

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340103

研究課題名（和文）

ボース凝縮体の衝突相互作用を利用した猫状態の生成と量子情報的手法による状態評価

研究課題名（英文）

Creation of the quantum cat state by using the collisional interaction of Bose-Einstein condensate and estimation of the quantum state

研究代表者

上妻 幹男 (KOZUMA MIKIO) 東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授

研究者番号：10302837

研究成果の概要（和文）：

本研究は、中性原子気体のボース凝縮体を利用して量子猫状態を生成することを目的としている。まず、ダブル磁気光学トラップ用超高真空槽、ならびにクローバーリーフ型磁場トラップを構築し、 $^{87}\text{Rb}$  原子のボース凝縮体を生成した。しかし磁場トラップによる磁気シールドの磁化の影響で、 $10\ \mu\text{G}$  以下まで残留磁場を抑圧することが難しかったため、光トラップのみを用いてボース凝縮体を生成する方式に切り替えることにした。YVO<sub>4</sub> 結晶を用いて  $1.06\ \mu\text{m}$ 、 $10\text{W}$  のレーザーを自作し、その出力を真空ガラスセルをふくむボウタイ型光共振器に導入することで、十分なポテンシャルを有する光トラップを構成することに成功した。この光トラップは、パーマロイ磁気シールドと共存しており、磁気光学トラップを内部で行っても、残留磁界を数  $\mu\text{G}$ 、残留磁場勾配を  $2\ \mu\text{G}/\text{cm}$  にとどめることが出来る。今後、この系を利用して、当初目的を達成する予定である。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of the research is to create the quantum cat state with Bose-Einstein condensate of neutral atomic gas. We constructed the ultra high vacuum system to operate the double magneto-optical trapping and also made the clover-leaf type of the magnetic trap. While the Bose-Einstein condensate of  $^{87}\text{Rb}$  atoms was successfully created, it was hard to suppress the residual magnetic field less than  $10\ \mu\text{G}$  because of the magnetization of the shield box caused by the magnetic trap. We thus started constructing a new setup which creates Bose-Einstein condensate by using only optical trapping technique. We succeeded in constructing a YVO<sub>4</sub> laser with its wavelength of  $1.06\ \mu\text{m}$  and its power of  $10\text{W}$ . Introducing the output power of the YVO<sub>4</sub> laser into the Bow-tie cavity which includes the vacuum glass cell, we succeeded in creating the optical trap whose potential depth is enough deep to catch the laser cooled Rb atoms. It is noted that the system is already surrounded by the magnetic shield and we can keep ultra low residual magnetic field under the operation of the double magneto-optical trapping. The residual magnetic field is less than  $10\ \mu\text{G}$  and the magnetic gradient is suppressed to  $2\ \mu\text{G}/\text{cm}$ . We are planning to implement our initial purpose by using these experimental setups soon

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2009 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：数物系科学  
科研費の分科・細目：物理学  
キーワード：量子情報

### 1. 研究開始当初の背景

シュレディンガーが量子力学の玄妙な性質を表現する上で使った「生きた猫と死んだ猫の重ね合わせ」という概念は、今日まで理学・工学両面にわたって多大な影響を与えてきた。N 個の粒子のどれか一つの状態が判明すると、残り N-1 個の粒子の状態も即座に決定され重ね合わせが崩れる、というのがこの状態の特徴である。

ところで、猫状態を生成する実験には、大きくわけて二つの立場がある。シュレディンガーの猫状態を実現したとされる最も有名な実験は、超伝導フラックス qubit (SQUID) を用いたものであろう [Nature 406, 43 (2000)]。Qubit を貫く磁束を調整することにより、右まわりと左回りのフラックスが重ねあわされた状態をエネルギー固有状態とすることができる。驚くべきことに、数  $\mu\text{A}$  もの電流が、右回りと左回りの重ね合わせとなった状態を生成することができ、マクロスコピックな数の電子が巨視的重ねあわせとなったと申すに足りない。これに対して、光子を用いた子猫状態というものが、昨今生成されるようになってきた [Science 312, 83 (2006)]。具体的には、パラメトリック過程で発生した真空スクイーズド状態をわずかな反射率をもつビームスプリッターによってサンプリングし、その光に対してフォトンカウントを行うことで子猫状態を生成する。これは偶数個の光子のフラックスであるスクイーズド状態から光子を 1 個取り除くことにより、奇数個の光子のフラックスをつくることを意味する。奇数個の光子のフラックスは位相が直交する二つのコヒーレント状態の重ねあわせで表現されるため、平均光子

