

## Trial of three dimensional laser cooling at S-LSR

Hikaru Souda\*, Mikio Tanabe, Masao Nakao, Akihisa Wakita, Takehiro Ishikawa,  
Masahiro Ikegami†, Hiromu Tongu, Akira Noda  
ICR Kyoto University, Gokasho, Uji-city, Kyoto, 611-0011

Toshiyuki Shirai  
National Institute of Radiological Sciences, Inage, Chiba, 263-8555, Japan

### Abstract

Three-dimensional laser cooling by resonant coupling is being carried out at small laser-equipped storage ring(S-LSR). The resonant coupling of longitudinal and horizontal oscillations are observed as sharp peaks of momentum spreads at two different tune conditions  $(\nu_x, \nu_s) = (2.065, 0.064), (2.054, 0.057)$ . Vertical beam size are measured in three dimensional coupling condition, but no significant reduction is observed yet. Horizontal beam size measurement and improvement of cooling efficiency will be carried out soon.

## S-LSR における 3次元レーザー冷却の試み

### 1. はじめに

京都大学化学研究所のイオン蓄積・冷却リング S-LSR<sup>[1]</sup>では、2007年1月より極低温ビーム実現のために40keV  $^{24}\text{Mg}^+$  のレーザー冷却実験を行っている。

極低温のビームではクーロン反発力によりビームの構成粒子の位置が固定される結晶化状態となることが予想されている<sup>[2]</sup>。これは運動量広がり、ビームサイズの急激な減少として観測されるが、S-LSRにおける Coasting Beam の1次元レーザー冷却実験<sup>[3]</sup>ではこの現象は確認されていない。これは、冷却していない横方向の温度が Intra Beam Scattering で進行方向に移動しており、到達温度が十分に下がっていないためと考えられる。

さらなる冷却を達成するため、シンクロトロン、ベータトロン各チューンの差が整数になる条件で各方向の振動を結合させて横方向を間接的に冷却する3次元レーザー冷却<sup>[4]</sup>の実験を2008年より行っている。

### 2. 実験装置

S-LSRの全体図は図1、主要パラメータは表1の通りである。イオン源CHORDISから引き出した $^{24}\text{Mg}^+$ ビームを40kVの静電高圧で加速し、リング内に導入してレーザー冷却実験を行っている。冷却用レーザーはポンピングレーザー (Coherent, Verdi V-10) の532nm出力を色素レーザー (Coherent, CR699-29) で560nmに変換し、倍波生成器 (Coherent, MBD-200) で280nmにしている。280nmのレーザー出力は最大50mW程度である。レーザー冷却を行う直線部のアパーチャーによってレーザーと $^{24}\text{Mg}^+$ ビームとのアライメントを行っている。

3次元冷却の実験を行うためにはシンクロトロンチューンとベータトロンチューンの少数部が一致す

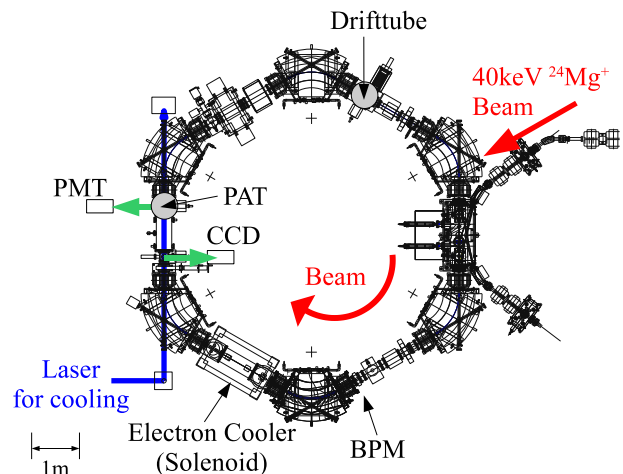


図1: S-LSR 全体図

表1: S-LSR 主要パラメータ

周長	22.557 m
曲率半径	1.05 m
イオン種	$^{24}\text{Mg}^+$ (40 keV)
周回周波数	25.192 kHz
$^{24}\text{Mg}^+$ 励起準位	$3s^2S_{1/2} \rightarrow 3p^2P_{3/2}$
励起波長	280 nm

