

EXAMINATION OF FREQUENCY SPECTRUM OF BUNCHED BEAM RELATED TO TRANSVERSE LASER COOLING

K. Jimbo^{#,A)}, H. Souda^{B)}, M. Nakao^{B)}, H. Tongu^{B)}, A. Noda^{B)}, He Zhengqi^{C)}

^{A)}IAE, Kyoto University, Uji-city, Kyoto, Japan

^{B)}ICR, Kyoto University, Uji-city, Kyoto, Japan

^{C)}Dept. of Engi. Phys., Tsinghua University, Beijing, China

Abstract

Frequency spectrums of a bunched beam under the synchro-betatron coupling were examined at an ion storage/cooler ring, S-LSR, Kyoto University. Prolongation of sideband amplitudes in the right side of the revolution frequency of harmonic number $h=99$ and in the left side of the revolution frequency of $h=101$ were observed adjacent to the RF frequency ($h=100$). We hope to utilize these kind of asymmetric phenomena to diagnose a bunched laser cooled beam.

S-LSR におけるバンチしたビームの 水平方向のレーザー冷却に関連した周波数スペクトルの考察

1. はじめに

レーザー冷却法によって、円形加速器及び、リング中のイオンビームの進行方向を直接冷却することが可能となった。Intra Beam Scattering 等を利用して、ビームの水平方向の冷却が試みられているが、あまり効率的ではない。そこでより効率的な、共鳴結合を利用したビームの水平方向の間接レーザー冷却法が提案された^[1]。周波数可変 $\sim 280\text{nm}$ のレーザー冷却設備を備えた京都大学化学研究所のイオン蓄積・冷却リングS-LSR^[2]では、 40keV の Mg^+ ビームを極低温まで冷却し、結晶化ビームを生成することを目指している。イオンビームは、 2.52MHz のRF波でバンチされており、これは周回周波数(25.192kHz)に対するハーモニック数 $h=100$ の高調波にあたる。我々はベータトロン振動とシンクロトロン振動の共鳴結合を利用した水平方向の冷却を既に確認している^[3]。ここでは水平方向の冷却に関連して、周波数スペクトラムに表れた対称及び非対称的な特徴について紹介する。

期を導き、MAD の計算値と一致したものを使用している。一方、 v_s の測定は、図2中の緑色の矢印のとおり行う。

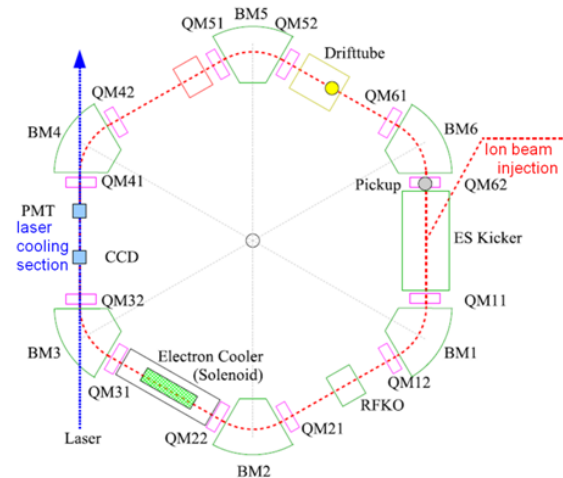


図 1 : S-LSR の配置図

2. ベータトロンチューン等の測定

S-LSR の配置図は図1、主要パラメータは表1に示す。水平方向のベータトロンチューン v_h 及び、シンクロトロンチューン v_s は、Beam Transfer Functionを測定して算出している。図2はブロック図を表す。 v_h の測定ではNetwork Analyzer (Agilent 4395A)からのキック(出力)をRFKO電極に与え、ビーム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でベータトロンのFractional tuneを計測している^[4]。Fractional tuneが水平・垂直のどちらのベータトロン振動を表すかはQM電流値を変化させた際の挙動で判断する。ベータトロンチューンの整数部は、補正なしのCODから変動周

