

PF-ring , PF-AR マシンスタディでの SAD の利用

2006年9月5日(火)

Workshop SAD 2006

宮島 司(KEK-PF)



目次

- 2.5 GeV PF-ring, 6.5 GeV PF-AR マシンスタディでの SAD の利用
- 例1: ベータトロン振動の非線形共鳴
- 例2: PF-AR での低エミッタンス化、加速・減速調整
- 例3: ノートPC(Windows)でのSADの利用
- まとめ

PF-ring, PF-AR でのマシンスタディでの SAD の利用

SAD を利用した計算

- ビーム光学関数の計算
 - ベータatron関数、分散関数、振幅依存チューンシフト、 R_{56} ...
- トラッキング用転送行列の計算
 - リングの超周期が乱れたときの共鳴の励起
 - 多粒子での粒子トラッキング(粒子間の相互作用あり)
- 加速器の制御
 - 電磁石、RF、入射システムの制御、電子軌道の制御
 - 加速器の運転用パネル
- データ解析
 - 実験データの解析(統計処理、FFT など)

PF-ring, PF-AR でのマシンスタディ

- 2.5 GeV PF-ring
 - ベータatron振動の非線形共鳴の研究
 - 横方向ビーム不安定性の研究
- 6.5 GeV PF-AR
 - 低エミッタンス化
 - 加速・減速調整
 - 短パルス光源の検討
 - オプティクス調整
- SAD を利用した計算
 - ビーム光学関数の計算
 - トラッキング用転送行列の計算
 - 加速器の制御
 - データ解析



ベータトロン振動の非線形共鳴

位相空間モニターによる観測と
粒子トラッキング

非線形共鳴の研究の動機

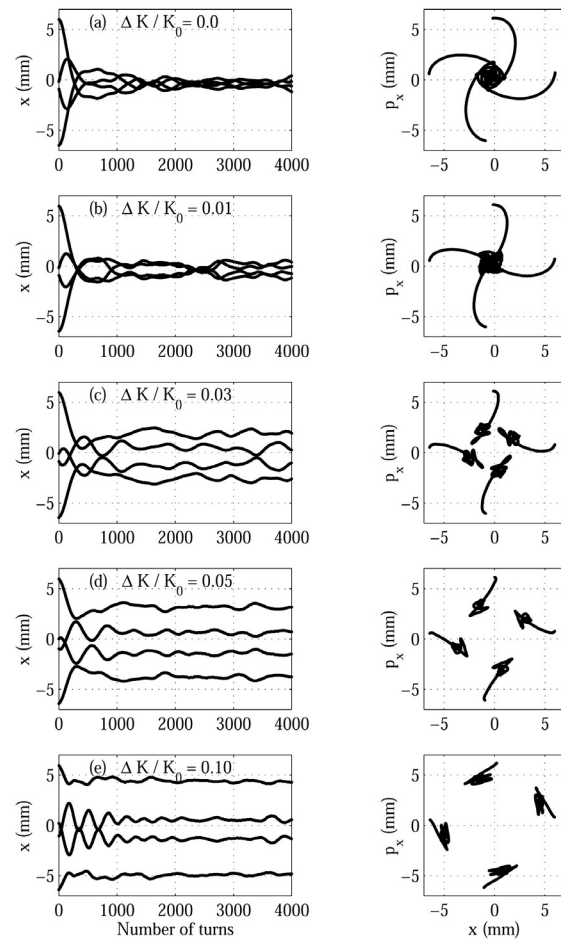
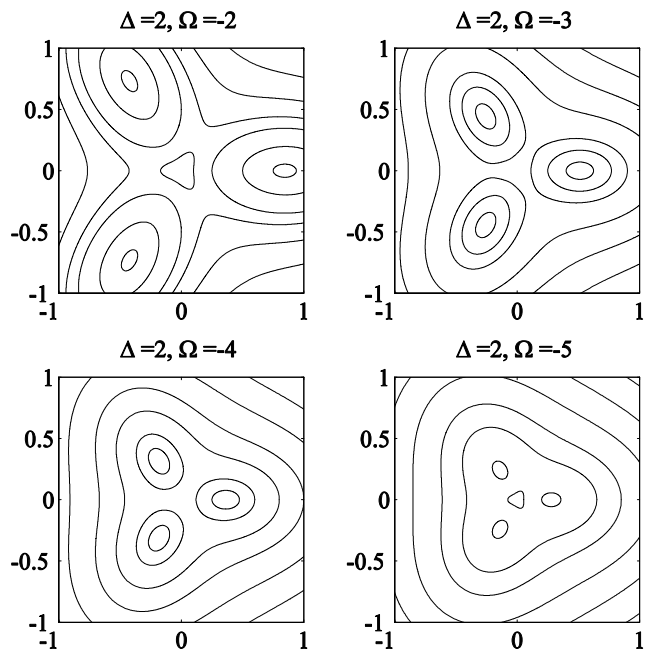
- 円形加速器で重要な事
 1. ビームを安定に周回させられること(長時間安定性、光学口径の大きさ)
 2. Top up 運転(ビーム電流を一定に保つための常時入射)では
僅かなビーム損失も許されない
(ビームラインのシャッターを開けたままで入射を行うため)
- ビーム損失を引き起こす原因
 1. ベータatron振動の共鳴現象
 - 僅かな非線形性でも影響が増大する
 2. ビーム不安定性現象

- 研究の動機
 1. 実用的な側面: Top up 入射の実現、ビーム不安定性を回避するためには、ビーム損失に関わる非線形共鳴を十分に理解しておくことが欠かせない
 2. 学問的な側面: 加速器では非線形性をコントロールすることが可能であり、非線形力学の実験対象としても適している

- 非線形共鳴を記述するモデル
- 垂直方向1次元 n 次共鳴 ($n\nu_y = l$) を記述するハミルトニアン

$$\mathcal{H}_n = \nu_y J_y + \frac{1}{2} \alpha_{yy} J_y^2 + G_{0,n,l} J_y^{n/2} \cos(n\phi_y - l\theta + \xi_y),$$

- 2項目: 振幅依存チューンシフト
- 3項目: 共鳴の強さ



- 共鳴パラメタを変化させることで位相空間パターンが変化
- 2つのパラメタ: 位相空間を特徴づけている

非線形共鳴の研究手法

- トラッキングなどの数値解析

- 長所: 計算機の能力の向上により容易に行える
- 短所: 現実の加速器を予想するためには、**予め共鳴の起源を入れる必要がある**

- 実際の加速器を用いた実験

- 長所: 現実の加速器を用いるので、**あらゆる非線形性を含んだ現象を調べることが可能**
- 短所: **測定が容易ではない**
 - 測定装置が必要(特に位相空間の情報を得る必要がある)
 - 安定に測定するのが難しい(初期条件の安定化)
 - 非線形性の起源を見極める必要がある

- 本研究 : **実験的手法と粒子トラッキング**を用いる

対象: **現実の電子貯蔵リング**

1. **実験的な手法** ⇒ 現実のリングの**共鳴パラメタを決定**
2. **粒子トラッキング** ⇒ **リングの超周期の乱れによる影響を調べる**

1. 位相空間モニターによる観測

垂直4次共鳴近傍でのベータatron振動

PF-ring での垂直4次共鳴の強さ

- 垂直4次共鳴のハミルトニアン

$$\mathcal{H}_4 = \nu_y J_y + \frac{1}{2} \alpha_{yy} J_y^2 + G_{0,4,l} J_y^2 \cos(4\phi_y - l\theta + \xi_y),$$

- 共鳴の起源 ⇒ **8極ポテンシャル中の y^4 項**

$$V_4(s) = \frac{1}{24} S_4(s) (x^4 - 6x^2y^2 + y^4).$$

- 共鳴の強さ $G_{0,4,l} e^{i\xi_y} = \frac{1}{96\pi} \oint ds S_4(s) \beta_y^2(s) e^{i[4\chi_y(s) - (4\nu_y - l)\theta]}.$

- 実験: 4台の8極電磁石を同時に同じ値に設定

$$G_{0,4,l} e^{i\xi_y} = \frac{1}{96\pi} K_3 \sum_{i=1}^4 \beta_{y,i}^2 e^{i[4\chi_y - (4\nu_y - l)\theta]},$$

- 共鳴の強さの応答 ⇒ **8極磁場の強さに対して線形になるはず**

$$G_{0,4,l} = g_{0,4} + g_{1,4} K_3,$$

振幅依存チューンシフト

- 8極磁場に起因する項: K_3 に対して1次

$$\alpha_{yy,4} = \frac{1}{16\pi} \oint ds S_4(s) \beta_y^2(s), \quad V_4(s) = \frac{1}{24} S_4(s) (x^4 - 6x^2y^2 + y^4).$$

