**Diesmal hat es geklappt: Der Nobelpreis für Physik 2017 wird für den direkten Nachweis von Gravitationswellen vergeben.**

***Erst hundert Jahre nach ihrer Vorhersage wurden Gravitationswellen erstmals direkt gemessen. Was aber sind Gravitationswellen und warum war es so schwierig, sie nachzuweisen? Wie haben österreichische ForscherInnen damals und heute zu diesem Erfolg beigetragen? Und welche neuen Möglichkeiten eröffnet dieser Zweig der Physik?***

Am 14. September 2015 wurden in zwei Gravitationswellen-Detektoren des „Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory“, kurz LIGO, in den USA fast gleichzeitig Signale in exakter Übereinstimmung mit den Berechnungen aus der Einstein‘schen Gravitationstheorie beobachtet.

Erst Monate später, am 11. Februar 2016, nachdem über Tausend der MitarbeiterInnen am LIGO-Projekt, sichergestellt hatten, dass es sich tatsächlich um ein echtes Signal aus dem Kosmos handelt und die Quelle identifizieren konnten, traten die VertreterInnen von LIGO an die Öffentlichkeit. Unterdessen wurde bekannt, dass bereits am 25. Dezember des Vorjahres ein weiteres Gravitationswellen-Signal empfangen wurde.

In der Zwischenzeit sind zwei weitere Ereignisse dazu gekommen: Wobei das letzte der beiden Ereignisse, im August 2017, besonders wichtig ist weil diesmal nicht nur die LIGO –Detektoren, sondern auch die VIRGO Anlage in Italien das Signal registrierte.

 Aufgrund dieser bahnbrechenden experimenteller und theoretischen Leistung hat das Nobelpreis Komitee den Nobelpreis für Physik 2017 an die Väter des LIGO Projekts, stellvertretend für eine der wohl größten wissenschaftlichen Kollaborationen, zuerkannt: Barry Barish vom Caltech, Kip Thorne ebenfalls Caltech und Rainer Weiss vom MIT. Damit wird eine über Jahrzehnte lange Anstrengung gewürdigt eine Messanlage zu entwerfen und zu konstruieren, welche imstande ist Gravitationswellen direkt nachzuweisen. Es ist dies bei weitem nicht die einzige Ehrung, denn zahlreiche Preise wurden dafür bereits vergeben und dennoch ist der Nobelpreis die Krönung für diese außergewöhnliche wissenschaftliche Entdeckung.

**Die Preisträger**

*Barry Barish,* ist *Professor Emeritus Inhaber des Linde Chair of Physics* am California Institute of Technology in Pasadena. Er war wissenschaftlicher Hauptverantwortlicher für das LIGO Projekt in den Jahren 1994 bis 2015. Als einer der treibenden Kräfte des LIGO Projekts war er maßgeblich bei der Konstruktion und Kommissionierung der ersten Detektoren, sowie bei der Planung der Instrumente wie sie heute zur Verfügung stehen, beteiligt.

*Kip Thorne*, emeritierter Professor vom Richard Feynman Lehrstuhl am Caltech, gehört zu den Gründungsvätern des LIGO-Projekts im Jahr 1984. Seine zahlreichen Beiträge über Gravitationswellen und deren mögliche astrophysikalischen Quellen waren Ansporn für das Projekt. Sein Beitrag zusammen mit Braginsky über das sogenannte „Quantum no-demolition measurement“ wurde dadurch motiviert die Effekte der Quantentheorie für Gravitationswellen Detektoren zu minimieren. Thorne war wissenschaftlicher Berater des Films „Interstellar“. Seine populären Bücher „The science of Interstellar“ und „Black Holes & Time Wraps: Einsteins outrageous legacy” sind Bestseller.

*Reiner Weiss*, Amerikaner in Berlin geboren, ist Emeritierter Professor am MIT. Bereits in 1970er Jahren begann er mit Planung von Detektoren und erarbeitete das technische Konzept für einen Gravitationswellen Interferometer. Mehre Jahrzehnte begleitete er mit seinen außerordentlichen experimentellen Fähigkeiten das LIGO- Projekt. Auch war er wissenschaftlicher Berater der NASA Satellitenmission „Cosmic Background Explorer“, welche damals die genauesten Daten über das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung lieferte und damit die Urknalltheorie erhärtete.

