

für die Streuintensität enthält eine Integration über das „Zeitfenster“ $0 \leq t \leq \tau_{\text{str}}$. Anschaulich betrachtet, führt das Zusammenspiel von „schneller“ Streuung mit „zeitabhängiger“ Verschränkung dazu, dass sich die streuenden Partikel (hier: Protonen) „verstecken“. Überraschenderweise spielt dabei die (üblicherweise „unerwünschte“) Dekohärenz eine „konstruktive“ Rolle, was einem für die Quantendynamik bisher unbekanntem Vorgang entspricht [7]. Diesen kann man sich weiterhin, im Lichte des neuartigen „Doppelspaltexperimentes in der Zeit“ [8], als „Interferenz in der Zeitdomäne“ (statt im Ortsraum) veranschaulichen.

Die erwähnten Attosekunden-Experimente und ihre überraschenden Befunde dürften weitreichende Bedeutung auf ganz verschiedene Gebiete haben, wie z. B. Neutronenphysik, Streuung an offenen Quantensystemen, kondensierte Materie und Molekülphysik. Insbesondere deuten sie darauf hin, dass Verschränkung und Dekohärenz eine wichtige Rolle bei der Bildung

und dem Zerfall chemischer Bindungen zu spielen scheinen.

C. ARIS CHATZIDIMITRIOU-DREISMANN

- [1] C. A. Chatzidimitriou-Dreismann et al., Phys. Rev. Lett. **79**, 2839 (1997); Physik in unserer Zeit, Juli 2004, S. 174
- [2] C. A. Chatzidimitriou-Dreismann et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 057403 (2003)
- [3] J. J. Blostein et al., Physica **B 334**, 257 (2003); Phys. Rev. **B 71**, 054105 (2005)
- [4] B. Dorner, Nucl. Instr. Meth. **B**, im Druck (2006); J. Neutron Research **13**, 267 (2005); vgl. dazu M. Krzystyniak et al., Phys. Rev. **B 72**, 174117 (2005)
- [5] E. B. Karlsson et al., Europhys. Lett. **46**, 617 (1999)
- [6] J. Mayers und T. Abdul-Redah, J. Phys. Cond. Matter **16**, 4811 (2004)
- [7] C. A. Chatzidimitriou-Dreismann und S. Stenholm, in: V. M. Akulin et al. (Hrsg.), Decoherence, Entanglement and Information Protection in Complex Quantum Systems, Springer, Dordrecht (2005), S. 555
- [8] F. Lindner et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 040401 (2005); W. P. Schleich, Physik Journal, Aug. 2005, S. 22

Mit vereinten Kräften

Eine über 30 Jahre alte Vorhersage, nach der drei identische Teilchen gebunden sein können, obwohl jedes Paar für sich genommen ungebunden ist, wurde nun in kalten Bose-Gasen bestätigt.

Aus der klassischen Mechanik ist bekannt, dass für das Dreikörper-Problem keine analytische Lösung existiert. Daher lassen sich auch über die Quantenphysik dreier paarweise wechselwirkender Atome nur wenige allgemeine Aussagen treffen. Eine Ausnahme bilden identische Bose-Teilchen für den Fall, dass in jedem der drei Paar-Potentiale nur ein gebundener Zustand mit beliebig geringer Bindungsenergie besteht. Bereits 1935 hat Thomas gezeigt, dass selbst in diesem Fall das zugehörige Dreikörper-System immer mindestens einen Bindungszustand besitzt [1]. Im Jahr 1970 hat Vitali Efimov dieses Resultat in bemerkenswerter Weise erweitert [2]. Demnach

Prof. Dr. C. Aris Chatzidimitriou-Dreismann, Institut für Chemie (Sekt. C2), TU Berlin, 10623 Berlin

wächst die Zahl der gebundenen Dreikörper-Zustände sogar unbegrenzt, je näher die Zweiteilchen-Bindungsenergie an die Schwelle zum Aufbruch rückt. In einem solchen Grenzfall verhalten sich drei gebundene Teilchen wie sog. Borromäische Ringe, die miteinander



Borromäische Ringe, hier an der Kirche San Sigismondo in Cremona, symbolisieren den Zusammenhalt der Gesellschaft: Entfernt man einen, fallen alle auseinander. Ähnliches gilt für Drei-Teilchen-zustände aus kalten Cäsium-Atomen.

in einer Weise verschränkt sind, dass sie auseinander fallen, sobald nur einer der Ringe entfernt wird.

Die vorausgesetzte beliebig schwache Zweiteilchen-Bindung hat bisher eine eindeutige experimentelle Bestätigung von Efimovs scheinbar paradoxer Vorhersage verhindert. Dank der Erzeugung von kalten Bose-Gasen in Atomfallen haben sich die Aussichten für eine Verwirklichung dieser Ideen in letzter Zeit deutlich verbessert. In solchen Alkali-Systemen mit nK-Temperaturen und Dichten, die um fünf Größenordnungen geringer sind als die der Luft, hängen die Wechselwirkungen von den inneren Zuständen der Atome ab. Diese lassen sich mit Magnetfeldern auf-

grund des Zeeman-Effekts verändern. Durch geeignete Variation der Wechselwirkungen wurde mit der Erzeugung beliebig schwach gebundener, zweiatomiger, sog. Dimer-Moleküle [3] bereits ein Grundstein für die Erzeugung von Thomas-Efimov-Zuständen gelegt.

