

Eine neue Ära der Astrophysik

Das Zeitalter der Gravitationswellen-Astronomie hat begonnen

Der 14. September 2015 wird in die Geschichte eingehen. An jenem Tag gelang der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen – 100 Jahre, nachdem Albert Einstein sie vorhergesagt hatte. Damit öffnet sich ein völlig neues Fenster zur Beobachtung des Universums. Insbesondere enge Doppelsysteme aus Neutronensternen und Schwarzen Löchern werden im Fokus dieser neuen Forschungsrichtung stehen.

Von Uwe Reichert

IN KÜRZE

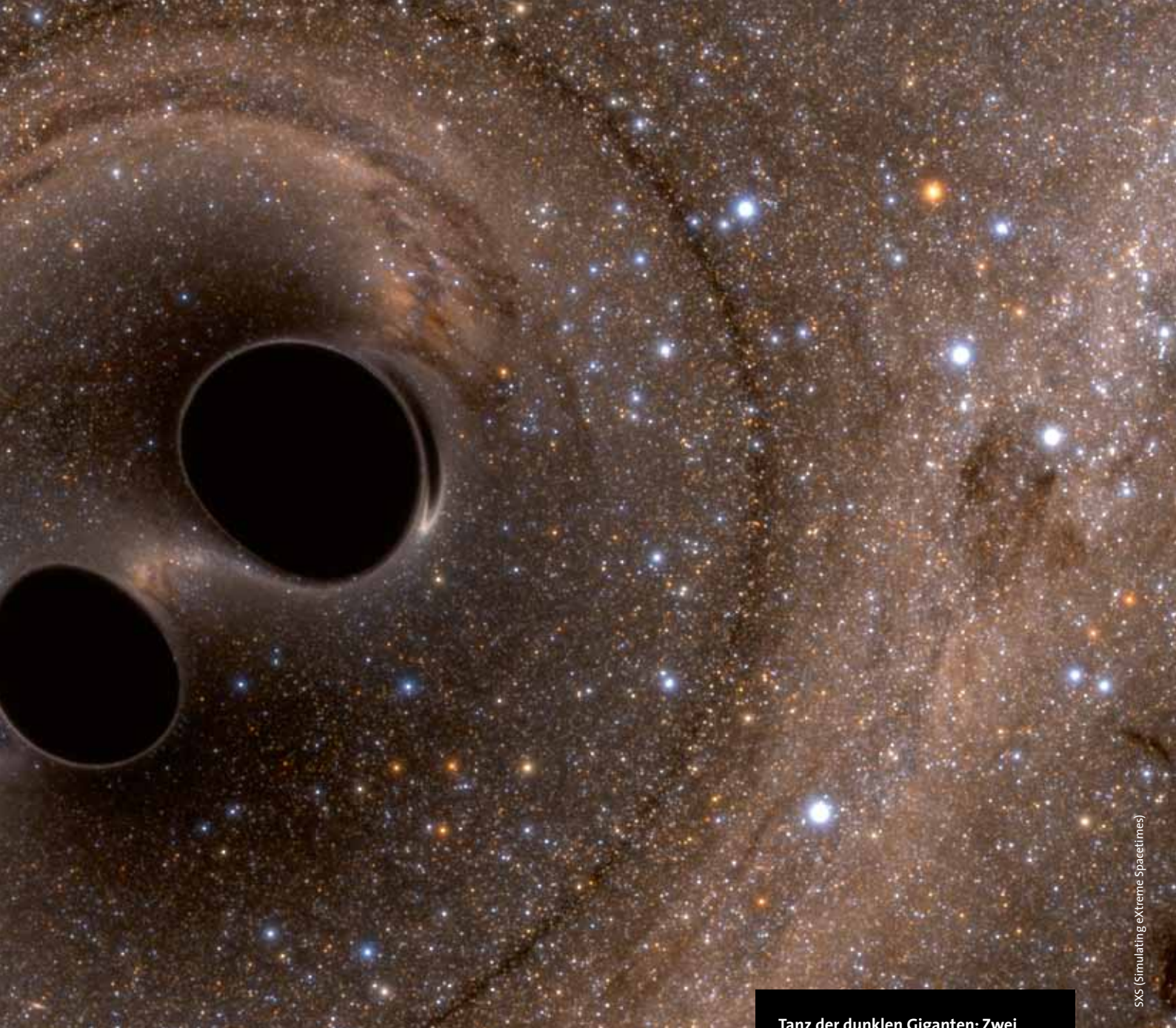
- Mit dem ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen am 14. September 2015 gelang den beiden Advanced-LIGO-Detektoren eine historische Entdeckung.
- Zugleich wurde damit bestätigt, dass es im Universum enge Doppelsysteme aus Schwarzen Löchern stellarer Masse gibt, die zu einem einzigen Schwarzen Loch verschmelzen können.
- Sowohl die Gravitationswellen als auch die Schwarzen Löcher verhalten sich exakt so, wie es 100 Jahre zuvor Albert Einstein und Karl Schwarzschild anhand von Lösungen der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt hatten.

Marco Drago war der Erste, der das Signal sah. Der italienische Postdoktorand saß am 14. September 2015 an seinem Arbeitsplatz am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Hannover. Hier überwachte er Datenströme, die von LIGO, dem Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory in den USA, eintrafen und nun hier in Hannover von einem Superrechner ausgewertet wurden. Dieser Computercluster namens ATLAS ist weltweit der leistungsfähigste Großrechner, der für die Analyse von Gravitationswellendaten eingesetzt wird.

Drago telefonierte gerade mit einem Kollegen aus Italien, als er von dem automatischen Auswertesystem eine Alarm-

meldung erhielt. Die Rechner hatten aus den Rohdaten ein »Ereignis« herausgefischt. Das bedeutete: Die beiden LIGO-Detektoren in den USA hatten zeitgleich ein Signal registriert, bei dem es sich um den lange ersehnten Nachweis einer Gravitationswelle handeln könnte.

Wie derartige Signaturen aussehen sollten, wusste Drago genau. In seiner Doktorarbeit an der Universität Padua hatte er einen Algorithmus entwickelt, mit dem sich die Rohdaten von Gravitationswellendetektoren wie LIGO rasch auf solche Muster hin analysieren lassen. Als er nun auf den Monitor seines Computers blickte, zeigte dieser ihm ein Signal wie aus dem Lehrbuch: Nicht verrauscht, wie zu erwarten wäre, sondern klar und deutlich stach es aus den Messdaten heraus.



SXS (Simulating extreme Spacetimes)

Aufgefangen hatten die LIGO-Detektoren das Signal wenige Minuten zuvor, um 11:50:45 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit. In Livingston, Louisiana, wo der eine Detektor steht, war es nun 5 Uhr in der Frühe. In dem 3000 Kilometer weiter nordwestlich gelegenen Hanford, Washington, dem Standort des zweiten Detektors, zeigten die Uhren sogar erst 3 Uhr morgens. Sollte dort zu nachtschlafender Zeit jemand ein künstliches Signal eingespeist haben?

An sich wäre das nichts Ungewöhnliches, denn solche Testsignale dienen dazu, das Betriebs- und Auswertepersonal zu trainieren und alle Abläufe von der Detektion über die Datenanalyse bis zur Fertigstellung einer wissenschaftlichen Veröffentlichung unter realistischen Bedingungen durchzuspielen. Nur wenige

Personen, die zur Geheimhaltung verpflichtet sind, wissen im Vorfeld von solchen Testsignalen. Andererseits liefen die LIGO-Detektoren noch im Experimentalbetrieb. Während einer rund fünfjährigen Umbauphase waren komplett neue technische Systeme eingebaut worden, um die Empfindlichkeit der Anlagen zu steigern. Die nötigen Kalibrierungsarbeiten waren erst am 12. September abgeschlossen worden, und die offizielle Einweihung der nun Advanced LIGO genannten Detektoren sollte erst in vier Tagen, am 18. September, erfolgen. Es gab also zum fraglichen Zeitpunkt keinen Grund, Testsignale einzuspielen – und auch noch gar nicht die technische Möglichkeit dafür.

Drago zog seinen Kollegen Andrew Lundgren hinzu, der ebenfalls als Post-

Tanz der dunklen Giganten: Zwei Schwarze Löcher umkreisen einander in geringem Abstand. Ihre jeweiligen Gravitationsfelder sind so stark, dass sie das Gefüge der Raumzeit extrem verzerren. Dadurch erscheint das von entfernten Sternen und Galaxien kommende Licht in ihrer Umgebung stark abgelenkt. Die Computersimulation beruht auf den Daten der LIGO-Detektoren und zeigt zwei Schwarze Löcher mit der 29- und der 36-fachen Sonnenmasse wenige Hundertstel Sekunden vor ihrer Verschmelzung.

