

Radius und Interferenz

Hochpräzise Spektroskopie bringt neues Licht in das Rätsel um den Protonen-Ladungsradius.

Die moderne Spektroskopie ist dank frequenz- und phasenstabilisierter Laser sowie Frequenzkämme so weit fortgeschritten, dass sich aus den gemessenen Frequenzen subtile Effekte herauslesen lassen [1]. Ein Beispiel ist der Ladungsradius des Atomkerns, der sich aus der inneren Struktur der Ladungsverteilung des Protons ergibt. Stellt man seine endliche Ausdehnung in Rechnung, ergibt sich eine kleine Korrektur zum Coulomb-Potential. Diese manifestiert sich als kleine Verschiebung der Spektrallinien („Kerngrößen-Korrektur“). Aus einer sehr genauen Messung der Übergangsfrequenz lässt sich dann auf einen Ladungsradius des Kerns schließen. Dieser Radius sollte natürlich unabhängig von der Messmethode sein, also sowohl vom untersuchten atomaren System als auch vom konkreten (Streu-)Experiment.

Neben den experimentellen Erfolgen gelang es in der Theorie, Korrekturen immer höherer Ordnung (ausgedrückt in der Sommerfeldschen Feinstrukturkon-

stanten α) in die Rechnung miteinzubeziehen. Doch trotz aller Fortschritte geriet die „Welt der Quantenelektrodynamik gebundener Zustände“ im Jahr 2010 in Verwirrung. Der bis dahin genaueste Wert für den Ladungsradius des Protons betrug rund 0,88 fm. Er stammte aus einer Regressionsrechnung, die auf den am besten vermessenen Spektrallinien des Wasserstoffs basierte (Tabelle XLV in [2]). Dem widersprachen jedoch Messungen an „exotischem“ myonischen Wasserstoff. Bei diesem ist das Elektron durch ein ebenfalls negativ geladenes Myon ersetzt. Da das Myon 200-mal schwerer als das Elektron ist, hält es sich näher am Kern auf und reagiert daher wesentlich empfindlicher auf den Ladungsradius des Protons. Die Überraschung war groß, als die Messung der „klassischen“ 2S-2P-Lamb-Verschiebung im myonischen Wasserstoff einen Wert von ungefähr 0,84 fm für den Protonen-Ladungsradius ergab [3, 4]. Seither versuchen sowohl Experimentatoren wie Theoretiker, den Widerspruch zu erklären. Eine einzige falsche Rechnung, ein einziges falsches Vorzeichen in einem Term, und alle Rätsel brechen in sich zusammen, etwa wie beim anomalen magnetischen Moment des Myons [5, 6]. Doch alle Ansätze, einen Fehler in den Rechnungen zu finden, scheiterten, sodass noch genauere Experimente gefragt waren.

Ein solches hat nun die Gruppe um Theodor Hänsch und Thomas Udem vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching durchgeführt [7]. Dabei lag die Betonung auf der Analyse der Linienform beim kürzlich vermessenen 2S-4P-Übergang in Wasserstoff. Die natürliche Linienbreite liegt bereits bei $2\pi \times 12,9$ MHz. Das „Protonen-Ladungsradius-Rätsel“ entspricht, in Frequenz-Einheiten ausgedrückt, einer Verschiebung dieser Spektrallinie um 8,9 kHz. Die experimentell beobachtete Linienbreite ist mit etwa 20 MHz höher als die natürliche Linienbreite

