

■ Wie groß ist das Proton?

Die erstmals gemessene Lamb-Verschiebung am myonischen Wasserstoff ergibt einen Protonradius, der deutlich kleiner ausfällt als in bisherigen Messungen.

1) Das entspricht in diesem Fall fast fünf Standardabweichungen.

Das immer präziser vermessene Spektrum des Wasserstoffatoms hat sich in der Vergangenheit als treibende Kraft erwiesen, um neue Vorstellungen zur elektromagnetischen Wechselwirkung zu entwickeln: angefangen bei der Grundstruktur des Anregungsspektrums, das zum Bohrschen Atommodell und zur Quantenmechanik führte, über die Feinstruktur, welche aus der Dirac-Gleichung folgt, bis zur Lamb-Verschiebung, welche schließlich die Quantenelektrodynamik (QED) erforderte. Inzwischen sind die Messungen so genau, dass sie auf die Ladungsverteilung des Protons im Zentrum des Wasserstoffatoms empfindlich sind.

Das Proton selbst ist natürlich ein diffuses Objekt ohne scharfen Rand. Seine Ladungsverteilung lässt sich in erster Näherung dadurch beschreiben, dass die Ladung radial exponentiell abfällt. Daher definiert man als Radius des Protons das quadratische Mittel seiner Ladungsverteilung $r_p = \langle r^2 \rangle^{1/2}$ (Root-Mean-Square, RMS). Die Größe dieses RMS-Radius beeinflusst auch die Lamb-Verschiebung, also die Energieaufspaltung zwischen $2s_{1/2}$ - und $2p_{1/2}$ -Niveau des Wasserstoffs. Diese lässt sich erst durch virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare im Rahmen der QED erklären, da die Wellenfunktion des $2s_{1/2}$ -Zustands im Gegensatz zur Wellenfunktion des $2p_{1/2}$ -Zustands am Kernort nicht verschwindet.

Bei einem neuen Experiment an der Beschleunigeranlage des

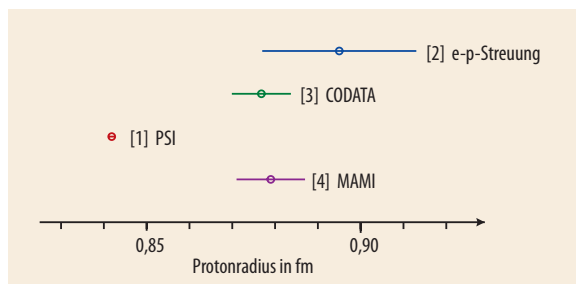
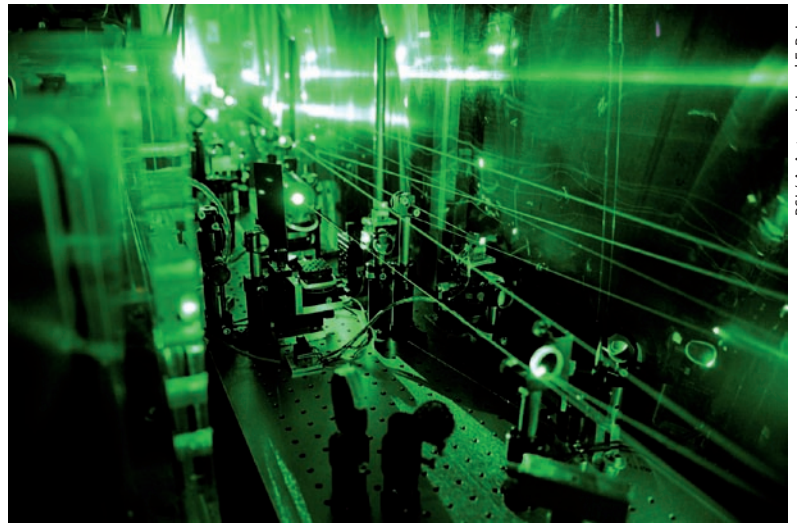


Abb. 1 Der anhand von Messungen am myonischen Wasserstoff ermittelte Protonradius weicht deutlich von den Werten beim normalen Wasserstoff ab. Der CODATA-Wert wird dominiert durch die Messung des Wasserstoff-Spektrums.



PSI / A. Antognini und F. Reiser

Am schweizer Paul-Scherrer-Institut gelang es, die Lamb-Verschiebung bei Wasserstoffatomen zu messen, in denen

ein Myon das Elektron ersetzt. Hier ist die im Experiment verwendete Laseranlage zu sehen.

Paul-Scherrer-Instituts (PSI) im schweizerischen Villigen gelang es nun zum ersten Mal, die Lamb-Verschiebung am myonischen Wasserstoff zu messen [1]. Dabei ersetzt ein Myon das Hüllenelektron des Wasserstoffs. Hierfür genügt es, dem Atom ein genügend langsames Myon zur Verfügung zu stellen, da durch die höhere Bindungsenergie des Myons bei der Verdrängung des Elektrons Energie frei wird. Durch die rund 200-fache Masse des Myons ist dessen Bohrscher Radius ebenfalls um den Faktor 200 kleiner. Das Myon hält sich entsprechend häufiger in Kernnähe auf und spürt somit mehr von der Ladungsverteilung des Protons.