Animation der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher:
<http://bit.ly/1QKCf5R>



doktorand am Albert-Einstein-Institut forsch. »Zu schön, um wahr zu sein!«, war auch seine erste Reaktion. Um zu klären, ob das Signal künstlichen Ursprungs oder die Folge einer wie auch immer gearteten Betriebsstörung oder einer Rauschquelle sein konnte, riefen die beiden jungen Wissenschaftler in den USA an. In Hanford meldete sich zu dieser Zeit niemand. In Livingston erreichten sie den diensthabenden Operator, William Parker. Von irgendwelchen Auffälligkeiten im Betriebsablauf war ihm nichts bekannt.

Die Aufregung der beiden Postdoktoranden in Hannover wuchs. Die von den Rechnern herausgefischte Signatur ähnelte genau derjenigen, die man von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher erwartete, die sich gewissermaßen in einem Todeskuss vereinigen und dabei das Raumzeit-Gefüge erzittern lassen. Wellenform, Frequenzverlauf, Zeitdauer – alles passte. War tatsächlich ein Gravitationswellensignal ins Netz gegangen?

Das Ereignis GW150914 elektrisiert die Forscher

Um sicherzustellen, dass sie nicht einer Fehlinterpretation aufsaßen, fragte Drago per Rundmail bei allen Mitgliedern der LIGO Scientific Collaboration nach, ob jemand etwas von der Einspeisung eines künstlichen Signals wüsste. Niemand bejahte. Aber nun wussten alle, dass etwas registriert worden war, das offenbar nicht auf ein absichtlich eingebrachtes Signal zurückzuführen war. Die Aufmerksamkeit war geweckt.

Der LIGO Scientific Collaboration gehören weltweit rund 1000 Wissenschaftler an. Sie sitzen nicht nur am California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena und am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, die für

den Betrieb der beiden LIGO-Detektoren zuständig sind, sondern an mehr als 90 Forschungseinrichtungen in den USA und 14 weiteren Ländern. Mit zum Forschungsverbund gehört der deutsch-britische Gravitationswellendetektor GEO600 in der Nähe von Hannover. Dieser wird vom Albert-Einstein-Institut der Max-Planck-Gesellschaft (mit Sitz in Hannover und Potsdam-Golm), der Leibniz Universität Hannover und englischen Partneruniversitäten betrieben. Eine enge Zusammenarbeit gibt es mit der Virgo Collaboration, die den französisch-italienischen Detektor Virgo in der Nähe von Pisa betreibt. Virgo wird gegenwärtig – wie bereits zuvor LIGO in den USA – mit empfindlicherer Technik umgerüstet; die Inbetriebnahme ist für Ende 2016 vorgesehen.

Naturgemäß dauerte es nur wenige Stunden, bis die Nachricht von einem Ereignis jeden innerhalb dieser großen Gruppe erreicht hatte. GW150914 lautete die Bezeichnung im Laborjargon – GW steht für gravitational wave, also Gravitationswelle, während die Ziffernfolge das Datum angibt (Jahr, Monat, Tag). Doch die Bedeutung, die diesem nüchternen Kürzel für die Gravitationswellenforschung zukommt, erschloss sich den Wissenschaftlern erst nach und nach. Schließlich trug GW150914 trotz der verräterischen Signatur nicht den Aufdruck »Ich bin ein Gravitationswellensignal«, sondern es galt nun, in bewährter wissenschaftlicher Methodik zunächst alle Fehlerquellen auszuschließen. Bahnbrechende Entdeckungen kommen selten in Form eines spontanen Durchbruchs, sondern schleichen sich oft in einem langsamen, arbeitsintensiven Erkenntnisprozess ins Bewusstsein ein.

In der Zwischenzeit hatten Drago und Lundgren in Hannover von dem kleinen Team, das für die verdeckte Einspeisung

von Testsignalen verantwortlich war, die Bestätigung erhalten, dass nichts Derartiges geschehen sei. In der nächsten Status-Telekonferenz teilte Lundgren das seinen Kollegen jenseits des Atlantiks mit. Einer der Teilnehmer erinnert sich, wie Alan Weinstein, der die LIGO-Datenanalyse-Gruppe am Caltech leitet, noch einmal ganz langsam rückfragte, um sich zu vergewissern: »Andy, du willst damit sagen, dass es keine verdeckte Einspeisung gegeben hat?« Als Lundgren bestätigte, wurde den Gesprächsteilnehmern bewusst, dass die Forschungsgruppe wissenschaftliches Neuland betreten hatte.

In der Folge mussten die LIGO-Wissenschaftler ihre Pläne modifizieren. Anstatt im experimentellen Betrieb der Detektoren weitere Veränderungen und Anpassungen vorzunehmen, galt es nun, die bestehende Konfiguration besser zu verstehen und insbesondere das Rauschverhalten detaillierter zu untersuchen. Dies erforderte einige Tage. Parallel dazu lief die Auswertung des Signals GW150914 weiter. Und die Forscher standen vor dem Problem, einerseits Kollegen aus der beobachtenden Astronomie um Nachbeobachtungen in möglichst vielen verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums zu bitten, andererseits aber ein unkontrolliertes Brodeln der Gerüchteküche zu verhindern. Nichts konnten die Wissenschaftler jetzt weniger gebrauchen als von außen ausgeübten Druck, doch endlich die Entdeckung eines Gravitationswellensignals bekannt zu geben. Schließlich gab es gerade in der jüngsten Vergangenheit mehrere Beispiele, wo Wissenschaftler viel zu früh, ohne ausreichende Prüfung und Begutachtung ihrer Ergebnisse, mit vermeintlich bahnbrechenden Entdeckungen über Pressekonferenzen an die Öffentlichkeit gegangen waren. Eine sol-

Gravitationswellen: 100 Jahre von der Vorhersage bis zur Entdeckung

<p>1915 Albert Einstein präsentiert seine allgemeine Relativitätstheorie</p>	<p>1916 Aus seiner Theorie leitet Albert Einstein die Existenz von Gravitationswellen ab. Karl Schwarzschild beschreibt Größe und Verhalten eines Schwarzen Lochs</p>	<p>1958 Erste Versuche von Joseph Weber an der University of Maryland, Gravitationswellen mittels Resonanzdetektoren nachzuweisen</p>
---	--	--

Gravitationswellen – Kräuselungen der Raumzeit

Gravitationswellen sind eine wichtige Vorhersage von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Dieser Theorie zufolge wird die Gravitation vermittelt durch Verformungen der vierdimensionalen Raumzeit. Griffig ausgedrückt: Unter dem Einfluss von Massen (oder Energie) wird die Raumzeit verzerrt; diese Krümmung gibt wiederum materiellen Körpern und Lichtstrahlen vor, wie sie sich in Raum und Zeit zu bewegen haben.

Die Verformbarkeit der Raumzeit ermöglicht die Ausbreitung von Wellen. Immer dann, wenn Massen beschleunigt werden, verursachen sie Kräuselungen der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Einstein selbst folgerte die Existenz solcher Gravitationswellen aus einer mathematischen Lösung der Feldgleichungen seiner Relativitätstheorie. Damit gelangte er zu einer völlig neuen Vorstellung von der Schwerkraft, denn nach der bis dahin anerkannten Gravitationstheorie von Isaac Newton würde sich die Wirkung der Gravitation ohne Zeitverlust im gesamten Universum bemerkbar machen.

