

■ Wenn drei sich binden

Mit den Efimov-Zuständen existieren quantenmechanisch gebundene Dreiteilchenzustände, deren universelle und überraschende Eigenschaften sich mit kalten Quantengasen untersuchen lassen.

Vor fast 40 Jahren machte Vitali Efimov eine erstaunliche Entdeckung, als er theoretisch das quantenmechanische Dreikörperproblem untersuchte [1]. Er fand eine analytisch beschreibbare Familie von Lösungen der Dreiteilchen-Schrödinger-Gleichung mit universellen und sehr überraschenden Eigenschaften. Universell deshalb, weil die Lösungen nicht von der konkreten Form des Wechselwirkungspotentials abhängen – das Potential muss nur schnell genug abfallen. Überraschend, da schon in der klassischen Mechanik nur ganz spezielle Lösungen des Dreikörperproblems bekannt sind. Warum sollte es in der Quantenmechanik plötzlich allgemeingültige Lösungen geben? Auch dass gebundene Dreiteilchenzustände selbst dann möglich sind, wenn keine gebundenen Zweiteilchenzustände existieren, überrascht. Anfänglich schenkte man Efimovs Rechnungen, die er für Nukleonen-Systeme im Rahmen der Kernphysik durchgeführt hatte, keinen Glauben. Seine Ableitung beruhte auf einer Reihe schwer kontrollierbarer Näherungen. Doch mittlerweile werden Efimovs Resultate als ein Höhepunkt der Quantenmechanik gefeiert. Sie führen nämlich zu einem neuen Typ der chemischen Bindung, bei der ein Teilchen die Bindung zwischen den beiden anderen vermittelt. Dies entspricht



P. Cromwell

Abb. 1 Borromäische Ringe, hier an der Kirche San Sigismondo in Cremona, symbolisieren den Zusammenhalt der Gesellschaft: Entfernt man einen, fallen alle auseinander.

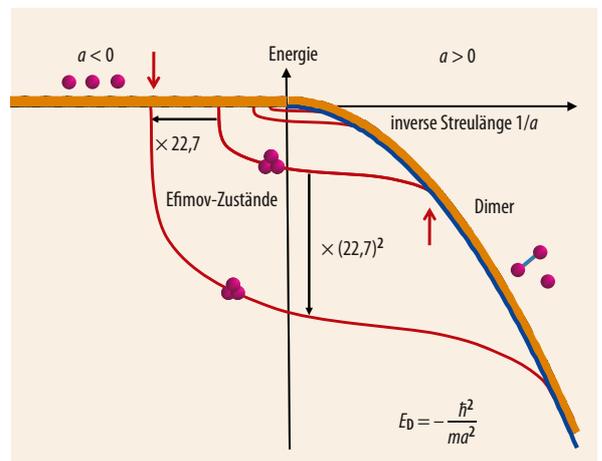
den sog. Borromäischen Ringen, die auseinanderfallen, wenn man einen Ring entfernt (Abb. 1).

Was zeichnet nun die nach Efimov benannten Zustände aus? Sie treten auf, wenn die Bindung zwischen Teilchenpaaren schwächer und schwächer wird (Abb. 2). Angenommen, man könnte an der Stärke des Potentials drehen, so würde an der Schwelle zur Dissoziation, wenn die Teilchen also nur noch ganz schwach gebunden sind, der Reihe nach ein Efimov-Zustand nach dem anderen erscheinen. Ein verschwindender Zweiteilchenzustand bedeutet resonante Zweiteilchenstreuung, die sich durch die atomare Streulänge a charakterisieren lässt. Efimov-Zustände tre-

ten also im Grenzwert a gegen unendlich auf. Das Faszinierende ist, dass diese Zustände selbstähnlich und skaleninvariant sind: Immer wenn sich a um einen festen Faktor F erhöht, tritt der nächste Efimov-Zustand auf (für drei Teilchen mit gleicher Masse gilt $F \approx e^\pi \approx 22,7$). Die Bindungsenergie verringert sich von Zustand zu Zustand um den Faktor F^2 . Interessanterweise legt die Kenntnis eines der Kreuzungspunkte, an dem einer der Efimov-Zustände an die Schwelle gelangt (rote Pfeile in Abb. 2), die Lage aller anderen Kreuzungspunkte fest. Daher gibt es nur einen freien Parameter in der Theorie. Überraschend ist, dass für endliches $a < 0$ kein Zweiteilchenzustand existiert, sehr wohl aber eine endliche Zahl von Efimov-Zuständen. Hier wirkt das dritte Teilchen wie ein Austauschboson.