る必要があり、ベータトロンチューンの整数共鳴を避けるために比較的大きなシンクロトロンチューン ( $\nu_s \sim 0.1$ )が必要とされる。既存の無同調空洞ではRF周波数 2.51926MHz ( $h=100$ ) の時 Transit Time Factor が0.36と小さく十分なチューンが得られなかったため、図2のRFドリフトチューブを新規に設計し、内径35mm、電場実効長は26.6mmであり、 $h=100$ でのTransit Time Factorは0.91となる。実際にリング内に

\* E-mail: souda@kytcr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

† Present Address is: Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency, Kizugawa, Kyoto, 619-0215, Japan

導入し、シンクロトロン Sideband の測定により  $\nu_s = 0.11$  の実測値を得た。

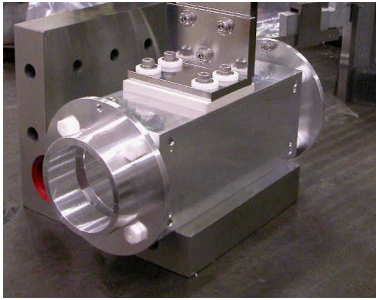


図 2: 小型ドリフトチューブ写真

進行方向のビーム温度は運動量広がりから算出するが、RF でバンチしたビームに関してはバンチビームのコヒーレントな信号が大きくショットキーノイズが観測できないため、ビームの蛍光によって運動量広がり測定を行う。このため、レーザー冷却部に局地的にビーム運動量を変えるための Post Acceleration Tube (PAT)<sup>[5]</sup> を導入した。この電圧を掃引しながら蛍光を光電子増倍管で計数することで、バンチビームの運動量広がり測定が可能となる。



図 3: 運動量広がり測定用 Post Acceleration Tube の写真。側面の穴から見える蛍光を光電子増倍管で観測する。

### 3. 3次元レーザー冷却実験

3次元レーザー冷却の実験はいくつかの段階を踏んで行っている。まず初めに、共鳴結合を用いない1次元のバンチビーム冷却の実験を2008年1月に行い、その効果を確認した<sup>[6]</sup>。

続いて、進行方向と水平方向の振動を結合させた2次元レーザー冷却の実験を行った。各チューンの値が  $(\nu_x, \nu_y) = (2.064, 0.814)$ ,  $(2.054, 0.826)$  の条件において、小型ドリフトチューブの電圧を変化させてシンクロトロンチューンを調整し、入射0.5秒後の運動量広がり測定をPATを用いて測定し、図4の結果を得た。

$(\nu_x, \nu_s) = (2.064, 0.065)$ ,  $(2.054, 0.057)$  のとき、運動量広がりが2倍程度に増加している。これらは差

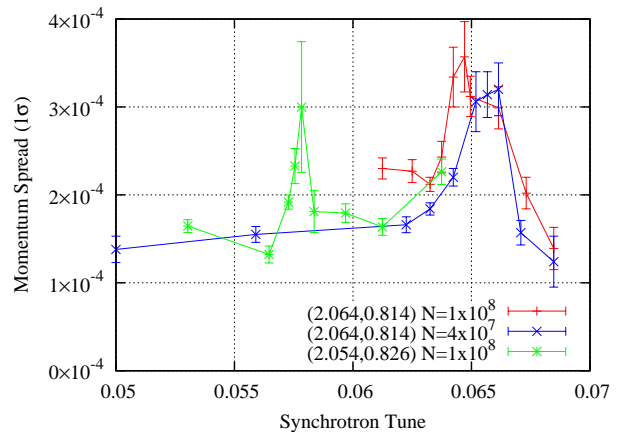


図 4: PAT を用いて測定した運動量広がり。シンクロトロンチューンを変化させると、共鳴条件においてピークが観測された。

が整数となる共鳴条件とほぼ一致している。共鳴結合が起これば横方向の熱が冷却されている進行方向に流入するため、運動量広がりが増大したということは横方向が冷却されている可能性が高いと考えられる。水平方向温度を示す水平ビームサイズは現在直接観測できないが、今夏のメンテナンスで設備を整え秋以降に観測を行う予定である。

