

# 6-GeV XFEL0 について

羽島良一

2012年7月26日

ERL ビームダイナミクスWG

# 共振器のモードボリューム



- 共振器型FEL → low-gain regime で動作  
 → 電子ビームによるガイディング効果は小さい  
 → 光分布は共振器の幾何形状で決まる

- FELのゲインを大きくする  
 → 電子と光の相互作用を強めたい  
 → 光を狭い領域に閉じ込める = 小さなモードボリューム

アンジュレータ長( $L_w$ )にわたるモードボリュームを計算すると、

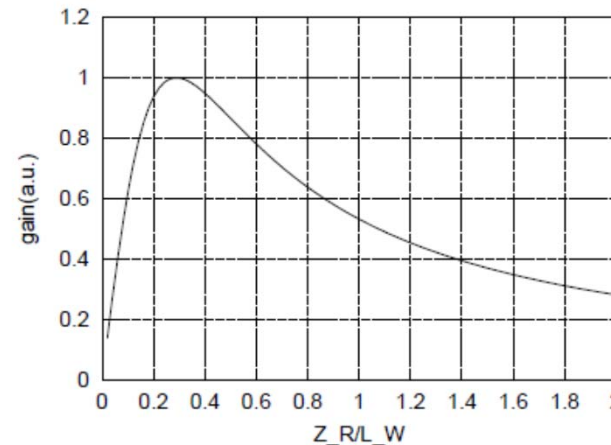
$$V = \int_{-L_w/2}^{L_w/2} \pi [w(z)]^2 dz = 2 \int_0^{L_w/2} \pi w_0^2 [1 + (z/Z_R)^2] dz = 2 \int_0^{L_w/2} \lambda (Z_R + z^2/Z_R) dz$$

$$= \lambda [Z_R L_w + L_w^3 / (12 Z_R)]$$

アンジュレータにわたっての平均スポットサイズ

$$\langle \pi w^2 \rangle = \lambda [Z_R + L_w^2 / (12 Z_R)]$$

$Z_R / L_w = 1 / \sqrt{12}$  の時に、  
 モードボリュームが最小 = FELゲインが最大



# 電子ビームの実効的な電流密度

光ビーム (Gaussian) の強度分布  $S(r) = S(0) \exp(-2r^2 / w^2)$

断面で積分した光ビームパワー  $P = \int S(r) dr = \frac{\pi w^2}{2} S(0)$



→ ピーク強度  $S(0)$  が  $\pi w^2/2$  の面積に一様分布 (円筒形) しているのと等価

FEL のゲイン計算  $\rho^3 = \frac{1}{16\pi} (a_w [JJ] \lambda_w)^2 \frac{1}{\gamma^3} \frac{I}{I_0} \frac{1}{\Sigma}$   $I_0 = 17 \text{kA}$

$\Sigma$ : 電子ビームの電流密度を定義するための断面積

電子ビームが十分に細い極限では、電子は光ビーム強度  $S(0)$  を感じる  
→ ビーム断面積  $\Sigma = \pi w^2/2$  として実効的な電流密度を定義すればよい

