

中性アルカリ原子気体の BEC *)

—Cornell, Ketterle, Wieman のノーベル賞受賞によせて—

京都大学大学院理学研究科 大見哲巨

(2002 年 2 月 13 日受理)

1 はじめに

2001 年度のノーベル物理学賞はアルカリ原子気体でのボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) を実現した E.A.Cornell、C.E.Wieman と W.Ketterle に与えられた。BEC そのものは Bose と Einstein により 1924 年に理想ボーズ気体で起こることが予言され、超流動 ^4He でその存在が確かめられた。また、その後数多く発見された超流動、超伝導もその超流動、超伝導性の説明は基本的には BEC によりなされている。そのよう歴史のなかで概念そのものは特に新しいとは言えない BEC をアルカリ原子気体で実現したということで、なぜノーベル賞の受賞対象になったのかという疑問に答えてくださいというのが執筆を依頼された時、編集委員の方から受けた説明であった。ご依頼に対して最初少し迷うこともあったが、BEC をひとつの研究テーマとしている者としてはお引き受けして、どういう面白いことがあるかを宣伝するいい機会かも知れないと思い直した。

という私自身も 1995 年 Cornell と Wieman により Rb 気体で BEC が実現された[1]という話を聞いた時、以下のような感想を持った。それまで BEC 研究といえば、超流動 ^4He を対象とした研究があげられる。その超流動 ^4He の研究は私が学生の頃、既に物理の問題としては終わったと考える人がいたくらいで、長い歴史を持っている。新しく見つかったアルカリ原子気体の BEC では相互作用は非常に弱く、超流動 ^4He の単純化した模型として提案された GP (Gross-Pitaevskii) 方程式がこの問題では非常によい近似で成立するという。ということで、超流動 ^4He の研究結果を単に適用するだけで、アルカリ気体の BEC は簡単に解決してしまうのではないかというのが最初の頃の私が受けた印象であった。実際、研究の初期段階での理論の review が Dalfovo 達[2]によってなされているが私の主観が入っているとは思いますが超流動 ^4He を易しくした研究という印象を受ける。しかし、その後の特に実験の進歩は目覚ま

*) 本稿は、編集部の方から特にお願いして執筆していただいた記事である。

しく、私の予想はまったく外れた。それは上述の review と Ketterle 達[3]の review を読み比べると良く分かる。また、その後の研究は想像されていた以上に様々な方向へと発展し、今後もその成長は幅広く進むことが予想される。そのあたりのことについて書けば「現在の BEC 研究の新しい点、従来にない面白さ、今後の発展性」について書くようにという編集委員の方からの注文に答えることになると思うが、漫然と書いたのではあまりその内容が伝わらないと思うので、私自身が興味を持つテーマに絞って少し詳しく書いて、その雰囲気伝えたいと思う。したがって、原子レーザー等、「物性研究」と少し離れたテーマはまったく取り上げないことになる。

取り上げるテーマは

- 1 凝縮体の成長—非平衡過程
- 2 Feshbach 効果—原子間相互作用の制御
- 3 スピン（内部）自由度をもつ BEC
- 4 量子渦

である。

2 Introduction

アルカリ原子気体（Rb、Na、Li など）の BEC への転移温度は 0.1 から $1\mu\text{K}$ という極低温である。この温度はこれまで超低温の代表とされてきた ^3He 系の温度に比較して order で 3 低く、そのような低温を量子エレクトロニクス等で開発された手法を用いて実現する技術はすばらしいものがある。しかし、ここではその詳細には立ち入らないで、以後の解説のため必要な BEC 系の舞台である磁気トラップと最近開発された光トラップについて述べておく。

μK というような低温にまで気体を冷やすには原子と容器の壁との接触を断つ必要がある。BEC の実験は磁気トラップおよび光トラップを用いて真空中で、真空容器の壁とは離れた空間に気体を閉じ込めて行なわれている。

磁気トラップ

まず、レーザー冷却により原子を十分低温にまで冷やしておく。低温に冷やされた原子の運動速度は遅く、そのため磁場の方向が場所によって変化しても、運動する原子に乗った系で感じる磁場変化は十分ゆっくりとしている。このような場合、原子が持つスピンの運動について断熱定理が適用され、磁場と平行方向を向いていたスピンは磁場の方向が場所によって変化しても常に平行のままであり、また反対方向を向いていたスピンは反対のままである。原子の持つ磁気モーメン

