

Gravitationswellen zeigen wie Raum und Zeit erzittern

Albert Einstein (1879 – 1955) wird heute als der größte Physiker unserer Zeit bezeichnet. Als theoretischer Physiker hat er das physikalische Weltbild mit seinen Forschungen zur Struktur von Materie, Raum und Zeit geprägt. Auch seine Arbeiten zur Quantenphysik und damit zur Struktur der festen Materie waren bahnbrechend. Jetzt sind seine Aktivitäten durch den Nachweis der Gravitationswellen wieder glanzvoll bestätigt worden.

Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm im damaligen Königreich Württemberg geboren. Dort wuchs er in einer jüdisch-deutschen Mittelstandsfamilie auf. Bald zog die Familie nach München, wo sein Vater mit seinem Onkel 1880 einen kleinen Betrieb für Gas- und Wasser-Installationen gründete, der dann 1885 in eine Fabrik für elektrische Geräte umgewandelt wurde, die auch Kraftwerke in München-Schwabing und in Varese, Italien belieferte.

Ab 1885 kam er in die Volksschule und dann ab 1888 in das Luitpold-Gymnasium in München. Er kam mit dem strengen Schulsystem des deutschen Kaiserreichs in Konflikt und zog 1894 ohne Schulabschluss seiner Familie nach, die inzwischen ihren Wohnsitz nach Mailand verlegt hatte. 1895 bewarb er sich an der eidgenössisch polytechnischen Schule in Zürich (der heutigen ETH Zürich). Da er keinen Schulabschluss (Abitur, oder schweizerisch Matura) hatte musste er, gerade 16 Jahre alt, eine Aufnahmeprüfung ablegen. In den naturwissenschaftlichen Fächern glänzte er, fiel jedoch in Französisch durch. Deshalb machte er die Matura in der Kantonsschule Aargau nach, wo er 1896 im Zeugnis fünfmal die in der Schweiz beste Note »sechs« erhielt.

Es folgte eine »Fachlehrer-Ausbildung für Mathematik und Physik« am Polytechnikum Zürich, die im Jahre 1900 mit einem Diplom abgeschlossen wurde. Es war für ihn schwierig eine Stelle, etwa als Universitätsassistent, zu erlangen. Daher bewarb er sich zuerst



▲ Albert Einstein 1921

um die Schweizer Staatsbürgerschaft, die er 1901 erhielt. Danach konnte er im Schweizer Patentamt in Bern zuerst eine Stelle als »Technischer Experte 3. Klasse« antreten, die ab 1903 in eine permanente Stelle umgewandelt wurde.

Während seines Studiums lernte er seine Kommilitonin Mileva Maric aus Novi Sad kennen, die er Anfang 1903, nach dem Tode seines Vaters 1902, heiratete. Mit ihr hatte er zwei Söhne Hans Albert (1904 – 1973) und Eduard (1910 – 1965).

Im März 1905 publizierte er seine Arbeit zum »Photoelektrischen Effekt«, und stellte im April 1905 seine Dissertation »zur Bestimmung der Moleküldimensionen« fertig, die er an der Universität Zürich einreichte. Im Juni 1905 reicht er die Abhandlung »Zur Elektrodynamik bewegter Körper« ein, in der

zum ersten Male die berühmte Gleichung:

$$E = mc^2$$

$$E = mc^2$$

(Energie ist gleich Masse mal dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit, ca. 300.000 km/s) genannt wurde, mit der die Äquivalenz von Energie und Masse beschrieben wird.

1909 berief man ihn zum Professor für Theoretische Physik an der Universität Zürich. Dann, 1911, wurde er zum ordentlichen Professor für Theoretische Physik an der Universität Prag ernannt (dabei erhielt er auch die österreichische Staatsbürgerschaft); doch schon nach einem Jahr ging er wieder zurück nach Zürich.

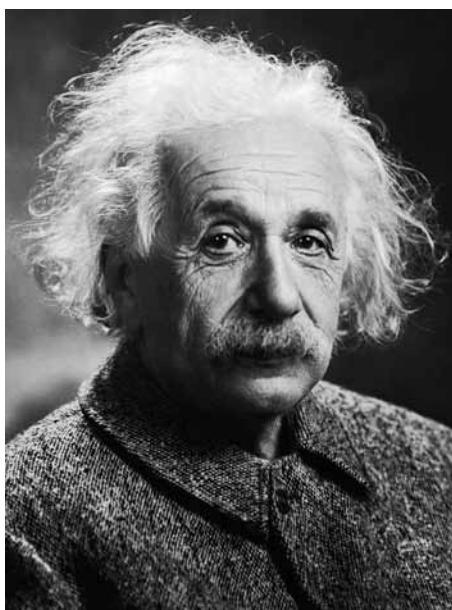
1913 wurde Einstein nach Berlin als Mitglied der Preussischen Akademie der Wissenschaften berufen und ab 1917 als Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik, und ab 1919 zusätzlich als Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

