

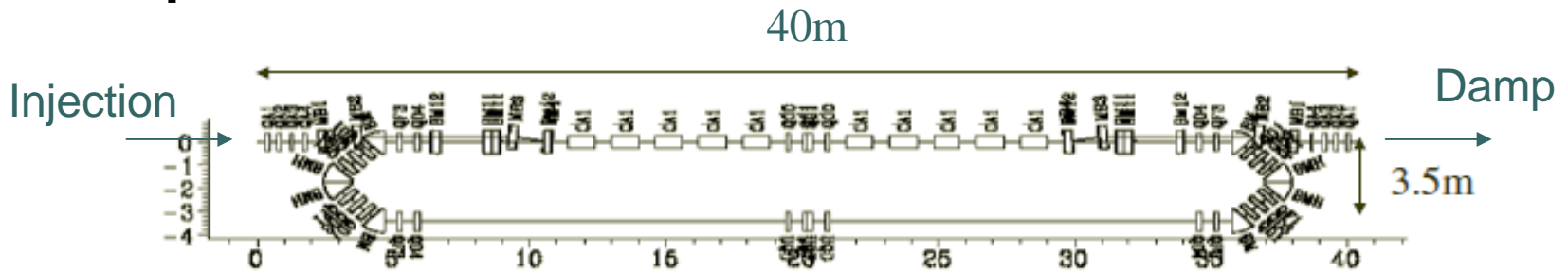


# 周回部におけるバンチ圧縮とCSRによるemittance growth

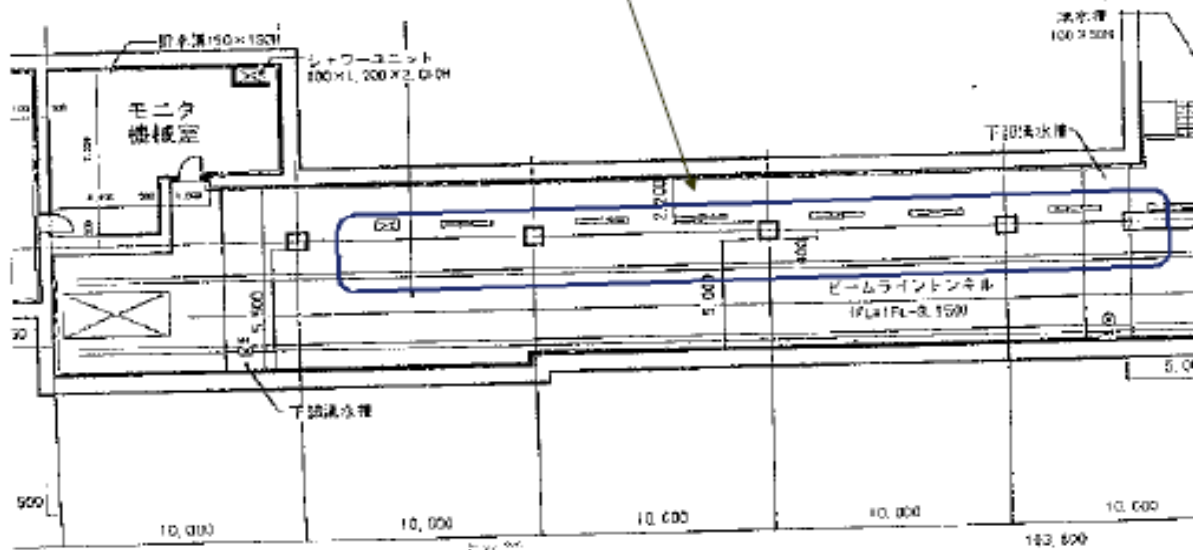
加速器研究施設  
(現在、分子科学研究所)

島田 美帆

# 200MeV ERL Test Facility



設計条件: 陽子加速器棟に収納可能なこと



# パラメーターの理想と目標

## ○ 理想的なビームパラメーター

- 小さな規格化エミッタンス  $\varepsilon_{pnx} < 100\text{nm rad}$   
(X線の回折限界)

- 短いバンチ長  $\sigma_z \sim 0.1 \text{ psec}$

- 大電流  $\sim 100\text{mA}$

(ビーム不安定性が起きない範囲での最大値)

しかし、大電流で短いバンチ長では**CSRによるエミッタンス劣化が甚大**

## ○ 当面の目標

- バンチ長1psec、100mAで低エミッタンスを実現 (High-current mode)
- **バンチ長0.1psec、低エミッタンスを維持しながらできる限り大電流(Short-bunch mode)**

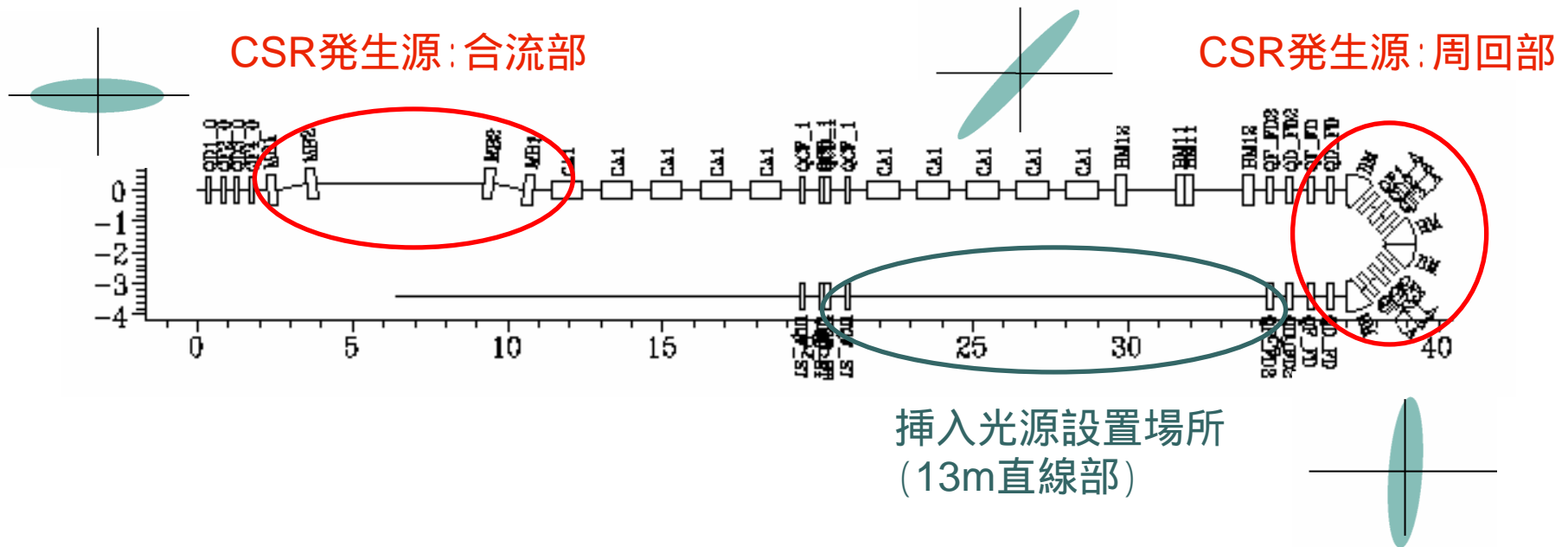
低エミッタンス維持……規格化エミッタンス  $\varepsilon_{pnx} = 100\text{nm rad}$  で入射、  
光源挿入部で  $\varepsilon_{pnx} < 200\text{nm rad}$  を目指す。



