

Kosmische Kollision: Die ersten jemals beobachteten Gravitationswellen stammen von zwei verschmelzenden, rund 1,3 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernten schwarzen Löchern. Forscher des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik haben das Szenario am Computer simuliert.

# Der Kosmos bebt

Albert Einstein hatte recht: Gravitationswellen existieren wirklich. Am 14. September 2015 gingen sie ins Netz. Das wiederum hätte Einstein verblüfft, glaubte er doch, sie seien zu schwach, um jemals gemessen zu werden. Umso größer war die Freude der Forscher – insbesondere jener am **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik**, das an der Entdeckung maßgeblich beteiligt war.

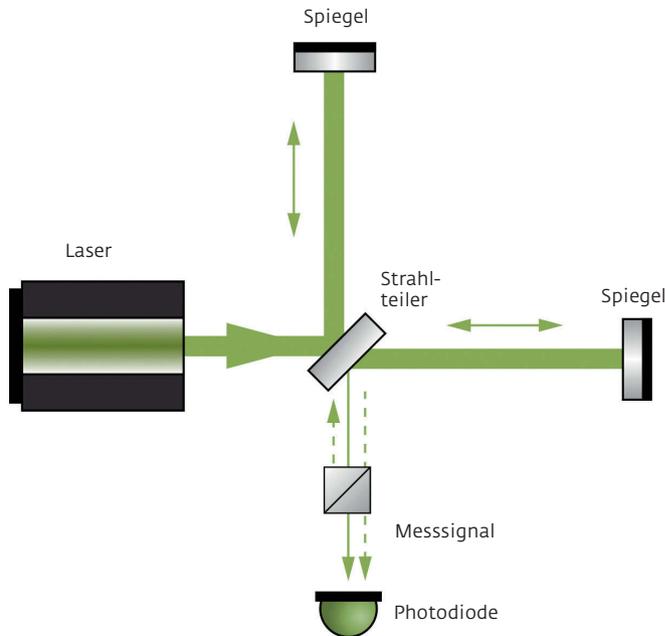
TEXT **HELMUT HORNING**

**A**n jenem denkwürdigen Montag im September 2015 zeigt die Uhr in Hannover 11.51 an, als Marco Drago am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik das Signal als Erster sieht. Für etwa eine Viertelsekunde ist die Gravitationswelle durch zwei Detektoren namens Advanced LIGO geschwappt. Die Anlagen stehen Tausende Kilometer entfernt in den USA, eine in Hanford (Bundesstaat Washington), die andere in Livingston (Louisiana).

Drago glaubt zunächst an ein Signal, das absichtlich eingestreut wurde, um die Reaktion der Wissenschaftler zu testen. Das ist in der Vergangenheit immer wieder einmal vorgekommen. Doch Advanced LIGO läuft noch gar nicht im regulären Betrieb. So informiert Drago seinen Kollegen Andy Lundgren. Die beiden sind sich einig: Die Kurve sieht perfekt aus, das Signal scheint echt zu sein. Die Max-Planck-Forscher ahnen, dass sie eben Zeugen eines historischen Augenblicks geworden sind.

Mit der Entdeckung erreicht die Geschichte der Gravitation ihren vorläufigen Höhepunkt, die allgemeine Relativitätstheorie hat jetzt mit Bravour ihren letzten Test bestanden. Zudem stößt die Messung ein neues Beobachtungsfenster auf. Denn nahezu 99 Prozent des Universums liegen im Dunkeln, senden also keine elektromagnetische Strahlung aus. Mit Gravitationswellen hingegen lassen sich kosmische Objekte wie schwarze Löcher erstmals im Detail untersuchen. Und selbst bis fast zum Urknall zurück werden die Forscher in Zukunft „hören“ können.

Was aber hat es mit den Wellen aus dem Weltall auf sich? Die Wurzeln moderner Gravitationsforschung liegen in der Schweiz. Dort denkt im Jahr 1907 am Berner Patentamt ein „Experte II. Klasse“ intensiv über die Schwerkraft nach: Albert Einstein. Er simuliert Schwerkraft mit Beschleunigung. Denn auch die Beschleunigung erzeugt Kräfte, wie sie etwa in einem schnell anfahrenen Lift auftreten. Wäre dessen Kabine



**Links** Gekreuzte Pfade: Im Gravitationswellendetektor wird ein Laserstrahl am Strahlteiler aufgespalten, von dort laufen die beiden Teilstrahlen senkrecht zueinander die Interferometerarme entlang. An deren Enden werden die Teilstrahlen reflektiert, zum Strahlteiler zurückgeschickt und überlagern sich dort zum Signalstrahl. Dieser trifft dann auf die Photodiode. Die von der Photodiode gemessene Helligkeitsänderung ist ein Maß für die relative Längenänderung der Lichtlaufstrecken.

**Rechts** Feldforschung: Einer der Detektoren von Advanced LIGO, der in Livingston (US-Bundesstaat Louisiana) seine vier Kilometer langen Arme ausstreckt. Sein Herzstück ist das Zentralhaus mit dem Lasersystem. Der zweite, praktisch baugleiche LIGO-Detektor befindet sich im rund 3000 Kilometer entfernten Hanford (Washington).

schall- und lichtsicht, könnten die Fahrgäste glauben, die Anziehungskraft der Erde habe plötzlich zugenommen.

