

LISA SCHMÖGER

SIND DIE NATURKONSTANTEN KONSTANT? – KALTE HOCH GELADENE IONEN ALS MÖGLICHE SENSOREN



Lisa Schmöger studierte Physik an der HU Berlin und der Universität Heidelberg, wo sie sich schon früh mit der Physik hochgeladener Ionen (HCIs) beschäftigte. Für ihre Diplomarbeit über ein elektrodynamisches System zum Transfer von HCIs in eine kryogene Paulfalle, durchgeführt am Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK), erhielt sie 2013 den Otto-Haxel-Preis der Universität Heidelberg. Im Anschluss forschte sie am MPIK, in Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, zur sympathetischen Kühlung von HCIs in einer Paulfalle, um diese neuen Methoden der Frequenzmetrologie zugänglich zu machen. Die weltweit erstmalige Präparation von HCIs im 10mK Bereich, als Voraussetzung für die Realisierung hochpräziser Atomuhren mit HCIs als Taktgebern, gelang 2016. Dies ermöglichte mehrere Folgeprojekte, unter anderem zur Hochpräzisionslaserspektroskopie oder neuen XUV-Frequenzstandards, die sie bis zu ihrer höchst erfolgreichen Promotion 2017 intensiv mit vorbereitete bzw. begleitete.

Im Herbst 2018 soll auf einer Weltkonferenz in Paris der Umbau des SI-Einheitensystem verabschiedet werden [1]. Bisher werden die Einheiten zum Teil über Artefakte definiert, was unter anderem zur Konsequenz hat, dass die Naturkonstanten, mit der Zeit ihren Wert ändern, da sich die Einheiten ändern, in denen diese angegeben werden. Dieses Verhältnis soll nach dem Herbst 2018 umgedreht werden [1].

Die Idee die Einheiten mit Hilfe unveränderlicher Konstanten zu definieren, ist schon älter und wurde von Planck bereits 1900 vorgeschlagen [2]: „Dem gegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein zu bemerken, dass mit Zuhilfenahme der beiden [...] Constanten a und b die Möglichkeit gegeben ist, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche, unabhängig von speziellen Körpern und Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und aussermenschliche Culturen notwendig behalten und welche daher als ‚natürliche Maaßeinheiten‘ bezeichnet werden können.“

Die Definition der Einheiten unter Zuhilfenahme fundamentaler Konstanten liefert die bestmögliche Grundlage für physikalische Messprozesse, die heutzutage von vielfältiger Bedeutung für unsere Zivilisation sind. Z.B. ist das weltweite Finanz, Kommunikations-, Navigations- und Energieversorgungssystem auf genaue Zeitsignale einer möglichst

genauen Zeitskala angewiesen. Heutzutage wird diese von einem Zusammenschluss von etwa 500 Atomuhren geliefert. Seit 1967 liefert die Weltzeit das Taktmaß für unsere technische Welt. In dieser Zeit hat sich, durch technischen Fortschritt, die tägliche Ungenauigkeit der Caesium-Uhren um 5 Größenordnungen reduziert. Optische Uhren hingegen, die mit neutralen, oder einfach geladenen Ionen als Taktgebern arbeiten, gibt es seit den 80er Jahren. Im letzten Jahrzehnt haben diese Uhren, nicht zuletzt durch die Möglichkeiten den der stete technische Fortschritt liefert, ein Niveau erreicht, das

Kurzzusammenfassung:

Gleichzeitige Kontrolle über die Freiheitsgrade der Bewegung und Anregung von Quantenobjekten gestattet Messgenauigkeiten mit denen u.a. die Untersuchung geringer relativistischer Effekte und die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells möglich sind. Theoretische Berechnungen sagen für bestimmte hochgeladene Ionen (HCIs) eine erhöhte Sensitivität verbotener optischer Übergänge bzgl. der Variation fundamentaler Konstanten, insbesondere der Feinstrukturkonstanten, voraus. Die Anwendung von heutzutage bereits verfügbaren Präzisionsmesstechniken der Atomphysik, wie der Quantenlogikspektroskopie, auf derartig sensitive Systeme könnte es ermöglichen, mit extrem großer Genauigkeit zu vermessen ob und wie sich fundamentale Konstanten in Raum und Zeit ändern. Dies ist, neben reiner Grundlagenforschung, auch gerade in Hinblick auf eine Neudefinition der SI-Einheiten durch Naturkonstanten, bedeutsam. Eine neue, modulare Technik zur Präparation kalter, stark lokalisierter HCIs fügt diese dem Repertoire an Quantensystemen für entsprechende Präzisionsexperimente hinzu und schafft die Voraussetzungen für den Bau von Atomuhren mit HCIs als Taktgebern.

