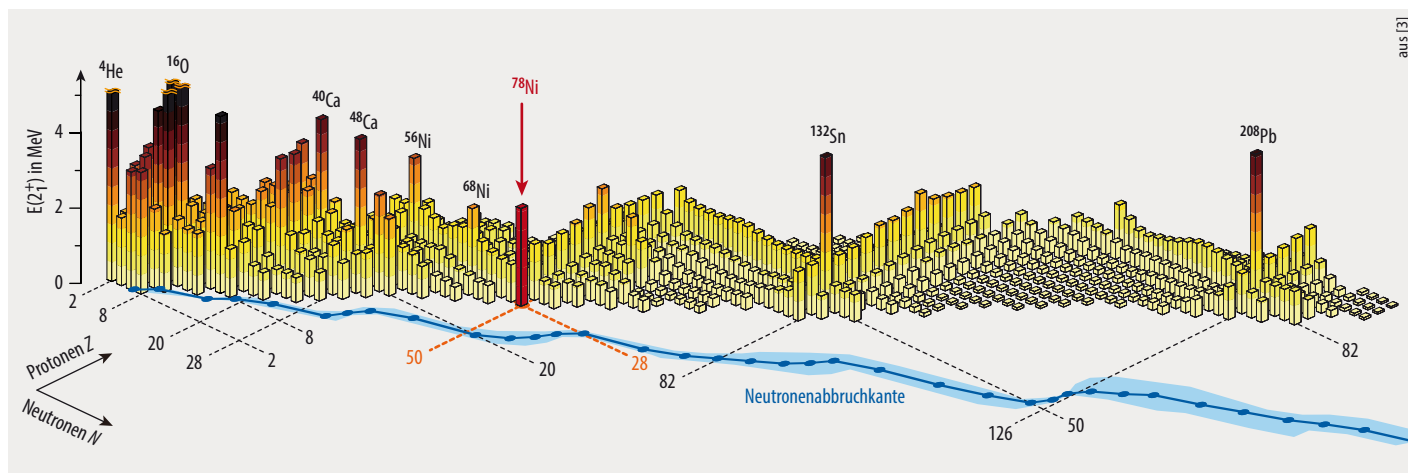


# Ein Exot mit Geheimnissen

Der exotische Atomkern  $^{78}\text{Ni}$  bestätigt die Vorhersagen des klassischen Schalenmodells und liegt zudem in zweierlei Gestalt vor.

Christoph Langer



**Abb. 1** Im Segre-Plot sind die bekannten Isotope anhand ihrer Protonen- und Neutronenzahl zweidimensional aufgetragen. Die dritte Dimension illustriert hier die Energie, die nötig ist, um das Isotop in den ersten quantenmechanischen angeregten Zustand zu versetzen: Die doppelt-magischen Kerne (markiert) ragen deutlich hervor.

Das Schalenmodell der Atomkerne beschreibt den Aufbau des Kerns als Zwiebelstruktur: Die  $Z$  Protonen und  $N$  Neutronen eines Kerns der Masse  $A = N + Z$  ordnen sich in einzelnen Schalen an und formen Energieorbitale [1]. Eine besondere Vorhersage des Modells stellen die magischen Zahlen dar. Demnach sind Kerne, die 2, 8, 20, 28, 50, 82 oder 126 Neutronen oder Protonen enthalten, besonders stabil. Experimentell drückt sich dies beispielsweise durch eine hohe Energie der angeregten Kernzustände aus (Abb. 1). Eine spezielle Rolle spielen doppelt-magische Kerne, die sowohl eine magische Anzahl von Neutronen als auch an Protonen besitzen, beispielsweise  $^4\text{He}$  ( $Z = N = 2$ ),  $^{16}\text{O}$  ( $Z = N = 8$ ) und  $^{48}\text{Ca}$  ( $Z = 20, N = 28$ ). Sie sind besonders stark gebunden und erlauben es, das Schalenmodell experimentell zu überprüfen und zu erweitern. Die doppelt-magischen Kerne bilden das Fundament, auf dem die Theorie steht, und erlauben den Vergleich mit experimentellen Daten. Die Eigenschaften dieser Kerne wirken sich direkt darauf aus, wie schwere Elemente im Universum bei Supernova-Explosionen oder

Neutronensternverschmelzungen entstehen. Wichtig sind hier sehr kurzlebige doppelt-magische Kerne, deren Protonen- und Neutronenzahl sich stark unterscheiden. Ihre besondere Struktur beeinflusst in Simulationen, wie häufig welches Element entsteht.