Wissenschaftlich arbeitete er weiter an der allgemeinen Relativitätstheorie und an der Quantentheorie. Schon 1916 postulierte er die stimulierte Emission von Licht. Dies erwies sich als Grundlage aller Laser, die aber erst 1960 erstmalig realisiert wurden und heute vielfältige Anwendungen finden. Auch die heutige Festkörperphysik und der Transistor gehen auf diese quantenphysikalischen Grundlagen zurück. Seine Frau Mileva ging mit den Söhnen in die Schweiz zurück, und Einstein ließ sich 1919 von ihr scheiden. Wenig später heiratete er seine Cousine Elsa Löwenthal (1876 – 1936), die zwei Töchter in die Ehe brachte. Mit ihr zusammen emigrierte er 1933 in die Vereinigten Staaten.

Im Jahre 1915 veröffentlichte Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie. Einer der Hauptpunkte dieser Allgemeinen Relativitätstheorie beinhaltet die Ablenkung von Licht durch das Gravitationsfeld von schweren Massen wie von Sternen. Dies konnte experimentell durch die Lichtablenkung der Venus bei einer Sonnenfinsternis im Mai 1919 durch den britischen Astrophysiker Arthur Eddington bei einer Expedition auf der Vulkaninsel Principe im Golf Guinea in Westafrika nachgewiesen werden. Denn wenn die Lichtstrahlen der Venus nahe der Sonne zur Erde strahlen, dann werden diese nach seiner Theorie im Schwerfeld der Sonne abgelenkt. Die Venus erscheint verschoben. Diese Beobachtungen errangen große Aufmerksamkeit, etwa auf der Titelseite der britischen »Times«. Danach erhielt Einstein den Nobelpreis 1921 für Verdienste um die Theoretische Physik, insbesondere für seine früheren Arbeiten zum Photoelektrischen Effekt. Da er zu dieser Zeit auf einer Vortragsreise im Fernen Osten war, in Singapur, Ceylon und Japan, konnte er den Preis erst ein Jahr später in Empfang nehmen.

In seiner Allgemeinen Relativitätstheorie hat Einstein auch die Existenz von Gravitationswellen vorhergesagt, die durch eine Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern entstehen können. Wenn zwei umeinander rotierende massereiche schwarze Löcher in ein einzelnes Loch verschmelzen, dann sollen in den letzten Sekundenbruchteilen Gravitationswellen entstehen. Diese Kollision von zwei schwarzen Löchern war zuvor vorhergesagt, aber – bis jetzt – noch nie beobachtet worden. Darüber unten mehr.

Als die Nationalsozialisten in Deutschland 1933 die Macht ergriffen, wurde Einstein aus Deutschland vertrieben. Er wurde ab 1933 Mitglied im »Institut for Advanced Study« in Princeton, New Jersey, USA. Ab 1935 durfte er permanent in den USA leben, und 1940 erhielt er die amerikanische



▲ Albert Einstein 1947

Staatsbürgerschaft. Obwohl Einstein ein ausgesprochener Pazifist war, befürwortete 1939 die Entwicklung der amerikanischen Atombomben im Manhattan-Projekt, aus Angst vor ähnlichen Entwicklungen im Nazi-Deutschland, was er später eher bedauerte. Als Einsteins letzte große Aktivitäten sind zu nennen sein Engagement für internationale Rüstungskontrollen, um den Weltfrieden, für den Staat Israel und für Internationale Friedensorganisationen (wie damals Völkerbund). Er starb am 18. April 1955 im Alter von 76 Jahren.