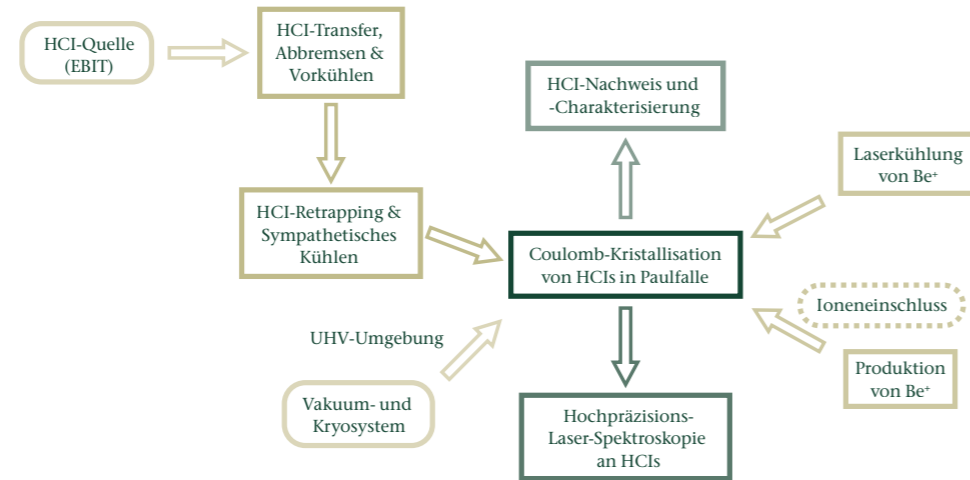


Abbildung 1: Abbildung 1: Physikalische Bausteine, die für die Realisierung neuer Atomuhren, basierend auf Übergängen hochgeladener Ionen als Taktgeber, beherrscht werden müssen [8]. Wesentliche Innovationen bestanden hierbei im Aufbau einer kryogenen, linearen Radiofrequenzfalle [7], sowie der Entwicklung eines modularen, technischen Konzeptes zur Implantation einzelner HCIs in einen permanent lasergekühlten Be^+ -Coulomb-Kristall [8–11].

bereits jetzt noch geringere Ungenauigkeiten liefert. Die Schwingungsfrequenzen, die den optischen Uhren als Taktgeber dienen, sind etwa 10000-mal schneller als die der Mikrowellenstrahlung der verwendeten Übergänge in Caesium und die so realisierten optischen Uhren sind so genau, dass sie weniger als eine Sekunde über das Alter des Universums falsch gehen würden.

Ein weiterer Sprung nach vorne bei der Realisierung optischer Uhren wäre die Verwendung anderer atomarer Systeme die, bezüglich ihrer Anfälligkeit auf äußere Störungen, ein geringeres Fehlerbudget aufweisen. Hier brilliert die Klasse der hochgeladenen Ionen (HCI). Da dieser Sorte atomarer Systeme

mehrere Elektronen fehlen, sind die verbleibenden Elektronen der Schale stärker an den Atomkern gebunden und somit wesentlich robuster gegen äußere Störungen, wie elektrische Felder oder Schwarzkörperstrahlung. Wendet man die technischen Entwicklungen heutiger optischer Uhren, auf der Basis neutraler oder einfach geladener Ionen, auf diese neuen Systeme an, so würden sich schon in jüngeren Entwicklungsstadien, vergleichbare, oder sogar bessere Genauigkeiten realisieren lassen, als dies mit den besten heutigen optischen Uhren möglich ist. Diese Genauigkeit und der physikalische Vorteil verschiedener optischer Übergänge im komplexen Termschema von HCIs ermöglichen des Weiteren die effiziente Be-

arbeitung einer weiteren essentiellen Fragestellung im Hinblick auf die Neudefinition der SI-Einheiten auf Basis fundamentaler Konstanten: Sind die Naturkonstanten in Zeit und Raum wirklich konstant?