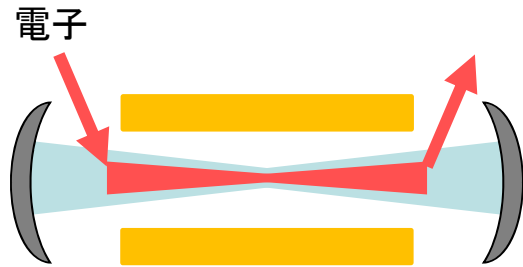
$$\text{Gain} = 0.135 j_0$$

共振器FELのゲイン

$$j_0 = 2(4\pi N_u \rho)^3$$

Colson's dimensionless current

# 電子ビームのフィリングファクタ



電子ビームは光モードの内部でないと相互作用しない  
→ エミッタンスの制約

回折限界エミッタンス: 光の広がり と 電子の広がりが等しい

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{4\pi}$$

電子ビームが有限広がりを持っている場合、  
電流密度の定義  $\Sigma = \pi w^2/2$  に補正が必要

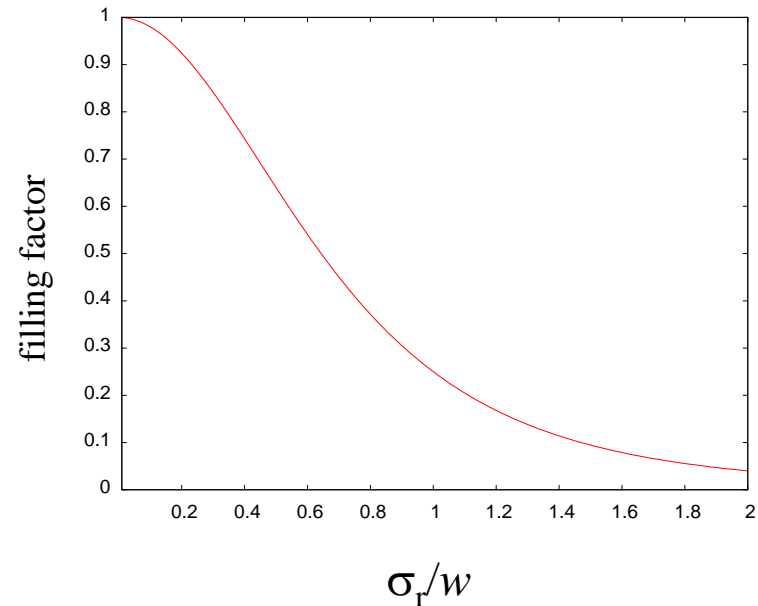
$$\rho^3 = \frac{1}{16\pi} (a_w [JJ] \lambda_w)^2 \frac{1}{\gamma^3} \frac{I}{I_0} \frac{1}{\Sigma} f$$

filling factor

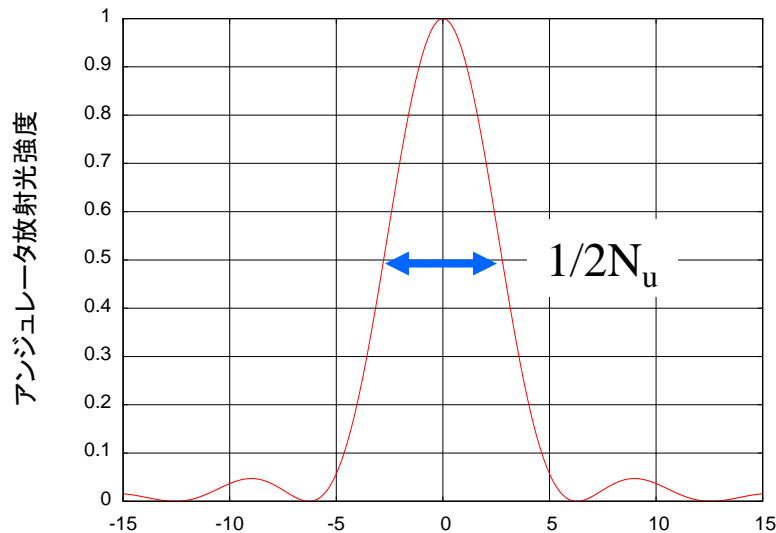
$$f = \left( \frac{2\sigma_r^2}{w^2} + 1 \right)^{-2} = \left( \frac{4\sigma_x^2}{w^2} + 1 \right)^{-2}$$