Die Erkenntnis, dass Gravitation zumindest teilweise eine Frage des Bezugssystems ist, führt Albert Einstein zu revolutionären Ideen, die er nach achtjähriger Arbeit im Herbst 1915 in seiner allgemeinen Relativitätstheorie vorstellt. Diese ist letztlich eine Feldtheorie. In ihr führt die beschleunigte Bewegung von Massen zu Störungen, die sich lichtschnell durch den Raum bewegen – Gravitationswellen.

Wer etwa auf dem Trampolin auf und ab hüpfte, verliert Energie und schlägt in der Raumzeit solche Wellen. Sie sind unmessbar klein, denn ein Mensch hat eine geringe Masse und hüpfte vergleichsweise langsam. 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 verharrt. So beult die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne den Raum aus und strahlt dabei Gravitationswellen mit einer Leistung von 200 Watt ab. Aber auch diese Gravitationswellen sind noch so schwach, dass man sie nicht mit einem Detektor aufspüren kann.

Glücklicherweise gibt es im Universum viel heftigere Erschütterungen der Raumzeit: Wenn zwei Neutronensterne oder schwarze Löcher extrem schnell umeinanderlaufen oder gar miteinander kollidieren. Oder wenn ein massereicher Stern als Supernova explodiert. Solche kosmischen Ereignisse erzeugen Gravitationswellen mit einer Energie von rund  $10^{45}$  Watt.

### LICHTWELLEN LÖSCHEN SICH GEGENSEITIG AUS

Gravitationswellen verändern den Abstand zwischen den im Raum enthaltenen Objekten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Das zu messen ist höchst schwierig. Albert Einstein hielt den Nachweis daher für unmöglich. Und doch haben die Wissenschaftler Instrumente ersonnen, denen das gelungen ist. Die Geräte der ersten Generation in den 1960er-Jahren bestanden aus tonnenschweren, mit sensiblen Sensoren bestückten Aluminiumzylindern. Gravitationswellenpulse müssten sie zum Schwingen bringen wie der Klöppel eine Kirchenglocke. Aber trotz hochgezüchteter Verstärker brachten solche Resonanzdetektoren keine Ergebnisse.

Daher konstruierten die Forscher noch weit empfindlichere Empfänger, sogenannte Laserinterferometer. Dabei trifft ein Laserstrahl auf einen Strahlteiler und wird dort in zwei Strahlen aufgespalten; einer läuft geradeaus weiter, der andere wird im Winkel von 90 Grad abgelenkt. Am Ende einer jeden Strecke sitzt ein Spiegel, der das Licht wieder auf den Strahlteiler reflektiert. Dieser lenkt die Strahlen nun so um, dass sie sich überlagern, also interferieren, und auf eine Photodiode treffen.

Im Fall von ungestörten Messstrecken schwingen die ankommenden Lichtwellen nicht im Gleich-, sondern im Gegentakt: Wellenberg trifft auf Wellental, die Lichtwellen löschen sich gegenseitig aus. Stört eine Gravitationswelle das System und verändert somit die Messstrecken, geraten die Lichtwellen aus dem Takt. Der Empfänger bleibt nicht länger dunkel – ein Signal erscheint.

Am Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik baute eine Gruppe um Heinz Billing im Jahr 1975 den Prototyp eines solchen Interferometers mit einer Streckenlänge von drei Metern, 1983 einen mit 30 Metern. So wurden die Grundlagen geschaffen für alle fol-



Foto: Caltech / LIGO Laboratory

genden Anlagen dieser Bauart. Vor allem für den Detektor GEO600, der seit Mitte der 1990er-Jahre auf einem Feld nahe Hannover seine 600 Meter langen Arme ausstreckt, haben die Wissenschaftler innovative Techniken entwickelt – sei es die Aufhängung der Spiegel oder die Stabilisierung des Lasers.

„So gesehen, ist Advanced LIGO auch unser Detektor“, sagte Karsten Danzmann am 11. Februar in Hannover anlässlich der offiziellen Bekanntgabe der Entdeckung. Denn die beiden baugleichen Anlagen in den USA stecken voll technischem Know-how aus

Danzmanns Team. Als sie die Erschütterung der Raumzeit registrierten, hatte sich die Länge der jeweils vier Kilometer langen, senkrecht zueinander stehenden Laserlaufstrecken lediglich um den winzigen Bruchteil eines Atomkerndurchmessers verändert.

Um die Gravitationswellensignale im Datenwust zu entdecken, mussten die Wissenschaftler wissen, wonach sie überhaupt suchen sollten. Daher arbeiten die Forscher in der Abteilung von Bruce Allen in Hannover an Programmen, um die Signale zu sehen und zu analysieren. Und die Gruppe von Ales-

sandra Buonanno in Potsdam-Golm hat die Modelle entwickelt, um die Quellen der Wellen besser zu verstehen.