# Parameters of ERL Test Facility

- Max. beam energy : 205 MeV
- Max. average beam current : 100 mA
- Max. bunch charge : 77 pC
- Operating frequency : 1.3 GHz
- Normalized transverse emittance (x/y) : 100 nm rad
- Rms bunch length : 1 ps    0.1ps
- Rms energy spread :  $5 \times 10^{-5}$
- RF cavity gradient : 20 MV /m
- Injection beam energy : 5 MeV
- $R_{56}$  in one TBA : -0.7 ~ 0.0

# 周回部でのバンチ圧縮

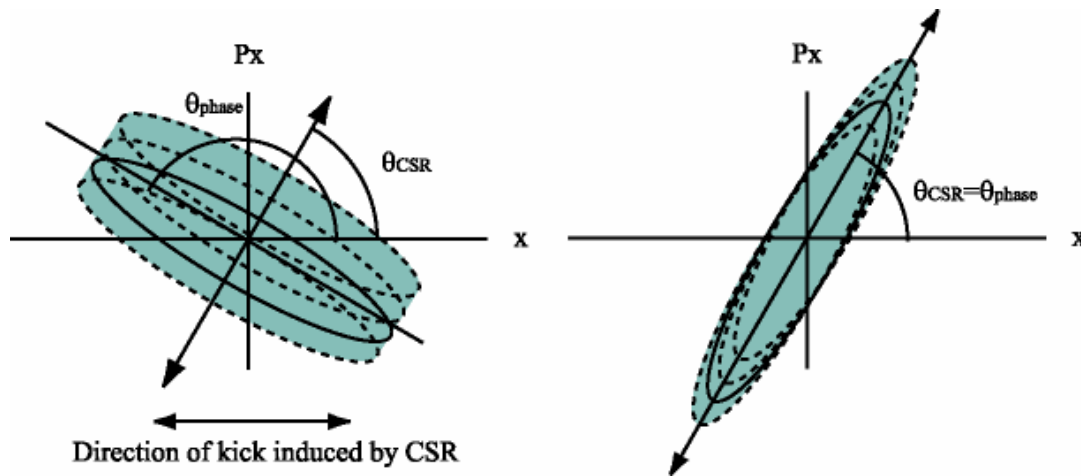


- 現在の光学系ではCSRが発生する箇所は合流部と周回部
  - 0.1psecで入射すると、5mAでも合流部で、すでに $\varepsilon_x > 200\text{nmrad}$   
周回部でバンチ圧縮する必要性
- 今回は合流部のCSRを無視し、周回部のCSRによるエミッタンスの劣化を最小化する光学系を検証

# CSRによるtransverse phase spaceの変化

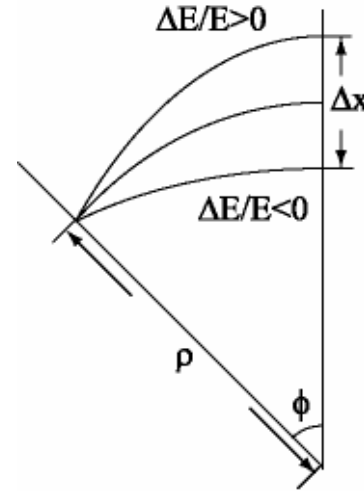
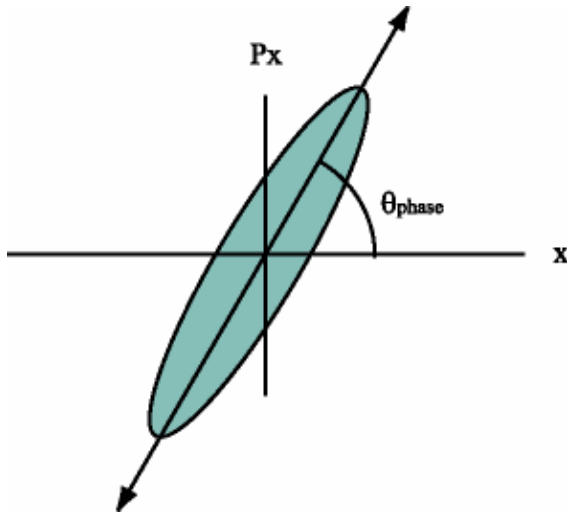
## $\alpha$ の調整によるエミッタンス増加の抑制

R. Hajima, Nuclear instruments and Methods in Physics Research A 528 (2004) 335-339



- CSRによるキックの方向  $\theta_{\text{CSR}}$  とARC出口の位相空間の傾き  $\theta_{\text{Phase}}$  が等しければ、 $\epsilon_{\text{pnx}}$  の増加を最小に抑えることができる。

# $\theta_{\text{Phase}}$ と $\theta_{\text{CSR}}$ の近似的な推定



- 線形近似ではtwiss parameterで推定可能

$$\tan(2\theta_{\text{Phase}}) = -2\alpha / (\beta - \gamma)$$

- 位相空間内の移動方向は偏向磁石の特性で決まる。

$$\begin{aligned}\theta_{\text{CSR}} &= \Delta x' / \Delta x \\ &= \sin\phi / \rho (1 - \cos\phi)\end{aligned}$$

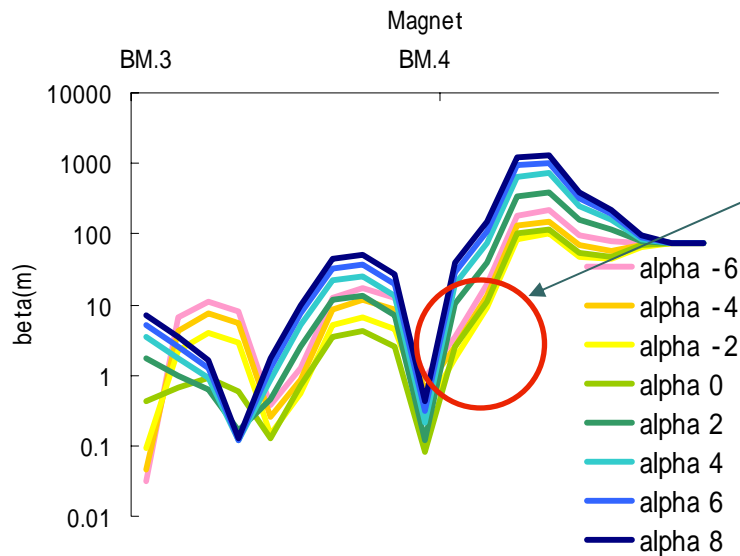
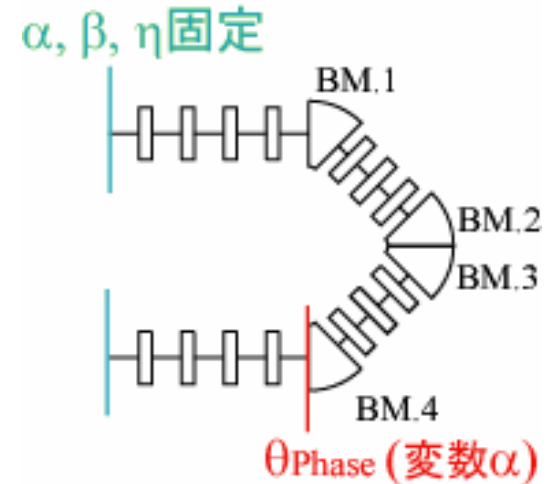
偏向磁石の特性は決まっているので(現時点)、  
Quadを使って $\theta_{\text{Phase}}$ をコントロールする

