Gravitationswellen messen

DFG Sonderforschungsbereich/Transregio: „Gravitationswellen-Astronomie", Garching | Hannover | Jena | Potsdam | Tübingen

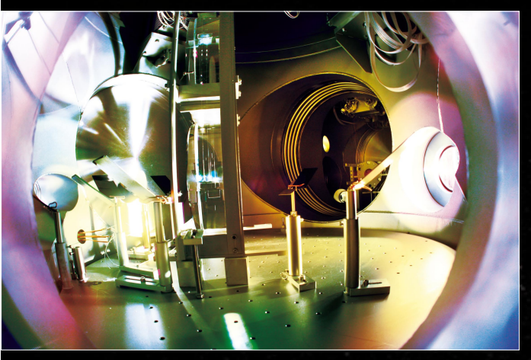
Einstein|Wellen|*mobil*
Gravitationswellen-Astronomie erleben

Jagd auf Gravitationswellen

Was Einstein nicht für möglich hielt, wird Realität – auf der Erde und im All.

Die Wirkung einer typischen Gravitationswelle ist extrem klein. Albert Einstein vermutete, dass man die winzigen Abstandsänderungen wohl nie würde messen können.

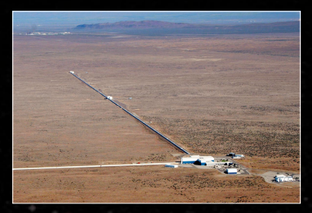
Heute rückt eine Messung solcher extrem kleiner Wegdifferenzen mit Hilfe von Laserinterferometern in den Bereich des Realisierbaren. Dabei kommt raffinierteste Lasertechnik zum Einsatz. Die Interferometer müssen Messstrecken aufweisen, die bis zu mehreren Kilometern lang sind.



Unten: Vakuumtanks von GEO600 bei Hannover. (Bild: H. Lück)

Auf der Erde existieren einige solcher Anlagen:

TAMA300	Tokio	300 m
LIGO	Livingston	4000 m
	Hanford	2000/4000 m
GEO600	Hannover	600 m
VIRGO	Cascina/Pisa	3000 m



LIGO-Detektor bei Hanford, Bundesstaat Washington, USA (Bild: LIGO)

Eine der Messstrecken des VIRGO-Detektors bei PISA (Bild: http://www.panoramio.com/photo/1957490)

Blick in den Graben mit einer der Messstrecken von GEO600 (Bild: AEI/MPG)

Wie funktioniert ein Laserinterferometer?

Mit einem Interferometer lassen sich winzige Unterschiede von Weglängen messen. Dazu wird ein Lichtstrahl an einem halbdurchlässigen Spiegel (Strahlteiler) in zwei Teilstrahlen aufgespalten und in zwei unterschiedliche Richtungen geschickt. Die beiden Teilstrahlen, die meist einen rechten Winkel bilden, werden an Spiegeln reflektiert und treffen sich wieder am Strahlteiler.

Dort überlagern sich die beiden Strahlen (Interferenz). Schwingen beide Lichtwellen dabei in die gleiche Richtung, so addieren sich die Intensitäten (konstruktive Interferenz), schwingen sie jedoch entgegengesetzt, so löschen sie sich aus (destruktive Interferenz).

Interferenzveränderung durch andere Weglängen

Ändern sich die Weglängen, sind die Lichtwellen mehr oder weniger lange unterwegs; sie treffen daher in einer anderen Phase ihrer Schwingung wieder zusammen. So kann sich die Interferenz z. B. von einer konstruktiven zu einer destruktiven verschieben, oder umgekehrt.

Läuft eine Gravitationswelle durch das Interferometer, so wird eine der Messstrecken gestaucht und die andere gedehnt. Die Interferenz verändert sich also – dies wird von einem Fotosensor als Signal registriert.