[7]. Das liegt unter anderem an der Doppler-Verbreiterung durch die Geschwindigkeitsverteilung der untersuchten Wasserstoffatome. Um das Rätsel zu lösen, galt es, die Linie auf etwa ein Zehntausendstel aufzulösen. Diese fast unlösbare Aufgabe ist nur dann zu bewältigen, wenn man die Linienform genau versteht, denn die „Linienmitte“ lässt sich nicht einfach mit der interessierenden Übergangsfrequenz gleichsetzen! Hier kommen prozessabhängige, dynamische Korrekturen ins Spiel, nicht zuletzt ein so genannter Quanten-Interferenzterm [8]. Dieser beschreibt die kohärente Überlagerung zweier Quantenpfade ($2S \rightarrow 4P_{1/2}^{F=1} \rightarrow 1S$ und $2S \rightarrow 4P_{3/2}^{F=1} \rightarrow 1S$), die sich lediglich um ein 4P-Feinstrukturintervall unterscheiden, aber gleiche totale Drehimpulsquantenzahl $F=1$ im Zwischenzustand aufweisen.

Die Wirkung des Quanteninterferenzterms lässt sich an zwei Kugeln („Murmeln“) in einem Doppelmuldenpotential veranschaulichen, die mit einer fast unsichtbaren, dünnen Feder verbunden sind. Der Abstand der zwei Minima (Mulden) entspricht der Energiedifferenz des Anfangs- und Endzustands (2S-4P-Übergang im Wasserstoff). Eine minimale Verschiebung der Kugeln aus den Potential-Minima aufgrund der Feder führt dazu, dass der gemessene Abstand der Kugeln nicht mehr gleich dem Abstand der Potential-Minima ist. Der Quanteninterferenzterm ergibt sich, weil quantenmechanisch die Amplituden für beide Pfade zu addieren sind, bevor man durch Bildung des Absolutbetrags den Wechselwirkungsquerschnitt berechnet, der im Experiment winkelaufgelöst gemessen wird. Um die Linienform so genau zu verstehen, muss der Interferenzterm also miteinbezogen werden, selbst wenn sich die beiden Übergänge durch eine Frequenz unterscheiden, die mehr als dem Hundertfachen der natürlichen Linienbreite jedes einzelnen Übergangs entspricht.

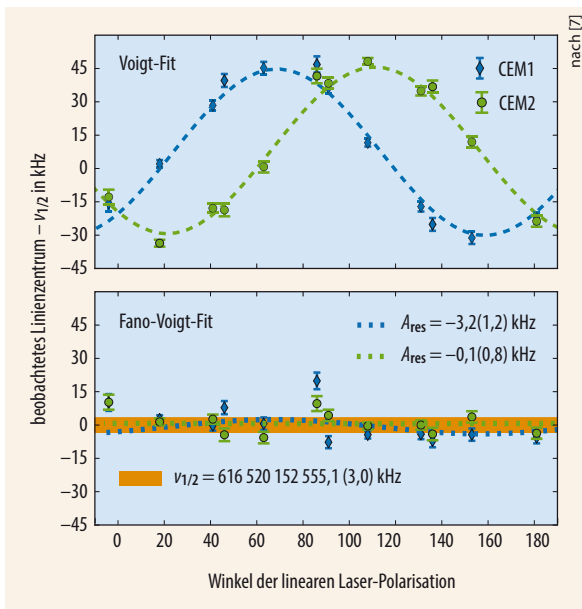


Abb. 1 Wenn man den richtungsabhängigen Quanteninterferenzterm aus der beobachteten Linie zum 2S-4P-Übergang herausrechnet, zeigt sich deutlich eine sinusoidale Abhängigkeit der beobachteten Fluoreszenzsignale von der Ausrichtung der Detektoren (oben). Konsistente Ergebnisse ergeben sich durch weitere prozess- und richtungsabhängige Quanteninterferenzterme (unten).

