

## WELH05 OPTICAL MEASUREMENT OF THE LASER COOLING EXPERIMENT AT THE S-LSR

Masao. Nakao<sup>1,A)</sup> Hikaru. Souda, Hiromu. Tongu, Akira. Noda<sup>B)</sup> Koichi. Jimbo  
C)H. Okamoto, K. Ohsaki, D)M. Grieser, E)Jie Wei, Yu Pei-Cheng, He Zhengqi, F)Andrew M. Sessler  
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)Tsinghua University, Beijing, 100084, China  
F)Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA

### Abstract

Experiments of transverse laser cooling for 24Mg<sup>+</sup> 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 0.53mm. At the same time, longitudinal momentum spread measured with PAT increased near the resonant condition. This suggests transverse temperature was transferred to longitudinal direction with synchro-betatron coupling. And time variations of the beam size time decreased at the coupling condition. This is also suggests synchro-betatron coupling.

## S-LSR におけるレーザー冷却実験でのビームの光学的観測

### 1. はじめに

ビームの品質向上のために、確率冷却、電子ビーム冷却、レーザー冷却のようなビーム冷却技術が開発されてきたが、理論的に最も低温のビームを実現できるのはレーザー冷却である。

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<sup>[1]</sup>。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想されている<sup>[2,3]</sup>。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<sup>+</sup> 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<sup>[4,5]</sup>。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<sup>[6]</sup>。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。<sup>[3,7]</sup> 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<sup>[8]</sup>。

共鳴が起こっている事を確かめるためには、シンクロトロンチューンを変化させた時に、共鳴が起こる時に横方向の運動量広がり小さくなると同時に進行方向の運動量広がり大きくなる事を確認する必要がある。

本論文では、CCD カメラによる横方向のビーム幅の測定と、PAT と PMT を用いた進行方向の運動量広がり振の舞いについて報告する。

### 2. 実験装置について

京都大学化学研究所で 2005 年より稼働している S-LSR(図 1)は、6 回対称性を持つ周長 22.57m の小型イオン蓄積・冷却リングであり、7MeV の陽子を電子ビーム冷却、40keV の 24Mg<sup>+</sup> 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 次元でオーダリングさせることができた<sup>[9]</sup>。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<sup>[10]</sup>。

<sup>1</sup> E-mail: nakao@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

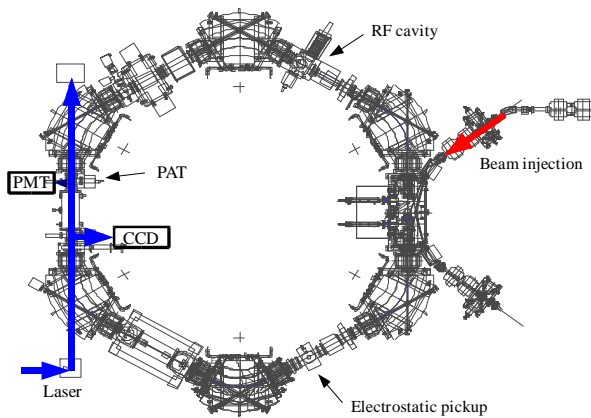


図 1: S-LSR の概観

レーザー発生装置としては、ポンピングレーザーとして COHERENT 社の Verdi-V10 (Nd:YVO<sub>4</sub>, 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(図 2)。

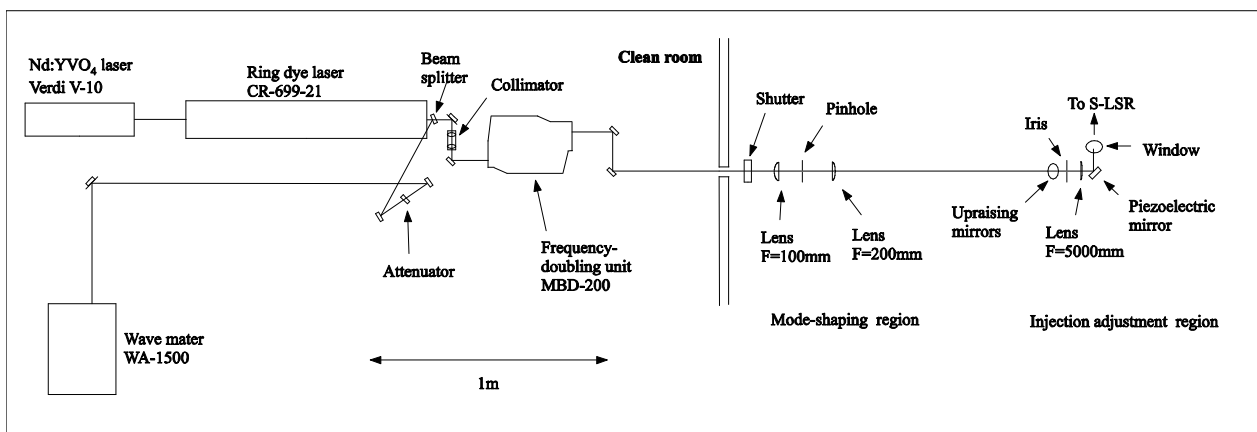


図 2: Laser and Transport System

2010 年 3 月以降、色素レーザーが、周波数を固定するために使われるリファレンスカビティからの信号にノイズが入る事が原因と思われる不安定な状態になっている。このノイズを除去するために調整、部品交換を行ったが、ノイズの発生源が不明のためレーザーの周波数が不安定で実験が非常に困難な状況である。

