Sauerstoff ohne doppelte Magie

Der erstmalige Nachweis von ^{28}O zeigt, dass das Sauerstoffisotop entgegen der Erwartung kein doppelt-magischer Atomkern ist.

Thomas Baumann

Kürzlich ist es einem international besetzten Team am japanischen Kernforschungszentrum RIKEN erstmals gelungen, das Sauerstoff-Isotop ^{28}O nachzuweisen [1]. Der Atomkern aus acht Protonen und 20 Neutronen liegt jenseits der Neutronenabbruchkante und ist demnach neutronenungebunden. Was macht ihn so interessant?

Neben den stabilen natürlich vorkommenden Atomkernen besitzen alle chemischen Elemente auch Isotope, die radioaktiv sind, also gemäß einer zeitlich begrenzten Lebensdauer zerfallen. Die meisten radioaktiven Isotope kommen nicht auf der Erde vor, sondern lassen sich nur in kernphysikalischen Laboratorien erzeugen. Stabilen wie radioaktiven Isotopen ist es gemein, dass ihre Protonen und Neutronen energetisch im Kern gebunden sind – zumindest lange genug, dass sich ein Atom mit den dazugehörigen Elektronen bildet. Bei neutronenreichen Isotopen lässt sich nur eine begrenzte Anzahl von Neutronen zum Kern hinzufügen, bis der Punkt erreicht ist, an dem ein weiteres Neutron nicht mehr energetisch gebunden ist. In der Nuklidkarte beschreibt die Neutronenabbruchkante diesen Punkt für die verschiedenen Elemente: Jenseits davon zerfallen Atomkerne praktisch sofort [2].

Die Isotope des Sauerstoffs stellen ein interessantes Forschungsobjekt dar, weil sie mit acht Protonen eine magische Anzahl derselben besitzen. Magische Zahlen beziehen sich auf das Schalenmodell des Kerns, das Maria Goeppert-Mayer und Hans Jensen vor 75 Jahren eingeführt haben. Das Modell gibt an, welche Anzahl von Kernteilchen die Schalen vollständig füllt, sodass eine stärker gebundene Konfiguration entsteht [3 – 5]. Protonen und Neutronen befinden sich in separaten Schalen und können daher unabhängig voneinander die Schalenabschlüsse bei 2, 8, 20, 28, 50, 82 und 126 Teilchen erreichen. Aufgrund der stärkeren Bindung und weiterer besonderer Eigenschaften werden diese Zahlen als magisch bezeichnet. Kerne mit einer magischen Anzahl von Protonen wie auch Neutronen heißen doppelt-magisch und sind besonders stark gebunden. Ein Beispiel ist ^{16}O mit acht Protonen und acht Neutronen; der nächste Kandidat für Sauerstoff wäre ^{28}O mit 20 Neutronen.

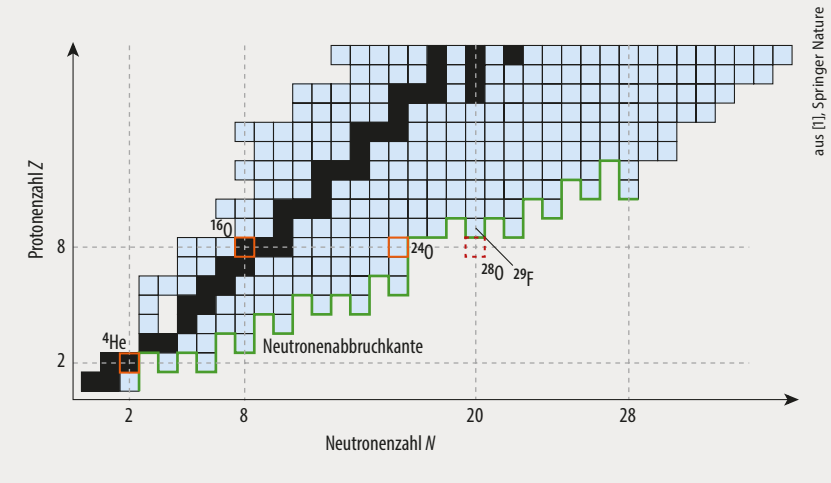


Abb. 1 In der Nuklidkarte liegt ^{28}O (rot) außerhalb der Neutronenabbruchkante (grün): Es handelt sich um einen ungebundenen Kern; das schwerste gebundene Sauerstoff-Isotop ist ^{24}O (orange).