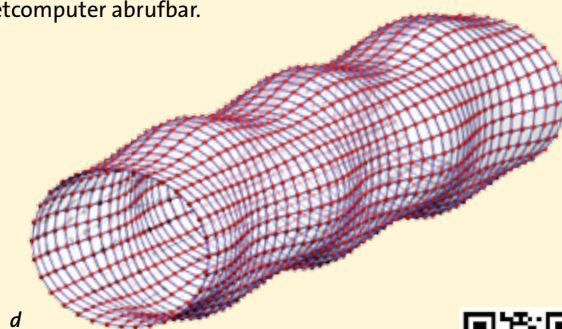
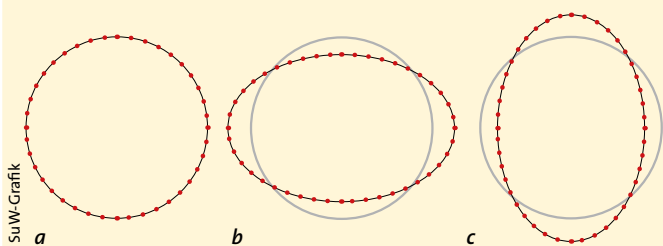
Es besteht eine gewisse Analogie zwischen Gravitationswellen und elektromagnetischen Wellen (wie zum Beispiel Licht oder Radiostrahlung). Beschleunigte elektrische Ladungen senden elektromagnetische Strahlung aus. Das ist uns von der Rundfunktechnik her vertraut: Oszillierende Elektronen in einer Antenne strahlen die zu übertragende Information als Radiowellen ab. Auf ähnliche Weise emittieren beschleunigte Massen Gravitationsstrahlung. Und beide Wellenarten breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, und zwar als Transversalwellen: Die Ausbreitung erfolgt senkrecht zur Schwingungs- beziehungsweise Verzerrungsrichtung. Ansonsten gibt es grundsätzliche Unterschiede zwischen Gravitations- und elektromagnetischen Wellen, da sie auf verschiedenen fundamentalen Wechselwirkungen beruhen. Da die Schwerkraft um viele Größenordnungen schwächer ist als die elektromagnetische Kraft, sind Gravitationswellen erheblich schwieriger nachzuweisen als Lichtwellen.

Aber anhand der Analogien können wir ein Verständnis für die Ausbreitung von Gravitationswellen entwickeln.

Betrachten wir ein einfaches geometrisches Modell, und zwar einen Querschnitt durch eine Gravitationswelle, senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung: Stellen wir uns zunächst einen Kreis vor, auf dem eine beliebige Anzahl von punktförmigen Testmassen liegt; diese Testmassen sollen frei beweglich im Raum schweben und durch keinerlei Kräfte miteinander verbunden sein (siehe Grafik a). Eine Gravitationswelle, die nun senkrecht durch die Papirebene läuft, verformt diesen Kreis zu einer Ellipse: In einer Richtung wird der Kreis gedehnt, in der Richtung senkrecht dazu gestaucht (siehe Grafik b). Beim weiteren Durchgang der Welle biegt sich die Ellipse wieder zurück zu einem Kreis, und in der nächsten Halbschwingung wird der Kreis in die andere Richtung gedehnt beziehungsweise gestaucht (siehe Grafik c). Nach einer vollständigen Schwingungsperiode haben sich alle Teilchen erneut in eine Kreisform begeben.

Für einen äußeren Beobachter (wie wir als Leser, die den Kreis auf der Papirebene betrachten) sieht es so aus, als würde sich der Abstand der Teilchen, die auf dem Kreis liegen, rhythmisch ändern. Dies ist unmittelbarer Ausdruck der Veränderung der lokalen Geometrie durch die Gravitationswelle.

Stellen wir uns nun viele hintereinanderliegende Kreise vor, so erhalten wir einen Schlauch, dessen Oberfläche wellenförmig zusammen- und auseinandergezogen wird (siehe Grafik d). Eine Animation dieser Wellenbewegung, die Markus Pössel vom Haus der Astronomie in Heidelberg erstellt hat, ist über den beistehenden QR-Code per Smartphone oder Tabletcomputer abrufbar.



Visualisierung einer ebenen Gravitationswelle konstanter Frequenz: <http://bit.ly/10OuTgn>

M. Pössel / www.einstein-online.info

1974

Russell Hulse und Joseph Taylor entdecken den ersten Pulsar in einem Doppelsystem: PSR 1913+16 umkreist einen Neutronenstern auf enger Bahn in 7,75 Stunden

1975

Das Max-Planck-Institut für Astrophysik in München beginnt als erste Gruppe weltweit mit Forschungen zur Gravitationswellen-Detektion mit Interferometern

1979

Indirekter Nachweis von Gravitationswellen: Hulse und Taylor zeigen, dass das Doppelsternsystem mit dem Pulsar PSR 1913+16 durch Abstrahlung von Gravitationswellen Energie verliert

Quellen von Gravitationswellen

Sets dann, wenn Massen beschleunigt werden, erzeugen sie Gravitationswellen. Theoretisch lösen wir bereits mit jeder Handbewegung solche Schwingungen der Raumzeit aus. Auch wenn wir eine Metallkugel auf und ab bewegen oder sie wie beim Hammerwerfen im Kreis herumschleudern, sollte die Raumzeit erzittern (siehe Bild links).

Allerdings sind die Gravitationswellen, die wir mit einem Hammerwurf erzeugen, vernachlässigbar klein. Die im Kasten »Gravitationswellen – Kräuselungen der Raumzeit« gezeigten Grafiken illustrieren zwar die Wellenbewegung, aber sie stellen die Amplitude stark übertrieben dar. In Wahrheit ist die Raumzeit nämlich äußerst steif und deswegen kaum verformbar.

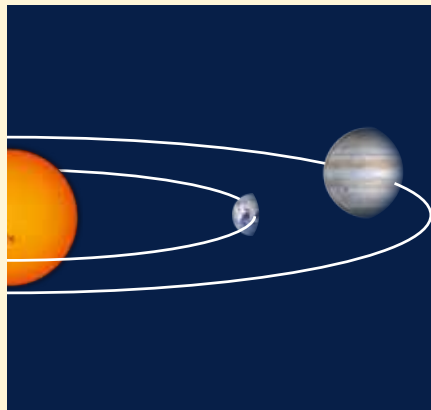
Dies mag ein Vergleich mit gewöhnlichen Stoffen verdeutlichen: Elastisches Gummi zum Beispiel hat einen Elastizitätsmodul um 0,05 Gigapascal. Demgegenüber beträgt dieser Materialkennwert für Stähle rund 200 Gigapascal. Stahl ist somit etwa 4000 Mal steifer als Gummi. Die Raumzeit ist jedoch nochmals um 22 Größenordnungen steifer – ihr lässt sich ein Elastizitätsmodul von rund 10^{24} Gigapascal zuschreiben.

Deshalb haben nur die energiereichsten Quellen im Universum eine Chance, messbare Wellen in der Raumzeit auszulösen. Selbst der Umlauf von großen Planeten um ihr Zentralgestirn reicht für detektierbare Gravitationswellen nicht aus (siehe Bild Mitte). Gute Kandidaten sind hingegen Supernova-Explosionen, Doppelsysteme aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern, die sich auf engen Bahnen umkreisen, sowie Verschmelzungen solch kompakter und massereicher Himmelskörper (siehe Bild rechts).

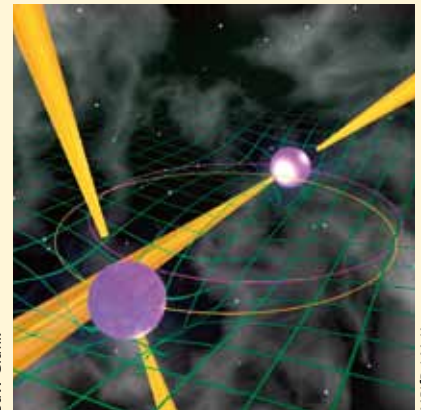
Doch auch die von solchen Quellen verursachten Erschütterungen der Raumzeit sind äußerst winzig. Wenn zum Beispiel in unserem Milchstraßensystem zwei Neutronensterne verschmelzen – was nur alle paar Millionen Jahre geschehen dürfte –, dann sind die durch die Gravitationswellen erzeugten relativen Längenänderungen am Ort der Erde nur in der Größenordnung von 10^{-20} . Der Abstand Erde–Sonne, der rund 150 Millionen Kilometer beträgt, würde sich dann nur um etwa den Durchmesser eines Atoms verändern. Dies stellt extreme Anforderungen an die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors.



fotolia / Salome (M)



SuW-Grafik



MPIFR / M. Kramer

Ein Hammerwerfer dürfte beim Schwungholen wohl kaum daran denken, dass er mit der kreisenden Metallkugel Gravitationswellen im Gefüge der Raumzeit auslöst. Der Effekt ist freilich um viele Größenordnungen zu klein, als dass er gemessen werden könnte – egal wie stark sich der Athlet anstrengt.

