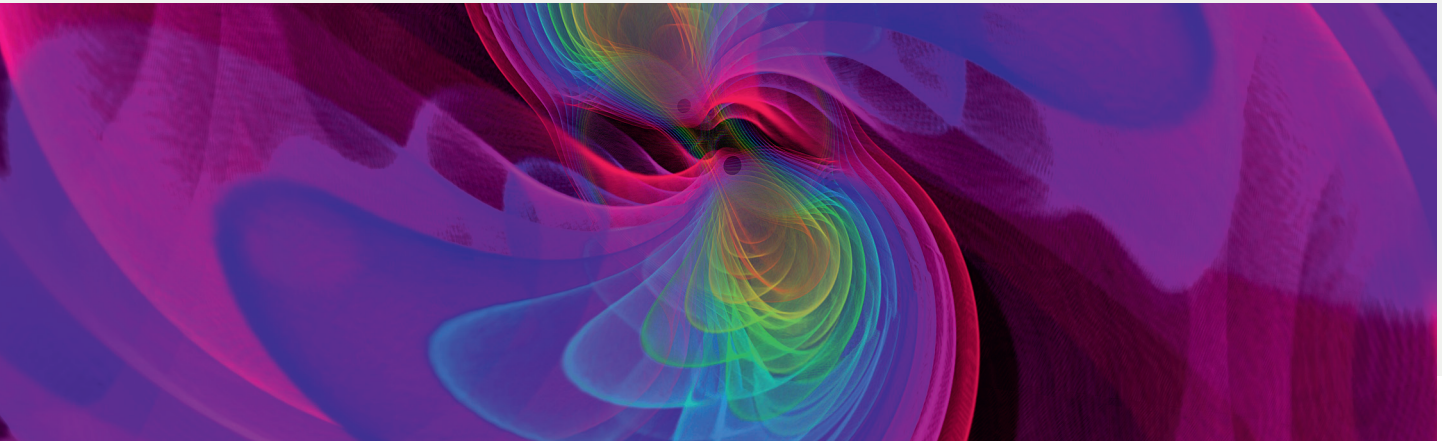


Der Kosmos bebt The Quaking Cosmos



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.

An 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. Beide 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,

Albert Einstein was right: gravitational waves really do exist. They were detected on September 14, 2015. This, on the other hand, would have surprised Einstein, as he believed they were too weak to ever be measured. The researchers were therefore all the more delighted – particularly those at the Max Planck Institute for Gravitational Physics, which played a major role in the discovery.

On that memorable Monday in September 2015, the clock in Hanover stood at 11:51 a.m. when Marco Drago at the Max Planck Institute for Gravitational Physics first saw the signal. For around a quarter of a second, the gravitational wave rippled through two detectors known as Advanced LIGO. The installations are located thousands of kilometers away in the US, one in Hanford, Washington, the other in Livingston, Louisiana.

Drago initially thought the signal had been slipped in deliberately to test the scientists' response, as has happened many a time in the past. But Advanced LIGO wasn't even in regular operation yet, so Drago informed his colleague Andy Lundgren. Both agreed: the curve looked perfect; the signal appeared to be real. The Max Planck researchers had an inkling that they had just become witnesses to a historic moment.

The discovery represents the current pinnacle of the history of gravitation – the general theory of relativity has now passed its final test with flying colors. In addition, the measurement opens up a new window of observation, as almost 99 percent of the universe is in the dark – that is, it doesn't emit any electromagnetic radiation. With gravitational waves, in contrast, it will be possible for the first time to investigate

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 schall- und lichtdicht, 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 hüpfet, verliert Energie und schlägt in der Raumzeit solche Wellen. Sie sind unmessbar klein, denn ein Mensch hat eine geringe Masse und hüpfet 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 umeinander laufen oder gar miteinander kollidieren. Oder wenn ein massereicher Stern als Supernova explodiert. Solche kosmischen Ereignisse erzeugen Gravitationswellen mit einer Leistung von rund 10^{45} Watt.

