

イオン蓄積・冷却リング S-LSR での MG イオンビームのレーザー冷却

LASER COOLING OF MG ION BEAM AT ION ACCUMULATION AND COOLER RING, S-LSR

野田 章^{#,A)}, 中尾 政夫^{A)}, 想田 光^{B)}, 頓宮 拓^{C)}, 岡本 宏巳^{D)}, 大崎 一哉^{D)}, 百合 庸介^{E)}, 神保 光一^{F)},
グリーザー マンフレッド^{G)}, 何 崢麒^{H)}

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

^{A)}NIRS, ^{B)}Gunma Univ. ^{C)}ICR, Kyoto Univ. ^{D)} AdSM, Hiroshima Univ.), ^{E)}JAEA, TARRI., ^{F)}IAE, Kyoto Univ.

^{G)}MPI-K., Germany, ^{H)} Tsinghua Univ., China

Abstract

We have already experimentally demonstrated transverse indirect laser cooling utilizing Synchro-Betatron Resonance Coupling (SBRC), but its efficiency was rather poor for beam intensity as 10^7 due to beam heating by Intra-Beam Scattering and its cooling time amounted as long as ~ 100 sec for this intensity. By application of beam scraping and optimization of laser detuning together with equilibrium deceleration with the use of an induction accelerator, we could reach the lowest transverse temperatures ever attained by laser cooling as 7.0 K and 2.1 K for the horizontal and vertical directions, respectively.

1. はじめに

京大・化研のイオン蓄積・冷却リング S-LSR ではその超周期性が 6 と大きく、ビームダイナミクスの安定性が高いという特性を反映して、世界でも初めて荷電数が 1 と小さい陽子ビームに対して電子ビーム冷却による 1 次元オーダリングを実現している^[1]。我々はこの S-LSR の特質を活用し、電子ビーム冷却よりも更に強力な冷却力を有するレーザー冷却を用いて極低温の結晶化ビームを実現する可能性に挑戦してきた。本稿ではその現在までの到達点について紹介したい。

2. 40keV²⁴Mg⁺イオンビームの横方向レーザー冷却

2.1 S-LSR におけるレーザー冷却の状況

S-LSR ではイオン源から 40keV で取り出された ²⁴Mg⁺イオンビームをビーム輸送系を経た後、入射部に導き、静電セプタムとキッカー電磁石により、リング中にシングルターン入射している。Fig. 1 に S-LSR のリングとレーザー冷却系のレイアウトを示した。我々は、既に Coasting Beam に対する縦

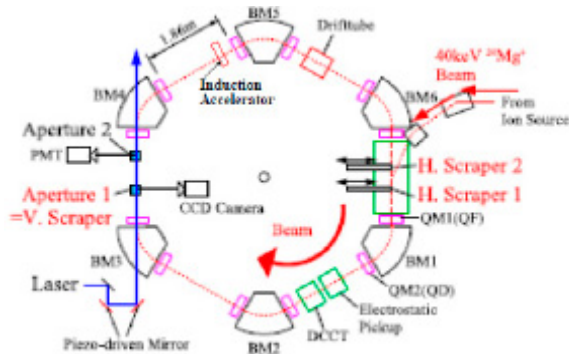


Figure 1: Layout of S-LSR and its laser cooling system

[#] a_noda@nirs.go.jp

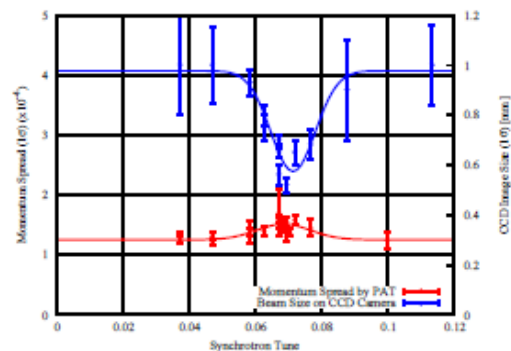


Figure 2 Experimental demonstration of Indirect Transverse Laser Cooling using Synchro-Betatron Resonance Coupling (SBRC). Horizontal beam size has its local minimum at the synchrotron tune which resonates with the horizontal betatron tune. Cooled momentum spread has its local maximum at this condition due to energy flow from the horizontal degree of freedom.

