

## ■ Gigantische Dreiteilchenbindung

Experimentell ist es gelungen, höhere Efimov-Zustände nachzuweisen und damit ihr diskretes Skalierungsverhalten zu überprüfen.

Eine Reihe von Experimenten zu Stoßprozessen in ultrakalten atomaren Quantengasen hat in den letzten Jahren neues Licht auf das quantenmechanische Dreikörperproblem geworfen. Eine besondere Faszination üben hierbei die sog. Efimov-Zustände aus [1–3]. Diese sollten in den unterschiedlichsten Systemen zu finden sein – in der Kern- wie in der Atomphysik. Sie zeichnen sich durch ganz erstaunliche und dazu noch universelle Eigenschaften aus. Erstaunlich deshalb, weil es für sie kein klassisches Analogon gibt. Zum Beispiel ist eine Bindung von drei Teilchen möglich, obwohl sie für zwei Teilchen nicht erlaubt ist. Erstaunlich auch deshalb, weil es die Efimov-Zustände, unabhängig von der Form des Wechselwirkungspotentials (es muss nur schnell genug abfallen), als immer gleiche unendliche Schar direkt unter der Dissoziationschwelle geben sollte. Zudem zeigt sich ein universelles diskretes Skalierungsverhalten: Von Zustand zu Zustand wächst die mittlere Bindungslänge um den Faktor  $F$ , und die Bindungsenergie sinkt um den Faktor  $F^2$  – für drei Teilchen mit gleicher Masse ist  $F = 22,7 \approx e^\pi$ . Damit ist klar, dass die Zustände sehr rasch immer größer und immer „fluffiger“ werden.

In den letzten acht Jahren gelang es, Efimov-Zustände in den unterschiedlichsten atomaren Systemen als Resonanzen zu beobachten [3]. Hierbei nutzt man aus, dass sich mithilfe von Feshbach-Resonanzen [4] die Zweiteilchen-Bindungsenergie (die Energie des Dimers) gegen Null und die Zweiteilchen-Bindungslänge und damit die Streulänge  $a$  zur Divergenz bringen lassen (Abb. 1). Bei Annäherung an die Schwelle zur Dissoziation sollte ein Efimov-Zustand nach dem anderen auftreten (rote Pfeile in Abb. 1), wenn man mithilfe eines Magnetfeldes und des Zeeman-Effekts über die linke Seite der Resonanz von  $1/a < 0$  nach  $1/a = 0$  fährt und

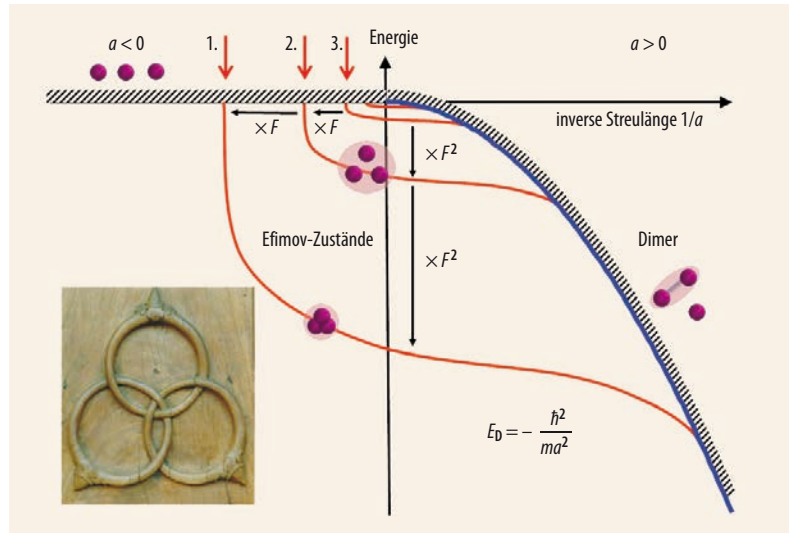


Abb. 1 Efimovs Szenario in der Nähe einer Streuresonanz ( $1/a \rightarrow 0$ ): Die Streulänge ist positiv, solange ein Zweiteilchenzustand existiert (Dimer, blaue Linie), und negativ, wenn er sich im Kontinuum aufgelöst hat. Die schraffierte Linie ist die Dissoziationschwelle des Trimers. Für  $a > 0$  ist sie durch die Bindungsenergie  $E_D$  des Dimers gegeben. Für  $a < 0$  entspricht sie dem Zustand dreier freier Teilchen. Die Efimov-Zustände (rote Linien) häufen sich um den Punkt  $1/a = 0$ . Experimentell lassen sich jene Kreuzungspunkte als Dreikörper-

dabei  $a$  immer um den Faktor  $F$  erhöht [3]. Die Zustände manifestieren sich als Dreiteilchen-Stoßresonanzen, d. h. in einer Überhöhung der Dreiteilchen-Stoßrate. Eine solche Efimov-Resonanz, nämlich die des untersten Efimov-Zustands, haben 2006 Physiker in Innsbruck in der Gruppe um R. Grimm und den Autor erstmals in einem ultrakalten Ensemble von Cäsium-Atomen gefunden [5]. Diese Beobachtung löste eine regelrechte Lawine von Aktivitäten aus [3]. Unter anderem erwies sich der Efimov-Effekt als „universeller“ als erwartet: Die Lage des Efimov-Grundzustands und damit die Lage der gesamten Zustandsschar ist für die typischen atomaren Van-der-Waals-Potentiale fixiert und nicht, wie angenommen, zufällig [6].

