

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岡場翔一

原子間や環境との相互作用を排除した単一原子（イオン）観測系の実現は、かつて光原子物理学が追い求めた大きな目標の一つだった。このような実験系の確立は、量子跳躍の観測や単一原子からの蛍光のアンチ・バンチングの観測、さらには、光やマイクロ波共振器と組み合わせることで、共振器量子電磁気学（CQED）の研究を可能にした。これらの理想原子を複数個に拡張する新たな実験系の構築は、今後の CQED 研究や量子計測の基幹技術として大きなインパクトをもつ。

原子時計、干渉計、磁場計など原子を用いた量子計測の測定限界は、典型的には量子射影雑音（Quantum Projection Noise, QPN）で与えられる。測定にかかる原子数を N とすれば、測定の統計精度（安定度）は $1/\sqrt{N}$ に比例して向上するため、原子数 N の増大は切実な要請である。ところが、レーザー光と原子の相互作用体積 $V = \pi w^2 L$ （ w はレーザーのビーム半径、 L はレーリ長や共振器長で決まる相互作用長）を考えると、原子数の増加は原子密度 $n = N/V$ の上昇をもたらす、原子間相互作用を引き起こす。このため、原子数 N の増大による測定の安定度の向上と、原子間相互作用による不確かさの増大はトレードオフの関係にある。

本論文では、原子数の増大（安定度向上）と原子間衝突の抑制（不確かさの低減）を両立させるために、中空フォトニック結晶ファイバー（以下、中空ファイバー）を用いた新たな量子計測のプラットフォームを提案している。レーザー光は中空ファイバー中を拡散することなく導波されるため、ファイバー中では原子と光の結合を損なうことなく、ファイバー長 L の延伸により相互作用体積 V を増大可能である。さらに、中空ファイバー中で（原子の共鳴周波数を変化させない）魔法波長を使う定在波を形成し、その N 個の腹に単一原子を捕獲することで（光格子）、原子間衝突および原子とファイバー内壁との衝突を抑制できる。これらを実証するため、魔法波長の光格子に閉じ込めたストロンチウム(^{88}Sr)原子を中空ファイバーに導入し、スピン禁制遷移（ $^1S_0 - ^3P_1$ ）のラム・ディッケ分光を行った。この結果、プローブ光の飽和広がりだけで説明できる7.8 kHzのスペクトル線幅を観測し、原子間やファイバー壁との相互作用を排除した実験系を実現した。

このような原子系は、原子と光の協力現象の理想的なテストベッドである。本論文の後半では、 $^1S_0 - ^3P_1$ 遷移での超放射を観測している。特に、超放射成分の40%もが中空ファイバーの基本モードにカップルすることを利用して、そのヘテロダイン分光によって超放射の振る舞いを詳細に調べている。このような、シングルモードにカップルする超放射光は、超放射レーザー（Bad cavity レーザー）構築に向けた重要な技術基盤である。レーザーミラーの熱的ノイズに支配される従来型のレーザー（Good cavity レーザー）に対し、高い Q 値をもつ原子をレーザー媒質として用いる Bad cavity レーザーは、超狭線幅光源の構成手法として注目されている。

本論文は5章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、本論文の序論として、中空ファイバーが新たな量子計測のプラットフォームとして有効であることと、これを用いた超放射現象を利用した光源の可能性を述べている。次に、研究の目的を述べ、本研究の構成を示している。

第2章では、中空ファイバーへの原子の導入のための実験装置、原子トラップ、中空ファイバーへの導入方法を説明する。その後、ファイバー中の原子のトラップ寿命測定、原子の移動に伴うパラメトリック加熱とその抑制に関する実験について述べている。

第3章では、中空ファイバー中での ^{88}Sr 原子の $^1S_0 - ^3P_1$ 遷移の分光実験を記述する。原子を捕獲する光格子レーザー光の波長、偏光状態を制御することでシュタルクシフトを抑制した。原子数を増加させたときの原子間衝突に伴う周波数シフトの観測、原子拡散による衝突シフトの低減など、詳細な分光実験について述べている。

第4章では、中空ファイバー中に導入した原子の超放射現象を観測し、平衡ヘテロダイン法による放射光の周波数測定、および放射光の中空ファイバーモードへの結合の原子数依存性測定について述べている。

第5章では、本研究の結果をまとめ、今後の展望を述べている。

以上のように、本論文では、中空ファイバー中で形成した魔法波長・光格子により、多数個の原子を一次元的に配列、捕獲する新しい量子計測のプラットフォームを実現した。このような、(原子に加わる摂動を極限まで抑制した)理想原子の一次元系は、原子の協力現象の詳細な検証を可能にする。スピン禁制遷移で観測された超放射現象を詳細に解析し、放射光の周波数とファイバーモードへの結合効率を評価した。これらは、超放射レーザー構築の基礎となる重要な成果であるとともに、多体の光原子物理学の研究に新たなツールを提供するものである。従って、本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。