

Ultrakalt, ultrakurz und ultrapräzise

Highlights aus dem Programm des Arbeitskreises Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (AMOP)

Rainer Scharf

Viele der vom Arbeitskreis Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen veranstalteten Vorträge fanden im Auditorium Maximum der Humboldt Universität statt – dort wo Albert Einstein in den Zwanzigerjahren Vorlesungen über die Relativitätstheorie gehalten hatte. In den aktuellen Vorträgen war der ungebrochene Einfluss Einsteins auf die moderne Physik spürbar.

Zahlreiche Vorträge befassten sich mit den faszinierenden Eigenschaften ultrakalter atomarer Gase, die bei Temperaturen im Mikrokkelvin-Bereich, je nach Spin der Atome, Bose-Einstein-Kondensate (BEC) oder fermionische Kondensate bilden. Immanuel Bloch von der Universität Mainz wies darauf hin, dass die Forschung mit bosonischen und fermionischen Quantengasen weitreichende Anwendungen hat von der Atom- und Molekülphysik, über die Quantenoptik und Quanteninformationsverarbeitung, bis zur Untersuchung von stark korrelierten Vielteilchen-Quantenphänomenen.

Bloch und seine Mitarbeiter haben untersucht, wie sich ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) in einem optischen Gitter verhält, das durch induzierte elektrische Dipolmomente ein „Eierkartonpotential“ für die Atome hervorruft. Solange die Potentialmulden nicht zu tief sind, können die Atome noch merklich zwischen benachbarten Mulden tunneln und sich im Gitter ungehindert umherbewegen. Dabei behalten sie ihre Phasenkohärenz. Das BEC bleibt bestehen, wobei die Atome über die Mulden poisson-verteilt sind. Sind die Potentialmulden jedoch tief genug, dann werden Atome, die in benachbarten Mulden sitzen, voneinander isoliert und können sich nicht mehr umherbewegen. Sie verlieren ihre Phasenkohärenz weitgehend, wobei dann in allen Mulden gleich viele Atome sitzen. Aus dem BEC ist ein Mott-Isolator geworden.

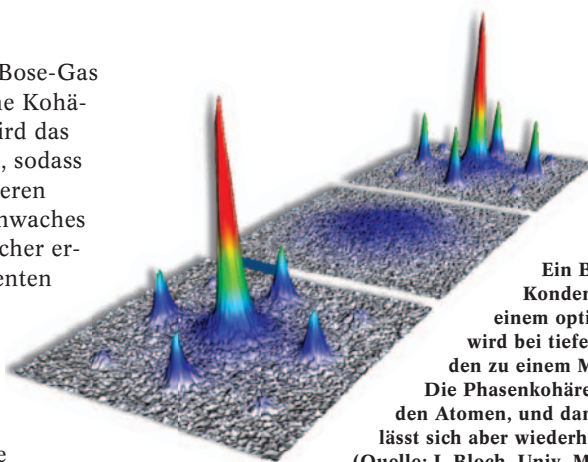
Neuere Untersuchungen der Mainzer Forscher deuten indes dar-

auf hin, dass das ultrakalte Bose-Gas auch in der Mott-Phase seine Kohärenz nicht völlig verliert. Wird das optische Gitter abgeschaltet, sodass die Atomwolke frei expandieren können, so zeigt sich ein schwaches Interferenzmuster. Die Forscher erklären dies mit einer kohärenten Beimischung von Teilchen-Loch-Paaren zum Isolatorgrundzustand, die die lokale Phasenkohärenz bewahrt. Dies hätte Konsequenzen für eine mögliche Nutzung des Mott-Isolators als Datenspeicher in der Quanteninformationsverarbeitung.

Kondensat in Rotation

Wenn makroskopische Quantenobjekte in schnelle Rotation versetzt werden, ändern sie ihre Eigenschaften auf dramatische Weise, betonte Jean Dalibard vom Laboratoire Kastler Brossel in Paris. So wird suprafluides Helium-4 bei hohen Rotationsfrequenzen zu einer normalen Flüssigkeit. In ähnlicher Weise wird ein Supraleiter 2. Art in einem hinreichend starken Magnetfeld normalleitend. Bei einem in Rotation versetzten BEC bildet sich ein Gas von quantisierten Wirbeln (Vortices), die sich zunächst in einem Dreiecksgitter anordnen. Um ein BEC in Drehung zu versetzen, rührt man es mit einem Laserstrahl gewissermaßen um.

