

氏名	しら い とし めき 白 井 敏 之
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	論 理 博 第 1491 号
学位授与の日付	平 成 19 年 7 月 23 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	One-dimensional Beam Ordering of Protons at Ion Storage Ring, S-LSR (イオン蓄積リングS-LSRにおける陽子の一次元ビーム整列)

論文調査委員 (主 査) 教 授 野 田 章 教 授 笹 尾 登 教 授 阪 部 周 二

論 文 内 容 の 要 旨

ビーム冷却により極低温のビームを実現することを目指し、7 MeV 陽子及び $^{24}\text{Mg}^+$ のビーム冷却を扱うイオン蓄積リングS-LSRの設計・製作を行い、ビーム冷却によって実現した低温のビームを安定に保持するのに適したラティス構造を追及して、超周期性、 N_{sp} が6と高く、極低温ビームのmaintenance conditionsと称されている(1) $\gamma < \gamma_t$, (2) $N_{\text{sp}} > 2\sqrt{2}v_{x,y}$ をみたすリングを周長22.56mの限られたサイズで実現する設計を完成させている。

更に、リングを構成する6台の偏向電磁石及び12台の四重極電磁石について、これらをリングの所定の位置に高精度で据え付けるためレーザートラッカーを用いた精密位置決めを行い、これらの電磁石を0.1mm以下の誤差で、精度良く設置することに成功している。

こうした準備の上に立ち、平成17年秋からS-LSRのビームコミッショニングを開始し、リングに設置された種々のビームモニターを駆使してビームの入射・周回を試み、多重入射に成功を納めた後、電子ビーム冷却のコミッショニングを遂行して、ビームの寿命を1300秒から電子ビーム冷却の適用により、23000秒に伸ばすことに成功している。

平成18年2月からは、ロシア、ドゥブナの連合原子核研究所との共同研究により、電子ビーム冷却により粒子密度が増大した陽子間で、クーロン相互作用によるイントラビーム散乱によってビームの温度があるレベルで平衡状態に達してしまう状況を克服してより低温の領域に迫ることを目的として、周回陽子ビームの粒子数を減少させることにより、実現可能なビーム温度の下限を探る試みを開始し、周回粒子ビーム数の制御に際しては、数千個といった少数の粒子を安定に制御する手法として、スクレーパーをパルスモーターにより精密に位置制御してビームを削り取る手法を確立している。さらに、粒子数が減少した際のビーム信号(ショットキー信号)が雑音レベルに隠れて検出不可能となる状況を克服するため、電子ビーム冷却装置の電子銃の高圧のリップルを軽減して、雑音レベルの減少を図るとともに、リング偏向電磁石のリップルの軽減、冷却部における陽子ビームと電子ビームの位置及び方向の精密調整による両者の軌道のオーバーラップ状況の改善、ビーム検出器のヘッドの低雑音化等を行って、最終的には2000個以下の陽子ビームに対して検出可能なS/N比を実現することに成功している。

本論文では、以上に述べた実験的な道具立てを駆使し、7MeV陽子ビームに対して、電子ビーム冷却により平衡に達する運動量拡がりの周回陽子数に対する依存性を、25mA、50mA及び100mAの3種類の電子ビーム冷却用の電子ビーム電流値に対して、測定を行い、これらの何れの電子ビーム電流値に対しても、陽子数2000個の近辺で運動量の拡がりが 4×10^{-6} 近辺から急激なジャンプを伴って 2×10^{-6} 以下に減少することを見出している。また、同様のアノマリーがショットキー信号のパワーに対しても観測されることも見出している。この急峻なジャンプは陽子ビームの1次元相転移に対応するものと考えられる。また、この実験で実現していると考えられている陽子の横方向温度は1meVと電子ビームの温度に対して30倍以上も低くなっており、これはmagnetized electron coolingによると理解できる。

論文審査の結果の要旨

本論文は炭素以上の重イオンに対して、ドイツのGSIやスウェーデンのMSL (Manne Siegbahn Laboratory) において確認されているイオンビームの一次元相転移に関して研究し、荷電数が1と小さくクーロン相互作用が上記の重イオンに比べて小さいため、電子ビーム冷却力が小さく、1次元相転移がいまだ実証されていなかった陽子ビームについて、その実現を世界的にも初めて示したものである。

申請者は、上記の1次元のオーダリングの実証という目的から、イオン蓄積リングS-LSRの設計に際し、イオンビームの結晶化・オーダリングに適したリング構造の実現に意を用い、周長を小さく抑えるという設置場所の制約のもとで、超対称性を6と比較的大きな値に設定したリングラティスを設計し、いわゆる maintenance conditionsを満たすリングを設計・製作している。更に、こうした対称性を現実のリングにおいてもキープするため、製作した電磁石の個性差に留意すると共に、電磁石の設置誤差にも注意を払い、最先端のレーザートラッカーを用いた位置計測技術により電磁石を極めて高精度(0.1mm以下の誤差)で据え付けることに成功している。

また、ビームのコミッショニングに際しては、残留ガスのイオン化を利用したビームプロファイルモニター、静電ピックアップによるビーム位置モニター、ヘリカルな構造によりビーム信号をコヒーレントに積み重ねることによりビームシグナルのS/N比向上を図る Schottky Monitor等を駆使し、陽子ビームの多重入射、電子ビーム冷却を短時日で成功に導いている。また、陽子ビームの1次元のオーダリング実験に際しては、陽子数の正確な制御のため、パルスモータでスクレーパを駆動して、ビームを削ることによりビーム数を低減する手法を確立したほか、2000個以下という少数の陽子に対して十分なS/N比を確保するために、電子銃の高圧リップルのRCフィルターによる軽減、リング偏向電磁石のリップルの軽減、冷却部における陽子と電子ビームのオーバーラップ条件の改善、検出陽子信号の低雑音化といった改善を中心となって推進している。申請者のこうした貢献により、陽子ビームに関してはいまだ実証されるにいたっていなかった状況を打破し、重イオンビームと同様の1次元のオーダリングが実現することに世界でも初めて成功し、またMolecular dynamicsを駆使したsimulationによりこうしたオーダリングに際して、重イオンと同様のビームのreflection probabilityが実現していることも示している。また、電子ビーム冷却された陽子ビームの横方向温度は、電子ビームのそれと比較して30倍以上も低く、理論的に予言されていたmagnetized electron coolingを実験的に示したものと考えられる。

今回実証された陽子ビームに対する1次元オーダリングは、1984年にドイツカールスルーヘで開催された国際ワークショップECOOL84において、ロシア(当時は旧ソ連)のノボシビルスクのNAP-Mで実現したと報告され、世界的にも注目を集め各国で追試が試みられてきたが、前述の重イオンビームに対するオーダリングは確認されたものの、陽子ビームに関してはドイツ、ユリッヒのCOSY等での追求にも拘らず、いまだ実証されるにいたっていなかった。今回、S-LSRにおいて世界的にも初めて実証に成功したことは、S-LSRの設計方針等のアプローチが当を得たものであり、またビームハンドリング技術、ビーム計測技術が世界最先端のレベルであることを如実に示している。

以上述べた理由から、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。