“-Signalen](#) durchgeführt und veröffentlicht. („Post-Merger“: Gravitationswellen, die nach einer Verschmelzung ausgestrahlt werden.) Dabei hatten wir uns auf relativ kurze Signale konzentriert: weniger als eine Sekunde lang für den hypermassiven Fall, oder höchstens einige Hundert Sekunden für Signale, die ein weniger massiver Neutronenstern am Anfang seiner Entwicklung aussenden könnte. Leider konnten wir keine solchen Gravitationswellen nachweisen. Dieses Ergebnis war auch nicht unerwartet, da LIGO und Virgo bei Frequenzen über etwa 500 Hertz – wo Post-Merger-Signale, besonders die kurzen, am stärksten sein sollten – deutlich weniger empfindlich sind als im niedrigeren Frequenzbereich, in dem wir das „Chirp“-Signal der einander spiralförmig umkreisenden Neutronensterne vor der Verschmelzung gefunden haben.

Seitdem haben wir uns die Daten noch ein Mal ganz genau angesehen und dabei unser Hauptaugenmerk auf länger andauernde Signale von einem möglicherweise supramassiven oder stabilen Neutronenstern gelegt, um so sicherzugehen, dass wir in diesem Bereich keine spannenden Post-Merger-Gravitationswellen verpassen. Um den empfindlichen Bereich gegenüber der vorherigen Analyse zu erweitern, haben wir vier neue Methoden verwendet, die auf längere Signaldauern spezialisiert sind, von Hunderten von Sekunden bis zu etwa einer Woche. (Denn die LIGO-Detektoren wurden eine gute Woche nach dem GW170817-Ereignis planmäßig abgeschaltet, um weitere instrumentelle Verbesserungen zu installieren.)

Die Herausforderung, nach Gravitationswellen mittlerer Signaldauer zu suchen.

Die Suche nach Gravitationswellen, die Hunderte Sekunden bis einige Tage oder Wochen dauern, stellt uns vor deutlich andere Herausforderungen als die meisten anderen Datenanalysen, die in den LIGO- und Virgo-Kollaborationen durchgeführt werden. Auf solchen Zeitskalen müssen wir mit sehr großen Datenmengen und fein gestaffelten Wellenform-Modellen arbeiten (traditionelle Herausforderungen auch im Bereich der [Suchen nach kontinuierlichen Gravitationswellen](#)), jedoch gleichzeitig auch mit der schnellen Frequenzentwicklung der erwarteten Signaltypen umgehen können. Dabei erwarten wir, dass die Gravitationswellen von einem einzelnen, in seiner Rotation abbremsenden Neutronenstern – selbst, wenn er neugeboren, besonders schwer und mit einer hohen Anfangsdrehgeschwindigkeit ausgestattet ist – sehr schwach sein werden und es somit

schwierig wird, sie aus dem Detektorrauschen herauszufiltern. Hinzu kommt auch noch, dass unsere theoretischen Signalmodelle für solche Signale nicht vollständig sein dürften, sodass die Form der tatsächlichen Signale von diesen Modellschablonen abweichen kann. Selbst wenn wir die Daten mit einem riesigen Modellsatz vergleichen, könnten wir das echte Signal also im schlimmsten Fall übersehen.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, haben wir vier verschiedene Analysemethoden eingesetzt. Zwei davon sind „modellfreie“ Algorithmen, die nach jedweder Art von vielversprechenden Signaturen in den Detektordaten aus der gewählten Zeitspanne suchen, ohne diese explizit mit Modell-Schablonen zu vergleichen. Die beiden anderen Methoden verwenden Wellenformmodelle, die der erwarteten Frequenzentwicklung für einen Neutronenstern entsprechen, dessen Abbremsung verschiedenen relativen Beiträgen von magnetischem Energieverlust und solchem durch Gravitationswellen entspricht. Bei einer der modellfreien Methoden handelt es sich um eine angepasste Konfiguration eines Algorithmus, den wir bereits für die Suche nach kürzeren Post-Merger-Signalen eingesetzt haben. Die anderen drei Methoden sind Weiterentwicklungen von Algorithmen, die zuvor für die Suche nach noch länger anhaltenden kontinuierlichen Gravitationswellen eingesetzt wurden. Dies ist das erste Mal, dass Methoden aus diesem Bereich für zeitlich begrenzte Signale angepasst und dann auch in einer tatsächlichen astrophysikalischen Analyse von LIGO-Daten angewendet werden.

