

## Fünf Jahre Gravitationswellenastronomie

# Schwarze Löcher und andere Mysterien

FRANK OHME

*Seit 2015 die ersten Gravitationswellen beobachtet wurden, hat sich ein bis dahin unbekannter Teil des Universums nach und nach einer neuen Form der Astronomie erschlossen. Nach nunmehr fünf Jahren sind die Signale zahlreicher Doppelsysteme von Schwarzen Löchern und zweier Neutronensternpaare entdeckt worden. Viele Wünsche der wissenschaftlichen Gemeinde haben sich damit erfüllt, aber die Daten hielten auch einige Überraschungen bereit.*

Seit Anbeginn der Menschheitsgeschichte nehmen wir das Universum durch elektromagnetische Strahlung wahr. Zunächst ließ sich nur das sichtbare Licht nutzen, mit dem menschlichen Auge als „Detektor“, um den Geheimnissen der Sterne und anderer Objekte im Universum auf die Spur zu kommen. Diese Beobachtungstechniken haben sich über die Jahrhunderte verfeinert und erweitert. Heute schauen wir nicht nur mit dem bloßen Auge, sondern mit einer Vielzahl von Teleskopen in den Nachthimmel, die in ihrer Gesamtheit wiederum ein breites Spektrum von Radiowellen bis hin zu den Gammastrahlen abdecken. All diese Teleskope haben jedoch eines gemeinsam: Sie empfangen elektromagnetische Strahlung verschiedener Wellenlängen. Alles was nicht leuchtet, wie Schwarze Löcher, bleibt für diese Teleskope im Dunkeln. Neben der klassischen Astronomie gibt es weitere Möglichkeiten, Boten aus dem All aufzunehmen, doch die Detektion und Interpretation von kosmischer Strahlung und Neutrinos befindet sich noch immer in den Anfängen.

Im Jahr 2015 gewannen wir jedoch einen weiteren Sinn hinzu, mit dem wir das Universum untersuchen können: Gravitationswellen. Diese sind ebenso wie Licht Schwingungen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Nur schwingen bei Gravitationswellen nicht etwa elektrische Felder, sondern Raum und Zeit selbst werden periodisch gestaucht und gestreckt. Unvorstellbare Energien sind nötig, um Gravitationswellen in einer solchen Stärke zu erzeugen, dass sie überhaupt messbar sind. Astronomische Doppelsysteme können dafür die perfekte Quelle sein, vorausgesetzt die beiden Objekte sind massereich und gleichzeitig

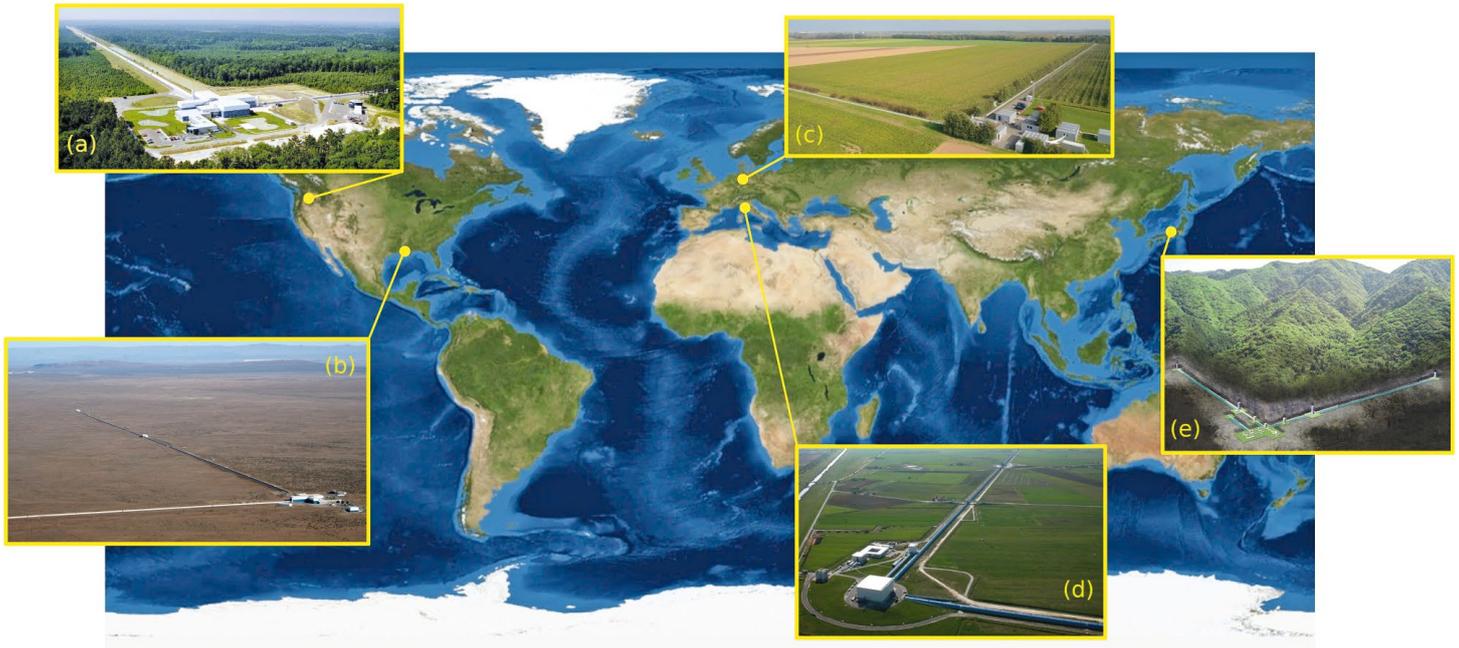
kompakt genug, um mit hohen Geschwindigkeiten in geringem Abstand umeinander zu kreisen. Daher sind es vor allem Systeme aus Neutronensternen – die kompaktesten Sterne, die wir kennen – und Schwarzen Löchern – die kompaktesten „Objekte“, die es in Einsteins Relativitätstheorie gibt –, die sich mittels Gravitationswellen aufspüren lassen.

Doch obwohl in diesen kompakten Doppelsystemen das Vielfache der Sonnenmasse mit Relativgeschwindigkeiten von bis zu 50% der Lichtgeschwindigkeit umeinander kreist, benötigt es hier auf der Erde die genauesten Längenmessinstrumente, die es gibt, um Raumzeitschwingungen aufzuzeichnen. LIGO, Virgo, KAGRA und GEO600 sind solche Instrumente, die mit Hilfe von Laserlicht relative Längenänderungen ihrer beiden im rechten Winkel zueinander stehenden Arme bis hinab zu Größenordnungen von fast  $10^{-22}$  messen können [1]. Anders als Teleskope werden Gravitationswellendetektoren nicht auf eine bestimmte Richtung ins All ausgerichtet. Sie nehmen Raumzeitschwingungen aus nahezu allen Richtungen wahr.

