

Pressemitteilung, 12. September 2019 (English below)

Auf dem Weg zur Kernuhr: Energie beim Zerfall von Thorium-229 erstmals genau gemessen

Physiker konnten erstmals die Energie genau messen, die beim Zerfall des angeregten Atomkerns Thorium-229 frei wird. Damit sind sie bei der Entwicklung der Kernuhr, die noch weit genauer tickt als heutige Atomuhren, einen wichtigen Schritt weitergekommen.

Uhren gehören zu den genauesten Messinstrumenten überhaupt. Die derzeit besten Atomuhren gehen in 30 Milliarden Jahren nur um eine einzige Sekunde falsch. Die sogenannte Kernuhr, die auf Energieveränderungen im Kern des Isotops Thorium-229 basiert, könnte diese Präzision noch um eine ganze Größenordnung übertreffen. Ein Team unter der Leitung des LMU-Physikers Peter Thirolf ist nun in Zusammenarbeit mit Kollegen des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg, des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung Darmstadt, der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) und des Helmholtz-Instituts Mainz (HIM), der Universität Bonn und der Technischen Universität Wien einen bedeutenden Schritt auf dem Weg zur Kernuhr vorangekommen und hat es mit diesem Thema sogar auf die Titelseite des renommierten Fachmagazins Nature geschafft. Wie die Wissenschaftler berichten, ist es ihnen erstmals gelungen, die Energie, die beim Zerfall dieses Kerns frei wird, genau zu vermessen – eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung der Kernuhr.

Taktgeber sind Schwingungen im Atomkern

Im Unterschied zu gewöhnlichen Atomuhren dienen bei Kernuhren nicht Schwingungen in der Elektronenhülle von Atomen als Taktgeber, sondern Schwingungen im Atomkern selbst. Hervorgerufen werden die Schwingungen durch Übergänge zwischen Energieniveaus, die bei Atomuhren mit Lasern erzeugt werden. Allerdings liegen die in Atomkernen vorherrschenden Energien um mehrere Größenordnungen über denen der Atomhülle, deshalb können Kerne mit heutigen Lasern normalerweise nicht angeregt werden. Der einzige mögliche Kandidat für die Entwicklung einer Kernuhr ist Thorium-229, da dieses Isotop das bei Weitem niedrigste angeregte Energieniveau aller derzeit bekannten etwa 3800 Atomkerne besitzt. Für seine Anregung reicht ultraviolette Strahlung aus, die mit Lasern produziert werden kann.

Welche Art von Laser für die Anregung von Thorium-229 benutzt werden muss, war bisher allerdings unklar, da die Eigenschaften des Kerns nicht genau genug bekannt sind. „Die Energie beziehungsweise Wellenlänge des Laser-Lichts muss haargenau auf die Energie des Kernübergangs abgestimmt sein. Diese Energie haben wir in unseren Experimenten an der LMU nun erstmals genau bestimmt“, sagt Benedict Seiferle, der Erstautor des Papers.

Uran-233-Quellen als Lieferanten des angeregten Thorium-229

Da der angeregte Zustand aktuell nicht direkt erzeugt werden kann, verwendeten die Wissenschaftler angeregte Thorium-229 Kerne aus in Mainz hergestellten Quellen. „Für die Herstellung der Quellen wurde in Mainz Uran-233 chemisch gereinigt und elektrochemisch auf titanbeschichteten Siliziumwafern abgeschieden. Dadurch entstehen dünne und homogene Schichten. Uran-233 zerfällt durch einen Alphazerfall zu Thorium-229. Die beim Alphazerfall freiwerdende Energie katapultiert das Thorium-229 aus der Uranschicht in eine von den LMU-Kollegen entwickelte Apparatur, in der Thorium-229-Kationen gewonnen werden“, beschreibt der Chemiker Christoph Düllmann vom GSI Helmholtzzentrum, der Universität Mainz und dem HIM das Verfahren. Wenn Thorium-229 als Ion vorliegt, besitzt es einen mit einer Lebensdauer von Stunden vergleichsweise langlebigen angeregten Kernzustand. „Durch die lange Lebensdauer finden allerdings nur äußerst selten Zerfälle statt, die man messen kann. Gibt man diesem Ion seine Elektronen zurück, zerfällt der angeregte Kernzustand dagegen sehr schnell“, sagt Seiferle.