次に、x-y カップリングを含めた3次元レーザー冷却の準備を行った。x-y カップリング源としては、電子ビーム冷却装置内のソレノイド磁場を用いている。ソレノイド磁場40Gauss のとき、RF Knock Out で水平方向に励振し、Beam Position Monitor の静電ピックアップ上下の信号をRF減算器 (THAMWAY, T040-1018A) に導入し、上下極板の差分信号を測定した。ソレノイド磁場がない場合には鉛直方向の振動は観測されないが、ソレノイド磁場がある場合にはRFKOでの水平励振により鉛直方向の振動が10dB程度励起され、共鳴チューン条件でのx-yカップリングが確認できた<sup>[7]</sup>。

さらに、3方向のチューンを共鳴条件にしての鉛直ビームサイズ測定を行った。ビームサイズは、レーザー冷却時の蛍光をCCDカメラで測定し、軸上に射影することで得られる。測定時の蓄積粒子数は  $3 \times 10^7$  個で、ベータロンチューンを  $(\nu_x, \nu_y) = (2.068, 1.069)$  に固定し、シンクロトロンチューンを変化させながら測定を行った。測定したビームサイズは図5の通りで、細かな変動があったが  $1\sigma = 1.6 \sim 2.0\text{mm}$  程度であり、共鳴条件における有意なビームサイズ減少は確認できていない。シミュレーション<sup>[8]</sup>によると鉛直方向の間接的な冷却速度は遅いため、現在はビーム寿命が短く冷却が不十分である可能性がある。今後、RF電圧印加時の加熱作用を抑える Adiabatic Capture を行うなどして冷却効率を改善する予定である。

また、レーザー冷却時のビーム寿命の調査を行ったところ、図6のように  $\nu_x = 0.05$  付近で寿命が急減し、それ以外の部分ではレーザー冷却時に寿命が伸びることがわかった。これらの原因はまだ調査中だ

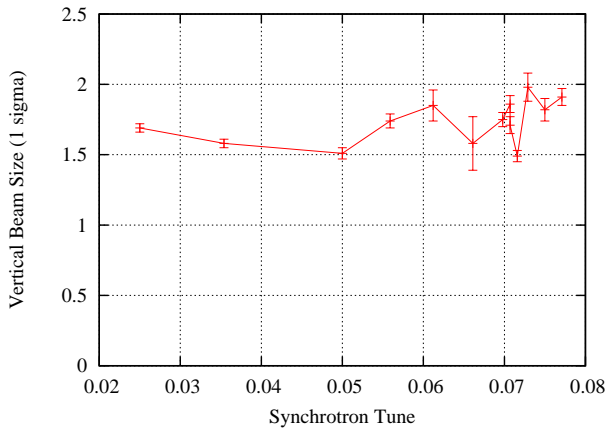


図 5: CCD カメラによる鉛直ビームサイズ測定結果。The betatron tunes are  $(\nu_x, \nu_y) = (2.068, 1.069)$  and solenoidal field of 40 Gauss is applied.

が、寿命増加はビームサイズ減少が確認できていないことから共鳴結合の影響ではなく運動量広がり減少に伴う Dispersion の影響が減少したためと考えられ、 $n_x=0.05$  付近での寿命急減については、レーザーなしの状態ですら図 7 に示した詳細調査の結果から、ベータatron チューンや粒子数に関係なく起こることからソレノイドによる横座標回転の影響ではないかと考えている。

