

**Beben im All: Wenn schwarze Löcher kollidieren, erschüttern sie die Raumzeit und verursachen Gravitationswellen. Diesen Effekt hatte Albert Einstein in seiner allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt. Hundert Jahre später, im September 2015, gingen solche Wellen erstmals ins Netz. Numerische Simulationen wie diese beschreiben die kosmischen Szenarien.**

BILD: N. FISCHER, H. PFEIFFER, A. BUONANNO/MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK, SIMULATING EXTREME SPACETIMES (SXS) COLLABORATION

# DICKER FISCH SCHLÄGT MÄCHTIG WELLEN

TEXT: HELMUT HORNING

Eigentlich dürfte es nicht existieren: ein schwarzes Loch mit der 85-fachen Masse unserer Sonne. Doch genau das haben Astronomen aufgespürt. Demnach war dieses Schwergewicht Teil eines Doppelsystems, ehe es mit seinem ebenfalls recht massiven Partner verschmolz. Das dabei ausgelöste Beben der Raumzeit sandte Gravitationswellen aus, welche die Forschenden des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik in Potsdam und Hannover vor so manches Rätsel stellen.

Gravitationswellen sind Boten aus dem dunklen Universum. Albert Einstein hat sie in zwei Aufsätzen in den Jahren 1916 und 1918 beschrieben, in den 1930er-Jahren jedoch vorübergehend an ihrer Existenz gezweifelt. Auf jeden Fall hielt er diese Wellen, deren Existenz die allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt, für unmessbar. Doch am 14. September 2015 verfin-gen sie sich zum ersten Mal im fein gespannen Netz der Forschenden – und erschütterten die beiden Detektoren von Advanced LIGO an den Standorten Hanford und Livingston in den USA.

Was aber steckt hinter diesem kosmischen Zittern? Die allgemeine Relativitätstheorie ist letztlich eine Feldtheorie. Danach führt die beschleunigte Bewegung von Massen im Schwerfeld zu Störungen, die sich lichtschnell ausbreiten. Diese Störungen heißen Gravitationswellen. Es klingt unglaublich, aber sie dehnen und stauchen den Raum, den sie durchheilen. Theoretisch entstehen sie zum Beispiel, wenn ein Kind auf dem Trampolin auf und ab hüpfet. Aber ein Mensch besitzt eine geringe Masse und hüpfet auch vergleichsweise langsam. Deshalb sind die von ihm ausgesandten Gravitationswellen unmessbar klein.

Im All dagegen findet man große Massen – und sogar ein Trampolin: die Raumzeit. Darin ist alles in Bewegung, weil kein einziger Himmelskörper in Ruhe an einem Ort verharret. Auch die Erde beult bei ihrem Umlauf um die Sonne den Raum aus und strahlt dabei Gravitationswellen mit einer Leistung von 200 Watt ab. Aber selbst diese Gravitationswellen sind noch zu schwach, als dass ein Detektor sie aufspüren würde. Im Universum gibt es jedoch sehr große Massen und rasend schnelle Bewegungen. So stammt das Signal vom 14. September 2015 von zwei schwarzen Löchern, die nach einem turbulenten

Todestanz in Bruchteilen einer Sekunde miteinander verschmolzen. Die Objekte besaßen jeweils rund 30 Sonnenmassen und waren etwa 1,3 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt.

Seit der ersten Entdeckung vor fünf Jahren haben die Wissenschaftler bis zum Redaktionsschluss dieser Ausgabe von *Max Planck Forschung* 50 Gravitationswellen-Ereignisse sicher nachgewiesen. Diese stammen überwiegend von kollidierenden schwarzen Löchern, und derartige Entdeckungen wurden allmählich zur Routine. Doch am 21. Mai 2019 geschah etwas Gewaltiges: Statt eines „Zwischerns“ in den Detektoren LIGO (USA) und Virgo (Italien) vernahmten die Astronomen gleichsam einen Plopp. Der dauerte nur eine Zehntelsekunde und erreichte eine maximale Frequenz von lediglich 60 Hertz – die geringste bisher beobachtete.

„Von Anfang an stellte uns das sehr kurze Signal vor Herausforderungen, als wir seine Quelle identifizieren wollten“, erzählt Alessandra Buonanno, Direktorin am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam. „Aber wir fanden heraus, dass das Signal dem entspricht, das wir von verschmelzenden schwarzen Löchern erwarten.“ So schließen die Forscher

75



aus den kürzlich ausgewerteten Daten auf zwei wahre Schwergewichte mit ungefähr 85 und 65 Sonnenmassen. Und GW190521, so die Bezeichnung des Ereignisses, brach noch einen Rekord: Die Verschmelzung fand vor etwa sieben Milliarden Jahren statt – zu einer Zeit, als das All halb so alt war wie heute. Und weil ein Blick in die Vergangenheit des Universums zugleich auch eine Reise in die Ferne bedeutet, ist das Signal das fernste je beobachtete.

Damit nicht genug: Bei der kosmischen Kollision wurden acht Sonnenmassen in Gravitationsenergie umgesetzt, und es entstand letztlich ein Koloss, der 142-mal so viel auf die theoretische Waage brächte wie unser Stern. „Wir waren offenbar erstmals Zeuge der Geburt eines mittelschweren schwarzen Lochs geworden“, sagt Alessandra Buonanno. Tatsächlich hatten die Forschenden die Existenz solcher Objekte bislang immer nur vermutet. Sie sind schwerer als die leichteren schwarzen Löcher mit Massen bis zum 65-Fachen der Sonne und weniger massereich als die extrem schweren in den Zentren von Galaxien. Kurz: Ihre Massen liegen in der Größenordnung von 120 bis 100 000 Sonnenmassen.

Das klingt alles sehr plausibel. Doch ein Partner des Ereignisses GW190521 tanzt aus der Reihe: „Nach unserem Verständnis davon, wie Sterne altern und wie sie sich entwickeln, sollten wir schwarze Löcher mit entweder weniger als 65 Sonnenmassen oder mehr als 120 Sonnenmassen finden, aber keine dazwischen“, sagt Frank Ohme, Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover. Das schwarze Loch mit 85 Sonnenmassen fällt aber genau in diese Lücke. „Entweder ist unsere Vorstellung der Sternentwicklung unvollständig, oder hier hat sich etwas grundsätzlich Anderes ereignet“, folgert Ohme.

Nach den Modellen der Astronomen entstehen schwarze Löcher von bis zu etwa 65 Sonnenmassen, wenn schwere Sterne am Ende ihres Lebens angekommen sind. Versiegt der Kernbrennstoff im Innern, geraten die

stellaren Gaskugeln erst in die Energiekrise und dann aus dem Gleichgewicht. Schließlich explodieren sie als Supernova und hinterlassen ein leichtes schwarzes Loch. Am anderen Ende der Gewichtsskala dieser Schwerkraftfallen vermuten die Wissenschaftler extrem schwere Sterne, die bei ihrem Tod gar nicht als Supernovae hochgehen, sondern ohne ein solches Feuerwerk gleich in sich zusammenstürzen und dabei mittelschwere schwarze Löcher von mehr als 120 Sonnenmassen bilden.

So ergibt sich die von Frank Ohme angesprochene Massenlücke von etwa 65 bis 120 Sonnenmassen, in der keine stellaren schwarzen Löcher

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Mit Gravitationswellen haben Astronomen die Verschmelzung der bisher massereichsten schwarzen Löcher beobachtet.

Bei diesem Ereignis wurden die Forschenden erstmals Zeugen der Entstehung eines mittelschweren schwarzen Lochs.

Eines der beiden schwarzen Löcher hatte vor der Verschmelzung 85 Sonnenmassen und dürfte eigentlich gar nicht existieren.



FOTO: SVEN DÖRING FÜR MPG

Licht ins Dunkel: Alessandra Buonanno entwickelt theoretische Modelle, mit denen sich die Signale von Gravitationswellen identifizieren und interpretieren lassen. Die Arbeiten der Direktorin am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik helfen dabei, die Geheimnisse von schwarzen Löchern oder Neutronensternen zu entschlüsseln, und gestatten Rückschlüsse auf die physikalischen Eigenschaften dieser exotischen Objekte.

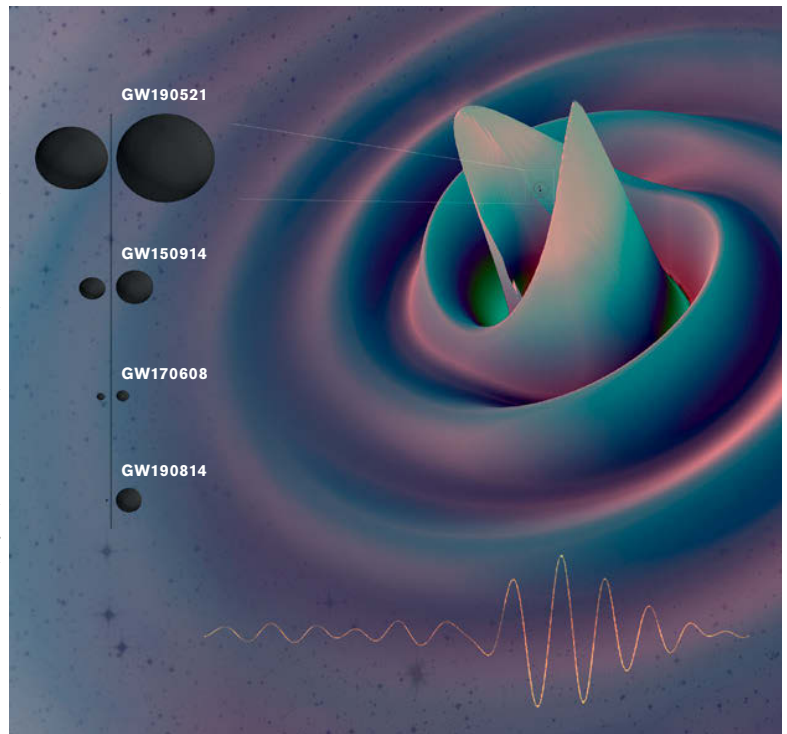
existieren dürften. Denn in der Theorie explodieren jene Sterne, aus denen schwarze Löcher in diesem Bereich entstehen würden, gar nicht als Supernovae und hinterlassen folglich auch keine schwarzen Löcher. Vielmehr erleben diese Sterne eine oder mehrere kurze instabile Episoden, in denen sie jeweils einen beträchtlichen Anteil ihrer Materie abstoßen. Erst nach diesem radikalen Gewichtsverlust bleibt am Ende ein Stern zurück, der in einer Supernova explodiert und ein schwarzes Loch erzeugt, das jedoch weniger als 65 Sonnenmassen besitzt.

