

## ■ Materiewellen fallen gleich schnell

Ein interferometrisches Experiment mit Rubidium- und Kalium-Atomen zeigt, dass die Äquivalenz von Gravitation und Beschleunigung auch für Quantenobjekte gilt.

Entgegen unserer Alltagserfahrung postulierte Galileo, dass sich alle Körper unter alleinigen Einfluss der Gravitation gleich bewegen. Vom Standpunkt eines frei fallenden Beobachters sollten sich all diese Objekte in unbeschleunigter Bewegung befinden – zumindest in einer kleinen Umgebung. Die Gravitation erscheint „abgestellt“. Umgekehrt lässt sich die Schwerkraft durch ein beschleunigtes Bezugssystem simulieren. Dieses „schwache Äquivalenzprinzip“ wurde inzwischen auf 13 Stellen genau verifiziert. Einstein hat darüber hinaus postuliert, dass überhaupt kein lokales Experiment zwischen Beschleunigung und Schwerkraft unterscheiden kann. Gilt dies nicht, kann die Allgemeine Relativitätstheorie nicht stimmen.

Spezifische Ansätze für eine Quantengravitation, z. B. Stringtheorie, oder allgemeine Erwartungen wie das Auftreten von Raum-Zeit-Fluktuationen führen zu kleinen Verletzungen des Äquivalenzprinzips [1]. Auch die Frage, ob Antimaterie das Äquivalenzprinzip erfüllt, ist höchst spannend. Daher sind bessere Experimente zur Schwerkraft wichtig. Bislang wenig untersucht ist auch die Frage, ob das Äquivalenzprinzip für Quantenmaterie gilt. Das ist interessant, da z. B. die Gravitationstheorie lokal, die Quantenmechanik aber intrinsisch nichtlokal ist und man außer-

dem die Frage stellen kann, wie der Spin an die Gravitation koppelt. Die Physiker um Ernst Rasel an der Universität Hannover haben nun ein Atominterferometer gebaut, mit dem sich diese Fragen untersuchen lassen [2].

In dem Experiment werden zunächst rund hundert Millionen Rubidium-87- bzw. Kalium-39-Atome in einer magneto-optischen Falle gekühlt, bis ihre thermische Geschwindigkeit nur einige cm/s beträgt. Anschließend fallen die Atome frei aus der Falle und werden nacheinander drei vertikal ausgerichteten Laserpulsen ausgesetzt, deren Wellenlänge jeweils zu einem atomaren Übergang passt (Abb. 1). Bei geeigneter Laserenergie überträgt jeder Puls mit einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit den Rückstoß zweier Photonen auf jedes Atom: Ein Photon wird absorbiert, eins stimuliert in die Gegenrichtung emittiert. Dies versetzt jedes Atom in eine Überlagerung von zwei Wellenpaketen, die sich vertikal mit der Rückstoßgeschwindigkeit von 12 mm/s (Rb) bzw. 27 mm/s (K) auseinander bewegen.

Quantenmechanisch ist jedes Atom als kohärent aufgespaltene Materiewelle zu beschreiben. Weitere Laserpulse lenken die beiden Teilwellen um und bringen sie zur Interferenz. Auf den beiden Pfaden sammeln die Wellenpakete eine Phasendifferenz  $\Delta\phi$  an, von der es abhängt, ob die Interferenz

konstruktiv ist oder nicht. Die Amplitude der kombinierten Wellenfunktion bestimmt die Wahrscheinlichkeit, das Atom zu detektieren,  $P = \cos^2(\Delta\phi/2)$ .

Die Phasendifferenz lässt sich im Rahmen der semiklassischen Lösungen der Schrödinger-Gleichung berechnen, was auf Integration der klassischen Langrange-Funktion  $L$  der Teilchen entlang der beiden Wege hinaus läuft,  $(i/\hbar)\oint L dt$ . Die Wirkung der Laserpulse addiert zusätzliche Phasen. Als messbare Phasendifferenz ergibt sich

$$\Delta\phi^{\text{At}} = \mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{g}^{\text{At}} T^2,$$

wobei  $\mathbf{k}_{\text{eff}} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$  die Differenz der Wellenvektoren ist,  $\mathbf{g}^{\text{At}}$  die Fallbeschleunigung des Atoms At und  $T$  das Pulsintervall (Abb. 1). Der Vergleich von  $\Delta\phi^{\text{At}}$  für die beiden Spezies erlaubt es also, die Fallbeschleunigungen der Atome genau zu bestimmen.

