

Nobel, harmonisch und verschränkt

Highlights aus dem Programm der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP)

Rainer Scharf

Die Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP) hatte zu ihrer Frühjahrstagung nach Hamburg eingeladen, allerdings ohne die Beteiligung der Plasma- und Kurzzeitphysiker, die sich in Greifswald trafen. Über 1700 Teilnehmer präsentierten ihre Arbeiten in rund 900 Vorträgen und auf 409 Postern. Von der breiten Themenvielfalt soll die nachfolgende Auswahl einen kleinen Eindruck geben.

Noble Massenbestimmung

Am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt gelang es weltweit zum ersten Mal, die Masse eines chemischen Elements jenseits des Fermiums direkt zu messen. Wie Michael Block von der GSI berichtete, handelte es sich dabei um die drei Isotope ^{252}No , ^{253}No und ^{254}No des Elements Nobelium, das die Kernladungszahl $Z = 102$ hat. Durch diese drei Isotope gehen Alpha-Zerfallsketten der Elemente Darmstadtium ($Z = 110$) und Hassium ($Z = 108$), die 1994 bzw. 1984 an der GSI entdeckt worden waren. Aus der Energie der beim Zerfall entstehenden Alphateilchen und den Massen der Nobelium-Isotope lassen sich die Massen der Darmstadtium- und Hassium-Isotope indirekt bestimmen. Für eine direkte Massenmessung zerfallen diese Isotope zu schnell (innerhalb von Millisekunden).

Mit Halbwertszeiten zwischen 2 und 100 Sekunden sind die drei Nobelium-Isotope deutlich langlebiger. Trotzdem war die Bestimmung ihrer Massen eine experimentelle Herausforderung. Das Element entstand durch Beschuss eines Bleitargets mit Kalziumionen, aus denen es herausgefiltert werden musste.



Abb. 1 In der SHIPTRAP-Anlage werden Nobelium-Ionen mit einem Puffergas gestoppt und in eine Penning-Falle gebracht. Aus der Zyklotronfrequenz der im Magnetfeld der Falle umlaufenden Ionen ließ sich deren Masse mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-7} messen.

Die Ausbeute betrug nur wenige No^{++} -Ionen pro Sekunde, die von MeV-Energien auf eV abgebremst wurden. Das geschah mit dem SHIPTRAP-Versuchsaufbau (Abb. 1).

Aus den gemessenen Isotopenmassen ergeben sich die nuklearen Bindungsenergien, anhand deren sich die Kernmodelle für super-schwere chemische Elemente überprüfen und verbessern lassen. Dies verspricht genauere Informationen über die „Insel der Stabilität“, mit der man eine Gruppe von noch unentdeckten, langlebigen super-schweren Nukliden bezeichnet. Es wird vermutet, dass diese Kerne durch abgeschlossene Protonen- und Neutronenschalen stabilisiert werden. Bei welcher Zahl von Protonen und Neutronen die Schalen gefüllt sind, darüber machen die Kernmodelle allerdings nur ungenaue Aussagen. Obwohl in den letzten Jahren zahlreiche neue Elemente hergestellt wurden, gelang es noch nicht, den Schalenabschluss zu erreichen. Ausgehend von den Nobeliummassen kann man die Insel der Stabilität nun gezielter suchen.

Blockierte Rydberg-Atome

An ultrakalten Atomgasen lässt sich gut studieren, wie sich ein Vielteilchen-Quantensystem mit nahezu beliebiger Wechselwirkung verhält. So hat man mit fermionischen Atomen den Übergang vom Bose-Einstein-Kondensat (aus zweiatomigen Molekülen) zum Bardeen-Cooper-Schrieffer-Zustand (aus locker zu Cooper-Paaren gebundenen Atomen) beobachtet. Herrschen zwischen den ultrakalten Atomen Dipolkräfte, so treten Ordnungszustände auf, die Tilman Pfau und seine Mitarbeiter von der Universität Stuttgart untersucht haben. So lassen sich Rydberg-Atome, die ein einzelnes, hochangeregtes Valenzelektron tragen, aufgrund ihrer enormen Größe besonders stark elektrisch polarisieren. Ihre van der Waals-Wechselwirkung ist zehn Milliarden Mal stärker als zwischen Atomen im Grundzustand. Dadurch können sich Rydberg-Atome über mehrere Mikrometer hinweg beeinflussen.