トの方向が磁場と反対方向の状態のことを弱磁場シーキング状態と言い、この状態の原子では磁場の大きさの小さい所（大きさが極大になる静磁場は作れない）でポテンシャルが極小になる。原子はこのような磁気によるポテンシャルを用いてトラップされる。磁気トラップされた原子はさらに蒸発冷却によりエネルギーの高い原子をトラップから取り去り、温度をさらに下げ BEC を実現する。

磁気トラップされた原子のスピンはトラップするための磁場で完全に決められており、自由に動けない。したがって、凝縮体の状態は超流動 ^4He と同じように 1 成分の秩序変数 Ψ を用いて完全に記述される。また、このときアルカリ気体の密度は低く、原子間相互作用は非常に弱い、そのため超流動 ^4He で弱結合近似のモデルとして導入された次の GP 方程式がこの系では凝縮体の運動を支配する方程式として非常によい近似で成り立つ。

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = - \left(\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \mu \right) \Psi + \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} |\Psi|^2 \Psi \quad (1)$$

ここで μ は化学ポテンシャル、 m はアルカリ原子の質量、 a は原子間の S 波散乱長である。この様に磁気トラップしたアルカリ気体の BEC では秩序変数は超流動 ^4He と同じ対称性を持ち、その意味では特に新しいタイプの超流動の系とは言えないかもしれない。しかし、アルカリ原子はもともとスピンを持ち、スピンが自由に動ける状況を考えると超流動 ^4He とは違う、新しいタイプの超流動体になる。

光トラップ

スピンが自由に動ける超流動は原子をレーザー光でトラップすることで得られる。レーザー光に伴う振動電場は原子を偏極し、その結果、原子のエネルギーが下がることがある。そのような場合にはレーザー光の強度が強いところほどポテンシャルが深くなり引力ポテンシャルができる。実際、Ketterle 達 MIT グループは Na 原子気体を光トラップした BEC の実験に最初に成功した[4]。レーザー光に伴う電場によってつくられるトラップポテンシャルはスピンの依存しないので、この方法でトラップした BEC はスピンが自由に動く、スピン内部の自由度を持った超流動体になる。

3 凝縮体の成長過程

既に述べたように、磁気トラップされたアルカリ原子の密度は超流動 ^4He に比べて小さく、相互作用も非常に弱い。したがって、非平衡過程での時間変化

もゆっくりしており、超流動 ^4He では観測困難であった現象も観測できるものがある。ここではその一例として、凝縮体の成長過程の観測を紹介する。

実験は MIT グループにより行なわれた[5]。BEC の観測はトラップをはずし重力で落下してきた原子の分布を見て行なうのが普通で、凝縮体は分布の鋭いピークとして観測される。MIT グループは Na 原子を BEC の転移温度の上から下へ急速に蒸発冷却した後、時間とともに変化する鋭いピークに含まれる原子数を観測し凝縮体の成長の様子を調べた。

観測結果の一例を図 1 に示す。図に示された凝縮粒子数の時間変化についての物理は容易に理解できる。すなわち、ボーズ粒子であるアルカリ原子では非凝縮状態から凝縮状態に遷移する確率が凝縮粒子自身の数に比例し、したがって、図に示されているように凝縮粒子の数は最初、指数関数的に増加する。そして、その後は平衡状態の値へ漸近するという過程をたどる。

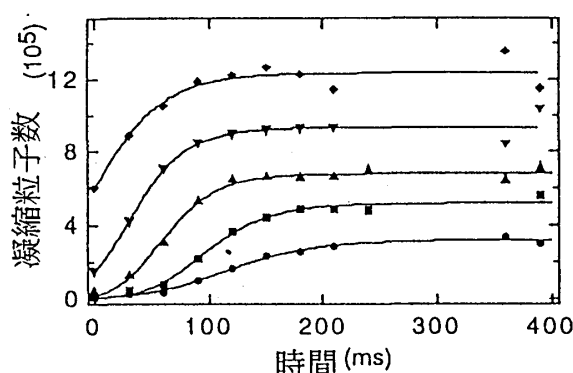


図 1. 凝縮体の成長の様子。最初は指数関数的に増加し、その後平衡状態の値へと漸近している。系の粒子数によって時定数がすこし違う。

観測によると、その過程の時定数はこのトラップ系での粒子数が 10^6 程度の時、だいたい 100msec のオーダーとなり、これは原子間相互作用から計算されたものとだいたい一致する。細かいところでは実験結果を説明しきれない箇所があるが大筋の説明は正しいと思われる。