Nachdem die bisherigen Arbeiten primär den Efimov-Grundzustand untersucht hatten, erschienen

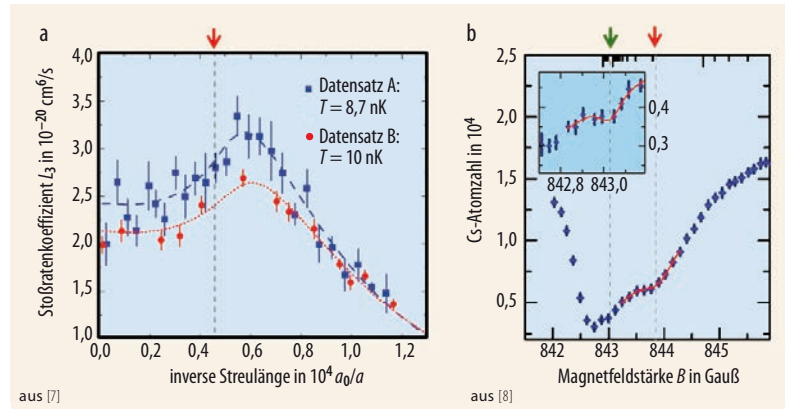
resonanzen beobachten, an denen sich die Efimov-Zustände der Schwelle nähern (rote Pfeile). Das diskrete Skalierungsverhalten ist durch den Faktor  $F$  charakterisiert. Inzwischen wurden neben dem Efimov-Grundzustand (1.) der erste (2.) und zweite angeregte (3.) Zustand beobachtet. Die borromäischen Ringe an der Kirche San Sigismondo in Cremona versinnbildlichen den Bereich  $a < 0$ : Obwohl keine Zweiteilchenbindung besteht, ist eine Dreiteilchenbindung möglich.

in den letzten Monaten gleichzeitig mehrere Arbeiten, die sich zum Ziel gesetzt hatten, die höheren Zustände zu finden und das durch den Faktor  $F$  charakterisierte diskrete Skalierungsverhalten zu überprüfen [7–9]. Zwei Zugänge haben sich ergeben: Für identische Bosonen mit einem verhältnismäßig großen Faktor  $F = 22,7$  konnten Grimm und seine Mitarbeiter Temperaturen unter 10 Nanokelvin in einer sehr schwachen Teilchenfalle mit einer harmonischen Einschlusslänge von weit über einem Mikrometer realisieren [7]. Solche extremen Bedingungen sind erforderlich, da der erste angeregte Efimov-Zustand eine geradezu gigantische mittlere Bindungslänge von einem Mikrometer aufweist und ansonsten nicht in die Falle passen würde. Dieser Efimov-Zustand lag bei einer Streulänge von  $a \approx 20\,000 a_0$  (Abb. 2a),  $a_0$  ist hierbei der Bohrsche Radius.

Die Arbeitsgruppen um Matthias Weidemüller in Heidelberg und um Cheng Chin in Chicago untersuchten dagegen den Efimov-Effekt in Atomgemischen von Cäsium- und Lithium-Atomen. Im Fall großer Massendifferenz sinkt der Faktor  $F$ : Für Li-Cs-Cs-Zustände beträgt er nur noch 4,9. Dann reichen Temperaturen von 200 bis 500 nK aus, um den ersten angeregten Efimov-Zustand klar zu identifizieren (Abb. 2b) [8, 9]. Beide Gruppen konnten sogar schwache „Dellen“ in ihren Daten ausmachen, die auf den zweiten angeregten Zustand hindeuten.

Die Innsbrucker Gruppe bestimmte den Skalierungsfaktor  $F$  zu  $21,0 (\pm 1,3)$  – ein Ergebnis, das recht gut, aber nicht perfekt mit dem idealen Wert übereinstimmt. Eine solche Abweichung verwundert aber nicht, da für den untersten Efimov-Zustand Korrekturen zur Bindungsenergie zu erwarten sind. An dieser Stelle sind jetzt die Theoretiker gefordert. Für die Li-Cs-Gemische wurde  $F$  zu  $5,8 (\pm 1,0)$  und  $4,8 (\pm 4)$  bestimmt. Gemäß der Heidelberger Messungen nähern sich die untersten drei Li-Cs-Cs-Efimov-Zustände bei  $a_1 \approx 320 a_0$ ,  $a_2 \approx 1900 a_0$  und  $a_3 \approx 14000 a_0$  der Schwelle zur Dissoziation.

