



## Hundert Jahre Gravitationswellen

Von Alexander Blum, Roberto Lalli und Jürgen Renn

Anbruch einer neuen Ära für die Suche nach Gravitationswellen. Das MPIWG, CalTech und die Hebrew University haben den langen Weg von Einsteins Vorhersage bis zu ihrer Entdeckung untersucht.

Die erste Arbeit zu Gravitationswellen im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie (ART) wurde im Juni 1916 von Albert Einstein eingereicht. Aber Einstein selbst, und mit ihm viele andere, würden noch jahrzehntelang skeptisch bleiben, was die Existenz dieser Wellen anging. Neue Forschungen, im Rahmen einer Kollaboration von Historikern des Einstein Papers Projects am Caltech (EPP), der Hebräischen Universität Jerusalem und des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte (MPIWG), zeigen, dass die Vorhersage der Existenz von Gravitationswellen aus einem Briefwechsel zwischen Einstein und dem Astronomen Karl Schwarzschild im Februar 1916 hervorging. Einstein war zunächst skeptisch. Schwarzschild kehrte im März von der Ostfront zurück und verstarb im Mai. Einstein wandte sich den Gravitationswellen wieder zu, nachdem er durch den Astronomen Willem de Sitter darauf hin-

gewiesen wurde, wie die mathematischen Probleme überwunden werden konnten, die Schwarzschild und Einstein im Februar noch zurückgehalten hatten. Im Juni machte Einstein dann seine Vorhersage zur Existenz von Gravitationswellen. In seinen Rechnungen war ein schwerwiegender Fehler, den er 1918 korrigierte. Er stellte eine Formel für die Ausstrahlung von Gravitationswellen auf, die bis heute (abgesehen von einem Faktor 2) als gültig erachtet wird. Einsteins Rechnungen zeigten jedoch, dass diese Wellen viel zu schwach waren, um mit den Mitteln der Zeit nachgewiesen zu werden.

Einsteins Rechnungen basierten auf einer vielfach kritisierten Näherung. 1936 schrieb sogar Einstein selbst, mit seinem Mitarbeiter Nathan Rosen, eine Arbeit, in der sie behaupteten zeigen zu können, dass es keine Gravitationswellen gibt. Ein Gutachter fand einen Fehler in der

Argumentation, und die überarbeitete Arbeit wurde schließlich in einer anderen Zeitschrift veröffentlicht, wobei die ursprüngliche Frage unbeantwortet blieb.

In den 30er Jahren fand das Thema Gravitationswellen ansonsten kaum Beachtung. Der Zeitraum von circa 1925 bis 1955 ist als Tiefstand der allgemeinen Relativitätstheorie bekannt. Es gab zu dieser Zeit kein anerkanntes Forschungsfeld „Allgemeine Relativitätstheorie“, wie es heute existiert, mit ganzen Forschungseinrichtungen (wie dem MPI für Gravitationsphysik), die sich ausschließlich diesem Thema verschrieben haben.

Mitte der 50er Jahre änderte sich das. In der als „Renaissance der allgemeinen Relativitätstheorie“ bekannten Periode wurde den Physikern klar, dass es ein vielversprechendes Potential gab, eine internationale Gemeinschaft von Wissenschaftlern, die sich für die mannigfaltigen Aspekte von Einsteins Theorie interessier-

ten, zu etablieren. Sie veranstalteten Konferenzen und gründeten Zeitschriften und eine internationale Gesellschaft, die ausdrücklich der ART gewidmet waren. Und sie stellten fest, dass es wichtige Fragen innerhalb der ART gab, die noch nicht zufriedenstellend beantwortet waren, darunter die nach der Existenz von Gravitationswellen.

Schon bei der ersten Konferenz zu Fragen der ART – 1955 in Bern – waren Gravitationswellen der Gegenstand hitziger Diskussion. Einen Wendepunkt stellte die Nachfolgekonferenz 1957 in Chapel Hill, North Carolina, dar (Der Bericht der Konferenz wurde erstmals 2011 veröffentlicht in der Edition Open Sources Reihe des MPIWG). Es entstand ein allgemeiner Konsens, dass Gravitationswellen wirklich existieren und Energie transportieren.

