

|          |  |
|----------|--|
| 氏 名      | た なべ みき お<br>田 邊 幹 夫   |
| 学位(専攻分野) | 博 士 (理 学)  |
| 学位記番号    | 理 博 第 3240 号   |
| 学位授与の日付  | 平 成 20 年 3 月 24 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   | Longitudinal and Transverse Coupling of the Beam Temperature<br>Caused by the Laser Cooling of $^{24}\text{Mg}^+$<br>( $^{24}\text{Mg}^+$ のレーザー冷却における縦・横方向のビーム温度の結合) |
| 論文調査委員   | (主 査)<br>教 授 野 田 章 教 授 今 井 憲 一 教 授 笹 尾 登   |

### 論 文 内 容 の 要 旨

本研究は化学研究所のイオン蓄積・冷却リングS-LSRに入射・蓄積された40keVの $^{24}\text{Mg}^+$ イオンにレーザー冷却を適用し、冷却可能な温度の下限を追及すると共にそれを定量的に追及し現象の物理的・直観的理解を目指したものである。申請者は、レーザー冷却に向けて、Mgイオンのイオン源の立ち上げに携わり、ビームをS-LSRに輸送し、入射・蓄積することに成功している。その過程で、Mgイオンを3次元結晶化することを想定して、偏向部での動径方向の拡がりに起因する結晶化したビームを引き裂く力、Shear Forceの抑制のため、電場と磁場と重畳することにより軌道のエネルギー分散を打ち消したラティスを構成する可能性に関して検討を進め、限られたサイズの偏向電磁石の磁極の中に設置可能な補助電極つき電極を設計・製作し、その一台を用いて軌道分散が1次のオーダーでは除去できることを実験的に証明している。

レーザーとしては、波長532nmの半導体レーザーでポンプしたローダミン560を用いた色素レーザーで発振した560nmのレーザー光を倍波生成器で280nmの波長とし、ドップラー効果により $^{24}\text{Mg}^+$ の基底準位と励起準位間のエネルギー差に一致させてレーザー冷却に使用している。生成したレーザーを光学系により整形し、バックグラウンドの原因となるハローの除去を行った後、S-LSRの真空系内に、反射による減衰を抑制するためにプリユスター角度を持たせた石英窓を通して導入し、 $^{24}\text{Mg}^+$ イオンのビーム軌道とオーバーラップさせ、レーザー冷却を行っている。その際のレーザーのサイズは、中心部で2mm径となっており、レーザーパワーは30mW程度となっている。レーザーは $^{24}\text{Mg}^+$ イオンビームの後方から入射し、ビームと併進させることにより、レーザー光の吸収による光子のエネルギー分の加速を一回の励起ごとに行っている。励起準位から基底状態への遷移に伴う光子放出は等方的であるので、この過程では統計的にはエネルギーの授受は行われぬ。

S-LSRに入射・蓄積された $^{24}\text{Mg}^+$ イオンの運動量拡がりは、最大の粒子数 $8 \times 10^7$ 個の場合 $\pm 1 \times 10^{-3}$ 程度であり、レーザー冷却の線幅に対応する運動量拡がりに比して数桁以上大きいため、すべてのイオンを冷却するためレーザー周波数を、イオンの運動量分布の下限より若干低い値に固定し、S-LSRリング中に設置されている誘導加速装置を用いて、すべての $^{24}\text{Mg}^+$ イオンを一様に減速しレーザー冷却を受ける領域を通過させる手法を用いている。

申請者はこうした手法を用い、レーザー冷却の実験を行い、ビームのショットキー信号の解析を行って運動量拡がりを求め、ビームの進行方向(縦方向)のビーム温度の計測を粒子数が $8 \times 10^7$ 個から $3 \times 10^4$ 個の範囲に亘って遂行している。更に、レーザーによる励起に伴うイオンの自発放射の蛍光をCCDカメラにより測定し、横方向のビームプロファイルの測定を実施し、横方向温度を求めている。この過程で縦方向のビーム温度はビーム同士の相互作用(イントラビーム散乱)による横方向(ビーム進行方向と直角方向)の運動エネルギーの縦方向への流入により規定されている状況に注目し、これを定量的に扱うことを企図して、縦方向ビーム温度の到達平衡温度のビーム粒子数依存性を整理し、これが粒子数の0.4乗に比例する形で定式化できることを示し、この依存性は縦方向ビーム温度が横方向のビーム温度に線形に依存しているというモデルで良く説明できることを示し、その結合係数は本研究の条件下では0.02と表されることも示している。この結果により、低強度ではバックグラウンドの関係で直接的測定の困難な、横方向ビーム温度の推定が可能となった。

## 論文審査の結果の要旨

本研究はビームの3次元結晶化に向けて、世界的にも注目を集めている3次元レーザー冷却による横方向も含む冷却の実現に向けて、イオンビームの縦・横両方向のビーム温度の定量的評価を実施し、物理プロセスの理解を深めると共に、今後の3次元ビームの結晶化に向けての実験計画の構築に貢献することを目指したものである。具体的には、560nmの色素（ローダミン）レーザーを波長532nmの半導体レーザーで励起し、倍波生成器により280nmの波長のレーザー光を得て、S-LSRの長直線部に導き、レーザー冷却実験を行っている。この過程で、申請者はほぼ独力で調整が複雑で熟練を要するとされる色素レーザーの調整法をマスターし、安定にレーザー発振を立てた上で、倍波の生成を行う手法を確立し、本研究の遂行において決定的な役割を果たしている。また、生成したレーザーをS-LSRへ導く光学系の設計及び実装も試行錯誤を重ねたうえで成功に導いている。

$^{24}\text{Mg}^+$ のイオンビームに関しても、イオン源の購入から始まり、高圧ステーション・引き出し系の設置等に主体的に取り組み、実際の実験に使用するビームの供給を可能としたうえで、S-LSRへのビーム輸送と入射・蓄積を行い、レーザー冷却のための基本的な条件の達成に大きく貢献してきている。

申請者は、上述の準備の上に立ってS-LSRにおいて $^{24}\text{Mg}^+$ のレーザー冷却実験に取り組み、誘導加速器を用いた一様にビームを減速する力がレーザー冷却力とつりあう条件での冷却実験を遂行した。実験の遂行にあたっては、縦方向のビーム温度の測定のため、RFKO電極からの出力電圧を用いたショットキー信号の解析を行い運動量の拡がりを探求している。また、横方向に関しては、レーザー励起された $^{24}\text{Mg}^+$ の自発放射の蛍光をビームラインを側方から観察するCCDカメラで検出し、ビームプロファイルの測定を行っており、こうした手法の開発も注目に値する。この過程で、イオン源からの $^{24}\text{Mg}^+$ のビームの横方向の温度は500ケルビン程度とかなり高いことに着目し、「ビーム相互の散乱（イントラビーム散乱）による横方向自由度からの縦方向へのエネルギーの流入は、粒子数が多いほど大きくなるはず」との予想のもとに、縦方向到達温度の粒子数依存性を定量的に測定した。その結果縦方向温度は粒子数の0.4乗に比例しているとの関係を見出し、これは縦方向温度が横方向温度に線形で結合していると考えれば説明できることを示し、その結合定数は本研究の条件の場合は0.02と与えられることも示している。従来からレーザー冷却に際して、イントラビーム散乱により横方向の温度も若干冷却されることは知られていたが、本研究のように定量化して議論されることは無く、縦・横両方向の自由度の線形結合という描像を示した本研究の意義は大きなものがあり、今後の3次元のビーム結晶化に向けての実験計画策定の上で大きな役割を果たすと考えられる。

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。