

Pressemitteilung

11.02.1016

## **Hundert Jahre Gravitationswellen: Der lange Weg von der Vorhersage zum Nachweis**

***In diesem Jahr jährt sich Einsteins Vorhersage von Gravitationswellen zum hundertsten Mal. Und an diesem Donnerstag, um 16:30 Ortszeit, hat die amerikanische National Science Foundation eine Pressekonferenz im National Press Club in Washington, DC, einberufen, auf der Wissenschaftler von Caltech, MIT und dem Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) die neuesten Resultate von LIGOs Suche nach Gravitationswellen bekanntgeben werden.***

Die erste Arbeit zu Gravitationswellen im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie wurde von Einstein selbst verfasst und am 22. Juni 1916 eingereicht, unter dem Titel „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.“ Aber Einstein selbst, und mit ihm viele andere, würden noch jahrzehntelang skeptisch bleiben, was die wirkliche, physische Existenz dieser Wellen anging.

Neue Forschungen, im Rahmen einer Kollaboration von Historikern der Collected Papers of Albert Einstein (Caltech), der Hebräischen Universität Jerusalem und des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte, 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 1916 von der Ostfront des ersten Weltkrieges zurück und verstarb zwei Monate später, im Alter von 42, in Potsdam, wahrscheinlich an den Folgen einer Auto-Immunerkrankung. Einstein wandte sich den Gravitationswellen wieder zu, nachdem er durch den Astronomen Willem de Sitter darauf hingewiesen wurde, wie die mathematischen Probleme überwunden werden konnten, die Schwarzschild und Einstein im Februar noch zurückgehalten hatten. Im Juni 1916 veröffentlichte Einstein eine Art Fortsetzung seines kürzlich erschienen Grundlagenwerks zur Theorie des Gravitationsfeldes. In dieser neuen Arbeit, sagte er die Existenz von Gravitationswellen voraus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, in voller Analogie zu den wohlbekannten elektromagnetischen Wellen (also Licht, Radiowellen, etc.). In seinen Rechnungen machte er einen schwerwiegenden Fehler, den er 1918 selbst korrigierte. In diesem Jahr stellte er eine Formel für die Ausstrahlung von Gravitationswellen auf, die bis heute (abgesehen von einem fehlenden Faktor 2) als gültig erachtet wird. Einsteins Rechnungen zeigten jedoch, dass diese Wellen viel zu schwach waren, um mit den technischen Mitteln der Zeit nachgewiesen zu werden.

Einsteins Rechnungen basierten auf der sogenannten linearen Näherung, in der die allgemeine Relativitätstheorie der etablierten Maxwellschen Theorie

des elektromagnetischen Feldes sehr ähnlich sah. Diese Näherung, und die Resultate die Einstein mit ihrer Hilfe aufstellte, wurden vielfach kritisiert, insbesondere von dem britischen Astronomen und Astrophysiker Arthur Eddington, der ansonsten einer der Hauptverfechter der neuen allgemeinen Relativitätstheorie war. In der Tat hatte Eddington im Jahre 1919 eine andere Vorhersage der Theorie (die Krümmung von Lichtstrahlen im Schwerfeld der Sonne) spektakulär bestätigt und Einstein damit zu einer internationalen Berühmtheit gemacht. Auch Einstein selbst wurde wieder von Zweifeln eingeholt: Im Jahre 1936 schrieb er 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 von Einstein und Rosen, und die Arbeit wurde schließlich in einer anderen Zeitschrift und mit ganz anderen Resultaten veröffentlicht, wobei die ursprüngliche Frage unbeantwortet blieb. Diese faszinierende Anekdote wird detailliert in Daniel Kenneficks Buch *Traveling at the Speed of Thought* beschrieben. Dieses Buch, in dem Kennefick viele Ergebnisse seiner Forschungen an den *Collected Papers of Albert Einstein* verarbeitet, gibt einen hervorragenden Überblick über die Geschichte der Gravitationswellen.

