

Ein quantenlogischer Paradigmenwechsel

Die Spektroskopie hochgeladener Ionen erlaubt mit deutlich erhöhter Auflösung einen präzisen Blick auf die Naturkonstanten.

Dietrich Leibfried

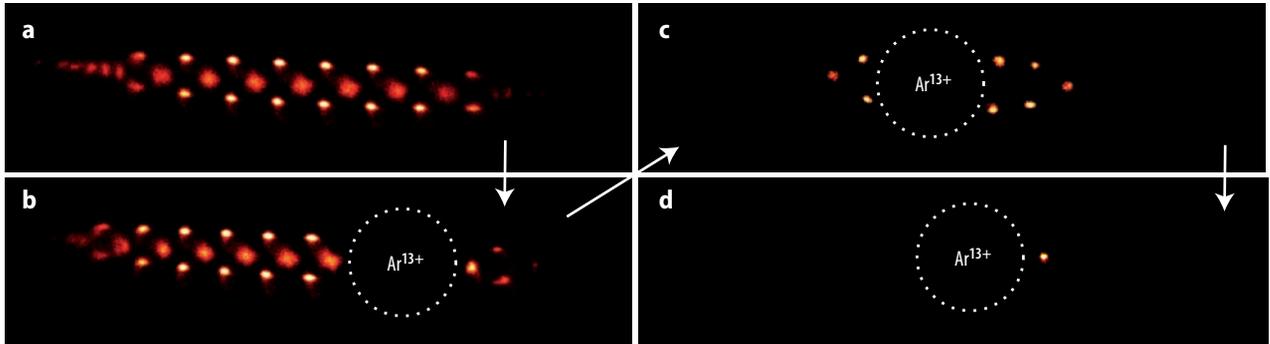


Abb. 1 In dem lasergekühlten Coulomb-Kristall aus 50 bis 100 ${}^9\text{Be}^+$ -Ionen (a) kristallisiert das hochgeladene Ar^{13+} -Ion (b). Durch gezieltes Aufheizen werden ${}^9\text{Be}^+$ -Ionen aus dem Kristall entfernt (c), bis nur noch eines verbleibt (d).

Quantentechnologie lässt enorme Fortschritte in der Rechen- und Messtechnik sowie der Simulation quantenmechanischer Modelle erwarten. Während einige Versprechungen mit berechtigter Skepsis zu betrachten sind, hat die 2002 von David Wine-land und Kollegen vorgeschlagene quantenlogische Spektroskopie [1] die ursprünglichen Erwartungen weit übertroffen. Sie ist nicht nur, wie damals vorgeschlagen, die Basis eines Frequenzstandards mit der derzeit geringsten relativen systematischen Unsicherheit von weniger als 10^{-18} [2], sondern hat auch die Quantenkontrolle und Präzisionsspektroskopie von Molekül-Ionen [3, 4] und nun die Spektroskopie an hochgeladenen Ionen mit enorm verbesserter Auflösung ermöglicht [5]. Eines ihrer Erfolgsgeheimnisse liegt unter anderem darin, dass das Konzept auf viele geladene Teilchen mit vollkommen unterschiedlichen Eigenschaften übertragbar ist. Angesichts der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten sind die bisherigen Arbeiten wohl nur die Spitze des Eisbergs.

Kürzlich hat eine Gruppe an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig unter Leitung von Jose Crespo López-Urrutia und Piet Schmidt zunächst ein Gemisch hochgeladener Argon-Ionen in einer