表 1: S-LSR の主要パラメーター

Circumference	22.557 m
Average Radius	3.59 m
Length of straight section	1.86 m
Radius of curvature	1.05 m
Revolution frequency	25.192 kHz
Super periodicity	6
Ion species	$^{24}\text{Mg}^+$
Kinetic beam energy	40 keV
Transition wavelength	280 nm

[#]jimbo@iae.kyoto-u.ac.jp

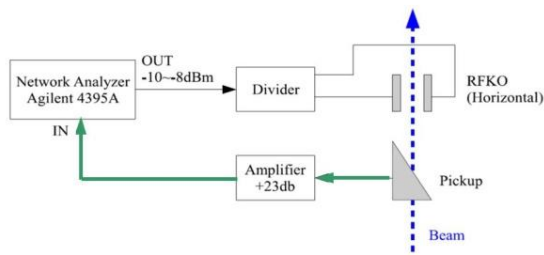


図2:ベータトロンチューン ν_β 、及びシンクロトロンチューン ν_s 測定のためのブロック図。

3. 実験結果

Network Analyzer で観察された、ピックアップ電極から得られた、周回周波数の高調波でハーモニック数 $h=9$ の場合の周波数スペクトラム例を図3及び、図4に示す。図3ではRFKOによるキックが与えられているので、ベータトロン振動 ν_h が明らかに観察されているが、図4ではキックが与えられていないので、ベータトロン振動はよく見えていない。どちらの図とも、シンクロトロン振動 ν_s は $h=9$ の周回周波数の高調波の両側によく見えている。チューンの測定は、通常ノイズレベルが最も低い $h=9$ で行った。

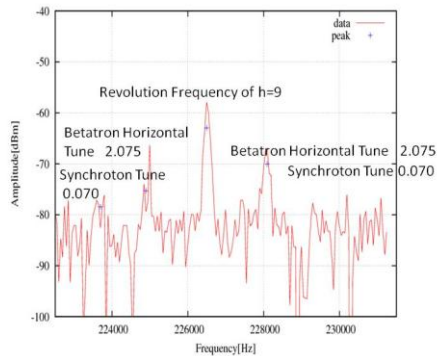


図3:キックが与えられた時のハーモニック数 $h=9$ の場合の周波数スペクトラム。周回周波数の両側にシンクロトロン振動とベータトロン振動が見えている。

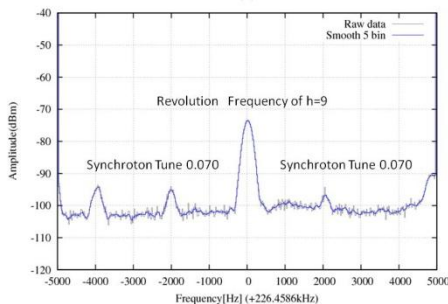


図4:キックなしの時のハーモニック数 $h=9$ の場合の周波数スペクトラム。明らかなのは周回周波数の両側に見えるシンクロトロン振動だけである。

一般にシンクロトロン振動は周回周波数の全ての高調波の両側によく見えている。図5-a及び、図5-bは水平方向のベータトロン振動とシンクロトロン振動が共鳴結合されている時 ($\nu_s=0.066$, $\nu_h=2.066$) の、即ち共鳴条件が満たされている時の周波数スペクトラムである。図5-aはビームがレーザー冷却されていない場合で、図5-bはレーザー冷却されている場合である。各左からハーモニック数 $h=98, 99, 100, 101, 102$ の場合の周回周波数の高調波と各々に付随する Sidebands を表す。 $h=98, 99, 101, 102$ では、両側にシンクロトロン振動の Sidebands を伴っているが、 $h=100$ (中心)では、RF周波数 2.52MHz とシンクロトロン振動とは関係ない Sidebands のみが見える。