ところで、凝縮体の成長について、まだ興味深い問題が残されている。それは図 1 の原点付近、凝縮体の芽がどのような過程を経てできてくるか、すなわち、凝縮状態の粒子の数が全粒子数と同じオーダーに達するまでの過程がどうなっ

ているかという問題である。この問題について BEC 実現以来、多くの理論が提出されたがまだ議論が収束していない。しかし、やっと最近になってこのテーマに焦点をしばった実験がなされるようになり解明の可能性が出てきた。難しい問題と思われるが理論的にも実験的にも解決の可能性があり、今後研究が進むものと思われる。

4 Feshbach 効果

Feshbach 共鳴を用いると原子間相互作用を自由に変えることができる。理論家は相互作用を自由に変化させた系を勝手に考えるが、現実の系で他の条件を変えないで相互作用のみを変えることはなかなか困難である。しかし、Feshbach 共鳴を用いるとその夢が実現できる。Feshbach 共鳴とは次のような現象である。

低温の希薄なアルカリ原子間の相互作用はエネルギーの低い原子どうしの散乱であり、(1) 式で与えたように S 波散乱長 a を用いて表せる。この散乱のチャンネルを 1 と呼ぼう。1 の散乱に対して他の散乱のチャンネル 2 が存在し、2 のチャンネルでの束縛状態が存在するとチャンネル 1 の散乱との間で共鳴が起き、散乱長 a はエネルギーとともに大きく変化することがある。特にチャンネル 2 での束縛状態が 1 のチャンネルの低エネルギー近傍に存在するとアルカリ原子系の相互作用を外場により大きく変化させることができる (Feshbach 効果では磁場の強さを変化させる)。理想的には散乱長 a は共鳴の前後でプラス無限大からマイナス無限大まで変化する。なお、この現象は粒子の統計に依らないのでボーズ系だけでなくフェルミ系でも起ることを注意しておく。

Feshbach 共鳴は最初に Na 原子気体で観測された[6]後、今までに⁸⁵Rb や K などでも観測されている。このような興味深い現象を用いてどのような物理が発展していくかはこれからの問題であるが、既に行われている実験やすぐに思い付く応用例をあげると次のようなものがある。また、K での実験はフェルミ粒子を用いて行われておりフェルミ系でも面白い現象が期待されるのでフェルミ系も含めてコメントする。

- 1) ボーズ粒子で、相互作用が引力のとき、系は不安定であることはよく知られているが、系の粒子数があまり多くない時には引力相互作用でも準安定なこともある。実際 ⁷Li 原子気体で準安定な BEC が観測された。しかし、現在多くの関心が寄せられているのは引力相互作用の BEC が崩壊する過程で、超新星の大爆発のシミュレーションにも例えられ、既にい

くつかの仕事がなされている。Feshbach 効果を用いるとこの現象を理想的に実験することができる。最初、相互作用を斥力にして安定な BEC を準備し、次に磁場をコントロールしそれを引力に変える。この実験は Feshbach 共鳴の最初の応用として既に行われており、興味深い結果が得られている[7]。

- 2) フェルミ粒子系ではその統計性のため、低エネルギー（低温）の粒子間の相互作用は弱くなり、したがって、熱平衡に達する時間が長くなり冷やすことができないという問題がある。これも Feshbach 共鳴によりある程度は克服できる見通しが出てきた。この方向に向けて実験も既に行われている。
- 3) 引力のボーズ粒子系については既に述べたがこの系で斥力を強くしていくとどのように変化するかは勿論興味がある。それ以上に、フェルミ系では引力でも斥力でも相互作用が強くなった時が面白い。クーパー対ができるか他の安定な状態になるか、クーパー対だとしたらどのような対称性のクーパー対ができるかなど興味は尽きない。

5 スピン自由度を持った BEC[8]

既に述べたように、アルカリ原子はもともとスピンを持ち、そのスピンの自由に動ける状況を考えると、スピンの内部自由度を持った超流動と言う新しいタイプの超流動が実現する。実際、MIT のグループはレーザーを用いて光学的にトラップした Na 原子気体で BEC の実験を行い、スピン状態の異なった状態への相分離などを観測した。