Anders als bei gewöhnlichen Molekülen sind die Atome in einem solchen Dimer in einem Mittel weiter voneinander entfernt als deren anziehender Potentialtopf dies in der klassischen Physik zuließe. Der Abstand der gebundenen Atome ist vielmehr durch einen einzigen Parameter a des Paar-Potentials bestimmt. Im Fall stoßender kalter Teilchen ist a als Streulänge bekannt und bestimmt den Radius des Streuquerschnitts. Eine Vergrößerung der Streulänge schwächt die Bindung eines Dimers, während dessen Wellenfunktion eine immer größere Ausdehnung proportional zu a erhält. In Efimovs Szenario wechselwirken auch drei gebundene Atome über solche Distanzen. Die Langreichweitigkeit der Wechselwirkung erklärt die große Zahl dieser Trimer-Zustände im Grenzfall $a \rightarrow \infty$, in Analogie zu z. B. den unendlich vielen Rydberg-Zuständen des Wasserstoff-Atoms. Efimovs Vorhersage ist also keineswegs paradox, sondern eine natürliche Folge der Quantenphysik bei niedrigen Energien.

Indem sie die Lebensdauern kalter Bose-Gase bestimmt haben, ist es der Arbeitsgruppe um Cheng Chin, Christoph Nägerl und Rudi Grimm aus Innsbruck gelungen, einen Thomas-Efimov-Zustand aufzuspüren [4]. Der gemessene Zerfallskanal ist als Dreikörper-Rekombination bekannt, bei der zwei Atome ein Dimer formen und die Bindungsenergie auf die molekulare Schwerpunktbewegung

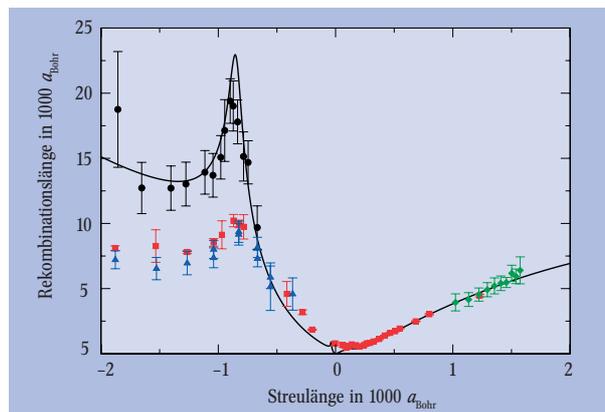
und ein drittes Teilchen verteilen. Aufgrund der Impulserhaltung fliegen im Allgemeinen sowohl das Dimer als auch das dritte Atom aus der Falle. In dem Innsbruck-Experiment wurde ein kaltes ^{133}Cs -Gas einem Magnetfeld ausgesetzt, welches eine weitgehende Veränderung der Streulänge a gestattet. Einer groben Regel nach ist die Rate der Dreikörper-Rekombination proportional zu a^4 , es sei denn, dass die Energie eines Thomas-Efimov-Zustands an die Schwelle zum Aufbruch in drei freie Atome gelangt.

Bei solchen Streulängen tritt eine resonante Erhöhung der Rekombination auf [5–7] (Abb. links). Aus Darstellungsgründen ist die vierte Wurzel der Rate in der Form einer sog. „Rekombinationslänge“ angegeben. Die Resonanz bei $a = -850 a_{\text{Bohr}}$ entspricht dem Verschwinden eines Trimer-Zustands, bei dem die effektive Paar-Wechselwirkung bereits so schwach ist, dass der Dimer-Zustand aufgebrochen ist. Daher ist die Streulänge negativ. Durch Verringerung der Temperatur von 250 nK bis 10 nK zeigt sich eine deutliche Schärfung der gezeigten Resonanz. Die Übereinstimmung der Messungen in verschiedenen Fällen zeigt, dass der Atomverlust wirklich der Dreikörper-Rekombination entstammt. Weder die genaue Position der Resonanz noch ihre Breite waren vor den Experimenten bekannt. Die Anpassungskurve [7] (s. Abb.) zeigt jedoch, dass alle Messungen mit einem möglichen theoretischen Verlauf der Rekombinationsrate als Funktion der Streulänge vereinbar sind.

