

Gezeitenkräfte im Quantenmaßstab

Erstmals gelang es, die Effekte einer gekrümmten Raumzeit entlang der Ausdehnung einer quantenmechanischen Wellenfunktion zu beobachten.

In jedem homogenen Gravitationsfeld existieren frei fallende Bezugssysteme, in denen sich die Dynamik von Körpern so beschreiben lässt, als wäre keine Gravitation vorhanden. Dieser Zusammenhang folgt aus der Gleichheit der trägen und der schweren Masse in der Newtonschen Mechanik und war die entscheidende Motivation für das Einsteinsche Äquivalenzprinzip. In einem inhomogenen Gravitationsfeld ist es hingegen nicht mehr möglich, die Gravitation durch einen Wechsel des Bezugssystems vollständig zu eliminieren, weil die Fallbeschleunigungen sich lokal unterscheiden. Daher treten nun „Gezeitenkräfte“ auf, die umso stärker sind, je weiter ein Körper vom Zentrum des frei fallenden Bezugssystems entfernt ist. Diese Kräfte hängen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie direkt mit der Raumzeitkrümmung zusammen. Ihr Name leitet sich von ihrer wohl am meisten sichtbaren Erscheinungsform im Alltag ab, den periodischen Wasserbewegungen der Ozeane, die durch das inhomogene Gravitationsfeld von Sonne und Mond entstehen.

Wissenschaftler aus der Gruppe von Mark Kasevich von der Stanford University haben nun ein Ex-

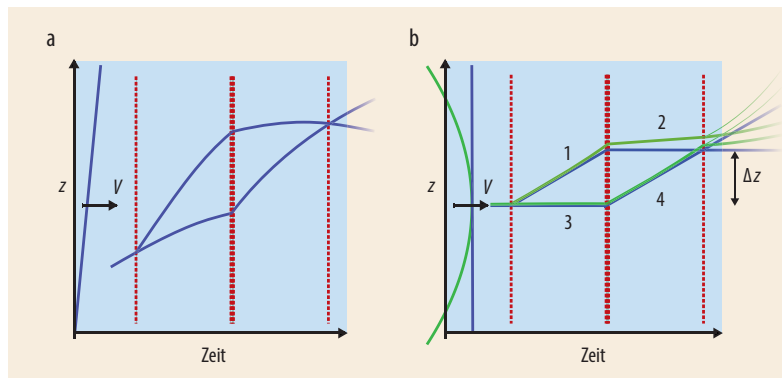


Abb. 1 Im Lichtpuls-Atominterferometer werden atomare Wellenpakete an drei aufeinanderfolgenden Lichtpulsen (rot) gestreut. a) zeigt die Sicht eines ruhenden Labor-Bezugssystems für ein homogenes Gravitationsfeld, b) die Sicht eines

frei fallenden Bezugssystems für ein homogenes (blau) sowie ein inhomogenes Gravitationsfeld (grün). Die ortsabhängigen Gravitationspotentiale V unterscheiden sich je nach Bezugssystem.

periment durchgeführt, mit dem sie den Einfluss der Gezeitenkräfte auf eine quantenmechanische Superposition von zwei räumlich getrennten Wellenpaketen beobachten konnten [1]. Der Effekt skaliert quadratisch mit der räumlichen Trennung der Wellenpakete und wächst über die Zeit an. Daher war es nötig, kohärente Superpositionen von Wellenpaketen, die sich während des Experiments viele Zentimeter voneinander trennen ließen, rund eine Sekunde lang aufrecht zu erhalten. Die Wissenschaftler verwendeten dazu ultrakalte Rubidiumatome und wiesen den verhältnismäßig

kleinen Effekt der Gezeitenkräfte mit Hilfe der Atominterferometrie [2] nach.

