

von $\varepsilon = -0,7$ bei der Wellenlänge von 550 nm im grünen Spektralbereich. Da jedoch auch die Imaginärteile in die Berechnung von n mit eingehen und diese aufgrund von hohen Verlusten sehr groß waren, gelang es in dieser Konfiguration nicht, einen negativen Brechungsindex im Sichtbaren nachzuweisen.

Weitere Alternativstrukturen hat die Gruppe von Stephen Brueck aus Albuquerque vorgeschlagen: zum einen benutzte er einen Mäander vor einem Spiegel, der mit seinem eigenen Spiegelbild eine Stromschleife bildet und zu einem negativen μ bei 60 THz führt [10]. Zum anderen demonstrierte seine Gruppe eine Struktur aus zwei gegenüberliegenden Metallfolien mit einem regelmäßigen Schachbrettmuster aus Nanolöchern. Die beiden Folien verhalten sich analog zu den gegenüberliegenden Drähten und führen den Kreisstrom, während die Löcher als Kondensatoren dienen. Diese Struktur weist einen negativen Brechungsindex von $n = -2$ bei einer Wellenlänge von $2 \mu\text{m}$ auf. Allerdings ist auch hier der Imaginärteil von n sehr groß, sodass diese Struktur hohe Verluste aufweist [11].

Die große Hoffnung ist, dass bald ein negativer Brechungsindex im Bereich der sichtbaren Wellenlängen bei gleichzeitig niedrigen Verlusten erreicht wird. Vielleicht geschieht dies mit Unterstützung aus der Hochfrequenz-Elektrotechnik, wo im Rahmen der „Transmission Line Theory“ solche linkshändigen Materialien schon länger untersucht werden.^{#)}

HARALD GIESSEN

[1] J. B. Pendry et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 3966 (2000)
 [2] R. A. Shelby et al., Science **292**, 77 (2001)
 [3] S. Linden et al., Science **303**, 1494 (2004)
 [4] C. Enkrich et al., Adv. Mat. **17**, 2547 (2005)
 [5] A. Ishikawa et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 237401 (2005)
 [6] J. Zhou et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 223902 (2005)
 [7] V. Shalaev et al., Opt. Lett. **30**, 3356 (2005)
 [8] G. Dolling et al., Opt. Lett. **30**, 3198 (2005)
 [9] A. N. Grigorenko et al., Nature **438**, 335 (2005)
 [10] S. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 37402 (2005)
 [11] S. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 137404 (2005)

Quantenelektrodynamik im Test

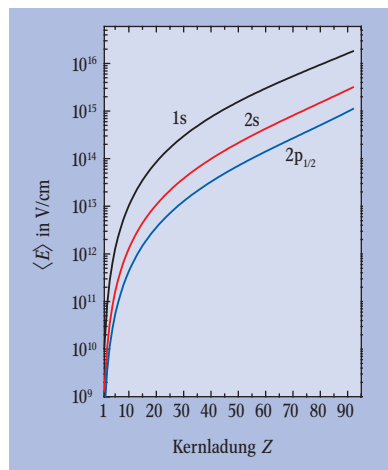
Ein Experiment mit lithium-ähnlichem Uran ist ein neuer Meilenstein beim Test der Quantenelektrodynamik in starken Feldern.

