

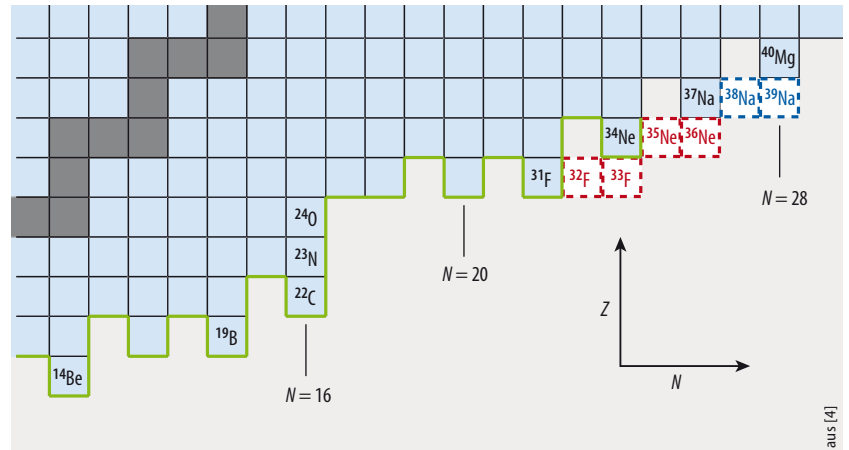
# Mehr Neutronen gehen nicht

Erstmals ist es gelungen, die Grenze der Neutronenstabilität für Fluor- und Neon-Isotope nachzuweisen.

Achim Schwenk

Die starke Wechselwirkung bindet Neutronen und Protonen zu Atomkernen und bestimmt zusammen mit der elektroschwachen Wechselwirkung die Struktur aller Atomkerne und damit der Nuklidkarte im Allgemeinen. Auf der Nuklidkarte sind alle Isotope nach der Anzahl der Protonen und Neutronen aufgetragen – ähnlich dem Periodensystem der Elemente. Während der Aufbau des Periodensystems heute gut verstanden ist, ist es noch offen, wie die Strukturen der Nuklidkarte aus dem Zusammenspiel fundamentaler Kräfte entstehen. Globale Rechnungen sagen vorher, dass heute erst die Hälfte aller gebundenen Atomkerne experimentell bekannt ist [1]. Die meisten der unbekanntenen Kerne sind extrem neutronenreiche Isotope, die nur für sehr kurze Zeit existieren, aber unter exotischen Bedingungen wie in der Kruste von Neutronensternen vorkommen.

Die Weizsäcker'sche Massenformel beruht auf der einfachsten Modellvorstellung eines Atomkerns – einem flüssigen Tropfen. Stabile Kerne besitzen ähnlich viele Protonen (Ladungs-



**Abb. 1** Nuklidkarte von Beryllium bis Magnesium mit stabilen Atomkernen (grau) und kurzlebigen Isotopen (hellblau). Bisher war die Grenze der Neutronenstabilität (grün) für die Elemente bis Sauerstoff bekannt. Nun zeigten Experimente mit extrem neutronenreichen Isotopen, dass  $^{32}\text{F}$  und  $^{33}\text{F}$  sowie  $^{35}\text{Ne}$  und  $^{36}\text{Ne}$  (rot) nicht als gebundene Kerne existieren. Für Natrium (dunkelblau) ließ sich die Grenze nicht eindeutig bestimmen.

zahl  $Z$ ) und Neutronen (Neutronenzahl  $N$ ):  $Z \approx N$ . Wenn für ein Element, also bei festem  $Z$ , mehr Neutronen hinzukommen, bleibt der Kern gebunden, solange der Unterschied zwischen  $Z$  und  $N$  nicht zu groß wird. In der Weizsäcker'schen Massenformel beschreibt die sogenannte Symme-

trieenergie, wie sich die Kernbindung als Funktion der Asymmetrie von Ladungs- und Neutronenzahl verändert. Sie ist proportional zu  $(N - Z)^2$  und bestimmt die Grenze, ab der ein weiteres Neutron nicht mehr am Kern haftet bzw. wieder „heraustropft“. Die Grenze der Neutronenstabilität heißt daher auch Neutronen-Dripline.

