

STUDY OF SLOW BEAM EXTRACTION THROUGH THE THIRD ORDER RESONANCE WITH PHASE SPACE MANIPULATION USING AN RF SHAKER

A. Miyamoto, F. Hinode, K. Shinto, T. Tanaka and H. Hama
Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, 982-0826

Abstract

The beam emittance extracted from stretcher ring increases because of timing jitter of bump magnet and optical mismatching between the ring and an injection line, accordingly it is difficult to obtain high quality beam. Therefore we have studied to control influence on the emittance of the extracted beam by introducing phase space manipulation with a mono-frequency transverse rf kick. We have demonstrated the reduction of emittance experimentally on the STB ring.

RFシェーカーによって位相空間操作を施した3次共鳴による ビーム取り出しの研究

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。

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。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。ストレッチャーリングの原理を表すチューンダイアグラムを図1に示す。200 MeVのエネルギの入射ビームはシンクロトロン放射によりエネルギーを失い、 $(\xi_x, \xi_y) = (-5.79, -4.98)$ の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。つまり、入射ビームのチューンに幅を与えることで、取り出し時間の幅を制御することができる。

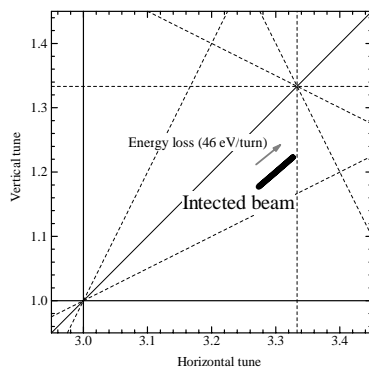


図1:核理研STBリングのチューンダイアグラム。

そこで入射ビームのエネルギー幅を、次のビームが入射されるまでの3.3 ms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として、 α, β のTwissパラメータを用いて

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

と表すと、6極ポテンシャルを含むHamiltonianは近似的に、

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

と表される^[3]。ここでは $\delta = \nu_x - l/3$ であり、共鳴点からのチューン偏差を表す。 ψ はベータトロン位相、 $\theta = s/R$ (R は平均半径)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

$$Ge^{i\xi} = \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \oint \beta(s)^{2/3} S(s) e^{i3 \int_0^s \frac{ds}{\beta(s)} - (3\nu - l) \frac{s}{R}} ds \quad (3)$$

である。ここでの $S(s)$ はビームエネルギーで規格化した6極磁場の強さである。

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

$$J_{UFP}^{1/2} = \left| \frac{2\delta}{3G} \right| \quad (4)$$

となる。STBリングには6極電磁石が直線部の中央

$\alpha = 0, \beta = 20.2$ mの1箇所のみを設置されており、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、

$$x_{UFP} = -\sqrt{2\beta} \frac{2\delta}{3G} \quad (5)$$

となる。このように共鳴条件はチューン差 δ とフリーエ振幅 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トリ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 $\delta = -0.003$ 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 ~ 15 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2(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 μ mrad)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ト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。

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ン振幅の差を持っている。この振幅の差はセパトト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。

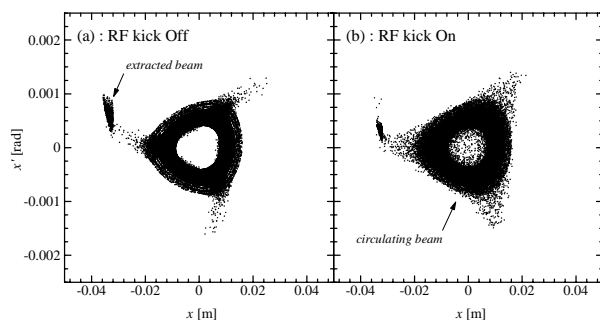


図2:周回ビームにRFキックを与えなかった場合(a)と与えた場合(b)の、周回粒子と静電セプタムでリングから取り出される粒子の位相空間。

2.2 単一周波数RFキックを用いたビーム取り出し

ストレッチャーリングにおいて取り出しビームは入射条件に非常に強く依存しているために、現実では入射ビームラインとリングの光学的マッチングや入射バンプ電磁石の時間ジッターなどの要因により高品質の取り出しビームを得るための入射条件を作り出すことは非常に困難である。

そこで単一周波数RFキックによって周回ビームに位相空間操作を施し、入射条件の変化が与える取り出しビームへの影響を抑制することを考案した。ある単一周波数RFキックがある場合の共鳴を表すためにHillの方程式を以下のように

$$\frac{d^2\eta}{d\phi^2} + \nu(t)^2\eta = \nu_0^2\beta^{3/2}f(t) \quad (6)$$

$$f(t) = \theta_a \sin(\omega_m t + \psi) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(s - nC)$$

$$\nu(t) = \nu_0 - at$$

とする。ストレッチャーリングではチューンは時間とともに変化するので時間 t の関数として、 ν_0 は初期チューン a は単位時間あたりのチューンシフトを表す。 θ_a, ω_m, ψ はそれぞれRFキックの蹴り角、角速度および初期位相である。これより得られる解析解は

$$x = -i \frac{\nu_0^2 \beta^2 \theta_a}{R} \frac{1}{\sqrt{\nu(\phi)}} e^{i[\nu_0\phi - \frac{A}{2}\phi^2]} \times \sum_{m=0}^k \frac{1}{\sqrt{\nu(2\pi m)}} e^{-i[\nu_0 2\pi m - \frac{A}{2}(2\pi m)^2]} \sin(\nu_0 2\pi m + \psi) \quad (7)$$

