

新博士紹介

氏名 杉本 寛 (KEK)
 論文提出大学 広島大学
 学位種類 博士 (理学)
 取得年月日 2011年3月23日
 題目 高密度クーロン多体系の生成と安定性
 に関する多粒子シミュレーション研究

1. はじめに

加速器ビームの位相空間密度の極大化 (エミッタンスの極小化) は, ERL, ILC, J-PARC, KEKB などの最先端プロジェクトで加速器の性能を決定する最も重要なテーマの一つである. 高密度領域において, ビームは単粒子の集合ではなく荷電粒子多体系として振る舞う. 集団共鳴不安定性, ビームハロー生成, イントラビーム散乱などはその典型的な例である. これらの現象はエミッタンス増加, ビームロス, 加速器の放射化といった問題を招き, ビームの高密度化を妨げる. 故に, 質の高いビームをユーザーに安定に供給するためには, これらの物理現象に対する高度な識見が必要となる.

博士論文では, 蓄積リング中の高密度ビーム, 広くは高密度の古典クーロン多体系の生成方法と安定性に関連した複数のテーマに対して, 主に数値計算を用いて研究を行った. 本稿ではその中から, 大学院時代の所属研究室で行われた, 高密度ビームの集団共鳴不安定性実験とその数値解析の結果^{1,2)}を紹介する. 最後に, 新博士紹介ということで, 著者の近況と抱負について簡潔に述べたい.

2. ビーム物理とプラズマトラップ

広島大学ビーム物理研究室では非中性プラズマトラップを応用した極めて独創的な研究を展開している¹⁻⁵⁾. このアプローチは, トラップ中の荷電粒子群はビーム静止系のビームと物理的に等価である, という物理的事実に基づく³⁾. 本研究はプラズマトラップの一種である線形ポルトラップ (以下 LPT) に捕捉した Ar^+ イオンに対して行われた. 図 1 に LPT の模式図を示す. LPT は四本の円柱電極及び両側の板状電極からなる. これらの電極に適切に電圧を印加することで電極に囲まれた領域に荷電粒子群を捕捉する. 具体的には, 両端の板状電極に静電位を与えることで, 荷電粒子のトラップ縦 (z -) 方向の閉じ込めを行う. こ

れに直交する横 (x -, y -) 方向に関しては, 円柱電極に適切な位相で高周波電圧を印加し, 時間的に変動する四重極場で閉じ込めを行う.

簡単のため, 捕捉プラズマが z -方向に一様に分布すると仮定し, さらに粒子間のクーロン散乱 (イントラビーム散乱) の効果を無視する. このときプラズマの古典的運動, すなわち, 一体の分布関数 f の時間発展はブラソフーポアソン方程式系により完全に予言できる:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial \tau} + [f, H] = 0 \\ H = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2} + \frac{1}{2} K_x(\tau) x^2 + \frac{1}{2} K_y(\tau) y^2 + \frac{q}{mc^2} \phi(x, y; \tau) \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi = -\frac{q}{\epsilon_0} \int f(x, y, p_x, p_y; \tau) dp_x dp_y \end{cases} \quad (1)$$

ここで, $[,]$ はポアソン括弧, q と m はそれぞれ捕捉粒子の電荷と質量, c は真空中の光速, ϵ_0 は真空の誘電率である. また, 独立変数を時間 t から $\tau = ct$ へ変換してある. 式 (1) は線形ビーム輸送系を飛行する連続ビームの支配方程式と本質的に同じ構造をもつ. この事実からビーム物理の基礎実験に LPT を利用できることが分かる.

ビームの研究に加速器ではなく, 敢えて LPT を使うのには当然理由がある. まず, LPT は非常にコンパクトで安価である. 加えて, 加速器に比べてランニングコストも格安なので, 省エネな実験システムを構築できる. さらに基本パラメータを広範囲に渡って制御できるため, 系統的調査も容易に行うことが可能である. 例えば, 所謂チューンサーベイは単に高周波電圧の振幅を制御することで行える. また, 高周波の波形を変えることで, 原理的には任意のラティス関数 $K_{x(y)}$ をもつビーム輸送系を模擬できる. このような研究は実際の加速器では実質的に不可能であり, LPT

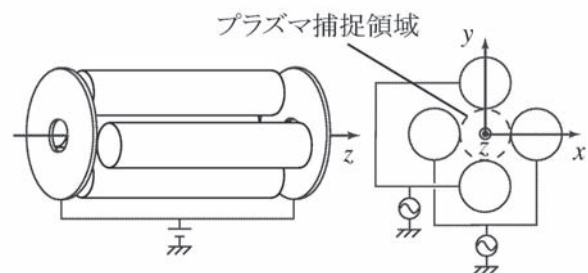


図 1 線形ポルトラップ (LPT) の模式図

でのみ可能である。

3. 集団共鳴不安定性の実験と数値計算

クーロン相互作用を媒介にしたビーム全体としての運動は、単粒子の運動と同様に、その振動数が特定の条件を満たしたときに不安定化する。高密度ビームの集団不安定性の理論では、ビームの集団振動を無限個のモードの重ね合せと考え、個々のモードに対してその安定性を解析する。式 (1) に対する一次元の摂動計算によれば、ビームの m 次のモードの共鳴条件は次式で与えられる⁶⁾：

$$m(\nu_0 - C_m \Delta\nu) \approx N_{sp} \cdot n/2 \quad n=1,2,3,\dots \quad (2)$$