方向のレーザー冷却に成功している^[2]が、レーザーはイオンビームと同一方向に併進するため、最外周電子の基底状態から励起状態への励起に伴うレーザーからイオンビームへの運動量トランスファーはレーザー方向すなわちイオンビームの進行方向のみに起こり、ビーム進行方向のみの冷却が可能である。この状況を克服し、ビーム進行方向と直角方向の自由度もレーザー冷却できる状況を作りだすため、シンクロトロン-ベータトロン結合共鳴を用いる手法が提案された^[3]。我々は S-LSR を用いてこの手法の実証にも成功している (Fig.2 参照)^[4]が、 10^7 個程度のイオンビーム強度を用いたこうした実験では、Fig. 3 に示したようにビームの横方向冷却時間が 100 秒以上にも及び極低温ビームの実現のためにはビーム冷却効率の改善が緊急の課題となっていた。

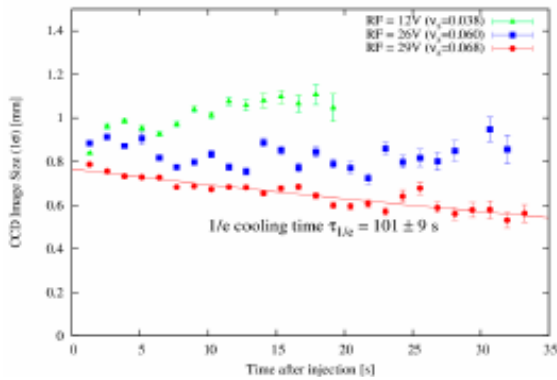


Figure 3 Time variation of the horizontal beam size observed by a CCD camera for different synchrotron tunes. With SBRC, the horizontal beam size decreases gradually but its cooling time is rather long as ~ 100 sec. for beam intensity of 10^7 due to heating by IBS.

2.2 間接的横方向レーザー冷却の効率化の取り組み
 ビーム間相互作用 (Intra-Beam Scattering: IBS) を抑制する目的からビームスクレーピングを行い、ビーム強度の低減を図る試みが始まりました^[5]。ビーム強度の制御の目的で、Fig. 1 に示す H. Scraper 1 を使用した。このスクレーパー位置とリング中のビーム強度の関係を Fig.4 に示した。

まず、SBRC の効果を明確に見るために

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

なる条件(SBRC)のみを満たす動作点(2.068, 1.105)を用いて、有限の分散関数 ($\sim 1\text{m}$) の位置で高周波加速を行うことにより、縦方向と水平方向のみの結合を図り、水平方向ビームサイズの縮減を図った。

この過程でビーム強度を 10^6 以下に縮減した条件では、従来用いていた CCD カメラを用いた光学的手法では十分な S/N 比を得ることが困難であった。この状況の打開策として、第 1 のスクレーパーでビーム強度を縮減した後、第 2 のスクレーパーを駆動して、その停止位置と残留周回ビーム強度の関係を求めて、ビームサイズを測定する手法を用いた。水平、垂直方向のビームサイズの測定に夫々 Fig. 1 の H. Scraper 2 及び V. Scraper (=Aperture 1) を使用し

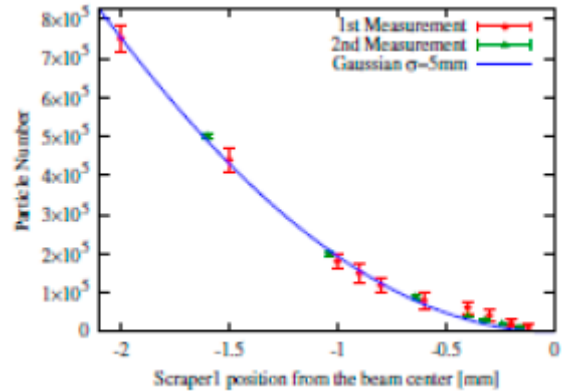


Figure 4 Relation between the H Scraper 1 position and the circulating beam intensity in the ring of S-LSR.

