

Moderne Methoden der beobachtenden Astronomie (Teil 5)

Die **Gravitationswellenastronomie**¹ gehört, ähnlich wie die Neutrinoastronomie, zu den jüngsten Zweigen der beobachtenden Astronomie. Forschungen zu Gravitationswellen werden mit immer leistungsstärkeren Ausrüstungen schon seit Jahrzehnten betrieben, aber ihr erster direkter Nachweis liegt noch keine 10 Jahre zurück. Informationsträger sind hier weder elektromagnetische Wellen noch Elementarteilchen, sondern winzige Verzerrungen der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Im Gegensatz zu Licht und anderen elektromagnetischen Wellen bewegen sich Gravitationswellen also nicht durch den Raum, sondern es handelt sich um Wellen (Stauchungen und Streckungen) des Raums, genauer gesagt, der vierdimensionalen Raumzeit selbst. Das macht sie für die astronomische Beobachtung auch so wertvoll. Sieht man mal von der noch jungen Neutrinoastronomie ab, hätte man z.B. nur geringe Chancen, etwas über das Innere von Himmelskörpern zu erfahren. Während elektromagnetische Wellen von normaler Materie sowohl ausgesandt als auch absorbiert werden können, werden Gravitationswellen von Materie kaum beeinflusst. Dadurch tragen sie Informationen über die Ereignisse und Objekte, welche sie ausgelöst haben, weitgehend ungehindert durch das All. Ein Beispiel für auf diese Weise beobachtbare Objekte sind Schwarze Löcher, die ja selber keinerlei Strahlung abgeben (allenfalls ihre nähere Umgebung) aber unter bestimmten Umständen Gravitationswellen emittieren können. Typische potentielle Beobachtungsziele der Gravitationswellenastronomie sind energieintensive kosmische Ereignisse wie die Verschmelzung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern, asymmetrische Supernova-Explosionen (Entstehung extrem schnell rotierender Neutronensterne oder mit sehr hoher Geschwindigkeit fortfliegender Schwarzer Löcher bei der nicht kugelförmigen Explosion sehr großer Sterne²) oder Phasenübergänge im frühen Universum (werden u.a. für das „Ausfrieren“ der vier Grundkräfte aus der „Ursuppe“ und einer neueren Hypothese zufolge für die Bildung der Dunklen Materie verantwortlich gemacht³).

Die Geschichte der Gravitationswellen-Forschung reicht bis in die 1890er Jahre zurück⁴. Man hatte erkannt, dass sich die Kräfte zwischen zwei elektrischen Ladungen einerseits und zwei Massen andererseits bei Veränderung ihres Abstandes analog verhalten und sich mathematisch ähnlich beschreiben lassen. Daraus schlussfolgerte man, dass neben elektromagnetischen Wellen auch Gravitationswellen existieren könnten. Die entscheidende Basis zum Nachweis von Gravitationswellen wurde dann durch Albert Einstein mit der 1905 veröffentlichten Speziellen Relativitätstheorie und der 10 Jahre später nachfolgenden Allgemeinen Relativitätstheorie gelegt. Die Gravitation wurde nicht mehr als Kraft, sondern als geometrische Eigenschaft der Raumzeit betrachtet. Diese wird durch Massen verformt, wodurch die Bahnen anderer Körper beeinflusst werden. Zur Ausbreitung der Gravitation durch Gravitationswellen hatte Einstein allerdings zeitlebens einen skeptischen Standpunkt. Auf jeden Fall bezweifelte er, dass man die winzigen Raumzeitverzerrungen überhaupt jemals nachweisen könnte. Das gelang erst nach seinem Tode. Der mathematische Beweis für die Existenz von Gravitationswellen wurde Ende der 1950er Jahre erbracht. 1974 erfolgte dann ihr indirekter Nachweis anhand von zwei sich umkreisenden Neutronensternen. Es konnte gezeigt werden, dass diese bei ihrer allmählichen Annäherung genauso viel Energie verloren wie sie gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie in Form von Gravitationswellen abstrahlen müssten. Erst Jahrzehnte später gelang 2015 der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen. In einem ca. 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernten Doppelsystem umkreisten sich zwei Schwarze Löcher mit 29 bzw. 36 Sonnenmassen. Beobachtet wurde die spiralförmige Annäherung und schließlich Verschmelzung der beiden Objekte zu einem noch größeren Schwarzen Loch mit einer Gesamtmasse von 62 Sonnenmassen. Die enorme Differenz von 3 Sonnenmassen wurde in Form starker Gravitationswellen freigesetzt, die nach ihrer Reise mit Lichtgeschwindigkeit durch die riesigen Weiten des Kosmos schließlich auch die Erde erreichten.

