

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 μK , 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 $\text{Cs} + \text{Cs}_2(v') \rightarrow \text{Cs} + \text{Cs}_2(v'')$ bei etwa 60 μK 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 $^{40}\text{Ca}^+$ -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 $^9\text{Be}^+$ -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

beobachten, braucht man also nur die Abnahme der Atom- und Moleküldichte in der Falle über die Zeit zu messen. Die Kunst im Experiment ist nun, andere Prozesse wie Stöße mit Hintergrundgas zu unterscheiden und nachzuweisen, dass überhaupt der oben angegebene Atom-Molekül-Prozess stattfindet. Darüber hinaus möchte man durch Variation des Quantenzustandes des Cs bzw. Cs₂ die Vielfalt des Prozesses erfassen.

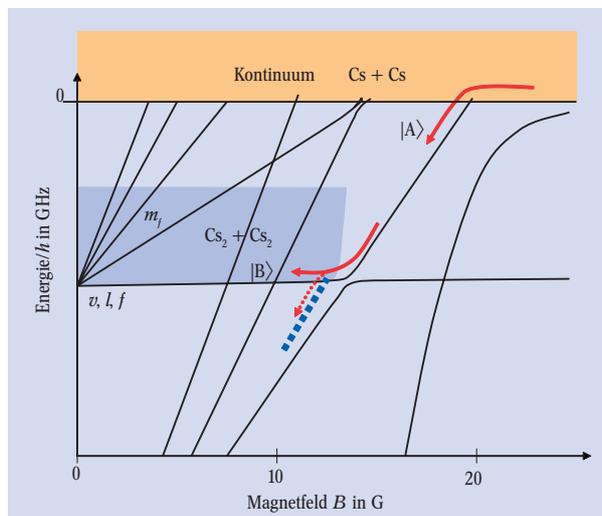
Studien von Fallenverlusten sind eigentlich ein altes Thema für die Atomfallenphysiker, das besondere dieser neuen Arbeiten ist es, dass „richtige“, tief gebundene Moleküle benutzt und deren Quantenzustand in Vibration und Rotation durch verschiedene Photoassoziationen selektiert werden. Da die Autoren selbst für den niedrigsten Rotationszustand die gleiche Relaxation gefunden haben, schließen sie, dass wirklich eine Vibrationsrelaxation stattfindet. Ein Einfluss verschiedener hoher Vibrationsanregung wurde nicht gesehen. Resultiert die Schwierigkeit, Unterschiede für verschiedene Vibrationen zu beobachten, vielleicht daraus, dass in den gemessenen Raten bereits ein Grenzwert (aufgrund der Unitaritätsgrenze bei den niedrigen Stoßenergien) sichtbar wird? Der Gruppe in Orsay gelang sogar ein erster Hinweis auf Stöße zwischen Cs₂-Molekülen, da sie relativ hohe Dichten von reinen Molekülensembles herstellen konnte, auch hier ergeben sich sehr hohe Raten.

Die Möglichkeit, Bose-Einstein-Kondensation (BEC) und Superfluidität in ultrakalten atomaren Ensembles herzustellen, führt unmittelbar zur Frage, wie chemische Prozesse in kohärenten Ensembles verlaufen, auch als kalte Quantenchemie bezeichnet. Der Prozess wird nicht mehr durch statistisches Verhalten dominiert, sondern durch eine stationäre Wellenmechanik, also mehr deterministisch, bestimmt. Wege hierzu sind deutlich in Experimenten mit BECs zu erkennen. Mithilfe eines Magnetfeldes wird ein Molekülzustand so verstärkt, dass er mit einem Atompaar bei der Energie null entartet ist; ein atomarer Stoß führt dann zu einer Resonanz, genannt Feshbach-Resonanz. Ausgehend von atomaren BECs in Na, Rb und Cs haben verschiedene Forscher durch eine adiabatische Variation des Magnetfeldes Molekülensembles erzeugt. Diese Moleküle

sind extrem fragil, mit Bindungsenergien von nur einigen nano-eV, und haben aufgrund der großen mittleren Kernabstände ganz andere Eigenschaften als „normale“ Moleküle. Ein Stoß „Molekül“+Atom ist daher eher als ein Atom+Atom-Stoß mit einem Beobachter-Atom in unmittelbarer Nachbarschaft zu se-

pulsen angesehen werden kann.

