

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：32606

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740314

研究課題名（和文） 超電導イオントラップ系におけるイオンの計測・制御に関する研究

研究課題名（英文） Study on measurement and control of an atomic ion using superconducting ion trap

研究代表者

衛藤 雄二郎 (ETO YUJIRO)

学習院大学・理学部・助教

研究者番号：50600003

研究成果の概要（和文）：本研究は、内部自由度を伴う原子のスピンコヒーレンスの測定及び長寿命化を目的としている。第一の研究成果として、イオン原子の長寿命コヒーレンスの実現に向けて、シンプルな冷却イオントラップチャンバーの設計及び作成に成功した。2つ目の成果として、全角運動量が2の原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体のスピン歳差運動の観測並びにスピネコー法を用いたコヒーレンス時間の改善に成功した。

研究成果の概要（英文）：The target of this research is to measure and prolong a spin coherence time of atom with spin degrees of freedom. As the first achievement, I designed and constructed the simple cooled ion trap chamber toward the realization of long time coherence of an atomic ion. As the second achievement, I succeeded in observing the spin precession of spin-2 atomic gaseous Bose-Einstein condensate and improving the spin coherence time by using the spin echo technique.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：冷却イオントラップ、ボース・アインシュタイン凝縮体、コヒーレンス時間、スピネコー、磁力計

## 1. 研究開始当初の背景

(1) イオン原子は、量子情報処理を実現する上で必要となる長寿命コヒーレンス時間の達成が報告されている量子系の一つであり、量子エラー訂正 [Nature 432, 602 (2004)] や量子テレポーテーション [Nature 429, 734 (2009)] といった少数個のイオンを用いた先進技術の実現が報告されている。故に、量子情報技術を実現する上での有力な量子系の一つとして考えられている。

イオンの量子情報処理の大規模化を目指すうえで重要となる技術は、平面型のイオントラップの使用である。研究開始当初の段階では、多くの実験において、リニア型のイオ

ントラップが使用されていた。しかしながら、リニア型トラップでは、イオンの個数を増やすと同時に振動モードも増加してしまうため、大規模化が困難であるという問題が存在する。一方、セグメント化された平面型のイオントラップでは、領域毎にイオンに対する処理・演算方法を分けることで、多数個のイオンの処理が可能であることが期待されている [Nature 417, 709 (2002)]。

平面型のイオントラップを使用する場合の問題点は、電極とイオン間の距離を近づけた際に生じる振動状態の加熱である [Phys Rev. Lett. 97, 103007 (2008)]. 平面イオントラップを用いた量子情報技術を実現する

上では、この電極表面由来の加熱を抑え長寿命のコヒーレンス時間を実現することが重要となる。

(2) 本研究の大きな目的は、量子情報処理や量子測定の実現に向けた、原子のコヒーレンス時間の長寿命化である。私はイオン原子の研究と併せて、本研究期間内での応用技術の実現が可能な中性原子気体のルビジウムボース・アインシュタイン凝縮体のコヒーレンス時間に関する研究も行った。研究開始当初、ルビジウム原子気体のスピン1 ボース・アインシュタイン凝縮体を位相コントラストイメージング法により観測する手法により、800ms のスピンコヒーレンス時間の達成が報告されていた [Phys. Rev. Lett. 95, 050401 (2005)]。この長寿命のコヒーレンス時間を利用して、ボース・アインシュタイン凝縮体を磁場センサーとして用いた実験が報告されており [Phys. Rev. Lett. 98, 200801 (2007)]、 $120\mu\text{m}^2$  の高空間分解能で  $8.3\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$  の高感度な磁力計が実現している。低周波磁場の測定において、上述の感度は、高感度な磁力計として知られる超電導量子干渉計の感度に匹敵する値であり、ボース・アインシュタイン凝縮体を磁場測定センサーとして用いる応用研究の重要性を示す重要な結果であると考えられる。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の第1の目的は、イオン原子を用いた量子情報処理技術の実現に向けて、平面トラップ中で長寿命コヒーレンスを持つイオンの量子ビットを実現することである。