Die beiden LIGO-Detektoren in den USA mit ihren 4 km langen Armen sind dabei Vorreiter in Sachen Messgenauigkeit. Der Virgo-Detektor in Italien, mit seinen immerhin 3 km langen Armen, ist typischerweise mit einem Faktor zwischen 2 und 3 weniger sensitiv, hat aber auch schon entscheidend zu astrophysikalischen Messungen beitragen können. GEO600, südlich von Hannover, dagegen ist mit 600 m Armlänge deutlich kürzer, hat sich aber als die Technologieschmiede für die größeren Detektoren etabliert. Das jüngste Mitglied des Instrumentennetzwerks heißt KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector) und befindet sich mit seinen 3 km langen Armen in der Kamioka-Mine in Japan (Abbildung 1).

Seit 2015 hat nun die zweite Generation von LIGO und Virgo die Tür zum Gravitationswellenuniversum aufgestoßen [2]. Zwischen immer neuen Verbesserungen der Instrumente gab es bisher drei Beobachtungsläufe, in denen für jeweils mehrere Monate die Instrumente möglichst stabil gehalten wurden, um ein vorrangiges Ziel zu verfolgen: Gravitationswellen aus dem Universum aufzuspüren. Der letzte diese Läufe, „O3“ genannt, endete im März 2020 bedingt durch die Corona-Pandemie einen Monat früher als geplant. Zur Entstehungszeit dieses Artikels, im Frühjahr

*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.*



**Abb. 1** Das weltweite Netzwerk von Gravitationswellendetektoren, die mit Hilfe der Laserinterferometrie Raumzeitschwingungen messbar machen. Die einzelnen Instrumente sind: **a)** LIGO Hanford, Washington State, USA. Mit 4 km Armlänge einer der beiden größten und empfindlichsten Gravitationswellendetektoren (Bild: Caltech/MIT/LIGO Lab). **b)** LIGO Livingston, Louisiana, USA; der Zwilling vom LIGO Hanford Detektor (Bild: Caltech/MIT/LIGO Lab). **c)** GEO600 bei Sarstedt, Raum Hannover; ein vergleichsweise kleiner Detektor, der sich als Technologieschmiede für Gravitationswellenmessungen etabliert hat (Bild: Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik/Milde Marketing). **d)** Virgo, Cascina, Italien; der dritte, große Detektor mit 3 km Armlänge (Bild: Virgo Kollaboration). **e)** KAGRA, Präfektur Gifu, Japan; ein 3 km langer Detektor unterhalb der Erdoberfläche in der Kamioka-Mine (Bild: ICRR, Univ. of Tokyo).

2021, waren noch nicht alle Daten vollständig ausgewertet, doch bereits nach umfassender Analyse der ersten beiden Beobachtungsläufe, sowie der ersten Hälfte von O3, zeichnet sich ein beeindruckendes Bild des Gravitationswellenuniversums ab.

Nach dem ersten Beobachtungslauf gab es drei Signale zu bestaunen, die jeweils den letzten Umläufen sowie der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher entsprangen. Woraus kann man das so genau schlussfolgern? Schwarze Löcher, die sich auf nahezu kreisförmigen Bahnen umeinander bewegen, strahlen Energie ausschließlich in Form von Gravitationswellen ab. Der Energieverlust durch die Wellen führt dazu, dass der Abstand zwischen den Objekten abnimmt. Sie kreisen dadurch aber nur noch schneller umeinander und geben noch stärkere Gravitationswellen ab. Dieser Prozess beschleunigt sich zunehmend, bis die Schwarzen Löcher miteinander verschmelzen und das Signal dann rapide abklingt. Die Frequenz der Umläufe ist direkt in den Messdaten wiederzufinden, da die Gravitationswellen mit der zweifachen Umlauffrequenz schwingen. Die Umlauffrequenz nimmt wie oben beschrieben immer schneller zu und führt zu einem für das System charakteristischen Verlauf der Gravitationswelle: dem „Chirp“. In grober Näherung kann dieser beschrieben werden als

$$f(t) = \frac{1}{8\pi} \cdot \left( \frac{c^3}{GM_c} \right)^{5/8} \cdot \left( \frac{5}{\delta t} \right)^{3/8},$$

wobei  $f$  die Frequenz des Gravitationswellensignals ist,  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit,  $G$  die Gravitationskonstante,  $\delta t$  die Zeit bis zur Verschmelzung,  $M_c$  ist die sogenannte Chirpmasse: eine für das System charakteristische Masse, die aus den Massen  $m_1$  und  $m_2$  der beiden umeinander kreisenden Objekte errechnet werden kann:

$$M_c = \frac{(m_1 \cdot m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}.$$

Bemerkenswert sind hier nicht nur die numerischen Werte der Exponenten, die es wohl selten in physikalischen Gesetzen zu finden gibt. Nach den obigen Gleichungen hätten alle Systeme mit den gleichen  $M_c$ -Werten den gleichen Gravitationswellenfrequenzverlauf, unabhängig von den individuellen einzelnen Massen. Dies würde die Identifikation der genauen Eigenschaften des Systems unmöglich machen. Wie also lassen sich weitere Informationen aus dem Signal gewinnen?

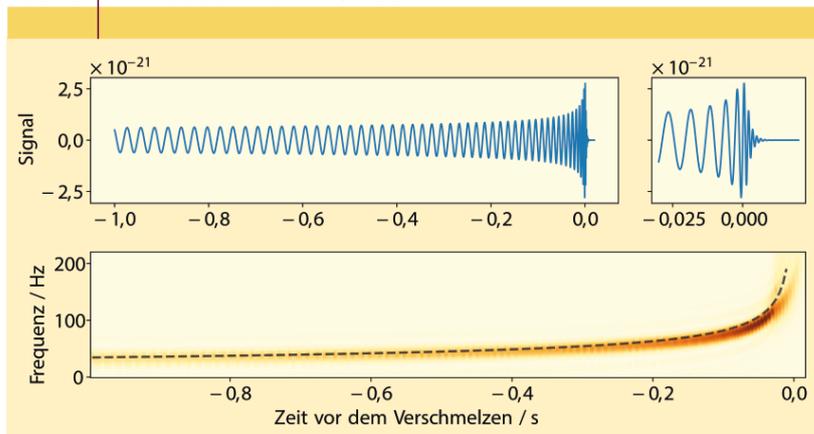
Die Gleichung für  $f(t)$  ist nur eine Näherung, die besonders das verhältnismäßig langsame Umkreisen gut beschreibt. In komplexen Lösungsverfahren der Einsteinschen Gleichungen finden sich viele weitere Korrekturen, die während der letzten Umläufe vor der Verschmelzung entscheidende Beiträge liefern, die es ermöglichen, neben der Chirpmasse auch dem Massenverhältnis und den Drehimpulsen der Schwarzen Löcher zumindest etwas auf

die Spur zu kommen. Seit einem Durchbruch im Feld der numerischen Relativitätstheorie im Jahr 2005 kann auch der komplette Verschmelzungsvorgang und das Abklingen des Signals, wenn das übrigbleibende Schwarze Loch noch gedämpft schwingt, mit Hilfe von Supercomputern berechnet werden. Verbunden mit analytischen Signalvorhersagen des frühen Umkreisens hat man so vollständige Modelle der zu erwartenden Signale zur Hand [3], die den gesamten Verschmelzungsprozess abbilden.