- 6極磁場に起因する項: K_3 に依存しない

$$\alpha_{yy,3} = -\frac{1}{64\pi} \int_0^C ds S_3(s) \beta_x^{1/2}(s) \beta_y(s) \int_s^{s+C} ds' S_3(s') \beta_x^{1/2}(s') \beta_y(s') \\ \times \left[4 \cdot \frac{\cos\{\Psi_x(s, s')\}}{\sin(\nu_x \pi)} + \frac{\cos\{\Psi_x(s, s') + 2\Psi_y(s, s')\}}{\sin\{(\nu_x + 2\nu_y)\pi\}} \right. \\ \left. + \frac{\cos\{\Psi_x(s, s') - 2\Psi_y(s, s')\}}{\sin\{(\nu_x - \nu_y)\pi\}} \right],$$

$$\Psi_x(s, s') = \Phi_x(s') - \Phi_x(s) - \pi\nu_x$$

$$\Psi_y(s, s') = \Phi_y(s') - \Phi_y(s) - \pi\nu_y.$$

- 実験では、8極磁場のみを変更

⇒ チューンシフトの変化: 8極磁場の強さに比例するはず

$$\alpha_{yy} = a_0 + a_1 K_3,$$

共鳴パターンの観測

- 共鳴の特徴的状态 ⇒ **位相空間中に現れる(共鳴パターン)**
 - アイランド構造 (安定固定点、ベータatronチューンが一定)
 - セパトリクス構造

- 実験的に位相空間の情報を得るには？
- ビームの位置と傾き (x, x') を

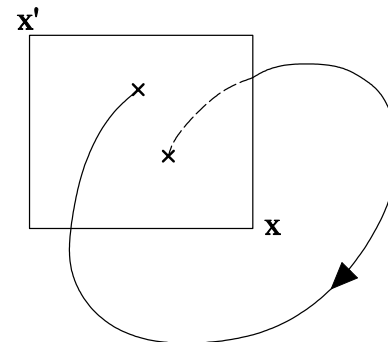
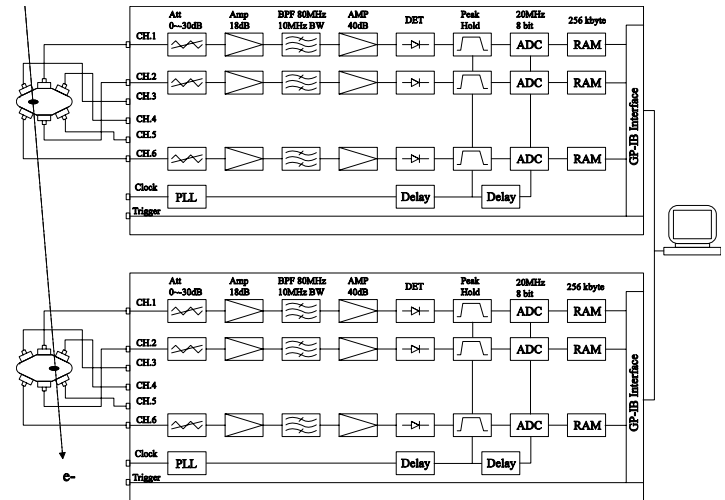
ターンバイターン測定ですればよい

⇒ **位相空間モニターシステムを開発**

- ビームに初期振幅を与える
⇒ 高速キッカー電磁石

- (x, x') のデータを1ターン毎に測定
⇒ 2つのBPMにより
ビームの位置を検出

- ここでは、垂直4次共鳴の実験結果を示す



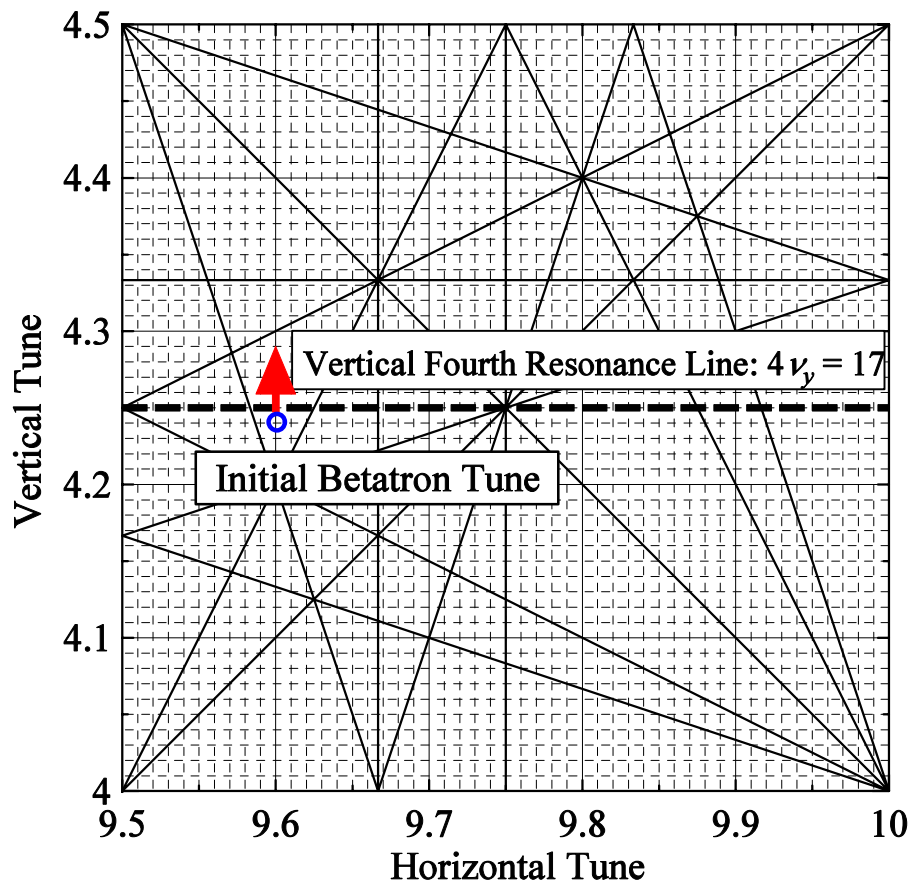
垂直4次共鳴での実験

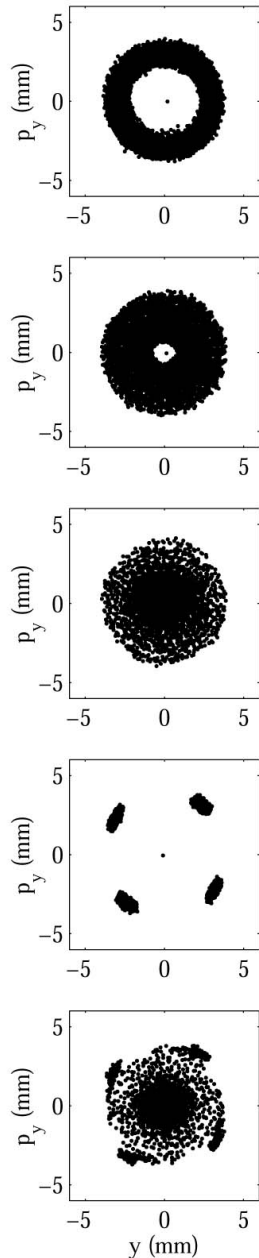
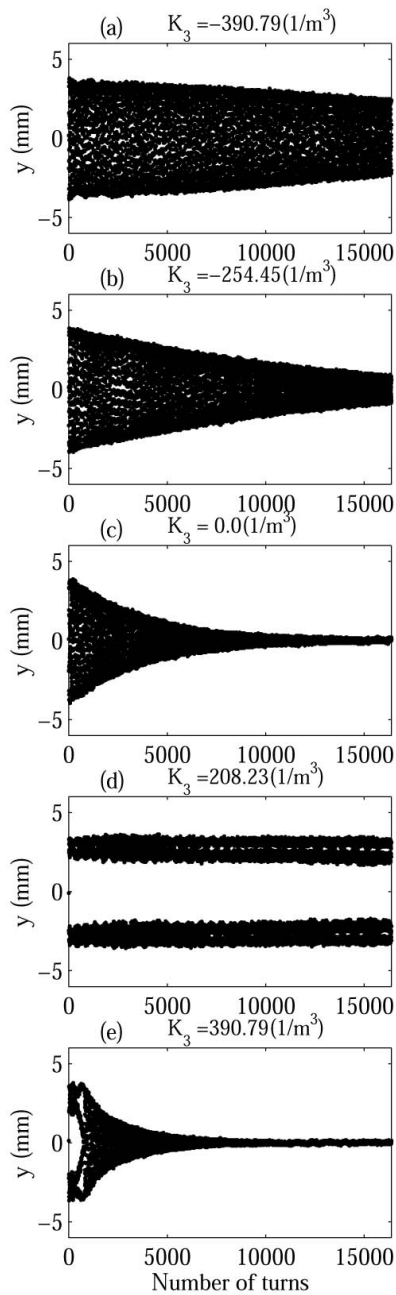
- 今回の実験: 8極磁場を変えながら測定
⇒ チューンシフト、4次共鳴の強さをコントロール
- 垂直4次共鳴: $4\nu_y = 17$
 1. 共鳴の起源である8極磁場が変化した場合の共鳴パラメタの応答は？
 2. 8極磁場に対して1次の応答を示すか？