(2) 本研究の第2の目的は、イオン原子だけでなく、高感度高分解能な磁場センサーとして適していると考えられる中性原子のボース・アインシュタイン凝縮体のスピンコヒーレンス時間を測定し、更にコヒーレンス時間の長寿命化を目指すものである。特に、これまでコヒーレンス時間に関して研究報告がないスピン2のボース・アインシュタイン凝縮体について調査する。

## 3. 研究の方法

(1) 平面イオントラップ近傍でのイオンの加熱は、平面イオントラップ自体を冷却することにより大きく低減することができる。そのため私は、研究開始当初、超電導体のイオントラップを作成し、平面イオントラップを極低温まで冷却することで、加熱の低減を試みようと考えていた。しかしながら、研究を進めていくなかで、NISTのWinelandのグループが、アルゴンイオンレーザーを平面イオントラップに照射し表面をクリーニングすることにより、過熱を低減させることが可

能であることを立証した [Phys. Rev. Lett. 109, 103001 (2012).]。Winelandの手法は、アルゴンイオンレーザーを照射するという非常にシンプルな方法であるのに対し、超電導イオントラップでは、超伝導体を冷却するための希釈冷凍機が必要となり、装置が大がかりになるという欠点を持つ。この欠点を解消するために、私は超電導イオントラップの代わりに、液体窒素を用いた冷却イオントラップの設計及び作成を目指すことにした。液体窒素は、超電導体に比べ、冷却可能温度が高いという欠点を持つが、装置の大幅な簡略化とコンパクト化が可能であり、更に装置全体に係る費用を大きく抑えることができる。

(2) スピン1 ボース・アインシュタイン凝縮体のコヒーレンス時間の測定や磁力計への応用研究においては、上述にもあるように位相コントラストイメージング法と呼ばれる原子と光との分散的な相互作用を利用した測定法が利用されていた。位相コントラストイメージング法は、ボース・アインシュタイン凝縮体を非破壊的に測定することが可能、つまり一つのボース・アインシュタイン凝縮体を何度も測定できるという利点を持つが、スピンの方向のみの情報しか得ることができず、各磁気副準位成分（スピン1であれば3成分）の分布の情報を得ることができない。一方、本研究では、ラムゼイ干渉法とシュテルンゲルラッハ吸収イメージング法と呼ばれる手法を採用し、スピンコヒーレンス時間を測定する。本手法では、1つのボース・アインシュタイン凝縮体に対して1度の測定しか行うことができないが、スピン2の5つの磁気副準位の分布を知ることが可能であるという利点を持ち、詳細なスピンドYNAMIXの調査が可能である。更に、コヒーレンス時間を延ばすために、スピンエコー技術を利用し、コヒーレンス時間の測定を行う。

## 4. 研究成果

(1) 液体窒素による冷却イオントラップチャンバーの設計及び構築に成功した。具体的な構成として、真空チャンバー内に液体窒素タンクとそれに接するイオントラップ冷却用の銅製ボックスを配置した。また、イオントラップを効率的に冷却するために、熱伝導率の高い絶縁部品である窒化アルミを絶縁部品として作成した。作成したイオントラップチャンバーは、 $-180$ ケルビンの温度まで冷却が可能である。また、4時間程度冷却が持続されることが確認できた。この冷却温度及び持続時間は、イオンのコヒーレンス時間の測定を行い、長寿命化を観測する上で十分な値であると考えられる。