Ein Planet in einer Umlaufbahn strahlt bereits stärkere Gravitationswellen ab. Die Erde wandelt aber nur 200 Watt aus ihrer Bahnbewegung in Gravitationswellen um, der Riesenplanet Jupiter immerhin 5300 Watt. Auch dies ist für eine messbare Erschütterung der Raumzeit um viele Größenordnungen zu klein.

Gute Kandidaten sind Doppelsysteme aus kompakten Neutronensternen, die sich innerhalb weniger Stunden umrunden. Der Doppelpulsar PSR J0737-3039 beispielsweise strahlt rund 10^{47} Watt in Form von Gravitationswellen ab – das ist fast so viel, wie alle Sterne im Universum im sichtbaren Licht aussenden.

1983

Das Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching baut einen interferometrischen Gravitationswellendetektor mit 30 Meter Armlänge

1984

Das Caltech und das MIT in den USA vereinbaren den Bau des interferometrischen Gravitationswellendetektors LIGO

1989

Deutsche und britische Forschergruppen beschließen den gemeinsamen Bau eines interferometrischen Gravitationswellendetektors

che Peinlichkeit wollte und musste man unbedingt vermeiden.

Advanced LIGO beendete schließlich die erste wissenschaftliche Datenaufnahme nach vier Monaten, am 12. Januar 2016. In dieser Zeit war die Empfindlichkeit der Detektoren drei bis vier Mal so hoch wie vor dem Umbau, und die Forscher lernten, die Eigenheiten und das Verhalten der Anlagen besser zu verstehen. Am 21. Januar reichten die LIGO Scientific Collaboration und die Virgo Collaboration, die das Signal gemeinsam ausgewertet hatten, eine Fachpublikation bei dem renommierten Journal »Physical Review Letters« ein. Nach Durchlaufen des Gutachterprozesses erschien der Aufsatz am 11. Februar.

Für diesen Tag wurden zeitgleich mehrere Pressekonferenzen in verschiedenen Ländern anberaumt, um die Medien und die Öffentlichkeit zu informieren. Als

David Reitze, der Leiter des LIGO-Experiments, an jenem 11. Februar 2016 vor die Kameras trat, machte er keine langen Umschweife: »We have detected gravitational waves – we did it!«, verkündete er stolz.

Aber was genau hatten die LIGO-Detektoren registriert? Und welche Informationen konnten die Wissenschaftler aus dem Signal GW150914 herauslesen? Um diese Fragen zu beantworten, schauen wir uns zunächst die Messtechnik näher an.

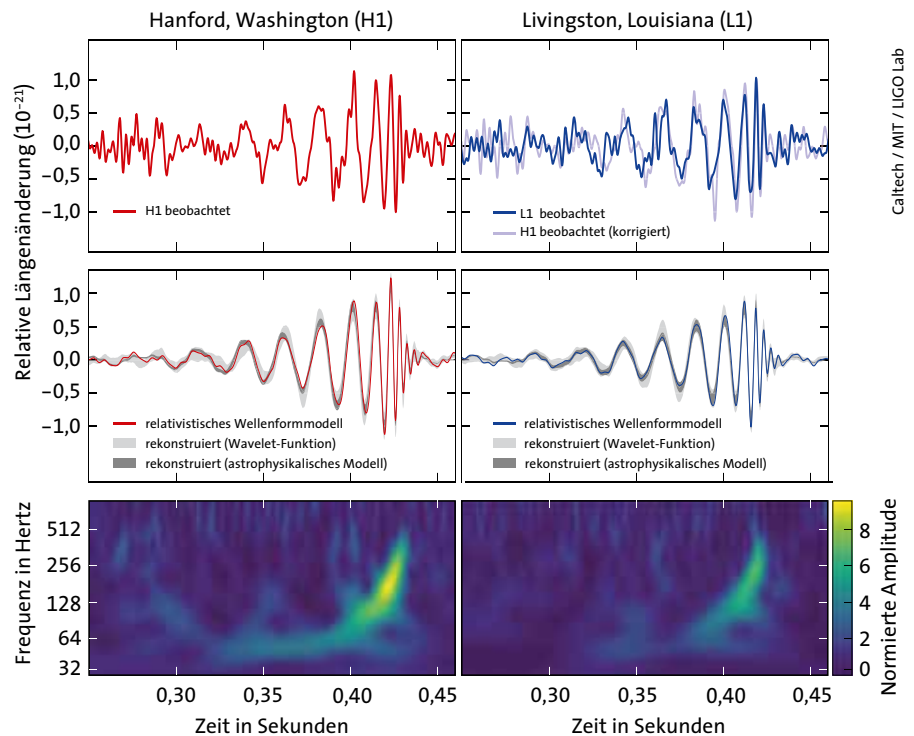
Modernste Detektortechnologie

Gravitationswellen sind winzige Erschütterungen der Raumzeit (siehe Kasten »Gravitationswellen – Kräuselungen der Raumzeit«, S. 27). Um sie zu messen, bedienen sich Forscher des Prinzips eines Interferometers, wie es bereits Ende des 19. Jahrhunderts von Albert Michelson und Kollegen entwickelt wurde (siehe

Kasten »Prinzip eines Laserinterferometers«, S. 30). Das LIGO-Experiment in den USA besteht aus zwei identischen Interferometern, die allerdings im Detail weit komplizierter aufgebaut sind als die ursprüngliche Version von Michelson. In beiden Anlagen wird Laserlicht durch zwei jeweils vier Kilometer lange, L-förmig angeordnete Vakuumröhren geschickt. Aufgabe des Laserstrahls ist es, die Position von Spiegeln an den Röhrenden hochpräzise zu vermessen. Dies geschieht durch interferometrische Überlagerung der beiden Teilstrahlen, welche die beiden Interferometerarme mehrfach durchqueren. Im Normalbetrieb wird die Anlage so eingestellt, dass sich die überlagerten Teilstrahlen am Ort des Empfängers, einer Fotodiode, auslösen.

Durchläuft nun eine Gravitationswelle den Detektor, verzerrt dies nach Einsteins

Das Gravitationswellensignal GW150914 traf zuerst im Detektor L1 in Livingston ein und 6,9 Millisekunden später im Detektor H1 in Hanford. Während der Signaldauer von 0,2 Sekunden stieg die Frequenz von 35 auf 250 Hertz, und die Spitzenamplitude erreichte 10^{-21} . Wie die Überlagerung der beiden Messungen zeigt, sind Wellenform und Frequenzverlauf identisch. Genau ein solches Signal sagen relativistische Modelle vorher, welche die Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern beschreiben (mittlere Zeile). Die Parameter eines solchen Systems lassen sich aus der gemessenen Wellenform ermitteln.



1994

Baubeginn für die beiden Gravitationswellendetektoren LIGO in Hanford, Washington, und Livingston, Louisiana

1995

Baubeginn für den deutsch-britischen Gravitationswellendetektor GEO600 in Ruthe bei Hannover

1997

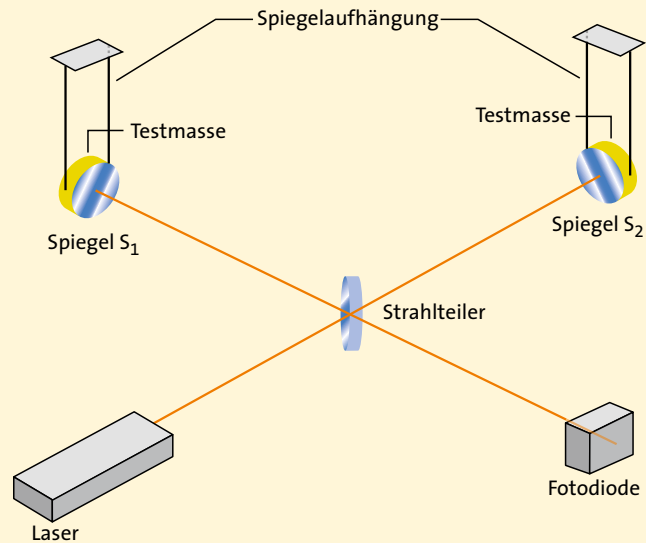
Gründung der LIGO Scientific Collaboration, der LIGO und GEO600 angehören

Prinzip eines Laserinterferometers

Grundlage eines Gravitationswellendetektors ist ein Interferometer. Darin wird ein Laserstrahl zunächst an einem Strahlteiler in zwei senkrecht zueinander stehende Lichtwege aufgeteilt. Die Teilstrahlen laufen die beiden Interferometerarme zu den Spiegeln S_1 und S_2 entlang (siehe Grafik). Von dort werden sie zurück zum Strahlteiler reflektiert, wo sie sich überlagern und dann als Signalstrahl auf eine Fotodiode treffen. Die Helligkeit des Signalstrahls hängt davon ab, in welcher relativen Phase die Teilstrahlen interferieren. Die Anlage wird so eingestellt, dass die beiden Strahlen in Ruhe genau um eine halbe Wellenlänge versetzt aufeinandertreffen und sich auslöschen (destruktive Interferenz).