5.1 スピン自由度

アルカリ原子のスピンは電子のスピン S と原子核のスピン I から合成される。BEC が起こる極低温では S と I を結合させる超微細結合の強さが温度にくらべて十分大きく $F = S + I$ が原子のスピン状態を記述し、 F の大きさの違う状態が温度により混ざることはない。また、アルカリ原子にはいくつかの同位元素があり、ボーズ粒子かフェルミ粒子は原子核のスピン I によって決まる。BEC を起こす原子は勿論ボーズ粒子で、 F の大きさは整数であるが、そのなかで理論的に詳しく調べられているのは $|F| = 1$ の場合と $|F| = 2$ の場合である。 $|F| = 1$ の代表的な例が ^{23}Na と ^{87}Rb 原子であり、 $|F| = 2$ には ^{85}Rb がある。

5.2 $|F| = 1$ の超流動体

最初に $|F| = 1$ の場合を考える。このとき、秩序変数は $F_z = 1, 0, -1$ の状態を表わす $\Psi_1, \Psi_0, \Psi_{-1}$ と 3 成分を持つことになる。これは三重項超流動体である超流動 ^3He の秩序変数のスピン部分と (P 波なので軌道部分とも) まったく同じである。3 成分の秩序変数に対する運動方程式も、1 成分 GP 方程式を導いたのと同じように分子場近似すれば簡単に求まる。3 成分の BEC の特徴は相互作用を表わす非線形項にあらわれる。すなわち、相互作用項が二つあり、ひとつは(1)式で表した 1 成分の時と同じ粒子密度での結合、もうひとつがスピン密度での結合である。系がスピン空間で等方的なのでスピン密度での結合は Heisenberg 型をしている。これらの相互作用項はゲージ変換およびスピン回転に対して不変な秩序変数の四次の項を求めるという一般論からも決められる。

外部磁場が零の場合、スピン密度での結合が系の基底状態をきめる。その結合定数の正負により系は磁気モーメントを持つ強磁性状態か、持たない反強磁性状態になる。注意すべきは通常の強磁性体、反強磁性体と違って、結合定数がどんなに小さくても BEC 転移とともに系はスピンがオーダーした状態になることである。Na 原子気体は反強磁性的であることが実験で示されているし、また ^{87}Rb は強磁性的であるといわれているがまだはっきりしない。

強磁性、反強磁性いずれの場合も基底状態に位相および零磁場ではスピン空間の回転に対するエネルギーの縮退がある。したがって、Goldstone モードとして、エネルギーギャップのない音波とスピン波が存在する。このうちスピン波は磁場をかけるとラーマー振動数のギャップを持つが、音波は勿論ギャップを持たない。磁気トラップした Na でその音速が観測され 1cm/sec 程度であることが分かった。スピン波の観測には磁場を十分弱くする必要があり、まだ観測されていない。

相図

次に超流動 ^4He との違いを強調する意味でも、スピン自由度を持った BEC の特徴が現れる相図について考えることにする。相図を考えるにあたって、この系のもうひとつの特徴である、系の全スピン角運動量は保存するという事に注意する。この BEC 系は非常に希薄な系であり、相互作用も弱いということは既に述べた。さらに、全スピン角運動量を変化させる磁気双極子相互作用も非常に弱く、そのため、原子がトラップされている寿命より全スピン角運動量の減衰時間の方が長いと考えられている。したがって、最初に用意した全磁化

は磁場を変化させない限り変化しない。相図はスピンの偏極 m と温度 T による m - T 相図を考えることになる。

このとき、スピン偏極の方向は与えられているので3成分の表示は偏極の方向に量子化軸を取って 1、0、 -1 とするのが便利である。得られた結果を図2に示す。図2において、縦軸に温度 T 、横軸には m/n をとった。ただし、