Gravitationswellen verändern den Abstand zwischen den im Raum enthaltenen Objekten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Das zu messen, ist äußerst schwierig. Albert Einstein hielt den Nachweis daher für unmöglich. Und doch haben die Wissenschaftler Instrumente ersonnen, denen das gelungen

cosmic objects such as black holes in detail. And in the future, the researchers will even be able to “hear” almost as far back as the Big Bang.

But what exactly are these waves from outer space? The roots of modern gravitational research lie in Switzerland. There, in 1907, a “technical expert second class” at the patent office in Berne was giving some intense thought to gravity: Albert Einstein. He simulated gravity using acceleration, since acceleration also generates forces as occur, for instance, in a rapidly accelerating elevator. If the elevator car were soundproof and lightproof, the passengers might think that terrestrial gravity had suddenly increased.

The realization that gravitation is at least partially a question of one’s system of reference led Albert Einstein to the revolutionary ideas he presented in his general theory of relativity in the fall of 1915, after eight years of work. It was ultimately a field theory. It states that the accelerated motion of masses leads to perturbations that move through space at the speed of light – gravitational waves.

If you jump up and down on a trampoline, for example, you lose energy and generate these waves in space-time. They are immeasurably small, because a human being has a low mass and jumps relatively slowly. Space, on the other hand, contains very large masses – and even a trampoline: space-time. Everything is in motion here, as not a single celestial body remains at rest in one place. Earth bends space as it orbits the Sun, radiating gravitational waves with a power of 200 watts. But even these gravitational waves are still too weak to be tracked down with a detector.

Fortunately, there are also much stronger tremors of space-time in the universe: when two neutron stars or black holes orbit each other extremely quickly, or even collide with each other. Or when a massive star explodes as a supernova. Such cosmic events generate gravitational waves with a power of around 10^{45} watts.

Gravitational waves change the separation between the objects in space perpendicularly to the direction of propagation. This is extremely difficult to measure, which is why Albert Einstein thought it would be impossible to detect them. And yet scientists have come up with instruments that have now succeeded in doing just that. The first-generation instruments of the 1960s consisted of aluminum cylinders weighing many tons and equipped with sensitive sensors. Pulses of gravitational waves should have caused them to oscillate

ist. Die Geräte der ersten Generation in den 1960er-Jahren bestanden aus tonnenschweren, mit sensiblen Sensoren bestückten Aluminiumzylindern. Gravitationswellenpulse mussten 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 Gegenteil: 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 folgenden 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

like the clapper of a bell. But despite sophisticated amplifiers, these resonance detectors produced no results.

