

## Breitet sich die Gravitation mit Lichtgeschwindigkeit aus?

Eine der ersten Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie war die Existenz von Gravitationswellen. Schon Einstein konnte 1916 zeigen, dass die linearisierte Theorie Lösungen in Form von Wellen besitzt, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Mit seiner Quadrupolformel gab er 1918 einen Ausdruck für die Leistung an, die eine langsam bewegte Quelle in Form von Gravitationswellen abstrahlt. Beim Doppelpulsar 1913+16 führt diese Strahlungsdämpfung zu einer Abnahme der Bahnperiode, die exzellent mit den Beobachtungen übereinstimmt und somit einen indirekten Nachweis für Gravitationswellen liefert [1]. Insofern wurde auch die Ausbreitung der Gravitation mit Lichtgeschwindigkeit indirekt bestätigt. Eine Abweichung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gravitation von der Lichtgeschwindigkeit würde ein ausgezeichnetes Bezugssystem festlegen und wäre somit in Widerspruch zur Relativitätstheorie, mit unabsehbaren Konsequenzen für die gesamte Physik.

Die Gleichheit der Geschwindigkeiten direkt zu bestätigen schien bisher nur möglich durch die direkte Beobachtung von Gravitationswellen oder der Ausbreitung des zeitabhängigen Gravitationsfeldes von beschleunigten Massen (analog der Situation beschleunigter Ladungen und der von ihnen erzeugten elektrischen Felder). Erste Ergebnisse von Gravitationswellendetektoren (darunter GEO 600 bei Hannover) werden in den nächsten Jahren erwartet. Beschleunigungen von ausreichend großen Massen waren für einen Nachweis bisher viel zu klein.

Gibt es alternative Methoden, um die Ausbreitung der gravitativen Wechselwirkung zu messen? Ein umstrittener Vorschlag, der kürzlich einiges Aufsehen erregt hat und durch die Tagespresse ging, nutzt die relativistische Laufzeitverzögerung aus, die Irwin Shapiro 1964 berechnet hat (siehe z.B. [2]). Dieser Shapiro-Effekt tritt zusammen mit der Lichtablenkung am Sonnenrand auf, deren Nachweis 1919 Einstein mit einem Schlag berühmt gemacht hat. Ein Lichtstrahl, der in der Nähe einer Masse läuft, braucht im Vergleich zur Abwesenheit der

Masse länger. Um diese Laufzeitverzögerung zu beobachten, schickt man beispielsweise ein Radarsignal zur Venus, das von dort reflektiert wird und wieder zur Erde gelangt. Verläuft dieses Signal in Sonnennähe, so kommt es zu der erwähnten Laufzeitverzögerung. Für ein Signal, das von einer weit entfernten Quelle (z. B. einem Quasar) kommend im Abstand  $d$  eine Masse der Größe  $M$  (z. B. Jupiter) passiert und zur Erde gelangt, beträgt die Laufzeitverzögerung

$$\Delta t = \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{|\mathbf{x}| - \mathbf{x} \cdot \mathbf{n}}{d} \right). \quad (1)$$

Hier bedeutet  $\mathbf{x}$  den Abstandsvektor Erde-Masse, und  $\mathbf{n}$  ist ein Einheitsvektor in Richtung des einfallenden Signals (Abb.).

Die Berechnung von Shapiro setzt einen statischen Körper voraus. Berücksichtigt man dessen Bewegung, so ergeben sich in (1) kleine Korrekturen von der Größenordnung  $v/c$ , wobei  $v = |\mathbf{v}|$  die Geschwindigkeit des Körpers ist [4]. Sie lauten

$$\frac{GM}{c^3} \rightarrow \frac{GM}{c^3} \left( 1 - \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \right),$$

$$\mathbf{n} \rightarrow \mathbf{n} - \frac{1}{c} \mathbf{n} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{n}). \quad (2)$$

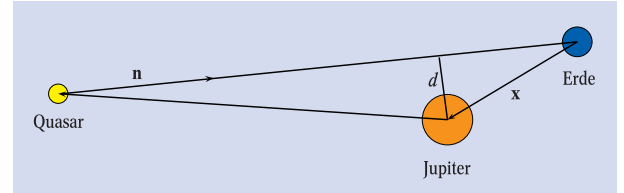
Mit diesem Resultat stimmen alle Experten überein. Um die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gravitation zu testen, hat Sergei Kopeikin von der University of Missouri-Columbia (USA) die in (2) erscheinende Lichtgeschwindigkeit  $c$  durch eine modifizierte Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_g$  ersetzt [5]. Gemeinsam mit Ed Fomalont vom National Radio Astronomical Observatory (USA) schlug er vor, die Terme in (2) bei einem seltenen Ereignis direkt zu messen [7]. Am 8. September 2002 nämlich zog der Riesenplanet Jupiter in einem Winkelabstand von weniger als vier Bogenminuten an einem weit entfernten Quasar vorbei. Die von dem Quasar ausgesandte und vom Gravitationsfeld des Jupiter beeinflusste Radiostrahlung wurde an diesem Tag von Radioteleskopen in den USA und Deutschland (Effelsberg) beobachtet. Da für den Jupiter  $v/c \approx 4,5 \times 10^{-5}$  gilt, ist die Shapirosche Laufzeitverzögerung (1) von der Größenordnung 100 ps, die Korrekturen in (2) liefern etwa 6 ps. Dazu war es notwendig, mit *Very-Long Baseline Interferometry* (VLBI) die Quasarkoordinaten mit einer Genauigkeit von einigen Mikrobogen-

sekunden zu verfolgen. Da man die Laufzeitverzögerung natürlich nicht mit einem „Newtonschen“ Signal vergleichen kann, wird die Änderung der Lichtlaufzeit gemessen, während Jupiter den Quasar passiert (differentielle Messung).

