

KERNPHYSIK

Ein Isomer als Uhrwerk

Analog zu hochpräzisen Atomuhren weist ein isomerer Kernzustand in ^{229}Th den Weg zu ultrapräzisen Kernuhren.

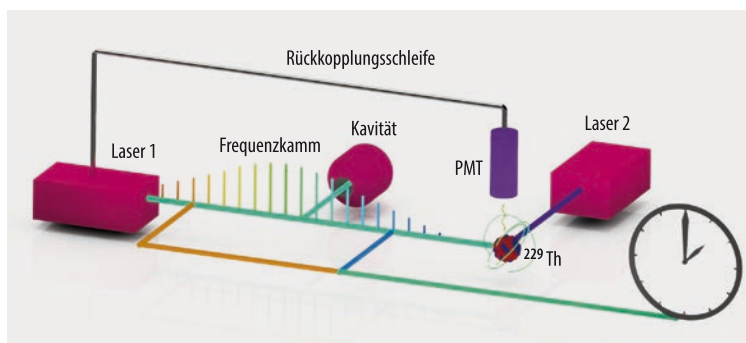
Peter G. Thirolf, Lars von der Wense und Benedict Seiferle

Schon die Sumerer nutzten vor 6000 Jahren das Licht, um die Zeit mit Sonnenuhren zu messen. Heute kommt Laserlicht in optischen Atomuhren zum Einsatz: Die Frequenzmessungen sind inzwischen so präzise, dass die Uhrzeit erst nach 33 Milliarden Jahren um eine Sekunde abweicht. Eine Kernuhr basierend auf dem Thorium-Isomer $^{229\text{m}}\text{Th}$ könnte diese Genauigkeit noch steigern.

Eine Uhr setzt sich aus einem Taktgeber und einem Zählwerk zusammen, das die Frequenz dieser Oszillation bestimmt. Die Definition der Einheit Sekunde im SI-System verwendet hierfür einen Mikrowellen-Übergang im Element Cäsium. Natürliches Cäsium besteht nur aus dem Isotop ^{133}Cs . Die niedrige Verdampfungstemperatur erleichtert es, einen Atomstrahl herzustellen. Optische Atomuhren im Labor erzielen heute relative Ungenauigkeiten von etwa 10^{-18} und sind wesentlich begrenzt durch

äußere elektrische und magnetische Störfelder. Diese Ungenauigkeit lässt sich – wie 2003 vorgeschlagen – weiter reduzieren, wenn die Uhr anstelle eines Übergangs in der Atomhülle einen Kernübergang verwendet [2]. Denn im erheblich kleineren Atomkern sind die Kernmomente geringer: Äußere elektromagnetische Störfelder koppeln entsprechend weniger an. Zum Konzept einer Kernuhr [2, 3] gehört ein schmalbandiger Laser, der den Kernübergang resonant anregt und dessen Wellenlänge sich mittels Frequenzkamm bestimmen lässt oder die selbst eine vakuumultraviolette Frequenzkamm-Mode ist (**Abb. 1**). Gemäß dem Funktionsprinzip optischer Atomuhren entspricht eine Sekunde einer bestimmten Anzahl von Schwingungen, die sich aus der Übergangsfrequenz des Kernübergangs ergibt. Für eine solche Uhr kommen nur Kernzustände infrage, deren Anregungsenergie so klein ist, dass ein Laser sie bereitstellen kann. Außerdem muss ihre Lebensdauer

Abb. 1 Für eine Kernuhr generiert Laser 1 zunächst einen Frequenzkamm. Laser 2 überprüft mithilfe der Hyperfeinstruktur eines Übergangs in der Atomhülle, ob sich der Kern im isomeren Zustand befindet. Der Photomultiplier (PMT) detektiert nur dann Photonen, wenn Laser 2 in Resonanz mit dem Hüllenübergang ist. Deshalb erlaubt es eine Rückkopplungsschleife, Laser 1 auf den Kernübergang zu stabilisieren. Die Anregungsfrequenz aus dem Frequenzkamm dient als Uhrensinal.



ausreichend lang sein, um für eine Uhr von hoher Stabilität geeignet zu sein. Ein solcher Zustand ist nur für das Aktiniden-Isotop ^{229}Th bekannt.