Schon 1938 spekulierte P. Dirac über die Möglichkeit, dass sich fundamentale Konstanten, wie die Gravitations- oder Feinstrukturkonstante, auf kosmologischen Zeitskalen ändern könnten [3]. Bei umstrittenen Messungen an Quasar-Absorptionsspektren wurde eine räumliche Variation der Feinstrukturkonstanten α , welche die Kopplungsstärke der elektromagnetischen Wechselwirkung bestimmt, über kosmologische Distanzen geschlussfolgert [4]. Diese würde zu einer relativen, terrestrischen Änderung der Konstanten in der Größenordnung von 10^{-19} pro Jahr führen. Bisherige terrestrische Messungen waren jedoch in Übereinstimmung mit einer Interpretation im Sinne einer zeitlichen Unabhängigkeit der fundamentalen Konstanten. Mit zunehmender Genauigkeit und Präzision physikalischer Messungen ergeben sich auch neue technische Möglichkeiten diese Ergebnisse auf immer kleineren Skalen zu testen. Inzwischen ist die Genauigkeit und Präzision von Frequenzmessungen auf einem Niveau angelangt, wo es möglich wäre, selbst kleine Änderungen der Feinstrukturkonstanten durch Langzeitvergleich zweier Uhrenübergänge, mit verschieden starker Sensitivität auf α -Änderung, zu messen. Gerade in

Bezug auf die Abhängigkeit des physikalischen Messprozesses von der Kenntnis über Konstanz und Art möglicher Drifts von Naturkonstanten bekommt die Fragestellung nach der räumlichen und zeitlichen Konstanz selbiger eine zentrale Bedeutung.

Nach theoretischen Vorhersagen beinhaltet die atomare Klasse der HCIs einige bestens geeignete Kandidaten mit denen präzise optische Uhren entwickelt werden könnten, um anschließend z.B. eine mögliche Variation der Feinstrukturkonstanten oder des Verhältnisses von Elektron- zu Protonmasse mit erhöhter absoluter Sensitivität (Faktor 100 gegenüber einfach geladenen Ionen möglich) und Genauigkeit zu untersuchen [5, 6].

Der Wunsch nach Präparation und Langzeitspeicherung kalter hochgeladener Ionen als Schlüssel für Uhrenspektroskopie birgt jedoch einige technische Herausforderungen, die im Entstehungsprozess sowie dem hohen Ladungszustand der HCIs begründet liegen (siehe Abb. 1). HCIs können auf natürliche Weise im Universum und gewollt im Labor durch das Entziehen mehrere Elektronen eines anfangs neutralen Atoms auf verschiedene Arten produziert werden. Allen Produktionsvarianten ist gemein, dass es sich

„Ob die fundamentalen Konstanten tatsächlich in Raum und Zeit konstant sind, ist in einer physikalischen Welt, die auf der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Messungen beruht, von entscheidender Bedeutung.“

Lisa Schmöger

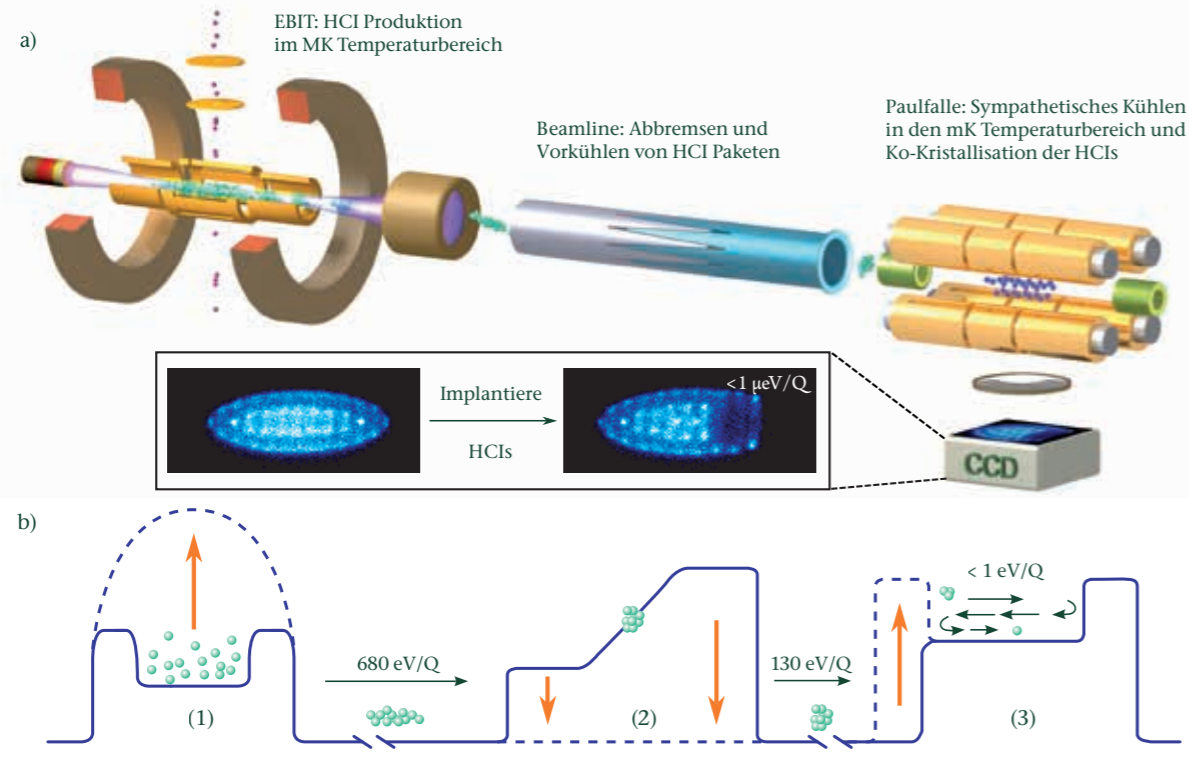


Abbildung 2: Zusammenfassende Darstellung des Konzepts zur Präparation kalter, stark lokalisierter HCIs [8–11].

a) Experimentelle Anordnung für die Implantation von HCIs in vorgeschaltete Kühlionen-Kristalle. Diese besteht aus einer Elektronenstrahlionenfalle (EBIT) als Produk-

tionsort der HCIs, einer Beamline zum Abbremsen und Vorkühlen der extrahierten Ionenpakete, sowie einer kryogenen, linearen Paulfalle mit der Möglichkeit zur Realisierung von mehrfachen Reflektions-Zyklen der HCI-Pulse zur künstlichen Verlängerung der Kühlionen-Kristall-Dimensionen. Die CCD-Bildausschnitte

sind je $640 \mu\text{m}$ lang. Es wurden hier beispielhaft zwei Ar^{33+} -Ionen ko-kristallisiert.

b) Skizze der verwendeten elektrodynamischen Potentiale. Durchgezogene bzw. gestrichelte Linien stellen die Potentiale vor bzw. nach dem Schaltzeitpunkt dar. Vertikale Pfeile symbolisieren das schnelle Schalten der angeleg-

ten Elektrodenspannungen, während horizontale Pfeile für die Bewegungsrichtung der HCI-Pakete stehen.

(1) Gepulste Extraktion, (2) Abbremsen mit simultaner longitudinaler Phasenraumkompression, (3) Retrapping und Mehrfachreflektionen in der Paulfalle.

je um einen extrem energetischen Prozess handelt und das erzeugte Ionengemisch hohe translatorische Temperaturen im MK-Bereich besitzt. Damit sind direkt Limitierungen in der spektroskopischen Genauigkeit durch den Dopplereffekt verbunden, so dass die bisherige Auflösung bei optischen Übergängen in HCIs bei $\sim 1\text{ppm}$ lag und die Entwicklung eines Kühlkonzeptes für HCIs zur Realisierung optischer Uhren unerlässlich war. Die hohe elektrische Ladung dieser atomaren Systeme erfordert darüber hinaus niedrige Drücke im UHV-Bereich von $< 10^{-13}$ mbar (H_2 -Partialdruck bei 8 K) um Ladungsaustausch zu verhindern und die Lebensdauer kristallisierter HCIs zu maximieren. Als spätere Plattform für den Bau einer optischen Uhr auf der Basis hochgeladener Ionen wurde eine lineare, kryogene Paulfalle gewählt [7]. In dieser Falle werden die HCIs, zusammen mit Kühlionen, im Vakuum in der Schwebe gehalten, so dass kontinuierliche sympathetische Kühlung und Präzisionslaserspektroskopie der auf μm -Skala stark lokalisierten HCIs stattfinden kann.

