

新博士紹介

氏名 大崎 一哉* (東芝)
 論文提出大学 広島大学
 学位種類 博士 (理学)
 取得年月日 2016年3月23日
 題目 Theoretical studies on Doppler laser cooling of an ion beam in a storage ring and an emittance growth mechanism of intense hadron beam

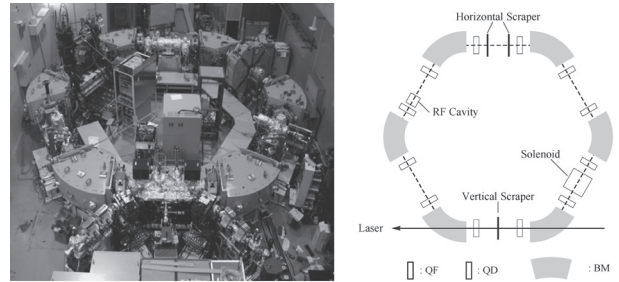


図1 S-LSRの写真と概略図. レーザーはリングに1本入っており, 共鳴結合法のためのRF cavityとSolenoidが図のように配置されている.

1. はじめに

ビームは低エミッタンスであるほど高品質で有用であるが, エミッタンスは保存量であるため, 通常は変化しない. ビームに散逸力を与え, エミッタンスを人為的に下げるビーム冷却と呼ばれるいくつかの手段が知られているが, ハドロンビームの最も強力な冷却方法は, レーザー冷却法で, 理論上はミリ秒のオーダーでゼロエミッタンスのクリスタルビームが生成可能である.

レーザー冷却法を用いた極低温ビーム生成の試みは1990年代に行われたが, 様々な問題でクリスタルビームの生成には至らなかった. その問題の一部を解決した加速器S-LSRが京都大学に建設され, クリスタルビーム生成を目指して実験が行われてきた. その実験におけるレーザー冷却のパラメータ最適化をMDコード“CRYSTAL”を用いて行ったので, 以下にその結果を記す.

2. S-LSR

2006年, 京都大学の宇治キャンパスに Mg^{+} イオンビームのレーザー冷却実験を行うため蓄積リングS-LSRが建設された(図1). 過去に行われたレーザー冷却実験の最大の問題は, レーザー冷却ではビームの進行方向しか冷却されず, 横方向はIBS (Intra Beam Scattering) を通じた結合により間接的に冷却されるにすぎないため, 横方向の冷却効率が悪いという点であった. これを解決するために提案されたのが共鳴結合法¹⁾で, ビー

ムの進行方向と水平方向と垂直方向に人為的な結合ポテンシャルを与え, 各方向のチューンの差を整数にすることで差共鳴を起こし, 結果としてレーザー冷却によるビームの進行方向の冷却力を横方向に拡張する. S-LSRではRF cavityとSolenoidをリングに入れることで結合ポテンシャルが与えられる. この方法がビームの横方向の冷却に有効であることが多くのMDシミュレーションで確認されたため, S-LSRはこの方法を採用し, クリスタルビーム生成を目指したビーム冷却実験が開始された.

3. 多粒子シミュレーション

3.1 レーザー冷却パラメータの最適化

S-LSRでのレーザー冷却実験では, 冷却用のレーザーがリングに1本のみ, レーザーのパワーが10 mW程度で十分ではない, などの問題がある. そのため冷却効率を最適化するためレーザーのパラメータを慎重に選ぶ必要がある. 重要なパラメータはレーザーパワーを既定のものとするれば, レーザーの離調 (detuning) とレーザー径で, それらの最適化のため多粒子シミュレーションを行った. その結果冷却された粒子は6次元位相空間上の原点付近に集まっていることが確認された. 全粒子数に対する冷却された粒子数の割合 Particle Capture Rate (PCR) を定義し, 冷却された粒子のみから各方向の温度を計算した. 図2に異なる離調におけるPCRのレーザー径依存性

* 株式会社東芝 Toshiba Corporation (E-mail: k.osaki19890212@gmail.com)

