

## ■ Kaltes Chaos?

In einem ultrakalten Erbiumgas treten Streuresonanzen auf, die auf eine chaotische Kollisionsdynamik hindeuten.

Bei der Streuung zwischen Atomen in ultrakalten Quantengasen können in Abhängigkeit von einem externen Magnetfeld so genannte Feshbach-Resonanzen auftreten. Sie sind der Schlüssel zu einer der größten Stärken dieser Quantensysteme: der Möglichkeit, durch ein äußeres Feld die Streueigenschaften und damit die Wechselwirkungsstärke zwischen den Atomen praktisch nach Belieben zu variieren. Damit lässt sich die Brücke vom idealen Gas bis hin zum stark korrelierten Vielteilchensystem in ein und demselben Experiment schlagen. Physiker der Universität Innsbruck haben nun eine ganz neue Seite dieser Resonanzen entdeckt, und zwar Hinweise auf quantenchaotisches Verhalten in gemessenen Resonanzspektren [1].

Im Gegensatz zu Experimenten mit Alkalimetallen und Chrom hat die Gruppe um Francesca Ferlaino für ihre Experimente das Selten-Erd-Element Erbium verwendet, das eine viel komplexere elektronische Struktur aufweist. Insbesondere und für die nun gemachten Beobachtungen entscheidend, besitzen die Atome in ihrem elektronischen Grundzustand einen endlichen Spin und Bahndrehimpuls sowie teilweise

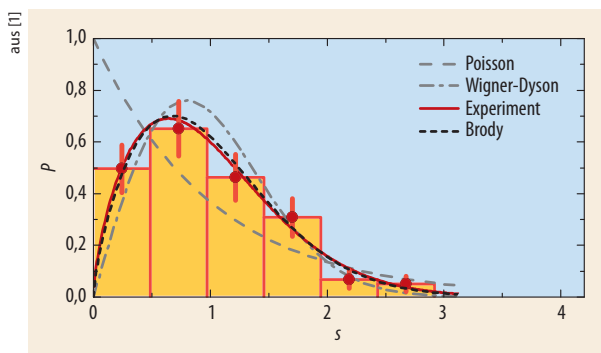


Abb. 2 Die gemessene Verteilung der Abstände  $s$  zwischen benachbarten Resonanzen (rote Punkte und Linie) lässt sich mit der Brody-Funktion (schwarz gestrichelt) beschreiben. Diese interpoliert mit einem Fit-Parameter  $\eta$  zwischen Wigner-Dyson- ( $\eta = 1$ , grau strichpunktirt) und Poisson-Verteilung ( $\eta = 0$ , grau gestrichelt) und liefert damit ein Maß dafür, wie ähnlich die gemessene Verteilung einer der beiden ist. Für  $^{168}\text{Er}$  ergibt sich  $\eta = 0,66$  und für  $^{166}\text{Er}$   $\eta = 0,73$ .

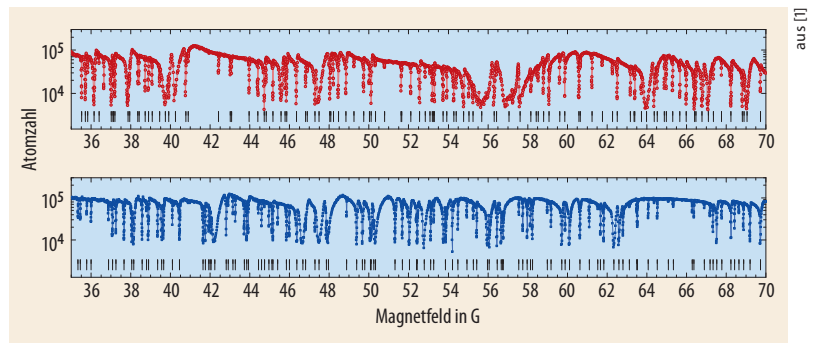


Abb. 1 In ultrakalten Quantengasen der bosonischen Erbium-Isotope  $^{168}\text{Er}$  (rot) und  $^{166}\text{Er}$  (blau) treten als Funktion des

Magnetfelds eine Fülle von Streuresonanzen auf, die zu magnetfeldabhängigen Verlusten in der Atomzahl führen.

gefüllte innere Schalen. Das führt zu Anisotropie der van-der-Waals-Wechselwirkung sowie zu großen magnetischen Momenten und einer starken Dipol-Dipol-Wechselwirkung zwischen den Atomen – die ursprüngliche Motivation für diese Experimente [2]. Andere Atomsorten dagegen haben einen verschwindenden Bahndrehimpuls ( $L = 0$ ) und meist ein viel geringeres magnetisches Moment.

