

Rb 原子のボーズ凝縮とその応用

京都大学理学部

豊田健二

アルカリ原子の Bose-Einstein 凝縮 (BEC) は 1995 年に ^{87}Rb で最初に観測されて以来、これまでに多くの実験的あるいは理論的研究がなされている [1, 2, 3]。希薄アルカリ原子系における BEC の特徴として、相互作用が弱く第一原理から凝縮体の性質を予測することが可能であること、凝縮体を実験的に操作することが容易であることなどがあげられる。我々はこのアルカリ原子の BEC に関する実験的研究、特にスピン自由度に着目した研究を行なうこと、および磁場勾配中でのスピン歳差の観測を通して凝縮体の空間分布を測定する手法を開発することなどを目指し準備を行なってきた。

アルカリ原子の BEC を達成するための方法として最も一般的なのは、まずレーザー冷却により原子を捕獲・冷却した上で、それを磁気トラップに導入し、RF 磁場を加えて蒸発冷却を行うことで位相空間密度を高めるというものである。蒸発冷却には弾性衝突による熱平衡化が本質的な役割をなしており、冷却の過程でこの弾性衝突のレートが次第に高まっていくのが望ましい（この状態は runaway evaporation などと呼ばれる）。このためには多くの原子数、長寿命・高勾配の磁気トラップが必要となる。このようなことをふまえ我々はまず、高真空中に多くの原子を蓄積することが可能な二重磁気光学トラップ法 [4]、十分大きな束縛力が得られ非断熱スピンプリップによるロスのない clover leaf 型の磁気トラップ [5] を用いた実験装置を作成した。

さらにこの装置を用いて、以下のような手順で ^{87}Rb における BEC を観測した。まず、二重磁気光学トラップにより $5 \times 10^{-11} \text{ Torr}$ 以下の高真空セル中で 10^9 個程度の ^{87}Rb 原子をトラップし、さらに圧縮、冷却などを行なった上で、clover leaf 型磁気トラップ（動径方向の磁場勾配 181 G/cm 、軸方向の曲率 87 G/cm^2 ）に導入した。この時の原子数は 6×10^8 個程度、温度は $200 \mu\text{K}$ 、ピーク密度は $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ であり、位相空間密度はおおよそ 10^{-6} に相当する。磁気トラップの寿命は 70s 程度である。さらに RF 磁場を加えその周波数を指数関数的に掃引して蒸発冷却を行ない、約 1 分間で位相空間密度が 1 程度となる温度約 500 nK 、ピーク密度約 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ まで冷却した。その後、トラップを瞬間的に切り原子集団を弾道的に膨張させて 20ms 後に吸収イメージを測定することで、二次元的な速度分布の測定を行なった。Bose-Einstein 凝縮体は、二次元的な速度分布において、Maxwell-Boltzman 的な広い分布の中心に現れる鋭いピークとして観測された（図 1）。凝縮体中の原子数は 3×10^5 個程度と見積もられた。

さらに、凝縮体を用いて以下のような実験的研究を行なうことを計画している。

磁気トラップ中の BEC においては、各原子のスピンは磁場の方向に偏極されているため、凝縮体はスピン自由度を失ってスカラー量の秩序変数で記述される。しかし磁気トラップ中の凝縮体を光双極子力トラップ中に移行させることにより、失っていたスピン自由度を復活させることができる。この場合には、凝縮体はスピノール量の秩序変数で表され、極めて多様な振舞いを示すことが予測されている [6]。現在までに、Na の $F = 1$ の場合については実験的に観測されている [7] が、 ^{87}Rb に関しては観測されていない。 ^{87}Rb の場合には $F = 2$ の凝縮体が存在可能であり、この場合のスピンに依存する原子間相互作用は Na の $F = 1$ の場合とは大き

く異なったものになる。

また凝縮体を磁場勾配中におき、原子スピンの歳差をファラデー効果によるプローブ光の偏光回転を通して観測することで、凝縮体の空間分布を測定することを計画している(図2)。原子の空間分布に関する情報は偏光回転のフーリエ成分の強度分布に置き換えられ、ポラリメータを用いて測定される。この測定法は回折限界などの影響を受けないため、原理的には純粋に光学的な測定法より高い分解能を得ることができる。このため、量子渦の観測などにこの方法を応用できる可能性がある。ほかにも時間分解可能である、非破壊的である、スピンに関する測定を行なえるなどの特徴をこの測定法は備えており、これまでの吸収イメージング法、位相コントラスト法などに代わる手段として用いることができると考えられる。

- [1] M. H. Anderson et al., Science **269**, 198 (1995); K. B. Davis et al., Phys. Rev. Lett **75**, 3969 (1995); C. C. Bradley et al., Phys. Rev. Lett **78**, 985 (1997).
- [2] for a theoretical review, see F. Dalfovo et al., preprint cond-mat/9806038
- [3] Georgia Southern University BEC Homepage, <http://amo.phy.gasou.edu/bec.html>
- [4] C. J. Myatt et al., Opt. Lett. **21**, 290 (1996).
- [5] M.-O. Mewes et al, Phys. Rev. Lett **77**, 416 (1996).
- [6] T. Ohmi and K. Machida, J. Phys. Soc. Jpn. **67**, 1822 (1998); T.-L. Ho, Phys. Rev. Lett. **81**, 742 (1998); C. K. Law, H. Pu and N. P. Bigelow, Phys. Rev. Lett. **81**, 5257 (1998)
- [7] J. Stenger et al., Nature **396**, 345; H.-J. Miesner et al., preprint cond-mat/9811161

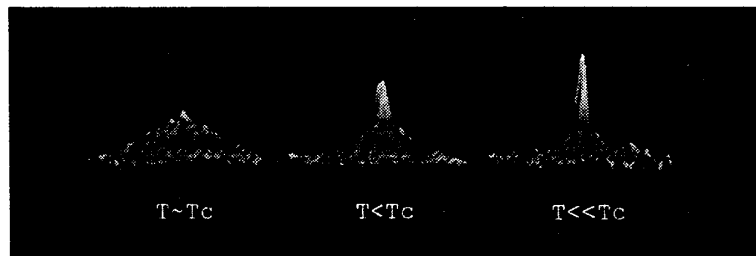


図 1:

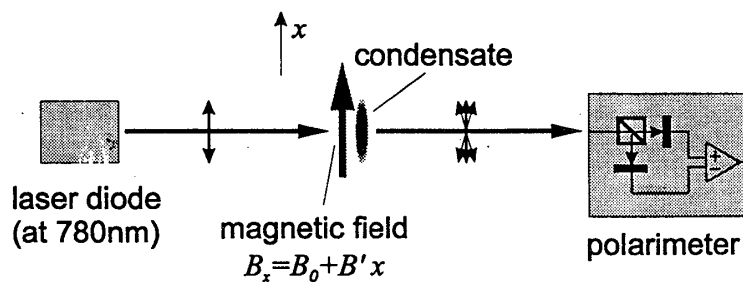


図 2: