

## ■ Spuren im Gas

In einem Gas aus ultrakalten Atomen lassen sich Stoßprozesse mit einzelnen Atomen verfolgen. Damit ist es möglich, die Diffusion mikroskopisch zu untersuchen.

Diffusionsphänomene und Brownsche Molekularbewegung gehören zu den wichtigsten dynamischen Prozessen unserer Umgebung, die unter anderem eine entscheidende Verbindung von makroskopischen und mikroskopischen Eigenschaften der Materie herstellen. In seinem „*annum mirabilis*“ schreibt Einstein 1905 in seiner Arbeit zur Brownschen Molekularbewegung [1]: „Wenn sich die hier zu behandelnde Bewegung ... wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erweise sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung der Wärme gegeben“. Am Ende seines Aufsatzes schätzt Einstein ab, dass Teilchen mit 1  $\mu\text{m}$  Durchmesser in Wasser durch Diffusion in einer Minute etwa 6  $\mu\text{m}$  zurücklegen sollten und fordert die Experimentalphysiker ganz jovial auf, ihre Mikroskope zu benutzen: „Möge es bald einem Forscher gelingen, die hier aufge-

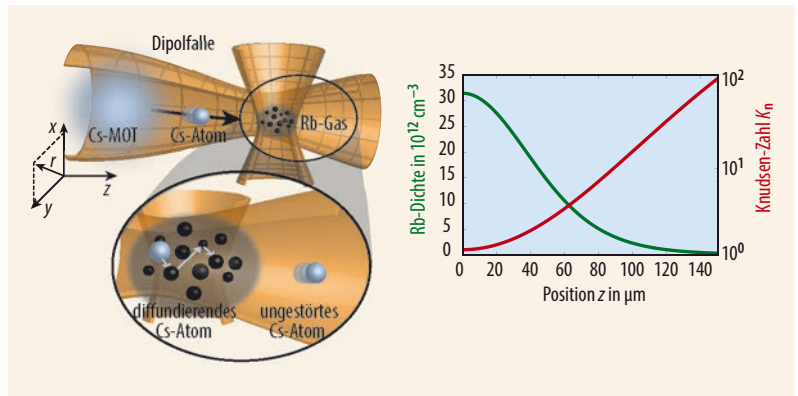


Abb. 1 Einzel präparierte kalte Cäsium-Atome werden in Richtung einer gespeicherten Wolke kalter Rubidium-Atome beschleunigt (links). Ein Teil der Atome durchquert die Wolke ungestört,

ein anderer Teil thermalisiert mit dem Gas. Die (positionsabhängige) Knudsen-Zahl variiert mit der Dichte der Rubidium-Atome (rechts).

worfene, für die Theorie der Wärme wichtige Frage zu entscheiden!“ Jean Perrin erwähnt genau diese Einsteinsche Passage sogar explizit in seinem Bericht „*Movement Brownien et Réalité Moléculaire*“, in dem er seine Beobachtungen mit dem Mikroskop schon 1909 im Detail erläutert [2].

Die Sache mit der Atomgröße ist lange geklärt, ist damit aber auch die Einsteinsche Aufforderung abgehakt? Keineswegs, wie kürzlich ein Team von Experimentalphysikern um Artur Widera in Kaiserslautern, mit theoretischer

Unterstützung von Eric Lutz aus Erlangen, zeigen konnte [3]. Einsteins Theorie basiert auf einem Modell, das sich genauer mit der Langevin-Gleichung umreißen lässt. Dazu ist es erforderlich, eine stochastische Kraft in die Bewegungsgleichungen einzuführen und die makroskopischen Eigenschaften mithilfe eines pauschalen Reibungskoeffizienten mit einem diffundierenden schweren mikroskopischen Teilchen zu verknüpfen. Der Ansatz ist ausgesprochen erfolgreich, der Gültigkeitsbereich aber eingeschränkt, denn er bezieht sich auf