Dalibard und seine Mitarbeiter haben untersucht, wie sich das Verhalten eines BEC, das sich in einem Potential befindet, mit zunehmender Rotationsfrequenz Ω ändert. Der transversale Anteil des Potentials hält das BEC in der Nähe der z -Achse, die zugleich die Rotationsachse ist. Wenn das transversale Potential harmonisch ist, dann ist seine charakteristische Frequenz ω zugleich auch ein kritischer Wert für die Rotationsfrequenz Ω des Kondensates. Rotiert das Kondensat nämlich schneller als mit ω , dann kann es vom Potential nicht mehr gehalten werden. Um dieses Problem zu umgehen, haben die Forscher dem transversalen Potential eine zusätzliche anharmonische



Ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) in einem optischen Gitter wird bei tiefen Potentialmulden zu einem Mott-Isolator. Die Phasenkohärenz zwischen den Atomen, und damit das BEC, lässt sich aber wiederherstellen. (Quelle: I. Bloch, Univ. Mainz)

Komponente gegeben, die das BEC auch noch für $\Omega \geq \omega$ festhält.

Bei ihren Experimenten mit einem rotierenden BEC aus Rubidium-95-Atomen haben die Forscher folgendes beobachtet. Für eine nicht zu große Rotationsfrequenz ($\Omega < 0,95 \omega$) ordnen sich die Wirbel in einem regelmäßigen Gitter an. Mit zunehmendem Ω wird das Gitter ungeordnet. Für $\Omega > \omega$ nimmt die Zahl der sichtbaren Wirbel dramatisch ab, obwohl das atomare Gas weiterhin ultrakalt und in schneller Rotation ist. Berechnungen, die eine enge Analogie zwischen der Physik eines schnell rotierenden BEC und dem Quanten-Hall-Effekt ausnutzen, haben gezeigt, dass die Dichte der Wirbel im Kondensat stetig zunimmt. Wenn Ω so groß wie ω wird, müsste jedoch die Zahl der Wirbel so groß werden wie die Zahl der Atome im BEC. Dann kann das atomare Gas nicht mehr durch eine makroskopische Wellenfunktion beschrieben werden. Es bildet sich ein stark korrelierter Grundzustand, der dem eines Elektronengases beim fraktionalen Quanten-Hall-Effekt ähnelt.

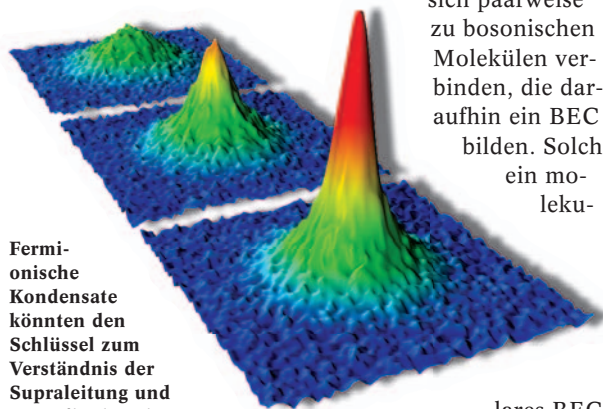
Fermionische Kondensate

Bei ultratiefen Temperaturen zeigen Fermi-Gase ein anderes Verhalten als Bose-Gase. Wegen des Pauli-Verbots können die Atome nicht im selben Zustand kondensieren. Stattdessen füllen sie die Zustände, nach ihrer Energie geordnet, der Reihe nach auf bis zum Fermi-Niveau. Solch ein fermi-entartetes Gas hatten Deborah Jin und ihre

Mitarbeiter am JILA in Boulder, Colorado, 1999 erstmals hergestellt. Markus Greiner, der in der Jin-Gruppe arbeitet, berichtete über aktuelle Arbeiten zur Kondensation von atomaren Fermi-Gasen.

Bei den Experimenten mit atomaren Fermi-Gasen ist es entscheidend, dass man die Wechselwirkung zwischen den Atomen mit Hilfe von Magnetfeldern in der Nähe einer so genannten Feshbach-Resonanz kontrollieren kann. Für Magnetfelder unterhalb der Resonanz tritt ein neuer gebundener Zustand zwischen zwei fermionischen Atomen auf. Die

Atome können sich paarweise zu bosonischen Molekülen verbinden, die daraufhin ein BEC bilden. Solch ein molekular-



Fermionische Kondensate könnten den Schlüssel zum Verständnis der Supraleitung und Suprafluidität liefern. (Quelle: M. Greiner, Univ. of Colorado, Boulder)

lares BEC haben Rudolf Grimm und seine Mitarbeiter mit Lithium-6 und Markus Greiner und seine Kolleginnen mit Kalium-40 erstmals im Jahr 2003 hergestellt.