高調波 $h=99$ の右側(緑で囲まれている部分)では(シンクロトロン振動の) Sideband の振幅が増幅されているのが認められる。同様に高調波 $h=101$ の左側の Sideband の振幅(青で囲まれている部分)も増幅されている。これら Sideband の振幅の増幅は、共鳴条件が満たされている時、高調波 $h=99$ と $h=101$ においてのみ認められた。

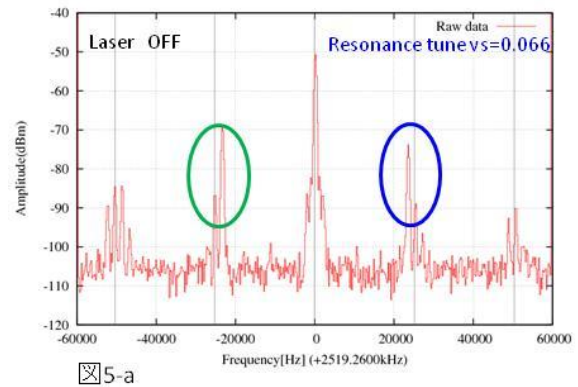


図5-a

$h=98$ $h=99$ $h=100$ $h=101$ $h=102$
 楕円で囲まれた $h=99$ と $h=101$ において、
 Sidebandの一方の振幅が顕著に増大している。

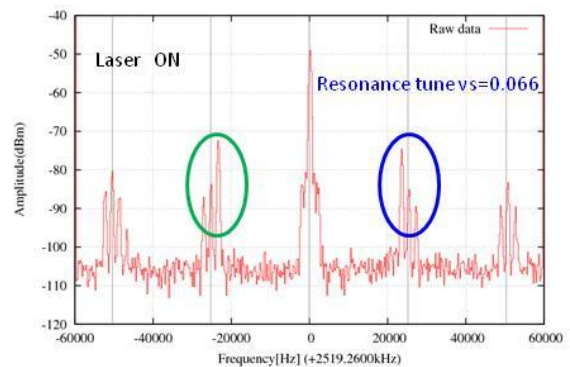


図5-b

図6-aは、図5-aの緑で囲まれている部分を拡大したもので、赤の矢印で示された周回周波数の高調波 $h=99$ と両側にあるシンクロトロン振動の Sidebands を示している。同様に図6-bは、図5-aの青で囲まれている部分を拡大したもので、赤の矢印で示された高調波 $h=101$ と両側にあるシンクロトロン振動の Sidebands を示している。図6-a, b共に

レーザー冷却されていない場合であるが、図 5-a と図 5-b を比べると明らかのように、ビームがレーザー冷却されているか否かでは、周波数スペクトラムに大きな違いは認められなかった。