Mehrere hunderttausend solcher simulierten Signale von Doppelsystemen mit verschiedenen Eigenschaften werden in nahezu Echtzeit mit den Daten der Gravitationswellendetektoren abgeglichen. Ist die Korrelation – die in diesem Kontext auch oft Signal-Rausch-Verhältnis genannt wird – zwischen errechnetem Signal und Daten so hoch, dass ein Zufall praktisch ausgeschlossen werden kann, hat man ein astrophysikalisches Signal identifiziert. Tatsächlich ist dies ein komplexer, mehrstufiger Prozess, der sich ausführlich mit dem stationären und nichtstationären Rauschen der Instrumente, den Umgebungsdaten und vielem mehr auseinandersetzt.

Als nächstes wird der Datenbereich, der das Signal enthält, nochmals analysiert. Ziel ist dabei, die Eigenschaften des entdeckten Doppelsystems genau zu identifizieren. Dabei wird abermals die Korrelation zwischen Modellsignalen und Daten berechnet; dieses Mal aber für Millionen von möglichen Systemen in einem stochastischen Prozess. Resultat der aufwendigen Berechnung ist eine mindestens 13-dimensionale Wahrscheinlichkeitsdichte, die unseren Wissensstand für alle wichtigen Eigenschaften quantifiziert:

**ABB. 2 | DAS BEBEN DER RAUMZEIT**



**Eine theoretische Vorhersage der letzten Sekunde des Gravitationswellensignals zweier umeinander kreisender und bei  $t = 0$  verschmelzender Schwarzer Löcher mit jeweils 10 und 15 Sonnenmassen in einer simulierten Entfernung von etwa 330 Millionen Lichtjahren. Das Signal schwingt mit der doppelten Umlauffrequenz und erzeugt relative Längenänderungen von bis zu  $2,5 \text{ pro } 10^{21}$  Längeneinheiten. Oben rechts wird der Abschnitt der Verschmelzung vergrößert dargestellt. Nach dem Kollidieren beider Schwarzer Löcher klingt das Signal schnell ab. Das untere Bild zeigt das Spektrogramm des Signals, in dem der Frequenzverlauf mit der im Text angegebenen Näherungsformel (gestrichelte Linie) verglichen werden kann. Aus der Stärke und dem Frequenzverlauf des Signals können wichtige Eigenschaften der Schwarzen Löcher abgelesen werden.**

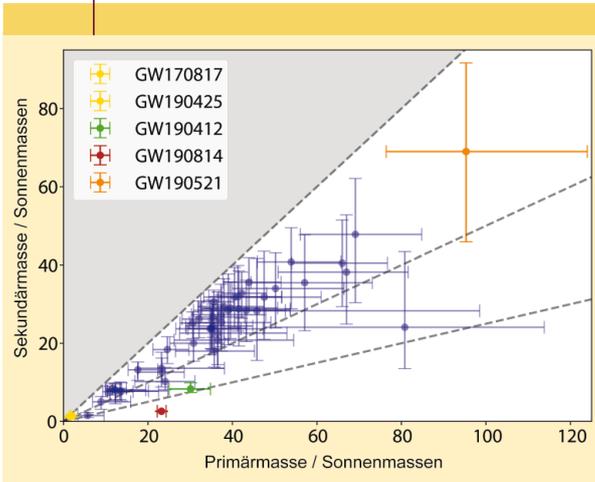
Wo kam das Signal her (zwei Winkel für die Himmelsposition sowie die Entfernung)? Wie war die Quelle zum Detektor orientiert (weitere drei Winkel)? Welche Massen hatten die Schwarzen Löcher (zwei Werte) und was waren ihre Drehimpulsvektoren (zwei dreidimensionale Vektoren)?

### Auch grenzwertige Signale bringen Nutzen

Ende Oktober 2020 hat die LIGO-Virgo-Kollaboration alle bisher vollständig analysierten Ereignisse im zweiten Gravitationswellenkatalog GWTC-2 (Gravitational-Wave Transient Catalog 2) veröffentlicht [4]. Darin finden sich insgesamt fünfzig Signale verschmelzender Doppelsysteme (Abbildung 3), wobei nicht alle Signale in GWTC-2 zweifelsfrei astrophysikalischer Natur sind. Während bei den drei Entdeckungen aus dem ersten Beobachtungslauf kaum Zweifel über ihren Ursprung bestehen, sind mittlerweile die Gravitationswellenmethoden so gut erprobt und das Interesse an möglichen Signalen so groß, dass auch Daten „grenzwertiger“ Signale veröffentlicht werden, deren Falsch-Positiv-Rate bei bis zu zwei pro Jahr liegt. Das heißt, die schwächsten Signale haben ein Signal-Rausch-Verhältnis, das auch zufällig vom Instrumentenrauschen etwa zwei Mal pro Jahr zu erwarten ist. Daraus schlussfolgern die LIGO- und Virgo-Wissenschaftler, dass höchstens 10% ihrer in GWTC-2 veröffentlichten Signale nicht astrophysikalischem Ursprungs sind.

Dennoch ist es interessant, solche grenzwertigen Signale zu veröffentlichen. Einerseits können statistische Methoden, die etwa die Eigenschaften der gesamten Population Schwarzer Löcher analysieren, sehr gut mit solch einer Kontamination umgehen, und lernen dabei immer noch mehr, als würde man ihnen alle Grenzfälle vorenthalten. Andererseits ist es für andere Teleskope interessant, nach Signalen im elektromagnetischen Spektrum, oder in Form von Neutrinos, zu suchen, die mit Gravitationswellensignalen zeitlich und räumlich übereinstimmen. Wenn das passiert, könnten durchaus auch Signale, deren Gravitationswellen nur schwach waren, wichtige Hinweise enthalten.