Pfau und seine Kollegen haben an ultrakalten Rydberg-Atomen einen neuartigen Phasenübergang studiert, der einem magnetischen

Phasenübergang ähnelt. Sie haben eine $3,4 \mu\text{K}$ kalte Wolke aus spinpolarisiertem Rubidium-87 in einer Magnetfalle festgehalten und mit Laserlicht in einen Rydberg-Zustand (Hauptquantenzahl $n = 43$) angeregt. Der Bruchteil der angeregten Atome hing von der Kopplungsstärke (Rabi-Frequenz Ω) des Laserlichts und seiner Verstimmung (Δ) gegen die Resonanzfrequenz des Übergangs ab. Bei fester Laserfrequenz änderte sich Δ für ein anzuregendes Atom, sobald sich in dessen Nähe schon ein Rydberg-Atom befand. Die abstoßende, weitreichende van der Waals-Wechselwirkung erhöhte die Energie des Rydberg-Zustandes. War ohne Rydberg-Atome $\Delta = 0$, so ließ ihre zunehmende Zahl Δ negativ werden, und die weitere Anregung von Rydberg-Atomen wurde schließlich unterdrückt. Diese „Rydberg-Blockade“ hielt die vorhandenen Rydberg-Atome auf Distanz. In einem Mikrometergroßen Blockadegebiet teilten sich die Atome kohärent die Anregung, und es entstand ein kollektives „Superatom“ aus bis zu 10 000 Atomen.

Wurde das Experiment als Spinproblem interpretiert, so zeigten theoretische Untersuchungen, dass sich die Rydberg-Atome für $\Delta > 0$ zu einem Kristall anordnen, während sie für $\Delta < 0$ eine ungeordnete „paramagnetische“ Phase bilden. Bei $\Omega = \Delta = 0$ tritt ein Quantenphasenübergang 2. Ordnung auf, der das kritische Verhalten der Atomwolke in einem Bereich um die Ω -Achse dominiert. So konnten die Forscher für den Anteil der Rydberg-Atome an der Gesamtatomzahl ein universelles Skalengesetz vorhersagen und experimentell bestätigen: Die für unterschiedliche Ω und Δ gemessenen Rydberg-Anteile fielen nach Skalierung alle auf eine universelle Kurve. Die gemessenen kritischen Exponenten dieses Phasenübergangs stimmten mit den theoretischen Vorhersagen überein. Für zigarrenförmige Wolken, deren Dicke kleiner ist als die Reichweite der van der Waals-Kraft, sollten die kritischen Exponenten andere Werte haben. Weitere Experimente sollen zeigen, wie die effektive räumli-

che Dimension der Atomwolke den Phasenübergang beeinflusst und ob die vorhergesagte kristalline Phase tatsächlich auftritt.

Fermi-Atome ultrakalt gemischt

Über eine Premiere aus dem Gebiet der ultrakalten molekularen Gase berichtete Louis Costa, stellvertretend für Arne-Christian Voigt, von der Universität München und dem MPI für Quantenoptik in Garching: Sie und ihre Kollegen am Lehrstuhl von Theodor Hänsch hatten die ersten ultrakalten bosonischen Moleküle aus zwei verschiedenen fermionischen Atomen hergestellt und untersucht. Mit solchen Molekülen könnte man exotische Quantenzustände verwirklichen. Um die Moleküle herzustellen, wurde eine Mischung aus fermionischem Lithium-6 und Kalium-40 in einer Magnetfalle sympathetisch mit bosonischem Rubidium-87 gekühlt, das aus der Falle verdampfte. Anschließend wurden die Fermi-Atome in eine optische Dipolfalle übertragen, einem starken Magnetfeld von $156,8 \text{ G}$ ausgesetzt und in bestimmte Hyperfeinzustände gebracht. Wurde das Magnetfeld kontinuierlich auf $154,7 \text{ G}$ verringert, so durchliefen die Lithium-Kalium-Atompaare eine Feshbach-Resonanz und wandelten sich zum Teil in locker gebundene Moleküle um.

