

単一周波数 RFKO を用いたストレッチャーリングからの 取り出しビームのエミッタンス縮小

宮本 篤、日出 富士雄、神藤 勝啓、田中 拓海、浜 広幸

東北大学大学院理学研究科附属原子核理学研究施設 〒982-0826 仙台市太白区三神峯 1-2-1

概要

ストレッチャーリングから取り出されるビームは、入射したビームが周回中に占める位相空間の大きさに直接起因する時間的・空間的な広がりを持つ。数値シミュレーションより、周回する電子にある特定の単一周波数を持った摂動を与えると、取り出しビームのエミッタンスが半分以下に縮小するということが見いだされた。

東北大学原子核理学研究施設 STB リングにおいて、リングに設置されているストリップライン型電極の RF キッカーを用いて、周回する電子ビームに摂動を与えるビーム取り出し実験を行った。取り出しビームの大きさを測定した結果、ほぼ計算と一致するエミッタンスの縮小が実証された。

1 ストレッチャーリング

東北大学原子核理学研究施設にはパルスストレッチャーとブースターシンクロトロン機能を併せ持つ電子円形加速器、ストレッチャー・ブースタリング[1,2] (STB リング) が設置されている。主なパラメータを表1に示す。

ストレッチャーリングは線形加速器などのパルスビームを擬似的な連続ビームに変換する円形加速器である。STB リングに蓄積されたビームは、6 極磁場が作り出す 3 次共鳴状態を経てリングから取り出される。入射されたビームはシンクロトロン放射によりエネルギーを失い、クロマティシティに応じたチューンシフトを起こす。入射ビームのチューンを制御することによって、共鳴状態に達するまでの時間を変えることができる。

表1: STB リングのパラメータ

Lattice type	Chasman-Green
Superperiodicity	4
Circumference	49.751 m
Beam energy	200 MeV (nominal)
Betatron tune	(3.31, ~1.20)
Natural chromaticity	(-5.79, -4.98)
Energy loss / turn	46 eV @ 200 MeV
Repetition period	3.33 ms @ 200 MeV
Relative energy loss / period	0.46 % @ 200 MeV
Horizontal tune shift / period	0.0267 @ 200 MeV
Twiss at injection point	$\beta_x = 20.2$ m, $\alpha_x = -0.06$
Number of harmonic sextupoles	1

リングに入射するビームのエネルギー幅を、次のビームが入射されるまでに失うエネルギーと等しくすると、パルスビームを擬似的な連続ビームに変換することができる。その時には $\Delta p/p = 0$ の粒子が取り出し時間の中間に取り出されるように、チューンを設定する必要がある。

2 STB リングからのビーム取り出し

2.1 共鳴条件の設定

ベータトロン振動振幅 J を Courant-Snyder invariant を用いて、

$$J = \frac{1}{2\beta} [x^2 + (\beta x' + \alpha x)^2] \quad (1)$$

と表すと、6 極ポテンシャルを含む Hamiltonian は近似的に、

$$H \approx \delta J + G J^{3/2} \cos(3\psi - l\theta + \xi) \quad (2)$$

と表される[3]。ここで $\delta = v_x - l/3$ であり、共鳴点からのチューンの差を表す。 ψ はベータトロン位相、 $\theta = s/R$ (R : 平均半径) である。また G はリング 1 周にわたって平均した 6 極モーメントのフーリエ振幅である。

式(2)から unstable fixed point (UFP)におけるベータトロン振幅は、

$$J_{UFP}^{1/2} = \left| \frac{2\delta}{3G} \right| \quad (3)$$

となる。STB リングには 6 極電磁石が直線部の中央 $\alpha = 0$ の 1 箇所のみに設置されており、取り出し静電セプタムはその直下流に位置している。この場合、近似的に実空間での UFP は、

$$x_{UFP} = -\sqrt{2\beta} \frac{2\delta}{3G} \quad (4)$$

となる。このように共鳴条件はチューン差 δ とフーリエ振幅 G によって決定される。STB リングでは静電セプタムのワイヤは中心軌道から -32 mm の位置にあるので x_{UFP} はそれ以下に設定する必要がある。

