

京都大学	博士（理 学）	氏名	想田 光
論文題目	シンクロ・ベータトロン共鳴結合による間接的横方向レーザー冷却のビーム強度制御による効率増強		
(論文内容の要旨)			
本研究は、通常の状態では気体状の加速器中のビームの温度をビーム冷却により低減し、より低温状態を実現するアプローチの一環として、電子ビーム冷却で 7MeV 陽子ビームに対して示されている 1D オーダリングをより一層推し進め、結晶化ストリングの実現に向けてより低温のビームの実現を図るため、冷却力が最も強いレーザー冷却をシンクロ・ベータトロン共鳴結合 (Synchro-Betatron Coupling Resonance: SBRC) を用いて 3 次元に拡張する手法について、理論及び計算機シミュレーションの予言を実証する先行研究を受け、その間接的横方向レーザー冷却の効率が、イントラビーム散乱 (IBS) による加熱の影響を受けて、ビーム強度の比較的大きい条件ではかなり低く抑えられている状況の改善を図るため、スクレーパによるビーム強度の縮減により、IBS の効果に起因するヒーティングを低減して、SBRC による水平方向の間接的レーザー冷却の効率を飛躍的に改善することを目的としている。 本研究の発表論文は、上記のスクレーパを用いた SBRC による横方向のレーザー冷却効率の改善の実現に関する報告と進行方向のレーザー冷却の実現のため、$^{24}\text{Mg}^+$イオンビームの軌道をレーザー冷却部に於いてレーザーとより良くオーバーラップさせるための閉軌道のずれ (Closed Orbit Distortion: COD) の補正に関する報告で構成されている。前者はビーム強度の制御に用いた水平方向に可動のスクレーパ 1 の位置と周回ビーム強度の関係を定量的に求め、このスクレーパ位置の制御によりビーム強度を低強度 ($\geq 10^4$) までコントロールすることを可能にした後、各ビーム強度の下で、水平乃至は垂直方向に可動の第 2 のスクレーパを用いて、周回ビームの残存率を測定してビームの水平乃至は垂直方向のプロファイルを観測することによりビームサイズ (1σ) を求めている。こうした観測を、(1) SBRC ON でレーザー冷却を実施、(2) SBRC OFF でレーザー冷却を実施、(3) レーザー冷却は実施しない、の三ケースについて行い定量的な比較検討を行い、(1) の SBRC ON の条件が最も冷却効率が高く、1×10^4 までビーム強度を低減しても高い冷却効率での横方向間接的レーザー冷却が可能であることを実証している。後者はリング中に設置した水平、垂直の各方向用に設置された夫々 6 個ずつのビームモニターにより観測した各点でのビームの位置情報から、リング中の夫々 6 箇所に設置されている水平乃至は垂直方向の軌道補正要素に印加すべき補正力を求め、COD の最適化を図った上で更に、レーザー冷却部の上流、下流の 2 箇所に挿入可能なアパーチャー (イオンビームに対しては 6 mmϕ, レーザーに対しては 2mmϕ) を用いて、レーザー冷却部での両者のオーバーラップを最適化する手法とその成果について報告している。 本研究は、間接的横方向レーザー冷却の到達ビームサイズの 1×10^4 までのビーム強度依存性を上記の 3 ケースについて定量的な観測をおこない、SBRC ON の条件では他の場合と異なり、1×10^4 の低強度までビームのエミッタースが保存され、水平方向の位相空間内の密度が一定に保たれ、ビームサイズの $\sqrt{N}$ (N は周回ビーム強度) 依存性が保たれていることを実験的に検証している。この手法により 1×10^4 のビーム強度に			

於いて実現された水平方向ビームサイズは 1σ で 0.2mm に達している。また水平方向の SBRC を用いた間接的レーザー冷却の冷却時間 (1/e cooling time) は 1×10^6 での 5 秒から 1×10^4 では 1.2 秒にまで短縮される事も示している。

(論文審査の結果の要旨)

極低温ビームの実現に向けて、電子ビーム冷却が実現した 1D オーダリングを更に推し進め、結晶化ストリングの可能性を追求する手段として、冷却力の最も強いと考えられているレーザー冷却は基本的にはビームの進行方向の自由度のみの冷却に限られているという制約を有しており、その改善を目的としたシンクロ・ベータトロン共鳴結合 (SBRC) を用いた間接的横方向レーザー冷却法が先行研究 (M. Nakao et al., Phys. Rev. ST-AB, 15, 110102 (2012)) により実験的に検証されていたが、その冷却効率は IBS による加熱のため 1×10^7 の周回ビーム強度に対して ~ 100 秒 (1/e cooling time) と極めて低い状態に留まっていた。本研究は、スクレーパを用いたビーム強度の低減により、この横方向冷却効率の抜本的改善を実現したものである。

先行研究の光学的測定手法がレーザーの迷光等によるバックグラウンドの影響で 10^6 以下の周回ビーム強度では困難である状況を受けて、スクレーパによってベータトロン振動がある振幅以下に留まる周回ビーム粒子の電氣的信号を検出しビーム残存率を測定することにより、このビーム残存率のスクレーパーの位置依存性からビームプロファイルを測定する手法を確立している。その上で、水平方向に駆動可能な第 1 のスクレーパの位置と周回ビーム強度の関係をまず測定し、 10^4 までのビーム強度の制御を可能とした後、上記の手法によるビームプロファイルの測定を行い、間接的横方向レーザー冷却の冷却時間及び冷却後の横方向平衡ビームサイズのビーム強度依存性の定量的な測定を行った。その結果、従来の IBS を用いた受動的な手法では、ビーム強度の低い領域では必然的に横方向の冷却効率が低下せざるを得ない状況とは異なり、SBRC は 10^4 と低いビーム強度に於いて更なる有効性を発揮することが実証された。これにより、ビームストリングの形成に向けて、ビームに対するヒーティング効果のビーム温度 1 ケルビン近傍に於ける極大値を乗り越え、更なる低温へと冷却するためには、強度を制御した SBRC による横方向間接的レーザー冷却が極めて有効な手段であることが示された。

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た。また、平成 25 年 1 月 15 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。