

Faszination von Quantenmaterie am absoluten Nullpunkt – Nobelpreis für Experimente zur Bose-Einstein Kondensation

Mit dem Physik-Nobelpreis des Jahres 2001, der im Dezember an die Amerikaner Eric Cornell und Carl Wieman sowie an den in den USA forschenden Deutschen Wolfgang Ketterle (Abb. 1) verliehen wurde, wird der große experimentelle Durchbruch der Bose-Einstein-Kondensation von ultrakalten atomaren Gasen gewürdigt [1]. Die Möglichkeit, reine Quantenmaterie am absoluten Nullpunkt unter idealen Bedingungen erforschen zu können, hat seit den ersten erfolgreichen Experimenten im Jahre 1995 ungeahnte Möglichkeiten eröffnet und das Tor zu einem neuen Arbeitsgebiet weit geöffnet.

Vorhersage von Bose und Einstein

Teilchen mit geradzahligem Spin haben eine Vorliebe für Quantenzustände die bereits besetzt sind und gesellen sich daher als „Bosonen“ gerne zu identischen Teilchen in gleichen Quantenzuständen. Diese Eigenschaft legte der Indische Physiker Satyendra Bose für Lichtquanten bereits im Jahre 1924 seinem statistischen Ansatz zur Herleitung des Planckschen Strahlungsgesetzes zu Grunde. Er sandte seine Resultate an Einstein, der die große Bedeutung dieser Arbeit erkannte, sie übersetzte und für ihre Veröffentlichung sorgte. Einstein erweiterte die Theorie dann auf materielle Teilchen und sagte einen Phasenübergang voraus, bei dem es bei Abkühlung unter eine kritische Temperatur T_c zu einer makroskopischen Besetzung des Grundzustands kommen sollte [2]. Dieser Phasenübergang zu einem Bose-Einstein-Kondensat (BEC) ist rein quantenstatistischer Natur, denn er ist nicht auf Wechselwirkungen der Teilchen untereinander zurückzuführen und kann somit im Prinzip auch in einem perfekten idealen Gas auftreten.

Das Auftreten eines BEC gilt als Erklärung für die Suprafluidität von flüssigem Helium unterhalb von 2,2 K. Diese von Fritz London bereits im Jahre 1938 aufgestellte Hypothese wurde durch Experimente von Penrose und Onsager in den fünfziger Jahren untermauert, die den Zusammenhang der Suprafluidität mit einer makroskopischen Besetzung des Grundzustandes zeigten. Wegen der starken Wechselwirkung der Heliumatome untereinander beträgt der Kondensatanteil aber selbst am absoluten Nullpunkt nicht mehr als 10% und ein komplettes Verständnis der äußerst komplexen Situation ist kaum möglich.

Spannende Jagd zum absoluten Nullpunkt

Bereits in den 80er Jahren war BEC ein wichtiges Ziel von Experimenten, die an kryogen gekühlten atomaren Wasserstoffgasen durchgeführt wurden. Erstmals konnte in der Arbeitsgruppe von Daniel Kleppner und Thomas Greytak am Massachusetts Institute of Technology (MIT) die magnetische

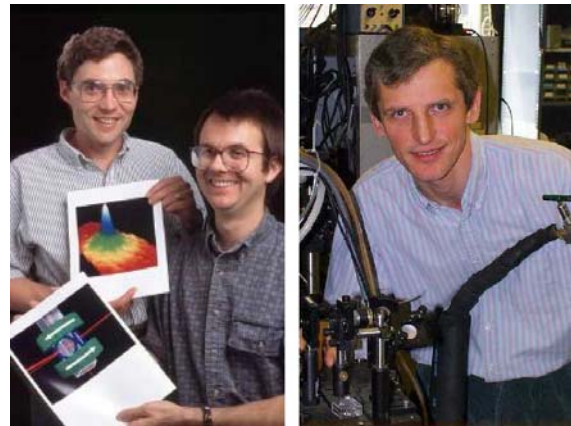


Abb.1: Die Nobelpreisträger Carl Wieman, Eric Cornell und Wolfgang Ketterle. (Fotos: JILA u. MIT)