Vor mehr als 40 Jahren lieferten gammaspektroskopische Messungen erste Hinweise auf die Existenz dieses Zustands [4]. Nach heutiger Kenntnis beträgt seine Anregungsenergie nur $(8,28 \pm 0,17)$ eV, was einer Wellenlänge von $(149,7 \pm 3,1)$ nm entspricht [5]. Das ist die niedrigste Energie aller rund 176 000 bekannten angeregten Zustände in den 3300 experimentell untersuchten Nukliden. Außerdem zeichnet sich $^{229\text{m}}\text{Th}$ durch eine Lebensdauer τ von einigen tausend Sekunden aus. Gemäß $\tau = \hbar/\Delta E$ folgt für den Übergang in den Grundzustand eine extrem geringe relative Linienbreite $\Delta E/E \approx 10^{-20}$, was für eine hochpräzise Kernuhr ebenfalls wünschenswert ist. Damit besitzt $^{229\text{m}}\text{Th}$ die Eigenschaften typischer atomarer Übergänge, die in optischen Atomuhren Verwendung finden (Abb. 2), und eignet sich als hochpräziser nuklearer Frequenzstandard [2].

Der direkte Nachweis des Thorium-Isomers gelang 2016 über seinen Zerfall in den Grundzustand [6]. Trotz zuletzt bedeutender Fortschritte sind die Eigenschaften des Thorium-Isomers, insbesondere seine Anregungsenergie, bisher nicht exakt genug bekannt, um es für eine Kernuhr zu nutzen. Dennoch existieren bereits zwei Ansätze für deren Realisierung. Das Einfangen einzelner Thorium-Ionen in einer Paul-Falle wäre vergleichbar mit dem Prinzip fallenbasierter optischer Atomuhren. Hier lassen sich systematische Verschiebungen der Uhrenfrequenz unterdrücken, sodass eine bisher unerreichte Ungenauigkeit von 10^{-19} realisiert werden könnte [3]. Radikal verschieden ist der Ansatz, ^{229}Th in vakuumultraviolett-transparente Kristalle einzubetten, beispielsweise in CaF_2 [1, 7]. Die mehr als 10^{15} Thorium-Kerne in einem Kristall ermöglichen ein deutlich höheres Signal-zu-Untergrundverhältnis und damit eine deutlich stabilere Kernuhr. Zunächst gilt es aber, die Eigenschaften von $^{229\text{m}}\text{Th}$ genauer zu bestimmen.

Auf die Energie kommt es an

Dabei ist es entscheidend, die Anregungsenergie des Thorium-Isomers präzise zu ermitteln [5]. Aktuell verfolgen mehrere Gruppen weltweit verschiedene experimentelle Ansätze, die zu drei Kategorien zählen:

- Einen **indirekten Zugang** bietet die Gammaspektroskopie von Rotationsübergängen in ^{229}Th [8]. Dazu werden zunächst Anregungszustände mit höheren Energien durch

den Alphazerfall von ^{233}U bevölkert (Abb. 3). Einige davon zerfallen sowohl in den Grundzustand als auch in den isomeren Zustand und emittieren dabei Gammastrahlung. Die Anregungsenergie des Isomers entspricht gerade der Differenz der gemessenen Energien der Gammaquanten. Gammaspektroskopische Messungen an ^{229}Th wurden seit den 1970er-Jahren durchgeführt. Germaniumdetektoren erlaubten es 1994, eine Anregungsenergie von $(3,5 \pm 1)$ eV zu bestimmen [9]. Experimente mit einem neuartigen Mikrokalorimeter ergaben 2007 einen Wert von $(7,6 \pm 0,5)$ eV beziehungsweise 2009 von $(7,8 \pm 0,5)$ eV [8]. Diese stellten bis vor Kurzem die genauesten publizierten Werte dar.

- Spektroskopie eignet sich auch für einen **direkten Nachweis**, dessen Ziel es ist, die Energie der Photonen zu bestimmen, die beim Zerfall des Isomers in den Grundzustand emittiert werden. Wie bei den Konzepten für die Kernuhr können dazu die Thorium-Ionen in einer Paul-Falle gespeichert sein oder dotierte Kristalle zum Einsatz kommen, falls deren Bandlücke groß genug ist, um für die erwartete Strahlung transparent zu sein. Auch die Population des isomeren Zustands ist auf unterschiedlichen We-

