

Press release

Technische Universität Wien

Dr. Florian Aigner

09/04/2024

<http://idw-online.de/en/news839128>

Research results, Scientific Publications
Physics / astronomy
transregional, national



Die erste Atomkern-Uhr der Welt

Atomuhren gibt es schon seit Jahrzehnten – nun aber gelang der entscheidende Schritt zu noch höherer Präzision: Die TU Wien präsentiert zusammen mit internationalen Partnern die erste Atomkern-Uhr.

Jahrzehnte lang arbeitete man auf diesen Erfolg hin, nun geht plötzlich alles ganz schnell: Erst im April hatte ein Team rund um Prof. Thorsten Schumm von der TU Wien einen großen Erfolg verkündet. Erstmals war es gelungen, einen Atomkern gezielt mit einem Laser von einem Zustand in einen anderen Zustand umzuschalten – ein Effekt, der sich für Hochpräzisions-Messungen nutzen lässt. Nun, wenige Wochen später, schaffte man es bereits, diesen Thorium-Übergang in der Praxis anzuwenden: TU Wien und JILA/NIST (USA) gelang es, eine hochpräzise optische Atomuhr mit einem Hochenergie-Lasersystem zu kombinieren und sie erfolgreich mit einem Kristall zu koppeln, der Thorium-Atomkerne enthält. Die Thorium-Atomkerne können nun als Taktgeber genutzt werden und somit die Uhr noch exakter ticken lassen – die erste Atomkern-Uhr der Welt ist da.

Noch liefert sie keine höhere Präzision als eine gewöhnliche Atomuhr, das war in diesem ersten Schritt auch noch nicht das Ziel. „Mit dem ersten Prototyp ist nun aber bewiesen: Man kann Thorium als Taktgeber für ultrahochpräzise Messungen verwenden, der Rest ist technische Entwicklungsarbeit, bei der keine großen Hindernisse mehr zu erwarten sind“, sagt Thorsten Schumm. Die erste Atomkern-Uhr wurde nun im Journal „Nature“ präsentiert.

Das Ticken eines Laserstrahls

Jede Uhr braucht einen Taktgeber – etwa das Schwingen des Pendels in der Pendeluhr. Präzisionsuhren nutzen dafür heute das Schwingen elektromagnetischer Wellen, gezählt werden die Schwingungen eines Laserstrahls. Doch die Frequenz eines Lasers kann sich im Lauf der Zeit ein bisschen ändern, dann muss man seine Frequenz nachjustieren.

„Deshalb benötigt man zusätzlich zum Laser ein Quantensystem, das äußerst empfindlich auf eine ganz bestimmte Laserfrequenz reagiert“, erklärt Thorsten Schumm (Atominstitut TU Wien). Das können zum Beispiel Cäsium- oder Strontium-Atome sein. Wenn sie mit Laserlicht einer ganz bestimmten Frequenz getroffen werden, dann wechseln die Elektronen dieser Atome zwischen zwei Quantenzuständen hin und her, und das kann man messen. Wenn sich die Laserfrequenz verändert, dann passt sie nicht mehr exakt zur Eigenfrequenz der Atome, die Atome werden nicht mehr so effizient angeregt. Dann muss man den Laser nachjustieren. Durch diese Technik kann man die Laserfrequenz extrem stabil halten – das ist das Grundprinzip einer Atomuhr.

Von der Atomuhr zur Atomkern-Uhr

Schon seit Jahrzehnten wusste man aber: Könnte man diesen Trick nicht mit einem Atom, sondern mit einem Atomkern durchführen, dann wäre noch viel höhere Präzision möglich. Atomkerne sind viel kleiner als Atome und reagieren viel weniger stark auf Störungen, etwa auf elektromagnetische Felder von außen. Das Problem dabei war nur: Um Atomkerne zwischen zwei Zuständen hin und her zu schalten braucht man normalerweise mindestens tausendmal mehr

Energie als die Photonen eines Lasers haben.