Wenn sich Protonen- und Neutronenzahl stark unterscheiden, spricht man von asymmetrischen Kernen. Ein Maß dafür ist das Verhältnis  $N/Z$ . Für leichte, stark asymmetrische Isotope gelten die Vorhersagen des klassischen Schalenmodells nicht mehr. So besitzt  $^{16}\text{O}$  ( $N/Z = 1$ ) die vorhergesagten doppelt-magischen Eigenschaften, während sich  $^{28}\text{O}$  ( $Z = 8, N = 20, N/Z = 2,5$ ) experimentell nicht als doppelt-magischer Kern erweist. Dagegen finden sich die doppelt-magischen Eigenschaften beim Isotop  $^{24}\text{O}$  ( $N/Z = 2$ ). Dies korrekt zu beschreiben, erfordert eine komplizierte Modifikation des klassischen Schalenmodells [2].

Ein internationales Forscherteam hat kürzlich am japanischen Forschungszentrum RIKEN in Tokio erstmals den als doppelt-magisch vorhergesagten Kern  $^{78}\text{Ni}$  ( $Z = 28, N = 50$ )

untersucht [3], der mit  $N/Z = 1,8$  ebenfalls asymmetrisch ist. Bisher ist wenig über diesen speziellen Atomkern bekannt, da er nur sehr aufwändig zu produzieren ist. Das Isotop besitzt 14 Neutronen mehr als das schwerste stabile Nickel-Isotop  $^{64}\text{Ni}$  und ist damit ein exotischer Kern. Seine Halbwertszeit beträgt nur 122 ms, sodass sich seine Eigenschaften nur mit einem Strahl aus  $^{78}\text{Ni}$  bei hoher Geschwindigkeit untersuchen lassen. Experimente mit Isotopen in seiner unmittelbaren Umgebung deuteten an, dass dieser außergewöhnliche Kern doppelt-magische Eigenschaften besitzen könnte.

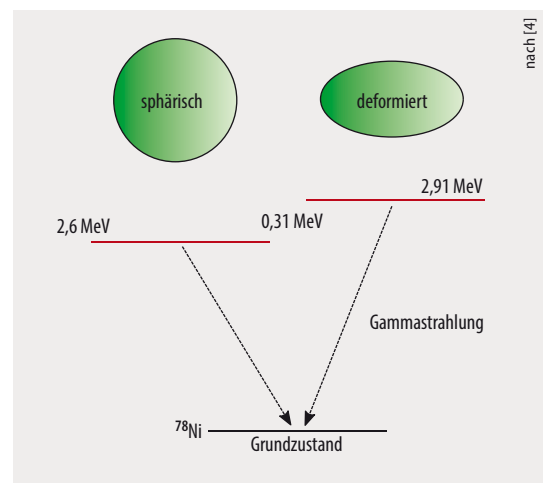
Die Untersuchung gelang nun in Japan an der Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF). Aus einem Strahl aus Uran-Ionen mit einer Geschwindigkeit von knapp  $0,7c$  entstanden durch Kernspaltung sehr viele leichtere Atomkerne. Daraus wurden in einem ersten Schritt die Isotope  $^{79}\text{Cu}$  und  $^{80}\text{Zn}$  aussortiert, die ein bzw. zwei Protonen mehr besitzen als  $^{78}\text{Ni}$ . Den verbliebenen Strahl mit  $0,6c$  lenkten die Forscher in den MINOS-Aufbau mit einem flüssigen Wasserstoff-Target,

das aus einer sehr dichten Ansammlung von Wasserstoff-Atomen besteht. Hier entstand  $^{78}\text{Ni}$  durch gezieltes Ausschlagen von Protonen in den Kernreaktionen  $^{79}\text{Cu} + p \rightarrow ^{78}\text{Ni} + 2p$  und  $^{80}\text{Zn} + p \rightarrow ^{78}\text{Ni} + 3p$ . Anschließend wurde das Nickel-Isotop im ZeroDegree-Massenspektrometer nachgewiesen.

Besonders interessant sind die  $^{78}\text{Ni}$ -Kerne, die in einem anderen quantenmechanischen Zustand als der Basiskonfiguration, dem Grundzustand, vorliegen. Innerhalb kurzer Zeit gibt der Kern im Flug die überschüssige Energie durch charakteristische Gammastrahlung ab. Um diese zu detektieren, benutzten die Forscher das DALI2-Spektrometer. Es besteht aus 160 einzelnen NaI(Tl)-Kristallen, die so um MINOS angeordnet sind, dass die in alle Raumrichtungen abgestrahlten Photonen mit möglichst hoher Effizienz detektiert werden. Um den signifikanten Beitrag anderer Isotope zum Untergrund in den Spektren zu reduzieren, kam eine Koinzidenzanalyse zum Einsatz. Dabei zählen nur die Photonen, die nahezu zeitgleich mit einem  $^{78}\text{Ni}$ -Kern im ZeroDegree-Spektrometer detektiert wurden. Auf diese Weise ließen sich mehrere diskrete Gammastrahlungsenergien aus  $^{78}\text{Ni}$  rekonstruieren. Mit 2,6 MeV Energie liegt der erste angeregte quantenmechanische Zustand vergleichsweise hoch über dem Grundzustand – eine wichtige Eigenschaft eines doppelt-magischen Kerns (Abb. 1). Alle theoretischen Rechnungen reproduzieren das gefundene Resultat gut.

