

新博士紹介

氏名	守屋 克洋* (日本原子力研究開発機構)
論文提出大学	広島大学
学位種類	博士 (理学)
取得年月日	2017年3月23日
題目	Experimental Study of Low-Order Resonant Beam Instabilities in Circular Accelerators Using a Linear Paul Trap

1. はじめに

今日の加速器ビームは様々な分野に利用され、その利用分野の拡大に伴い大強度ビームの需要が高まっている。J-PARC や世界の次世代加速器計画では、空間電荷効果と呼ばれるクーロン場を介して個々の粒子が強く結合した、高密度ハドロン加速器が運転・検討されている。このとき粒子の運動は独立ではなく集団的に振る舞い、極めて複雑である。理論解析の場合、粒子の位相空間分布関数の時間発展はブラソフ方程式で記述できるが、自己充足的に解くことは難しい。数値計算の場合、粒子間相互作用を正確に計算するには膨大な時間を要し、計算時間と計算精度には相反関係がある。加速器実験の場合、ビーム基礎パラメータの制御が難しいため、多くの制限がある。

これらの困難を克服するために、広島大学ビーム物理研究室では小型線形ポルトラップ (LPT) を用いた新しい実験装置 S-POD (Simulator of Particle Orbit Dynamics の略) の開発を進めてきた。本研究では高密度ビームの集団的性質を調べるために、大型加速器の代わりにこの小型装置を用いる。なお、昨年の新博士紹介に掲載された福島慧氏¹⁾ が数値計算、私が S-POD 実験を担当する形で研究を進めてきた。

2. 理論的背景

LPT 中に捕捉された粒子のハミルトニアンは

$$H = \frac{1}{2}(p_x^2 + p_y^2) + \frac{1}{2}K(\tau)(x^2 - y^2) + \frac{q\phi}{mc^2}$$

と記述できる。ここで、 q と m は LPT に捕捉された粒子の電荷と質量、 c は光速、 x (y) は粒子の横方向位置、 p_x (p_y) は基準運動量で規格化された共役運動量、 K は LPT に印加された電圧波形に比例する収束関数、 ϕ は自己クーロン場、 τ ($=ct$) は独立変数を表す。 H は第 3 項の空間電荷効果を含め、強収束系を通過するビームのハミルトニアンと相似である。これは、LPT を用いて加速器中のビーム力学研究が可能であることを意味する[†]。

空間電荷効果を伴うビームの共鳴条件は、外場由来と空間電荷効果由来の 2 つあり、それぞれ

$$\nu_0 - C_m \Delta\nu \approx \begin{cases} nN_{sp}/m & (\text{外場駆動由来}) \\ nN_{sp}/2m & (\text{空間電荷効果由来}) \end{cases}$$

と書ける²⁾。ここで、 ν_0 はベアチューン、 $\Delta\nu$ は rms チューンシフト、 m は共鳴次数、 C_m は共鳴次数依存の定数、 N_{sp} は加速器リングの超周期、 n は自然数を表す。

3. S-POD 実験

S-POD 実験には多くの利点がある。加速器実機に比べ、S-POD は小型で安価な装置である。また、LPT 中に捕捉されたプラズマは実験室系で静止しているため、共鳴により全粒子を損失させても機器の放射化を心配する必要はない。LPT は四重極電極に交流電圧を印加することで、RFQ のようにプラズマを横方向に閉じ込める。電圧波形は収束ラティスに相当し、S-POD では任意のラティス構造を再現することが原理的に可能であり、また、閉じ込め電圧振幅を変えることでチューンを自由に選択できる。

3.1 実験装置

S-POD は小型 LPT、イオン閉じ込め波形印加電源、チューン計測用オシロスコープ等から構成される。S-POD 実験に使用する LPT を図 1 に

* 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター JAEA/J-PARC (E-mail: kmoriya@post.j-parc.jp)

† LPT では電場を用いるため、Dispersion が生じない等の制約がある。

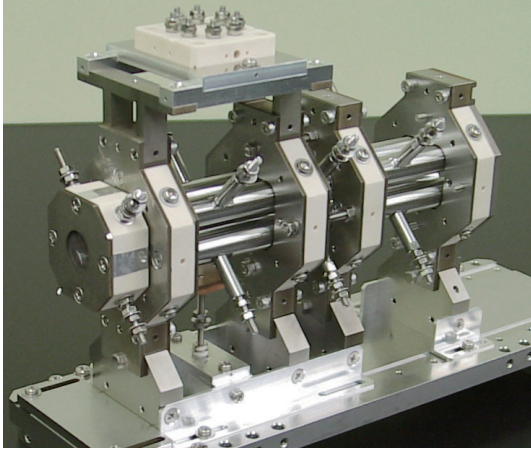


図1 小型線形ポールトラップ (全長約 200 mm)