Grundsätzlich erzeugen alle bewegten Massen Gravitationswellen. Die gigantischen Herausforderungen an ihren messtechnischen Nachweis ergeben sich daraus, dass die verursachten „Kräuselungen“ der Raumzeit so unvorstellbar winzig sind. So würde beispielsweise ein heftiges

kosmisches Ereignis in unserer Nachbarschaft wie eine Supernova-Explosion in der Milchstraße Gravitationswellen mit Abstandsänderungen um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms, bezogen auf die Distanz Erde - Sonne hervorrufen. Für eine typische Messstrecke auf der Erde von einem Kilometer würde die Änderung lediglich ein Tausendstel eines Protonendurchmessers betragen⁵. Gravitationswellen treten in einem sehr breiten Frequenzspektrum zwischen ca. 10^{-18} (Hintergrundstrahlung aus den Anfängen des Kosmos) und 10^4 Hz (Supernovae) auf.

Es gibt zwei Arten von Gravitationswellendetektoren:

- Das Hauptelement von **Resonanzdetektoren**⁶ ist eine schwingende Testmasse, (Resonator) z.B. ein Zylinder oder eine Kugel aus Metall mit einer Masse in der Größenordnung von einer Tonne. Durch Gravitationswellen werden diese Körper in Schwingungen versetzt, die messbar sein sollten. Auf Grund der Resonanzüberhöhung sollten auch sehr kleine Signale messbar gemacht werden. Resonanzüberhöhungen (oder erzwungenen Schwingungen) können z.B. auch bei Brücken auftreten, wenn darüber marschierende militärische Einheiten durch Gleichschritt die Brücke in sich aufschaukelnde Schwingungen versetzen, die sogar zur Zerstörung führen können. Der Effekt ist besonders stark, wenn die erzwungene Schwingung in der Nähe der Eigenfrequenz liegt. Aus diesem Grund schränkt auch die Nutzung dieses Effektes bei Resonanzdetektoren den untersuchbaren Frequenzbereich stark ein. Um lokale Störungen auszuschalten, wurden gleichartige Detektoren z.T. in ca. 1000 km Entfernung parallel betrieben. Resonanzdetektoren werden seit den 60er Jahren eingesetzt. Trotz gesteigerter Empfindlichkeit konnte jedoch mit dieser Methode kein eindeutiger Nachweis von Gravitationswellen geführt werden, so dass man sich verstärkt einem anderen Verfahren zuwandte.

- **Bild 1** zeigt das Prinzip eines typischen **Laserinterferometers**⁴. Dieses besteht aus zwei senkrecht zueinander verlaufenden Vakuumröhren, in deren Schnittpunkt ein halbdurchlässiger Spiegel (Strahlteiler) angebracht ist. Ein darauf gelenkter hochstabilisierter Laserstrahl wird auf beide Arme aufgeteilt. Die Teilstrahlen werden an den Röhrendenden an störungsisoliert aufgehängten Spiegeln reflektiert und anschließend durch den Strahlteiler wieder zusammengeführt. Als resultierendes Messsignal ergibt sich ein Interferenzmuster in Form von Interferenzstreifen oder -ringen. Eine durchlaufende Gravitationswelle führt dazu, dass jeweils ein Arm kurzzeitig gestreckt und der andere gleichzeitig gestaucht wird. Dadurch verlängern beziehungsweise verkürzen sich die von den Laserstrahlen durchlaufenen Strecken und die beiden überlagerten Lichtwellen schwingen zeitweilig nicht mehr im gleichen Takt. Das führt zu einem charakteristisch veränderten Interferenzmuster, dessen Auswertung Aussagen zu der verursachenden Gravitationswelle erlaubt. Im Gegensatz zu Resonanzdetektoren decken Laserinterferometer ein relativ breites Frequenzspektrum ab und sind auch wesentlich empfindlicher.

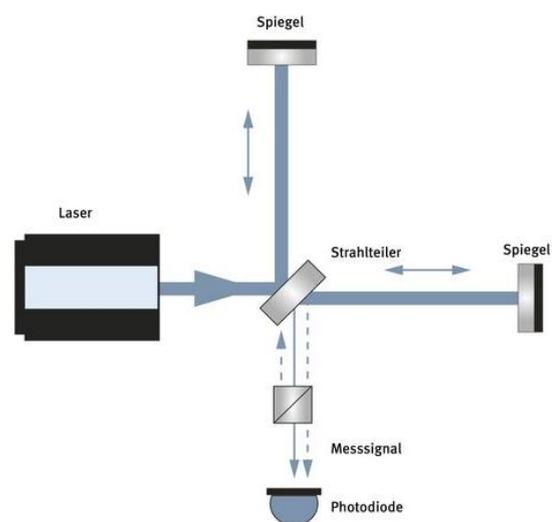


Bild 1 Prinzip eines Laserinterferometers⁴

Nachfolgend werden einige besonders bedeutsame Gravitationswellendetektoren etwas näher betrachtet.