た。こうした測定で得られたビームプロファイルの例を Fig.5 に示した。

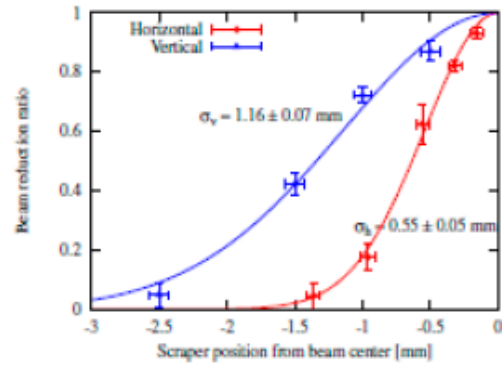
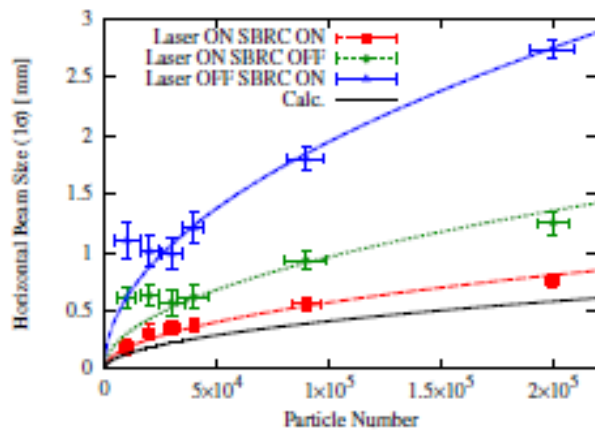


Figure 5 Examples of beam profiles measurement with the use of scrapers.

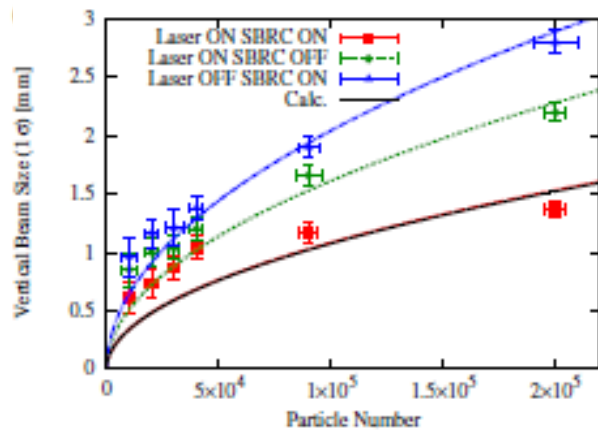
上述のビームサイズ測定のビーム強度依存性測定の結果を Laser Off 及び Laser On だが SBRC Off の場合の結果と共に Fig. 6 に示した。Laser と SBRC を On することにより、水平方向ビームサイズが間接的横方向レーザー冷却により、如実に縮減していることが見て取れる^[6]。

この状況を推し進め、垂直方向のビームサイズの縮減も実現するため、

$$v_H - v_V = m \quad (m: \text{integer}) \quad (2)$$



(a) Horizontal beam size



(b) Vertical beam size

Figure 6 Beam intensity dependence of indirect transversely laser cooled beam size, (a) horizontal and (b) vertical directions.

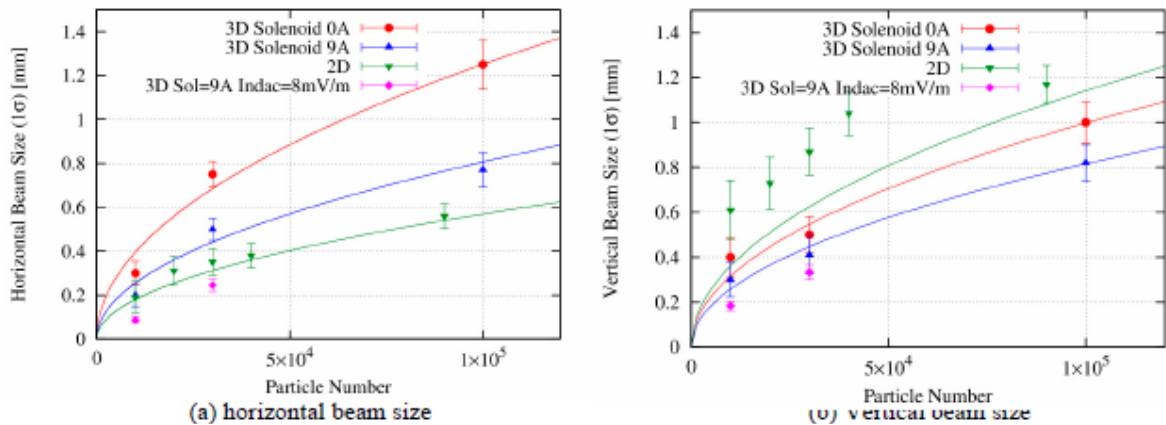


Figure 7 Beam intensity dependence of the horizontal (a) and vertical (b) beam sizes with 3D indirect transverse laser cooling with and without solenoid magnetic field and additional application of induction deceleration..