D. Iracane et al., PRE 49 (1994) 800

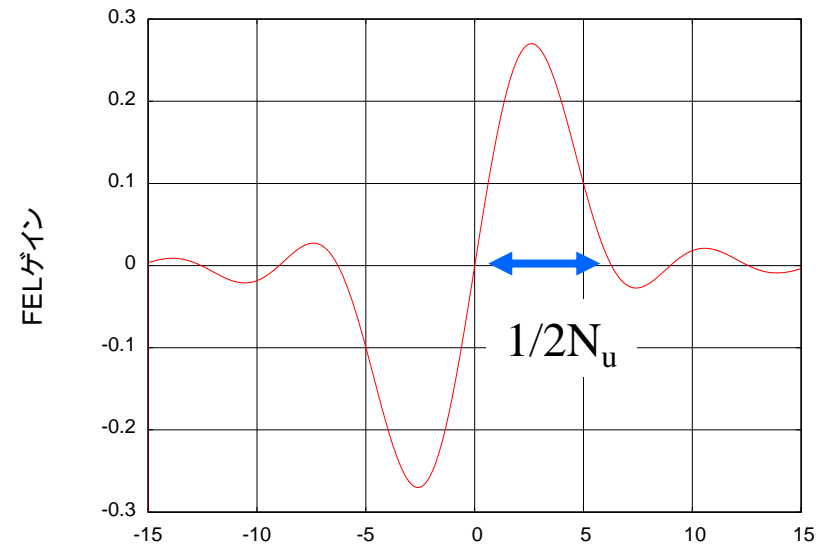
回折限界エミッタンスの時、 $f=0.25$



# アンジュレータ放射とFELゲイン



$$v = 2\pi N_u \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$



$$v = 2\pi N_u \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$

FELのゲインバンド幅は  $1/2N_u$  である。

電子のエネルギーが基準値から外れると、ゲインが小さくなる → ゲインがなくなる

電子ビームのエネルギー広がりによるゲインの低下(近似式)

$$\mu_E = 4N_u \frac{\sigma_E}{E} \quad \text{として、} \quad f_E = \frac{1}{1 + 1.7\mu_E^2}$$

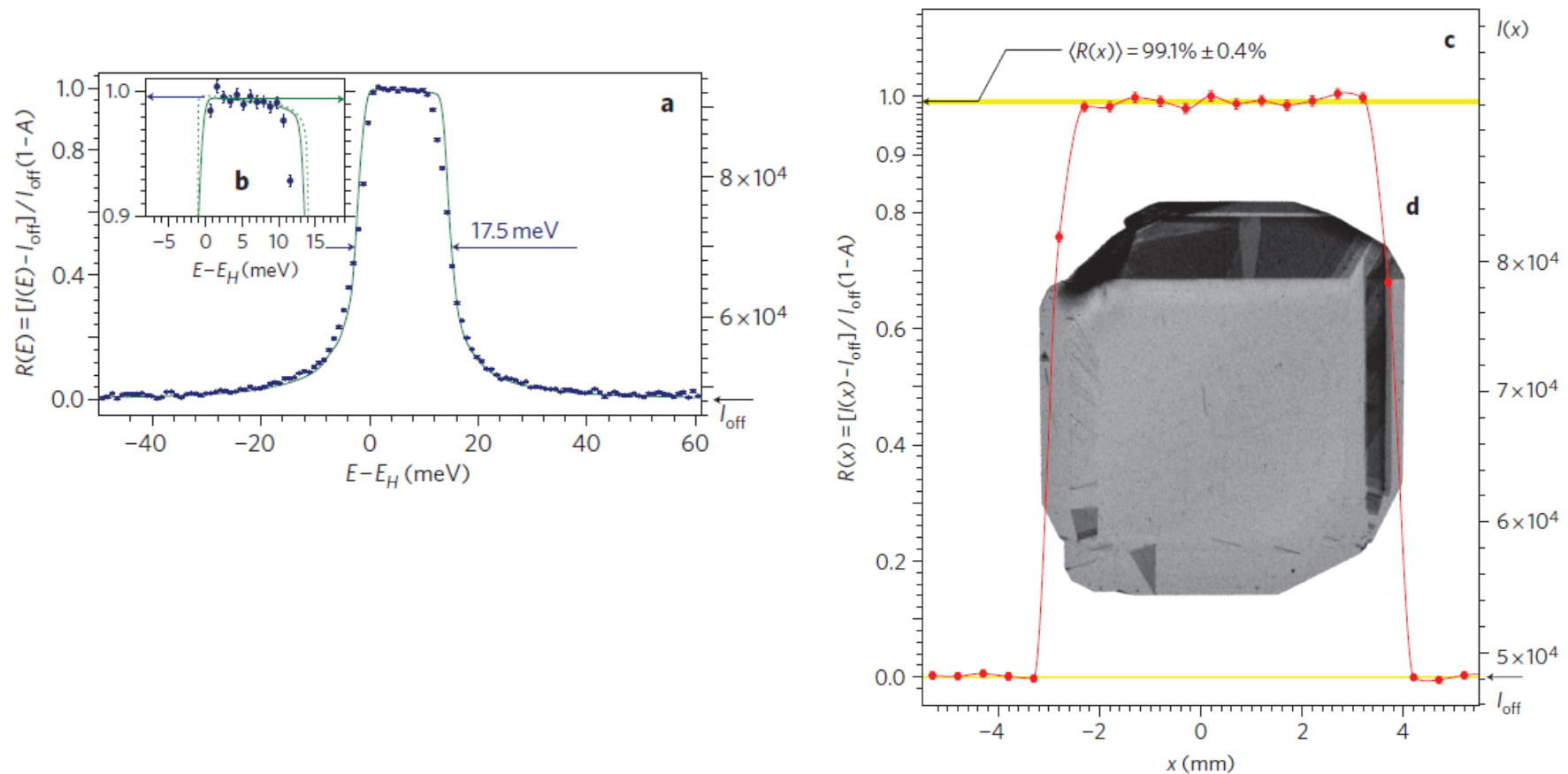
$$\rho^3 = \frac{1}{16\pi} (a_w [JJ] \lambda_w)^2 \frac{1}{\gamma^3} \frac{I}{I_0} \frac{1}{\Sigma} f f_E$$

