

Gravitationswellen

Anlass dieser Schrift ist der kürzlich (am 14. Sep. 2015) erfolgte experimentellen Nachweis einer Gravitationswelle.

Albert Einstein hat die Existenz von Gravitationswellen im Rahmen seiner allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesagt.

Die Physik der Gravitationswellen unterscheidet sich wesentlich von der Physik der elektromagnetischen Wellen, aber sie haben auch einige Gemeinsamkeiten. So breiten sich beide Wellenarten mit der Lichtgeschwindigkeitskonstanten (299.792.458 m/s) aus. Beide werden durch die Beschleunigung von Massen erzeugt, wobei im Falle der elektromagnetischen Welle jene Massen Ladungsträger sind. Jede elektromagnetische Welle hat demnach gleichzeitig auch eine Gravitationswellenkomponente.

Hinzu kommt, dass jede beschleunigte Masse, die elektrisch neutral ist, ebenfalls Gravitationswellen emittiert.

Die Gravitationswelle ist somit die allgemeinere Form der Wellenausbreitung und die elektromagnetische Welle ist der Sonderfall. Beide Wellentypen haben aber prinzipiell die selbe Ursache, die entstehen durch die Veränderungen im Raum, die durch die Beschleunigung von Massen (ladungstragende Massen im Falle der elektromagnetischen Welle).

Die Veränderungen im Raum (die wir als Wellen bezeichnen) entstehen aufgrund der Endlichkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wirkung. D.h. in der Ferne vom beschleunigtem Objekt findet die Wirkung zeitverzögert statt, weil sie sich eben nur mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet und diese „Ausbreitungswelle“ bezeichnen wir als elektromagnetische- bzw. Gravitationswelle.

Warum hat so lange gedauert, bis die erste Gravitationswelle gemessen werden konnte? Das hat damit zu tun, weil die Gravitationswellen im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen außerordentlich wenig Leistung emittieren. Ein Radiosender emittiert leicht mehrere tausend Watt, die in vielen Kilometer Entfernung noch gemessen werden können.

Die Erde hingegen, die sich mit 30 km/s um die Sonne bewegt, emittiert hingegen gerade mal 200 Watt¹ Gravitationswellenenergie. Natürlich können wir die Welle auf der Erde selbst nicht messen, weil sie sich relativ zu uns nicht beschleunigt.

Um eine Gravitationswelle messen zu können benötigt man also zwei Umstände. Erstens muss die emittierende Masse außerordentlich Große sein – am besten mehrere Sonnenmassen. Zweitens muss die Beschleunigung der Masse extrem groß sein – im Falle einer Kreisbahnbewegung (was ja auch eine beschleunigte Bewegung ist) muss

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=1ROtbWH6FqU> - min 17:50 (Hanns Ruder)

die Umlaufzeit zweier extrem großer Massen extrem kurz sein, d.h. zwei äußerst schwere Körper müssen sich in sehr kurzer Distanz umkreisen.

Das ist z.B. in jedem Doppelsternsystem der Fall. Hier werden dann tatsächlich etwa 10^{30} Watt² Gravitationswellenenergie frei (immerhin 10.000 Mal so viel wie unsere Sonne als sichtbares Licht emittiert). Angesichts der Entfernung solcher Doppelsternsysteme ist das aber viel zu wenig, um auf der Erde detektiert werden zu können.

Die nun gemessenen Gravitationswellen entstammen tatsächlich von einem kollabierenden Doppelsternsystem, d.h. von zwei ultraschweren Objekten, die sich in Spiralbahnen aufeinander zu bewegten und am Ende verschmolzen sind. Es handelte sich um zwei Schwarze Löcher mit etwa 36 und 29 Sonnenmassen, welchen in den letzten 20 Millisekunden vor der Verschmelzung $3,6 \times 10^{49}$ Watt Gravitationswellenenergie freigesetzt haben, allerdings aus einer Entfernung von etwas über 1 Milliarde Lichtjahren³.

Tatsächlich wurde bei diesem Ereignis am Laser-Interferometer LIGO eine Raumänderung in der Länge von 1 zu 10^{-21} gemessen. Das Signal dauerte etwa 0,2 Sekunden lang an und die gemessene Frequenz von 150Hz legt nahe, dass die beiden Objekte sich kurz vor der Verschmelzung 75 Mal pro Sekunde gegenseitig umrundeten. Der daraus errechnete Abstand betrug zu diesem Zeitpunkt 350 km. Die Bahngeschwindigkeit der beiden Objekte steig in diesem Moment von 30% auf 60% der Lichtgeschwindigkeit an, was bedeutet, dass kurz vor der Verschmelzung 3 Sonnenmassen in Gravitationswellenenergie umgewandelt worden sind.

² <https://www.youtube.com/watch?v=1ROtbWH6FqU> - min 22:30 (Hanns Ruder)

³ https://en.wikipedia.org/wiki/First_observation_of_gravitational_waves