

# Abgebremst und aussortiert

Die Protoneneinfangreaktion an  $^{124}\text{Xe}$  ließ sich im Speicherring erstmals bei astrophysikalisch relevanten Energien messen.

Daniel Bemmerer

Die chemischen Elemente, ausgenommen Wasserstoff und Helium, entstehen in Sternen und bei Sternexplosionen. Bereits 1957 zeigte eine bahnbrechende Arbeit [1], dass für die leichten Elemente bis Eisen vor allem Fusionsreaktionen entscheidend sind [2], während die noch schwereren Elemente durch eine Abfolge von Neutroneneinfängen und Betazerfällen entstehen [3]. Aber diese Prozesse können etwa 35 Isotope auf der protonenreichen Seite des „Tals der Stabilität“ nicht erreichen, die so genannten p-Kerne (Abb. 1). Sie können bei verschiedenen Prozessen entstehen, beispielsweise durch eine Kette von Protoneneinfängen und Betazerfällen oder in einem Netzwerk aus Photodissoziationsreaktionen [4]. Die Vorhersagen der astrophysikalischen Modelle zu den Element- und Isotopenhäufigkeiten weichen allerdings um bis zu zwei Größenordnungen von den beobachteten Werten ab. Um die Übereinstimmung zu verbessern, ist es nötig, die Wirkungsquerschnitte der beteiligten Kernreaktionen im Umfeld der p-Kerne präzise zu vermessen.

In der stellaren Umgebung finden die Reaktionen am wahrscheinlichsten im so genannten Gamow-Fenster statt. Dieser Energiebereich ergibt sich für geladene Teilchen aus der Maxwell-Boltzmann-Verteilung bei den typischen Temperaturen von 1 bis 3,5 Milliarden Kelvin und dem Wirkungsquerschnitt der Reaktion. Messungen im Gamow-Fenster sind schwierig, weil bei den relevanten Energien die Coulomb-Barriere zu sehr kleinen Wirkungsquerschnitten führt. Im Labor treten die Reaktionen daher nur selten auf.

Einer Gruppe um Yuri Litvinov vom GSI Helmholtzzentrum in Darmstadt und René Reifarth von der Goethe-Universität Frankfurt am Main ist es jüngst erstmals gelungen,

$^{124}\text{Ba}$ 11 m	$^{125}\text{Ba}$ 3 m	$^{126}\text{Ba}$ 100 m	$^{127}\text{Ba}$ 13 m	$^{128}\text{Ba}$ 2 d	$^{129}\text{Ba}$ 2 h	$^{130}\text{Ba}$ 0,1	$^{131}\text{Ba}$ 12 d	$^{132}\text{Ba}$ 0,1
$^{123}\text{Cs}$ 6 m	$^{124}\text{Cs}$ 31 s	$^{125}\text{Cs}$ 47 m	$^{126}\text{Cs}$ 2 m	$^{127}\text{Cs}$ 6 h	$^{128}\text{Cs}$ 4 m	$^{129}\text{Cs}$ 32 h	$^{130}\text{Cs}$ 29 m	$^{131}\text{Cs}$ 10 d
$^{122}\text{Xe}$ 20 h	$^{123}\text{Xe}$ 2 h	$^{124}\text{Xe}$ 0,1	$^{125}\text{Xe}$ 17 h	$^{126}\text{Xe}$ 0,1	$^{127}\text{Xe}$ 36 d	$^{128}\text{Xe}$ 1,9	$^{129}\text{Xe}$ 26	$^{130}\text{Xe}$ 4,1
$^{121}\text{I}$ 2 h	$^{122}\text{I}$ 4 m	$^{123}\text{I}$ 13 h	$^{124}\text{I}$ 4 d	$^{125}\text{I}$ 59 d	$^{126}\text{I}$ 13 d	$^{127}\text{I}$ 100	$^{128}\text{I}$ 25 m	$^{129}\text{I}$ 16 My
$^{120}\text{Te}$ 0,1	$^{121}\text{Te}$ 19 d	$^{122}\text{Te}$ 2,6	$^{123}\text{Te}$ 0,9	$^{124}\text{Te}$ 4,7	$^{125}\text{Te}$ 7,1	$^{126}\text{Te}$ 19	$^{127}\text{Te}$ 9 h	$^{128}\text{Te}$ 32