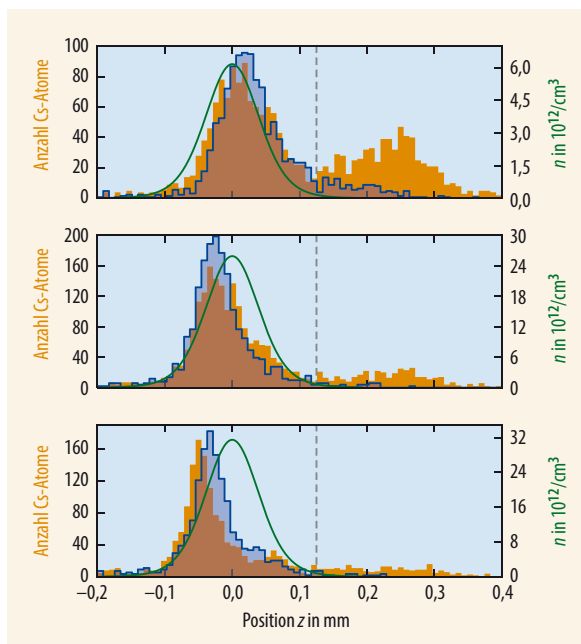


Abb. 2 Die räumliche Verteilung der Cäsium-Atome (orange) wurde nach fester Diffusionszeit gemessen. Die Dichte des Rubidium-Gases (grüne Kurve: räumliche Verteilung) steigt von oben nach unten an [5]. Die Atome werden als harte Kugeln modelliert. Auf der linken Seite der gestrichelten Linie gibt die Simulation nach der modifizierten Langevin-Theorie (blau) den thermalisierten Anteil der Cs-Spuratome sehr gut wieder. Rechts davon finden sich die ballistischen Atome, die von der Langevin-Theorie nicht erfasst werden.

schwere Partikel, die in einer dichten Umgebung leichter Teilchen, d. h. mit hoher Stoßrate, diffundieren. Ist also alles andere ein Fall für die Boltzmann-Gleichung, die als Integro-Differentialgleichung bekanntermaßen unhandlich ist?

Die Experimentatoren sind der Einsteinschen Aufforderung erneut gefolgt und haben mit einem ganz ähnlichen Konzept die Diffusion einzelner Caesium-Atome in einem ultrakalten Gas von Rubidium-Atomen beobachtet und analysiert [3]. Sie erschließen damit – ganz im Geist der Einsteinschen Abschätzung, dass die Brownsche Bewegung im Mikroskop zu sehen sein müsste – neue Parameter-Bereiche, die quantitative Aussagen über die Gültigkeit bzw. Erweiterbarkeit der Langevin-Theorie erlauben. Insbesondere lässt sich die so genannte Knudsen-Zahl  $K = \lambda/L$ , das Verhältnis der freien Weglänge  $\lambda$  der Caesium-Atome zur charakteristischen Dimension  $L$  des Systems (hier der Durchmesser der optisch gespeicherten Rb-Wolke), über große Bereiche durch einfache Variation der Rb-Dichte kontrollieren (Abb. 1). Die kalten Atome bewegen sich mit Geschwindigkeiten von rund 10 mm/s, die Stoßraten erfolgen auf einer Zeitskala von 0,1 ms – das sind gute Bedingungen, um die Dynamik kalter Atome zu beobachten. Auch sind die Cs-Atome nur 1,5-mal schwerer als die Rb-Atome des Stoßmediums, das Cs-Spuratom und die Rb-Atome seiner Umge-

bung haben also ganz ähnliche kinetische Eigenschaften.

Im Experiment werden einzelne Cs-Atome präpariert und mit optischen Dipolkräften in Richtung der kleinen kalten Rb-Wolke beschleunigt. Die beiden Spezies lassen sich vollständig unabhängig voneinander kontrollieren und detektieren. Nach festgelegten Entwicklungszeiten wird die Dynamik abgebrochen. Dazu gilt es, die Bewegung des Cs-Atoms als Funktion der Wartezeit mit einem optischen Gitter instantan einzufrieren und anschließend mit hoher Empfindlichkeit und Auflösung auszulesen. Die vielfache Wiederholung des Experiments liefert das Datenmaterial, um theoretische Vorhersagen zu überprüfen. Die Messdaten zeigen eine bimodale Verteilung: Ein Teil der Cs-Atome durchquert die Rb-Wolke ungestört, der andere Teil führt nach einem „Initialstoß“ eine diffusive Bewegung aus (Abb. 2). Noch ein schöner Aspekt: Das einzelne Cs-Atom lässt sich als minimal-invasives Thermometer für die Rb-Wolke verwenden [4]. Man misst dazu – im Mittel über viele Versuche – die Verteilung der kinetischen Energie der thermalisierten Cs-Spuratome.