Die ersten Messungen dieser Art verwendeten Neutronen [3] und sind bis heute aktuell [4]. Experimente mit Atomen jeweils einer Spezies erzielten hohe Genauigkeiten, z. B.  $7 \cdot 10^{-9}$  mit Cäsium im Vergleich mit makroskopischen Objekten [5]. Der Vergleich von Isotopen eines Elements (Rubidium) im selben Aufbau ergab Genauigkeiten von  $10^{-7}$  [6]. Ernst Rasel und sein Team haben nun erstmalig zwei Elemente verglichen. Große Teile der Optik und Elektronik kamen für beide Atome

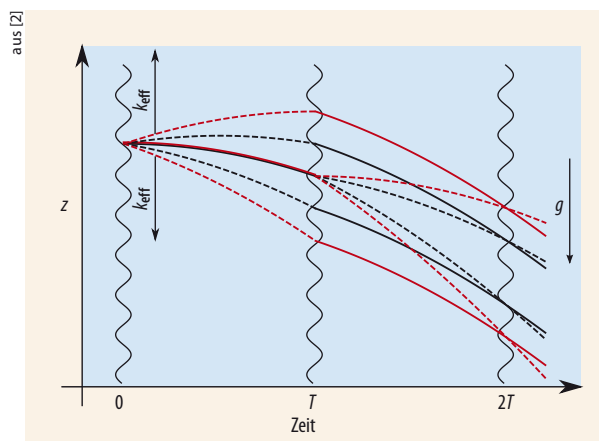
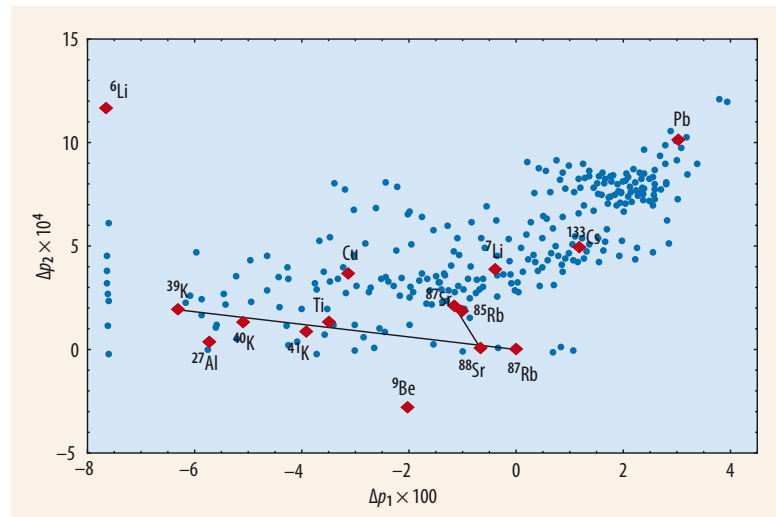


Abb. 1 Die Rb- bzw. K-Atome (schwarze bzw. rote Linien) fallen ab einem Zeitpunkt  $t < 0$  frei aus der Falle. Durch den Laserpuls (Wellenlinie) bei  $t = 0$  entsteht eine Überlagerung von zwei Wellenpaketen, die sich voneinander entfernen. Da die Relativgeschwindigkeit für K größer ist als die von Rb, überlappen die Trajektorien nicht. Für den Puls bei  $T$  ist der Impulsübertrag invertiert, sodass sich die Wellenpakete wieder aufeinander zu bewegen und sich bei  $2T$  mit Hilfe eines dritten Pulses überlagern. Da der erste Impulsübertrag sowohl nach oben als auch nach unten zeigen kann, sind zwei verschiedene Interferometer möglich. Dies unterdrückt systematische Fehler. Die Laserstrahlen ändern auch den internen Quantenzustand, angedeutet durch die durchgezogenen und gestrichelten Linien.

zum Einsatz, was systematische Fehler stark reduziert. Die Messung ergibt  $2(g^{\text{Rb}} - g^{\text{K}})/(g^{\text{Rb}} + g^{\text{K}}) = (0,3 \pm 5,4) \cdot 10^{-7}$  für die relative Abweichung der beiden Fallbeschleunigungen, den „Eötvös-Parameter“. Der Fehler ist wesentlich durch die relative niedrige Zählrate der Kalium-Atome bestimmt.