Das am 14. September 2015 aufgefangene Signal kündete von der Verschmelzung zweier schwarzer Löcher mit 29 und 36 Sonnenmassen, 1,3 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt. Dank des engen Zusammenspiels von Experiment, Simulation, analytischer Berechnung und Datenanalyse brachten die Wissenschaftler hier Licht in die dunklen Ecken des Universums. Die Rippel der Raumzeit werden die Astronomie erhellen. ◀

# „Das Signal stach sofort ins Auge“

Die Entdeckung von Gravitationswellen am 14. September 2015 krönt eine jahrzehntelange Suche mit ausgeklügelten Methoden. Entscheidenden Anteil am Erfolg hat das **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik** mit seinen Standorten in Potsdam-Golm und Hannover. Dort forschen die Wissenschaftler an innovativen Techniken sowie an theoretischen Modellen, virtuellen Simulationen und an der Datenanalyse. Über ihre Arbeit sowie Bedeutung und Folgen der Entdeckung sprachen wir mit den Direktoren **Bruce Allen, Alessandra Buonanno** und **Karsten Danzmann**.

*Herr Allen, Frau Buonanno, Herr Danzmann: Als Mitglieder eines internationalen Netzwerks von Gravitationswellenforschern, der LIGO-Virgo-Kollaboration, waren Sie und die Mitarbeiter Ihres Instituts maßgeblich an der ersten Messung von Gravitationswellen beteiligt. Herzlichen Glückwunsch!*

**Alle drei:** Vielen Dank!

*Haben Sie mit der Entdeckung zu diesem Zeitpunkt gerechnet?*

**Karsten Danzmann:** Nein, überhaupt nicht. Das kam völlig überraschend. Die US-amerikanischen LIGO-Detektoren – sie sind wie unser Detektor GEO600 auch nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers konstruiert – befanden sich Mitte September 2015 nach einer längeren Umbauphase zunächst im Testbetrieb. Der wissenschaftliche Messbetrieb sollte wenige Tage später beginnen. Es wurde noch überprüft, ob die Instrumente wie geplant arbeiten. Das war in der Tat der Fall. Aber dass sie so gut funktionieren und in der Lage sein würden, gleich ein Gravitationswellensignal zu empfangen – das hat niemand erwartet.

**Bruce Allen:** Das Signal kam am 14. September 2015 am späten Vormittag mitteleuropäischer Sommerzeit herein. In den USA war es Nacht, die Kollegen dort schliefen. So haben es zwei Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik als Erste auf ihrem Bildschirm gesehen – wenige Minuten nachdem die Detektoren angeschlagen hatten. Die beiden untersuchten die Daten für einige Stunden und schickten dann eine erste E-Mail an die Kollaboration. Wir konnten es erst gar nicht glauben. Vor allem war das Signal so stark und sah so perfekt aus, dass wir uns zunächst fragten, ob es tatsächlich echt ist.

**Danzmann:** Dazu muss man wissen: Zu Testzwecken wird regelmäßig das Eintreffen von Gravitationswellen in den Detektoren simuliert. Zum einen testen wir damit die Funktionsfähigkeit der Geräte, zum anderen überprüfen wir die Detektionskette und stellen sicher, dass die Wissenschaftler unabhängig arbeiten.

**Allen:** In den ersten Wochen nach der Entdeckung hatten wir tatsächlich Bedenken, jemand könnte ein künstliches Signal injiziert und einfach vergessen haben, uns da-

rüber zu informieren. Wir haben sehr viel Arbeit investiert, um dies ausschließen zu können. Doch am Ende stand dann fest: Das Signal stammt aus dem All. Wir sind Zeugen davon geworden, wie in einer fernen Galaxie zwei schwarze Löcher ineinandergestürzt sind!

**Wie kann man sich so ein Signal vorstellen?**

**Alessandra Buonanno:** Das Signal rauschte eine Viertelsekunde lang durch die LIGO-Detektoren. Es sah bemerkenswert einfach aus. Eine Sinuswelle mit zehn bis 15 Zyklen, deren Amplitude zunächst zunahm, dann ihr Maximum erreichte und schließlich abflaute. Unterdessen stieg ihre Frequenz stetig an, bis sie schließlich einen konstanten Wert annahm. Dieses charakteristische Signal lässt sich folgendermaßen erklären: Wenn sich die beiden schwarzen Löcher umrunden, strahlen sie Gravitationswellen ab und verlieren dadurch Energie. Deshalb kommen sie einander immer näher, bis sie kollidieren und miteinander verschmelzen. Dabei entsteht ein massereicheres schwarzes Loch, das noch etwas nachschwingt wie eine Glocke, bevor es zur Ruhe kommt. Vor der Verschmelzung ist die Signalfre-

quenz proportional zur Umlauffrequenz. Die Signalamplitude ist proportional zur charakteristischen Umlaufgeschwindigkeit der beiden Partner des Doppelsystems. Während der letzten Entwicklungsphase entspricht diese nahezu der Lichtgeschwindigkeit. Sobald sich das neue schwarze Loch gebildet hat, bebt es noch ein wenig nach. Dabei sendet es Gravitationswellen bei konstanter Frequenz aus.

