

Gravitationswellen

Leuchs, Gerd

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1989 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.193-196



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Gravitationswellen

Von **Gerd Leuchs**

Sektion Physik der Universität München und Max Planck Institut für Quantenoptik,
D-8046 Garching

Von den vier in der Physik bekannten Kräften ist im Bereich der Elementarteilchen die Gravitation die schwächste. In unserem Alltag dagegen spielt die Schwerkraft eine beherrschende Rolle. Dennoch ist die Gravitation dem Experiment in macher Hinsicht viel schwerer zugänglich als der Elektromagnetismus. Dort wurde schon früh vermutet, daß sich Licht, von dem wir heute wissen, daß es eine elektromagnetische Welle ist, nur mit einer endlichen Geschwindigkeit ausbreitet. Die ersten zunächst allerdings noch vergeblichen Versuche zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit gab es zur Zeit der Renaissance. Aber auch über die Schnelligkeit, mit der sich Änderungen des Schwerefeldes über große Entfernungen ausbreiten, wurde schon spekuliert, lange bevor Einstein unser heutiges Verständnis der Gravitation begründete. So kommt Gruithuisen im Jahr 1838 zu dem Schluß: „Die Anregung der Fernwirkung der Schwerkraft kann daher nicht in endlicher Zeit mit unendlicher Geschwindigkeit geschehen“ (1). Aber erst Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie machte konkrete Vorhersagen über die Geschwindigkeit und Natur der Gravitationswellen (2).

Das besondere an der Schwerkraft ist, daß sie alle Körper gleich stark beschleunigt. Diese Proportionalität zwischen der Trägheit eines Körpers und der auf ihn wirkenden Schwerkraft unterscheidet die Gravitation von allen anderen Wechselwirkungen. Sie ist der Grund dafür, daß Einstein die Gravitation als eine Veränderung der Geometrie des Raums beschreiben konnte. Da die Gravitations-Wechselwirkung die Geometrie der zugrundeliegenden Raum-Zeit, in der sie beschrieben wird, ändert, sind die von Einstein zu ihrer Beschreibung aufgestellten Gleichungen nicht linear. Im Bereich starker Gravitationsfelder, wie sie bei Neutronensternen oder schwarzen Löchern auftreten, sind die Lösungen der Einsteinschen Gleichungen entsprechenden komplex und schwierig. Im Bereich schwacher Gravitation, wie sie in unserem Sonnensystem allemal vorherrscht, kann die lineare Näherung der Einsteinschen Gleichungen herangezogen werden. Wenn diese lineare Näherung gilt, dann kommt man mit der Analogie zum Elektromagnetismus zumindest qualitativ recht weit. Das normale statische Gravitationsfeld entspricht dabei dem elektrischen Feld und bewegte Massen führen zu einem „gravitomagnetischen“ Feld. Die Wirkung solcher Massenbewegungen pflanzt sich im Raum in Form von Wellen als periodische Verzerrungen des Raums fort. Da es nur eine Sorte von Massen gibt, kann es zu keiner Dipolstrahlung kommen, und die von einer Gravitationswellen verursachten Dehnungen und Stauchungen des Raums haben quadrupolförmigen Charakter.

Wenn wir versuchen, auf der Erde ein Gerät zum Nachweis von Gravitationswellen zu bauen, dann glauben wir, daß wir die Wirkung der Gravitationswelle auf die Nachweisapparatur verstehen, denn der Nachweis findet im Bereich schwacher Gravitation statt. Das eigentliche Interesse am Nachweis von Gravitationswellen kommt daher, daß wir hoffen, etwas über die Quellen dieser Strahlung zu erfahren. Bislang ist der direkte Nachweis noch nicht gelungen, es gibt lediglich einen indirekten Hinweis durch die Beobachtung der Verlangsamung der Umlaufperiode eines Pulsars in einem kompakten Doppelsternsystem (3). Gravitationswellen, die stark genug sind, daß man sie auf der Erde direkt nachweisen kann, werden von kosmischen Katastrophen wie Supernova oder kollabierenden Doppelsternsystemen dann erwartet, wenn Neutronensterne oder schwarze Löcher beteiligt sind oder entstehen. Im Bereich dieser enorm hohen Massenkonzentrationen ist die Gravitation die alles beherrschende Kraft, zu deren Beschreibung man die vollen Einsteinschen Gleichungen verwenden muß. Sollte es also gelingen, Gravitationswellen von solchen Quellen zu beobachten, dann ergäbe sich die Möglichkeit, die Theorie der Gravitation im Bereich extrem hoher Felder zu überprüfen. Vielleicht läßt sich dadurch auch unser Verständnis von den Anfängen des Urknalls weiter verbessern.