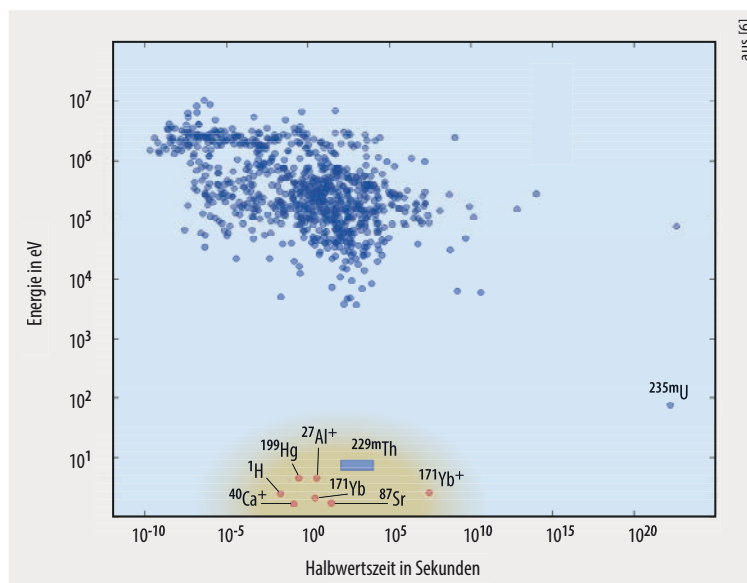


Abb. 2 Heute sind viele angeregte Kernzustände mit langen Halbwertszeiten (Isomere, blau) bekannt. Ihre Anregungsenergien reichen von einigen 10 keV bis zu mehreren MeV. Nur die Isomere $^{235\text{m}}\text{U}$ und $^{229\text{m}}\text{Th}$ liegen mit etwa 76,7 eV bzw. 8,28 eV unterhalb von einem keV. Der Zustand $^{235\text{m}}\text{U}$ ist sehr langlebig und kommt für eine Kernuhr nicht infrage. Einzig $^{229\text{m}}\text{Th}$ besitzt ähnliche Eigenschaften wie einige Übergänge (rot), die in optischen Atomuhren (gelb) genutzt werden.

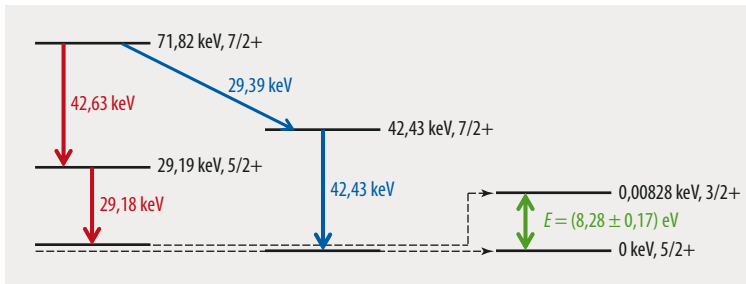


Abb. 3 Die Anregungsenergie (grün) des Thorium-Isomers ergibt sich aus der Differenz der Übergänge des Zustands bei 71,82 keV in den Grundzustand (blau) und den Isomerezustand (rot). Im Ausschnitt des Kernanregungsschemas sind Spin und Parität sowie Energie der Zustände angegeben.

gen möglich. Beispielsweise kann die direkte Anregung aus dem Grundzustand mithilfe von Synchrotronstrahlung [10] oder über einen elektronischen Brückenprozess [11] gelingen. Bei letzterem erfolgt zunächst die resonante Anregung der Atomhülle, welche diese Energie dann auf den Kern überträgt. Auf natürliche Weise bevölkern der Alphazerfall von ^{233}U und der Betazerfall von ^{229}Ac das Isomer. Die Wahrscheinlichkeit beträgt zwei Prozent für ^{233}U und mindestens 13,4 Prozent für ^{229}Ac . Darüber hinaus kann ähnlich zu den indirekten Messungen ein energetisch höher liegender Kernzustand durch seinen Zerfall das Isomer bevölkern.

■ Weil das Thorium-Isomer auch durch **innere Konversion** in den Grundzustand zerfällt, besteht die Möglichkeit, die dabei emittierten Elektronen nachzuweisen. Bei der inneren Konversion überträgt der Kern die Anregungsenergie auf die Atomhülle. Ist diese Energie höher als die Ionisationsenergie, emittiert die Hülle ein Elektron. Aufgrund der geringen Anregungsenergie von $^{229\text{m}}\text{Th}$ ist dies nur für neutrales Thorium möglich. Der Nachweis solcher Elektronen aus dem Zerfall von $^{229\text{m}}\text{Th}$ gelang erstmals 2016 [6]. Nun gilt es, die Anregungsenergie mittels Elektronenspektroskopie zu bestimmen [5].

