

量子縮退原子スピンを用いた全く新しい光の量子もつれ合い状態の生成と制御に関する研究 (031307005)

Study on new method for generation and control of quantum entangled states of light by using atomic spin ensemble of quantum degenerate gas

研究代表者

高橋義朗 京都大学大学院理学研究科

Yoshiro Takahashi, Graduate School of Science, Kyoto University

研究分担者

高須洋介 京都大学大学院理学研究科

Yosuke Takasu, Graduate School of Science, Kyoto University

研究期間 平成 15 年度～平成 19 年度

本研究開発の概要

本研究では、レーザー冷却されたイッテルビウム原子気体、特にフェルミ縮退などの量子気体を全光学的に生成する技術を創出し、さらに冷却気体のスピン集団に複数の光パルスを入射させて偏光面のファラデー回転を起こさせ、量子非破壊測定によるポストセレクションやコヒーレント光によるひねりを利用して、スピン間および光の偏光状態間に量子もつれ合い状態を実現する。こうして実現された光の偏光状態についての量子もつれ合い状態を、複数回、原子集団に対して相互作用させることにより、遠く離れた原子集団間の量子エンタングルメント生成や量子スワッピング、量子メモリーなどの量子情報通信、量子インターフェースを行うなど、様々な応用研究を行うことが目標である。

Abstract

We develop a new method for creating a laser-cooled ytterbium atomic gas, especially in the quantum degenerate regime such as Fermi-degeneracy. By irradiating the atomic gas with several light pulses, we induce Faraday rotation of polarization plane of the light pulses and we generate quantum entangled states between atomic spins or light pulses through post-selection via quantum nondemolition measurement and/or one-axis twisting interaction. We will apply this scheme to quantum communication or quantum interface such as generating a quantum entanglement between distant spin ensembles, a quantum swapping, and a quantum memory.

1. まえがき

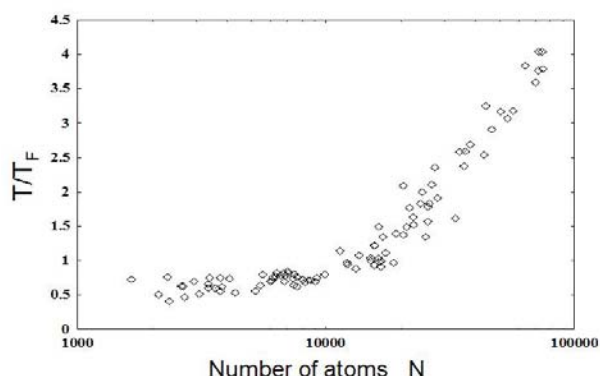
本研究では、量子縮退原子集団を量子情報通信の研究に新たに利用しそれらが持つ特異な純粋量子状態を最大限に利用するというもので、熱運動する古典的高温原子集団の混合状態を利用する従来の手法とは根本的に異なるものであり世界的にも全く例のない新しい試みである。本研究では特に、イッテルビウム (Yb) 原子を用いてそのファラデー回転相互作用に基づいた様々な応用に着目し研究を行い、この方向性で幾つもの成果を獲得することができた。これを契機に量子縮退原子集団を量子情報通信の研究に応用する研究が今後本格化すると考えられる。以下で具体的な成果について報告する。

2. 研究内容及び成果

本研究の内容は、A) 量子縮退原子集団の生成、に関するもの、および B) 原子と光のファラデー回転相互作用によるスクイーミング、に関するもの、に大別される。獲得した主な成果をまとめると、A) 量子縮退原子集団の生成に関するものとして、1) 多成分スピンを持った Yb 原子のフェルミ縮退の実現、2) 新しい量子状態制御に向けた Yb 原子の光会合共鳴の観測、3) Yb 原子の準安定状態における原子衝突の解明、4) スピノール分子ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の生成、5) デコヒーレンスの無視できるコヒーレントスピン操作法の開発、6) Yb 原子 BEC の準安定状態へのコヒーレントな励起、および、7) 1 次元光格子中への Yb 原子 BEC の導入と原子数スクイーゾド状態の生成、が挙げられる。また、B) 原子と光のファラデー回転相互作用に関しては、8) ショットノイズ限界の QND 測定系の開発、9) Yb 原子ビームを用いた集団

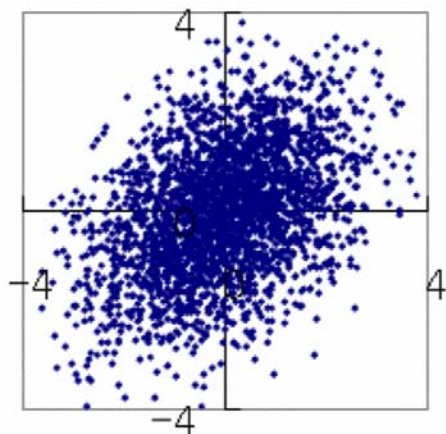
スピンノイズ測定、10) 冷却 Yb 原子のファラデー回転観測、11) コヒーレント光との相互作用による一軸ひねりスピンスクイーミングの提案、12) 冷却 Yb 原子のスピン集団に対するファラデー回転相互作用によるスピンスクイーミングの実現、13) 量子電磁気学効果によるファラデー回転相互作用の増幅の観測、および 14) ファラデー回転相互作用にもとづく量子スワッピングの量子ゲートとしての性能評価、が挙げられる。このうち、特に重要と思われる、1) 多成分スピンを持った Yb 原子のフェルミ縮退の実現、および、12) 冷却 Yb 原子のスピン集団に対するファラデー回転相互作用によるスピンスクイーミングの実現、について詳しく報告する。

これまで、レーザー冷却原子を用いたフェルミ縮退は、 ^{40}K と ^6Li の 2 種類のアルカリ原子のみであり、基底状態に電子スピンが存在するため、揺動磁場の影響を大きくうけてしまう。これは量子メモリーその他の量子情報通信、量子インターフェースへの応用を考えた場合、大変不利である。一方、本研究で対象とした Yb 原子のフェルミ縮退気体では、これまでのものとは根本的に異なり、2 電子系であり基底状態に電子スピンを持たず、核スピンが存在する (^{173}Yb は核スピン 5/2、 ^{171}Yb は核スピン 1/2)。そのため、微弱な磁場や磁場勾配による影響を受けにくい、という大きな特徴があり、極めて制御しやすく、かつ、デコヒーレンスが最小であることが期待される。特に、純粋にスピン 1/2 の系は、光との相互作用において高次のテンソル効果が全くないという意味で理想的な系である。次図に、原子数を減らすことによって、原子の温度を冷却する過程をプロットしたものを示す。フェルミ温度程度まで冷却すると、



パウリブロッッキングといわれる量子統計性の効果により冷却効率が低下する現象も確認された。今回実現した ^{173}Yb のフェルミ縮退および ^{171}Yb のフェルミ温度以下までの冷却は、世界に先駆けて実現に成功したものであり、現在、我々のグループにしか実現できないという極めて独創性の高いものである。

このように生成した冷却原子集団に対してスピンスクイズド状態を生成することが本研究プロジェクトの最も重要な目的のひとつである。本プロジェクトで主として研究してきたスピンスクイズド状態生成方法は、原子スピン集団に対して偏光のファラデー回転によるスピン量子非破壊測定を行い、ポストセクションによって実現するというものである。本研究では、上記B)において記述した通り、必要な基盤技術開発を行ってきた。これまでの本研究プロジェクトで開発した偏光回転検出装置の特徴は、原子の特定な共鳴線に同調可能な波長可変な光源を用いた、パルス動作モードでの、ショットノイズ限界の偏光回転検出装置である。さらに、DC成分を含めた広帯域において標準量子限界での雑音測定を実現できる検出器を2台製作し、短時間に2つのパルス光を測定できる系を構築した。この装置を用いて、スピン偏極した冷却 ^{171}Yb 原子集団に対して、100ns程度パルス幅を持つ2つの光を入射されて、ファラデー回転相互作用によって生じる偏光ノイズの間の相関測定を行った。下図にその結果を示す。横軸に1発目に入射した光パルスの偏光ノイズ(ショットノイズにより規格化)をプロットし、縦軸に、2発目に入射した光パルスの偏光ノイズ(ショットノイズにより規格化)をプロットしている。もし、原子がない場合には、図に現れたような相関は観測されないことを確認している。さらに、観測された偏光ノイズの相関は、古典的な相関ではなく、量子スピンノイズ相関であることを定量的に確認して



いる。この結果はまた、集団スピンの量子非破壊測定、およびそれによるスピンスクイズディングに成功したことを

意味している。特に、本研究で用いている ^{171}Yb 原子は、スピン 1/2 の系であり理想的なスピン量子非破壊測定が可能である。一方これまで用いられていたアルカリ原子の場合はスピン 1 以上であるためテンソル効果が混入してきてしまい、その影響は注意深く取り除かなくてはならない。今後の応用を考えた場合、スピン 1/2 の ^{171}Yb 原子でのスピン量子非破壊測定、スピンスクイズディングの実現は非常に重要であると考えている。

3. むすび

量子縮退原子集団を量子情報通信の研究に新たに利用する新しい試みに向けて、幾つもの成果を獲得することができた。この成果を基に、今後本格的な量子情報通信への応用研究を行うことが可能になった。

【誌上発表リスト】

- [1] M. Takeuchi, S. Ichihara, T. Takano, M. Kumakura, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, "Spin Squeezing via One-Axis Twisting with Coherent Light", Phys. Rev. Lett. Vol.94 No.2 pp023003-1-4 (18 January 2005)
- [2] T. Fukuhara, Y. Takasu, M. Kumakura, Y. Takahashi, "Degenerate Fermi Gases of Ytterbium", Phys. Rev. Lett. Vol.98 No.3 pp030401-1-4 (19 January 2007)
- [3] M. Takeuchi, S. Ichihara, T. Takano, M. Kumakura, and Y. Takahashi, "Spin Noise Measurement with Diamagnetic Atoms", Phys. Rev. A, Vol.75 No6 pp063827-1-4 (June 2007)

【受賞リスト】

- [1] 高橋義朗、藪崎努、応用物理学会 H17 年度光・量子エレクトロニクス業績賞、“イッテルビウム原子の BEC”、H18 年 3 月 22 日

【報道発表リスト】

- [1] "Ytterbium joins the condensates", PhysicsWeb, 31 July 2003
- [2] "A Spinless BEC", Physics News Update, Number 652, September 4, 2003