Über vierzig Jahre dauerte es nach der Vorhersage der Existenz von Gravitationswellen durch Einstein, bis sich gegen Ende der Fünfziger Jahre der wagemutige Physiker Joseph Weber an den Versuch machte, einen Detektor für Gravitationswellen zu bauen. Für diese lange Zeitspanne gab es einen Grund, denn erste theoretische Abschätzungen hatten ergeben, daß die von der stärksten zu erwartenden Gravitationswelle verursachte Raumdehnung immer noch extrem klein ist. Durch die Entwicklung der Hochleistungs-Computer wird es mittlerweile möglich, immer komplexere numerische Rechnungen durchzuführen. Dadurch und durch die Entwicklung neuer Rechenmethoden lassen sich heute zuverlässigere Vorhersagen über die zu erwartenden Raumdehnungen machen. Eine Supernova im Zentrum unserer Milchstraße sollte ein wenige Millisekunden andauerndes Signal mit ein paar Oszillationen verursachen, wobei Raumdehnungen von 10^{-19} bis 10^{-18} erwartet werden. Solch winzige Raumdehnungen kann man sich kaum noch vorstellen. Bezogen auf die Entfernungen zwischen Erde und Mond bedeutet das eine Abstandsänderung von nur einem Moleküldurchmesser! Man nimmt an, daß Supernova in unserer Milchstraße etwa ein bis zehnmal pro Jahrhundert auftreten. In den letzten tausend Jahren berichteten die Astronomen zwar nur von vier Ereignissen, aber einige von ihnen werden durch andere Sternmaterie verdeckt. Der Nachteil der Gravitationswellen, daß sie in den Detektoren auf der Erde so geringe Spuren hinterlassen wird hier zum Vorteil: Sie dringen nahezu ungehindert auch durch die unsere Sicht versperrenden Sternmassen hindurch. Höhere Signalaraten wären mit noch empfindlicheren Detektoren zu erwarten, da dann auch die „Raumdehnungswellen“ von ähnlichen Ereignissen in anderen Galaxien beobachtet werden könnten. Hierbei hilft, daß die Raumdehnung, die gemessen werden muß, proportional zur Amplitude der Gravitationswelle und nicht zu der von ihr transportierten Energie ist. Daher kann man mit einem tausendmal empfindlicheren Detektor auch tausendmal weiter in den Raum schauen.

Wie sehen nun die Detektoren für Gravitationswellen aus, an denen zur Zeit an vielen Stellen gearbeitet wird? Es gibt zwei unterschiedliche Messmethoden, die experimentell verfolgt werden. Die erste seit Ende der Fünfziger Jahre zunächst von Joseph Weber entwickelte Methode arbeitet nach dem Stimmgabelprinzip. Es handelt sich um tonnenschwere in einem Vakuumtank aufgehängte Metallzylinder, die in der heute üblichen Version auf die Temperatur des flüssigen Heliums abgekühlt werden. Ein kurzer Gravitationswellenpuls regt den Zylinder zu Schwingungen bei seiner Resonanzfrequenz an. Diese Auslenkungen werden meist durch kapazitive Ankopplung an eine Stirnfläche ausgelesen. Die Empfindlichkeit der von dieser Art existierenden Detektoren liegt gerade bei 10^{-18} . Die Nachteile dieser Detektoren sind zum einen, daß sie von ihrer Natur her Resonanzantennen sind, sie sich also nicht gut zur Bestimmung der Signalform eignen und zum anderen, daß sie auch bei weiterer Abkühlung zwischen 10^{-20} und 10^{-21} an eine fundamentale quantenmechanische Grenze stoßen.

Auf lange Sicht vielversprechender sind große Michelson-Interferometer, bei denen die Dehnung des Raums mit Laserlicht vermessen wird. Ähnlich wie bei Dipolantennen für elektromagnetische Strahlung gibt es auch für die Länge der Interferometerarme einen optimalen, an die Frequenz der Gravitationswelle angepaßten Wert, der erreicht wird, wenn die Laufzeit des Lichts in jedem Interferometerarm gleich der halben Periode der Gravitationswelle ist. Bei einer Frequenz von einem Kilohertz entspricht das einer Lichtlaufstrecke von 150 Kilometern. Solch lange Laufstrecken können in der Praxis durch eine Faltung des Strahlengangs in jedem Interferometerarm erreicht werden. Der mit einem Interferometer leicht zu beobachtende Effekt ist der Übergang von konstruktiver zu destruktiver Interferenz, von Helligkeit zu Dunkelheit, der auftritt, wenn sich die Differenz der Lichtwege in den beiden Interferometerarmen um eine halbe Laserwellenlänge ändert. Damit läßt sich aber selbst bei den hier diskutierten großen Armlängen „nur“ eine Raumdehnung von 3 mal 10^{-12} messen. Um aber in den Bereich unter 10^{-21} vorzustoßen, muß die Lage des Interferenzsignals auf den 10^{-10} -ten Teil des Abstands zwischen hellen und dunklen Streifen ausgewertet werden können (4). Das macht es erforderlich, alle Störungen wie seismisches Wackeln und thermische Schwingungen der Spiegel, Streulicht und Schwankungen der Laserfrequenz zu unterdrücken bzw. zu kontrollieren. Schließlich bleibt die „Körnigkeit“ des Lichts, das Photonenrauschen, das durch Erhöhung der Laserleistung im Interferometer verringert werden kann. Ein effizienter Weg, die Laserleistung zu erhöhen, besteht in der Rückkopplung des aus dem Interferometer austretenden Lichts, so daß sich die Lichtleistung im Interferometer wie in einem optischen Resonator aufschaukelt. Eine weitere Empfindlichkeitssteigerung läßt sich dadurch erreichen, daß zusätzlich zu dem Hauptlaser auch noch nichtklassisches Licht verwendet wird (5). Es handelt sich dabei um eine neue Messtechnik der Quantenoptik, die vor kurzem experimentell demonstriert wurde.

