

Das erste Signal einer Gravitationswelle registrierten die Detektoren des amerikanischen LIGO-Experiments am 14. September 2015 am späten Vormittag mitteleuropäischer Zeit. Da es in den USA noch Nacht war, sahen zwei Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik in Hannover das Signal zuerst auf ihrem Bildschirm – wenige Minuten, nachdem die Detektoren angeschlagen hatten. Es war so perfekt, dass sie es zunächst für ein Testsignal hielten. Die beiden LIGO-Detektoren waren nach einer längeren Umbauphase noch im Testbetrieb. Erst wenige Tage später sollte der Messbetrieb beginnen.

„Wenn Sie die Präzision der Messinstrumente erhöhen, brauchen Sie noch eine Zeit für die Feinabstimmung. Das ist, wie wenn Sie bei einem Orchester die Musiker durch noch bessere Musiker ersetzen. Spielt die neue Besetzung zum ersten Mal zusammen, erwarten Sie noch nicht den perfekten Sound“, erklärt Prof. Luciano Rezzolla vom Institut für Theoretische Physik der Goethe-Universität. Als Theoretiker war er nicht direkt an den Messungen beteiligt, aber auch dank seiner Simulationen wussten die Kollegen am LIGO-Experiment genau, wie das extrem schwache Signal aussehen sollte. „Dass in dieser frühen Phase des Experiments schon ein eindeutiges Signal gemessen wurde, ist fast wie Magie“, strahlt Rezzolla.

Die beiden Forscher in Hannover untersuchten die Daten zunächst für einige Stunden, bevor sie ihre Kollegen informierten. Erst am 11. Februar 2016 wagte sich das internationale Forscherteam mit der Aufsehen erregenden Meldung an die Öffentlichkeit: „In den ersten Wochen nach der Entdeckung hatten wir tatsächlich Bedenken, dass jemand aus Versehen ein künstliches Signal injiziert haben könnte oder vergessen hatte, uns darüber zu informieren. Wir haben sehr viel Arbeit investiert, um das ausschließen zu können. Doch am Ende stand fest: Das Signal stammt aus dem All. Wir sind Zeuge davon geworden, wie in einer fernen Galaxie zwei schwarze Löcher ineinandergestürzt sind!“, erklärte Prof. Bruce Allen vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover wenige Tage nach der Pressekonferenz.

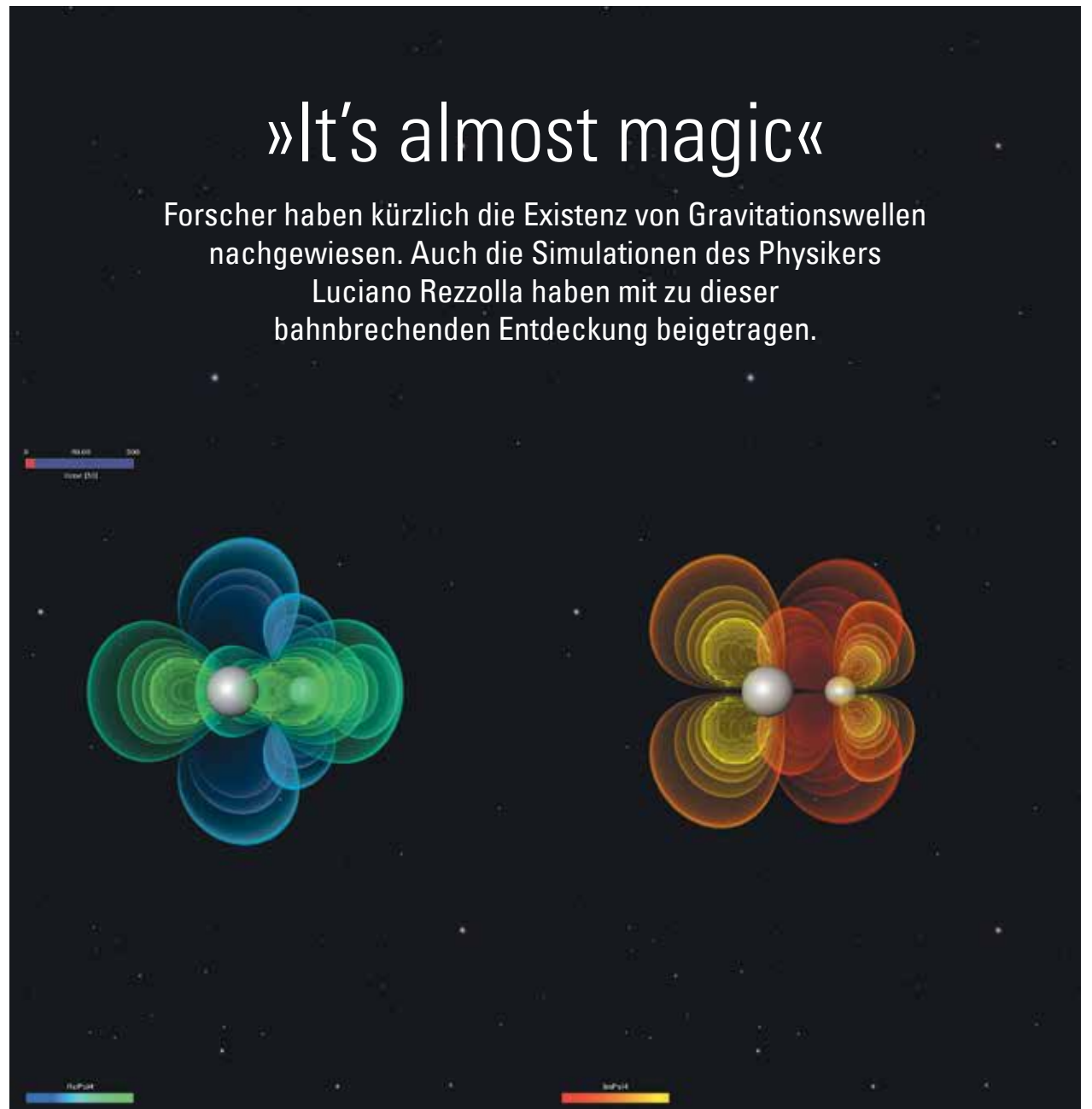
Luciano Rezzolla hatte bereits Gerüchte von der Entdeckung gehört, als er Anfang Februar von der geplanten Pressekonferenz erfuhr. „Sie fiel genau in meine letzte Vorlesung zur Allgemeinen Relativitätstheorie, in der ich die Gravitationswellen behandeln wollte. Ich habe alle im Physik-Institut in meine Vorlesung eingeladen. Dann habe ich zur festgesetzten Zeit unterbrochen und wir haben uns die Übertragung der Pressekonferenz aus Washington live angeschaut. Das war für alle ein außerordentliches Moment.“