Speicherung und Kühlung durch Abdampfen von energetischen Teilchen demonstriert werden. Das große Potenzial dieser Verdampfungskühlung war damals schon erkennbar, doch sind Wasserstoffgase experimentell so schwer zugänglich, dass die Experimente damals nicht zum BEC-Erfolg führten. Einen wesentlich besseren Zugang ermöglichen Gase von Alkali-Atomen, die mit ihren Resonanzlinien im sichtbaren oder nahen infraroten Spektralbereich sehr gut mit Laserlicht ansprechbar sind. Zu jener Zeit wurden auch die Schlüsselmethoden der Laserkühlung gerade entwickelt und man konnte Alkaligase bereits in den Temperaturbereich von einigen Millionstel Kelvin kühlen und in optischen und magnetischen Fallen speichern. Zunächst erschien die Anwendbarkeit von Verdampfungskühlung auf Alkali-Atome aber als sehr fraglich, denn der Grundzustand eines Ensembles von ultrakalten Alkali-Atomen ist ja ein kleines metallisches Klümpchen und kein Gas. So könnte man erwarten, dass die zur Verdampfungskühlung notwendigen thermalisierenden Stöße ein solches Gas zerstören würden. Tatsächlich ist die Laserkühlung von dichten Gasen auch von Verlustprozessen durch ultrakalte Stöße begrenzt.

Zu Anfang der 90er Jahre wurden gezielte Experimente zur Erzeugung eines BEC initiiert, da man die gute Chance, die Alkali-Atome nach Vorkühlung durch Laserlicht zu diesem Zweck boten, zu erkennen begann. Innerhalb von wenigen Jahren führte dies zu einem dramatischen Wettlauf, der im Jahre 1995 entschieden werden sollte. Am Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA) trieb der junge Physiker Eric Cornell in eigener Arbeitsgruppe, aber in enger Zusammenarbeit mit seinem erfahrenen Kollegen Carl Wieman ein BEC-Experiment voran. Am MIT wurde Wolfgang Ketterle von seinem Mentor David Pritchard die große Chance gegeben, dessen Laserkühllabor zu übernehmen und die Experimente in völlig eigener Regie zum BEC zu führen. Randall Hulet, einst Doktorand von Kleppner am MIT, begann an der Rice University in Houston seine BEC Experimente. Dabei wurde auf

verschiedene Pferde gesetzt: Cornell und Wieman kühlten Rubidium, während Ketterle Natrium verwendete und Hulet mit Lithium arbeitete.

Zu Beginn dieser gezielten BEC-Experimente war über die Wechselwirkungen in einem ultrakalten Gas fast nichts bekannt. Bei sehr niedrigen Energien ist ein einziger Parameter für die quantenmechanische Wechselwirkung entscheidend, die s-Wellen-Streulänge. Über die Streulängen der verwendeten Atomsorten wusste man zunächst nichts, doch entscheidet sie über Wohl oder Wehe bei den Experimenten. Bei positiver Streulänge ist die effektive Wechselwirkung repulsiv und ein beliebig großes Kondensat kann als stabiler Zustand existieren. Eine negative Streulänge dagegen führt wegen attraktiver Wechselwirkung zu einem Kollaps des Systems, so dass nur sehr kleine Kondensate entstehen können. Die Entscheidung für eine Atomsorte war damals also zunächst ein Glücksspiel für die Experimentatoren mit ungewissem Ausgang. Erst im Laufe der Experimente verdichteten sich durch genauere spektroskopische Untersuchungen der atomaren Wechselwirkungen die Hinweise auf eine positive Streulänge von Rubidium und Natrium, aber eine negative Streulänge von Lithium.