**Allen:** Dass man gerade bei der ersten Detektion aus der Wellenform so direkt auf das Ereignis schließen kann, habe ich nicht erwartet. Ich war davon ausgegangen, dass die ersten Detektionen sehr viel schwächer sein und sich nur mit unseren Analyseprogrammen aus den Daten herausfischen lassen würden. Und auch, dass es schwierig sein würde zu verstehen, was da wirklich passiert. Die Tatsache, dass es sich so deutlich und selbst für das menschliche Auge sichtbar in den Rohdaten abhebt, ist bemerkenswert.

**Auch wenn sich das Gravitationswellensignal in diesem Fall offensichtlich leicht mit dem Auge erkennen ließ: Eine fundierte Datenanalyse ist unabdingbar. Wie läuft diese ab, und welche Rolle spielt dabei das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik?**

**Danzmann:** Während die Detektoren laufen, werden die Messdaten kontinuierlich automatisch auf Signale hin durchsucht. Und sobald etwas gefunden wird, werden die Wissenschaftler darüber per E-Mail informiert.

**Allen:** Die Grundlagen für den Algorithmus, der das aktuelle Signal aufgespürt hat, haben Kollegen von der University of

Florida geschaffen. Er sucht in den LIGO-Detektoren nach einem Ausschlag bei denselben Frequenzen, sodass die Ereignisse in beiden Detektoren zusammenpassen. In unserer Arbeitsgruppe haben wir diesen Code über viele Jahre ausgebaut und verbessert, um speziell Signale von Doppelsystemen mit schwarzen Löchern mittlerer Masse aus den Daten herauszufiltern. Diese Verbesserungen waren mit ein Grund dafür, dass das aktuelle Ereignis entdeckt wurde. Und auch was den Algorithmus zur

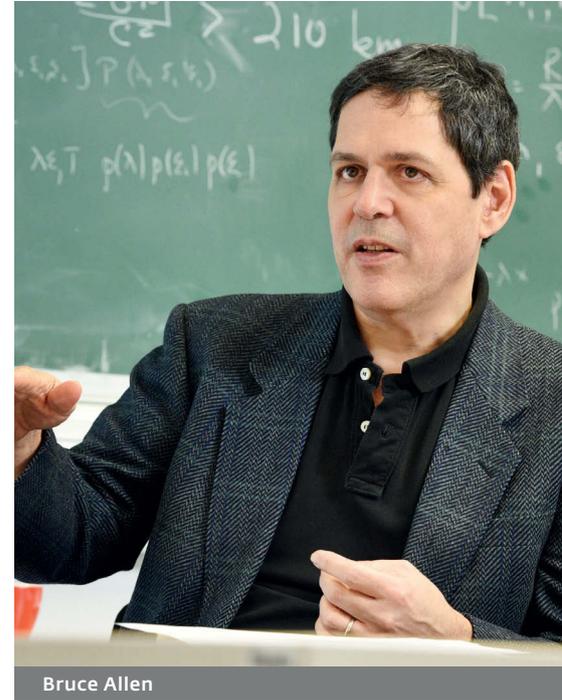
» Gegen Ende der nächsten Messperiode werden wir rund 20 solcher Detektionen haben.

Feinanalyse betrifft, die im Anschluss an die Detektion stattfindet, gehören die Kollegen an unserem Institut zu einer der beiden Expertengruppen weltweit.

**Wo werden die Berechnungen durchgeführt?**

**Allen:** Ein Großteil wird am Atlas-Computercluster hier in Hannover gemacht. Er besitzt in etwa dieselbe Kapazität, die innerhalb der übrigen Kollaboration noch einmal zur Verfügung steht.

**Danzmann:** Nachdem sämtliche äußere Störeinflüsse wie etwa auch Erdbeben ausgeschlossen sind, vergleicht man das Signal mit synthetisch generierten Wellen-



Bruce Allen

formen. So ermitteln wir die Eigenschaften der astrophysikalischen Quelle, die Gravitationswellen aussendet.

**Wie lassen sich diese Wellensignale modellieren und in Ihre Suche integrieren?**

**Buonanno:** Zunächst haben wir ausgefeilte analytische Näherungen entwickelt, um die Zweikörperdynamik und die Emission von Gravitationswellen während jener Phase zu beschreiben, in der zwei schwarze Löcher einander immer näher kommen. Dann haben wir numerische Lösungen der allgemeinen Relativitätstheorie von binären schwarzen Löchern verwendet, um die Verschmelzung und die Abklingphase zu



Alessandra Buonanno

**Buonanno:** Nachdem wir das Signal gesehen hatten, haben wir mithilfe unserer Wellenformmodelle Folgeanalysen durchgeführt und die astrophysikalischen Eigenschaften der Quelle daraus abgeleitet. So fanden wir heraus, dass sich das binäre System aus zwei schwarzen Löchern mit 36 und 29 Sonnenmassen zusammensetzte. Die beiden schwarzen Löcher sind zu einem einzigen rotierenden schwarzen Loch verschmolzen, dessen Masse der 62-fachen Sonnenmasse entspricht. Das Doppelsystem befindet sich in einer Entfernung von 1,3 Milliarden Lichtjahren. Zudem war das Signal ziemlich intensiv, sodass wir mithilfe unserer Modelle auch nach Verletzungen der allgemeinen Relativitätstheorie suchen konnten. Wir haben jedoch keine Abweichungen gefunden!