Wie aber kam das schwarze Loch mit 85 Sonnenmassen in dem Ereignis GW190521 auf die Welt? Eine Möglichkeit: Die Entwicklungsmodelle der Sterne sind fehlerhaft oder unvollständig, und aus manchen Supernovae entstehen vielleicht doch schwarze Löcher mit mehr als 65 Sonnenmassen. Die Forschenden halten das allerdings für nicht sehr wahrscheinlich: „Ich nehme an, dass dieses Objekt aus einer früheren Verschmelzung eines Doppelsystems hervorgegangen ist“, sagt denn auch Alessandra Buonanno, „vermutlich aus einer Verschmelzung von zwei kleineren schwarzen Löchern oder von zwei massereichen Sternen.“

In der Tat lässt sich das Signal nach der allgemeinen Relativitätstheorie gut als Verschmelzung zweier schwarzer Löcher beschreiben. Trotzdem untersuchen die Wissenschaftler auch noch andere mögliche Erklärungen für ihre Beobachtung: Stammt das Signal vielleicht von kosmischen Strings – hypothetischen Objekten, die sich im frühen Universum gebildet haben könnten? Steckt doch eine Supernova dahinter? Ist GW190521 am Ende gar nicht so weit weg, und sind in Wirklichkeit weniger massereiche schwarze Löcher in geringerer Erdentfernung verschmolzen, deren Wellen durch eine Gravitationslinse verzerrt wurden? Und schließlich: Könnte das Signal von ursprünglichen schwarzen Löchern erzeugt worden sein, die sich in den Kindertagen des Alls noch vor den ersten Sternen bildeten? Fazit aller Über-

legungen: Keines dieser Szenarien will so recht zu den Daten passen.

„Wir wissen noch nicht, ob GW190521 den Vertreter einer völlig neuen Klasse von Doppelsystemen schwarzer Löcher darstellt oder nur das massereiche Ende des Spektrums, das wir bisher gesehen haben“, sagt Karsten Danzmann, Direktor am Hannoveraner Max-Planck-Institut. „Wenn wir alle Verschmelzungen schwarzer Löcher analysiert haben, die LIGO und Virgo in ihrem dritten Beobachtungslauf O3 aufgezeichnet haben, wissen wir hoffentlich mehr.“ An Material mangelt es den Forschern jedenfalls nicht: Während des dritten Beobachtungslaufs, der vom 1. April 2019 bis zum 27. März 2020 dauerte, haben sie die Daten von nicht weniger als 56 möglichen Gravitationswellen-Kandidaten gesammelt.



GRAFIK: D. FERGUSON, K. JANI, D. SHOEMAKER, P. LAGUNA, GEORGIA TECH, MASA COLLABORATION

**Schweregewichte:** Diese Grafik zeigt ein Standbild aus einer numerischen Relativitätssimulation von GW190521. Dabei waren vor etwa sieben Milliarden Jahren zwei schwarze Löcher mit rund 85 und 65 Sonnenmassen verschmolzen – Rekord! Im Vergleich dazu darunter die schematisch dargestellten Massen anderer Gravitationswellen-Ereignisse.

77

## GLOSSAR

### GRAVITATIONSWELLEN-DETEKTOR

Die derzeit größten Anlagen sind LIGO in den USA und Virgo in Italien. Sie funktionieren nach dem Prinzip der Interferometrie. Laserlicht läuft in zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Vakuumröhren. Durchquert eine Gravitationswelle den Detektor, verlängern oder verkürzen sich die Arme. Dadurch geraten die Laserlichtwellen aus dem Takt, was die Intensität des gemessenen Lichts ändert. LIGO mit Standorten in Hanford und Livingston besteht aus jeweils vier Kilometer langen Armen, Virgo in der Toskana besitzt drei Kilometer lange Röhren.