

# S-LSRにおける水平方向のレーザー冷却に関連したシンクロトロン振動 Synchrotron Oscillation relevant to Transverse Laser Cooling in S-LSR

神保光一<sup>#,A)</sup>, 想田光<sup>B)</sup>, 中尾政夫<sup>C)</sup>, 百合庸介<sup>D)</sup>, 頓宮拓<sup>E)</sup>, 野田章<sup>C)</sup>  
 K. Jimbo<sup>#,A)</sup>, H. Souda<sup>B)</sup>, M. Nakao<sup>C)</sup>, Y. Yuri<sup>D)</sup>, H. Tongu<sup>E)</sup>, A. Noda<sup>C)</sup>  
<sup>A)</sup>IAE, Kyoto University, Uji-city, Kyoto, Japan  
<sup>B)</sup>GHMC, Maebashi-city, Gunma, Japan  
<sup>C)</sup>NIRS, Chiba-city, Chiba, Japan  
<sup>D)</sup>TARRI, JAEA, Takasaki-city, Gunma, Japan  
<sup>E)</sup>ICR, Kyoto University, Uji-city, Kyoto, Japan

## Abstract

A bunched 40 keV Mg<sup>+</sup> beam at an ion storage/cooler ring, S-LSR, Kyoto University, was cooled transversely through synchro-betastron coupling by a co-propagating laser. Optical methods were widely used to diagnose the transversely cooled ion beams. As less ions are in the beam of lower temperature, however, it is more difficult to observe such a beam optically. We investigated peaks of the synchrotron oscillation spectroscopically so that we could observe it stably and applied it to the beam diagnostics. If the beam temperature is decreased drastically, the synchrotron oscillation will be ceased when an ion beam is in space charge limited region. We discuss space charge limited region with the synchrotron oscillation.

## 1. はじめに

周波数可変~280nm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において、マグネシウム(Mg<sup>+</sup>)イオンビームの進行方向のシンクロトロン振動と、ビームと水平方向のベータトロン振動が共鳴結合されている時<sup>[1]</sup>、ビームと並走したレーザー光により、RFでバンチされたイオンビームの水平方向の冷却が既に実現された<sup>[2]</sup>。我々はビームスクレーピングによるビーム強度の低減により、イントラビーム散乱を抑制することにより、間接的横方向レーザー冷却の効率の改善を推し進めてきた。しかし、現在イオン粒子数10<sup>4</sup>個オーダーで実験を行っており、光学的測定の限界に既に達している。この過程で非光学的測定方法の一環として以下に述べるスペクトル解析を実施した。

S-LSRの配置図はFig.1に、主要パラメータは表1に示す。

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	<sup>24</sup> Mg <sup>+</sup>
Kinetic beam energy	40 keV
Transition wavelength	280 nm

<sup>#</sup>jimbo@iae.kyoto-u.ac.jp

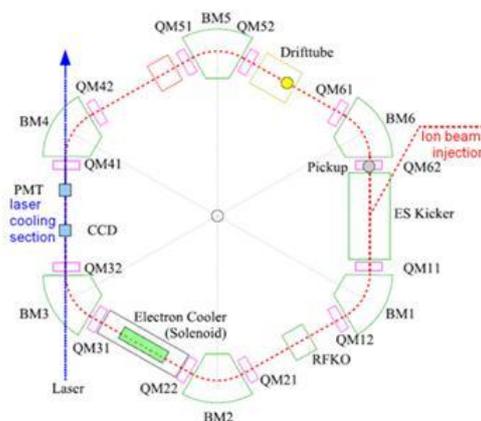


Fig.1: S-LSR の配置図

イオンビームは、RF frequency 2.5192MHz でバンチされており、これは周回周波数(25.192 kHz)に対してハーモニック数 h=100 の高調波にあたる。従って、リング中のイオンビームの Bunch 数は100である。

## 2. 実験結果

ここでは、RF frequency 2.5192MHz (以後赤矢印で示し、2.5MHz と略す) 付近の周波数スペクトラムに表れた特徴について述べる。これらのスペクトラムは平行平板ピックアップのプリアンプ出力をスペクトラムアナライザで観測したものである<sup>[3]</sup>。

Fig.2 はシンクロ・ベータトロン結合下 (Resonance tune  $\nu_s=0.066$ ,  $\nu_h=2.066$ ) における、即ちシンクロ・ベータトロン(差)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。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 Sideband を表している。 $h=98, 99, 101, 102$  では、両側にシンクロトロン振動の Sideband を伴っている。シンクロトロン振動は、中央 ( $h=100$ ) の部分を除き、周回周波数の全ての高調波の両側によく見えている。