# $\alpha$ の最適化と $\theta_{\text{Phase}}$ の変化

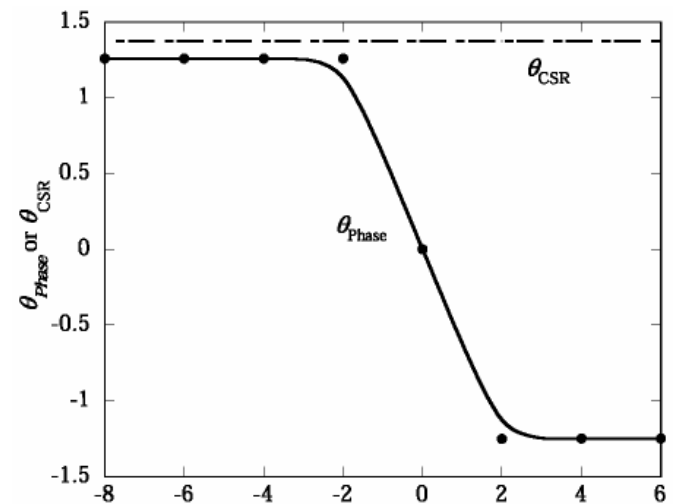
( $R_{56}=0$ の例)

- 周回部前後のTwiss parameterは固定

$$R_{56} = \int_{\text{ARC}} \eta / \rho \quad \eta \propto \bar{\beta}_{\text{ARC}}$$



Fittingの結果、BM.4出口の $\alpha$ が $\beta$ に比例した。(この2つは独立ではなかった。)



- ここで $\beta\gamma=(1+\alpha^2)/2$ ,  $|\alpha| \gg 1$ ,  $\alpha=\beta'/2=k\beta$ とすると、

$$\theta_{\text{Phase}} = 2\alpha/(\gamma-\beta) = 4k/(k^2-2) = \text{const.}$$

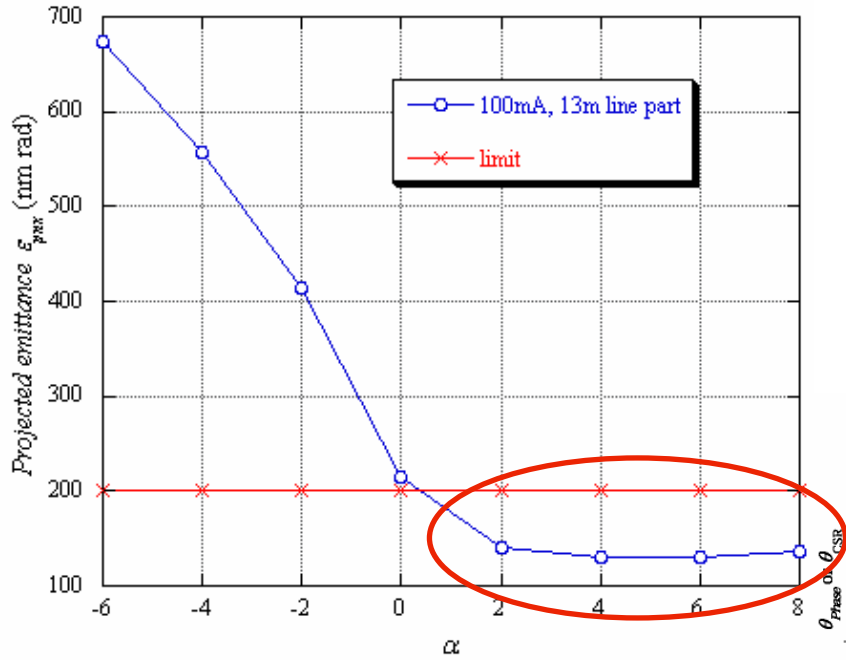
$R_{56}$ によって、とりうる $\theta_{\text{Phase}}$ に限界があるようです。



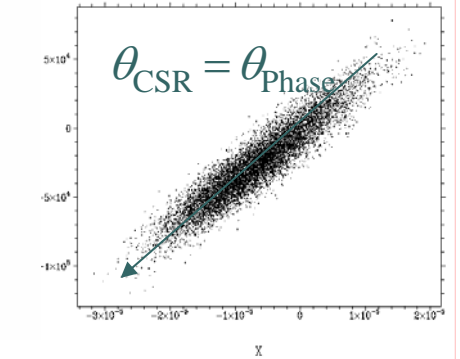
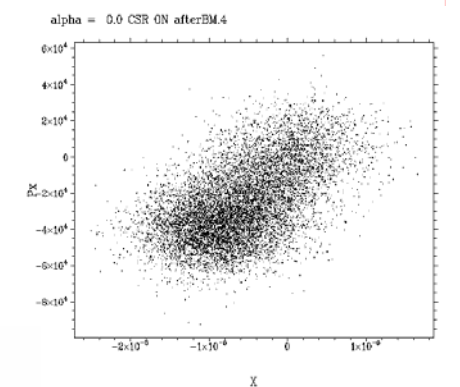
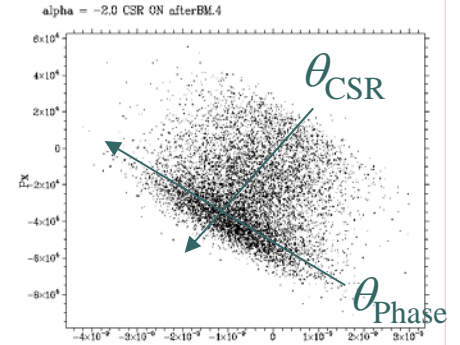
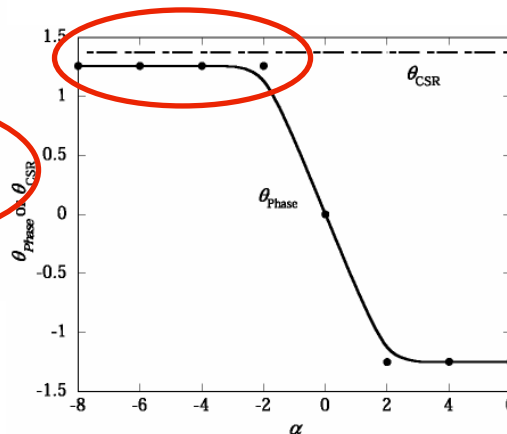
# $\theta_{\text{Phase}}$ の最適化と $\varepsilon_{\text{pnx}}$ の増加