Die mit fortschreitenden Verbesserungen der Instrumente immer häufiger auftretenden Beobachtungen führten die wissenschaftliche Gemeinschaft schnell an die Grenzen ihrer Namensgebung. Im ersten Katalog reichte es noch, aus dem Datum jeder Beobachtung den Namen abzuleiten: GW151226 hieß zum Beispiel das Signal, das am 26. Dezember 2015 – sozusagen als Weihnachtsgeschenk – aufgenommen wurde. Was aber, wenn mehrere Ereignisse am gleichen Tag identifiziert werden? Gammastrahlenblitze bekommen dafür Buchstaben an den Namen gehängt (GRB 170817A), allerdings kodiert man damit die Reihenfolge der Entdeckungen, nicht unbedingt die zeitliche Reihenfolge der Signale; und wenn am 01.01.2023 ein Gravitationswellensignal identifiziert wird, muss man erst nachschauen, wie viele an diesem Tag schon identifiziert und benannt wurden, bevor der richtige Buchstabe ermittelt werden kann.

**ABB. 3 | GRAVITATIONSWELLENEREIGNISSE**


**Die Gravitationswellenergebnisse des zweiten Gravitationswellenkatalogs GWTC-2, dargestellt durch die beiden im Doppelsystem umeinander kreisenden Massen und ihrer Messunsicherheit. Gestrichelte Linien stellen die Massenverhältnisse 1:1, 1:2 und 1:4 (von links nach rechts) dar. Die Primärmasse ist dem massereicheren Partner im System zugeordnet, daher kann es per Konvention keine Messpunkte im grau schraffierten Bereich geben. Besondere Systeme sind hervorgehoben: die Neutronenstern-Verschmelzungen GW170817 und GW190425 (gelb), das asymmetrische Paar Schwarzer Löcher GW190412 (grün), das Doppelsystem GW190814 (rot), bei dem die Natur des leichteren Partners nicht eindeutig bestimmt werden kann, sowie das ungewöhnlich massereiche System GW190521 (orange). Die zugrunde liegenden Daten können auf <https://www.gw-openscience.org/> abgerufen werden.**

Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, einigten sich die LIGO- und Virgo-Kollaborationen schließlich darauf, dass ab sofort Namen nicht nur den Tag, sondern auch die Zeit des Signals bis zur Sekunde genau angeben, gemessen in der koordinierten Weltzeit UTC. GW190828\_063405 kam am 28.08.2019 um 6:34 Uhr und 5 s bei uns auf der Erde an; gut zwanzig Minuten später kam schon das nächste Signal: GW190828\_065509.

### Weltweit größte Beobachtungskampagne

Aus der Fülle der Signale, die mittlerweile entdeckt wurden, stechen einige besonders interessante und zum Teil auch unerwartete heraus. Um nicht in Zahlen zu versinken, werden deren Namen oft wieder nur mit dem Datum abgekürzt. GW170817 und GW190425 heißen zum Beispiel die zwei Signale, die jeweils durch die Verschmelzung zweier Neutronensterne entstanden. Neutronensterne sind die kompakteste und dichteste Form der Materie, die wir im Universum kennen. Ein Löffel Neutronensternmaterie wäre auf der Erde Milliarden Tonnen schwer. Wenn zwei solcher Materiekugeln, die innerhalb eines Radius von etwas mehr als 10 km typischerweise das 1,5-fache der Sonnenmasse enthalten, aufeinander prallen, kann auch daraus ein Schwarzes Loch entstehen. Allerdings geht das häufig damit

einher, dass einige Materie zunächst herausgeschleudert wird und dem System entweicht und ein anderer Teil als Scheibe um das entstandene Zentralobjekt verbleibt. Diese Dynamik führt zu einer Fülle von elektromagnetischen Signalen, die als Gamma-Blitze, Kilonovae, Röntgen- und Radiowellen aufgenommen werden können – wenn man Glück hat. Glück ist deshalb erforderlich, weil nicht jede Neutronensternverschmelzung überhaupt solche Signale generiert, und selbst wenn, sind manche Strahlungsarten nur in bestimmten Richtungen sichtbar, andere sind eher schwach oder nur von kurzer Dauer.

Bei GW170817 hatte die Forschungsgemeinschaft Glück. Die Quelle war mit etwa 140 Millionen Lichtjahren Entfernung nah genug und obendrein günstig orientiert, sodass sich vielerlei Strahlung nachweisen ließ [5]. Dass die Teleskope bei der weltweit größten, koordinierten Beobachtungskampagne [6] der Geschichte überhaupt wussten, wohin sie schauen sollten, lag vor allem an den Gravitationswellendaten. Denn obwohl die Gravitationswelleninstrumente wie Mikrofone aus allen Richtungen Schwingungen aufnehmen können, kann man aus der Intensität in den einzelnen Instrumenten und vor allem der zeitlichen Reihenfolge, wann das Signal welches der Instrumente erreicht hat, Rückschlüsse ziehen, woher die Welle kommt. Diese Information wird in Form einer Himmelskarte an die Astronomen weitergegeben, die dann mit der Schatzsuche beginnen können.

Ein zweites Mal, im Fall von GW190425 [7], hatte die Forschungsgemeinschaft nicht so viel Glück. Oder besser gesagt, GW190425 war so, wie man es in den meisten Fällen erwarten würde. Die Quelle war mehr als 300 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt und schlecht lokalisierbar, da der LIGO-Detektor in Hanford zur Zeit des Signals für etwa zwei Stunden aufgrund von Wartungsarbeiten nicht im Beobachtungsbetrieb war. Dass sich keine dazugehörigen elektromagnetischen Signale aufspüren ließen, ist also kaum verwunderlich. Im Prinzip könnten die Gravitationswellendaten alleine schon Hinweise darauf geben, ob Schwarze Löcher oder Neutronensterne umeinander kreisen. Einerseits unterscheiden sich die Signale ab dem Moment der Kollision deutlich, andererseits verformen sich Neutronensterne durch die Gezeitenkräfte des Partners im Doppelsystem stärker als Schwarze Löcher, was sie wiederum etwas schneller aufeinander zu kreisen lässt.

Leider sind die aktuellen Instrumente noch nicht empfindlich genug, diese beiden Effekte bei schwachen Signalen aufzulösen. Die Gravitationswellenfrequenzen bei der Kollision und Verschmelzung sind bei Neutronensternen so hoch, dass sie im Quantenrauschen der Instrumente untergehen. Die schwachen Änderungen, die durch die Gezeitenkräfte hervorgerufen werden, sind erst messbar, wenn das Signal laut genug oder die Verformung besonders stark ist. Beides war bisher nicht der Fall. Tatsächlich hat GW170817 sogar erste Hinweise darauf gegeben, dass die Zustandsgleichung der Materie bei extrem hohen Dichten sich so verhält, dass es keine starke Verformung und

damit auch keinen einfach zu messenden Effekt in den Gravitationswellen gibt. Daher bleibt die Erforschung von Neutronensternen weiterhin eines der aufregendsten Ziele der Multi-Messenger-Astronomie, die Daten von Gravitationswellen, elektromagnetischer Strahlung und gegebenenfalls von Neutrino-Detektionen vereint.

