

Quantenelektrodynamik auf dem Prüfstand

Die Hyperfeinaufspaltung in wasserstoff- und lithiümähnlichen Bismut-Ionen weicht deutlich von der theoretischen Vorhersage ab.

Im heutigen Standardmodell der Physik beschreibt die Quantenelektrodynamik (QED) die elektromagnetische Wechselwirkung. Diese Theorie erklärt die Kräfte zwischen geladenen Teilchen durch den Austausch virtueller Photonen. Deren Eigenschaften beeinflussen die Struktur der QED: Insbesondere das Fehlen einer direkten Wechselwirkung unter den Photonen ermöglicht es, physikalische Observablen mit außerordentlich hoher Genauigkeit vorherzusagen und zu berechnen. Historisch betrachtet ließ sich dadurch die QED vielfach bestätigen: Zahlreiche faszinierende Experimente mit ständig wachsender Präzision prüfen die Vorhersagen [1]. Meist finden diese Tests bei sehr schwachen Feldstärken statt – für sehr starke Felder, also bei einer hohen Dichte virtueller Photonen, mangelt es an vergleichbarer Empfindlichkeit. Kürzlich hat die LiBELLE-Kollaboration die Hyperfeinstruktur in hochgeladenem Bismut untersucht und eine deutliche Abweichung zur Vorhersage gefunden [2]. Damit steht die Gültigkeit der QED im Grenzbereich infrage.

Extrem starke Felder sind in hochgeladenen Ionen möglich, wenn man einem schweren Atom fast alle Elektronen entzieht. Verbleibende Elektronen sind sehr eng an den Kern gebunden und spüren dort die höchsten im Labor erreichbaren Feldstärken: elektrische Felder bis zu 10^{16} V/cm und magnetische Felder bis zu 20 000 T. Stärkere makroskopische Felder

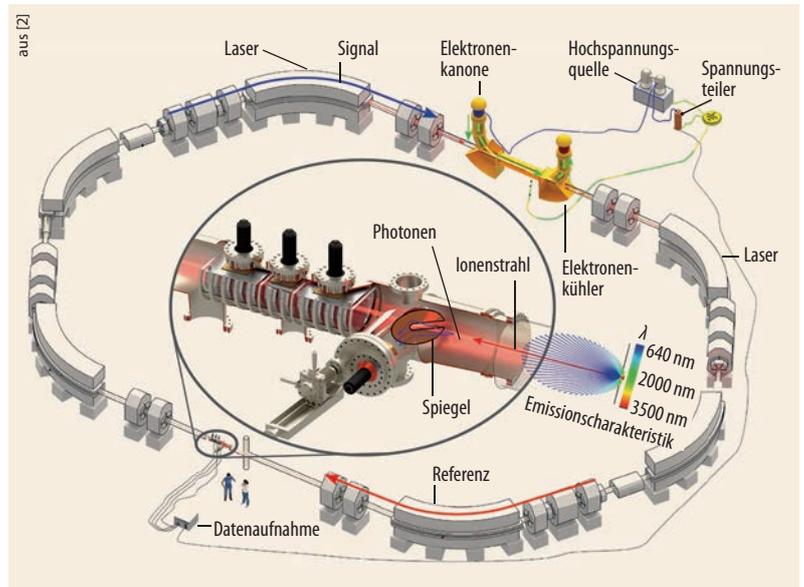


Abb. 1 Der Elektronenkühler des experimentellen Speicherringes ESR am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung legt die Geschwindigkeit der Bismut-Ionen fest. Nach der Anregung

durch ein Lasersystem sammeln besondere Spiegel (Inset) die wenigen emittierten Fluoreszenzphotonen, um die Übergänge in wasserstoff- und lithiümartigem Bismut nachzuweisen.

zerfallen, weil sie spontan Teilchen-Antiteilchenpaare bilden. Im Rahmen der QED ist das System aus schwerem Kern und einem oder wenigen Elektronen sehr genau berechenbar [3, 4]. Allerdings lassen sich hochgeladene Ionen im Labor nur mit großem Aufwand erzeugen. Um fast alle Elektronen zu entfernen, sind für die schwersten Ionen über 100 keV nötig. Das erlauben weltweit nur wenige Anlagen – darunter der experimentelle Speicherring ESR am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt (Abb. 1).