Das eingesetzte Lichtpuls-Atominterferometer beruht auf dem Wellencharakter von Teilchen und nutzt Laserstrahlen, um die Materiewellen zu streuen (Abb. 1). Ein erster Lichtpuls (Strahlteiler) spaltet das ursprüngliche Wellenpaket in eine kohärente Überlagerung von zwei Wellenpaketen mit unterschiedlichen Impulsen auf, ein zweiter Lichtpuls (Spiegel) invertiert die Impulsverschiebung und ein dritter Lichtpuls (Strahlteiler) führt die beiden Wellenpakete wieder zusammen. Dadurch zeigt sich an beiden Ausgängen die Interferenz zweier Wellenpakete, die unterschiedliche Pfade im Interferometer zurückgelegt haben. Neutrale Atome, die in magnetisch unempfindlichen Zuständen präpariert wurden, bilden in einem Atominterferometer einen fast optimalen Referenzpunkt für ein Inertialsystem. Denn abgesehen von Gravitations- und Trägheitskräften bewegen sie sich beinahe ungestört zwischen den Lichtpulsen. Solche Konfigurationen erlauben es daher, extrem genaue Trägheitssensoren für Beschleunigungen und Rotationen zu konstruieren [3].

Der Einfluss der Gezeitenkräfte in einem Atominterferometer zeigt

KURZGEFASST

Unerwartete Oszillationen

In einer eindimensionalen stark wechselwirkenden Bose-Flüssigkeit oszillieren Fremdatome anstatt sich durch diese hindurch zu bewegen. Innsbrucker Experimentalphysiker entdeckten dieses unerwartete dynamische Verhalten, als sie einzelnen Cs-Atomen der Bose-Flüssigkeit durch ein hochfrequentes Signal einen neuen Spinzustand aufprägten. Die Oszillation lässt sich mittels Quanteninterferenz erklären: Die Fremdatome verhalten sich wie Wellen, die an der Bose-Flüssigkeit streuen und reflektieren. Die Entdeckung könnte unter anderem helfen, Transportprozesse in komplexen biologischen Systemen besser zu verstehen. *F. Meinert et al., Science 356, 945 (2017)*

Faszinierende Gravitationswellen

Im Januar 2017 konnte die LIGO-Virgo-Kollaboration zum dritten Mal eine Gravitationswelle nachweisen, die aus dem Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher resultiert. Das Signal GW170104 entstand in einer Entfernung von drei Milliarden Lichtjahren durch zwei Schwarze Löcher mit Massen von 31 und 19 Sonnenmassen. Erstmals gelang es bei der Datenanalyse, Hinweise auf die Spins der Schwarzen Löcher zu extrahieren: Während sich die Objekte umkreisen und einander nähern, drehen sie sich auch um die eigene Achse. Mindestens eines hat entgegengesetzt zum gesamten System rotiert. *B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. 118, 221101 (2017)*

sich recht einfach, wenn man ein geeignetes, frei fallendes Bezugssystem wählt, in dem das atomare Wellenpaket sich anfangs in Ruhe befindet und in Ruhe bleibt, solange es nicht mit den Lichtpulsen wechselwirkt. Liegt ein homogenes Gravitationsfeld vor, entsprechen die Raum-Zeit-Trajektorien der Wellenpakete in einem solchen Bezugssystem geraden Linien (Abb. 1b). In einem inhomogenen Gravitationsfeld treten hingegen Abweichungen auf. Ein Gravitationsgradient entlang der z-Achse lässt sich durch ein umgekehrtes harmonisches Potential

$$V(z) = -\frac{1}{2} m \Gamma z^2$$

mit der Atommasse m und einer Konstanten Γ charakterisieren und führt zu den oben beschriebenen Gezeitenkräften. Diese Kräfte krümmen die Trajektorien und bewirken eine leichte Asymmetrie in der Propagation der Wellenpakete entlang der beiden Wege 2 und 3, wohingegen die Trajektorien entlang der Wege 1 und 4 symmetrisch verlaufen. Da die beiden Wellenpakete (nahezu) in Ruhe sind, wenn sie entlang der Wege 2 und 3 propagieren, ist die akkumulierte Phase pro Zeiteinheit in beiden Fällen proportional zum Potential an der Stelle des jeweiligen Wellenpakets. Während das Potential für den Weg 3 verschwindet, entspricht es für den Weg 2 dem Wert

$$V(z) = -\frac{1}{2} m \Gamma \Delta z^2$$

wobei Δz den Abstand der beiden Interferometerarme bezeichnet. Dies führt zu einer messbaren Phasenverschiebung.