Von Schwarzen Löchern hingegen sind kaum andere Signale als Gravitationswellen zu erwarten. Daher beginnt die Forschung auch erst jetzt, diesen dunklen Teil des Universums direkt zu beobachten. Die Schwerkrafteffekte von extrem massereichen Schwarzen Löchern, wie das im Zentrum unserer eigenen Galaxie, werden schon seit Jahrzehnten beobachtet und vermessen [8], aber die kleineren Schwarzen Löcher, die entstehen, wenn schwere Sterne ausgebrannt sind und kollabieren, bleiben der klassischen Astronomie in den meisten Fällen verborgen. Jetzt kommen Gravitationswellenforscher aber auf ihre Spuren und finden eine erstaunlich vielfältige Population von Doppelsystemen, die nur aus Schwarzen Löchern bestehen. Der Großteil der Systeme, die LIGO und Virgo bisher beobachten konnten, haben jeweils eine Gesamtmasse von 40 bis 90 Sonnenmassen, die etwa gleich verteilt auf beide Schwarze Löcher sind. Generell scheint die Natur Doppelsysteme zu bevorzugen, in denen die Masse recht symmetrisch auf beide Partner verteilt ist. Zu starke Asymmetrien erhöhen das Risiko, dass das Paar sich trennt, noch bevor sich das System zu zwei nah umeinander kreisenden Schwarzen Löchern entwickeln kann.

### Ungleiche Partner

Umso erstaunlicher ist es, dass unter den bisher gefundenen Ereignissen einige Ausnahmen von dieser Regel zu finden sind. GW190412 ist beispielsweise ein System Schwarzer Löcher, bei dem ein Partner mehr als drei Mal so massereich ist wie der andere [9]. Das macht seine Entstehung aus einem isolierten System zweier Sterne nicht unmöglich, aber doch schwieriger zu erklären. Doch noch etwas anderes macht GW190412 zu einer Besonderheit. Die ungleichen Massen führen dazu, dass die Gravitations-

wellenschwingungen einen komplexeren „Klang“ haben als die anderen Beobachtungen. Denn im Signal von GW190412 ist nicht nur der oben beschriebene Chirp zu hören, der bei der doppelten Umlauffrequenz klingt. Das Signal enthält auch messbare Obertöne, die mit dreifacher Umlauffrequenz schwingen. Musikfreunde werden das Frequenzverhältnis von 3:2 als reine Quinte kennen. Genau wie Musikinstrumente, deren Klang mehr als die reine Grundfrequenz enthält, klingen also auch verschmelzende Schwarze Löcher in mehreren Harmonischen – erstmals „hörbar“ bei GW190412.

Noch asymmetrischer und mysteriöser war das Signal GW190814 [10]. Hier war das Schwarze Loch mehr als acht Mal massereicher als sein Partner, wobei der kleine Partner selbst Rätsel aufgibt. Mit etwa 2,6 Sonnenmassen ist es ein Objekt, das mehr Masse als jeder bisher bekannte Neutronenstern hat, aber weniger Masse, als man für Schwarze Löcher erwarten würde. Was ist es also? Aus dem Gravitationswellensignal kann man nur schließen, dass es sich um ein kompaktes Objekt handeln muss, ansonsten könnte das System nicht die Geschwindigkeiten erreichen, die das Signal widerspiegelt. Ob es sich aber um einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch handelt, ist bislang nicht aus den Gravitationswellendaten herauszulesen. Andere, etwa elektromagnetische, Signale wurden nicht beobachtet.

So bleibt es der Astrophysik nur, theoretisch fundiert zu spekulieren, wie ein solches System entstanden sein könnte, um seinen Eigenschaften auf die Spur zu kommen. Das leichte Objekt könnte selbst das Produkt einer vorherigen Verschmelzung zweier Neutronensterne sein. Damit ließe sich gut die Entstehung eines so leichten Schwarzen Loches erklären. Allerdings müssten sich die Neutronensterne und der massenreiche Partner in GW190814 dafür in einer besonderen Umgebung befinden, in der es förmlich von Neutronensternen und Schwarzen Löchern nur so wimmelt. Nur so könnten häufig genug solche Mehrfach-Verschmelzungen zustande kommen, dass es plausibel wird, ihr Endergebnis auch tatsächlich zu beobachten. Kugelsternhaufen und junge Sternhaufen kommen dafür als mögliche Ursprungsorte in Frage.

### Rätselhafte Riesen

Was genau passieren musste, um GW190814 zu bilden, wird wohl aber noch eine Weile Rätsel aufgeben und erst bei wiederholter Messung ähnlicher Signale langsam entschlüsselt werden können. Ähnliches gilt für GW190521, dem mit Abstand massereichsten System, das bisher mit Gravitationswellen entdeckt wurde [11]. Etwa 150 Sonnenmassen vereint dieses System zweier Schwarzer Löcher. Seltsam daran ist, dass zumindest das schwerere von ihnen, wenn nicht sogar beide Schwarzen Löcher, so viel Masse enthält, dass sie eigentlich gar nicht existieren dürften; zumindest nicht, wenn sie aus einem ausgebrannten schweren Stern entstanden sein sollen. Denn wenn ein Stern am Ende seines Lebens sehr massereich ist, dann wird der Druck auf sein eigenes Inneres so groß, dass sich freie Paa-