本研究では、最終的な目標である、冷却ト

ラップによるイオン原子の加熱の抑制を観測するまでには至らなかった。しかしながら、本研究を通して構築した液体窒素による冷却イオントラップチャンバーは、当初予定していた超電導イオントラップ系より格段にコンパクトなものとなっており、光学的なアクセスも比較的容易に行える。そのため、汎用性の高い装置の構築が実現できたものと考えている。また、冷却チャンバーは、イオン原子だけでなく中性原子系のコヒーレンスを延ばす上でも重要な技術である [New J. Phys. 12, 065024 (2010)]. 今後は、本研究を通して構築したシステムを用いて、原子のコヒーレンス測定の実現を目指し研究を進める予定である。

(2) スピン2のボース・アインシュタイン凝縮体のラーモア歳差運動の観測と制御並びに、ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた交流磁力計の実現に成功した。以下では、①ラムゼイ干渉計を用いたラーモア歳差運動の測定、②スピネコー法を用いたコヒーレンス時間の改善、③ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた交流磁力計の実現の順で研究成果を説明する。

①スピン2のラーモア歳差運動を観測するために、まずは光トラップ中にボース・アインシュタイン凝縮体を準備する。ここで軸方向と動径方向のトラップ周波数は、それぞれ30Hzと100Hzである。長軸方向(z方向)にバイアス磁場を印加し、磁気副準位-2 ( $m_F=-2$ )のボース・アインシュタイン凝縮体を準備する。その後2発のラジオ波 $\pi/2$ パルスから構成されるラムゼイ干渉法を実装する。1発目の $\pi/2$ パルスにより歳差運動が誘起され、2発目の $\pi/2$ パルスにより、スピン歳差運動の位相情報がスピンz方向の大きさ $S_z$ に変換される。最後に、シュテルンゲルラッハ吸収イメージング法により、各磁気副準位の原子数分布が測定され、 $S_z$ の期待値を得ることができる。

図1は、2発の $\pi/2$ パルスの時間間隔、つまり歳差運動の時間を130 $\mu$ sから132 $\mu$ sまで変化させ測定した各磁気副準位の原子数分布である。130 $\mu$ s(図1の一番上の図)において、ほぼ $m_F=-2$ だけであった原子が、時間間隔を延ばすことで5成分の重ね合わせ状態となり、更には、 $m_F=+2$ の状態(図1の一番下の図)に変化していることが分かる。これは、ラムゼイ干渉法により、ラーモア歳差運動が観測されたことを表している。

コヒーレンス時間を調査するために、歳差運動時間を変化させ、ラーモア歳差運動の測定を繰り返し行った。その結果、約3msのコヒーレンス時間が得られた。本評価方法では、位相コントラストイメージング法と異なり、

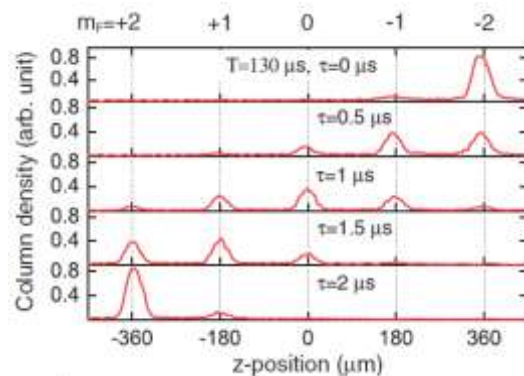


図1. ラムゼイ干渉法によるラーモア歳差運動の観測

複数個のボース・アインシュタイン凝縮体の測定からコヒーレンス時間を見積もっているため、測定毎に変化するバイアス磁場の僅かな変動がコヒーレンス時間を制限する大きな要因であると考えられる。

②ラムゼイ干渉実験では、磁場の時間的な変動がコヒーレンス時間を制限する大きな要因となっていた。磁場の時間的な変動や空間的な不均一性の効果は、スピネコー法により低減させることが可能である。図2は、スピネコー法を用いた場合のコヒーレンス時間の評価結果を表している。具体的なスピネコーの実装方法は、2発の $\pi/2$ パルスの中間に $\pi$ パルスを1発照射するというものである。スピネコーを行うことで、12msまでコヒーレンス時間を改善することに成功した。更に、スピネコー法により、磁場勾配により生成されるスピンのらせん構造が抑圧されることを確認することができた。