実験結果：垂直4次共鳴

実験条件

1. 共鳴: $4\nu_y = 17$
2. シングルバンチ: 9.0 mA
3. 初期振幅: $y_0 = 4.0$ mm
4. 初期ベータロンチューン:
(ν_x, ν_y) = (9.660, 4.240)
5. パラメタ: 8極磁場の強さ K_3
変更範囲: $-390 \sim 390$ m⁻³
6. 超伝導ウイグラー: 消磁
7. アンジュレータのギャップ:
全開
8. その他のパラメタは固定
9. Twiss parameter :
 $\alpha_y = 0.2354, \beta_y = 4.384$ m





- 振幅依存チューンシフト

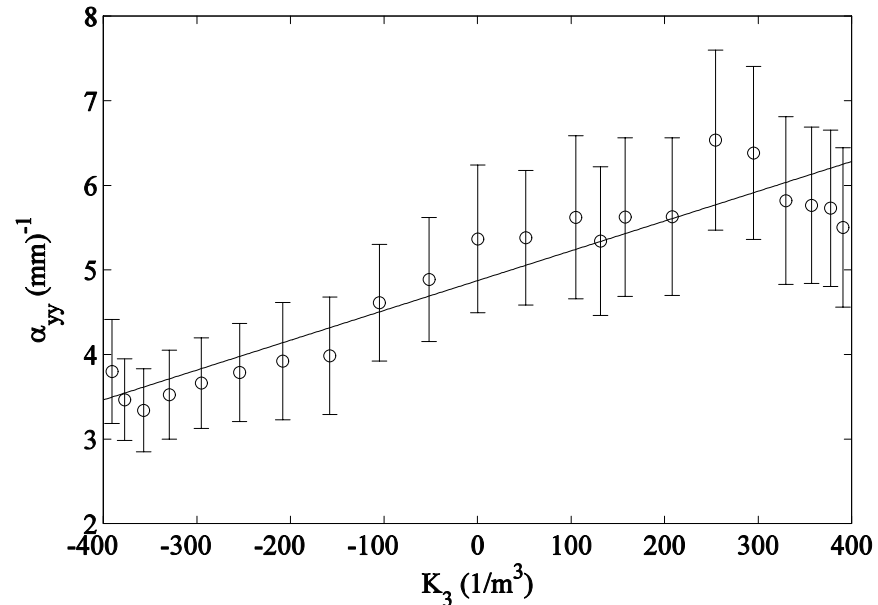
$$\alpha_{yy} = a_0 + a_1 K_3,$$
- a_0 : 6極磁場による項(定数)
- a_1 : 8極磁場による項

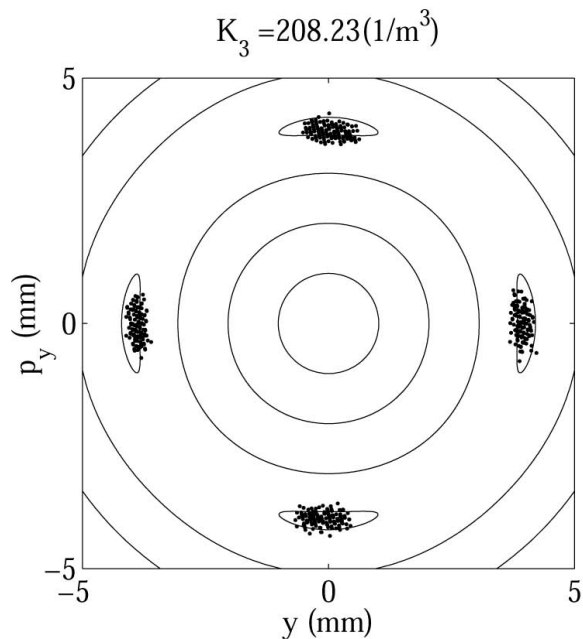
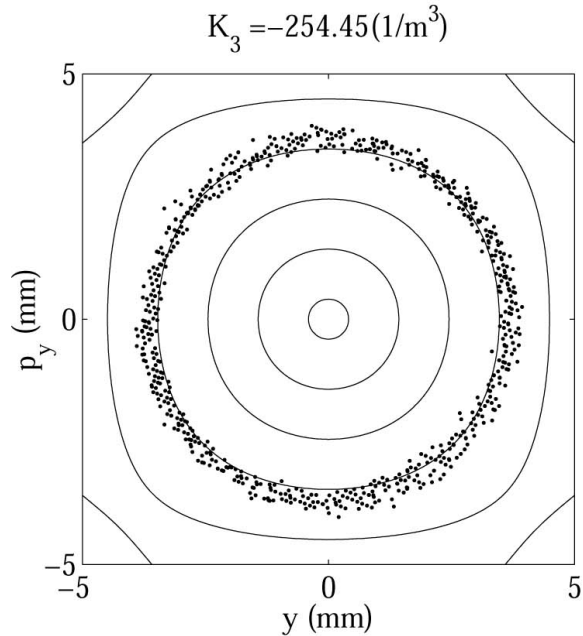
• 実験でもほぼ線形の応答

• 係数:

1. $a_0 = 4.873 \text{ mm}^{-1}$

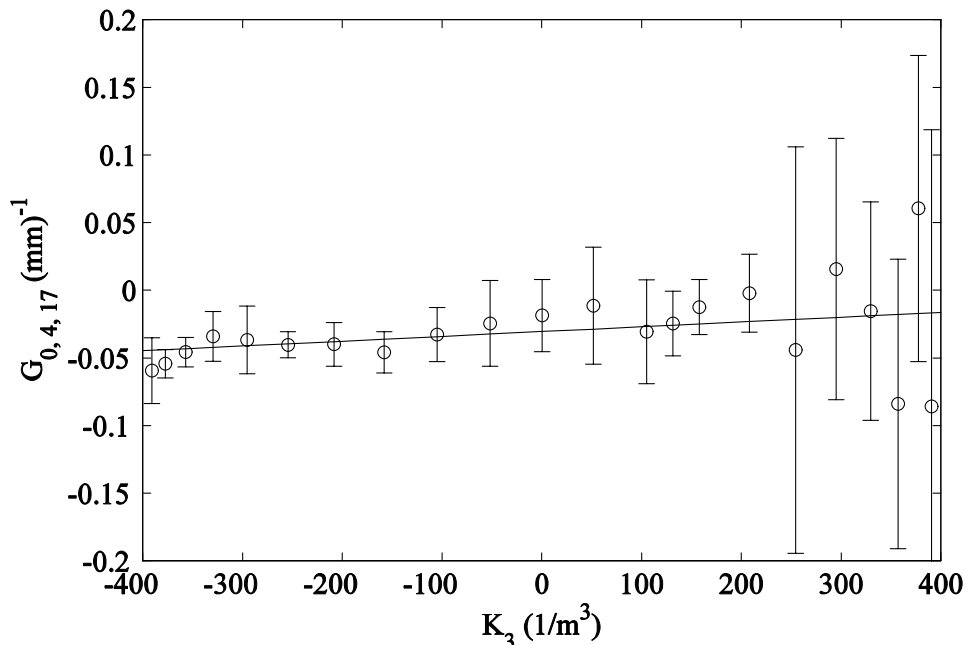
2. $a_1 = 0.00352 \text{ m}^3 \text{ mm}^{-1}$





- 共鳴の強さ $G_{0,4,l} = g_{0,4} + g_{1,4}K_3,$
- ほぼ、線形な応答になった
- 誤差が大きい部分: 振動の減衰が速い
- 係数:
 1. $g_{0,4} = -0.0306 \text{ mm}^{-1}$
 2. $g_{1,4} = 3.54 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ mm}^{-1}$
- オフセット項の存在

⇒ 8極磁場の他に垂直4次共鳴の起源がある
(超伝導ウィグラーやアンジュレータか?)