In den 1930er Jahren fand das Thema Gravitationswellen ansonsten kaum Beachtung. Überhaupt ist der Zeitraum von ca. 1925 bis 1955 als Tiefstand der allgemeinen Relativitätstheorie („low-watermark period“) bekannt. Neueste historische Forschungen (in einer Kollaboration des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte, der Hebräischen Universität und der *Collected Papers of Albert Einstein*) haben gezeigt, dass die wenigen Physiker, die in dieser Zeit an der Weiterentwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie arbeiteten, hauptsächlich daran interessiert waren eine neue Theorie zu finden, die die allgemeine Relativitätstheorie ersetzen und dabei auch die neuesten Entwicklungen in der Quantentheorie miteinschließen, wenn nicht gar erklären, sollte; oder daran eher philosophische Fragestellungen zur Kosmologie, d.h. zur Entwicklung des Universums als Ganzes, zu erörtern. Und selbst diese wenigen Physiker waren über den gesamten Erdball verstreut und tauschten sich nur wenig über ihre Ansätze und Ergebnisse aus. Es gab, in anderen Worten, zu dieser Zeit kein anerkanntes Forschungsfeld „Allgemeine Relativitätstheorie (und Gravitation)“, wie es heute existiert, mit ganzen Forschungseinrichtungen (wie dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik), die sich ausschließlich diesem Themenkomplex verschrieben haben.

Erst Mitte der 50er Jahre, ein Jahrzehnt nach dem Ende des zweiten Weltkrieges, begann sich dieser Zustand zu ändern. Die folgende sogenannte „Renaissance der allgemeinen Relativitätstheorie“ wurde ermöglicht durch die vielen Forschungsgelder, die nach der Entwicklung der Atombombe, in die theoretische Physik flossen, sowie durch die neue internationale Mobilität. Aber die Haupttriebkraft waren die Physiker selbst. Diesen wurde klar, dass es ein vielversprechendes Potential gab, eine internationale Gemeinschaft von Wissenschaftlern, die sich für die mannigfaltigen Aspekte von Einsteins Theorie interessierten, zu etablieren. Sie veranstalteten Konferenzen und gründeten Zeitschriften und eine internationale Gesellschaft, die ausdrücklich der allgemeinen Relativitätstheorie gewidmet waren. Und sie stellten fest, dass es grundlegende Fragen innerhalb der allgemeinen Relativitätstheorie gab, die noch nicht zufriedenstellend beantwortet waren, die aber für fast jeden, der in dem Gebiet forschte, von Belang waren. Die vielleicht wichtigste dieser Fragen war die nach der Existenz und den Eigenschaften von Gravitationswellen.

Schon bei der ersten internationalen Konferenz zu Fragen der allgemeinen Relativitätstheorie – 1955 in Bern abgehalten – 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 Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte und der University of Oklahoma). Entscheidend waren hierbei die theoretischen Arbeiten des britischen Physikers und Hermann Bondi, sowie das berühmte „Sticky Bead“-Gedankenexperiment von Richard Feynman, in dem er den Effekt einer Gravitationswelle auf ein Kügelchen, das sich dabei auf einem Stock auf und ab bewegt und dabei durch Reibung Wärme erzeugt, analysierte. Es entstand ein allgemeiner Konsens, dass Gravitationswellen doch wirklich existieren und Energie transportieren.

Die ersten Versuche, die winzigen Effekte von Gravitationswellen nachzuweisen wurden von Joseph Weber an der University of Maryland unternommen. Weber, mit seinem Apparat, den sogenannten Weber Bars, war der Pionier der direkten Suche nach Gravitationswellen. Mit einer Handvoll von Mitarbeitern und Studenten begann er um 1960 mit seinen Experimenten. Nach fast einem Jahrzehnt Arbeit verkündete er dann im Jahre 1969, dass ihm der Nachweis von Gravitationswellen geglückt sei. Webers Arbeiten und seine Bekanntgabe der Entdeckung schlugen große Wellen und führten zu mehreren Nachfolgeexperimenten zur Überprüfung von Webers Ergebnissen. Keiner dieser Versuche konnte Webers Entdeckung bestätigen, doch Weber beharrte auf der Richtigkeit seiner Messungen. Diese widerstreitenden Resultate führten zu einer langen und heftigen Kontroverse, die von dem Soziologen Harry Collins analysiert worden ist. Collins betont dabei die Wichtigkeit von soziologischen Faktoren im Fort- und Ausgang von wissenschaftlichen Kontroversen über experimentelle Ergebnisse. 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 in diesem Jahr: Ein besseres Verständnis der astronomischen Quellen dieser Wellen. In der Tat gab es bereits im Jahre 1974 einen „indirekten“ Nachweis von Gravitationswellen durch die genaue Beobachtung einer solchen Quelle. Die Quelle war in diesem Fall ein Doppelsternsystem (zwei massive Sterne, die um einander kreisen), welches durch die Ausstrahlung von Gravitationswellen Energie verliert, so dass die beiden Sterne sich verlangsamen und langsam aufeinander zu bewegen. Der von Joseph Taylor und Russell Hulse beobachtete Energieverlust stimmte genau mit den theoretischen Vorhersagen für die Ausstrahlung von Gravitationswellen überein, was Hulse und Taylor im Jahre 1993 den Physiknobelpreis brachte.