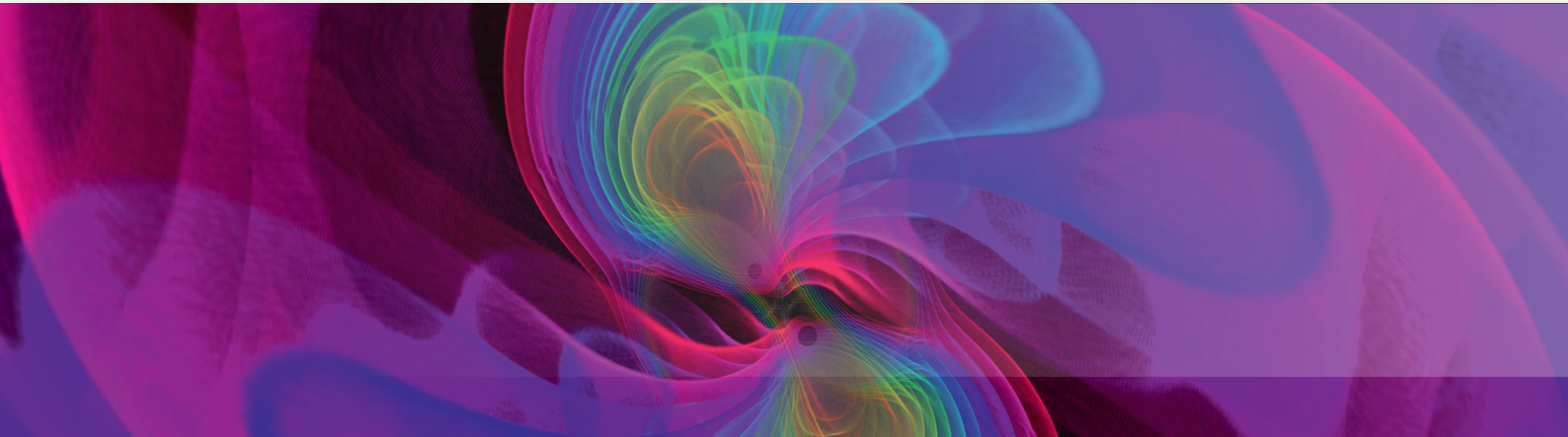
The researchers thus designed receivers that were even more sensitive, known as laser interferometers. Here, a laser beam impinges on a beam splitter, where it is split into two beams; one continues on in a straight line while the other is deflected to the side. At the end of each path is a mirror that reflects the light back to the beam splitter. This mirror now deflects the beams in such a way that they are superimposed on each other – that is, they interfere – and strike a photodiode.

In the case of unperturbed measurement paths, the light waves arriving at the photodiode oscillate not in phase, but out of phase: wave crest meets wave trough, the light waves extinguish each other. If a gravitational wave perturbs the system and thus changes the measurement paths, the light waves lose the beat. The receiver no longer remains dark – a signal appears.

In 1975, a group working with Heinz Billing at the Max Planck Institute for Physics and Astrophysics built the prototype of such an interferometer with a path length of 3 meters; in 1983 they built one with a 30-meter path length. The foundations were thus laid for all subsequent installations of this type. The scientists have developed innovative technologies – for instance for the suspension of the mirrors or to stabilize the laser – particularly for the GEO600 detector, which has been stretching out its 600-meter arms in a field near Hanover since the mid-1990s.

“Seen in this light, Advanced LIGO is our detector as well,” said Karsten Danzmann on February 11 in Hanover, on the occasion of the official announcement of the discovery. After all, the two structurally similar facilities in the US are full of technical know-how from Danzmann’s team. When they detected the tremor in space-time, the length of the laser paths, each four kilometers long and arranged perpendicular to each other, had changed by only a tiny fraction of the diameter of an atom.

In order to discover the gravitational wave signals in the pile of data, the researchers had to know what they were looking for in the first place. The researchers in Bruce Allen’s department in Hanover are therefore working on programs to see and analyze the signals. And Alessandra Buonanno’s group in Potsdam-Golm developed the models they use to better understand the sources of the waves.



Abteilung von Bruce Allen in Hannover an Programmen, um die Signale zu sehen und zu analysieren. Und die Gruppe von Alessandra 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.

Text: Helmut Hornung

The signal detected on September 14, 2015 told of the merger of two black holes with 29 and 36 solar masses, 1.3 billion light-years away from Earth. The close interplay of experiment, simulations, analytical calculations and data analysis allows the scientists to illuminate the dark corners of the universe. The ripples in space-time will shed light on the astronomy of the future.

Author: Helmut Hornung

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.

© S. Ossokine, A. Buonanno (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik), Simulating eXtreme Spacetime Projekt, D. Steinhauser (Airborne Hydro Mapping GmbH)

Cosmic collision: The first gravitational waves ever observed originated from two merging black holes around 1.3 billion light-years from Earth. Researchers at the Max Planck Institute for Gravitational Physics simulated the scenario on the computer (see also the magazine cover).

© S. Ossokine, A. Buonanno (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik), Simulating eXtreme Spacetime project, D. Steinhauser (Airborne Hydro Mapping GmbH)