

Gravitationswellen: Ein neues Fenster in das Universum¹

David Walker

Bericht: Wolfgang Czieslik

Im Jahr 2017 wurde der Nobelpreis für Physik für den direkten Nachweis von Gravitationswellen an Reiner Weiss, Barry Barish und Kip S. Thorne verliehen. 24 Jahre zuvor, im Jahr 1993, erhielten Joseph H. Taylor und Russel A. Hulse den Physik Nobelpreis für den indirekten Nachweis von Gravitationswellen.

Vor einhundert Jahren hat Albert Einstein vorausgesagt, dass immer dann, wenn Massen beschleunigt werden, sich Gravitationswellen in den Raum ausbreiten. Einstein war allerdings davon überzeugt, dass die Gravitationswellen niemals nachgewiesen werden können, da die durch sie ausgelösten Effekte sehr klein sind.

Gravitationswellen sind räumlich fortschreitende Gravitationsfelder, vergleichbar mit elektromagnetischen Wellen – hierzu gehören Radiowellen,

Licht oder auch Röntgenstrahlung-, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreiten, ohne dass hierzu ein Träger – z.B. Luft, Wasser oder Eisen – benötigt wird. Wir sehen das Licht unserer Sonne und anderer viel weiter entfernter Sterne, obwohl sich zwischen diesen Sternen und der Erdoberfläche keine oder genauer sehr wenig Materie befindet.

Würde man auf dem Mond oder der 500-mal so weit entfernten Sonne eine sehr starke Schallquelle aufstellen, dann würde man auf der Erde nichts hören. In einem Laborversuch kann man dies leicht zeigen (s. Video „Schall im Vakuum“):

Stellt man unter eine gasdicht abgeschlossene Glasglocke eine Schallquelle (Lautsprecher, Klingel, Metronom o.ä.) und pumpt die Luft unter der Glocke ab, dann wird der Ton während des Abpumpens im-



Abb. 1: Dr. David Walker



Abb 2:

Barry Barish

Kip S. Thorne

Rainer Weiss

Beide LIGO/VIRGO Collaboration , Caltech

LIGO/VIRGO Collaboration, MIT



Abb 3: Joseph H. Taylor



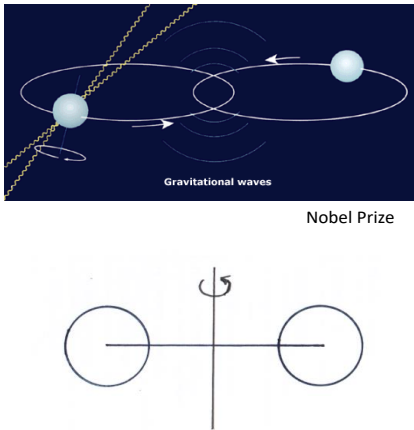
Abb. 4: Russel A. Hulse

mer leiser, bis man überhaupt nichts mehr hört. Lässt man wieder Luft in die Glasglocke einströmen, dann hört man den Ton wieder. Das Licht einer Lampe, die sich unter der Glocke befindet, würde man mit und ohne Luft in der Glocke sehen.

Die Quelle für eine elektromagnetische Welle ist eine zeitabhängige Ladungsverteilung. Konkret kann dies ein hochfrequenter elektrischer Wechselstrom in einem Draht sein. Die Quelle für eine Gravitationswelle ist eine zeitabhängige Massenverteilung, wie beispielsweise ein Doppelstern, bei dem zwei Sterne umeinander kreisen. Auch das System Sonne – Erde sendet Gravitationswellen aus. Allerdings beträgt die abgestrahlte Leistung nur 200 W, was schon in der nächsten Umgebung nicht mehr messbar ist.

