

## 量子縮退した中性原子気体の実験研究

高橋義朗（京都大学・大学院理学研究科）

takahasi@yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp

### アブストラクト

最近のアルカリ原子気体のボース・アインシュタイン凝縮を用いた実験研究を簡単にレビューする。また、最近我々が行っている希土類のイッテルビウム (Yb) 原子を用いたボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退およびその混合系といった量子縮退状態を生成する試みについて紹介する。

### 1. アルカリ原子気体のボース・アインシュタイン凝縮を用いた実験研究

最近活発に研究が行われているアルカリ原子気体のボース・アインシュタイン(BEC)<sup>1)</sup>の大きな特徴にその優れた操作性が挙げられる。外部から加えたレーザー光や磁場により BEC を非常に精度よくかつ劇的に変化させることが可能であるということは、これまで知られていた超流動ヘリウムその他の系では考えられない事柄である。

#### 1-1 レーザー光による操作：吸収

レーザー光と原子の相互作用は吸収と分散があるが、その両方とも BEC 実験には有効に用いられている。吸収を利用したものとして最も広く用いられているものは、吸収イメージング法で、高感度に BEC の空間および運動量の 2 次元分布を測定することが可能である。また、1 光子吸収に関係した現象としては **bosonic stimulation** に関係した超放射現象があり、マイクロ波遷移は蒸発冷却にも用いられている。さらに、2 光子遷移に関しては、**Bragg** 散乱とそれを利用した干渉計、マイクロ波の 2 光子遷移による BEC の **binary mixture** の生成、ラマン遷移による超冷分子生成、等が挙げられる。

#### 1-2 レーザー光による操作：分散

分散を利用したものとしては、まず、位相コントラストイメージング法があり、これにより非破壊的に BEC のダイナミクスを測定することが可能になる。また、分散による光双極子力は、量子渦生成や、臨界速度測定、音波励起等に利用されている。また、光双極子力を用いてトラップ（光トラップ）が可能であり、純光学的に BEC を生成することが最近できている。また、可逆的に BEC を生成することも光トラップを用いて行われている。さらに、BEC を光トラップに移すことでスピン自由度をもった BEC(Spinor BEC)が実現されている。さらに最近では BEC を 44cm もの距離移動させるのにも使われている。また、光格子中の BEC による多重原子波干渉やスクイーズド状態の生成が報告されている。

#### 1-3 磁場による操作

アルカリ原子の基底状態は電子スピンをもっているため磁場と相互作用する。磁気トラップは BEC 生成の最も重要な技術であるのはいうまでもない。また、**Feshbach** 共鳴による散乱長の制御はアルカリ BEC 系の最も大きな特徴のひとつである。さらに不均一磁場は **Stern-Gerlach** 効果によるスピン選択的測定を可能にする。また、磁場の特異点まわりの断熱通過による量子渦生成も提案されている。そして、高周波磁場は蒸発冷却に用いられるだけでなく、原子レーザーにおける出力結合器にも用いられている。

### 2. イッテルビウム原子のレーザー冷却

我々は最近、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いる。Yb 原子はパリティ非保存の研究や、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が、特に我々は冷却 Yb 原子を用いた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を提案し<sup>2)</sup>、これを目的として研究を開始したが、研究が進んでいく過程で、冷却 Yb 原子は BEC やフェルミ縮退およびその混合系といった量子縮退状態を実現するのにも有望な系であると実感するよう

になり現在はこの方向の研究を推進している。

まず我々は Yb 原子のスピン禁制の異重項間遷移 ( $^1S_0 - ^3P_1$ ) を用いた磁気光学トラップ (MOT) を開発し (図 1、図 2), 7 つの安定同位体 (ボソン:  $^{168}\text{Yb}$ ,  $^{170}\text{Yb}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{174}\text{Yb}$ ,  $^{176}\text{Yb}$ , フェルミオン:  $^{171}\text{Yb}$ ,  $^{173}\text{Yb}$ ) のうち、5 つの同位体 ( $^{171}\text{Yb}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{173}\text{Yb}$ ,  $^{174}\text{Yb}$ ,  $^{176}\text{Yb}$ ) について MOT することに成功した<sup>3)</sup>。このスピン禁制遷移を用いた MOT では、完全に閉じた系をなすため分岐によりトラップ寿命が制限されることがないこと、また  $^3P_1$  準位の輻射寿命が 875 ns と、アルカリ原子の D 線などに比べて 1 桁以上長いこと、ドップラー限界温度が 4.4  $\mu\text{K}$  と非常に低いこと、などが大きな利点である。最も存在比の大きい  $^{174}\text{Yb}$  に対して測定した結果は、原子数は約  $10^8$  個、原子密度は約  $10^{12}/\text{cm}^3$ 、温度は約 10  $\mu\text{K}$ 、トラップ寿命は約 10 秒、となり高密度の低温 Yb 原子を準備することに成功した。

