

Spektroskopie – aber logisch!

Die kohärente Manipulation von gefangenen Ionen ermöglicht die Präzisionsspektroskopie bislang unzugänglicher Spezies.

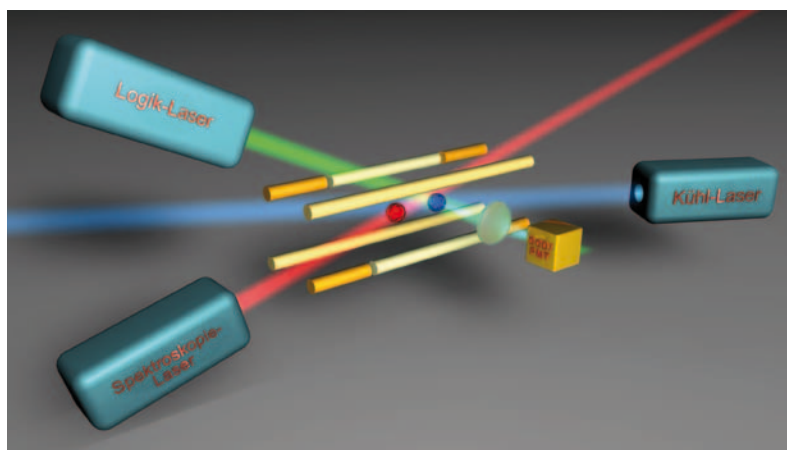
Piet O. Schmidt

Optische Spektroskopie mit höchster Auflösung ist nur möglich an Atomen, die geeignete Übergänge zum Laserkühlen und zur Detektion des internen Zustands haben. Dies schränkte die Methode, z. B. im Hinblick auf hochgenaue Atomuhren, stark ein. Ein neues Verfahren, basierend auf Techniken der Quanteninformationsverarbeitung, hebt diese Beschränkung auf und macht eine Vielzahl weiterer Atome und Moleküle zugänglich. Das eröffnet faszinierende Möglichkeiten bei der Entwicklung optischer Uhren und bei Tests fundamentaler Theorien.

Präzisionsspektroskopie ist eine treibende Kraft für die Weiterentwicklung unseres physikalischen Verständnisses. So machten immer höhere spektroskopische Auflösungen Effekte wie die Fein- und Hyperfeinstruktur sowie die Lamb-Verschiebung sichtbar und führten zur Entwicklung der Quantenelektrodynamik (QED). Die QED ist einer der Grundpfeiler des sehr erfolgreichen Standardmodells der Teilchenphysik, das jedoch eine Reihe von Phänomenen, wie zum Beispiel Dunkle Materie bzw. Energie und die Asymmetrie in der Verteilung von Materie und Antimaterie, nicht erklären kann. Zudem ist die Gravitation nicht mit der QED vereinbar. Aus diesem Grund wird nach einer gemeinsamen Beschreibung aller fundamentalen Wechselwirkungen gesucht. Die Hoffnung besteht, dass die Spektroskopie mit immer höherer Auflösung irgendwann weitere Abweichungen von den Vorhersagen unserer besten Modelle liefert und damit die Richtung für eine verfeinerte und möglicherweise vereinheitlichte Theorie vorgibt.

Sehr lohnenswert ist hierbei die Untersuchung von Systemen, bei denen mögliche Abweichungen besonders ausgeprägt sind. Dazu zählen insbesondere spektroskopische Untersuchungen an Atomen und Molekülen, um mögliche Änderungen von Fundamentalkonstanten nachzuweisen, nach einem eventuellen Dipolmoment des Elektrons zu suchen, die Paritätsverletzung zu messen sowie generell die QED zu testen. Allerdings gibt es nur wenige theoretische Vorhersagen zur Größenordnung der zu erwartenden Effekte. Da diese im Labor noch nicht gefunden wurden, müssen die Abweichungen so winzig sind, dass nur höchstauflösende Methoden Erfolg versprechen.

Die mit Abstand genaueste Messmethode ist heutzutage die Laserspektroskopie, mit der sich Frequenz-



Bei der Quantenlogikspektroskopie werden Spektroskopie- (rot) und Logik-Ion (blau) gemeinsam in einer linearen Paul-Falle gefangen.

verhältnisse von optischen Uhren auf 17 Stellen genau angeben lassen [1]. Dazu müssen die Referenzatome bestmöglich von störenden Umwelteinflüssen wie unerwünschten elektromagnetischen Feldern und Stößen mit anderen Atomen abgeschirmt sein. Paul-Fallen für Ionen im Ultrahochvakuum eignen sich dazu besonders gut, da sich die gefangenen Ionen dort in einem beinahe feldfreien Raum befinden. Durch den starken Falleneinschluss tritt bei der Spektroskopie praktisch kein Rückstoß auf (analog zum Mößbauer-Effekt), da ein einzelnes Photon den quantisierten Bewegungszustand des Ions in der Falle nicht ändert.

Zur Spektroskopie an schmalen Übergängen, d. h. bei langer Lebensdauer des angeregten Zustands von einzelnen gefangenen Ionen, verwendet man meist eine sich immer wiederholende Sequenz (Abb. 1): Laser-

KOMPAKT

- Die Quantenlogikspektroskopie ermöglicht es, die besonderen spektroskopischen Eigenschaften einer Ionenpezies (Spektroskopie-Ion) mit der guten Manipulierbarkeit einer anderen Spezies (Logik-Ion) zu kombinieren, wenn diese in einer Paul-Falle gespeichert sind.
- Da beide Ionen aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung stark gekoppelt sind, lässt sich mithilfe geeigneter Protokolle der interne Zustand des Spektroskopie-Ions auf das Logik-Ion übertragen und dort auslesen.
- Auf diese Weise war es möglich, die zurzeit genaueste Uhr der Welt zu konstruieren, obwohl sich das verwendete Aluminium-Ion nur eingeschränkt direkt manipulieren lässt.

