

Vom Fußball zum Rugbyball

Zirkoniumisotope verändern ihre Gestalt durch Anregung und mit wachsender Neutronenzahl.

Dr. Marcus Scheck, School of Engineering and Computing, University of the West of Scotland, Paisley Campus, HighStreet, Paisley, PA1 2BE, UK

Atomkerne bilden als ein gebundenes Quantensystem eine Schalenstruktur aus, die der Struktur von Elektronenhüllen im Atom ähnelt. Allerdings gibt es im Kern zwei Arten von Bausteinen, die jeweils eine eigene Schalenstruktur füllen: Protonen und Neutronen. Bei magischen Kernen liegt ein Schalenabschluss für eine Sorte der Nukleonen vor: Die äußere Schale ist komplett gefüllt. Besonders stabil gebunden sind doppelmagische Kerne, bei denen dies für Protonen und Neutronen gleichzeitig zutrifft. Sie zeichnen sich durch eine sphärische Form aus. Je mehr Valenznukleonen ein Kern besitzt, umso mehr sollte seine Gestalt bereits im Grundzustand deformiert sein. Mit Hilfe theoretischer Rechnungen ließ sich kürzlich erklären, warum sich die Form von Zirkoniumisotopen mit wachsender Neutronenzahl sprunghaft von einer Kugel zu einem Rugbyball verändert [1]. Fast gleichzeitig zeigte ein Experiment, dass das Isotop ^{96}Zr seine Gestalt bei verschiedenen Anregungsenergien verändert [2].

Eine japanische Gruppe hat sich mit der Form der Zirkoniumisotope ($Z = 40$) befasst [1]. Ausgehend von der magischen Neutronenzahl $N = 50$ beim Isotop ^{90}Zr behalten die geradzahigen Zirkoniumisotope mit wachsender Anzahl von Valenzneutronen im Grundzustand ihre sphärische Gestalt. Die experimentell bestimmten Niveauschemata und Übergangsraten zwischen den Kernzuständen belegen, dass dies selbst für ^{98}Zr mit acht Valenzneutronen noch gilt. Erst beim Isotop ^{100}Zr kommt es schlagartig zu einem deformierten rugbyballförmigen Grundzustand (Abb. 1). Das ist ungewöhnlich, weil dieser Übergang in den meisten Isotopenketten graduell vonstatten geht. Die Rechnungen der japanischen Gruppe zeigten, dass die spezielle

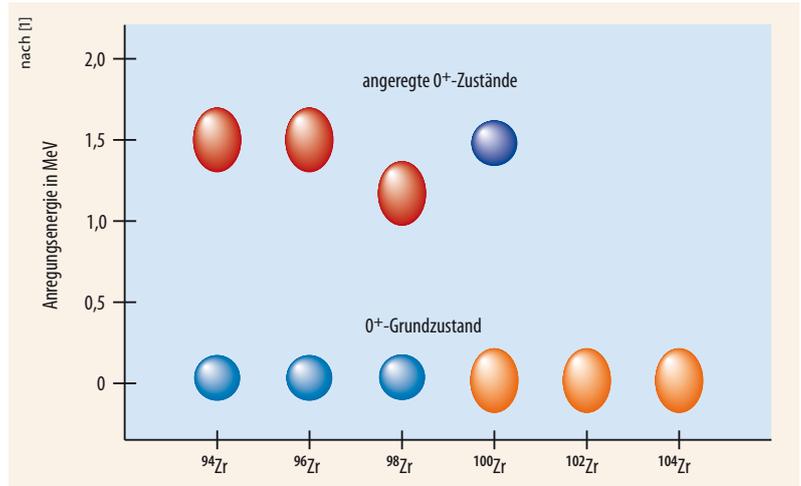


Abb. 1 Die Isotope ^{94}Zr , ^{96}Zr und ^{98}Zr besitzen einen 0^+ -Grundzustand sphärischer Gestalt, während angeregte 0^+ -Zustände einem Rugbyball ähneln.

Diese Formkoexistenz verändert sich beim Übergang zu ^{100}Zr : Die beiden Gestalten des Kerns tauschen ihre energetische Lage aus.