## » Die beiden schwarzen Löcher sind zu einem einzigen rotierenden schwarzen Loch mit der 62-fachen Sonnenmasse verschmolzen.

simulieren. Es ist unmöglich, bei der Suche und den Folgeanalysen ausschließlich auf Wellenformen zurückzugreifen, die allein mit numerischen Methoden der Relativitätstheorie berechnet wurden. Denn es dauert mindestens einen Monat, um die letzten 15 Umläufe vor der Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern auf diese Weise zu modellieren. Bei der weiteren Suche nach solchen Ereignissen in den LIGO-Daten werden auch die von uns entwickelten Wellenformmodelle verwendet. Die als GW150914 bezeichnete Quelle konnten wir so mit zuverlässiger Signifikanz in den Daten identifizieren.

**Und hinterher können Sie genau sagen, wie das gefundene System in Wirklichkeit aussieht?**

**Abgesehen von der Signalstärke: War dieses System noch in anderer Hinsicht eine Überraschung?**

**Buonanno:** Wir wussten nicht, ob schwarze Löcher mit mehr als 20 Sonnenmassen überhaupt existieren. Uns war allerdings klar: Sollte das der Fall sein, wären sie die stärksten Quellen von Gravitationswellen für den LIGO-Detektor. Sie erwiesen sich als die goldenen Quellen, von denen wir immer geträumt haben! Denn das Signal von solch massereichen, verschmelzenden Doppelsystemen schwingt genau in jenem Frequenzbereich, in dem die Detektoren am empfindlichsten sind. Und während sich die schwarzen Löcher vereinigen, ist das Signal am stärksten.

**Bei welchen Frequenzen ist das?**

**Danzmann:** Zwischen 60 und 250 Hertz. In diesem Bereich sind die LIGO-Detektoren mittlerweile fast zehnmal so empfindlich wie vor dem Umbau. Darüber freuen wir uns übrigens ganz besonders: Fast alle Entwicklungen, die Advanced LIGO so viel empfindlicher gemacht haben, wurden bei GEO600 ausgetüftelt oder erprobt. Bei höheren Frequenzen, bei denen wir etwa die Signale von zwei verschmelzenden Neutronensternen erwarten, sind die Instrumente derzeit um den Faktor drei besser als zuvor. In den nächsten Monaten soll das noch auf das Zehnfache gesteigert werden. Bei sehr niedrigen Frequenzen dominieren zu sehr die seismischen Einflüsse. Aber diese Lücke wird zukünftig der VIRGO-Detektor in Italien schließen, der auch unserem Netzwerk angehört. Er wird derzeit ebenfalls technologisch modernisiert und soll im kommenden Jahr den Betrieb wiederaufnehmen.

**Und wie sieht es mit GEO600 in Ruthe bei Hannover aus?**

**Danzmann:** Dieser Detektor ist bei niedrigen Frequenzen nicht empfindlich genug für solche Signale, da er kleiner ist. Seine Stärke liegt bei höheren Frequenzen. Vor allem gibt es hier aber eine jahrzehntelange Tradition der Technologieentwicklung. Alle Innovationen, die hieraus hervorgegangen sind, finden sich mittlerweile in den anderen Detektoren des Netzwerks wieder, neben speziellen Spiegelaufhängungen etwa auch die Lasertechnologie und überhaupt das optische Layout der Interferometer. Die vorstabilisierten Lasersysteme von Advanced LIGO haben wir als Hardware bereitgestellt. Advanced LIGO ist auch unser Detektor!

**Die Entdeckung hat gezeigt, dass das Kalkül, mit der neuen Messempfindlichkeit der Detektoren endlich Gravitationswellen direkt zu messen, aufgegangen ist. Und das sogar**

---

## » Wir haben auf einmal ein neues Werkzeug zur Hand, um die dunkle Seite des Universums zu studieren.

---

**früher als erhofft. Welche weiteren Entwicklungen und Beobachtungen erwarten Sie in näherer Zukunft?**

**Allen:** Gerade kurzfristig könnte es nun besonders spannend werden. Wir haben jetzt ein System sehr gut beobachtet. Ich schätze mal, dass wir während des nächsten sechsmonatigen Wissenschaftsbetriebs nach einer weiteren, kürzeren Umbauphase im Laufe des Jahres ein System wie dieses alle drei oder vier Tage sehen. Gegen Ende der nächsten Messperiode werden wir rund 20 solcher Detektionen haben. Wir werden sehen können, wie das Massenspektrum solcher Systeme beschaffen ist. Und wir werden etwas über die Entwicklung solcher Systeme lernen, denn einige von ihnen werden näher sein, andere weiter entfernt, das heißt: zu einem früheren Zeitpunkt entstanden sein. So werden wir zum Beispiel etwas über den Anteil schwerer Elemente im Universum zu den verschiedenen Epochen erfahren. Denn das beeinflusst stark die Entstehungsrate besonders massereicher Sterne und schwarzer Löcher. Und dann hoffen wir natürlich, all die anderen Arten von Quellen, die zu erwarten sind, auch noch zu finden – die Verschmelzung zweier Neutronensterne oder Kombinationen aus einem Neutronenstern und einem schwarzen Loch.