Die Messung weiterer Thomas-Efimov-Resonanzen bei noch größeren Beträgen der Streulänge stellt eine Herausforderung für zukünftige Experimente dar. Deren Anwendung könnte in der Herstellung kalter metastabiler Trimere bestehen. Diese ließen sich z. B. in optischen Gittern mit genau drei Atomen pro Zelle durch Verringerung der negativen Streulänge durch eine Trimer-Resonanz hinweg formen [8]. Es ist auch denkbar, dass sich mit ähnlichen Methoden noch größere nicht-klassische Molekül-Komplexe aus vier oder mehr Bose- und auch Fermi-Atomen herstellen lassen. Untersuchungen der Existenz und Stabilität solcher Cluster sind von besonderem Interesse, da sie von

Dr. Thorsten Köhler, Department of Physics, University of Oxford, Clarendon Laboratory, Oxford, OX1 3PU, Großbritannien

Die Resonanz in der ^{133}Cs -Rekombinationslänge als Funktion der Streulänge (a_{Bohr} ist der Bohr-Radius) ist ein Hinweis auf einen gebundenen Drei-Teilchen-Zustand. Die Kreise entstammen Experimenten bei einer Temperatur von 10 nK, während Quadrate, Rauten und Dreiecke weiteren Messungen in Gasen bei Temperaturen bis 250 nK in verschiedenen Atomfallen entsprechen [4]. Die Kurve zeigt eine Anpassung eines theoretischen Modells [7] an die Messdaten.



der Bose- oder Fermi-Statistik der Atome und deren Massen abhängen sollten. Damit könnten die schon lang existierenden Arbeiten von Thomas und Efimov die Physik der Wenigteilchen-Systeme für neue Experimente mit kalten Gasen erschließen.

THORSTEN KÖHLER

- [1] *L. H. Thomas*, Phys. Rev. **47**, 903 (1935)
- [2] *V. Efimov*, Phys. Lett. **33B**, 563 (1970)
- [3] *J. Hecker-Denschlag, H.-C. Nägerl* und *R. Grimm*, Physik Journal, März 2004, S. 33
- [4] *T. Kraemer, M. Mark, P. Waldburger, J. G. Danzl, C. Chin, B. Engesser, A. D. Lange, K. Pilch, A. Jaakkola, H.-C. Nägerl* und *R. Grimm*, Nature **440**, 315 (2006)
- [5] *E. Nielsen* und *J. H. Macek*, Phys. Rev. Lett. **83**, 1566 (1999)
- [6] *B. D. Esry, C. H. Greene* und *J. P. Burke*, Phys. Rev. Lett. **83**, 1751 (1999)
- [7] *E. Braaten* und *H. W. Hammer*, cond-mat/0410417
- [8] *M. Stoll* und *T. Köhler*, Phys. Rev. **A 72**, 022714 (2005)

Präzision dank Polarisierung

Die präzisen Daten des WMAP-Satelliten zur Polarisierung der Hintergrundstrahlung ermöglichen neue Einsichten in die Entwicklung des Universums und die Struktur-entstehung darin.

Das heutige Universum ist erfüllt von der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB) [1], deren Temperatur sich durch die Expansion des Raumes im Laufe der Zeit auf 2,7 K verringert hat. Als das Photonengas aber noch 3000 K und heißer war, bildete es mit den Elektronen und Wasserstoffkernen ein sehr homogenes Plasma, dessen kleine Dichteschwankungen aus der Inflationsphase des Universums unmittelbar nach dem Urknall herrührten. Während nun die Wasserstoffkerne aufgrund der Gravitation von dichteren Regionen angezogen wurden, arbeiteten die Photonen mit ihrem Druck der Gravitation entgegen. Dies führte zu akustischen Schwingungen, die sich mit halber Lichtgeschwindigkeit ausbreiteten. In Gebieten, die durch die Schwingungen dichter waren, erhöhte sich die Temperatur des Photonengases leicht, in weniger dichten Gebieten war es ein wenig kälter. Mit der weiteren Abkühlung der Photonen rekombinierten die Elektronen und Protonen zu Wasserstoff, sodass das Universum durchsichtig wurde.

Dadurch wurden die Schwingungen und somit die geringen Temperaturunterschiede gleichsam konserviert. Da sich aus den anfänglichen (primordialen) Dichteschwankungen die heute sichtbaren Strukturen wie Galaxien oder Galaxienhaufen entwickelt haben, erlauben die Temperaturunterschiede wichtige Rückschlüsse auf die Strukturentstehung im Universum.

Mit geeigneten Detektoren werden diese leicht unterschiedlichen Temperaturen beim Blick in verschiedene Himmelsrichtungen sichtbar. Aus dem im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie berechneten Verhalten des Plasmas und des Photonengases sowie der gemessenen Verteilung der „kalten“ und „heißen“ Gebiete am heutigen Himmel lassen sich Rückschlüsse auf wichtige kosmologische Parameter ziehen. Dabei kann man zwar nicht vorhersagen, welcher Punkt am Himmel kalt oder heiß ist, wohl aber, wie kalte und heiße Punkte am Himmel in Abhängigkeit vom Winkel zwischen ihnen korreliert sind. Beispielsweise gibt es ein erstes Maximum in der Winkelkorrelation bei ungefähr einem Grad. Da dieser Winkel von den kosmologischen Parametern abhängt, zeigt der gemessene Wert u. a., dass das Universum annähernd räumlich flach ist.

Dem 1989 gestarteten COBE-Satelliten gelang es erstmals, die Temperaturfluktuationen des CMB zu bestimmen. Da seine Winkel-