Der erste Nachweis von ^{28}O hat nun aber gezeigt, dass es sich nicht um einen doppelt-magischen Kern handelt (**Abb. 1**). ^{28}O zerfällt direkt in 4 Neutronen und ^{24}O, das neutronenreichste gebundene Sauerstoff-Isotop [6]. Um ^{28}O nachzuweisen, war es notwendig, genau diese fünf Teilchen in Koinzidenz zu messen. Am japanischen RIKEN Nishina Kernforschungszentrum entsteht ^{28}O, wenn ein Strahl aus radioaktiven ^{29}F-Isotopen ($Z = 9$, $N = 20$) auf ein Target aus flüssigem Wasserstoff trifft, also auf Protonen. In diesem Target treten viele Reaktionen mit ^{29}F auf; ab und an wird genau ein Proton herausgeschlagen, sodass ^{28}O entsteht – und sofort wieder zerfällt. Diese seltenen Fälle galt es nun zu selektieren. Um aus den aufgenommenen Daten ^{28}O zu rekonstruieren, musste das Zerfallsprodukt ^{24}O gleichzeitig mit vier Neutronen identifiziert werden (**Abb. 2**).

Zu der internationalen Kollaboration, welcher der Nachweis von ^{28}O erstmals gelungen ist, gehören auch Kernphysiker:innen vom GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt: Mit dem Neutronendetektor NeuLAND haben sie entscheidend zum Erfolg des Experiments beigetragen. Die vier Neutronen gleichzeitig zu messen, ist sehr herausfordernd, da sich die ungeladenen Teilchen nur schwer detektieren lassen. Im Experiment dienen Plastikszintillatoren als Neutronendetektoren. Selbst bei einer Dicke von insgesamt etwa 90 Zentimetern beträgt die Nachweiswahrscheinlichkeit einzelner Neutronen, die sich mit mehr als halber Lichtgeschwindigkeit bewegen, nur etwa 50 Prozent: Etwa die Hälfte aller Neutronen, die auf den Detektor treffen, werden nicht registriert. Umso schwieriger ist es, vier Neutronen in Koinzidenz zu messen.

© 2023 Wiley-VCH GmbH

Darüber hinaus streuen die Neutronen im Detektormaterial, wenn sie ein Signal erzeugen. Werden diese gestreuten Neutronen ein weiteres Mal detektiert, kann es zu einer falschen Koinzidenz kommen: Dann sieht es so aus, als ob mehrere Neutronen detektiert wurden. Deswegen war es nötig, einen Auswahlalgorithmus anzuwenden, der die falschen Ereignisse aussortiert, ohne dabei die effektive Nachweiswahrscheinlichkeit weiter abzusenken. Dennoch lag unter Anwendung aller Filter für das richtige Signal die Effizienz für den Nachweis von vier Neutronen in Koinzidenz nur bei 0,4 Prozent. Um dies zu kompensieren, erfolgte die Optimierung anderer Aspekte des experimentellen Aufbaus. Beispielsweise gelang es, den Teilchenstrahl mit ^{29}F in sehr hoher Intensität zu erzeugen und ein Reaktionstarget mit großem Volumen zu verwenden. Dennoch war mehr als eine Woche Strahlzeit nötig, um eine aussagekräftige Statistik zu erhalten.

Um die Energieniveaus von ^{28}O zu rekonstruieren, erfolgte die Messung der Impulsvektoren aller fünf Zerfallsprodukte in Koinzidenz. Daraus lässt sich die invariante Masse oder Schwerpunktsenergie des Teilchensystems ermitteln; zusammen mit den bekannten Massen der Zerfallsprodukte ergibt sich die Zerfallsenergie. Diese wiederum gibt Aufschluss über die ungebundenen Energieniveaus des Isotops ^{28}O, also dessen Resonanzen. Deren Rekonstruktion zeigte nun, dass die Zerfallsenergie anders ausfällt, als von aktuellen Theorien vorhergesagt. Die theoretische Berechnung lässt sich mit den experimentellen Daten nur in Einklang bringen, wenn die Neutronen im Isotop ^{28}O andere Niveaus besetzen als vom Schalenmodell vorgegeben. Mit anderen Worten: Die Energieniveaus von ^{28}O sind so verschoben, dass der Schalenabschluss mit 20 Neutronen verschwindet. Dies entspricht einer Konfiguration, die derjenigen von ^{29}F gleicht, wo dieser Schalenabschluss auch nicht vorliegt [7].

Das Experiment hat damit gezeigt, dass das Isotop ^{28}O kein doppeltmagischer Kern ist. Stattdessen gehört ^{28}O zur sogenannten „Insel der Inversion“, für welche die Energieniveaus in ungewöhnlicher Reihenfolge besetzt werden [8] und die nun bis zum Sauerstoff reicht. Die vorliegende Arbeit belegt, dass die meisten theoretischen Rechnungen das experimentell bestimmte Energieniveau von ^{28}O nicht korrekt wiedergeben, selbst mit verschiedenen Modellen für die Wechselwirkungen und Kernpotentiale. Hinzu kommen die recht großen Konfidenzintervalle der theoretischen Ergebnisse. Die experimentellen Resultate geben interessante Aufschlüsse über die Kernstruktur in extrem neutronenreichen Isotopen. Sie bieten somit ein Erprobungsfeld für verbesserte theoretische Berechnungen, sowohl für die Entwicklung realistischerer Kernmodelle als auch beim Anpassen von Parametern für eine höhere Genauigkeit.

