

5.4 GRAVITATIONSWELLEN

Die Raumzeit bebt

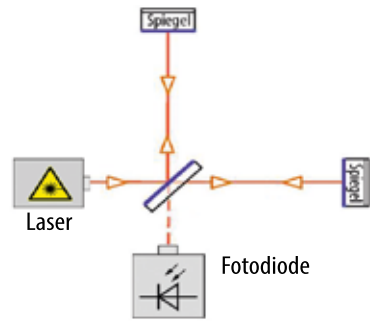
Gaßner: Die größte wissenschaftliche Erfolgsmeldung seit dem Nachweis des Higgsteilchens war ohne Frage die erste direkte Messung einer Gravitationswelle am 14. September 2015.

Lesch: Dass es diese Beben der Raumzeit geben muss, war ja bereits seit 1974 klar, als Russell Hulse und Joseph Taylor das 21.000 Lichtjahre entfernte Doppelsystem *PSR1913+16* beobachtet hatten, bestehend aus einem Neutronenstern und einem Pulsar. Durch das schnelle Kreisen um den gemeinsamen Schwerpunkt – rund 17 mal pro Sekunde – erzeugen die Objekte starke Verwerfungen in der Raumzeit und verlieren dabei kontinuierlich Energie in Form von abgestrahlten Gravitationswellen. Dadurch nähern sie sich einander pro Jahr um 3,5 Meter an, und diese Änderung der Bahnparameter wurde nachgewiesen (Nobelpreis 1993).

Gaßner: Aber ein direkter Nachweis, eine Messung jener Prognose, die Albert Einstein bereits vor rund 100 Jahren aufgestellt hatte, diese Trauben schienen zu hoch zu hängen. Einstein selbst erachtete es als unmöglich, jemals Messungen mit einer derart hohen Präzision durchführen zu können. Wir sprechen hier von relativen Stauchungen und Dehnungen der Raumzeit in der Größenordnung von 10^{-21} , d. h. die Entfernung Erde Sonne würde beim Durchlauf einer Gravitationswelle gerade mal um einen Atomdurchmesser verändert.

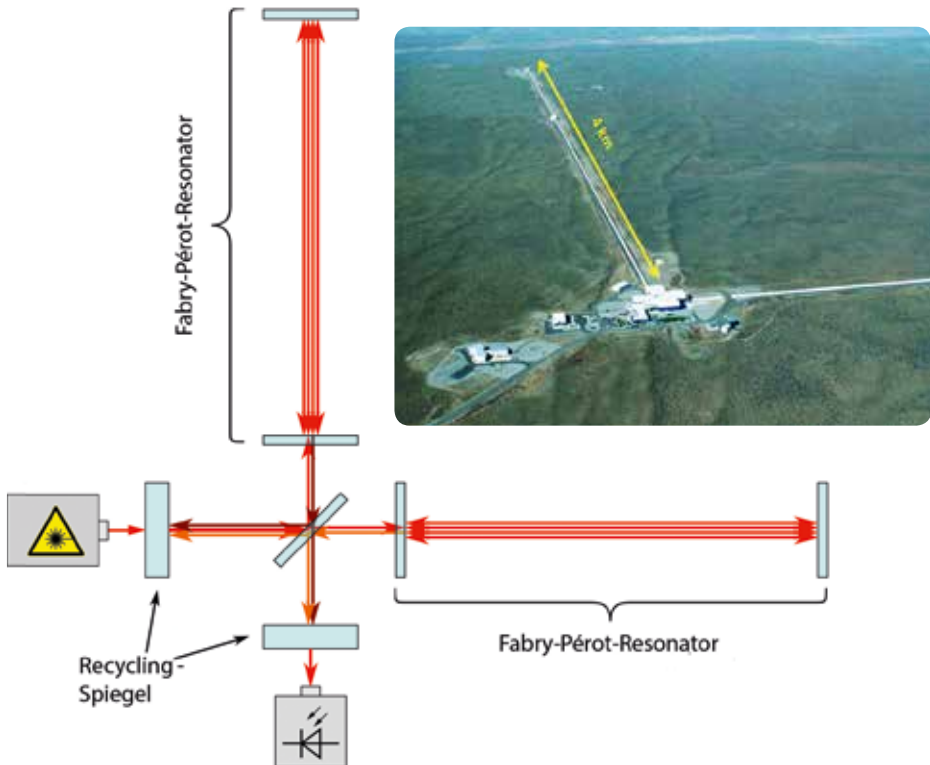
Lesch: Solche Genauigkeiten lassen sich natürlich nur mit Licht erreichen. Im Prinzip handelt es sich bei der Messanordnung um ein Interferometer. Das Licht eines Lasers wird mittels Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel) in zwei senkrecht zueinander stehende Arme gelenkt, an deren Ende von Spiegeln reflektiert und über den Strahlteiler wieder zusammengeführt. Als Detektor dient eine Fotodiode. Im Ausgangszustand sind die Strecken in den beiden Armen so justiert, dass sich die Lichtwege gerade um eine halbe Wellenlänge bzw. ein ungeradzahliges