G. Dattoli et al., IEEE QE-20 (1984) 637.

# ダイヤモンド完全結晶の開発

Reflectivity of 13.9 keV X-rays from the (8 0 0) atomic planes of a diamond crystal

Y. Shvyd'ko et al., Nature Photonics (2011)



# 6-GeV XFELのパラメータ例

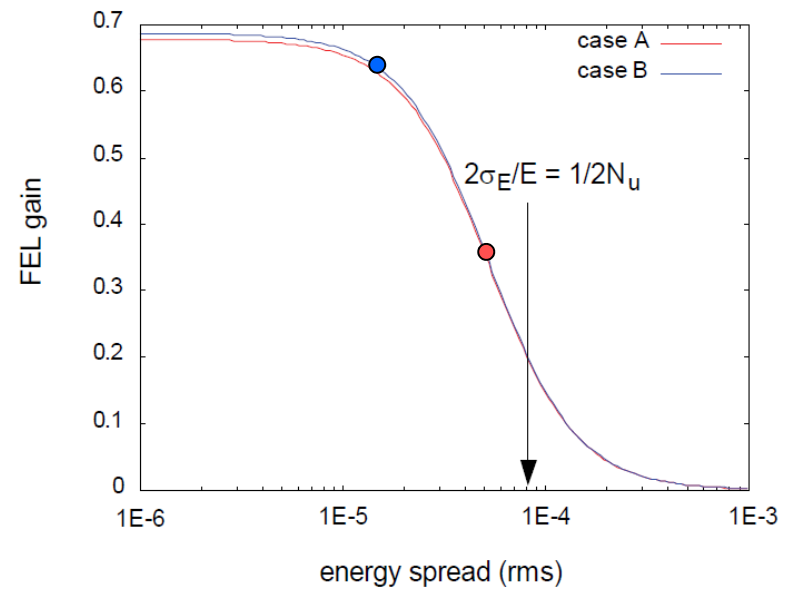
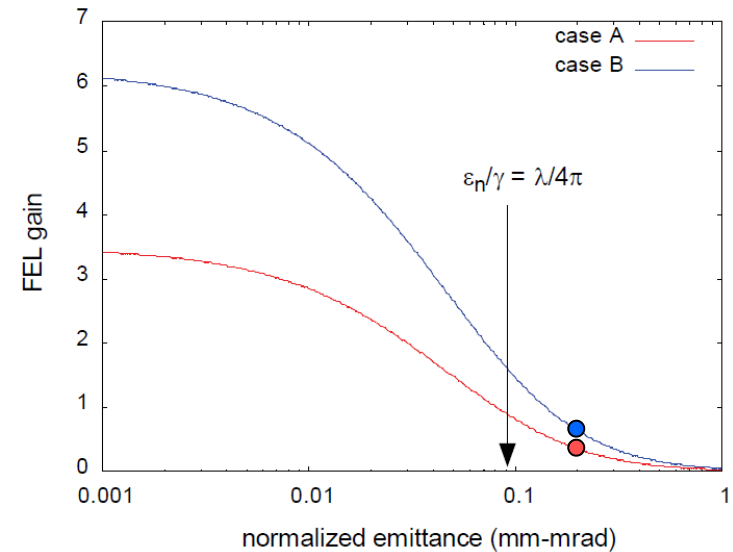
X線共振器の損失(取り出しを含めて) ~ 10% を想定

損失を上回るFELゲインが得られるパラメータを選んだ

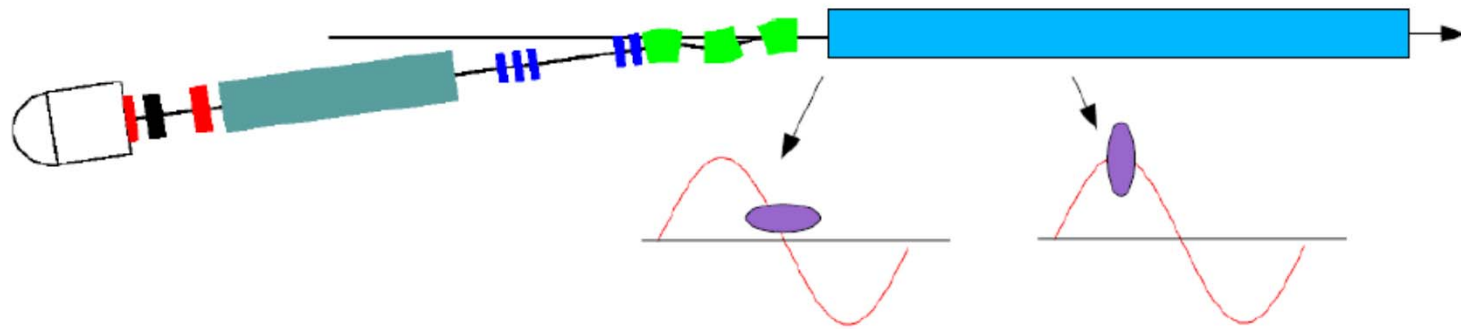
表 1. XFEL のパラメータ例

Electron Beam	Case A	Case B
Energy	6 GeV	6 GeV
Charge	20 pC	7.7 pC
$\sigma_t$	1 ps	0.38 ps
$\sigma_E/E$	5E-5	1.5E-5
$\varepsilon_n$	0.2 mm-mrad	0.2 mm-mrad
$\beta^*$	17 m	17 m
Repetition	1 MHz	1 MHz
Undulator		
Pitch	1.94 cm	
$a_w$	0.65	
$N_u$	3000	
FEL		
Wavelength	1 Å	
Gain	35%	63%