Prof. Dr. Piet O. Schmidt, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, Physikalisch-Technische Bundesanstalt und Leibniz Universität Hannover, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

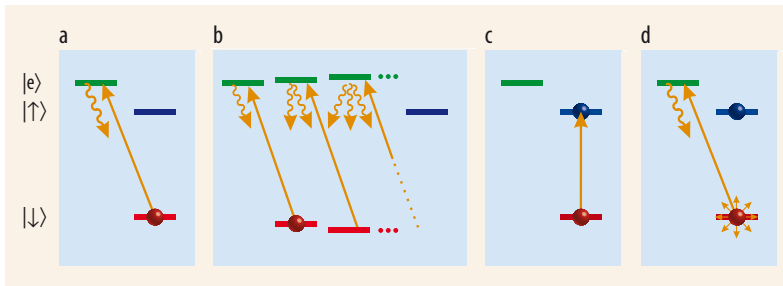


Abb. 1 Ein Zyklus der Laserspektroskopie schmalere Übergänge beginnt mit Laserkühlung auf einem geschlossenen Übergang, bei dem das Atom nach Anregung durch einen leicht verstimmen Laser vom Zustand $|e\rangle$ nur wieder zurück in den Grundzustand $|\downarrow\rangle$ zerfallen kann. Die atomaren Niveaus spalten in einem Magnetfeld in ihre magnetischen Komponenten auf (symbolisiert durch die roten und grünen Balken, b). Für das Experiment ist es erforderlich, gezielt einen dieser Zustände zu präparieren.

Dies geschieht durch optisches Pumpen mit polarisiertem Licht auf dem Übergang $|\downarrow\rangle \leftrightarrow |e\rangle$, bei dem die Atome Drehimpuls aus dem Licht absorbieren, bis sie im äußersten Unterzustand mit maximaler Drehimpulskomponente gelandet sind. Ein Laserpuls regt den Spektroskopieübergang $|\downarrow\rangle \leftrightarrow |\uparrow\rangle$ an (c). Über zustandsabhängige Laserfluoreszenz lässt sich der interne Zustand detektieren (d). Dies geschieht meist auf dem Laserkühlübergang.

kühlung minimiert Doppler-Verschiebungen, mit optischem Pumpen wird der Ausgangszustand für die Spektroskopie initialisiert, ein Spektroskopielaserpuls, der das Atom mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in den angeregten Zustand bringt, fragt den Übergang ab. Schließlich gibt die Detektion Auskunft, ob das Atom im Grundzustand verblieben ist. Das Spektroskopiesignal resultiert aus dem Mittel der Anregungen über viele Zyklen als Funktion der Verstimmung des Lasers bezüglich des Übergangs.

Jedoch besitzt nicht jede interessante Spezies einen geeigneten Übergang zur Laserkühlung und Detektion. In der Tat wurde bislang nur ein kleiner Bruchteil aller neutralen und geladenen Atome mit Lasern gekühlt. Bei Molekülen ist die Situation noch dramatischer: Aufgrund der Vielzahl von Rotations- und Vibrationsniveaus existieren in den seltensten Fällen geschlossene zyklische Übergänge, die sich für die Laserkühlung eignen. Gerade Moleküle bieten jedoch einen reichhaltigen Fundus an Übergängen mit Eigenschaften, die für eingangs genannte Fragestellungen relevant sind.

Eine Lösung für dieses Problem kommt aus einem vermeintlich ganzen anderen Fachgebiet, das sich in den letzten 15 Jahren rasant entwickelt hat: die Quanteninformationsverarbeitung mit gefangenen Ionen. Diese hat das Ziel, Quantencomputer und Quantensimulatoren zu realisieren.¹⁾ Elementarer Baustein ist dabei das aus zwei langlebigen Niveaus bestehende Quanten-Bit (Qubit), in dem die Quanteninformation als Überlagerung der Zustände kodiert ist. Die quantenmechanische Verschränkung mehrerer Qubits in einem Quantenregister erlaubt es, bestimmte Algorithmen effizienter zu implementieren als klassisch möglich. Ein solches Quantenregister lässt sich z. B. mithilfe von Ketten von Ionen realisieren, die in einer linearen Paul-Falle gefangen und über ihre gegenseitige Coulomb-Abstoßung stark gekoppelt sind. Die Bewegung der Ionen wird in diesem Fall über kollektive

Bewegungen aller Ionen beschrieben. Mit Laser- oder Mikrowellenpulsen geeigneter Frequenz und Dauer ist es möglich, den internen elektronischen Zustand der Ionen sowie ihren Bewegungszustand in der Falle zu ändern. Ignacio Cirac und Peter Zoller schlugen 1995 vor, solche Laserpulse zu benutzen, um Ionen über die gemeinsame Bewegung in der Falle zu verschränken und so Quantenlogikgatter zu implementieren [2]. Diese Idee wurde in zahlreichen Experimenten umgesetzt und weiterentwickelt. Quantenalgorithmen und -simulationen wurden eindrucksvoll implementiert – möglich durch die effiziente Entkopplung der internen und externen Freiheitsgrade von Umwelteinflüssen, die Dekohärenz bewirken, und durch die effiziente Präparation, kohärente Manipulation und Detektion von internen Zuständen mithilfe von Laserlicht. Dieselben Anforderungen gelten auch für die Laserspektroskopie (Abb. 1).