Den Nachweis der Moleküle erbrachten die Forscher auf zweierlei Weise. Im ersten Fall schalteten sie

das Magnetfeld und die optische Falle aus, sodass die Wolke aus Atomen und Molekülen expandieren konnte. Während sich die Atome durch Lichtabsorption verrieten, blieben die Moleküle unsichtbar. Die Zahl der nachgewiesenen Atome war umso kleiner, je langsamer die Feshbach-Resonanz durchlaufen worden war. Dass die „fehlenden“ Atome nicht aus der Falle entwichen waren, sondern Moleküle gebildet hatten, zeigte sich, als das Magnetfeld wieder auf seinen ursprünglichen Wert oberhalb der Resonanz zurückgebracht wurde: Dann wandelten sich die Moleküle wieder in sichtbare Atome um.

Beim zweiten Nachweis nutzten die Forscher aus, dass die Lithium-Kalium-Moleküle in einem räumlich homogenen Magnetfeld nahe der Feshbach-Resonanz ein viel kleineres magnetisches Moment hatten als die noch verbliebenen freien Lithium- und Kaliumatome. Moleküle und Atome ließen sich deshalb in einem Stern-Gerlach-Experiment voneinander trennen. Nach Ausschalten der optischen Falle wurden die Teilchen zusätzlich zum Magnetfeld einem gepulsten Magnetfeldgradienten ausgesetzt, der die Atome und die Moleküle unterschiedlich stark beschleunigte und dadurch separierte (Abb. 2). Im Magnetfeld konnten auch die Moleküle durch Lichtabsorption sichtbar gemacht werden. So ließen sich zwei Wölkchen voneinander unterscheiden, wobei das eine aus Atomen bestand und das

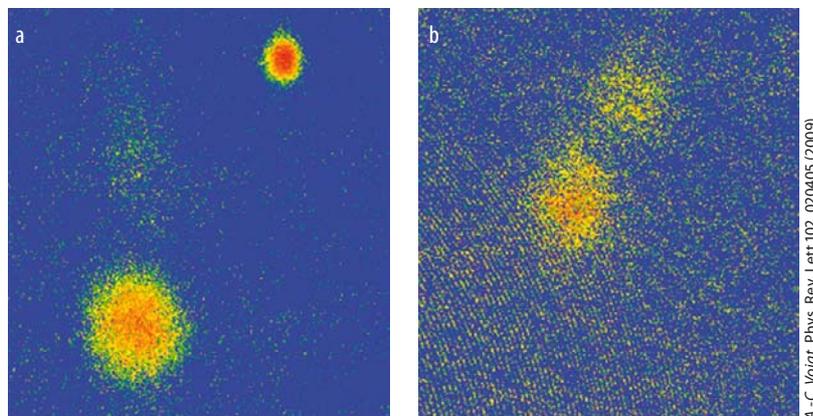


Abb. 2 Nachdem die Molekülwolke und die beiden Atomwolken durch die Stern-Gerlach-Kraft voneinander getrennt worden sind und unterschiedlich schnell weiter fliegen, lassen sie sich auf den

Absorptionsaufnahmen für unterschiedliche Flugdauern deutlich unterscheiden: Lithium (a, Flugdauer $1,6 \text{ ms}$) bzw. Kalium (b, $4,6 \text{ ms}$). Die Moleküle sind jeweils oben, die Atome unten.

andere aus Molekülen. Da die Moleküle eine Lebensdauer von mehr als 0,1 s hatten, bliebe genug Zeit, sie soweit abzukühlen, dass ein Bose-Einstein-Kondensat im molekularen Grundzustand entstünde. Dieses Kondensat hätte neuartige Eigenschaften, da die Moleküle im Gegensatz zu allen bisher kondensierten Bosonen ein starkes elektrisches Dipolmoment besitzen.