Die Quantenelektrodynamik (QED), welche die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen beschreibt, ist eine der am besten überprüften und erfolgreichsten Theorien der Physik. Mittlerweile ist es gelungen, die Vorhersagen der QED für leichte Atome wie Wasserstoff mit einer extrem hohen Genauigkeit zu überprüfen. In den extrem starken elektrischen Feldern, die in den schwersten Atomen vorliegen, treten allerdings QED-Effekte höherer Ordnung auf, deren experimentelle Überprüfung noch aussteht. Daher ist seit vielen Jahren ein möglichst genauer Test der QED in starken elektrischen Feldern Gegenstand eines stetigen Wechselspiels zwischen Experiment und Theorie. Starke Felder mit Feldstärken größer als 10^{16} V/cm finden sich in der Nähe von Kernen mit Kernladungszahlen $Z > 80$ (Abb.). Sie übertreffen selbst die Felder, die sich mit den derzeit stärksten Lasern erzeugen lassen, um mehr als drei Größenordnungen. Unter diesen Umständen ist die elektromagnetische Kopplungskonstante αZ mit der Feinstrukturkonstante $\alpha \approx 1/137$ nicht mehr klein gegen 1. Damit lässt sich eine störungstheoretische Berechnung der quantenelektrodynamischen Effekte, die traditionell in einer Entwicklung nach dem Störparameter αZ durchgeführt wird, nicht mehr durchführen. Vielmehr müssen Beiträge höherer Ordnung mittels geeigneter analytischer oder numerischer Verfahren berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen erstrecken sich über einen weiten Bereich, der von der Bestimmung der Bindungsenergien in hochgeladenen, schweren Ionen oder der Hyperfeinaufspaltung bei Kernen mit nichtverschwindendem Spin bis hin zur Messung von g-Faktoren von gebundenen Elektronen in wasserstoffähnlichen^{*)} Ionen reicht [1]. Dabei behandeln die verschiedenen Ansätze unterschiedliche Aspekte der QED, und letztendlich wird erst die Gesamtheit der Daten den gewünschten QED-Test bedeuten.

Wasserstoff-, helium- oder lithium-ähnliche schwere Ionen sind von besonderem Interesse, da große theoretische Fortschritte in den letzten Jahren heute eine zuverlässige Berechnung dieser Mehrelektronensysteme ermöglichen.

Im Experiment hat man dabei mit einem nicht zu unterschätzenden Problem zu kämpfen, nämlich dem der Herstellung dieser Ionen. Schwere wasserstoffähnliche



Der Mittelwert der elektrischen Feldstärke erreicht für die am stärksten gebundenen atomaren Zustände als Funktion der Kernladungszahl Z Werte von bis zu 10^{16} V/cm .

Ionen wie etwa U^{91+} , die eigentlich das ideale Forschungsobjekt wären, stehen für Experimente zur Zeit nur in den Beschleunigeranlagen der GSI in ausreichender Zahl zur Verfügung. Die mit der relativ hohen Geschwindigkeit der Ionen von bis zu 30 % der Lichtgeschwindigkeit verbundenen Probleme bei der Berücksichtigung des Doppler-Effekts begrenzen aber die erreichbare Genauigkeit. Demgegenüber befinden sich Ionen, die in einer Ionenfalle gespeichert werden, nahezu in Ruhe, sodass sich der Einfluss des Doppler-Effekts vernachlässigen lässt. Kombiniert man eine Ionenfalle mit einem energiereichen und intensiven Elektronenstrahl, so lassen sich hierdurch hochgeladene Ionen erzeugen und speichern. Solche Systeme wurden im Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) entwickelt und heißen EBIT (Electron Beam Ion Trap). Der Nachteil der zur Zeit verfügbaren EBIT-Anlagen besteht aber darin, dass nur Ionen mit mehreren Elektronen in hinreichender Zahl produziert werden können und das auch nur in einer Mischung von mehreren Ladungszuständen.

Die am LLNL entwickelte SuperEBIT erlaubt es, lithiumähnliche Uranionen in hinreichender Zahl zu produzieren und speichern. Diese Tatsache nutzte eine Gruppe vom LLNL um Peter Beiersdorfer aus,

Prof. Dr. Harald Giessen, 4. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

^{#)} Zu diesem Zweck wird in Bad Honnef vom 15. - 17.9.2006 eine Heraeus-Sommerschule stattfinden, bei der Optiker und Elektrotechniker gemeinsam über die Zukunft der Metamaterialien diskutieren. Anmeldung unter www.physik.uni-stuttgart.de/metamaterials.

^{*)} Unter wasserstoffähnlichen Ionen versteht man Atome, die neben dem Kern nur aus einem Elektron bestehen. Entsprechend haben helium- bzw. lithiumähnliche Ionen zwei bzw. drei Elektronen.

um mit Hilfe eines hochauflösenden „Grazing-Incidence Spektrometers“ für den EUV-Bereich die Wellenlänge und daraus abgeleitet die Energie des $2s_{1/2}-2p_{1/2}$ -Übergangs in U^{89+} neu zu bestimmen [2]. Der neue Wert von 280,645(15) eV bedeutet eine Steigerung der experimentellen Präzision um nahezu eine Größenordnung gegenüber einer älteren Messung durch Schweppe et al. [3], deren Ergebnis 280,59(10) eV für fast 15 Jahre die genaueste experimentelle Bestimmung von QED-Effekten (einschließlich der Effekte, die durch Kerneigenschaften hervorgerufen werden) in hochgeladenen Mehrelektronensystemen darstellte.

