

イッテルビウム原子のボース・アインシュタイン凝縮とその展望 Bose-Einstein Condensation of Ytterbium Atoms and Its Prospects

高橋義朗^{1,2}

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² (独) 科学技術振興機構クレスト

Yoshiro Takahashi^{1,2}

¹ Graduate School of Science, Kyoto University,

² JST-CREST

1. はじめに

1980年代から発展してきたレーザー冷却の技術を活用することで、1995年にアルカリ原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が実現された[1]。それ以来、原子物理学、量子エレクトロニクスの分野のみならず、低温物理学、統計物理学、原子核物理学、などの研究者を巻き込んで急速な勢いで研究が進み、2001年度のノーベル物理学賞は、希薄気体アルカリ原子のBECの実現とその基礎研究に対して与えられたことは、記憶に新しい。

ボース・アインシュタイン凝縮という現象自体は、超流動ヘリウムなどにおいてすでに実現されていたわけであるが、希薄気体アルカリ原子の系では、その優れた操作性、高感度検出、理論と実験の優れた対応、などの理由から、超流動ヘリウムの系において観測されていた、もしくは予測されていた様々な現象を、極めて定量的にかつ様々な観点から研究することが可能になり、BEC現象の本質的理解を深めることができた。

また、フェルミ粒子に対しての量子縮退状態であるフェルミ縮退状態もカリウム原子[2]、リチウム原子[3]に対して実現し、極最近には、長寿命の分子BECの生成[4]や、固体の超伝導状態に対応する、原子のBCS状態の生成に成功したことが報告されている[5,6]。このように、レーザー冷却原子を用いた量子縮退の研究の勢いは、いまだ衰える気配がない。

こうしたこれまでのレーザー冷却原子を用いたBECは、そのほとんどがアルカリ原子についてである(⁸⁷Rb, ²³Na, ⁷Li, ⁸⁵Rb, ⁴¹K, ¹³³Cs) [1,7-11] 図1を参照して頂きたい。水素原子[12]及び準安定励起状態のヘリウム原子[13]のBECも報告されているが、実効的に1電子系であるという意味では、アルカリ原子と基本的には変わらない。1電子系原子の特徴は、基底状態および励起状態に電子スピンの常存在することである。そのため、磁場に対して敏感であり、また超微細相互作用が存在する。これは、磁気トラップ法を可能にし、また準分子ポテンシャルにおける超微細構造間の相互作用に基づくフェシュバハ共鳴現象による散乱長の制御を可能にし、多様な操作性をもたらしている[14]。さらに、スピン自由度をもったBEC、いわゆる、スピノールBECという新たな研究の方向性も提供している[15]。

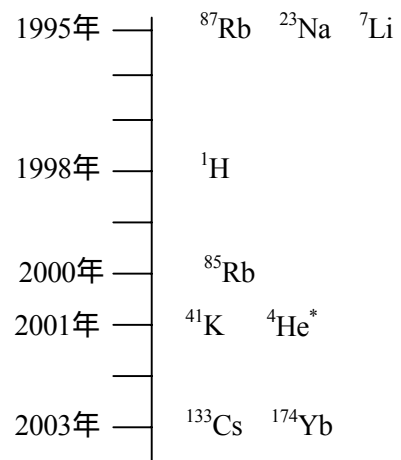


図1 これまでに実現した原子のBEC

しかし、原子レーザーなどの原子光学に応用しようとすると、電子スピンの存在は揺動磁場の影響を大きくうけてしまうことになり、高精度な原子干渉計を構築するうえでは好ましくない。また、冷却原子系を用いて量子計算機を構築しようという研究が最近世界各国で行われているが、特に、盛んに研究が行われている固体表面上での原子操作、いわゆる「原子チップ」においても原子は揺動磁場による加熱を受けて、寿命が短くなってしまふということが大きな問題となってきている。

