

CONTROLLED BEAM SCRAPING ORIENTED FOR EFFICIENT INDIRECT TRANSVERSE LASER COOLING

Akira Noda ^{#,A)}, Masao Nakao^{A)}, Hikaru Souda^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Kouichi Jimbo^{B)}, Hiromi Okamoto^{C)}, Kazuya Osaki^{C)}, Yousuke Yuri^{D)}, Manfred Grieser^{E)}, Zhengqi He^{F)}

^{A)} ICR, Kyoto University, ^{B)} IAE, Kyoto University, Gokano-sho, Uji-city, Kyoto, 611-0011

^{C)} AdSM, Hiroshima University, Kagamiyama 1-3-2, Higashi Hiroshima-city, 739-8511

^{D)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, JAEA, Watanuki-machi 1233, Takasaki-city, 370-1292

^{E)} MPI-K, 69029 Heidelberg, 103980, Germany, ^{F)} Tsinghua University, 1 Qinquayuan, Beijing, China.

Abstract

For the purpose of attaining low temperature beam circulating in a storage ring, laser cooling has been largely paid attention because of its strong cooling force, which, however, has such a severe limitation as can mainly cool down only the longitudinal temperature. We have experimentally demonstrated the capability of reducing the horizontal temperature by combination of longitudinal laser cooling and “Synchro-Betatron Resonance Coupling (SBRC)”, the cooling time of which, however, was found too long to realize low enough beam temperature due to heating because of intra-beam scattering (IBS). We have developed such a scheme as to reduce the beam intensity in order to suppress the IBS effect with the use of a scraper which eliminates the beam particle locating at the outskirts of the $^{24}\text{Mg}^+$ ion beam distribution.

横方向間接レーザー冷却の効率化に向けた制御ビームスクレーピング

1. はじめに

京大・化研のイオン蓄積・冷却リング S-LSR では「がん治療用加速器の小型化」という先進小型加速器のための要素技術の開発の本来の研究テーマに加えて、イオンビームの品質向上の極限追求の観点から 7MeV 陽子ビームの電子ビーム冷却、40keV の $^{24}\text{Mg}^+$ イオンビームのレーザー冷却を遂行してきた [1]。電子ビーム冷却による 7MeV 陽子ビームの 1 次元ビームオーダーリング [2] に引き続き、より冷却力の強烈なレーザー冷却による $^{24}\text{Mg}^+$ イオンビームの String 形成を目指してきた。既に縦方向と水平方向のシンクロ-ベータトロン共鳴結合 (Synchro-Betatron Resonance Coupling: SBRC) により、水平方向の間接的レーザー冷却が実現していることを実験的に実証している [3] が、 $10^6 \sim 10^7$ のビーム強度でのこれらの実験では、ビーム間相互作用 (Intra-Beam Scattering: IBS) の効果によるヒーティングの効果に打ち克って相転移を起こして String State に到達するのは困難であることが判明したため、横方向位相空間の周辺部のビームをスクレーピングすることによりビーム強度を低減して、IBS の抑制を図り、横方向レーザー冷却の効率化を図ってきた。その結果に関して報告したい。

2. S-LSR に於けるレーザー冷却

S-LSR ではイオン源から 40kV の静電高圧で Mg^+ イオンを加速して取り出した後、ビーム輸送系の 25 度偏向電磁石とスリットにより運動量のセレクションを行った後、図 1 に示したように S-LSR に入射を行い、ビームと同方向に併進する波長

