

Neue Frequenznormale und Tests fundamentaler Physik

André P. Kulosa¹, Tanja E. Mehlstäubler², Ekkehard Peik³,
Piet O. Schmidt⁴, Andrey Surzhykov⁵

Die Fortschritte, die in den letzten Jahren in der Entwicklung von optischen Uhren erzielt wurden, sind spektakulär und es scheint bei den am weitesten fortgeschrittenen Systemen auch bisher keine harte Begrenzung der erreichbaren Genauigkeit in Sicht zu sein. Dennoch, oder vielleicht auch deswegen, hat sich ein großes Interesse entwickelt, noch weitere und andersartige Ansätze für Atomuhren zu erforschen und den Kreis der untersuchten physikalischen Systeme auszuweiten. Die experimentellen Methoden der Speicherung und Laserkühlung von Atomen und Ionen sind so weit entwickelt, dass sie erfolgreich auf immer größere Gruppen von chemischen Elementen angewandt werden konnten. Bei gespeicherten Ionen ermöglicht das Gleichgewicht aus Coulomb-Abstoßung und der einschließenden Kraft einer Ionenfalle die Bildung von stabilen Strukturen unterschiedlicher Ionen, die in ihren inneren und äußeren Freiheitsgraden bis in den Quantenbereich kontrolliert und damit für Frequenzmessungen höchster Präzision verwendet werden können. Die mit einer größeren Ionenzahl erreichbare höhere Stabilität soll in der Multi-Ionen-Uhr ausgenutzt werden, die im ersten Abschnitt dieses Artikels eingeführt wird. Anschließend werden zwei physikalische Systeme mit großem Potenzial für präzise Uhren vorgestellt: hochgeladene Ionen und der Atomkern Thorium-229, der eine optische Resonanzfrequenz besitzt. Neben der Aussicht auf neue Uhren sehr hoher Genauigkeit begründen auch die Möglichkeiten für Tests fundamentaler Physik das Interesse an diesem Forschungsgebiet. Hochpräzise Frequenzvergleiche sollen genutzt werden, um nach kleinen Abweichungen von den Vorhersagen der etablierten physikalischen Theorien zu suchen, hervorgerufen von erwarteten Effekten „Neuer Physik“, wie zum Beispiel einer zeitlichen Veränderung von Naturkonstanten oder einer Kopplung der Uhren an die rätselhafte „Dunkle Materie“. Die hier vorgestellten, neuen Systeme zeichnen sich durch besonders hohe Empfindlichkeiten für solche Tests aus. Der Vergleich physikalisch möglichst unterschiedlicher Uhren erhöht die Wahrscheinlichkeit, wirklich neue Effekte nachzuweisen, und wird es erlauben, sie von experimentellen Störungen zu unterscheiden.

1. Quantenuhren der Zukunft: Multi-Ionen-Uhren

Optische Uhren mit gespeicherten Ionen besitzen nach aktuellem Stand der Technik relative systematische Frequenzunsicherheiten, die im Bereich von wenigen $1 \cdot 10^{-18}$ liegen. Dies bedeutet eine Messpräzision von 18 Stellen hinter dem Komma, was Atomuhren basierend auf lasergekühlten Ionen zu den genauesten Apparaten macht, die je von Menschenhand entwickelt wurden. Die in diesen Experimenten verwendeten Ionenfallen speichern die positiv geladenen Teilchen durch eine Kombination aus Gleichspannungs- und Wechselspannungs-Feldern im Radiofrequenz(RF)-Bereich. Sie ermöglichen einen tiefen Einschluss (in der Größenordnung von 10^4 K) der Ionen, ohne dabei ihre elektronischen Energieniveaus in erster Näherung zu beeinflussen. Daraus resultiert die Möglichkeit, Ionen von externen Störungen abzuschirmen, was eine ideale Voraussetzung für Präzisionsspektroskopie darstellt. Eine fundamentale Limitierung, um mit der Uhrenunsicherheit in den 10^{-19} -Bereich vorzustoßen, ist derzeit nicht absehbar. Neben der Anwendung als hochstabile Frequenzreferenz können auch einige Gebiete der fundamentalen Forschung von diesen Genauigkeitsniveaus profitieren, z. B. die Suche nach „Neuer Physik“, die über das Standardmodell hinausgeht oder Tests auf mögliche Verletzungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Stabile und reproduzierbare optische Uhren ebnet darüber hinaus auch den Weg für interdisziplinäre Anwendungen, wie z. B. die chronometrische Höhenvermessung in der Geodäsie (siehe Artikel "Optische Uhren und ihre Anwendung in der Geodäsie" dieses Heftes). Hier gibt ein Frequenzvergleich zweier, voneinander entfernter Uhren mittels relativistischer Zeitdilatation Aufschluss über ihren Unterschied im Gravitationspotential der Erde: Je weiter ein Beobachter vom Erdmittelpunkt entfernt ist, desto schneller vergeht die Zeit für ihn. Relative Frequenzunsicherheiten von 10^{-18} und besser ermöglichen eine Auflösung von Höhenunterschieden unter 1 cm auf der Erdoberfläche, was den Gebrauch von optischen Uhren als hochsensitive Quantensensoren nahelegt.

- 1 Dr. André P. Kulosa, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig, E-Mail: andre.kulosa@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0003-0982-4113>
- 2 PD Dr. Tanja E. Mehlstäubler, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig, E-Mail: tanja.mehlstaebler@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0003-3430-4689>
- 3 PD Dr. Ekkehard Peik, Fachbereich „Zeit und Frequenz“, PTB Braunschweig, E-Mail: ekkehard.peik@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0001-6309-2975>
- 4 Prof. Dr. Piet O. Schmidt, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, E-Mail: piet.schmidt@quantummetrology.de, <https://orcid.org/0000-0003-0773-5889>
- 5 Prof. Dr. Andrey Surzhykov, Fundamental Physics for Metrology, PTB Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, E-Mail: andrey.surzhykov@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0002-6441-0864>

1.1 Warum überhaupt Multi-Ionen-Uhren?

Ein Nachteil in der heutigen Generation von Atomuhren, die mit einem einzelnen Ion arbeiten, ist das geringe Signal-zu-Rausch-Verhältnis des einzelnen Quantenabsorbers, welches die erreichbare Kurzzeitstabilität während der Uhrenabfrage limitiert. Optische Atomuhren basierend auf lasergekühlten Ionen benötigen nach heutigem Stand der Technik Integrationszeiten von mehreren 10 bis 100 Tagen, um eine relative Frequenzauflösung von 10^{-18} zu erreichen. Dies entspricht dem derzeitigen Ziel für geodätische Messungen. Allerdings sind solch lange Integrationszeiten eher ein Hindernis für Messkampagnen im „freien Feld“. Eine Verbesserung der Kurzzeitstabilität von Ionen-basierten Frequenznormalen ist daher von entscheidender Bedeutung, um die gleiche Frequenzauflösung wesentlich schneller zu erreichen.

Eine Möglichkeit, die Stabilität von Atomuhren basierend auf Einzelionen zu verbessern, ist die Abfrage schmalere, atomarer Übergänge und die daraus resultierende Erhöhung des Gütefaktors $Q = f_0/\Delta f$ der aufgelösten Linie, wobei f_0 die Absolutfrequenz und Δf die Linienbreite des Uhrenübergangs darstellen. Dafür wird jedoch eine ausgezeichnete Stabilität des Uhrenlasers benötigt, was mit weiteren technischen Herausforderungen einhergeht: Um Fourier-limitierte Spektroskopie an Millihertz-breiten, atomaren Übergängen durchführen zu können, muss der Uhrenlaser eine Kurzzeit-Linienbreite ebenfalls im Millihertz-Bereich besitzen. Aufgrund der binären Information, die man bei Spektroskopie eines einzelnen Ions erhält, werden lange Integrationszeiten τ benötigt, um genügend Statistik zu erhalten, um den Laser auf das atomare Signal zu stabilisieren. Für die Auflösung eines Millihertz-breiten Uhrenübergangs und die Stabilisierung eines Lasers darauf mittels Standard-Spektroskopie, muss der Uhrenlaser beispielsweise eine Frequenzstabilität im unteren 10^{-17} -Bereich über mehrere Minuten aufweisen, um das Quantenprojektionsrauschen

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{2\pi f_0} \sqrt{\frac{1}{NT\tau}} \quad (1)$$

des Ions zu erreichen. N ist hier die Anzahl der spektroskopierten Atome und T die Wechselwirkungszeit der Uhrenabfrage. Dies ist keine leichte Herausforderung, besonders wenn kompakte oder feldtaugliche Instrumente eingesetzt werden. Im Bereich der Frequenzmetrologie wird derzeit ein enormer Aufwand betrieben, um die Limitierungen der Lokaloszillatoren hinsichtlich ihrer Stabilität weiter zu reduzieren, siehe Artikel "Ultrastabile Laser" in diesem Heft. Laser, die auf kryogene Resonatoren mit einem thermischen

Rausch-Limit von $\sigma = 4 \cdot 10^{-17}$ stabilisiert werden, zeigten kürzlich eine Phasen-Kohärenzzeit von ungefähr 16 Sekunden. Eine Ausdehnung der Uhrenabfrage zu längeren Kohärenzzeiten von mehreren Sekunden muss dabei Hand in Hand mit einer verbesserten Kontrolle der Ionenbewegung auf diesen Zeitskalen gehen, welche vor allem durch übermäßiges Heizen des Ions aufgrund von Rauschen des elektrischen Feldes, Mikrobewegung im RF-Potential und Hintergrundstöße beeinträchtigt wird.

Eine schnellere Anbindung des Uhrenlasers an das Atom und ein schnelleres Auslesen der Uhr mit hoher Genauigkeit kann u. a. mit neuen, phasensensitiven Abfrage-Schemata erzielt werden, in welchen mehrere Atomuhren-Ensembles in einer kaskadierten Abfrage verwendet werden, um die Phasenentwicklung des Uhrenlasers mit steigender Wechselwirkungszeit zu verfolgen. Das klassische Limit durch Quantenprojektionsrauschen kann bei der Abfrage mehrerer Atome durch Quantenkorrelationen überwunden werden, z. B. durch die Verwendung gequetschter Spin-Zustände [Ludlow2015]. Ionen-basierte Frequenznormale der nächsten Generation müssen daher künftig mit vielen Ionen betrieben werden, um von einer der genannten Techniken zu profitieren. Dies bedeutet aber, ein komplexes Vielteilchensystem von geladenen und miteinander wechselwirkenden Teilchen zu beherrschen.

Bereits eine klassische Uhrenabfrage von Multi-Ionen-Ensembles würde einen großen Sprung in Richtung höherer Stabilitäten von Frequenznormalen bedeuten. Gemäß Gleichung (1) mittelt die Stabilität von Frequenzmessungen gleichermaßen mit der Wurzel aus der Anzahl der Atome N und der Integrationszeit τ herunter, sodass eine Erhöhung der Ionenanzahl auf N eine Reduzierung der Integrationszeit auf $1/N$ ermöglicht. Konkret bedeutet dies z. B. dass 10 Ionen die gleiche Auflösung wie ein einzelnes Ion bereits nach einem Zehntel der Integrationszeit erreichen. Hier zeigt sich das hohe Potenzial neuer Multi-Ionen-Uhren für die Entwicklung neuer, ultra-stabiler und präziser Atomuhren mit gespeicherten Ionen. Diese ermöglichen es, mit kurzen Mittelungszeiten kompakte und ultra-stabile Referenzsysteme zu liefern, die für die Navigation und relativistische Geodäsie von hohem Nutzen sind.