Ein logischer Zugang

Inzwischen gibt es eine Reihe von Techniken aus der Quanteninformationsverarbeitung, um die Präzisionspektroskopie zu verbessern. Paradebeispiel ist die Quantenlogikspektroskopie, vorgeschlagen im Jahre 2001 von David Wineland am NIST in Boulder. Diese ermöglicht es, die besonderen spektroskopischen Eigenschaften einer Ionenspezies (Spektroskopie-Ion) mit der guten Manipulierbarkeit einer anderen Spezies (Logik-Ion) zu kombinieren, wenn diese zusammen in einer Paul-Falle gespeichert sind. Die Bewegung der Ionen ist so stark gekoppelt, dass das Spektroskopie-Ion durch Laserkühlung des Logik-Ions mitgekühlt wird. Mithilfe von Quantenlogikprotokollen lässt sich nach der Abfrage des Spektroskopieübergangs die interne Zustandsinformation des Spektroskopie-Ions auf das Logik-Ion übertragen, wo sie mit praktisch 100 % Effizienz nachzuweisen ist (Infokasten). Zusätzlich ist es möglich, den internen Zustand innerhalb der möglichen Spektroskopiezustände deterministisch zu präparieren [3]. Damit sind alle Anforderungen erfüllt, die für die Laserspektroskopie an Ionen mit fehlendem zyklischen Übergang notwendig sind.

Diese Technik bietet somit den Zugang zur Spektroskopie von zuvor unerreichbaren atomaren und molekularen Spezies, die interessante spektroskopische Eigenschaften besitzen oder sich besonders für Atomuhren eignen. Einige Beispiele sollen im Folgenden die Implementierung der Quantenlogikspektroskopie illustrieren.

Die Uhr der Wahl

Bereits 1992 schlugen Hans Dehmelt und Kollegen das Aluminium-Ion als Kandidat für eine Uhr vor, deren Referenzübergang im optischen Spektralbereich liegt. Schon damals war bekannt, dass sich der $^1S_0 - ^3P_0$ -Übergang in Al^+ besonders gut als Referenz für einen

¹⁾ vgl. D. Leibfried, Physik Journal, Dezember 2009, S. 45

Frequenzstandard eignet: Dieser verbotene Übergang ist lediglich durch die Hyperfeinwechselwirkung des Valenzelektrons mit dem Kernspin schwach erlaubt und weist daher eine mit 8 mHz schmale Linienbreite auf. Zudem ist der Übergang unempfindlich gegenüber elektrischen Feldgradienten, eine der größeren systematischen Unsicherheiten in typischen Einzelionenuhren. Das einzige natürlich vorkommende Isotop ^{27}Al besitzt einen Kernspin von $5/2$, der zu einer schwachen linearen und quadratischen Zeeman-Verschiebung der Uhrenniveaus aufgrund der Wechselwirkung des Kernspins mit einem externen Magnetfeld führt. Außerdem reagiert das Aluminium-Ion viel weniger auf Schwarzkörperstrahlung als alle anderen bislang untersuchten Uhrenatome. Aufgrund der Kopplung an die thermische Strahlung der Umgebung verschieben sich beide Uhrenniveaus geringfügig. Dies ist derzeit bei den meisten Uhren eine der größten systematischen Unsicherheiten.

Da Al^+ keinen geeigneten Übergang zur Laserkühlung besitzt, hat es trotz all dieser positiven Eigenschaften mehr als zehn Jahre gedauert, bis die Quantenlogikspektroskopie die erste Al^+ -Uhr mit Beryllium als Logik-Ion ermöglicht hat (Infokasten). Gemäß dem Quantenlogikprotokoll gilt es zunächst, beide Ionenspezies in einer linearen Paul-Falle zu fangen und zu kühlen (Abb. 2). Nach der Spektroskopie des Uhrenübergangs in Al^+ wird der interne Zustand von Al^+ nach Be^+ übertragen und dort detektiert. Der Zustandstransfer gelingt über eine Reihe wohlkontrollierter Laserpulse. Hierbei kommt der gemeinsamen Bewegung der Ionen aufgrund der starken Coulomb-Kopplung die Vermittlerrolle zu. Abhängig vom internen Zustand des Al^+ -Ions regt der erste Laserpuls eine Bewegung des zuvor in den Grundzustand der Bewe-