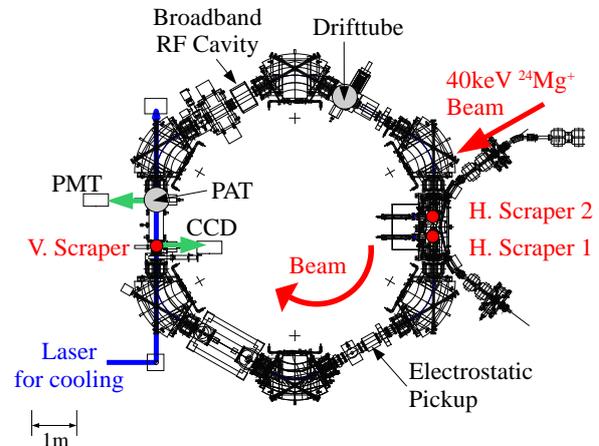


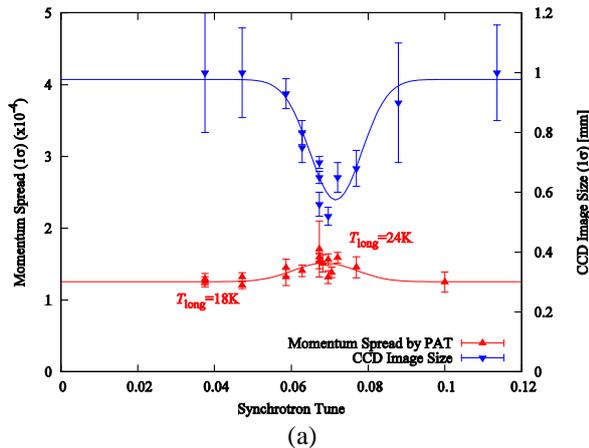
図 1 : S-LSR のレーザー冷却システム及びビームスクレーパーの配置図

280nm のレーザー光を用いてビーム進行方向のレーザー冷却を行い、高周波加速によるシンクロトロン振動数を水平方向のベータトロン振動数と共鳴させる [4] (式 (1) 参照)

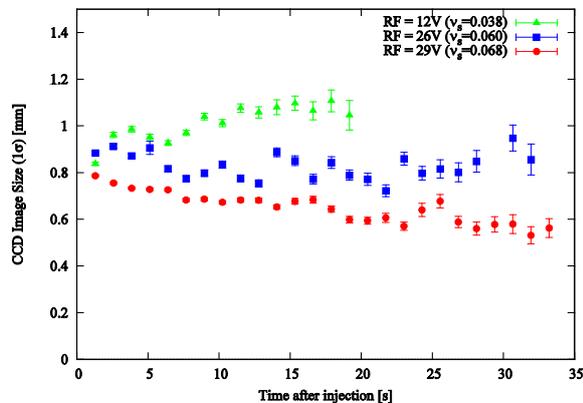
$$v_s - v_H = m \quad (\text{integer}) \quad (1)$$

ことにより水平方向の間接的レーザー冷却も実現している。図 2 (a) から上記 (1) 式を満たす SBRC の状況で水平方向の CCD イメージサイズが最小となり、この条件で縦方向のビーム運動量の到達冷却幅が水平方向からの熱の流入により極大値を取っていることが見て取れる。(この実験の場合、レーザーサイズの方がイオンビームサイズ

[#] noda@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp



(a)



(b)

図 2. 冷却後の縦方向運動量拡がり と水平方向 CCD イメージサイズのシンクロトロンチューン依存性(a) 及び種々のシンクロトロンチューンの場合の CCD イメージサイズの時間変化(b)

よりも小さいので、CCD のイメージサイズはビームサイズと同一ではないが、レーザーの中心とイオンビームの中心は注意して合せてあるので、CCD イメージサイズが最小となる条件が Mg イオンビームサイズの最小条件と一致する。) シンクロ-ベータトロン共鳴の中心では、間接的水平方向レーザー冷却の効果が IBS によるヒーティングの効果に打ち克ち水平方向ビームサイズがゆっくりと減少しているが、SBRC の共鳴条件から外れた条件では IBS によるビームサイズの徐々の増大が観測されている。またシンクロトロンチューンが共鳴中心から若干ずれた条件($v_s=0.060$)では間接的水平方向レーザー冷却がヒーティング効果とつりあいビームサイズが変化しない状況が生じている (図 2 (b))。この測定は $10^6 \sim 10^7$ のビーム強度に対して行われた。こうした IBS によるヒーティング効果を抑制し、冷却効率を高める試みを我々は進めてきた。