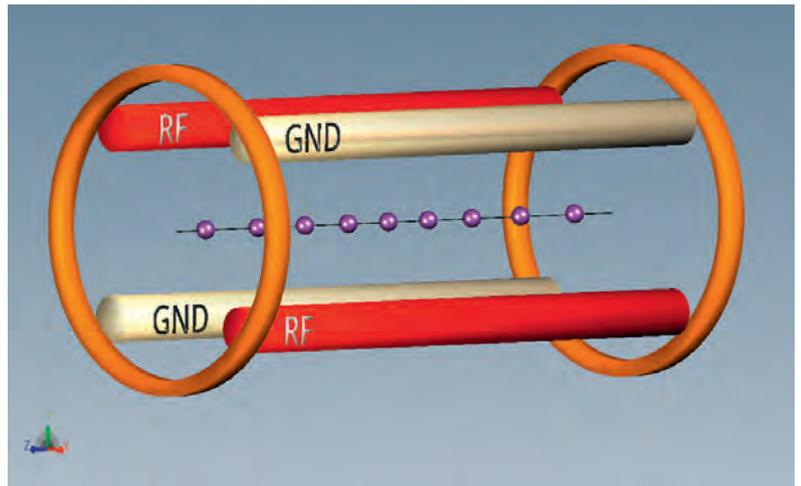
1.2 Kandidaten für eine Multi-Ionen-Uhr

Befinden sich mehrere, lasergekühlte Ionen in der gleichen Falle, formieren sie sich zu Coulomb-Kristallen, wobei sich die Ionen in ihren Gleichgewichtspositionen an Orten eines verschwindenden, gemittelten elektrischen Feldes anordnen. Die Ladungen der benachbarten Teilchen verursachen jedoch Gradienten im elektrischen Feld,

die mit den Elektronenschalen benachbarter Ionen über deren Quadrupolmoment wechselwirken und somit eine Frequenzverschiebung im Uhrenübergang induzieren. Sofern nicht atomare Uhrenzustände mit einem verschwindenden Quadrupolmoment θ gewählt werden, liegen die resultierenden Frequenzverschiebungen bei Größenordnungen von 10 Hz. Ebenso führen statische Feldgradienten des Fallenpotentials oder Streufelder von Ladungen auf den Oberflächen von Isolatoren zu Frequenzverschiebungen in der gleichen Größenordnung.

Ferner verursachen räumlich ausgedehnte RF-Feldgradienten Frequenzverschiebungen, die präzise charakterisiert werden müssen. Betrachtet man all diese verschiedenen Effekte, stellt sich die fundamentale Frage, ob ein größeres Ensemble von Ionen überhaupt ausreichend gut kontrolliert werden kann, um relative Frequenzgenauigkeiten oder Langzeitstabilitäten im Bereich von 10^{-18} zu erreichen. Bisher wurden nur Frequenznormale basierend auf Mikrowellenübergängen in einer Wolke von Puffergas-gekühlten Ionen untersucht, die eine Langzeitstabilität von 10^{-15} erreicht haben.

Mögliche Kandidaten für eine Multi-Ionen-Uhr sind In^+ , Al^+ , Yb^+ , Lu^+ und Th^{3+} (siehe Abschnitt 3). Charakteristisch ist bei diesen Elementen ein verschwindendes oder sehr geringes Quadrupolmoment. Dies geht einher mit Uhrenübergängen zwischen Zuständen, die sphärische Elektronenorbitale vorweisen, wie die $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ Interkombinationslinien in Zwei-Elektronen-Systemen. Ein verschwindendes Quadrupolmoment erlaubt es, ein weiteres Ion in der gleichen Falle zu speichern, welches zum sympathetischen Kühlen bzw. zur Uhrendetektion verwendet wird, ohne zu störenden Frequenzverschiebungen zu führen. Das Al^+ -Ion, das derzeit in vielen Forschungslaboren mittels Quantenlogik-Ansatz untersucht wird, erfüllt genau diese Bedingungen. Eine ähnliche Situation findet sich für das In^+ -Ion. Hier ist die direkte Detektion der Anregung auf dem $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ -Uhrenübergang möglich, da die $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$ -Interkombinationslinie dank relativistischer Effekte dafür hinreichend verbreitert ist. Das leicht skalierbare Detektionsschema und die Möglichkeit zur direkten Laserkühlung auf dem gleichen Übergang machen In^+ zum geeigneten Kandidaten für den Multi-Ionen-Ansatz. Uhrenspektroskopie auf dem $\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ -Übergang in $^{115}\text{In}^+$ wurde bereits erfolgreich demonstriert und wird gegenwärtig in Tokyo und Braunschweig hinsichtlich Uhrenbetriebs mit mehreren Ionen [Pyka2014] untersucht. Neben atomaren Zuständen mit sphärischen Elektronenorbitalen ist auch der Oktupol-Übergang zum stark abgeschirmten F-Zustand im Yb^+ -Ion ein möglicher Kandidat für den Multi-Ionen-Ansatz [Huntemann2012].



Auch wenn keine sphärischen Elektronenorbitale in den Zuständen des Uhrenübergangs vorliegen, wie es z. B. im Lu^+ -Ion der Fall ist, können diese atomaren Spezies geeignete Kandidaten für eine Multi-Ionen-Uhr sein. In diesem Fall betrachtet man innerhalb des Uhrenübergangs die möglichen Hyperfein-Übergänge ausgehend von einem bestimmten Magnetzustand m_F im Grundzustand. Eine Mittelung über alle diese Hyperfein-Übergänge führt zu einer Unterdrückung der Zeeman- und Quadrupolverschiebungen.

1.3 Entwicklung skalierbarer Ionenfallen an der PTB

Bei der Uhrenspektroskopie auf einem Genauigkeitsniveau von 10^{-18} spielt eine Vielzahl von systematischen Effekten eine entscheidende Rolle. Eine technische Herausforderung für die Nutzung von vielen Ionen ist das Design einer geeigneten Ionenfalle, die für das gefangene Ionen-Ensemble eine möglichst homogene Umgebung bietet. So ist zum Beispiel zu beachten, dass die angelegte Fallenanzugsspannung von ~ 1 kV nicht zu einer ungleichmäßigen Aufheizung der Fallenstruktur führt, da eine homogene thermische Umgebung entscheidend für den Beitrag der Schwarzkörperstrahlung zur Uhrenungenauigkeit ist. Ionenfallen für viele Ionen sind von ihrem Aufbau her im Allgemeinen komplexer und somit ist die Materialerwärmung noch kritischer als bei bisherigen Standard-Paul-Fallen.

In linearen RF-Ionenfallen wird durch das elektrische Wechselfeld ein starker Einschluss der Ionen radial um die Achse entlang des Zentrums der Elektroden erzeugt. Entlang der Achse wird die Falle durch zwei Elektroden mit einer abstoßenden Gleichspannung abgeschlossen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Entlang dieser Fallenachse existiert eine RF-Knotenlinie, an der sich die Ionen eines linearen Coulomb-Kristalles an ihren Gleichgewichtspositionen anordnen.

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer linearen Paul-Falle. Der starke RF-Einschluss wird über vier Elektroden in Quadrupolanordnung generiert. Eine DC-Spannung, die an zwei End-Elektroden (hier als orangefarbener Ring dargestellt) angelegt wird, führt zu einem Einschluss der geladenen Ionen in axialer Richtung. Entlang dieser schwachen Fallenachse ordnen sich lineare Ionenketten in der RF-Knotenlinie (schwarz) an ihren Gleichgewichtspositionen an.

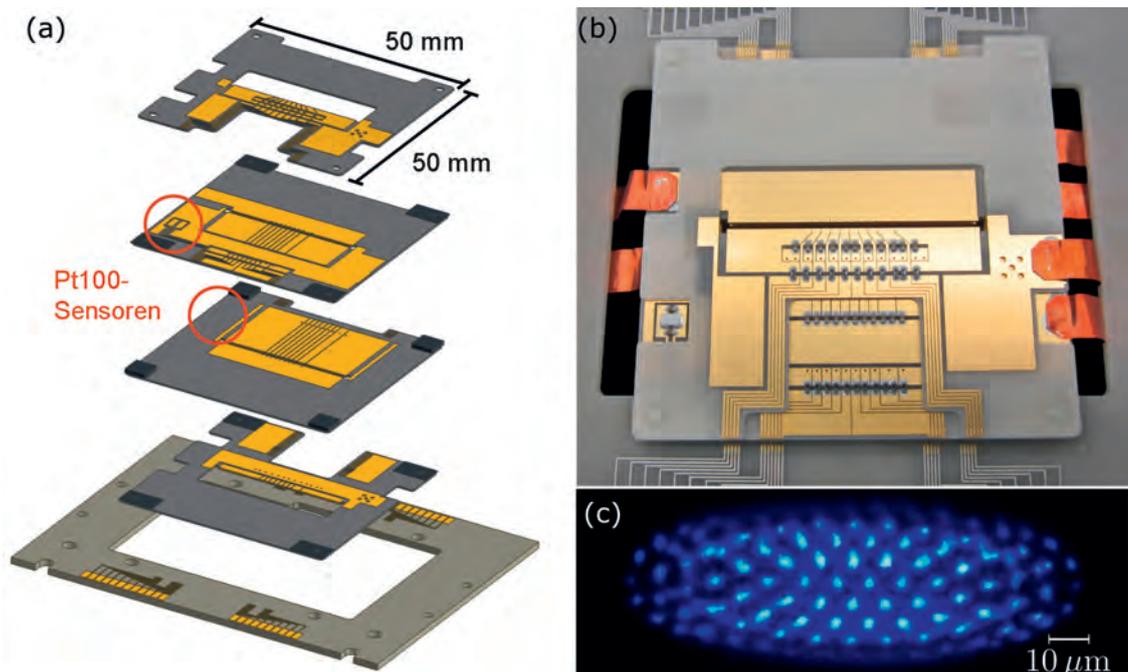
Ein weiterer, systematischer Effekt ist die Verschiebung der geladenen Ionen von der RF-Knotenlinie der Paul-Falle aufgrund von statischen, elektrischen Störfeldern. Dies führt zu kleinen Oszillationen mit der Frequenz der angelegten Fallenantriebsspannung, die als Mikrobewegung bezeichnet werden. Mikrobewegung verursacht nun Energie-Verschiebungen und Zeitdilatationen im Bereich von einigen Hz [Keller2015], sobald Ionen in einem 2D- oder 3D-Kristall die RF-Knotenlinie verlassen. Selbst lineare Ionenketten können durch eine imperfekte Elektroden-Geometrie sowie Effekte der endlichen Fallenstruktur residuellen RF-Feldern auf der Fallennachse ausgesetzt sein, was signifikante Frequenzverschiebungen in ausgedehnten Kristallen hervorrufen würde [Herschbach2012].

Das erste Konzept zur Erhöhung der Ionenanzahl für optische Uhrenspektroskopie stammt aus dem Jahr 2012 [Herschbach2012]. Hier war die Idee, systematische Verschiebungen zu reduzieren bzw. zu vermeiden, indem man sowohl Ionen-Kandidaten wählt, die eine intrinsisch geringe Sensitivität auf Feldgradienten besitzen, als auch Ionenfallen herzustellen, die eine Umgebung mit den geringsten, systematischen Verschiebungen bereitstellen und eine hohe Kontrolle der Ionenbewegung ermöglichen [Keller2015, Herschbach2012]. Das Design solcher Multi-Ionen-Fallen, die die gleichen exzellenten Umgebungsbedingungen wie für ein einzelnes Ion bereitstellen, stellt eine große, technische Herausforderung dar. In [Herschbach2012] wurde ein skalierbares Ionenfallen-Design vorgestellt, das eine lineare Anordnung von mehreren Ionenfallen ermöglicht. Etwa 10 Ionen können simultan in jedem Fallensegment gespeichert werden, wobei für jedes Ionen-Ensemble eine definierte und kontrol-

lierte Umgebung sichergestellt ist. Auf diese Weise können optische Frequenznormale mit mehreren 10 bis zu 100 Ionen betrieben werden, mit der Aussicht, die Mittelungszeit von Frequenzmessungen um bis zu zwei Größenordnungen zu reduzieren.