Zur Erzeugung eines BEC wird generell ein zweistufiges Verfahren verwendet, bei dem zuerst Methoden der Laserkühlung zur Anwendung kommen und eine ultrakalte Atomwolke mit typischerweise 10^9 Teilchen in einem Volumen von einigen Kubikmillimetern bei Temperaturen in der Größenordnung von $10\mu\text{K}$ bereit gestellt wird. Dieses Ensemble wird dann in eine magnetische Falle transferiert, wo mit dem nachfolgenden Abdampfen von Atomen höherer Energien die zweite Stufe der Kühlung stattfindet. Letzteres wird durch energieselektive Hochfrequenzübergänge erreicht, die dem fortschreitenden Kühlvorgang dynamisch angepasst werden. Diese erzwungene Verdampfungskühlung kann äußerst effizient sein, doch benötigt sie geeignete Startbedingungen, um überhaupt zünden zu können. So muss die Laserkühlung für diesen Zweck gut optimiert werden, und ein besonders kritischer Punkt bei den Experimenten ist der Übergang zwischen den beiden Kühlstufen. So mussten die drei Arbeitsgruppen in ihrem Wettlauf auf dem Weg zur BEC verschiedene Schlüsseltechniken entwickeln, die heute zum Standard-Repertoire der Experimentatoren auf diesem Gebiet gehören.

Im Jahre 1994 trat das Rennen dann in seine entscheidende Phase. Die Teams in Boulder und am MIT konnten erstmals überzeugende Resultate für die Verdampfungskühlung von Alkali-Atomen vorlegen. Für beide gab es aber noch eine letzte Hürde zu nehmen: In den verwendeten Magnetfallen bestand ein „Loch“, das bei fortschreitender Abkühlung zu großen Verlusten von Atomen führte. An einem Nulldurchgang des Magnetfeldes, wie er in den verwendeten Quadrupolfallen existiert, können die

Atome ihren Spin umkehren und sich so von magnetisch gespeicherten Atomen in nicht gefangene Atome verwandeln. Dieses Loch konnten Cornell und Wieman durch ein zusätzliches rotierendes Magnetfeld schließen, während Ketterle hierzu einen zusätzlichen Laser verwendete.

Im Mai 1995 gelang dann der große Durchbruch, die Suche nach dem „heiligen Gral“ des Arbeitsgebiets war schließlich erfolgreich: Mit ca. zwanzigtausend Rubidium-Atomen konnten Cornell und Wieman bei einer Temperatur von ca. 200nK erstmals die Bose-Einstein-Kondensation in einem ultrakalten Gas beobachten [3]; siehe Abb. 2. Wenige Monate später konnte Ketterle nachziehen und ein etwa hundert mal größeres Kondensat von Natrium-Atomen erzeugen [4]. Auch Hulet, der an Lithium trotz der negativen Streulänge festgehalten hatte, erzielte noch im gleichen Jahr Resultate, die auch auf ein Lithium-Kondensat hindeuteten, doch konnte er erst etwas mehr als ein Jahr später eindeutige Resultate für das sehr kleine Kondensat von weniger als tausend Atomen vorlegen [5].