Vielfaches davon unterscheiden, d. h. entlang des Rückwegs schwingt eine Lichtwelle nach oben, während die andere nach unten schwingt (und umgekehrt), sodass sie sich beim Eintreffen am Strahlteiler gegenseitig auslöschen und somit an der Diode kein Signal hervorrufen. Sobald sich nun eine der Längen ändert, warum auch immer, wird diese sogenannte *destruktive Interferenz* aufgehoben: An der Diode kommt Licht an, und sie schlägt Alarm.



5.32 Skizzierter Aufbau eines Michelson-Interferometers.

Gaßner: Ja, durch diese Längenänderungen sollen sich die Gravitationswellen verraten – das ist ja genau ihr Wesen, dass sie Raum und Zeit senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung abwechselnd stauchen und strecken. Allerdings ist dieses Beben der Raumzeit derart schwach, dass man selbst für den Nachweis gewaltiger Ereignisse in den Weiten des Alls, wie das Verschmelzen Schwarzer Löcher, noch Interferometerarme mit mindestens tausend Kilometer Länge bräuchte. Die Erdkrümmung setzt aber den Aufbauten bereits nach wenigen Kilometern eine Grenze. Zudem wäre bei diesen Distanzen ein Laser mit immenser Leistung notwendig, über 750 kW, dessen Strahl allein die Spiegel in Unruhe versetzen würde. Es bedarf also einiger Kniffe. Zunächst nutzt man die Strecke der vier Kilometer langen Arme mehrfach, genauer gesagt 280-mal. Dafür installiert man zusätzliche Spiegel und erhält einen sogenannten *Fabry-Pérot-Resonator*, der das Laserlicht in den Armen vielfach hin und zurück wirft. Damit verschafft man den Interferometern die nötige Länge bzw. die notwendige Sensibilität. Eine möglichst hohe Auflösung des Signalverlaufs an der Diode, d. h. möglichst viele Photonen pro Sekunde, erreicht man nicht durch einen extrem starken Laser, sondern durch sehr umsichtiges Recycling der Photonen einer nur 200 Watt starken Lichtquelle. Entlang des gesamten Lichtweges wird achtsam jedes einzelne Photon durch sogenannte Recycling-Spiegel gehegt und gepflegt, damit ja keines unnützlich verloren geht. Das ist wie im richtigen Leben: Wer wenig verschwendet, kommt auch mit kleinem Budget über die Runden.



5.33 Das Laser-Interferometer Gravitationswellen-Observatorium (advanced LIGO) in Hanford (Washington). Die Fabry-Pérot-Resonatoren vervielfachen die durchlaufene Lichtstrecke auf jeweils 1.120 km. Ein Hochvakuum schützt vor unerwünschten Schmutzeffekten und die 40 kg schweren Spiegel an den Umkehrpunkten sind vierfach von äußeren Einflüssen entkoppelt. Zusätzlich halten sogenannte Recycling-Spiegel möglichst viele Photonen des nur 200 W starken Lasers im Detektor. Ein zweites, nahezu baugleiches Interferometer, befindet sich rund 3.000 km entfernt in Livingston (Louisiana).