**Welche Bedeutung hat die Entdeckung für die Physik im weiteren Sinne?**

**Danzmann:** Ich denke, die Bedeutung für Physik und Astronomie ist enorm. Nicht so sehr, weil endlich Gravitationswellen nachgewiesen wurden. Daran hat keiner gezweifelt! Aber weil die Gravitationswellenastronomie in den Mainstream der Astronomie gerückt ist. Wir haben auf

einmal ein neues Werkzeug zur Hand, um die dunkle Seite des Universums zu studieren. Man muss sich einmal klarmachen, dass mehr als 99 Prozent des Weltalls kein Licht und keine elektromagnetische Strahlung aussenden. Über diesen Teil wissen wir bisher nur, dass er der Schwerkraft unterworfen ist. Das nun untersuchen zu können, darin liegt die größte Hoffnung.

**Allen:** Nun, zuallererst haben wir gezeigt, dass wir Gravitationswellen direkt messen können. Wir können damit jetzt Wissenschaft betreiben. Und wir sind nun auch in der Lage, die allgemeine Relativitätstheorie bei starken Gravitationsfeldern zu testen. Bis jetzt beweist das vor allem, dass Einsteins Theorie völlig richtig ist. Daher denke ich nicht, dass wir daraus etwas fundamental Neues über die Physik lernen werden. Aber wir haben jetzt eine wunderbare Methode, um diese Gesetze nachzuprüfen.

**Buonanno:** Diese Entdeckung hat eine solche Tragweite, dass es zum jetzigen Zeitpunkt noch schwierig ist, alle Folgen auf unser Verständnis von Gravitation, Grundlagenphysik und Astrophysik wirklich abschätzen zu können. Diese Beobachtung wird wohl noch für viele Jahre Nachwirkungen auf diese Forschungsfelder haben. Und es ist fantastisch, dass die Bekanntgabe der Entdeckung kurz nach dem hundertjährigen Jubiläum von Einsteins Veröffentlichung über die Existenz von Gravitationswellen erfolgt! Jetzt steht uns ein neues Instrument zur Erforschung des Universums und zur Enthüllung seiner dunklen, extremsten Seite zur Verfügung. Wir haben entdeckt, dass stellare schwarze Löcher existieren, dass sie paarweise – also in Doppelsystemen – vorkommen und



Karsten Danzmann

dass es sich um ziemlich massereiche Gebilde handeln kann. Und ja, die Beobachtung von zwei miteinander verschmelzenden schwarzen Löchern erlaubt es uns zu untersuchen, wie sich die Gesetze der Gravitation unter solch extremen Bedingungen verhalten. So können wir überprüfen, ob die allgemeine Relativitätstheorie auch dann noch gilt.

**Allen:** Ich denke da auch an das hundertjährige Jubiläum der allgemeinen Relativitätstheorie, das wir im Herbst 2015 in Berlin gefeiert haben. Denn Einstein selber glaubte nicht daran, dass sich Gravitationswellen jemals würden messen lassen, weil sie so schwach sind. Und er glaubte außerdem nicht an schwarze Löcher. Wir haben gezeigt, dass er in beiden Punkten falsch lag. Aber ich denke nicht, dass ihn das gestört hätte. Ich glaube, er hätte sich gefreut! ◀

Interview: Felicitas Mokler

# Die Suche nach dem **zarten Zittern**

Gravitationswellen gehören zu den spektakulären Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie von 1915. Aber erst ein halbes Jahrhundert später versuchte der Physiker Joseph Weber sie aufzuspüren. Anfang der 1970er-Jahre stiegen auch **Max-Planck-Wissenschaftler** in dieses Forschungsfeld ein und entwickelten Detektoren der zweiten Generation. Dank der Vorarbeiten dieser Pioniere blieben die Wellen in der Raumzeit keine Hirngespinnste: Im September 2015 gingen sie endlich in die Falle.

TEXT **HELMUT HORNING**

Albert Einstein zweifelte: Gravitationswellen werde man niemals nachweisen können, zu schwach sei das Zittern der Raumzeit! Dabei hatte er selbst ihre Existenz postuliert, denn sie ergibt sich aus seiner im November 1915 vorgelegten allgemeinen Relativitätstheorie. Wenig später – 1916 und 1918 – widmet er diesem Phänomen jeweils eine Veröffentlichung.

Nach zwei Jahrzehnten plötzlich die Wende: „Ich habe zusammen mit einem jungen Mitarbeiter [Nathan Rosen] das interessante Ergebnis gefunden, daß es keine Gravitationswellen gibt“, schreibt Einstein an seinen Kollegen Max Born. Und reicht 1936 bei der renommierten Zeitschrift *PHYSICAL REVIEW* ein Manuskript ein – das ein Gutachter als unbrauchbar an den Autor zurücksendet. Albert Einstein kocht vor Wut ob dieser Blamage, muss aber einsehen, dass seine Argumentation tatsächlich fehlerhaft ist. Seine Zweifel waren unberechtigt.

