

OPTICAL MEASUREMENT OF THE LASER COOLING EXPERIMENT OF THE BUNCHED BEAM AT THE S-LSR

Masao. Nakao^{1,A)} Hikaru. Souda, Hiromu. Tongu, Akira. Noda^{B)} Koichi. Jimbo

^{C)}H. Okamoto, ^{D)}M. Grieser, ^{E)}A.V. Smirnov

^{A)}Institute for Chemical Research, ^{B)}Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokano-sho, Uji-city, Kyoto, Japan, 611-0011

^{C)}Graduate School of Advanced Sciences of Matter,

1-3-1, Kagamiyama, Higashihiroshima-city, Hiroshima, Japan, 739-8530

^{D)}Max-Planck-Institut für Kernphysik, Postfach 103980, D-69029 Heidelberg, Germany

^{E)}Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Moscow Re3gion, Dubna, Russia

Abstract

Experiments of transverse laser cooling for $^{24}\text{Mg}^+$ beam have been performed at a small ion storage and cooler ring, S-LSR. The horizontal beam size and momentum spread are optically measured with CCD camera and PAT (post acceleration tube), respectively. The measured beam size with CCD camera is decreased from about 1mm to 0.55mm and longitudinal momentum spread measured with PAT increased near the resonant condition. This suggests transverse temperature was transferred to longitudinal direction with synchro-betatron coupling.

S-LSRにおけるバンチビームのレーザー冷却実験の光学的観測

1. はじめに

加速器中のビームは、個々の粒子の運動量にばらつきがあり、有限の速度広がりを持っている。また、空間的にもビームは進行方向、垂直方向に広がりを持っている。通常、ビームの温度は数千Kにもなり極めて高温の状態である。ビームの品質を向上させるために、様々なビーム冷却法が開発されてきた。その種類は確率冷却、電子ビーム冷却、レーザー冷却がある。レーザー冷却は、これらの冷却法の中で最も冷却限界温度が低い。

近年イオントラップ中のイオン集団をレーザー冷却することで実際にクーロン結晶状態を作り出せることが確認されている^[1]。一方で理論的には、蓄積リングを周回するイオンビームを冷却していくと、クーロン結晶がリング中を周回しているのと同様なクリスタルビームが生成可能であると予言されている^[2,3]。また円形イオントラップにおいて、運動エネルギーが1eVという非常に低エネルギーの Mg^+ イオンビームのレーザー冷却によって、3次元のクリスタルビームが生成できたと報告されている^[4,5]。しかし、高速イオンビームの結晶化はまだ実現していない。

高速で運動しているビーム中の粒子をレーザー冷却するとき、レーザーは前方または後方からのみ当てることができるので、直接冷却できるのは進行方向のみである。ビーム粒子の密度が高ければ、クー

ロン力によって垂直方向にも冷却されるが、より強力な共鳴結合法という方法が提案されている^[6]。シミュレーションによる研究により、共鳴結合法でクリスタルビームを作るには、適切なラティス構造をもつ蓄積リングにおいてシンクロトロン振動とベータトロン振動を共鳴させることが必要になる。^[3,7] 京都大学化学研究所のイオン蓄積リングS-LSRは設計段階からクリスタルビーム生成に必要な条件を考慮に入れ理論的に予言されている条件を満たす動作点でビームを安定に蓄積、冷却できるように考慮されている^{[8][9]}。

本年度の実験で、ベータトロンチューンとシンクロトロンチューンの差が整数になる付近で、シンクロトロンチューンとベータトロンチューンの整数部が入れ替わる現象が見られた。これは共鳴によると思われる。この現象については、参考文献10で報告される。

本論文では、ベータトロンチューンとシンクロトロンチューンとの差が整数になる付近での、CCDカメラによる横方向のビーム幅を測定と、PATとPMTを用いた進行方向の運動量分散の振る舞いについて報告する。