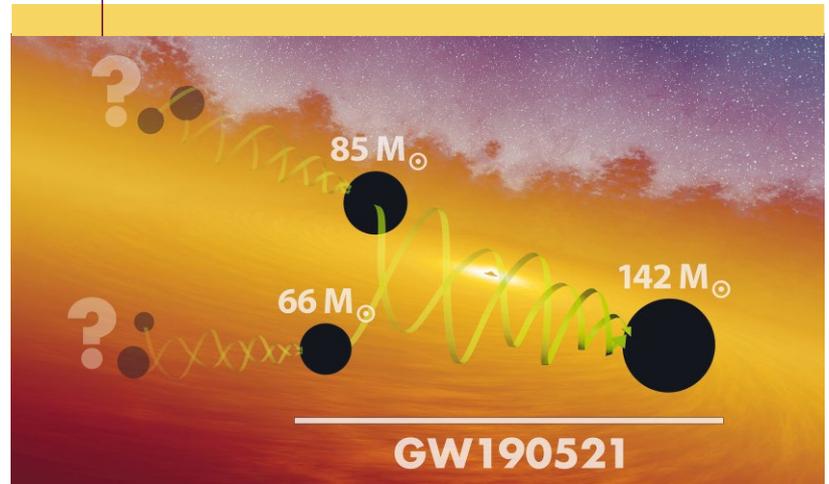
**Zwei LIGO-Techniker installieren die Optik zur Bereinigung der Moden (Foto: LIGO Laboratory).**

re von Positronen und Elektronen bilden. Dieser Prozess absorbiert wiederum Strahlung, die dann nicht mehr den nötigen Gegendruck erzeugt, um der Eigengravitation des Sterns zu widerstehen. Das Resultat: Der Stern zerstört sich selbst in einer gewaltigen Paarinstabilitäts-Supernova, die kein Schwarzes Loch hinterlässt. Dieses Phänomen ist theoretisch gut verstanden und führt zu einer Lücke im Massenspektrum, in dem es keine Schwarzen Löcher geben sollte. Doch GW190521 scheint der Beweis für das Gegenteil zu sein. Ist die Theorie also falsch? Oder sind auch die Schwarzen Löcher, die in GW190521 aufeinander trafen, bereits Produkte vorheriger Verschmelzungen (Abbildung 4)? Oder sind sie gar ganz anderen Ursprungs und existierten bereits im frühen Universum, bevor es überhaupt Sterne gab? Auch hier heißt es nun: warten auf weitere Beobachtungen.

Mit mittlerweile fünfzig beobachteten Doppelsystemen kann aber schon jetzt angefangen werden, verwandte Fragen nach dem „wie viel“ und „wie schwer“ von Schwarzen Löchern statistisch zu beantworten. Das Ganze funktioniert nach dem in der wissenschaftlichen Analyse weit verbreiteten Theorem von Bayes: Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Hypothese für die aufgenommenen Daten korrekt ist, ist proportional zur Wahrscheinlichkeit, dass man die Daten unter Annahme der Hypothese beobachten würde, multipliziert mit der A-priori-Wahrscheinlichkeit für die Hypothese. Diese Formel wird zum Beispiel benutzt, wenn jedes einzelne System analysiert wird. Nahezu jede plausible Annahme darüber, welche Eigenschaften das System haben könnte – also wo befindet sich die Quelle und welche Objekte sind beteiligt –, wird mit den Daten verglichen und berechnet, wie wahrscheinlich oder unwahrscheinlich die beobachteten Daten unter der jeweiligen Annahme wären.

Der Bayessche Formalismus ist exzellent dazu geeignet, nicht nur einzelne Beobachtungen zu untersuchen, um die wahrscheinlichste Erklärung (inklusive Unsicherheitsabschätzung) zu finden. Er lässt sich auch dazu nutzen, eine Hypothese für die Gesamtheit der stellaren Schwarzen Löcher im Universum zu testen. Wie viele Schwarze Löcher gibt es? Wie häufig verschmelzen sie in Doppelsystemen? Welche Massen sind wie häufig vertreten? Bei der Fülle an Beobachtungen ist klar: Das Universum ist voll von Schwarzen Löchern. Allerdings ist auch klar, dass die überwältigende Mehrheit bisher unbeobachtet blieb. Dennoch können auch auf Grundlage relativ weniger Beobachtungen gute Abschätzungen für die Gesamtheit der Schwarzen Löcher getroffen werden. Das ist so, als würden Außerirdische irgendwann die Erde entdecken und zunächst nur zufällig fünfzig Menschen finden. Aus deren Eigenschaften würden sie schon ganz verlässliche Rückschlüsse darüber ziehen können, wie groß, schwer und alt Milliarden von Menschen auf der Erde werden. Nicht alle Rückschlüsse wären exakt, aber die Größenordnung sollte stimmen. So verhält es sich mit unserem Wissen über Schwarze Löcher auch.

ABB. 4 | KOMBINATION VON VERSCHMELZUNGEN



**Eine Illustration der möglichen Entstehungsgeschichte des massereichen Doppelsystems GW190521. Die beiden Schwarzen Löcher sind zu schwer, um direkt aus dem Kollaps von Sternen entstanden zu sein. Möglicherweise sind sie selbst Produkte vorheriger Verschmelzungen, die wiederum in einer Umgebung mit einer hohen Dichte an Schwarzen Löchern auftreten können. Die Nähe zu einem Galaxienkern ist eine solche denkbare Umgebung (Bild: LIGO/Caltech/MIT/R. Hurt, IPAC).**

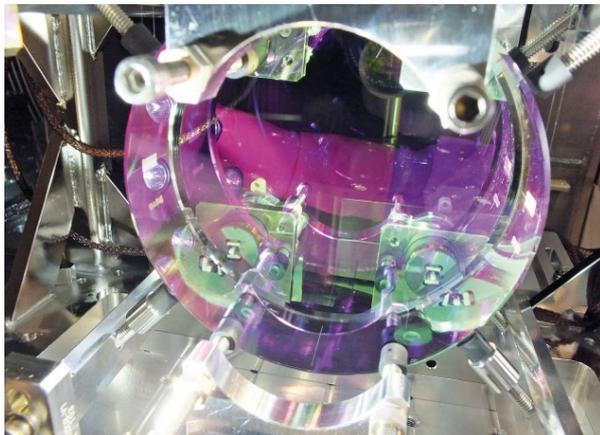
Nach eingehender Analyse [12] der bisher beobachteten Systeme von Schwarzen Löchern stellt sich dabei heraus, dass es mehr „leichte“ als „schwere“ Schwarze Löcher gibt. Genauer gesagt, wenn  $m$  die Masse des größeren Schwarzen Lochs im System ist, dann folgt die Verteilung im Universum grob einem Potenzgesetz,

$$p(m) \sim m^{-\alpha},$$

wobei  $\alpha$  zwischen 1 und 2 liegt. Dass die Beobachtungen von LIGO und Virgo ganz offensichtlich nicht von leichten Systemen dominiert werden, liegt daran, dass die Stärke des Gravitationswellensignals selbst von der Masse abhängt. Massereichere Systeme produzieren stärkere Signale und sind daher in größeren Entfernungen sichtbar. Daher ist ihre Chance, entdeckt zu werden, ebenso größer, und diese Messverzerrung muss aus den Daten herausgerechnet werden.