In Einsteins Überlegungen zur Allgemeinen Gravitationstheorie 1905 bis 1915 sagte er auch Zeitdilatation durch starke Gravitation voraus, eine Rotverschiebung und die Ablenkung des Lichts durch ein Schwerfeld, was ja auch experimentell nachgewiesen wurde und ihm große Berühmtheit verschaffte. In 1916 hatte Einstein die Möglichkeiten von Gravitationswellen vorhergesagt. Alle rotierenden Massen strahlen danach »etwas« Energie ab. Dies bedeutet, dass es doch ziemlich große Massen sein müssen, die sehr schnell umeinander rotieren. Die ersten indirekten astronomischen Hinweise auf Gravitationswellen ergaben sich aus Beobachtungen von rotierenden Neutronensternpaaren in

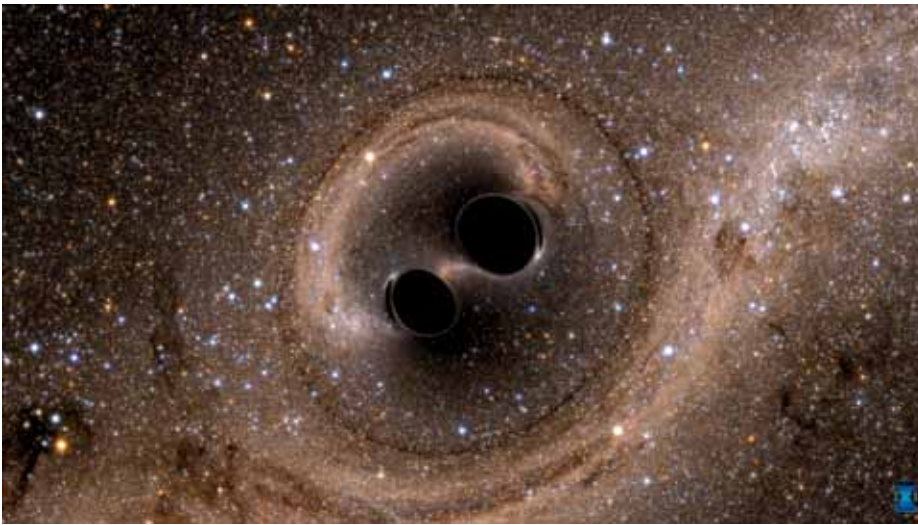
den 70er Jahren, aus dem schnellen Zusammenbruch ihrer Rotation. Das bedeutete, dass ein Teil ihrer Energie in Form von Gravitationswellen abgestrahlt werden musste. Für diese Beobachtungen erhielten die Astronomen R. Hulse und J. Taylor 1993 den Nobelpreis für Physik.

Am 14. September 2015 um 5:51 Uhr US-Ostküstenzeit (9:51 Uhr Weltzeit) kam es nun zum direkten experimentellen Nachweis von Gravitationswellen mit den LIGO-Detektoren in Livingstone, Louisiana und in Hanford, Washington, USA. LIGO sind LASER Interferometer für die Beobachtung von Gravitationswellen. Diese Detektoren sind das Ergebnis einer großen internationalen Forschungskooperation. Die LIGO-Observatorien werden von der National Science Foundation (NSF) finanziert. Caltech und MIT entwarfen, bauten und betreiben die Detektoren.

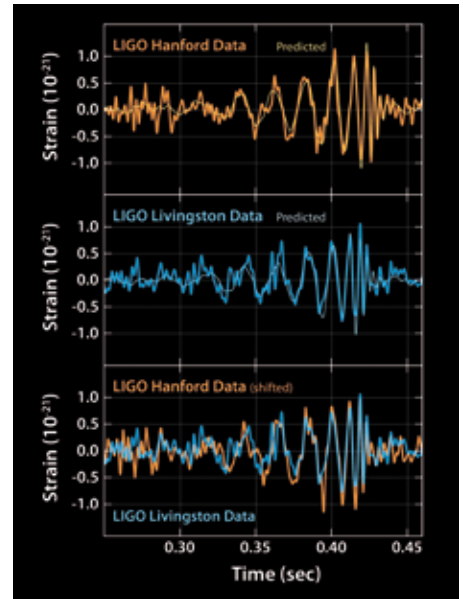
Bei diesem Ereignis handelt es sich offenbar um eine Verschmelzung von zwei mittelschweren Schwarzen Löchern. Ihre Massen betragen vor der Verschmelzung etwa das 29-fache und das 35-fache der Masse unserer Sonne. Das Schwarze Loch, das übrig blieb, bringt es auf etwa 62 Sonnenmassen. Bleibt eine Differenz von etwa drei Sonnenmassen, die in Form von Gravitationswellen abgestrahlt wurden. Vermutlich haben sich diese Schwarzen Löcher schon lange umkreist, doch dann kamen sie sich näher und umkreisten sich immer schneller, bis sie sich schließlich berührten.

Die bei den letzten vier Umläufen abgestrahlten Gravitationswellen waren dann stark genug, um mit dem LIGO-System detektiert zu werden. Es wird eine Position im südlichen Himmel in einer Entfernung von 1,3 Milliarden Lichtjahren vermutet.