Verschränkt im Weltraum

Quantenmechanisch verschränkte Teilchen zeigen ein viel enger abgestimmtes Verhalten, als es im Rahmen der klassischen Physik möglich ist. Dabei sollte es keine Rolle spielen, wie weit die verschränkten Teilchen voneinander entfernt sind. Ein Satellitenexperiment, das Rupert Ursin von der Universität Wien und seine europäischen Kollegen vorbereiten, soll mit Photonenpaaren die räumlichen Grenzen der Verschränkung ausloten und zugleich Quantenkryptographie über interkontinentale Entfernungen ermöglichen (Abb. 3). Bei der Quantenkryptographie teilen sich zwei Beobachter paarweise verschränkte Photonen, mit deren Hilfe sie sich abhörsicher auf einen Code zum Verschlüsseln von Nachrichten einigen können.¹⁾

Bei einer Übertragung von verschränkten Photonen durch Glasfasern lassen sich allerdings nur Entfernungen von einigen 100 Kilometern überbrücken, da bei der dann nötigen Verstärkung des Lichtes die Verschränkung verloren ginge. Hier könnte ein Ausweichen in den Weltraum weiterhelfen. Im Rahmen des europäischen Projekts Space-QUEST²⁾ soll ein Satellit eine Kette von Basisstationen überfliegen. Dabei soll er auf je zwei aufeinanderfolgende Stationen verschränkte Photonenpaare verteilen, mit denen die Nachbarstationen einen gemeinsamen Code erzeugen. Aus „Nachbarcodes“ lässt sich abhörsicher ein Code für die beiden Stationen an den Enden der Kette gewinnen. Auf diese Weise könnte man Nachrichten weltumspannend verschlüsseln und abhörsicher



Abb. 3 Das Projekt Space-QUEST soll Quantenkryptographie über interkontinentale Entfernungen ermöglichen, z. B. von der Internationalen Raumstation aus.

übertragen. Ein Experiment, das verschränkte Photonen zu zwei ca. 1500 km voneinander entfernten Basisstationen sendet, soll mit dem Columbus-Modul der ESA an Bord der ISS mitfliegen.

Bei Experimenten auf der Erde haben die Forscher getestet, ob eine ausreichende Zahl verschränkter Photonen durch die Erdatmosphäre gelangt und ihr Ziel erreicht, um eine Quantenkryptographie mit Satelliten durchführen zu können. Auf La Palma wurden polarisationsverschränkte Photonen durch parametrische Abwärtskonversion erzeugt und zur 144 km entfernten Insel Teneriffa geschickt, wo sie mit einem 1-Meter-Teleskop aufgefangen wurden. In einem 2007 durchgeführten Experiment hatten die Forscher von jedem Photonenpaar ein Teilchen in La Palma behalten und analysiert, das andere nach Teneriffa geschickt. Es zeigte sich, dass die Photonen, die die Reise überstanden hatten, so stark mit ihren Partnern verschränkt waren, dass die Korrelationen ihrer Polarisationen die Ungleichung von Clauser, Horne, Shimony und Holt (CHSH) um mehr als 13 Standardabweichungen verletzten. Bei einem kürzlich durchgeführten Experiment wurden beide Photonen eines verschränkten Paares um 50 ns zeitversetzt auf die 144 km lange Reise geschickt. Von zwei Millionen Paaren/s kamen nur etwa vier Paare pro Minute an, die aber weiterhin verschränkt waren und die CHSH-Ungleichung um mehr als fünf Standardabweichungen verletzten.