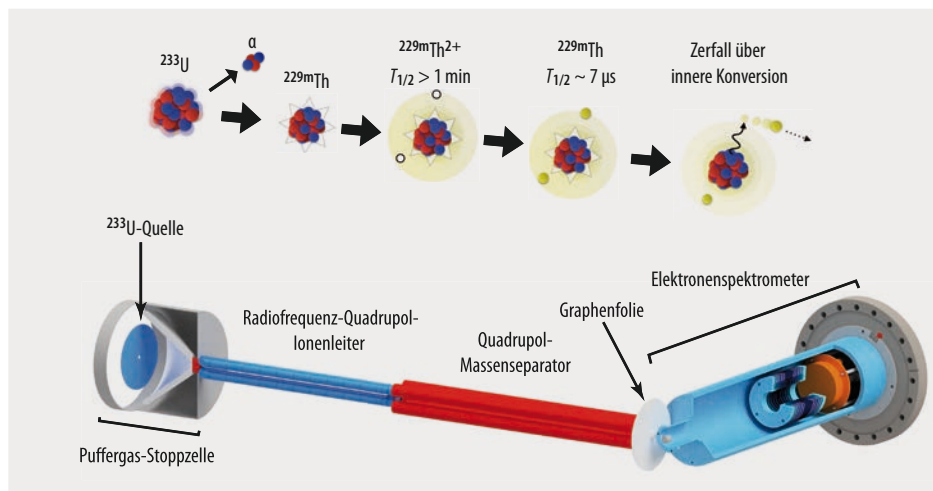
Kernspektroskopie für Fortgeschrittene

Damit dies mittels Konversionselektronen gelingt, ist es zunächst nötig, den isomeren Zustand zu bevölkern. Dazu

dient der Alphazerfall von ^{233}U . Im experimentellen Aufbau befindet sich eine ^{233}U -Quelle (**Abb. 4**). In der Puffergas-Stoppzelle thermalisieren die beim Zerfall entstehenden Thorium-Ionen durch Stöße mit ultrareinem Helium und liegen meist zwei- oder dreifach positiv geladen vor. Das erlaubt es einerseits, sie zu extrahieren und mittels elektrischer Felder einen Ionenstrahl zu formen. Andererseits ist der Zerfall des Isomers in den Grundzustand durch innere Konversion nicht möglich, was seine Lebensdauer auf mehrere tausend Sekunden erhöht. So ist nach der Extraktion ausreichend Zeit für ein gezieltes Manipulieren des Ionenstrahls. Zunächst entfernt ein Quadrupol-Massenseparator andere Produkte der Zerfallsreihe von ^{233}U . Mit einem solchen Strahl gelang erstmals der direkte Nachweis des isomeren Zerfalls (**Abb. 5**) [6]. Um zunächst die Halbwertszeit des Thorium-Isomers genauer zu bestimmen, ist es nötig, den Ionenstrahl zeitlich zu strukturieren. Dazu sammelt eine Paul-Falle die Ionen und extrahiert sie in zeitlich scharf begrenzten Pulsen. Die Halbwertszeit ergibt sich aus dem Vergleich des Zeitpunkts der Extraktion mit dem Zeitpunkt der Detektion von Konversionselektronen. In einem ersten Experiment wurden die Ionen in eine Metalloberfläche implantiert. Hier führt ein Ladungsaustausch zur Neutralisation der Thorium-Ionen, sodass die innere Konversion energetisch erlaubt ist. Die dabei emittierten niederenergetischen Elektronen lassen sich mit einem Mikrokanalplatten-Detektor zeitaufgelöst detektieren. Das liefert die Halbwertszeit des Isomers in neutralen Thorium-Atomen von etwa $7 \mu\text{s}$ [12].

Um die Anregungsenergie präzise zu bestimmen, gilt es, verfälschende Prozesse zu vermeiden, beispielsweise Unterschiede in der Elektronen-Austrittsarbeit durch elektronische Dichteschwankungen an der Oberfläche. Deshalb erfolgt die Neutralisation der Thorium-Ionen nicht mehr auf einer Metalloberfläche, sondern beim Durchfliegen einer Graphenfolie (**Abb. 4**). Im Anschluss bestimmt ein Elektronenspektrometer die kinetische Energie der Konversionselektronen. Der Aufbau ist besonders kompakt durch eine magnetische Flasche [5]. Diese kollimiert zunächst die Elektronen. Anschließend erlaubt es ein abstoßendes elektrostatisches Potential an einem Gitter, die Elektronen

Abb. 4 Ein Ionenstrahl, zusammengesetzt aus ^{229}Th und $^{229\text{m}}\text{Th}$, entsteht durch den Zerfall von ^{233}U . Nach der Extraktion aus der Puffergas-Stoppzelle formt ein segmentierter Radiofrequenz-Quadrupol-Ionenleiter den Strahl, und ein Quadrupol-Massenseparator reinigt ihn. Die kinetische Energie der Konversionselektronen lässt sich mit einem Elektronenspektrometer in Form einer magnetischen Flasche mit Retardierungselektroden und Mikrokanalplatten-Detektor bestimmen.



gemäß ihrer Energie zu filtern: Nur wenn ihre kinetische Energie höher ist als die gewählte Grenzernergie am Gitter, können es die Elektronen passieren und den Mikrokanalplatten-Detektor erreichen.