Das magnetische Moment des gebundenen Elektrons [5] oder

Anregungsenergien in höhere elektronische Zustände bieten die Möglichkeit, die QED hochpräzise zu testen. Weil die Anregungsenergien für schwere Kerne im Gammastrahlungsbereich liegen, ist der Beitrag der QED – ein Teil des Lamb-Shifts – klein. In Experimenten am ESR mit wasserstoffartigem Uran gelang es bereits, den Lamb-Shift mit einer Genauigkeit von etwa einem Prozent zu messen [6]. Hier setzt das Experiment der LiBELLE-Kollaboration an. In Systemen mit einem nichtverschwindenden Kernspin tritt analog zum Wasserstoffatom eine Hyperfeinstruktur in den Anregungsenergien auf. Für schwere Kerne liegt diese Aufspaltung aufgrund der engen Bindung des Elektrons an den Kern im optischen Bereich und lässt sich durch präzise Laserspektroskopie beobachten. Beim Berechnen der Hyperfeinstruktur geht allerdings auch die Struktur des Kerns ein, insbesondere die Verteilung der magnetischen Momente. Dieser Bohr-Weisskopf-Effekt begrenzt die Genauigkeit der Vorhersage, sodass es nötig ist, ihn im Rahmen

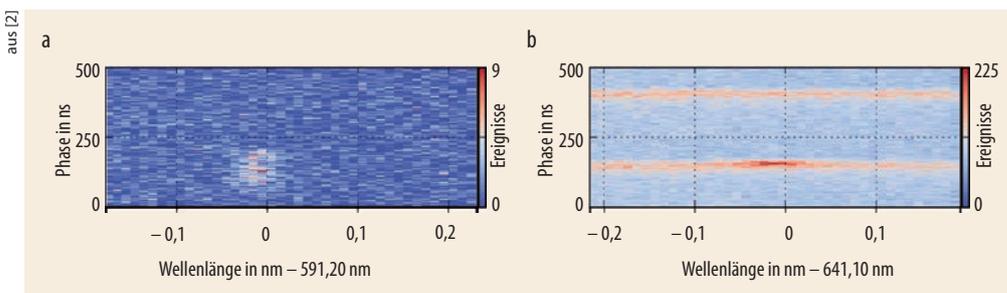


Abb. 2 In wasserstoffähnlichem Bismut lässt sich der Übergang zwischen den Hyperfeinniveaus durch wenige Ereignisse nachweisen (a). Bei

lithiümähnlichem Bismut gelingt dies nur, wenn die Fluoreszenzphotonen mit Spiegeln gesammelt werden, die sich direkt im Strahlengang befinden (b).

des Experiments zu eliminieren. Dazu misst man die Hyperfeinaufspaltung in wasserstoffartigen und lithiumartigen Ionen [4]. Da der Bohr-Weisskopf-Effekt beide Systeme unterschiedlich beeinflusst, ergibt sich aus einer geschickten Kombination der Messwerte ein Ergebnis, das von ihm unabhängig sein sollte.

Auf der Jagd nach Photonen

Im Experiment der LiBELLE-Kollaboration treibt ein Laser den Übergang zwischen den Hyperfeinniveaus des Grundzustands hochgeladener Bismut-Ionen an. Bei passender Laserfrequenz tritt Fluoreszenz auf. Allerdings ist die Zahl der Fluoreszenzphotonen sehr gering, weil der Übergang zwischen den Hyperfeinniveaus „verboten“ ist. Die Lebensdauern der angeregten Zustände sind trotz der Übergangsfrequenz im optischen Bereich mit $556 \mu\text{s}$ für $^{209}\text{Bi}^{82+}$ und 107ms für $^{209}\text{Bi}^{80+}$ recht lang: Die wenigen emittierten Photonen verteilen sich auf der kompletten Flugstrecke durch den ESR. Insbesondere im lithiumähnlichen Bismut war der Übergang nicht zu beobachten. Erst durch das Implementieren eines hocheffizienten, parabolischen Spiegels im ESR gelang der Nachweis (Abb. 2).