Deshalb nutzten die Wissenschaftler einen Trick: Sie schossen die Ionen durch eine Folie aus Graphen. Dann holt sich das Ion seine fehlenden Elektronen vom Graphen und verlässt die Folie als neutrales Atom. Durch die kontrollierte Neutralisation zerfällt der angeregte Kernzustand innerhalb weniger Mikrosekunden und gibt seine Energie an ein Elektron ab, das dadurch aus der Atomhülle herausgeschossen wird und wieder ein Thorium-Ion zurücklässt. Die kinetische Energie dieses Elektrons hängt von der Energie des angeregten Kernniveaus ab und kann dann mit einem Elektronenspektrometer vermessen werden. Die Interpretation der gemessenen Spektren ist allerdings anspruchsvoll, da das Elektron nur einen Teil der Kernanregungsenergie trägt und ein anderer Teil beim Thorium-Ion zurückbleibt. Die zu erwartenden Spektren konnten am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg vorhergesagt werden. In Zusammenarbeit mit den Kollegen aus Wien und Bonn ist es den Münchner Physikern dann gelungen, die Energie des Kernzerfalls zu bestimmen.

Kernanregung durch Laserstrahlen mit Wellenlänge von 150 Nanometern möglich

Aus diesen Informationen konnten die Wissenschaftler bestimmen, dass zur Anregung von Thorium-229 Laserstrahlen mit einer Wellenlänge von rund 150 Nanometern benötigt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse können nun erstmals für die Anregung von Thorium-229 geeignete Laser konstruiert und damit die Entwicklung einer Kernuhr entscheidend vorangetrieben werden. Die Wissenschaftler sind überzeugt, dass die Kernuhr etwa in der Grundlagenforschung zahlreiche Anwendungen haben wird, da sich manche Fragestellungen nur mithilfe extrem präziser Zeitmessungen beantworten lassen.

Die aktuellen Ergebnisse ebnen den Weg für neue Forschungsmöglichkeiten an der neuen Beschleunigeranlage FAIR, die gerade bei GSI entsteht. Thomas Stöhlker, stellvertretender Forschungsdirektor und Leiter des Bereichs Atomphysik von GSI, sagt: „Diese genauere Energiebestimmung eröffnet exzellente Perspektiven für zukünftige Forschung an den Speicherringen der Anlage FAIR und ermöglicht Präzisionsstudien an Thorium-229 und seinem Isomer in höchsten Ladungszuständen durch dielektronische Rekombination.“

Diese Pressemitteilung mit druckfähigen Fotos finden Sie unter

https://www.gsi.de/start/aktuelles/detailseite/2019/09/11/auf_dem_weg_zur_kernuhr.htm

Press Release, September 12, 2019

Probing a nuclear clock transition

Physicists have measured the energy associated with the decay of a metastable state of the thorium-229 nucleus. This is a significant step on the way to a nuclear clock which will be far more precise than the best of today's atomic timekeepers.

Modern atomic clocks are the most accurate measurement tools currently make it possible to enhance timing accuracy by another order of magnitude. Now a research team led by LMU physicist Peter Thirolf, in collaboration with colleagues at the Max Planck Institute for Nuclear Physics in Heidelberg, the GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt, Johannes Gutenberg University Mainz, Helmholtz Institute Mainz, the University of Bonn and the Technical University of

Vienna has taken an important step towards such a clock. Indeed, the new study is featured on the title page of the leading journal *Nature*. In the paper, the authors report that they have succeeded in quantifying the energy released by the decay of the excited thorium-229 nucleus, which is an essential prerequisite for the realization of a thorium-based nuclear clock.

Clock generators are oscillations in the atomic nucleus

Unlike current atomic clocks, which make use of oscillations in the outer electron shells of atoms, nuclear clocks employ oscillations within the nucleus as their timekeeper. In both cases, the oscillations are the product of transitions between defined energy levels, which can be excited by laser light of a specific wavelength. Typically, the energies required to excite oscillations in the vast majority of atomic nuclei are orders of magnitude higher than those required to stimulate transitions in the orbital shells of electrons – which precludes the use of conventional lasers for this purpose. However, there is only one viable candidate for the development of a nuclear clock – the thorium-229 nucleus. Its excited state is located at an energy that is by far the lowest of any state found in the approximately 3800 currently known atomic nuclei. Irradiation with UV light, which is within the capability of lasers now available, is sufficient to populate this excited state.