Alle optischen Elemente sind über spezielle Aufhängungen von der Umgebung entkoppelt; auf sie wirken also keine Kräfte. Wenn nun eine Gravitationswelle die Anlage durchläuft, ändert sie nicht die Lage der Testmassen, sondern deren Eigenabstand. (Die Spiegel verhalten sich wie die Testmassen im Kasten »Gravitationswellen – Kräuselungen der Raumzeit«.) Da die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, benötigt das Licht nun zum Durchlaufen des einen Arms mehr Zeit als für den anderen. Dadurch löschen sich die überlagerten Teilstrahlen nicht mehr vollständig aus, und die Fotodiode misst ein Signal. Mit hinreichend frequenzstabilem Laserlicht lassen sich auf diese Weise Verschiebungen von winzigen Bruchteilen einer Lichtwellenlänge bestimmen.

Die Messempfindlichkeit eines solchen Detektors steigt mit der Länge der Interferometerarme. Im Fall der beiden Advanced-LIGO-Detektoren sind sie jeweils vier Kilometer lang. Mit verschiedenen Modifikationen des ursprünglichen Interferometerprinzips ließ sich die Empfindlichkeit weiter steigern. So wurden zusätzliche Spiegel eingebracht, die mit den Spiegeln S_1 beziehungsweise S_2 einen Resonator bilden, in dem die Laserstrahlen vielfach hin und her laufen. Damit erhöht sich die verfügbare Lichtleistung (Power-Recycling), und das Rauschen im Signalstrahl wird reduziert (Signal-Recycling).



M. Pitkin et al., 2011 / SuW-Grafik



LIGO Scientific Collaboration



LIGO Scientific Collaboration

2001

Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam übernimmt in Hannover die Aktivitäten des MPI für Quantenoptik

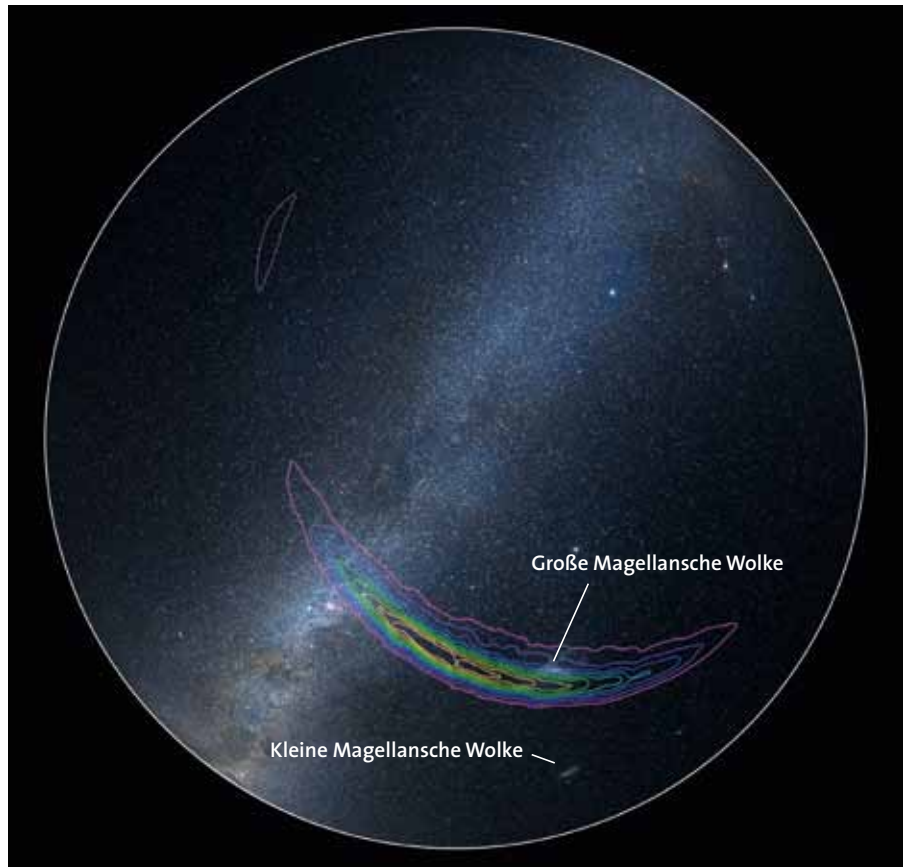
2002

Erster Koinzidenz-Testlauf von LIGO und GEO600

2007

Inbetriebnahme des französisch-italienischen Gravitationswellendetektors Virgo in Italien

Die Quelle, die das Signal GW150914 erzeugte, lässt sich am südlichen Sternhimmel verorten. Die farbigen Kurven repräsentieren unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten (in Schritten von zehn Prozentpunkten), mit denen die Position eingegrenzt werden kann. Mit einer Wahrscheinlichkeit von zehn Prozent kam das Signal aus der durch die innerste gelbe Kurve umschlossenen Region. Die äußere Kurve (lila) markiert eine 600 Quadratgrad große Region, aus der das Signal mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 Prozent stammt. In diesem Areal gibt es rund 100 000 Galaxien, die in dem von Advanced LIGO zugänglichen Entfernungsbereich liegen. Die Große Magellansche Wolke scheidet als Quelle aus, weil sie uns mit einem Abstand von 170 000 Lichtjahren viel zu nahe liegt. Das Signal erreichte die Erde aus einer Entfernung von 1,3 Milliarden Lichtjahren.



Caltech / MIT / LIGO Lab

allgemeiner Relativitätstheorie die Raumzeit, wodurch einer der beiden Teilstrahlen einen etwas kürzeren Weg zu durchlaufen hat, der andere einen etwas längeren. In anderen Worten: Die Längen der beiden Interferometerarme sind nun nicht mehr gleich, sondern verändern sich relativ zueinander. Die Laserstrahlen löschen sich nun nicht mehr vollständig aus, so dass die Fotodiode ein Lichtsignal registriert.

Der Betrag dieser relativen Längenänderung ist mit einer erwarteten Größenordnung von weniger als 10^{-20} äußerst winzig. Um zumindest die energiereichsten Prozesse im Universum nachweisen zu können, die Gravitationswellen auslösen, musste die Messempfindlichkeit der Detektoren durch ausgeklügelte Techniken

auf ein kaum vorstellbares Maß gesteigert werden. Advanced LIGO kann noch erkennen, wenn sich die Länge eines der vier Kilometer langen Interferometerarme um 0,000 000 000 000 000 000 000 1 Meter ändert, also um 10^{-19} Meter. Dieser Wert ist weit kleiner als der Durchmesser eines Atoms, ja sogar noch vier Größenordnungen kleiner als der Durchmesser eines Protons.

Es liegt auf der Hand, dass bei solch winzigen Längenänderungen die Zahl der natürlichen und künstlichen Rauschquellen, die ein Gravitationswellensignal überdecken können, sehr groß ist. Ein Erdbeben auf der anderen Seite der Erdkugel, die Brandung der Wellen an der Atlantikküste, das Vorbeifahren eines Zuges oder eines Autos in der Nähe der Anlage – sol-

che mikroseismischen Erschütterungen sind in der Regel größer als das nachzuweisende Signal. Deshalb wurden in den vergangenen Jahren Verfahren entwickelt, mit denen sich die Messstrecken der Gravitationswellendetektoren mechanisch von ihrer Umgebung entkoppeln lassen. Aber nicht nur seismische Schwingungen beeinflussen die exakten Spiegelpositionen – auch thermisches Rauschen oder der Strahlungsdruck der Laserstrahlen sind Störfaktoren, die kompensiert werden müssen.

Eine weitere Kategorie von Rauschquellen ist mit der Sensorik verknüpft. Dazu gehören zum Beispiel das Schrotrauschen der Fotodiode, das auf die Bewegung der einzelnen Ladungsträger zurückzuführen

2010

Der Umbau von LIGO zu Advanced LIGO beginnt

2011

Gemeinsame Messkampagne von GEO600 und Virgo. Im Anschluss beginnt der Umbau von Virgo zu Advanced Virgo

14.9.2015

Erster direkter Nachweis von Gravitationswellen mit Advanced LIGO

ist, die Instabilitäten des Laserstrahls und das unvermeidliche Rauschen in der Ausleseelektronik.

Mit großem Ideenreichtum haben die Wissenschaftler und Ingenieure in den vergangenen Jahren die Messempfindlichkeit der interferometrischen Gravitationswellendetektoren verbessert und die Einflüsse von Rauschquellen vermindert. Die deutsch-britische Anlage GEO600 bei Hannover fungierte hierbei als Vorreiter und Prüfstand. Wesentliche Neuerungen wurden unter Leitung des Albert-Einstein-Instituts, der Leibniz Universität Hannover und des Laser Zentrum Hannover e.V. entwickelt. Hierzu zählen unter anderem spezielle Spiegelaufhängungen und frequenzstabilisierte Hochleistungslaser.

Rascher Lohn nach Umbau

Im Zuge der internationalen Kooperation wurden solche Neuerungen während des fünfjährigen Umbaus zu Advanced LIGO in den US-amerikanischen Detektoren eingebaut. Nach Abschluss dieser Arbeiten im September 2015 stehen nun erstmals die präzisen Technologien zur Verfügung, die man für den Nachweis der schwachen Gravitationswellen braucht.

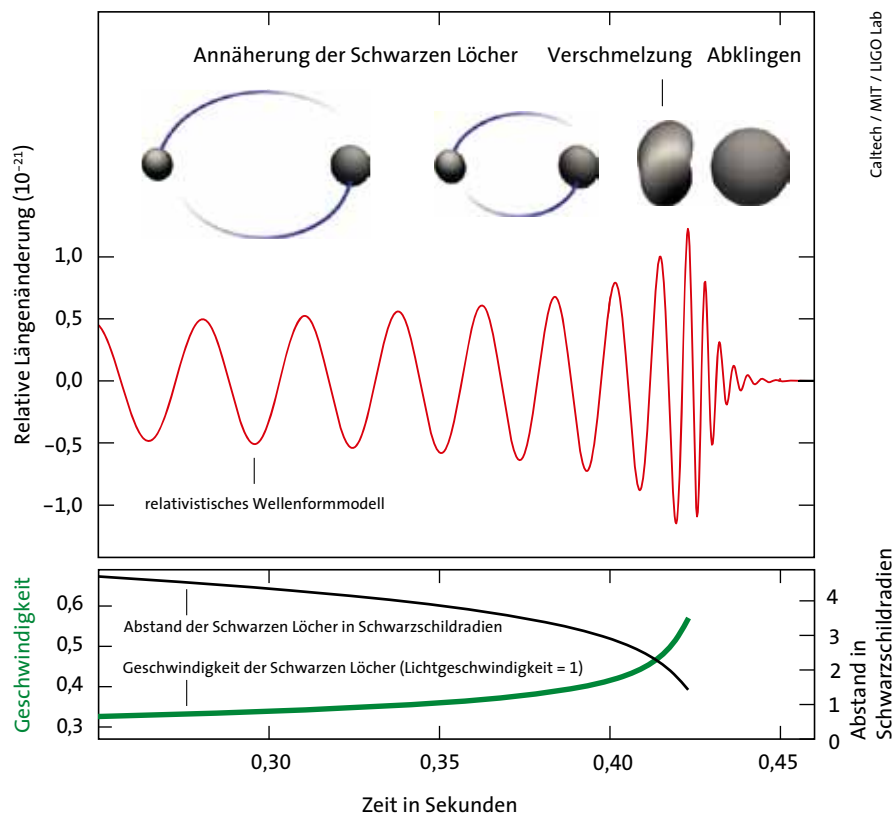
Den Lohn für die aufwändigen Umbauarbeiten fuhr die LIGO Scientific Collaboration unerwartet schnell ein. Am

14. September 2015, um 09:50:45 Uhr Weltzeit, registrierten die Detektoren H1 in Hanford und L1 in Livingston das nun GW150914 genannte Signal (siehe Bild S. 29). Dieser zeitgleiche Nachweis in verschiedenen Detektoren – in der Fachsprache Koinzidenz genannt – ist ein wichtiger Beleg für ein reales Ereignis. Hätte nur einer der Detektoren das Signal empfangen, wäre es mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine Störquelle zurückzuführen gewesen und deshalb von den Auswerteprogrammen gleich aussortiert worden. Koinzidenz bedeutet hierbei, dass sich die Ankunftszeiten der Signale in den beiden Detektoren um nicht mehr als zehn Millisekunden unterscheiden dürfen. Dieser Wert entspricht der Lichtlaufzeit zwischen den beiden 3000 Kilometer entfernten Detektoren. Ein weiterer Beleg für ein reales Ereignis ist die hohe statistische Signifikanz des Signals: Die Wahrscheinlichkeit, dass GW150914 durch Fehlerquellen zufällig entstanden sein könnte, ist sehr klein – nur einmal in 200 000 Jahren wäre ein solches Fehlsignal zu erwarten, so die LIGO-Forscher.

Nur etwa 0,2 Sekunden dauerte das registrierte Signal GW150914. In diesem Zeitraum nahmen sowohl die Frequenz der Welle als auch die Amplitude der relativen Längenänderung zu: Die Frequenz

stieg von 35 Hertz auf 250 Hertz an, und die Spitzenamplitude erreichte 10^{-21} . Im Detektor L1 in Livingston traf das Signal zuerst ein; 6,9 Millisekunden später erreichte es den Detektor H1 in Hanford. Aus diesem Laufzeitunterschied schlossen die Wissenschaftler, dass die Quelle des Gravitationswellensignals am südlichen Sternenhimmel liegt. Mit zwei Detektoren lässt sich der Herkunftsort zwar nicht genau ermitteln, aber immerhin auf einen ringförmigen Streifen am Himmel eingrenzen. Weitere Faktoren wie etwa die sich verändernde Signalstärke in den Detektoren schränken den Bereich zusätzlich ein (siehe Bild S. 31).

Die grundlegende Form des Signals GW150914 weist auf die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher hin, die sich zuvor in einem engen Doppelsystem umkreist hatten. Anhand von relativistischen Modellen erwarteten Theoretiker genau den Kurvenverlauf, der sich durch die Beobachtung bestätigte (siehe Bild unten): Je näher sich die Schwarzen Löcher kommen, desto kürzer wird ihre Umlaufperiode, was zu einer höheren Frequenz der Gravitationswellen führt. Gleichzeitig nimmt die Stärke der Wellen, also die Amplitude des Signals zu, weil das Gravitationsfeld immer stärker wird. In jener Phase umrunden sich die beiden Schwarzen Löcher



Wenn sich zwei Schwarze Löcher auf einer immer enger werdenden Bahn umrunden (oben) nimmt die Frequenz der von ihnen ausgesendeten Gravitationswellen zu (Mitte). Kurz vor dem Kollidieren macht sich auch das zunehmende Gravitationsfeld bemerkbar, was zu einem Anstieg der Wellenamplitude führt. Die Spitzenamplitude wird im Moment des Verschmelzens erreicht. Das neu entstandene Schwarze Loch nimmt dann nach wenigen Hundertstel Sekunden einen Gleichgewichtszustand an, wodurch das Signal rasch abklingt. In den letzten 0,2 Sekunden vor dem Verschmelzen nähern sich die Schwarzen Löcher von fünf auf einen Schwarzschildradius an (unten, schwarze Kurve); dabei nimmt ihre relative Umlaufgeschwindigkeit von etwa 30 auf mehr als 50 Prozent der Lichtgeschwindigkeit zu (unten, grüne Kurve).

Neutronensterne

Neutronensterne sind Überreste von massereichen Sternen. Nach dem Aufbrauchen des Fusionsbrennstoffs kollabiert die Kernregion eines solchen Sterns, weil nichts mehr die Gravitation kompensieren kann. Dabei werden die Protonen und Elektronen der Materie derart stark zusammengequetscht, dass sie sich zu Neutronen vereinen. Während der äußere Teil des Sterns als Supernova explodiert, bleibt innen ein Neutronenstern zurück – eine kompakte Kugel von etwas mehr als einer Sonnenmasse, aber einem Durchmesser von nur rund 20 Kilometern.

