

HORIZONTAL-VERTICAL COUPLING FOR THREE DIMENSIONAL LASER COOLING

T. Hiromasa^{#A)}, M. Nakao^{A)}, A. Nod^{A)}, H. Souda^{A)}, H. Tongu^{A)},
K. Jimbo^{B)}, T. Shirai^{C)}, H. Okamoto^{D)}

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji-city, Kyoto, 611-0011, Japan,

^{B)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji-city, 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

Abstract

In order to achieve three dimensional crystal beam, laser cooling forces are required not only in the longitudinal direction, but also in the transverse directions. With the resonance coupling method, transverse temperature is transmitted into longitudinal direction, and we have already demonstrated the horizontal laser cooling experimentally. In the present paper, we will describe an approach to extend this result to three dimensional cooling. The vertical cooling requires that the horizontal oscillation couples with the vertical oscillation. For achieving horizontal-vertical coupling, the solenoid in electron beam cooling apparatus is utilized with an experiment ($\nu_x=2.07$, $\nu_y=1.07$). For various solenoidal magnetic fields from 0 to 100 Gauss, horizontal and vertical betatron tunes are measured by beam transfer function. For a certain region of the solenoidal magnetic field, these tunes are mixed up each other.

水平・鉛直方向の共鳴結合による三次元ビーム冷却

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] ではイオンビーム冷却の実験を行なっている。イオンビームの冷却法には電子冷却、確率冷却、レーザー冷却があり、中でもレーザー冷却は最も強い冷却力を持つと知られている。しかしレーザー冷却の原理上、直接冷却力が働くのはビーム進行方向に限られるため、横方向を冷却することが出来ない。より低温のビームを作り出すためには、進行方向のみならず横方向にも冷却力を働かせなければならない。この問題を解決するため、共鳴結合法 [2] が提案された。

共鳴結合法はレーザー冷却を用いて三次元結晶化ビームを実現するための手法である [3]。過去の研究において、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ことが可能であると理論的に示され、シミュレーションにより確認されている [4]。共鳴結合法では鉛直方向と水平方向の自由度を結合させるためにスキュー四重極磁石、またはソレノイド磁石を用いるが [5]、我々は S-LSR に設置されている電子冷却装置に内蔵されているソレノイド磁石を利用した。

三次元レーザー冷却の実現には次の二つの条件を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} \nu_s - \nu_x &= \text{integer} & (1) \\ \nu_x - \nu_y &= \text{integer} & (2), \end{aligned}$$

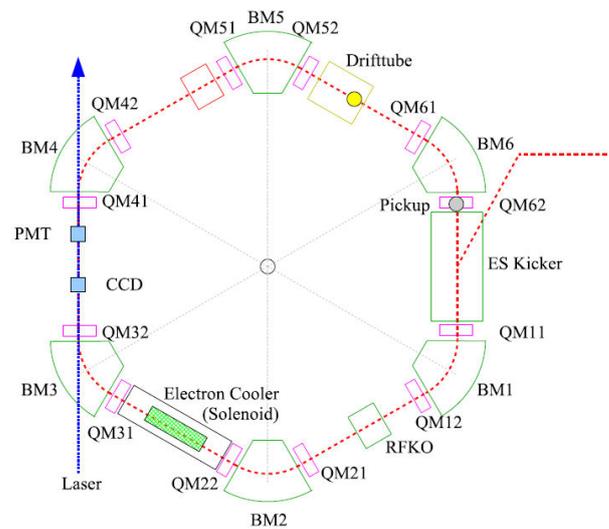


図 1 : S-LSR のレイアウト

ここで ν_x 、 ν_y はそれぞれ水平・鉛直方向のベータトロンチューン、 ν_s はシンクロトロンチューンを示している。我々は式(1)の共鳴を満たすことで水平方向の冷却を実験的に確認している。

本研究の目的は三次元結晶化ビームの実現であり、S-LSR はこの目的のために設立されたイオン蓄積・ビーム冷却リングであり、表 1 に S-LSR の主要パラメータを、図 1 にレイアウトを示す。ここでは、三次元結晶化ビームの実現に向けた共鳴結合法の研究について報告する。

[#] hiromasa@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

表 1: S-LSR 主要パラメータ

周長	22.557 m
平均半径	3.59 m
直線部の長さ	1.86 m
曲率半径	1.05 m
周回周波数	25.192 kHz
対称性	6
イオン種	$^{24}\text{Mg}^+$ 40 keV
励起波長	280 nm

2. レーザー冷却

2.1 S-LSR

S-LSR はビーム冷却の研究を目的として設立されたイオン蓄積リングであり、陽子ビーム冷却用の電子冷却装置と Mg^+ ビーム冷却用のレーザー冷却装置を内蔵する。結晶化ビームの実現にはリングパラメータが以下の二つの条件を満たしていなければならず、S-LSR はこれらの条件を満たすよう設計されている。

$$\gamma < \gamma_t$$

$$v_{x,y} < \frac{N_{SP}}{2\sqrt{2}},$$

ここで γ はローレンツ因子、 γ_t は遷移エネルギー、 N_{sp} はリングラティス対称性を示している。

レーザー冷却は特定の周波数のレーザーを照射しイオンを励起させるため、冷却可能なイオン種は限られている。S-LSR では $^{24}\text{Mg}^+$ を用いて実験を行っている。プラズマイオン源 CHORIDIS で生成された $^{24}\text{Mg}^+$ は 40 kV の高電圧で引き出され、蓄積リング内に設置されているレーザー冷却装置により冷却される。