Bisher war diese Dripline nur bis zu den Sauerstoff-Isotopen ( $Z = 8$ ) bekannt. Hier bildet der doppelt magische Kern  $^{24}\text{O}$  die Grenze der Stabilität [2] – und besitzt die gleiche Neutronenzahl  $N = 16$  wie die beiden leichteren Dripline-Kerne  $^{22}\text{C}$  und  $^{23}\text{N}$  (Abb. 1). Dagegen kann das nächst schwerere Element Fluor ( $Z = 9$ ) bis zu 22 Neutronen binden, also sechs Neutronen mehr als Sauerstoff, was auch als Sauerstoffanomalie bekannt ist [3]. Einem Team um Deuk Soon Ahn vom RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science in Tokio ist es nun gelungen, an der dortigen Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) zu zeigen, dass die Isotope  $^{32}\text{F}$  und  $^{33}\text{F}$  sowie  $^{35}\text{Ne}$  und  $^{36}\text{Ne}$  ungebunden sind [4]. Damit steht fest, dass sich die Grenze

## Kurzgefasst

### Verschränkter Rekord

Erstmals ist es gelungen, die Verschränkung eines Rubidium-Atoms mit einem Photon nach dem Durchqueren einer 20 Kilometer langen Glasfaserleitung zu beobachten. Zuvor lag der Rekord bei 700 Metern. Forscher der LMU München und der U des Saarlandes wandelten mit einem speziellen Frequenzkonverter die Wellenlänge der Photonen von 780 auf 1520 nm um und minimierten so die Leitungsverluste. Als nächsten Schritt für ein Quantennetzwerk wollen die Forscher den Konverter mit zwei Atomen anwenden. Anschließend ist geplant, die Experimente außerhalb kontrollierter Laborbedingungen durchzuführen.

T. van Leent et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 010510 (2020)

### Datierter Crash

Mithilfe des Sterns  $\nu$  Indi hat ein internationales Forscherteam den Zusammenstoß unserer Milchstraße mit der Zwerggalaxie Gaia-Enceladus datiert: Der Crash liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 Prozent nur 11,5 Milliarden Jahre zurück. Aus Daten der Europäischen Südsternwarte, des Galaxy Evolution Experiments und des Weltraumteleskops Gaia ergab sich, dass  $\nu$  Indi seine Flugbahn beim Zusammenstoß verändert hat. Sein Alter, das sich aus Beobachtungen des Weltraumteleskops TESS ableiten lässt, gibt daher die obere Grenze für den Zeitpunkt der Kollision der beiden Galaxien an.

W. J. Chaplin et al., Nat. Astron. (2020), DOI: 10.1038/s41550-019-0975-9

der Neutronenstabilität bei  $^{31}\text{F}$  und  $^{34}\text{Ne}$  befindet: Erstmals wurde sie somit für Elemente jenseits von Sauerstoff experimentell bestimmt.

Für diesen Nachweis waren höchste Intensitäten neutronenreicher Isotope notwendig, die momentan nur RIBF erzeugt. Dazu beschleunigt das weltweit größte Superconducting Ring Cyclotron einen Teilchenstrahl stabiler, neutronenreicher  $^{48}\text{Ca}$ -Isotope auf 345 MeV/Nukleon bei einer Intensität von  $10^{12}$  Teilchen/s. Der Strahl trifft auf ein Beryllium-Target, sodass die  $^{48}\text{Ca}$ -Isotope vor allem in verschiedene leichtere Kerne fragmentieren. Diese Fragmente kann der Separator BigRIPS nachweisen und identifizieren (Abb. 2). Jedem Teilchen lässt sich sein Energieverlust in Siliziumdetektoren, seine Flugzeit zwischen verschiedenen Szintillationsdetektoren und die Krümmung seiner Flugbahn in einem Magnetfeld zuordnen (magnetische Steifigkeit). Daraus ergeben sich die Ladungszahl  $Z$  und das Masse-Ladungsverhältnis  $A/Z$ : Das Isotop ist damit eindeutig identifiziert.



