

Beobachteter Zerfall

Mit der optischen Detektion des Kernübergangs in Thorium ist ein Meilenstein auf dem Weg zur Kernuhr gelungen.

Simon Stellmer

Die Nuklidkarte verzeichnet mehr als 3000 Nuklide. In diesen wurden bisher knapp 200 000 angeregte Kernzustände entdeckt und kartiert. Rund 3000 davon haben eine vergleichsweise lange Halbwertszeit von mehr als einer Nanosekunde und tragen die Bezeichnung Isomer (**Abb. 1**).

Unter diesen Zuständen besitzt nur ein einziger eine Anregungsenergie von einigen eV: das Isomer in Thorium-229. Seine Einzigartigkeit hat diesem Zustand schon vor dem gesicherten Nachweis [1] einen gewissen Legendenstatus verschafft. Auf ihm ruht die Vision, die etablierten Verfahren der optischen Laserspektroskopie mit ihrer Ungenauigkeit bis auf die 18. Kommastelle von der Atom- auf die Kernphysik zu übertragen. Eine Kernuhr [2] ist ein optischer Frequenzstandard, der auf einem nuklearen Zwei-Niveau-System beruht.

Da der Atomkern um Größenordnungen kleiner ist als die Orbitale der Hüllenelektronen, sollte die Frequenz des Kernübergangs gegenüber äußere-

ren Störungen deutlich weniger empfindlich sein als für Übergänge zwischen Zuständen in der Elektronenhülle. Mit Spannung wird erwartet, ob eine solche Kernuhr am Ende wirklich präziser geht als eine Atomuhr. Zudem hängt die Anregungsenergie von Kernzuständen von anderen Naturkonstanten ab als jene von Elektronen in der Atomhülle. Dadurch eröffnet sich ein neuer Zugang zur Suche nach Physik jenseits des Standardmodells. Besonders interessant ist hier die Frage, ob sich die Naturkonstanten über die Zeit verändern. Dies ließe sich durch wiederholte Messungen des Frequenzverhältnisses zwischen einem Kern- und einem Atomübergang überprüfen.

Lichtquellen im Dauerstrichbetrieb und mit langer Kohärenzzeit stehen aktuell nur bis zu einer Energie von etwa 6 eV zur Verfügung, also einer Wellenlänge von etwa 200 nm. Auch in absehbarer Zukunft bleibt die Entwicklung kohärenter Röntgenquellen für den MeV-Bereich eine Herausfor-

derung. Dies erklärt das große Interesse am Zustand Th-229m.

Seit rund fünfzig Jahren suchen Forschende nach einer Signatur des Isomers Th-229m. Über die Jahre hat sich der aus Gammaspektroskopie-Messungen abgeleitete Energiebereich, in dem das Isomer liegen sollte, immer wieder verschoben. Erst der Gruppe um Peter Thirof von der LMU München gelang es, das Isomer zweifelsfrei nachzuweisen, und zwar durch Beobachtung des nichtstrahlenden Zerfalls des Isomers [1]. Bei diesem Zerfall gibt das Isomer seine Energie an ein Außenelektron ab, welches das Atom verlässt und auf einer Vielkanalplatte detektiert wird.

In der Folge wurde die Anregungsenergie mit unterschiedlichen Methoden bestimmt [3]. Hierbei kamen Verfahren der klassischen Kernphysik zur Anregung (meist Alphazerfall aus U-233) und zur Detektion der Abregung (etwa Spektroskopie von Gamma-/Röntgenstrahlung oder Elektronen) zum Einsatz. Sämtliche Versuche einer direkten optischen Anregung oder Detektion blieben jedoch erfolglos.

In allen bisherigen Arbeiten wurde das Isomer Th-229m durch den Alphazerfall von U-233 erzeugt. Ein europäisches Forschungsteam unter Leitung von Piet Van Duppen (KU Leuven) nutzte nun den Betazerfall von Ac-229. Dieser Ansatz umgeht die große Rückstoßenergie des Alphazerfalls von U-233 und bevölkert das Isomer etwa zehnmal effizienter. Im Gegensatz zu U-233 jedoch, das eine Halbwertszeit von 160 000 Jahren hat und aus den Nuklearprogrammen des Kalten Krieges reichlich zur Verfügung steht, muss Ac-229 „frisch“ produziert werden, da seine Halbwertszeit nur etwa eine Stunde beträgt.