Die Messungen führte das Innsbrucker Team jeweils an etwa 100 000 Er-Atomen bei einer Temperatur von rund 400 nK durch. Dazu präparierten sie die Atome im Quantenzustand tiefster Energie und hielten sie für einige hundert Millisekunden in ihrer Falle. Abhängig vom Magnetfeld treten nun Streuresonanzen auf, die auch dazu führen, dass Atome inelastisch aus der Falle gestreut werden. Resonanzen lassen sich daher identifizieren, indem man die in der Falle verbliebenen Atome anhand eines Absorptionbildes zählt. Aus zahllosen solcher Experimente extrahierten die Innsbrucker auf diese Weise Spektren mit 189 bzw. 190 Resonanzen bei Magnetfeldern von 0 bis 70 Gauss für die beiden bosonischen Isotope  $^{166}\text{Er}$  und  $^{168}\text{Er}$  (Abb. 1). Aufgrund ihres zusätzlichen Kernspins treten bei den Fermionen  $^{167}\text{Er}$  sogar bis zu 20 Resonanzen pro Gauss auf.

Die Bedeutung dieser Entdeckung ergibt sich aus dem Kontext

der atomaren Streutheorie. Diese erlaubt es, Kollisionen zweier Atome im Quantenregime auf sehr einfache Art zu beschreiben. Gekennzeichnet ist dieses Regime durch Temperaturen um 100 Nanokelvin, d. h. Kollisionsenergien neun Größenordnungen unter Normalbedingungen. Dadurch liegt die de-Broglie-Wellenlänge der Teilchen, die eng verknüpft mit der Heisenbergschen Unschärfe und umgekehrt proportional zu ihrer Geschwindigkeit ist, im Bereich von Mikrometern. Das ist sehr viel größer als typische Längenskalen, auf denen Details atomarer Wechselwirkungen variieren. Die Bindungslänge eines Stickstoff-Moleküls beträgt z. B. etwa 0,1 nm. Unter solchen Umständen beschreibt eine einzige Größe, die Streulänge, den Stoß zweier Atome. Sie hängt von den an der Kollision beteiligten Streukanälen ab, womit man diejenigen Molekülzustände der Stoßpartner bezeichnet, die aufgrund von Wechselwirkungen zwischen ihnen berücksichtigt werden müssen.

Obwohl die Atome in den Experimenten in wohldefinierten Anfangszuständen all ihrer Freiheitsgrade präpariert werden, führen Wechselwirkungen (Spin-Bahn-, Hyperfein- und magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkungen) dazu, dass bei einem Stoß lediglich die Projektion des Gesamt-Drehimpulses aus elektronischen Dreh-

impuls und Bahndrehimpuls der Stoßpartner erhalten ist. Bezüglich der anderen Quantenzahlen können die Zustände aber mischen.

Feshbach-Resonanzen treten genau dann auf, wenn die Energie eines solchen Kanals gerade der Kollisionsenergie entspricht. Da ihr Gesamtdrehimpuls sich zu unterschiedlichen Anteilen aus Spin und Bahndrehimpuls zusammensetzt und sie daher unterschiedliche magnetische Momente haben, verschiebt ein Magnetfeld die Energie der Kanäle gegeneinander und erlaubt, solche Resonanzen gezielt herbeizuführen und die Streueigenschaften exakt zu beeinflussen – zumindest im Fall „einfacher“ Atome.

Bei Alkalimetallen ist das also noch überschaubar und die Zahl möglicher Resonanzen sowie ihre spektrale Dichte ist relativ beschränkt, da die einlaufenden Zustände keinen elektronischen Bahndrehimpuls besitzen ( $L = 0$ ). Man kann einer Resonanz oft exakt einen Satz von Quantenzahlen zuweisen und aus den Spektren viel über die Molekülpotentiale lernen. Anders dagegen

bei den Erbium-Atomen mit  $L = 5$ . Bei solch komplexen Atomen kann eine sehr große Zahl von Resonanzen auftreten, die so dicht beieinander liegen, dass sie interferieren und sich gegenseitig beeinflussen. Eine Zuweisung von genauen Quantenzahlen der Kollisionskanäle ist dann nicht mehr sinnvoll. Stattdessen können große Fluktuationen der Streuphasen und damit quantenchaotisches Verhalten auftreten.

Zur Interpretation ihrer komplexen Spektren zogen Frisch et al. das ursprünglich in der Kernphysik entwickelte Konzept der Zufallsmatrizen heran, das auf einer Analyse der statistischen Eigenschaften des Resonanzspektrums beruht. Dabei zeigte sich, dass die Abstände aufeinander folgender Resonanzen nicht – wie bei einer regulären Dynamik zu erwarten – eine Poisson-Verteilung aufweisen. Stattdessen ähnelt die Verteilung sehr der Wigner-Dyson-Verteilung eines Systems mit chaotischem Verhalten (Abb. 2). Daraus schließen die Autoren auf eine zugrunde liegende chaotische Kollisionsdynamik.