In unserem modularen Prototypenaufbau ([8–11], Abb. 2) werden die HCIs in einer Elektronenstrahlionenfalle (EBIT) durch sukzessive Elektronenstossionisation anfänglich neutraler Atome erzeugt, was zu Iontemperaturen in der Falle von mehreren MK führt. Das Gemisch aus verschiedenen Ladungszuständen wird dann mit typischen longitudinalen, mittleren kineti-

schen Energien von $680 \text{ eV}/Q$ extrahiert. Die, als gaussförmig angenommene, longitudinale Energieverteilung hat eine Halbwertsbreite von ungefähr $25 \text{ eV}/Q$. Für eine möglichst effiziente Injektion der gewünschten Ionensorte in die lineare Paulfalle, muss die Emittanz der EBIT an die Akzeptanz der Paulfalle angepasst werden, was entlang einer speziell entworfenen Strahlführung in einem mehrstufigen Abbrems- und Abkühlprozess gelang.

Nach Selektion der Ionen mit bestimmten Ladungs-zu-Masse-Verhältnis wird, in einem ersten Schritt, das Paket der gewünschten Ionensorte mittels einer elektrodynamischen, gezackten Elektrodenanordnung vorgekühlt. Diese Kühlmethode ist von der Technik des stochastischen Kühlens in der Beschleunigertechnik inspiriert. Die Position eines Ions innerhalb der gezackten Elektroden ist mit dessen kinetischer Energie korreliert. Durch Verwendung eines linear ansteigenden Abbremspotentials werden die langsameren Ionen schwächer verlangsamt als die schnelleren. Das schnelle Pulsen des Abbremspotentials auf Erdpotential entspricht dann einer komprimierenden Umsortierung der Ionen im longitudinalen Phasenraum des Teilchensembles und damit einem Kühlvorgang.

„Das Einfrieren translatorischer Freiheitsgrade atomarer Systeme dient als Schlüssel für das präzise Beherrschen und Messen innerer Freiheitsgrade.“

Lisa Schmöger

Nachdem das Ionenpaket vorgekühlt und somit auch zeitlich fokussiert wurde, wird die mittlere Energie des Ionenpaketes mit Hilfe eines statischen Gegenfeldes weiter reduziert, um die energetische Akzeptanz des Ionenpaketes in die lineare Paulfalle zu erhöhen. Im letzten Schritt werden die Ionen, die in die Fallenregion gelangen, mehrfach durch einen vorgeschickten und kontinuierlich lasergekühlten Be^+ -Coulomb-Kristall geschickt (vergleiche *Abb. 3* zur technischen Umsetzung im Paulfallenbereich). Die HCIs pendeln anfangs zwischen den Spiegelelektroden (EM1/2) der Falle hin und her, durchqueren dabei mehrfach den Coulomb-Kristall und verlieren jedes Mal, durch Coulomb-Stöße mit den Kristallionen, weiter kinetische Energie, bis sie nur noch zwischen den äußeren Fallenelektroden des Hauptfallen-Bereichs hin und her reflektieren. Hier setzt sich der reibungsartige Energieverlust soweit fort bis die HCIs im Coulomb-Kristall stecken bleiben. Die, bei diesem Abbremsen, auf den Kühlkristall transferierte Energie wird kontinuierlich durch Laserkühlung abgeführt.

Sind die Ionen einmal in den Kühlionen-Kristall implantiert, können sie sympathetisch in den mk-Bereich abgekühlt werden. Während des gesamten Prozesses wird das Fluoreszenzlicht der Kühlionen auf eine CCD-Kamera abgebildet. Die ko-kristallisierten HCIs wechselwirken nicht mit dem Kühl-laser, so dass sich bei erfolgreicher Implan-

tion sphärische, dunkle Strukturen entlang der Fallennachse bilden, wie in den CCD-Aufnahmen von *Abb. 4* zu erkennen ist.