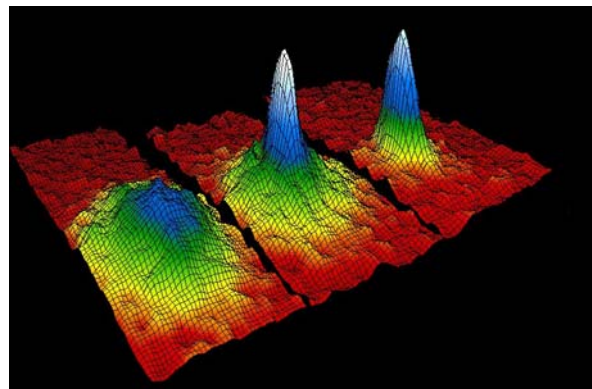


Abb.2: Erste Beobachtung der Bose-Einstein-Kondensation in dem Experiment von Cornell und Wieman [3]. Kurz vor Auftreten des Kondensats zeigt die Geschwindigkeitsverteilung eine thermische Wolke (links); nach dem Phasenübergang bei ca. 200nK entsteht eine sehr schmale zentrale Komponente, die dem quantenmechanischen Grundzustand des Systems entspricht (Mitte); bei fortschreitender Verdampfungskühlung verschwindet der thermische Anteil, so dass ein reines Kondensat präpariert wird (rechts). Um die Geschwindigkeitsverteilung zu messen, wird die Magnetfalle plötzlich abgeschaltet, und nach einer freien Expansion von 50ms wird die resultierende Verteilung im Ortsraum (Bildausschnitt hier $0,2\text{mm} \times 0,27\text{mm}$) durch Laserabsorption abgebildet. (Bild JILA)

Experimente mit Bose-Einstein Kondensaten

Nach diesen ersten erfolgreichen Experimenten war sofort klar, dass diese herausragenden Experimente das Tor zu einem neuen Arbeitsgebiet weit geöffnet hatten, und sehr schnell wurde auch über die große Würdigung aus Stockholm spekuliert. Zunächst wurde allerdings die Laserkühlung mit dem

Nobelpreis bedacht, der 1997 an Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji und William D. Phillips verliehen wurde [6]. Als wie reichhaltig und spektakulär sich das Arbeitsgebiet der BEC innerhalb von wenigen Jahren erweisen würde, übertraf dann selbst die kühnsten Erwartungen. Cornell, Wieman und Ketterle brannten innerhalb von kürzester Zeit ein wahres Feuerwerk von aufregenden Experimenten ab, bevor andere Teams nach fast zwei Jahren nachzuziehen begannen. Auch Kleppner und Greytak, deren Arbeiten am atomaren Wasserstoff dem Arbeitsgebiet so viele Impulse gegeben hatten, war 1998 erfolgreich. Nach einer entscheidenden Verbesserung der Apparatur konnte durch Verdampfungskühlung nach kryogener Vorkühlung (d.h. als einziges Experiment ohne Laserkühlung!) ein Wasserstoff-BEC erzeugt werden [7]. Das Arbeitsgebiet ist seit diesen ersten erfolgreichen Experimenten explosionsartig angewachsen und hat sich als so reichhaltig erwiesen, dass die inzwischen mehr als 30 Teams, die weltweit experimentell mit Bose-Einstein-Kondensaten arbeiten, wissenschaftliches Neuland mit derzeit noch unabsehbaren Grenzen vor sich haben.

Was macht die Forschung mit BEC so spannend und so ergiebig? Um diese Frage zu beantworten, sollte man sich deutlich machen, dass der Wissenschaft mit solchen Kondensaten erstmals makroskopische Quantenzustände schwach wechselwirkender Teilchen zur Verfügung stehen, die Vielteilchen-Quantenphysik in reinster Form zum anfassen, anschauen und verstehen ermöglichen. Solche Quantensysteme bieten einzigartige Möglichkeiten zur Kontrolle und Manipulation durch elektromagnetische Felder sowie zur empfindlichen Diagnose mit Laserlicht und haben sich noch dazu auch als verblüffend robust erwiesen. Die relativ schwache Wechselwirkung der Teilchen untereinander ermöglicht theoretische Zugänge zum tiefen Verständnis aller Phänomene, wie sie in stark wechselwirkenden Systemen wie Helium-Supraflüssigkeiten einfach nicht möglich sind. So hat sich die Wechselwirkung zwischen Theorie und Experiment auf dem Arbeitsgebiet der BEC als extrem fruchtbar erwiesen und die Ausstrahlung in viele Arbeitsgebiete der Physik ist enorm. Eine Reihe von spektakulären Experimenten kann dies belegen, wie die beiden im folgenden diskutierten Entwicklungen exemplarisch zeigen.