In verschiedenen theoretischen Modellen besitzen doppelt-magische Kerne makroskopisch betrachtet eine sphärische Gestalt, während alle anderen Kerne mehr oder weniger stark deformiert sind. Auch sehr asymmetrische Kerne weichen bevorzugt von der Kugelgestalt ab. Hier bildet  $^{78}\text{Ni}$  eine Ausnahme und liegt trotz des großen Neutronenüberschusses im Grundzustand und im ersten angeregten Zustand in den Rechnungen sphärisch vor. Das gilt aber nicht für einen weiteren angeregten Zustand, der nur etwa 0,3 MeV höher liegt als der erste (Abb. 2). Theoretische Interpretationen der experimentellen Daten deuten an, dass  $^{78}\text{Ni}$  in diesem Zustand leicht prolat deformiert ist, also einem Rugbyball ähnelt. Weil die Energielücke zwischen der sphärischen und der deformierten Form sehr klein ist, scheint ein Übergang schon durch eine geringe Anregung möglich zu sein.

Die ersten Erkenntnisse aus der aktuellen Studie inspirieren sicher viele neue Arbeiten zu  $^{78}\text{Ni}$ , sowohl experimentell als auch theoretisch. Weitere Untersuchungen stehen auf der Agenda von im Bau befindlichen Anlagen wie FAIR in Darmstadt oder FRIB an der Michigan State University in den USA. Beispielsweise gilt es, die Fragen zu beantworten, wie schwer der Kern ist, wie schnell der Übergang von der sphärischen zur deformierten Gestalt stattfindet und ob moderne theoretische Modelle dies genau beschreiben können. Für die weitere Entwicklung des Schalenmodells wäre es wich-



**Abb. 2** Im angeregten Zustand (rot) liegen für  $^{78}\text{Ni}$  eine sphärische und eine deformierte Form vor, die nur durch eine kleine Energielücke voneinander getrennt sind.

tig zu wissen, ob die magische Zahl  $Z = 28$  auch bei noch exotischeren Nickel-Isotopen erhalten bleibt und ob auch leichtere Elemente als Nickel bei  $N = 50$  Eigenschaften magischer Kerne besitzen.

- [1] M. G. Mayer, Phys. Rev. **75**, 1969 (1949); M. G. Mayer, Science **145**, 999 (1964)
- [2] C. R. Hoffman et al., Phys. Lett. B **672**, 17 (2009); R. Kanungo et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 152501 (2009)
- [3] R. Taniuchi et al., Nature **569**, 53 (2019)
- [4] G. Hagen und T. Papenbrock, Nature **569**, 49 (2019)

## Autor

**Dr. Christoph Langer**, Institut für Angewandte Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 12, 60438 Frankfurt am Main

## Kurzgefasst

### Empfindlichere Auswertung

In den Daten des Weltraumteleskops Kepler verstecken sich mehr Exoplaneten als bisher gedacht. Mit einer neuen Analyse ist es deutschen Forschern gelungen, 18 weitere erdgroße Exoplaneten zu entdecken. Dazu verwendeten sie in der Transitmethode einen realistischen Helligkeitsverlauf. Damit waren die kleinen Signale der Planeten vom Rauschen des Messinstruments zu unterscheiden. Die empfindlichere Auswertung lässt sich auch auf Daten zukünftiger Missionen wie Plato anwenden.

R. Heller et al., A&A **625**, A31 (2019) und DOI: 10.1051/0004-6361/201935600

### Hochaufgelöste Abbildung

Rydberg-Atome sind komplexe hochangeregte Atome mit einem Elektron, die sich ähnlich wie Wasserstoffatome verhalten. Da sie theoretisch gut zu beschreiben sind und untereinander stark wechselwirken, kommen sie für Anwendungen in der Quantensimulation und im Quantencomputing infrage. Physikern am MPI für Quantenoptik ist es nun erstmals gelungen, mit einem hochauflösenden Mikroskop die Bindung zweier Rydberg-Atome direkt abzubilden. Dazu regten sie das Molekül mit Laserlicht an und konnten bei einer Bindungslänge von etwa einem Mikrometer Vibrationszustände beo-

bachten. Diese stimmen quantitativ sehr gut mit theoretisch berechneten Werten überein.

S. Hollerith et al., Science **364**, 664 (2019)

### Charmante Verletzung

Am Experiment LHCb konnte erstmals eine CP-Verletzung im Zerfall von Hadronen, die ein Charm-Quark enthalten, nachgewiesen werden. Der Wert ist zwar noch verträglich mit dem Standardmodell, passt aber auch zu darüber hinausgehenden Theorien, welche die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie im Universum erklären können.

R. Aaij et al. (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. **122**, 211803 (2019)