Auch aus Deutschland kamen dazu wesentliche Beiträge vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut; AEI) in Hannover und Potsdam und vom Institut für Gravitationsphysik der Leibniz Universität Hannover, etwa mit der Entwick-



▲ Ein Paar schwarzer Löcher erzeugt Gravitationswellen.



▲ Signale der beiden LIGO-Detektoren in Hanford und in Livingstone zeigen – bis auf das Rauschen) identische Gravitationswellensignale.



▲ Ein Blick auf das Interferometer-Rohr des Hanford-Systems.

lung und dem Betrieb extrem empfindlicher Detektoren an den Grenzen der Physik, mit effizienten Methoden der Datenanalyse, die auf leistungsfähigen Computerclustern laufen und mit hochgenauen Wellenformmodellen, um das Signal aufzuspüren und astrophysikalische Information daraus zu gewinnen.

Als Detektoren wurden hochempfindliche Michelson-Interferometer genutzt. Dabei wird ein Laserstrahl in zwei Teilstrahlen gespalten, die längere, senkrecht zueinander stehende Interferometerarme durchlaufen. Am Ende der Laufstrecke wird das Licht

an Spiegel zurück reflektiert, die Lichtstrahlen kehren zum Ausgangspunkt zurück und überlagern sich und löschen sich aus. Eine Gravitationswelle, die über das Interferometer »rauscht«, streckt einen Arm und staucht den anderen, diese Längenänderungen können als Interferenzsignale detektiert werden. Um die notwendige höchste Empfindlichkeit zu erzielen, benötigt man Laserarme von vier Kilometern Länge, starke, stabile Laser, spezielle in Hannover entwickelte Spiegelsysteme. Längenänderungen von einem zehntausendstel des Protonendurchmessers kön-

nen damit detektiert werden. Mit einem hochreinen Superwerkstoff aus Quarzglas für Gravitationswellen-Detektoren hat Heraeus dazu beigetragen, die Einsteinsche Relativitätstheorie zu beweisen.

In den Gravitationswellen-Detektoren kommen hochsensitive optische Interferometer mit vier Kilometer Armlänge zum Einsatz. Sie enthalten Quarzglas mit extremen Transmissionswerten und optischer Homogenität. In den für die Messung wichtigen optischen Bestandteilen der Instrumente steckt Heraeus Suprasil® 3001.

Dr. Ralf Takke beschäftigt sich seit über 30 Jahren mit dem besonderen Material. Als Entwicklungsleiter hat er in den achtziger und neunziger Jahren mit seinen Mitarbeitern viele neue Quarzglassorten kreieren und neue Anwendungen finden können. »Bei Aufträgen wie dem LIGO-Experiment gehen wir oft bis an die Grenze des technisch Machbaren«, sagt er. Aber genau in solchen außergewöhnlichen Aufträgen steckt ein Mehrwert – nicht nur für das Unternehmen. Suprasil® 3001 ist optisch isotrop, hochhomogen und eignet sich vor allem für die Herstellung von mehrdimensionaler Optik wie Prismen, stark gekrümmten Lin-



sen, Strahlteilern, Strahlführungssystemen oder Retro-Reflektoren. Daher eignet sich diese Quarzglassorte für Hochenergie-Laser, die im nahen Infrarot arbeiten. Zur Anwendung kommt es im Alltag für Diodenlaser im Bereich der Medizintechnik, zur Materialbearbeitung oder für Spektroskopie-Optiken.

Der im Messaufbau verwendete Laserkopf wurde am Laserzentrum Han-

nover mit der neoLASE GmbH entwickelt, gebaut und mit konfektionierten Spezialkabeln der LEONI Business Unit Fiber Optics ausgestattet. Diese Kabel bestehen aus 70 bis 100 m langen konfektionierten Bündeln von je sieben Large Core Fasern mit einem Kerndurchmesser von 400 μm und sieben Einzelarmen, deren Bündelende alle Faserenden in einer Hülse zusammenfassen.

Die Gravitationswellenforschung wird nun gezielt weitergehen. Es werden weitere LIGA-Detektoren, etwa auf der Südhalbkugel der Erde (in Diskussion ist Indien) gebaut werden, um eine Richtungsabhängigkeit von Gravitationsereignissen zu bestimmen. Damit eröffnen sich neue Forschungsmöglichkeiten, die uns Einblick in unser Universum geben können.

Autor: Dr. Guido Tschulena