(bunch圧縮なしの例)

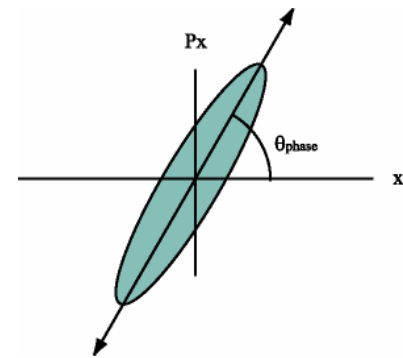
- $\theta_{\text{Phase}}$  が  $\theta_{\text{CSR}}$  に近いときに  $\varepsilon_{\text{pnx}}$  を 200nm rad 以下に抑えられる。  
(横軸 ARC出口の  $\alpha$ , 縦軸  $\varepsilon_{\text{pnx}}$  [nm rad])



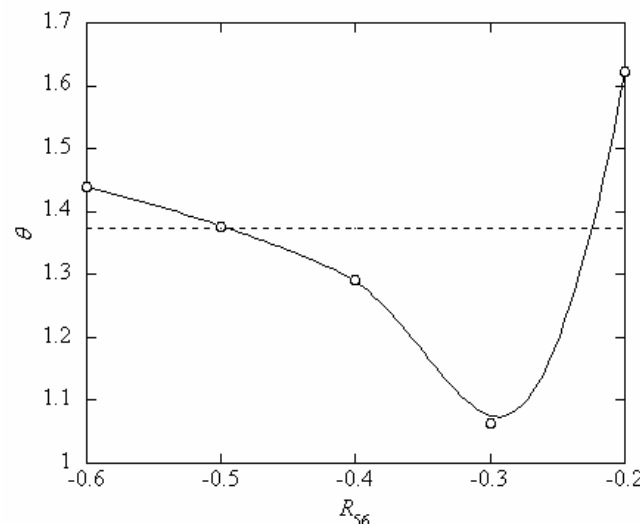
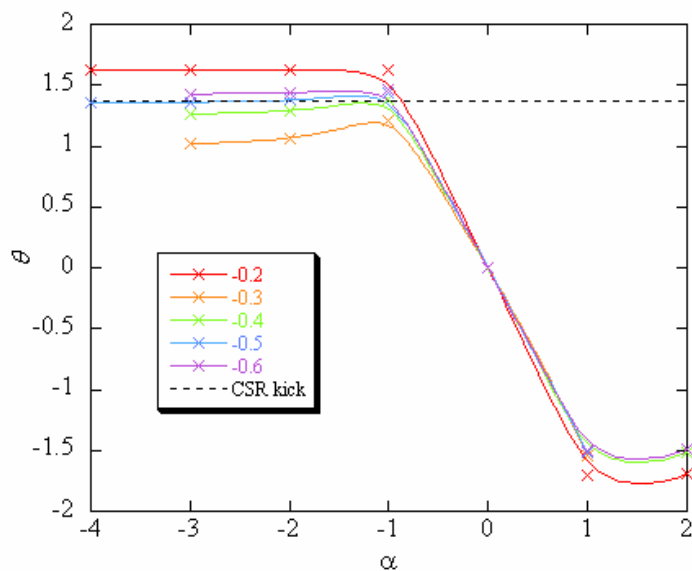
上の図は  $\alpha$  の符号が逆です。



# $R_{56}$ に対する $\theta_{\text{Phase}}$ の変化



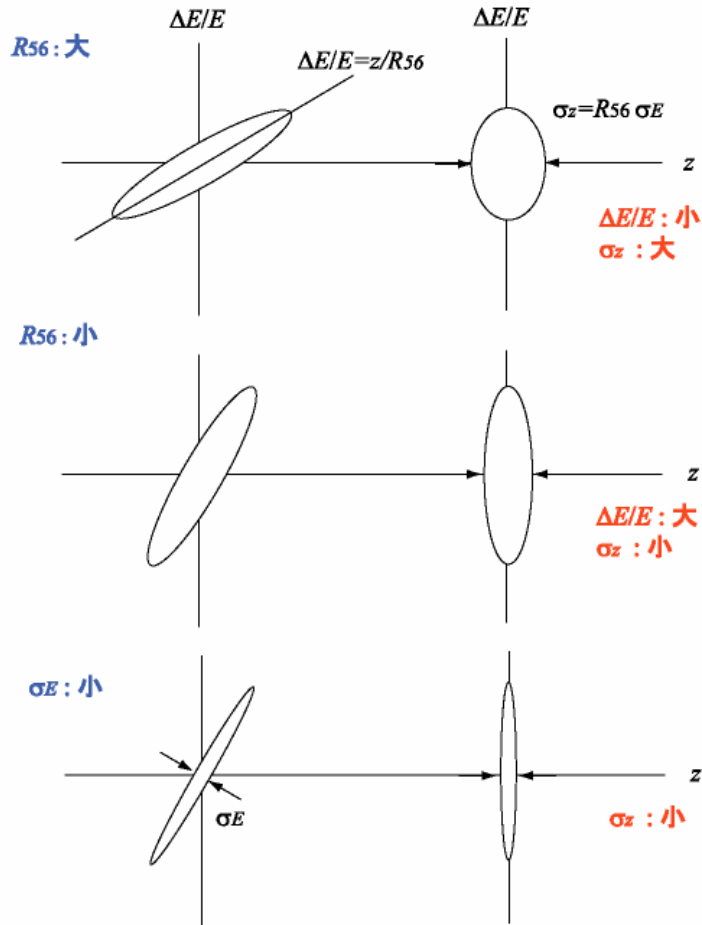
$$\tan 2\theta = 2\alpha / (\gamma - \beta)$$



ARC出口の  $\alpha = -3$

- 角度  $\theta_{\text{Phase}}$  は、 $R_{56}$  によって下限があり、 $R_{56}$  の絶対値が大きいほど、可能な  $\theta_{\text{Phase}}$  が広がる。
- したがって、絶対値が大きい  $R_{56}$  でエミッタンス増加を小さく抑えるように調整できる。

# Bunch compression



- 相対的なエネルギーのずれ  $\Delta E/E$  をもつ粒子が周回部通過後に位置  $\Delta z$  だけずれる。その割合を表すパラメーター  $R_{56}$  は次のように定義される。

$$\Delta Z \cong R_{56} \frac{\Delta E}{E}$$

$$\left[ \cong R_{56} \frac{\Delta E}{E} + T_{566} \left( \frac{\Delta E}{E} \right)^2 + \dots \right]$$