Lesch: Spieglein, Spieglein an der Wand ... Dass man solche Anlagen mit derartiger Genauigkeit justieren kann, das grenzt ja schon an ein Wunder. Aber wenn sich jetzt ein Spiegel bewegt und die Diode ein Signal liefert, wie will man sich dann sicher sein, dass man wirklich eine Gravitationswelle gemessen hat und nicht irgendeine andere Störung? Da hustet mal ein Mitarbeiter oder draußen fährt ein LKW vorbei, ganz zu schweigen von seismischen Beben.

Gaßner: Grundsätzlich sind die Spiegel mit ihrer Masse von 40 Kilogramm gegenüber mechanischen Störungen sehr träge, zumal sie vierfach schwingungsentkoppelt aufgehängt wurden, d. h. sie hängen an einer Federung, die wiederum an einer Federung hängt, die über eine Federung mit einer vierten Federung verbunden ist. Trotzdem kommt es bei diesen Genauigkeiten natürlich zu einer Menge an Störsignalen, einem regelrechten Hintergrundrauschen. Diese Ereignisse sind allerdings überwiegend lokal, während Gravitationswellen sich global auswirken. Deshalb betreibt man mehrere Detektoren in großer Entfernung zueinander. Wenn in Hanford z. B. ein LKW vorbei fährt, wird das Signal ausgefiltert, weil es im 3.000 Kilometer entfernten Livingston nicht gleichzeitig zu sehen ist. Zur Filterung globaler Störquellen stehen in den Leitzentralen der Detektoren eine Armada an seismischen und anderen hochsensiblen Geräten, die potenzielle Störquellen abgleichen. Zu guter Letzt kommen wir Theoretiker zu Hilfe, indem wir für verschiedene Quellen von Gravitationswellen jeweils einen charakteristischen Signalverlauf vorgerechnet haben, gewissermaßen einen Fahndungskatalog, mit dem du dein Messergebnis vergleichen kannst, sogenannte *Chirps*.

Lesch: Und wie berechnet man so einen Chirp?

Gaßner: Dafür müssen wir erst mal erklären, wie Gravitationswellen überhaupt zustande kommen. Gravitation breitet sich nicht beliebig schnell aus, sondern unterliegt ebenfalls dem Tempolimit der Lichtgeschwindigkeit. Könnte man z. B. unsere Sonne in diesem Augenblick wegzaubern, so würden wir die Auswirkungen sowohl was das Licht anbelangt, als auch die ausbleibende gravitative Wirkung, erst mit achteinhalb Minuten Verspätung bemerken. So lange wäre die Information „die Sonne ist weg“ unterwegs, bis sie uns erreicht. Könnten wir mit einem anderen Zauberspruch die Sonne periodisch um eine bestimmte Strecke hoch und runter versetzen, würde auch diese Information „die



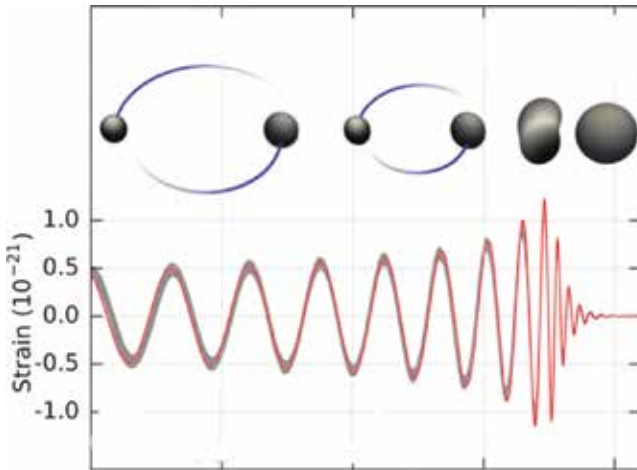
5.34 Spiegel in vierfach entkoppelter Aufhängung