2. 実験装置

京都大学化学研究所で2005年より稼働しているS-LSRは、6回対称性を持つ周長22.57mの小型イオン蓄

¹ E-mail: nakao@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

積・冷却リングであり、7MeVの陽子を電子ビーム冷却、40keVの24Mg+のビームをレーザー冷却する実験が行われている。S-LSRでは、電子ビーム冷却によって極めて低い線密度において陽子を1次元でオーダーリングさせることができた^[11]。またレーザー冷却によってビームの進行方向に連続的に分布したコースティングビームの冷却に成功している^[12]。

レーザー発生装置は昨年と同様のものを用いた。ポンピングレーザーとしてCOHERENT社のVerdi-V10 (Nd:YVO4, 532nm,最大出力10W)を使用し、この出力をRhodamine 560 Chloride を使用した色素レーザーCOHERENT社のCR-699に入射した。これをLBO結晶を用いたMBD(倍波発生器)(COHERENT社のMBD-200)に入射し、紫外線レーザーを発生する。最大出力は60mWである。

また、レーザー発生源での強度からS-LSR出口でのレーザー強度が過小になっていた。COHERENT社に問い合わせ、ミラーやレンズが紫外線レーザーで劣化して透過率あるいは反射率が低下したのではないかという意見を参考にしてトランスポート系のミラーを、回転あるいは平行移動して劣化部分を避けたところ、レーザー強度は回復した。

水平方向のビーム分布の蛍光観測には浜松ホトニクス社の冷却EB-CCDカメラ(浜松ホトニクスC7190-11W)を用いた(図1)。観測では1秒間積算の測定を30回繰り返した。なお、処理の都合上、測定と測定の間に170ms程度のタイムラグがあるため、1秒ごとにはなっていないものの、計測開始からの時間はms単位で保存されるため、他の測定と結果を照合できる。

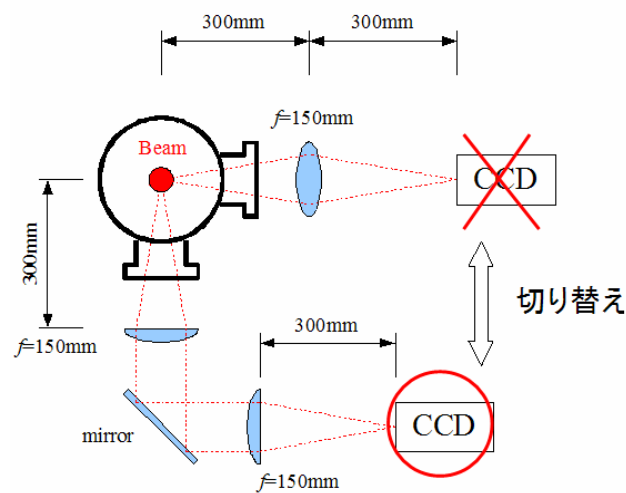


図1 CCDの位置と光学系

進行方向の運動量分布の測定にはPAT(Post Acceleration Tube)^{[13][14]}を使用した。PATは図2のような概観である。PATに掛ける電圧を掃引したとき、ドップラーシフトによってPAT内でレーザーと相互作用できる進行方向速度のMgイオンのみが蛍光

を出し、PATの窓から出た自然放出の蛍光をPMT(Photo-multiplier Tube)で観測する。

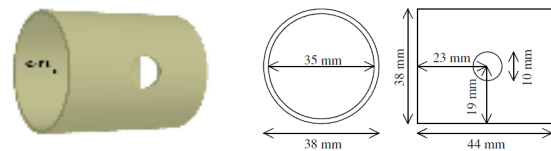


図2 PATの概観

実験の主なパラメーターは表1のようなものである。特にカップリング付近のチューンの特徴的な変化については参考文献10で詳しく発表している。

パラメーター	値
ビーム運動エネルギー	40keV
初期運動量広がり	$7 \cdot 10^{-4}$
ビーム粒子数	$3 \cdot 10^7$ 個
初期横方向ビームサイズ	1mm (1 σ)
シンクロトロンチューン	0.0376-0.1299
ベータトロンチューン	(2.068,1.105) (2.082,1.100) (2.098,1.103)
周回周波数	25.192kHz
ハーモニクス	100
Detuning	-0.1GHz \pm 0.05GHz
レーザー強度(S-LSR出口)	11mW \sim 20 mW

