

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岡村幸太郎

現在、光干渉計は高精度計測において広く用いられる技法となっている。これに対し、近年、原子波を干渉波動として用いる原子干渉計の実験が行なわれるようになってきている。原子干渉計は光干渉計に比べ、1. 他の条件が同じとしてサニャックジャイロを構成した場合 10^{11} 倍程度感度が高い 2. 磁場や物質との強い相互作用など、光干渉計でとらえられない物質の測定が可能 等という特長を持っている。原子干渉計の構成要素としては、1. 原子線源、2. 原子波束分割手段、3. 原子波束重ね合わせ手段、4. 原子波検出手段がある。レーザー冷却技術の発展により高輝度の原子波源が得られるようになり、また微細加工技術の進歩やレーザー周波数制御技術の進歩により、現実的な原子波束分割/重ね合わせ手段も得られるようになってきた。これによりこれまで原子干渉計によるサニャックジャイロ、重力傾度計、ガスによる屈折率測定等が実現されてきている。

現在、原子干渉計の実験は主にアルカリ金属原子を対象として行なわれている。原子線源の構成としてはオープンから飛来する原子をレーザー冷却により横方向速度広がりを小さくし収束した原子線源か、磁気光学トラップにより捕獲、冷却した原子を用いている。しかしこれらには一長一短がある。サニャックジャイロを例にとると、その感度はループ面積に比例する。ループの原子線方向長さを一定とするとループの幅は原子波束分割時に原子に与えられる横方向速度に比例し、原子線速度に反比例する。オープンから出射される原子線は大きな速度を持つので、感度の面で不利となる。磁気光学トラップにより捕獲した場合、原子線速度は低いが、間欠的に出力することになる。この場合、原子間の衝突シフトによる位相回りによって最大原子数が制限され、これにより位相検出感度が制限されてしまう。また、アルカリ金属原子の各状態は必ず角運動量を持ち、それゆえにたとえ磁気副準位を 0 に取ったとしても大きな二次ゼーマンシフトを起こす。これを避けるには厳重な磁気シールドを必要とし、実験装置の大規模化を困難にする。本研究では、上記の問題を回避できる、角運動量を持たない原子を極低温、連続波、静止状態で出力する新たなスカラー原子線源を提案し、実験によりその詳細な特性を調べている。

本論文は以下の 6 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、研究の背景として、原子干渉計及び原子干渉計用原子線源に求められる特性について述べている。

第 2 章では、レーザー冷却の理論と磁気光学トラップ既存の原子線源について述べている。まず中性原子と光の相互作用について述べ、それに基づき各種のレーザー冷却法について述べている。それに続き原子線源として高原子数で磁気光学トラップを行なった時に生ずる各種問題、またそれを回避した既存の原子線源について述べている。

第 3 章では、ストロンチウム原子を用いた連続波極低温原子線源の原理及び実現可能性

について述べている。ストロンチウム原子基底状態 $5s^21S_0$ を下準位とした、800Kから μK オーダーの温度への冷却を行なうゼーマン冷却過程及び磁気光学トラップと、準安定状態 $5s5p^3P_2$ を下準位とした、 μK オーダーから数 $10\mu\text{K}$ オーダーへの冷却を行なう磁気光学トラップを同時同一空間で行なうことにより、冷却上準位からのカスケード遷移を用いて状態遷移を行なわせ、800Kから数 $10\mu\text{K}$ まで連続的に冷却可能なことを示している。また、準安定状態 $5s5p^3P_2$ を下準位とした磁気光学トラップ上準位 $5s5d^3D_3$ からの緩和過程について理論予測を行ない、もう一つの角運動量0の準安定状態 $5s5p^3P_0$ が生成されることを示している。更に、この準安定状態 $5s5p^3P_0$ の生成効率を高めて実用的なスカラー原子線源を作るためには $5s5d^3D_3$ からの緩和過程で大量に生成される $5s5p^3P_1$ 状態から $5s5p^3P_2$ 状態へのポンピングが必要であることを示し、光ポンピングによりそれが実現できることを示している。

第4章では、実験装置について述べている。磁場・トラップビーム配置を述べ、光源で用いた外部共振器型半導体レーザー及びFM分光法の原理を述べてから連続波極低温原子線源用の準安定状態冷却用光源及び光ポンピング用光源の開発について述べている。

第5章では、連続波極低温原子線源の実験及びそれによって判明した特性について述べている。まず基底状態 $5s^21S_0$ を下準位とした磁気光学トラップの特性を説明した後、それに対するポンピング光の効果を説明、これまで理論値しか知られていなかった分岐過程の分岐比の実測値を示している。次いで準安定状態 $5s5p^3P_2$ を下準位とする磁気光学トラップの特性を説明し、これにより効率よく角運動量0の準安定状態 $5s5p^3P_0$ が生成されることを説明している。更にTOF法による連続波スカラー原子線源の温度測定について説明し、原子線束測定についても説明している。更に原子収集光の追加により大離調により低温を達成しつつ効率よく原子を捕獲できることを説明し、その特性について説明している。最後に連続波スカラー原子線源の応用例として、スピン禁制遷移を用いたドップラー分光について説明している。

第6章では、まとめと本連続波原子線源を用いた実験の将来展望について説明している。

以上のように、本研究はストロンチウムにおいて同時同一空間で二種類の磁気光学トラップが実行可能であることに着目し、それによって実現される極低温連続波スカラー原子線源の詳細な特性を測定している。その結果、連続波スカラー原子線源としてはこれまでにない低温を実現した。本研究は、これまで主に価電子を一つしか持たず一時に可能な冷却遷移が一つしかないアルカリ金属を用いて行なわれてきた原子線源の開発に対して、アルカリ土類金属のストロンチウムが二つの価電子を持ち基底状態に加えて二つの準安定状態があって同時実行可能な冷却遷移が二つ取れることに着目して、これまでになく外場の影響を受けにくい干涉計向きの原子線源を実現した点で意義があり、物理工学の発展への寄与は大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。