数が十分大きいときは猫状態とみなすことができる (図 1 参照)。ただし実験では、現存するスクイーズの性能によって平均光子数は数個程度にとどまっている。従ってこれら二つの実験を単純に比較すると、前者に比べて後者は極端に見劣りするように思える。しかしこれら二つの実験は本質的に異なる物理的意味をもっており、異なるカテゴリーにおいてそれぞれ重要な実験成果が得られたとするのが正しい認識であろう。

二つの実験の本質的な差を理解するために、次のようなことを考えることにする。超伝導フラックス qubit では、何故猫状態のように一見すると脆弱な量子状態をビットとして活用できるのだろうか？超伝導フラックス qubit を構成している多数個の電子は、互いに強い相互作用をしている。そのため、超伝導をおこしている多数個の電子のどれか 1 個の状態を変化させようとする、系がもつエネルギーに比べてはるかに大きなエネルギーを投入する必要性がでてくる。つまり、多数個の電子が存在しているのは事実であるが、その多体系に許される状態の数は極端に制限されており、事実上二つしかないというわけである。状態数が二つしかないので、系はデコヒーレンスに強く、猫に相当する状況を実現することができる。直感的な表現をするならば、超伝導フラックス qubit で生成される状態は、「凍った猫」ということになる。

これに対して、光で作られた子猫状態の場合、光子同士は強い相互作用はしておらず、系は無数の状態をとりうる。そのため、生成された状態は環境との相互作用に対して極めて脆弱である。このように、豊富な数の状

態をとりうる系において、直交する2状態だけの巨視的重ね合わせを選択的に作り出す研究、簡単に言えば非常に脆弱な猫をつくる、という実験的立場も考えられることになる。こうした状態のデコヒーレンス時間は、関与する粒子数を増やしていくにつれ、急速に短くなる。これは逆にいうと外界からの擾乱を敏感に検出することができることを意味する。標準量子限界をやぶる干渉計の構築や、通信路における超加法性の実現等にこの状態が関与しているのは、系の敏感性によるということもできるだろう。

## 2. 研究の目的

本研究は、こうした背景にもとづき、今後超精密測定等への応用性をもつ子猫状態を、光ではなく、質量をもつ中性原子気体を用いて実現することを目的とする。具体的な方法として、我々は、図1のように凝縮体中のスピン依存衝突相互作用を利用してユニタリーな形でスピンをスクイーズさせ（1軸捻り）、その後発生した原子コヒーレンスの一部を光に転写し、それをフォトンカウントすることで、原子系の子猫状態を生成することにした。

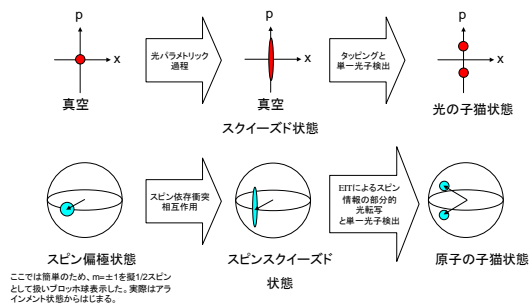


図1 猫状態の生成

この方法により、スクイーズそのものは原理的には-40dB程度が達成できる。光のスク

イズが-10dB程度にとどまっていることを考えると、光を超える猫状態の生成が期待できる。子猫状態が生成されたか否かの判定については、電磁誘起透明化（EIT）過程、および量子トモグラフィの手法を活用する。まず猫状態にある原子系のスピン情報をEITを用いて全て光に転写する。次に、生成された光のウィグナー関数を、局発光を用いたホモダイーン測定によって再構築する。子猫状態ができていれば、ウィグナー関数が負値をとる部分があらわれることになり、明確な子猫状態の判定が可能となる。