Ob Photonen auch über interkontinentale Entfernungen verschränkt bleiben, sollen die Satellitenexperimente zeigen.

Geformte Photonen

Bei der kohärenten Quantenkontrolle geht es darum, mit geeignet geformten Laserpulsen die gewünschte Wirkung auf Atome, Moleküle oder Nanostrukturen zu erzielen. Um etwa ein Molekül durch einen Laserpuls möglichst effektiv in die gewünschten Reaktionsprodukte zu zerlegen, kann man den Puls mit einem Pulsformer optimieren, der von einem evolutionären Algorithmus gesteuert wird. Wird dabei das Molekül durch einen Zwei-Photonen-Prozess angeregt, so kommt die Interferenz zwischen verschiedenen spektralen Komponenten des Pulses ins Spiel, wie Yaron Silberberg vom Weizmann Institute of Science erläuterte. Gibt man diesen Komponenten unterschiedliche Phasen, so kann man erreichen, dass sie für bestimmte Summenfrequenzen konstruktiv interferieren, für andere jedoch destruktiv. Während ein Puls mit „konstruktiver“ Phasenwahl das Molekül anregt, hat ein Puls mit „destruktiver“ Phasenwahl keine Wirkung und ist „dunkel“, wie Silberberg vor einigen Jahren gezeigt hatte.

Um ein Atom oder Molekül in einem Zwei-Photonen-Prozess anregen zu können, müssen die beiden Photonen es gleichzeitig erreichen. Daher nimmt man normalerweise möglichst kurze Pulse, z. B. fs-Pulse. Silberberg beschrieb, dass es genauso gut möglich ist, Zwei-Photonen-Prozesse mit verschränkten Photonenpaaren anzuregen. Diese Paare wurden in einem Bariumboratkristall mithilfe der parametrischen Abwärtskonversion eines langen Laserpulses von 3 ns Dauer erzeugt. Dabei entstand aus je einem Laserphoton ein Photonenpaar mit der „richtigen“ Summenfrequenz. Die beiden Photonen konnten gemeinsam ein Atom effizient anregen, wenn sie es mit einem zeitlichen Abstand von weniger als 20 fs trafen, was der Korrelationszeit eines

1) s. Physikalische Blätter, Juni 1999, S. 25

2) www.quantum.at/quest

Photonenpaares entsprach. Ein 3-ns-Puls aus verschränkten Photonenpaaren hatte demnach dieselbe Wirkung wie ein viel kürzerer 20-fs-Puls aus unkorrelierten Photonen.

Ein solches Photonenpaar verhielt sich wie ein Lichtpuls, wobei die Korrelationszeit der beiden Photonen der für die Zwei-Photonen-Anregung entscheidenden Dauer des Pulses entsprach. Silberberg und seine Kollegen haben diese Photonenpaar-„Pulse“ geformt als wären es normale Laserpulse. Dazu wurde der Strahl der Photonenpaare mit einem Beugungsgitter in seine spektralen Komponenten aufgefächert, die daraufhin unterschiedliche Bereiche eines räumlichen Lichtmodulators passierten. Für ein Photon eines jeden Paares gab der Modulator den verschiedenen Komponenten unterschiedliche Phasen. Anschließend wurden die Komponenten durch ein zweites Beugungsgitter wieder zu einem Strahl zusammengeführt, der nun aus „geformten“ Photonenpaaren bestand. Das zeigte ein Interferenzexperiment, bei dem die zeitlichen Korrelationen der beiden Photonen eines jeden Paares gemessen wurden. So konnte man den von einem Photonenpaar gebildeten Puls in zwei kohärente Teile zerlegen.