Gruppe zeigten, dass die spezielle Schalenstruktur der Zirkoniumisotope für diesen Effekt verantwortlich ist. Bei den Protonen ist die letzte besetzte Schale durch eine große Energielücke von den anderen Unterschalen getrennt; bei den Neutronen ist die Lücke zwischen den Schalen recht groß, die durch die wachsende Zahl von Neutronen nach und nach gefüllt werden. Abhängig von den Besetzungszahlen wirkt zwischen Protonen und Neutronen eine Tensorkraft, die wie die Spin-Bahn-Wechselwirkung die Lage der Schalen im Niveauschema verändern bzw. die Reihenfolge vertauschen kann. Kommen in einer Isotopenkette Neutronenpaare hinzu, verändert sich die Besetzungszahl der Schalen, und es kann zu einer so genannten Typ-I-Schalenentwicklung kommen. Ändern sich bei einem Isotop die Besetzungszahlen, sobald es in einem angeregten Zustand vorliegt, spricht man dagegen von einer Typ-II-Schalenentwicklung [3].

Beim Vergleich der Isotope ^{98}Zr und ^{100}Zr , fällt auf, dass die Protonen die $g_{9/2}$ - und die $f_{5/2}$ -Schale sehr unterschiedlich besetzen. Der 0^+ -Grundzustand ist für ^{98}Zr sphärisch, während der angeregte 0^+ -Zustand die Form eines Rugbyballs annimmt. Die Schalenentwicklung sorgt in ^{100}Zr dafür, dass

aus [2]

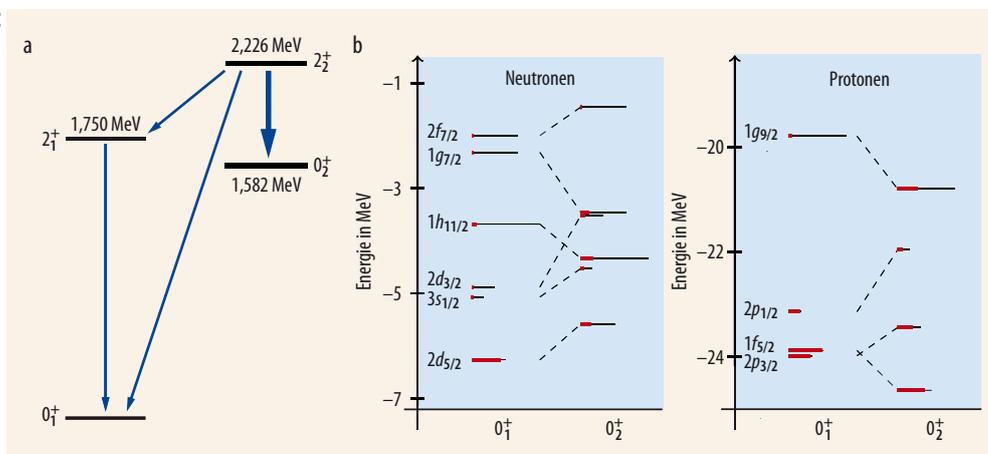


Abb. 2 Die Übergangsstärken (Pfeildicke) zwischen den angeregten Zuständen und dem Grundzustand von ^{96}Zr belegen, dass sich unterhalb von 2,3 MeV zwei Bandenstrukturen ausbilden (a). Die Schalenstrukturen der Neutronen und Protonen des Grund-

zustands (0^+) und des angeregten Zustands (0_2^+) unterscheiden sich deutlich (b). Weil sich die Besetzungszahlen der Schalen verändern (rot), verschiebt sich ihre energetische Lage zueinander (gestrichelt), und der Kern verändert seine Form.

Physik Journal 16 (2017) Nr. 1 © 2017 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

der Grundzustand deformiert und der angeregte Zustand kugelförmig ist. Die Rechnungen sagen voraus, dass auch in den anderen Zirkoniumisotopen diese sog. Formkoexistenz vorliegen sollte und sich die Gestalten des Grundzustands und der angeregten Zustände unterscheiden.

