

Einzelnen Ionen auf der Spur

Wenn sich ein Ion durch ein Bose-Einstein-Kondensat bewegt, beeinflussen Kollisionen den Ladungstransport in dem ultrakalten Gas.

Johannes Hecker Denschlag

In einem Medium mit beweglichen elektrischen Ladungen erzeugt ein elektrisches Feld einen Strom. Das Feld beschleunigt die Ladungen, aber Kollisionen innerhalb des Mediums führen zu einer Art Reibung, welche die Geschwindigkeit der Ladungen und die Stromstärke begrenzt. Dieses universelle Konzept des diffusiven Transports gilt in vielen Medien, beispielsweise in metallischen Leitern, elektrolytischen Lösungen und gasförmigen Plasmen. Gegebenenfalls beeinflussen aber auch andere Effekte den Transport, beispielsweise in einem Supraleiter oder einer Supraflüssigkeit. Kürzlich hat eine Gruppe um Florian Meinert und Tilman Pfau an der Universität Stuttgart Experimente zum Ladungstransport mit einem einzelnen Ion durchgeführt, das ein Bose-Einstein-Kondensat aus kalten, neutralen Atomen durchquert [1]. Die Messungen zeigen, dass der Transport dabei hauptsächlich diffusiver Natur ist. Dennoch ebnen die Ergebnisse den Weg für die Suche nach weiteren, nicht diffusiven Transportphänomenen.

Ein Bose-Einstein-Kondensat ist suprafluid. Daher liegt die Erwartung nahe, dass reibungsfreier Ladungstransport auftritt. Es gibt aber auch Vorhersagen, dass sich ein Atomcluster um ein kaltes Ion bildet, der den Ladungstransport behindern sollte [2]. Darüber hinaus könnten weitere Effekte auftreten. So würde ein resonanter Ladungstransfer zwischen dem Ion und einem benachbarten Atom die Leitfähigkeit im Gas drastisch erhöhen, weil das leichte Elektron und nicht das schwere Ion für den Ladungstransport sorgt [3].

Um das Transportszenario experimentell zu untersuchen, nahm die Stuttgarter Gruppe das Transportver-

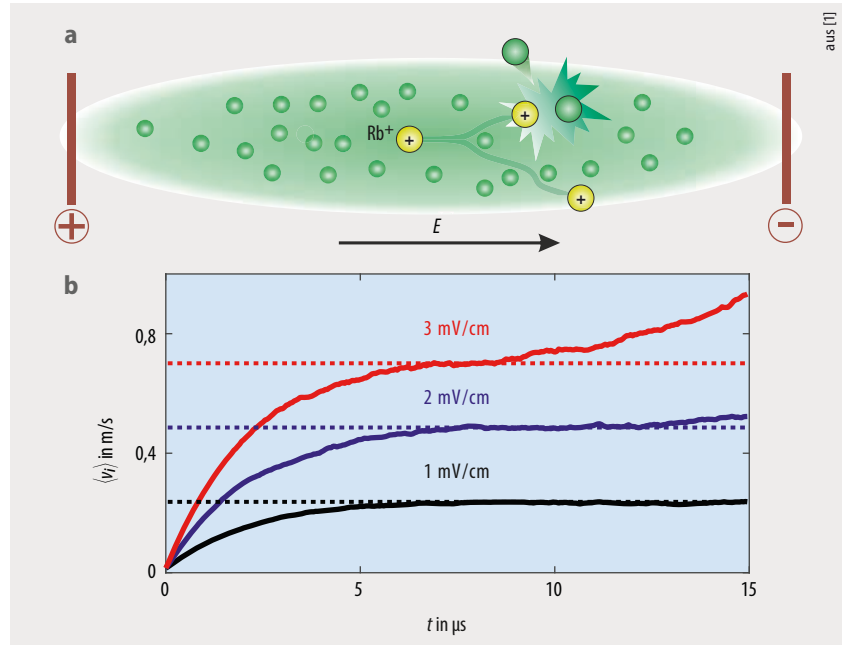


Abb. 1 Ein elektrisches Feld E zwischen zwei Elektroden (a, braun) transportiert ein einzelnes Rb^+ -Ion (gelb) durch ein Bose-Einstein-Kondensat. Dabei treten Kollisionen mit Rb -Atomen (grün) auf und es können auch Rb_2^+ -Dimere entstehen. In numerischen Bahnsimulationen (b) der mittleren Geschwindigkeit $\langle v_z \rangle$ als Funktion der Entwicklungszeit t besitzt ein im Zentrum des Bose-Einstein-Kondensats erzeugtes Ion nach einem anfänglichen Transienten eine feldabhängige Driftgeschwindigkeit (gestrichelt). Dieses Verhalten deutet auf einen diffusiven Ionentransport hin.

