

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	奥野 大地
論文題目	Single ytterbium atoms in an optical tweezer array: high-resolution spectroscopy, single-photon Rydberg excitation, and a scheme for nondestructive detection (単一イッテルビウム原子光ピンセットアレイ：超狭線幅分光と1光子リドベルグ励起及び非破壊検出スキーム)		
(論文内容の要旨)			
<p>近年、中性原子のレーザー冷却技術が開発され、マイクロケルビン台の極低温の原子集団を用意することが可能になり、物性、量子情報、原子時計、その他様々な研究に用いられている。さらに、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子気体が生成され、その物性研究が、盛んに研究されている。また、冷却原子気体を、光ピンセットアレーや光格子と呼ばれるレーザー光によってつくられたポテンシャルに導入した系は、固体中の電子系とのアナロジーから、強相関量子多体系を研究する新しい実験系として注目を集め、盛んに研究されている。特に、不純物や格子欠陥のない、理想的な系を対象とすることができることや、系のパラメーターを高い精度で制御可能であることが大きな特徴であり、このようなことから、光ピンセットアレーや光格子中の冷却原子を用いた実験は、量子多体系に対する量子シミュレーション実験と認識されている。さらに、光ピンセットアレー中の単一原子の系は、量子計算機の実現に有望な系としても、近年注目を集めている。</p> <p>このような背景のもと、本申請者の奥野大地氏は、以下に詳述する2つの研究に取り組んだ。まず第一の研究は、光ピンセットアレー中の中性原子を用いた量子計算の実現に向けた研究である。特に、これまで主に用いられてきたアルカリ原子と異なり、豊富な内部自由度を有することに起因した様々な有利な特徴を有する2電子系原子であるイッテルビウム原子に着目して実験系を構築することに成功した。まず、高い集光効率を有する対物レンズを上下に装着可能な特殊金属チャンバーを組み上げ、それを用いてイッテルビウム原子ビームのレーザー減速および磁気光学トラップによる低温原子集団を生成し、単一イッテルビウム原子を2次元光ピンセットアレーにトラップしそれを発光イメージングにより検出することに成功した。さらに量子フィードバックの手法により1次元および2次元の無欠陥な原子アレーの生成に成功した。特に、音響光学偏向器のみを用いて2次元の無欠陥な原子アレーを初めて実現している。さらに、長寿命準安定励起状態である3P2状態に注目し、単一イッテルビウム原子の基底状態から3P2状態への超狭線幅分光に成功した。これは、基底状態と3P2状態からなる量子ビットの可能性を示すものである。また、光ピンセットアレー中の単一イッテルビウム原子を用いて、3P2状態からの1光子励起によるリドベルグ状態への励起に成功した。これは、アルカリ原子等で通常採用されている2光子励起で問題となるデコヒーレンスを回避することが可能であり、量子計算実現のための新しい可能性を実証したものである。また、リドベルグ状態に対する高感度なイオン化検出を実装することにより、イッテルビウム原子のリドベルグ状態の系統的な分光実験を行い、新しい共鳴を複数発見することに成功し、量子計算に必要な2量子ビットの実現のための重要な知見を得ることに成功した。</p> <p>第2の研究は、光ピンセットアレーおよび光格子にトラップされた単一原子の非破壊測定に関する理論提案である。奥野氏は、イメージングに伴う加熱問題に注目し、光格子系にも適用可能な究極の手法として、光子の実吸収のない非破壊な原子の検出</p>			

が真空スクイーズド光といった非古典的な光を用いることで初めて達成されることを具体的なスキームとともに示した。

これらの成果は、世界で初めての重要な成果であり、冷却原子を用いた量子計算・量子シミュレーション研究を大きく前進させたと言える。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本研究の背景として、近年、中性原子のレーザー冷却技術が開発され、マイクロケルビン台の極低温の原子集団を用意することが可能になり、物性、量子情報、原子時計、その他様々な研究に用いられていることが挙げられる。例として、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子気体が生成され、その物性研究が盛んに研究されている。さらに、冷却原子気体を、光ピンセットアレーや光格子と呼ばれるレーザー光によってつくられたポテンシャルに導入した系は、固体中の電子系とのアナロジーから、強相関量子多体系を研究する新しい実験系として注目を集め、盛んに研究されている。特に、不純物や格子欠陥のない、理想的な系を対象とすることができることや、系のパラメーターを高い精度で制御可能であることが大きな特徴であり、このようなことから、光ピンセットアレーや光格子中の冷却原子を用いた実験は、量子多体系に対する量子シミュレーション実験と認識されている。さらに、光ピンセットアレー中の単一原子の系は、量子計算機の実現に有望な系としても、近年注目を集めている。

このような背景のもと、本申請者の奥野大地氏は、以下に詳述する2つの研究に取り組んだ。まず第一の研究は、光ピンセットアレー中の中性原子を用いた量子計算の実現に向けた研究である。特に、これまで主に用いられてきたアルカリ原子と異なり、豊富な内部自由度を有することに起因した様々な有利な特徴を有する2電子系原子であるイッテルビウム原子に着目して実験系を構築することに成功した。まず、高い集光効率を有する対物レンズを上下に装着可能な特殊金属チャンバーを組み上げ、それを用いてイッテルビウム原子ビームのレーザー減速および磁気光学トラップによる低温原子集団を生成し、単一イッテルビウム原子を2次元光ピンセットアレーにトラップしそれを発光イメージングにより検出することに成功した。さらに量子フィードバックの手法により1次元および2次元の無欠陥な原子アレーの生成に成功した。特に、音響光学偏向器のみを用いて2次元の無欠陥な原子アレーを初めて実現している。さらに、長寿命準安定励起状態である3P2状態に注目し、単一イッテルビウム原子の基底状態から3P2状態への超狭線幅分光に成功した。これは、基底状態と3P2状態からなる量子ビットの可能性を示すものである。また、光ピンセットアレー中の単一イッテルビウム原子を用いて、3P2状態からの1光子励起によるリドベルグ状態への励起に成功した。これは、アルカリ原子等で通常採用されている2光子励起で問題となるデコヒーレンスを回避することが可能であり、量子計算実現のための新しい可能性を実証したものである。また、リドベルグ状態に対する高感度なイオン化検出を実装することにより、イッテルビウム原子のリドベルグ状態の系統的な分光実験を行い、新しい共鳴を複数発見することに成功し、量子計算に必要な2量子ビットの実現のための重要な知見を得ることに成功した。

さらに、奥野氏は、光ピンセットアレーおよび光格子にトラップされた単一原子の非破壊測定に関して、イメージングに伴う加熱問題に注目し、光格子系にも適用

可能な究極の手法として、光子の実吸収のない非破壊な原子の検出が真空スクイーズド光といった非古典的な光を用いることで初めて達成されることを具体的なスキームとともに示した。これが第2の研究である。

これらは、世界に先駆けたもので、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。今後、光・原子物理学、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、令和4年5月30日、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。

要旨公表可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降