**Abb. 1** Erstmals gelang es, den Wirkungsquerschnitt der Protoneneinfangreaktion des p-Kerns  $^{124}\text{Xe}$  (rot) bei astrophysikalisch relevanten Energien zu messen. In der Massenregion gibt es noch weitere p-Kerne (dunkelblau), die im Gegensatz zu anderen stabilen Isotopen (grau) nicht durch eine Abfolge von Neutroneneinfangreaktionen und Betazerfällen erzeugt werden können.

die Protoneneinfangreaktion am p-Kern  $^{124}\text{Xe}$  bei Energien im Gamow-Fenster zu messen [5], basierend auf Vorarbeiten, die ebenfalls am Speicherring ESR des GSI Helmholtzzentrums stattfanden [6].

Um in dem Experiment die Reaktion  $^{124}\text{Xe} + p \rightarrow ^{125}\text{Cs} + \gamma$ , in kernphysikalischer Notation  $^{124}\text{Xe}(p,\gamma)^{125}\text{Cs}$ , zu untersuchen, wurde ein vollständig ionisierter, isotonreiner Strahl mit  $^{124}\text{Xe}^{54+}$ -Ionen aus dem Schwerionensynchrotron SIS18 in den Speicherring ESR geleitet und dort auf Energien von 5,5 bis 8,0 MeV/Nukleon abgebremst. Damit bei einer einzelnen Messung die Xe-Ionen möglichst exakt die gleiche Energie besaßen, kam der Elektronenkühler am ESR zum Einsatz, der die Impulsverteilung der gespeicherten Ionen deutlich reduzierte. Die Magnete des Speicherrings hielten die bis zu 500 000-mal pro Sekunde umlaufenden Ionen gemäß ihrer Masse und ihrem Ladungszustand auf einer festen Bahn, sodass nur  $^{124}\text{Xe}^{54+}$  im Speicherring verbleiben konnte. Die Reaktion  $^{124}\text{Xe}(p,\gamma)^{125}\text{Cs}$  fand in einem

direkt im Speicherring eingebauten Wasserstofftarget statt (Abb. 2). Die  $^{125}\text{Cs}^{55+}$ -Ionen folgen im nächsten Ablenkarm des ESR einer Bahn mit kleinerem Radius als die ursprünglichen  $^{124}\text{Xe}^{54+}$ -Ionen. Dadurch wird der Nachweis der Reaktionsprodukte mit einem ortsauflösenden Silizium-Streifendetektor möglich.