Die einzige bekannte Ausnahme ist Thorium: „Thorium-Kerne haben zwei Zustände sehr ähnlicher Energie, sodass man sie mit Lasern umschalten kann“, sagt Thorsten Schumm. „Damit das gelingt, muss man die Energiedifferenz zwischen diesen beiden Zuständen aber sehr genau kennen. Viele Jahre lang haben Forschungsteams auf der ganzen Welt nach dem genauen Wert dieser Energiedifferenz gesucht, um Thorium-Kerne gezielt umschalten zu können – uns ist das erstmals gelungen, das ist das Ergebnis, das wir im April publizieren konnten.“

Ein „optisches Getriebe“ und der Frequenzkamm

Nun gelang es, die Atomuhr des JILA (ein Forschungsinstitut des NIST bzw. der University of Boulder, USA) mit Thorium-Atomkernen zu koppeln. Dafür waren einige physikalische Tricks nötig: „Die Atomuhr arbeitet mit Laserlicht im Infrarot-Bereich, damit werden Strontium-Atome angeregt. Unsere Thorium-Atomkerne allerdings brauchen Strahlung im UV-Bereich“, erklärt Thorsten Schumm. „Man muss daher eine hochpräzise Übersetzung von Infrarot-Frequenzen auf UV-Frequenzen erzeugen, ähnlich wie ein mechanisches Getriebe eine langsame Rotation durch passende Zahnräder in eine schnellere Rotation übersetzen kann.“

Dafür verwendete man ultrakurze Infrarot-Laserpulse, die aus einer Reihe unterschiedlicher Infrarot-Frequenzen bestehen. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Frequenzen ist immer gleich, so wie der Abstand zwischen benachbarten Zähnen eines Kamms, daher spricht man in diesem Fall auch von einem „Frequenzkamm“. Dieser Frequenzkamm aus Infrarot-Licht trifft auf Xenon-Gas, die Xenon-Atome reagieren dann auf das Infrarot-Licht, indem sie auf sehr exakt vorhersehbare Weise UV-Licht produzieren. Dieses UV-Licht wird dann auf einen winzigen Kristall geschickt, der Thorium-Atomkerne enthält. „Dieser Kristall ist gewissermaßen das Herzstück des Experiments“, sagt Thorsten Schumm. „Er wurde bei uns in Wien am Atominstitut produziert, mehrere Jahre Entwicklungsarbeit waren nötig, um das dafür nötige Know-How zu entwickeln.“

So entstand die erste Atomkern-Uhr der Welt. Eine Präzisionssteigerung liefert dieser erste Prototyp noch nicht – aber das war von vornherein klar. „Uns ging es immer darum, eine neue Technologie zu entwickeln. Wenn die erst mal da ist, kommt die Qualitätssteigerung dann ganz von selbst, das war immer schon so“, sagt Thorsten Schumm. „Die ersten Autos waren auch noch nicht schneller als Kutschen. Es ging darum, ein neues Konzept vorzustellen. Und genau das ist uns jetzt mit der Atomkern-Uhr gelungen.“

Präzisionsrekord

Möglich wurde dadurch auch eine um Größenordnungen genauere Vermessung der Thorium-Zustände. „Als wir den Übergang erstmals angeregt haben, konnten wir die Frequenz auf einige Gigahertz genau bestimmen. Das war bereits um mehr als einen Faktor tausend besser als alles, was davor bekannt war. Jetzt aber haben wir eine Präzision im Bereich von Kilohertz – also noch einmal eine Million mal besser“, sagt Thorsten Schumm. „Wir rechnen damit, auf diese Weise die besten Atomuhren in 2-3 Jahren zu überholen“.

Diese Technologie soll nicht nur deutlich präzisere Zeitmessungen ermöglichen als bisherige Uhren, auch andere physikalische Größen sollen sich dann in weiterer Folge präziser messen lassen. In vielen Forschungsbereichen könnte diese Thorium-Technologie wichtige Fortschritte liefern, von der Geologie bis zur Astrophysik. Eine der erhofften Anwendungen: Man könnte mit dieser extremen Präzision nun auch die fundamentalen Gesetze der Natur unter die Lupe nehmen und untersuchen, ob die Naturkonstanten vielleicht gar nicht perfekt konstant sind, sondern sich möglicherweise in Raum und Zeit ändern.

contact for scientific information:

Prof. Thorsten Schumm
Atominstitut
Technische Universität Wien
+43 1 58801 141896
thorsten.schumm@tuwien.ac.at

