

## Wie schwer sind Neutronensterne? [25. Jan.]

Am 17. August 2017 haben die Detektoren des *Advanced LIGO* und des *VIRGO-Netzwerks* das *Gravitationswellensignal* des Hineinspiralens und der Verschmelzung eines **Doppel-Neutronensterns** gemessen. Die entsprechenden elektromagnetischen Signale wurden von rund 70 astronomischen Observatorien und Satelliten gemessen; sie deuten darauf hin, daß derartige Verschmelzungen von Neutronensternen direkt mit der Beobachtung von **kurzen Gammastrahlenausbrüchen** assoziiert sind.

Bei Gammastrahlenausbrüchen (Abb. 1) handelt es sich um schnelle, sehr helle Lichtausbrüche, die ihr Maximum im *Gammabereich* besitzen. Das Nachglühen des Ereignisses findet bei längeren *Wellenlängen* statt. Während *lange Gammaausbrüche* auf den Kollaps des Kerns eines entwickelten Sterns hindeuten, treten *kurze Ausbrüche* bei der Verschmelzung von Sternpaaren wie zwei Neutronensternen oder einem System aus Neutronenstern und *Schwarzen Loch* auf.

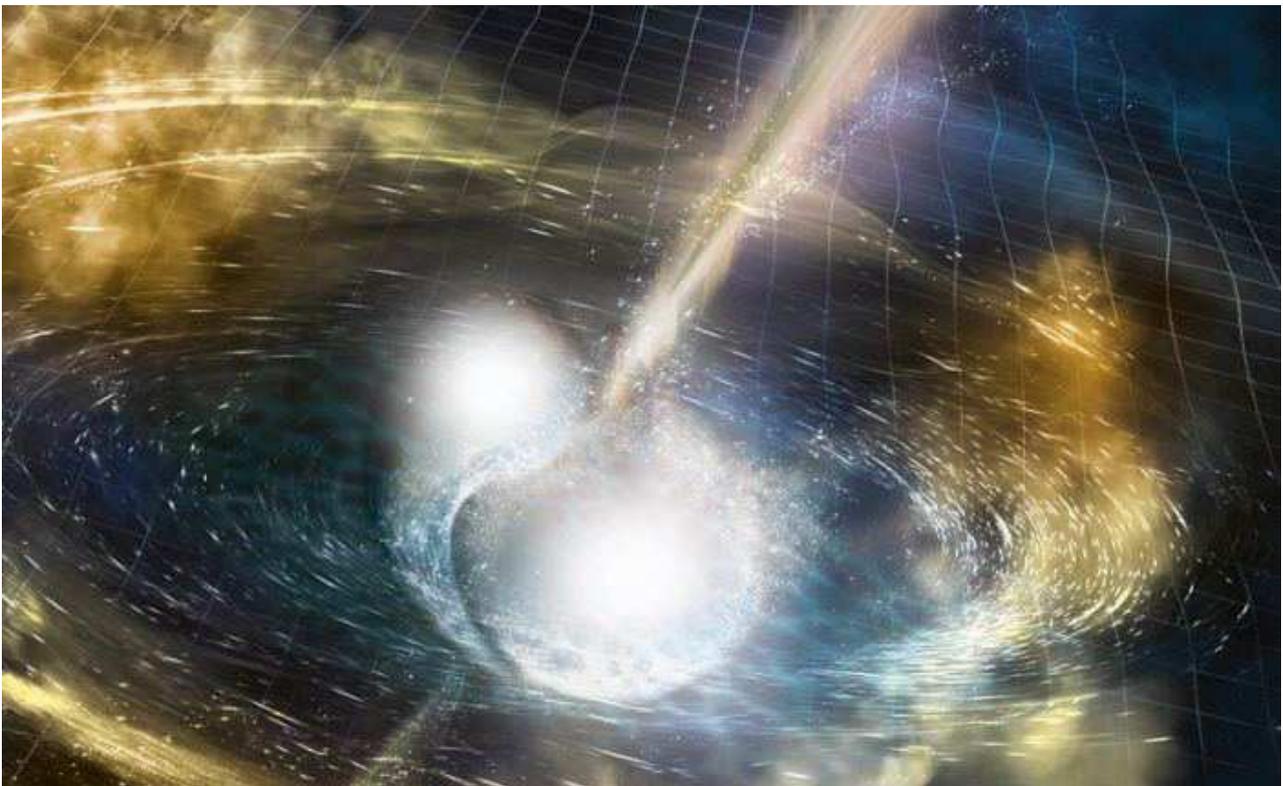


Abb. 1 Künstlerische Darstellung der Verschmelzung eines Doppel-Neutronensterns und dem dazugehörigen kurzen Gammastrahlenereignis.

Ein räumlich gesehen enger Gammastrahlenausbruch (nach oben und unten) kann bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne auftreten. Parallel wird durch die Verschmelzung *Gravitationsstrahlung* erzeugt, die sich wellenartig in der *Raumzeit* (Gitternetz) ausbreitet. Dabei können durch den hochenergetischen Prozeß heiße Gaswolken, die zuvor aus der Umgebung der beiden Sterne weggeschleudert wurden, Ursache für die Emission der Gammastrahlung sein.

© National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