Die Anregungsenergie des Isomers ergibt sich aus der kinetischen Energie der Elektronen zuzüglich der Ionisationsenergie des Konversionselektrons im Thorium. Letztere ist auf wenige meV genau bekannt. Außerdem erlaubt die Energieauflösung des Spektrometers eine Präzision von deutlich weniger als 0,1 eV. In der Analyse gilt es auch zu berücksichtigen, dass die Neutralisation der Thorium-Ionen zu angeregten atomaren Zuständen führen kann. Dann endet auch der Zerfall des Thorium-Isomers in einem angeregten elektronischen Zustand. Aus dem beschriebenen Experiment ergab sich kürzlich der erste direkt aus dem Zerfall von ^{229m}Th bestimmte Wert der Anregungsenergie. Dieser beträgt $(8,28 \pm 0,17)$ eV und korrigiert den bisher akzeptierten Wert von $(7,8 \pm 0,5)$ eV leicht nach oben. Zugleich bietet er eine fast dreimal höhere Genauigkeit [5].

Eine komplementäre experimentelle Methode lieferte mit einem neuen magnetischen Mikrokalorimeter einen weiteren Wert für die Anregungsenergie, der mit dem neuen Wert aus der Elektronenspektroskopie übereinstimmt: $(8,09 \pm 0,13_{\text{stat}}^{+0,05}_{-0,14\text{syst}})$ eV [13]. Außerdem gelang es erstmals, ^{229m}Th durch resonantes optisches Pumpen zu erzeugen: Synchrotronstrahlung regt den zweiten angeregten Zustand von ^{229}Th bei 29,19 keV an, der mit einer Lebensdauer von (82 ± 4) ps vorwiegend in das Isomer zerfällt [14].

Laserspektroskopische Charakterisierung

Wie eingangs erwähnt, ist es für den Bau einer Kernuhr notwendig, auf kurzen Zeitskalen zu überprüfen, ob ein Kern im angeregten Zustand vorliegt. Eine bereits 2003 vorgeschlagene Methode basiert auf der Doppelresonanz [2]. Diese nutzt aus, dass sich die Kernspins des Isomers und des Grundzustands unterscheiden. Dadurch kommt es zu einer unterschiedlichen Hyperfeinstruktur-Aufspaltung in der Atomhülle. Die experimentelle Messung der Aufspaltung gelang erstmals 2018 [15]. Zweifach geladene ^{229}Th -Ionen befanden sich in einer Paul-Falle, um mittels

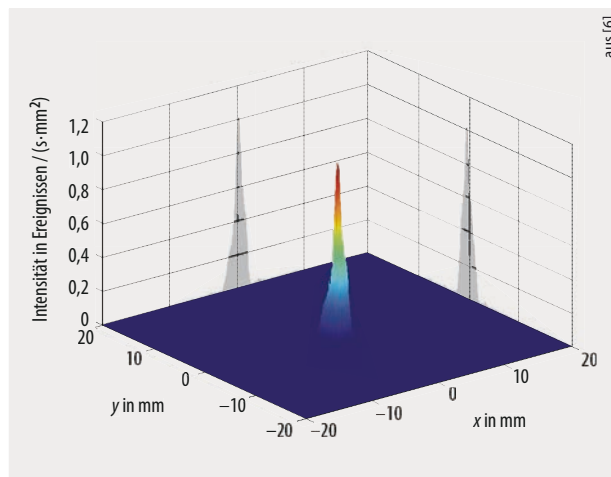


Abb. 5 Der erste direkte Nachweis des Zerfalls von ^{229m}Th erfolgte durch die Detektion der Konversionselektronen mithilfe eines ortsaufauflösenden Mikrokanalplatten-Detektors.

kollinearer Laserspektroskopie die Untersuchung der Hyperfeinstruktur-Aufspaltung eines Übergangs in der Atomhülle zu ermöglichen. Zunächst erfolgte die Messung mit Thorium-Ionen aus Laserablation, die ausschließlich im Grundzustand vorlagen (**Abb. 6a**). Danach kamen Thorium-Ionen aus dem Alphazerfall von ^{233}U zum Einsatz, so dass sich zwei Prozent der Ionen im isomeren Anregungszustand befanden (**Abb. 6b**). Der anschließende Vergleich der Spektren zeigte, dass im zweiten Fall mehr Linien beobachtbar sind, als durch die Hyperfeinstruktur-Aufspaltung des Grundzustands zu erwarten ist. Diese Übergänge lassen sich eindeutig dem Isomer zuordnen und ermöglichen es, zerstörungsfrei zu überprüfen, ob ^{229m}Th vorliegt. Außerdem gelang es, die magnetischen Dipol- und elektrischen Quadrupolmomente sowie den mittleren quadratischen Kernladungsradius des Isomers zu bestimmen (**Abb. 7**).