Dieses Phänomen ist für viele Atomkerne bekannt [4]. So besitzt der Kern ^{186}Pb einen kugelförmigen 0^+ -Grundzustand und unterhalb einer Anregungsenergie von 1,5 MeV zwei weitere 0^+ -Zustände, einen mit der Form eines Rugbyballs und einen mit diskusartiger Gestalt [5]. In Darmstadt untersuchten Christoph Kremer und Kollegen an ^{96}Zr , wie die Formkoexistenz in den Zirkoniumisotopen ausgeprägt ist [2]. Ziel der experimentellen Arbeit war es, niederenergetische Bandenstrukturen zu beobachten. Unter einer Bandenstruktur versteht man eine Reihe von Kernzuständen z. B. mit den Spins 0^+ , 2^+ , 4^+ etc., welche die gleiche Schalenstruktur aufweisen und mit großer Wahrscheinlichkeit ineinander übergehen. Um die Übergangsstärken zwischen 0^+ - und 2^+ -Zuständen zu bestimmen, nutzten die Forscher die inelastische Elektronenstreuung. Am supraleitenden Darmstädter Linearbeschleuniger S-DALINAC standen Elektronen mit Energien von 43 und 69 MeV zur Verfügung. Ein hochauflösendes Magnetspektrometer diente dazu, Elektronen nachzuweisen, die an einer dünnen Zirkoniumfolie gestreut wurden. Aus den gemessenen Übergangsstärken leitet sich ab, dass die 0^+ - und 2^+ -Zustände unterhalb einer Anregungsenergie von 2,3 MeV zwei Bandenstrukturen bilden (Abb. 2a), welche zu einer sphärischen und einer deformierten Gestalt des Kerns gehören. Übergänge zwischen den Banden sind wenig wahrscheinlich, was auf eine schwache Mischung der Zustände schließen lässt: In ^{96}Zr liegt wie theoretisch vorhergesagt Formkoexistenz vor.

Diese Koexistenz lässt sich mit Hilfe der Typ-II-Schalentwicklung erklären (Abb. 2b): Für

die angeregten Zustände wird ein Protonenpaar in die zuvor leere und energetisch isoliert gelegene $g_{9/2}$ -Schale gehoben. Durch die Tensorkraft entsteht eine repulsive Wechselwirkung mit den Neutronen, die in ^{96}Zr die $d_{5/2}$ -Schale vollständig füllen. Daher rückt die $d_{5/2}$ -Schale näher an die energetisch höher gelegenen Schalen heran, sodass die Neutronen mit vergleichsweise geringer Energie in diese wechseln können. Die neu strukturierte Anordnung der Neutronenschalen führt also zu veränderten Besetzungszahlen. Nun bewirkt wiederum die Tensorkraft, dass die $g_{9/2}$ -Schale der Protonen enger an ihre Nachbarn mit niedrigerer Energie heranrückt, sodass es auch hier zu einer veränderten Besetzung der Schalen kommt. In einem dynamischen Prozess beeinflusst dies wiederum die relative Lage der Neutronenschalen, und eine sich selbst verstärkende Schalenentwicklung setzt ein. Als Konsequenz daraus befinden sich zunächst sehr viele Besetzungszustände in einem kleinen Energieintervall. Um diese Entartung aufzuheben und die Zustandsdichte zu erniedrigen, reagiert der Kern durch eine spontane Symmetriebrechung von der sphärischen zur rugbyballartigen Form. Dieses Verhalten zeigen auch Moleküle (Jahn-Teller-Effekt).

Die experimentelle Beobachtung der Darmstädter Gruppe macht den Kern ^{96}Zr zu einem Paradebeispiel, um die Formkoexistenz in Atomkernen mit Typ-II-Schalentwicklung zu beschreiben. Dies hat auch allgemein zum Verständnis beigetragen, wie eine zustandsabhängige, dynamische Schalenstruktur im Vielteilchen-Quantensystem Atomkern entsteht und sich auf Parameter wie die Form des Kerns auswirkt.

Marcus Scheck

- [1] T. Togashi et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 172502 (2016)
- [2] C. Kremer et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 172503 (2016)
- [3] Y. Tsunoda et al., Phys. Rev. C **89**, 031301(R) (2014)
- [4] J. L. Wood und K. Heyde, Rev. Mod. Phys. **83**, 1467 (2011)
- [5] A. N. Andreyev et al., Nature **405**, 430 (2000)