Höhere harmonische Einblicke

Intensive Laserstrahlung hat auf Atome und Moleküle eine stark nichtlineare Wirkung: Es entstehen zahlreiche höhere Harmonische der Laserfrequenz. Auf diese Weise lassen sich z. B. mit Infrarotlasern ultrakurze Pulse von extremer UV-Strahlung erzeugen. Darüber hinaus enthalten die von Molekülen abgestrahlten höheren Harmonischen auch wertvolle Informationen über die molekulare Struktur und Dynamik, wie Jonathan Marangos vom Imperial College in London ausführte. Die intensive niederfrequente Laserstrahlung ionisiert ein Atom oder Molekül, indem sie den Potentialtopf des am schwächsten gebundenen Elektrons so stark deformiert, dass das Elektron aus ihm heraus tunnelt. Anschließend schwingt das freie Elektron im Takt des Laserfeldes und gewinnt dabei an Energie, bis es nach einigen Femtosekunden mit dem ionisierten Molekül kollidiert und wieder eingefangen wird, wobei es die zuvor aufgenommene Energie abstrahlt.

Das kollidierende elektronische Wellenpaket ist räumlich sehr ausgedehnt und besitzt eine breite Energieverteilung. Deshalb eignet es sich als Sonde, mit der man das Molekülorbital abtasten kann, aus

dem das Elektron heraus getunnelt ist und in das es wieder zurückkehrt. Die dabei abgestrahlten höheren Harmonischen enthalten die für eine tomographische Rekonstruktion des Orbitals nötigen Informationen. Auf diese Weise haben Marangos und seine Kollegen das höchst besetzte Molekülorbital (HOMO) von Stickstoff, Azetylen ($\text{HC} \equiv \text{CH}$) und Allen ($\text{H}_2\text{C} = \text{C} = \text{CH}_2$) rekonstruiert. Die Moleküle wurden dazu mit 10 fs langen Laserpulsen von 800 nm Wellenlänge und einer Pulsenergie von 0,5 mJ bestrahlt. Da der Laserpuls die Elektronen nahezu gleichzeitig freisetzt, konnte ein Elektron umso mehr Energie im Laserfeld aufnehmen, je später es mit dem Ion kollidierte. Die dabei entstandenen höheren Harmonischen wurden folglich umso später abgestrahlt, je höher ihre Ordnung war.

Anhand der zeitlich aufgefächerten höheren Harmonischen ließ sich mit einer Auflösung von etwa 100 Attosekunden verfolgen, wie sich die Atomkerne eines angeregten Moleküls bewegten und umordneten. So haben Marangos und seine Kollegen beobachtet, dass nach Ionisation eines Methanmoleküls dessen vier Protonen ihre Tetraederpositionen verließen und innerhalb von wenigen Femtosekunden ein Rechteck bildeten. Bei der Ionisation von Wasserstoffmolekülen führte die dabei auftretende Bewegung der Protonen zu destruktiven Interferenzen mit dem zurückkehrenden elektronischen Wellenpaket, wodurch die Intensitäten bestimmter höherer Harmonischer verringert wurden. Weitere Einblicke in die Struktur der Moleküle erhoffen sich die Forscher davon, dass sie neben der Energie auch die Bewegungsrichtung der zum Ion zurückkehrenden Elektronen zeitabhängig machen. Zudem haben Berechnungen gezeigt, dass eine Laserwelle mit optimierter Form die Elektronen auf eine dreimal so große Kollisionsenergie beschleunigen kann wie eine Sinuswelle. Mit höheren Harmonischen lässt sich also womöglich noch viel tiefer in die Moleküle blicken.

SAMOP-DISSERTATIONSPREIS

Alexander Szameit (rechts, mit dem Sprecher der Sektion AMOP, Jan-Michael Rost) freut sich über den ihm zuerkannten SAMOP-Dissertationspreis. Szameit wurde für seine an der

Universität Jena angefertigte Dissertation über „Discrete optics in femtosecond-laser written photonic structures“ ausgezeichnet.



G. Prager