Von der Anregungsenergie...

Die Anregungsenergie von ^{229m}Th mit $(8,28 \pm 0,17)$ eV sehr präzise zu bestimmen, war der wichtigste Zwischenschritt

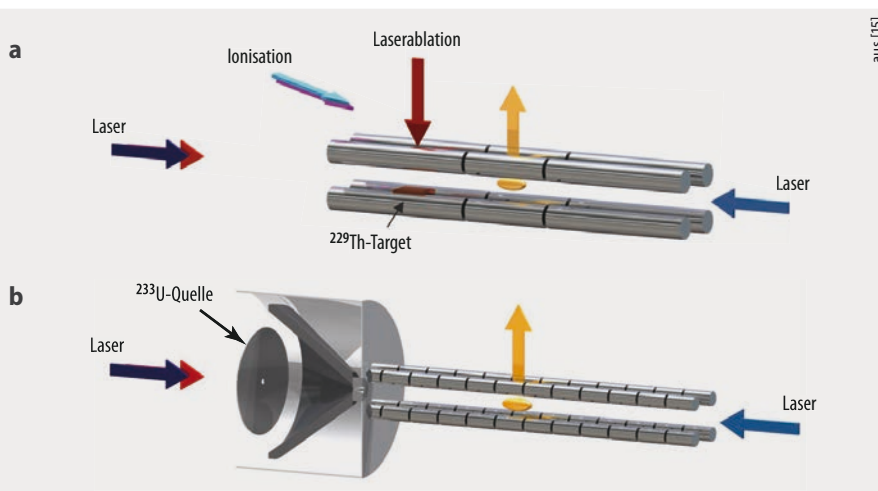


Abb. 6 Um die Unterschiede in der Hyperfeinstruktur-Aufspaltung von ^{229}Th und ^{229m}Th zu bestimmen, erfolgte die dopplerfreie Laserspektroskopie mit zweifach positiv geladenen Ionen im Grundzustand (a) und mit Thorium-Ionen aus dem Alphazerfall von ^{233}U (b). Die Anregung erfolgte in zwei Stufen mit Lasern der Wellenlängen 484 nm (lila) und 1164 nm (rot). Zur Normierung des Fluoreszenzsignals (gelb) diente ein dritter Laser (blau, 459 nm): Damit ließ sich die Anzahl der Ionen in der Falle zu Normierungszwecken kontrollieren.

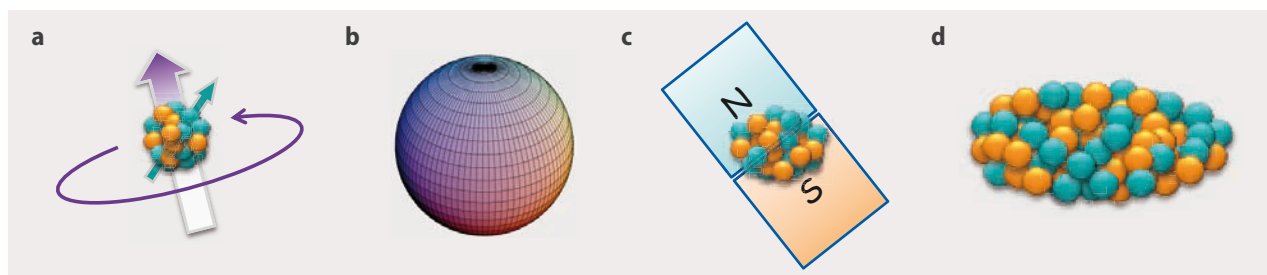


Abb. 7 Für das Isomer ^{229m}Th ließen sich durch kollineare Laserspektroskopie der Kernspin zu $3/2$ (a), die Differenz der mittleren quadratischen Ladungsradien von Isomer und Grundzustand zu $(0,012 \pm 0,002) \text{ fm}^2$ (b), das magnetische Dipolmoment zu $-(0,37 \pm 0,06) \mu_N$ (c) und das elektrische Quadrupolmoment zu $(8,7 \pm 0,3) e \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ (d) ermitteln.

auf dem Weg zu einer Kernuhr. Diese Energie entspricht einer Wellenlänge von $(149,7 \pm 3,1) \text{ nm}$ und lässt sich nun mit laserspektroskopischen Methoden weiter präzisieren, um in der Uhr die angestrebte optische Anregung des Kerns zu erreichen. Ein breitbandiger Laser ermöglicht es ausgehend von diesem Wert, die Anregungsenergie mit einer Genauigkeit von etwa 10 GHz oder $40 \mu\text{eV}$ zu bestimmen. In einem weiteren Schritt hilft eine direkte Spektroskopie mit einem vakuumultravioletten Frequenzkamm, die Genauigkeit in den Bereich unterhalb eines Kilohertz zu verbessern.