Allgemein ist zu erwarten, dass der Wert von  $F$  für höhere



**Abb. 2** Atomverlustmessungen in der Nähe höherer Efimov-Resonanzen: Der Dreikörper-Stoßratenkoeffizient  $L_3$  für das Cs-Dreikörperproblem [5] zeigt eine Resonanz bei einer Streulänge von  $a \approx 20000 a_0$  (a) [7]. Hier tritt der erste angeregte Efimov-Zustand an die Dissoziationsschwelle. Der rote Pfeil zeigt die theoretisch erwartete Position der Resonanz für  $T = 0 \text{ K}$  an. Die Abweichung ist größtenteils auf Temperatureffekte im Experi-

ment zurückzuführen. Betrachtet man die Atomanzahl in der Falle für das Li-Cs-Cs-System nach 400 ms Haltezeit als Funktion des Magnetfeldes, ist die Efimov-Resonanz zum ersten angeregten Zustand (roter Pfeil) gut zu erkennen (b). Ein weiterer leichter Einbruch in der Atomanzahl bei 843 Gauß (Inset) deutet auf den zweiten angeregten Efimov-Zustand (grüner Pfeil).

Efimov-Zustände immer besser mit dem idealen Wert übereinstimmt. Beim Cs-Cs-Cs-System mit  $F = 22,7$  dürfte das allerdings sehr schwer zu realisieren sein: Für den nächsten Efimov-Zustand wären Temperaturen um 10 Piko-kelvin erforderlich. Das wäre ein Temperaturweltrekord! Zudem ist es bislang noch niemandem gelungen, eine Teilchenfalle mit einer Einschlusslänge von mehreren 10 Mikrometern zu realisieren. Hier

ist der Erfindergeist der Physiker gefragt.

Im Li-Cs-Cs-System mit  $F = 4,9$  ist das natürlich viel leichter. Dort ist das Experiment derzeit durch die simple Tatsache begrenzt, dass die beiden Gaswolken bei zu tiefen Temperaturen nicht mehr überlappen, weil sie aufgrund der Schwerkraft unterschiedlich absacken. Dieses Problem lässt sich im Prinzip mithilfe von atomspezifischen Laserlichtkräften lösen. Einer eindeutigen Beobachtung des zweiten angeregten Efimov-Zustands und auch eines dritten und eventuell sogar eines vierten sollte damit eigentlich nichts im Wege stehen.

Hanns-Christoph Nägerl

## KURZGEFASST

### ■ Verschränkung im Diamant

Künstliche Diamanten mit Stickstoff-Fehlstellenzentren sind bereits hinlänglich bekannt, doch nun haben Ulmer Physiker auch in Kristallen mit Silizium-Fehlstellen (SiV-Zentren) nützliche Eigenschaften entdeckt: Zwei separate SiV-Zentren emittieren nämlich Photonen mit identischen Eigenschaften. Diese Photonen sind ununterscheidbar – eine Voraussetzung für Verschränkung.

L. J. Rogers et al., Nature Comm. 5, 4739 (2014)

### ■ Im Licht der Sonnenneutrinos

Am Borexino-Detektor im Gran-Sasso-Untergrundlabor ist es gelungen, erstmals Neutrinos nachzuweisen, die im Inneren der Sonne entstehen, wenn zwei Wasserstoffatome zu schwerem Wasserstoff verschmelzen. Diese Fusionsreaktion ist Startpunkt für die sog.

Proton-Proton-Kette, bei der Wasserstoffatome in einem mehrstufigen Prozess zu Helium verschmelzen und die 99 Prozent der Sonnenenergie liefert. Bisher ließ sich nur über Licht und Wärme auf die Sonnenenergie schließen, doch diese Strahlung braucht über 100 000 Jahre, um an die Oberfläche zu gelangen – Neutrinos benötigen dafür nur wenige Sekunden.

G. Bellini et al. (Borexino Coll.), Nature 512, 383 (2014)

### ■ Massiges Teilchen

Mithilfe einer verbesserten Analyse zweier Zerfallskanäle konnte die ATLAS-Kollaboration am LHC den systematischen Messfehler bei der Bestimmung der Higgs-Masse um den Faktor 3 reduzieren. Demnach beträgt die Higgs-Masse  $m_H = 125,36 \pm 0,37 \text{ GeV}/c^2$ .

G. Aad et al. (ATLAS Coll.), Phys. Rev. D 90, 052004 (2014)

- [1] V. Efimov, Phys. Lett. B 33, 563 (1970)
- [2] V. Efimov, Sov. J. Nucl. Phys. 12, 589 (1971)
- [3] H.-C. Nägerl, Physik Journal, Oktober 2009, S. 18
- [4] J. Hecker Denschlag, H.-C. Nägerl und R. Grimm, Physik Journal, März 2004, S. 33
- [5] T. Kraemer et al., Nature 440, 315 (2006)
- [6] M. Berninger et al., Phys. Rev. Lett. 107, 120401 (2011)
- [7] B. Huang, L. A. Sidorenkov, R. Grimm und J. M. Hutson, Phys. Rev. Lett. 112, 190401 (2014)
- [8] R. Pires et al., Phys. Rev. Lett. 112, 250404 (2014)
- [9] S.-K. Tung et al., arXiv:1402.5943 (2014)