Die Kombination dieser vier Suchmethoden erlaubt es uns, verschiedene Bereiche der erwarteten Vielfalt von möglichen Signalwellenformen abzudecken, sowie verschiedene Zeitspannen: eine Methode deckt drei Stunden ab, zwei weitere analysierten etwa einen Tag an Daten, und eine untersuchte den gesamten Datensatz. Verschiedene Methoden reagieren auch unterschiedlich auf Störsignale in den Detektordaten, sodass der Quervergleich robustere Ergebnisse erlaubt. Und insbesondere war es wichtig, dass die modellfreien Methoden sicherstellen, dass wir keine gänzlich unerwarteten, und doch starken Signale in den Daten übersehen, während die modellbasierten Methoden eine gute Empfindlichkeit für die erwarteten Wellenformen bieten.

Ergebnis: Wir haben den Überrest von GW170817 immer noch nicht identifizieren können.

Wir sind dieses Projekt bereits in der Erwartung angegangen, dass ein Nachweis von langandauernden Post-Merger-Gravitationswellen von GW170817 unwahrscheinlich sein würde, ebenso wie er es für die zuvor anvisierten kurzen Signale war. Und tatsächlich hat keine der vier Suchmethoden einen interessanten Kandidaten für ein Gravitationswellensignal gefunden. Drei Algorithmen hatten einige vorläufige Kandidaten identifiziert, die wir jedoch mit Sicherheit ausschließen konnten, nachdem detaillierte Untersuchungen ergaben, dass sie eher Störsignalen im Detektorrauschen ähneln als echten astrophysikalischen Quellen.

Dass wir kein Signal messen konnten, ist eine logische Konsequenz der begrenzten Detektorempfindlichkeit (besonders bei hohen Frequenzen) und der Entfernung von 40 Megaparsec zur Quelle von GW170817 – möglicherweise aber eben auch aus der Abwesenheit eines langlebigen Neutronensterns, falls der Überrest schon sehr schnell zu einem Schwarzen Loch kollabiert war.

Bevor wir solche Schlüsse ziehen können, mussten wir aber erst ein Mal sicherstellen, dass der Nichtnachweis nicht etwa an Fehlern in unseren Analysemethoden lag, die uns ein echtes Signal hätten übersehen lassen. Um dies zu überprüfen, haben wir eine Vielzahl von Signalen simuliert, die einem spezifischen Wellenformmodell für einen langsam abbremsenden jungen

Neutronenstern entsprechen. Empfindlichkeitsmessungen für diese Modellsignale haben gezeigt, dass für einen sicheren Nachweis die Gravitationswellen nach der Verschmelzung von GW170817 eine um ein vielfaches höhere Energie davongetragen hätten haben müssen, als der Überrest in seiner anfänglichen schnellen Eigendrehung gespeichert haben kann. Oder in anderen Worten hätte ein GW170817-ähnliches Ereignis mit einem realistischen Energiebudget deutlich näher an der Erde stattfinden müssen – maximal 1 Megaparsec statt 40 — damit wir mit der Empfindlichkeit unserer aktuell verfügbaren Detektoren seine Post-Merger-Signale hätten nachweisen können.

Ausblick: Was wir in der Zukunft erreichen können.