... zur Kernuhr

Eine Kernuhr auf Fallenbasis erreicht eine optimale Genauigkeit, wenn ein schmalbandiger Laser mit einigen Hertz Breite den Übergang antreibt. Bei den relevanten Wellenlängen um 150 nm bietet es sich an, die Frequenzvervielfachung eines Frequenzkamms im Edelgas zu nutzen, beispielsweise die 5. Harmonische eines Ti:Saphir-Lasers oder die 7. Harmonische eines Yb-Faserlasers. Eine solche Kernuhr erfordert es außerdem, thermisch entkoppelte, ultrakalte dreifach geladene ^{229}Th -Ionen zu erzeugen. Das ist mittels Laserkühlung möglich: Durch die einfache atomare Niveaulstruktur mit nur einem Valenzelektron eignet sich $^{229}\text{Th}^{3+}$ hierfür besonders. Aufgrund der großen chemischen Reaktivität von Thorium bildet eine kryogene Paul-Falle für die Laserkühlung eine ideale Umgebung, da bei Temperaturen um 4 K nahezu alle Restgasatome ausfrieren. Das reduziert die Kollisionsrate der Thorium-Ionen mit Untergrundatomen drastisch und erhöht die mögliche Speicherzeit auf mehrere Stunden. Dadurch ist zum einen die direkte Laseranregung des Kerns möglich und zum anderen die Voraussetzung geschaffen, die Lebensdauer der Ionen des Thorium-Isomers experimentell zu bestimmen, die nicht durch innere Konversion zerfallen können. Zusammen mit dem Nachweis der Kernanregung durch die Doppelresonanzmethode wären damit die Grundlagen für den Aufbau einer Einzelionen-Kernuhr vorhanden, die eine relative Gang- Ungenauigkeit von 10^{-19} verspricht [3].

Für eine Festkörper-Kernuhr ist es darüber hinaus notwendig, den Zerfall des Isomers über innere Konversion in einem Kristall zu unterdrücken und den Gammazerfall des angeregten Kernzustands nachzuweisen [1, 7]. Sollte dies gelingen, wäre eine solche Uhr aufgrund der mehr als 10^{15} gleichzeitig zur Messung beitragenden Kerne sehr kompakt

zu realisieren und dabei ausgesprochen robust gegenüber Störungen.

Eine Kernuhr als komplementäre Technologie zur Atomuhr zu realisieren, ist das Ziel des Projekts Thorium-NuclearClock. Dafür haben sich die TU Wien (Thorsten Schumm), die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Ekkehard Peik) und die LMU München (Peter Thirolf) zusammengeschlossen; Marianna Safronova (U Delaware, USA) unterstützt bei der Theorie. In der ersten Phase stehen spektroskopische Experimente im Fokus (Gamma-, Elektronen- und Fluoreszenz-Spektroskopie), die noch nicht darauf angewiesen sind, die Anregungsenergie des Thorium-Isomers hochpräzise zu kennen. Dabei gilt es, die zentralen nuklearen Eigenschaften des Thorium-Isomers zu bestimmen, beispielsweise Übergangsenergie, Lebensdauer und Kernmoment sowie Hyperfeinstruktur und elektronische Brückenprozesse. Die laserspektroskopische resonante Anregung und Spektroskopie folgt in einer zweiten Phase. Im Zentrum steht der Einfluss unterschiedlicher elektronischer Umgebungen, wenn die Ionen sich in einer Falle befinden oder in einem Festkörper kristallisiert sind. Abschließend ist geplant, eine oder mehrere Kernuhren im Vergleich mit hochpräzisen Atomuhren zu optimieren.

Ob Kernuhren die optischen Atomuhren langfristig ersetzen können, wird sich vor allem in der Anwendung zeigen. Von der verbesserten Genauigkeit könnten satellitengestützte Navigationssysteme genauso profitieren wie die Suche nach Dunkler Materie und der Nachweis kleinster Schwankungen des Gravitationspotentials der Erde. Auch die vorhergesagten zeitlichen Veränderungen fundamentaler Konstanten könnten empfindlich nachweisbar sein [1].