Dies geschieht an der Isotopenquelle ISOLDE am CERN durch Be-

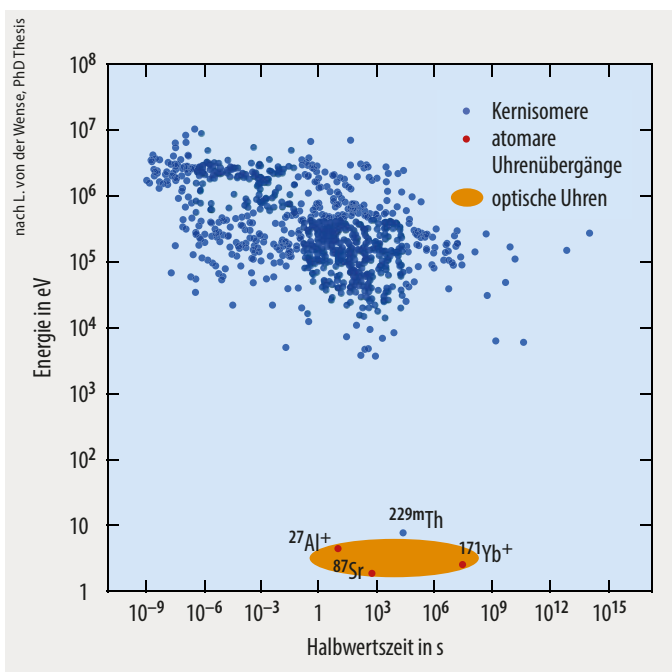


Abb. 1 Einige tausend der 200 000 bekannten angeregten Kernzustände besitzen eine Halbwertszeit von mehr als einer Nanosekunde (blaue Kreise). Es ist ein Geschenk der Natur, dass eines dieser Isomere eine Energie von weniger als 10 eV hat und damit in einem für kohärente Laserstrahlung zugänglichen Bereich liegt. Zum Vergleich sind einige der in optischen Atomuhren verwendeten Übergänge angegeben.

schuss eines Uran-Targets mit einem hochenergetischen Protonenstrahl. Die erzeugten Nuklide diffundieren aus dem Target, werden einfach ionisiert, nach Massenzahlen aufgetrennt und mit einer Energie von 30 keV in einen UV-transparenten Kristall implantiert. Die charakteristische Eindringtiefe beträgt etwa 20 Nanometer. Besonders interessant ist hier die Massenzahl $A = 229$, also die Kette an Betazerfällen $\text{Fr} \rightarrow \text{Ra} \rightarrow \text{Ac}$.

Nach etwa einer Stunde sind die meisten Ac-229-Kerne in Th-229m zerfallen, und der Kristall wird vor den Eingangsspalt eines VUV-Spektrometers verfahren. Ein Photomultiplier zeichnet das Emissionsspektrum zwischen etwa 130 und 190 nm auf. Ein Signal bei 148,7 nm liegt deutlich über dem Hintergrund der Tscherenkow-Strahlung (Abb. 2). Es hängt nicht von der Art des Kristalls (MgF_2 und CaF_2 in unterschiedlichen Dicken) ab und verschwindet beim Implantieren von Ionen mit einer anderen Massenzahl ($A = 230$). Somit ist es zweifellos gelungen, einen Gammazerfall im optischen Bereich zu detektieren [4].

Aus dem zeitlichen Verlauf des Fluoreszenzsignals leitet sich auch die Halbwertszeit des Isomers ab. Sie liegt, nach Korrektur um den Brechungsindex des Kristalls, bei einer guten halben Stunde.

Mindestens einige Prozent der Ionen wurden in eine „wohldefinierte“ Position im Wirtsgitter implantiert, an der keine elektronischen Zustän-

de deutlich unterhalb der Bandlücke (etwa 12 eV für CaF_2 und MgF_2) und unterhalb der Anregungsenergie des Isomers (8,3 eV) zur Verfügung stehen. Dies unterbindet den nicht-radiativen Zerfall oder unterdrückt ihn zumindest um etwa neun Größenordnungen. Das Forschungsteam wies nach, dass fast alle in CaF_2 implantierten Th-Ionen den Gitterplatz eines Ca-Ions einnehmen. Hierzu vermessen die Forschenden das räumliche Emissionsmuster der Elektronen aus dem Betazerfall von implantiertem Th-231. Die Kristallstruktur sorgt für eine starke Bündelung der Elektronen entlang der Kristallachsen („Channeling“), aus der sich der Ursprungsort der Elektronen zuverlässig ableiten lässt [5].

Diese Arbeit beendet die über 25-jährige Suche nach dem direkten optischen Zerfall des Isomers. Die Suche verlagerte sich von einer anfänglich prognostizierten Wellenlänge um 350 nm immer tiefer in den UV-Bereich. Die Radioaktivität des verwendeten Urans und Thoriums erzeugt unvermeidbare Fluoreszenz innerhalb der Messapparatur, die leicht mit dem Zerfall des Isomers verwechselt werden kann. Eine Reihe vermeintlicher Erfolgsmeldungen in hochrangigen Journalen stellte sich daher als verfrüht heraus.