Was diese Entdeckung für die Physik bedeutet, ließ sich in den Tagen nach der Pressekonferenz an den glücklichen Gesichtern und begeisterten Äußerungen der sonst eher zurückhaltenden Forscher ermessen. „Zunächst einmal wissen wir jetzt, dass wir die letzten 20 Jahre unseres Lebens nicht mit der Suche nach Gravitationswellen vergeudet haben“, sagt Luciano Rezzolla erleichtert. „Es ist eine Sache, an etwas zu glauben, und eine andere, sie bestätigt zu wissen.“ Schließlich hatte Albert Einstein, der die Existenz von Gravitationswellen vor 100 Jahren als Konsequenz der allgemeinen Relativitätstheorie vorhersagte, selbst nicht erwartet, dass man die schwachen Signale jemals würde nachweisen können.

Was sind Gravitationswellen?

Gravitationswellen sind Kräuselungen der Raum-Zeit-Krümmung, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und dabei eine Energie und einen Drehimpuls transportieren. Luciano Rezzolla veranschaulicht dies durch den Vergleich mit einem glatten Laken, auf das man eine schwere Kugel legt. Dadurch entsteht eine Delle. Legt man nun eine Murmel auf die Fläche, wird sie auf die Kugel zurollen, als ob sie von ihr angezogen würde. „Genau so wirkt auch die Gravitationskraft auf die Raum-Zeit-Krümmung: Massive Körper verbiegen die vierdimensionale Fläche der Raum-Zeit und leichtere Körper folgen diesen Krümmungen“, erklärt Rezzolla. Wenn zwei massive Kugeln sich aufeinander zubewegen, dann entsprechen Gravitationswellen kleinen Kräuselwellen auf der Oberfläche des Bettlakens, das die Raum-Zeit-Krümmung repräsentiert.

Den ersten indirekten Hinweis auf Gravitationswellen fanden 1974 zwei Radio-Astronomen, Russel Hulse und Joseph Taylor. Sie entdeckten zwei Neutronensterne im Sternbild Adler, die einander innerhalb von nur acht Stunden umkreisen. Neutronensterne sind verglühte Sterne, etwa anderthalb mal so schwer wie die Sonne und extrem klein; ihr Radius beträgt nur 15 Kilometer. Deshalb besitzen sie außerordentlich starke Gravitationsfelder, die im Wesent-



Numerische Simulation zweier einander umkreisender Schwarzer Löcher, die zu einem neuen Schwarzen Loch verschmelzen. Dargestellt sind die scheinbaren Horizonte der Schwarzen Löcher und die abgestrahlten Gravitationswellen. Abgebildet sind entweder die tatsächlichen und/oder der imaginäre Teil der Krümmung skalarer Ψ_4 .