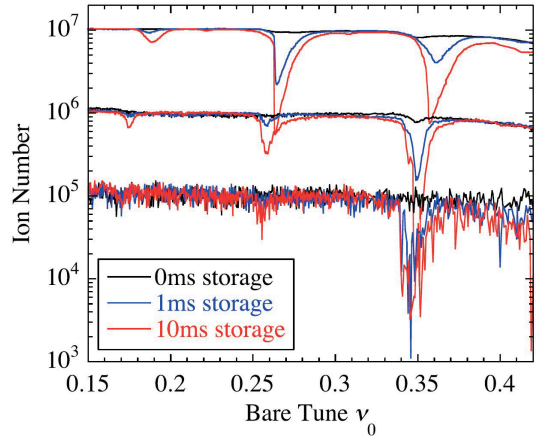


図2 S-POD で取得したストップバンド

示す. 本研究では LPT の四重極電極に 1 MHz 正弦波電圧を印加することで Ar^+ を横方向に閉じ込めて実験を行う. また, S-POD は分割型 LPT により構成されており, 閉じ込め領域に隣接する LPT の電極に直流電圧を重畳することで縦方向に井戸型ポテンシャルを形成し, プラズマを 3 次元的に捕捉する. 横方向の閉じ込め波形をオシロスコープで常にモニタしており, この閉じ込め波形等から横方向のチューンを算出する. また, 所定の時間プラズマを閉じ込めることで加速器ビームの蓄積を再現する. 閉じ込めイオン数の変化を Faraday Cup, 分布の変化を蛍光面で観測することで, 高密度ビームの集団的性質を調べる. なお, 本研究では $\nu_x = \nu_y (\equiv \nu_0)$ で実験を行った.

3.2 ビーム蓄積実験

典型的な実験結果を図2に示す. 1 MHz ($=1 \mu\text{s}$ 周期) 閉じ込め実験の場合, 1 ms 閉じ込めはビームが FODO ラティスセルを 1,000 個通過することに相当する. 横軸は 1 セルあたりの Bare tune ν_0 , 縦軸は蓄積イオン数, 色の違いは蓄積時間の違いを示す.

蓄積イオン数 10^5 個の場合, 左から順に, $\nu_0 \approx 1/6, 1/4, 1/3$ で粒子損失が確認できる. 蓄積イオン数 10^5 個では空間電荷効果がほとんど効かないため, これらの粒子損失は LPT の電極構造や据え付け誤差から生じる外場駆動由来の共鳴で説明でき, それぞれ 6 次 ($m=6$), 4 次 ($m=4$), 3 次 ($m=3$) の共鳴である.

S-POD 実験では蓄積イオン数を増やすことで, 空間電荷効果が強く働くビームを再現できる. 蓄積イオン数 10^7 個まで増やすと, 共鳴位置が右側

にシフトする. これは空間電荷効果によるチューンシフトである. また, $\nu_0 \approx 1/4$ で最も多い粒子損失が確認できる. これは空間電荷効果由来の共鳴で, 主に 2 次 ($m=2$) の共鳴である. 同様に $\nu_0 \approx 1/6, 1/3$ の共鳴は, 主に 3 次 ($m=3$) の共鳴で説明できる. これらの結果は数値計算結果とよく一致しており, 次世代大強度加速器を実現するには, 空間電荷効果由来の共鳴, つまり既存の外場駆動由来の共鳴条件の半整数倍毎に出現する共鳴を考慮する必要がある.

これまでに共鳴横断^{3,4)}や, 次世代大強度ビームに見られる空間電荷効果由来の 1 次 ($m=1$) の半整数共鳴について S-POD 実験と数値計算で確認し, その抑制方法を調べた⁵⁾.

4. 今後の抱負

現在, 私が所属する日本原子力研究開発機構 J-PARC では更なる安定化・大強度化に向けた研究が行われている. 私は空間電荷効果が強く働く Linac のコミッショニング・モニタグループに所属しており, これまで基礎研究で得た知識を加速器実機に応用する絶好の機会だと考えている.

参考文献

- 1) 福島慧, 加速器 **13**, 115 (2016).
- 2) H. Okamoto and K. Yokoya, Nucl. Instrum. Meth. A **482**, 51 (2002).
- 3) H. Takeuchi *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 074201 (2012).
- 4) K. Moriya *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **18**, 034001 (2015).
- 5) K. Moriya *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 114201 (2016).