3. 間接的横方向レーザー冷却の効率化のための制御ビームスクレーピング

上述の実験結果から 10^6 から 10^7 程度のビーム

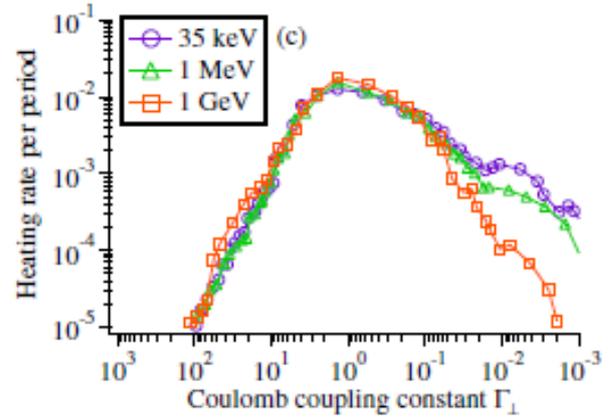


図 3. ヒーティングレートの Coulomb Coupling Constant 依存性 (Ref. [5]より借用)。

強度に対しては IBS のヒーティング効果が大きく、図 3 に示したようなヒーティング効果の山をすばやく乗り越えて、ビームに相転移を起こしてストリング状態を実現するという我々の最終目的にはかなわないことが判明した。この状況を克服するため、水平方向に移動する図 1 に示したスクレーパー 1 を用いて S-LSR に入射後のビームを Closed Orbit の中心からの距離の大きなものに限って削り落とし、全体のビーム強度の低減を図り、冷却されるビームの IBS の抑制を図り、レーザー冷却の効率化の実現を目指した。

このアプローチに於いてはビーム強度の低減に伴い、ビーム観測の際の S/N 比の劣化が克服すべき最大の課題となる。実際スクレーピングによりビーム

表 1 : S-LSR のレーザー冷却系の主要パラメータ

周長	22.557 m
平均半径	3.59 m
直線部長さ	1.86 m
曲率半径	1.05 m
超周期性	6
イオン種(エネルギー)	$^{24}\text{Mg}^+$ (40 keV)
回転周波数	25.1668 kHz
加速高周波電圧周波数	2.51558 MHz
初期粒子数	1×10^7
初期運動量幅	7×10^{-4}
Natural Width of $^{24}\text{Mg}^+$	$2\pi \times 42.7$ MHz
初期エミッタンス (H, V)	(6.8 π , 2.4 π) mm \cdot mrad
ベータトロンチューン	(2.068, 1.105)
シンクロトロンチューン	0.0376~0.1299
レーザー波長	279.3 nm \pm 10 $^{-8}$
レーザー-Detuning	200 MHz (fixed)

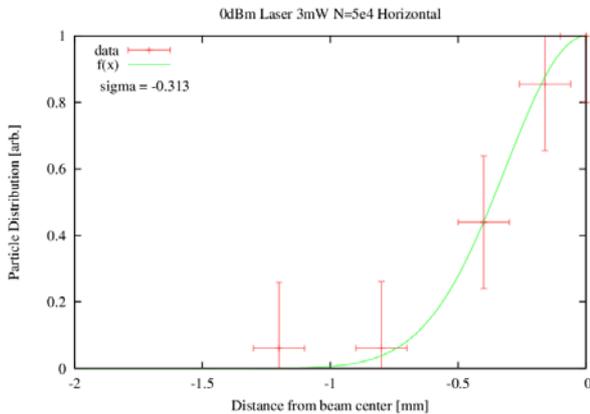


図 4. ビーム生存率のスクレーパー位置の Closed Orbit Center からの距離依存性(ビーム強度 5×10^4 、レーザーパワー 3mW)での測定([6]参照)。

強度を 2 桁程度縮減した今回の取り組みにおいては、従来用いられてきた冷却 CCD カメラによる Mg イオンの自発蛍光放射を用いた測定[3]では十分な S/N 比が達成できなかったため、冷却開始後の各時刻における水平、垂直方向のビームサイズの測定は図 1 の H Scraper 2 及び V Scraper を夫々用いて行った。表 1 にこれらの実験に使用した S-LSR レーザー冷却系の主要パラメータを列記した。