一方、我々はこの数年、広く用いられてきたアルカリ原子ではなく、希土類のイッテルビウム (Yb) 原子のレーザー冷却の研究を行ってきた。Yb 原子はパリティ-非保存の研究や永久電気双極子モーメントの探索による時間反転対称性の破れの検証、さらに原子時計への応用など幅広く興味を持たれている原子である。Yb 原子のレーザー冷却研究を推し進めていった結果、最近、我々はこの Yb 原子の BEC を全光学的に生成することに成功した[16]。Yb 原子は、アルカリ土類原子と同様な 2 電子系の原子であり、図 2 のようなエネルギー準位構造を持つ。Yb 原子の BEC は、これまでのアルカリ原子の BEC にはない様々な魅力的な特徴を備えているため、単に BEC することができた原子種が一つ増えたという以上の意味を持っている。本稿では 1 マイクロケルビン以下のナノケルビン領域において達成した、我々の Yb 原子の BEC 生成実験とその応用に関する展望を紹介したい。

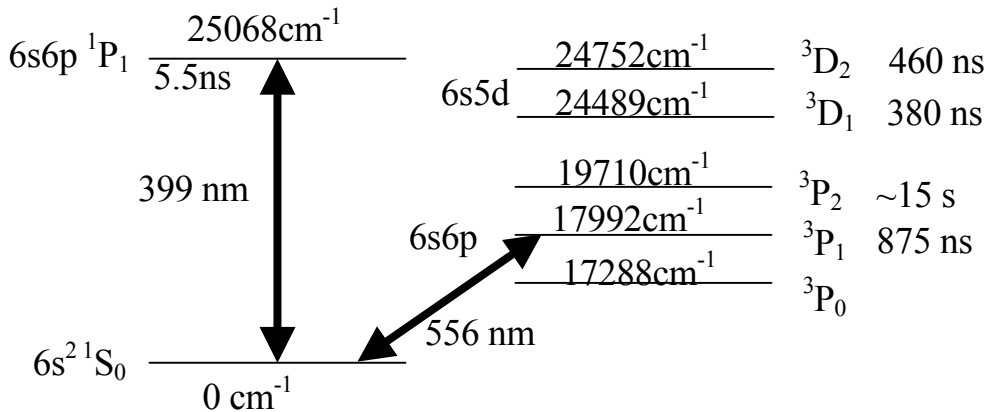


図 2 Yb 原子のエネルギー準位。2 つの最外殻電子のスピンの反対向きスピン 1 重項状態とスピンの向きが揃ったスピン 3 重項状態がある。

2. 全光学的 BEC 生成

冒頭、「レーザー冷却の技術を活用することで、BEC が実現された」と書いたが、実は、レーザー「冷却」のみによって達成されたわけではない。光の吸収を伴うレーザー冷却法は、数 μK 程度までの低温や 10^{12} cm^{-3} 程度の原子密度の原子集団を得るには大変有効な方法であるが、それ以上の低温や高密度を得る方法としては、都合が悪い。まず、温度の限界は、単一光子の反跳によって決まり、この限界温度 $T=(\hbar k)^2/(mk_B)$ は通常数 100 nK 程度になる。また、高密度集団に共鳴に近い光を入射したときには、トラップ中の原子の自然放出光を別の原子が吸収してしまい、原子間に実効的な反発力が働き、更なる高密度化が抑制されてしまう。また同時に、光誘起の原子間衝突が起こり、加熱や原子がトラップから逃げる原因となってしまうため、極めて都合が悪い。そのため、以上に挙げたアルカリ原子では、あらかじめレーザー冷却法により低温・高密度にした原子集団を、空間的に不均一な磁場と原子の磁気モーメントの相互作用による磁気トラップ法を用いて長時間トラップし、そこで高周波磁場によるスピン反転を利用して、高温の原子を選択的にトラップから逃がすことによる冷却法、

いわゆる蒸発冷却法により，通常 100 nK 程度の BEC やフェルミ縮退への転移温度を達成している．すなわち，最後の段階になって，レーザー冷却の利用をあきらめる，という選択をしたのである．

