

QUANTENPHYSIK UND GRAVITATION

Äquivalenzprinzip gilt auch für Quantenobjekte

Gravitationstheorie und die Quantentheorie zu einer gemeinsamen Theorie vereinheitlichen, das ist eines der ungelösten Probleme der modernen Physik. Garching und Tübinger Wissenschaftler haben nun das Äquivalenzprinzip, einen Eckstein der Gravitationstheorie, mit der Methode der Atominterferometrie, die sich der quantenmechanischen Natur von Atomen bedient, überprüft. [1]

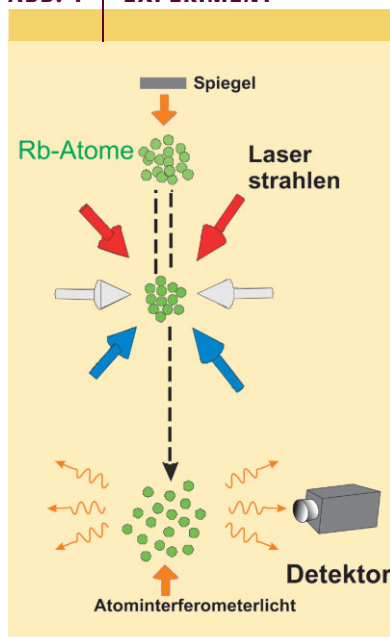
Nach dem Äquivalenzprinzip erfahren unter dem Einfluss der Schwerkraft alle Gegenstände unabhängig von ihrer Masse oder Zusammensetzung die gleiche Beschleunigung. Makroskopisch ist dies vielfach und sehr genau überprüft worden. Theoretiker haben Tests des Äquivalenzprinzips für isolierte, freie Atome vorgeschlagen [2]. Die Motivation hierfür ist die Perspektive, neue Möglichkeiten für die Überprüfung von Theorien zu schaffen, welche Quantenmechanik und Gravitation in einer einheitlichen Beschreibung darstellen.

In unserem Experiment haben wir den freien Fall von zwei unterschiedlich schweren Rubidiumisotopen (^{85}Rb und ^{87}Rb) mit der Methode der Atominterferometrie verglichen. Dafür wurden zunächst in einer Vakuumkammer etwa eine Milliarde Rubidiumatome mittels Laserlicht und magnetischen Feldern in einer magneto-optischen Falle gefangen und mit Lichtkräften gegen die Erdanziehung nach oben beschleunigt. Die Atome folgen dann einer freien ballistischen Flugbahn, ähnlich wie Wassertropfen eines Springbrunnens. In dieser Analogie wird ein solcher experimenteller Aufbau auch als „atomarer Springbrunnen“ bezeichnet.

Auf ihrem Flug erreichen die Isotope den Höhepunkt der Trajektorie und fallen anschließend unter dem Einfluss der Gravitation wieder nach unten. Für die Bestimmung der während des Fluges zurückgelegten Strecke wird die Wellennatur der Atome ausgenutzt. Diese erlaubt es,

Rubidiumatome werden mit Lichtkräften gefangen, gekühlt und dann auf eine nach oben gerichtete Bahn beschleunigt. Während des folgenden freien Falls wird die zurückgelegte Strecke mit einem Atominterferometer vermessen.

ABB. 1 EXPERIMENT



die Bewegung der Atome mit einem Atominterferometer genau zu vermessen.

In einem konventionellen Interferometer wird ein Laserstrahl zum Beispiel an einem halbdurchlässigen Spiegel aufgespalten, mit Spiegeln umgelenkt und schließlich auf einem Photodetektor zur Interferenz gebracht. Haben die ankommenden Lichtwellen eine entgegengesetzte Amplitude, so heben sich die Wellenzüge gegenseitig auf, und der Detektor misst keine Lichtintensität. Überlagern sich die Wellenzüge mit gleicher Amplitude, so summieren sich diese und der Detektor registriert ein Eintreffen des wieder zusammengeführten Lichtstrahls.

Den Gesetzen der Quantenmechanik zu Folge besitzen Atome

ebenfalls Welleneigenschaften, umgekehrt kann Licht eine mechanische Wirkung ausüben und beispielsweise Atome auf ihrer Bahn umlenken.

In unserem Atominterferometer werden diese Eigenschaften dazu verwendet, mit Licht Materiewellen aufzuspalten und sie dann mit sich selbst interferieren zu lassen, so dass damit Licht und Materie im Vergleich zum konventionellen Interferometer ihre Rollen vertauschen. Die interferierenden Atome werden mit einem Laser zum Leuchten gebracht und auf diese Weise nachgewiesen. Abhängig davon, ob sich eine Verstärkung oder eine Auslöschung der Wellenamplituden ergibt, leuchten die Atome, oder sie bleiben dunkel.

Aufgrund der Beschleunigung im Schwerfeld der Erde kann man nun einen Wechsel zwischen hellen und dunklen Perioden beobachten und als Interferenzmuster aufzeichnen. Dabei entspricht der Abstand zwischen einem hellen und einem dunklen Bereich einer während des Fluges zurückgelegten Entfernung von etwa $0,5 \mu\text{m}$. Damit steht ein sehr genaues „Lineal“ zur Vermessung der atomaren Bewegung zur Verfügung.

Mit diesem Präzisionsmessgerät haben wir die Flugbahn der beiden Isotope ^{85}Rb und ^{87}Rb vermessen und dabei festgestellt, dass deren Fallbeschleunigung bis auf eine Genauigkeit von $1,7 \cdot 10^{-7}$ übereinstimmt. Zumindest bis auf diese Genauigkeit ist also das Äquivalenzprinzip auch für Quantenobjekte gültig. In Zukunft kann erwartet werden, dass durch weitere technische Verbesserungen extrem genaue Überprüfungen des Äquivalenzprinzips für quantenmechanische Probeteilchen möglich werden.

[1] S. Fray et al., Phys. Rev. Lett., **2004**, 93, 240404.

[2] J. Audretsch et al, Phys. Rev. A **1993**, 47, 4632; L. Viola, R. Onofrio, Phys. Rev. D **1997**, 55, 455.

Sebastian Fray, Theodor W. Hänsch,
MPI für Quantenoptik, Garching,
Martin Weitz, Uni Tübingen.