表 1 : 実験のパラメーター

3. 実験結果

CCDカメラで測定した1秒間積算の蛍光強度と、その幅をグラフ化した($\nu = (2.098, 1.103)$)共鳴は2 \sim 4dBmの条件)のが図3である。時間と共にビーム粒子数は減少しているため、入射時の測定点がグラフの右側に相当し、時間と共に左へ移動していく。このとき、進行方向と水平方向のカップリング付近ではビームサイズが減少しているが、カップリングから外れている部分ではビームサイズが変わっていないことが分かる。

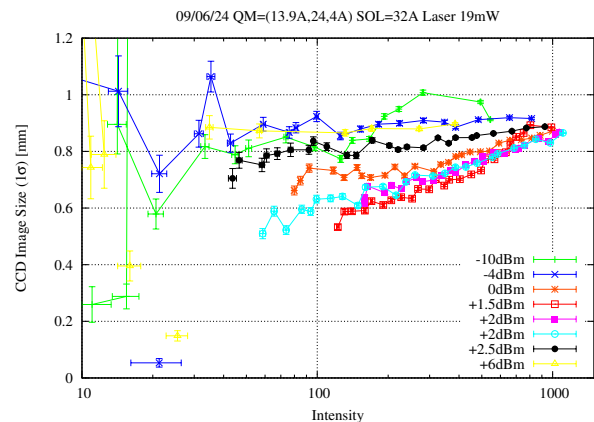


図3 CCDカメラで測定した蛍光強度とビームサイズの関係

PATで測定した進行方向の運動量広がり、と CCDカメラで測定した水平方向ビームサイズをシンクロトロンチューンを変更した測定でそれぞれプロットしたのが図4~6である。