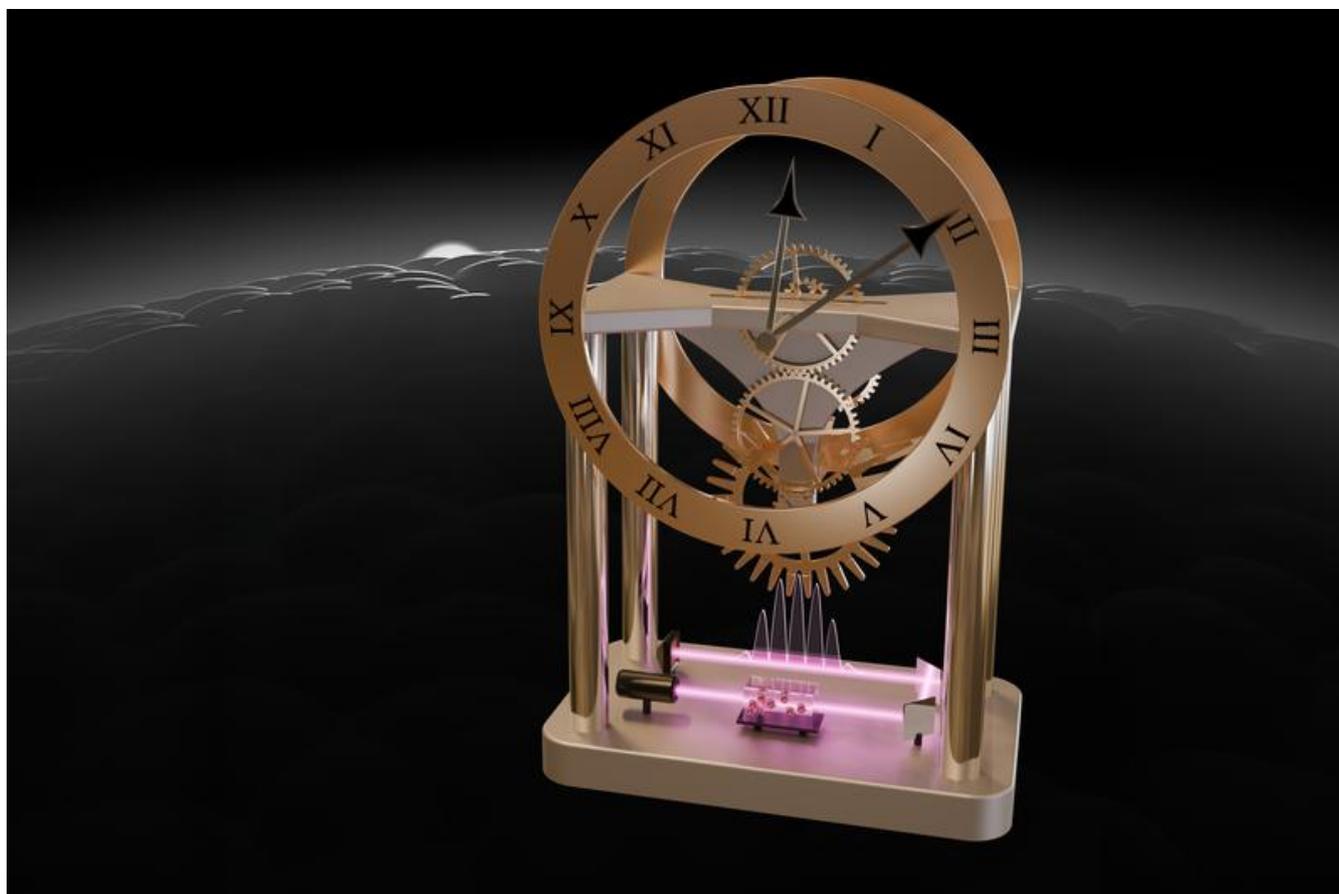
Original publication:

Frequency ratio of the ^{229m}Th isomeric transition and the ^{87}Sr atomic clock

<https://www.nature.com/articles/s41586-024-07839-6>

Open Access Version (arxiv):

<https://arxiv.org/abs/2406.18719>



Mit Atomkernen Zeit messen
Oliver Diekmann, TU Wien
Oliver Diekmann, TU Wien