Die detaillierte Analyse zieht für Simulationen des diffusiven Anteils erneut die Langevin-Gleichung heran, allerdings mit einer kleinen Modifikation: Der Reibungskoeffizient hängt von der Geschwindigkeit des diffundierenden Atoms

ab. Die gute Übereinstimmung von Theorie und Experiment weist darauf hin, dass in der Tat der geschwindigkeitsabhängige Reibungskoeffizient der Langevin-Gleichung die Physik der Stoßprozesse gut wiedergibt, wenn die Geschwindigkeit des diffundierenden Teilchens von derselben Größenordnung ist wie die der Hintergrundpartikel.

Das Team um Artur Widera stößt mit diesem Experiment ein Tor auf, um weitere ungewöhnliche Diffusionsprozesse auf der Ebene mikroskopischer Teilchen bis hinein in den „echten“ Quantenbereich zu studieren, in dem die de Broglie-Wellenlänge der Stoßpartner ihren Abstand übersteigt. Der offene, dissipative Charakter des hier untersuchten Systems bietet ein breites Feld auch für die Analyse von Nicht-Gleichgewichtssystemen im Grenzbereich von klassischer und Quantenphysik.<sup>1)</sup> So bleibt festzustellen: Möge es den Forschern gelingen, weitere für die Theorie der Wärme wichtige Fragen experimentell zu entscheiden!

Dieter Meschede

[1] A. Einstein, Ann. Phys. **322**, 549 (1905)

[2] J. B. Perrin, Ann. Chim. Phys. **18**, 5 (1909)

[3] M. Hohmann et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 263401 (2017)

[4] M. Hohmann et al., Phys. Rev. A **93**, 043607 (2016)

[5] M. Hohmann, Thermometry and Diffusion with Single Impurity Atoms in an Ultracold Gas, Dissertation, TU Kaiserslautern (2016)

1) Diesem Thema widmet sich beispielweise der SFB/TR 185 OSCAR Open System Control of Atomic and Photonic Matter in Kaiserslautern und Bonn.

Prof. Dr. Dieter Meschede, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn, Wegelerstr. 8, 53115 Bonn

## KURZGEFASST

### ■ Relativistische Sternbahnen

Für die Bahnen der Sterne, die dem Schwarzen Loch im Zentrum unserer Milchstraße am nächsten kommen, lassen sich relativistische Abweichungen nachweisen. Dazu werteten Wissenschaftler aus Köln, Bonn und Prag Infrarot-Daten des VLT und anderer Teleskope aus den letzten 20 Jahren neu aus. Die relativistischen Effekte beeinflussen die Form der Bahnen nur um wenige Prozent, sodass erst seit dem Einsatz adaptiver Optiken ausreichend exakte Positionsdaten vorliegen. Die Analyse ergab auch exaktere Werte für die Masse des Schwarzen Lochs und seinen Abstand zur Erde.  
M. Parsa et al., ApJ **845**, 22 (2017)

### ■ Nickel verantwortlich für Magnetfeld

Nickel und Eisen unterscheiden sich deutlich bei den hohen Temperaturen und dem großen Druck, die im Erdkern herrschen. Das könnte laut Würzburger und Wiener Physikern erklären, wie das Erdmagnetfeld entsteht. Die Wärmeleitfähigkeit eines reinen Eisenkerns ist so hoch, dass keine Konvektionsströme auftreten sollten. Diese sind aber eine Voraussetzung des gängigen Modells vom Geo-Dynamo. Aufwändige Simulationen unterschiedlicher Fe-Ni-Legierungen zeigten, dass die im Erdkern vermuteten 20 Prozent Nickel ausreichen, um die Ströme in Gang zu setzen.  
A. Hausoel et al., Nat. Commun. **8**, 16062 (2017)

### ■ Charmant im Doppelpack

Theoretisch war bereits vorhergesagt worden, dass es Baryonen geben muss, die aus zwei schweren Charm-Quarks bestehen. Nun ist es der LHCb-Kollaboration gelungen, ein solches Teilchen experimentell nachzuweisen: Das Baryon  $\Xi_{cc}^{++}$  hat eine Masse von 3621 MeV und setzt sich aus zwei c-Quarks und einem u-Quark zusammen. Sein Zerfall in das Baryon  $\Lambda_c^+$  und drei leichte Mesonen zeigte sich bei Kollisionen von Protonen mit einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV. Inzwischen wurden solche Signaturen auch in älteren Daten bei 8 TeV Schwerpunktsenergie gefunden.  
R. Aaij et al. (LHCb collaboration), Phys. Rev. Lett. accepted