Das Experiment ist eine technische Pionierleistung. Beide Atomsorten zu kühlen, sie zu überlappen und gleichzeitig, aber unabhängig voneinander zu detektieren sind wichtige Voraussetzungen für künftige Experimente mit extrem hoher Genauigkeit. Auch ohne weitere Verbesserungen ist die Arbeit ein wichtiger Fortschritt beim Test des Äquivalenzprinzips mit Quantenobjekten. Die Autoren nennen z. B. die Möglichkeit, gemeinsame Tests des schwachen Äquivalenzprinzips und der gravitativen Rotverschiebung mit Materiewellen durchzuführen [7].

Verletzungen des Äquivalenzprinzips lassen sich mithilfe sog. Testtheorien parametrisieren. So gibt es z. B. in der Standardmodell-Erweiterung (SME) fünf Parameter, die alle Null sein müssen, damit das Äquivalenzprinzip für elektrisch neutrale Materie erfüllt wird. Das



**Abb. 2** Verschiedene Isotope sind unterschiedlich empfindlich auf die Parameter der SME, die Verletzungen des Äquivalenzprinzips beschreiben [8]. In dieser Auftragung ist jedes Isotop durch einen Punkt repräsentiert, dessen Lage angibt, wie stark zwei der Parameter (hier einfach  $p_1$  und  $p_2$  genannt, [8]) die Phase eines Atominterferometers mit dem Atom beeinflussen. Je weiter ein Isotop vom Referenzpunkt  $^{87}\text{Rb}$  entfernt ist,

desto stärker wird sich die mit ihm gemessene Phase von der Phase des Rubidium-Interferometers unterscheiden, falls das Äquivalenzprinzip nicht gilt. Die Kombination Rubidium-Kalium ist in dieser Hinsicht günstig. Das Experiment mit zwei Strontium-Isotopen misst eine andere Linearkombination der beiden Parameter, wie man an der anderen Richtung der Verbindungslinie sehen kann.

Äquivalenzprinzip lässt sich daher möglichst gut verifizieren durch Experimente, die nicht nur für selbst kleine Werte der Parameter große Signale ergeben, sondern auch möglichst alle fünf Parameter gut abdecken, um die letzten

Schlupflöcher im Rahmen des Modells zu schließen. Da die Kombination aus Rubidium und Kalium in beiderlei Hinsicht günstig ist (Abb. 2) [8], ist der Einfluss der Messung auf die Genauigkeit, mit der das Äquivalenzprinzip insgesamt bestätigt ist, größer, als es die reine Messgenauigkeit vermuten lässt.

In einer ähnlichen Apparatur hat jüngst die Gruppe von Guglielmo Tino (Florenz) zwei Strontium-Isotope und damit erstmals direkt den freien Fall von einzelnen Bosonen und Fermionen verglichen [9]. Die Genauigkeit dieser Messung liegt ebenfalls bei  $10^{-7}$ . Daraus ergeben sich direkt Grenzwerte für anomale Kopplungen der Gravitation an den Kernspin.

Weltweit arbeiten mehrere Gruppen an Verbesserungen der Atominterferometrie. Unter Schwerkraft sind z. B. längere Zeitintervalle  $T$  und somit höhere Auflösungen möglich. Systematische Effekte lassen sich stark verringern, indem man z. B. das Experiment „auf den Kopf stellt“ und damit den Einfluss des Gravitationsgradienten eliminiert. Damit sollte eine Genauigkeit von  $10^{-14}$  und besser möglich sein. Auch Experimente mit

## KURZGEFASST

### ■ Präzises Moment

Zu den charakteristischen Eigenschaften des Protons gehört sein magnetisches Moment  $\mu_p$ , dessen bislang präziseste Messung 42 Jahre alt und zudem indirekt war, da sie auf der Hyperfeinstruktur von Wasserstoff beruhte. Nun ist es einer Physiker-Kollaboration aus Darmstadt, Heidelberg und Mainz gelungen,  $\mu_p$  direkt über die Spinflips eines einzelnen Protons in einer Penning-Falle zu messen. Der um einen Faktor drei genauere Wert beträgt  $\mu_p = 2,792847350(9) \mu_N$  mit dem Kernmagneton  $\mu_N$ . Durchgeführt mit einem Antiproton soll das Experiment zeigen, ob eine Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie existiert. A. Mooser et al., Nature **509**, 596 (2014)

### ■ Zuwachs im Quarkzoo

Die bisherigen Hinweise auf Teilchen, die nicht nur zwei oder drei Quarks enthalten wie die Mesonen bzw. Baryonen, wurden nun bestätigt: Kürzlich hat die LHCb-Kollaboration am LHC im