In einem mehrjährigen Entwicklungsprozess an der PTB entstand basierend auf dem Design der Prototyp-Falle eine neue, skalierbare Ionenfalle für die Verwendung in der Frequenzmetrologie. Diese ist komplett nicht-magnetisch und besteht aus laser-geschnittenen AlN-Keramik-Wafern mit Ti/Au-beschichteten Elektroden. Abbildung 2 zeigt eine dieser Fallen, zusammen mit einem Ionen-Coulomb-Kristall bestehend aus lasergekühlten $^{172}\text{Yb}^+$ -Ionen, der in dieser gefangen wurde. Diese Fallen-Plattform besteht, wie in (a) dargestellt, aus vier 380 μm dicken Wafern, die präzise aufeinander ausgerichtet werden. Das auf Leiterplatten basierende Design ermöglicht Skalierbarkeit und den Einsatz von symmetrisch geformten Elektroden mit Herstellungstoleranzen unter 10 μm . Zwei auf den Chips integrierte Pt100-Sensoren erlauben eine Auslesung der Temperatur während des Uhrenbetriebs, was essenziell für die Bestimmung der Uhrenunsicherheit aufgrund von Schwarzkörperstrahlung ist. Weitere Eigenschaften der neuen Ionenfalle sind optischer Zugang für Laserstrahlung aus allen drei Raumrichtungen, dedizierte Kompensationselektroden für 3D-Streufelder in jedem der einzelnen Fallensegmente, sowie Chip-integrierte RC-Filter nahe jeder Elektrode, um elektronisches Rauschen zu unterdrücken [Keller2019a]. In dieser Ionenfalle konnten bereits die Mikrobewegungsamplituden für einen Coulomb-Kristall mit 14 Yb^+ -Ionen mit sub-nm-Auflösung vermessen werden, wie in Abbildung 3 dargestellt. Die resultierenden Frequenzver-

Abbildung 2:
Neue Präzisions-Ionenfalle aus AlN-Keramik. (a) Schematische Darstellung des Chip-Stapels bestehend aus vier Wafern. (b) Die einzelnen Wafer sind lasergeschnitten und erlauben einen skalierbaren Multi-Ionen-Uhrenbetrieb mit benachbarten Ensembles. Die Chips sind ausgestattet mit integrierter Filter-Elektronik. (c) EMCCD-Aufnahme eines großen Ionen-Coulomb-Kristalls (fluoreszierende Yb^+ -Ionen), der als hochstabile Frequenzreferenz dienen kann.



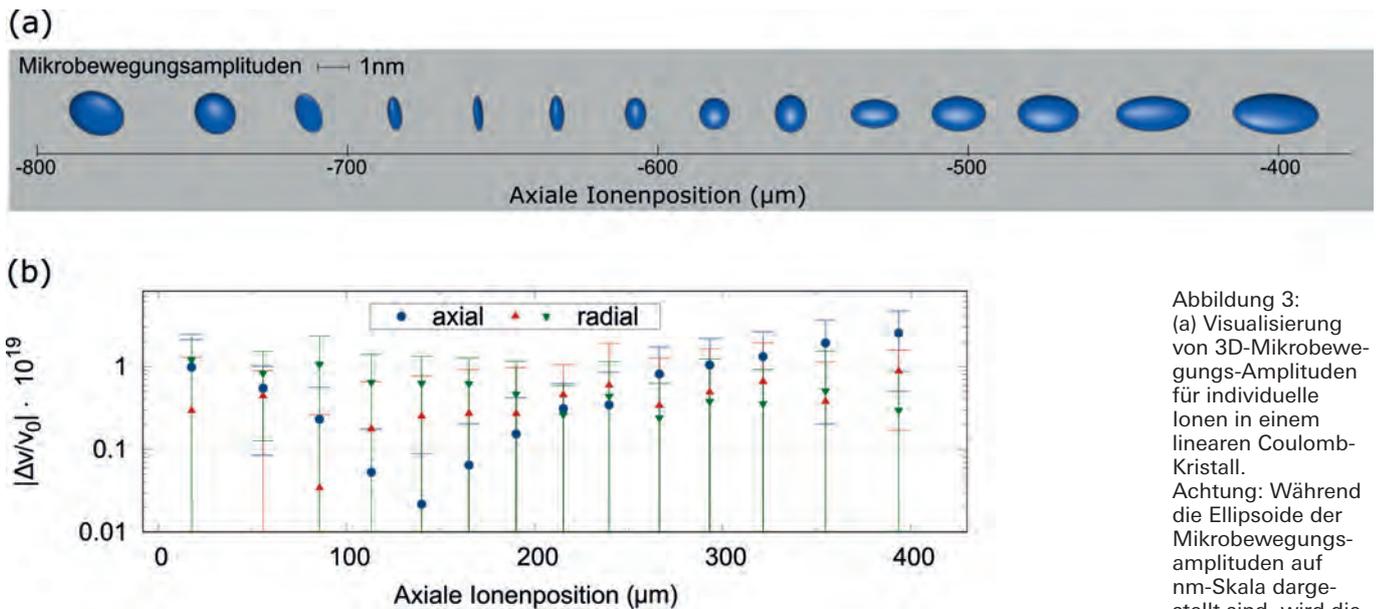


Abbildung 3:
(a) Visualisierung von 3D-Mikrobewegungs-Amplituden für individuelle Ionen in einem linearen Coulomb-Kristall. Achtung: Während die Ellipsoide der Mikrobewegungsamplituden auf nm-Skala dargestellt sind, wird die Ionenposition auf µm-Skala dargestellt.
(b) Die zugehörigen, relativen Frequenzverschiebungen aufgrund der Zeitdilatation für In^{91+} -Ionen mit atomarer Masse $m = 115$ au.

schiebungen aufgrund von Zeitdilatation liegen dabei im unteren 10^{-19} -Bereich [Keller2019a, Keller2019b]. Forschung an gefangenen Ionen in skalierbaren Fällen ist seit kurzem auch Bestandteil im BMBF-geförderten Industrieprojekt „Optische Einzelionen-Uhr für Anwender“ (opticlock). Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung einer optischen Atomuhr basierend auf einem lasergekühlten Yb^{+} -Ion als Frequenzreferenz, die für Anwendungen als Ersatz eines Wasserstoffmasers eine Verbesserung der Stabilität und Genauigkeit um mindestens eine Größenordnung verspricht. Damit würde es möglich, optische Uhren auch außerhalb von spezialisierten Metrologieinstituten einzusetzen.

2. Struktur und Wechselwirkungen hochgeladener Ionen

Hochgeladene Ionen (engl. *highly charged ions*, HCIs) stellen heute ein einzigartiges Werkzeug zur Untersuchung vieler fundamentaler, aber wenig verstandener Probleme in verschiedenen Bereichen der modernen Wissenschaft dar. Im Bereich der Atomphysik dienen diese Ionen als natürliche „Laboratorien“ zur Erforschung von Systemen mit wenigen Elektronen, die den extrem starken elektromagnetischen Feldern der Kerne ausgesetzt sind. So erfährt ein Elektron, das sich im $1s$ -Grundzustand von (relativ leichtem) wasserstoffähnlichem Argon Ar^{17+} befindet, eine elektrische Feldstärke von etwa 10^{14} V/cm; ein Wert, der derzeit nur von den leistungstärksten Laseranlagen erreicht werden kann. Mit der weiteren Erhöhung der Kernladungszahl Z kann sich das elektromagnetische Feld innerhalb eines Ions dem „kritischen“ Bereich nähern, in dem das Quantenvakuum instabil wird und durch die Bildung von Elektron-Positron-Paaren „zerfallen“ kann. Unter diesen extremen Bedingungen unterscheidet sich die elektronische

Struktur der hochgeladenen Ionen drastisch von der „konventioneller“ neutraler Atome. Ionen mit nur wenigen Elektronen sind zum Beispiel sehr eng gebundene Systeme, deren Ionisationsenergie mit Z^2 skaliert und bei schweren Elementen wie U^{91+} bis zu 130 keV betragen kann. Dieselbe Z^2 -Skalierung gilt auch für Energien von Übergängen zwischen elektronischen Zuständen mit unterschiedlichen Hauptquantenzahlen n . Für hochgeladene Ionen können diese (Übergangs-)Energien im Röntgen- und sogar im γ -Strahlenbereich liegen, was einen deutlichen Unterschied im Vergleich zu den optischen und UV-Übergängen in leichten, neutralen Atomen bedeutet. Darüber hinaus kommen viele faszinierende Phänomene, die normalerweise in neutralen Systemen „versteckt“ sind, in hochgeladenen Ionen zur Geltung. Beispielsweise führt die Kopplung des Elektronenspins mit der Orbitalbewegung und dem Kernspin zu einer Fein- bzw. Hyperfeinaufspaltung von Ionen-niveaus, die mit $\Delta E_{fs} \propto Z^4$ bzw. $\Delta E_{hfs} \propto Z^3$ skalieren. Für Ionen mit mittlerer und hoher Kernladungszahl Z ermöglichen $\Delta E_{fs} \propto \text{keV}$ und $\Delta E_{hfs} \propto \text{eV}$ so eine detaillierte Untersuchung von relativistischen sowie magnetischen Wechselwirkungen und sogar nuklearen Eigenschaften. Auch die quantenelektrodynamischen (QED) Effekte führen zu Energieverschiebungen $\Delta E_{\text{QED}} \propto Z^4$, die bei hochgeladenen Ionen stark ausgeprägt sind und bei sehr schweren Systemen einige hundert eV erreichen können. Das Studium der Struktur hochgeladener Ionen erlaubt es daher, unser grundlegendes Verständnis von atomaren Systemen im kritischen (und sogar überkritischen) Regime zu testen, über das uns noch immer detaillierte Kenntnisse fehlen.

Durch das Entfernen vieler Elektronen rücken die verbleibenden Elektronen näher an den Kern heran und die Polarisierbarkeit der Elektronenhülle sinkt. Dadurch sind HCIs besonders unempfind-

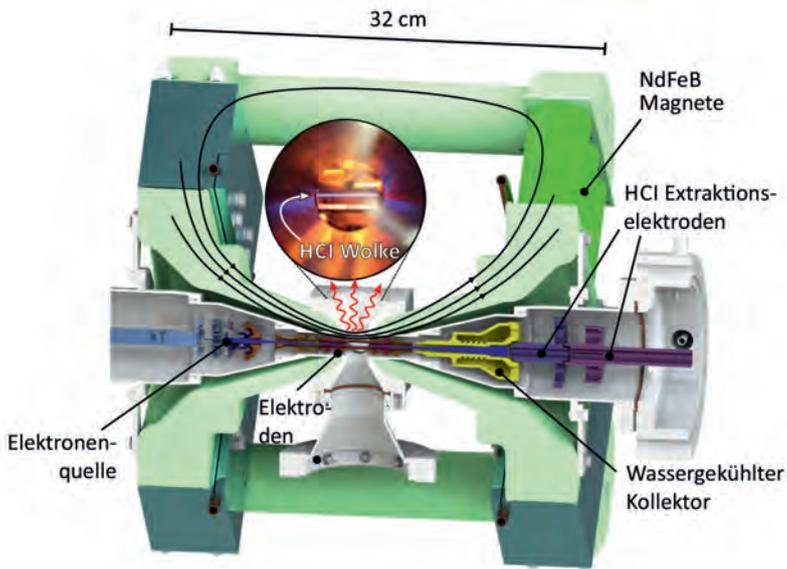


Abbildung 4: Kompakte Elektronenstrahl Falle (mini-EBIT). Das Magnetfeld von Permanentmagneten wird über ein Joch im Zentrum einer Vakuum-Umgebung konzentriert. Ein Elektronenstrahl wird von links durch das Zentrum der Falle beschleunigt und ionisiert injizierte Neutralatome, wie z. B. Argon zu Ar^{13+} . Diese Ionen werden vom Ionenstrahl zum Leuchten bei 441 nm angeregt (Bildeinsatz).

lich gegenüber Energieverschiebungen durch elektrische Felder und elektrische Feldgradienten. Als weitere Konsequenz der großen Spreizung der Energieniveaus in HCIs sind Energieverschiebungen in Magnetfeldern besonders linear, sodass sich diese Verschiebungen durch geschicktes Mitteln von Frequenzmessungen magnetischer Unterzustände eliminieren lassen. Mit diesen Eigenschaften besitzen HCIs die besten Voraussetzungen als Referenzen für optische Uhren mit hoher Genauigkeit [Kozlov2018].