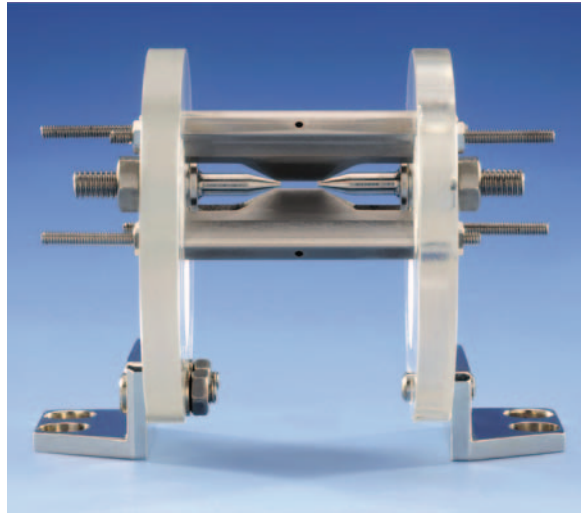
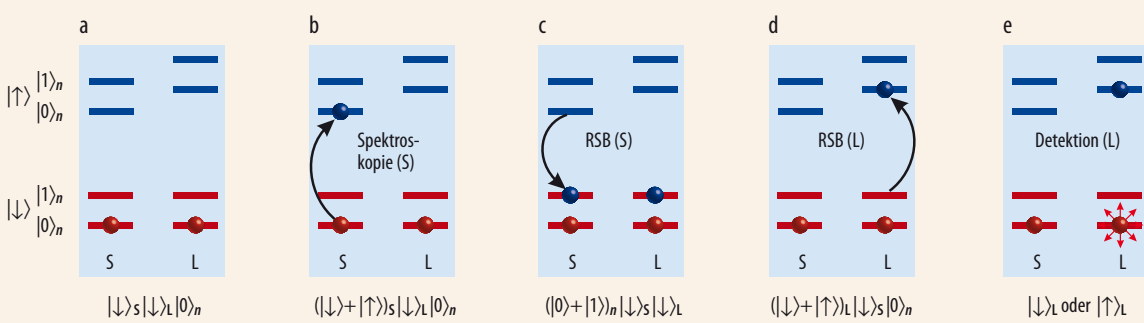


Abb. 2 Eine Paul-Falle aus präzisionsgefertigten Titan-Elektroden und einer Saphir-Halterung ist das Herzstück der an der PTB im Aufbau befindlichen Al^+ -Quantenlogikuhr.

gung gekühlten Ionenkristalls an. Diese Bewegungsanregung kann ein zweiter Laserpuls auf dem Logik-Ion wieder in einen internen Zustand kodieren und mittels eines weiteren Laserpulses dort detektieren. Auf einem Hilfsübergang in Al^+ gelang es, dieses Schema erstmals zu implementieren (Abb. 3) [3]. Dies ist die Basis für den Betrieb der Al^+ -Uhr, die mit einer relativen Ungenauigkeit von $8,6 \cdot 10^{-17}$ die derzeit genaueste Uhr der Welt ist [4].

Frequenzvergleiche zwischen zwei verschiedenen Uhren mit derart hohen Genauigkeiten erlauben es, kleinste Verschiebungen der atomaren Energieniveaus zu messen. Die Änderung von fundamentalen Konstanten, wie der Feinstrukturkonstanten α , könnten solche Verschiebungen hervorrufen. Man kann sehr genau berechnen, wie die Energieniveaus in unterschiedlichen Atomen auf eine Änderung von α reagieren würden und über einen Frequenzver-

QUANTENLOGIKTRANSFER

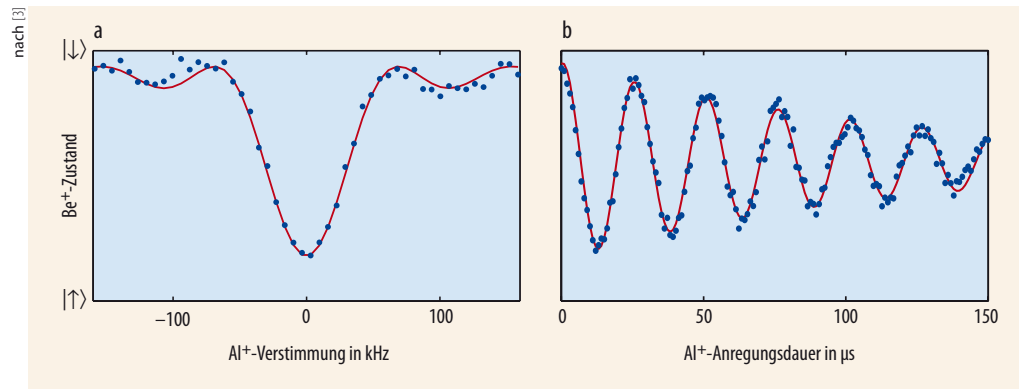


nach [3]

Bei der Quantenlogikspektroskopie transferieren mehrere Laserpulse den internen Zustand vom Spektroskopie- (S) auf das Logik-Ion (L). Relevant sind dabei die beiden Uhrenzustände $|\downarrow\rangle_S$ und $|\uparrow\rangle_S$, zwei langlebige Zustände im Logik-Ion ($|\downarrow\rangle_L$ und $|\uparrow\rangle_L$) und die Bewegungsmode im Grund- ($|0\rangle_n$) und ersten angeregten Zustand ($|1\rangle_n$). Ausgangspunkt ist der Grundzustand des Systems, der durch optisches Pumpen und Grundzustandskühlen der Mode initialisiert wird (a). Der Spektroskopieimpuls erzeugt einen Überlagerungszustand zwischen Grund- und angeregtem Uhrenzustand (b). Hier nehmen wir gleiche Amplituden der beiden Zustände an und vernachlässigen Normierungsfaktoren. Durch einen sog. roten Seitenbandpuls (RSB) geht der elektronische

Überlagerungszustand in einen Überlagerungszustand der Bewegung über (c). Dieser Laserpuls lässt sich z. B. mit dem Spektroskopielaser implementieren und adressiert nur den elektronisch angeregten Teil der Wellenfunktion ($|\uparrow\rangle_S$), da es keinen Zustand gibt, an den $|\downarrow\rangle_S$ resonant koppeln könnte. Ein vergleichbarer Laserpuls kann die Überlagerung aus Bewegungszuständen in eine elektronische Überlagerung auf dem Logik-Ion transformieren (d). Dort ist es möglich, durch Einstrahlen des Kühllasers zwischen den beiden Zuständen $|\downarrow\rangle_L$ und $|\uparrow\rangle_L$ zu unterscheiden, da nur der Grundzustand durch Kopplung an ein drittes elektronisches Niveau Photonen streut, während der angeregte Zustand dunkel bleibt (e).