Dieses Ereignis hat nicht nur die Geburt der **Multi-Gravitationswellenastronomie** ausgelöst, sondern auch wichtige Einblicke in das langjährige Rätsel des Ursprungs der kurzen Gammastrahlenausbrüche ermöglicht. Im Zusammenspiel mit Computersimulationen könnte das Rätsel bald gelöst sein.

## Woher stammen die neuen Daten?

Detaillierte Analysen dieser Ergebnisse ermöglichen die Verwendung der Gravitationswellensignale, um Eigenschaften des Doppel-Neutronensternsystems abzuleiten. Beispielsweise machen **Änderungen des Gravitationswellensignals** während des Ineinanderspiralens beider Sternreste Aussagen über die *Deformationsfähigkeit* der *Sternmaterie*, d.h. wie stark man diese Materie zusammenquetschen kann bevor ein *Schwarzes Loch* entsteht.

Die Bestimmung des genauen Schicksals am Ende der Verschmelzung zweier Neutronensterne hängt von mehreren *makroskopischen*, beispielsweise der Gesamtmasse und des Masseverhältnisses beider Sternreste, und *mikroskopischen* Faktoren, beispielsweise der Effizienz des *Energietransports* durch *Neutrinos* ab. Allerdings führten weder der Versuch, die **Masse des Doppelsterns** zu bestimmen, die zu einem sofortigen Kollaps des Systems führt, noch die Bestimmung der Lebensdauer des Sternendprodukts zu keinem eindeutigen Ergebnis.

Dabei wird das Szenario durch die *Multiplizität* möglicher stabiler, instabiler und *metastabiler Gleichgewichtsszenarien* verkompliziert, die das Endprodukt einnehmen kann.

Die **Frage** lautet: Wann oder wie lange bleibt der Sternrest stabil, wann wird er metastabil und wann instabil? Die Wissenschaftler versuchen bereits seit Jahren dieses Bild deutlicher zu beleuchten, jedoch muß man dazu verstehen wie der Sternrest sich gegen einen möglichen *Gravitationskollaps* wehrt; dieser Prozeß hängt entscheidend von der **maximalen Masse** ab, die der Gravitation standhalten kann, was wiederum von der sog. *Zustandsgleichung* abhängt. (Abb. 2)