一方，最近になって，全光学的方法によって，原子の BEC やフェルミ縮退を実現できることが報告されている．これは，蒸発冷却を採用したうえで，そのトラップの「器」として光トラップを利用するというものである．すなわち，全光学的な量子縮退生成法とは，レーザー冷却により予備冷却したのち，磁気トラップではなく，光によるトラップに導入し，そこで光強度を徐々に低くしていくことにより蒸発冷却を行い，量子縮退を生成するということである．ここで，光トラップとは，原子に非共鳴なレーザー光を照射することによってできるポテンシャルに原子を閉じ込めることであり，このポテンシャルは，光による原子のエネルギー準位のシフトでもあり，ライトシフトとも呼ばれている．また，正弦波の光電場によるシフトでもあり，AC シュタルクシフトとも呼ばれる．光の周波数が原子の共鳴周波数よりも低い場合には，光ポテンシャルは負になり，光ビームをレンズ等でフォーカスさせるだけで，強度が最も高い焦点に原子をトラップすることが可能になる．このような光トラップ中で蒸発冷却を行うわけであるが，蒸発冷却の過程では，原子間衝突による熱平衡化を利用している．この原子間の弾性衝突のレート Γ_{el} は， $\Gamma_{el} = n v \sigma$ で与えられる．ここで σ は衝突断面積， v は平均速度である．これから分かるように，高密度な方が，言い換えれば，トラップによる閉じ込めが強い方が， Γ_{el} は高い値をとることになる．一般に光トラップでは磁気トラップに比べて，強い閉じ込めを実現できるため，蒸発冷却の最終段階においても高い弾性衝突レート Γ_{el} を維持でき，しかも比較的短時間で蒸発冷却を行うことが可能となる．また，フェシュバハ共鳴のようなスピン自由度を利用して，衝突断面積 σ を共鳴的に大きくすることができることも大きな利点である．これまでに，この全光学的手法により， ^{87}Rb 原子 BEC [17]， Cs 原子 BEC [11]， Li 原子フェルミ縮退 [18]， Yb 原子 BEC [16]，が達成され，さらに最近は， Li 分子の BEC [4] や BCS [6] も報告されている．

3. Yb 原子 BEC 生成実験

本章では我々がどのようにして Yb 原子 BEC を達成したかを説明する．図 3 を参照して頂きたい．

実験の第一段階はスピン禁制の異重項間遷移 ($^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$) を用いた磁気光学トラップ (MOT) である [19]． $^3\text{P}_1$ 準位の輻射寿命は 870 ns であり，アルカリ原子の D 線などに比べて 1 桁以上長いので，ドップラー限界温度が $4.4 \mu\text{K}$ と非常に低いことが特徴である． ^{174}Yb に対して実験を行った結果は，原子数は約 10^8 個，原子密度は約 10^{12} cm^{-3} ，温度は約 $10 \mu\text{K}$ ，トラップ寿命は約 100 秒，であった．この段階で，位相空間密度は 10^5 となっており，BEC を作るのには，かなりいい初期条件となっている．