Numerische Simulation: C. Reisswig, L. Rezzolla (Albert-Einstein-Institut).
Wissenschaftliche Visualisierung: M. Koppitz (Albert-Einstein-Institut & Zuse-Institut Berlin)

lichen mit denen eines Schwarzen Lochs vergleichbar sind. „In einem Doppelsternsystem bewegen sich die Sterne fast mit Lichtgeschwindigkeit und senden dabei reichlich Gravitationswellen aus. Unglücklicherweise erreichen uns diese Wellen erst, wenn sie schon stark abgeschwächt sind. Das Sternbild Adler ist 21.000 Lichtjahre entfernt. Lange Zeit konnten wir sie deshalb mit unseren empfindlichsten Detektoren nicht messen“, erklärt Rezzolla und verweist auf die erfolglose erste Messperiode des LIGO-Experiments in den Jahren 2002 bis 2007.

Dennoch glaubten die Forscher an die Existenz der Gravitationswellen, weil sie über Jahrzehnte hinweg präzise messen konnten, wie sich der Abstand zwischen den beiden Neutronensternen verkürzte. Daraus schlossen sie, dass das System Energie in Form von Gravitationswellen abstrahlt. Die Daten stimmten bestens mit den Vorhersagen von Einsteins Theorie überein. 1993 erhielten Hulse und Taylor den Physik-Nobelpreis.

Dass die Gravitationswellen nun nachgewiesen werden konnten, ist der technischen Aufrüstung der beiden LIGO-Detektoren in den Staaten Washington und Louisiana zu verdanken. Es handelt sich um riesige Apparaturen mit je vier Kilometer langen Laserarmen, in denen Laserstrahlen im rechten Winkel zueinander losgeschickt, an Spiegeln reflektiert und zur Interferenz gebracht werden. Im Kreuzungspunkt entsteht ein Muster aus hellen und dunklen Streifen, das extrem empfindlich auf die Wegstrecke reagiert, welche die Strahlen zurücklegen, bevor sie sich treffen. Wird die Raumzeit durch eine Gravitationswelle gestaucht, lässt sich das an einer Verschiebung des Musters ablesen. Allerdings muss man dazu Erschütterungen wie den Straßenverkehr, die zu einem viel größeren Ausschlag der Messinstrumente führen würden, vermeiden. Eine Maßnahme ist die Aufhängung der riesigen Spiegel. Während sie in der ersten Generation des LIGO-Experiments an einem einfachen Pendel aufgehängt waren, sind sie in der zweiten Ausbaustufe durch

ein Vierfachpendel noch besser vor Erschütterungen geschützt.

Bedeutung von Simulationen

Doch trotz des gewaltigen technischen Aufwands sind die Signale der Gravitationswellen so schwach, dass sie im Rauschen des Experiments untergehen. Deshalb sind Simulationen von Theoretikern wie Luciano Rezzolla so wichtig. Wenn man nämlich vorher weiß, wie das Signal aussehen sollte, kann man es herausfiltern. „Wir können das Signal berechnen, indem wir mit parallel arbeitenden Supercomputern die Einstein'schen Gleichungen und diejenigen der relativistischen Hydrodynamik numerisch lösen“, erklärt Rezzolla. Das jetzt gemessene Signal ist konsistent mit den Computersimulationen.

Jetzt prüft die Arbeitsgruppe von Rezzolla noch Details, insbesondere, ob das Signal wirklich von schwarzen Löchern ausgesandt wurde. Theoretisch könnte es nämlich auch von „Gravasternen“ stammen. Das sind hypothetische Himmelsobjekte, die gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie ebenfalls aus einem sehr massereichen Stern entstehen könnten – so etwas wie Schwestern der schwarzen Löcher.

Für Rezzolla und seine Kollegen bedeutet der Nachweis der Gravitationswellen den Beginn einer neuen Ära der Astrophysik. „Ich vergleiche die bisherige Situation gern mit einer Bibliothek, in der man alle Bücher kennt. Jetzt haben wir eine Geheimgtür in eine verborgene Bibliothek gefunden. Darin stehen Bücher, von denen wir schon einmal gehört haben und die wir jetzt endlich lesen können, aber auch andere, die ganz unbekannt und vielleicht in fremden Sprachen geschrieben sind.“ Schon jetzt weist vieles darauf hin, dass in den aufgezeichneten Daten noch mehr interessante Physik steckt. Mit weiteren Messungen, die künftig auch vom VIRGO-Experimente in Italien und KAGRA in Japan zu erwarten sind, geht die Astrophysik spannenden Zeiten entgegen.

Anne Hardy