# Neutronenstern

## Aufbau

$$M \sim 1.5 M_{\odot}$$

Oberfläche

Atmosphäre

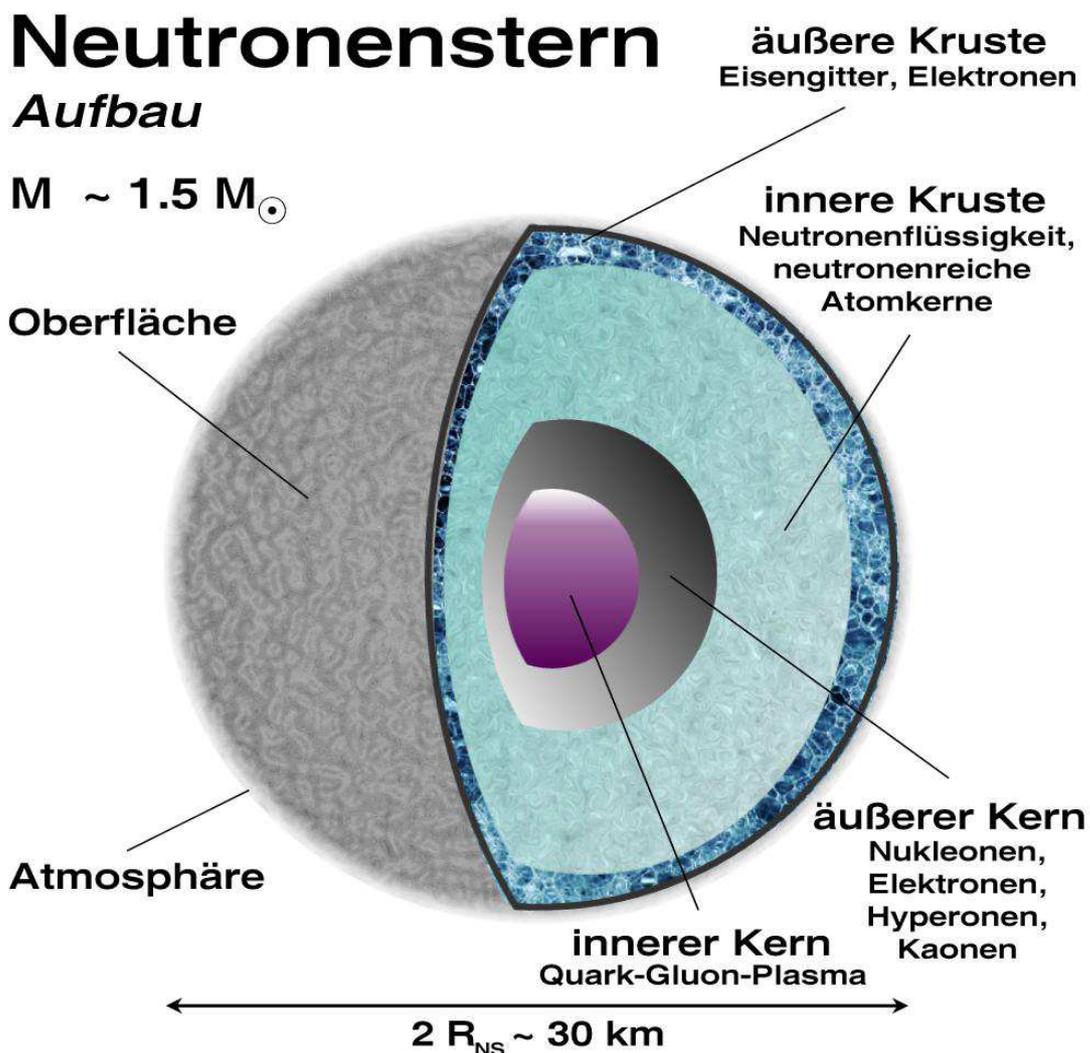
äußere Kruste  
Eisengitter, Elektronen

innere Kruste  
Neutronenflüssigkeit,  
neutronenreiche  
Atomkerne

äußerer Kern  
Nukleonen,  
Elektronen,  
Hyperonen,  
Kaonen

innerer Kern  
Quark-Gluon-Plasma

$$2 R_{NS} \sim 30 \text{ km}$$



### Abb. 2 Schematischer Aufbau eines Neutronensterns.

Wie genau ein Neutronenstern im Inneren aufgebaut ist, wissen die Forscher nicht genau, da die Zustandsgleichung der Materie in einem Neutronenstern nicht exakt bekannt ist. Wahrscheinlich befindet sich unter einer dünnen Atmosphäre über dem dichten Sternrest eine Oberfläche, darunter eine äußere Kruste, in der sich *Elektronen* in einer *festen Gitterstruktur* befinden. Die darunter liegende innere Kruste ist wahrscheinlich flüssig und besteht mehrheitlich aus *neutronenreichen Atomkernen*. Der äußere Kern des Neutronensterns könnte aus unterschiedlichen Bestandteilen bestehen, beispielsweise Elektronen, aber auch Teilchen, die man bisher nicht direkt gemessen hat. Das Innere des Sternrests bildet vermutlich ein sog. *Quark-Gluon-Plasma*, das so im Universum nicht vorkommt. Insgesamt wird die Materie des Sterns so stark zusammengepreßt, daß sein Durchmesser nur rund 60 Kilometer beträgt, jedoch etwa 1,5 *Sonnenmassen* schwer ist. Im Vergleich besitzt die Sonne mit 1 Sonnenmasse einen Durchmesser von 1,4 Millionen Kilometer.

© docplayer.org

Die meisten bekannten Neutronensterne besitzen eine Masse von rund 2,1 *Sonnenmassen*; massereichere Exemplare kennt man nur wenige, beispielsweise den *Pulsar* (schnell rotierender Neutronenstern) *PSR J0348+0432* mit einer Masse von 2,01 Sonnenmassen. Dabei ist die *Dichte eines Neutronensterns* so enorm, daß die *Materiedichte* einem Bierglas entspricht, in das der Himalaya hineingepreßt wurde. Die meisten Wissenschaftler vermuten, daß ein noch schwererer Sternrest sofort in ein Schwarzes Loch kollabiert, möglicherweise bereits beim Hinzufügen nur eines einzigen Neutrons zum Sternrest.

### Neue Studie

Ein Wissenschaftler und zwei seiner Studenten haben unlängst gezeigt wie man Gravitationswellen nutzen kann, um zu bestimmen wie massereich die Komponenten eines verschmelzenden Doppel-Neutronensterns werden können, bevor sie in Schwarze Löcher kollabieren. Mit der jetzt ermittelten Masseobergrenze können die Forscher verstehen, wie sich Materie unter extremen Bedingungen - wie sie in Neutronensternen vorliegen - verhält.

Die neue **Masseobergrenze** konnte mithilfe der Daten des **Gravitationswellenereignisses GW170817** vom 17.08.2017 ermittelt werden (Abb. 3). Das Ereignis der Verschmelzung zweier Neutronensterne in einem Doppelsystem geschah in rund 130 Millionen Lichtjahren Entfernung. Basierend auf Modellrechnungen und Beobachtungen des Röntgenobservatoriums Chandra gehen die Wissenschaftler davon aus, daß die Kollision und die anschließende Verschmelzung der beiden Sternreste ein Schwarzes Loch zurückließen.

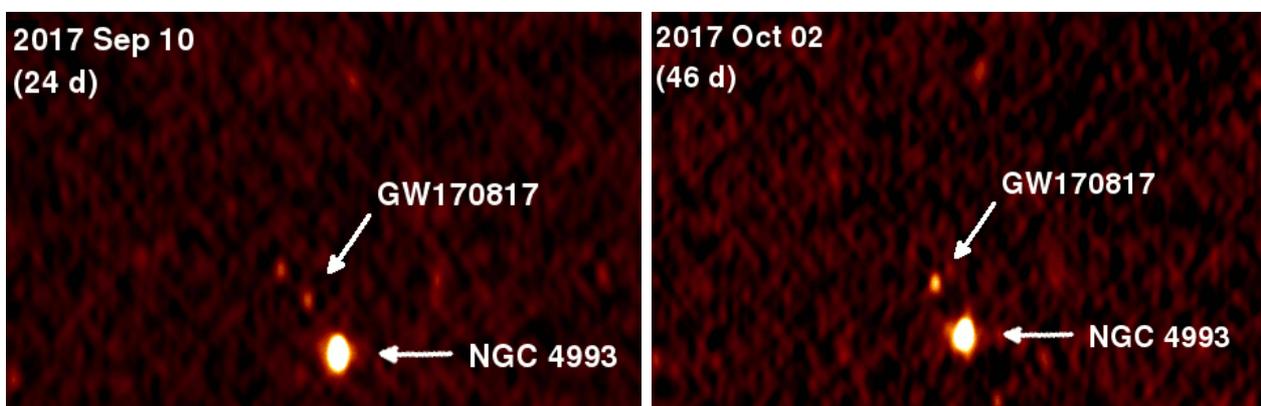


Abb. 3 Das Nachglühen des Gravitationswellenereignisses GW170817.