Yb 原子の基底状態には電子スピンがないために，磁気

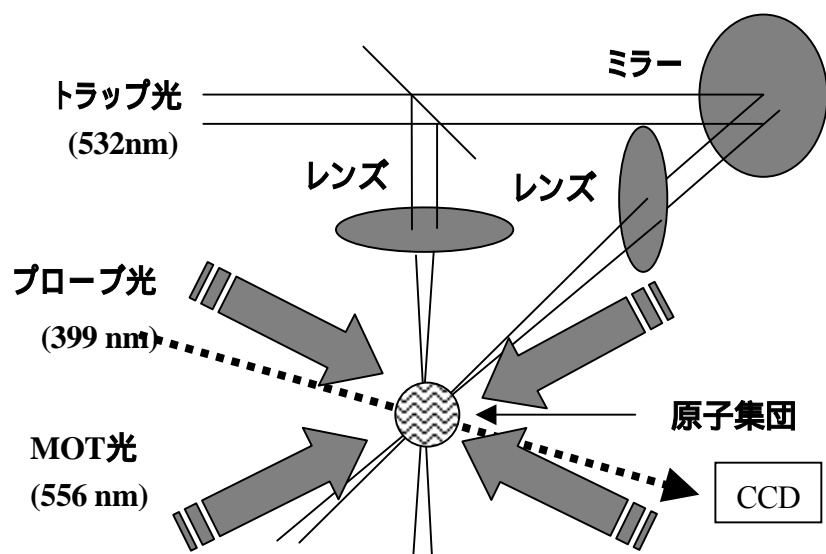


図 3 全光学的 Yb 原子 BEC 生成の実験装置．

トラップを行うことはできない．したがって，蒸発冷却のための保存力によるトラップを実現するには，光によるトラップが唯一の方法である．我々の実験では，2本の光をそれぞれのフォーカス点で重ねることで，いわゆる，交差型光トラップを実現した[20]．このときトラップ深さは約 1 mK で，原子数は約 10^5 ，原子密度は約 10^{14} cm^{-3} ，温度は約 100 μK ，であった． 10^{14} cm^{-3} という原子密度は，極めて高いものであり，これは原子間衝突によって生成されていることを我々は明らかにした[20]．

最終段階の蒸発冷却であるが，当初，光を水平面内で交差させた配置で実験を行っていたが，最終的には，鉛直面内（1本は水平，もう1本は鉛直）で交差させた配置に改良した．後者の配置では重力の影響を利用することで，非交差領域に蒸発した高温の原子が留まってしまうことを回避できる．この配置で，光強度を徐々に下げることによって交差型光トラップ中の ^{174}Yb 原子に対して蒸発冷却を行った結果，約 5×10^3 個の原子からなる BEC を生成することができた．転移温度近傍での原子の運動量分布を示したのが，図 4 である．非等方な広がりとともに，二つの構造，すなわち熱原子の分布とより狭い BEC 原子の分布が共存していることが分かる．一方，図 5 に示す通り，転移温度より高温では熱原子による等方的な分布が観測される．これらが BEC 相転移が起こっていることの証拠である．

4. Yb 原子 BEC の展望

このようにして実現した Yb 原子の BEC には，どのような新しい可能性があるのでしょうか？

まず，その 2 電子系のエネルギー準位に起因した特徴に着目してみる．基底状態には電子スピンも核スピンも存在しない．したがって，浮遊揺動磁場の影響を無視できるため，原子レーザーを用いた