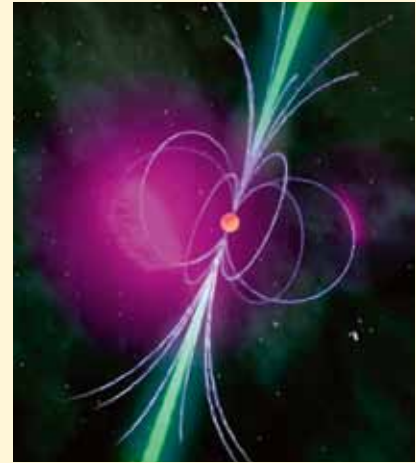
Das Vorhandensein solch bemerkenswerter Objekte, deren Dichte etwa 100 Billionen mal höher ist als diejenige der Sonne, wurde bereits Ende der 1930er Jahre diskutiert. Man hielt sie freilich für zu lichtschwach, um sie tatsächlich beobachten zu können. Im Jahr 1967 erkannte jedoch Franco Pacini von der Europäischen Südsternwarte ESO, dass Neutronensterne elektromagnetische Wellen aussenden würden, falls sie rotierten und starke Magnetfelder aufwiesen.

Tatsächlich entdeckten noch im gleichen Jahr die Doktorandin Jocelyn Bell und ihr Doktorvater Antony Hewish an der University of Cambridge mit einer neuartigen Antennenanlage des Mullard Radio Astronomy Observatory (MRAO) kurze Radiopulse extraterrestrischen Ursprungs, die sich mit außerordentlicher Regelmäßigkeit alle 1,337 Sekunden wiederholten. Aus der Pulsdauer von nur einigen Millisekunden folgte, dass das aussendende Objekt nicht größer als wenige tausend Kilometer sein

konnte. Mit diesem »Pulsar« genannten Objekt hatten Bell und Hewish eine neue Klasse von Himmelskörpern entdeckt. Im Jahr 1974 erhielt Hewish dafür den Nobelpreis für Physik (er teilte ihn sich mit Martin Ryle, dem Direktor des MRAO, der für die Entwicklung der Apertursynthese

geehrt wurde; damit ließ sich das Auflösungsvermögen von Radioteleskopen erheblich steigern, so dass auch die Positionen von Pulsaren bestimmt werden konnten).

Schon bald nach der Entdeckung setzte sich die Auffassung durch, dass Pulsare Neutronensterne sind, die – wie von Pacini vermutet – tatsächlich schnell rotieren. Dabei senden sie ähnlich wie der Scheinwerfer eines Leuchtturms Strahlung in zwei engen, entgegengesetzten Bündeln aus. Bei jeder Umdrehung, wenn die Strahlen die Position der Erde überstreichen, ist ein kurzer Radiopuls zu empfangen.



NASA / Fermi / Cruz de Wilde

Schwarze Löcher

Schwarze Löcher entstehen wie Neutronensterne; allerdings hatten ihre Vorgängerstern weit mehr Masse. Die ehemalige Kernregion wird dann noch stärker zusammengedrückt als beim Neutronenstern. Das Resultat ist ein kollabiertes Objekt, welches das Mehrfache einer Sonnenmasse in sich vereint.

Wie ein Schwarzes Loch im Innern beschaffen ist, wissen wir nicht. Die uns bekannten Naturgesetze reichen nicht aus, diesen Zustand zu beschreiben. Was wir aber wissen ist: Kein Teilchen, noch nicht einmal Licht kann diesem Gravitationssschlund entkommen – es ist, als hätte das Universum hier einen Ausgang erschaffen, in den wie bei einem Badewannenabfluss alles hineinwirbelt, aber nichts mehr herauszukommen vermag.

Dass es massereiche Himmelskörper geben müsse, die sich nicht durch eigene Strahlung bemerkbar machen, also dunkel erscheinen, ist keine Erkenntnis des 20. oder 21. Jahrhunderts. Bereits der Engländer John Michell erkannte 1784 mit erstaunlicher Weitsicht und auf der Grundlage der newtonschen Gravitationstheorie, dass bei einem genügend großen Stern »alles Licht, das von einem solchen Körper ausgesandt würde, durch seine eigene Schwerkraft gezwungen würde, zu ihm zurückzukehren.«

Erst die allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein erlaubte ein tieferes Verständnis der Gravitation und somit ein konsistenteres Bild von Schwarzen Löchern. Ihre erste theoretische Beschreibung im Rahmen dieser Theorie lieferte Karl Schwarzschild 1916: Nach ihm ist heute der von der Masse des Schwarzen Lochs abhängige Radius benannt, innerhalb dessen

nichts mehr aus diesem Objekt herausgelangen kann. Der Schwarzschild-Radius ist nicht mit der Oberfläche eines Himmelskörpers gleichzusetzen, sondern gibt nur den Horizont an, der die Grenze zwischen Sichtbarkeit und Unsichtbarkeit markiert. Für ein Schwarzes Loch von einer Sonnenmasse beträgt der Schwarzschild-Radius drei Kilometer.

Ein Schwarzes Loch ist für sich genommen nur durch sein äußeres Gravitationsfeld zu bemerken. Gelangen jedoch Gaswolken oder Sterne in seinen unmittelbaren Einzugsbereich, dann stürzt diese Materie nicht direkt hinein, sondern bildet einen scheibenförmigen Wirbel, eine Akkretionsscheibe, in der sie langsam nach innen durch den Schwarzschild-Horizont spiralt. Durch das Umwandeln von Gravitationsenergie und durch dynamische Prozesse in der Scheibe heizt sich diese extrem auf, so dass wir die Vorgänge darin anhand ihrer elektromagnetischen Strahlung – insbesondere im Röntgenbereich – sehen können.



Double Negative / O. James et al.



mit mehr als der halben Lichtgeschwindigkeit. Nach dem Verschmelzen dauert es einige Hundertstel Sekunden, bis das neu entstandene Schwarze Loch einen Gleichgewichtszustand erreicht hat. In dieser Abklingphase, im Englischen ringdown genannt, nimmt die Amplitude der Gravitationswellen rasch ab.

Aus dem gemessenen Verlauf des Wellenzugs lassen sich nun mit Hilfe von aus der allgemeinen Relativitätstheorie abgeleiteten Wellenformmodellen die genauen astrophysikalischen Parameter des Ereignisses ermitteln. Dazu zählen die Massen und die Eigendrehungen der beiden ursprünglichen Schwarzen Löcher, die Orientierung des Doppelsystems und seine Entfernung zur Erde sowie die Masse und die Eigendrehung des neu entstandenen Schwarzen Lochs.

Wie die Auswertung ergab, hatten die beiden kollidierenden Schwarzen Löcher die 36- und 29-fache Masse unserer Sonne.

Mit dem Beginn der Gravitationswellenastronomie öffnet sich ein neues Fenster zur Beobachtung des Universums.

ne. Das resultierende einzelne Schwarze Loch weist die 62-fache Masse der Sonne auf. Demnach wurde innerhalb eines Sekundenbruchteils eine Masse von dem Dreifachen unserer Sonne in Gravitationswellen umgesetzt. Dies bedeutet, dass für einen kurzen Moment rund 50-Mal so viel Energie in Form von Gravitationswellen freigesetzt wurde, wie alle leuchtenden Sterne im Universum im sichtbaren Licht abstrahlen. Dieser gewaltige Ausbruch ereignete sich in einer Entfernung von 1,3 Milliarden Lichtjahren.

Sternleichen im Walzerwirbel als astrophysikalische Labore

Aus diesen Angaben wird deutlich, dass den Wissenschaftlern gleich ein ganz besonderer Fang gelungen ist. Die LIGO-Forscher haben nicht nur den engen Umlauf von zwei Schwarzen Löchern beobachtet, sondern auch den Vorgang des Verschmelzens. Noch nie zuvor in der Geschichte war das gelungen. Über den direkten Nachweis von Gravitationswellen hinaus haben die Wissenschaftler damit auch ein bisher nur theoretisch untersuchtes Phänomen gemessen. Und erneut konnte eine Vorhersage von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie präzise bestätigt werden.

Damit schließt sich gewissermaßen nach 100 Jahren ein Kreis: Im November 1915 hatte Albert Einstein der Preussischen Akademie der Wissenschaften die Grundzüge seiner allgemeinen Relativitätstheorie vorgestellt (siehe SuW 11/2015, S. 40). Ein halbes Jahr später, im Juni 1916,

beschrieb er anhand von Lösungen seiner Theorie die Entstehung von Gravitationswellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Einstein glaubte allerdings, dass man diese Wellen nie würde nachweisen können, weil sie so schwach sind.