アンジュレータは永久磁石Halbach型とすれば、  
gap = 8mm に対応する設計

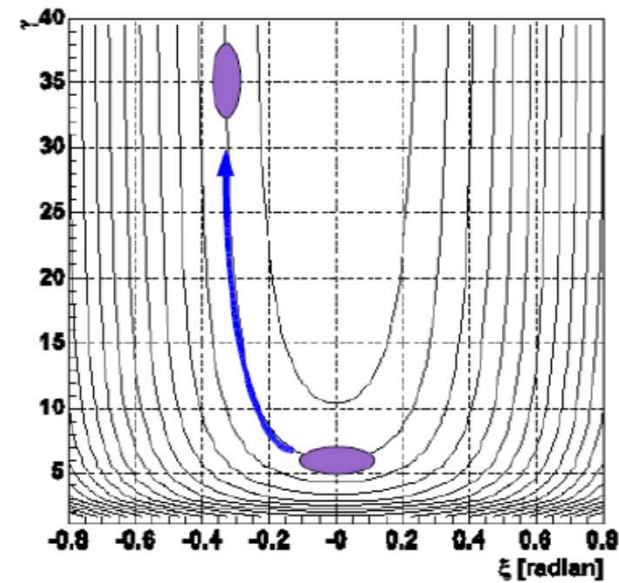


# Velocity bunching in a main linac



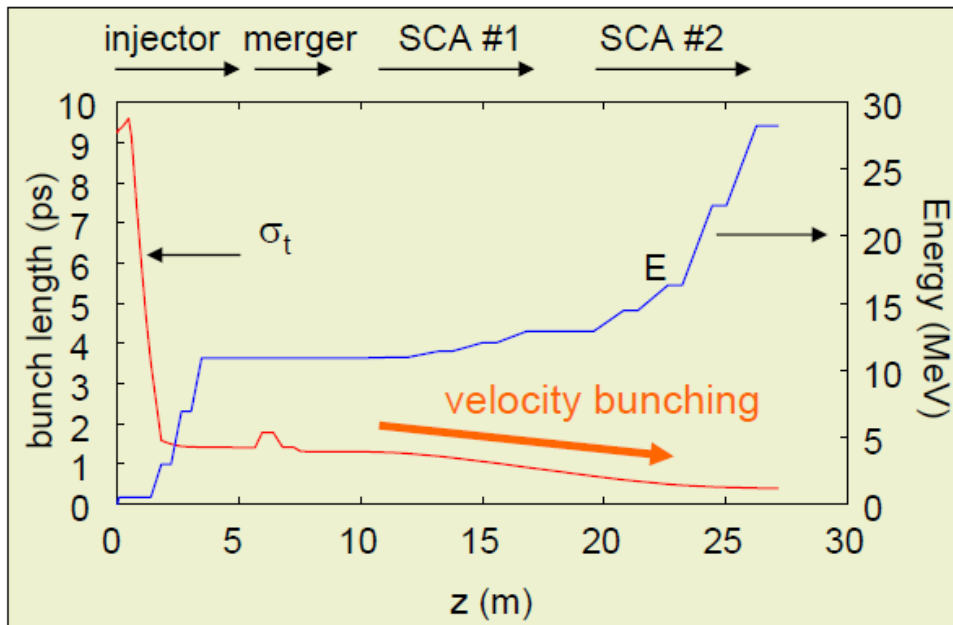
Is it possible to make velocity bunching at the beginning of main linac ?

- how short bunch ?
- merging energy ?
- emittance growth ?
- energy-recovery OK ?
- HOM loading to the main linac ?
- residual energy spread ?





# Optimum design of the velocity bunching

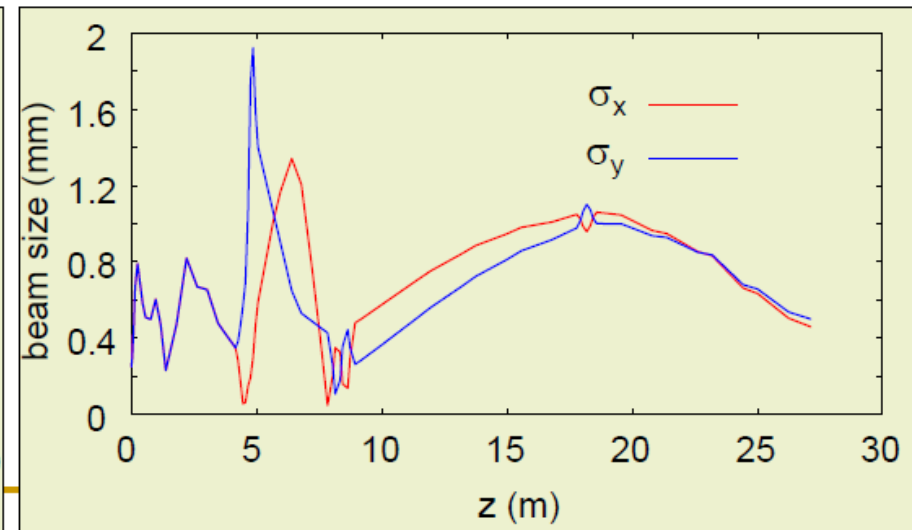
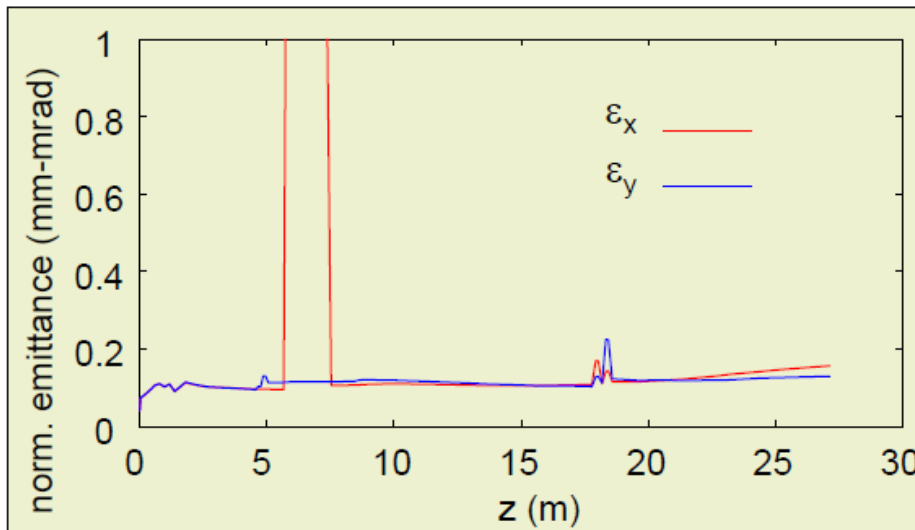


bunch charge  $q = 7.7$  pC

velocity bunching  
bunching in 6 cav. + on-crest 2 cav.  
injection 10.9 MeV, 1.3 ps, -90 deg.  
gradient  $E_{\text{acc}} = 8.5$  MV/m

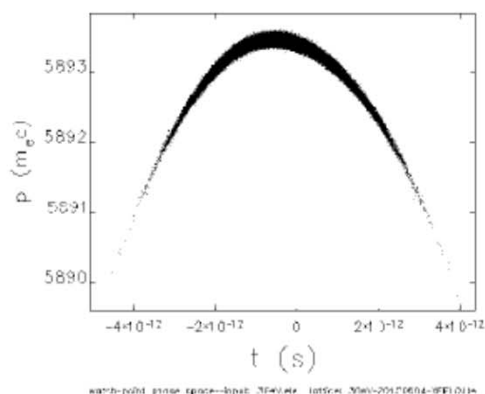
at the SCA#2 exit

$E = 27.7$  MeV,  $\sigma_t = 380$  fs,  $\sigma_E = 250$  keV  
 $\varepsilon_x = 0.16$  mm-mrad,  $\varepsilon_y = 0.13$  mm-mrad



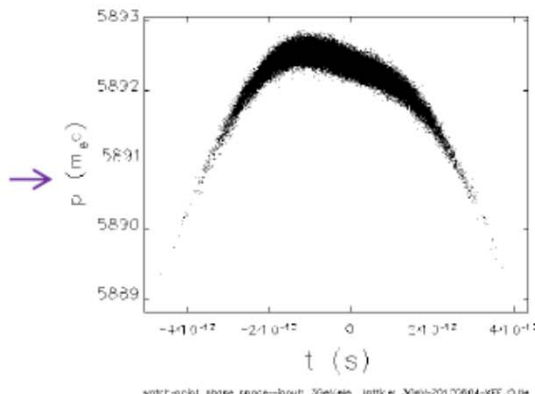
# XFEL mode II (Case A)

## 2. Energy spreadの変化



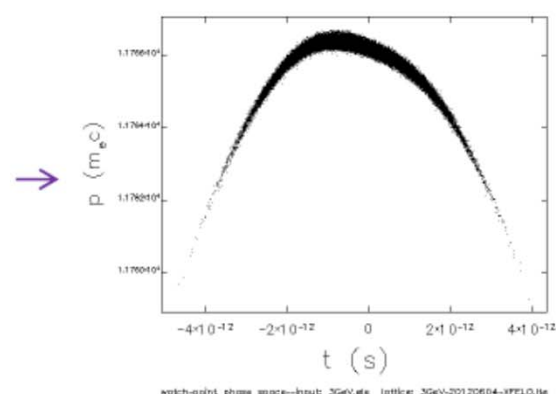
加速直後周回前

$$\sigma_\delta : 4.799 \times 10^{-5}$$



周回後再加速直前

$$\sigma_\delta : 4.341 \times 10^{-5}$$



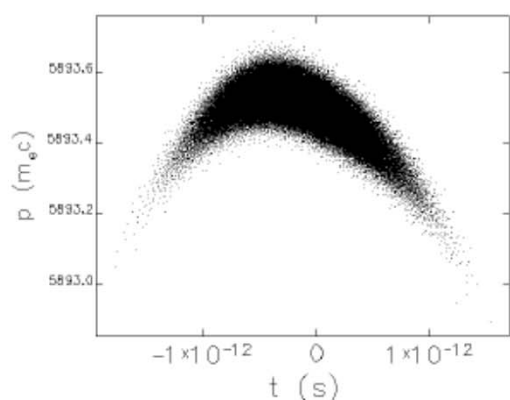
再加速後

$$\sigma_\delta : 4.390 \times 10^{-5}$$

- ✓ XFELの発振に必要な $5 \times 10^{-5}$ は維持可能。
- ✓ 周回後はCSR wakeの影響で $\sigma_\delta$ が小さくなる。
- ✓ 再加速の前後で $\sigma_\delta$ に大きな変化は無く、ほぼRF curvatureで決まっている。

# XFEL0 mode II (Case B)

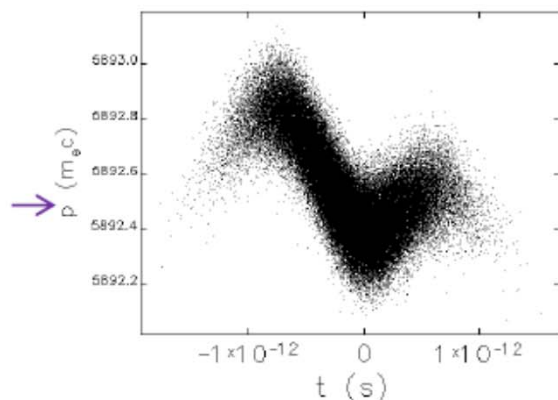
## 2. Energy spreadの変化



watch-point phase space--input 30GeV.ele lattice: 30GeV-20120604-XFEL0.lis

加速直後周回前

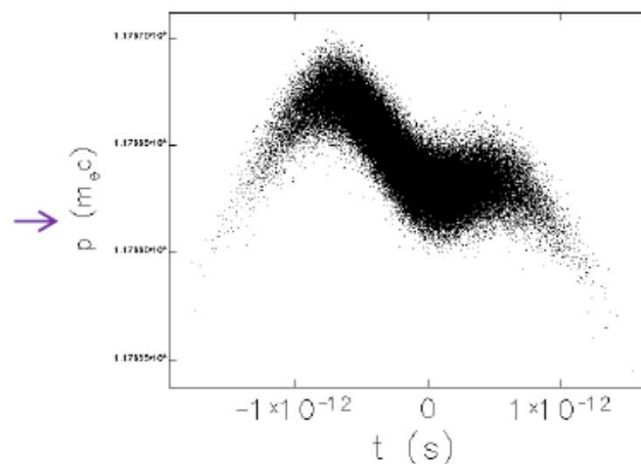
$$\sigma_\delta : 1.105 \times 10^{-5}$$



watch-point phase space--input 30GeV.ele lattice: 30GeV-20120604-XFEL0.lis

周回後再加速直前

$$\sigma_\delta : 2.771 \times 10^{-5}$$



watch-point phase space--input 30GeV.ele lattice: 30GeV-20120604-XFEL0.lis

再加速後

$$\sigma_\delta : 1.496 \times 10^{-5}$$

- ✓ XFEL0の発振に必要な $5 \times 10^{-5}$ は維持可能。
- ✓ 周回後はCSR wakeの影響で $\sigma_\delta$ が小さくなる。

# まとめ

- 共振器型FELのゲインの計算方法、エミッタンス、エネルギー広がりの効果
- 6-GeV ビーム (3-GeV ERLの2回加速) で1 Å のXFELの発振が可能なパラメータが得られる
- low charge、short bunch が有利に思われる→ CSRによるエネルギー広がり抑制、自発放射光熱負荷の低減
- 入射器パラメータの最適化、主加速器による速度集群など検討したい