



RFT-Projekt:

Entwicklung von Atom- und Molekularstrahlmethoden für die Erzeugung und Charakterisierung neuartiger Materialkomponenten für die Nanotechnologie

Atomic and Molecular Beam Techniques for the Generation and Characterization of New Building Blocks of Nanosize Materials

Materialbausteine aus einigen tausend Atomen haben Eigenschaften, die grundlegend anders sein können als die der korrespondierenden Stoffe in makroskopischen Mengen. Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und die Gesetze der Quantenmechanik regeln zum Beispiel, welche Spektralfarben ein aus bestimmten Elementen bestehendes Material absorbiert und ob dieses Material elektrischen Strom leitet oder nicht. Zur Herstellung und Untersuchung von einzelnen Nanoteilchen können Molekularstrahlen eingesetzt werden, in denen die Wechselwirkung der Teilchen mit Laserlicht gemessen wird. Darüber hinaus werden die Welleneigenschaften einfacher Atomstrahlen in einem Materiewellenmikroskop genutzt, um die Struktur von deponierten Teilchen zu analysieren.

Seit vielen Jahrzehnten gehören Atom- und Molekularstrahlen zum Repertoire des Experimentalphysikers, der detaillierte Informationen über die innere Struktur von Atomen und Molekülen sucht. Mit der schnellen Entwicklung der Nanotechnologie in den letzten Jahren ist der Bedarf nach grundlegender Klärung der Eigenschaften nanostrukturierter Materie entstanden. So genannte Nanoteilchen (Größenskala $\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$) bestehen aus einigen tausend Atomen. Während die Zusammensetzung von Festkörpern normaler Alltagsdimensionen (mm , cm oder größer) hinsichtlich ihrer geometrischen Kristallstruktur, ihrer elektrischen und magnetischen Eigenschaften und ihrer temperaturabhängigen Phasen (fest, flüssig) in der Regel gut bekannt ist, war es für Teilchen, die aus weniger als einigen Millionen Atomen bestehen, nicht selbstverständlich, ob man von fester und flüssiger Phase sprechen kann, ob ihre Elektronen delokalisiert sein können, sie also elektrisch leitfähig sind und ob ihnen die üblichen magnetischen Eigenschaften fester Stoffe zuzuordnen sind. Seitdem die Forschung an Clustern (freie Aggregate von hunderten Atomen) gezeigt hat, auf welche Weise in solchen Teilchen Phasenübergänge sowie elektronische und magnetische Eigenschaften eindeutig beschrieben werden können, versuchen Wissenschaftler, Bausteine für neue Materialien für verschiedene Anwendungen zu schneiden.

Im folgenden werden zwei neue Projekte skizziert, die am Institut für Experimentalphysik aufgebaut werden und der Herstellung und fundamentalen Untersuchung von Nanoteilchen dienen. Beide basieren auf Atom- und Molekularstrahltechniken.

Erzeugung neuartiger Molekülbausteine in superfluiden Heliumnanotröpfchen

Teilchen, die aus einigen hundert oder tausend Atomen oder Molekülen bestehen, werden auch atomare bzw. molekulare Cluster genannt. Die Definition einer festen oder flüssigen Phase eines Clusters korrespondiert zu dem Bild, das wir von größeren Stoffmengen haben: Ein Cluster ist in seinem Innern fest, wenn die Atome oder Moleküle feste, regelmäßige Abstände haben, seine Struktur als rigide angesehen kann. Er ist flüssig, wenn sich die Atome oder Moleküle in seinem Innern frei gegeneinander bewegen, analog zu der freien Verschiebbarkeit der Teilchen in einer makroskopischen Flüssigkeit. Das Element Helium ist dafür bekannt, dass die Temperatur für seine Verflüssigung sehr niedrig ist. Eine der Hauptanwendungen besteht gerade darin, dass man in Tieftemperaturanlagen

gewonnenes flüssiges Helium zum Kühlen ganzer Apparaturen auf eine Temperatur von wenigen Kelvin benutzt. Wird Helium auf unter 2 Kelvin abgekühlt, so besitzt die Flüssigkeit eine ungewöhnliche Eigenschaft, die als superflüssig bezeichnet wird: Ein Rotor, der in einem kalten Heliumbad gedreht wird, erfährt keine Reibung und kann ungebremst laufen. Seit den neunziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts fragten sich Physiker, ob atomare Heliumcluster auch eine superflüssige Phase aufweisen. Im Jahr 1998 wurden experimentelle Ergebnisse veröffentlicht, die nahe legen, dass einzelne kleine Moleküle wie SF_6 oder OCS sich reibungsfrei und ungehindert in Clustern aus einigen hundert Heliumatomen drehen und bewegen können. Die Ergebnisse werden inzwischen allgemein als Nachweis der Superflüssigkeit von Heliumclustern oder -nanotröpfchen bei einer Temperatur von 0,4 Kelvin akzeptiert.