Die bisherigen Daten zeigen aber auch recht klar, dass ein solch einfaches Potenzgesetz nicht ausreicht, um die beobachtete Verteilung – auch nach Korrektur von Messverzerrungen – zu erklären. Denn in einem Bereich, der knapp unterhalb von 40 Sonnenmassen beginnt, ändert sich die beobachtete Verteilung. Verschmelzungen mit höherer Gesamtmasse tauchen deutlich seltener in den Beobachtungen auf, als man es vom oben genannten Potenzgesetz erwarten würde. Wenn man  $\alpha$  für hohe Massen anpasst, findet man einen deutlich steileren Abfall mit  $\alpha \sim 5$  oberhalb von 40 Sonnenmassen. Als Ursache am plausibelsten ist eine nur dünn besiedelte „Massenlücke“, die durch Paarbildung entsteht (siehe GW190521). Insgesamt verschmelzen pro Volumen eines Würfels mit einer Kanten-

**Die Power-  
Recycling-Optik  
von LIGO** (Foto:  
LIGO Laboratory).



länge von einem Gigaparsec zwischen 15 und 40 Paare Schwarzer Löcher pro Jahr – in dem von LIGO und Virgo messbaren Massebereich. Zum Vergleich: In einem solchen Volumen befinden sich im Schnitt immerhin etwa 10 Millionen milchstraßenähnliche Galaxien.

### Woher stammen die Schwergewichte?

Wo genau all diese Paare von Schwarzen Löchern entstanden und verschmolzen sind, bleibt weiterhin offen. Neben der Massenverteilung und dem Massenverhältnis der Paare gibt es eine weitere wichtige Eigenschaft, die Aufschluss über die Geschichte jedes einzelnen Systems geben könnte: die Drehimpulse der Schwarzen Löcher. Denn wenn ein Paar Schwarzer Löcher in Isolation aus explodierenden Sternen entstanden ist, dann hatten diese Sterne typischerweise eine an ihrer Umgebung ausgerichtete Drehachse, die auch die Schwarzen Löcher übernehmen. Das führt dazu, dass die Eigendrehimpulse der Schwarzen Löcher an dem Drehimpuls des Systems ausgerichtet sind und die Kreisbewegungen umeinander in einer zeitlich unveränderlichen Bahnebene stattfinden.

Ist das Paar allerdings in einer Umgebung mit vielen Schwarzen Löchern daraus entstanden, dass zwei Schwarze Löcher sich zufällig so nahe kamen, dass sie ein gravitativ gebundenes System bildeten, so können die jeweiligen Drehimpulse beliebig orientiert sein. Das ist besonders spannend, da sich nun das gesamte System nicht mehr in einer festen Ebene umeinander bewegt, sondern wie ein Kreisel anfängt zu präzedieren. Der Effekt auf das Gravitationswellensignal ist jedoch schwach, sodass bisher in keinem System eindeutig Präzession nachgewiesen werden konnte.

In der statistischen Analyse gibt es aber zunehmend Hinweise darauf, dass sich die gesamte beobachtete Population besser erklären lässt, wenn zumindest manche der Systeme präzedieren. Vieles deutet also daraufhin, dass wir Doppelsysteme aus verschiedenen Umgebungen wahrnehmen. Manche sind in Isolation aus Sternenpaaren entstanden und haben daher aneinander ausgerichtete Drehimpulse und sehr ähnliche Massen. Andere wiederum entstanden in viel dichteren, dynamischeren Umgebungen, die Präzession und deutlich ungleiche Massen erlauben.

Neben vielen astrophysikalischen Fragen gibt es noch weitere, fundamentale Problemstellungen, die sich mit Gravitationswellenbeobachtungen auf eine ganz neue Art bearbeiten lassen. Eine der vielleicht fundamentalsten Fragen lautet dabei: Ist die Allgemeine Relativitätstheorie auch in Bereichen extremer Gravitation und in dynamischen Systemen gültig? Die Gravitationswellensignale von verschmelzenden kompakten Objekten eröffnen einen Zugang zu eben solchen dynamischen Bereichen, die bisher, beispielsweise durch Beobachtungen in unserem Sonnensystem, unerreichbar waren. Nun aber können theoretische Vorhersagen der Einsteinschen und auch alternativer Theorien mit den Gravitationswellendaten verglichen werden [13]. Bisher besteht die Relativitätstheorie auch diese Prüfung mit Bravour. Allerdings stehen wir erst am Anfang dieser Hochpräzisionstests. Stärkere Signale, ebenso wie eine größere Zahl von Signalen, werden es erlauben, immer feinere Details aufzulösen und dabei die Relativitätstheorie immer tiefergreifender zu testen.

So aufregend wie bisher wird es aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren in der Gravitationswellenastronomie weiter gehen. Die Analysen der zweiten Hälfte der Daten des bereits abgeschlossenen dritten Beobachtungslaufs laufen mit Hochdruck weiter. Eine erste Überraschung wurde daraus kürzlich publiziert [14]. Die Beobachtung zweier ungleicher Paare, bei denen jeweils ein Neutronenstern von einem Schwarzen Loch verschluckt wurde, komplettiert nun endgültig die Sammlung von beobachteten Doppelsystemen. Das Rätsel, wie genau die beiden Systeme GW200105 und GW200115 entstanden sind, reiht sich dabei in die noch zu entschlüsselnde Entstehungsgeschichte der anderen Beobachtungen ein. Aber, und das kann die Forschung nun mit Bestimmtheit sagen, es gibt sie tatsächlich, diese ungleichen Doppelsysteme, in denen ein Neutronenstern entweder von einem Schwarzen Loch zerrissen oder verschluckt wird. Letzteres war wohl bei den jüngsten Beobachtungen der Fall, weswegen es erneut an elektromagnetischem Leuchten fehlte. Die gute Nachricht lautet aber auch hier: Hat man zwei solcher Systeme bereits jetzt gesehen, werden noch viele weitere folgen.

Um diese und andere Beobachtungen zu ermöglichen, arbeiten Instrument-Experten bereits daran, die LIGO- und Virgo-Detektoren sowie den japanischen Detektor KAGRA für den vierten Lauf vorzubereiten. Ab etwa Mitte 2022 sollen sie wieder ins All lauschen – und wenn alles gut läuft, fast jeden Tag neue Paare von Schwarzen Löchern finden. Bisher gab es in jedem Beobachtungslauf Überraschungen zu bestaunen. So vielleicht auch wieder in naher Zukunft. Einzelne rotierende Neutronensterne, die, wenn nicht perfekt rund, ein kontinuierliches Gravitationswellensignal von sich geben, stehen noch auf der Wunschliste der zu entdeckenden Signale, ebenso Supernova-Explosionen. Die Liste an weiteren möglichen Gravitationswellenquellen ist lang. Dazu muss man immer auf das völlig Unbekannte vorbereitet sein. So haben Gravitationswellen einen bisher schwer zugänglichen Teil des Universums aufgedeckt, der

aber theoretisch durchaus gut studiert und vorhergesagt war. Das muss nicht immer so bleiben. Vielleicht dringen Astronomen sowie Theoretiker bald in wahrhaft dunkle Gebiete des Universums vor, die sie nur gemeinsam Schritt für Schritt beleuchten können.