Die ersten Versuche, die winzigen Effekte von Gravitationswellen nachzuweisen wurden um 1960 von Joseph Weber an der University of Maryland unternommen. Nach fast einem Jahrzehnt Arbeit verkündete er im Jahre 1969, dass ihm der Nachweis von Gravitationswellen geglückt sei. Webers Entdeckung wurde in anderen Experimenten jedoch nicht bestätigt. Diese widerstreitenden Resultate führten zu einer langen und heftigen Kontroverse. Obwohl es schließlich allgemein akzeptiert wurde, dass Weber keine Gravitationswellen beobachtet hatte, führte die Debatte doch zur Entwicklung neuer Techniken und Methoden, welche die Grundlage für die späteren Großgeräte, darunter LIGO, darstellten.

Neben diesen technischen Fortschritten gab es eine zweite notwendige Voraussetzung für die Entdeckung von Gravitationswellen: Ein besseres Verständnis der astronomischen Quellen dieser Wellen. In der Tat gab es bereits im Jahre



Abb. 1: ©Laurent Taudin

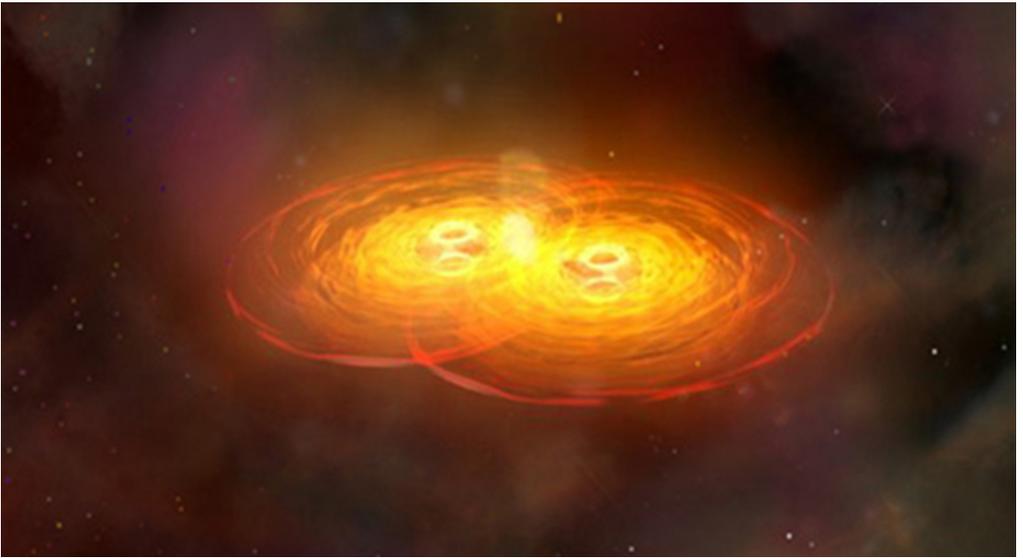


Abb. 2: Black Hole Merger; [http://chandra.harvard.edu/photo/2002/0192/bh\\_merger\\_still3.jpg](http://chandra.harvard.edu/photo/2002/0192/bh_merger_still3.jpg), NASA.

1974 einen „indirekten“ Nachweis von Gravitationswellen durch die genaue Beobachtung eines Doppelsternsystems (zwei massive Sterne, die umeinander kreisen), welches durch die Ausstrahlung von Gravitationswellen allmählich Energie verlor, so dass die beiden Sterne sich beschleunigten und langsam aufeinander zu bewegen. Diese Beobachtung wurde ermöglicht durch Joseph Taylor und Russel Hulse, welche den ersten Doppelpulsar im Jahr 1974 entdeckten. Der von Joseph Taylor, Joel Weisberg und ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in einer langen Reihe von Beobachtungen gemessene Energieverlust dieses Systems stimmte genau mit den theoretischen Vorhersagen für die Ausstrahlung von Gravitationswellen überein. Dies trug wesentlich dazu bei, dass Hulse und Taylor im Jahre 1993 den Physiknobelpreis gewannen, „für die Entdeckung einer neuen Art von Pulsar, einer Entdeckung die neue Möglichkeiten zur Untersuchung der

Gravitation eröffnet hat“.