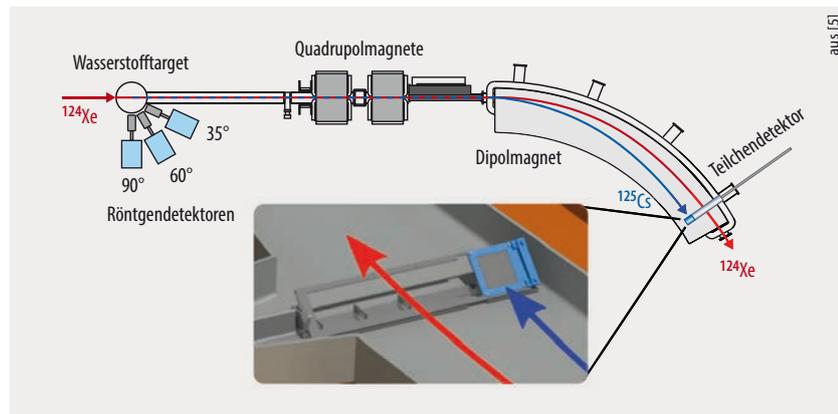
Aufgrund der niedrigen Energien der Xe-Ionen sind atomare Prozesse, wie der Einfang von Elektronen in die Atomhülle aus dem Restgas im Speicherring oder beim Durchqueren des Wasserstofftargets, um ein Vielfaches wahrscheinlicher als die zu untersuchende Kernreaktion. Nicht mehr vollständig ionisiertes  $^{124}\text{Xe}$  geht aber in den Ablenkarmen verloren. Um diese Verluste zu reduzieren, war der Siliziumdetektor im Vakuum des Speicherrings positioniert und so konstruiert, dass er dort das Ausheizen unbeschadet übersteht. Anders als beim Vorgängerexperiment konnten daher die zehn Millionen  $^{124}\text{Xe}^{54+}$ -Ionen im Ring jeweils etwa sechs Millionen-mal umlaufen, bevor der Ring neu befüllt

und der Strahl neu präpariert werden mussten.

Um aus der absoluten Zahl der nachgewiesenen  $^{125}\text{Cs}$ -Reaktionsprodukte auf den Wirkungsquerschnitt der Reaktion zu schließen, muss die Luminosität im Speicherring bekannt sein. Diese wurde mittels des eigentlich störenden atomaren Prozesses eines Elektroneneinfangs aus dem Gastarget in die K-Schale der Xe-Ionen gemessen. Dabei tritt charakteristische Röntgenstrahlung auf, die sich mit Reinstgermaniumdetektoren nachweisen lässt. Der Wirkungsquerschnitt des atomaren Prozesses ist gut bekannt, sodass der gesuchte Wirkungsquerschnitt der Reaktion  $^{124}\text{Xe}(p,\gamma)^{125}\text{Cs}$  mit dem Verhältnis der  $^{125}\text{Cs}$ -Ionen im Teilchendetektor und der Zahl der Röntgenquanten errechnet werden kann – ein schönes Beispiel für das Zusammenspiel von Atom- und Kernphysik.

Der Wirkungsquerschnitt beträgt bei 5,5 MeV Schwerpunktsenergie ( $14,0 \pm 2,4_{\text{stat}} \pm 0,9_{\text{sys}}$ ) mb und steigt bis etwa 7 MeV auf fast 100 mb an, um für noch höhere Energien wieder langsam abzufallen. Der Verlauf und die absoluten Werte dienen dazu, Implementierungen des Hauser-Feshbach-Modells zur Berechnung des Wirkungsquerschnitts zu überprüfen und weiterzuentwickeln.

Die neuen Daten zu  $^{124}\text{Xe}(p,\gamma)^{125}\text{Cs}$  dienen nicht nur dem Verständnis



**Abb. 2** Der Strahl aus  $^{124}\text{Xe}^{54+}$ -Ionen (rot) trifft auf ein Wasserstoff-Gastarget. Im Dipolmagnet beschreiben die Xe-Ionen und die Reaktionsprodukte,  $^{125}\text{Cs}^{55+}$ -Ionen (blau), verschiedene Bahnen, sodass ein ortsauflösender Teilchendetektor (Inset) letztere nachweisen kann. Die Röntgendetektoren am Target dienen der Normierung des Wirkungsquerschnitts.