Die Genauigkeit der Wellenlängenbestimmung von 0,0024 Å bzw. der Energie von 0,015 eV ist so hoch, dass sie zum ersten Mal auf den Einfluss von quantenelektrodynamischen Korrekturen 2. Ordnung, den sog. „Zwei-Schleifen-Korrekturen“, empfindlich ist. Aus einem Vergleich mit theoretischen Rechnungen [4] bestimmen die Autoren diesen Beitrag auf -0,22 eV für den $2s_{1/2}$ -Zustand, der damit mehr als einen Faktor 10 größer ist als die Messgenauigkeit. Darüber hinaus gelingt es ihnen, den Zwei-Schleifen-Beitrag zur Bindungsenergie des Grundzustands von wasserstoffähnlichem Uran zu extrapolieren und zu $(-1,25 \pm 0,44)$ eV abzuschätzen. Dieser Wert stimmt hervorragend mit dem neuesten theoretischen Resultat von $(-1,26 \pm 0,33)$ eV überein [5]. Inwieweit diese Extrapolation gerechtfertigt ist, können nur Experimente an wasserstoffähnlichen schweren Ionen klären, die in naher Zukunft geplant sind. Dazu wird auch HITRAP beitragen, eine Ionenfallenanlage für hochgeladene schwere Ionen, die zur Zeit an der GSI aufgebaut wird.²⁾ HITRAP wird auch Teil der zukünftigen internationalen Beschleunigeranlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research)³⁾ sein, von der wesentliche Impulse für die Erforschung der QED in extrem starken Feldern ausgehen werden. Für Schwerionen in beliebigen Ladungszuständen werden hier erstmals Experimente mit verschiedenen Isotopen eines Elements möglich, eine Voraussetzung, um den Einfluss von Kerneffekten zu eliminieren.⁴⁾ Wie auch durch die vorliegende Arbeit wieder verdeutlicht, bilden diese Effekte gegenwärtig eine unüberwindbare Hürde zum ultimativen Test der

QED im hohen Feldbereich. Im Wechselspiel zwischen Experiment und Theorie ist nunmehr die Theorie gefordert, die experimentell bestimmten Übergangs- bzw. Bindungsenergien durch die Berechnung der Einflüsse höherer Ordnung korrekt zu beschreiben.

DIETER LIESEN UND THOMAS STÖHLKER

- [1] Th. Stöhlker, T. Beier, H. F. Beyer, Th. Kühl, W. Quint, in „The Physics of Multiply and Highly Charged Ions“, hrsg. von Fred J. Currell, Kluwer Academic Publishers (2003)
- [2] P. Beiersdorfer, H. Chen, D. B. Thorn und E. Träbert, Phys. Rev. Lett. **95**, 233003 (2005)
- [3] J. Schweppe et al., Phys. Rev. Lett. **66**, 1434 (1991)
- [4] O. Y. Andreev, L. N. Labzowsky, G. Plunien und G. Soff, Phys. Rev. A **64**, 042513 (2001) und dort aufgeführte Zitate
- [5] V. A. Yerokhin und V. M. Shabaev, Phys. Rev. A **64**, 062507 (2001) und dort aufgeführte Zitate

Ultrakalte Chemie

Der Motor chemischer Prozesse ist die thermische Energie und die Änderung der Entropie, kurz die Temperatur. Entsprechend hört man durchweg die Meinung: Kühlt man mehrere Größenordnungen unter molekulare Umwandlungsenergien ab, so ist die chemische Welt erstarrt. Weitet man jedoch den Blickwinkel über die Statistik klassischer Teilchen hinaus, so bekommt man bei ultratiefen Temperaturen, etwa einige μ K, Materiewellen mit de Broglie-Wellenlängen, die vergleichbar mit Abständen zwischen den Teilchen werden, und damit ist das