議論 : 振幅依存チューンシフト

- チューンシフトの応答: K_3 の1次になると予想された

$$\alpha_{yy} = a_0 + a_1 K_3,$$

- 実験結果: K_3 の1次関数となった
- 摂動展開によって計算した振幅依存チューンシフトと比較する

SAD での振幅依存チューンシフトの計算

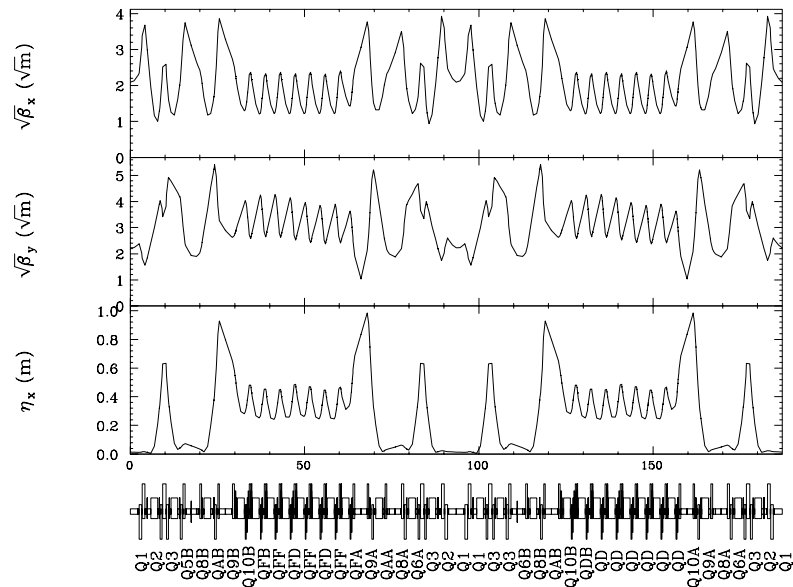
- 8極磁場に起因する項: K_3 に対して1次

$$\alpha_{yy,4} = \frac{1}{16\pi} \oint ds S_4(s) \beta_y^2(s),$$

- 6極磁場に起因する項: K_3 に依存しない

$$\alpha_{yy,3} = -\frac{1}{64\pi} \int_0^C ds S_3(s) \beta_x^{1/2}(s) \beta_y(s) \int_s^{s+C} ds' S_3(s') \beta_x^{1/2}(s') \beta_y(s') \\ \times \left[4 \cdot \frac{\cos\{\Psi_x(s, s')\}}{\sin(\nu_x \pi)} + \frac{\cos\{\Psi_x(s, s') + 2\Psi_y(s, s')\}}{\sin\{(\nu_x + 2\nu_y)\pi\}} \right. \\ \left. + \frac{\cos\{\Psi_x(s, s') - 2\Psi_y(s, s')\}}{\sin\{(\nu_x - \nu_y)\pi\}} \right],$$

- SAD でベータatron関数を計算
- 6極電磁石、8極電磁石の位置で上記の積分を実行
- 実際の積分は、電磁石を分割して計算し和をとる



振幅依存チューンシフトの比較

- 振幅依存チューンシフト:

$$\alpha_{yy} = a_0 + a_1 K_3,$$

- 実験から求めた値

- 垂直4次共鳴

1. $a_0 = 4.873 \text{ mm}^{-1}$

2. $a_1 = 0.00352 \text{ m}^3 \text{ mm}^{-1}$

- 摂動展開から計算(SAD使用)

- 垂直4次共鳴

1. $a_0 = 5.608 \text{ mm}^{-1}$

2. $a_1 = 0.00320 \text{ m}^3 \text{ mm}^{-1}$

- 定数項(6極起源)の違いはあるが、線形項(8極起源)はほぼ等しい値となった

議論 : 垂直4次共鳴の起源

- 8極磁場が共鳴の起源の場合
⇒ 共鳴パラメタの応答は、 K_3 に対して1次になるはず

$$G_{0,4,l} = g_{0,4} + g_{1,4}K_3,$$

- 実験でも1次的な振舞いとなった
⇒ 共鳴の起源 : 8極磁場
- さらに、オフセット項が存在
⇒ 8極磁場以外の垂直4次共鳴の起源が存在する
共鳴の起源: 超伝導ウイグラー、アンジュレータ?

位相空間モニターでの観測のまとめ

- ベータatron振動の共鳴について、実験的手法により研究を行った
- 実験的に共鳴を調べるため：
高速キッカー電磁石、位相空間モニターシステムを開発した
- 垂直4次共鳴について実験を行った
- 垂直4次共鳴 : $4\nu_y = 17$ (非構造共鳴)
 1. 振幅依存チューンシフト: 1次関数
 2. 共鳴の強さ: 1次関数
 3. 摂動から予想される振舞いと一致
- 共鳴の起源の推測
 1. 垂直4次共鳴 : 8極磁場

2. 粒子トラッキング

リングの超周期の乱れと共鳴の強さ

非構造共鳴

- 超周期: N
- 周期性: $K(s + C/N) = K(s)$

- 1次元共鳴の共鳴条件: $nv_y = Nl$
($l = 1, 2, 3, \dots$)

- PF-ring での超周期 : $N = 2$

$$\Rightarrow nv_y = 2l \quad :$$

理想的な条件下では、

nv_y が偶数の場合のみ共鳴が現れる

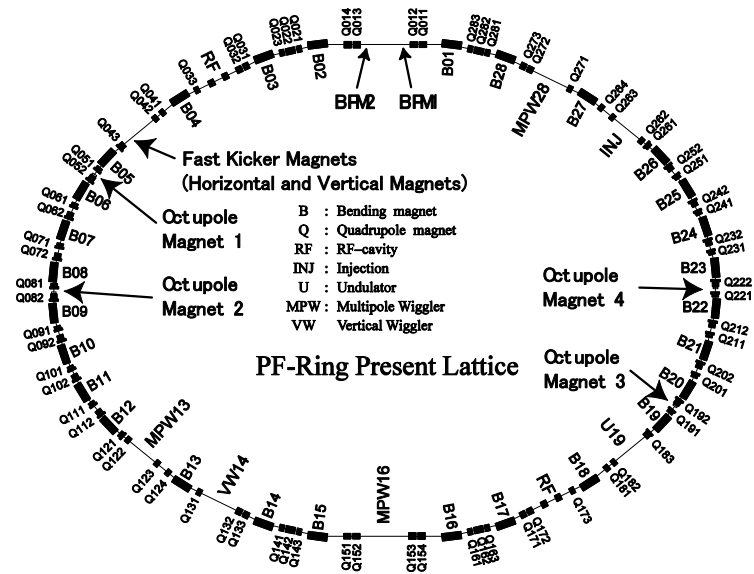
- 実験を行った共鳴:

1. 垂直4次共鳴 : $4v_y = 17 \Rightarrow$ 実験では強い共鳴が観測された
2. 垂直3次共鳴 : $3v_y = 13$

\Rightarrow 理想的には非常に弱い共鳴

ラティスの周期性の乱れがあると強くなる

- 超周期が乱れた場合、共鳴はどうなるか? \Rightarrow 粒子トラッキングで検証



超周期と共鳴の強さ

- 粒子トラッキングにより超周期が乱れた場合の共鳴の変化を調べた
- SADでオプティクス関数を計算
- 例として、水平4次共鳴について計算
- 粒子数400個(ウェイクによる相互作用あり)

- 1台の4極電磁石の強さを変えてトラッキング(チューンは同じに調整)

⇒ 超周期を乱すことに対応

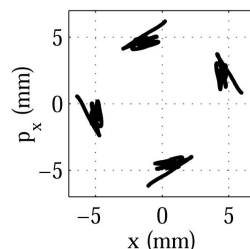
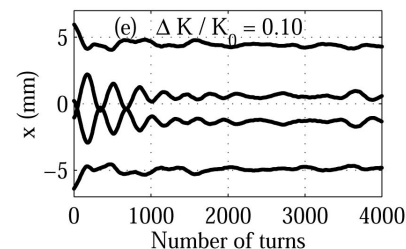
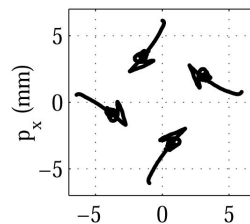
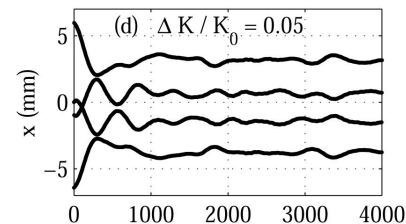
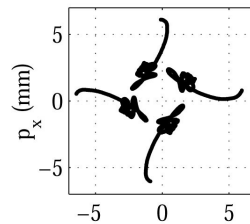
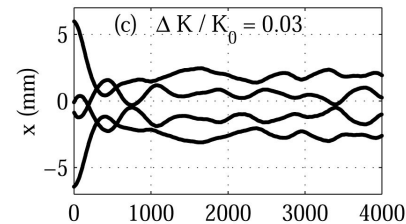
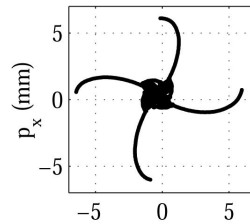
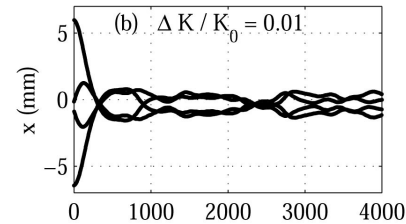
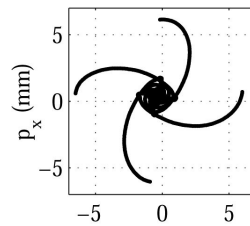
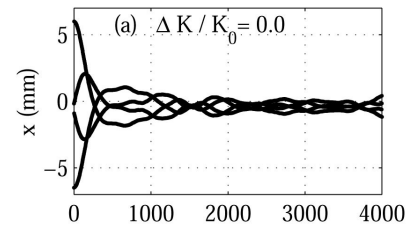
- 周期性の乱れが少ない(上の図)