Die typischen Energien der Ionen während der einzelnen Prozessschritte zur Präparation kalter hochgeladener Ionen in einer linearen Radiofrequenzfalle sind in *Abb. 2* zu sehen. Die Effizienz des gesamten Präparationsprozesses, von der Extraktion bis hin zur Implantation, liegt momentan bei (0.2 – 0.5) %. Für die Experimente ist dies vollkommen ausreichend und muss in der Regel sogar noch künstlich reduziert werden, um ein Schmelzen von größeren Mischkristallen zu verhindern. Sollte die Effizienz jedoch erhöht werden müssen, ließe sich auch dies durch Optimierung der Strahlführung, oder Erhöhung der Anzahl an produzierten HCI um etwa eine Größenordnung steigern.

Für die Anwendung neuer spektroskopischer Methoden ist neben der finalen Ionenkonfiguration auch die erreichte Temperatur der HCI entscheidend. Im Experiment konnte eine Reduktion der kinetischen Energie der HCI, von mehreren MK bei der Produktion zu wenigen mK nach der Implantation, demonstriert werden. Auch die entscheidende experimentelle Realisierung eines Zwei-Ionen-Mischkristalls konnte erreicht werden (*siehe Abb. 5*). An Zwei-Ionen-Mischkristallen mit Temperaturen in dieser Größenordnung lassen sich weiterführende