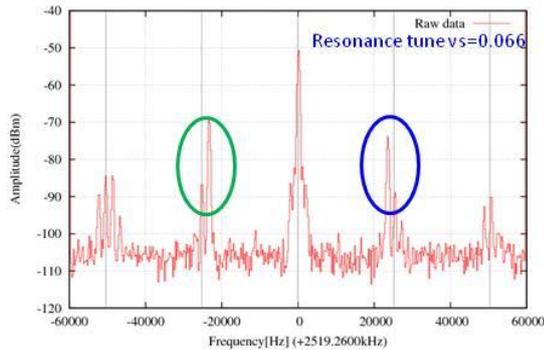


Fig.2  $h=98$   $h=99$   $h=100$   $h=101$   $h=102$   
 シンクロ・ベータトロン(差) 共鳴 条件が満たされている時の、  
 周波数スペクトラム。  
 楕円で囲まれた周回周波数  $h=99$ (緑) &  $h=101$ (青)の高  
 調波においてSidebandの一方  $\uparrow$  の  
 振幅が顕著に増大している。  
 2.5MHz RF frequency

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、時間的にきわめて不安定で、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。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。

緑で囲まれている部分と青で囲まれている部分の間、即ち中央( $h=100$ )付近では、RF 周波数 2.5MHz とその両側に通常のシンクロトロン振動とは異なる Coherent dipole synchrotron oscillation と呼ばれる複数のピークが見える。Fig.3はこの中央部分を拡大したものである。

さて、中央付近においてもシンクロトロン振動の Sideband を見るために、以下の点を改善した。

- 1) レーザ、とイオンビームの アライメント
- 2) Adiabatic capture の効率
- 3) より小さいレーザーの Detuning

Fig.4 は、分解能を上げて測定した、中央 2.5MHz ( $h=100$ )付近の周波数スペクトラムである。シンクロトロン振動の Sideband のピークの位置は、RF 電圧を変化するに従って (a)  $\pm 1450\text{Hz}$ 、(b)  $\pm 1800\text{Hz}$ 、(c)  $\pm 2500\text{Hz}$ 、と外側に広がっている(青矢印)。即ちシンクロトロン振動のピークの位置も変化しているので、シンクロトロン振動の Sideband であると明らか

かに確認できた。これらのシンクロトロン振動のピークは安定して観察することができた。ここで(b)  $\pm 1800\text{Hz}$  のときのみ結合条件が満たされている。ビームがレーザー冷却されているか否かでは大きな違いは認められなかった。

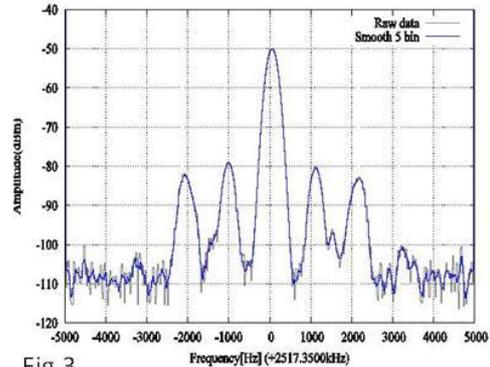


Fig.3  
 中央付近を拡大した周波数 ↑ スペクトラム。RF周波数  
 2.5MHzとその両側に通常の シンクロトロン振動とは  
 異なる Coherent dipole synchrotron oscillation と呼ば  
 れる複数の低いピークが見える。2.5MHz RF frequency

### 3. 考察

周回周波数のスペクトラムのシンクロトロン sideband のピークは、RF frequency 2.5MHz ( $h=100$ ) 付近では安定して観察することができた。ここではバンチが RF wave のポテンシャルにしっかり捉えられているためだと推察される。

一方、 $h=99$  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不安定に増大することが認められた。 $h = 99$ 、 $h = 101$  では周回周波数のスペクトラムのピークには、実際にはバンチのイオンを閉じ込めている RF wave のポテンシャルは存在していないので、観察されたシンクロトロン sideband 振幅の不安定な増大は、そのために引き起こされたと考える。共鳴結合との関連はよく分からないが、ビームの進行方向と水平方向が関連しているので、何らかの形で不安定に寄与しているのであろう。

従ってシンクロトロン振動を観察するには、安定した振動のピークが得られる 2.5 MHz 付近が最適と考えられる。

### 4. Synchrotron 振動と Space charge limit

一般にバンチに閉じ込められたイオンは、Bucket の中心付近で Synchrotron tune は最大で、外側に行くにつれて周期は遅くなり Separatrix 軌道上でゼロとなる<sup>[4]</sup>。つまりシンクロトロン振動は、周波数の広がりを持っている。

Fig.3 における Coherent dipole synchrotron oscillation は、進行方向の dipole oscillation によって

引き起こされ、RF 周波数が正確に周回周波数の整数倍でない時に現れる<sup>[5]</sup>。縦軸の単位は dBm であるので、低いピークは、中央の RF 周波数のピークよりも十分に低く、RF 周波数を多少変化させてもこれ以上低くはならなかった。

