

氏 名	たけ うち まこと 竹 内 誠
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2970 号
学位授与の日付	平 成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Study on quantum spin noise with atomic ensemble of ytterbium (イッテルビウム原子集団を用いた量子スピン雑音の研究)
論文調査委員	(主 査) 助教授 高 橋 義 朗 教 授 田 中 耕 一 郎 教 授 松 田 祐 司

論 文 内 容 の 要 旨

近年、量子情報の研究が様々な系を対象として盛んに行われているが、原子スピン集団の持つ量子性も、大変興味を持たれて研究されているもののひとつである。光と原子の相互作用により、光が担う量子情報を原子集団スピン系に転写し、さらにそれを蓄え、その後に、再び光として取り出す、いわゆる量子中継は、その代表的な応用例である。また、量子情報通信等に重要な役割を果たす、光の非古典的な状態を、光と原子の相互作用により生成することも大変重要なテーマとなっている。一方、これまで、原子スピン集団の系を用いて、たとえば原子の永久電気双極子モーメントなどの、スピンに関連した物理量の超精密測定が行われてきた。このような極限的な測定では、測定限界は、スピン集団の持つ量子ゆらぎにより決定される。本論文は、この原子スピン集団の量子性、特にその量子ゆらぎ（ノイズ）について、理論及び実験を行った研究である。

本研究では、まず、原子スピン集団とコヒーレント光との相互作用による新たなスピンスクイジングの手法を考案した。スピン集団はハイゼンベルグの不確定性関係により、量子ゆらぎをもつが、個々のスピン間に相関を持たせることにより、この量子ゆらぎを抑制することができる。これがスピンスクイジングである。新しい方法は、原子スピンによる光のファラデー回転と、円偏光の光による擬似磁場、という基本的な過程を組み合わせたものであり、測定による射影を必要としない、などこれまで考えられてきた手法と比べ簡易であり、ゆらぎの抑制も従来のものと同程度以上のものが期待できる。さらに、測定による射影を用いる従来の方法に比べて、効率的にスピンスクイジングが得られる、という利点がある。本研究では、この新しい手法の実現可能性も議論した。

さらに、上記の新しい手法や量子非破壊測定による射影を用いたスピンスクイジングの実現に向けて、イッテルビウム原子を用いた実験的研究を行った。イッテルビウム原子は、基底状態に電子スピンを持たないため、これまで他の研究で用いられてきたアルカリ原子に比べて、外部浮遊磁場の影響が極めて少なく、他の系で問題となるデコヒーレンスを極めて小さく抑えることが可能である、という利点がある。本研究では、まず、高密度のイッテルビウム原子ビーム装置を製作し、ファラデー回転信号を高精度に測定することに成功した。つぎに、高精度偏光検出器を作成して、古典的なノイズを除去し、原子スピン集団の量子ノイズの測定にも成功した。また、スピンスクイジングも含めた様々な応用の可能性を広げるため、イッテルビウム原子のレーザー冷却及びトラップ実験を行い、それによって得られた 1mK 以下の極低温イッテルビウム原子に対しても、ファラデー回転を観測することに成功した。

さらに、特に量子非破壊測定によるスピンスクイジングの実現に向けて、100ns 程度の短いパルスによる光のショットノイズ限界の感度を持つ偏光検出器の開発に成功した。これまでのショットノイズ限界の感度を持つ偏光検出器検出はほとんどが連続光のものであったが、より高度なパルスモードでの検出器の開発は、今後の応用にとって重要な実験的成果である。

論文審査の結果の要旨

近年、原子スピン集団の持つ量子性は、量子情報研究の対象として盛んに研究されているもののひとつである。本論文は、この原子スピン集団の量子性、特にその量子ノイズについて、理論的及び実験的基礎研究を行ったものを報告したものである。

本研究では、まず、原子スピン集団とコヒーレント光との相互作用による新たなスピンスクイジングの手法を考案した。スピン集団はハイゼンベルグの不確定性関係により、量子ゆらぎをもつが、個々のスピン間に相関を持たせることにより、この量子ゆらぎを抑制することができる。これがスピンスクイジングである。新しい方法は、原子スピンによる光のファラデー回転と、円偏光の光による擬似磁場、という基本的な過程を組み合わせたものであり、測定による射影を必要としない、などこれまで考えられてきた手法と比べ簡易であり、ゆらぎの抑制も従来のものと同程度以上のものが期待できる。さらに、測定による射影を用いる従来の方法に比べて、効率的にスピンスクイジングが得られる、という利点がある。本研究では、この新しい手法の実現可能性も議論した。

さらに、上記の新しい手法や量子非破壊測定による射影を用いたスピンスクイジングの実現に向けて、イッテルビウム原子を用いた実験的研究を行った。イッテルビウム原子は、基底状態に電子スピンを持たないため、これまで他の研究で用いられてきたアルカリ原子に比べて、外部浮遊磁場の影響が極めて少なく、他の系で問題となるデコヒーレンスを極めて小さく抑えることが可能である、という利点がある。本研究では、まず、高密度のイッテルビウム原子ビーム装置を製作し、ファラデー回転信号を高精度に測定することに成功した。つぎに、高精度偏光検出器を作成して、古典的なノイズを除去し、原子スピン集団の量子ノイズの測定にも成功した。また、スピンスクイジングも含めた様々な応用の可能性を広げるため、イッテルビウム原子のレーザー冷却及びトラップ実験を行い、それによって得られた1mK以下の極低温イッテルビウム原子に対しても、ファラデー回転を観測することに成功した。

さらに、特に量子非破壊測定によるスピンスクイジングの実現に向けて、100ns程度の短いパルスによる光のショットノイズ限界の感度を持つ偏光検出器の開発に成功した。これまでのショットノイズ限界の感度を持つ偏光検出器検出はほとんどが連続光のものであったが、より高度なパルスモードでの検出器の開発は、今後の応用にとって重要な実験的成果である。

以上のように、申請者の研究によって、原子スピン集団の量子性の研究において、新しい知見が得られた。これらの研究は、世界に先駆けた極めて独創的なもので、すでに学術雑誌や国内・国際会議などを通して、国の内外を問わず脚光を浴びている。これらの研究は、今後、光・原子・分子物理学、量子情報処理、量子エレクトロニクス、など、多くの研究分野への貢献も多大であり、高く評価できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。