Was bedarf es nun, um die Efimov-Zustände im Experiment zu beobachten? Zum einen ist ein kurzreichweitiges Paarpotential erforderlich, das resonante Streuung erlaubt. Ein solches findet sich häufig in der Physik, sei es durch die starke Wechselwirkung in der Kernphysik oder durch die schwache van-der-Waals-Bindung in der Atom- und Molekülphysik. Maximal ein Teilchen darf geladen sein, da sonst die langreichweitige Coulomb-Wechselwirkung den Effekt zerstört. Zum anderen

Abb. 2 Efimov-Zustände treten auf, wenn die inverse Streulänge $1/a$ klein ist. Die Streulänge ist positiv, solange ein Zweiteilchenzustand existiert („Dimer“, blaue Linie, mit Masse m und Bindungsenergie E_D), und negativ, wenn er sich im Kontinuum aufgelöst hat (links). Die orange Linie ist die Dissoziationschwelle für Trimere. Für $a > 0$ ist sie durch die Bindungsenergie E_D des Dimers gegeben. Für $a < 0$ entspricht sie dem Zustand drei freier Teilchen. Die Efimov-Zustände (rote Linien) häufen sich um den Punkt $1/a = 0$. Im Experiment lassen sich jene Kreuzungspunkte beobachten, an denen die Efimov-Zustände an die jeweilige Schwelle kommen (rote Pfeile, exemplarisch). Bei massegleichen Teilchen hängen die Zustände über den universellen Faktor 22,7 zusammen.



müssen die Energien niedrig sein, da die Efimov-Zustände nur sehr schwach gebunden sind. Liefße sich das Potential einstellen, könnte man die Zustände „durchfahren“. In der Kernphysik ist das nicht möglich, sodass man dort bei fixer Streulänge arbeiten muss. Für He^4 , das schwach gebundene Dimere bilden kann, sagen hochpräzise Rechnungen genau einen Efimov-Zustand voraus. Dieser wurde bislang aber nicht beobachtet.

In der Atomphysik gibt es jedoch abstimmbare und damit gut kontrollierbare Streuresonanzen in Hülle und Fülle. Auf dem Gebiet der ultrakalten Quantengase sind diese als Feshbach-Resonanzen bekannt [2]. Mithilfe des Zeeman-Effekts lässt sich der Zustand von zwei aneinander streuenden Atomen an einen gebundenen Molekülzustand, ein Dimer, koppeln. Effektiv ist es damit möglich, den Molekülzustand über die Änderung eines externen Magnetfelds bis an die Schwelle heranzuführen und über die Resonanz hinweg in den Bereich $a < 0$ vorzudringen. Kommt ein Efimov-Zustand an die Dreiteilchendissoziationsschwelle (linker roter Pfeil in Abb. 2), erhöht sich die Drei-Körper-Stoßrate drastisch [3]. Diese sog. Efimov-Resonanz lässt sich bei hinreichend tiefen Temperaturen weit unter einem Mikrokkelvin gut über die damit verbundenen resonanten Teilchenverluste in Atomfallen ausmessen. Eine solche Messung, durchgeführt an einem ultrakalten Ensemble von Cäsium-Atomen, erbrachte 2006 für den Fall identischer Bosonen erstmals den Nachweis des Efimov-Zustands [3]. Ganz ähnlich lässt sich beobachten, wie der Efimov-Zustand an die Atom-Dimer-Schwelle koppelt. Dazu präpariert man ein ultrakaltes Gemisch aus Atomen und Dimeren und misst wiederum die inelastische Stoßrate. Dies liefert zusätzliche Information über das Efimov-Spektrum, die in Einklang mit den Messungen an der Drei-Atom-Schwelle stehen sollte. Hier gelang kürzlich mit der Beobachtung einer Atom-Dimer-Efimov-Resonanz mit ultrakaltem Cäsium ein Durchbruch [4].