Heliumnanotröpfchen werden in einer Molekularstrahlapparatur mittels Expansion von Heliumgas sehr hohen Drucks (100 bar) durch eine sehr kalte Düse (10 bis 15 Kelvin) erzeugt. Neben der Verfolgung fundamentaler Fragestellungen bieten die Tröpfchen die Möglichkeit der Einlagerung einzelner Atome und Moleküle, die dann auf die Temperatur von 0,4 Kelvin abgekühlt werden, sich frei innerhalb der Tröpfchen bewegen können und dort mit anderen eingelagerten Molekülen Reaktionen durchführen und neue Verbindungen eingehen. Die tiefe Temperatur erlaubt das „Einfrieren“ ungewöhnlicher Strukturen. So wurde bisher die Bildung ungewöhnlicher Molekülketten beobachtet, z.B. formen bis zu 10 HCN Moleküle in superflüssigen Tröpfchen eine fortlaufende Kette. Organische Moleküle wie Pentazen und etliche Porphyrine konnten bei 0,4 Kelvin in Helium untersucht werden, und bei Messungen am Perylenderivat PTCD, einem interessanten Baustein für die molekulare Elektronik, wurde die Bildung von Dimeren festgestellt. Alkalimetallatome, die auf das Heliumtröpfchen gesetzt werden, bleiben an der kalten Oberfläche, wo sich mehrere von ihnen zu neuen Aggregaten verbinden können. Wir beobachteten dabei neue Verbindungen, bei denen mehrere Elektronenspins parallel ausgerichtet sind, eine Konstellation, die bei Raumtemperatur nicht stabil ist.

Unsere Untersuchungen werden mit Lasern vorgenommen, wobei Methoden der Absorptionsspektroskopie, der Fluoreszenzlichtmessung, der Laserionisation mit nachfolgender Massenspektroskopie und Lasermehrfachresonanzen eingesetzt werden. Das Cartoon-Bild (Abb. 1) veranschaulicht, wie aus einer kalten Düse (7 Kelvin) He-

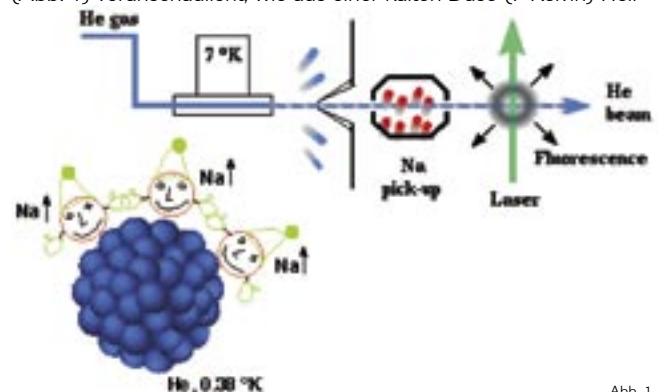


Abb. 1

umgas strömt, Tröpfchen bildet, die durch eine konische Begrenzung in ein Hochvakuum treten, dort in einer Pick-up-Zelle Natriumatome aufsammeln und danach einen Laserstrahl kreuzen. In diesem Experiment wurde die Formation von Natriumtrimeren mit drei parallelen Elektronenspins auf dem kalten Tröpfchen entdeckt.

In Zukunft werden wir größere kalte Metallaggregate herstellen. Bei einigen Metallen ist das Einsetzen von Supraleitung bei tiefen Temperaturen bekannt, d.h. sie setzen dem elektrischen Strom keinen Widerstand entgegen. Ungeklärt ist noch, ob das zugrunde liegende Phänomen, die Paarbildung von Elektronen durch Wechselwirkung mit dem Metallgitter (Cooper-Paare), auch in Metallclustern ein Analogon findet. Eine Klärung dieser Frage wäre nicht nur von grundlegendem Interesse, sondern würde sicher in der Nanotechnologie Anwendungen finden. Dr. Carlo Callegari und Diplomstudent Johann Nagl arbeiten an den Vorbereitungen zu entsprechenden Experimenten. (Abb. 2)



Abb. 2: Johann Nagl und Carlo Callegari bei Justierarbeiten an einem Laser. (Foto W. Ernst)

Entwicklung der Materiewellenoptik als Methode der zerstörungsfreien Analyse nanostrukturierter Materialien