ここで ν_0 はベアチューン、 C_m はモード m に依存する 1 より小さい正定数、 $\Delta\nu$ はインコヒーレントチューンシフト、 N_{sp} は想定するラティスの超周期数である。

図 2 は LPT 実験で実際に観測された高密度ビームのストップバンドの分布である。横軸はベアチューン ν_0 、縦軸はプラズマ生成後、加速器のラティスで 1000 FODO に相当する時間の後にファラデーカップ (FC) で測定された Ar^+ イオンの粒子数である。この実験では 12 FODO で構成される超周期数 N_{sp} が 12 と 3 のラティスを想定している。 $N_{sp} = 3$ の超周期構造を模擬するために、 $N_{sp} = 12$ となる基本高周波の 4 倍の波長をもつ微小振幅の高周波が重畳してある。所々に見られる測定粒子数の落ち込みが、何らかの不安定性の存在を示している。さらに $N_{sp} = 3$ のラティスでは $\nu_0 \approx 0.8$ と $\nu_0 \approx 1.6$ 付近に $N_{sp} = 12$ のラティスには見られなかったストップバンドが発現している。共鳴条件式から、このバンドは 2 次 ($m = 2$) の共鳴不安定性によるものだと考えられる。

LPT 実験で得られたデータの解析を複数の数値計算コードを用いて行った。一例として、多粒子シミュレーションにより得た LPT 中の Ar^+ プラズマの不安定領域を図 3 に示す。この計算では米国のローレンスバークレー国立研究所で開発されている計算コード WARP⁷⁾ を利用している。図 3 の横軸はベアチューン ν_0 、縦軸は 100FODO 後の二乗平均エミッタンスのその初期値に対する比であり、単純には不安定性の強さに対応する。図 3 の $\nu_0 \approx 3.2$ に見られる不安定性はエンベロップ不安定性として広く知られる 2 次 ($m = 2$) の非常に強い共鳴不安定性で、図 2 の実験データにも確認できる。超周期数 N_{sp} が 12 の場合、 $\nu_0 \approx 3.2$ 以下に大きな不安定性は見られないが、実験と同様に

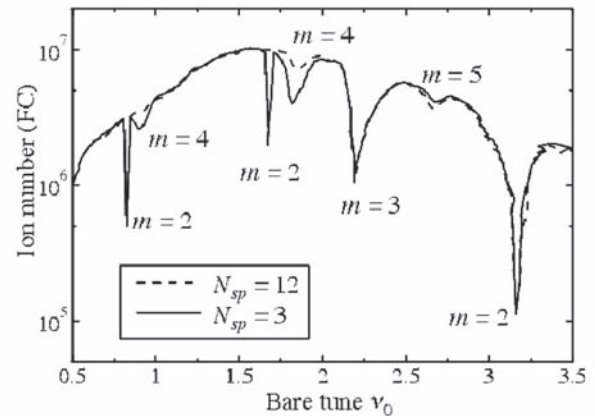


図 2 測定粒子数のチューン依存性 (実験)

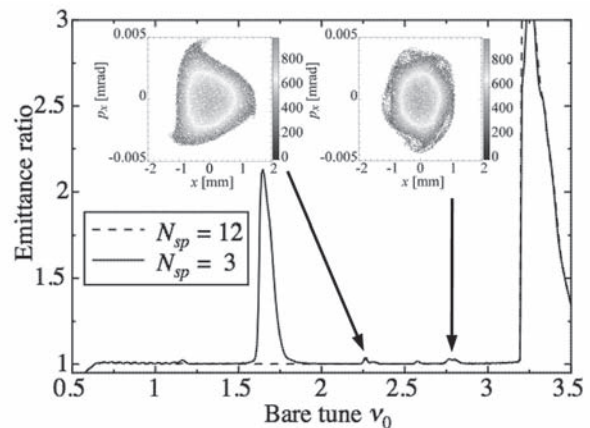


図 3 エミッタンス増加率のチューン依存性 (多粒子シミュレーション)

N_{sp} が 3 に低下するとシミュレーションでも 2 次の共鳴に起因する新たなストップバンドが $\nu_0 \approx 1.6$ に形成される。一方、実験結果で $\nu_0 \approx 2.2$ と $\nu_0 \approx 2.7$ に見られる不安定性はシミュレーションでは、その強さは 2 次の共鳴不安定性に比べて非常に弱い。図 3 中に示したビームの位相空間分布の形状と式 (2) から、これらの不安定性は 3 次と 5 次の集団共鳴によるものだと考えられる。また、実験で $\nu_0 \approx 0.8$ に見られる不安定領域は図 3 からははっきり確認できないが、条件を変えた別の計算において、その存在は確認されている。