Oberhalb der Resonanz ziehen sich die fermionischen Atome sehr schwach an und können paarweise Zustände bilden, die den elektronischen Cooper-Paaren entsprechen, wie sie aus der BCS-Theorie der Supraleitung bekannt sind. Diese atomaren Paare, deren Ausdehnung sich über viele Atomabstände hinweg erstreckt, sind ebenfalls Bosonen und können ein supraflüssiges Kondensat bilden. Inzwischen hat die Gruppe von Wolfgang Ketterle am MIT in ultrakaltem Lithium-6-Gas tatsächlich Suprafluidität nachgewiesen: Es traten regelmäßige Anordnungen von Vortizes auf, und zwar sowohl im molekularen BEC als auch im BCS-Zustand der locker gebundenen Atompaaare. Der Cross-Over vom BEC zum BCS-Zustand wird derzeit von vielen Gruppen intensiv untersucht. Er könnte den Schlüssel zu einem umfassenden Verständnis der Supraleitung und der Suprafluidität enthalten.

Moleküle in Nanotropfen

Nanometergroße Tröpfchen aus flüssigem Helium eröffnen faszinierende experimentelle Möglichkeiten. So hatten J. P. Toennies und seine Mitarbeiter vor einigen Jahren untersucht, wie groß ein Helium-4-Tropfen sein muss, damit er „makroskopische“ Suprafluidität zeigt.¹⁾ Dazu betteten sie einzelne OCS-Moleküle in 0,15 K kalte Helium-3-Tröpfchen ein und fügten eine bestimmte Zahl von Helium-4-Atomen hinzu. Die Helium-4-Atome umschlossen daraufhin das OCS-Molekül. Die Infrarot-Spektroskopie der OCS-Moleküle ergab, dass sie völlig ungehindert rotieren konnten, wenn mindestens 60 Helium-4-Atome vorhanden waren – die Minimalanforderung für supraflüssiges Helium-4.

In den letzten Jahren ist die Spektroskopie einzelner, in Helium-Nanotropfen eingeschlossener Moleküle zu einem vielseitigen Instrument geworden, mit dem man Anregungen von Molekülen bei Temperaturen im Millikelvin-Bereich untersuchen kann. Frank Stienkemeier (Universität Freiburg) berichtete über entsprechende Experimente an hetero-nuklearen Alkali-Molekülen und -Clustern sowie an halbleitenden organischen Nanostrukturen. Kalte heteronukleare Moleküle sind vor allem wegen ihres elektrischen Dipolmoments von Interesse. Sie eröffnen die Möglichkeit, die Wechselwirkung in einem quantenmechanisch entarteten, polaren Gas zu untersuchen, indem man einzelne Dipole beeinflusst.

Stienkemeier und seine Kollegen haben die stark polaren Alkalidimere LiCs und NaCs in Helium-Nanotropfen spektroskopisch untersucht. Dazu ließen sie die Alkaliatome von den He-Tropfen einfangen. Es bildeten sich Dimere, Tri- oder Oligomere, wobei die freiwerdende Bindungsenergie von den Tropfen aufgenommen und durch verdampfende Helium-Atome abgeleitet wurde. Durch stetiges Verdampfen erreichten die Helium-Tropfen samt den auf ihnen sitzenden Molekülen schließlich eine Temperatur von etwa 380 mK. Die Moleküle befanden sich dabei im tiefsten Rotations- und Schwingungszustand des elektronischen Triplett-Grundzustandes. Photoionisationsspektroskopie der LiCs- und NaCs-Moleküle lieferte dann detaillierte Informationen über die Wechselwirkungspotentiale der Moleküle. Der Vergleich mit ab-initio-Berechnungen zeigte, dass die

Anregungsenergien durch den Einfluss der supraflüssigen He-Tropfen nur geringfügig verschoben waren.