Die Konstanz der Feinstrukturkonstante

Ein Beispiel ist die Feinstrukturkonstante α . Eine theoretische Arbeit von 2006 ergab, dass sich durch den Vergleich eines nuklearen Frequenzstandards (Kernuhr) mit einer Atomuhr die potentielle Zeitabhängigkeit der Feinstrukturkonstante um fünf bis sechs Größenordnungen sensitiver abschätzen lassen sollte [16]. Änderungen der Feinstrukturkonstante wirken sich auf die Coulomb-Energie aus und beeinflussen die Anregungsenergie des Isomers. Entscheidend für die Sensitivität eines solchen Effekts ist die Differenz der Coulomb-Energien des angeregten und des Grundzustands: $\Delta E_C = E_{C,\text{Isomer}} - E_{C,\text{GZ}}$. Theoretisch

lässt sich der Wert nicht mit der benötigten Genauigkeit berechnen, weil er stark vom verwendeten Kernmodell abhängt. Experimentell leitet sich ΔE_C aus dem Verhältnis der elektrischen Quadrupolmomente von Grundzustand und Isomer sowie dem Verhältnis der Kernladungsradien ab [17]. Ein erstes Experiment ergab einen Wert von $\Delta E_C = -(0,29 \pm 0,43)$ MeV. Das erlaubt noch keine schlüssige Aussage, welche Sensitivitätssteigerung eine Kernuhr mit ^{229m}Th tatsächlich erlauben würde [15].

Literatur

[1] P. G. Thirolf, B. Seiferle und L. von der Wense, Ann. Physik 531, 1800381 (2019)
 [2] E. Peik und C. Tamm, Eur. Phys. Lett. 61, 181 (2003)
 [3] C. J. Campbell et al., Phys. Rev. Lett. 108, 120802 (2012)
 [4] L. A. Kroger und C. W. Reich, Nucl. Phys. A 259, 29 (1976)
 [5] B. Seiferle et al., Nature 573, 243 (2019)
 [6] L. von der Wense et al., Nature 533, 47 (2016)
 [7] W. G. Rellergert et al., Phys. Rev. Lett 104, 200802 (2010)
 [8] B. R. Beck et al., Phys. Rev. Lett. 109, 142501 (2007); LLNL-PROC-415170 (2009)
 [9] R. G. Helmer und C. W. Reich, Phys. Rev. C 49, 1845 (1994)
 [10] J. Jeet et al., Phys. Rev. Lett. 114, 253001 (2015)
 [11] S. G. Porsev et al., Phys. Rev. Lett. 105, 182501 (2010)
 [12] B. Seiferle, L. von der Wense und P. G. Thirolf, Phys. Rev. Lett. 118, 042501 (2017)
 [13] J. Geist, PhD Thesis, Universität Heidelberg (2019)
 [14] T. Masuda et al., Nature 573, 238 (2019)
 [15] J. Thielking et al., Nature 556, 321 (2018)
 [16] V. V. Flambaum, Phys. Rev. Lett. 97, 092502 (2006)
 [17] J. C. Berengut et al., Phys. Rev. Lett. 102, 210801 (2009)

Die Autoren



Peter Thirolf (FV Hadronen und Kerne, FV Massenspektrometrie) promovierte 1992 an der U Heidelberg. Nach Stationen am MPI für Kernphysik in Heidelberg und an der Michigan State University arbeitet er an der LMU München, wo er sich 2004 habilitierte. Ihn interessieren die Struktur exotischer Kerne, Detektoren für medizinphysikalische Anwendungen, fällenbasierte Massenspektrometrie und die Laser-Ionenbeschleunigung.



Benedict Seiferle studierte Physik an der LMU München. Im Rahmen seiner Promotion hat er die Lebensdauer des Thorium-Isomers bestimmt und die Anregungsenergie direkt gemessen.



Lars von der Wense studierte Physik und Mathematik an der U Hamburg und an der U Cambridge. Im Rahmen seiner mehrfach ausgezeichneten Promotion an der LMU München wies er 2016 den direkten Zerfall von ^{229m}Th nach. Derzeit arbeitet er als Postdoc an der Univ. of Colorado in den USA.

Priv.-Doz. Dr. Peter Thirolf und Dr. Benedict Seiferle, Fakultät für Physik, LMU München, Am Coulombwall 1, 85748 Garching; Dr. Lars von der Wense, JILA, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0440, USA





HiScroll®

Die äußerst leisen, kompakten, ölfreien Pumpen. Zur Reduzierung Ihres CO₂-Fußabdrucks.

Trocken	Ideale Vorpumpe für niedrige Enddrücke. Frei von Fetten, Ölen und Kohlenwasserstoffen.
Nachhaltig	15% höherer Wirkungsgrad, geringere Wärmeentwicklung und geringerer Kühlbedarf.
Leise	Geringer Geräuschpegel, wenig Vibration, selbstregelnder Lüfter.
Intelligent	Angepasste Leistung durch intelligenten Einsatz von Sensorik.

Wir treiben nachhaltige Lösungen voran.

Sie suchen eine perfekte Vakuumlösung? Sprechen Sie uns an:
Pfeiffer Vacuum GmbH · Germany · T +49 6441 802-0 · www.pfeiffer-vacuum.com