共鳴を起こした粒子が周回ビームから切り取られる時に静電セプタムのワイヤを通過するが、3 周ごとの振幅の増加幅、3 ターンセパレーション[4]が小さすぎるとほとんどの粒子がワイヤに衝突して失われる。ターンセパレーションは UFP からの距離に依存しているので、ワイヤを越えることができるようにセパトロックスの大きさと初期のベータトロン振幅を設定する必要がある。

STB リングでは $\delta = -0.004$ として、 $\Delta p/p = 0$ の粒子のベータトロンチューンを (3.315, 1.200)、6 極磁場の強さは -0.47 m^{-3} 、入射点における平衡軌道からの距離を $\sim 15 \text{ mm}$ として運転している。静電セプタムのワイヤの太さは約 0.3 mm である。このような条件下でシミュレーションを行い、周回ビームと静電セプタムによって切り取られたビームの位相空間を図 1 (a)に示す。リングに入射するビームのエネルギー幅は $\Delta p/p = \pm 0.0 \%$ 、エミッタンスは 300 nmrad (規格化エミッタンス 117 μmrad) とした。また、放射光放

出の量子効果は無視し、1 周あたりの平均エネルギー損失のみを考慮した。

入射ビームのエミッタンスが 0 の場合、すべての粒子は同一のセパトロリクス上を移動してリングから取り出され、非常に小さなエミッタンスとなる。さらにエネルギーが同じ粒子について考えると、すべての粒子のチューンが常に一致するので入射から取り出されるまでの時間も一致するはずである。

しかし、実際のビームは入射エミッタンスに応じたベータトロノ振幅の差を持っている。この振幅の差はセパトロリクスの大きさの差となり、取り出しビームは空間的に広がりを持つ。また振幅の差に応じたチューン広がりを持っているので、時間的な広がりも生じることになる。

2.2 単一 RFKO を用いたビーム取り出し

リングを周回するビームに単一周波数の摂動を与えることにより、取り出されるビームの水平方向の広がりが縮小することがシミュレーションにより見いだされた。周波数 1.98279 MHz ($v_s = 0.329$)、蹴り角 $3.5 \mu\text{rad}$ で周回ビームに摂動を与えた時に、取り出されるビームの位相空間を図 1 (b) に示す。摂動を与えなかった場合(a)と比較して、静電セパタムで切り取られたビームの広がりが縮小していることがわかる。さらに、図 2 に示すように時間的な広がりも摂動を与えない場合と比較して 77% に減少し、ビームのエネルギー広がりも $\sigma = 1.15 \times 10^{-4}$ から 0.93×10^{-4} に減少することがわかった。

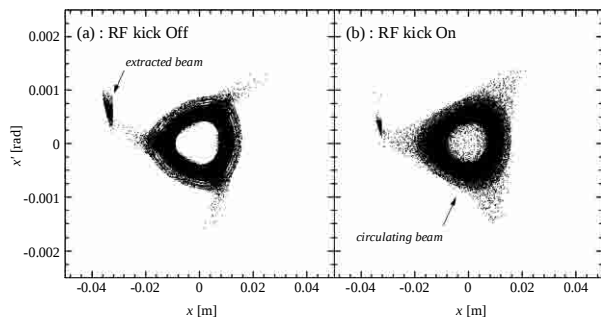


図1：周回ビームに摂動を与えなかった場合(a)と与えた場合(b)の、周回粒子と静電セパタムでリングから取り出される粒子の位相空間。

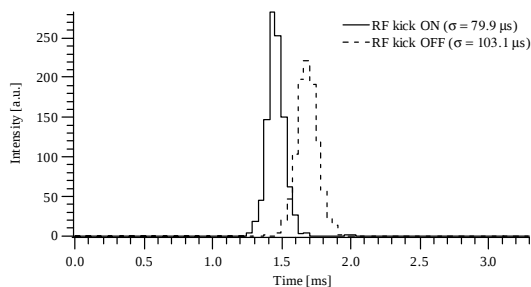


図2： $\Delta p/p = 0$ の入射ビームが取り出される場合の時間分布。実線が摂動を与えた場合、破線が与えなかった場合で、 σ はガウス関数でフィットした時の標準偏差。摂動を与えると取り出される時間幅が 77% に減少する。

