

TUNE OPTIMIZATION FOR RESONANT COUPLING AT S-LSR

Hikaru Souda^{*A)}, Masao Nakao^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Akira Noda^{A)}, Kouichi Jimbo^{B)},
Toshiyuki Shirai^{C)}, Hiromi Okamoto^{D)}, Manfred Grieser^{E)}, Alexander Smirnov^{F)}

A) Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

B) Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

C) National Institute of Radiological Sciences
4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555, Japan

D) Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
1-3-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8530, Japan

E) Max-Planck-Institut für Kernphysik
Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg, Germany

F) Joint Institute for Nuclear Research
Dubna, 141980 Moscow region, Russia

Abstract

Betatron and synchrotron tunes are optimized in order to enable transverse laser cooling by resonant coupling at S-LSR. Magnetic field of quadrupole magnets are initialized by a excitation current of 180A for a minute and set to 10-30A to control the betatron tunes to a precision of 0.001. Synchrotron tunes can be changed from 0 to 0.1 by an rf voltage applied on a small drifttube. In the laser cooling experiment, an indication of coupling: reduction of a beam size from 0.9 to 0.55 mm and larger momentum spread was observed at a tune condition of $(n_x, n_y, n_s) = (2.068, 1.105, 0.068)$.

S-LSR での共鳴結合のためのチューン調整

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^[1] 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^[2] 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。このため、冷却できない横方向の運動が Intra-beam scattering によって進行方向に流入することで、進行方向の到達温度が一定より下がらないという現象が見られた^[3]。

このため、より低温まで冷却するためには、進行方向だけでなく横方向の温度を下げる必要があると考えられる。レーザーで直接冷却できるのは進行方向だけだが、運動量分散が 0 でない地点に RF 空洞を配置し、ベータトロン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^[4]、シミュレーションも行われている^[5]。

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が、共鳴状態を実現するにはシンクロトロンチューン・ベータトロンチューンの小数部を一致させる必要がある。こ

のため、実際の実験においては、これらのチューンを実際に測定しながら微調整し、共鳴状態にあることを確認する必要がある。

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、ベータトロンチューンの調整要素は、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@kyticer.kuicr.kyoto-u.ac.jp

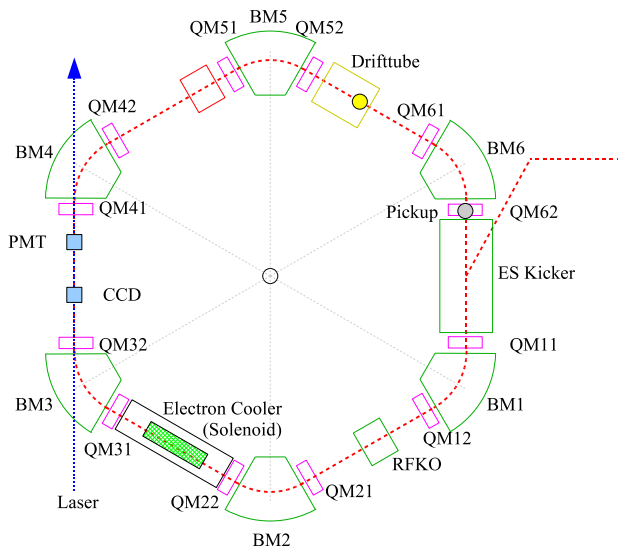


図 1: S-LSR 全体図

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

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 Drifttube で行う。Drifttube がある点での dispersion 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。

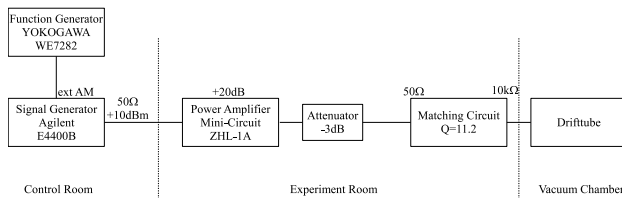


図 2: RF 系ブロック図

x-y coupling は BM2, BM3 の間にある Electron Cooler 中央部のソレノイド磁場を用いる。ソレノイド磁場の有効長は 1.2m である。陽子の電子ビーム冷却に用いる場合は電子銃、中央部、コレクタ部とその間のトロイド部のコイルを直列にして電流を流しているが、トロイド部の磁場があるとビームが横方向に力を受けこれを補正する必要が生まれるため、配線を変更して中央部コイルのみを励磁するようにした。

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 ν_x の整数部は 2, ν_y の整数部は 1 である。

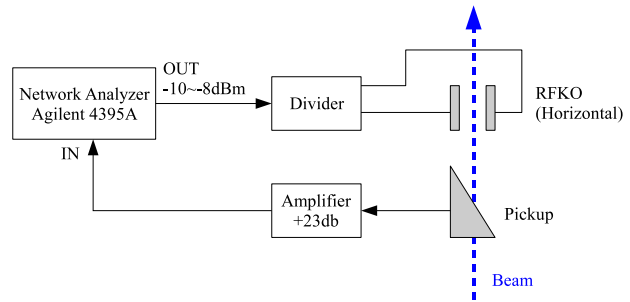


図 3: Beam Transfer Function 測定のブロック図

3. ベータトロンチューンの調整

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。この時、水平・鉛直チューンの小数部が近いと x-y coupling の影響で、図 4 のように小数部の値が一致する点からチューンの値がずれる Tune Separation が発生している。