Die Radioaufnahmen des *VLA-Teleskops* zeigen die nach dem Gravitationswellenereignis GW170817 ansteigende *Radiostrahlung* am 10. September bzw. 2. Oktober 2017, 24 bzw. 46 Tage nach dem eigentlichen Verschmelzen des Doppel-Neutronensternsystems. Unterhalb befindet sich die *Galaxie NGC 4993*. Eine Animation finden Sie unter [3].

© K. Mooley and G. Hallinan (CalTech/NRAO)

## **Masseobergrenze für Neutronensterne**

Die neue Studie geht davon aus, daß sämtliche Neutronensterne **ähnliche Eigenschaften** besitzen, die als *dimensionslose Größen* ausgedrückt werden können (sog. „*quasi-universelle Beziehungen*“). In der Kombination mit den Gravitationswellendaten folgern die Forscher, daß die maximale Masse *nicht-rotierender Neutronensterne* den Wert von 2,01-2,16 Sonnenmassen nicht überschreiten kann. Dabei hängt die Abschätzung der Obergrenze von der Gesamtmasse des Systems (Obergrenze wird größer) und der bei der Kollision abgeschleuderten Masse (Obergrenze wird bei geringerer abgeschleuderten Masse größer) ab.

Es sei bemerkenswert, wenn bereits ein einziges Signal eines verschmelzenden Doppel-Neutronensterns in Kombination mit den genannten quasi-universellen Beziehungen das Rätsel der Masseobergrenze lösen könne, so der Wissenschaftler.

Die Studie ist ein gutes Beispiel wie Theorie und experimentelle Forschung zu besseren Modellen und Vorhersagen führen können.

Wenige Tage nach der Veröffentlichung der Studie bestätigten Forschergruppen aus den Vereinigten Staaten und Japan unabhängig voneinander und mit unterschiedlichen Ansätzen und Techniken diese Ergebnisse [5]; die von den Wissenschaftlern ermittelte Obergrenze liegt bei 2,15-2,25 Sonnenmassen.

## **Ausblick**

Nun hoffen die Wissenschaftler auf weitere Gravitationswellensignale verschmelzender Doppel-Neutronensterne, die geringere Massen als das System GW 170817 besitzen, um die Masseobergrenze weiter einzuschränken. Mithilfe von verbesserten Methoden und genaueren Modellen könnten die Forscher mehr über diese energiereichen Vorgänge im Universum lernen.

Falls Sie Fragen und Anregungen zu diesem Thema haben, schreiben Sie uns unter **[kontakt@ig-hutzi-spechtler.eu](mailto:kontakt@ig-hutzi-spechtler.eu)**

Ihre  
IG Hutzi Spechtler – Yasmin A. Walter

Quellenangaben:

[1] Mehr Information über Objekte des Sonnensystems und astronomische Begriffe (*kursive Schreibweise*)  
[www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)

[2] Abbot, B. P., et al., *ApJL* 848, L13 (2017) und *Phys. Rev. Lett.* 119, 16101 (2017)

[3] Rezzolla, L., et al., *ApJL* 852, No. 2 (2018)

[4] Animation des Nachglühens des Gravitationswellenereignisses GW170817  
<https://3c1703fe8d.site.internapcdn.net/newman/csz/news/800/2017/5a3a397aa5c90.gif>

[5]  
Shibata, M., et al., *Phys. Rev. D* 96, 123012 (2017)  
Margalit, B., Metzger, B. D., *ApJL* 850, Vol. 2(2017)