Sonne zieht ein bisschen weiter nach oben oder unten“ mit zeitlicher Verzögerung bei uns eintreffen und ihre Wirkung entfalten: Wir würden auf unserer Umlaufbahn wie eine Boje im Wasser rauf und runter schaukeln. Bis der Mars die Bewegung nachvollziehen würde, müsste man aufgrund seiner größeren Entfernung zur Sonne noch etwas länger warten – so lange eben, bis die Information auch ihn mit Lichtgeschwindigkeit erreicht hat. Beim Jupiter noch länger, usw. Für einen weit entfernten Beobachter würde es so aussehen, als liefe eine Welle „gravitativer Wirkung“ durch unser Sonnensystem, welche die Planeten der Reihe nach ins Schaukeln versetzt. Das ist natürlich stark vereinfacht gedacht, im Weltbild der Newtonschen Mechanik. Im Bild der Allgemeinen Relativitätstheorie wird dieses Schaukeln durch Änderungen der Raumzeitkrümmung vermittelt, und die sich ausbreitenden Krümmungsänderungen nennen wir Gravitationswellen.

Lesch: Und die verändern die Armlängen der Interferometer.

Gaßner: Genau, und zwar für unterschiedliche Quellen jeweils in einem charakteristischen Verlauf – dem Chirp. Verschmelzende Schwarze Löcher liefern einen anderen Signalverlauf als kollidierende Neutronensterne oder Supernova-Explosionen. Einen Sonderfall stellen rotations-symmetrische Beschleunigungen dar, sie liefern gar kein Signal, gemäß dem sogenannten Birkhoff-Theorem. Ersichtlich ist das bereits an unserem Gedankenexperiment mit der Sonne. Außerhalb einer Massenkugel ist die gravitative Wirkung so, als wäre die Gesamtmasse im Kugelmittelpunkt (bzw. im Schwerpunkt) vereint. Das ist allein schon aus Symmetriegründen klar – nur der Mittelpunkt ist von der gesamten Kugeloberfläche gleich weit entfernt, wodurch gewährleistet wird, dass die Gravitationskraft auch in alle Richtungen identisch wirkt. Die Größe der Sonne spielt also für ihre gravitative Wirkung auf unseren Planeten keine Rolle, sondern lediglich ihre Masse und die Entfernung des Mittelpunktes. Würde die Sonne durch irgendeinen Prozess auf den doppelten Radius aufgebläht oder den halben Radius geschrumpft, würden dabei sehr wohl große Massen beschleunigt, die Position ihres Mittelpunktes bliebe allerdings unverändert und somit auch ihre gravitative Wirkung auf die Planeten.

Lesch: Der Chirp ist also der Schlüssel zum Erfolg. Kreisen zwei Schwarze Löcher vor der Verschmelzung auf immer engeren Bahnen umeinander, werden ihre Massen immer stärker beschleunigt, und die Verwerfung der Raumzeit steigt entsprechend an. Bei der Verschmelzung erreicht sie ein Maximum und anschließend klingt der Chirp auf null ab, weil das resultierende Gebilde rotationssymmetrisch ist.



5.35 *Der charakteristische Chirp zweier kollidierender Schwarzer Löcher mit 36 und 29 Sonnenmassen, wie er am advanced LIGO am 14. September 2015 auf einer Zeitskala von 0,3 Sekunden gemessen wurde. Die spezifische Längenänderung nennt man Strain. Grau: Messung; rot: theoretischer Verlauf. Oberhalb des Graphen wird die Position der Schwarzen Löcher zueinander skizziert. Die Differenz von drei Sonnenmassen wurde in Form von Gravitationswellen abgestrahlt, die rund 1,2 Milliarden Jahre später auf der Erde gemessen wurden.*

Gaßner: Die beiden gemessenen Schwarzen Löcher hatten rund 36 und 29 Sonnenmassen und sind zu einem neuen Objekt mit 62 Sonnenmassen verschmolzen, d. h. die unglaubliche Differenz von drei Sonnenmassen wurde innerhalb von Sekundenbruchteilen in Form von Gravitationswellen abgestrahlt. Trotzdem hat die Raumzeit hier bei uns, in 1,27 Milliarden Lichtjahren Entfernung, gerade mal um einen Faktor 10^{-21} geschwankt. Die Raumzeit ist offensichtlich extrem starr. Zusätzlich fällt die Chirp-Amplitude in großer Entfernung zur Quelle näherungsweise linear mit dem Abstand.

Lesch: Wie soll ich mir das vorstellen – „die Raumzeit ist starr“?