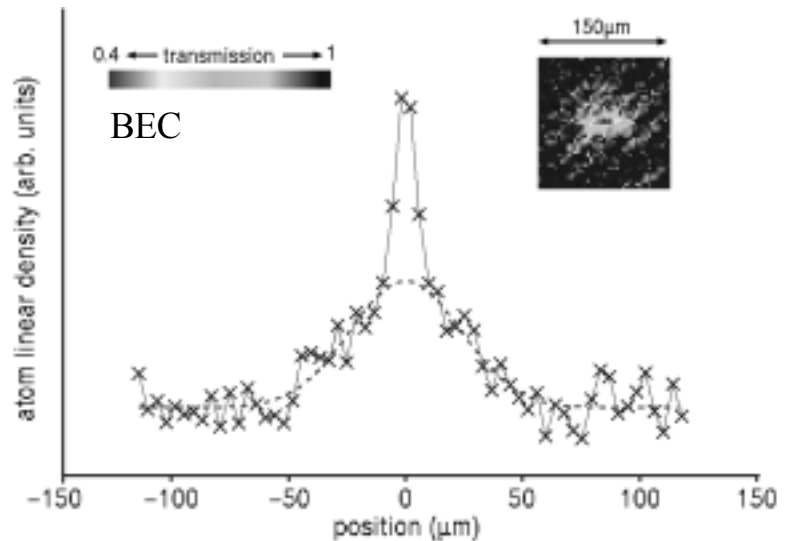


図 4 転移点付近での原子の運動量分布(トラップから開放後 5 ms の原子の分布)．右上図は 2 次元分布を表している．

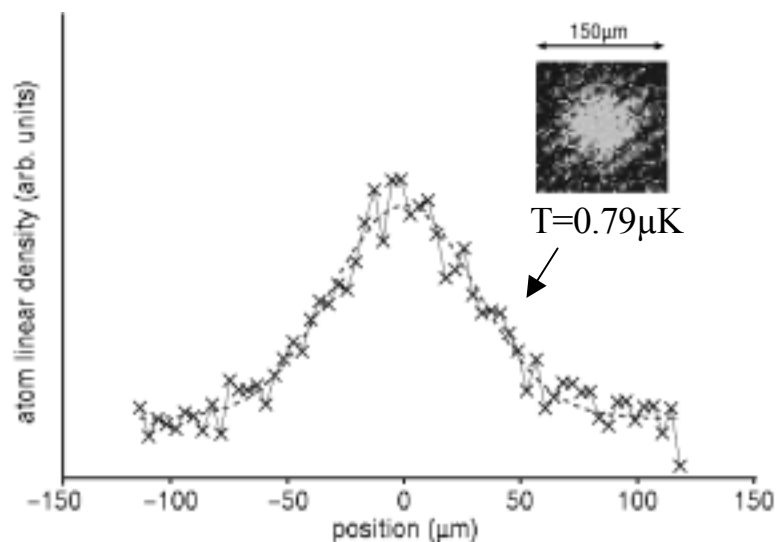


図 5 転移点より高温での原子の運動量分布(トラップから開放後 5 ms の原子の分布)．右上図は 2 次元分布を表している．

高精度干渉計や、長寿命の原子チップの構築などが期待できる。実際、同様の2電子系の原子であるSr原子に対して、電場のみによる原子チップが最近開発され、これを量子ビットとした量子計算機の研究が有望視されている。次に、励起状態に着目すると、準安定状態 3P_2 , 3P_0 状態が存在していることが特徴として挙げられる。これらの準安定状態と基底状態との間には、弱い光遷移が可能である。この遷移は、ともにmHz台の非常に狭い線幅を有しており、光周波数標準として有望視されている[21]。同じエネルギー構造をもつSr原子に対しては、冷却原子を光の定在波(光格子)によるポテンシャル中に導入することにより原子を光の波長以下に閉じ込め、これにより熱運動のスペクトルに及ぼす影響を回避するという、いわゆる「光格子時計」[22]が提案され、極低温のSr原子を用いた原理実証実験が最近おこなわれ、注目を浴びている。この「光格子時計」はYb原子に対しても、全く同様に機能すると考えられているが、特に、重い原子であるYb原子には相対論的效果が大きく寄与するため、最近いろいろな系で探索されている微細構造定数の時間変化の検出に対して有望であると考えられる。BECを用いることにより、原子は光格子ポテンシャルの振動基底状態にのみ存在することになり、熱運動によるスペクトルの広がりを根本的に除去することが期待できる。

また、準安定状態 3P_2 においては、原子間相互作用が大変ユニークな振舞いをするのが指摘されている[23]。これまでにBECが実現している原子の電子状態は電子軌道角運動量 $L=0$ のS状態であるが、電子軌道角運動量 $L=1$ のP状態においては、原子間に四重極-四重極相互作用が働く。このために、ファン・デア・ワールス力による引力だけでなく、原子間距離10nm程度から斥力が加わり、その結果、長距離分子が形成される。この長距離分子状態は、印加した磁場に敏感に変化し、その結果、原子間相互作用を共鳴的に引力から斥力まで大きく変化させることが可能になる。現在、我々は光トラップされた基底状態の原子を別の励起状態 3D_2 を介して間接的に 3P_2 状態に励起することにより、光トラップ中で 3P_2 状態BECを生成することを試みており、 3P_2 状態における原子の基本的な振舞いが明らかになりつつある。