4. まとめと今後の展望

実験、理論、シミュレーションによる系統的な研究の結果、LPT で観測された不安定性はビームの集団共鳴不安定性であり、その共鳴条件は式 (2) により与えられることを確認した。さらに、より詳細な解析の結果、LPT 実験ではチューン降下率 $(\nu_0 - \nu)/\nu_0$ にして 0.7 - 0.8 程度の超高密度のビームが模擬できていることも判明した。これらの結果により、LPT

のビーム物理実験装置としての有効性が改めて実証されたと言える。

シミュレーション側の今後の課題として、実験データとの定量的な対応が挙げられる。本稿で示したように、実験と計算の結果は不安定領域の位置に関しては定性的に一致する。その強さや形状の違いの原因として、ビームの位相空間分布の違い、電極の設置誤差、捕捉粒子同士もしくは捕捉粒子と残留ガスとの衝突などが考えられる。LPT 内にどのような位相空間分布をもつプラズマが生成されているのかは、それ自体が物理学上の興味深いテーマである。

5. 近況と抱負

博士号取得後、幸運にも高エネルギー加速器研究機構 (KEK) に採用され、現在も加速器に関する研究を続けている。KEK では KEKB 加速器のアップグレード計画である、SuperKEKB プロジェクトに携わっている。SuperKEKB は KEKB のビーム電流値を 2 倍、衝突点におけるビームサイズを 20 分の 1 にすることでルミノシティを 40 倍に増強することを目指すルミノシティフロンティアの加速器である。私はこのプロジェクトの中でビーム光学グループに所属し、KEK で開発されている加速器計算コード SAD⁸⁾ を使って SuperKEKB の光学設計に関する研究に従事している。SuperKEKB には所謂「砂時計効果⁹⁾」を緩和するためにナノビーム方式¹⁰⁾ が採用されているが、そのためには衝突点で非常に細く (垂直ベータ関数で約 300 μm)、かつ低エミッタンス (垂直エミッタンス約 10 μm) のビームを安定に周回させる必要があり、基本的なデザインは決まっているものの、細部の光学設計において検討すべき課題は未だ多く残されている。

私の現在の研究課題は、マグネットの磁場の誤差やミスアライメントに対するラティスの許容度の評価と、誤差によって乱れたオプティクスを補正するための具体的な方法の構築である。ビーム軌道、ベータ関数、分散関数などの測定モデルを組み、SAD を使って検討を行っている。その結果を元にビームモニターや電磁石などを専門としているグループと議論を行い、光学補正に必要なハードの台数や性能など、SuperKEKB の仕様を詰めて行くのが仕事である。

学生時代は、もちろん、それなりに責任や期限はあったが、概して自己責任においてマイペースに研究して

きたと思う。大きなプロジェクトに携わるのは今回が初めてで、このように色々なグループと協同で研究を進めて行く過程はなかなか新鮮である。皆で同じ目標に向かって進む楽しさを感じるとともに、世界最先端のプロジェクトに参加できることに感謝している。ラティス設計段階にプロジェクトに携われることを活かし、このマシンがどのような指針のもとで設計されていくかをしっかりと把握し、その経験をコミッションに活かして行ければと考えている。

思えば、学部の卒業研究のタイトルは「分子動力学における種々のアルゴリズムの検討と氷のシミュレーションへの応用」という加速器とは無関係のものだった。大学院では実験に即した計算がしたくなって、進学時に研究室を移ることにした。大学院時代、人の研究の話聞くのが一種の気分転換で、その中で自分が貢献できる部分を見つけるのが楽しかった。今後も自分の研究範囲を限定することなく歩み、視野の広い研究者になれればと思う。

参考文献

- 1) S. Ohtsubo, M. Fujioka, H. Higaki, K. Ito, H. Okamoto, H. Sugimoto and S. M. Lund, Phys. Rev. STAB 13 044201 (2010).
- 2) H. Sugimoto, K. Ito, H. Okamoto, and S. M. Lund, Proc. 1st International Particle Accelerator Conf. pp. 4668-4670 (2010).
- 3) H. Okamoto and H. Tanaka, Nucl. Instrum. Methods A 437, 178 (1999).
- 4) R. Takai, H. Enokizono, K. Ito, Y. Mizuno, K. Okabe, and H. Okamoto, Jpn. J. Appl. Phys. 45, 5332 (2006).
- 5) R. Takai, K. Nakayama, W. Saiki, K. Ito and H. Okamoto J. Phys. Soc. Jpn. 76 014802 (2007).
- 6) H. Okamoto and K. Yokoya, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 482, 51 (2002).
- 7) D. P. Grote, A. Friedman, G. D. Craig, I. Haber, and W. M. Sharp, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 464, 563 (2001).
- 8) K. Oide, Nucl. Instrum. Methods A 276, 427 (1989). <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- 9) *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, edited by A. W. Chao and M. Tigner (World Scientific Press, Singapore, 1998).
- 10) P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy (2006).