Der indirekte Nachweis von Gravitationswellen gelang bei der Beobachtung des Pulsars 1913+16 – ein Neutronenstern mit einem Durchmesser von etwa 10 km, der einen zweiten Neutronenstern gleicher Größe auf einer engen, stark elliptischen Bahn umkreist. Beide Neutronensterne laufen auf den stark elliptischen Bahnen umeinander herum und werden dabei ungewöhnlich stark beschleunigt. Dies führt nach Einstein zur Aussendung von Gravitationswellen, und das System aus zwei Neutronensternen verliert damit Energie, insgesamt ein Fünftel der Strahlungsleistung der Sonne. Dadurch bewegen sich die beiden Neutronensterne auf Spiralbahnen, die immer enger werden. Der Abstand zwischen den Sternen sollte jedes Jahr um etwa 3,50 m kleiner werden, wodurch sich die Umlaufzeit um 0,076 ms verkürzt. Nach fast 20-jähriger Messzeit konnten Hulse und Taylor diese Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie durch ihre Messdaten bestätigen und hatten damit die Gravitationswellen indirekt nachgewiesen.²

PSR 1913+16



Gravitational waves
Nobel Prize

- Zwei Neutronensterne, einer davon als Pulsar beobachtbar;
- Umlaufperiode: $7^{\text{h}}45^{\text{m}}$;
- Bahnhalbachse: $2.8 R_{\odot}$;
- Massen: je ca. $1.4 M_{\odot}$.

Enger werdende Spiralbahnen infolge Aussendung von Gravitationswellen: ca. 1 cm pro Tag.

Abb. 5: Indirekter Nachweis von Gravitationswellen

LIGO – Ein gigantisches Michelson Interferometer

Das Michelson-Interferometer ist ein Gerät, mit dem sehr präzise kleine Längenänderungen gemessen werden können. Es wurde 1881 von dem amerikanischen Physiker Albert Michelson (* 19.12.1852 in Strelno bei Posen, † 9.5.1931 in Pasadena (Kalifornien); Nobelpreis für Physik 1907) entwickelt. Zusammen mit E.W. Morley führte er ab 1881 mehrfach Messungen der Lichtgeschwindigkeit in verschiedene Raumrichtungen durch, um die Erdgeschwindigkeit relativ zu einem hypothetischen Lichtäther zu bestimmen. Die Ergebnisse der Experimente zeigten, dass es den Lichtäther nicht gibt.

Das LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) besteht im Wesentlichen aus zwei L-förmig angeordneten 4 km langen Lichtwegen, an deren Schnittpunkt sich ein Strahlenteiler (2) und deren Enden sich jeweils ein Hochleistungsspiegel (3) befinden. Laserlicht wird aus einer sehr leistungsfähigen Lichtquelle (1) auf den Strahlenteiler, ein halbdurchlässiger Spiegel, gelenkt. Die Hälfte der Lichtintensität durchläuft den Strahlenteiler ungestört und trifft auf den Spiegel am Ende des rechten Schenkels des L (s. Abb.). Die andere Hälfte des Lichts wird am Strahlenteiler im Winkel von 90° reflektiert und trifft auf den Spiegel am Ende des linken Schenkels des L. Das von den beiden Spiegeln zurücklaufende Licht überlagert sich am Strahlenteiler und trifft auf den Detektor (5). Sind die beiden Strecken zwischen dem Strahlenteiler und dem Spiegel gleich lang, dann überlagern sich die Lichtwellen so, dass sie sich gegenseitig vollständig auslöschen. Am Detektor wird kein Signal gemessen. Unterscheiden sich die beiden Lichtwege, dann überlagern sich die Lichtwellen so, dass sie sich gegenseitig verstärken bzw. nicht gegenseitig vollständig auslöschen. Am Detektor wird ein Signal gemessen.