Prof. Dr. Ulrich D. Jentschura, Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, USA

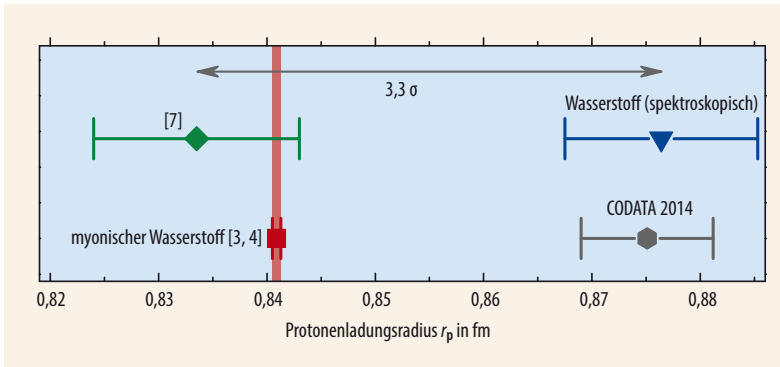


Abb. 2 Übersicht über die bislang gemessenen Werte für den Ladungsradius des Protons. Die CODATA 2014-Werte be-

rücksichtigen neben spektroskopischen Messungen an Wasserstoff auch Daten von elastischer Elektronenstreuung.

Wenn man beim modifizierten Lorentz-Profil¹⁾ die Geschwindigkeitsverteilung der Atome im Experiment berücksichtigt, lassen sich die beobachteten Linienformen sehr gut verstehen (Abb. 1). Die Amplitude der winkelaufgelösten Verschiebung durch den Interferenzterm liegt dabei im Bereich von bis zu 40 kHz. Ihre Elimination ist der Schlüssel zur Bestimmung der genannten beiden Übergangsfrequenzen mit einer Genauigkeit von etwa 3 kHz. Das entspricht einer Bestimmung des Zentroids des 2S-4P-Intervalls mit einer Genauigkeit von etwa 2 kHz. Diese Auflösung entspricht etwa einem Zehntausendstel der beobachteten Linienbreite und bezieht sich – genauer gesagt – auf den Feinstruktur-Zentroid der Hyperfeinstruktur-Zentroide.

Durch diesen experimentellen Erfolg wurde es möglich, allein auf der Grundlage der neuen 2S-4P-Messung unter Zuhilfenahme der bereits verfügbaren 1S-2S-Daten die Rydberg-Konstante R_∞ sowie

den Protonen-Ladungsradius aus einer Wasserstoff-Messung neu zu bestimmen [7]. In der Tat ergibt sich ein Wert, der mit dem Ladungsradius übereinstimmt, welcher im myonischen Wasserstoff bestimmt wurde, nämlich $r_p = 0,8335(95)$ fm (Abb. 2).²⁾

Ist damit das Rätsel des Protonen-Ladungsradius gelöst? Die Antwort ist „Jein“, wie die Gruppe um Theodor Hänsch und Thomas Udem bemerkt. Einerseits bestätigt die neue Messung die Werte für myonischen Wasserstoff. Andererseits ergeben sich neue Fragen. Die Messungen geben einen klaren Hinweis darauf, dass die experimentellen Linienformen einer weiteren Überprüfung bedürfen, insbesondere für die Übergänge 2S-8D sowie 2S-12D, die von der Gruppe am Laboratoire Kastler-Brossel bestimmt wurden [9, 10]. Zwar sollten dort die Interferenzterme keine große Rolle spielen, sodass es mysteriös bleibt, warum alle bisher verfügbaren Messungen von Wasserstoff-Frequenzen mit

dem größeren Protonen-Ladungsradius vereinbar sind, die neue Messung jedoch nicht [7]. Weitere Experimente sind daher notwendig. Dabei bleibt abzuwarten, ob vielleicht die Pariser Messungen durch einen nicht vollkommen verstandenen systematischen Effekt im Experiment, etwa aufgrund einer mutmaßlich nicht vollkommen verstandenen Geschwindigkeitsverteilung der Atome, korrigiert werden müssen.³⁾ Derzeit arbeiten mehrere Gruppen an einer genauen Analyse der Problematik und verbesserten hochgenauen Messungen, so eine Gruppe um Eric Hessels an der York University in Toronto (Kanada). Falls sich dabei der Garchinger Wert des Protonen-Ladungsradius bestätigt, wäre damit nicht nur das „Protonen-Ladungsradius-Rätsel“ gelöst, sondern auch ein weiterer Meilenstein im Verständnis des Niedrigenergie-Sektors des Standardmodells erreicht.