Andere Wissenschaftler waren da optimistischer. Zu den frühen Pionieren der Gravitationswellenforschung gehört der US-amerikanische Physiker Joseph Weber (1919–2000). Er verwendete massive Aluminiumzylinder als Resonanzdetektoren. Eine starke Gravitationswelle sollte in der

Lage sein, die Resonanzfrequenz des Zylinders anzuregen. Es gelang jedoch nie, eindeutige Ergebnisse zu erzielen – auch nicht, als andere Forscher durch verbesserte Ausführungen die Empfindlichkeit der Weberzylinder auf rund das Tausendfache steigern konnten.

Resonanzdetektoren haben neben der zu geringen Empfindlichkeit einen weiteren Nachteil: Selbst wenn sie durch eine Gravitationswelle zum Schwingen angeregt werden, können sie die Wellenform nicht erfassen. Deshalb ist keine Auskunft über die Art der Quelle möglich.

Mit interferometrischen Detektoren jedoch ist die Wellenform messbar. Pionierarbeiten hierzu begannen 1975 am Max-Planck-Institut für Astrophysik in München (siehe Zeitleiste in diesem Artikel). Jetzt, nach 40 Jahren intensiver Forschung auf diesem Gebiet, führte die Beharrlichkeit der Wissenschaftler mit der ersten direkten Messung von Gravitationswellen zum lang ersehnten Erfolg.

Bisher hatte es nur indirekte Hinweise für die Existenz von Gravitationswellen gegeben. Im Jahr 1974 entdeckten Russell Hulse und Joseph Taylor mit dem Radioteleskop bei Arecibo (Puerto Rico) den ersten Pulsar in einem Doppelsternsystem. Pulsare sind Neutronensterne, die rasch rotieren und auf Grund ihrer starken Magnetfelder elektromagnetische Strahlung aussenden (siehe Kasten »Neutronensterne«, S. 33). In detektivischer Kleinarbeit stellte Hulse fest, dass die Pulse ihres Objekts PSR1913+16 mit einer Periode von 7 Stunden und 45 Minuten regelmäßig schwanken – eine Folge des Umlaufs um einen zweiten Neutronenstern. Da die

Ein weltweiter Forschungsverbund beteiligt sich an der Suche nach Gravitationswellen. Denn ein Signal aus dem All gilt nur dann als eindeutig nachgewiesen, wenn es von mindestens zwei Detektoren gleichzeitig empfangen wurde. Die Anlage GEO600 in der Nähe von Hannover ist die kleinste; dort wurden aber viele Technologien entwickelt, die nun in den anderen Detektoren zum Einsatz kommen. Die beiden LIGO-Detektoren in den USA wurden technisch aufgerüstet und gingen im September 2015 als Advanced LIGO wieder in Betrieb. Virgo in Italien wird nach einer längeren Umbauphase Ende 2016 den Messbetrieb wieder aufnehmen. Die Anlagen KAGRA in Japan und LIGO India sind noch im Bau.

beiden kompakten Körper dabei ungewöhnlich hohen Beschleunigungen unterworfen sind, mussten die Wissenschaftler relativistische Effekte berücksichtigen, um die Bahnparameter und die Massen der beiden Komponenten zu ermitteln. Dies war das erste Mal, dass Einsteins Theorie zur Bestimmung astrophysikalischer Größen aus Messwerten herangezogen wurde.

Einer der relativistischen Effekte, die Taylor und sein Team messen konnten, ist die Verschiebung des Periastrons – des Punktes auf der Umlaufbahn des Pulsars, an dem er seinem Begleiter am nächsten ist. Dieser Effekt entspricht der bekannten Periheldrehung des Merkur im Sonnensystem, die nach Einstein eine natürliche Folge der Krümmung der Raumzeit in der Nähe der Sonne ist. Allerdings ist der Effekt bei PSR1913+16 rund 35 000-mal größer als bei Merkur.

Dieser große Unterschied verdeutlicht den besonderen Wert von engen Doppelsystemen aus kompakten Neutronensternen oder – noch besser – Schwarzen Löchern als Testobjekte für die Relativitätstheorie und insbesondere für die Untersuchung von Gravitationswellen. Anhand des Pulsars PSR1913+16 ließ sich erstmals zeigen, dass das System durch Abstrahlen von Gravitationswellen Energie verliert, die der Bahnbewegung entzogen wird: Pro Umlauf kommen sich der Pulsar und sein Begleiter um 3,1 Millimeter näher. Über die entsprechende Änderung in der Umlaufperiode des Pulsars – die sich pro Jahr um 0,076 Millisekunden verkürzt – ließ sich dieser Effekt messen. Für die indirekte Bestätigung der von Ein-

stein vorhergesagten Gravitationswellen erhielten Hulse und Taylor im Jahr 1993 den Nobelpreis für Physik.

Während es noch rund 320 Millionen Jahre dauern wird, bis PSR1913+16 mit seinem Begleiter kollidiert, sind in der Zwischenzeit weitere Doppelsysteme aus Neutronensternen bekannt, die noch kleinere Umlaufperioden haben und deshalb früher verschmelzen werden. So wurde 2003 der Doppelpulsar PSR J0737-3039 entdeckt, dessen Komponenten einander in nur 2,4 Stunden umkreisen. Dieses System wird bereits in 85 Millionen Jahren verschmelzen.

Solche Zeitskalen werfen natürlich die Frage auf, in welchen Abständen ein Gravitationswellendetektor ein Verschmelzungsereignis nachweisen kann. Das hängt wesentlich von der Empfindlichkeit des Detektors ab, denn je kleiner die Nachweisgrenze, desto größer ist das Volumen im Universum, in dem ein bestimmtes Ereignis erfasst werden kann.

Beginn einer neuen Ära

Für den Moment bleibt festzuhalten, dass mit dem direkten Nachweis von Gravitationswellen durch Advanced LIGO eine neue Ära der Astrophysik begonnen hat. In der Fachpublikation, in der die Entdeckung von GW150914 veröffentlicht wurde, sind nur 16 Tage des Detektorbetriebs ausgewertet. Die erste Messphase von Advanced LIGO dauerte indessen vier Monate. In dieser Zeitspanne sind weitere Ereignisse hinzugekommen, die gegenwärtig ausgewertet werden.

Die eigentliche Entdeckungsmeldung zog rasch eine Flut von weiteren Veröffentlichungen nach sich. Allein 25 Forschungsteams suchten in den Tagen nach dem 14. September das fragliche Himmelsareal nach elektromagnetischen Signalen ab. Solche sind zwar von einem reinen Doppelsystem aus Schwarzen Löchern nicht zu erwarten, doch durch Wechselwirkungen mit Materie in der Umgebung könnten solche Signale entstehen.

Auch wenn solche Nachbeobachtungen dem momentanen Kenntnisstand zufolge negativ ausgefallen sind, wird sich ihr Wert künftig noch erweisen. Denn nachdem sich mit der Gravitationswellenastronomie ein neues Fenster zur Beobachtung des Universums geöffnet hat, werden die Astronomen nicht nur das messen, was sie erwartet haben, sondern auch vieles, was sie sehr überraschen wird. ©



UWE REICHERT ist Astrophysiker und Chefredakteur von *Sterne und Weltraum*.

Literaturhinweise

Abbott, B.P. et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. In: *Physical Review Letters* 116, 061102, 2016

Belczynski, K. et al.: The Origin and Evolution of LIGO's First Gravitational-Wave Source. arXiv:1602.04531v1, 2016

diverse Autoren: Einsteins Kosmos. *Moderne Astronomie im Licht der Relativitätstheorie. Sterne und Weltraum Dossier 2/2015.* Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg 2015

Einstein, A.: Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, S. 688–696, 1916

Einstein, A.: Über Gravitationswellen. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, S. 154–167, 1918

Mokler, F.: Warten auf das große Zittern. Wie Physiker Einsteins Schwingungen der Raumzeit auflauern. In: *Sterne und Weltraum* 11/2015, S. 28–36

Pössel, M.: 100 Jahre und quicklebendig. Die astronomische Bedeutung der allgemeinen Relativitätstheorie. In: *Sterne und Weltraum* 11/2015, S. 40–47

Reichert, U.: Nobelpreis für Physik – indirekter Nachweis von Gravitationswellen. In: *Spektrum der Wissenschaft* 12/1993, S. 21–23

Schwarzschild, K.: Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, S. 189–196, 1916

Dieser Artikel und Weblinks im Internet: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1401529