

審査の結果の要旨

氏名 鄭京勲

本論文は、線形イオントラップに捕獲された原子イオンに、その電子遷移エネルギーに対応したレーザー光を照射することでレーザー冷却を行い、個別同位体イオンを観測し、さらにイオントラップ・レーザー冷却分光法を同位体分析へ適用するための研究を行っており、7章より構成される。

第1章は序論であり、研究の背景と目的について述べている。まず研究の背景として環境試料中の同位体分析の重要性について触れた後に、加速器質量分析法 (AMS)、共鳴イオン化質量分析法 (RIMS)、原子捕獲微量分析法 (ATTA) について紹介している。これに対して、本研究で扱っているイオントラップ・レーザー冷却分光法 (ILECS: Ion trap-Laser cooling spectroscopy) を検出法の特長が述べられている。さらに、本手法を可能にするためには、照射レーザー光周波数の高度な安定化が必要とされることが説明されている。これらを踏まえて、本研究の目的は個別同位体の観測の確立と同重体干渉の影響の評価であることが述べられている。

第2章では、イオントラップ・レーザー冷却法、原子・分子の構造、半導体レーザー装置などの説明がなされている。まず、四重極交流電場と軸方向の静電場閉じ込めによるイオントラップ装置の説明がなされている。次にレーザー冷却法の原理について説明がなされている。またクーロン結晶で重要な指標である Γ (クーロンエネルギーと熱エネルギーの比率) について触れられている。次に原子・分子の構造として、同位体シフトや超微細構造について説明されるとともに、吸収スペクトルの広がりについて議論されている。また外部共振器型半導体レーザーシステムについての紹介も行っている。

第3章では DFOC (Digital Fringe Offset Control) System についての説明を行っている。これは光共振器にレーザー光を入射することで得られる Fringe 信号を用いて、レーザー光周波数をコンピュータにより制御するシステムであることが述べられている。基準レーザーの周波数安定化には Sub-Doppler DAVLL (Dichroic Atomic Vapor Laser Lock) を用いており、1.4 MHz (半値全幅) で制御されていることが示されている。これに対して、制御レーザーとしては、397 nm と 866 nm のレーザーがそれぞれ 2 台あり、フィードフォワードにより、全ての同位体シフトに対応する掃引周波数幅の拡張に成功している。共振器の FSR は音響光学素子を用いたビート信号から 189.2 MHz と較正されている。レーザー周波数制御のために必要となるパルス変換回路及びフィードバック機構の説明の後、実際に周波数安定化した結果、制御がない場合は数百 MHz の変動があるが、制御を行うことで 397 nm、866 nm レーザーともに 3 MHz 程度に抑えられていることが確認されている。これを利用して、ICPMS から射出されるイオンを同位体ごとに変化させて、レーザー周波数

をそれに対応するようコンピュータで変化させることで、カルシウムの偶数同位体の蛍光信号を取得している。周波数応答の高速化のためにコンピュータ制御部分の FPGA 化も提案されている。

第 4 章では、イオントラップへの入射イオンの捕獲効率の向上のための検討を行っている。本研究では、質量選別イオン源として ICPMS、イオン検出として ILECS を用いたシステムを利用している。まず ICPMS 装置についての説明がなされており、その後 ILECS の説明が続いている。ICPMS から射出されたイオンを効率よくイオントラップで捕獲するための検討結果が示されている。具体的にはトラップポテンシャル依存性、レーザー強度依存性などについて検討されている。それらの調整の結果、高真空での入射イオン捕獲が可能となり、イオン入射に応じてイオン雲からクーロン結晶へと相転移する画像を取得することに成功している。さらに少数同位体イオンをクーロン結晶化し、徐々に増加している様子も示されている。

第 5 章では、微量同位体検出で重要となるクーロン結晶可視化の効率を改善するための検討を行っている。冷却効率を改善するためには、イオントラップ交流電場に追従して捕獲イオンが振動するマイクロモーションという現象を抑制する必要がある、イオン捕獲位置の最適化が重要となることから、画像や rf 相関などの手法からマイクロモーション最小化を行うとともに、電場依存性を明らかにしている。これらをもととして、これまでの偶数同位体だけでなく、共鳴準位に超微細構造を持つ奇数同位体に対しても、レーザー冷却を行うために、レーザーシステムの構築を行うとともに、その可視化を実現している。また超微細構造分裂周波数スペクトルも取得している。

第 6 章では、本装置の特長である同重体干渉回避の可能性について、実験的な検討を行っている。具体的にはカルシウム 48 に対して、チタン 48 を混入させることで、同位体干渉の影響を評価している。 $^{48}\text{Ti}/^{48}\text{Ca}$ を 0 から 1,000 まで変化させた実験を行い、その捕獲特性を取得している。その結果、100 倍程度までは定量的評価が可能であることを示している。また、カルシウムとチタンが混在するイオン雲を観測した後に、トラップポテンシャルを調整することで不純物イオン（チタン）の除去を行い、着目イオンのクーロン結晶化に成功している。

第 7 章は、結論および今後の展望であり、本研究のまとめを述べている。

以上を要するに、本論文はイオントラップ・レーザー冷却分光法を利用した同位体分析で必要となるイオン観測の効率化を実現し、同重体干渉評価に先鞭をつけている。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。