- ARC部に入る前に、波数  $k_{RF}$  の加速波で位相  $\phi_{RF}$  だけずらして  $\Delta E/E$  をつける。

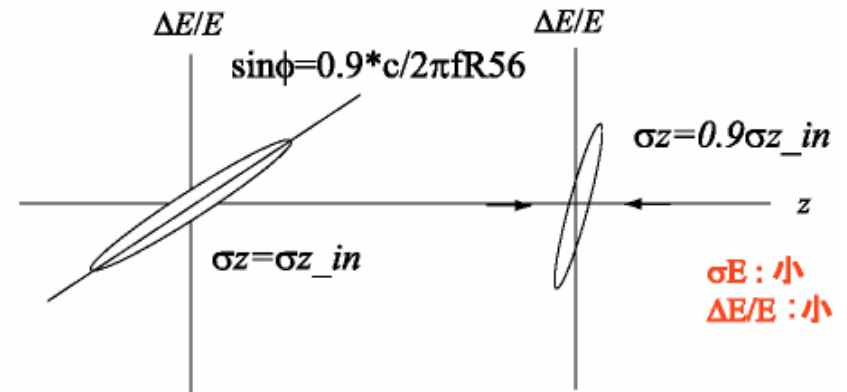
$$k_{RF} \sin \phi_{RF} = \frac{1}{R_{56}}$$

- 計算上の圧縮後のバンチ長  $\sigma_z$

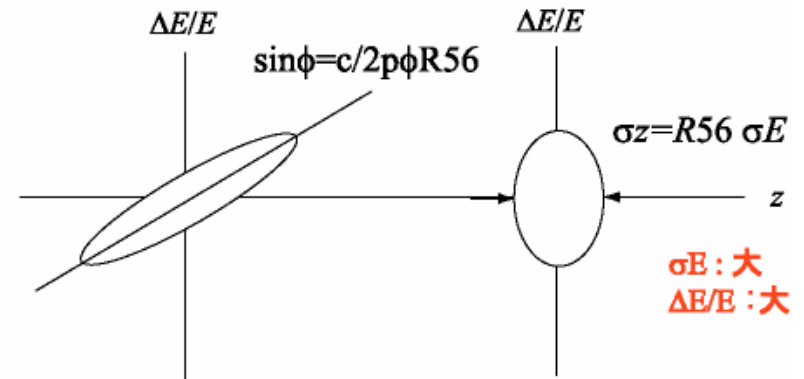
$$\sigma_z = R_{56} \sigma_E$$

# 任意の $R_{56}$ で直線部のバンチ長 $\sigma_z$ を $30\mu\text{m}$ ( $0.1\text{psec}$ )に圧縮するには

1. 加速位相 $\Delta\phi$ を微調整する



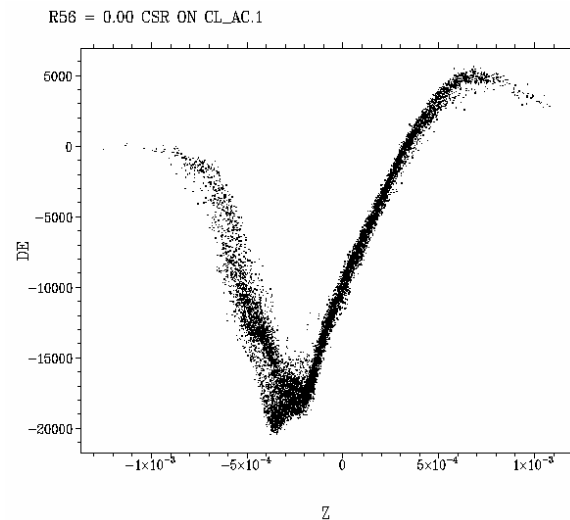
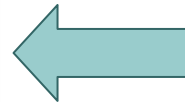
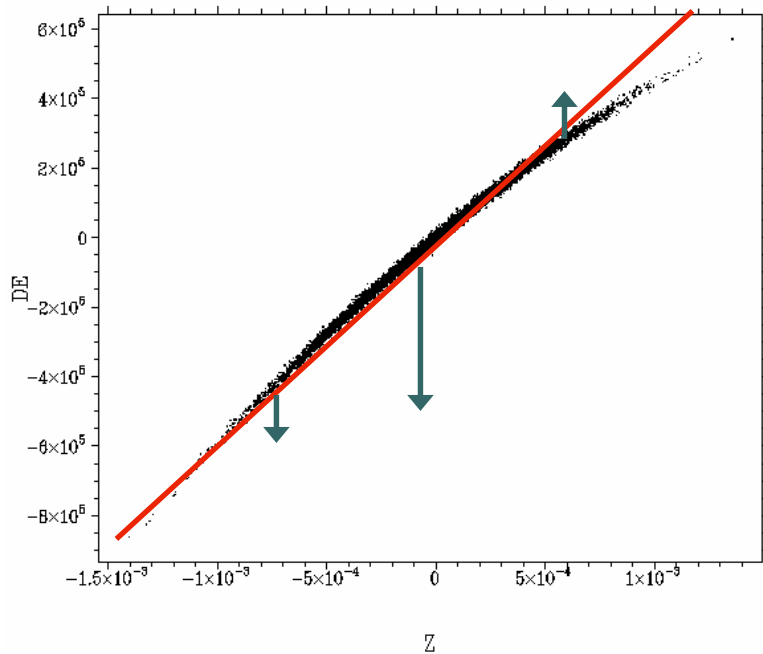
2. 入射部のエネルギーの広がり $\sigma_E$ を大きくする。



これらの方法を組み合わせて調整

# CSRによるenergy distributionの変化

(横軸  $z$  [m], 縦軸  $DE$  [eV])



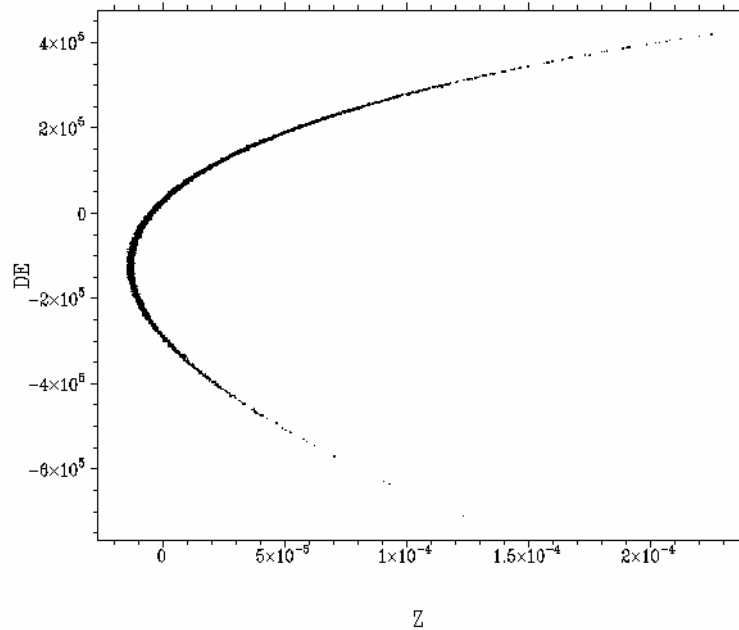
CSRによるエネルギー変化

- CSRによるエネルギー変化によりRFによるカーブが線形になるように補正される。

# CSRによるlongitudinal phase spaceの変化

(横軸  $z$  [m], 縦軸  $DE$  [eV])