halten eines einzelnen Rubidium-Ions (Rb^+) in einem zigarrenförmigen Bose-Einstein-Kondensat aus etwa einer Million Rubidium-Atomen unter die Lupe [1]. Das Team erzeugte in einem zweistufigen Prozess das Rb^+ -Ion im Zentrum der $50 \mu\text{m}$ langen Rb -Wolke. Ein auf das Zentrum der Wolke fokussierter Laserstrahl regte ein einzelnes Rb -Atom in einen Rydberg-Zustand an. Dabei besetzt ein Elektron ein Orbital mit großem Radius. Weil starke Wechselwirkungen mit diesem Rydberg-Atom die Energieniveaus seiner Nachbarn so verschieben, dass der Laser sie nicht anregen kann, entsteht immer genau ein angeregtes Atom – ein Effekt, der Rydberg-Blockade genannt wird [4]. Anschließend führte das Anlegen eines kleinen elektrischen Gleichfeldpulses zur Ionisation des Rydberg-Atoms. Hierbei erhielt das

erzeugte Rb^+ -Ion eine kleine Anfangsgeschwindigkeit von etwa 10 cm/s , was einer Temperatur von $50 \mu\text{K}$ entspricht.

Ein durchstimmbares, homogenes elektrisches Feld von einigen mV/cm beschleunigte das kalte Ion entlang der Längsrichtung des Bose-Einstein-Kondensats. Nach einer Transportzeit von bis zu $25 \mu\text{s}$ wurde der Ort des Ions mit Mikrometerauflösung bestimmt. Ein weiteres, viel stärkeres elektrisches Feld beschleunigte dazu das Ion in Richtung eines Ionendetektors (sog. „multi-channel plate detector“). Aus der Zeitverzögerung zwischen dem Einschalten des Feldes und dem Nachweis auf dem Ionendetektor leitete sich der Ort ab, an dem sich das Ion am Ende der Transportphase befand.

Die Messungen zeigen, dass das Ion in einer dichten Wolke in der gleichen

#) Bei diesem Artikel handelt es sich um eine bearbeitete Übersetzung von J. Hecker Denschlag, *Physics* **14**, 8 (2021).

Zeit eine kürzere Strecke zurücklegt als in einer verdünnten. Dieses Verhalten lässt sich durch Kollisionen des Ions mit den ultrakalten Atomen erklären, die so das Ion abbremsen. Bei der gegebenen Teilchendichte von $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ findet etwa eine Kollision pro Mikrosekunde statt. Nach einigen Kollisionen sollte sich eine konstante Driftgeschwindigkeit einstellen, bei der sich Beschleunigung und Reibung die Waage halten. Dieses Regime wird jedoch erst kurz vor dem Austritt des Ions aus der Atomwolke erreicht, weil diese sehr klein ist. Dennoch erlauben die Daten den Schluss, dass die Driftgeschwindigkeit wie beim diffusiven Transport linear mit dem angelegten elektrischen Feld zunimmt.

Die Ergebnisse belegen demnach die „klassischen“ Kollisionen beim Ladungstransport, aber es bleibt offen, ob weitere Effekte auftreten. Die Experimente können noch nicht zeigen, ob sich Atomcluster um das Ion bilden oder ob Ladungstransport mittels Ladungstransfer zwischen Atom und Ion stattfindet. Außerdem ist noch nicht klar, inwieweit die Suprafluidität die Kollisionen unterdrücken kann. Um diese Effekte nachzuweisen, sind wahrscheinlich noch kältere Ionen und niedrigere elektrische Beschleunigungsfelder nötig.