3 実験結果とシミュレーションの比較

3.1 RF キッカー

STB リングにはストリップライン型電極をもつ RF キッカーが直線部に設置されている。電極長は約 500 mm で、特性インピーダンスが 50Ω になるように設計されている。水平方向には最大電場 2.6 kV/m を印加することができ、200 MeV の電子に対して $6.5 \mu\text{rad}$ の蹴り角を与えることができる。

3.2 ビームサイズの測定

リングから取り出されたビームのサイズは、取り出しセパタム電磁石の直前にタングステンワイヤ(1 mm ϕ)を挿入して測定した。ワイヤを水平方向に走査し、制動放射による γ 線をワイヤ下流に設置したプラスチックシンチレータで捉えて、その計数率を電子密度として計測した。

3.3 RF キック角の変化

RF キッカーに入力する信号の電力を変化させて、蹴り角が 0.0, 2.2, 2.8, $3.5 \mu\text{rad}$ の時のビームサイズを測定した。図 3 に測定結果を示す。取り出しビームの大きさを標準偏差とし、RF キックの蹴り角に対するビームサイズの変化を図 4 に示す。

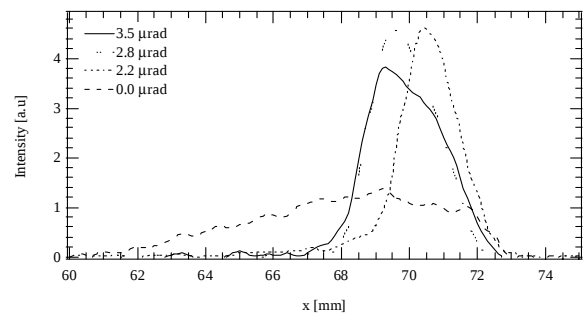


図3：蹴り角を変えた時のビームサイズの変化。

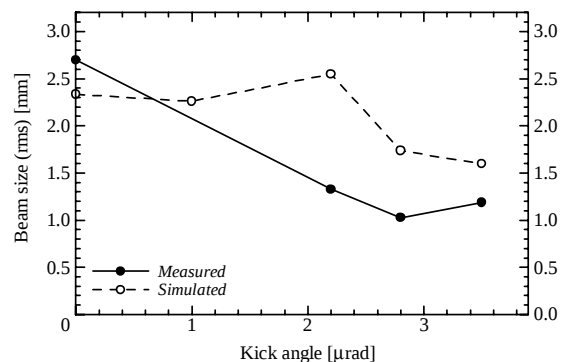


図4：蹴り角に対する取り出しビームサイズの変化。実線が測定結果、破線がシミュレーション結果。

3.4 RF キックの周波数の変化

RF キッカーに入力する信号の周波数を変化させた時の、 $\Delta p/p \sim 0$ の粒子が入射から取り出されるまでの時間分布の変化を図 5 に示す。リングから取り出されたビームの時間構造は、ビーム輸送系に設置された蛍光スクリーン下流に

設置されたプラスチックシンチレータで γ 線を捉えることで測定する。

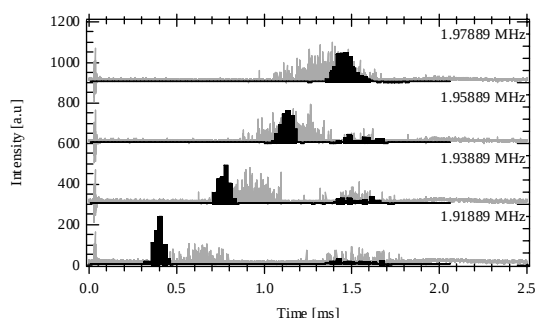


図5: $\Delta p/p \sim 0$ の粒子がビーム入射から取り出されるまでの時間分布。灰色線が測定結果、黒色ヒストグラムがシミュレーション結果。

シミュレーションでは、入射のミスマッチを考慮に入れていない。取り出し時間と時間幅には、ミスマッチが主因のわずかなベータトロン振幅の差が非常に大きく影響する。このため、シミュレーションと測定結果に差が生じていると考えられるが、傾向はおおむね一致している。