Auch komplexe organische Moleküle wie 3,4,9,10-Perylen-tetracarboxyl-Dianhydrid (PTCDA) lassen sich in Helium-Nanotropfen fangen und spektroskopisch untersuchen. Die mit laserinduzierter Fluoreszenz gewonnenen Spektren zeigen scharfe Anregungslinien und sehr breite Absorptionsbanden. Die scharfen Anregungslinien gestatten es, verschiedene Schwingungszustände aufzulösen, die u. a. Informationen über Struktur und Bindung von Komplexen aus mehreren PTCDA-Molekülen geben. Die breiten Absorptionsbanden rühren hingegen von Übergängen in exzitonische Zustände her, die bei sandwich-artigen Komplexen auftreten. Auf diese Weise kann man den Ladungstransfer in solchen Aggregaten untersuchen und erhält grundlegende Einblicke in die Halbleitereigenschaften organischer Materialien.

Photoelektronen-Spektroskopie

Für die Erklärung des Photoelektrischen Effekts, der Grundlage der Photoelektronen-Spektroskopie, erhielt Einstein 1921 den Nobelpreis für Physik. Stefan Hüfner (Universität des Saarlandes) gab nach einem Blick auf die Geschichte des Photoelektrischen Effekts eine Übersicht über die aktuellen Anwendungen der Photoelektronen-Spektroskopie.²⁾ Der 1887 von Heinrich Hertz und Wilhelm Hallwachs beschriebene Photoelektrische Effekt zeigte, noch vor der Entdeckung des Elektrons, dass durch Bestrahlung mit UV-Licht nur negative Ladung von einer Festkörperoberfläche entfernt werden kann, positive Ladung hingegen nicht.

Die Photoelektronen-Spektroskopie beruht darauf, dass die Eigenschaften der freien Photoelektronen im Wesentlichen die elektronischen Eigenzustände des untersuchten Systems widerspiegeln. Während man die UV-Photoemissionsspektroskopie (UPS) hauptsächlich einsetzt, um die Valenzbandzustände zu untersuchen, erhält man mit der Röntgen-Emissionsspektroskopie (XPS) Informationen über die stark gebundenen Zustände der kernnahen Elektronen. Mit Hilfe der XPS kann man die chemische Zusammensetzung von Oberflächen oder dünnen Schichten analysieren.

Bei aktuellen Anwendungen der

1) s. Physik Journal, Juli/August 2002, S. 49

2) s. a. www.iop.org/EJ/abstract/1367-2650/7/1/097

UPS nutzt man deren gute Energieauflösung von wenigen meV aus, um Vielteilcheneffekte in Festkörpern zu untersuchen. So geben elektronische Shockley-Zustände, die an Metalloberflächen lokalisiert sind, scharfe Photoemissionslinien, aus denen man Informationen z. B. über die Renormierung der Bandstruktur durch Vielteilcheneffekte, die Lebensdauer der Photo-Löcher oder die Elektron-Phonon-Wechselwirkung nahe der Fermi-Energie gewinnen kann.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz der UPS ist die Untersuchung der Energielücke von konventionellen Supraleitern, die typischerweise kleiner als 3 meV ist. Mit UPS kann man die Temperaturabhängigkeit der Energielücke analysieren. Für die Untersuchung der elektronischen Struktur von Hochtemperatur-Supraleitern ist die winkelaufgelöste UPS derzeit das wichtigste experimentelle Werkzeug. Sie könnte zur Beantwortung der Frage beitragen, welcher Kopplungsmechanismus zwischen den Elektronen für die Hochtemperatur-Supraleitung verantwortlich ist: Spinfluktuationen oder BCS-artige Phononenwechselwirkungen.

Laser als Beschleuniger

Mit gepulsten Lasern erreicht man heute extrem hohe Intensitäten von mehr als 10^{20} W/cm². Richtet man solch intensive Laserstrahlung auf ein festes oder gasförmiges Target, dann erzeugt sie ein relativistisches Plasma und es entsteht intensive Strahlung aus hochenergetischen Elektronen, Photonen, Protonen, Neutronen und schweren Ionen. Welche Möglichkeiten ultraintensive Laser für die Teilchenbeschleunigung und für praktische Anwendungen eröffnen, erörterte Ken Ledingham (University of Strathclyde in Glasgow). So könnte man mit handlichen Laser-Plasma-Beschleunigern einen tausendmal größeren Feldgradienten erzeugen als mit herkömmlichen Beschleunigern.

Mit einem kompakten Titan-Saphir-Laser hatten französische Forscher schon vor drei Jahren Elektronen auf Energien von bis zu 200 MeV beschleunigt. Die Elektronen surfen dabei auf einer vom Laserlicht erzeugten Plasmawelle. Allerdings hatten die Elektronen eine sehr breite Energieverteilung. Im vergangenen Jahr konnten mehrere Forschergruppen monoenergetische

Elektronenstrahlen mit Energien von 80 bis 170 MeV erzeugen, indem sie die ultrakurzen Lichtpulse (30 bis 50 fs Pulslänge) eines Terawattlasers (10 bis 30 TW Leistung) auf einen ionisierten Gasstrahl richteten.