さらに、Yb原子系にはボソンおよびフェルミオンを含む豊富な同位体が存在することも大きな特徴のひとつである。7つの安定同位体の存在比は、ボソン: $^{168}\text{Yb}(0.14\%)$, $^{170}\text{Yb}(3.1\%)$, $^{172}\text{Yb}(21.9\%)$, $^{174}\text{Yb}(31.6\%)$, $^{176}\text{Yb}(12.6\%)$, フェルミオン: $^{171}\text{Yb}(14.4\%)$, $^{173}\text{Yb}(16.2\%)$ と、かなり均等に分布している。これは、他のアルカリ原子やアルカリ土類原子にはない特徴である。このことは、今回我々が ^{174}Yb 原子に対して行った実験システムを用いて、他の同位体についても同様に実験を行える、ということの意味する。最近の結果では、 ^{176}Yb 原子に対しては、トラップから開放したときに、 ^{174}Yb のBECよりも激しく非等方的に広がる様子が観測された。現在様々な観点からの確認を急いでいる。また、 ^{172}Yb 原子では蒸発冷却がうまく機能していない。これから、 ^{172}Yb 原子では原子間相互作用が弱いことが予想される。これらの同位体を変えた実験では、実験パラメータは全く変えていないため、観測された振舞いの違いは、同位体固有の原子間相互作用の違いに容易に帰着させられる。また、混合量子縮退系を生成することも比較的容易である。我々はすでに、フェルミオン ^{171}Yb とボソン ^{174}Yb の対、さらに ^{172}Yb と ^{174}Yb のボソン対、 ^{176}Yb と ^{174}Yb のボソン対についても光トラップすることに成功している[24]。多様な量子縮退系の研究を行うことは、我々により深い量子縮退の物理的理解をもたらすであろう。

フェルミ同位体 ^{171}Yb および ^{173}Yb の存在は特に興味深い実験系を提供してくれる。フェルミ縮退した原子集団を光格子に導入し、これを、固体の結晶格子中の電子系とみなしそのシミュレーターとする研究が、量子情報の観点から最近注目されている[25]。量子系をシミュレートするには、別の量子系を用意する必要があり、古典系をもってしては「手に負えない」、ということが、ファインマンの

指摘以来、量子情報研究の基礎となっている。シミュレーションを行う対象として特に興味深い系として強相関電子系が挙げられる。我々は、特に現在でも凝縮系物理学の大きな宿題とされる銅酸化物における高温超伝導の解明に向けて、フェルミ縮退した ^{171}Yb 原子を 2 次元の光格子中に導入した系を用いた、2 次元ハバードモデルの量子シミュレーション研究の準備を進めている。この系では、格子間のホッピングレートや原子間相互作用、2 次元面間のホッピングレート、格子の充填率（ドープレート）、などのパラメーターを精密にコントロールすることができ、しかも、現実の固体サンプルのような不純物の混入などは全く考える必要がない。さらに光を用いた高感度な測定手段も開発されている。これまでに、フェルミオン ^{171}Yb をボソン ^{174}Yb との衝突により超低温に冷却する、いわゆる協同冷却の実験に成功しており、フェルミ縮退まであと一步のところまで来ている。

また、Yb 原子の BEC を原子リソグラフィに应用するのは産業上も大変興味深い。Yb 金属の反応性は低く、空気中においても比較的安定である。これは、これまで BEC が実現した原子種にはない特徴である。最近、原子オープンからの熱原子を用いて、日本のグループが、Yb 原子を用いた原子リソグラフィの実験を行い、約 200nm の構造を作成することに実際に成功している[26]。これを BEC に置き換えることにより、より微細で多様な構造を作成することができるであろう。

5. おわりに

以上、Yb 原子の BEC 生成実験とその将来展望について紹介した。現在我々は、応用に向けた研究を準備しているところであるが、海外においても、Yb 原子のレーザー冷却研究は急速に進展し始めている。例えば、Rb 原子と Yb 原子を同時に光トラップし、極性分子である YbRb 分子を生成しようとする研究が、ドイツの研究者により進められている。このような極低温の極性分子は、量子計算機や、永久電気双極子モーメントの探索などに有望であるとされており、大変興味深い。また、国内外の複数の国立標準研究所において、本稿で紹介した光周波数標準への応用を目指した本格的な研究がスタートしようとしており、今後、この分野の研究進展が注目されるところである。

最後に、本研究は多くの方々との共同研究であり、ここに深く感謝したい。日本学術振興会博士研究員（京都大学大学院工学研究科）の高須洋介氏は、本研究において中心となって多大な貢献をして頂いている。大学院生の山口敦史氏および加藤豊氏には、装置の改良も含めて、2 年間大いに尽力頂いた。H16 年度より新たに加わって頂いた COE 研究員東條賢氏および JST 研究員植竹智氏には、本研究推進にさまざまな面で貢献して頂いている。大学院生の北川昌明氏、福原武氏、橋本大祐氏には、すでに多くの貢献をして頂き、現在も精力的に研究を推進していただいている。また、本研究は熊倉光孝助手との共同研究でもあり、ここに深く感謝したい。