Die hochgeladenen Ionen sind im ESR bei relativistischen Energien gespeichert, sodass sich die Übergangsfrequenz im Laborsystem relativistisch verschiebt: In Flugrichtung wird der Übergang bei höheren Frequenzen nachgewiesen und umgekehrt entgegen der Flugrichtung. Bewegen sich die Bismut-Ionen mit etwa 71 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, liegen die Frequenzen nicht im tiefen Ultraviolett bzw. Infrarot, sondern im optischen Bereich bei etwa 600nm . Das ist von Vorteil, um den anregenden Laser einzustellen und die emittierten Photonen nachzuweisen. Allerdings muss die Geschwindigkeit der Ionen genau bekannt sein, damit man aus der eingestrahelten Laserfrequenz die eigentlich gesuchte Übergangsfrequenz im Ruhesystem des Ions ableiten kann. Um die Beschleunigungsspannung des Elektronenkühlers von über 200kV mit der nötigen Präzision zu messen, wurde ein spezieller Spannungsteiler der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt installiert, der die Spannungsquellen exakt kalibriert.

Mit der präzise gemessenen Hyperfeinaufspaltung in beiden Ionen gelang der Vergleich mit der Theorie. Dabei zeigte sich überraschenderweise eine deutliche Abweichung von $0,3 \text{meV}$, was acht Standardabweichungen entspricht. Dieser Wert könnte auf ein Problem der QED in starken Feldern hinweisen, z. B. auf eine veränderte elektromagnetische Wechselwirkung. Dieser Effekt muss so gering sein, dass er bei „normalen“ Feldstärken nicht sichtbar ist. Daher legt die Höhe der Abweichung andere Ursachen nahe. Um die Hyperfeinaufspaltung exakt zu berechnen, braucht es genauere Werte des magnetischen Moments des Kerns. Bisher gestaltet es sich schwierig, diese aus Magnetresonanzexperimenten in makroskopischen Proben zu erhalten. Beispielsweise hängen die gemessenen Werte davon ab, wie die komplexe Elektronenwolke des neutralen Bismut-Atoms das angelegte Magnetfeld abschirmt und wie sich die Konzentration des Bismuts in der gemessenen Probe verteilt. Um die Abweichung im Experiment der LiBELLE-Kollaboration eindeutig zu interpretieren,

ist eine von solchen Effekten unabhängige Messung des magnetischen Moments des Kerns nötig. Am GSI Helmholtzzentrum ist dies mit dem Penning-Fallenexperiment ARTEMIS geplant [7]. Unabhängig davon wird das ALPHATRAP-Experiment des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg einen exakten Blick auf die QED in starken Feldern ermöglichen [8]. Observable ist dabei der g -Faktor eines gebundenen Elektrons in schweren Systemen. Es bleibt also abzuwarten, ob die Messung der LiBELLE-Kollaboration tatsächlich ein fundamentales Problem mit der vielleicht am besten verstandenen Theorie im Standardmodell aufgedeckt hat.

Sven Sturm

- [1] D. Hanneke et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 120801 (2008)
- [2] J. Ullmann et al., Nat. Commun. **8**, 15484 (2017)
- [3] V. M. Shabaev, Phys. Rep. **356**, 119 (2002); V. A. Yerokhin und V. M. Shabaev, J. Phys. Chem. Ref. Data **44**, 033103 (2015)
- [4] V. M. Shabaev et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 3959 (2001)
- [5] S. Sturm et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 023002 (2011)
- [6] A. Gumberidze et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 223001 (2005)
- [7] D. von Lindenfels et al., Phys. Rev. A **87**, 023412 (2013)
- [8] K. Blaum, S. Sturm und S. Ulmer, Physik Journal, Januar 2017, S. 31

SIMULIERTE GALAXIEN-GESCHICHTE

Im Auriga-Projekt entstand die größte und höchstauflösende Simulation zur Geburt und Entwicklung von Galaxien wie unserer Milchstraße. Das Team um Robert Grand vom HITS benutzte die Supercomputer Hornet und SuperMUC, um in mehreren Monaten u. a.

die Dichteverteilung der Dunklen Materie 500 Mio. Jahre nach dem Urknall zu bestimmen (Abb.). Die Ergebnisse dienen dem Vergleich mit Beobachtungsdaten, z. B. von der Gaia-Mission. R. J. J. Grand et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **467**, 179 (2017)