さらに高密度原子集団を生成するために、我々は光双極子力を利用した非共鳴光のみによるトラップ (FORT) を行った。我々の実験では、FORT 光源は  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  レーザーの第 2 高調波 (532 nm) で 10 W 出力のものを用いた。この FORT 光を半径約 14  $\mu\text{m}$  までフォーカスし、MOT された原子集団に空間的に重ねることにより、MOT から FORT へ Yb 原子を移行させた。また、2 本の FORT 光をそれぞれのフォーカス点で重ねることにより 3 次元的に急峻なトラップ (交差型 FORT) を実現した。トラップされた原子分布の一例を図 3 に示す。このときトラップ深さは約 1 mK であった。最大約  $10^6$  個の原子を FORT に移行することができたが、約 50 ms の間 MOT と FORT を同時に行うことが高効率で移行させるうえで重要であった。MOT の原子数が少なく  $10^6$  個以下のときには MOT にトラップされた原子数のほとんどを FORT に移行することが可能であった。また、飛行時間法により温度を測定すると約 100  $\mu\text{K}$  であった。トラップ中の原子密度は、原子がトラップ中でマックスウェル・ボルツマン分布をしているとして見積もることができ、交差領域で  $10^{14}/\text{cm}^3$  以上という非常に高い値になった。この非常に高い原子密度の原因を調べるため我々は新たな方法として、2 本目の FORT 光を 1 本目に対して少し遅らせて入射させる、という遅延交差型 FORT を考案し、トラップ中での Yb 原子の分布の時間発展を調べてみた。その結果、MOT 光が切れ FORT のみになった後にポテンシャルの変形に伴い原子が交差領域に集中していく様子を確認することができた。すなわち、交差領域の高密度は原子間衝突によって生成されていることが明らかになった。この過程は、以前から行われてい

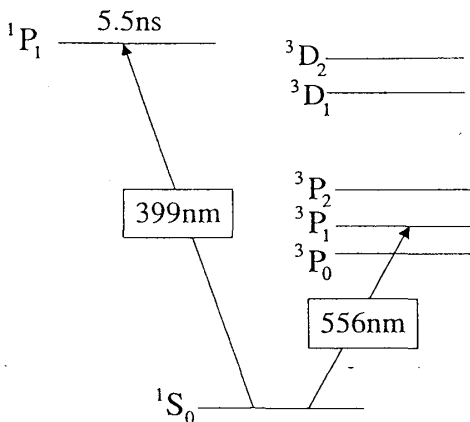


図 1 : Yb 原子のエネルギー準位。

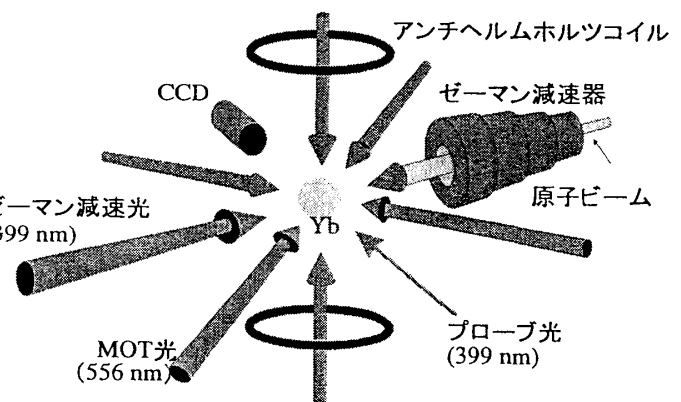


図 2 : 磁気光学トラップの実験配置図。

たポテンシャルの変形による位相空間密度の上昇、とも捉えることができる。また、同位体によってこの熱平衡化の様子が大きく異なることを見出した。これは原子間衝突断面積が同位体によって異なる、ということが現われていて、非常に興味深い。