## 3. 研究の方法

本研究を行う上でもっとも重要なポイントは、ボース凝縮体においてスピンスクイーズをユニタリーな形で生成することである。この点に関して、我々は北川・上田らが提案した1軸捻りと呼ばれる相互作用を活用する[PRA 47, 5138 (1993)]。要求される相互作用は $H = \hbar \chi S_z^2$ というもので、これは、スピン依存衝突相互作用を利用して実現可能である[Nature 409, 63 (2001)]。実験では、具体的原子種としてRbを利用する。F=1, m=-1状態に凝縮を生成し、これを、離調をとった光トラップに移行した後、光ラマン過程を用いて $m = \pm 1$ の重ね合わせを作る。異種スピン間の散乱長が同種スピン間の散乱長の和と異なることが起因して、1軸捻り型の相互作用が10msのオーダーで発生する。1軸捻りで得られるスピンスクイーズのレベルは解析的にもとまっており、ボース凝縮体のように十分多数個の粒子に対しては、 $N^{-2/3}$ でスケールする。 $10^6$ 個程度のRb凝縮体を得ることはさほど難しくなく、これにより-40dB程度のスクイーズが可能となるわけである。

## 4. 研究成果

研究が始まった初年度、我々は本研究を遂行する上で基本となる  $^{87}\text{Rb}$  原子のボース凝縮体を生成する実験を開始した。図2にみられる

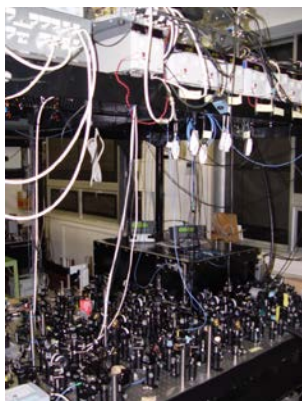


図2 光源

ように、チタンサファイアレーザーを主たる光源として用い、適宜、半導体レーザーを使用する形で、光原系を構築した。また十分な数のボース凝縮体を得るため、クローバーリーフ型の磁場トラップを構築した(図3)。ダブル磁気光学トラップと呼ばれる手法を用いて、約  $10^{10}$  個のレーザー冷却された Rb 原子集団を準備し、これを磁場でトラップしなおした。トラップされた原子集団に RF を照射することにより、エネルギーの高い原子を選択的にトラップから開放し、蒸発冷却を行った。最終的に、約  $10^6$  個のボース凝縮した原子集団を得ることに成功した。

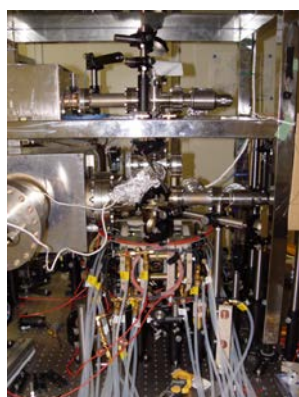


図3 磁場トラップ

図4は、磁場トラップから開放された原子集団を吸収撮像した結果である。異方的なボテ

ンシャル中のボース凝縮体を特徴付ける、非等方的な拡散を確認することができる。

ボース凝縮体の生成については、問題なく研究が進行したが、ここで一つ問題が発生した。本研究は、原子の集団スピンを対象としており、スピンのコヒーレンス時間が十分に長いことが前提となっている。迷走磁場によるスピン回転は、およそ  $1\text{MHz/Gauss}$  であり、迷走磁場の大きさを  $10\mu\text{G}$  程度まで小さくすることが必要となる。この程度の磁場環境は、内部に磁場を発生させる装置がなければ、パーマロイ等の材料を用いて系を囲むことで達成が可能である。