Zentrale Fragen

In den letzten zwölf Monaten gab es eine rasante Entwicklung zu drei zentralen Fragen im Zusammenhang mit Efimov-Zuständen: Kann man das Skalierungsverhalten ausmessen, d. h. den nächsten Efimov-Zustand beobachten? Dies ist insofern wichtig, als dass strikt genommen das Skalierungsverhalten nur asymptotisch gilt, also für die höheren Efimov-Zustände. Und was sind die allgemeinsten Voraussetzungen, damit Efimov-Zustände auftreten? Die Theorie sagt voraus, dass bei drei Teilchen nur zwei der maximal drei möglichen Wechselwirkungen resonant sein müssen. Zwei Teams um Massimo Inguscio am LENS in Florenz haben sich diesen beiden Fragen gewidmet. Im Hinblick auf das Skalierungsverhalten konnten sie zwar den nächsten Efimov-Zustand nicht direkt beobachten, aber sie entdeckten einen zweiten Kreuzungspunkt, an dem ein Efimov-Zustand an die Atom-Dimer-Schwelle gelangt [5]. Erstaunlich ist, dass dieser Nachweis nicht über den Umweg eines Atom-Dimer-Gemisches gelang, sondern sich direkt in Dreikörperstößen als Stoßeffect zweiter Ordnung beobachten ließ. Ein zweites Experiment hat den Nachweis des Efimov-Effekts für nicht identische Teilchen erbracht [6]. Dabei zeigt sich, dass es für ein mehrkomponentiges Gemisch von Teilchen ausreicht, dass zwei der drei möglichen paarweisen Wechselwirkungen resonant sind. Bei einem zweikomponentigen Gemisch, in diesem Fall aus Kalium und Rubidium, muss demnach nur die K-Rb-Streulänge groß werden. Für die Efimov-Zustände sind daher KKRB oder KRBRb möglich. Die neuesten Entwicklungen zeigen, dass der Efimov-Effekt auch bei Fermionen auftritt. Diese Beobachtung machten gleichzeitig die Gruppen um Joachim Selim in Heidelberg [7] und um Kenneth O'Hara an der Penn State University (USA) [8]. Sie präparierten dreikomponentige Spingemische von Fermionen, für die mindestens zwei der Wechselwirkungen resonant sind, und beobachteten mehrere Efimov-Resonanzen.

Schließlich stellt sich noch die Frage, ob es eine Verallgemeinerung der Efimov-Zustände zu vier und mehr Teilchen gibt. Oder ist der Efimov-Effekt ein reiner Dreiteilcheneffekt? Neue theoretische Überlegungen zum Vierkörperproblem haben hier zu einer großen Überraschung geführt. Chris H. Greene und Mitarbeiter am JILA in Boulder (USA) fanden heraus, dass Efimov-Trimere nicht allein auftreten [9]. Vielmehr erscheinen sie immer zusammen mit einem Paar von Vierteilchenzuständen. Erstaunlich ist, dass es für die Beschreibung dieser Tetramere keines zusätzlichen Parameters bedarf. Hier zeigt sich in beeindruckender Weise die Universalität des Efimovschen Szenarios. Ein Nachweis der Tetramere ließ nicht lange auf sich warten [10]. Er gelang in Innsbruck und wurde veröffentlicht, bevor der theoretische Vorschlag überhaupt offiziell erschien!

Nun darf man auf weitere Messungen gespannt sein. Die Gruppe von Randall Hulet an der Rice University (USA) präsentierte kürzlich noch unveröffentlichte Daten, die eine Fülle von Efimov-Resonanzen zeigen. Mit verbesserter Abstimmbarkeit und bei ultratiefen Temperaturen unter einem Nanokelvin ist noch viel interessante „Wenig-Teilchen-Quantenphysik“ zu erwarten.

Hanns-Christoph Nägerl

a. Univ. Prof. Dr. Hanns-Christoph Nägerl, Universität Innsbruck, Technikerstr. 25, 6020 Innsbruck, Österreich

- [1] V. Efimov, Phys. Lett. **B 33**, 563 (1970); Sov. J. Nucl. Phys. **12**, 589 (1971)
- [2] J. Hecker Denschlag, H.-C. Nägerl und R. Grimm, Physik Journal, März 2004, S. 33
- [3] T. Kraemer et al., Nature **440**, 315 (2006), vgl. Th. Köhler, Physik Journal, Mai 2006, S. 17
- [4] S. Knoop et al., Nature Physics **5**, 227 (2009)
- [5] M. Zaccanti et al., Nature Physics **5**, 586 (2009)
- [6] G. Barontini et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 043201 (2009)
- [7] T. B. Ottenstein et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 203202 (2008)
- [8] J. R. Williams et al., arXiv:0908.0789 (2009), Phys. Rev. Lett. im Druck
- [9] J. von Stecher, J. P. D'Incao und C. H. Greene, Nature Physics **5**, 417 (2009)
- [10] F. Ferlaino et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 140401 (2009)