⇒ 安定なアイランドが生じない

- 周期性の乱れが増える(下の図)

⇒ 安定なアイランドが形成される

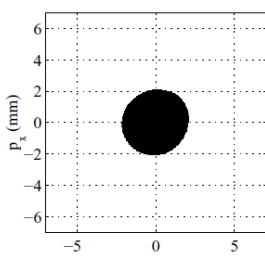
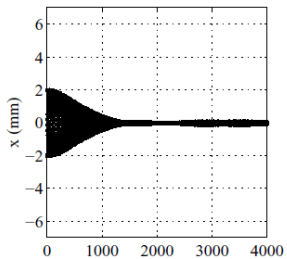
- 超周期の乱れが共鳴を強くする



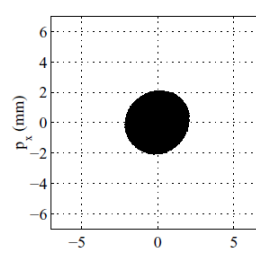
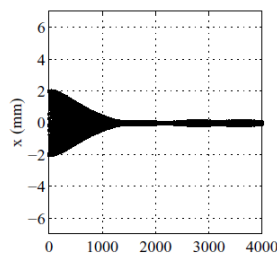
トラッキングの結果

- $K \Rightarrow K_0 + \delta K$: 1台のQ-magのみの値を変える
- 左図から: $\delta K / K_0 = 0.0, 0.02, 0.05$

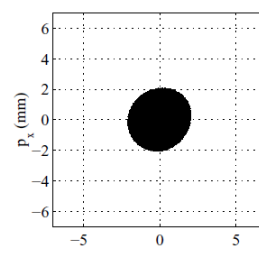
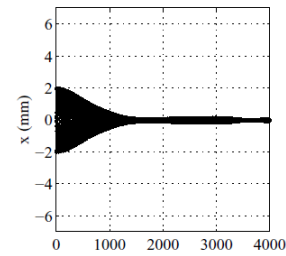
(a) $x_0 = 2.0$ mm



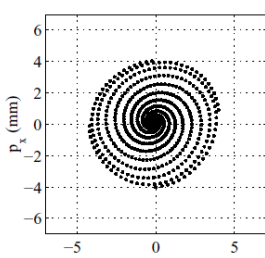
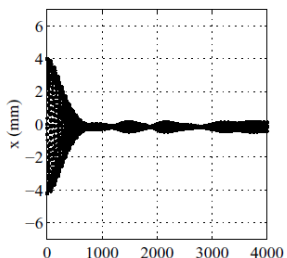
(a) $x_0 = 2.0$ mm



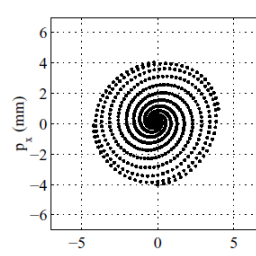
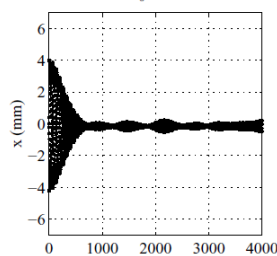
(a) $x_0 = 2.0$ mm



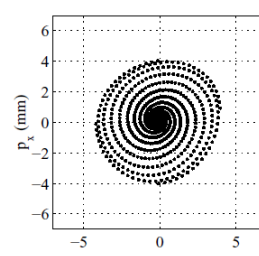
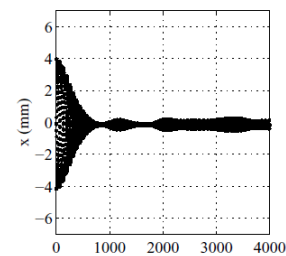
(b) $x_0 = 4.0$ mm



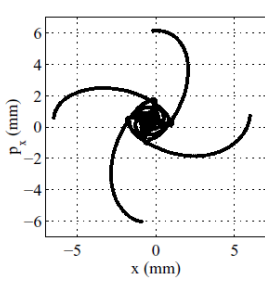
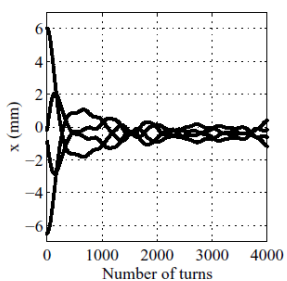
(b) $x_0 = 4.0$ mm



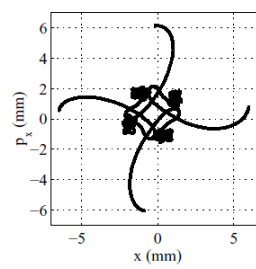
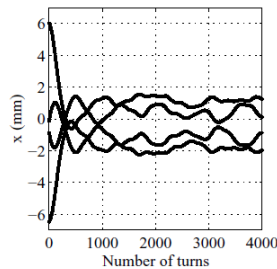
(b) $x_0 = 4.0$ mm



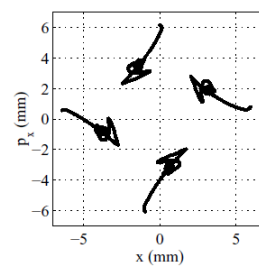
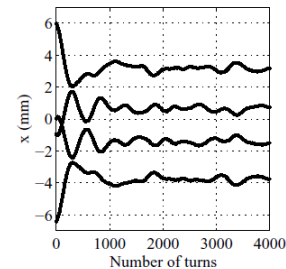
(c) $x_0 = 6.0$ mm