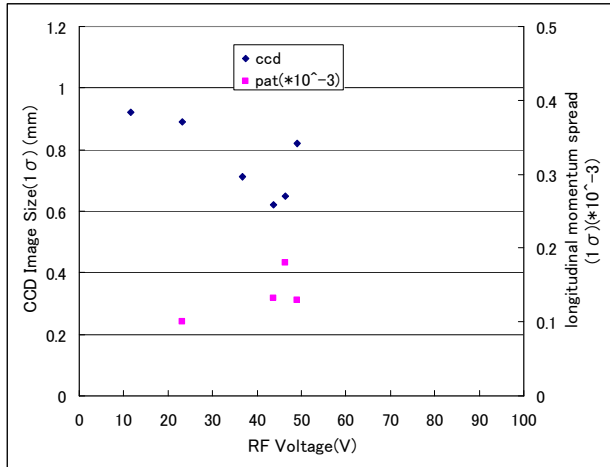


図4 $\nu = (2.068, 1.105)$ のときの進行方向運動量広がり、と水平方向ビームサイズ

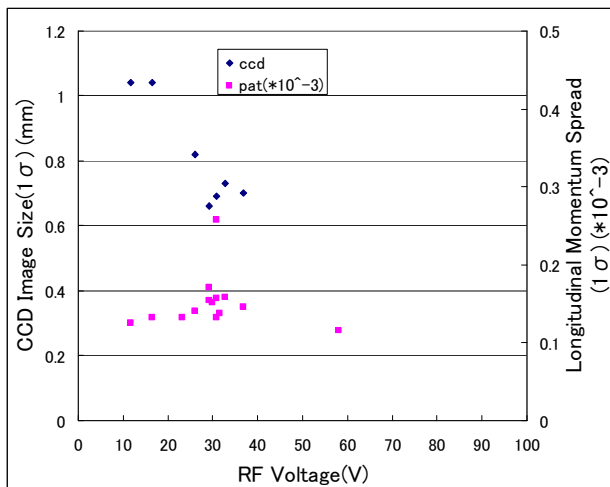


図5 $\nu = (2.082, 1.100)$ のときの進行方向運動量広がり、と水平方向ビームサイズ

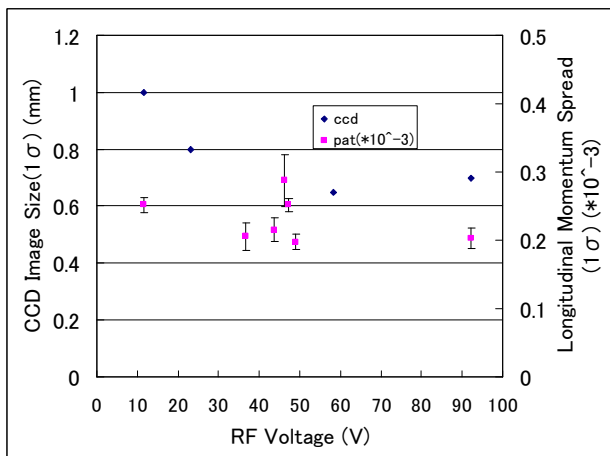


図6 $\nu = (2.098, 1.103)$ のときの進行方向運動量広がり、と水平方向ビームサイズ

4. まとめと今後の展望

共鳴付近で水平方向ビームサイズが減少し、その中の狭い範囲で進行方向運動量広がりが大きくなっていることが分かる。これは、カップリングによって横方向の温度が縦方向に移動したためと考えられる。最小では0.55mmにまで水平方向ビームサイズが減少している。

ただし、ビーム寿命が短くなっているシンクロトロンチューンでは、測定できないものがあつたので、ビーム寿命が共鳴によって短くなる現象と合わせて、さらに実験や理論的な解析が必要である。

特に、 $\nu = (2.098, 1.103)$ のような水平方向と鉛直方向にカップリングしているチューンでの振る舞いを調査する。

参考文献

- [1] J.J. Bollinger and D.J. Wineland, "Strongly Coupled Nonneutral Ion Plasma" Phys. Rev. Lett. **53** 348 (1984)
- [2] A. Rahman and J. P. Schiffer, "Structure of a One-Component Plasma in an External Field: A Molecular-Dynamics Study of Particle Arrangement in a Heavy-Ion Storage Ring", Phys. Rev. Lett. **57** 1133 (1986).
- [3] J. Wei, H. Okamoto and A. M. Sessler, "Necessary Conditions for Attaining a Crystalline Beam", Phys. Rev. Lett. **80** 2606 (1998).
- [4] T. Schätz, U. Schramm, D. Habs, "Crystalline ion beams", Nature (London) **412** 717 (2001).
- [5] U. Schramm, T. Schätz, and D. Habs, "Three-dimensional crystalline ion beams", Phys. Rev. E **66**, 036501 (2002).
- [6] H. Okamoto, A. M. Sessler and D. Möhl, "Three-Dimensional Laser Cooling of Stored and Circulating Ion Beams by Means of a Coupling Cavity", Phys. Rev. Lett. **72**, 3977 (1994).
- [7] J. Wei, X.-P. Li and A. M. Sessler, "Low-Energy States of Circulating Stored Ion Beams: Crystalline Beams", Phys. Rev. Lett. **73**, 3089 (1994).
- [8] A. Noda, M. Ikegami and T. Shirai, "Approach to ordered structure of the beam at S-LSR", New J. Phys. **8**, 288 (2006)
- [9] 野田章 他、「京大・化研の加速器・ビーム物理研究グループの現状」、本学会報文集WOOPB01.
- [10] 想田光 他、「S-LSRでの共鳴結合のためのチューン調整」、本学会報文集FOBTB03.
- [11] T. Shirai et al., "One-Dimensional Beam Ordering of Protons in a Storage Ring", Phys. Rev. Lett., **98**, 204801 (2007)
- [12] M. Tanabe et al., " Longitudinal and Transverse Coupling of the Beam Temperature Caused by the Laser Cooling of 24Mg^{+} ", Appl. Phys. Express, **1** 028001(2008)
- [13] W. Petrich et al., Phys. Rev. A **48** 2127 (1993).
- [14] 石川丈寛 修士論文 京都大学 (2008)