Für das Experiment leiteten die Forscher einen niederenergetischen Myonenstrahl in eine Wasserstoffgaszelle, wodurch myonischer Wasserstoff in einem hochangeregten Zustand entsteht. Dieser zerfällt überwiegend prompt in den $1s$ -Zustand. Ein geringer Teil des myonischen Wasserstoffs verharrt jedoch im langlebigen $2s$ -Zustand und lässt sich in den $2p$ -Zustand anregen, und zwar durch einen Infrarot-Laserpuls, der mit dem Eintritt des Myons ausgelöst und über eine Spiegelkavität eingekoppelt wird. Der $2p$ -Zustand

zerfällt wiederum unter Aussenden eines K_α -Photons mit 2 keV Energie, welches mit dem Laserpuls zeitlich korreliert auftritt und sich als Signatur des Übergangs eignet. Die Messung mehrerer bekannter Absorptionslinien in einer parallel betriebenen Wasserdampfzelle dient dazu, die Frequenz des Laserpulses sehr genau zu kalibrieren. Der systematische Fehler fällt daher gering aus, und es ergibt sich eine Lamb-Verschiebung im myonischen Wasserstoff von 49 881,88(76) GHz.

Rechnungen zur Lamb-Verschiebung ergeben nun, dass die Ladungsverteilung des Protons mit rund zwei Prozent zur Energiedifferenz beiträgt, sodass sich umgekehrt durch die hohe absolute Genauigkeit der Protonradius zu $r_p = 0,84184(67)$ fm bestimmen lässt. Der Wert ist eine Überraschung, denn er ist um fast sechs Prozent kleiner als in bisherigen Messungen.¹⁾ Seine Genauigkeit ist hierbei um eine Größenordnung höher.

Zuerst gelang es, den Protonradius mithilfe der elastischen Streuung von Elektronen am Proton zu bestimmen. Hierbei parametrisieren Formfaktoren, die vom auf das Proton übertragenen

Impuls abhängen, die Abweichung vom Fall der Streuung an einem punktförmigen Objekt. Aus den Formfaktoren lässt sich auf die Ladungs- und Magnetisierungsverteilung des Protons schließen. Der RMS-Radius ergibt sich nun modellunabhängig aus der Steigung des elektrischen Formfaktors bei verschwindendem Impulsübertrag. Aber nicht nur der RMS-Radius, auch die höheren Momente der Ladungsverteilung sowie die Polarisierbarkeiten, die nötig sind, um die Lamb-Verschiebung zu berechnen, müssen aus der Elektronenstreuung extrahiert werden.

Die weltweiten Messungen mithilfe der Elektronenstreuung [2] ergaben bisher einen Radius von $r_p = 0,895(18)$ fm. Diese Zahl berücksichtigt die CODATA-Gruppe ebenfalls in der Zusammenstellung der Naturkonstanten von 2006 [3], allerdings ist deren Wert für den Protonradius $r_p = 0,8768(69)$ fm durch die Messungen des Spektrums des elektronischen Wasserstoffatoms dominiert. Hierbei wurde der Protonradius simultan mit anderen Naturkonstanten an die Lamb-Verschiebung sowie mehrere andere am Wasserstoff sehr präzise vermessene Übergänge, insbesondere zur Feinstruktur und Hyperfeinstruktur, angepasst.

Ebenfalls ist inzwischen eine neue Messung am Mainzer Mikroskop (MAMI) erschienen, die mit einem Wert von $r_p = 0,879(8)$ fm erneut mit den alten Messungen zur Elektronenstreuung übereinstimmt [4]. Die genannten drei Werte weichen deutlich von dem des myonischen Wasserstoffs ab (Abb. 1).

Liegt die Diskrepanz an den Messungen oder an ihrer Interpretation? Insbesondere der Widerspruch zwischen den Werten am myonischen und am normalen Wasserstoffatom, bei ähnlichen Methoden und Auswertungen, legt nahe, dass der Grund in der Theorie liegt.

Auch wenn die elektromagnetische Wechselwirkung die mit Abstand am besten verstandene Wechselwirkung ist, muss man sich im Klaren sein, dass auf dem erforderlichen Genauigkeitsniveau noch

immer keine in sich geschlossene Theorie existiert. Die QED ist als Störungsrechnung prinzipiell nicht in der Lage, gebundene Zustände, hier also die Wellenfunktionen der Eigenzustände im Wasserstoffatom, zu berechnen. Alle Rechnungen müssen daher zuerst den gebundenen Zustand modellieren, etwa durch numerisches Lösen der Dirac-Gleichung, und anschließend unter anderem die virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paare der QED durch störungstheoretische Rechnung in Form von einzelnen Korrekturen einbringen. Diese Rechnungen erweisen sich als sehr aufwändig. Zur Berechnung der Lamb-Verschiebung im myonischen Wasserstoff gilt es, allein 27 vom Protonradius unabhängige Korrekturterme zu betrachten. Die zugrundeliegenden Annahmen, wie zum Beispiel die störungstheoretische Behandlung von stark gebundenen Zuständen, müssen nun zurück auf den Prüfstand.

Die Unsicherheit im Protonradius beschränkt mittlerweile die Genauigkeit, mit der sich Tests der QED durchführen sowie fundamentale Naturkonstanten bestimmen lassen. Hier ein konsistentes Bild zu erhalten, ist also unverzichtbar. Neben den theoretischen Bemühungen sind weitere Experimente am PSI, unter anderem am myonischen Deuteron und Helium geplant, aber auch in der Elektronenstreuung sind an MAMI weitere Experimente zur genaueren Bestimmung des Radius sowie der höheren Momente der Ladungsverteilung und der Polarisierbarkeiten vorgesehen.

Harald Merkel

- [1] R. Pohl et al., *Nature* **466**, 213 (2010)
- [2] I. Sick, *Phys. Lett. B* **576**, 62 (2003)
- [3] P. J. Mohr et al. (CODATA), *Rev. Mod. Phys.* **80**, 633 (2008)
- [4] J. C. Bernauer et al., arXiv:1007.5076.

Dr. Harald Merkel, Institut für Kernphysik,
Johannes Gutenberg-Universität Mainz,
Johann-Joachim-Becher-Weg 45, 55099 Mainz