RIKEN Nishina Center

Abb. 2 Der Separator BigRIPS im japanischen RIKEN Nishina Center in Tokio

Allerdings beträgt die Nachweiswahrscheinlichkeit nicht 100 Prozent. Daher gilt es auszuschließen, dass ein bestimmtes Isotop zwar existiert, aber nicht detektiert wurde. Dazu hat das Team um Deuk Soon Ahn systema-

tisch die Produktionsraten für alle Fluor-, Neon- und Natrium-Isotope gemessen und mit den Vorhersagen etablierter theoretischer Modelle verglichen. Unter der Annahme, dass die Isotope  $^{32}\text{F}$  und  $^{33}\text{F}$  sowie  $^{35}\text{Ne}$  und  $^{36}\text{Ne}$  existieren, erwartet man mindestens Produktionsraten von 320 Ereignissen für  $^{32}\text{F}$  und von 22 Ereignissen für  $^{33}\text{F}$ . Weil diese nicht beobachtbar waren (Abb. 3), lässt sich mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit von  $1:10^{10}$  ausschließen, dass  $^{33}\text{F}$  gebunden ist. Die Produktionsraten der Neon-Isotope fallen entsprechend geringer aus – mit 5 erwarteten Ereignissen für  $^{36}\text{Ne}$ . Daraus ergibt sich immer noch eine Wahrscheinlichkeit von 99 Prozent, dass die beiden Neon-Isotope nicht existieren. Für die Natrium-Isotope gelang es nicht, die Grenze der Neutronenstabilität zu erreichen: Ein Fragment wurde als  $^{39}\text{Na}$  identifiziert, sodass bei Natrium wohl ein größerer Neutronenüberschuss möglich ist.

Diese experimentellen Ergebnisse beeinflussen unser Verständnis der starken Wechselwirkung, weil sie für



Coherence Matters.

HIGH PERFORMANCE LASERS  
WITH DEPENDABLE EXCELLENCE



C-WAVE. Tunable Lasers.



Cobolt. Single & Multi-line Lasers.

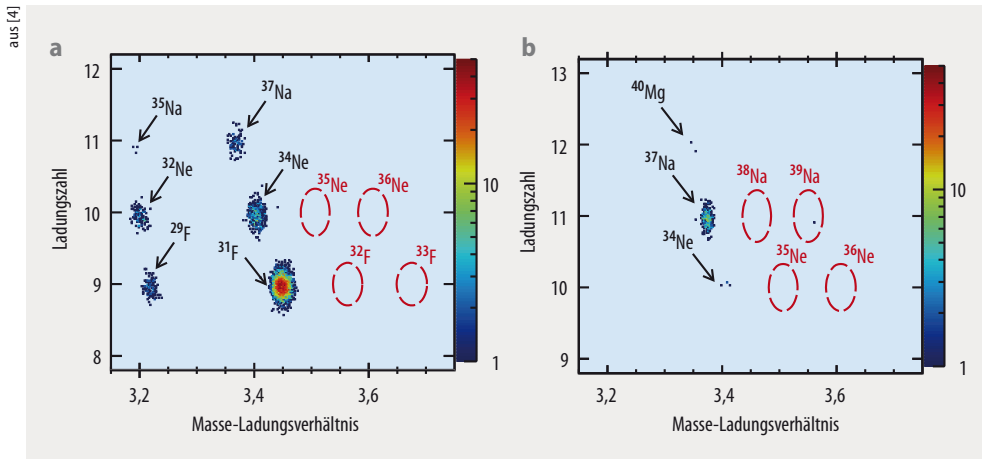


C-FLEX. Laser Combiners.

HÜBNER Photonics

coboltlasers.com | hubner-photonics.com





**Abb. 3** Ist der Separator BigRIPS für den Nachweis des Isotops  $^{33}\text{F}$  optimiert (a), zeigt sich, dass die Isotope  $^{32}\text{F}$  und  $^{33}\text{F}$  sowie  $^{35}\text{Ne}$  und  $^{36}\text{Ne}$  (rot) ungebunden sind. Beim Optimieren auf  $^{36}\text{Ne}$  und  $^{39}\text{Na}$  (b) ließ sich ein Ereignis für  $^{39}\text{Na}$  nachweisen. Das legt nahe, dass für die Natrium-Isotope die Grenze der Neutronenstabilität bei größerem Neutronenüberschuss liegt.

die Eigenschaften neutronenreicher Kerne in modernen Theorien eine fundamentale Rolle spielen. Beispielsweise ergibt sich der Verlauf der Neutronen-Dripline in Vielteilchenrechnungen aus dem Zusammenwirken attraktiver Zweiteilchen-Wechselwirkungen und repulsiver Dreiteilchen-Kräfte, wie die Sauerstoffanomalie zeigt [3]: Je repulsiver die Dreiteilchen-Kräfte sind, desto näher liegt die Neutronen-Dripline an den stabilen Isotopen bzw. desto größer ist die Symmetrieenergie.