Bild 2 LIGO-Observatorien⁷

LIGO⁷ (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, d.h. Laser-Interferenz-Gravitationswellen-Observatorium) ist eine seit 2002 betriebene Anlage in den USA, die aus zwei miteinander verknüpften ca. 3.000 km voneinander entfernten Observatorien besteht (**Bild 2**). Jedes verfügt über ein L-förmiges Ultrahochvakuumssystem mit Schenkellängen von je 4 km. Ein Spiegelsystem sorgt für den vielfachen Durchlauf der Messstrecke und damit eine effektive Lauflänge des Lichtes von 1.120 km. Daraus resultiert eine entsprechend hohe Empfindlichkeit. Der relative

messbare Armlängenunterschied durch Gravitationswellenwirkung beträgt etwa 10^{-22} (ein Tausendstel Protonenradius). Das Herausfiltern von Gravitationssignalen aus einem Mix von Störsignalen stellt eine besondere Herausforderung dar. Die Anlagen sind für Nachweise im Frequenzbereich zwischen ca. 30 Hz und einigen kHz ausgelegt. Das Observatorium in Hanford verfügt über ein zweites, ähnlich aufgebautes Interferometer mit einer Schenkellänge von zwei Kilometern. Bevorzugte Beobachtungsobjekte von LIGO sind Pulsare, Gravitationswellen-Hintergrundstrahlung, Verschmelzung kompakter Objekte (Neutronensterne, Schwarze Löcher) und Bursts (kurze intensive Strahlenausbrüche wie z.B. Gammablitz). Nach mehreren mehrjährigen Messperioden in enger Kooperation mit anderen Observatorien wurden die Instrumente umfangreich verbessert. Im Mai 2015 ging die Anlage als Advanced LIGO mit einer um den Faktor 10 (gegenüber der Ursprungseinrichtung) verbesserten Empfindlichkeit erneut in Betrieb. Wenige Monate später erfolgte dann der erste, bereits oben erwähnte, direkte Nachweis von Gravitationswellen (**Bild 3**). Die Diagramme zeigen die relativen Armlängenänderungen über der Zeit, oben und in der Mitte einzeln für die beiden Detektoren und unten im direkten Vergleich unter Berücksichtigung der positionsbedingten Laufzeitverzögerung. Oben und in der Mitte sind zudem aus Modellrechnungen vorhergesagte Verläufe für das beobachtete Ereignis eingetragen.

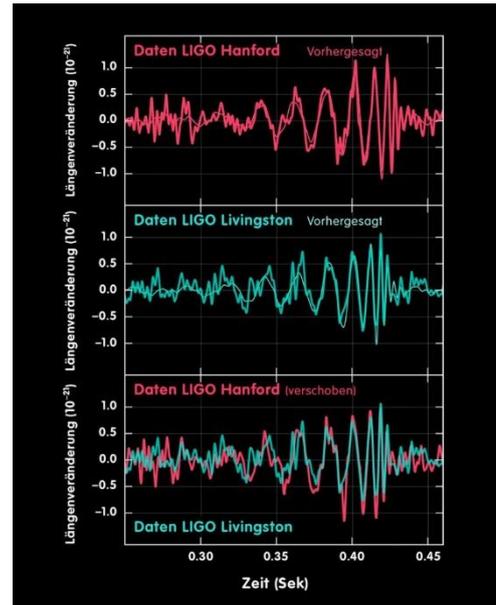


Bild 3⁸ Zeitlicher Verlauf des Gravitationswellensignals durch Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher beim ersten direkten Gravitationsnachweis in den beiden LIGO-Observatorien

Der in der Nähe von Hannover stationierte europäische Gravitationswellendetektor **GEO600**⁹ hat eine Schenkellänge von 600 m. Die Anlage wurde 2006 in Betrieb genommen und ist zusammen mit Advanced LIGO und Advanced Virgo (s.u.) Teil des internationalen LIGO-Verbundes. Seit 2010 setzt die Anlage weltweit als erster Detektor sogenanntes gequetschtes Licht ein (mit speziellen Lasern erzeugtes extrem rauscharmes Laserlicht zur wesentlichen Erhöhung der Empfindlichkeit). GEO600 wird für die Grundlagenforschung genutzt und diente u.a. auch zur Entwicklung und zum Test von Anlagenkomponenten, wie sie bei den beiden großen LIGO-Detektoren eingesetzt werden.