Elektronenstrahl-Ionenfalle (EBIT) präpariert [5]. Statt wie bisher die Spektroskopie der ${}^{40}\text{Ar}^{13+}$ -Ionen direkt im Plasma bei etwa 100 Millionen Kelvin durchzuführen, wurden sie aus der EBIT ausgekoppelt, abgebremst und vorselektiert, um einzeln in eine Paul-Falle zu gelangen. In dieser befand sich ein Coulomb-Kristall aus 50 bis 100 einfach geladenen Beryllium-Ionen, die auf wenige Millikelvin lasergekühlt waren (**Abb. 1**) [6]. Sobald das hochgeladene Ion die Paul-Falle erreichte, wurde das Potential am Eingang so hochgeschaltet, dass kein Entkommen möglich war. In zahlreichen Stößen gab das ${}^{40}\text{Ar}^{13+}$ seine Energie an die Beryllium-Ionen ab, nahm deren Temperatur an und wurde schließlich in den wiedererkalteten Kristall eingebettet. Danach wurden aus der Falle alle Beryllium-Ionen bis auf eines entfernt, das im Folgenden als „Logik-Ion“ die Verbindung zwischen Forschern und dem hochgeladenen Ion aufrecht erhielt.

Der wesentliche Trick quantenlogischer Spektroskopie besteht darin, Übergänge des zu untersuchenden Ions mithilfe des mitgefangenen Logik-Ions sichtbar zu machen. Dazu gilt es zunächst, die gemeinsame Bewegung der beiden Ionen in ihren quantenmechanischen Grundzustand zu kühlen, um der Bewegung keine

weitere Energie entziehen zu können. Anschließend regten die Forscher mit einem hochstabilen Laser der Wellenlänge 441 nm den schmalen Feinstruktur-Übergang zwischen dem ${}^2\text{P}_{1/2}$ -Grundzustand und dem angeregten ${}^2\text{P}_{3/2}$ -Zustand mit Lebensdauer 9,573(4) ms in ${}^{40}\text{Ar}^{13+}$ an. Dem ersten Puls schickten sie einen zweiten mit einer kleineren Frequenz hinterher (**Infokasten**). Deren Unterschied entsprach exakt einem Quantum der gemeinsamen Bewegung der Ionen. Falls der erste Puls das Ion anregte, beförderte der zweite Puls es zurück in den Grundzustand, wobei aufgrund der Energieerhaltung ein Quantum in der Bewegung deponiert wurde.

Auf das Logik-Ion folgte ein Laserpuls, dessen Frequenz ebenfalls um ein Bewegungsquantum zu klein war. Falls das hochgeladene Ion sein Quantum an die Bewegung abgegeben hatte, konnte die Bewegungsenergie zusammen mit der Photonenenergie den Zustand des Logik-Ions verändern. Insgesamt änderte sich der Zustand des Logik-Ions also genau dann, wenn das Argon-Ion vorher seine beiden Übergänge erfolgreich durchlaufen hatte. Die Forscher konnten anschließend das Logik-Ion auslesen, da ein Zustand sehr viele, der andere aber nur sehr wenige Photonen eines

Nachweislasers in einen Detektor streute.

Diese Pulssequenz wurde vielfach wiederholt, während der 441-nm-Laser schrittweise über eine Resonanzlinie des hochgeladenen Argon-Ions verstimmte wurde und das Logik-Ion dessen Übergänge „mitschrieb“. Damit gelang es, die Linie innerhalb weniger Minuten mit einer von der Pulslänge des Lasers begrenzten Breite von etwa 65 Hz aufzulösen. Diese Auflösung liegt nahe an der natürlichen Linienbreite des Argon-Übergangs von 17 Hz und ist um etwa acht Größenordnungen höher als die vorher in heißen Plasmen nach stunden- oder tagelanger Mittelung erzielten Genauigkeiten. Weiterhin regten die Forscher das Argon-Ion exakt auf Resonanz an und bestimmten durch verschiedene Wartezeiten zwischen den beiden 441-nm-Pulsen den Anteil der im angeregten $^2P_{3/2}$ -Zustand zurückgebliebenen Population als Funktion der Zeit und damit die Lebensdauer des Zustands. Zudem zeichneten sie alle möglichen Übergänge innerhalb der von einem Magnetfeld mit 160 μT aufgespaltenen Feinstruktur-Unterkonstruktionen auf. Damit ließ sich der g -Faktor des $^2P_{3/2}$ -Zustands mit einer um etwa zwei

Größenordnungen geringeren Ungenauigkeit bestimmen.