Obwohl ein großer Teil der Materie im Universum hochgeladen vorkommt und in astronomischen Spektren nachgewiesen wurde, gibt es überraschend wenig hochaufgelöste spektroskopische Information aus Laborexperimenten. Erst 2011 wurde die wohletablierte Technik der Laserspektroskopie zum ersten Mal für hochgeladene Ionen eingesetzt [Mäckel2011]. Die Gründe hierfür liegen im bis vor kurzem vergleichsweise hohen apparativen Aufwand zur Erzeugung von hochgeladenen Ionen in sogenannten Elektronenstrahlfallen und der extrem hohen kinetischen Energie der Ionen in solchen Fallen, die zu großen Doppler-Linienverbreiterungen führen.

2.1 Erzeugung hochgeladener Ionen

Hochgeladene Ionen werden durch sukzessives Entfernen von Elektronen ausgehend von neutralen Atomen erzeugt. Da die Ionisierungsenergie quadratisch mit dem Ladungszustand skaliert, sind z. B. für die Erzeugung von U^{92+} -Energien von 130 keV erforderlich. Dies wird heute meist in Elektronenstrahlfallen (engl. *Electron Beam Ion Trap*, EBIT) erreicht. In diesen werden freie Elektronen durch thermische Emission in einer

Kathode mit einem Material geringer Elektronen-Austrittsarbeit erzeugt. Über eine Elektrodenanordnung werden die Elektronen zu einem Strahl gebündelt und auf die erforderliche Energie beschleunigt. Ein im Zentrum einer Hochvakuum-Apparatur konzentriertes Magnetfeld bündelt den Elektronenstrahl. In den Elektronenstrahl als Gas oder von einem Festkörper eingebrachte Atome oder Moleküle werden durch Stöße mit den Elektronen so lange ionisiert, bis die Ionisationsenergie die Beschleunigungsenergie der Elektronen übersteigt. Dabei führt die negative Raumladung der Elektronen zusammen mit in Elektronenstrahlrichtung angelegten elektrischen Potentialen zum Einschluss der hochgeladenen Ionen in einer Region mit einer radialen Abmessung von einigen 100 μm und einer axialen Länge von wenigen Zentimetern. Ohne Elektronenstrahl bleiben die HCIs im Magnetfeld gefangen. Während in den ersten Systemen kryogene supraleitende Magnete zum Einsatz kamen, wurde in jüngerer Zeit die Entwicklung einer kompakteren Generation von EBITs vorangetrieben, die auf Permanentmagneten basieren. Eine solche, in Zusammenarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg und der PTB entwickelten, EBIT ist in Abbildung 4 dargestellt. Sie ermöglicht die Erzeugung von hochgeladenen Ionen bis zu einer Ionisationsenergie von 10 keV. So konnte beispielsweise Xe^{37+} mit einer Beschleunigungsspannung von 3 kV erzeugt werden [Micke2018]. Typischerweise existiert in der EBIT eine Verteilung von Ladungszuständen, die durch die Raten der Erzeugung durch Elektronenstöße und Neutralisierung durch Elektronenrekombination oder Stöße mit dem neutralen Hintergrundgas gegeben ist. Durch die kontinuierliche Anregung über den Elektronenstrahl emittieren die in der EBIT gefangenen HCIs Fluoreszenzstrahlung aus hochangeregten Zuständen. Dieses Leuchten ist z. B. als blauer Schimmer im Foto in Abbildung 4 zu sehen.

2.2 Optische Spektroskopie in der Elektronenstrahl Falle

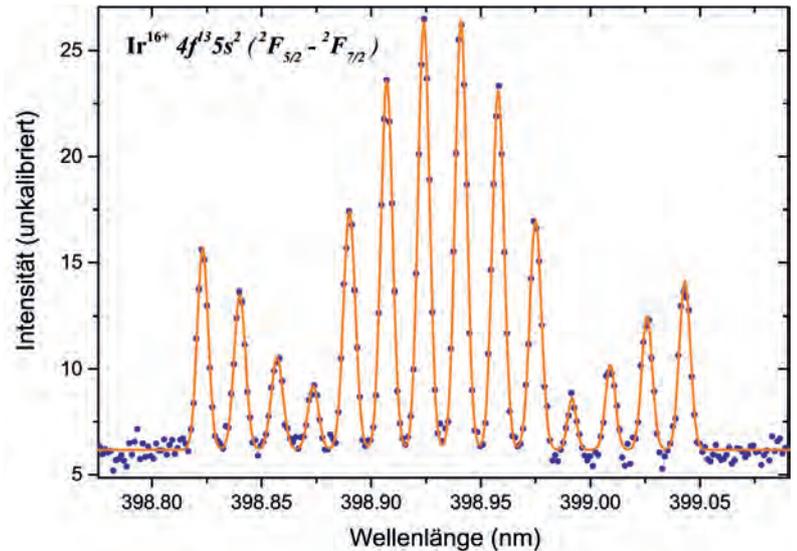
Über eine Abbildungsoptik mit hoher numerischer Apertur kann die von den HCIs in der EBIT emittierte Strahlung über hochauflösende Spektrometer untersucht und die beobachteten Spektrallinien können über Vergleiche mit theoretischen Rechnungen der Niveaustuktur des Ions identifiziert werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 5 für einen optischen Übergang in Ir^{16+} zu sehen, der in der Heidelberg-EBIT mit einem hochauflösenden Spektrometer aufgenommen wurde. Die Auflösung der Übergänge ist durch die Dopplerverbreiterung bei einer mittleren kinetischen Energie von einigen 10 eV limitiert. Geringere Energien von bis zu 6 eV sind durch Verdampfungskühlen

aus der Falle bei abgeschaltetem Elektronenstrahl erreicht worden. Hierbei wird die Potentialbarriere der Falle abgesenkt, sodass besonders hochenergetische HCIs die Falle verlassen und die restlichen Ionen über Stöße zu einer geringeren Temperatur thermalisieren. Kombiniert mit laserinduzierter Fluoreszenzspektroskopie ist es gelungen, einen Feinstrukturübergang in Ar^{13+} bei einer Wellenlänge von 441 nm mit nur 16 Hz Linienbreite auf ca. 300 MHz genau aufzulösen [Mäckel2011].

2.3 Hochaufgelöste Laserspektroskopie am Horizont

Die EBIT mit ihren starken Feldern und der hohen kinetischen Energie der HCIs von vielen eV bietet keine ideale Umgebung für hochaufgelöste Spektroskopie, wie man sie mit Auflösungen von einigen 10^{-15} von einzelnen einfach geladenen Ionen kennt [Huntemann2016]. Der Schlüssel hierfür liegt in der Kühlung der Bewegung und damit Lokalisierung der Ionen in Fallen, die rückstoßfreie Spektroskopie erlauben. In diesen Fällen ist die Oszillationsfrequenz der Ionen größer als die Photonenrückstoßenergie, sodass keine zusätzliche Verschiebung bei der Absorption oder Emission von Photonen auftritt. Typischerweise werden solche Experimente in Paul-Fallen durchgeführt [Ludlow2015]. Speziell bei HCIs müssen für solche Untersuchungen jedoch exzellente Vakuumbedingungen von weniger als 10^{-14} mbar Restgasdruck herrschen, um Ladungstransfer durch Stöße mit Restgasmolekülen zu minimieren, die zu einem Verlust des HCI führen würden. Solche Bedingungen können nur in einer 4 K kalten kryogenen Umgebung erreicht werden, in der alles Restgas ausfriert. Vor kurzem wurde in einer Zusammenarbeit zwischen dem MPIK und der PTB ein Demonstrationsexperiment in einer derartigen Apparatur durchgeführt, bei dem HCIs gepulst aus einer EBIT durch Absenken der axialen Fallenspannung extrahiert, abgebremst und mit einer kinetischen Energie von unter einem eV in eine lineare Paulfalle injiziert wurden. In der Paul-Falle befand sich ein Ionenkristall aus mehreren hundert lasergekühlten Be^+ -Ionen, der die schnellen hochgeladenen Ionen über ihre starke elektrostatische Kopplung abgebremst und in den Kristall gekühlt hat [Schmöger2015]. Abbildung 6 zeigt jeweils ein Ar^{13+} -Ion zusammen mit mehreren bzw. einem einzelnen lasergekühlten Be^+ -Ion in einer linearen Paul-Falle. Aus der Bewegung der Be^+ -Ionen konnte eine Temperatur für die Ar^{13+} -Ionen von 221(26) mK abgeschätzt werden. Das ist eine Reduktion der kinetischen Energie um mehr als sieben Größenordnungen und vermutlich das kälteste im Labor erzeugte HCI.

Inzwischen wurde eine verbesserte Version dieses Experiments in Zusammenarbeit mit dem MPIK in Heidelberg an der PTB aufgebaut, mit dem Ziel, eine kryogene sowie vibrations- und



magnetfeld-arme Umgebung für Laserspektroskopie höchster Präzision bereitzustellen [Micke2019].

In diesem Aufbau befindet sich eine lineare Paul-Falle (Abbildung 7), die Fallenfrequenzen von mehreren Megahertz und damit rückstoßfreie Spektroskopie erlaubt [Leopold2019].

Die Falle ist über ca. 1 m lange vibrationsentkoppelte Kupferrohre mit dem Kältekopf eines geschlossenen Kühlsystems für 4 K verbunden. Die Apparatur ist mit einer kompakten EBIT (siehe Abbildung 4) und einer entsprechenden Abbremsenheit ausgestattet.

Abbildung 5: Hochaufgelöstes optisches Spektrum eines Übergangs in Ir^{16+} mittels Elektronenanregung in der EBIT [Bekker2017]. Die breit gespreizte magnetische Unterstruktur ist ein Resultat des hohen Magnetfelds von 8 T in der EBIT.

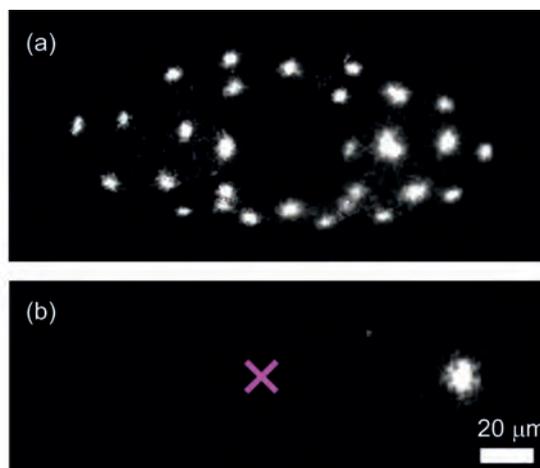


Abbildung 6: Kalte hochgeladene Ionen. (a) Ein einzelnes Ar^{13+} -Ion in einem Kristall aus lasergekühlten Be^+ -Ionen. (b) Einzelnes Ar^{13+} an der Stelle des pinkfarbenen Kreuzes zusammen mit einem Be^+ -Ion ([Schmöger2015])

Es wurden bereits Be^+ -Ionen gefangen und mittels sogenanntem Raman-Seitenbandkühlen in den Bewegungsgrundzustand der Falle gekühlt. Kürzlich konnten Ar^{13+} -Ionen von der EBIT in die Paulfalle geladen und dort von den Be^+ -Ionen gekühlt werden. Nach der Präparation eines 2-Ionen-Kristalls aus $\text{Ar}^{13+}/\text{Be}^+$ kann der $P_{1/2} - P_{3/2}$ -Feinstrukturübergang bei 441 nm in Ar^{13+} mit einem hochstabilen Laser abgefragt werden. Über eine Folge von Laserpulsen kann der interne Zustand vom Ar^{13+} -Ion auf das Be^+ -Ion übertragen und dort detektiert werden. Mit dieser sogenann-

ten Quantenlogik-Spektroskopie [Schmidt2005] steht ein universelles Verfahren für die Spektroskopie von vielen verschiedenen HCI-Spezies zur Verfügung. Damit sollen in Zukunft experimentell die eingangs erwähnten Fragen zur Konstanz von Naturkonstanten oder zu Nichtlinearitäten in der Isotopieverschiebung untersucht werden.