Mehr Power durch Recycling

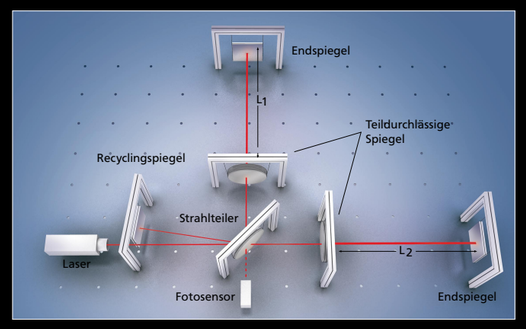
Das meiste Licht wandert aus den Messstrecken zurück in Richtung Lichtquelle. Ein weiterer Spiegel kann dort das Licht wieder in das Interferometer zurückwerfen („Power Recycling"). Aufgrund einer größeren Lichtstärke der Teilstrahlen erzielt man so eine höhere Messgenauigkeit.

Mit Laser und langen Messstrecken

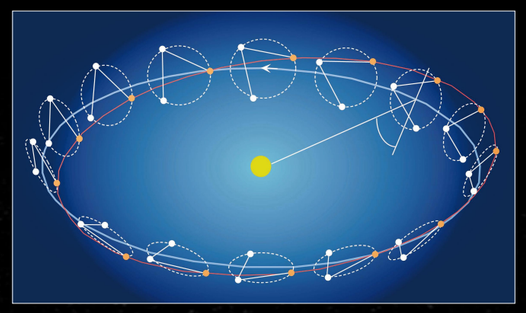
Eine Gravitationswelle verändert die Längen der Messstrecken um einen winzigen Bruchteil von beispielsweise 0,000 000 000 000 000 000 001 – folglich baut man Interferometer zur Messung von Gravitationswellen mit möglichst langen Armen (> aktuell bis zu vier Kilometer), damit überhaupt eine Chance besteht, einen derart winzigen Bruchteil davon messen zu können. Um die Messgenauigkeit noch zu erhöhen, werden statt „gewöhnlichem" Licht spezielle Laser eingesetzt.

Die Abmessungen von Detektoren auf der Erde sind begrenzt, seismische Störungen vereiteln Messungen bei Frequenzen unter ca. 50 Hertz. Die Lösung heißt LISA, Laser Interferometer Space Antenna, und wird aus drei Satelliten bestehen, die in Form eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet sind. Fünf Millionen Kilometer soll der Abstand der Satelliten voneinander betragen, die komplette Anordnung soll in 50 Millionen Kilometer Abstand von der Erde ihre Bahn um die Sonne ziehen – das ist das 150-fache der Strecke von der Erde zum Mond!

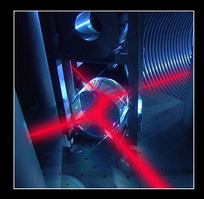
Gravitationswellen von Binärsystemen aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern lange Zeit vor dem Kollaps, kosmischen Strings oder dem Nachhall des Urknalls, der Geburt unseres Universums, weisen sehr tiefe Frequenzen auf, bis weit unter ein Millihertz. Sie lassen sich von terrestrischen Detektoren nicht messen. LISA hingegen stellt eine hervorragende Antenne für diese hochinteressanten Signale dar.



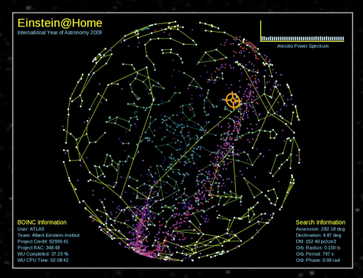
Aufbau eines Laserinterferometers. Eine Gravitationswelle beeinflusst die Längen L_1 und L_2 der Messstrecken.



Links Mitte: Die Bahnen der drei LISA-Satelliten um die Sonne sind leicht gegeneinander verkippt und verschoben. So bleibt die Dreiecksanordnung in sich unverändert, während sie gewissermaßen um die Sonne zu „rollen" scheint. (Bild: LISA/SRL Caltech)



Der zentrale Strahlteiler im Gravitationswellendetektor „GEO600". (Bild: AEI/Milde Marketing)



Mit dem Screensaver „Einstein@Home" kann Ihr PC Jagd auf Gravitationswellen machen. Auf dem Bildschirm wird angezeigt, wo gerade nach Strahlungsquellen gesucht wird. (Bild: AEI)

Momentaufnahme der LISA-Satelliten auf ihrer Bahn um die Sonne. Sie bewegen sich auf der gleichen Umlaufbahn wie die Erde, läufen der Erde aber mit einer „Verspätung" von ca. 20 Tagen hinterher. (Bild: AEI/Milde Marketing, Exozet)

Design: www.gd90.de