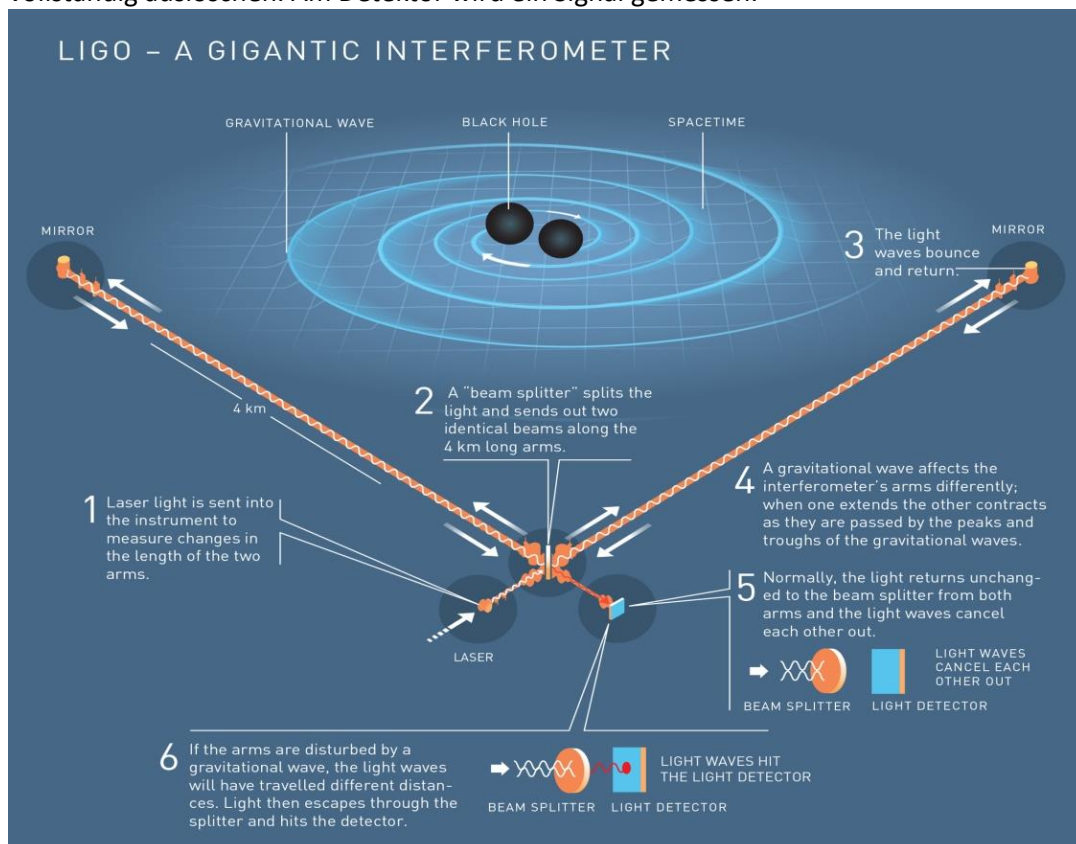


Abb.6: Aufbau und Funktionsweise von LIGO

Am 14. September 2015 gelang mit dem Interferometer LIGO der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen⁴. Vor fast einer Milliarde Jahren verschmolzen ein schwarzes Loch mit 29 Sonnenmassen mit einem anderen Schwarzen Loch mit 36 Sonnenmassen innerhalb von wenigen zehntel Sekunden zu einem Objekt mit 62 Sonnenmassen und strahlten dabei die Energie von 3 Sonnenmassen ab. Die dabei entstehenden Gravitationswellen entfernten sich mit Lichtgeschwindigkeit von dem neu entstandenen Schwarzen Loch und kamen mehrere Millionen Jahre nach dem Ereignis stark abgeschwächt am LIGO an. Die Gravitationswellen strecken und stauchen den Raum rhythmisch und verändern damit auch die Längen der Lichtwege innerhalb der beiden Arme im LIGO. Dies bedeutet die beiden Lichtwellen löschen sich am Lichtdetektor nicht mehr vollständig aus, sondern es wird eine gewisse Lichtintensität gemessen. Die relative Lichtwegänderung, dies ist die Amplitude der Gravitationswelle, ist mit ungefähr 10^{-21} m – dies sind etwa 4/1000 des Durchmessers von Protonen, dem positiv geladenen Baustein von Atomkernen – unvorstellbar klein. Dennoch gelang es, diese Änderung zu messen.