Folgende Faktoren führten nun zum Erfolg: das Verständnis des Channelings, um die Implantation auf „sichere“ Gitterplätze zu verifi-

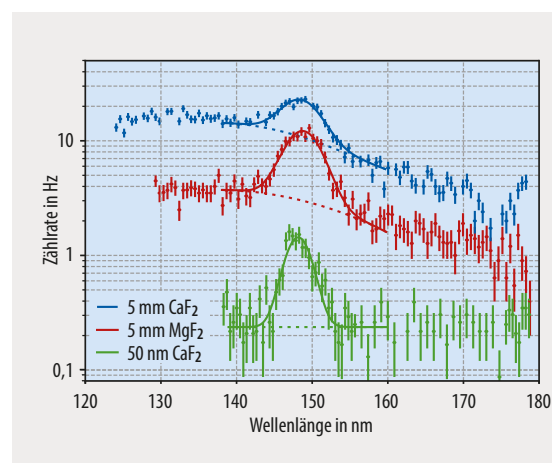


Abb. 2 Die Emissionsspektren von Kristallen, in die Th-229m-Ionen implantiert wurden, zeigen eine Resonanz bei etwa 148,7 nm. Sie rührt vom radiativen Zerfall des Isomers und tritt bei Implantation von Th-230 nicht auf.

zieren, der reduzierte Hintergrund durch Wechsel auf Ac-229 sowie die Zusammenarbeit von Forschenden aus sehr unterschiedlichen Bereichen.

Diese Arbeit verringert die Unsicherheit in der Energie des Isomers um den Faktor sieben und liefert erstmals einen Messwert für die Halbwertszeit des radiativen Zerfalls. Zudem zeigt sie, dass die optische Anregung des Kerns, eingebettet in einen Kristall, möglich sein sollte.

Die hier gemessene Anregungsenergie entspricht einer optischen Frequenz von 2016 THz, die jedoch immer noch mit einer Unsicherheit von etwa 6 THz behaftet ist. Weltweit sind mehrere Gruppen bereits damit beschäftigt, durchstimmbare Lasersysteme bei 148 nm aufzubauen. Das Rennen um die erste optische Anregung eines Atomkerns hat begonnen!

Kurzgefasst

Genussreiche Physik

Wenn es um die Eigenschaften von Lebensmitteln und ihr Verhalten bei der Zubereitung geht, spielt unter anderem die Strömungsdynamik häufig eine wichtige Rolle. Nun fasst ein Überblicksartikel den Wissensstand rund um die physikalischen Aspekte vom Aperitif bis zum Dessert zusammen – und welche offenen Fragen noch bestehen. Jenseits der kulinarischen Aspekte finden die Ergebnisse dieser Untersuchungen auch Anwendung in vielen anderen Bereichen. So lässt sich beispielsweise aus gemahlenem Kaffee etwas über Lawinen lernen.

A. J. T. M. Mathijssen et al., Rev. Mod. Phys. **95**, 025004 (2023)

Eisen unter Druck

Unsere Erde besitzt einen Eisenkern. Durch den großen Druck in ihrem Inneren und die hohe Temperatur liegt dieser flüssig vor. Um zum Beispiel zu verstehen, wie das Magnetfeld der Erde entsteht, müssen die Materialeigenschaften im Kern gut bekannt sein. Ein japanisches Forschungsteam hat erstmals den elektrischen Widerstand von flüssigem Eisen bei einem Druck bis zu 135 GPa und einer Temperatur bis zu 6680 K bestimmt. Die experimentellen Ergebnisse bestätigen die Vorhersagen von *ab initio*-Rechnungen und helfen, das Magnetfeld der Erde genauer zu modellieren.

Kenji Ohta et al., Phys. Rev. Lett. **130**, 266301 (2023)

- [1] L. von der Wense et al., Nature **533**, 47 (2016)
- [2] E. Peik und C. Tamm, Euro. Phys. Lett. **61**, 181 (2003)
- [3] B. Seiferle et al., Nature **573**, 243 (2019); T. Masuda et al., Nature **573**, 238 (2019); A. Yamaguchi et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 222501 (2019); T. Sikorsky et al., Phys. Rev. Lett. **125**, 142503 (2020)
- [4] S. Kraemer et al., Nature **617**, 706 (2023)
- [5] M. Verlinde et al., Phys. Rev. C **100**, 024315 (2019)

Der Autor

Prof. Dr. Simon Stellmer, Universität Bonn, Nussallee 12, 53115 Bonn