Auch wenn wir von Anfang an keinen sicheren Nachweis erwarten konnten, haben wir dieses Projekt unternommen, da es im Angesicht neuer Entdeckungen – wie GW170817 – stets wichtig ist, sorgfältig auch nach unerwarteten Spuren in den Daten zu suchen. Die Entdeckung eines Post-Merger-Signals würde zudem reichhaltige Informationen über das Verhalten von Materie bei extremen Dichten versprechen. Und auch ohne einen erfolgreichen Nachweis hat es uns diese kombinierte Analyse mit vier verschiedenen Methoden ermöglicht, die speziellen Stärken jeder Methode herauszuarbeiten und ihre Robustheit unter realistischen Bedingungen sicherzustellen. In der Zukunft erwarten wir mit den verbesserten LIGO- und Virgo-Detektoren, viele weitere verschmelzende Neutronensterne zu beobachten, und müssen bereit sein, erneut nach Post-Merger-Signaturen zu suchen. Doch selbst wenn wir Glück haben und es weitere Ereignisse gibt, die näher an der Erde stattfinden als GW170817, wird es weiterer Verbesserungen an den Analysemethoden, aber auch an den Detektoren selbst, bedürfen, um eine realistische Chance auf einen Nachweis von Post-Merger-Gravitationswellen zu haben. Wenn die Detektoren dann aber entsprechend verbessert sind, insbesondere im Bereich hoher Frequenzen, dann hat dieses Projekt gezeigt, dass unsere Analysemethoden bereit sind, um den reichen Informationsgehalt von nach einer Verschmelzung ausgestrahlten Gravitationswellen zu erschließen.

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN:

- Websites von LIGO und Virgo: <https://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- Kostenloser Vorabdruck des Fachartikels: <https://arxiv.org/abs/1810.02581>
- LIGO Open Science Center mit Zugang zu den Rohdaten von GW170817: <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](#)
- [Suche nach dem Überrest von GW170817: Neutronenstern oder Schwarzes Loch?](#)
- [Messung der Expansion des Universums mit Gravitationswellen](#)
- [Vorhersage der Folgen der Neutronensternkollision, die GW170817 produzierte](#)
- [Die Herkunft von GW170817: Neutronensterne, Supernovae und Billard-Tricks](#)

- [Die Hintergrundsymphonie der Gravitationswellen von verschmelzenden Neutronensternen und schwarzen Löchern](#)
- [Suche nach hochenergetischen Neutrinos vom verschmelzenden Doppelneutronenstern GW170817 mit ANTARES, IceCube und dem Pierre-Auger-Observatorium](#)

Glossar

- **Schwarzes Loch:** Eine Region der Raumzeit, in der durch eine extrem kompakte Masse die Schwerkraft so stark ist, dass alles, einschließlich Licht, daran gehindert wird, zu entkommen.
- **Neutronenstern:** Extrem dichtes Objekt, das nach dem Zusammenbruch eines massiven Sterns übrig bleibt. Ein typischer Neutronenstern wiegt eine halbe Million mal die Masse der Erde, hat aber nur einen Durchmesser von unter 30 km.
- **Hypermassiver Neutronenstern:** Ein Neutronenstern, der in weniger als 1 Sekunde zu einem Schwarzen Loch kollabiert, da er so schwer ist, dass er nur kurzzeitig durch Differentialdrehung und Temperaturgradienten (unterschiedliche Drehgeschwindigkeit und Temperatur in verschiedenen Schichten) stabilisiert werden kann.
- **Supramassiver Neutronenstern:** Ein etwas leichterer Neutronenstern, der in 10 bis 1000 Sekunden zu einem Schwarzen Loch kollabiert, da er durch normale Rotation stabilisiert wird, die sich aber im Laufe der Zeit zu sehr verlangsamt. Nur noch leichtere Neutronensterne können dauerhaft stabil bleiben.
- **Multi-Messenger-Astronomie:** Der Zweig der Astronomie, der Beobachtungen von zwei oder mehr verschiedenen Arten von Signalen oder „Boten“, wie Gravitationswellen, elektromagnetischen Wellen oder Neutrinos, zu kombinieren versucht. (Oder auch: Beobachtungen „auf mehreren Kanälen“.)
- **Megaparsec:** Eine astronomische Entfernungseinheit, die einer Million [Parsec](#) oder etwa 3,26 Millionen [Lichtjahren](#) entspricht.
- **Wellenform-Schablone** (Englisch: „template“): Die Form eines Gravitationswellensignals, wie es ein physikalisches Modell für eine bestimmte Quelle mit bestimmten Eigenschaften vorhersagt. Dies beinhaltet sowohl die Amplitude (Stärke) als auch die Frequenz des Signals als Funktionen der Zeit. Der direkte Vergleich der Detektordaten mit Modell-Wellenformen ermöglicht besonders empfindliche [Optimalfilter](#)-Suchmethoden.
- **Modellfreie Suchalgorithmen:** Methoden, die kein spezifisches Signalmodell voraussetzen, sondern nach beliebigen Gravitationswellenformen in den Daten suchen, üblicherweise durch den Nachweis besonders starker Fluktuationen.
- **Chirp:** Das typische Gravitationswellensignal, das zwei Schwarze Löcher oder zwei Neutronensterne abgeben, bevor sie miteinander verschmelzen. Dabei nehmen Amplitude und Frequenz im Verlauf der Zeit immer mehr zu, während sich die Objekte einander annähern.