Die jetzt von LIGO beobachtete Quelle von Gravitationswellen ist nun jedoch nicht einfach zwei massive Sterne, die sich langsam näher kommen, sondern zwei schwarze Löcher, die direkt aufeinandertreffen und verschmelzen. Das Konzept des schwarzen Loches überhaupt war das Resultat eines neuentwickelten Verständnisses der Lösungen von Einstein Gleichungen, eine Entwicklung die sich erst während der Renaissance der allgemeinen Relativitätstheorie vollzog. Und selbst dann wurden schwarze Löcher als real existierende physikalische Objekte erst ernstgenommen, nachdem in den 1960ern Beobachtungen der noch jungen Radioastronomie

(die auf neuer, im Rahmen der Radarforschung im zweiten Weltkrieg entwickelten, Technologie gründete) 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 allgemeinen Relativitätstheorie in jenen Jahren, und half ihren neuen Status als ein spannendes Forschungsgebiet zu etablieren. Um aber quantitative Vorhersagen über das Verhalten schwarzer Löcher zu machen, Vorhersagen die essentiell waren um jetzt das Gravitationswellensignal der Kollision zweier schwarzer Löcher zu identifizieren, waren numerische Computersimulationen vonnöten. Auch hier lässt sich sagen, dass diese Simulationen nicht einfach das Ergebnis des technischen Fortschritts (in diesem Fall der Computertechnologie) waren, sondern auch Ergebnis von theoretischen und konzeptuellen Veränderungen: Einsteins ursprüngliche Formulierung der allgemeinen Relativitätstheorie beruhte auf einem vierdimensionalen Standpunkt, bei dem Raum und Zeit gleichwertig behandelt werden, so dass es keine klare Vorstellung von einem durch Anfangswerte gegebenen Zustand gibt, der sich mit der Zeit verändert. So eine Vorstellung ist jedoch nötig, um aus der allgemeinen Relativitätstheorie Fragestellungen zu extrahieren, die auf einem Rechner gelöst werden können. Es war ein weiterer großer konzeptueller Fortschritt der Renaissance-Epoche (hier sind vornehmlich die Physiker Richard Arnowitt, Stanley Deser und Charles Misner zu nennen), die allgemeine Relativitätstheorie so zu formulieren, dass Raum und Zeit, Anfangswerte und zeitliche Veränderung, klar getrennt werden konnten. Dies führte schließlich zur Etablierung eines ganze 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 1950ern und 60ern wirklich etabliert wurde, als die großen technischen, konzeptuellen und organisatorischen Fortschritte, die man als Renaissance der allgemeinen Relativitätstheorie zusammenfasst, den Grundstein legten für die diesjährige Entdeckung und einen Boom auslösten, der bis heute anhält und die Voraussetzungen schuf für die heutigen internationalen Großprojekte, wie LIGO. Vor einem Jahr hat das Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, in Kollaboration mit den Collected Papers of Albert Einstein am Caltech und der Hebräischen Universität Jerusalem, 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.

### **Kontaktdaten der Autoren:**

Dr. rer. nat. Alexander Blum, +49-176-63149400,  
[ablum@mpiwg-berlin.mpg.de](mailto:ablum@mpiwg-berlin.mpg.de)

Ph. D. Roberto Lalli, [rlalli@mpiwg-berlin.mpg.de](mailto:rlalli@mpiwg-berlin.mpg.de)

Prof. Dr. Jürgen Renn, [renn@mpiwg-berlin.mpg.de](mailto:renn@mpiwg-berlin.mpg.de)

### **Weitere Informationen**

<http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/>

<https://www.ligo.caltech.edu/>

<http://new.huji.ac.il/en>

### **Pressekontakt**

Dr. Hansjakob Ziemer

Max Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte

Boltzmannstr. 22,

D-14195 Berlin

[public@mpiwg-berlin.mpg.de](mailto:public@mpiwg-berlin.mpg.de)

Telefon (+4930) 22667-242

Fax (+4930) 22667-238