Und die Fachwelt? Die nimmt von den Gravitationswellen kaum Notiz. Das gilt für die allgemeine Relativitätstheorie insgesamt, die schon seit den 1920er-Jahren ein eher kümmerliches Dasein fristet. Erst nach Einsteins Tod 1955 wächst das Interesse an ihr. Schwarze Löcher oder Quasare rücken jetzt ins Blickfeld der Astrophysiker: exotische Objekte, die sich ohne Einsteins Formeln nicht erklären lassen. Von dieser Renaissance der Relativität profitieren letztlich auch die Gravitationswellen. Wenigstens bei einem Physiker bringen sie eine Saite zum Schwingen: Joseph Weber.

Der 1919 in New Jersey geborene Wissenschaftler forscht an der Universität von Maryland und hat die Idee zu einem simplen Experiment: Er hängt einen tonnenschweren Aluminiumzylinder – etwa eineinhalb Meter lang und 60 Zentimeter dick – in einer Drahtschleife auf und versieht ihn in der Mitte mit Piezosensoren, die Schwingungen registrieren sollen. Die gesamte Versuchsanordnung steckt in einer Vakuumkammer.

Warum aber können Gravitationswellen einen massiven Metallzylinder erzittern lassen? Weil sie den Raum senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung dehnen und stauchen. Stellen wir uns vor, Gravitationswellen würden auf einen kugelförmigen Ballon treffen: Innerhalb von tausendstel Sekunden würden sie ihn zunächst zu einem Ei verformen und anschließend zu einer Wurst auseinanderziehen.

Als Quellen für Gravitationswellen sieht Weber vor allem kosmische Katastrophen innerhalb unserer Milchstraße, eine Supernova etwa. Dabei explodiert ein Stern und schleudert große Massen ins Weltall, während gleichzeitig seine inneren Bereiche in sich zusammenstürzen. Übrig bleiben ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch. Heute wissen wir, dass diese Objekte auch selbst Gravitationswellen erzeugen können – und zwar immer dann, wenn sie als Paare in engen Umlaufbahnen entstehen und miteinander verschmelzen. Die im September 2015 registrierten Wellen stammen von einem derartigen Ereignis: von zwei schwarzen Löchern mit 29 und 36 Sonnenmassen, die sich in einer rund 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie vereint haben.

Die Reichweite der Weber-Zylinder umfasste nur einen kleinen Bereich innerhalb unserer Milchstraße. Unwahrscheinlich, dass darin eine Supernova hochgeht. Zumal es in der gesamten Galaxie nur zwei bis vier solcher Ereignisse pro Jahrhundert geben soll. Dennoch: 1969 meldet Joseph Weber einen Erfolg. Seine Detektoren in Maryland und am 1000 Kilometer entfernten Argonne National Laboratory sollten tatsächlich Gravitationswellen registriert haben, sogar mehrere pro Woche!

Andere Wissenschaftler bleiben skeptisch. Auch die am Münchener Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik. Hier schlägt im Jahr 1970 die Geburtsstunde der Gravitationswellenforschung in Deutschland. „Damals beschlossen wir, Webers Experiment mit verfeinerter Technik und ausgeklügelter Datenverarbeitung mög-

Gewichtiges Experiment: Mit einem solchen massiven Zylinder aus Aluminium haben Max-Planck-Forscher Anfang der 1970er-Jahre nach Gravitationswellen gefahndet.



lichtst exakt zu wiederholen“, erinnert sich Walter Winkler, der zu den ambitionierten Max-Planck-Forschern gehörte. Die Gruppe um Heinz Billing baut in München und im italienischen Frascati die empfindlichsten Zylinderdetektoren weltweit. Mit ihnen lassen sich noch Längenänderungen von  $10^{-15}$  Zentimetern registrieren. Die Versuche laufen von 1972 bis 1975. Ergebnis: nichts!

Die Weber-Detektoren kommen aus der Mode – und machen einer neuen Methode Platz: der Interferometrie. Die Idee dazu stammt von dem deutsch-amerikanischen Physiker Albert A. Michelson. Im Jahr 1881 wollte er mit einem solchen Gerät in Potsdam die Geschwindigkeit der Erde relativ zum damals vermuteten Äther messen. 90 Jahre später schlagen Philip Chapman, Robert Forward und Rainer Weiss ein derartiges Instrument als Detektor für Gravitationswellen vor. Als Lichtquelle soll ein Laser dienen. Doch die drei US-Forscher kommen wegen Geldmangels nicht weiter.

Wieder tritt die Gruppe aus dem Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik auf den Plan. Als einzige weltweit beginnt sie, mit der neuen Technik zu arbeiten. Deren Prinzip ist einfach: Ein Laserstrahl trifft auf einen Strahlteiler und wird dort in zwei Strahlen aufgespalten; einer läuft geradeaus weiter, der andere wird um 90 Grad abgelenkt. Am Ende einer jeden Strecke sitzt ein Spiegel, der das Licht wieder auf den Strahlteiler reflektiert.