Abb. 3 Für die Demonstration der Quantenlogikspektroskopie wurde das Al^+ -Ion mit der angegebenen Laserverstimmung auf dem Hilfsübergang $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ angeregt (a). Auf der Resonanz führt das Ion sog. Rabi-Oszillationen als Funktion der Anregungsdauer aus. (b). Gemäß dem im Infokasten beschriebenen Protokoll wurde der interne Zustand nach jeder Anregung auf das Be^+ -Logik-Ion transferiert und dort detektiert.



gleich eine obere Schranke für eine Variation von α angeben. So folgte aus zwei Vergleichen der Al^+ - und Hg^+ -Frequenzstandards im Abstand eines Jahres, dass die relative zeitliche Änderung der Feinstrukturkonstanten kleiner ist als $(-2,6 \pm 2,3) \cdot 10^{-17}$ pro Jahr [1]. Zusammen mit Vergleichsmessungen anderer Frequenzstandards ist es möglich, die zeitliche Änderung von weiteren fundamentalen Konstanten wie der Rydberg-Konstanten einzuschränken (Abb. 4). Mit einer um zwei Größenordnungen höheren Genauigkeit wäre eine aus astrophysikalischen Beobachtungen prognostizierte räumliche Änderung von α mit optischen Uhren messbar.

Spektroskopie am Limit und Designer-Atome

Die Verschränkung von Atomen führt zu faszinierenden Anwendungen der Quantenlogik. In der klassischen Ramsey-Spektroskopie erzeugt ein kurzer Laserpuls ausgehend vom Grundzustand eine Überlagerung aus Grund- und angeregtem Zustand mit gleichen Amplituden ($|\downarrow\rangle + \exp(-i\omega t)|\uparrow\rangle$).²⁾ Die beiden Teile der Wellenfunktion entwickeln sich mit einer relativen Phase, die ihrem Energieabstand $\hbar\omega$

entspricht. Nach einer Wartezeit ändert ein zweiter Laserpuls, abhängig von der relativen Phasenentwicklung zwischen Atom und Laser, die Amplituden des Überlagerungszustandes. So befindet sich das Atom z. B. bei exakt resonanter Anregung und identischer Phasenentwicklung nach dem zweiten Puls im angeregten Zustand. Die Messung der Überlagerungsamplituden lässt Rückschlüsse auf die relative Phasenentwicklung zwischen Atom und Laser zu. Wird nur ein einzelnes Atom gemessen, so ist dabei das Signal aufgrund der Projektion in einen der beiden Zustände bei der Detektion stark verrauscht (Quantenprojektionsrauschen).

In einer klassischen Messung an N unkorrelierten Atomen verbessert sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis mit \sqrt{N} . Durch Verschränkung kann diese Skalierung bis zur sog. Heisenberg-Grenze verbessert werden, was einer Skalierung mit N entspricht. Dies lässt sich durch verallgemeinerte Ramsey-Pulse erreichen, die (analog zu den oben beschriebenen Einzelatom-Ramsey-Pulsen) einen Überlagerungszustand erzeugen und auslesen, der aus zwei Teilen besteht: alle Atome im Grundzustand und alle Atome im angeregten Zustand ($|\downarrow\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle + \exp(-iN\omega t)|\uparrow\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$) (Abb. 5). Der Energieunterschied zwischen beiden Teilen

²⁾ Normierungsfaktoren werden hier und im Folgenden vernachlässigt.