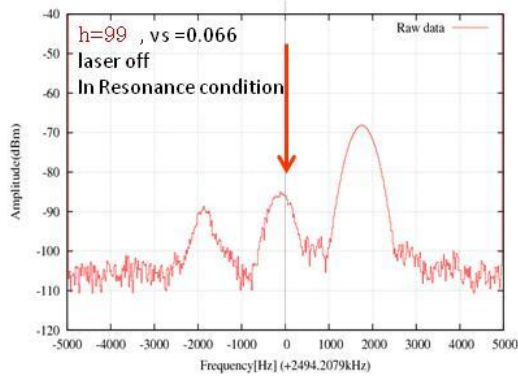


図6-a: 赤矢印は周回周波数の $h=99$ 高調波。両側のシンクロトロン振動のSidebandsのうち右側の振幅が顕著に増大している。

赤い矢印は周回周波数を表す。

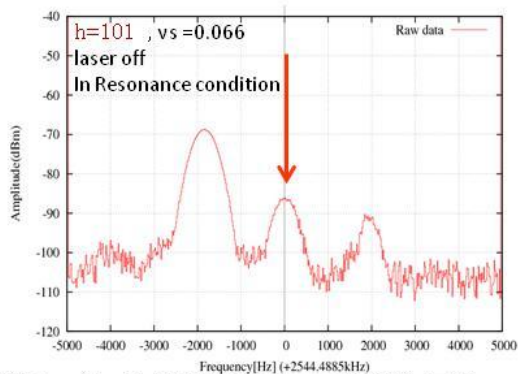


図6-b: 赤矢印は周回周波数の $h=101$ 高調波。両側のシンクロトロン振動のSidebandsのうち左側の振幅が顕著に増大している。

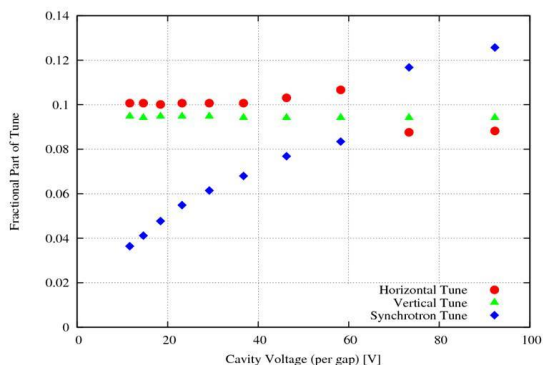


図7: 水平方向のベータトロン振動とシンクロトロン振動の共鳴結合が共鳴点付近 ($v_x=2.10$, $v_y=1.10$, $v_s=0.10$) で達成されている。

4. 結論

水平方向のベータトロン振動とシンクロトロン振動の共鳴条件が満たされている時、共鳴結合が共鳴

点付近で達成されていることは、図7で示すようにすでに報告した^[5]。我々は共鳴点でビームの水平方向から進行方向にエネルギーが移動してビームの水平方向の自由度が冷却されているならば何らかの形で現象として表れると考える。

光学的にビームの水平方向の温度を測ればよいのだが、水平方向の冷却は、ビームの粒子数が少ないほど効率が良くなる。しかしこれは、光学的に測定できる分解能と背反条件となる。現在、我々は粒子数 $\sim 10^7$ 個で実験を行っており、光学的測定の限界に達している。そこで非光学的測定方法を模索して、周波数スペクトルの利用を考えた。

水平方向のベータトロン振動とシンクロトロン振動が共鳴結合されている時、RFでバンチされた Mg^+ (マグネシウムイオン)ビームをレーザー冷却した時の周波数スペクトラムにおいて、 $h=99$ の両側のSidebandsのうち右側、そして $h=101$ の両側のSidebandsのうち左側の振幅がそれぞれ顕著に増大することが認められた。この現象は $h=99$ 及び、 $h=101$ のSidebandを個々に比較してみると非対称ではあるが、RF周波数($h=100$)を中心として眺めると対称である。つまりRF周波数($h=100$)の両側で、対称及び非対称的な特徴が認められた。

ビームがレーザー冷却されているか否かでは、周波数スペクトラムに際立った違いはなかった。しかし、水平方向の温度は常に進行方向の温度より高いと考えられるので、共鳴条件が満たされている時、水平方向から進行方向へ常にエネルギーが移動する。我々は、シンクロトロン振動の振幅の増大は、共鳴条件が満たされている時、進行方向から水平方向へのエネルギーの移動、即ちビームの水平方向が冷却されていることを間接的に示しており、周波数スペクトラムをビーム診断に利用することが可能と考える。

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」の援助を得て行われました。

参考文献

- [1] H. Okamoto et al., Phys. Rev. Lett 72, 3977 (1994)
- [2] A. Noda, Nucl. Instr. and Meth. A532, 150 (2004).
- [3] Nakao et al., Proceedings of IPAC10, Kyoto, 2010, MOPD072 .
- [4] H. Souda et al., Proceedings of IPAC10, Kyoto, 2010, MOPD073.
- 想田光 他、「Present Status of Ion Accumulation and Cooler Ring, S-LSR」、本学会概要 MOPS008(2011)
- [5] K. Jimbo, T. Hiromasa, M. Nakao, A.Noda, H. Souda, H.Tongu, Proceedings of IPAC11, New York, 2011, MOP146 .