Der Unterschied zwischen einem Laser und einer Glühlampe ist offensichtlich. Ein Laser beruht auf einem makroskopischen Quantenzustand von Photonen in einem optischen Resonator. Durch Auskopplung entsteht ein kohärenter Laserstrahl mit Eigenschaften, die Strahlen aus thermischen Lichtquellen weit überlegen sind. Ist das BEC aber überhaupt kohärent und lässt sich analog dazu auch aus einem BEC ein Anteil auskoppeln, der dann einen kohärenten Atomstrahl bildet? Diese Fragen wurden zuerst von Ketterle experimentell beantwortet; siehe Abb. 3. In einem ersten Versuch spaltete er das

Kondensat mit einem Laser und beobachtet das Interferenzstreifenmuster, das die beiden entkoppelten Kondensate nach Überlagerung in Analogie zum Youngschen Doppelspaltversuch zeigten [8]. Dann bestrahlte er das Kondensat in der Magnetfalle mit einem Hochfrequenzpuls, der einen Teil der Atome im Kondensat in einen nicht gefangenen Zustand transferierte. Diese ausgekoppelten Atome waren als kohärente Materiewellenpakete die ersten Pulse eines Atomlaserstrahls [9]. Atomlaser wurden seitdem auch mit einigen anderen Auskoppelmechanismen realisiert und die perfekte Kohärenz dieser Atomlaserstrahlung demonstriert. Für die Zukunft verspricht die Weiterentwicklung von Atomlasern eine einzigartige Materiewellenquelle für Experimente der Atomoptik sowie für Präzisionsmessungen.

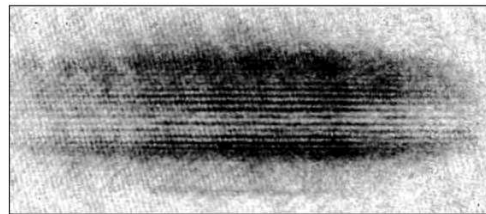


Abb.3: Nachweis der Kohärenz und erster Atomlaser in Ketterles Experimenten am MIT. Das obere Bild zeigt ein Interferenzmuster von zwei frei expandierenden Bose-Einstein-Kondensaten, die sich nach Abschalten der Falle überlagern [8]. Dies ist ein direkter Nachweis der makroskopischen Kohärenz eines BEC. Die destruktive Interferenz von Atomen („Atom + Atom = nichts!“) ist eine drastische und verblüffende Demonstration der Wellennatur von Materie. Das untere Bild zeigt die Auskopplung von kohärenten Materiewellenpaketen aus einem BEC [9], die sich unter dem Einfluss der Gravitation nach unten bewegen. Diese Experiment stellt eine erste Realisierung eines gepulsten Atomlasers dar. Die auffällige sichelförmige Gestalt der Atomlaserpulse entsteht durch die Wechselwirkung des fallenden Pulses mit dem BEC kurz nach der Auskopplung. (Bilder: MIT)

Wenn Rotation und Drehimpuls ins Spiel kommen, zeigen makroskopische Quantenzustände ein sehr interessantes Verhalten. Wegen der Quantisierungsbedingung, dass die Umlaufbahn bei jeder kreisförmigen Bewegung einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge entsprechen muss, kann sich die Drehbewegung in einer Quantenflüssigkeit nicht kontinuierlich ändern, so dass zwangsläufig Singularitäten auftreten. Solche quantisierten „Vortices“ spielen eine wesentliche Rolle bei Phänomenen der Suprafluidität und der Supraleitung, so dass die Untersuchung ihrer Dynamik an experimentell zugänglichen Modellsystemen auch für diese Gebiete von größtem Interesse ist. Die erste Realisierung eines Vortex in einem Bose-Einstein-Kondensat überhaupt gelang dem Team von Cornell und Wieman vor gut zwei Jahren [10]. Kürzlich gelang es Ketterles Arbeitsgruppe, ein extrem großes BEC so in Rotation versetzen, dass sogar mehr als 100 Vortices beobachtet wurden [11]; siehe Abb. 4. Ketterle konnte so die für Supraleiter des Typs II vorhergesagte Ausbildung eines regelmäßigen „Abrikosov“-Gitters direkt an einem BEC nachweisen.