Die empfindlichsten Prototyp-Detektoren, die nach dem Laserinterferometrischen Prinzip arbeiten, stehen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, an der Universität Glasgow und am California Institute of Technology. Das Interferometer in Garching hat 30 Meter lange Arme und der Lichtstrahl läuft bis zu fünfzigmal hin und

her. Mit diesem Prototyp wurde eine Dehnungsempfindlichkeit demonstriert, die bei breitbandigem Nachweis im Kilohertzbereich bei 10^{-18} liegt. Durch die Potenz-Schreibweise übersieht man leicht, was die Zahl tatsächlich bedeutet. Sie ist so winzig, daß die Messapparatur schon anspricht, wenn einer der Spiegel des Interferometers innerhalb einer Millisekunde nur um 3% des Durchmessers eines Protons ausgelenkt wird! Dabei ist dieser Kernbaustein selber schon sehr klein. Die Laserinterferometer haben damit die Zylinderantennen praktisch eingeholt, aber die Grenze der Dehnungsempfindlichkeit, an die die Zylinderantennen bei 10^{-20} bis 10^{-21} stoßen, erreichen die Laserinterferometer erst bei etwa 10^{-24} . Dieser Vorteil ergibt sich hauptsächlich daraus, daß die Raumdehnung mit Lichtgeschwindigkeit statt mit Schallgeschwindigkeit ausgelesen wird.

Nun sollen mehrere Kilometer große Laserinterferometer gebaut werden, die in den Empfindlichkeitsbereich unterhalb von 10^{-21} vorstoßen. Dabei kommt man in verschiedenen Bereichen an die Grenze des heute technologisch machbaren. Um die anfallenden Probleme besser lösen zu können, haben sich in letzter Zeit verschiedene Forscherteams auf internationaler Ebene zusammengeschlossen. So gibt es seit 1989 eine enge Zusammenarbeit zwischen der Universität Glasgow und der Max-Planck-Gesellschaft (6). Beide Länder wollen gemeinsam einen Detektor bauen. Eine ähnliche Antenne wird von den französischen und italienischen Teams in Orsay und Pisa geplant. In den USA haben sich Caltech und MIT zusammengetan. Auch in den Ländern Japan und Australien ist das Interesse an dem Bau von Gravitationswellendetektoren groß. Es ist wichtig, daß weitere Detektoren dieser Art gebaut werden, denn nur über Koinzidenzmessungen werden sich Gravitationswellensignale zuverlässig identifizieren lassen. Auch die Position der Quelle am Himmel kann dann durch Zusammenschalten verschiedener Gravitationswellenantennen bestimmt werden. Die Daten werden dann ganz ähnlich wie bei der Radiowelleninterferometrie mit großen Basislängen ausgewertet.

Literatur

- [1] Fr.v.P. Gruithuisen, „Was ist geschwinder als Licht?“, in *Astronomisches Jahrbuch für physische und naturhistorische Himmelforscher*, Hrsg. Fr.v.P. Gruithuisen, München 1838.
- [2] A. Einstein, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 154 (1918).
- [3] J.H. Taylor, J.M. Weisberg, *Astrophys. J.* **253**, 908 (1982).
- [4] K. Maischberger, A. Rüdiger, R. Schilling, L. Schnupp, D. Shoemaker, W. Winkler, „Vorschlag zum Bau eines großen Laser-Interferometers zur Messung von Gravitationswellen“, *MPQ Report* **96** (1985), s.a. „Erweiterte Fassung“, *MPQ Report* **129** (1987).
- [5] G. Leuchs, *Contemp. Phys.* **29**, 299 (1988).
- [6] E. Dreisigacker, *Phys. Bl.* **46**, 64 (1990).