Im Brennpunkt der kalten Quantenchemie stehen aber nicht nur Alkalien. So fanden z. B. Balakrishnan und Dalgarno [5] mit Modellpotentialen, dass die Austauschreaktion $F + H_2 \rightarrow HF + H$ trotz einer erheblichen Aktivierungsenergie mit der erstaunlich



Zu einem ausgewählten Vibrationszustand v , Rotationszustand l und Hyperfeinniveau f des Atompaars Cs + Cs bilden die Zeeman-Niveaus m_f eine Geradenschar, die sich bei $B=0$ schneiden. Die anderen Niveaus mit teilweise vermiedenen Kreuzungen gehören zu niedrigeren Zuständen v , l und f . Referenzenergie ist das Atompaar mit kinetischer Energie null. Rechts oben beginnt der Pfeil bei Magnetfeldern für freie Paare von Atomen, und beim Erniedrigen des Magnetfeldes kann kinetische Energie abgegeben werden. Das Atompaar taucht in das Gebiet der gebundenen Paare beim Zustand $|A\rangle$ und kann bei weiterer Erniedrigung in den Zustand $|B\rangle$ übergehen. Durch das unterschiedliche magnetische Moment und das Stoßverhalten kann man im Experiment die Paarzustände zweifelsfrei unterscheiden.

hen. Bei diesen Experimenten führt man das Atompaar mithilfe des von außen einstellbaren Magnetfeldes durch die Schar seiner Zeeman-Niveaus mit großer Zahl von vermiedenen Kreuzungen bis hin zum „gewünschten“ Paarzustand (Abb.).

Die Gruppe um Grimm in Innsbruck hat nun kürzlich [3] bei diesen „Wanderungen“ im See ultrakalten Cäsiums von etwa 250 nK bei etwa 12,7 G einen erhöhten Verlust von Molekülen entdeckt, der keinem Atompaar Cs + Cs zuzuordnen ist. So wie zu einem Kontinuum von Cs-Paaren eine große Mannigfaltigkeit von einkreuzenden Cs₂-Zeeman-Termen gehört, so auch zu einem Kontinuum von Cs₂-Paaren (beispielhaft blau schattiert) darunter die Schar von gebundenem Cs₂ + Cs₂. Deswegen liegt es nahe, den gefundenen Molekülverlust dem Einfluss einer Feshbach-Resonanz durch Cs₄ gebildet aus Cs₂-Paaren und damit einem neuen inelastischen Kanal zuzuschreiben. Damit werden komplexe molekulare Strukturen in ultrakalten Ensembles sichtbar. Selbst kohärente Materiewellenfelder als Superposition von Atom- und Molekülzuständen mit einem BEC aus Rb sind von der Gruppe von Hecker Denschlag in Innsbruck in einem Raman-Prozess hergestellt worden [4], was als Schritt zur Quantenkontrolle von Reaktionen ähnlich wie kohärente Anregungen mit Femtosekunden-

großen Rate 10^{-12} cm³/s bei 0 K verlaufen könnte. Niedrige kinetische Energien bedeuten schlicht, dass die Teilchen über lange Zeiten hinreichend nahe sind, um Tunnelprozesse effektiv werden zu lassen. Um andere Teilchenarten einzusetzen, entwickelt z. B. Meijer in Berlin das Abbremsen von polaren Molekülen durch inhomogene elektrische Felder. NH₃ und das Radikal OH stehen bereits bei einigen mK zur Verfügung, und kürzlich ist es der Gruppe von Lisdat in Hannover gelungen, SO₂ für ein zukünftiges Dissoziationsexperiment zur Herstellung von kalten Radikalen SO und O abzubremesen.

Damit kommen „richtige“ Moleküle im Bild des Chemikers ins Spiel, und die europäischen Physiker sind dabei durch ihre bisherigen Erfolge hervorragend für die Herausforderung aufgestellt, die Möglichkeiten der Quantenmechanik voll auszuloten.

EBERHARD TIEMANN

- [1] P. Staunum et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 023201 (2006)
- [2] N. Zahzam et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 023202 (2006)
- [3] C. Chin et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 123201 (2005)
- [4] K. Winkler et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 063202 (2005)
- [5] N. Balakrishnan und A. Dalgarno, J. Phys. Chem. **107**, 7101 (2003)

Prof. Dr. Eberhard Tiemann, Institut für Quantenoptik, Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover