

# BEAM CURRENT DEPENDENCE OF THE EQUILIBRIUM TEMPERATURE WITH A LASER COOLING

Hikaru Souda<sup>A)</sup>, Masao Nakao<sup>A)</sup>, Yuji Nasu<sup>A)</sup>, Hiromu Tongu<sup>A)</sup>, Akira Noda<sup>A)</sup>,  
Kouichi Jimbo<sup>B)</sup>, Hiromi Okamoto<sup>C)</sup>, He Zhengqi<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Institute for Chemical Research, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

<sup>B)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

<sup>C)</sup> Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University  
1-3-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8530, Japan

<sup>D)</sup> Tsinghua University, Beijing, 100084, People's Republic of China

## Abstract

Particle number dependence of horizontal temperatures are measured at Small Laser-equipped Storage Ring (S-LSR) at Kyoto University. With a resonant coupling condition of tunes  $(\nu_x, \nu_y, \nu_s) = (2.068, 1.105, 0.068)$ , horizontal temperature decreases with power of 0.3 of particle numbers. The coupling constant of horizontal and longitudinal temperature:  $C_h = T_h/T_{||}$  is 0.12 with the coupling condition, which is larger than that with non-coupling conditions; 0.02. This indicates a strong coupling occurred with an synchro-betatron resonant coupling condition.

## レーザー冷却時平衡温度のビームカレント依存性

### 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、 $^{24}\text{Mg}^+$  ビームをレーザー冷却によって極低温まで冷却し、結晶化ビーム<sup>[2]</sup>を生成することを目指している。

レーザー冷却は非常に強い冷却力を持つが、その冷却作用は照射した方向に限られ、加速器・リング中を運動するイオンについては実質的に進行方向にしか冷却できない。Intra Beam Scattering による熱の移行を利用する方法<sup>[3]</sup>や、レーザーを水平方向にずらして照射する方法<sup>[4]</sup>により横方向を間接的にレーザー冷却する試みもなされたが、これらは電子ビーム冷却と同程度の温度までしか横方向の冷却効果が得られていない。

これに対して、運動量分散が有限である地点に RF 空洞を配置し、ベータatron振動とシンクロトロン振動の共鳴を利用することで、進行方向の冷却力を横方向に伝える手法が理論的に示され<sup>[5]</sup>、シミュレーションも行われており<sup>[6]</sup>。S-LSR では、この共鳴結合による横方向のレーザー冷却を実現すべく冷却実験を行っている。

冷却時の平衡状態でのビーム温度は冷却力と加熱力のつり合いによって定まり、加熱力としてはビームカレントに依存する Intra Beam Scattering が支配的である。そのため、ビームカレントを減らすと加熱力が減少し、温度低下により空間電荷密度が上昇して加熱力と平衡する点が新たな平衡温度となる。そ

のため、冷却力の大小、冷却限界の温度を調べるには、粒子数とビーム温度の関係を調べる必要がある。進行方向の冷却については、Coasting Beam に後方からレーザーを照射し誘導加速器による対抗力を用いて冷却を行った結果が得られている<sup>[7]</sup>が、同様の測定を水平方向のビーム温度に対して行った。

### 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 40kV の静電高圧で引き出した  $^{24}\text{Mg}^+$  ビームを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。

S-LSR の Lattice は、現在使用している  $(\nu_x, \nu_y) = (2.0, 1.0)$  付近の動作点では FODO Lattice であり、偏向磁石の両端に配置された四重極磁石について、上流側が QF、下流側が QD となっている。S-LSR は 6 回対称のリングであり、偏向磁石 6 台、上流側 QM6 台、下流側 QM6 台をそれぞれシリーズ励磁している。したがって、ベータatronチェーンの調整要素は、上流側 QM(QM1 系) 電流値、下流側 QM(QM2 系) 電流値の 2 つである。

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

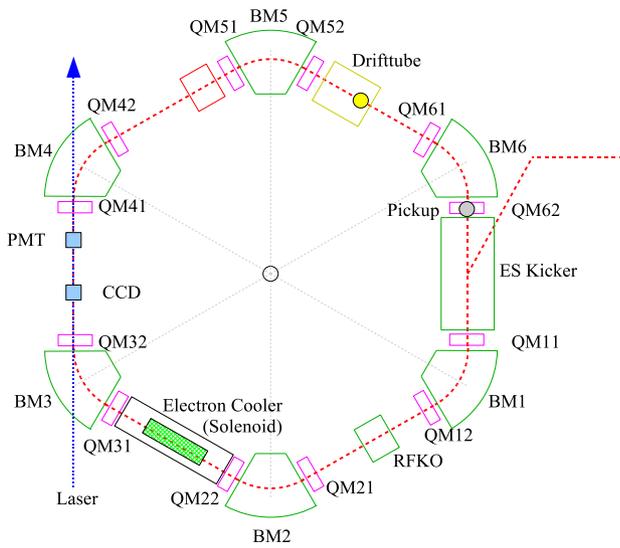


図 1: S-LSR 全体図

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

ビーム電流量の測定は DCCT によって行っているが、 $1 \times 10^8$  個以下の粒子数の時は感度が足りず DCCT での測定は不可能である。そのため、ピックアップ電極に誘起されるショットキー信号の強度およびレーザー冷却時に CCD で測定される蛍光の Photon 数を DCCT で校正し、粒子数に変換した。ピックアップ電極での測定限界は  $1 \times 10^5$  個、CCD 蛍光での測定限界は  $2 \times 10^6$  個である。

シンクロトロンチューンの調整は直線部に配置した小型 Drift tube で行う。Drift tube がある点での運動量分散はチューン設定により変化するが、1.0 ~ 1.2m である。RF 電力の投入は図 2 のようになっており、信号源の AM 外部入力端子に Function Generator の信号を入れて、入射時は電圧 0 で時間の 2 次関数で電圧を立ち上げる Adiabatic Capture を行っている。

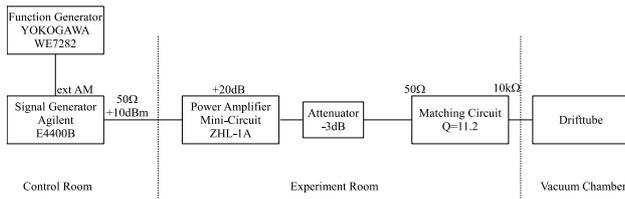


図 2: RF 系ブロック図

各チューンは Beam Transfer Function を測定して算出している。ブロック図は図 3 の通りで、Network Analyzer (Agilent 4395A) からの出力を RFKO 水平電極に印加し、ビームの振動と共鳴した時に励起される振動を三角板型 Pickup で検出し、Network Analyzer で Sideband 周波数を測定している。Sideband が水平・鉛直のどちらのチューンを表すかは QM 電流値を変化させた際の挙動で判断している。またチューンの整数部は補正なしの時の COD を測定して変動周期を調べるとともに、MAD で計算して一致することを確認している。今回の条件ではいずれも  $\nu_x$  の整数部は 2,  $\nu_y$  の整数部は 1 である。

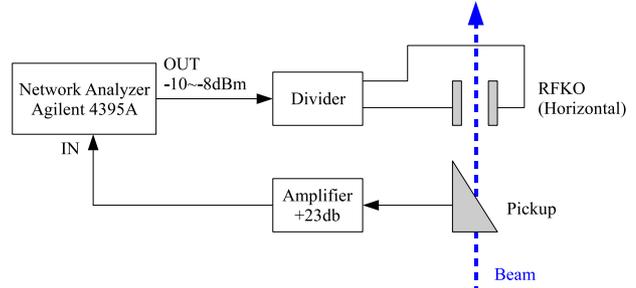


図 3: Beam Transfer Function 測定のブロック図

### 3. チューンの調整

ベータトロンチューンを低くしすぎると整数共鳴によるビーム寿命の減少が起こるが、シンクロトロンチューンは 0.1 程度までしか上がらないため、共鳴に影響する小数部が 0.07 ~ 0.10 になるように調整を行った。

シンクロトロンチューンの測定も、ベータトロンチューンと同様に Sideband を測定して行っている。RF なしでの bare tune が  $(\nu_x, \nu_y) = (2.068, 1.105)$  の条件で、Drift tube に印加する RF 電圧を 10V から 90V まで変化させてベータトロンチューン・シンクロトロンチューンを同時測定した結果が図 4 である。強い結合を持つ進行方向と水平方向が RF 電圧 25V-35V、チューン小数部 0.068 付近で共鳴していることがこの測定結果から読み取れる。

### 4. 横方向レーザー冷却の結果

この測定結果を元に、RF 電圧を変えながらレーザー冷却を行い、冷却後のビームサイズを CCD カメラで測定し、冷却中の運動量広がりを速度掃引と PMT による蛍光量測定によって測定したところ、チューンが共鳴を示す条件においてビームサイズが 0.55mm と他の条件より小さくなり、運動量広がりが他の条件より大きくなるという結果が得られた [8]。

進行方向のチューンを 0.038 から 0.113 まで変えながらビームサイズを 1 秒おきに 30 秒間測定し、水平方向の温度を求めたものが図 6 である。粒子数は時間と共に減少していくが、共鳴条件を満たさない