をも満たす動作点(2.067、1.070)を用いて、この条件で最適化された水平・垂直結合用ソレノイド(電子ビーム冷却用のリング内ソレノイドを活用)の磁場 22.5 Gauss の励磁を ON/OFF した条件でもビーム強度に対する依存性の測定を行った。更に、我々の場合、使用可能なレーザーがイオンビームと併進する 1 台に限られているため、レーザーの吸収に伴うイオンビーム加速に平衡する減速効果を与えるため、誘導加速装置による減速も試みた。これらの条件で間接的横方向レーザー冷却のビーム強度依存性を調べた結果を Fig. 7 に示した。

最適化されたソレノイド磁場 (22.5 Gauss) を用いた 3 次元間接的レーザー冷却により、垂直方向ビームサイズの縮減が実現し、垂直方向からの熱の流入に伴い水平方向のサイズが増大しているが、これもレーザー光による加速と吊り合う誘導減速の導入により縮減可能である。この最も良く縮減された状況 (離調 -26MHz, Laser Power 10mW, Beam Size 0.08m(H), 0.13mm(V)での H, V 方向の温度は夫々 7.0 K, 2.1K であり、対応するプラズマパラメータ Γ_p

$$\Gamma_p = \frac{Z^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 a_{WS} k_B T}, \quad a_{WS} = \left(\frac{4\pi}{3} n\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

(a_{WS} : Wigner Seitz Radius, k_B : Boltzmann Constant, n : ion density) を算出すると $\Gamma_p \sim 0.05$ が得られる (ここでビーム進行方向のパンチ長として百合によるシュミレーション結果^[7]の ~ 5 mm を用いた)。

3. 結果と考察

Figure 8 に H. Bussmann et al., によって与えられた Heating Rate の Plasma Parameter 依存性を示す^[8]。我々が当面目指した目標は、 $\Gamma_p \sim 1$ 周辺の Heating Rate のピークを乗り越え、固体状態の Crystalline Structure に到達することであったが、前述したようなスクレーパによるビーム強度の低減による横方向間接的レーザー冷却の効率化により冷却の効率化を実現し、横方向のビーム冷却時間は 10^7 個のビーム強度に比して 2 桁近くの低減を実現している^[6]が、依然まだ Heating Rate のピークの裾野にやっと到達した状態であることが見て取れる。

計算機シミュレーションでは 10^3 個まで粒子ビームを低減して IBS を抑制すれば、Crystalline String

の形成が予想されているが、現状ではこのビーム強度までの縮減は十分な S/N 比の確保出来ない難点が存在する。しかし、Crystalline String が形成されるとビーム信号がコヒーレントに積み重なり突如シャープなピークが現れる可能性^[9]があり、レーザーのパワー及び台数といった冷却力を高めるアプローチとより低強度のビーム観測を可能とするアプローチを並行して推進していくことが求められている。

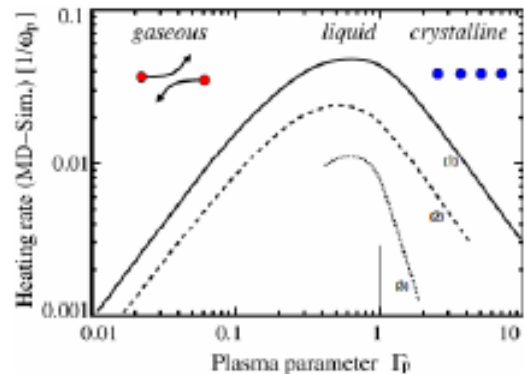


Figure 8 Plasma parameter dependence of heating rate^[8]

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の開発事業」及び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] T. Shirai et al., Phys. Rev. Lett., **98**, (2007), 204801.
- [2] M. Tanabe et al., Appl. Phys. Express **1**, (2008), 028001.
- [3] H. Okamoto, A. Sessler and D. Möhl, Phys. Rev. Lett. **72**, (1994), 3977.
- [4] M. Nakao et al., Phys. Rev. ST-AB, **15**, (2012), 110102.
- [5] A. Noda et al., Proc. of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, (2012), 394.
- [6] H. Souda et al., Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 030202.
- [7] Y. Yuri et al., Proc. of COOL'13 Workshop, Müren, Switzerland, June 10-14 (2013).
- [8] M. Bussmann, U. Schramm and D. Habs, et al., Proc. of SPARC07.
- [9] H. Okamoto Private communication.