Dabei helfen werden diverse Fortschritte, die sich heute schon abzeichnen, aber hier abschließend nur angerissen werden können. In der Analyse werden Computer und Algorithmen immer leistungsfähiger, und künstliche Intelligenz und neuronale Netzwerke finden immer mehr Anwendung auch in der Gravitationswellenastronomie. Dazu liegen Pläne für die nächste Generation von Gravitationswellenobservatorien längst nicht mehr nur in der Schublade. LISA (Laser Interferometer Space Antenna) heißt die Mission, die Laserinterferometrie ins All befördern soll, um unter anderem auch den extrem massenreichen Schwarzen Löchern mit Hilfe von Gravitationswellen auf die Spur zu kommen [15]. Der Start ist für 2034 geplant. Aber auch auf oder unter der Erde sollen die Laserinterferometer immer größer werden. Cosmic Explorer soll ein LIGO-ähnliches Instrument mit 40 km Armlänge in den USA werden [16]. Der europäische Entwurf heißt Einstein Telescope. Er soll in einer Dreiecksanordnung unterirdisch betrieben werden [17].

Seit Jahrhunderten schauen wir Menschen in den Sternenhimmel und haben dabei viel über das Universum und uns selbst gelernt. Es wurde langsam Zeit, weitere Sinne zu bemühen. Und so steht das 21. Jahrhundert ganz im Zeichen einer neuen Reise durch das Universum, bei der uns Gravitationswellen helfen, die dunkelsten und mysteriösesten Orte zu entdecken.

## Zusammenfassung

Seit 2015 wurden in bisher drei Beobachtungsläufen periodische Raumzeitkrümmungen von großen Laserinterferometern gemessen. Das Ergebnis: Fünfzig Gravitationswellensignale konnten in den Daten gefunden werden, die jeweils vom Umkreisen und Verschmelzen von kompakten Doppelsystemen ausgelöst wurden. Zwei dieser beobachteten Systeme bestanden dabei aus Neutronensternen, die anderen Signale entstammen der Verschmelzung von Schwarzen Löchern. Durch diese Messungen wird ein bisher kaum zugänglicher Bereich des Universums nach und nach sichtbar. Es zeichnet sich ab, dass auch in Zukunft die Signale vieler verschmelzender Schwarzer Löcher, die jeweils 10 bis 40 Sonnenmassen schwer sind, den Großteil der Beobachtungen ausmachen werden. Allerdings hat der erst kürzlich analysierte Beobachtungslauf auch einige überraschende Messungen beinhaltet. Doppelsysteme, in denen die Masse nicht symmetrisch auf beide Partner verteilt ist, wurden erstmals beobachtet und ihr „Klang“ inklusive Obertöne analysiert. In zumindest einem Fall (GW190814) kann das kleine Objekt im System nicht zweifelsfrei identifiziert werden. Bei GW190521 sind die Schwarzen Löcher dagegen so massereich, dass deren Entstehung Rätsel aufgibt. Weitere Beobachtungsläufe, ebenso wie neuartige Gravitationswelleninstrumente, sind

für die Zukunft geplant und werden weitere Einsichten zur Zusammensetzung, Entwicklung und Entstehung des Universums liefern.

## Stichwörter

Gravitationswellen, Gravitationswellenastronomie, LIGO, Virgo, GEO600, KAGRA, Relativitätstheorie, Schwarze Löcher, Neutronensterne.

## Danksagung

Der Autor bedankt sich bei den vielen Kolleginnen und Kollegen der LIGO- und Virgo-Kollaborationen, deren gemeinsame Arbeit die hier beschriebenen Resultate erst ermöglichten. Dank gilt weiterhin David Keitel, Benjamin Knispel, Harald Lück und Bernhard Lampe für viele nützliche Hinweise zu diesem Artikel.

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

## Literatur

- [1] H. Lück, Phys. Unserer Zeit **2017**, 48(3), 124.
- [2] A. Rüdiger, Phys. Unserer Zeit **2017**, 48(6), 272.
- [3] F. Ohme, Class. Quant. Grav. **2012**, 29, 124002.
- [4] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (R. Abbott et al.), 2020, <https://arxiv.org/abs/2010.14527>
- [5] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (B. P. Abbott et al.) Phys. Rev. Lett. **2017**, 119, 161101.
- [6] LIGO Scientific and Virgo Collaborations and many astronomers (B. P. Abbott et al.) Astrophys. J. Letters **2017**, 848, L12.
- [7] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (B. P. Abbott et al.), Astrophys. J. Letters **2020**, 892, L3.
- [8] S. Britzen, A. Müller, Phys. Unserer Zeit **2017**, 48(1), 30.
- [9] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (R. Abbott et al.), Phys. Rev. D **2020**, 102, 043015.
- [10] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (R. Abbott et al.), Astrophys. J. Letters **2020**, 896, L44.
- [11] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (R. Abbott et al.), Phys. Rev. Lett. **2020**, 125, 101102.
- [12] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (R. Abbott et al.), Astrophys. J. Letters **2021**, 913, L7.
- [13] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (R. Abbott et al.), Phys. Rev. D **2021**, 103, 122002.
- [14] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (R. Abbott et al.), Astrophys. J. Letters **2021**, 915, L5.
- [15] LISA Consortium (Pau Amaro-Seoane et al.), **2017**, <https://arxiv.org/abs/1702.00786>.
- [16] LIGO Scientific and Virgo Collaborations (B. P. Abbott et al.), Class. Quantum Grav. **2017**, 34, 044001.
- [17] M. Punturo et al., Class. Quantum Grav. **2010**, 27, 084007.

## Der Autor



Frank Ohme, geboren 1983, studierte Physik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena, promovierte anschließend am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik und der Universität Potsdam und arbeitete von 2012–2016 an der Cardiff University im Vereinigten Königreich. Seit 2017 ist er Leiter einer unabhängigen Max-Planck-Forschungsgruppe am Albert-Einstein-Institut in Hannover. Frank Ohme ist seit 2011 Mitglied der LIGO Scientific Collaboration.

### Anschrift

Dr. Frank Ohme, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Albert-Einstein-Institut, Callinstr. 38, 30167 Hannover.  
[frank.ohme@aei.mpg.de](mailto:frank.ohme@aei.mpg.de)