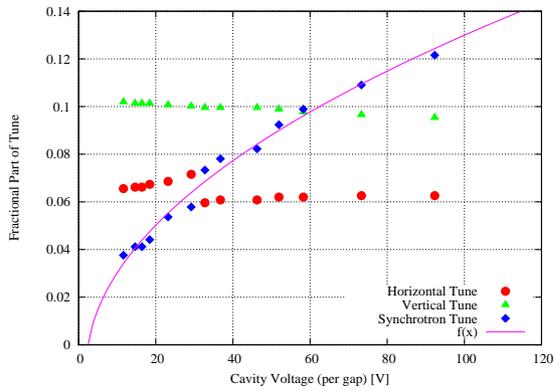


図 4:  $(\nu_x, \nu_y) = (2.068, 1.105)$  でのベータトロンチューン、シンクロトロンチューン測定

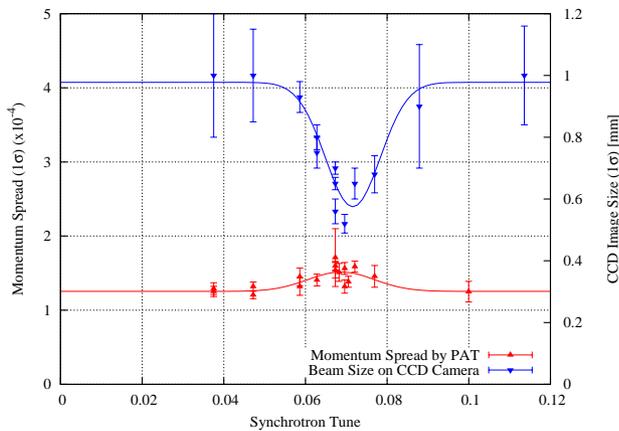


図 5:  $(\nu_x, \nu_y) = (2.068, 1.105)$  での冷却後運動量広がりおよびビームサイズ

$(\nu_x, \nu_s) = (2.068, 0.038)$  の場合は粒子数が減少しても温度は低下しない。共鳴条件を満たす  $(\nu_x, \nu_s) = (2.068, 0.068)$  の条件においては、冷却後の水平方向温度は粒子数の 0.3 乗で減少していく。これは、進行方向冷却時の粒子数依存係数 (0.32 乗) に近い。Intrabeam Scattering と同様の Linear Coupling を仮定すると、進行方向と水平方向の温度の比  $C_h = T_h/T_{||}$  は、共鳴状態で  $21\text{K}/171\text{K}=0.12$  となり、非共鳴状態では進行方向  $20\text{K}$ 、横方向  $800\text{K}\sim 2000\text{K}$  で  $C_h=0.01\sim 0.02$  である。Coasting Beam 実験<sup>[7]</sup> の時も 0.02 であり、共鳴状態では非共鳴状態に比べて 5~10 倍大きな結合定数となっている。現在、電子ビーム冷却で前段冷却を行うことによりさらに低温に到達するための検討を進めており、Expansion により横方向電子温度が  $400\text{K}$  となる S-LSR の電子ビーム冷却装置を用いることにより、冷却開始時の温度を  $1/2\sim 1/5$  にできれば粒子数  $10^4$  個で  $1\text{K}$  台への到達が予想でき、今後分子動力学による詳細なシミュレーションを行う予定である。

これらの実験及び解析により、横方向のレーザー冷却において、シンクロ・ベータトロン共鳴条件で

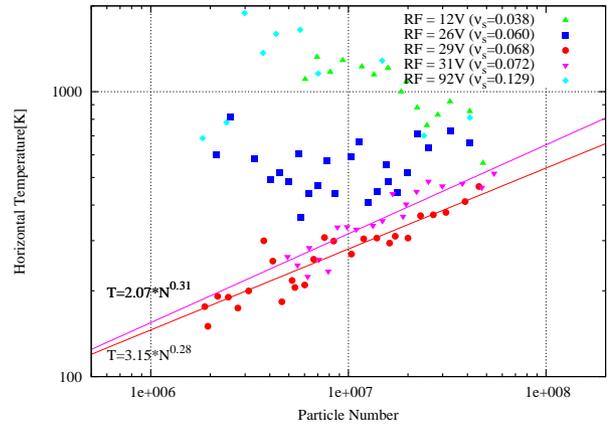


図 6: シンクロトロンチューンを変えた時の水平方向温度と粒子数の関係。  $\nu_s = 0.068, 0.072$  で粒子数の減少とともに温度が低下している。

はより強い進行方向と横方向結合が発生していると考えられる。ただし、現在の測定セットアップでは入射直後 (100ms 以内) の冷却の進み方、冷却速度が得られていないため、現在これを CCD で直接測定し、Cooling Time を評価する準備を行っている。

## 5. 謝辞

本研究は、先進小型加速器事業、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」、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] H.-J. Miesner, R. Grimm, M. Grieser, D. Habs, D. Schwalm, B. Wanner and A. Wolf: Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 623.
- [4] I. Lauer, U. Eisenbarth, M. Grieser, R. Grimm, P. Lenisa, V. Luger, T. Schätz, U. Schramm, D. Schwalm, and M. Weidemüller: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 2052.
- [5] H. Okamoto: Phys. Rev. E **50** (6) (1994) 4982.
- [6] Y. Yuri and H. Okamoto: Phys. Rev. ST-AB **8** (2005) 114201.
- [7] M. Tanabe, T. Ishikawa, M. Nakao, H. Souda, M. Ikegami, T. Shirai, H. Tongu and A. Noda: Applied Physics Express **1** (2008) 028001.
- [8] M. Nakao, T. Hiromasa, H. Souda, H. Tongu, A. N. K. Jimbo, T. Shirai, M. Grieser, H. Okamoto and A. V. Smirnov: Proceedings of IPAC'10 2010) p. 858.