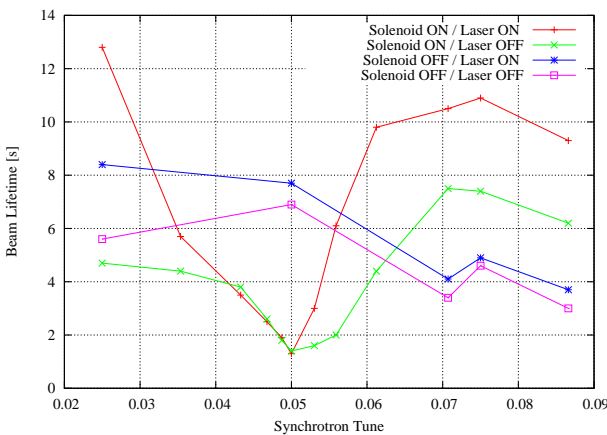


図 6: ソレノイドとレーザーの有無によるビーム寿命の変化

#### 4. まとめ

京都大学化学研究所のイオン蓄積・冷却リング S-LSR で、共鳴結合を利用した 3 次元レーザー冷却の実験を行った。3 次元レーザー冷却用の装置として小型のドリフトチューブと運動量測定用 Post Acceleration Tube を設計してリング内に導入し、加速空洞を用いた進行方向と水平方向のカップリングによる 2 次元レーザー冷却実験においてチューンが共鳴条件の時

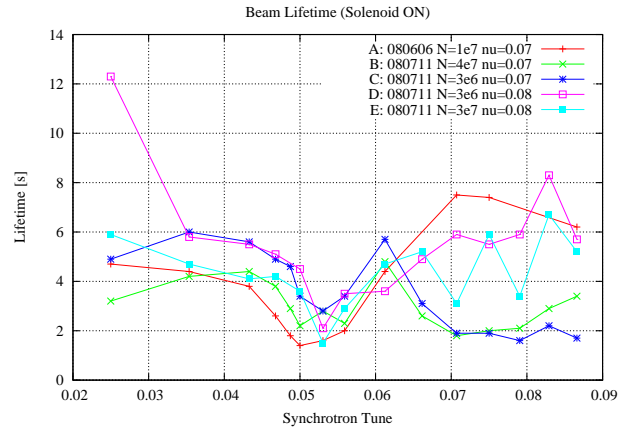


図 7: ソレノイド磁場 40Gauss、レーザーなしの時のビーム寿命詳細調査

に運動量広がりピークを観測した。各チューンを共鳴状態にした 3 次元レーザー冷却実験を行ったが、共鳴条件でのビームサイズ減少は確認できていない。ビーム寿命が短いこと、RF バンチ時の加熱作用により冷却効率が低いであることが原因と考えられ、今後はこれらの改善を行っていく予定である。

#### 5. 謝辞

本研究は、先進小型加速器事業、京都大学 21 世紀 COE プログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」、および日本学術振興会特別研究員奨励費の援助を得て行われました。

#### 参考文献

- [1] A. Noda: Nucl. Instrum. Methods **532** (2004) 150.
- [2] J. Wei, X. ping Li and A. M. Sessler: Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 3089.
- [3] M. Tanabe, T. Ishikawa, M. Nakao, H. Souda, M. Ikegami, T. Shirai, H. Tongu and A. Noda: Appl. Phys. Express. **1** (2008) 028001.
- [4] H. Okamoto: Phys. Rev. E **50** (1994) 4982.
- [5] T. Ishikawa, M. Tanabe, H. Souda, M. Ikegami, H. Tongu, T. Shirai and A. Noda: *Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan 2007* p. 321.
- [6] M. Nakao, M. Tanabe, H. Souda, A. Wakita, T. Ishikawa, M. Ikegami, H. Tongu, T. Shirai, A. Noda: in this proceedings.
- [7] H. Souda, M. Nakao, A. Wakita, M. Tanabe, T. Ishikawa, M. Ikegami, H. Tongu, T. Shirai and A. Noda: *Proceedings of the Tenth Symposium on Accelerator and Related Technology 2008* p. 55.
- [8] Y. Yuri and H. Okamoto: Phys. Rev. ST-AB **8** (2005) 114201.