**GEO, November 1985**



Mit einer drei mal drei Kilometer großen „Antenne“ wollen Forscher des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching Gravitationswellen aus fernen Galaxien einfangen.

Dieser lenkt die Strahlen nun so um, dass sie sich überlagern, also interferieren. Die auf einer Photodiode ankommenden Lichtwellen schwingen jedoch nicht im Gleich-, sondern im Gegenteil: Wellenberg trifft auf Wellental, die Lichtwellen löschen sich gegenseitig aus. Läuft eine Gravitationswelle durch das System, quetscht und dehnt sie den Raum und verändert so die Messstrecken. Die Lichtwellen geraten aus dem Takt. Der Empfänger bleibt nicht länger dunkel – ein Signal erscheint.

Im Jahr 1975 bauen die Münchner Forscher – neben Heinz Billing sind das Walter Winkler, Albrecht Rüdiger, Roland Schilling, Lise Schnupp und Karl Mäischberger – einen Prototyp mit einer Armlänge von drei Metern. Das Licht eines drei Watt starken Argon-Lasers wird darin 150-mal reflektiert. Doch auch dieser Detektor der zweiten Generation hat seine Tücken: Die Lichtfrequenz des Lasers muss extrem stabil sein, außerdem ist seine Grundleistung zu schwach. Zudem verursachen Schwankungen in der Geometrie des Strahls unerwünschte Fehlsignale und lassen Bodenerschütterungen die Spiegel erzittern.

Um alle diese missliebigen Effekte zu reduzieren, entwickeln die Physiker innovative Techniken, ohne die heute keine Gravitationswellenfalle mehr auskommt. Ihre Pionierarbeit setzen sie ab dem Jahr 1983 an einem zweiten Prototyp mit 30 Meter Armlänge fort. Das ist recht kurz. Denn in der tausendstel Sekunde, in



Neue Technik: Kernstück der zweiten Generation von Detektoren sind Laser. Hier arbeiten Walter Winkler (links im Hintergrund) und Karl Mäischberger im Jahr 1977 am Prototyp eines solchen Interferometers.

der eine Gravitationswelle die Messstrecke durchquert, legt das Licht 300 Kilometer zurück. Der Laserstrahl müsste also genauso weit unterwegs sein, um die Welle vollständig zu beobachten. Die Forscher bedienen sich eines Tricks, den sie *delay line* nennen und der darin besteht, dass der Strahlengang „gefaltet“ und, wie oben erwähnt, der Strahl mehrfach zwischen den Spiegeln hin und her geworfen wird.

Trotzdem: Je länger die Messstrecke, desto besser. „Im Jahr 1985 stellten wir daher den Antrag zum Bau eines Detektors mit drei Kilometer Armlänge“, sagt Walter Winkler. „Aber das Projekt stieß in Deutschland auf keinerlei Interesse und wurde folglich nicht genehmigt.“ Genauso ergeht es einer britischen Gruppe. Seit 1977 befasste sie sich an der Universität Glasgow mit ähnlichen Untersuchungen und konstruierte 1980 einen Detektor mit zehn Meter Armlänge. 1986 fand der Antrag der Schotten auf ein großes Interferometer kein Gehör.

Ähnliche Schicksale schweißen zusammen, und so beschließen beide Teams drei Jahre später zu kooperieren. Schon kurz darauf legen sie gemeinsam die Planungen für einen Detektor vor, der im Harz entstehen soll – wiederum erfolglos. Im Jahr 1994 endlich der Durchbruch: Nahe Hannover wird der Bau eines deutsch-britischen Detektors mit einer Armlänge von jeweils 600 Metern endlich Realität. „Herbert Welling von der Universität Hannover schaffte es, seine Kollegen zu überzeugen, die Anlage nach Niedersachsen zu holen“, sagt Winkler.

Karsten Danzmann, erst Gruppenleiter in Garching und heute Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, wird berufen und erhält Mittel vom Land Niedersachsen, der Universität sowie der VW-Stiftung. Mit wenig Geld und großem Einsatz – auch von den Kollegen aus Großbritannien – bringen die Forscher das Projekt auf den Weg.

Am 4. September 1995 erfolgt der erste Spatenstich. Seit 2002 wird der Detektor vom Zentrum für Gravitationsphysik, dem auch das Max-Planck-Institut angehört, gemeinsam mit der Leibniz Universität Hannover und den Universitäten in Glasgow und Cardiff betrieben. Die Anlage dient vor allem als Testlabor für Techniken, die in anderen Detektoren weltweit Eingang finden. Nicht zuletzt gehörte David Shoemaker, Projektleiter von Advanced LIGO, zeitweise der Max-Planck-Gruppe an. Nun hat diese US-amerikanische Anlage mit deutscher Technologie erstmals Gravitationswellen gemessen und damit die jahrzehntelange, hartnäckige Suche nach dem zarten Zittern aus dem All gekrönt.