However, up to now, the precise energy required to generate the excited thorium-229 has remained unknown. “To induce the nuclear transition, the wavelength of the laser light must be tuned to match the transition energy exactly. We have now succeeded in measuring this precisely for the first time,” says Benedict Seiferle, lead author of the new paper.

Uranium-233 sources as suppliers of excited thorium-229

For these measurements, carried out at LMU, the authors of the study made use of the doubly charged thorium-229 cation. Sources providing this cation in the excited nuclear state were developed in Mainz. “Uranium-233 was chemically purified and subsequently deposited on titanium-covered silicon wafers using an electrochemical method. This yields homogeneous thin films. Uranium-233 undergoes alpha decay, producing thorium-229. Thorium-229 recoils from the thin film due to the energy released in the alpha decay, hence entering into a dedicated ion trap developed at LMU in which thorium-229 cations are recovered,” Christoph Düllmann, chemist at GSI Helmholtzzentrum, University Mainz and HIM, describes the process. The excited state of the cation has a lifetime of hours. This is relatively long for an excited nuclear state and is crucial for the future development of the clock, but it hampers measurement of the decay energy. “This long lifetime means that decay to the ground state occurs only rarely. As measurement of this decay was the goal of our experiment, we exploited the fact that decay occurs rapidly when the cations are given the opportunity to collect the missing electrons,” says Seiferle.

To provide electrons, Seiferle and colleagues guided the ions through a layer of graphene. On its way through this layer, each ion picks up two electrons and emerges as a neutral atom on the other side. Thanks to this controlled neutralization step, the excited state then decays to the ground state within a few microseconds. The neutralized atoms expel an electron from an outer atomic shell, thus generating a positively charged thorium-229 ion. The kinetic energy of the free electron depends on the excitation energy of the nuclear state and is determined using an electron spectrometer. However, this energy is only a fraction of the energy used to generate the excited nuclear state. The rest remains in the thorium-229, which renders the interpretation of the resulting spectra complex. To get around this problem, the authors based at the Max-Planck Institute for Theoretical Physics in Heidelberg calculated the spectra to be expected. With the aid of these predictions, and in collaboration with their colleagues in Vienna and Bonn, the team in Munich was then able to determine the energy actually associated with the decay of the excited nuclear state.

Nucleus excitation by laser beams with a wavelength of 150 nanometers possible

The result indicates that the thorium-229 nucleus can be excited to this level by irradiation with laser light at a wavelength . Now lasers specifically designed to emit in this wavelength range can be constructed. This step will bring the first nuclear clock a great deal closer to practical realization. The researchers believe that a thorium-based nuclear clock will open up new avenues in the basic sciences, but will also find many applications, which only become possible on the basis of extremely precise measurements in the time domain.

The current results opens the way for new research prospects at the FAIR accelerator facility currently being built at GSI. Professor Thomas Stöhlker, Vice Director of Research and head of the Atomic Physics division at GSI, says: „This refined energy value opens up future research opportunities at the FAIR storage rings, allowing for precision studies of thorium-229 and its isomer at highest charge states via di-electronic recombination.“

This press release with picture is available on our website at

https://www.gsi.de/en/start/news/details/2019/09/11/auf_dem_weg_zur_kernuhr0.htm

--

Dr. Ingo Peter
Head of Public Relations Department / Leiter Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Phone / Telefon: +49 6159 71 2598
I.Peter@gsi.de

Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH (FAIR GmbH)
GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
Planckstraße 1, 64291 Darmstadt, Germany, www.fair-center.eu, www.gsi.de

Commercial Register / Handelsregister:
FAIR: Amtsgericht Darmstadt, HRB 89372
GSI: Amtsgericht Darmstadt, HRB 1528
Managing Directors / Geschäftsführung:
FAIR: Professor Dr. Paolo Giubellino, Ursula Weyrich, Jörg Blaurock
GSI: Professor Dr. Paolo Giubellino, Ursula Weyrich, Jörg Blaurock
Chairman of the GSI Supervisory Board / Vorsitzender des GSI-Aufsichtsrats:
Ministerialdirigent Dr. Volkmar Dietz