3. Von der Atomuhr zur Kernuhr

Während bei den hochgeladenen Ionen wichtige Eigenschaften durch Extrapolation von Ionen in niedrigeren Ladungszuständen vorhergesagt werden können, stößt die Idee einer „Kernuhr“ in einen noch weitgehend unerforschten Parameterbereich vor. Anstelle eines Übergangs in der Elektronenhülle eines Atoms, soll bei der Kernuhr ein elektromagnetischer Übergang im Atomkern die Referenzfrequenz definieren [Peik2015]. Es geht hierbei nicht um radioaktive Zerfallsprozesse, wie sie für geologische oder archäologische Datierungen verwendet werden, sondern um Gamma-

mit abstimmbaren Lasern und den Methoden der optischen Frequenzmessung erreicht werden. Dies ist eine direkte Folge der im Kern stärker lokalisierten Ladungen. Glücklicherweise ist aber ein Atomkern bekannt, der sich für die Realisierung einer optischen Kernuhr anbietet. Es handelt sich um das Thoriumisotop mit der Massenzahl 229, kurz Th-229, das einen ungewöhnlich niederenergetischen Übergang besitzt. Die Eigenschaften dieses Atomkerns haben die Entwicklung des Konzepts der optischen Kernuhr motiviert und stehen heute im Mittelpunkt des experimentellen Interesses in diesem sich entwickelnden Arbeitsgebiet.

3.1 Der Atomkern Thorium-229

Th-229 scheint ein einzigartiges Objekt der Kernphysik zu sein; der einzige bekannte Kern, der einen angeregten Zustand (ein Isomer) im Bereich von optischen Photonen besitzt. Th-229 entsteht aus dem Alphazerfall von Uran-233 und ist selbst ebenfalls instabil gegen Alphazerfall mit einer Halbwertszeit von etwa 7900 Jahren. Wegen ihrer im Vergleich zum Alter der Erde kurzen Halbwertszeiten, sind U-233 und Th-229 nicht in irdischen Mineralien zu finden, können aber relativ einfach in Kernreaktoren aus dem häufig vorkommenden Th-232 erzeugt werden. Die Niveaustuktur von Th-229 wurde seit den 1970er-Jahren in der Gruppe von C. Reich in den USA untersucht [Helmer1994]. Dabei wurde festgestellt, dass die niedrigsten Anregungszustände zu zwei Rotationsbanden gehören. Der Kern bildet zwei etwas unterschiedlich geformte, entlang einer Achse verlängerte Ellipsoide, die mit unterschiedlichen Drehimpulsen rotieren können, und so jeweils eine regelmäßige Folge von Energieniveaus ergeben. Die beiden Zustände des jeweils niedrigsten Drehimpulses (die Bandenköpfe) konnten jedoch spektroskopisch nicht getrennt werden. Aus diesem Verständnis der Struktur des Kerns folgte daher zwangsläufig, dass er zwei unterschiedliche und gleichzeitig energetisch sehr nah beieinander liegende Zustände besitzen muss. Der energetisch tiefer liegende bildet den Grundzustand des Kerns, der höher liegende das Isomer. Aus Gammaspektroskopie von höherenergetischen Übergängen innerhalb der Rotationsbanden wurde die Übergangsenergie zwischen den beiden Bandenköpfen anfangs als etwa 3,5 eV angegeben. Nach einer weiteren, unabhängigen Messung mit einem speziellen Gammadetektor höherer Energieauflösung wurde 2007 der Wert 7,8 ($\pm 0,5$) eV veröffentlicht [Beck2007], der bis heute als gültig angesehen wird, allerdings noch nicht bestätigt oder präzisiert werden konnte. Der Übergang zwischen beiden Zuständen sollte unter Absorption oder Emission von magnetischer Dipolstrahlung im ultravioletten Spektralbereich mit einer natür-

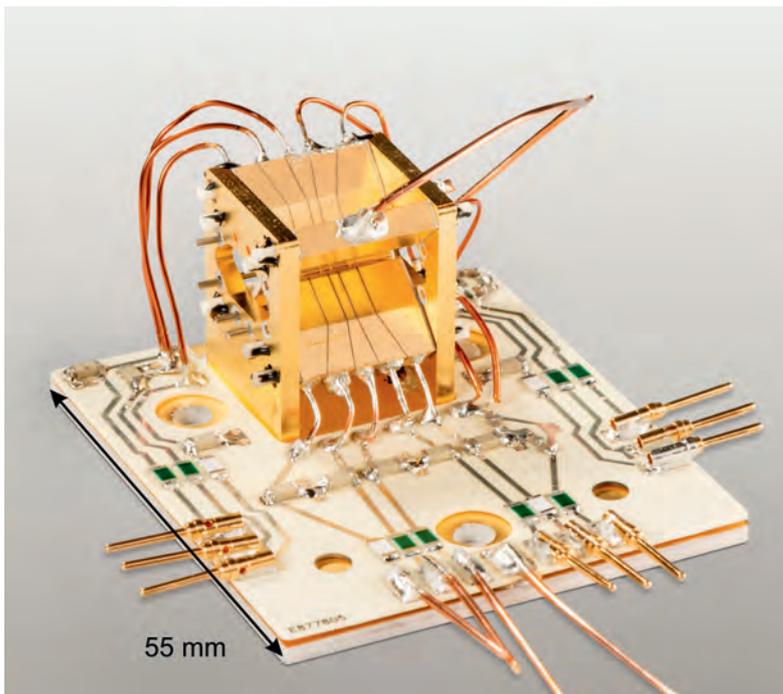


Abbildung 7: Kryogene lineare Paul-Falle für rückstoßfreie Spektroskopie von hochgeladenen Ionen

strahlung, die aus einer Änderung der Anordnung der Protonen und Neutronen im Kern resultiert. Da diese durch die starke Kernkraft viel enger gepackt und stärker gebunden sind, als die Elektronen in der Atomhülle, sind die entsprechenden Übergangsfrequenzen von der Wechselwirkung mit der Umgebung, z. B. mit elektrischen Feldern, viel weniger beeinflussbar. Daraus resultiert die Erwartung, mit einer Kernuhr eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und Genauigkeit zu erreichen. In praktisch allen bekannten Fällen liegen die Übergangsfrequenzen von Gammastrahlung allerdings im hochenergetischen Bereich, etwa 10.000-mal höher als die optischen Frequenzen, die heute

lichen Linienbreite von unter einem Millihertz erfolgen.

Das experimentelle Resultat dieser extrem niedrigen Kern-Anregungsenergie im Bereich der Energien von atomaren Valenzelektronen hat eine Reihe von theoretischen Arbeiten und Vorschlägen motiviert, da man hier erstmals ein System identifiziert hatte, bei dem Kopplungen zwischen dem Atomkern und der Elektronenhülle eine wichtige Rolle spielen. So wurde vorhergesagt, dass sich in Abhängigkeit von der elektronischen Umgebung des Th-229-Kerns, d. h. ob er sich in einem neutralen Atom, einem positiven Ion, Molekül, in einem Metall oder Isolator befindet, sehr unterschiedliche Lebensdauern für den angeregten Kernzustand ergeben [Matinyan1998, Tkalya2003]. Bildlich betrachtet ist der Atomkern eine sehr schlechte Antenne für Licht, da er mit einer Größe von einigen 10^{-15} m viel kleiner als die Wellenlänge ist, die hier im Bereich von 10^{-7} m liegt. Wenn die Möglichkeit dafür gegeben ist, ist es daher viel wahrscheinlicher, dass der Kern seine Anregungsenergie auf ein Elektron der Hülle überträgt, anstatt sie als Photon abzustrahlen. Dies ist insbesondere in Metallen oder Festkörpern der Fall, wenn freie oder nur schwach gebundene Elektronen vorhanden sind. Sind die Elektronen dagegen so stabil gebunden, dass sie durch die Kernanregungsenergie von etwa 7,8 eV nicht freigesetzt werden können, ist dieser schnellere Zerfallskanal geschlossen, der angeregte Kern muss ein Photon emittieren und kann anschließend mit einem Laser wieder angeregt werden. Diese für die optische Uhr gewünschte Situation sollte bei allen positiven Thorium-Ionen und auch bei Th-dotierten Festkörpern mit hoher Bandlücke der Fall sein. Eine solche Abhängigkeit einer Zerfallsrate von der Umgebung des Kerns ist in der Kernphysik höchst ungewöhnlich, da meist die Energie von Kernübergängen um Größenordnungen oberhalb der Energien der Hüllenelektronen liegt.

3.2 Th-229 als Basis einer optischen Uhr

Das Konzept einer auf Th-229 basierenden optischen Kernuhr wurde an der PTB entwickelt und 2003 veröffentlicht [Peik2003]. Der Vorschlag für eine Uhr höchster Präzision basiert auf einem lasergekühlten, gespeicherten Th^{3+} -Ion und hat einige Gemeinsamkeiten mit bereits bekannten optischen Uhren mit gespeicherten Ionen. Der wesentliche Vorteil einer Kernuhr in Bezug auf die systematische Unsicherheit liegt darin, dass sich von äußeren elektrischen oder magnetischen Feldern verursachte Frequenzverschiebungen vermeiden lassen, wenn man die Laseranregung des Kernübergangs in einem hierfür geschickt gewählten elektronischen Zustand vornimmt

[Peik2003, Campbell2012]. Hierbei spielen insbesondere Symmetrieeigenschaften und Drehimpulse der Elektronenhülle eine Rolle. Die Unempfindlichkeit der Übergangsfrequenz gegenüber elektrischen Feldern ist praktisch von großem Interesse, da damit auch experimentell schwer kontrollierbare Effekte wie Stöße mit Restgasmolekülen oder der Einfluss der thermischen Umgebungsstrahlung abgedeckt sind. Die elektronische Niveaustuktur von Th^{3+} ist gut bekannt, und man findet dort Zustände, die die gewünschten vorteilhaften Eigenschaften für die Kernanregung haben. Die Laseranregung eines Übergangs in der Elektronenhülle kann verwendet werden, um den Zustand des Kerns auszulesen, ohne ihn zu beeinflussen: Die beiden Kernzustände (Grundzustand und Isomer) unterscheiden sich im Wert des Kernspins und der magnetischen und elektrischen Momente und prägen damit jedem Zustand der Hüllenelektronen eine charakteristische Hyperfeinstruktur auf, die über Laserspektroskopie selbst bei nur einem einzelnen Ion eindeutig identifiziert werden kann. Dieses Signal kann zur Stabilisierung der Frequenz des Laseroszillators, der die Kernübergänge resonant anregen soll, genutzt werden.