Abbildungen aus dem Fachartikel

Weitere Informationen zu diesen Abbildungen finden sich im [vollständigen Artikel](#).

Abbildung 1a:

Empfindlichkeit der beiden LIGO-Detektoren zur Zeit des Eintreffens von GW170817. (Die Daten des deutlich weniger empfindlichen Virgo-Detektors wurden in dieser Analyse nicht verwendet.) Niedrigere Werte der abgebildeten Kurve entsprechen hier besserer Empfindlichkeit; wir sehen also, dass die Detektoren unglücklicherweise gerade bei hohen Frequenzen – die für den Nachweis von Post-Merger-Gravitationswellen besonders wichtig sind – weniger empfindlich sind als bei wenigen hundert Herz.

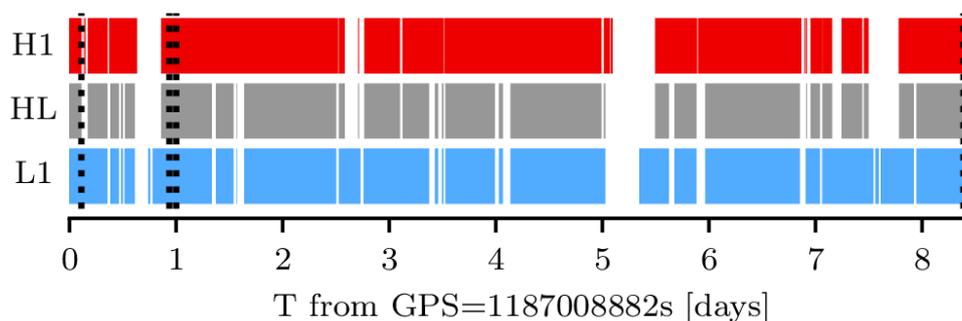
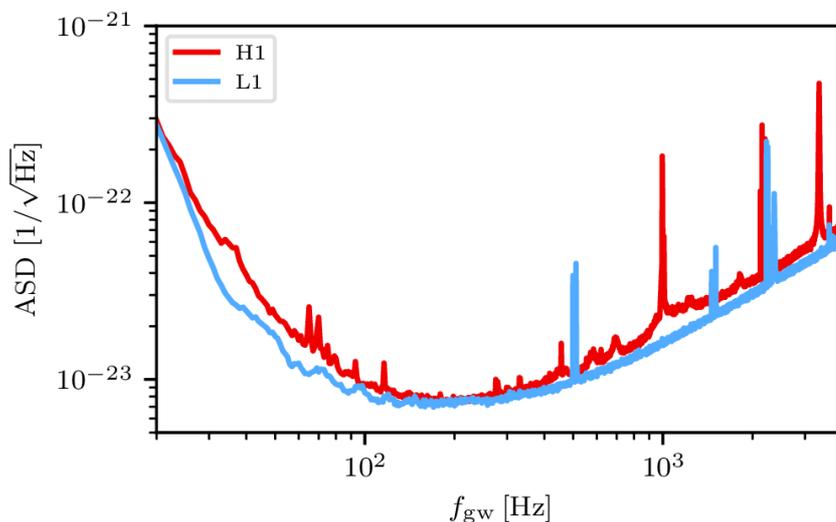