Direkter Nachweis von Gravitationswellen: Messung der Verlängerung des Lichtweges

Relative Lichtwegänderung = Amplitude der Welle:

$$\frac{\Delta L}{L} \sim h \approx 10^{-21},$$

entspricht, bei LIGO, 4/1000 Protonendurchmessern

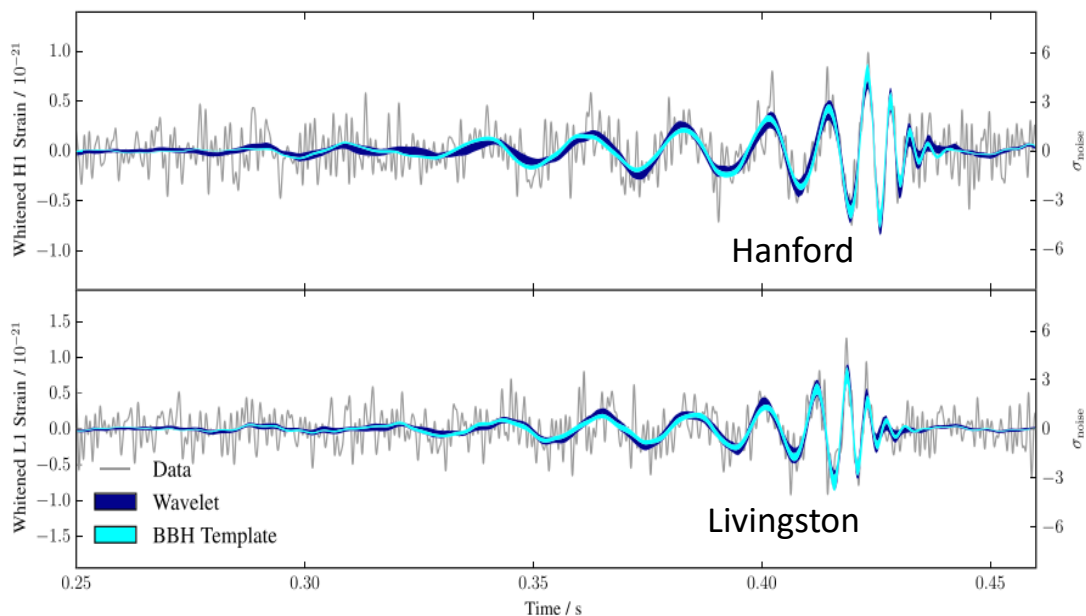


Abb. 7: Von den Interferometern LIGO Hanford und LIGO Livingston empfangenen Signale, die als direkter Nachweis für Gravitationswellen interpretiert werden. Blau durchgezogene Kurven: Anpassung gerechneter Kurven an das empfangene Signal.

Neutronensterne, Schwarze Löcher³

Sterne entstehen durch die Kondensation von Materie. Sie leuchten, da durch Kernfusionen in ihrem Innern gewaltige Energiemengen nach außen abgegeben werden und sie erreichen im Verlauf ihrer Entwicklung verschiedene Endzustände, die letztendlich von ihrer Anfangsmasse abhängen. **Neutronensterne** stellen einen möglichen Endzustand der Sternenentwicklung dar. Dies sind Sterne mit einem Radius zwischen 9 und 13 km und einer unvorstellbar hohen Dichte von 10^{17} kg/m^3 oder umgerechnet 10^8 kg/mm^3 (100 Millionen kg pro Kubikmillimeter). Dies bedeutet, ein Würfel aus Neutronensternmaterie mit einer Seitenlänge von 1 mm hat eine Masse, die der von 10.000 Autos entspricht (je Auto grob 1000 kg = 1 t).

Zum Größenvergleich: Unsere Sonne, ein relativ kleiner Stern, hat einen Radius von etwa 700.000 km und eine Masse, die etwa genauso groß ist wie die des Neutronensterns. Unsere Erde hat einen mittleren Radius von etwa 6.360 km.

Wenn im Verlauf der Sternenentwicklung die Masse des Zentralbereiches eines ausgebrannten Sternes die obere Massengrenze eines Neutronensterns (zwischen zwei und drei Sonnenmassen) überschreitet, dann kann sich kein Neutronenstern bilden. Vielmehr kollabiert der innere Teil des Sterns unter der Schwerkraft der Materie. Dabei wird sein Radius kleiner als

$$R_S = \frac{2G \cdot M}{c^2},$$

und kein Signal aus dem Gebiet innerhalb des Radius R_S kann nach außen gelangen.

Dieses Gebilde wird als **Schwarzes Loch** bezeichnet.