(c) $x_0 = 6.0$ mm



(c) $x_0 = 6.0$ mm



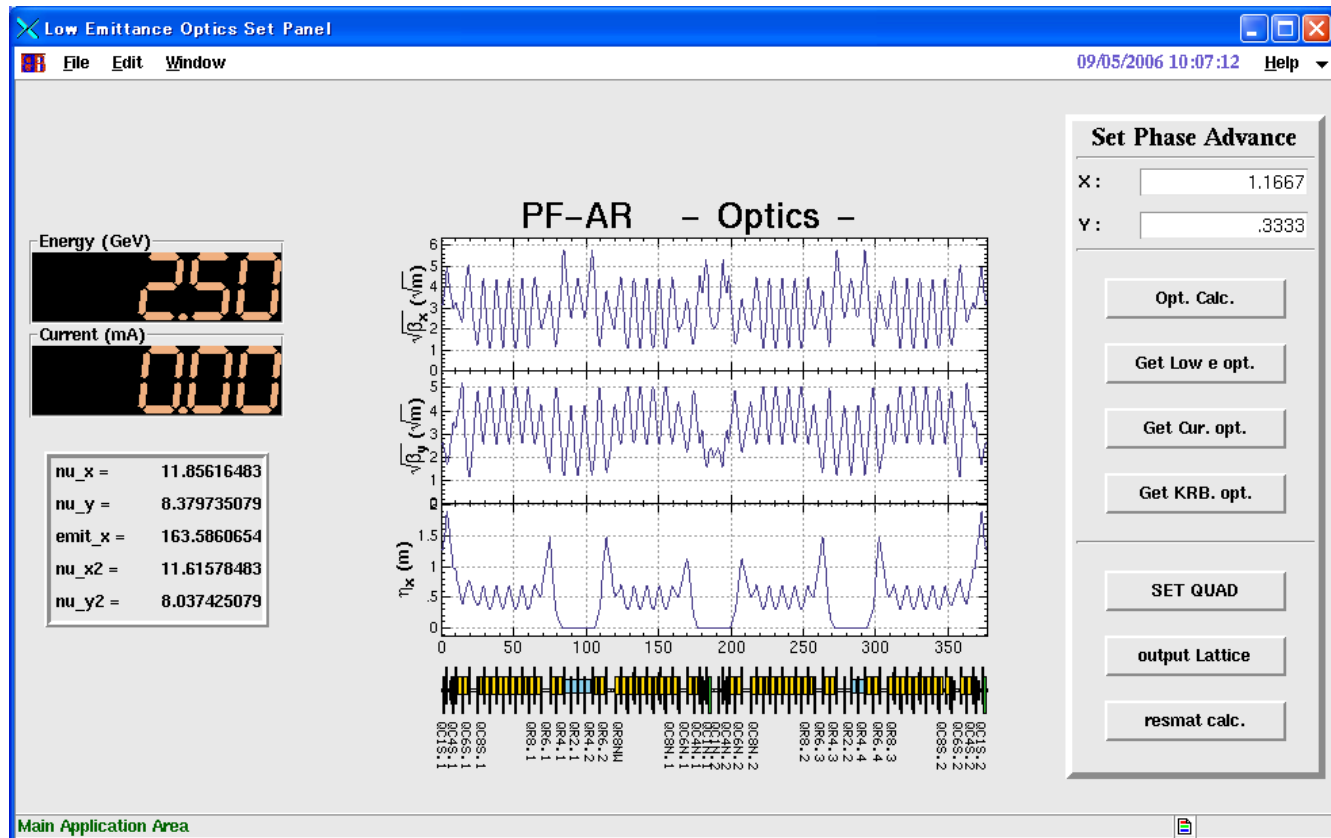
トラッキングのまとめ

- 共鳴の強さと超周期の関係を粒子トラッキングによって調べた
- SAD でオプティクス関数を計算
- トラッキングの結果：
 - 周期性が乱れが大きい場合の方が、位相空間上に安定なアイランドが形成された
 - ⇒ 周期性の乱れが共鳴を強くする

PF-AR の低エミッタンス化、 加速・減速調整

PF-AR の低エミッタンス化

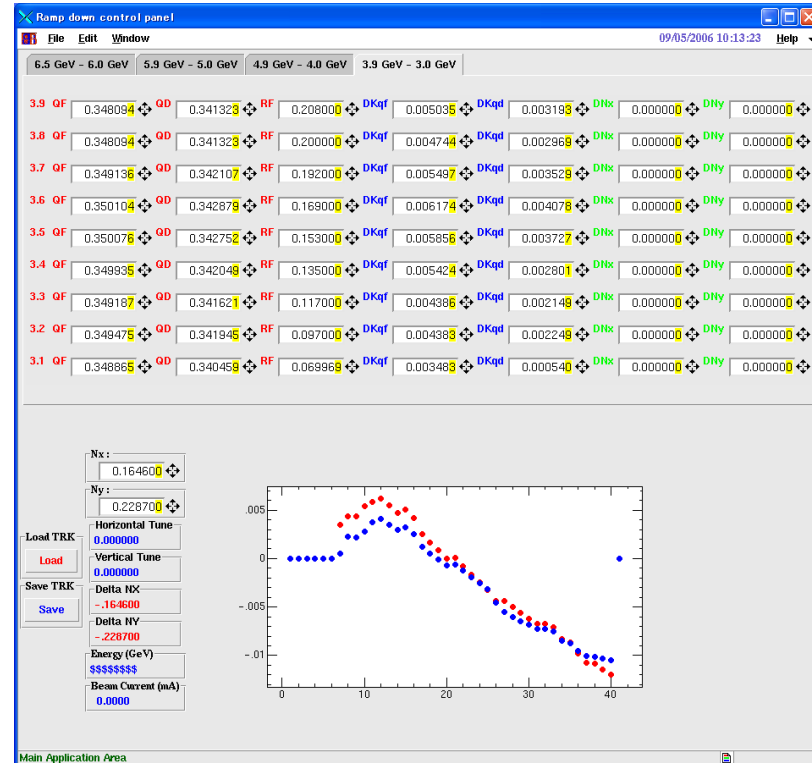
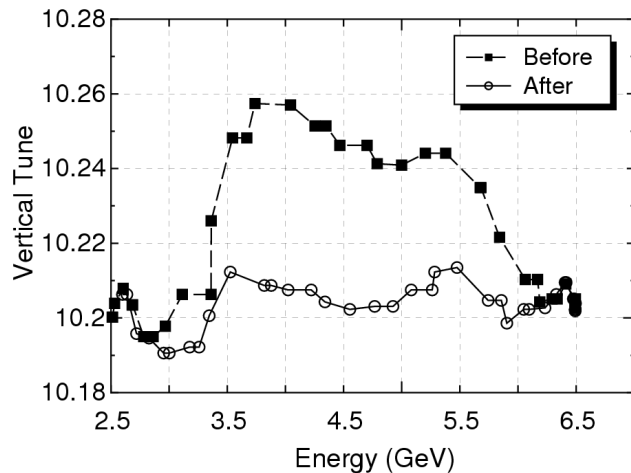
- これまでに、PF-AR の低エミッタンス化したオプティクスのマシンスタディを行ってきた
- 6.5 GeV での水平方向エミッタンス: 290 nmrad \Rightarrow 160 nmrad



加速・減速調整

- PF-AR の入射
 - 入射エネルギー: 3.0 GeV \Rightarrow ユーザー運転: 6.5 GeV
- 入射後に、3.0 GeV から 6.5 GeV まで加速する必要がある
- 加速・減速時にチューンの変動が起きる

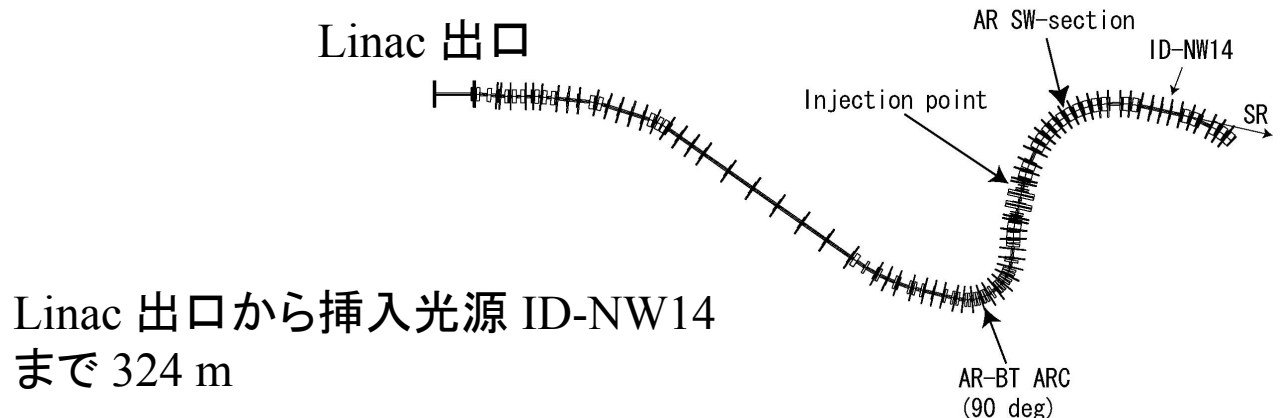
\Rightarrow 各エネルギーでのチューンのずれを測定し、SADで求めた補正係数を用いてチューンを調整



PF-AR での短パルス光源の検討

計画の概要

- Linac で $\sigma = 2\text{ps}$ 程度のバンチ長のビームを生成
- この電子ビームを短いバンチ長のまま、Linac から発光点となる挿入光源ID-NW14 まで輸送 (ビームラインは、PF-AR北西棟BL-NW14)
- 挿入光源通過後は、**リングにビームを貯蔵せず**ビームダンプに捨てる (シングルパスでの運転を考えているが、数ターンさせても良い)
- 常にLinacからの短バンチビームを利用することが可能
- Linac で生成された短バンチ長ビームを、**バンチ長を伸ばさず、挿入光源まで輸送できるか？**