Ein zweites, komplementäres Konzept für eine Kernuhr beruht auf Laserspektroskopie in Festkörpern. Während Resonanzen in der Elektronenhülle beim Übergang vom freien Atom zu Festkörpern zu Bändern verbreitert werden, ist dies bei Kernresonanzen nicht der Fall. Vielfältig genutzt wird dies in der Mößbauerspektroskopie, wo Gammaübergänge in einem Festkörper durch eine radioaktive Quelle desselben Kerns angeregt werden. Durch Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber wird über den Dopplereffekt eine äußerst hohe Frequenzauflösung erreicht. Bei Th-229 könnte man eine Art Laser-Mößbauer-Spektroskopie erreichen, und die radioaktive Quelle durch einen kohärenten abstimmbaren Laser ersetzen. Während in den heutigen, optischen Uhren maximal nur etwa eine Million Atome abgefragt werden, ließe sich in einer Festkörper-Kernuhr die Atomzahl leicht um 10 Größenordnungen steigern und damit ein starkes Signal aus einem kleinen Volumen erhalten.

3.3 Experimente zur optischen Kernspektroskopie

Wegen dieser starken Motivation wurde und wird ein Nachweis für eine direkte optische Kernanregung von Th-229 weltweit von mehr als 10 Gruppen mit unterschiedlichen Methoden gesucht [Peik2015, VonDerWense2018] – bisher ohne Erfolg. Der Wechsel von der Gammaspectroskopie mit einer Energieauflösung von einigen Elektronenvolt zur Laserspektroskopie mit einer Auflösung von einigen Megahertz (oder darunter)

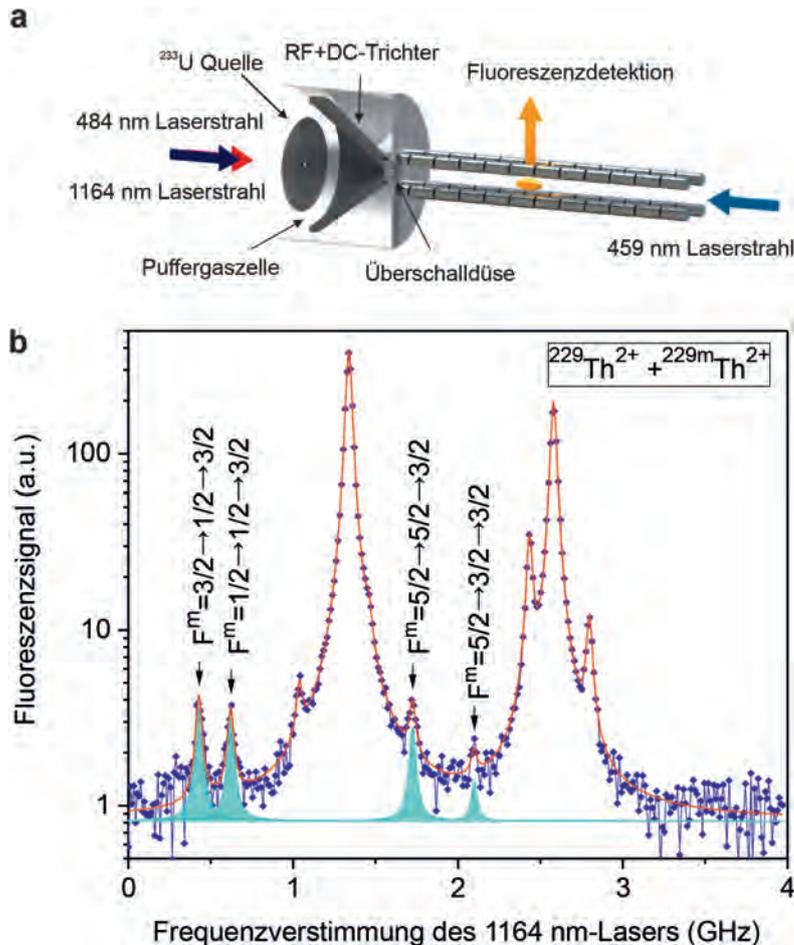


Abbildung 8:
a) Experiment zur Laserspektroskopie von gespeicherten Th^{2+} -Rückstoßionen aus dem Zerfall von U-233.

b) Das Spektrum zeigt die Hyperfeinstruktur eines elektronischen Übergangs mit mehreren Linien des Th^{2+} Kerngrundzustands und zusätzlichen Resonanzen (cyan hinterlegt) des Anteils von etwa 2 % Kernen im isomeren Zustand. Die Auswertung erlaubt die Bestimmung wichtiger Eigenschaften des Isomers (siehe [Thielking2018])

lässt einen Suchbereich von vielen Größenordnungen offen. Die schmalbandige Kernresonanz gleicht der sprichwörtlichen Nadel im Heuhaufen. Erschwert wird die Situation dadurch, dass bei Experimenten mit größeren Th^{229} -Proben (man verwendet 10^{12} bis 10^{16} Kerne) immer auch ein Untergrund an Lumineszenzphotonen aus radioaktiven Zerfällen auftritt, der das gesuchte schwache Fluoreszenzsignal einer Laseranregung des Kerns überlagert. Dies hat bereits zu mehreren Veröffentlichungen über eine scheinbare Beobachtung der Kernresonanz in der wissenschaftlichen Literatur geführt, die sich bei genauerer Untersuchung als falsch erwiesen haben. Mit verbessertem Verständnis der Probleme und neu entwickelten Detektoren sollte eine Lösung dieses Problems aber in der absehbaren Zukunft erreichbar sein. Dies wäre ein lange erwarteter Durchbruch, der dann den Weg zu Präzisionsexperimenten hin zur Kernuhr öffnen würde.

Die wichtigsten experimentellen Resultate der letzten Jahre über das Th^{229} -Isomer stammen aus Rückstoßkernen aus dem Alphazerfall von U-233. Hierfür muss der Th^{229} -Kern nicht aktiv angeregt werden, sondern er wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 2 % gleich im angeregten Zustand erzeugt. Da die Emission des energiereichen Alphateilchens eine Rückstoßenergie von etwa 80 keV auf den frisch erzeugten Th^{229} -Kern

überträgt, kann dieser, wenn der Zerfall in einer dünnen Schicht von U-233 stattfindet, von dort als freies Thorium-Ion ins Vakuum emittiert werden. In einem Experiment an der Ludwig-Maximilians-Universität München konnte 2015 erstmals nachgewiesen werden, dass ein Teil dieser Ionen tatsächlich eine zusätzliche innere Energie trägt, nämlich die Anregungsenergie des Isomers [VonDerWense2016]. Es war der erste direkte Nachweis des angeregten Kernzustands, auch wenn sich der Wert der Anregungsenergie daraus noch nicht präzise bestimmen ließ. Zusammen mit der PTB wurde das Experiment um Laserspektroskopie der Thorium-Ionen erweitert (s. Abbildung 8). Dazu wurden die Rückstoß-Ionen in Puffergas abgebremst und in einer Ionenfalle gespeichert. Die Analyse der Hyperfeinstruktur von zwei Übergängen in Th^{2+} hat es erstmals ermöglicht, wesentliche Eigenschaften des Isomers mit denen des Th^{229} -Kerngrundzustands zu vergleichen: das magnetische Moment und die Form (Quadrupolmoment) und Größe der Ladungsverteilung der Protonen im Kern [Thielking2018]. Wie theoretisch vorhergesagt, ändert sich die Ladungsverteilung beim Übergang zwischen Isomer und Grundzustand nur wenig. Die magnetischen Momente unterscheiden sich dagegen deutlich. In einem stark vereinfachten Bild lässt sich das Isomer als die Anregung eines äußeren Neutrons beschreiben, dass mit einer etwa birnenförmigen Anordnung der restlichen Neutronen und Protonen in Wechselwirkung steht. Weitere, noch präzisere Messungen der Hyperfeinstruktur werden notwendig sein, um die Struktur dieses ungewöhnlichen Kerns vollständiger zu beschreiben.

4. Test fundamentaler Symmetrien der Natur

Nachdem die grundlegenden Eigenschaften und experimentellen Methoden der Untersuchung von einzel- und hochgeladenen Ionen diskutiert wurden, soll im Folgenden näher auf wissenschaftliche Anwendungen eingegangen werden. Neben der atomaren Struktur sind detaillierte Untersuchungen von Ionen in anderen Bereichen der heutigen Forschung, wie der Kern- und Astrophysik, der warmen und heißen dichten Materie oder auch den Tests des Standardmodells von Teilchen und Wechselwirkungen, sehr gefragt. Letzteres Thema erregt derzeit sowohl im Experiment als auch in der Theorie große Aufmerksamkeit. Dabei können hochgeladene Ionen eingesetzt werden, um die (Verletzungen von) fundamentalen Symmetrien der Natur zu untersuchen. So sind etwa Ionen mit nur wenigen Elektronen sehr empfindlich gegenüber Paritätsverletzungen, also Verletzungen der räumlichen Spiegelsymmetrie. Solche P-Verletzungen werden durch die schwache Wechselwirkung zwischen Kern und Elektronen

verursacht und führen zur Mischung von Ionen-niveaus entgegengesetzter Parität. Im Gegensatz zu neutralen Systemen ist der Mischkoeffizient in HCI's stark erhöht, da das Matrixelement des Hamiltonian der schwachen Wechselwirkung als Z^5 skaliert. Die Methoden zur Beobachtung dieser Mischung, basierend auf laserinduzierten Ein- und Zwei-Photonen-Übergängen, befinden sich derzeit in der Entwicklung [Surzhykov2011]. Diese Atomexperimente werden die Ergebnisse der hochenergetischen CERN-Messungen ergänzen und wahrscheinlich wertvolle und einzigartige Informationen über die schwache Wechselwirkung im Niedrigenergiebereich liefern. Neben dem führenden Teil der Paritätsverletzung in Atomen durch Z^0 -Bosonenaustausch zwischen Kern und Elektronen wird derzeit besonderes Augenmerk auf die schwache Wechselwirkung innerhalb der Kerne gelegt (siehe Abbildung 9). Diese Mischung zeichnet sich durch das sogenannte Anapolmoment aus, dessen Eigenschaften noch wenig verstanden sind. Der vielversprechendste Weg zur Messung dieser Konstanten ist die Beobachtung der Einzelphotonenübergänge zwischen den Hyperfein-niveaus hochgeladener Ionen [Ferro2011].

Über Tests der P-Verletzung hinaus gelten hochgeladene Ionen als sehr attraktive Kandidaten für die Untersuchung von CP-Verletzungen und für die Suche nach einer „Neuen Physik“ jenseits des Standardmodells. Das heißt, obwohl die Verletzung der kombinierten Paritäts- (P) und Ladungssymmetrien (C) durch das Standardmodell nicht verboten ist, reichen seine Vorhersagen nicht aus, um viele faszinierende Fragen zu klären, wie die der Materie-Antimaterie-Asymmetrie oder das Fehlen von CP-verletzenden Beobachtungen in der Quantenchromodynamik, der Beschreibung der starken Kernkraft. Es gibt eine Reihe von Erweiterungen des Standardmodells, die die Existenz noch unbekannter Teilchen und Wechselwirkungen und damit größere CP-Verletzungseffekte vorhersagen. In der Atomphysik würden diese Verletzungen ein permanentes, elektrisches Dipolmoment (EDM) von Teilchen erzeugen. Die Suche nach diesem permanenten EDM von Protonen, Neutronen und Elektronen erregt daher viel Aufmerksamkeit. Außerdem wurden erst kürzlich Experimente vor-

geschlagen, in denen das EDM des in wasserstoffähnlichen Ionen gebundenen Elektrons in elektrostatischen Speicherringen beobachtet werden kann [Bondarevskaya2011].

4.1 Tests der lokalen Lorentz-Invarianz

Nicht nur hochgeladene, sondern auch einzelgeladene Ionen spielen eine entscheidende Rolle für die Suche nach „Neuer Physik“. Atome im Allgemeinen sind ausgezeichnete Systeme, um z. B. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie auf mögliche Verletzungen zu testen. Ein Grundstein dieser Theorie ist die lokale Lorentz-Invarianz. Diese besagt, dass das Ergebnis eines Experimentes unabhängig von der Orientierung und der Geschwindigkeit seines Bezugssystems ist. Gemäß dem Standardmodell der Teilchenphysik sind alle Teilchen und Felder invariant unter Lorentz-Transformationen. Das Standardmodell beschreibt drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen (elektromagnetische, schwache und starke) im Rahmen der Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie. Unser Verständnis von der vierten Wechselwirkung, die Gravitation, basiert jedoch auf der Allgemeinen Relativitätstheorie. Theorien, die eine Vereinigung aller fundamentalen Wechselwirkungen anstreben, sagen eine Verletzung der Lorentz-Symmetrie vorher.

