

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	中尾 政夫
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実証		

(論文内容の要旨)

通常はガス状で重心系に於いてはランダムな速度分布を有している加速器中のビームの特性を、ビーム冷却の手法を活用して改善し、高速でリング中を周回しているビーム温度の低減を測り、極低温のイオンビームに迫る可能性を追求するのが本研究の狙いである。この方向の研究としては、電子ビーム冷却によるイオンビームの1次元オーダーリング状態の生成が U^{92+} , Ar^{18+} , C^{6+} 等の重イオンについてはドイツ、GSIのESRやスウェーデンのCRYRINGで、また電荷が1と小さくもっとも困難な陽子についても京大・化研のS-LSRに於る実証が報告されている。ただ、このオーダーリング状態に於いては、隣接する粒子間の距離は固定されておらず振動しており、ビーム粒子相互の距離がある程度まで近づいてクーロン反発力が強大になると押し戻されるという状況を繰り返している。この状況を更に一步推し進め、一列に整列した粒子間距離を一定に保ったビームが高速で運動する状態(Beam String)の実現に向けて、冷却力が電子ビーム冷却よりも強烈ではあるが、基本的にはビームの進行方向のみに限られていたレーザー冷却に関して、ビームの進行方向と直角方向のビーム温度を能動的に縮減する可能性を初めて実験的に示したのが本研究の成果である。

ビームの進行方向と直角方向の横方向のレーザー冷却に関しては、ビーム相互のイントラビーム散乱(Intra-Beam Scattering: IBS)を用いた受動的な横方向レーザー冷却の手法やレーザーをイオンビームの軌道から平行にシフトして水平方向とビーム進行方向の運動エネルギーの結合を図る手法を用いた成果が報告されているが、これらは夫々横方向冷却効率がビーム強度の低い状況では確保できない、レーザーとイオンビームの重なりが充分でないため冷却効率が低いという制約があり、上記の極低温を目指す冷却法としての役割を果たすことは不可能であった。ビーム進行方向と横方向の運動をシンクロベータトロン共鳴と水平-垂直両方向の差共鳴を用いてビームの共鳴現象を活用して結合させることにより、ビームの横方向の運動エネルギーを進行方向のそれに転化させた後、これをビーム進行方向のレーザー冷却によって冷却するシンクロベータトロン共鳴結合法(Synchro-Betatron Resonance Coupling: SBRC)が岡本らにより理論的に提案されていた。この手法は $\nu_s - \nu_H = m(\text{integer})$ 及び $\nu_H - \nu_V = n(\text{integer})$ (ν_s , ν_H , ν_V は夫々シンクロトロン振動数、水平及び垂直両方向のベータトロン振動数)を満たす条件のもとで有限の分散関数の位置に設置された高周波空洞による加・減速によりビーム進行方向と水平方向の運動を結合し、ソレノイド磁場乃至はスキュー四重極磁場によって水平・垂直両方向の結合を実現し、基本的には進行方向のみのレーザー冷却力を3次元に拡張することを目指すものである。

申請者は、京大・化研のS-LSRに於いて、このSBRCを用いた水平方向の能動的な間接的横方向レーザー冷却の実験的検証に取り組んできた。具体的には40keVの $^{24}Mg^{+}$ イオンビームをS-LSRに入射し、分散関数が有限の位置に設置された高周波空洞に印加された高周波電圧によるキャプチャーを実施して、バンチビームの進行方向のレーザー冷却を行い、SBRCによる横方向ビームサイズの縮減を目指している。レーザー冷却前後の水平方向のビームサイズの測定のための光学的な手法として、レーザーとイオンビームのオーバーラップ領域の下方に設置した、反射鏡と集光レンズからなる

光学系を用いて、レーザー光によりドップラー励起された $^{24}\text{Mg}^+$ イオンからの自然放出光を冷却 CCD に導きイオンビームの水平方向ビームサイズの測定を行っている。併せて、Post Acceleration Tube (PAT) と称する金属製のチューブに正電圧を印加し、この正電圧を時間変化させることにより、静電ポテンシャルによってエネルギー変化を受けた $^{24}\text{Mg}^+$ イオンがドップラーシフトにより励起され、自然放出光を放出する強度の時間変化を PAT の横の開口部から光電子増倍管を用いて観測を行い、レーザー冷却に伴うイオンビームエネルギーの時間変化を精密に測定し、レーザー冷却後のイオンビームの運動量拡がりの測定も実施した。こうした測定により、申請者は SBRC を用いたレーザー冷却後の水平方向のビームサイズ及びビーム進行方向の運動量拡がりが、 $v_s - v_H = m \text{ (integer)}$ を満たすシンクロトロン振動数の条件で夫々、極小値と極大値を取ることを実験データにより示し、水平方向の運動エネルギーがビーム進行方向に転化して横方向のレーザー冷却が実現していることを本研究において初めて実験的に示している。

(論文審査の結果の要旨)

本研究は高速でリング中を周回するイオンビームのレーザー冷却に関して、従来は能動的な冷却はビームの進行方向に限られ、横方向に関してはビーム間相互作用 (IBS) を用いた受動的な冷却乃至はビームとレーザーを水平方向にシフトした効率の低い冷却のみが報告されていた状況を改善し、SBRC により能動的に横方向もレーザー冷却が可能であることを実験的に示した点で重要な意義を有している。

SBRC による横方向の間接的レーザー冷却の可能性は理論的には夙に提唱されており、これを実証する試みは世界の各地のイオン蓄積・冷却リングで試みられてきたが、上記の SBRC 条件を満たすためには、シンクロトロン振動数(ν_s)が水平方向ベータトロン振動数の小数部分 (q_H) と等しいことが要求されるが、シンクロトロン振動数は高周波電圧の平方根に比例しており、大きな高周波電圧がビームに与える影響を極力抑えるためには、 q_H を小さな値に抑える必要があり、一方でこの q_H は動作点の整数共鳴からの距離に対応するため、整数共鳴のストップバンドの大きな他のリングでは SBRC による間接的横方向レーザー冷却の実験的検証は実現されるに至っていなかった。申請者は、S-LSR がその周期性が 6 と高く、リング構成要素の電磁石もこうした状況を考慮して設計・製作と設置が行われ、整数共鳴のストップバンドが小さく抑制されている特徴をフルに活用し、レーザー冷却に必要とされる調整に熟練を要する色素レーザーを丹念に調整して、有限の分散関数の位置に設置された高周波空洞による加・減速によりビーム進行方向と水平方向の運動を能動的に結合し、基本的には進行方向のみのレーザー冷却力を水平方向に拡張する可能性を世界に先駆けて実験的に証明している。

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た。また、平成 25 年 1 月 21 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行い、その結果合格と認めた。