Gaßner: Für die schnelle Ausbreitung einer Welle in einem Medium braucht es eine möglichst starre Kopplung der schwingenden Elemente. Schall breitet sich beispielsweise bei Zimmertemperatur in Luft mit 343 m/s, in Wasser mit 1.484 m/s und in Beton mit 3.800 m/s aus. In Diamant wären es 18.000 m/s. Gravitationswellen breiten sich in der Raumzeit mit Lichtgeschwindigkeit aus. Dafür ist eine extrem starre Kopplung notwendig, was wiederum sehr schwache Ausschläge bedingt.

Lesch: Mit der Detektion von Gravitationswellen hat sich ein weiteres Fenster ins All zumindest einen Spalt weit geöffnet. Bislang haben wir von kosmischen Großereignissen nur das Licht gesehen, jetzt „hören“ wir auch den passenden Knall dazu.

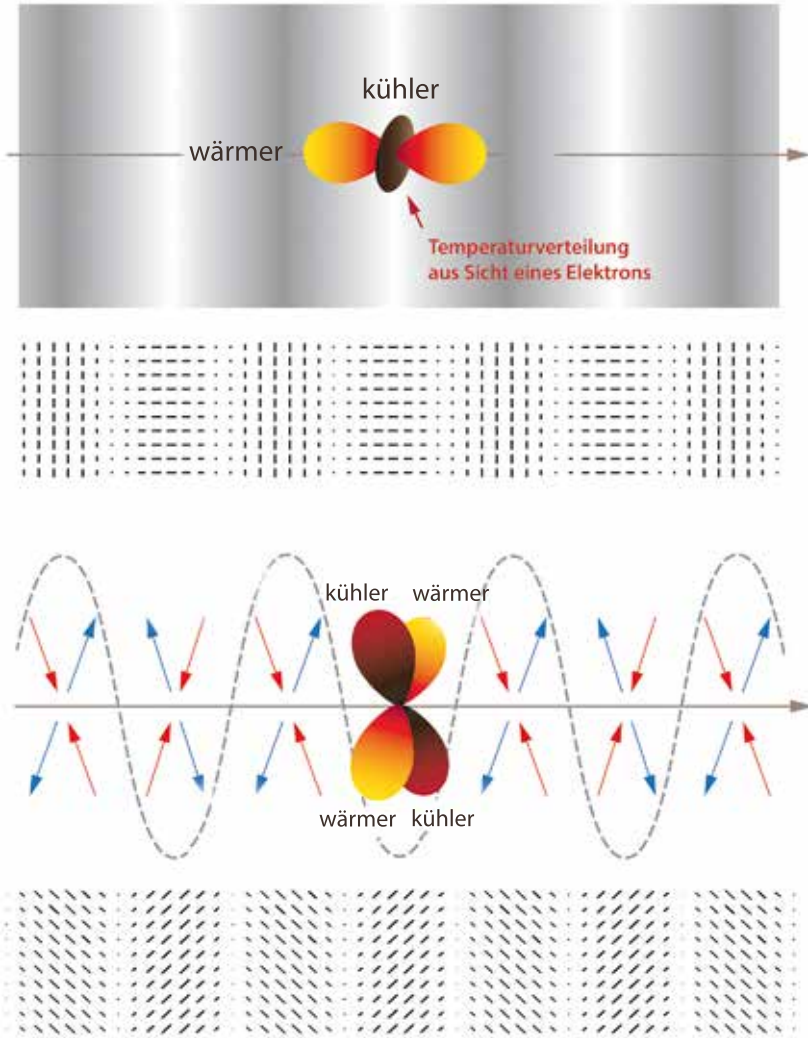
Gaßner: Na bravo – neben der hellen und dunklen Seite des Universums bekommen wir es jetzt auch noch mit der verbeulten zu tun – hoffentlich wird's dadurch wirklich einfacher. Mit zunehmender Anzahl an Detektoren (GEO600 in Deutschland, advanced VIRGO in Italien, KAGRA in Japan und INDIGO in Indien) werden wir zumindest die Herkunft der Signale besser bestimmen können. Bislang war das nur sehr grob möglich, anhand der zeitlichen Differenz, mit der die Gravitationswellen in Hanford und Livingston aufgezeichnet wurden. Würde die Welle genau entlang der Verbindungslinie einfallen, wäre die Verzögerung 10 ms. Tatsächlich waren es aber 7 ms und daraus lässt sich ein Auftreffwinkel rekonstruieren. Mittels Triangulation werden wir zukünftig Photonen und Gravitationswellen von Ereignissen einander zuordnen und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeiten vergleichen. Daran geknüpft ist die Frage, ob ein potenzielles Graviton wirklich masselos ist.