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 3)。この実験では、2 通りの観測方法を使用した。一つの方法は、ビーム入射から 20 秒程度後のほぼ平衡状態と思われる状況で、1 秒間露光の測定を行い、ビームの幅を評価した。もう一つの方法では、100ms の露光を繰り返し、ビームの幅の時間変化を測定し、冷却の速さを測定した。なお、内部処理の都合上、測定と測定の間に 170ms 程度のデッドタイムがあり、また、100ms 露光で外部トリガと安定して同期するのは 2.2Hz 程度以下であるため、非同期で測定した。一定時間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。進行方向の運動量分布の測定には PAT(Post Acceleration Tube)<sup>[11][12]</sup>を使用した。PAT は図 4 のような概観である。

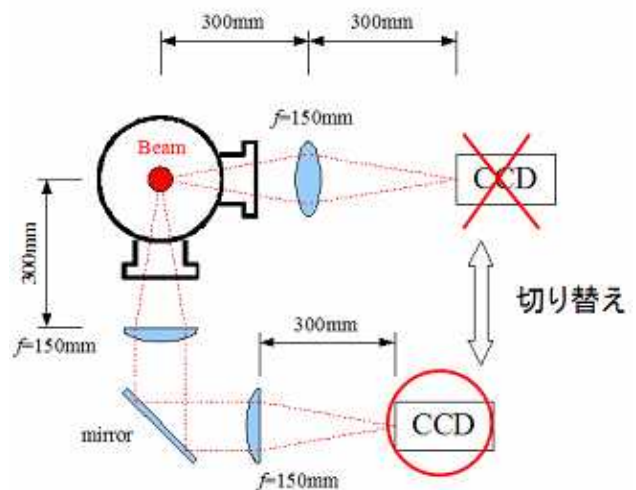


図 3 CCD の位置と光学系

PAT は最大 400V の電圧がかけられるステンレス管であり、その中を粒子が通る時、局所的に粒子は減速される。また、PAT 内で粒子がレーザーによって励起された後の自然放出の蛍光を、窓から PMT(Photo-multiplier Tube)で観測すれば、PAT の中で粒子とレーザーがどの程度相互作用しているかが分かる。ここで、ドップラー効果により、PAT 内で

レーザーと相互作用できる粒子の運動量は一定の範囲にあるので、PAT に掛ける電圧を掃引したとき、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す。

ここで PAT にかける電圧を掃引すると、それに応じて発光する粒子の運動量が掃引されるため、蛍光量の時間変化が運動量の分布になる(図 5)。

現在、運動量の分解能を高めるために PAT の掃引電圧は 100V で実験している。

実験の主なパラメータは表 1 の通りである。

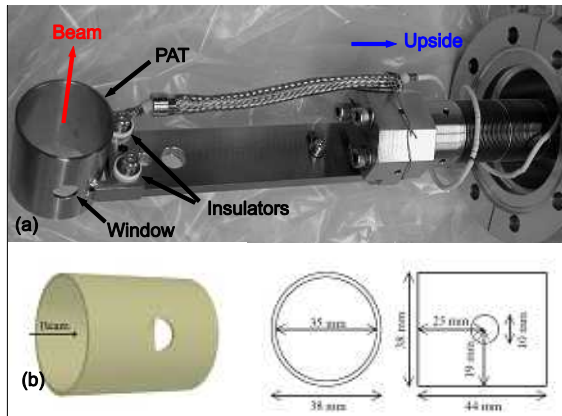


図 4: (a) PAT の取り付け方法 (b) PAT の概観図

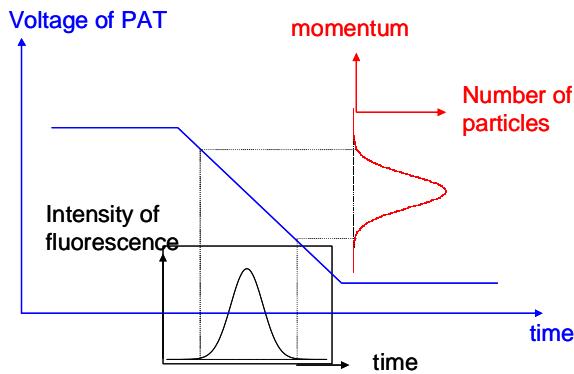


図 5: PAT の原理

表 1: S-LSR の主な実験パラメータ

周長	22.557m
平均半径	3.59m
直線部の長さ	1.86m
曲線部半径	1.05m
ラティス対称性	6
イオン種	$^{24}\text{Mg}^+$ : 40keV
初期運動量広がり	$1 \times 10^{-3}$
初期粒子数	$3 \times 10^7$
主な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
レーザー周波数	$1074110.3\text{GHz} \pm 0.05\text{GHz}$
レーザーの離調(レーザー周波数と共鳴周波数の差)	$-0.2\text{GHz} \pm 0.05\text{GHz}$
出口窓でのレーザー強度	11 ~ 20mW