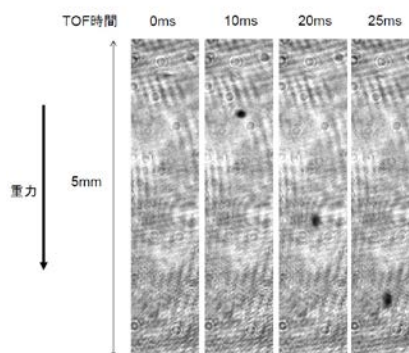


図4 自由落下するボース凝縮体の撮像  
しかしながら、強力な磁場を発生する装置の中にはいつている場合は、パーマロイそのものの磁化がおこってしまう。凝縮体を生成した後、磁場トラップとパーマロイとを共存させるいくつかの試みを行った。磁場トラップに影響を与えずに、パーマロイのみを消磁することが原理的には可能であることはわかったが、系が複雑化すると、再現性が損なわれる恐れがでたため、我々は、強磁場を用いず、光トラップのみでボース凝縮体を生成する実験に移行することにした。

まず我々は、光トラップを行うための  $1\mu\text{m}$  帯光源を開発した(図5)。807nmの半導体レーザーの出力を照射することで、 $\text{YVO}_4$  結晶を励起し、さらに結晶を4枚のミラーで囲うことでボウタイ共振器を形成し、 $1.06\mu\text{m}$  での

レーザー発振を実現した。

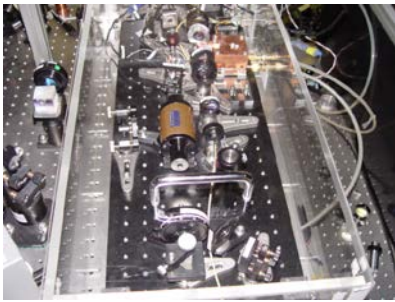


図5 YVO<sub>4</sub>レーザー

単一周波数での発振を実現するために、共振器内にエタロンを挿入し、また出力を増大させるために、レーザー出力の一部を再度共振器に戻すことで、右回り、左回りの共振モードの一方を抑圧した。レーザーの出力強度として約10Wを得た。さらに周波数モードホップを、1時間にわたって抑圧することに成功した。

レーザー冷却された原子集団を光でトラップするためには100Wオーダーのレーザーが必要となる。実際に得られたレーザー出力は10Wであり、全く十分ではない。この問題を解決する手法として、従来、共振器トラップと呼ばれる手法が用いられてきた。すなわち、レーザーを光共振器に導入することで、共振器内の光パワーを増大させるという手法である。ガラスセルで真空装置を作り、光のパスがガラスセルに対してブリュースター角で浸入するようにしておけば、ガラスによる光ロスを無視することができ、フィネスの高い共振器を実現することができる。ただしこの手法には問題点がある。通常ファブリペロー型光共振器の空間モードは、定在波型になっており、仮に原子を光トラップしたとしても、異なるサイトにトラップされた原子同士は衝突しないため、効率的な蒸発冷却を行うことが出来ないのである。

この問題を解決するため、我々はこれまで実現されたことのない、全く新しい手法にト

ライすることにした。具体的にはファブリペロー型ではなく、ガラスセルを含む形でボウタイ型の共振器を作成し、そこにレーザーを導入するというものである。この場合、進行波型の共振となるため、先の問題点が回避される。但し、図6に示されるように、光学系はかなり複雑になり、共振器が不安定になりやすいというトレードオフが発生する。

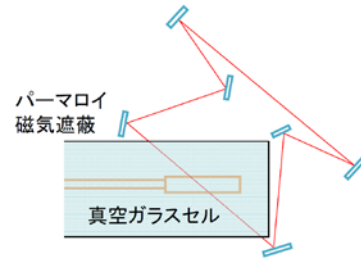


図6 ボウタイ型光共振器トラップ

我々は、1 $\mu$ mレーザー、ボウタイ共振器型光トラップを、小型のハニカム型除振台の上に組み、その除振台を、大型の除振台の上に固定するという手法をとることで、実験を遂行する上で十分な共振器の安定性を確保した。