Lesch: Schön finde ich ja, dass die Kollegen bei all diesem riesen Aufwand ihren größten Triumph am 14. September 2015 verschlafen haben – die Gravitationswelle GW150914 wurde nämlich in den USA in den frühen Morgenstunden aufgezeichnet. So kam es, dass die Entdeckung hier in Deutschland um 10:53 Uhr unserer Zeit zuerst aufgefallen war.

Gaßner: Und selbst hier wollte man es anfangs nicht wahr haben. Marco Drago, Postdoc am Albert-Einstein-Institut in Hannover, dachte im ersten Augenblick an eine sogenannte *blind injection*. Mit derartigen Fake-Signalen wird die Wachsamkeit der beteiligten Wissenschaftler regelmäßig überprüft. Das ist vergleichbar einem Feueralarm, bei dem alle denken: „Wieder so eine Übung!“ Erst am nächsten Morgen wurde dem jungen Wissenschaftler bewusst, dass er Geschichte geschrieben hatte.

Lesch: Apropos Fake-News zu Gravitationswellen, da fällt mir die Forschergruppe *Bicep* (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) bzw. ihr Nachfolger *Bicep2* ein, die 2014 einen Nachweis zur Kosmischen Inflation publiziert hatten. Seit einigen Jahren nutzt man die besonders trockene Luft am Südpol, in 2.800 Meter Höhe, um zwei Prozent des Himmels nach besonderen Mustern in der Hintergrundstrahlung abzusuchen. Ständig auf denselben Punkt zu starren, das hat schon was von buddhistischer Zen-Meditation.

Gaßner: Auch die Kosmische Inflation sollte theoretisch immense Beschleunigungen verursacht haben, deren resultierende Gravitationswellen wiederum ein charakteristisches Muster in der Polarisation der Hintergrundstrahlung hinterlassen hätten. Man unterscheidet dabei sogenannte *E-Moden* und *B-Moden*. Polarisation ist die Eigenschaft elektromagnetischer Strahlung, bevorzugt in einer Richtung zu schwingen. Allerdings ist die vermeintliche Sensation zu Staub zerfallen – im wahrsten Sinne des Wortes. Man war nämlich irrtümlich davon ausgegangen, der beobachtete Bereich wäre nahezu frei von galaktischem Staub, der ähnliche Auswirkungen auf die Photonen hat. Tatsächlich haben aber ein Jahr später Daten der Planck-Mission und des Keck-Teleskops auf Hawaii gezeigt, dass der Himmelsausschnitt der *Bicep2*-Messungen sehr wohl galaktischen Staub aufweist. Dafür wurden neue Messungen in einem höheren Frequenzbereich vorgenommen. Bei 353 Gigahertz beispielsweise werden die Polarisationen fast ausschließlich von Staub verursacht. Zieht man diese Daten von den *Bicep2*-Daten ab, so ist der verbleibende Effekt nicht mehr aussagekräftig genug. Natürlich ist die Kosmische Inflation damit nicht widerlegt, aber die Suche nach einem Beweis geht in die nächste Runde.



5.36 Bild oben: Eine ebene Dichtewelle, die senkrecht von links einfällt, verursacht an einem beliebigen Raumpunkt eine veränderte Temperaturverteilung und eine charakteristische Polarisierung. Diese sogenannten E-Moden sind durch Striche dargestellt.

Bild unten: Eine Gravitationswelle, die von links einfällt, verursacht wirbelartige B-Moden in der Polarisierung, weil der Raum abwechselnd gestaucht (rote Pfeile) und gestreckt (blaue Pfeile) wird.