Auf der Jahrestagung der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft Anfang Januar 2003 haben Kopeikin und Fomalont ihre Ergebnisse vorgestellt. Danach haben sie die Korrekturterme (2) mit einer

Formalismus ist und deshalb ad hoc geschieht. Bei ihm erscheint  $c_g$  erst in der *nächsten* Ordnung, die um einen Faktor  $v/c$  kleiner ist und mit dem derzeitigen Stand der Technologie nicht beobachtet werden kann. Das Experiment vom 8. September könnte also nur dazu dienen, die Parameter  $\gamma$  und  $\zeta$  zu messen. Allerdings, so Will, ergeben sich hierfür weitaus größere Fehler als mit bereits durchgeführten Beobachtungen.

**Das Radiosignal eines Quasars, das nah am Jupiter vorbeiläuft, erfährt eine Laufzeitverzögerung von rund 100 ps.**



Genauigkeit von etwa 20 % gemessen, wonach sich für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gravitation der Wert  $c_g/c = 1,06 \pm 0,21$  ergibt – in Übereinstimmung mit der Einsteinschen Theorie [6].

Ist dies die Bestätigung dafür, dass sich auch die Gravitation mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet? Theorien, die  $c_g \neq c$  voraussagen, sollten sich auch in weiteren Eigenschaften von der Allgemeinen Relativitätstheorie unterscheiden. Insbesondere wird durch die Existenz *zweier* charakteristischer Geschwindigkeiten ein Bezugssystem ausgezeichnet – das Bezugssystem, in dem beide Ausbreitungsphänomene isotrop sind (*preferred frame*). Das hat Clifford Will von der Washington University (USA) zum Anlass genommen, die Ableitung der Korrekturterme in einem allgemeinen Rahmen zu untersuchen, in dem man mögliche Abweichungen von der Relativitätstheorie durch sogenannte „post-Newtonsche Parameter“ beschreibt [8]. Er findet, dass anstatt (2) die einzige Ersetzung durch

$$\frac{GM}{c^3} \rightarrow \frac{1+\gamma}{2} \frac{GM}{c^3} \left( 1 - (1+\zeta) \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \right) \quad (3)$$

gegeben ist. Die post-Newtonschen Parameter  $\gamma$  und  $\zeta$  beschreiben eventuelle Abweichungen von der Allgemeinen Relativitätstheorie (für die  $\gamma = 1$  und  $\zeta = 0$  gilt):  $\gamma$  beschreibt die „Stärke“ des von einer Einheitsmasse erzeugten Gravitationsfeldes;  $\zeta$  enthält die Größe  $\gamma$  und ist zudem proportional zu einem *preferred frame*-Parameter. Auch Will führt eine geänderte Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_g$  ein, was freilich gegen den Geist des post-Newtonschen

Neben der detaillierten Rechnung präsentiert Will auch ein allgemeines Argument, warum die Retardierung der Gravitation in der gemessenen Ordnung nicht beitragen sollte. Entwickelt man nämlich das retardierte Potential in der Nahzone, so ergibt sich zunächst ein Beitrag in der erwünschten Ordnung von  $v/c_g$ , der aber wegen der Massenerhaltung nicht beiträgt. Der erste genuine Effekt der Retardierung erscheint in der um den Faktor  $v/c_g$  kleineren Ordnung. Dies ist auch mit der Intuition in Einklang, dass eine reine Geschwindigkeitstransformation (für den Jupiter) keinen Effekt geben sollte. Für einen eindeutigen Test sollte man wohl doch den Nachweis von Gravitationswellen abwarten.

CLAUS KIEFER,  
CLAUS LÄMMERZAHL

- [1] J. H. Taylor, Rev. Mod. Phys. **66**, 711 (1994)
- [2] I. Ciufolini und J. A. Wheeler, Gravitation and Inertia, Princeton University Press, Princeton (1995)
- [3] C. M. Will, Living Reviews in Relativity (2001-4), siehe www.livingreviews.org
- [4] S. M. Kopeikin und G. Schäfer, Phys. Rev. **D 60**, 124002 (1999)
- [5] S. M. Kopeikin, Astrophys. J. **556**, L1 (2001)
- [6] S. M. Kopeikin, gr-qc/0212121 (v2)
- [7] S. M. Kopeikin und E. Fomalont, gr-qc/020602
- [8] C. M. Will, astro-ph/0301145

Prof. Dr. Claus Kiefer, Institut für Theoretische Physik, Universität zu Köln, Zùlpicher Strasse 77, 50937 Köln

Priv.-Doz. Dr. Claus Lämmerzahl, Institut für Experimentalphysik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Universitätsstr. 1, 40225 Düsseldorf