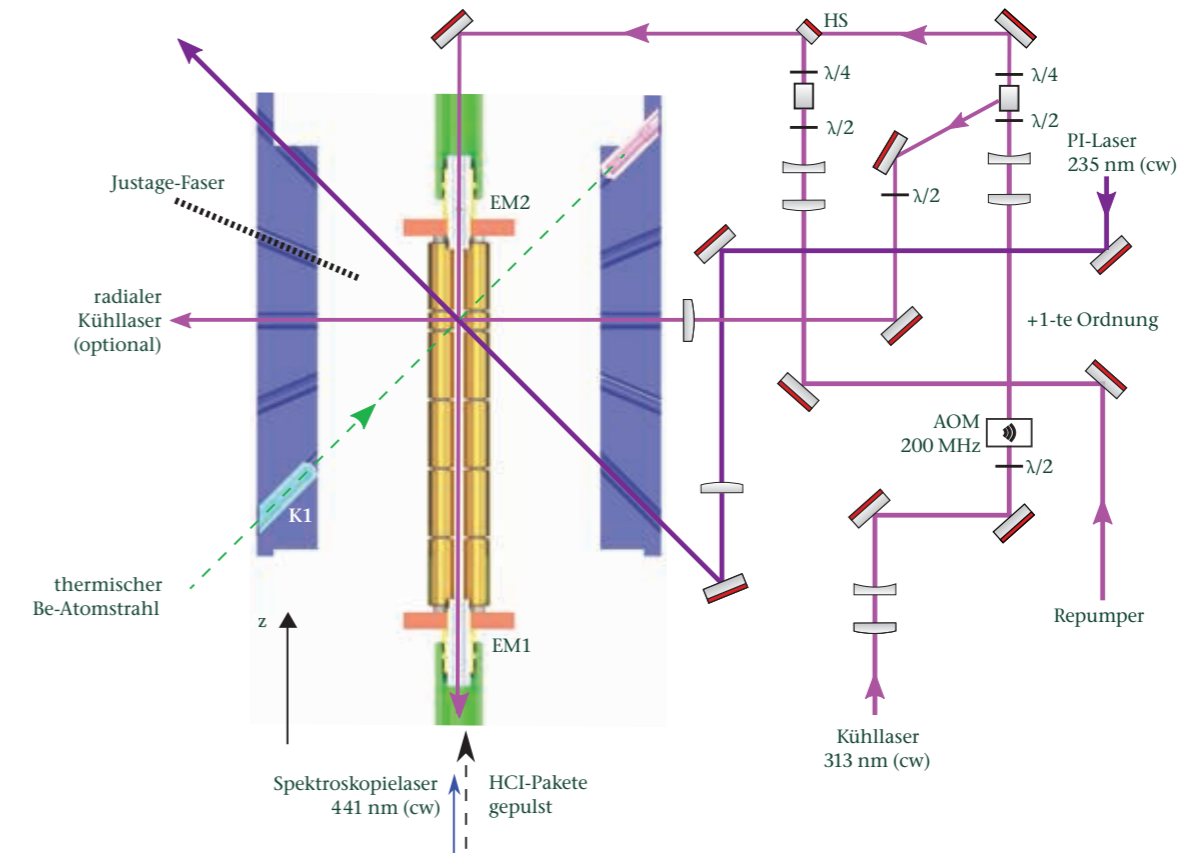


Abbildung 3: Beispielhafte Skizze der Verläufe von Lasern und Atomen im kryogenen Paulfallen-Bereich [8]. Vor Injektion der, aus der EBIT extrahierten, HCI-Pakete wird ein mK kalter Be^+ -Kühlionen-Kristall in-situ in der Paulfalle erzeugt. Dies geschieht mittels resonanzverstärkter Zweipho-

tonenionisation eines thermischen, neutralen Be -Atomstrahls und anschließender Doppler-Laserkühlung bei 313 nm der erzeugten einfach geladenen Kühlionen. EM1 und 2 bezeichnen die koaxial angeordneten elektrostatischen Spiegelelektroden für das Multipass-Stoppen der HCIs im Kühlionen-Kristall.

Abbildung 4: CCD-Aufnahmen dreidimensionaler Misch-Coulomb-Kristalle mit je einer Länge von $\sim 950 \mu\text{m}$ [8]. Es wurden zwischen 2 und 5 $^{40}\text{Ar}^{3+}$ -Ionen implantiert. Die Bilderserie zeigt die verschiedenen möglichen thermodynamischen Zustände des Kühlionen-Ensembles, während die HCIs aufgrund ihrer hohen Ladung stets kristallin bleiben. Die Aufnahmen dienen der Temperaturbestimmung der HCIs mit Hilfe des Plasma-Kopplungsparameters.