Ulrich D. Jentschura

- [1] T. W. Hänsch, Rev. Mod. Phys. **78**, 1297 (2006)
- [2] P. J. Mohr et al., Rev. Mod. Phys. **80**, 633 (2008)
- [3] R. Pohl et al., Nature **466**, 213 (2010)
- [4] A. Antognini et al., Science **339**, 417 (2013)
- [5] M. Hayakawa und T. Kinoshita, Phys. Rev. D **57**, 465 (1998)
- [6] M. Knecht und A. Nyffeler, Phys. Rev. D **65**, 073034 (2002)
- [7] A. Beyer et al., Science **358**, 79 (2017)
- [8] U. D. Jentschura und P. J. Mohr, Can. J. Phys. **80**, 633 (2002)
- [9] B. de Beauvoir et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 440 (1997)
- [10] C. Schwob et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 4960 (1999); Erratum: Phys. Rev. Lett. **86**, 4193 (2001)

1) Siehe explizit Gl. 10 in [8] sowie Gl. 3 in [7].

2) Der neue Wert für die Rydberg-Konstante bestätigt ebenfalls denjenigen Wert, der sich für myonischen Wasserstoff ergibt.

3) Eine jüngst abgeschlossene Doktorarbeit aus der Pariser Gruppe zum 1S-3S-Übergang in Wasserstoff kommt zu dem Schluss, dass auch in einer Re-Analyse der Geschwindigkeitsverteilung bestenfalls ein Teil der Lösung des Rätsels zu finden ist, vgl. bit.ly/2zK1fNS

KURZGEFASST

■ CPT-Invarianz hochpräzise bestätigt

Der BASE-Kollaboration ist es am CERN kürzlich gelungen, das magnetische Moment des Antiprotons hochpräzise zu bestimmen. Der Wert von 2,7928473441(42) ist 350-mal genauer als bisher. Dazu analysierten japanische und deutsche Physiker erstmals zwei Antiprotonen in einem System aus zwei Penning-Fallen, um das magnetische Moment zu bestimmen.^{+) Das Ergebnis bestätigt die CPT-Invarianz, nach der sich Materie und Antimaterie exakt symmetrisch verhalten sollten. C. Smorra et al., Nature **550**, 371 (2017)}

■ Kognitive Elektronik entwickeln

Forscher der Uni Kiel haben einen elektronischen Schaltkreis aus Oszillatoren und Memristoren aufgebaut, der lernt, optische Täuschungen zu enttarnen. Er arbeitet ähnlich wie Neuronen im Gehirn, sobald mehrere optische Informationen unterschiedliche Ergebnisse suggerieren. Als Beispiel diente ein Nilpferd mit scheinbar mehr als vier Beinen. Der Schaltkreis ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu kognitiver Elektronik und selbstlernenden Systemen. M. Ignatov et al., Sci. Adv. **3**, e1700849 (2017)

■ Umdenken bei Dunkler Materie

Neueste Ergebnisse des weltweit größten Detektors für die Suche nach Dunkler Materie, XENONIT, und des chinesischen Experiments PandaX-II, fordern ein Umdenken bei der Beschreibung der mysteriösen Teilchen. Da trotz der enormen Sensitivität der Detektoren noch kein Nachweis der Teilchen möglich war, rücken alternative Modelle wieder in den Fokus der Theoretiker. E. Aprile et al. (XENON Coll.), Phys. Rev. Lett. **119**, 181301 (2017) und X. Cui et al. (PandaX-II Coll.), Phys. Rev. Lett. **119**, 181302 (2017)

+) K. Blaum, S. Sturm und S. Ulmer, In die Falle gegangen, Physik Journal, Januar 2017, S. 31