Zerfall von B-Mesonen die Resonanz  $Z(4430)$  beobachtet und als Vier-Quark-Zustand identifiziert. Aus sogar sechs Quarks besteht der Zustand  $d^*(2380)$ , der am Jülicher COSY-Beschleuniger beobachtet wurde. Auf der Grundlage der Quantenchromodynamik hatten Theoretiker schon lange komplexere Hadronenzustände vorhergesagt. R. Aaij et al. (LHCb Coll.), Phys. Rev. Lett. **112**, 222002 (2014); P. Adlarson et al. (WASA-at-COSY Coll.), Phys. Rev. Lett. **112**, 202301 (2014)

### ■ Kein Hinweis auf Majorana-Neutrinos

Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen und damit sog. Majorana-Fermionen? Falls ja, müsste der neutrinolose doppelte Beta-Zerfall existieren. Nach zwei Jahren Messzeit hat das EXO-200-Experiment in New Mexico keinen Hinweis auf diesen Zerfall in  $^{136}\text{Xe}$  gefunden. Falls er dennoch existiert, müsste die Halbwertszeit für diesen Zerfall länger als  $1,9 \cdot 10^{25}$  Jahre sein. EXO-200 Coll., Nature **510**, 229 (2014)

Prof. Dr. Holger Müller, Michael Hohensee, Department of Physics, 366 Le Conte Hall, University of California, Berkeley, CA 94720, USA.  
Prof. Dr. Claus Lämmerzahl, ZARM, Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen

klassischen Testobjekten werden weiter verbessert, z. B. mit der 2016 startenden MICROSCOPE-Mission. Sicher ist, dass jede Abweichung vom Äquivalenzprinzip unser physikalisches Weltbild revolutionieren würde.

Holger Müller, Michael Hohensee  
und Claus Lämmerzahl

- [1] T. Damour, F. Piazza und G. Veneziano, Phys. Rev. D **66**, 046007(2002); E. Göklü und C. Lämmerzahl, Class. Quant. Grav. **25**, 105012 (2008)  
[2] D. Schlippert et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 203002 (2014)  
[3] R. Colella, A. W. Overhauser und S. A. Werner, Phys. Rev. Lett. **34**, 1472 (1975)  
[4] T. Jenke et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 151105 (2014)  
[5] A. Peters, K. Y. Chung und S. Chu,

- Nature **400**, 849 (1999)  
[6] S. Fray, C. A. Diez, T. W. Hänsch und M. Weitz, Phys. Rev. Lett. **93**, 240404 (2004)  
[7] H. Müller, A. Peters und S. Chu, Nature **463**, 926 (2010)  
[8] M. A. Hohensee, H. Müller und R. B. Wiringa, Phys. Rev. Lett. **111**, 151102 (2013)  
[9] M. G. Tarallo et al., arXiv:1403.1161

## ■ Das Salz in der DNA-Suppe

Welchen Einfluss haben Salzionen auf die Bewegung von DNA-Molekülen in einem Temperaturgradienten?

Moleküle lassen sich durch verschiedene Mechanismen in Flüssigkeiten bewegen, etwa durch ein elektrisches Potential (Elektrophorese) oder durch einen Temperaturgradienten (Thermophorese). Bereits seit dem 19. Jahrhundert ist bekannt, dass sich in einer Salzlösung mit Temperaturgradienten die Ionen auf der kalten Seite anreichern (Soret-Effekt). In den vergangenen Jahren wurde dies in kolloidalen Dispersionen ausführlich untersucht [1]. Die Thermophorese lässt sich nutzen, um Makromoleküle nach Molekulargewicht zu trennen [2], und findet bei der Untersuchung von Protein-

wechselwirkungen Anwendung [3]. Zudem stellt Thermophorese möglicherweise einen wichtigen Baustein zur frühen Evolution dar [4].

Die zu Grunde liegenden Mechanismen sind allerdings nicht vollständig verstanden. Wie die Gruppe von Dieter Braun von der LMU München nun berichtet, hängt die Thermophorese von DNA in wässriger Lösung stark vom Elektrolyten ab und ändert für manche Salze sogar das Vorzeichen [5]. Braun und Mitarbeiter fanden dabei einen erheblichen nichtionischen Beitrag zur Beweglichkeit von DNA.