Der aktuelle Versuchsaufbau erlaubt es, das Verhalten der Ionen über den Ladungstransport hinaus zu untersuchen. Ein großer Teil der Rb^+ -Ionen rekombiniert mit Rb-Atomen [5, 6]. Bei dieser chemischen Reaktion bildet ein Rb^+ -Ion mit einem Rb-Atom ein schwach gebundenes Rb_2^+ -Dimer, während ein zweites Rb-Atom einen Teil der freigesetzten Bindungsenergie davonträgt. Das Rb_2^+ -Dimer lässt sich leicht vom Rb^+ -Ion unterscheiden, weil es durch seine größere Masse den Ionendetektor später erreicht.

Bei speziell dafür ausgelegten Versuchen gelang es der Stuttgarter Gruppe, die typischen Bindungsenergien des Rb_2^+ -Dimers zu messen [5]. Das Anlegen eines geeigneten elektrischen Feldes brach das schwach gebundene Rb_2^+ -Dimer auf in ein Rb^+ -Ion und ein neutrales Rb-Atom. Dabei muss das elektrische Feld umso stärker sein, je größer die Bindungsenergie ist, um das Molekül zu dissoziieren.

Durch Messung des Prozentsatzes der dissoziierten Dimere als Funktion des elektrischen Feldes ließen sich die typischen Bindungsenergien bestimmen. Es zeigte sich, dass sich das Molekül-Ion auf seinem Weg durch die Wolke verändert: Seine Bindung wird nach und nach immer stärker. Diese Relaxation zu tiefer gebundenen Energiezuständen ist durch inelastische Stöße des Rb_2^+ -Moleküls mit Rb-Atomen zu erklären. Eine ähnliche Relaxationsdynamik konnten wir kürzlich mit einem BaRb^+ -Molekül beobachten, wobei wir eine optische Nachweismethode für die Moleküle verwendeten [7]. Momentan kann keine der beiden Gruppen die quantisierten Energieniveaus der molekularen Ionen auflösen. Aber die Stuttgarter Gruppe könnte dies wohl mit einer optimierten Nachweismethode erreichen. Damit ließen sich chemische Reaktionskanäle auf der Quantenebene untersuchen, ein großes Ziel der sog. „state-to-state chemistry“.

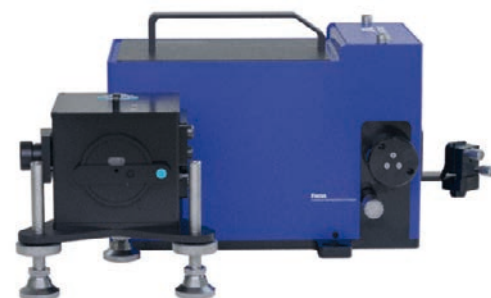
Die neuen Experimente weisen den diffusiven Transport in einem Bose-Einstein-Kondensat nach. Verfeinerte Messungen dürften zukünftig zeigen, inwieweit sich die vorhergesagten atomaren Cluster um das Ion bilden [2], ob ein schneller Ladungstransport aufgrund von Ladungssprüngen zwischen den Teilchen stattfindet [3] oder ob reibungsfreier Transport möglich ist. Ein optimierter Aufbau könnte es überdies erlauben, quantisierte molekulare Energieniveaus aufzulösen und so Experimente zur state-to-state chemistry durchzuführen.^{#)}

- [1] T. Dieterle et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 033401 (2021)
- [2] R. Côté et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 093001 (2002)
- [3] R. Côté, Phys. Rev. Lett. **85**, 5316 (2000)
- [4] E. Urban et al., Nat. Phys. **5**, 110 (2009)
- [5] T. Dieterle et al., Phys. Rev. A **102**, 041301 (2020)
- [6] A. Härter et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 123201 (2012)
- [7] A. Mohammadi et al., Phys. Rev. Research, akzeptiert (2021); arXiv:2005.09338

Der Autor

Prof. Dr. Johannes Hecker Denschlag,
Universität Ulm, Institut für Quantenmaterie,
Albert-Einstein-Allee 45, 89081 Ulm

Ultrakurzpuls Diagnostik



- Autokorrelator
- Mikroskopie-Autokorrelator
- Spektrometer
- SPIDER
- FROG