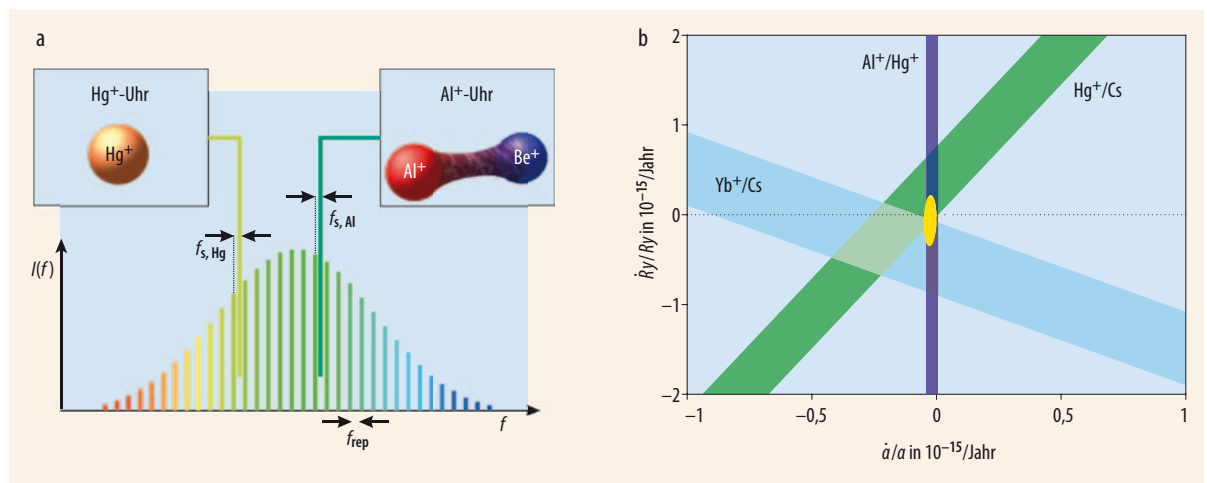


Abb. 4 Aus einem Vergleich der Quecksilber- und Aluminiumionenuhren folgt eine obere Schranke für die Änderung der Feinstrukturkonstanten. Dazu vergleicht man optische Uhren mithilfe eines Frequenzkamms mit Kammlinienabstand f_{rep} und Versatz-Frequenz f_{CEO} (a). Die Kammzinken haben eine optische Frequenz von $m \cdot f_{\text{rep}} + f_{\text{CEO}}$, wobei m eine ganze Zahl ist. Aus den

Schwebungsfrequenzen $f_{s,\text{Al}}$ und $f_{s,\text{Hg}}$ der optischen Uhren mit den nächstgelegenen Kammzinken lässt sich das Frequenzverhältnis der beiden Uhren bestimmen. Die Konstanz der Frequenzverhältnisse unterschiedlicher Uhren über längere Zeiträume schränkt die zeitliche Änderung der Rydberg-Konstanten R_y und von α im Rahmen der Messgenauigkeit ein (b).

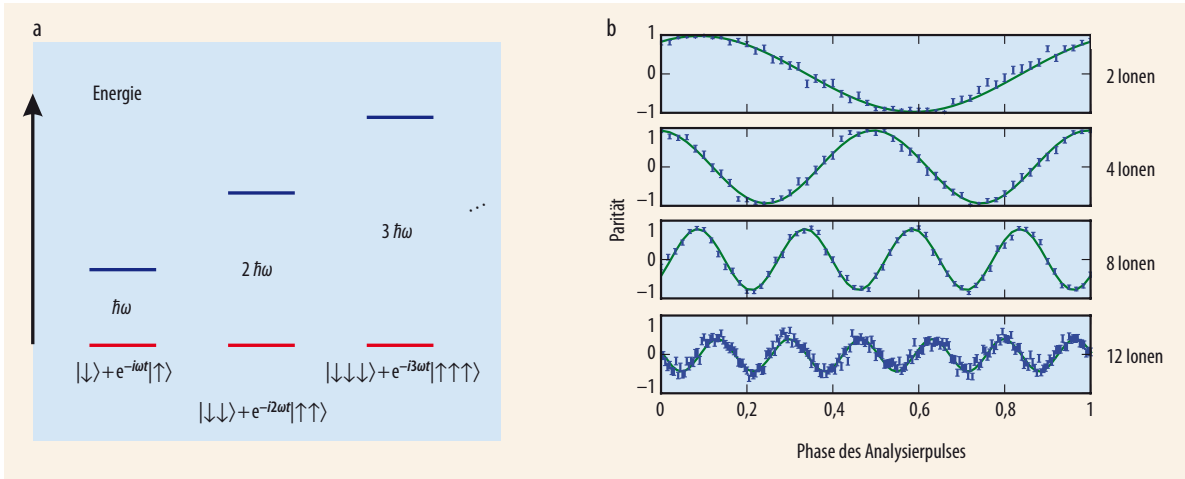


Abb. 5 Die Heisenberg-limitierte Spektroskopie nutzt verschränkte Atome, deren Energieniveaus und Phasenentwicklung von einem, zwei und drei verschränkten Atomen in (a) ge-

zeigt sind. Bei der experimentellen Realisierung mit Ca⁺-Ionen (b) ist die Parität proportional zur Phasenentwicklung des verschränkten Zustands [7].

der Wellenfunktion ist durch die Summe aller Einzelatomenergieunterschiede und damit $N\omega$ gegeben, was direkt zum gewünschten Skalierungsverhalten führt und experimentell mit Beryllium- [6] und Calcium-Ionen [7] demonstriert wurde. Dieses Schema in Atomuhren anzuwenden ist aber schwierig, da das erhöhte Signal-zu-Rausch-Verhältnis nur dann die Stabilität verbessert, wenn der Spektroskopielaser ausreichend stabil arbeitet – derzeit der limitierende Faktor.

Spannende Möglichkeiten eröffnen sich bei der Verschränkung unterschiedlicher Zustände. Eine geschickte Kombination der Zustände kann dazu führen, dass beide Teile der Wellenfunktion dieselbe lineare Zeeman-Verschiebung erfahren. Da die Phasenentwicklung zwischen den verschränkten Zuständen lediglich empfindlich auf die relative Energieverschiebung ist, hängt die Messung in erster Ordnung nicht mehr vom Magnetfeld ab (Abb. 6). Jedoch müssen weiterhin Verschiebungen durch den Zeeman-Effekt zweiter Ordnung berücksichtigt werden. Verschränkung von mehreren Atomen erlaubt also das Design von „Superatomen“ mit Eigenschaften, die das einzelne Atom nicht aufweist, wie z. B. eine Unempfindlichkeit auf Magnetfelder. Auf diese Weise ist es gelungen, das elektrische Quadrupolmoment eines Calcium-Ions mit bislang unerreichter Genauigkeit zu vermessen [8].