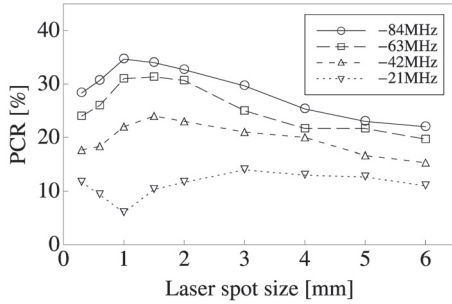


図2 各レーザー離調におけるPCR, レーザー径が1.5 mm 付近で最大となることが確認できた。

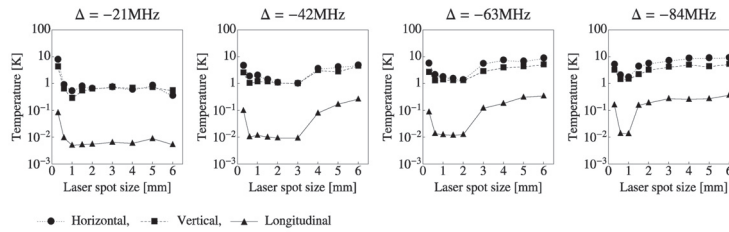


図3 離調-21 ~ -84 MHz でのビームの最終温度. 進行方向の温度が低くなっているレーザー径の範囲ではビームの longitudinal 方向が秩序化していることが確認された。

を示す. PCR はレーザー径が 1.5 mm 付近で最大となることが確認された. 各離調におけるビームの各自由度における到達温度を図3に示す. 進行方向 (longitudinal) の温度が横方向 (horizontal and vertical) より低くなっていることが分かる. これは進行方向がレーザーで直接冷却されているからだと考えられる. また特定のレーザー径の範囲でビームの longitudinal 方向が他の自由度より1桁下がっている. この範囲ではビームの進行方向が秩序化し, 各粒子のシンクロトン振動が止まることが確認された.

3.2 RF cavity 電圧の Ramping

クリスタルビーム生成のためにはビーム横方向の温度をさらに下げなければならない. また結晶ビームの構造はビームの線密度によって変化することが知られており²⁾, S-LSR では String 構造と Zigzag 構造のみ生成可能なため, 結晶生成のためには線密度をさらに下げる必要がある. それらを満たすため RF cavity の電圧を下げるのが有効であると考えた. 電圧を下げるとビームの線密度が下がり粒子間衝突頻度が低くなることで, 結果としてビーム横方向の加熱が減るからである. 図4はRF電圧を2Vまで下げたときのビームの実空間分布でString-likeな分布となることが確認できた. またこのときのビームの温度も縦横方

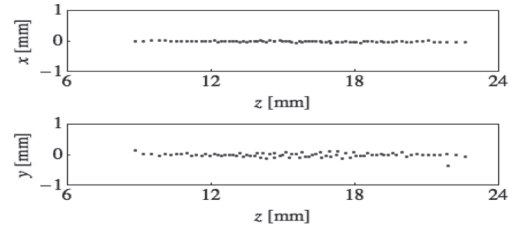


図4 RF電圧を2Vまで下げたときのビームの実空間分布. String-like となっている。

向ともに電圧を下げる前より約1桁下がっていたことから, RF電圧を下げることはビームの冷却に有効であることが示された.

4. まとめと今後の抱負

今回系統的に行った多粒子シミュレーションから京都大学の加速器S-LSRでのレーザー冷却の最適値を決定した. またレーザー冷却後にRF電圧を下げることでビーム間衝突頻度が下がり, さらなるビームの冷却に有効であることが確認された. このときビームはString結晶-likeな分布となる. 今回得られたパラメータを参考に実機で実験することで, かつて無い低エミッタンスビームの生成が期待できる.

私は今年の4月から株式会社東芝で働き始め, 山形大学での医療用加速器開発に携わっている. 学術的な研究からは少し離れるが, これまでの研究生活で培った経験を生かして医療用加速器開発を行いたいと考えている.

参考文献

- 1) H. Okamoto, A. M. Sessler and D. Möhl, Phys. Rev. Lett. 72, 3977 (1994).
- 2) R. W. Hasse and J. P. Schiffer, Ann. Phys. 203, 419 (1990).