Bei der Erzeugung von Protonen mit ultraintensiven Lasern hat man Energien von bis zu 58 MeV und Intensitäten von 10^{15} Teilchen pro Puls erreicht. Kompakte Laser-Protonenquellen sind besonders für die Medizin von großem Interesse. So braucht man Protonenstrahlung, um kurzlebige positronen-emittierende Isotope wie Fluor-18 herzustellen, die man für die Positronen-Emissions-Tomographie benötigt. Außerdem setzt man Protonenstrahlen mit großem Erfolg in der Tumortherapie ein. In beiden Fällen ist man bislang auf große konventionelle Protonenbeschleuniger angewiesen. Laser-Protonenquellen würden den nötigen Aufwand beträchtlich verringern.

Auch in der Kernphysik erschließen sich neue Möglichkeiten für die Laser-Teilchenbeschleuniger. Ledingham und seine Kollegen haben z. B. mit einem lasererzeugten Protonenstrahl, bei relativ geringem Aufwand, den Verlauf von Kernreaktionen untersucht, wie sie auch aufgrund der Evaporation von Protonen bei GeV-Spallationsreaktionen von Blei auftreten. Mit der hochenergetischen Bremsstrahlung, die von lasererzeugten Elektronen abgegeben wird, kann man Atomkerne aktivieren, dass sie sich spalten oder durch Neutronenemission in andere Kerne umwandeln. Auf diese Weise versucht man, langlebigen radioaktiven Abfall in kurzlebige oder stabile Isotope zu transmutieren. Mit Neutronen, die man durch Laserfusion in deuteriumhaltigen Plasmen erzeugt, lässt sich untersuchen, welchen Anforderungen die Materialien in einem Fusionsreaktor ausgesetzt sind. Angesichts stetig steigender Laserintensitäten zeigen die vielen Beispiele, dass die Teilchenbeschleunigung mit Lasern gerade erst begonnen hat.

QED in starken Feldern

Die Quantenelektrodynamik (QED) ist zwar eine der am besten überprüften Theorien, meinte Alexandre Gumberidze von der GSI in Darmstadt. Doch die Effekte, die von der QED für die extrem starken elektrischen Felder in den schwersten Atomen vorhergesagt werden, müsse man noch mit

Präzisionsexperimenten überprüfen. Zusammen mit einer internationalen Gruppe um Thomas Stöhlker hat Gumberidze jetzt an wasserstoffähnlichen Uran-Ionen Präzisionsmessungen der Lamb-Verschiebung durchgeführt.

Beim Wasserstoffatom sind die Energien der angeregten Niveaus



Für die Röntgenspektroskopie hochionisierter Schwerionen wurde eigens ein neuartiges Röntgen-Spektrometer entwickelt, das sog. FOCAL-Spektrometer.³⁾ (Foto: GSI)

$2s_{1/2}$ und $2p_{1/2}$ nicht gleich, wie von der Dirac-Theorie vorhergesagt, sondern um 4×10^{-6} eV verschieden. Auch die Energie des Grundzustands $1s_{1/2}$ ist um $3,4 \times 10^{-5}$ eV gegenüber dem theoretischen Wert verschoben. Erst die QED kann das gemessene Wasserstoffspektrum mit großer Präzision reproduzieren. Wie beim Wasserstoffatom, so zeigen auch beim wasserstoffähnlichen Uranion U^{91+} die Energieniveaus Abweichungen von den Vorhersagen der Dirac-Theorie. Kann die QED die Lamb-Verschiebung auch für U^{91+} richtig vorhersagen, obwohl beim Uran das auf den Grundzustand wirkende elektrische Feld etwa eine Million Mal stärker ist als beim Wasserstoff?

Gumberidze und Kollegen haben mit einem Experiment am Schwerionensynchrotron (SIS) der GSI die Verschiebung des Grundzustandsenergie von U^{91+} mit bisher unerreichter Genauigkeit gemessen: Sie beträgt demnach $(460,2 \pm 4,6)$ eV. Das Fazit ist somit: Auch für extreme Bedingungen macht die QED die richtige Vorhersage.

³⁾ FOCAL steht für FOCussing Compensated Asymmetric Laue geometry. Weitere Infos unter <http://mac02.gsi.de/FOCAL/Focal1.html>