ビーム輸送路でのバンチ長の変化

- 電子ビームのバンチ長

$$z_1 = z_0 + R_{56} \cdot \delta$$

- z_0 : 入り口の進行方向の位置、 z_1 : 出口の位置
- δ : 運動量誤差
- 電子ビームのバンチ長を一定のままビーム輸送路を通過させるためには、 $R_{56} = 0$ という条件が必要である

$$R_{56} = \int_{Bend} ds \frac{\eta_x}{\rho}$$

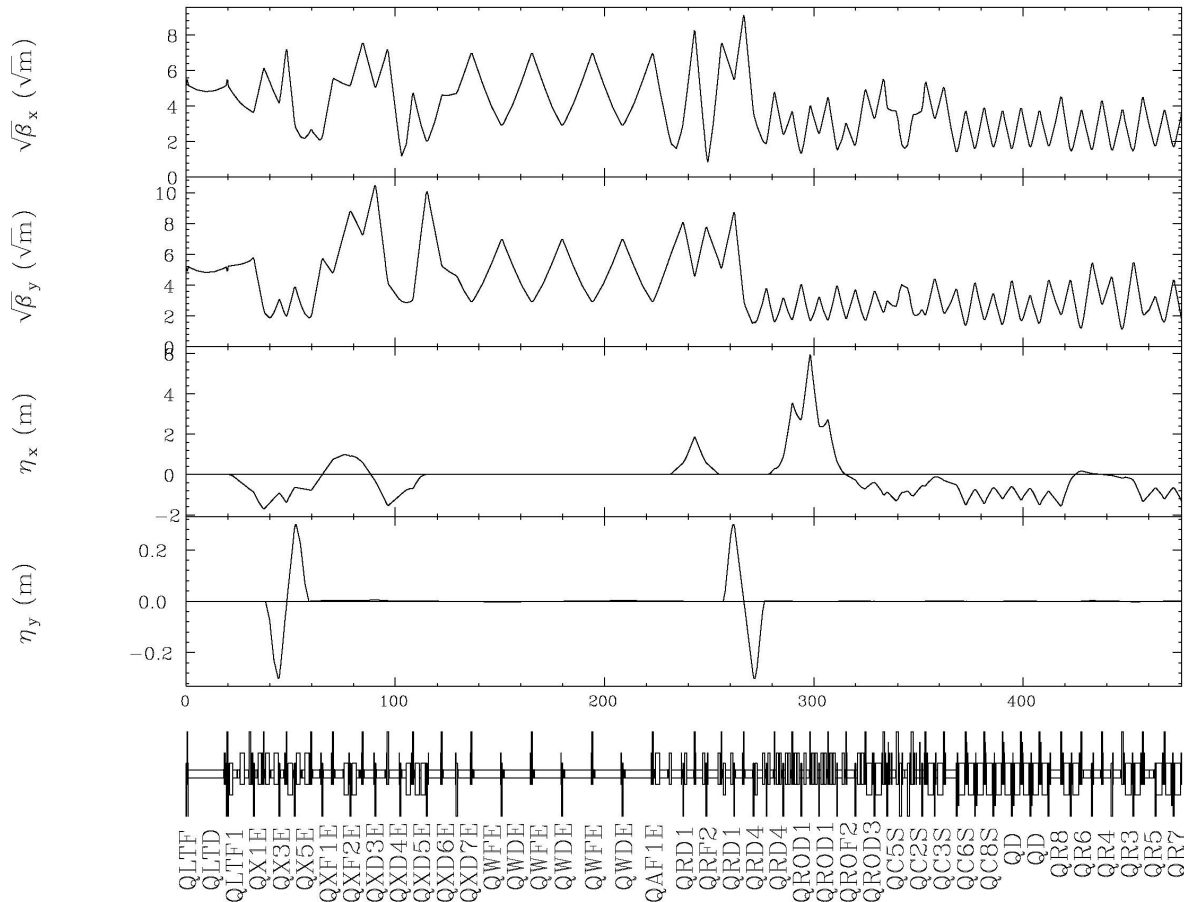
- SAD での R_{56} の計算

- 偏向電磁石の中で分散関数を計算
- dp/p を変えて、 z の変化を計算
- SADのコマンド

- $r560 = (\text{OneTurnTransferMatrix}/.\text{Emittance}[\text{Emittance}->\text{False}, \text{OneTurnInformation}->\text{True}])[[5,6]];$

ビーム輸送路の R56 計算結果

20:20:46 Friday 03/11/2005



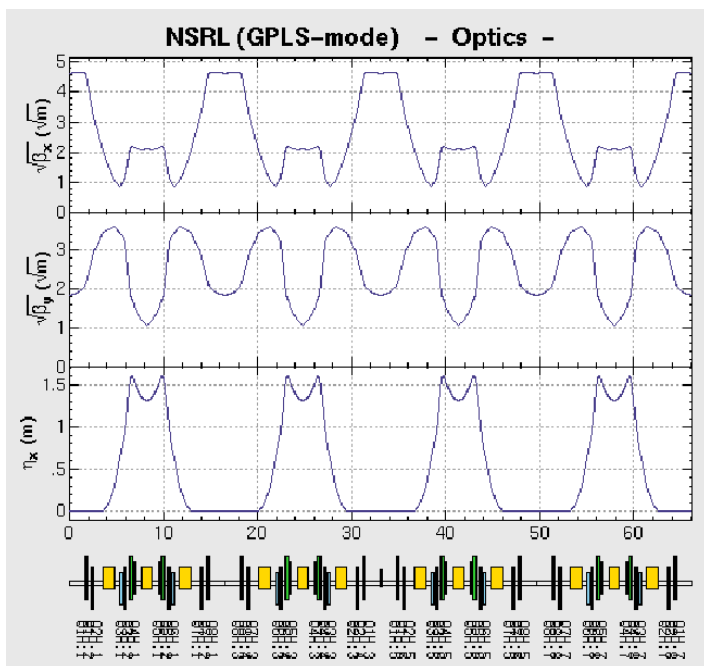
R56 の計算結果

- $R_{56} = 4.65$ m
- $dp/p = 0.001$ とすると、バンチ長の変化は 4.65 mm (片幅、15.5 ps)
- Linac で作った 2ps のビームが、7倍以上になる
- 現状のままでは難しい
- 現在は、PF-ring のBTでの建設を開始している

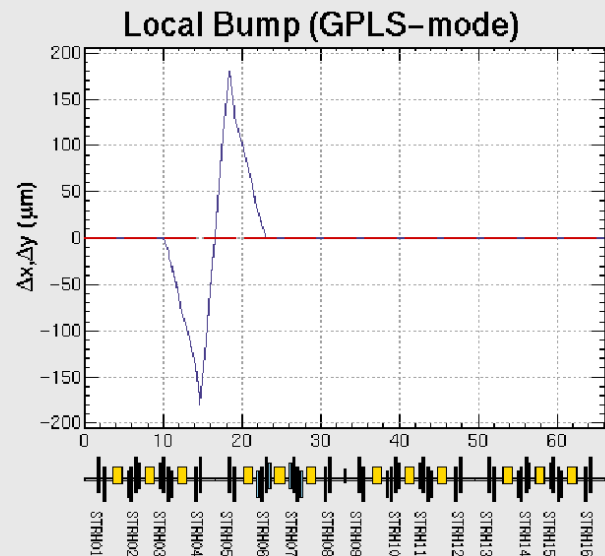
Note PC + cygwin + SAD

NSRL(合肥、中国科学技術大学)での
入射バンプの計算

- 2004年2月に中国科学技術大学の放射光加速器である NSRL でマシスタディを行った
- その際に、入射バンプを調整することになり、その場で持参したノートPC内のSADを用いてバンプを計算した
- 計算したシステム: 持参したノートPC
構成: ノートPC(Windows) + cygwin + SAD



ST Name	$\Delta\theta$ (mrad)
STRH03	0.02563
STRH04	-0.09264
STRH05	0.09271
STRH06	-0.02560



まとめ

- 2.5 GeV PF-ring
 - ベータatron振動の非線形共鳴の研究
 - 横方向ビーム不安定性の研究
- 6.5 GeV PF-AR
 - 低エミッタンス化
 - 加速・減速調整
 - 短パルス光源の検討
 - オプティクス調整
- マシンディでのデータ解析やシミュレーションのために SAD を使用
 - ビーム光学関数の計算
 - トラッキング用転送行列の計算
 - 加速器の制御
 - データ解析
- Windows にお手軽にインストールできると楽かなと思う

資料

横方向ビーム不安定性

振幅依存チューンシフトと不安定性の抑制

横方向不安定性の8極磁場依存性

- PF-ring ではマルチバンチ運転時に横方向不安定性が観測されている
- ユーザー運転では、
 - 直線部改造以前: 8極磁場を励磁
 - 直線部改造後: バンチ毎フィードバックを用いて不安定性を抑制していた