Präparierte Zustände und Photonen-Billard

Der in Zusammenhang mit der Aluminiumuhr beschriebene Zustandstransfer erfordert einigen experimentellen Aufwand, da es nötig ist, die Ionen in den Grundzustand zu kühlen und aufwändige Laserpulssequenzen zu implementieren. Wiederum kommt eine Entwicklung in der Quanteninformationsverarbeitung zu Hilfe: Dort eingesetzte Rechenoperationen (Gatter) basieren auf einer zustandsabhängigen Lichtkraft, die auf die Ionen wirkt. Durch die Modulation dieser Kraft bei der Frequenz einer Bewegungsmode heizt sich der

Ionenkristall zustandsabhängig auf. Dieser Effekt kann so stark werden, dass er das Fluoreszenzsignal des Logik-Ions nachweisbar moduliert, wie sich erfolgreich in einem Experiment an einem Al⁺/Mg⁺-Ionenkristall zeigte [5]. Ein zeitlich moduliertes Stehwellenfeld aus zwei gegenläufigen Laserstrahlen, deren Lichtfrequenz sich genau um die Frequenz einer Bewegungsmode unterscheidet, kann die erforderliche Lichtkraft implementieren. Die Laserstrahlen sind gegenüber einem Übergang im Atom verstimmt, um eine ausreichend große Kraft zu gewährleisten und eine Anregung des Übergangs zu vermeiden. Dadurch ist sichergestellt, dass sich der interne Zustand während der Detektion nicht ändert.

Diese Methode ist besonders gut geeignet, die Zustände von Atomen und Molekülen mit komplizierter Niveaulstruktur zu präparieren, bei denen das übliche optische Pumpen nicht anwendbar ist. Ziel ist dabei stets, die über viele Niveaus verteilte Population mittels geeigneter Kopplungen in einem einzelnen Zustand

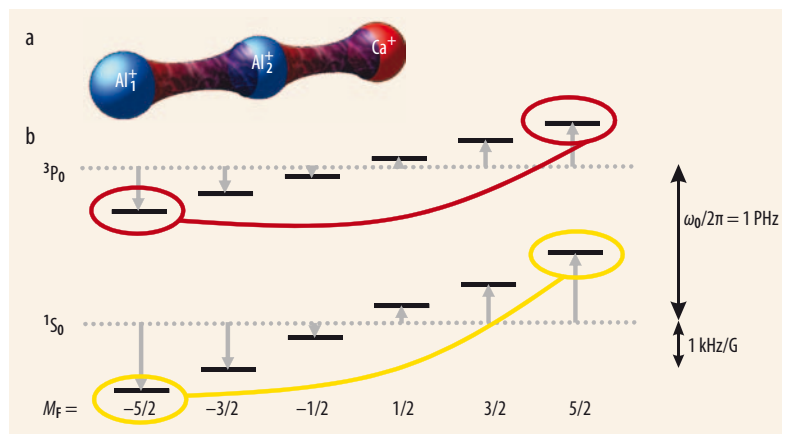


Abb. 6 Zwei Al⁺-Ionen (Index 1 und 2) sind zusammen mit einem Ca⁺-Logik-Ion in einer Paul-Falle gefangen (a). Über geeignete Laserpulse werden unterschiedliche interne Zustände der beiden Al⁺-Ionen miteinander verschränkt (b). Beide Teile der Wellenfunktion enthalten so-

wohl positiv als auch negativ verschobene Zustände. Daher hängt die Gesamtwellenfunktion nicht vom linearen Zeeman-Effekt ab. Zudem oszilliert die relative Phasenentwicklung der beiden Teilwellenfunktionen mit $2\omega_0$ und damit $\sqrt{2}$ schneller als unkorrelierte Atome.

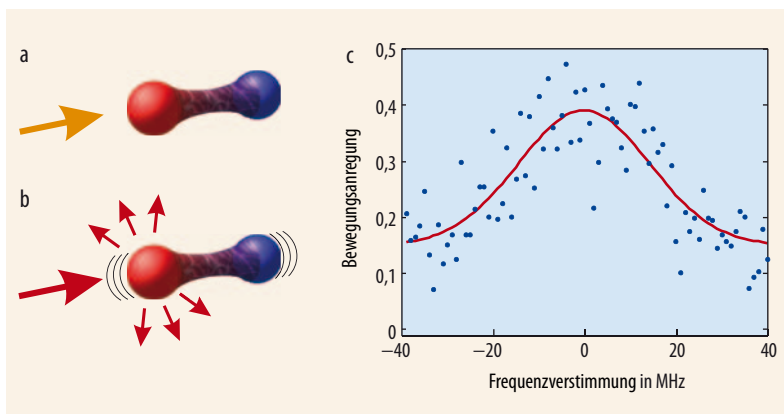


Abb. 7 Ausgangspunkt der Photonenrückstoß-Spektroskopie ist ein in den Grundzustand gekühlter 2-Ionen-Kristall bestehend aus einem Spektroskopie-Ion (rot) und einem Logik-Ion (blau, a). Von einem nicht-resonanten Spektroskopie-Laser (orange) werden keine Photonen gestreut, die Ionen verharren im Grund-

zustand. Nahe der Resonanz werden vom Spektroskopie-Ion Photonen aus dem Spektroskopie-Laser (rot) gestreut (b). Der Photonenrückstoß regt die Ionen zu gemeinsamen Schwingungen an, die sich mit hoher Effizienz nachweisen lassen. Gezeigt ist dies in (c) für ein Ca^+ -Spektroskopie- und ein Mg^+ -Logik-Ion.

zu akkumulieren. Kombiniert man nun eine schwache Kopplung zwischen den besetzten Zuständen mit der oben beschriebenen Zustandsdetektion, wird das Ion früher oder später in den Zielzustand projiziert. Eine mögliche Anwendung ist die Präparation und Spektroskopie ausgewählter Rotations-Vibrationszustände in molekularen Ionen [9]. Die Anwendungen, die sich daraus für die Präzisionsspektroskopie eröffnen, sind vielfältig und reichen von Tests der QED und genauere Bestimmung der Feinstrukturkonstanten, bis zu Messungen eines möglichen Dipolmoments des Elektrons und einer möglichen Änderung des Massenverhältnisses von Elektron zu Proton.