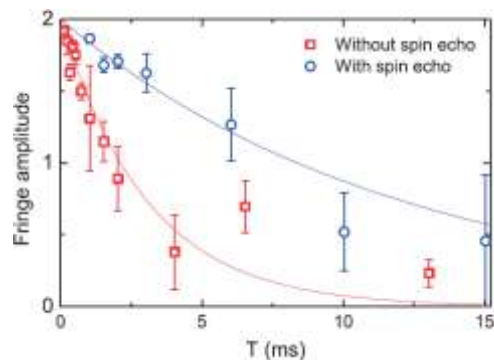


図2. スピネコー法の有無によるコヒーレンス時間の比較

スピン2ボース・アインシュタイン凝縮体に対してスピネコー技術を適用した例はこれまでに報告がなく、上述の①②の結果は、Applied Physics Express 誌に掲載された (Appl. Phys. Express 8, 052801 (2013)).

③ボース・アインシュタイン凝縮体にスピン

エコー法を適用することにより、微弱な交流磁場を測定することに成功した。スピンエコー法は、ゆっくりとした磁場の変動を打ち消す効果を持つが、逆に、2発の $\pi/2$ パルスの時間間隔に一致する周期の交流磁場に対しては、磁場変動の効果を増幅させるような働きを示す。このスピンエコーの性質と密に原子が存在するボース・アインシュタイン凝縮体の性質を利用して、約  $100\mu\text{m}^2$  の分解能で  $12\text{pT/Hz}^{1/2}$  の感度を持つ磁力計の構築に成功した。本研究で確立した交流磁場測定の手法を用いることで、真空チャンバー内の磁場の変動を測定し、更にその変動を抑圧することが可能である。変動の少ない磁場環境は、弱磁場中でのスピノールボース・アインシュタイン凝縮体のスピンドYNAMICKSの観測や磁気的な基底状態の探索といった非常に興味深い実験を実装する上で、非常に重要な技術となる。本研究成果は、現在論文投稿中である (arXiv:1306.1011)。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

(1) Yujiro Eto, Sawako Sekine, Sho Hasegawa, Mark Sadgrove, Hiroki Saito, Takuya Hirano, Control and Detection of the Larmor Precession of  $F=2$   $^{87}\text{Rb}$  Bose-Einstein Condensates by Ramsey Interferometry and Spin-Echo, Applied Physics Express, 査読有, Vol. 6, 2013, 052801-1-4, DOI: 10.7567/APEX.6.052801

(2) Yujiro Eto, Akane Koshio, Akito Ohshiro, Junichi Sakurai, Keiko Horie, Takuya Hirano, Masahide Sasaki, Efficient homodyne measurement of picosecond squeezed pulses with pulse shaping technique, Optics Letters, 査読有, Vol. 36, 2011, 4653-4655, <http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.004653>

[学会発表] (計4件)

- ① 衛藤雄二郎、スピノールボース凝縮体を用いた磁力計、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月27日、広島大学東広島キャンパス
- ② 関根佐和子、スピン2ボース・アインシュタイン凝縮体におけるラーモア歳差運動の測定3、日本物理学会第68回年次大

会、2013年3月27日、広島大学東広島キャンパス

- ③ 関根佐和子、スピン2ボース・アインシュタイン凝縮体におけるラーモア歳差運動の測定2、日本物理学会2012年秋季大会、2012年9月19日、横浜国立大学
- ④ 衛藤雄二郎、CWモード同期レーザーと光導波路を用いたスクイーズド光の生成(III)、日本物理学会2011年秋季大会、2011年9月23日、富山大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://qo.phys.gakushuin.ac.jp/~eto/>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

衛藤 雄二郎 (ETO YUJIRO)

研究者番号: 50600003