n_1 、 n_0 、 n_{-1} を3成分の密度とし

て $n = n_1 + n_0 + n_{-1}$ ， $m = n_1 - n_{-1}$

である。また、Nで表される領域

は非凝縮相、C1は $F_z = 1$ の1の成分のみ凝縮している相、C2は3成分とも凝縮している相である。C1と

C2の二つの超流動相が存在し、したがって、 $m/n = 0$ または1の場合を

除いて、温度を下げると二段階の相転移が起こることになる。二段階の相

転位まだ観測されていない。

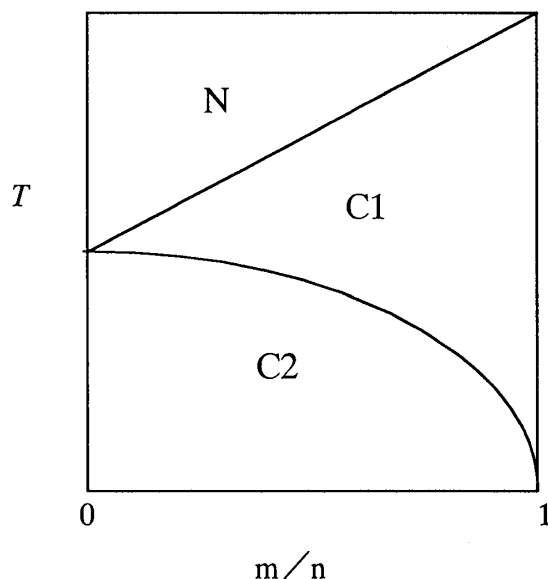


図2 $|F| = 1$ の BEC の相図

最後に $|F| = 2$ の超流動体について、理論的に調べられた結果をコメントしておく。この超流動体は等方的 D 波のクーパ対と同じ5つの秩序変数で表される。それに対応して相互作用項は3種類ある。 $|F| = 1$ のときと同じ粒子密度とスピン密度の結合に加えて、もう一つ秩序変数の四次項にゲージおよびスピン回転の変換で不変な組み合わせが存在する。また、基底状態も3種類の相互作用係数をどう取るかに依り、強磁性、反強磁性状態に加えてもうひとつ $|F| = 2$ 特有の状態が存在する。それらの状態の性質はそれぞれの状態での励起などとともに現在理論的に調べられている。

6 回転系

回転系というのは超流動 ^4He 、 ^3He の渦糸状態ことであり、超伝導では磁束状態の系に対応する。アルカリ原子気体の BEC 実現以来、理論的には BEC の系がヘリウムなどと同じように、コヒーレントな性質をもち、超流動性を示すということは予想されたが、それを実際に示すのが実験の課題であった。回転系

での実験より量子渦系の存在を示せば、それに端的に答えることができる。

超流動 ^4He の場合を考える。超流動 ^4He 中に線 1 をとり、その上で秩序変数をゼロにすると、線 1 の周りを一周すると位相が 2π 変化するような構造が作れる。位相の勾配が超流動速度を与えていることから、この構造は超流動流が線 1 の周りをまわっている渦系になる。超流動 ^4He を入れた容器を回転させると、このような渦系が多数生成され、それらが平行に並んだ渦格子ができ、流体全体が剛体的に回転する。

上述の目的を持って、磁気トラップされた BEC で渦系を生成する試みがなされたが、初めはなかなか成功しなかった。その中で、最初に phase imprinting という巧妙な方法[9]により、その生成に成功したのは Cornell 達 JILA のグループであった。phase imprinting 法というのはこの BEC 系が如何に精密に制御できるかということを示し、この系の特徴がよく出ているので簡単に紹介しておく。

^{87}Rb の核スピン I は $3/2$ で、したがって $F=1$ と $F=2$ の場合があり、磁気トラップした BEC の寿命くらいの時間では両方とも安定である。これらのスピン状態のなかで ($F=1, F_z=-1$) の状態 1 と ($F=2, F_z=1$) の状態 2 はほとんど同じ磁気モーメントを持ち、1つの磁気トラップで2成分の BEC をトラップできる。JILA のグループはこのような系を用いて巧妙な方法で渦を作った。まず、状態 1 の BEC を用意する。次に、マイクロ波を当てて励起し、エネルギーの高い状態 2 の BEC を作るが、そのときトラップの中心から少しはずしてレーザー・ビームも当て、それを中心の周りに回転させながら状態 2 の BEC を作る。このとき場所により生成される状態 2 の BEC の位相を変化させることができる。そしてマイクロ波の振動数とレーザー・ビームの回転速度をうまく調節することで、ちょうど一周した時に 2π だけ位相が変化するようにする。このように BEC の位相までコントロールして状態 2 に渦が生成される。

phase imprinting 法は巧妙ではあるが多数の渦系を生成するのには適さない。超流動 ^4He の容器を回転させるのと同じようにして多数の渦系を生成し、渦格子が作れるようになった。そのひとつは磁気トラップした BEC (1成分) に中心からずらしてレーザー・ビームを当て円筒非対称なポテンシャルをつくり、レーザー・ビームを中心の周りで回転させるという方法で、これはスプーンを入れてかきまわすのに似ているということで光スプーンによる方法[10]とよばれている。もうひとつは磁気トラップのポテンシャルをもともと円筒対称でないようにしておき、そのポテンシャルを回転させるという超流動 ^4He とほとん