Diese Folgerung wäre weitreichend, da für ultrakalte Moleküle, die eine noch größere Zahl von inneren und äußeren Freiheitsgraden besitzen, ein ähnliches Verhalten zu erwarten ist. Für die atomaren Quantengase ergeben sich viele weitere Fragen, vor allem nach dem Verhalten der elastischen Streuung in der Nähe dieser Resonanzen und nach ihrem Zusammenspiel mit der anisotropen, lang-reichweitigen Dipol-Dipol-Wechselwirkung der Atome. Für das weitere Verständnis der Kollisionsdynamik und für die Frage, ob und wie solche Resonanzen, ähnlich wie bei den Alkalimetallen, zur Kontrolle über die Wechselwirkungsstärke eingesetzt werden können, sind diese Fragen von zentraler Bedeutung.

Axel Griesmaier

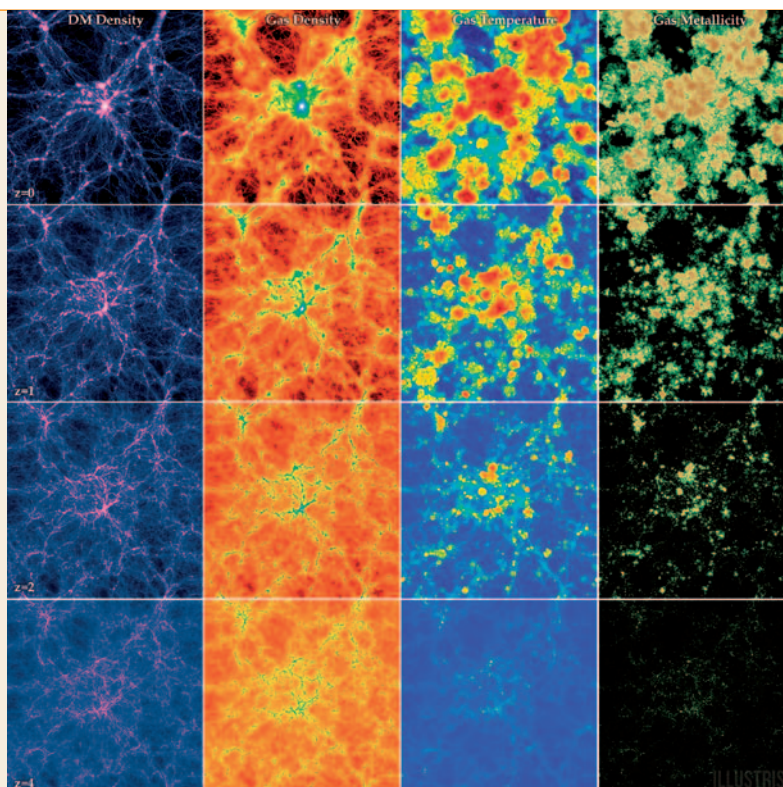
- [1] A. Frisch et al. *Nature* **507**, 475 (2014)  
 [2] A. Griesmaier, *Physik Journal*, Juli 2012, S. 22

Dr. Axel Griesmaier,  
 Physikalisches  
 Institut, Universität  
 Stuttgart, Pfaffen-  
 waldring 57,  
 70569 Stuttgart

## ILLUSTRE SIMULATION

Mit fünf Supercomputern – darunter „SuperMUC“ in Garching – und einer Prozessorzeit von insgesamt 16 Millionen Stunden hat die Illustris-Kollaboration, ein Projekt von Forschern aus Deutschland und den USA, die Entwicklung des Kosmos über einen Zeitraum von 13 Milliarden Jahren simuliert. Während die „Millennium“-Simulation von 2005 nur die filamentartigen Strukturen der Dunklen Materie nachgebildet hatte, gelang es bei „Illustris“ nun auch, die heute beobachteten Häufigkeiten von unterschiedlichen Galaxientypen sowie deren chemische Zusammensetzung korrekt wiederzugeben. In der Abbildung entsprechen die Zeilen Rotverschiebungen  $z$  von 4 bis 0, die Zeit verläuft also von unten nach oben. Die Spalten zeigen von links nach rechts die Entwicklung der Dichte der Dunklen Materie, der Dichte und Temperatur des Gases sowie dessen Anteil an Elementen schwerer als Helium („Metallizität“).

M. Vogelsberger et al., *Nature* **509**, 177 (2014)



Illustris Collaboration