**Was sind Gravitationswellen?**

Albert Einstein hat seine Theorie der Gravitation, die allgemeine Relativitätstheorie, Ende 1915 publiziert und bereits ein halbes Jahr später die theoretische Existenz von Gravitationswellen daraus abgeleitet. Gravitationswellen entstehen durch bewegte Massen und transportieren diese Energie analog zu elektromagnetischen Wellen. Im täglichen Leben merken wir davon nichts, weil die Stärke der Gravitationswellen viel zu gering ist. Selbst Gravitationswellen, die durch die Bewegung der Erde um die Sonne oder die Bewegung anderer Planeten erzeugt werden, sind zu vernachlässigen. Da bedarf es virulenter Ereignisse wie z.B. das Aufeinandertreffen von Neutronensternen oder schwarzen Löchern. Das LIGO-Projekt sucht u.a. nach Signalen, die von sich eng umkreisenden, kompakten Objekten ausgesandt werden. In der Endphase wird diese Rotation immer schneller bis sie schließlich, unter Ausstoß starker Gravitationswellen, zusammenfallen.

**Das LIGO-Projekt**

Das „Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory“, kurz LIGO, ist eine der derzeit wohl größten wissenschaftlichen Kollaborationen. Weltweit sind mehr als tausend WissenschafterInnen an über 80 Forschungsinstitutionen am Erfolg des 1997 gestarteten Projekts beteiligt. Das jeweilige Herzstück der zwei Observatorien – das eine in Hanford (Washington, USA), das andere im 3.000 km entfernten Livingston (Louisiana, USA) – sind die Laser-Interferometer. In den Interferometern wird Laserlicht eingebracht, geteilt und in die kilometerlangen Arme des Interferometers geschickt. Nach mehrfacher Reflexion an im Interferometer befindlichen Spiegeln treffen die Teilstrahlen wieder an ihrem Ausgangspunkt aufeinander und überlagern sich. Die frei hängenden Spiegel an den Enden der beiden Interferometer-Arme werden für so adjustiert, dass sich die beiden Teilstrahlen des Laserlichts bei der Überlagerung auslöschen.

Albert Einstein hat die Wirkung der Gravitation auf geometrische Eigenschaften des Raums, besser der Raumzeit, zurückgeführt. Gravitationswellen sind (kleine) Störungen in der Geometrie, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Sie bewirken, dass sich der Abstand zwischen frei beweglichen Körpern beim Durchgang der Welle ändert. Sollte eine Gravitationswelle das Interferometer passieren, verkürzen bzw. verlängern sich die Arme des Interferometers minimalst. Die Teilstrahlen des Laserlichts löschen sich daher nicht vollständig aus und ein Signal wird empfangen.

Die gesamte Messanlage ist äußerst empfindlich gegenüber verschiedensten Störungen wie z.B. natürliche oder durch Straßenverkehr verursachte Vibrationen im Erdreich wie auch thermische Bewegungen der Atome in den Spiegeln. Um Signale von Gravitationswellen von Signalen von Störquellen zu unterscheiden, analysieren viele theoretische Physiker – darunter auch Alumni der Universität Wien – die mit LIGO gewonnenen Daten. Mögliche Quellen von Gravitationswellen, die mit LIGO gemessen werden können, umfassen die Verschmelzung zweier kompakter Objekte wie Neutronensterne und Schwarze Löcher, Pulsare, Supernovae, aber auch bis zu den Anfängen zurückliegende Ereignisse vom Urknall.

**Was erzählen die gemessenen Gravitationswellen?**

Die am 14. September 2015 beobachteten Schwankungen der Spiegel in Hanford und in Livingston zeigten ein identisches Muster, jedoch um ca. 7 Millisekunden zeitversetzt, entsprechend der Laufzeit der Welle von einem Detektor zum anderen. Obwohl sich Gravitationswellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten war das Signal etwa 1,3 Milliarden Jahre unterwegs, hervorgerufen durch das Zusammenfallen zweier schwarzer Löcher. Wie genaue Analysen zeigten, hatten die schwarzen Löcher vor der Verschmelzung etwa 36 bzw. 29-mal größere Massen als die unserer Sonne, das Endprodukt ein schwarzes Loch mit ca. 62 Sonnenmassen. Die Differenz von 3 Sonnenmassen wurde als Energieäquivalent in Form von Gravitationswellen abgestrahlt. Das ist ein enormer Betrag, der es ermöglichte das Signal über derart große Distanzen nachzuweisen. Allerdings war dies eine Meisterleitung, denn die Verschiebungen in den Detektoren waren unglaublich klein: nur ca. 0.00000000000000001 cm betrug die Auslenkung der Spiegel, was etwa einem Tausendstel der Größe eines Protons entspricht. Es war eine außerordentliche Ingenieursleistung gepaart mit einer ausgeklügelten Methode der Datenanalyse, die es ermöglichte das Signal heraus zu filtern.