Abbildung 1b: Die Längen der verwendeten LIGO-Datensätze nach der Verschmelzung von GW170817. Die Zeit ist hier in „GPS-Sekunden“ gemessen, wobei 1187008882 s etwa der Verschmelzung der beiden Neutronensterne am 17. August 2017 entspricht. Rote und blaue Balken entsprechen den Zeiten, zu denen die LIGO-Detektoren in Hanford bzw. Livingston im Messbetrieb waren, während weiße Lücken anzeigen, dass es zu diesen Zeiten keine nutzbaren Daten des jeweiligen Detektors gab. Die grauen Balken in der Mitte geben die Zeiten an, zu denen beide Detektoren gleichzeitig im Messbetrieb waren. Die gestrichelten Linien zeigen die Endpunkte der Zeitabschnitte an, die von den vier verschiedenen Analysemethoden untersucht wurden.

Abbildung 2a: Die größten Entfernungen, bis zu denen jede einzelne Analyse-methode ein Post-Merger-Gravitationswellensignal von einem GW170817-ähnlichen Ereignis hätte nachweisen können. Genauer gesagt gibt, auf der Grundlage von simulierten Signalen, die wir zu den Detektordaten hinzugefügt haben, die Größe $d^{90\%}$ an, dass wir bei dieser Entfernung (in Megaparsec) 90% der simulierten Signale nachweisen können. Diese Entfernung hängt dabei von der anfänglichen Frequenz f_{start} des Überrest-Neutronensterns ab, wenn er mit der Abstrahlung von Gravitationswellen beginnt. Alle vier Analysemethoden erreichen 90%-Entfernungen von höchstens 1 Megaparsec, wobei ihre Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Anfangsfrequenz f_{start} und anderen Parametern deutlich unterschiedlich verläuft. Zum Vergleich: wie am oberen Rand der Abbildung zu sehen, ist die wahre Quelle von GW170817 etwa 40 Megaparsec entfernt.

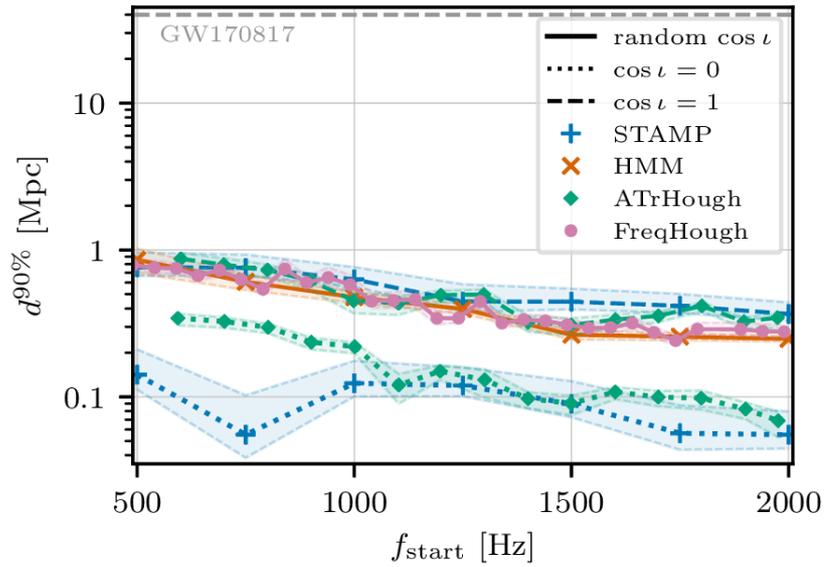


Abbildung 2b: Unsere ermittelten Grenzwerte für die Gesamtenergie von langandauernden Gravitationswellen, die nach der Verschmelzung von GW170817 ausgestrahlt worden sein können. Diese wurden mit dem gleichen Satz an Simulationen wie in Abbildung 2a abgeschätzt, aber in diesem Diagramm entspricht ein niedriger Wert einer stärkeren Einschränkung. Zum Vergleich ist im unteren Bereich ein physikalisch realistisches Energiebudget aufgetragen, das der möglichen anfänglichen Drehenergie eines Neutronensterns entspricht. Die linke vertikale Achse zeigt die Energie in Einheiten der [Sonnenmasse](#) und die rechte Achse ist in der astronomischen Einheit [erg](#) gemessen.