Durchgeführt wurde das Experiment in einer zehn Meter hohen Vakuumröhre (Abb. 2). In dieser lassen sich Atome wie in einer Fontäne senkrecht nach oben schießen. Abschließend beschreiben sie für etwa 2,6 Sekunden eine ungestörte Flugbahn, bevor sie wieder auf dem Boden auftreffen [4]. In der Röhre wurden zwei Interferometer in einem vertikalen Abstand von bis zu 32 cm gleichzeitig durch denselben Laser betrieben. Da-

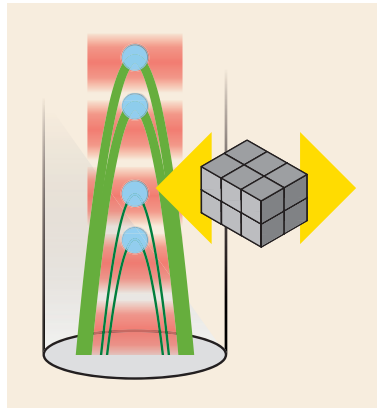


Abb. 2 Zwei vertikal verschobene Atominterferometer (grün mit hellblauen Atomwolken) werden in der Vakuumröhre durch denselben Laser (rot) simultan betrieben. Die Platzierung von Bleiblocken (grau) erlaubt es, das Gravitationsfeld lokal zu verändern. Dies führt zu unterschiedlichen Gezeitenkräften in den beiden Interferometern.

durch war es möglich, die Differenz der Phasenverschiebungen zu betrachten. Dabei heben sich alle unerwünschten Effekte auf, die beide Interferometer gleichermaßen betreffen, z. B. Fluktuationen der Laserphase. Damit dies nicht auch auf die Effekte der Gezeitenkräfte zutrifft, veränderten die Wissenschaftler den Gravitationsgradienten eines Interferometers lokal, indem sie mehrere Bleiblocke mit einer Gesamtmasse von 84 kg an einer geeigneten Stelle platzierten. Die gemessene Differenz der Phasenverschiebungen hing quadratisch vom Abstand der Interferometerarme ab und belegte damit eindeutig den Einfluss von Gezeitenkräften.

Die Präzision dieser Messungen ist beeindruckend. So ließ sich die Beschleunigungsdifferenz der beiden Interferometer auf 1 nm/s^2 messen. Damit lässt sich zum Beispiel die Genauigkeit von Tests des Äquivalenzprinzips um mehrere Größenordnungen verbessern. In solchen Tests geht es darum, die gravitative Beschleunigung von zwei unterschiedlichen Atomsorten zu vergleichen [5]. Dabei stellen Gravitationsgradienten eine große Herausforderung dar, da bereits ein minimaler Unterschied im Anfangsort oder der Anfangsgeschwindigkeit der Wellenpakete der beiden Atomsorten eine Ver-



Stanford University

letzung des Äquivalenzprinzips vortäuschen kann. Eine kürzlich vorgeschlagene Methode erlaubt es jedoch, Effekte von Gravitationsgradienten durch eine geeignete Frequenzänderung der Lichtpulse zu kompensieren [6].

Für die Genauigkeit derartiger Tests ist die Flugdauer der Atome im Interferometer entscheidend. Diese ließe sich dadurch verlängern, dass man die Versuchsanordnung kompakt konstruiert und auf einer frei fallenden Plattform wie im ZARM-Fallturm in Bremen montiert [7], in einer Höhenrakete, auf der ISS oder an Bord eines Satelliten. In Zukunft sollte es durch solche Ansätze möglich sein, fundamentale Aspekte wie das Äquivalenzprinzip mit einer noch höheren Genauigkeit zu überprüfen und darüber hinaus das Gravitationsfeld der Erde mit hoher Auflösung zu kartographieren.

Albert Roura und Raoul Heese

- [1] P. Asenbaum et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 183602 (2017)
- [2] A. Cronin et al., Rev. Mod. Phys. **81**, 1051 (2009)
- [3] A. Peters et al., Nature **400**, 849 (1999)
- [4] S. Dickerson et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 083001 (2013)
- [5] D. Schlippert et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 203002 (2014)
- [6] A. Roura, Phys. Rev. Lett. **118**, 160401 (2017)
- [7] H. Müntinga et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 093602 (2013)

Dr. Albert Roura und Dr. Raoul Heese, Institut für Quantenphysik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, 89081 Ulm