Das Signal vom 25. Dezember 2015 war weniger deutlich, konnte aber ebenfalls auf das Verschmelzen zweier schwarzen Löchern zurückgeführt werden. Allerdings mit geringeren Massen von etwa 14 bzw. 7 Sonnenmassen.

Bereits 1993 wurde der Nobelpreis für Physik für den indirekten Nachweis von Gravitationswellen vergeben. Denn Einstein leitete bereits in einer Arbeit von 1918 seine berühmte „Quadrupol-Formel“ her, die die Stärke der abgestrahlten Gravitationswellen angibt. 1974 entdeckten zwei amerikanische Astronomen mit dem großen Radio-Teleskop von Arecibo auf Puerto Rico ein Doppelsternsystem, dass heute unter dem Namen „Hulse-Taylor-Pulsar bekannt ist. An diesem System konnte der Energieverlust durch Abstrahlung von Gravitationswellen in exzellenter Übereinstimmung mit der Formel von Einstein, beobachtet werden.

**Auch österreichische ForscherInnen waren und sind beteiligt**

Es ist eine Ironie, dass Albert Einstein selbst später an der Existenz von Gravitationswellen zweifelte: In einer Arbeit aus 1936, zusammen mit Nathan Rosen, widerrief er seine früheren Aussagen. Der Grund war, dass die Arbeiten von 1916 bzw. 1918 nur Näherungslösungen betrachteten und er zu dem Schluss kam, dass in der exakten Theorie solche Wellen nicht existieren können.

Spätere Untersuchungen von namhaften Wissenschaftlern haben dies aber widerlegt. Einen wesentlichen Beitrag zum theoretischen Verständnis von Gravitationswellen geht auf den in Wien geborenen Sir Hermann Bondi zurück. Er emigrierte 1937 nach England, wurde während des 2.Welkriegs als feindlicher Ausländer interniert, arbeitete dann aber an der Entwicklung des Radars mit. Nach 1945 bis zu seinem Tod war er Professor in London und Cambridge und auch Berater der britischen Königin. Seine theoretischen Arbeiten über Gravitationswellen sind heute ein fester Bestandteil in Lehrbüchern über Gravitationstheorie.

ÖsterreicherInnen sind aber auch Teil des LIGO-Projekt und maßgeblich am Erfolg beteiligt: So etwa die theoretischen PhysikerInnen Sascha Husa (Professor an der Universitat de les Illes Balears), Michael Pürrer (derzeit Forscher am Albert-Einstein- Institut, Max Planck Institut für Gravitationsphysik, in Golm/Potsdam) und Patricia Schmidt (soeben von CALTECH an die Universität Radboud gewechselt), die an der Universität Wien studierten und in der hiesigen Gravitationsgruppe an der Fakultät für Physik arbeiteten. Ihre Beiträge betreffen numerische Simulationen von Signalen, die es ermöglichen die Quelle zu identifizieren.

**Ein neues Fenster zum Kosmos**

Die direkten Beobachtungen von Gravitationswellen, die in exzellenter Übereinstimmung mit den theoretischen Vorhersagen sind, lassen keinen Zweifel an deren Existenz. Sie zeigen aber noch mehr: Dass die Einstein‘sche Theorie auch in Bereichen mit extrem starker Gravitation gültig ist. Die meisten Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie beziehen sich auf schwache Felder, das Zusammenfallen zweier schwarzer Löcher bedeutet aber extrem starke Deformationen der Raumzeit.

Nicht nur deshalb ist der Nobelpreis gerechtfertigt, denn der Nachweis von Gravitationswellen eröffnet auch ein neues Fenster zum Kosmos. Die meiste Information aus dem All erhalten wir mittels elektromagnetsicher Wellen: von Radiowellen bis zu Röntgenstrahlung. Gravitationswellen sind ein ganz neues Signal mittels dem es möglich sein wird Dinge zu erforschen, die mittels elektromagnetischer Wellen nicht zugänglich sind.

 Die aufgefangenen Gravitationswellen Signale haben bereits jetzt unsere Vorstellungen vom Universums verändert: Die Existenz von schwarzen Löchern mit mehr als 30 Sonnenmassen, die aus Sternkollaps entstehen, war unerwartet. Auch konnten Gravitationswellen, die von Neutronen Doppelestern-Systemen ausgehen, bisher nicht nachgewiesen werden. Dies zeigt, dass wir unsere Vorstellungen über die Sternentstehung und ihrer Entwicklung revidieren müssen.