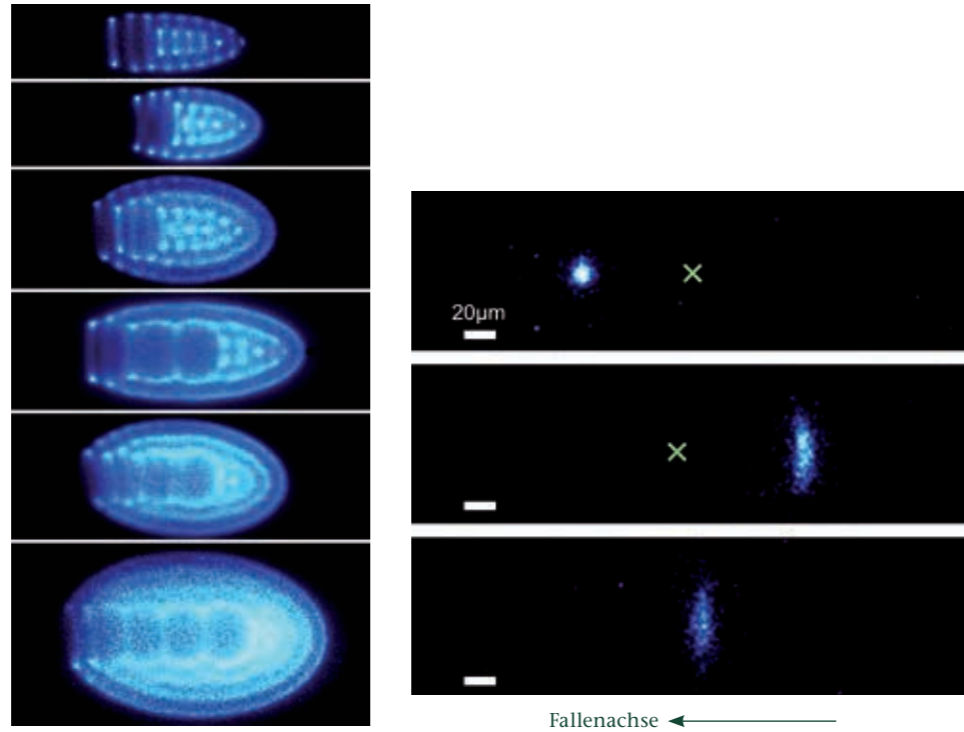


Abbildung 5 (rechts): Oben, Mitte: CCD-Aufnahmen eines Zwei-Ionen-Mischkristalls (HCI-Position durch Kreuz markiert) [8], dessen Erzeugung Grundlage für die Anwendung von Quantenlogik-Spektroskopie in Bezug auf atomare Übergänge in HCIs ist. Unten: CCD-Aufnahme eines einzelnen Be^+ -Ions nach Verlust des hochgeladenen Ions [8].

Kühl- und laserspektroskopische Methoden (z.B. Quantenlogikspektroskopie [12]) realisieren, die schon, höchst erfolgreich, bei einfach geladenen atomaren Systemen angewendet wurden um die Temperatur noch weiter zu verringern und die Präzision spektroskopischer Untersuchungen zu steigern.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Entwicklung genauerer Atomuhren unweigerlich auf die Entwicklung optischer Uhren führt. Kalte HCIs stellen hierbei, durch ihre starke Immunität gegenüber Umwelteinflüssen in Kombination mit der erhöhten Sensitivität auf fundamentale Phy-

sik, ein geeignetes, atomares System, sowohl für die Etablierung neuer Zeitstandards, als auch als Quantensensoren für die Suche nach einer möglichen zeitlichen Variation fundamentaler Konstanten dar. Der entwickelte modulare Aufbau für die Bereitstellung kalter HCIs wird schon in den nächsten Monaten und Jahren zu Folgeexperimenten führen. Im Rahmen der PTB-MPIK-Kollaboration werden derzeit technische Upgrades umgesetzt um neue optische Uhren mit HCIs als Taktgebern [13], Frequenzstandards im EUV [14] sowie genauere Untersuchungen auf mögliche Drifts fundamentaler Naturkonstanten zu realisieren.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Simon, PTB mitteilungen 126, Heft 2, 2016
- [2] M. Planck, Annalen der Physik, vol. 1, p.69, 1900
- [3] P. A. M. Dirac, „A New Basis for Cosmology“, Proceedings of the Royal Society A. 165 (921): 199–208, 1938
- [4] J. K. Webb, et al., „Indications of a Spatial Variation of the Fine Structure Constant“, Physical Review Letters, vol. 107, 2011
- [5] J. C. Berengut et al., „Enhanced Laboratory Sensitivity to Variation of the Fine-Structure Constant using Highly Charged Ions“, Physical Review Letters, vol. 105, 2010
- [6] J. C. Berengut et al., „Electron-Hole Transitions in Multiply Charged Ions for Precision Laser Spectroscopy and Searching for Variations in α “, Physical Review Letters, vol. 106, 2011
- [7] M. Schwarz et al., „Cryogenic linear Paul trap for cold highly charged ion experiments“, Review of Scientific Instruments, vol. 83, 083115, 2012
- [8] L. Schmöger, „Kalte hochgeladene Ionen für Frequenzmetrologie“, Doktorarbeit, Universität Heidelberg, 2017
- [9] L. Schmöger et al., „Coulomb crystallization of highly charged ions“, Science, Vol. 347, Issue 6227, pp. 1233–1236, 2015
- [10] L. Schmöger et al., „Deceleration, precooling, and multi-pass stopping of highly charged ions in Be^+ Coulomb crystals“, Review of Scientific Instruments 86, 103111, 2015
- [11] L. Schmöger et al., „Heiße Ionen kalt gestellt“, Physik in unserer Zeit, Vol. 46, pp. 163–165, 2015
- [12] P. O. Schmidt et al., Spectroscopy using quantum logic. Science, Vol. 309, pp. 749–752, 2005
- [13] M. Schwarz et al., „A Cryogenic Paul trap for quantum logic spectroscopy with highly charged ions“, in Vorbereitung, 2017
- [14] J. Nauta, et al., „Towards precision measurements on highly charged ions using a high harmonic generation frequency comb“, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 408, 285–288, 2017