

氏 名	すぎ やま かず ひこ 杉 山 和 彦
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3232 号
学位授与の日付	平 成 9 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Characteristics of Ytterbium Ions Stored in RF Traps (rf トラップに閉じ込められたイッテルビウムイオンの特性)

論文調査委員 (主 査)
教授 小倉久直 教授 橋 邦英 教授 松重和美

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、イッテルビウムイオン (Yb^+) の rf トラップへの閉じ込めに関する実験的研究をまとめたもので、とくに Yb^+ の長寿命光遷移周波数の次世代周波数標準への応用に際しての問題点を明らかにし、その解決方法を提案している。本論文は以下の 6 章から構成されている。

第 1 章は序章で、本研究の背景と意義をのべ、研究動向、課題を明らかにし、本論文の構成を示している。

第 2 章では、まず、 Yb^+ の閉じ込め、冷却の実験のために開発した rf トラップ装置について、つづいて、閉じ込めを確認する方法として用いた電氣的共鳴法について述べている。そして電氣的共鳴信号が、イオン振動の非線形性のために、緩衝気体の圧力、および閉じ込めイオン数に大きく依存することを見いだした。

第 3 章では、 Yb^+ の研究のために開発した光源について述べている。蛍光の検出、およびレーザー冷却には、 $2S_{1/2}-2P_{1/2}$ 遷移 (波長 369.52nm) が用いられたが、この波長の光源を、まず、半導体レーザーとアルゴンイオンレーザーの和周波混合という簡単な構成で、比較的安価に実現した。また、和周波数を、2 台の 1 次レーザーのうちの 1 台のみを制御することで安定化する方法を提案し、実現した。レーザー冷却のためにはより大きな光出力が必要となるため、色素レーザーの 2 通倍光を、外部共振器を利用して基本波を増強する方法により発生させた。レーザー冷却には $2D_{3/2}$ 準位へ遷移した Yb^+ を短時間で基底準位へ戻す必要があり、このために波長 935nm のチタンサファイアレーザー光で $2D_{3/2}-^3[3/2]_{1/2}$ 遷移を励起した。この遷移に関する未知の同位体シフトを、光ガルバノ法で測定した。

第 4 章は、緩衝気体によって室温近傍まで冷却された Yb^+ の特性について述べている。特に注目されるのは、波長 369.52nm 光を連続照射したときの特性である。この場合、観測している蛍光が消失する現象が広く知られていて、その原因には $2F_{7/2}$ 準安定準位へのトラッピングが考えられてきた。しかし、本研究では、波長 369.52nm 光を連続照射したとき、蛍光が消失するだけでなく、電氣的共鳴信号までも消失する場合があることを発見した。この現象は残留ガスが真空槽内に存在するときに限り生じることを見

いだし、真空槽内に O_2 ガス、あるいは、 H_2O ガスを導入した場合に電氣的共鳴信号の消失が加速されることを確認した。この機構として、励起準位 Yb^+ が化学反応を起こして分子イオンとなることを提案した。イオントラップに四重極質量分析計を組み合わせ、質量を選択してトラップ内のイオンを検出する方法を開発し、励起準位 Yb^+ が H_2 ガスと反応し YbH^+ が生成されることを確認した。 YbH^+ 生成は、電氣的共鳴信号の消失をとまなうことはなく、蛍光のみの消失の原因の一つとして考えるべきものである。また、従来 $2F_{7/2}$ 準安定準位の Yb^+ を脱励起波長と思われていたものが、実際には YbH^+ の光解離線に対応することを見出した。緩衝気体導入時には不純物としての H_2 ガスの除去は困難で、 YbH^+ 生成が緩衝気体冷却を用いた Yb^+ の周波数標準における新たな問題点となることを指摘した。一方、真空槽内に O_2 ガスを導入した場合には、 YbO^+ の生成が確認された。しかし、波長 369.52nm 光を連続照射した場合でも、 YbO^+ の個数の時間的減少は顕著ではなかったことなどから、電氣的共鳴信号の消失は総イオン数の減少によるものではない、と結論づけている。

第5章は、 Yb^+ のレーザー冷却について述べている。レーザー冷却に用いた2つのレーザーの周波数を注意深く設定し、天然同位体混合物をイオン源として用いても複数イオン種のレーザー冷却が可能であることを示した。さらに、単一 $^{174}Yb^+$ の観測とレーザー冷却を、天然同位体混合物を用いて成功した。観測されたスペクトル幅から到達温度を 150mK と決定した。少数個の場合のイオン数決定は、 $2F_{7/2}$ 準位へ Yb^+ を一個ずつ遷移させたときに観測される瞬間的な蛍光の減少（量子跳躍）のステップ数から決定した。さらに $2F_{7/2}$ 準位の Yb^+ を基底準位へ戻すための遷移として4つの波長を確認し、これによって量子跳躍信号を連続的に観測することを可能とした。

第6章は結論であって、本研究を通してえられた各章の成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文はイッテルビウムイオン (Yb^+) の rf トラップへの閉じ込めに関する実験的研究をまとめたものであり、得られた成果の主なものは次のとおりである。

- 1 イオンの閉じ込めの検出法の1つである電氣共鳴法において、その電氣的共鳴信号が、イオン振動の非線形性のために、緩衝気体の圧力、閉じ込めイオン数に大きく依存することを見いだした。
- 2 Yb^+ の蛍光の検出、およびレーザー冷却に必要な、波長 369.52nm の光源を2種類開発した。
- 3 Yb^+ の $2D_{3/2} \rightarrow 3[3/2]_{1/2}$ 遷移に関する未知の同位体シフトを、光ガルバノ法で測定した。
- 4 緩衝気体による Yb^+ の冷却に関する研究をおこなった。とくに、波長 369.52nm 光を連続照射したとき蛍光が消失する現象に関して詳しい実験を行った。従来、 $2F_{7/2}$ 準安定準位へのトラッピングが原因と考えられてきたが、本研究では蛍光のみならず、電氣的共鳴信号も消失する場合があることを発見した。これは、トラッピングでは説明できない現象である。励起準位 Yb^+ と緩衝気体との化学反応がその原因であることをつきとめ、周波数標準における問題点となりうることを指摘した。
- 5 レーザー冷却に用いた2つのレーザーの周波数を注意深く設定し、天然同位体混合物をイオン源として用いても複数イオン種のレーザー冷却が可能であることを示した。さらに、単一 $^{174}Yb^+$ の観

測とレーザー冷却を，天然同位体混合物を用いて成功した。

以上要するに本論文は， Yb^+ の rf トラップへの閉じ込めに関する基礎的研究とその次世代周波数標準への利用の問題点を検討したものであり，学術上，實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また平成9年2月24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。