Quantenregime für das Verhalten eines Teilchenensembles bestimmend. Wigner hat bereits 1948 Wirkungsquerschnitte berechnet für inelastische Stöße zwischen Atomen bzw. Stöße, bei denen eine chemische Reaktion stattfindet. Bei verschwindender kinetischer Energie hat er dabei gefunden, dass die Wirkungsquerschnitte für s-Wellen mit der reziproken Relativgeschwindigkeit divergieren. Damit wird die Reaktionsrate, die proportional zu Wirkungsquerschnitt mal Relativgeschwindigkeit ist, praktisch unabhängig von der kinetischen Energie beim Stoß. Durch die vielfältigen Erfolge der letzten Jahre, ultrakalte Atom- und Molekülensembles zu erzeugen, lässt sich diese Welt der Chemie heute im Labor erforschen.

Der einfachste Prozess ist die Relaxation eines hoch angeregten Moleküls, das dadurch stabilisiert wird. So ist es kürzlich zwei Arbeitsgruppen aus Freiburg [1] und Orsay [2] gelungen, extrem hohe Raten der Reaktion $Cs + Cs_2(v') \rightarrow Cs + Cs_2(v'')$ bei etwa 60 μ K zu beobachten. Dabei bezeichnen v' bzw. v'' unterschiedliche Vibrationsniveaus. Hierzu werden zunächst Cs-Atome bei Dichten um 10^{11} cm^{-3} in einer optischen Dipolfalle gefangen, die mit einer Falltiefe von etwa 1 mK durch einen fokussierten CO_2 -Laserstrahl gebildet wird. Unter Laserbestrahlung entstehen daraus zu einem geringen Prozentsatz Cs_2 -Moleküle (Photoassoziation). Bei jedem Relaxationsprozess wird die Vibrationsenergie in kinetische Energie des Atoms und des Moleküls umgewandelt, und zwar weit über die Falltiefe hinaus, sodass die Teilchen aus der Falle entweichen. Um die Relaxation zu

KURZGEFASST...

■ Verschränkungsrekord

Auf dem Weg zu immer komplexeren quantenmechanischen Zuständen gibt es neue Etappenziele: Rainer Blatt und seine Mitarbeiter in Innsbruck präparierten sog. W-Zustände mit bis zu acht $^{40}Ca^+$ -Ionen, die jeweils ein Quantenbit darstellen. W-Zustände sind besonders robuste verschränkte Zustände, denen eine große Bedeutung in der Quanteninformationsverarbeitung zugemessen wird. Dave Wineland und seinen Mitarbeitern vom NIST ist es hingegen gelungen, sechs $^9Be^+$ -Ionen in den Zustand $|eeeeee\rangle + |gggggg\rangle$ zu bringen, in dem die Ionen zugleich angeregt (e) und nicht angeregt (g) sind, ein sog. Schrödinger-Katzen-Zustand.

D. Leibfried et al, Nature **438**, 639 (2005);
H. Häffner et al., ibid. 643.

■ $E = mc^2$ getestet

Pünktlich zum Ende des Einstein-Jahres hat ein internationales Physikerteam den bislang genauesten Test der wohl berühmtesten Gleichung veröffentlicht. Die Abweichungen von $E = mc^2$ betragen demnach maximal 0,00004 %. Die Physiker haben dazu Prozesse untersucht, bei denen die Kerne ^{28}Si bzw. ^{32}S durch Neutroneneinfang in ^{29}Si bzw. ^{33}S übergehen und anschließend durch die Emission von γ -Strahlung wieder zerfallen. Die Energie der γ -Quanten wurde über die Bragg-Streuung in Kristallen präzise vermessen, die Massendifferenz der involvierten Kerne über die Zyklotronfrequenz in einer Ionenfalle bestimmt.

S. Rainville et al., Nature **438**, 1096 (2005)

Prof. Dr. Dieter Liesen, Universität Heidelberg und Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Planckstraße 1, 64291 Darmstadt; Prof. Dr. Thomas Stöhlker, Universität Frankfurt und GSI

2) www.gsi.de/forschung/ap/projects/hitrap/

3) www.gsi.de/fair/index.html

4) siehe Programm der SPARC-Kollaboration, www.gsi.de/fair/experiments/sparc