eines Protoneneinfangs bei astrophysikalisch relevanten Energien, sondern helfen auch, das zeitumgekehrte Spiegelbild, die Photodissoziationsreaktion  $^{125}\text{Cs}(\gamma,p)^{124}\text{Xe}$ , zu verstehen. Darüber hinaus zeigt die Messung, dass es an Speicherringen grundsätzlich möglich ist, die Wirkungsquerschnitte von (p,γ)-Reaktionen im Gamow-Fenster zu bestimmen. Das ermöglicht es, auch instabile Kerne zu untersuchen, die am GSI Helmholtzzentrum mit dem Fragmentseparator erzeugt und in den Speicherring weitergeleitet werden können. Bisher gibt es für diese Wirkungsquerschnitte in den meisten Fällen nur theoretische Vorhersagen, obwohl die Reaktionen mit instabilen Kernen bei der Nu-

kleosynthese der p-Kerne eine entscheidende Rolle spielen. Allerdings bleibt die Methode auf die Kerne beschränkt, deren Halbwertszeit im Bereich der Speicherzeit des genutzten Rings oder darüber liegt.

Derzeit wird am Speicherring die Erweiterung durch den CRYRING getestet. Dieser soll es ermöglichen, Ionen mit noch geringeren Energien zu speichern und damit viele weitere Reaktionen im Gamow-Fenster zu untersuchen. Damit reicht der Anwendungsbereich der neuen Technik von der Reaktion  $^{59}\text{Cu}(p,\gamma)^{60}\text{Zn}$ , die für die Lichtkurve von Röntgenstrahlausbrüchen (X-ray bursts) entscheidend ist, bis hin zu Reaktionen rund um das Isotop  $^{44}\text{Ti}$ , das für Kernkollaps-Supernovae charakteristisch ist. Solche Messungen könnten das zukünftige Verständnis explosiver astrophysikalischer Szenarien prägen.

- [1] E. M. Burbidge et al., Rev. Mod. Phys. **29**, 547 (1957)
- [2] C. Broggini et al., Prog. Part. Nucl. Phys. **98**, 55 (2018)
- [3] F. Käppeler et al., Rev. Mod. Phys. **83**, 157 (2011); F.-K. Thielemann et al., Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **67**, 253 (2017)
- [4] T. Rauscher et al., Rep. Prog. Phys. **76**, 066201 (2013)
- [5] J. Glorius et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 092701 (2019)
- [6] B. Mei et al., Phys. Rev. C **92**, 035803 (2015)

## Autor

**Priv.-Doz. Dr. Daniel Bemmerer**, Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden

## Kurzgefasst

### Stürme mit hohem Potential

Indische und japanische Wissenschaftler haben mit dem Muonen-Teleskop GRAPES-3 das elektrische Potential in Gewitterstürmen bestimmt. Beim Durchqueren des Potentials verlieren die Muonen umso mehr Energie, je höher dieses ist. Aufwändige Simulationen zeigten, welche Zählraten bei einem gegebenen Potential zu erwarten sind. Bei den 184 untersuchten Stürmen ergab sich für einen Sturm ein elektrisches Potential von 1,3 GV – eine Größenordnung mehr als bisher nachgewiesen. Dieser Wert könnte die hochenergetische terrestrische Gammastrahlung erklären, die das Gamma-Weltraumteleskop Compton nachgewiesen hat.

B. Hariharan et al. (GRAPES-3 Coll.), Phys. Rev. Lett. **122**, 105101 (2019)

### Logikgatter aus Nanomagneten

Nanomagnete bestehen nur aus wenigen Atomschichten. Auf kürzesten Entfernungen zeigt sich eine besondere magnetische Wechselwirkung mit zwei Vorzugsrichtungen, quasi ein Nord-Süd- und ein Ost-West-Magnet. Nun ist es Schweizer Forschern erstmals gelungen, Strukturen herzustellen, bei denen sich diese Wechselwirkung in einer Ebene abspielt. Sie tritt in einer 1,6 nm dünnen Lage aus Kobaltatomen auf, die sich zwischen Schichten aus Platin und Aluminiumoxid befindet. Das ermöglicht es, magnetische Netzwerke in einer Ebene zu entwickeln und synthetische Antiferromagnete zu erzeugen. In Logikgattern könnten diese die Leistung von Mikroprozessoren deutlich steigern.

Z. Luo et al., Science **363**, 1435 (2019)