レーザー冷却システムは固体レーザー(532nm)、リングダイレーザー(560nm)、倍波発生器(280nm)から構成されている。本研究では $^{24}\text{Mg}^+$ の励起波長 280nm 及び出力 100mW で冷却実験を行っている。冷却されたビームは PMT または高精度 CCD カメラにより光学測定される。

2.2 共鳴結合法

S-LSR ではベータトロンチューン $\nu_x = 2.07$ 、 $\nu_y = 1.07$ で、共鳴結合法を用いた三次元結晶化ビームの実現に向けた研究を行っている。ベータトロンチューンは図 1 における QM1(focus) と QM2(defocus)の電流値で、シンクロトロンチューンはドリフトチューブの RF 電圧で調節を行なう。

S-LSR では陽子ビーム冷却に使用された電子冷却装置に内蔵されるソレノイド磁石を利用してビーム横方向の水平・鉛直ベータトロンチューンの共鳴結合を試みた。ソレノイド磁場は 0 から MD シミュレーションにより最適と見積もられた最大値 100 ガウスまで変化させ [6]、水平・鉛直チューンの共鳴の様子を観測した。

3. 測定

3.1 ベータトロンチューン測定

共鳴結合におけるベータトロンチューンの変化を測定するために、電子冷却装置に内蔵されているソレノイドの電流を 0 から 40A まで変化させながらベータトロンチューンの測定を行なった。図 2 に電子冷却装置の内部構造を示す。

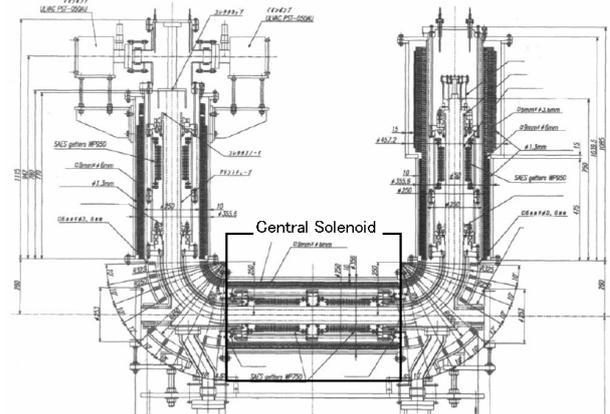


図 2: S-LSR の電子冷却装置

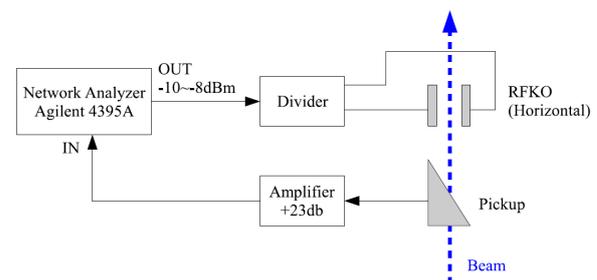


図 3: ビームトランスファーフンクシヨンの概念図

ベータトロンチューンはビームトランスファーフンクシヨンを測定して算出される。図 3 に測定の概念図を示す。測定のプロセスは以下の通りである。

- Network Analyzer の出力を RFKO に印加
 - ビームとの共鳴時の励起振動を Pickup で測定
 - Network Analyzer でサイドバンド周波数を測定
- QM の電流値を変化させたときに見られるサイドバンドの振舞いにより水平方向と鉛直方向のベータトロンチューンの区別を行なう。表 2 に測定の主要パラメータを示す。

表 2: ベータトロンチューン測定の主要パラメータ:

Betatron Tune	(2.07, 1.07)
Solenoid Current	0 - 40 A
QM1 Current	12.63 A
QM2 Current	23.25 A

3.2 水平励振における鉛直振動の測定

共鳴結合により水平方向の振動が鉛直方向に伝播していることを確認するために、RFKO を利用してビームの水平方向に励振をかけた上で鉛直方向の振動を測定する。測定は上下二枚の電極で構成されている BPM を用いて、鉛直方向の信号をスペクトルアナライザーで読み取る。表 3 に実験の主要パラメータを示す。

表 3 : 鉛直振動測定における主要パラメータ

RFKO Frequency	2.521158MHz
Solenoid Current	0, 16 A
QM1 Current	13.2 A
QM2 Current	23.6 A

4. 結果

三次元結晶化ビームの実現に向けて、我々は共鳴結合方を用いたレーザー冷却実験を行なった。水平・鉛直ベータトロンチューンの共鳴を確かめるためにソレノイド磁場を用いて行なった測定結果を図 4 に示す。赤、緑のドットはそれぞれ水平、鉛直ベータトロンチューンを示している。