Nanostrukturierte Materialien erfordern analytische Messmethoden, die eine der Größe entsprechende Auflösung aufweisen. Die in den achtziger Jahren entwickelte Rastertunnelmikroskopie markierte einen Durchbruch für die Sichtbarmachung von Oberflächenstrukturen im Nanometer-Größenbereich. Methoden wie die Raster-Kraftmikroskopie und optische Nahfeldtechniken folgten. Die Elektronenmikroskopie macht sich die Tatsache zunutze, dass Teilchen auch Wellennatur besitzen und mit einer ihrem Impuls entsprechenden Wellenlänge an kleinen Strukturen gebeugt werden. Da Elektronen eine sehr geringe Masse besitzen, können Elektronenstrahlen einer den Nanostrukturen entsprechenden Wellenlänge gut hergestellt werden. Die Elektronenmikroskopie ist daher sicher eine der universellsten Untersuchungsmethoden. Manche Materialien, insbesondere aus dem biologischen Bereich, sind allerdings sehr empfindlich und werden beschädigt oder zerstört, wenn sie hochenergetischen Elektronen ausgesetzt werden. Neutrale Teilchenwellen niedriger Energie gehen sanfter mit diesen Stoffen um. So wurde die Idee geboren, leichte und chemisch inerte Atome zu einem Strahl einheitlicher Geschwindigkeit zu formieren und Fokussieroptiken für ein neues Teilchenmikroskop zu entwickeln. Heliumatome aus

einer Düsenstrahlquelle besitzen eine Teilchenwellenlänge von ungefähr 0,1 nm und können durch eine „Optik“ aus Zonenplatten und gekrümmten Reflektoren fokussiert werden. Das Projekt der Entwicklung eines Helium-Materiewellenmikroskops wird von der Europäischen Union in ihrem 6. Rahmenprogramm gefördert. Neben dem Institut für Experimentalphysik nehmen 5 andere europäische Partnergruppen teil. Frau Dr. Bodil Holst (s.a. Rubrik Jungforscher in diesem Heft) ist Koordinatorin, Startdatum ist der 1. Juli 2004, und das so genannte Kick-off Meeting mit allen beteiligten Gruppen fand am 14. und 15. Juli 2004 im Institut für Experimentalphysik statt. Erste Anwendungen des Heliummikroskops für die Untersuchung von Biomaterialien sind geplant und die Unterstützung des FWF wurde soeben zugesagt. In weiterer Zukunft möchten wir zusätzlich laseroptische Methoden hoher Ortsauflösung in unser Messprogramm aufnehmen.

Weitere Informationen: <http://iep.tu-graz.ac.at/>

Atomic and Molecular Beam Techniques for the Generation and Characterization of New Building Blocks of Nanosize Materials

Aggregates of atoms or molecules, intermediate in size between individual atoms and small pieces of bulk matter, are called clusters. The fundamental physics and chemistry of clusters has been of interest for the last two decades with questions ranging from their nuclear geometry and electronic structure to their chemical reactivity. At what size do clusters start to behave like small samples of condensed material? Can clusters be used as building blocks of new materials? While these questions originally derived from scientific curiosity, in the last decade a new area of technology has begun: The art of nanofabrication developed which has created tiny pieces of material and organized structures consisting of a small number of atoms or molecules. With shrinking size, quantum effects have become important. Fortunately, nanoscience can resort to the results of cluster research with respect to the fundamental issues.

At different temperatures, matter exhibits different phases. Formerly, samples of a size that could be called infinite in comparison to the atomic distances, were required to apply strict definitions of phases. When it was discovered that clusters could be in a state of "regular geometric" shape or in a state of fluctuating internuclear distances, definitions of "solid" and "liquid" had to be modified such as to be applicable to finite size samples. Helium in bulk size is known to have a superfluid phase at temperatures below 2 Kelvin. An exciting challenge of the last 10 years has been the experimental and theoretical investigation of finite size samples of helium (or helium nanodroplets). What does the term "superfluidity" mean when applied to a nanometer sized sample of helium? While we actively pursue these fundamental questions by investigating helium nanodroplets that are generated in molecular beam experiments, we also use the cold nanodroplets as a 0.4 Kelvin environment for the aggregation of other atoms and molecules to form new exotic dimers and oligomers that may become building blocks of new materials.

While scanning tunnelling microscopy and electron microscopy are very powerful techniques for the investigation of most nanosize materials some samples of biological or geological importance are too sensitive to be exposed to high energy electrons. Helium atom beams of low energy and a de Broglie wavelength of 0.1 nm provide a non destructive method. We are involved with the development of a helium microscope that employs matter wave optics like curved reflectors and zone plates as matter wave optics.