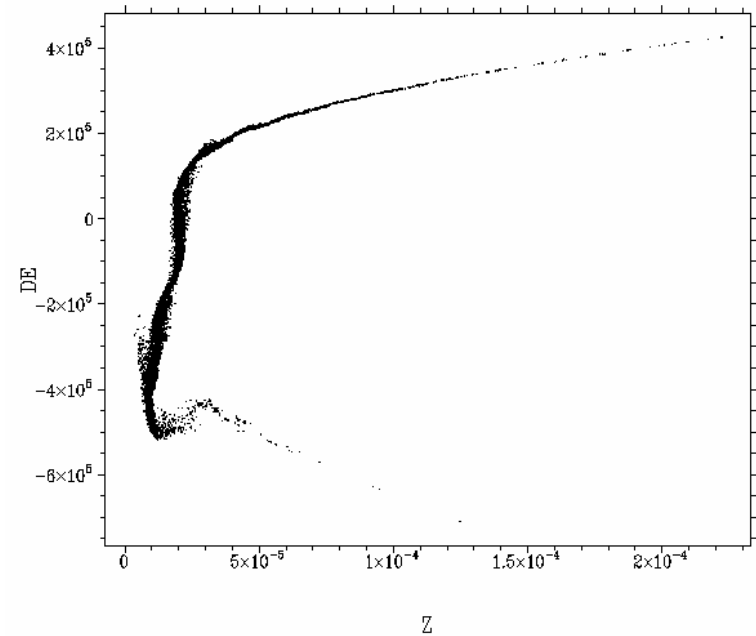
ratio\_phi = 0.950 CSR OFF L1\_ST.1



CSRなし

$\sigma_z$  1psec 0.093psec

ratio\_phi = 0.950 CSR ON L1\_ST.1

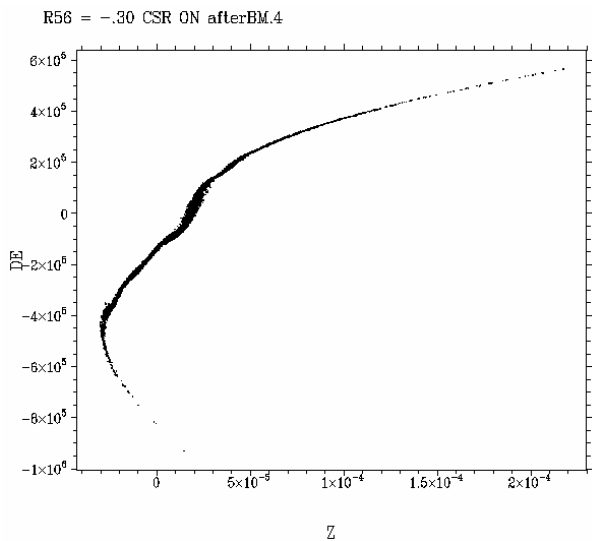


CSRあり

$\sigma_z$  1psec 0.067psec

- CSRによるバンチ圧縮効果が見られる。
- $R_{56} = -0.4$ ,  $\Delta\phi = 0.95 \times \Delta\phi_0 = c/2\pi R_{56}$   
一番圧縮効果が見えやすいパラメータで計算したため、最大電流値である条件とは異なる。