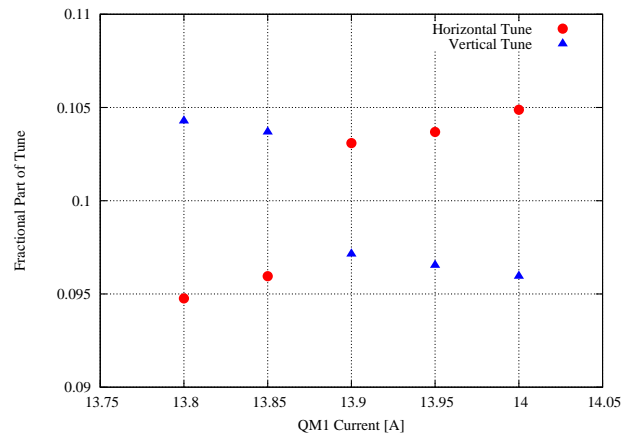


図 4: $\nu_x = \nu_y = 0.10$ 付近でのベータトロンチューン測定

この Tune Separation については、ソレノイド電流

を0A から40A(100Gauss)まで変化させることで図5のように変化している。0Aではなく20Aの時にこのSeparationが最小値を取ることから、これに相当するSkew成分などのCoupling要素がリングに存在すると思われる。現在ソレノイド等によるカップリングの強さと冷却結果の有意な相関は観測されていないが、鉛直方向を含めた3次元冷却を行うため今後さらに調査を進める予定である。

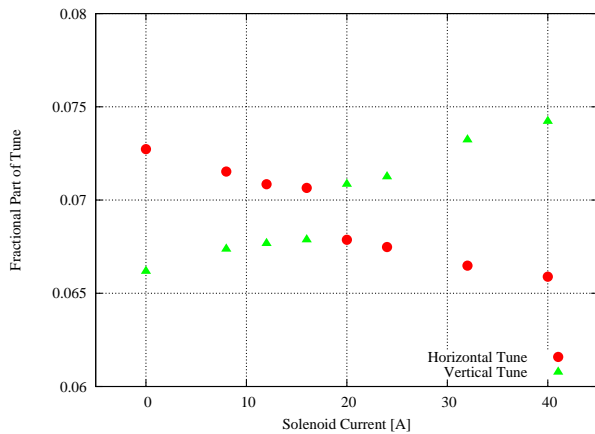


図5: $(\nu_x, \nu_y) = (2.07, 1.07)$ 付近でソレノイド電流を変えたときのチューン変化

4. シンクロトロンチューンの調整

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、Drifttube 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6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。

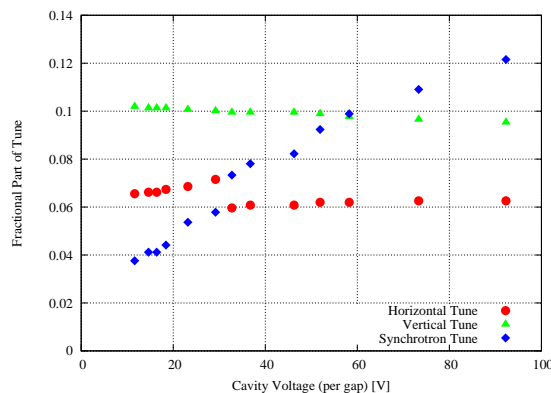


図6: $(\nu_x, \nu_y) = (2.068, 1.105)$ でのベータトロン、シンクロトロンチューン測定

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 [6]。これは水平方向の熱が進行方向に流入することにより、間接的に水平方向が冷却されたことを示唆している。ただし、x-y coupling に近い条件においては共鳴から離れた点でこのビームサイズ減少が起こり、共鳴点付近ではビーム寿命が減少するなどの挙動が見られており、今後はこの付近でのさらなる調査を行い、鉛直方向を含めた3次元のレーザー冷却の実現に向けて実験を進めていく予定である [7]。

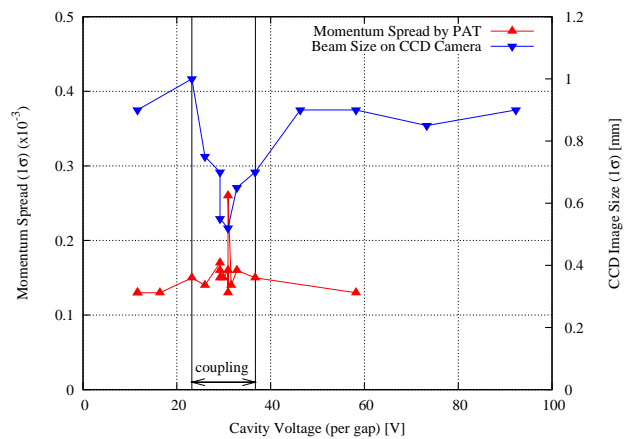


図7: $(\nu_x, \nu_y) = (2.068, 1.105)$ での冷却後運動量広がり とビームサイズ

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**, 150 (2004).
- [2] J. Wei, X. ping Li and A. M. Sessler, Phys. Rev. Lett. **73**, 3089 (1994).
- [3] M. Tanabe *et. al.*, Applied Physics Express **1**, 028001 (2008).
- [4] H. Okamoto, Phys. Rev. E **50**, 4982 (1994).
- [5] Y. Yuri and H. Okamoto, Phys. Rev. ST-AB **8**, 114201 (2005).
- [6] M. Nakao *et. al.*, in this proceedings.
- [7] A. Noda *et. al.*, in this proceedings.