Ein Verständnis neutronenreicher Kerne erlaubt damit Tests von Kernkräften im Labor [5], um extrem neutronenreiche Materie zu verstehen, wie sie in Neutronensternen vorliegt. Dort führen repulsivere Dreiteilchen-Kräfte zu Neutronensternen mit größeren Radien [6].

Darüber hinaus beeinflusst die Lage der Neutronen-Dripline die Synthese schwerer Elemente während Kernkollaps-Supernovae oder des Verschmelzens zweier Neutronensterne [7].

Für die hierzu benötigten theoretischen Vorhersagen der Eigenschaften extrem neutronenreicher Kerne ist es entscheidend, in Zukunft nicht nur Messungen an der RIBF in Japan durchzuführen. Beispielsweise soll die Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) an der Michigan State University in den USA auch dazu beitragen, die Neutronen-Dripline bei leichten Kernen weiter abzustecken. Darüber hinaus wird die Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) in Darmstadt so nahe wie keine andere Anlage an die schweren neutronenreichen Isotope herankommen, die für die Nukleosynthese wichtig sind.

Das Wechselspiel der starken Kräfte in neutronenreichen Kernen im Labor und in Sternen wird also noch spannender werden.

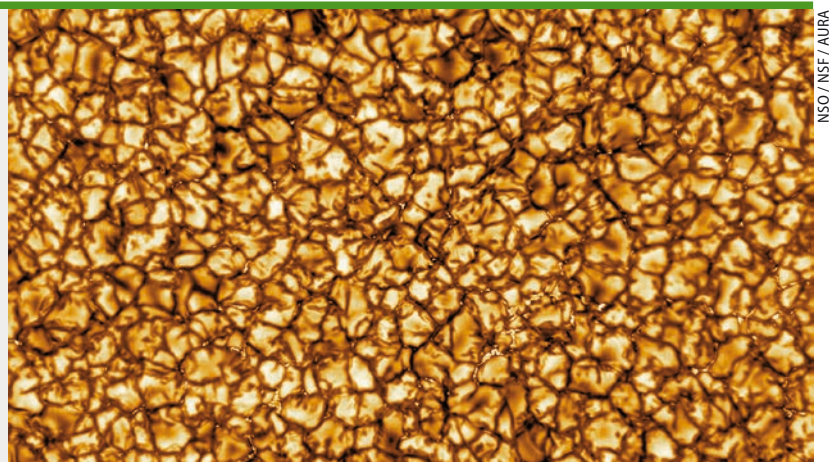
- [1] J. Erler et al., Nature **486**, 509 (2012)
- [2] R. V. F. Janssens, Nature **459**, 1069 (2009)
- [3] T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 032501 (2010)
- [4] D. S. Ahn et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 212501 (2019)
- [5] F. Wienholtz et al., Nature **498**, 346 (2013)
- [6] K. Hebeler et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 161102 (2010)
- [7] vgl. den Artikel von A. Arcones in diesem Heft

## Autor

**Prof. Achim Schwenk, Ph.D.**, Institut für Kernphysik – Theoriezentrum, TU Darmstadt, Schlossgartenstr. 2, 64289 Darmstadt

## Sonnenoberfläche en détail

Nach zwei Jahrzehnten Planung und Bauzeit hat das Daniel K. Inouye Solar Telescope auf dem Gipfel des Haleakala der Hawaii-Insel Maui nun erstmals Licht gesehen. Schon die ersten Aufnahmen des knapp 350 Mio. US-Dollar teuren Observatoriums zeigen die Oberfläche der Sonne in bisher unerreichter Genauigkeit: Mit der Auflösung eines Mikroskops werden in 150 Mio. km Entfernung Strukturen sichtbar, die nur 35 Kilometer groß sind. Auch wenn die Kalibration der Aufnahmen noch nicht abgeschlossen ist, lassen sich Regionen mit heißem Plasma, das aus dem Sonneninneren aufsteigt (hell), präzise von den Bereichen trennen, in denen das abgekühlte Plasma wieder absinkt (dunkel). Weitere Abbildungen und Filme finden sich unter [bit.ly/2OFtbbM](http://bit.ly/2OFtbbM).



Dieses hochaufgelöste Bild der Sonne zeigt einen 36 500 Kilometer breiten Ausschnitt. Die kleinsten sichtbaren Strukturen in der Bildmitte sind lediglich 35 Kilometer groß.