Die jetzt von LIGO beobachtete Quelle von Gravitationswellen ist jedoch eine andere, nämlich zwei kollidierende schwarze Löcher. Schwarze Löcher als real existierende physikalische Objekte wurden erst in den 1960ern ernst genommen, als Beobachtungen der noch jungen Radioastronomie den Schluss nahelegten, dass solche extremen Objekte tatsächlich in fernen Galaxien existieren.

Das qualitative Verständnis solcher fernen, doch ungeheuer hellen, Radioquellen (Quasare) war einer der großen Erfolge der ART in jenen Jahren. Um aber quantitative Vorhersagen über das Verhalten schwarzer Löcher zu machen waren numerische Computersimulationen vonnöten. Diese Simulationen waren nicht nur das Ergebnis von Fortschritten der Computertechnologie, sondern auch Ergebnis von konzeptuellen Fortschritten der Renaissance-Epoche, die es erlaubten aus der ART

Fragestellungen zu extrahieren, die auf einem Rechner gelöst werden können. Dies führte schließlich zur Etablierung eines ganz neuen Forschungsfeldes, der numerischen Relativitätstheorie.

Wenn die Entdeckung von Gravitationswellen nun zurecht als die Bestätigung einer Vorhersage gefeiert wird, die Einstein vor 100 Jahren machte, so sollte man auch bedenken, dass das Konzept der Gravitationswellen erst in den 50ern und 60ern wirklich etabliert wurde, als große technische, konzeptuelle und organisatorische Fortschritte den Grundstein legten für die diesjährige Entdeckung und einen anhal-

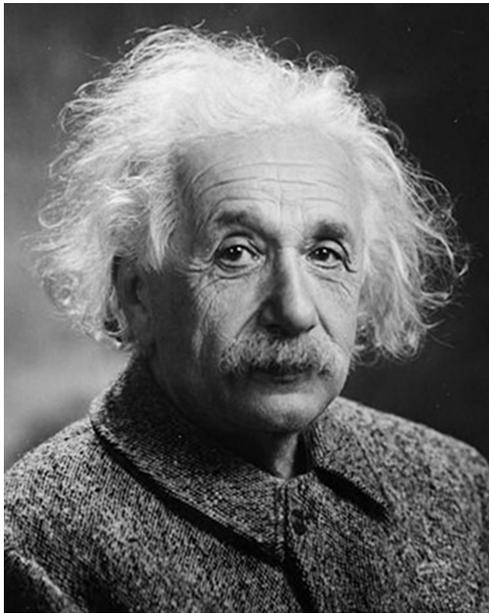


Abb. 3: Albert Einstein 1947; Wikimedia Commons.

Eine vollständige Version ist mit weiteren Forschungsthemen auf der Institutswebsite zugänglich („Aktuelles/Aktuelle Themen“).

tenden Boom auslösten, der die Voraussetzungen schuf für die heutigen internationalen Großprojekte, wie LIGO. Vor einem Jahr hat das MPIWG, in Kollaboration mit dem EPP und der Hebräischen Universität, ein Forschungsprojekt ins Leben gerufen, das sich mit der vielfältigen Geschichte der Renaissance der allgemeinen Relativitätstheorie beschäftigt. In diesem Rahmen wird auch die wichtige Rolle der Gravitationswellen untersucht.

Während also, nach der ersten Entdeckung, Gravitationswellen in Zukunft auch ein Mittel darstellen werden, unser Universum auf neue Art zu beobachten, wird auch die Geschichte dieses lange kontrovers diskutierten Themas weiter beleuchtet werden.

Wilko Graf von Hardenberg ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit September 2015 am MPIWG ([whardenberg@mpiwg-berlin.mpg.de](mailto:whardenberg@mpiwg-berlin.mpg.de)).

Roberto Lalli ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit Juli 2013 am MPIWG ([rlalli@mpiwg-berlin.mpg.de](mailto:rlalli@mpiwg-berlin.mpg.de)).

Jürgen Renn ist seit 1994 Direktor am MPIWG ([renn@mpiwg-berlin.mpg.de](mailto:renn@mpiwg-berlin.mpg.de)).