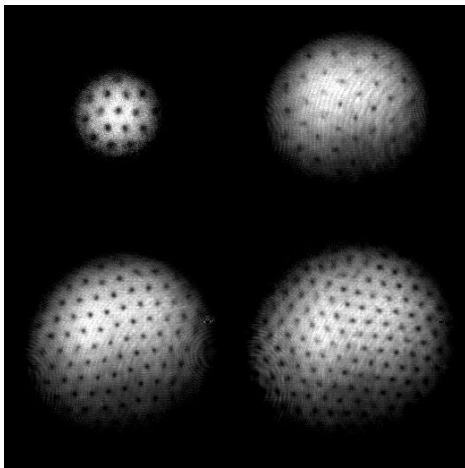


Abb.4: Beobachtung von regelmäßigen Vortex-Anordnungen („Abrikosov-Gitter“) am MIT [11]. Sie bilden sich nach „Rühren“ der suprafluiden Quantenflüssigkeit eines BEC mit einem Laserstrahl. (Bild: MIT)

Aktuelle Entwicklungen

Selbst wenn man von dem Nobelpreis einmal absieht, war das Jahr 2001 für das Arbeitsgebiet ein außergewöhnlich fruchtbares: So betraten zum Beispiel zwei neue Spezies kürzlich die Bühne: BEC von metastabilen Helium-Atomen konnte fast zeitgleich von zwei Arbeitsgruppen in Paris realisiert werden [12]. Besonders bemerkenswert daran ist die Tatsache, dass die Atome sich in Bezug auf ihre äußeren Freiheitsgrade im absoluten Grundzustand befinden, aber dennoch als metastabile Atome eine enorme innere Energie haben. Diese besondere Eigenschaft kann z.B. zu einem extrem präzisen und empfindlichen Nachweis von Teilchenkorrelationen benutzt werden. Auch Kalium-Atome konnten

inzwischen von einer Arbeitsgruppe in Florenz durch Mischung mit einem ultrakalten Rubidium-Gas kondensiert werden [13]. Die Kombination von verschiedenen Systemen führt zu einer immensen Erweiterung der Palette von experimentellen Möglichkeiten. Dies belegen auch eindrucksvoll die Experimente an der Rice-University in Houston und an der Pariser ENS, die an Gemischen von bosonischen mit fermionischen Systemen durchgeführt wurden [14]. Zum ersten Mal gelang es im Jahr 2001 auch, ein BEC direkt in einer optischen Falle zu erzeugen [15]. Optische Fallen sind besonders dann interessant, wenn die herkömmliche Magnetfallenmethode nicht angewandt werden kann, wie z.B. bei Cäsium (siehe unten) und diamagnetischen Atomen. Eine sehr vielversprechende Entwicklung ist auch die Erzeugung von BEC in Mikrofallen, die im Sommer 2001 zwei Arbeitsgruppen in Deutschland praktisch zeitgleich gelang [16]. Dies bietet völlig neue Möglichkeiten für integrierte atomoptische Systeme, die derzeit stark im Kommen sind.

