

Universalität in der Kernphysik



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Abstrakt zum Seminarvortrag von Thilo Egenolf
Theorieseminar: Kernstruktur und Nukleare Astrophysik
09. Juni 2016

Einführung

Betrachtet man Streuprozesse von Teilchen mit kurzreichweitiger Wechselwirkung und einer Streulänge, die groß ist im Verhältnis zur Reichweite der Wechselwirkungen, dann weisen diese im Grenzfall niedriger Energien Eigenschaften auf, die unabhängig von der Reichweite und den Eigenschaften der kurzreichweitigen Wechselwirkung sind.

Dieses Verhalten, dass Eigenschaften von Systemen nicht von allen Systemdetails abhängen, wird als Universalität bezeichnet. Solche Universalitätsklassen mit gleichem Verhalten, aber unterschiedlichen Systemdetails lassen sich in vielen Bereichen der Physik beobachten, unter anderem auch in der statistischen Mechanik. Dort hat zum Beispiel der Ordnungsparameter nahe eines Phasenübergangs, also eines kritischen Wertes des Systemparameters, ein universelles Verhalten, das sich in ganz unterschiedlichen Systemen wiederfindet.

In der Kernphysik ist der Streuprozess zweier Teilchen im Grenzfall niedriger Energien das einfachste System mit universellen Eigenschaften, die durch die S-Wellen-Streulänge a beschrieben werden. Das bekannteste Beispiel für ein solches System ist das Deuteron. Es besitzt einen gebundenen Zustand, dessen Bindungsenergie nahe der Bindungsenergie liegt, die für solche Universalitätssysteme zweier Teilchen identischer Masse vorhergesagt wurde. Auch im Grenzfall divergierender Streulängen bleibt bei Zweikörper-Systemen dieser eine gebundene Zustand theoretisch vorhanden.

Dreikörper-Systeme besitzen dagegen in diesem Grenzfall unendlich viele gebundene Zustände. Dieses Verhalten wurde zuerst 1970 von Vitaly Efimov für drei identische Bosonen theoretisch abgeleitet und daher als Efimov-Effekt bezeichnet. Die Bindungsenergien der sogenannten Efimov-Zustände weisen eine diskrete Skalensymmetrie auf, sodass die Beschreibung des Spektrums einen weiteren universellen Dreikörper-Parameter zusätzlich zur Zweikörper-Streulänge erfordert.

Theoretische Beschreibung des Efimov-Effekts

Eine theoretische Herleitung des Efimov-Spektrums für den Grenzfall divergierender Streulängen, aber auch für große, aber endliche Streulängen ist durch Lösung der Schrödinger-Gleichung formuliert in hypersphärischen Koordinaten möglich. Aus dieser Formulierung lassen sich auch weitere universelle Observablen ableiten. Zum Beispiel weist der Atom-Dimer-Wirkungsquerschnitt ebenfalls eine diskrete Skalensymmetrie auf.

Andere auftretende Korrelationen lassen sich anhand dieser Herangehensweise nicht erklären. Ein Beispiel eines solchen universellen Zusammenhangs ist die Korrelation zwischen der Bindungsenergie des Tritons und der Spin-Doublet Neutron-Deuteron-Streulänge, die Phillips-Linie genannt wird. Die Ableitung dieser Korrelationen ist durch die Formulierung des Efimov-Effekts in der effektiven Feld-Theorie möglich.

Experimentelle Beispiele

Der erste experimentelle Nachweis eines Efimov-Zustandes erfolgte 2006 durch Kraemer et al. (Nature 440:315) bei der Untersuchung von ultrakalten ^{133}Cs -Atomen. Durch die Weiterentwicklung der verwendeten optischen Dipolfallen folgten weitere Nachweise von Efimov-Zuständen auch in anderen ultrakalten Gasen. Beobachtet werden dabei Maxima der Dreikörper-Rekombinationsrate abgeleitet aus der zeitabhängigen Atomanzahl in der Falle. Die benötigte Variation der Streulänge wird durch die Variation eines externen magnetischen Feldes nahe einer Feshbach-Resonanz erreicht. Der Nachweis von drei aufeinanderfolgenden Efimov-Zuständen gelang erstmals Tung et al. 2014 (PhysRevLett.113.240402) und Ulmanis et al. 2016 (PhysRevA.93.022707) bei der Untersuchung eines ultrakalten Li-Cs-Gases. Mit diesen Ergebnissen war auch erstmals die experimentelle Beobachtung der diskreten Skalensymmetrie der Efimov-Zustände möglich. Eine weiteres kernphysikalisches System, das universelle Eigenschaften aufweist, sind sogenannte Halo-Kerne. Diese bestehen aus einem stark gebundenen Kern, dessen Struktur keinen Einfluss auf die universellen Eigenschaften hat, und einem oder mehreren schwach gebundenen Valenznukleonen. Der kleinste Zweikörper-Halo-Kern ist das bereits genannte Deuteron. Beispiele für Dreikörper-Halo-Kerne sind ^6He und ^{20}C . Letzterer ist durch die reinen S-Wellen-Bindungszustände der Valenznukleonen auch ein Kandidat für Efimov-Zustände.