R_S ist der Schwarzschild-Radius, benannt nach dem Physiker Karl Schwarzschild (1873 -1916).

Gravitationskonstante: $G = 6,67428 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$

Masse des Schwarzen Loches: $M = 5 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Lichtgeschwindigkeit: $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Für einen Stern mit der angegebenen Masse ergibt sich für den Schwarzschildradius: $R_S = 7,43 \cdot 10^3 \text{ m} = 7,43 \text{ km}$

Mit der folgenden Betrachtung über die Fluchtgeschwindigkeit kann die Gleichung für den Schwarzschildradius in stark vereinfachter Form plausibel gemacht werden.

Wenn eine Rakete, die auf der Erdoberfläche gestartet wird, den Bereich der Gravitationskraft der Erde verlassen soll, dann muss ihre Startgeschwindigkeit (Fluchtgeschwindigkeit v_F) größer als 11,2 km/s sein. Dies ergibt sich aus der folgenden Energiebetrachtung: Die kinetische Energie der Rakete

mit der Masse m beim Start ($W_{kin} = \frac{1}{2} m v_F^2$) muss größer sein als die potentielle Energie im Gravitationsfeld ($W_{pot} = GmM_E \left(\frac{1}{R_E} - \frac{1}{r_\infty} \right)$).

M_E : Masse der Erde; R_E : Radius der Erde r_∞ : unendlich große Entfernung von der Erde; $\frac{1}{r_\infty} = 0$

Setzt man diese Energien gleich und löst nach der Fluchtgeschwindigkeit v_F auf, dann erhält man:

$$\frac{1}{2} m v_F^2 = GmM_E \frac{1}{R_E} \quad v_F = \sqrt{\frac{2GM_E}{R_E}}$$

Ersetzt man die Fluchtgeschwindigkeit v_F durch die Lichtgeschwindigkeit c und formt nach R um, dann erhält man die oben angegebene Formel für den Schwarzschild-Radius.

Quellen:

1. Dieser Bericht basiert auf dem Vortrag von David Walker am 04.03.2018 im Vortragssaal des Museums für Natur und Umwelt in Lübeck
2. J. Grehn, J. Krause (Hrsg.), Metzler Physik, Schroedel Verlag, Hannover 1998, S. 369
3. J. Grehn, J. Krause (Hrsg.), Metzler Physik, Schroedel Verlag, Hannover 1998, S. 560 f.
4. https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/popular-physicsprize2017.pdf
5. Informationen über LIGO: <https://www.ligo.caltech.edu/page/about>

Ergänzende Videos:

„Schall im Vakuum“: https://www.youtube.com/watch?v=A6y_7B2Woww

Entstehung elektromagnetischer Wellen: <https://www.youtube.com/watch?v=Xv3yigaveKs>

LIGO: Journey of a Gravitational Wave <https://www.youtube.com/watch?v=FXlg3cr-q44>

Was die Entdeckung von Gravitationswellen bedeutet (Vortrag):

<https://www.youtube.com/watch?v=iMVAgCPYYHY>

Bildnachweise:

Abb. 1: W. Czeslik

Abb. 2: Reuters; <https://1hu9t72zwflj44abyp2h0pfe-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2017/10/Barry-Barish-1024x448.jpg>

Abb. 3: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/taylor.jpg

Abb. 4: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/hulse.jpg

Abb. 5: David Walker, Vortragsfolie 19

Abb. 6: nobelprize.org;

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/popular-physicsprize2017.pdf

Abb. 7: David Walker, Vortragsfolien 30 und 34

Dr. David Walker wurde 1990 an der Universität Hamburg mit einer theoretischen Arbeit über elektromagnetische und optische Eigenschaften unkonventioneller Supraleiter promoviert. Nach zwei Jahren Postdoc in Hamburg wechselte er 1992 in den Lehrerberuf. Zur Zeit unterrichtet er Mathematik und Physik an einem privaten Hamburger Gymnasium. Sein wissenschaftliches Interesse gilt der theoretischen Astrophysik, besonders der Kosmologie und der Relativitätstheorie einerseits sowie dem Aufbau und der Entwicklung von Sternen andererseits.