具体的なビームサイズの測定は、まずビームサイズの測定を行う水平又は垂直方向のスクレーパーを序々にビーム軌道に近づけ、ビームが完全に失われる位置を観測し、これを Closed Orbit Center と考える。ついでこの位置からの距離を変化させ、各位置でのビームの生存率を測定し、これを図 4 に示したように Gaussian Fit を行い、ビームサイズ (1σ) を求めた[6]。こうした垂直及び水平方向の測定結果を図 5 及び図 6 に夫々示した。(ビームサイズの測定誤差に関する考察に関しては想田他、本学会ポスターセッション WEPS016 [6]を参照されたい。)

これらのデータから水平、垂直両方向ともに 1×10^5 以上のビーム強度に関しては IBS によるヒーティング効果がビーム強度の増大に伴い増加する様子がはっきりと見て取れる。また、シンクロトロン

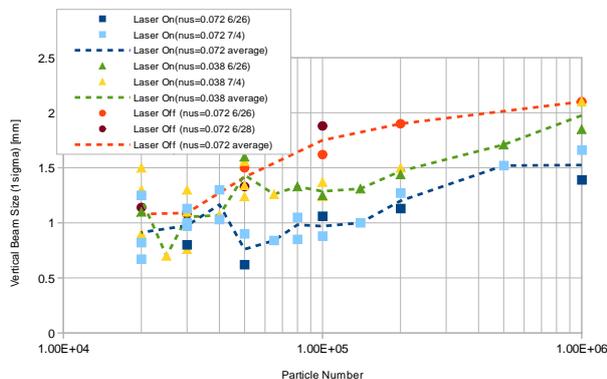


図 5. 垂直方向ビームサイズのスクレージングによる強度変化依存性

チューンのベータatronチューンとの共鳴、非共鳴によるビームサイズの差は、SBRC による間接的横方向レーザー冷却の効果と考えられるが、このビーム強度の範囲では、この効果は IBS による横方向レーザー冷却効果(レーザーOff とレーザーOn で v_s が 0.038 の場合との差)に比してまだずいぶん小さく、効率的間接的横方向レーザー冷却を実現してビームストリングを実現するためには、よりいっそうのビーム強度の低減を要することが明らかになった。

上に述べた実験結果から現在までのところ我々が S-LSR の $^{24}\text{Mg}^+$ イオンビームに対して達成した最も低いビーム温度は、 10^4 台のビーム強度の条件で、ビームの進行方向、水平、垂直の各方向に対して夫々 ~ 20 K、 ~ 40 K、 ~ 50 K であると評価している。

今後より一層のビーム強度の観測感度の向上を図り、S/N 比を改善して更なる低ビーム強度領域での間接的横方向レーザー冷却を遂行し、リング中を周回するビームストリングの達成に挑戦したい。

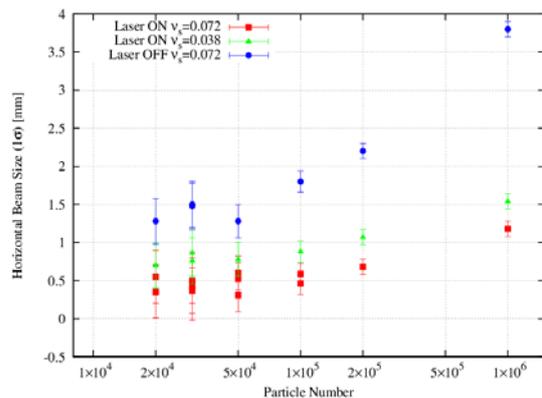


図 6 水平方向ビームサイズのスクレージングによる強度変化依存性

謝辞

本研究は文部科学省の先進小型加速器のための要素技術開発事業、京都大学グローバル COE プログラム「普遍性と創発性から紡ぐ次世代物理学」の支援を得て行われた。

参考文献

- [1] A. Noda, Nucl. Instrum. Meth. **A532**, 150 (2004).
- [2] T. Shirai et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 204801 (2007).
- [3] M. Nakao, et al., Proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, 855 (2010) and M. Nakao et al., submitted to Phys. Rev. ST-AB.
- [4] H. Okamoto, A. M. Sessler and D. Möhl, Phys. Rev. Lett. **72**, 3977 (1994).
- [5] Y. Yuri, H. Okamoto and H. Sugimoto, JPSJ, **78**, 124501 (2009)
- [6] H. Souda et al., WEPS016 本学会プロシーディングス。