Das französisch-italienische Gemeinschaftsprojekt **VIRGO**¹⁰ mit 3 km langen Interferometer-Armen ging 2007 in der Toskana in Betrieb. Nach umfassenden Optimierungen wird es seit 2017 als Advanced Virgo betrieben. Durch Mehrfachreflexion beträgt die effektive Armlänge etwa 100 km. Der auswertbare Frequenzbereich liegt etwa zwischen 10 Hz und 10 kHz. Durch die Kooperation mit den beiden Advanced LIGO-Observatorien konnte die Nachweisgenauigkeit wesentlich erhöht werden und u.a. die Verschmelzung zweier Neutronensterne im August 2017 beobachtet und ausgewertet werden.

Der japanische Gravitationswellendetektor **KAGRA**¹¹ (**Kamioka Gravitational Wave Detector** - nach der gleichnamigen Stadt benannt) nahm seinen Betrieb im Jahre 2020 auf. Seine Armlänge beträgt 3 km.

Zur Reduzierung des thermischen Rauschens sind die Spiegel auf 20 K heruntergekühlt. Damit ist er der bisher einzige mit Kryotechnik arbeitende interferometrische Detektor. Durch Unterbringung in einer Bergbaumine wurde außerdem das seismische Rauschen minimiert. Derzeit werden in weltweiter Kooperation mit anderen Observatorien die speziellen technischen Möglichkeiten der Anlage u.a. dazu genutzt, kontinuierliche Gravitationswellen, wie sie z.B. von deformierten, schnell rotierenden Neutronensternen ausgehen sowie den noch weitgehend unerforschten Gravitationswellenhintergrund zu erkunden.

LISA¹² (Laser Interferometer Space Antenna, d.h. Laser-Interferometer-Weltraum-Detektor) ist ein von der ESA geplantes Projekt zur Errichtung eines Gravitationswellendetektors im All. Die Anlage soll aus drei Satelliten bestehen, die ein nahezu gleichseitiges Dreieck mit 2,5 Millionen Kilometer Seitenlänge bilden. 2035 sollen die Satelliten mit einer Ariane-6-Rakete ins All gebracht werden. Die Satellitenformation soll sich etwa 50 Millionen Kilometer hinter der Erde auf dem Erdorbit um die Sonne bewegen. Durch die große Armlänge und den weitgehenden Ausschluss von erdtypischen Störfaktoren wird LISA besonders geeignet für die Erfassung niederfrequenter (0,1 mHz bis 1 Hz) und entsprechend langwelliger Signale sein. Vorgesehene Forschungsziele sind u.a. supermassereiche Schwarze Löcher, Gravitationswellen aus der Zeit kurz nach dem Urknall und eventuell spezielle Raumzeitveränderungen, wie sie für das aus zwei Weißen Zwergen mit sehr kurzer Umlaufzeit bestehende Doppelsternsystem HM Cancri erwartet werden.

Ein weiterer Gravitationswellendetektor, das europäische **Einstein-Teleskop**¹³, befindet sich derzeit noch in der konzeptionellen Phase. Die Anlage soll LIGO ähneln, aber als dritte Generation für wesentlich genauere Präzisionsmessungen geeignet sein. Das Teleskop soll über drei in einem gleichseitigen Dreieck angeordnete je 10 km lange Arme verfügen und in ca. 250 bis 300 m Tiefe betrieben werden. Geplant sind sechs Einzeldetektoren, von denen die Hälfte auf 10 K gekühlt und Messungen im Niederfrequenzbereich von 2 bis 40 Hz vornehmen soll. Die anderen Detektoren sind für Hochfrequenzmessungen vorgesehen und sollen gegenüber Vorgängern eine wesentlich höhere Laserleistung aufweisen. Von mehreren in Frage kommenden Standorten wird z.Z. die Grenzregion zwischen den Niederlanden, Belgien und Deutschland präferiert, wo derzeit Untersuchungen des Untergrundes durchgeführt werden. Der aktuelle Zeitplan sieht die Standortentscheidung 2025/26 vor, den Baubeginn 2028 und die Inbetriebnahme 2035.

Quellen

1	https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswellenastronomie
2	https://futurezone.at/science/schwarzes-loch-supernova-neutronenstern-simulation-sonne-geschwindigkeit-weltall/402722035
3	https://www.scinexx.de/news/kosmos/neues-modell-fuer-die-dunkle-materie/
4	https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/gravitationswellen/
5	https://www.geo600.org/99874/gravitational-waves
6	https://de.wikipedia.org/wiki/Resonanzdetektor
7	https://de.wikipedia.org/wiki/LIGO
8	https://www.einstein-online.info/spotlight/gw150914/
9	https://de.wikipedia.org/wiki/GEO600
10	https://de.wikipedia.org/wiki/Virgo_(Gravitationswellendetektor)
11	https://de.wikipedia.org/wiki/KAGRA
12	https://de.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna
13	https://de.wikipedia.org/wiki/Einstein-Teleskop