ボウタイ型光共振器トラップは、図6をみるとわかるように、パーマロイ磁気遮蔽と共存できる形となっている。今回構成した系は、磁場トラップを利用しないため、強磁場によるパーマロイの磁化を避けることができる。とはいえ、真空ガラスセル内において磁気光学トラップを行う際、10G/cm程度の磁場勾配を必要とするため、これによるわずかな磁化が発生することが危惧された。

我々が構成したパーマロイ磁気遮蔽は、図7のような円筒形をしており、内部は3重構造となっている。通常パーマロイは、工場での消磁操作を行った上で出荷するが、そのレベルは100 $\mu$ G程度でしかない。我々は、パーマロイに対して、トロイダル状にコイルを巻き、そこに交流電流を流すことで、交流磁界を発生し、消磁を行った。このような交流消



磁は、簡便上、50Hz で行われることが多いが、その場合は、最終残留磁界として、数 10 $\mu$ G 程度しか得ることが出来ない。

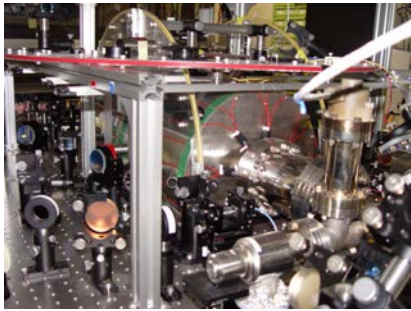


図 7 磁気シールド

様々な工夫の末、ある特定の周波数を用いることで、最終的に残留磁場を数  $\mu$ G、残留磁場勾配を 2  $\mu$ G/cm まで落とすことに成功した。この値は、磁気光学トラップを行っても影響を受けることがなく、磁場の問題が、根本的に解決されることとなった。

残念ながら、研究期間中に光トラップ中でのボース凝縮を実現するには至らなかったが、必要な系はすでに出来上がっており、凝縮の実現はかなり近いものと思われる。構築した系は、単に光トラップ中でのボース凝縮を行うだけでなく、それを数  $\mu$ G という超弱磁場下で実現する世界的にも例のない装置となっている。今後、すみやかに当初目的を達成していく所存である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文：抜粋〕(計 6 件)

1. Y. Eto, A. Noguchi, P. Zhang, M. Ueda, M. Kozuma, Phys. Rev. Lett. 106, 160501 (2010). 査読有
2. M. Takeuchi, N. Takei, K. Doi, P. Zhang, M. Ueda and M. Kozuma, Phys. Rev. A 81, 062308 (2010). 査読有
3. N. Takei, M. Takeuchi, Y. Eto, A. Noguchi, P. Zhang, M. Ueda, and M. Kozuma, Phys. Rev. A 81, 042331 (2010). 査読有
4. M. Arikawa, K. Honda, D. Akamatsu, S.

Nagatsuka, K. Akiba, A. Furusawa, M. Kozuma, Phys. Rev. A 81, 021605(R) (2010). 査読有

5. R. Inoue, T. Yonehara, Y. Miyamoto, M. Koashi, M. Kozuma, Phys. Rev. Lett. 103, 110503 (2009). 査読有

6. K. Akiba, K. Kashiwagi, M. Arikawa, and M. Kozuma, New J. Phys. 11, 013049 (2008). 査読有り

〔学会発表〕(計 1 件)

<国際会議：本研究に関連するもののみ>

“Toward 87Rb BEC at zero magnetic field”, S. Nagaoka, Y. Yamamoto, M. Nakada, Y. Kasahara, K. Honda, and M. Kozuma, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultra cold Atoms and Molecules (UCAM2011), PS-30 (Tokyo, Japan; Jan. 24, 2011).

〔図書〕(計 1 件)

上妻 幹旺、基礎からの量子光学—基礎理論から実用化に向けた取り組みまで、オプトロニクス社、第 12 章 光の保存と再生、P. 452-467 (2009).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.phys.titech.ac.jp/laboratory/kozuma.html>

<http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/>

<http://ultracold.t.u-tokyo.ac.jp/uedaERATO/kozuma/index-j.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

上妻 幹男 (KOZUMA MIKIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：10302837

(2) 連携研究者

本多 和仁 (HONDA KAZUHITO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：70408706