と同じ方法である。渦を作るのに最初は手間取ったが、一旦成功してしまうと最近ではこんなに簡単な方法で渦が作られるようになった。特に、光学スプーンによる方法は強力で既にこの方法で 100 本を超える渦糸が生成され、その渦糸が並んだ格子が観測されている[11]。

7 終わりに

以上、最近の BEC の発展を具体的に見てもらうために、私自身が興味を持ったテーマに片寄ってしまったきらいはあるが、テーマを絞って詳しく書いてきた。最後に、今後どんな発展が期待されるか等も含めて、これまで述べたことをまとめておく。

アルカリ原子気体の BEC は超流動 ^4He とは多くの点で異なった性質を持つ新しい物質系である。それは次のような性質を持っている。

- 1) スピンの内部自由度を持っており、その意味では超流動 ^3He に近い性質を持つ。
- 2) 相互作用が弱いので非平衡過程、例えば凝縮体の成長過程が観測できると期待される。
- 3) Feshbach 共鳴を用いて相互作用を正にも負にもすることができ、またその強さも変化させることができる。
- 4) この系の特徴として、精密に制御可能な系であることがあげられる。渦生成での phase imprinting では秩序変数の位相がコントロールできることを述べたが、他にも磁場を変化させてスピンの自由度をコントロールし渦を作るなど様々なことが考えられる。
- 5) アルカリ原子にはボーズ粒子だけでなくフェルミ粒子もある。フェルミ粒子系ではフェルミ縮退の実現とその先にはクーパー対の形成の話がある。
- 6) さらに、光トラップの系ではアルカリ土類原子気体の BEC の実現が目前までできている。
- 7) アルカリ原子やアルカリ土類原子気体以外にも多くの原子や分子の気体を μK やそれ以下の温度に冷やすことできる。例えば μK まで冷やす技術が確立している原子を寒剤として用いることで他の原子や分子を低温にする(協同冷却)可能性が考えられている。

このようにヘリウム系と違って多くの種類の様々の性質をもった BEC の系

やさらにクーパー対凝縮の系が考えられ、精密に制御できることと相まって将来の発展が大いに期待できる。BEC の研究者の間で言われているが、このノーベル賞受賞は BEC 研究のゴールではなく、これからのスタートの合図であると言える。

参考文献

- 1) M. D. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Mathews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science*, 269, 198 (1996).
- 2) F. Dalfovo, S. Giorgini, L.P. Pitaevskii, and S. Stringari, *Rev. Mod. Phys.* 71, 463 (1999).
- 3) W. Ketterle, D. S. Durfee, and D. M. Stamper-Kurn, *Proceedings of the International School of Enrico Fermi, Course CXL* (IOS Press, Amsterdam, 1999), pp. 67-176.
- 4) D. M. Stamper-Kurn, M. R. Andrews, A. P. Chikkatur, S. Inoue, H.-J. Miesner, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.*, 80, 2027 (1998).
- 5) M.-J. Miesner, D. M. Stamper-Kurn, M. R. Andrews, D. S. Durfee, S. Inoue, and W. Ketterle, *Science*, 279, 1005 (1998).
- 6) S. Inoue, M. R. Andrews, J. Stenger, H.-J. Miesner, D. M. Stamper-Kurn and W. Ketterle, *Nature*, 392, 151 (1998).
- 7) J. L. Roberts, N. R. Claussen, S. L. Cornish, E. A. Donley, E. A. Cornell and C. E. Wieman, *Phys. Rev. Lett.* 86, 4211 (2001).
- 8) T. Ohmi and K. Machida, *J. Phys. Soc. Jpn.* 67, 1822 (1988).
T.-L. Ho, *Phys. Rev. Lett.* 81, 742 (1988).
- 9) M.R. Matthews, B. P. Anderson, P. C. Haljan, D. S. Hall, C. E. Wieman and E. A. Cornell, *Phys. Rev. Lett.* 83, 2498 (1999).
- 10) K.E. Madison, F. Chevy, W. Wohlleben, and J. Dalibard, *Phys. Rev. Lett.* 84, 806. (2000).
- 11) J. R. Abo-Shaeer, C. Raman, J. M. Vogels, and W. Ketterle, *Science*, 292, 476 (2001).