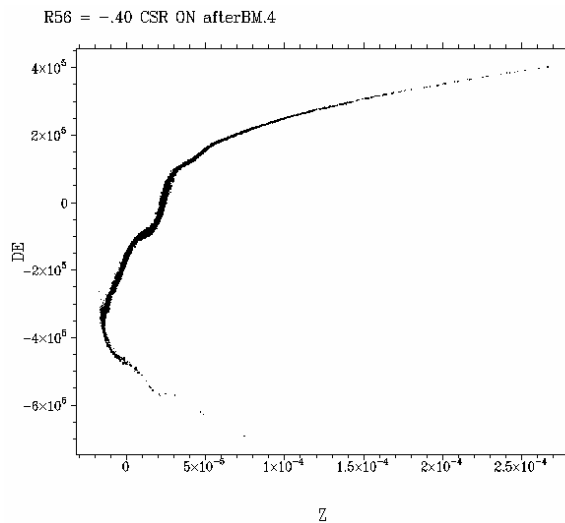
# $R_{56}$ とバンチ圧縮効果による弊害



$R_{56} = -0.3$

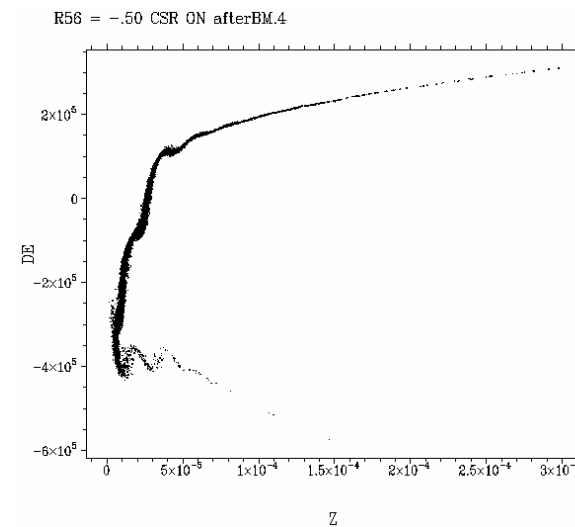
なだらかなバンチ形状

弱いCSR  $\Delta\epsilon_x$ が小さい



$R_{56} = -0.4$

$\sigma_z$ はすべて0.1psec

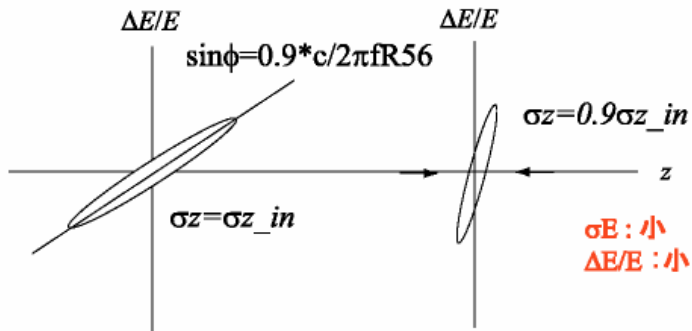


$R_{56} = -0.5$

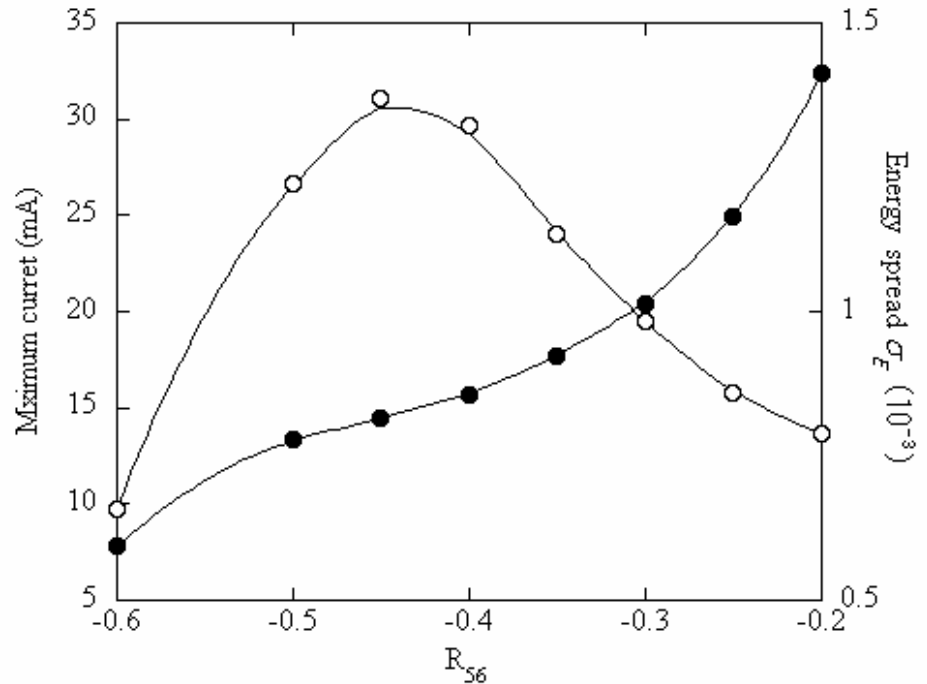
先頭に鋭いピーク

強いCSR  $\Delta\epsilon_x$ が大きい

# 最大電流値とその $\sigma_E$



$\tan\phi = R_\phi c / 2\pi f R_{56}$   
 $R_\phi$ はTrackingの結果を見ながら調整

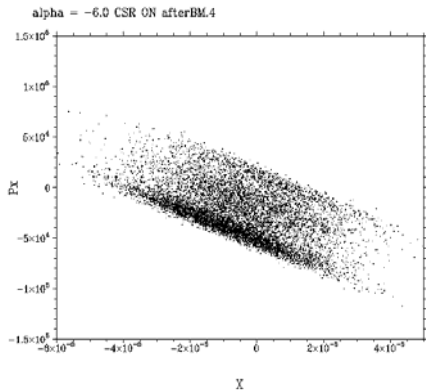


- :エネルギーブレッド :最大電流値
- $R_{56}$ の-0.45付近で最大30mAまで可能。 $\sigma_E$ はおよそ $0.8 \times 10^{-3}$ 
  - $R_{56}$ の絶対値が大きい CSRが強い。
  - $R_{56}$ の絶対値が小さい  $\theta_{\text{Phase}}$ が合わない。

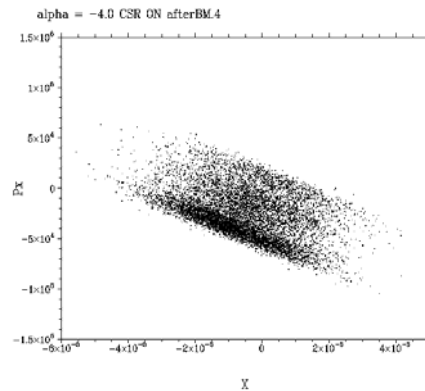


# $\alpha$ による $\varepsilon_{pnx}$ の増加の度合い

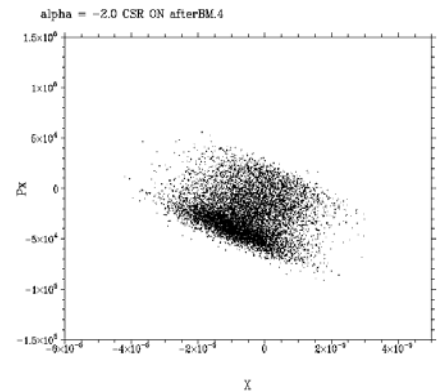
$\alpha = 0.6$



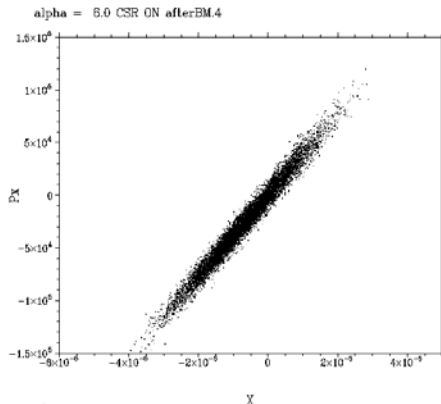
$\alpha = 0.4$



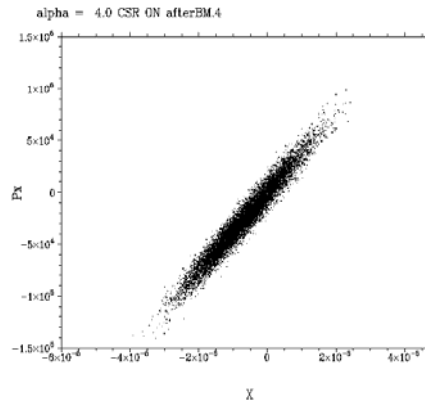
$\alpha = 0.2$



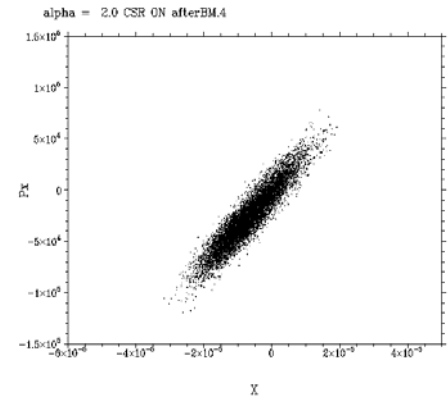
$\alpha = -0.6$



$\alpha = -0.4$



$\alpha = -0.2$



$\theta_{\text{Phase}} \neq \theta_{\text{CSR}}$

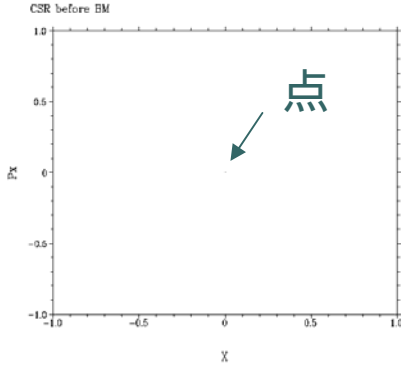
$\theta_{\text{Phase}} \sim \theta_{\text{CSR}}$