Anders als bei Sedimentation wirkt beim kolloidalen Transport (Phorese) aufgrund eines Gradienten von Konzentration, Temperatur oder elektrischem Feld keine äußere Kraft auf das Teilchen. Thermophorese resultiert aus thermodynamischen Kräften, die ein Temperaturgradient erzeugt. Am besten sind dabei die elektrischen Ladungseffekte verstanden: Ein geladenes Kolloidteilchen in wässriger Lösung ist von einer Wolke von Gegenionen abgeschirmt; die Dicke dieser elektrischen Doppelschicht ist durch die Debye-Länge gegeben. Auf der kälteren Seite ist diese allerdings geringfügig kleiner und der osmotische Druck der Salzionen entsprechend größer. Letztere diffundieren daher entlang der Oberfläche zu höherer Temperatur. Die entstehende Scherspannung übt auf die Teilchen eine entgegengesetzte Kraft aus; sie wandern ins Kalte mit einer Geschwindigkeit  $u = -D_T \nabla T$ , wobei die Mobilität  $D_T$  im Allgemeinen positiv ist.

Neben dieser Thermophorese im engeren Sinne verursacht die Temperaturabhängigkeit der Elektrolyteigenschaften eine Reihe von Sekundärfeldern [6]. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Seebeck-Effekt (Abb.): Wie eingangs erwähnt, haben Salzionen die Tendenz, sich auf der kalten Seite anzureichern. Allerdings unterscheiden sich Kationen und Anionen in ihrem thermotropen Verhalten; dies führt zu einem Überschuss einer Ionensorte auf der einen Seite und zu einem entsprechenden Defizit auf der anderen. Diese Oberflächenladungen erzeugen ein makroskopisches Thermopotential zwischen kalt und warm sowie ein thermoelektrisches Feld  $E = S \nabla T$ , mit dem Seebeck-Koeffizienten  $S$  der Salzlösung. Letzterer ist durch die Lösungsenthalpie  $h_{\pm}$  (oder Transportwärme) der Ionen bestimmt,

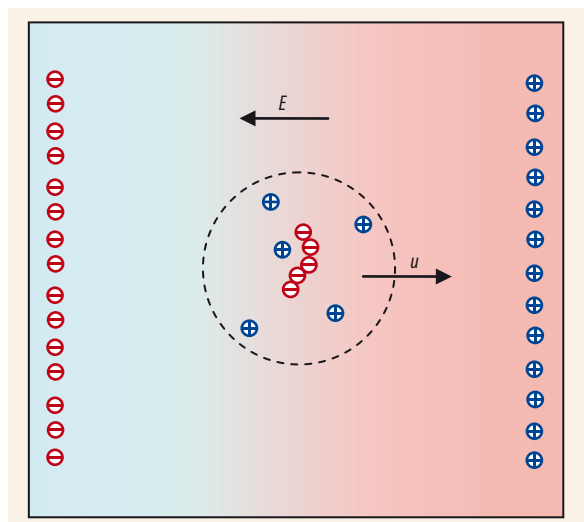
$$S = (k_B/e) (h_- - h_+) / (2k_B T), \quad (1)$$

wobei der Aktivitätsfaktor gleich eins gesetzt ist. Typische Werte für  $S$  liegen um  $100 \mu\text{V}/\text{K}$  und sind damit erheblich größer als der thermoelektrische Koeffizient in Metallen und Halbleitern.

Mit dem thermoelektrischen Term und der üblichen elektrophoretischen Mobilität  $\mu$  ergibt sich die Driftgeschwindigkeit eines Kolloidteilchens oder eines Biomoleküls

$$u = -D_T \nabla T + \mu S \nabla T \quad (2)$$

Der Seebeck-Koeffizient kann beide Vorzeichen annehmen. Mehrere in den letzten Jahren durchgeführte Experimente zeigten, dass diese „Thermo-Elektrophorese“



Bei der Thermoelektrophorese in einer Elektrolytlösung mit negativem Seebeck-Koeffizienten, etwa Kaliumfluorid, zeigt das elektrische Feld  $E = S \nabla T$  vom Warmen ins Kalte. Entsprechend wandert negativ geladene DNA, z. B. ein Pentamer (rot, Mitte) zu höherer Temperatur. Zu sehen sind auch die makroskopischen Oberflächenladungen sowie die Gegenionen zur DNA; der gestrichelte Kreis zeigt die Ausdehnung der Abschirmwolke. Ist der Seebeck-Koeffizient positiv wie bei NaCl, sind die Oberflächenladungen vertauscht und die Richtungspfeile umgekehrt.