参考文献

- [1] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Andrews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269**, 198 (1995).
- [2] B. DeMarco and D. S. Jin, *Science* **285**, 1703(1999).
- [3] A. G. Truscott, K. E. Strecker, W. I. Maclenxander, G. B. Partridge, and R. G. Hulet, *Science* **291**, 2570 (2001).
- [4] S. Jochim, M. Bartenstein, A. Altmeyer, G. Hendl, S. Riedl, C. Chin, J. Hecker Denschlag, and R. Grimm, *Science* **302**, 2101 (2003).
- [5] C. A. Regal, M. Greiner, and D. S. Jin, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 040403 (2004).

- [6] C. Chin, M. Bartenstein, A. Alymeyer, S. Riedl, S. Jochim, J. Hecker Denschlag, and R. Grimm, *Science* **305**,1128 (2004).
- [7] K. B. Davis, M.-O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969(1995).
- [8] C.C. Bradley, C. A. Sackett, J. J. Tollett, and R. G. Hulet, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1687(1995).
- [9] S. L. Cornish, N. R. Claussen, J. L. Roberts, E. A. Cornell, and C. E. Wieman, *Phys. Rev. Lett.*,**85**, 1795(2000)
- [10] G. Modugno, G. Ferrari, G. Roati, R. J. Brecha, A. Simoni, and M. Inguscio, *Science*, **294**, 1320 (2001).
- [11] T. Weber, J. Herbig, M. Mark, H.-C. Nagerl, and R. Grimm, *Science* **299**, 232 (2003).
- [12] D. G. Fried, T. C. Killian, L. Willmann, D. Landhuis, S. C. Moss, D. Kleppner, and T. J. Greytak, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3811 (1998).
- [13] A. Robert, O. Sirjean, A. Browaeys, J. Poupard, S. Nowak, D. Boiron, C. I. Westbrook, and A. Aspect, *Science* **292**, 461 (2001).
- [14] S. Inouye, M. R. Andrews, J. Stenger, H.-J. Miesner, D. M. Stamper-Kurn, and W. Ketterle, *Nature* **392**, 151 (1998).
- [15] J. Stenger, S. Inouye, D. M. Stamper-Kurn, H.-J. Miesner, A. P. Chikkatur, and W. Ketterle, *Nature* **396**, 345 (1998).
- [16] Y. Takasu, K. Maki, T. Takano, K. Komori, K. Honda, M. Kumakura, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 040404 (2003).
- [17] M. D. Barrett, J. A. Sauer, M. S. Chapman, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 010404 (2001)
- [18] S. R. Granada, M. E. Gehm, K. M. O'Hara, J. E. Thomas, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 120405 (2002).
- [19] T. Kuwamoto, K. Honda, Y. Takahashi, and T. Yabuzaki, *Phys. Rev. A.* **60**, R745(1999).
- [20] Y. Takasu, K. Honda, K. Komori, M. Kumakura, Y. Takahashi, T. Yabuzaki, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 023003 (2003).
- [21] J. Hall ,M. Zhu, and P. Buch, *Opt.Soc. Am.* **B6** 2194 (1989).
- [22] H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov, and V. D. Ovsiannikov, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 173005 (2003).
- [23] A. Derevianko, S. G. Porsev, S. Kotochigova, E. Tiesinga, P. S. Julienne, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 063002 (2003).
- [24] K. Honda, Y. Takasu, T.Kuwamoto, M.Kumakura, Y.Takahashi, T. Yabuzaki, *Phys. Rev. A*, **66**, 02 1401(R) (2002).
- [25] W. Hofstetter, J. I. Cirac, P. Zoller, E. Demler, M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 220407(2002).
- [26] R. Ohmukai, S. Urabe, and M. Watanabe, *Appl. Phys. B.* **77**, 415 (2003).