Diese Ergebnisse bedeuten einen Paradigmenwechsel in der Spektroskopie hochgeladener Ionen, da dieselbe Methode auf verschiedene hochgeladene Ionen übertragbar ist. Elektronen in hochgeladenen Ionen sind stark an den Kern gebunden und weniger anfällig gegen Störungen durch äußere Felder, was für Frequenzstandards vorteilhaft ist. Die Valenzelektronen kommen ihrem Kern viel näher als entsprechende Elektronen in neutralen oder einfach geladenen Atomen und ermöglichen dadurch einen genaueren Einblick in die Kernstruktur. Das kleine Volumen ihrer Wellenfunktionen erzwingt aufgrund der Unschärferelation einen hohen Impuls und damit große relativistische Korrekturen. Die hohe Kernladungszahl kann quantenelektrodynamische Korrekturen hervorbringen, die nicht mehr mit der herkömmlichen Störungstheorie zu beschreiben sind. Die Kombination dieser Wechselwirkungen macht hochgeladene Ionen zu feinfühligsten Sensoren für zeitliche Änderungen der Feinstrukturkonstante. Daher dürfte die quantenlogische Spektroskopie weiterhin den Blick

auf die Naturgesetze erweitern und schärfen.

- [1] D. J. Wineland et al., Proc. 6th Symp. on Frequency Standards and Metrology (2002), S. 361
- [2] S. M. Brewer et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 033201 (2019)
- [3] F. Wolf et al., Nature **530**, 457 (2016)
- [4] C. W. Chou et al., Nature **545**, 203 (2017)
- [5] P. Micke et al., Nature **578**, 60 (2020)
- [6] L. Schmöger et al., Science **347**, 1233 (2015)

Autor

Dr. Dietrich Leibfried, National Institute of Standards and Technology, Time and Frequency Division 688, 325 Broadway, Boulder, CO 80305, USA

Quantenlogische Mess-Sequenz

Bei der quantenlogischen Mess-Sequenz ist das Argon-Ion in seinem $^2P_{1/2}$ -Grundzustand (i) und das Logik-Ion im Zustand |dunkel>, in dem es beim Nachweisschritt keine Photonen in den Detektor streut. Die gemeinsame Bewegung beider Ionen wurde vorher mit dem Logik-Ion in den Grundzustand $n = 0$ gekühlt.

Der erste Puls bei 441 nm (oranjer Pfeil 1, ii) regt das Argon-Ion in den $^2P_{3/2}$ -Zustand an, ohne die Bewegung zu beeinflussen. Der zweite Puls (oranjer Pfeil 2) hat eine zu kleine Frequenz, um das Argon-Ion in den Ausgangszustand zurückzubringen. Trotzdem kann das Argon-Ion in den $^2P_{1/2}$ -Zustand zurückkehren und die Energie erhalten, indem die Energiedifferenz die gemeinsame Bewegung der Ionen nach $n = 1$ anregt (grüner Pfeil).

Ein dritter Puls (grüner Pfeil, iii) kann nun das Logik-Ion resonant von $n = 1$, |dunkel> nach $n = 0$, |hell> anregen, sodass das Logik-Ion anschließend viele Photonen in den Detektor streut. Der gemeinsame Bewegungszustand ändert sich dabei auch für das Argon-Ion zurück nach $n = 0$ (oranjer Pfeil).

Falls die Pulse auf das Argon-Ion aus ii) keine Wirkung hatten, zum Beispiel weil sie nicht resonant waren, verbleibt das Gesamtsystem im Zustand aus i). Der Puls auf das Logik-Ion hat dann zu wenig Energie, um seinen Zustand zu ändern (gestrichelter grüner Pfeil in iii). Das Logik-Ion bleibt in |dunkel> und streut keine Photonen in den Detektor.