Mit der sogenannten Erweiterung des Standardmodells (SME) existiert ein theoretisches Grundgerüst, welches eine systematische Untersuchung von möglichen Verletzungen der Lorentz-Symmetrie erlaubt. Die SME ist eine effektive Feld-Theorie, die den Formalismus des Standardmodells um jede mögliche Kombination der darin enthaltenen Felder erweitert, die nicht Term für Term Lorentz-invariant ist. Dabei bleiben jedoch alle anderen grundlegenden Eigenschaften der Theorie unangetastet. Die SME kann genutzt werden, um die niederenergetische Limitierung vieler verschiedener Theorien, die eine Lorentz-Verletzung vorher-sagen, zu beschreiben und enthält das Standardmodell als Grenzfall.

Die SME erlaubt es, eine Lorentz-Verletzung separat für alle Teilchen (z. B. Neutronen, Photonen, Elektronen) zu untersuchen. Um die

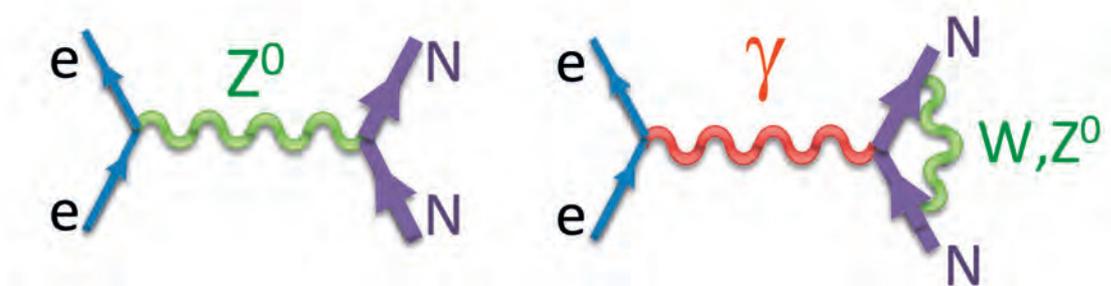


Abbildung 9: Die Paritätsverletzung in atomaren Systemen entsteht durch den Austausch eines Z^0 -Bosons zwischen Kern und Elektronenwolke (linkes Feynman-Diagramm), sowie durch die schwache Wechselwirkung zwischen Nukleonen (rechtes Feynman-Diagramm)

Lorentz-Symmetrie eines bestimmten Teilchens zu verifizieren, muss es mit einem Referenzsystem verglichen werden, da nur Unterschiede in deren Verhalten unter Lorentz-Transformation beobachtbar sind. Ein übliches Referenzsystem ist das Ruhesystem der Sonne. Zeitabhängige Lorentz-Transformationen von diesem in das Laborsystem führen aufgrund der Erdbewegung zu einer zeitlichen Variation der lokalen Messungen, falls die Lorentz-Symmetrie, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesetzt wird, verletzt ist. Die wohl bekanntesten Tests der Lorentz-Symmetrie sind Michelson-Morley-ähnliche Experimente, die die Isotropie der Lichtgeschwindigkeit verifizieren [Michelson1887].

Ein analoger Test kann für den Elektronen-Sektor durchgeführt werden, wo die Ausdehnung der Elektronen-Wellenfunktionen im Atom von der Dispersionsrelation der Elektronen abhängt. Für ein atomar-gebundenes Elektron mit Impuls p kommt es zu einer geringfügigen Energieverschiebung, die davon abhängt, wie der Gesamtimpuls p bezüglich einer Quantisierungsachse im Laborsystem verteilt ist. Da die Erde rotiert, ist eine zeitliche Modulation der Elektronenenergie bei Verletzung der Lorentz-Symmetrie zu erwarten, die mit der Rotationsfrequenz korreliert ist. Labortests suchen daher nach Signalen mit einer Frequenz von $\omega_E = 2\pi/(23.93h)$, entsprechend der Dauer eines siderischen Tages (siehe Abbildung 10).

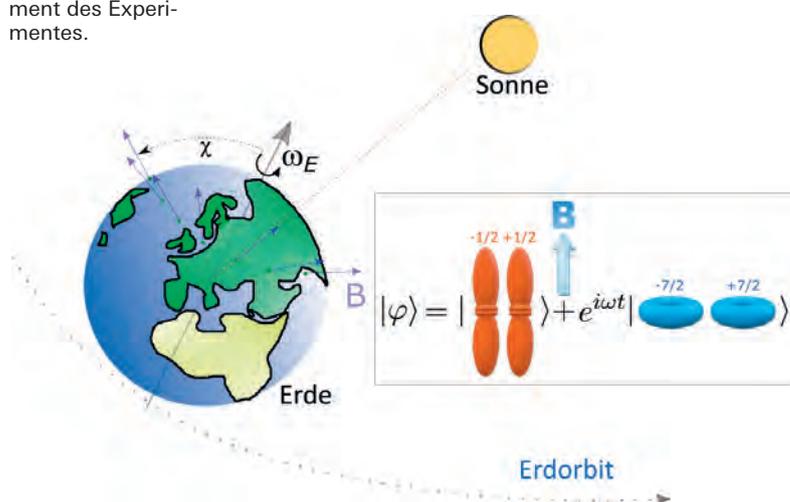
Um eine Verletzung der Lorentz-Invarianz mit Elektronen zu testen, kann also ein quantenmechanisches Analogon zum klassischen Michelson-Morley-Experiment betrieben werden, indem atomare Zustände miteinander interferiert werden, die eine möglichst unterschiedliche Elektronenimpuls-Verteilung entlang verschiedener Richtungen haben. Erste Experimente wurden hierzu mit neutralen Dysprosium-Atomen durchgeführt, mit denen eine mögliche Lorentz-Verletzung mit einer Unsicherheit von $2,2 \cdot 10^{-16}$ ausgeschlossen werden konnte. Eine Verbesserung um einen Faktor 100

konnte mit zwei verschränkten Kalzium-Ionen erzielt werden, sodass eine mögliche Lorentz-Verletzung für Elektronen bis zu einem Bereich von 10^{-18} auszuschließen ist. Eine weitere Verbesserung verspricht ein Test auf Lorentz-Verletzung mit Yb^+ -Ionen. Die tief im Atom lokalisierte 4f-Schale besitzt aufgrund ihrer großen kinetischen Energie eine hohe Sensitivität auf relativistische Effekte. Gerade der $4f^{13}6s^2 \ ^2F_{7/2}$ -Zustand in Yb^+ weist eine extrem lange Lebensdauer von mehreren Jahren vor, was für eine präzise Bestimmung der Energieverschiebungen von Vorteil ist. Erste Messungen mit den Atomuhren basierend auf einem lasergekühlten Yb^+ -Ion an der PTB konnten einen neuen Weltrekord für die Suche nach Lorentz-Verletzungen aufstellen und verbesserten die zuletzt veröffentlichte Sensitivität im Elektronen-Sektor um einen weiteren Faktor 100. Somit ist bis heute eine Verletzung der lokalen Lorentz-Invarianz bis zu einem Sensitivitätsbereich von 10^{-20} auszuschließen. Auch wenn dies bereits eine sehr präzise Eingrenzung darstellt, ist die Gültigkeit der Lorentz-Invarianz im Neutronen-Sektor um fast zehn Größenordnungen mehr gegeben.

4.2 Die Suche nach Dunkler Materie und Variationen von Naturkonstanten

Ein weiteres ungelöstes Problem der modernen Physik, das mithilfe hochgeladener Ionen effizient in Angriff genommen werden kann, ist das Wesen der Dunklen Materie. Die Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie ist nicht nur für die Astrophysik und Kosmologie relevant, sondern auch wichtig für die Beantwortung der Frage, ob sich die fundamentalen Konstanten der Natur über Zeit und Raum verändern. Eine solche Variation würde zum Beispiel bedeuten, dass die Eigenschaften der Atome eines Elements in verschiedenen Teilen des Universums unterschiedlich sind, oder sich über die verschiedenen Entwicklungsstufen des Universums hinweg änderten. Eine Reihe von kosmologischen Theorien, sowie Theorien, die darauf abzielen, die Schwerkraft mit den drei anderen fundamentalen Kräften zu vereinen, sagen voraus, dass sich zumindest einige der Naturkonstanten im Laufe der Zeit durch die Kopplung zwischen einem skalaren Feld der Dunklen Materie und gewöhnlicher Materie verändern können. Nach den zeitlichen Schwankungen der Naturkonstanten kann im Labor durch hochpräzise Messungen mit Atom- und Kernuhren sowie Molekülen gesucht werden. Auch für hochgeladene Ionen wurden vielversprechende Methoden zur Beobachtung der Variation von Naturkonstanten vorgeschlagen [Safranova2014]. Der große Vorteil dieser Ionen ist, dass ihre Energiespektren durch Wahl der Kernladungszahl Z und ihres Ladungszustandes (d. h. der Anzahl der an den Kern gebundenen

Abbildung 10: Prinzip des Tests der Lorentz-Symmetrie: Ein vertikales Magnetfeld B definiert die Quantisierungsachse im Laborsystem. Da die Erde mit einer Winkelgeschwindigkeit von $\omega_E = 2\pi/(23.93 h)$ rotiert, ändert sich die Ausrichtung der Quantisierungsachse und somit die Ausrichtung der Elektronenorbitale gegenüber dem Ruhesystem der Sonne. Der Winkel χ entspricht dem Breitengradkomplement des Experimentes.

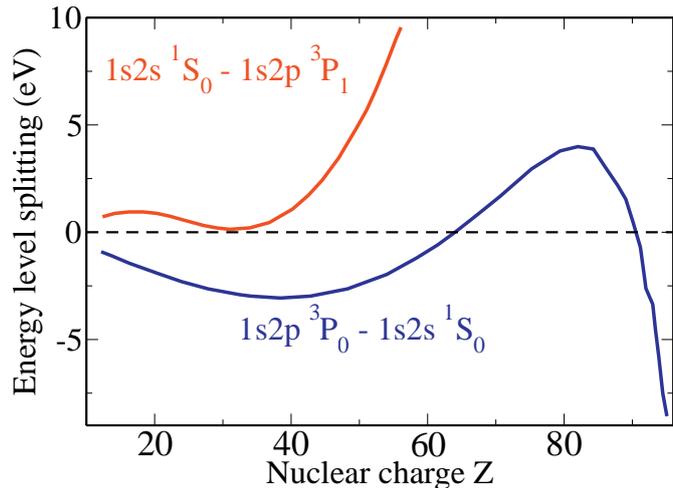


Elektronen) „fein abgestimmt“ werden können. Insbesondere lassen sich die Auswirkungen der Überschneidungen von ionischen Energieniveaus beobachten. Diese Überschneidungen – bei denen zwei unterschiedliche ionische Zustände bei fast gleicher Energie auftreten – können für viele Untersuchungen fundamentaler Phänomene genutzt werden. Beispielsweise sind die Niveaus $1s2s\ ^1S_0$ und $1s2p\ ^3P_0$ von heliumähnlichen Ionen für die Kernladungen $Z = 66$ und $Z = 92$ bekannt (siehe Abbildung 11). Bei diesen Kernladungszahlen ist die Energiedifferenz $\Delta E(2^1P_0 - 2^3P_0)$ sehr empfindlich gegenüber dem Wert der Feinstrukturkonstanten α . Hochpräzise Messungen von $\Delta E(2^1P_0 - 2^3P_0)$, basierend auf der Laserspektroskopie, sind derzeit in der Diskussion und können wertvolle Informationen über mögliche Veränderungen von α liefern.