Yb 原子系は、ボソンおよびフェルミオンを含む豊富な同位体があることも大きな特徴のひとつである。我々はこの特徴を生かし、フェルミオン  $^{171}\text{Yb}$  とボソン  $^{174}\text{Yb}$  を同時に光ト

ラップすることに成功した。まず、同時トラップしたい  $^{171}\text{Yb}$  と  $^{174}\text{Yb}$  の同位体シフト (3.8GHz) に相当する側帯波を、電気光学変調器を用いて MOT 光に生成することによって、二つの同位体を同時に MOT し、これを前述の交差型 FORT に移行させることで、高密度のボソン・フェルミオン混合系の光トラップを実現した。このほかにも、 $^{172}\text{Yb}$  と  $^{174}\text{Yb}$  のボソン対、 $^{176}\text{Yb}$  と  $^{174}\text{Yb}$  のボソン対についても同時 FORT することに成功した。この系において前述の遅延交差型 FORT の実験を行い、交差領域への原子の集中する様子を調べたところ、ボソン・フェルミオン間の弾性衝突に起因する振舞いを観測することができた。

このように、我々は Yb 原子の高密度光トラップを実現したが、温度が比較的高いため、位相空間密度は約  $10^4$  程度に留まっている。さらに位相空間密度を上昇させるために我々は光トラップ中の Yb 原子の蒸発冷却を行った。当初、FORT 光を水平面内で交差させた配置で実験を行っていたが、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、非交差領域に原子が留まってしまふことを回避できる。この配置で FORT 光強度を徐々に下げることで交差型 FORT 中の  $^{174}\text{Yb}$  原子に対して蒸発冷却を行ったところ、温度は約  $4\mu\text{K}$  に冷却することができ、位相空間密度にして約 400 倍の上昇を得ることができた。ボース凝縮まではあと、1-2 桁程度の増大が必要であるが、現在の蒸発冷却の効率は約 400ms という短いトラップ寿命でも制限されており、これを改善することも課題である。また、フェルミオン  $^{171}\text{Yb}$  に対しても同様な蒸発冷却を行ったが、蒸発冷却の最終時点では原子はほとんど残らなかった。これは p 波遠心力障壁を乗り越えられないほどの極低温ではフェルミオン間の衝突が抑制されるため、というのが最も自然な説明である。さらに、ボソン・フェルミオン混合系に対して同様の蒸発冷却を行ったところ、今度は蒸発冷却の最終時点で、トラップに残った  $^{171}\text{Yb}$  原子を観測することができた。これボソン・フェルミオン間の協同蒸発冷却効果であると解釈することができる。

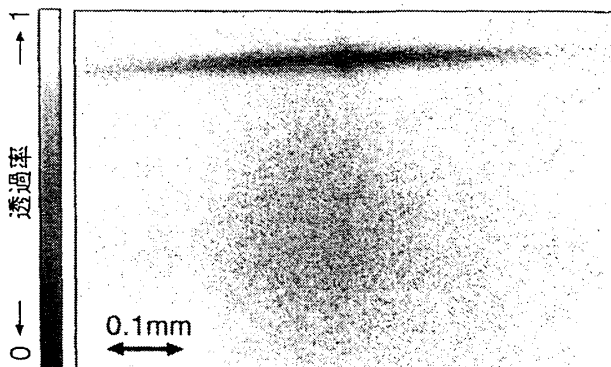


図 3 : 光トラップされた Yb 原子のイメージ

本研究は、本多和仁、高須洋介、小森一樹、小林淳、白旗由香利、竹内誠、熊倉光孝、藪崎努、の各氏との協同研究の成果をもとにしており、ここに深く感謝したい。本研究は文科省科研費(11216203,11640394,11304023),光科学技術振興財団 REFORT、郵政省 BT21、日本原子力研究所の支援を頂いたのでここに感謝する。

#### 参考文献：

- 1) 例えば、上田正仁、日本物理学会誌 53 (1998)663; W. Ketterle et al. in Proceedings of the International School of Physics-Enrico Fermi, p67, (IOS press, 1999); The Nobel Prize in Physics 2001. <http://www.nobel.se/physics/laureates/2001>; Georgia Southern University BEC Homepage. <http://amo.phys.gasou.edu/bec.html>
- 2) Y. Takahashi et al.: in Proceedings of CP Violation and its Origin, edited by K. Hagiwara (KEK Reports, Tsukuba, 1997).
- 3) T. Kuwamoto et al.: Phys.Rev. A60(1999) R745.