Auch in Österreich wird intensiv auf dem Gebiet der BEC geforscht. Die Arbeitsgruppe um P. Zoller und I. Cirac¹ am Inst. für Theoretische Physik der Univ. Innsbruck forscht von Beginn an auch auf diesem Gebiet. Kürzlich konnte in einem spektakulären Experiment eines Münchner Teams der von Zoller und Mitarbeitern bereits 1998 vorhergesagte Phasenübergang eines suprafluiden Systems zu einem in der Festkörperphysik bekannten Mott-Isolator beobachtet werden [17]. Dazu wird das BEC aus der Magnetfalle in eine periodische Potenzialstruktur transferiert, die als dreidimensionales „optisches Gitter“ mit Laserlicht realisiert wird. Neben diesem Brückenschlag zur Festkörperphysik ist auch die Anwendung von BEC als Speicher für Quanteninformation von größtem Interesse und daher wichtiger Forschungsgegenstand der Innsbrucker Theoriegruppe. Experimentell befasst sich die neue Arbeitsgruppe des Autors am Inst. für Experimentalphysik der Univ. Innsbruck mit BEC. Neben der Erzeugung eines Rubidium-Kondensates für Experimente in optischen Gittern und der Untersuchung fermionischer ⁶Li-Quantengase wird auch an der Realisierung eines BEC von Cäsium-Atomen in einer neuartigen optischen Falle gearbeitet, die auf leistungsstarken CO₂-Lasern basiert. Wegen exotischer Wechselwirkungseigenschaften läßt sich Cäsium mit der herkömmlichen Magnetfallenmethode nicht zu einem BEC kondensieren, da hierbei zu starke Verlustprozesse auftreten. Die Besonderheiten von Cs bieten aber auch den Schlüssel zu neuen Möglichkeiten, wie zur weiten Abstimmung der quantenmechanischen Wechselwirkung über externe Magnetfelder sowie zur Erzeugung eines bisher nicht realisierten Kondensats aus ultrakalten Molekülen.

¹ jetzt am MPI für Quantenoptik, Garching

Die experimentellen Möglichkeiten und Herausforderungen auf dem Arbeitsgebiet, das durch herausragenden Leistungen von Cornell, Wieman und Ketterle erschlossen wurde, wachsen mit atemberaubender Geschwindigkeit. Der Phantasie für weitere Entwicklungen und Entdeckungen sind hier derzeit keine Grenzen gesetzt.

Literatur:

- [1] *The Royal Swedish Academy of Sciences*, Advanced info. on the Nobel Prize in physics 2001, <http://www.nobel.se/physics/laureates/2001/phyadv.pdf>
- [2] *S.N. Bose*, *Z. Phys.* **26**, 178 (1924); *A. Einstein*, *Sitzungsber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss.* **1924**, 261 (1924); *ibid.* **1925**, 3 (1925).
- [3] *M.H. Anderson et al.*, *Science* **269**, 198 (1995).
- [4] *K.B. Davis et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969 (1995).
- [5] *C.C. Bradley et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1687 (1995); *ibid.* **78**, 985 (1997).
- [6] *S. Chu*, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 685 (1998); *C. Cohen-Tannoudji*, *ibid.* 707 (1998); *W.D. Phillips*, *ibid.* 721 (1998).
- [7] *D.G. Fried et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3811 (1998).
- [8] *M.R. Andrews et al.*, *Science* **275**, 637 (1997).
- [9] *M.-O. Mewes et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 582 (1997).
- [10] *M.R. Matthews et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 2498 (1999).
- [11] *J.R. Abo-Shaeer et al.*, *Science* **292**, 476 (2001).
- [12] *A. Roberts et al.*, *Science* **292**, 461 (2001); *F. Pereira Dos Santos et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3459 (2001).
- [13] *G. Modugno et al.*, *Science* **294**, 1320 (2001).
- [14] *A.G. Truscott et al.*, *Science* **291**, 2570 (2001); *F. Schreck et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 080403 (2001).
- [15] *Barret et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 010404 (2001).
- [16] *W. Hänsel et al.*, *Nature* **413**, 498 (2001); *Ott et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 230401 (2001).
- [17] *M. Greiner et al.*, *Nature* **415**, 39 (2002); *D. Jaksch et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3108 (1998).

Rudolf Grimm
Institut für Experimentalphysik
Universität Innsbruck
Technikerstr. 25, A-6020 Innsbruck
<http://exphys.uibk.ac.at/ultracold>

Mitteilungsblatt der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Jänner 2002