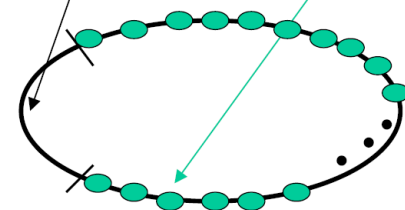
- 研究で明らかにしたいこと

- 不安定性の発生条件
- 8極磁場によるランダウ減衰の効果
- デコヒーレンスの効果
- イオン捕獲の効果

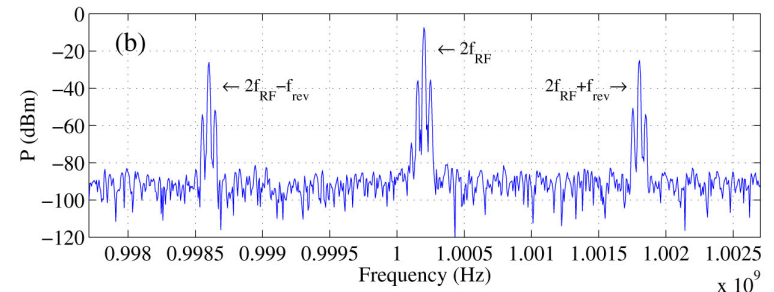
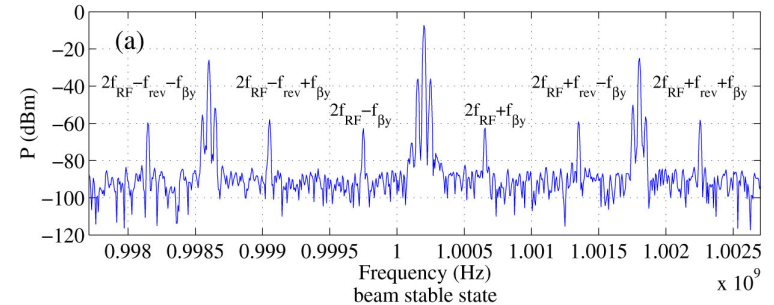
- Normal user operation

multi bunch mode

- Initial beam current 450 mA
- Consecutive 280 stored buckets
- 32 empty buckets



beam unstable state



8極磁場による振幅依存チューンシフト

- 振幅依存チューンシフト

$$\begin{pmatrix} \Delta\nu_x \\ \Delta\nu_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix}, \quad (1)$$

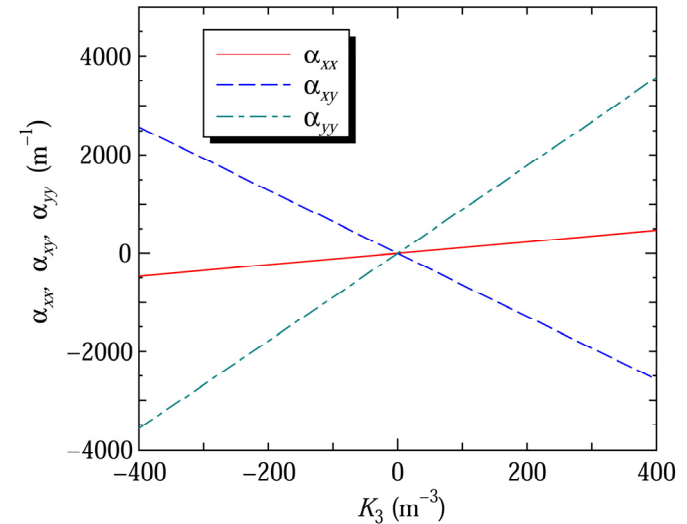
- 8極磁場によるもの:

$$\alpha_{xx} = \frac{1}{16\pi} \int_s^{s+C} ds S_4(s) \beta_x^2(s), \quad (2)$$

$$\alpha_{xy} = \alpha_{yx} = -\frac{1}{8\pi} \int_s^{s+C} ds S_4(s) \beta_x(s) \beta_y(s), \quad (3)$$

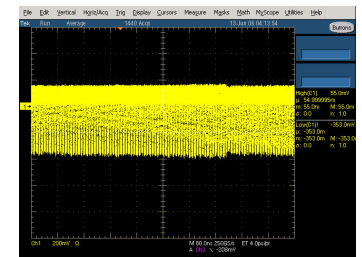
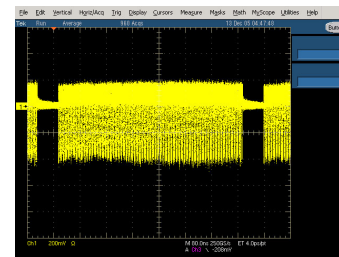
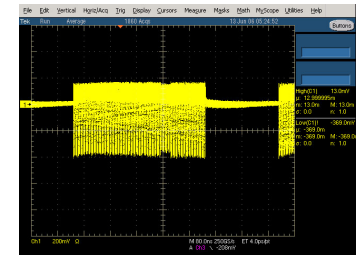
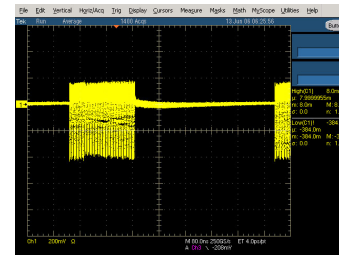
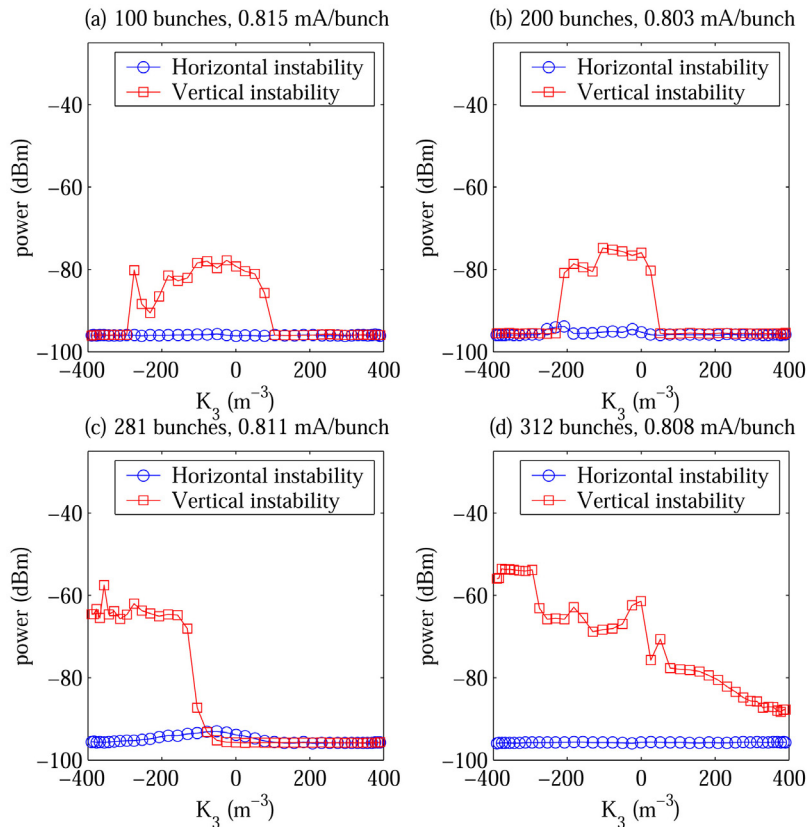
$$\alpha_{yy} = \frac{1}{16\pi} \int_s^{s+C} ds S_4(s) \beta_y^2(s), \quad (4)$$

- SAD でベータatron関数を計算
- 8極電磁石の中で上記の積分を実行
- 振幅依存チューンシフトにより、ビームにチューンの拡がりが生じる
⇒ ランダウ減衰



不安定性の8極磁場依存性の測定例

- 1バンチあたりのビーム電流を 0.8 mA / bunch に設定
- 蓄積するバンチ数を変化 (100, 200, 281, 312 bunch)
- 8極磁場を $-400 < K_3 < 400$ (m^{-3}) まで変化させる



バンチ圧縮について

- 空洞で位相空間の分布を傾ける(k)
- BT のR56 により、位相空間で分布が回転
- 発光点に来たときに、バンチ長が短くなるようにしたい
- 転送行列は次のように書ける

RF Accelerating Structure

$$\begin{pmatrix} z_j \\ \delta_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_i \\ \delta_i \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} z_f \\ \delta_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{56} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_i \\ \delta_i \end{pmatrix}$$

Beam Transport line

$$\begin{pmatrix} z_f \\ \delta_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{56} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_j \\ \delta_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + kR_{56} & R_{56} \\ k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_i \\ \delta_i \end{pmatrix}$$

$$1 + kR_{56} = 0$$

を満たすようなkとしたとき

$$\sigma_{z_i} = \langle z_i \rangle, \quad \sigma_{\delta_i} = \langle \delta_i \rangle$$

$$\sigma_{z_f} = \langle z_f \rangle = |R_{56}| \sigma_{\delta_i}$$