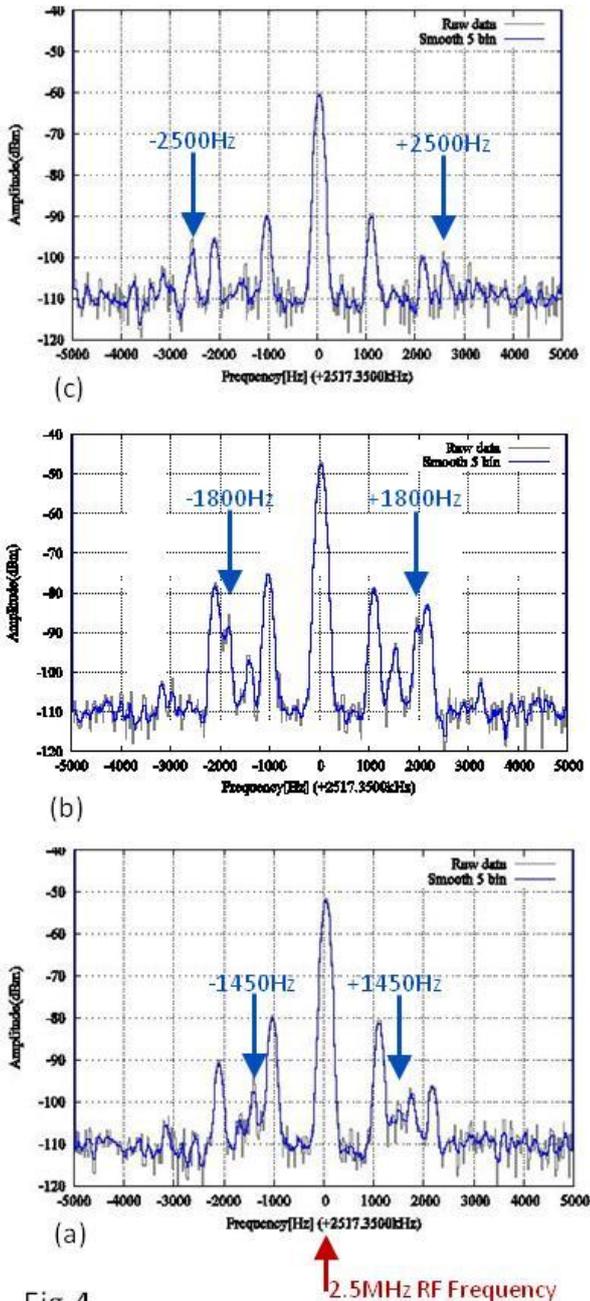


Fig.4

改善後、分解能を上げて測定した、中央2.5MHz付近の周波数スペクトラム。横軸が実際のスペクトラムと少しずれているので、青矢印でシンクロトロン周波数を示した。

M.Grieser 氏は Space charge limit 状態では、(通常の)シンクロトロン運動は存在しないので シンクロトロン振動のピークが見えないだろうと指摘した。

また、シュミレーションでも、ビームが冷却されて space charge limit 状態になると、バンチされたビームでは、冷却によりシンクロトロン振動がほぼダンパされた状態となるとの結果を得ている<sup>[6]</sup>。一方、レーザー (1 方向のみ) による加速効果によって、バンチの重心が前方に偏ることに起因するコヒーレントな振動が新たに生じる可能性がある。もしそのような振動が観察された場合。両方向にレーザーを配置する必要が生じるかも知れない。

我々はビームスクレーピングによる強度の低減により間接的横方向レーザー冷却の効率を高め、従来にないレーザー冷却による横方向低温ビームを実現した<sup>[7]</sup>。この状態でのビーム進行方向位相空間におけるビームの状況の観測手法としてここに述べたスペクトル解析の手法を活用できないかと考えている。

現在 S-LSR においてかなり低温のイオンビームが実現している。これまでのところ、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ルに大きな違いは認められていない。しかし、安定してシンクロトロン振動を観察できることは確認できた。今後 Space charge limit 状態に到達させ、それをどう確認するかは一つの課題である。従ってシンクロトロン振動のピークを観察していれば、そのピークが見えなくなった時、Space charge limit 状態の達成を確認できるのではないかと考えている。つまり周波数スペクトルはイオンビーム診断に利用できるのである。

## 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] M. Nakao et al., Physical Review Special Topics - Accelerator and Beams **15**, 110102 (2012)
- [3] 神保光一 他、「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」、本学会概要 WEPS027(2012)
- [4] S.Y.Lee, Accelator Physics (World Scientific, New Jersey 2004) 2nd ed. p260
- [5] M.Grieser (Max-Planck-Institute für Kernphysik, Heidelberg), private communication.
- [6] Y. Yuri et al., Proc. International Workshop on Beam Cooling and Related Topics COOL'13, Murren, Switzerland, 2013, THAMHA03
- [7] H. Souda et al., Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 030202.