### 3. 実験の結果

ベータトロンチューンが(2.068,1.105)のとき、シンクロトロンチューンを変えながら冷却後の運動量広がりとビームサイズを測定したところ、図 6 のようになった。

横方向にカップリングするチューンである 0.068 付近で、横方向ビーム幅が 0.8mm ~ 1mm から最小で 0.53mm に減少し、運動量広がりが  $1.2 \times 10^{-4}$  から最大で  $1.7 \times 10^{-4}$  に増加した。これは、共鳴結合によって進行方向のみを冷却していた冷却力が横方向に移ったためと考えられる。

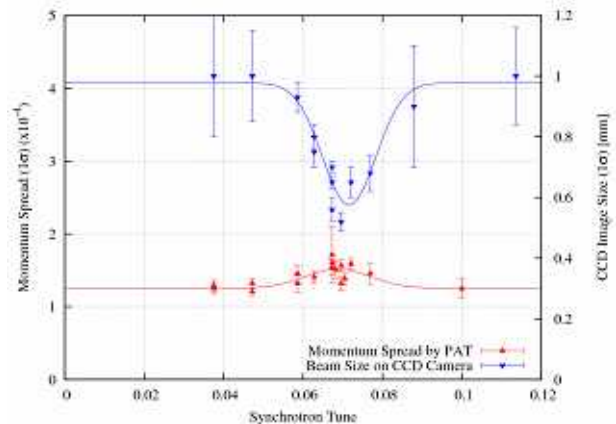


図 6: (2.068,1.105)での運動量広がりとビームサイズ

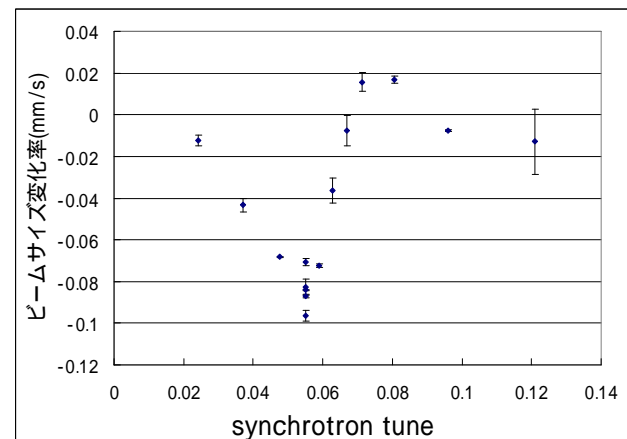


図 7: チューンと冷却速度の関係(  $x$ ,  $y$  ) =

(2.058,1.101)

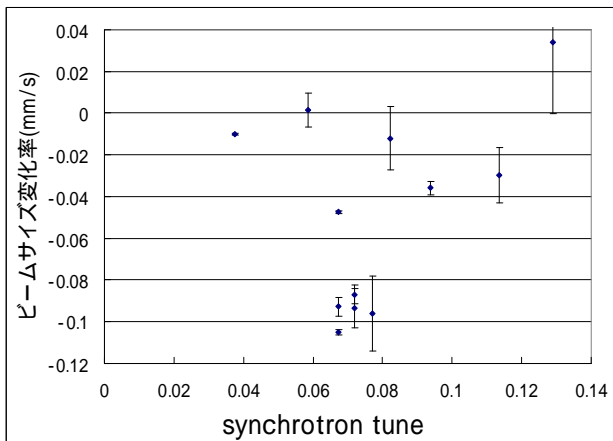


図 8: チューンと冷却速度の関係 (  $x_s, y_s$  ) = (2.067,1.104)

また、図 7~8 は、入射(冷却開始)直後から約 1.5 秒後までの 5 回の測定 of ビームサイズを直線で fit して求めた傾きをビームサイズ変化率としてシンクロトロンチューンを変えて測定したものである。

$x$  方向のベータトロンチューンの小数部とシンクロトロンチューンが一致する付近でビームサイズの変化率が小さく(ビームサイズが小さく)なっている。これもカップリングによるものと考えられる。

## 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] T. Shirai et.al., "One-Dimensional Beam Ordering of Protons in a Storage Ring", Phys. Rev. Lett., **98**, 204801 (2007)
- [10] M. Tanabe et.al., " Longitudinal and Transverse Coupling of the Beam Temperature Caused by the Laser Cooling of  $24\text{Mg}^+$ ", Appl. Phys. Express, **1** 028001(2008)
- [11] W. Petrich et al., Phys. Rev. A **48** 2127 (1993).
- [12] 石川丈寛 修士論文 京都大学 (2008)