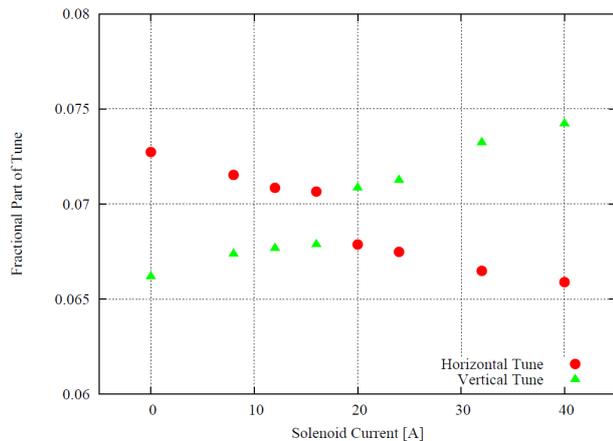


図 4 : 水平・鉛直ベータトロンチューンとソレノイド電流の依存性

水平・鉛直ベータトロンチューンはソレノイド電流と共に変化しており、電流値が 17-20A の領域で両者がミックスアップしていることが確認できる。これは水平・鉛直チューンの共鳴が起こっていることを表している。

図 5、6 はそれぞれソレノイド電流が 0、16A のときのビーム鉛直方向の振動を示しており、緑・赤ラインはそれぞれ RFKO が OFF・ON の状態の振幅を表している。ソレノイド電流が 16A で、RFKO が ON の振動では 2.52116 MHz にピークが見られる。一方、ソレノイド電流が 0A では RFKO が ON の状態であっても同様のピークは確認できない。RFKO による励振はビーム水平方向にのみ働くため、二つの電流における信号の違いは、ソレノイド磁場により水平振動が鉛直方向に伝播したことを示している。

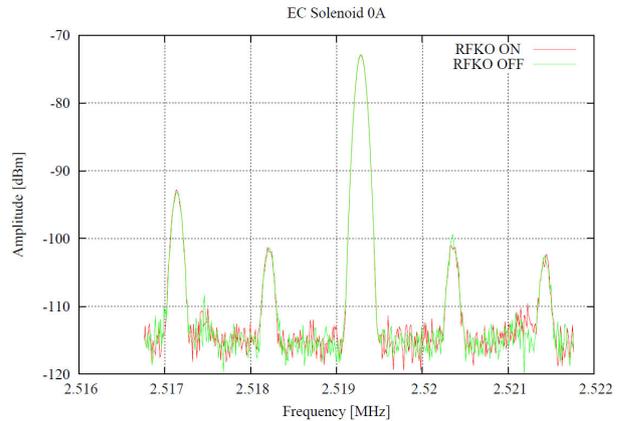


図 5 : 鉛直方向のバンチビーム信号 (ソレノイド電流: 0 A)

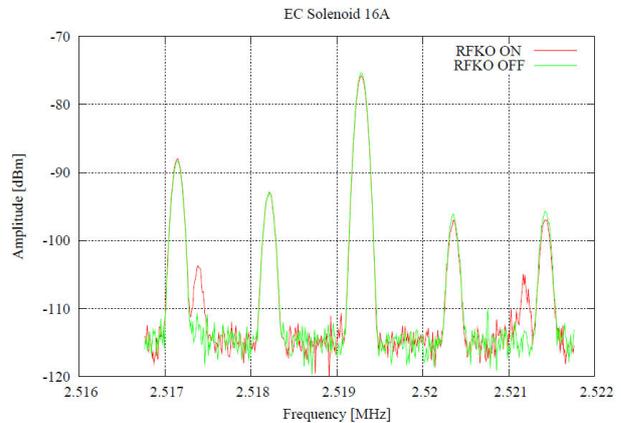


図 6 : 鉛直方向のバンチビーム信号 (ソレノイド電流: 16 A)

5. まとめ

本研究ではソレノイド磁場によるビーム水平方向と鉛直方向が共鳴結合していることを確認できた。今後はこのカップリングの最適化を行なうと共に、ビームプロファイルにより冷却に伴うビームの位相広がり減少の確認を行なっていく予定である。

参考文献

- [1] A. Noda, M. Ikegami and T. Shirai, "Approach to ordered structure of the beam at S-LSR", New J.Phys. 8, 288(2006).
- [2] Y. Yuri and H. Okamoto, "Generating Ultralow-Emitance Ion Beams in a Storage Ring", Phys. Rev. Lett. 10.1103(2004).
- [3] J. Wei, H. Okamoto and A. M. Sessler, Phys. Rev. Lett. 80 2606(1998).
- [4] T. Kihara, H. Okamoto, and Y. Iwashita, Phys. Rev. E. 59 3594(1999).
- [5] Y. Yuri, "Feasibility of beam crystallization in a cooler storage ring", Phys. Rev. STAB. (2005)
- [6] Y. Yuri and H. Okamoto, Phys. Rev. STAB 8, 114201(2005)