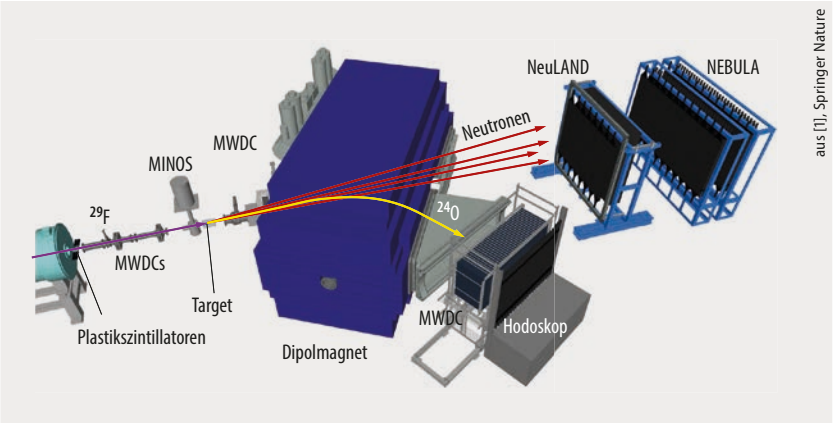


Abb. 2 Im experimentellen Aufbau für die Messung des Zerfalls von ^{28}O lenkt der SAMURAI-Dipolmagnet geladene Zerfallsprodukte (gelb) ab: Er wiegt etwa 570 Tonnen [9]. Neutronen (rot) fliegen durch eine 80 Zentimeter hohe Öffnung und werden mit den Detektoren NeuLAND und NEBULA nachgewiesen.

Kurzgefasst

Doppelblick auf Sonnenmagnetfeld
Einzelne Teleskope können nur die Komponente des Sonnenmagnetfelds in Blickrichtung eindeutig bestimmen, nicht aber diejenige senkrecht dazu. Das ist nun mit zwei Raumsonden gelungen, dem Solar Orbiter der ESA und dem Solar Dynamics Observatory der NASA, die aus zwei verschiedenen Blickwinkeln auf die Sonne schauen. Ein Team unter Leitung des MPI für Sonnensystemforschung ist es gelungen, Daten beider Sonden vom März 2022 so zu kombinieren, dass sich das Magnetfeld an der sichtbaren Oberfläche der Sonne erstmals eindeutig bestimmen lässt – ein wichtiger Schritt, um dieses insgesamt besser zu verstehen.

G. Valori et al., Astron. Astrophys **677**, A25 (2023)

Vela pulst mit höchster Energie
Der Pulsar PSR J0835-4510 im Sternbild Vela emittiert Gammastrahlung mit einer Energie bis zu 20 TeV. Das hat die H.E.S.S.-Kollaboration mit dem gleichnamigen Observatorium nachgewiesen – und die energiereichste Strahlung eines Pulsars entdeckt. Der Vela-Pulsar rotiert etwa elfmal pro Sekunde und hatte bereits Rekorde inne: Er ist der hellste Pulsar bei langwelliger Radiostrahlung und für GeV-Strahlung. Die nun nachgewiesenen Photonen mit etwa 200-mal höherer Energie lassen sich nicht mit dem etablierten Modell erklären, dass die Strahlung entsteht, wenn das Magnetfeld des Pulsars Elektronen beschleunigt.

The H.E.S.S. Coll. et al., Nat. Astron. (2023), DOI: 10.1038/s41550-023-02052-3

[1] *Y. Kondo* et al., Nature **620**, 965 (2023)
[2] *M. Thoennessen*, Rep. Prog. Phys **67**, 1187 (2004)
[3] APS News **17**(8), 2 (2008)
[4] *M. Goeppert Mayer*, Phys. Rev. **75**, 1969 (1949)
[5] *O. Haxel* et al., Phys. Rev. **75**, 1766 (1949)
[6] *D. S. Ahn* et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 212501 (2019)
[7] *A. Revel* et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 152502 (2020)
[8] *B. Alex Brown*, Physics **3**, 104 (2010)
[9] *Y. Kondo, T. Tomai* und *T. Nakamura*, NIM B **463**, 173 (2020)

Der Autor

Dr. Thomas Baumann, Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University, 640 South Shaw Lane, East Lansing, MI 48824, USA

© 2023 Wiley-VCH GmbH