位相空間が細く、長くなる

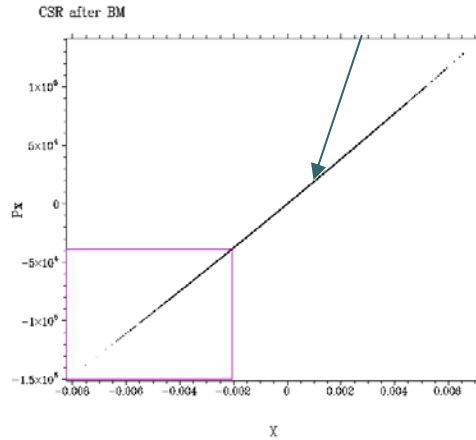
- $\alpha$ が増加すると、位相空間が細長くなる。 $\theta_{\text{Phase}}$ と $\theta_{\text{Phase}}$ が一致しないときは $\varepsilon_x$ は増加するが、一致する場合は変化なし。

# Dipole magnet通過後の位相空間の変化

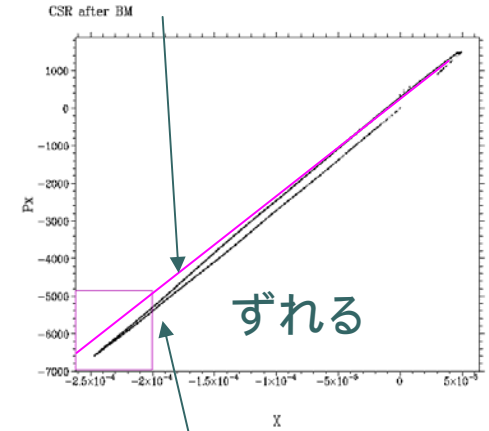
$$\theta_{\text{Phase}} = \sin\phi / \rho (1 - \cos\phi)$$



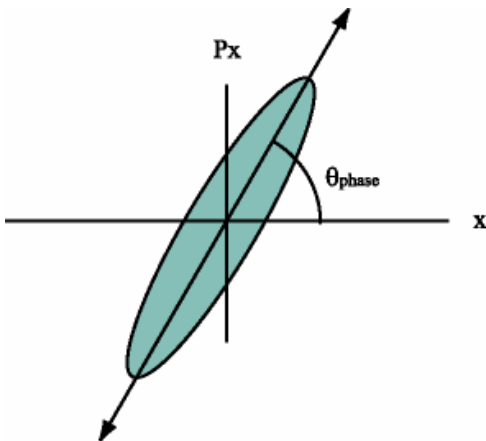
入射した位相空間



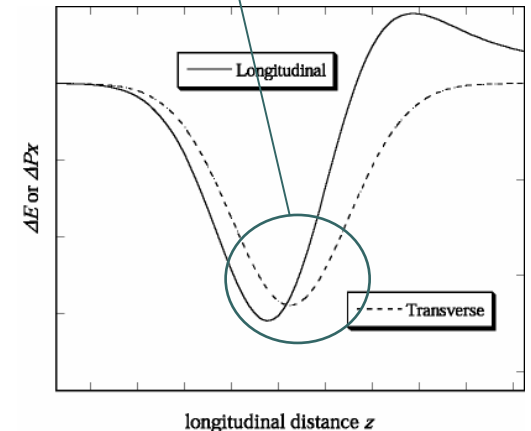
通常のenergy spread  
による位相変化



CSRによる位相変化



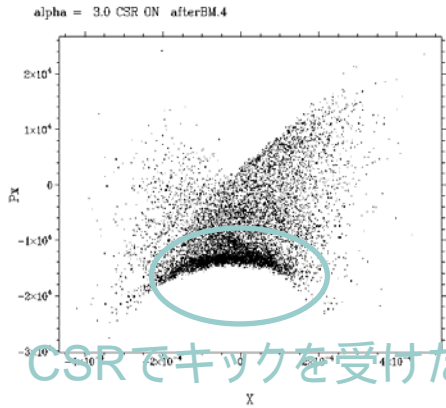
- CSRによる $\Delta Px$ で、 $\theta_{\text{Phase}}$ は $\sin\phi / \rho (1 - \cos\phi)$ より少しずれる。



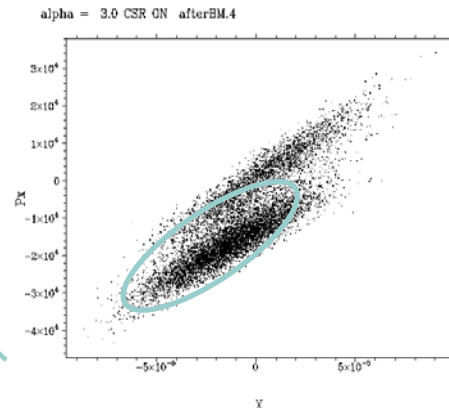
# BM.4直後のPhase Space

( $\alpha=-3$ )

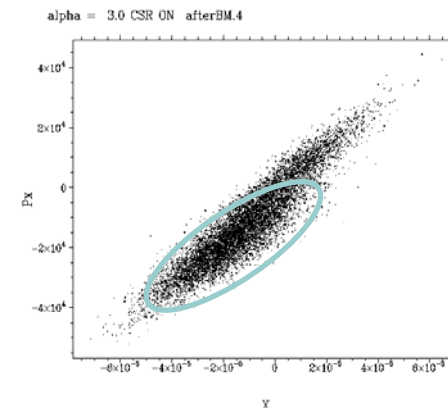
R56 = -0.2



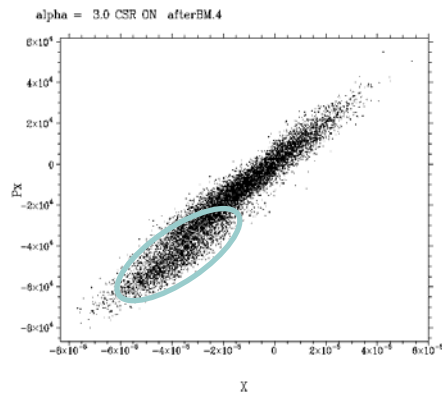
R56 = -0.3



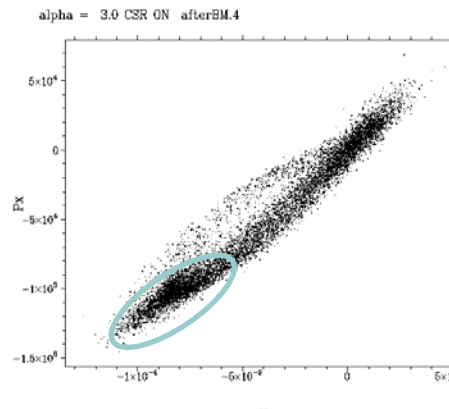
R56 = -0.4



R56 = -0.5



R56 = -0.6



- $R_{56}=-0.2$ でエミッタンスが大きくなるのはCSRのキックを受けた部分が大きく傾いているため