である。この解は6極ポテンシャルを含んでいないが、ストレッチャーリングでは6極ポテンシャルによるセパトトリクスが存在する。その様子を図3に模式的に示す。リングに入射されたビームは周回とともにチューンシフトを起こし、やがてセパトトリクスに到達してリングから取り出されるが、その時のベータトロン振幅 J やチューンは初期ベータトロン振幅に依存している。通常に取り出しにおいてセパトトリクスに到達するよりも低いチューンのRFキックを与えると、その周波数で共鳴を引き起こし、セパトトリクスに到達した時点でのベータトロン振幅やチューンの差がRFキックを与えない場合と比較して減少していることがわかる。

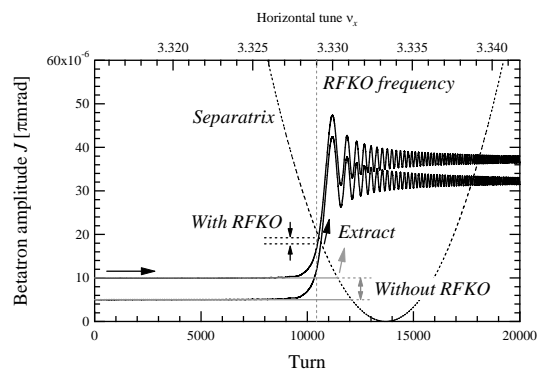


図3:RFキックを併用した取り出しの模式図。

この方法によるエミッタンスの縮小はトラッキングシミュレーションによっても図2(b)に示すように確認された。(a)と比較してワイヤセパタムによって周回ビームから切り取られた取り出しビームの広がり縮小していることがわかる。

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50 Ω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 μrad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 μradの時のビームサイズを測定した。図4に測定結果を示す。RFキックを与えるとビーム幅が大幅に減少していることがわかる。

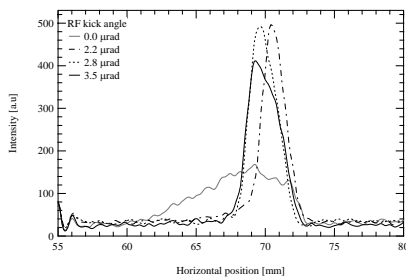


図4:RFキック角を変化させた時の取り出しビーム分布の変化。

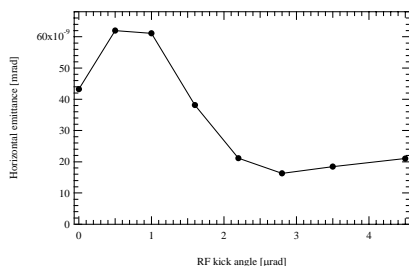


図5:トラッキングシミュレーションにより求められたRFキックを変化させた時の取り出しビームエミッタンスの変化。

同条件でのトラッキングシミュレーション結果から、(1)式によってエミッタンスを算出したものを図5に示す。RFキック角が~3 μradの時にエミッタンスが最小になり、通常を取り出しと比較して約38%に縮小する。

3.4 エミッタンスの縮小と増大

(7)式より求められるセパトリクスに到達した時のベータトロン振幅 J とRFキックの初期位相の関係を図6に示す。 J の最大値と最小値の差がエミッタンスと関係するので、蹴り角が3 μrad程度の場合に最小になり、蹴り角が小さい場合はエミッタンスが増大する。

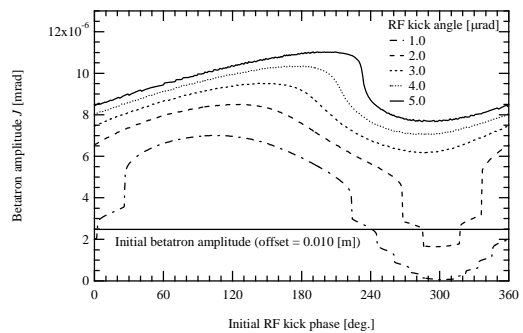


図6:セパトリクスに到達した時のベータトロン振幅 J とRFキックの初期位相の関係。

4. まとめ

単一周波数のRFキックによって位相空間操作を施すことで、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。キック角などへの依存性について実験を行い、ほぼトラッキングシミュレーションと一致する結果を得た。

さらに、セパトリクスに到達時のベータトロン振幅を解析解より求め、エミッタンスの縮小および増大が確認された。

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.