4 共鳴状態の粒子の振舞い

4.1 セパトトリクス

共鳴状態にある粒子は、リングから取り出される直前はセパトトリクス上を運動している。RF キックを行わない場合は、初期ベータトロン振幅に応じたセパトトリクスの大きさに沿って取り出されることになり、静電セパタムの位置における位相空間で x 軸上の差を持っている。ところが、共鳴状態の粒子が持つチューンと同一の周波数で周回粒子に摂動を与えることにより、共鳴状態に陥った粒子のベータトロン振幅の分布の広がりを小さくすることができる。

初期振幅の異なる粒子がリングから取り出される時、摂動を与えない場合は初期振幅の大きさを反映したセパトトリクスの差があるが、摂動を与えた場合には RF キックとビームが共鳴を起こし、取り出されるまでにベータトロン振幅の差が減少していく。

4.2 入射から取り出されるまでの時間

STB リングの取り出し静電セパタムの位置での Twiss パラメータ

$$\beta_x = 20.303,$$

$$\alpha_x = -0.0230$$

を用いて、式(1)のベータトロン振幅 J の周回毎の変化を図6に示す。摂動を与えなかった場合、ビームはベータトロン振幅に依存したチューンの差を持ち、その差に応じた取り出し時間の差が現れる。

摂動を与えた場合、ベータトロン振幅が異なる粒子も RF キックの周波数にチューンが近づくにつれて共鳴を起こして、ベータトロン振幅に大きなうねりが生じる。これは RF キックの周波数にビームのチューンが近づいたためであり、このうねりの位相がそろふことで取り出されるまでの時間差が減少し、またほぼ同じ大きさのセパトトリクスに到達する。

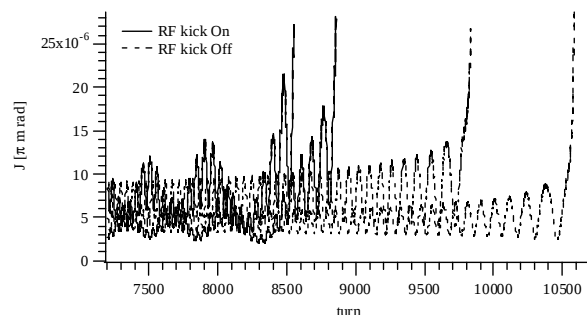


図6: リングから取り出される粒子が持つベータトロン振幅の周回毎の変化。実線が摂動を与えた場合、破線が与えなかった場合。

5 まとめ

単一周波数の RFKO を用いることで、ストレッチャーリングからの取り出しビームのエミッタンスを縮小することに成功した。キック角や周波数に対する依存性について実験を行い、ほぼシミュレーションと一致する結果を得た。

RFKO を用いたストレッチャーからのビーム取り出しは、3次共鳴と RFKO 共鳴の重ね合わせ現象であるため、ビームはベータトロン振幅のうねりなどの複雑な運動をする。今後はより精密な測定と比較を行い、ビームダイナミクスをより詳しく検討していくとともに、取り出しビームの解析的な解法を確立していく。

参考文献

- [1] H. Hama, *et al.*, The 18th International Conference on High Energy Accelerators, Tsukuba, Japan, Mar. 26-30, 2001.
- [2] F. Hinode, *et al.*, Proceedings of the Second Asian Particle Accelerators Conference, Beijing, China, 2001.
- [3] S. Y. Lee, *Accelerator Physics*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., p. 184.
- [4] H. Hama, *et al.*, Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Suita, Osaka, Japan, Oct. 29-31, 2001.