Bei der Suche nach „Neuer Physik“ eröffnet auch die bereits diskutierte Kernuhr mit Th-229 neue Möglichkeiten für die physikalische Grundlagenforschung. Bei allen heutigen Atomuhren sind die Resonanzfrequenzen von der elektromagnetischen Wechselwirkung bestimmt und mit den Gesetzen der Quantenelektrodynamik zu beschreiben. Im Atomkern spielt hingegen die starke Wechselwirkung die dominierende Rolle. Fast alle Ideen zu „Neuer Physik“ gehen davon aus, dass die Beschreibung der Natur mit vier fundamentalen Kräften (elektromagnetisch, schwach, stark, gravitativ) nicht vollständig und nicht unveränderlich ist. Daher ist es für experimentelle Tests solcher Modelle besonders interessant, mit Th-229 eine Uhr zur Verfügung zu haben, die auf einer von Kombination von zwei der fundamentalen Kräfte beruht und die sich mit sehr hoher Präzision mit einer konventionellen Atomuhr vergleichen lässt.

4.3 Isotopenverschiebung als ein Prüfstand für Atomstrukturrechnungen

Messungen von Isotopenverschiebungen in hochgeladenen Ionen bieten sehr gute Möglichkeiten für Tests relativistischer und quantenelektrodynamischer (QED) Systeme mit wenigen Elektronen. Neben Untersuchungen von sehr schweren Ionen, die üblicherweise an Beschleuniger- und Speicherringanlagen durchgeführt werden, steht heute auch der niedrig-Z-Bereich im Mittelpunkt des Interesses. In diesem Bereich sind hochpräzise „table-top“-Experimente an Ionenfallen möglich, die wichtige Informationen über die Struktur von (relativ) einfachen Atomsystemen liefern. Von besonderem Interesse sind hier die elektrisch-dipol-verbotenen Übergänge in Ionen wie z. B.



der $1s^2 2s^2 2p\ ^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ Zerfall in Bor-ähnlichen Systemen [Zubova2016]. Da die Aufspaltung zwischen diesen beiden (Feinstruktur-)Niveaus rein relativistischer Natur ist und kein nicht-relativistisches Gegenstück aufweist, bietet der Übergang $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ ein perfektes Testfeld für die relativistischen und quantenelektrodynamischen (QED) Effekte in Systemen mit wenigen Elektronen. Tatsächlich werden die relativistischen und QED-Korrekturen in diesem Fall nicht durch die (oft dominierenden) nicht-relativistischen Beiträge verdeckt. Die relativ einfache elektronische Struktur der Bor-ähnlichen Ionen ermöglicht es, diese Korrekturen theoretisch mit hoher Genauigkeit zu analysieren. Daher können die Feinstrukturübergänge in Ionen genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit und Machbarkeit moderner relativistischer Mehrkörper-Berechnungsansätze zu überprüfen. Insbesondere durch den Vergleich von experimentellen Daten und theoretischen Vorhersagen kann man QED-Effekte höherer Ordnung untersuchen, deren genaue Auswertung nach wie vor eine sehr komplizierte Aufgabe ist. Isotopenverschiebungen von Atomniveaus sind ein ideales Werkzeug für einen solchen Vergleich, da sie mit viel höherer Genauigkeit als absolute Energien berechnet werden können. Darüber hinaus können hochpräzise (experimentelle und theoretische) Analysen der Isotopenverschiebungsdaten wertvolle Informationen über besondere Kerneigenschaften liefern, die mit anderen Methoden weniger gut zugänglich sind. Die Kenntnis dieser Eigenschaften ist für die hochpräzise King-Plot-Analyse der Isotopenverschiebungsdaten unerlässlich. Eine solche Analyse wurde kürzlich als weiteres Werkzeug zur Suche nach einer „Neuen Physik“ jenseits des Standardmodells vorgeschlagen.

Abbildung 11: Aufspaltung der $2\ ^1S_0 - 2\ ^3P_0$ und $2\ ^1S_0 - 2\ ^3P_1$ Energieniveaus von heliumartigen Ionen als Funktion der Kernladungszahl

Literatur

- [Beck2007] B. R. Beck et al., *Energy splitting of the ground-state doublet in the nucleus ^{229}Th* , Phys. Rev. Lett. **98**, 142501 (2007)
- [Bekker2017] H. Bekker, persönliche Mitteilung (2017)
- [Bondarevskaya2011] A. Bondarevskaya, A. Prozorov, L. Labzowskya, G. Plunien, D. Liesen und F. Bosch, *Theory of the polarization of highly charged ions in storage rings: Production, preservation, observation and application to the search for a violation of the fundamental symmetries*, Phys. Rep. **507**, 1 (2011)
- [Campbell2012] C. J. Campbell et al., *Single-ion nuclear clock for metrology at the 19th decimal place*, Phys. Rev. Lett. **108**, 120802 (2012)
- [Ferro2011] F. Ferro, A. Surzhykov und Th. Stöhlker, *Hyperfine transitions in He-like ions as a tool for nuclear-spin-dependent parity-nonconservation studies*, Phys. Rev. A **83**, 052518 (2011)
- [Helmer1994] R. G. Helmer, C. W. Reich, *An excited state of ^{229}Th at 3.5 eV*, Phys. Rev. C **49**, 1845 (1994)
- [Herschbach2012] N. Herschbach, K. Pyka, J. Keller und T. E. Mehlstäubler, *Linear Paul trap design for an optical clock with Coulomb crystals*, Appl. Phys. B **107**, 891 (2012)
- [Huntemann2012] N. Huntemann, M. Okhapkin, B. Lipphardt, S. Weyers, C. Tamm und E. Peik, *High-Accuracy Optical Clock Based on the Octupole Transition in $^{171}\text{Yb}^+$* , Phys. Rev. Lett. **108**, 090801 (2012)
- [Huntemann2016] N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, C. Tamm und E. Peik, *Single-Ion Atomic Clock with $3 \cdot 10^{-18}$ Systematic Uncertainty*, Phys. Rev. Lett. **116**, 063001 (2016)
- [Keller2015] J. Keller, H. L. Partner, T. Burgermeister und T. E. Mehlstäubler, *Precise determination of micromotion for trapped-ion optical clocks*, J. Appl. Phys. **118**, 104501 (2015)
- [Keller2019a] J. Keller, T. Burgermeister, D. Kalincev, A. Didier, A. P. Kulosa, T. Nordmann, J. Kiethe und T. E. Mehlstäubler, *Controlling systematic frequency uncertainties at the 10^{-19} level in linear Coulomb crystals*, Phys. Rev. A **99**, 013405 (2019)
- [Keller2019b] J. Keller, D. Kalincev, T. Burgermeister, A. Kulosa, A. Didier, T. Nordmann, J. Kiethe und T. E. Mehlstäubler, *Optical clocks based on linear ion chains with high stability and accuracy*, Phys. Rev. Appl. **11**, 0111002 (2019)
- [Kozlov2018] M. G. Kozlov, M. S. Safronova, J. R. C. López-Urrutia und P. O. Schmidt, *Highly charged ions: optical clocks and applications in fundamental physics*, Rev. Mod. Phys. **90**, 045005 (2018)
- [Leopold2019] T. Leopold, S. A. King, P. Micke, A. Bautista-Salvador, J. C. Heip, C. Ospelkaus, J. R. C. López-Urrutia, und P. O. Schmidt, *A cryogenic radio-frequency ion trap for quantum logic spectroscopy of highly charged ions*, arXiv:1901.03082 (2019)
- [Ludlow2015] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik und P. O. Schmidt, *Optical atomic clocks*, Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015)
- [Mäckel2011] V. Mäckel, R. Klawitter, G. Brenner, J. R. Crespo López-Urrutia und J. Ullrich, *Laser Spectroscopy on Forbidden Transitions in Trapped Highly Charged Ar^{13+} Ions*, Phys. Rev. Lett. **107**, 143002 (2011)
- [Matinyan1998] S. Matinyan, *Lasers as a bridge between atomic and nuclear physics*, Phys. Rep. **298**, 199 (1998)
- [Michelson1887] A. A. Michelson und E. W. Morley, *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether*, Am. J. Sci. **34**, 333 (1887)
- [Micke2018] P. Micke, S. Kühn, L. Buchauer, J. R. Harries, T. M. Bücking, K. Blaum, A. Cieluch, A. Egl, D. Hollain, S. Kraemer, T. Pfeifer, P. O. Schmidt, R. X. Schüssler, C. Schweiger, T. Stöhlker, S. Sturm, R. N. Wolf, S. Bernitt und J. R. Crespo López-Urrutia, *The Heidelberg compact electron beam ion traps*, Review of Scientific Instruments **89**, 063109 (2018)
- [Micke2019] P. Micke, J. Stark, S. A. King, T. Leopold, T. Pfeifer, L. Schmöger, M. Schwarz, L. J. Spieß, P. O. Schmidt, und J. R. C. López-Urrutia, *Closed-cycle, low-vibration 4 K cryostat for ion traps and other applications*, arXiv:1901.03630 (2019)
- [Peik2003] E. Peik und Chr. Tamm, *Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in ^{229}Th* , Europhys. Lett. **61**, 181 (2003)
- [Peik2015] E. Peik und M. Okhapkin, *Nuclear clocks based on resonant excitation of γ -transitions*, Comptes Rendus Physique **16**, 536 (2015)
- [Pyka2014] K. Pyka, N. Herschbach, J. Keller und T. E. Mehlstäubler, *A high-precision segmented Paul trap with minimized micromotion for an optical multiple-ion clock*, Appl. Phys. B **114**, 231 (2014)
- [Safronova2014] M. S. Safronova, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, U. I. Safronova, S. G. Porsev und M. G. Kozlov, *Highly Charged Ions for Atomic Clocks, Quantum Information, and Search for α variation*, Phys. Rev. Lett. **113**, 030801 (2014)
- [Schmidt2005] P. O. Schmidt, T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist und D. J. Wineland, *Spectroscopy Using Quantum Logic*, Science **309**, 749 (2005)
- [Schmöger2015] L. Schmöger, O. O. Versolato, M. Schwarz, M. Kohlen, A. Windberger, B. Piest, S. Feuchtenbeiner, J. Pedregosa-Gutierrez, T. Leopold, P. Micke, A. K. Hansen, T. M. Baumann, M. Drewsen, J. Ullrich, P. O. Schmidt und J. R. C. López-Urrutia, *Coulomb crystallization of highly charged ions*, Science **347**, 1233 (2015)
- [Surzhykov2011] A. Surzhykov, P. Indelicato, J. P. Santos, P. Amaro und S. Fritzsche, *Two-photon absorption of few-electron heavy ions*, Phys. Rev. A **84**, 022511 (2011)

- [Thielking2018] J. Thielking et al., *Laser spectroscopic characterization of the nuclear-clock isomer ^{229m}Th* , Nature **556**, 321 (2018)
- [Tkalya2003] E. V. Tkalya, *Properties of the optical transition in the ^{229}Th nucleus*, Phys. Uspekhi **46**, 315 (2003)
- [VonDerWense2016] L. von der Wense et al., *Direct detection of the ^{229}Th nuclear clock transition*, Nature **533**, 47 (2016)
- [VonDerWense2018] L. von der Wense, B. Seiferle und P. G. Thirolf, *Towards a ^{229}Th -based nuclear clock*, Measurement Techniques **60**, 1178 (2018)
- [Zubova2016] N. A. Zubova, A. V. Malyshev, I. I. Tupitsyn, V. M. Shabaev, Y. S. Kozhedub, G. Plunien, C. Brandau und Th. Stöhlker, *Isotope shifts of the $2p_{3/2}-2p_{1/2}$ transition in B-like ions*, Phys. Rev. A **93**, 052502 (2016)