Die Quantenlogikspektroskopie setzt einen ausreichend langlebigen angeregten Zustand voraus, sodass kein Zerfall während der Auslesesequenz eintritt. In einer Variation dieser Methode lassen sich auch schnelle Dipol-erlaubte Übergänge streulichtfrei und mit einer gegenüber der direkten Detektion der gestreuten Photonen deutlich gesteigerten Effizienz untersuchen. Hierfür wird das Spektroskopie-Ion wiederum mithilfe eines Logik-Ions in den Bewegungsgrundzustand einer Mode in der Falle gekühlt. Wird nun der Spektroskopielaser nahe einer Resonanz im Spektroskopie-Ion entlang der Bewegungsrichtung dieser Mode eingestrahlt, streut dieses Photonen aus dem Laser. Bei jedem Absorptions-/Emissions-Zyklus erfährt das Ion einen Rückstoß entlang der Modenrichtung bei der Absorption und einen weiteren Rückstoß in Richtungen gemäß der Dipol-Abstrahlcharakteristik bei der Emission. Durch den starken Einschluss des Ions in der Falle genügt die Rückstoßenergie eines einzelnen optischen Photons nicht, um ein Phonon in der Mode anzuregen. Im Mittel sind einige zehn bis hundert Streuzyklen nötig, bis es zur Anregung der Bewegung aus dem Grundzustand kommt. Diese Bewegung lässt sich mithilfe eines Laserpulses auf dem Logik-Ion nachweisen, der den internen Zustand des Logik-Ions abhängig vom

Bewegungszustand ändert und damit das Spektroskopiesignal liefert (Abb. 7).

Da sich diese Methode nur für relativ breite Übergänge eignet, spielen Effekte wie Asymmetrien in der Linienform aufgrund der Bewegung des Ions eine untergeordnete Rolle. Auf diese Weise ist es möglich, das Signal von nur einigen zehn bis hundert gestreuten Photonen nachzuweisen. Dies ermöglicht die Spektroskopie an Systemen mit nicht vollständig zyklischen Übergängen, wie sie bei einigen Molekül-Ionen auftreten. Zudem spielt Streulicht praktisch keine Rolle, da der Nachweis der Photonen nur über ihre kinematische Wirkung auf das Ion erfolgt. Das eröffnet neue Perspektiven z. B. in der direkten Frequenzkammspektroskopie, bei der das stabilisierte Spektrum eines Frequenzkamms direkt mit den Atomen oder Molekülen wechselwirkt. Die Anregung erfolgt meist nur durch einige wenige „Zinken“ des Kammspektrums, das Licht des gesamten übrigen Kamms sorgt für aufwändig zu filterndes Streulicht. Die Photonenrückstoß-Spektroskopie könnte es daher erlauben, auch das schwache Signal eines einzelnen Ions bei der direkten Frequenzkammspektroskopie nachzuweisen.

Das junge Gebiet der Quantenlogikspektroskopie konnte bereits mit beeindruckenden Resultaten aufwarten und eine ganze Reihe von neuen Spezies der Spektroskopie zugänglich machen. Diese Aussichten versprechen eine spannende zukünftige Entwicklung des Feldes mit der Perspektive, die spektroskopische Genauigkeit weiter zu steigern, um bislang unbekannte Phänomene zu entdecken.

Literatur

- [1] T. Rosenband et al., *Science* **319**, 1808 (2008)
- [2] J. I. Cirac und P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4091 (1995)
- [3] P. O. Schmidt et al., *Science* **309**, 749 (2005)
- [4] C. W. Chou et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 070802 (2010)
- [5] D. B. Hume et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 243902 (2011)
- [6] D. Leibfried et al., *Science* **304**, 1476 (2004)
- [7] T. Monz et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 130506 (2011)
- [8] C. F. Roos et al., *Nature* **443**, 316 (2006)
- [9] I. S. Vogelius et al., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39**, S1259 (2006); J. C. J. Koelemeij et al., *Phys. Rev. A* **76**, 023413 (2007)
- [10] E. Peik, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* **203**, 18 (2010)

DER AUTOR

Piet O. Schmidt (FV Quantenoptik/Photonik) studierte Physik in Konstanz und Oregon (USA) und promovierte an der Universität Stuttgart. Als Feodor-Lynen-Fellow der Humboldt-Stiftung baute er zusammen mit Kollegen am NIST in Boulder (USA) die erste Aluminium-Quantenlogikuhr. Diese Erfahrungen konnte er an der Universität Innsbruck bei Forschungsarbeiten zur Quanteninformationsverarbeitung und Cavity-QED mit gefangenen Ionen vertiefen. Seit 2009 ist er Professor an der Leibniz Universität Hannover und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig.

