

3 GeV ERLの周回部の影響について(続き)

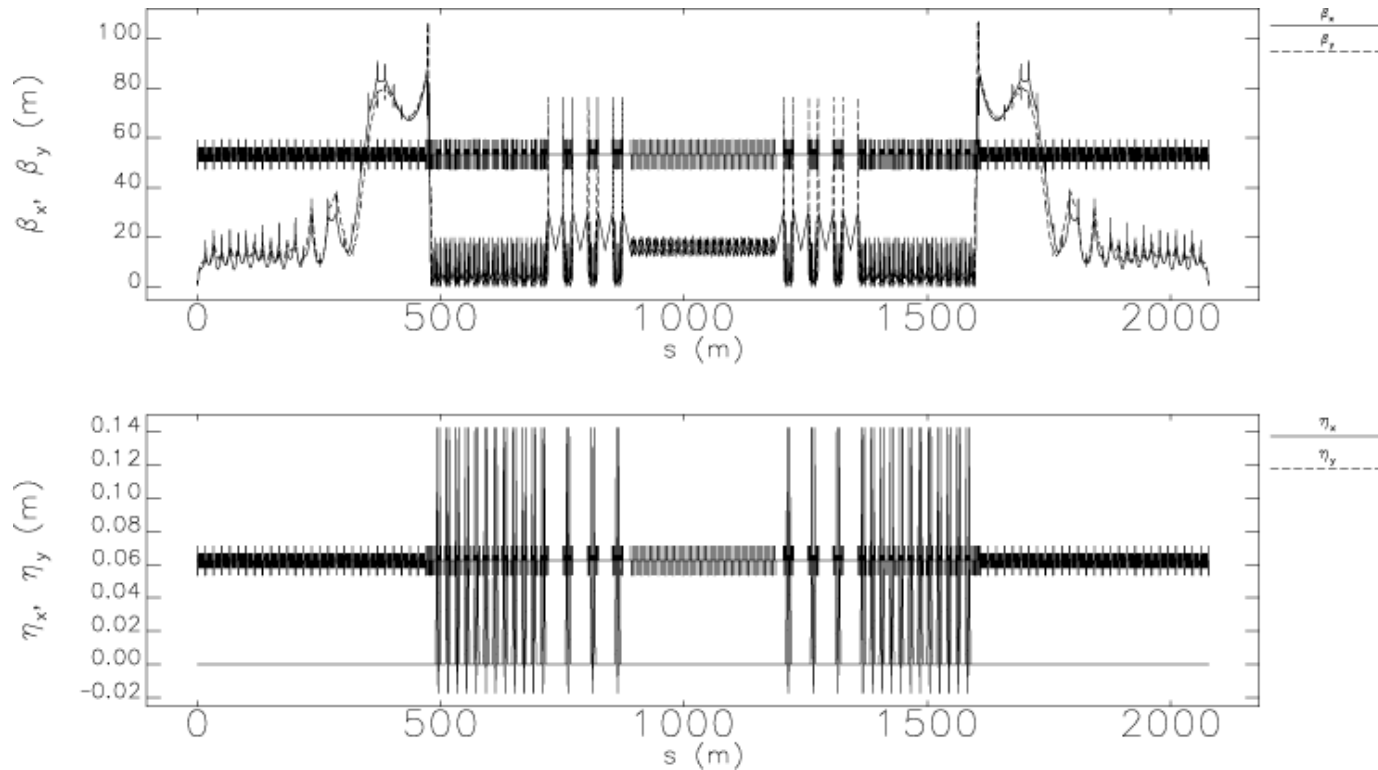
ビームダイナミクスWG
2012年7月26日(木)

加速器第7研究系
島田 美帆

検討項目

1. 放射励起によるエミッタンス増加・エネルギー広がり
2. CSR wakeによるエミッタンス増加・エネルギー広がり
3. 空洞の縦方向のwakeについて
4. 2つの運転モードについて
 - Ultimate mode: 77 pC, 2 ps, 0.1mm-mrad, $\sigma_\delta=2\times 10^{-3}$ (@10MeV)
 - XFEL (Case A): 20 pC, 1 ps, 0.1mm-mrad, $\sigma_\delta=2\times 10^{-3}$ (@10MeV)
 - XFEL (Case B): 7.7 pC, 0.38 ps, 0.1mm-mrad, $\sigma_\delta=2\times 10^{-3}$ (@10MeV)

現在のOptics



補足

- 3.5 GeV XFELの可能性を考慮し、曲率半径20m(正確には19.1m)のままとした。
- CSRCBENDのn_kicksを適切な値に変更した。(500 kicks / rad以上)
- アークにはCSRDRIFTを挿入した。
- 加速空洞にtesla型のwakeを導入した。

放射励起の影響について I

解析解は第67回BDWGの中村さんの資料を参考。

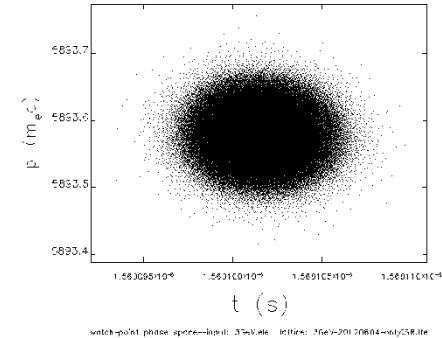
トラッキング粒子数は100k

CSRの影響を除くため、 7.7×10^{-20} Cとした。

RF curvatureの影響を除くため、RF周波数を1.3kHzとした。(右図→)

4通りの初期値で計算を行った。

1. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 10^{-20}, 2 \times 10^{-10})$
2. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 10^{-20}, 2 \times 10^{-3})$
3. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-10})$
4. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-3})$



RF curvatureはほとんど見えない。
(加速直後)

1. energy spread増加 $\Delta\sigma_\delta$

解析解: 1.31×10^{-5}

トラッキングの解 $\Delta\sigma_\delta = \sqrt{\sigma_{\delta 1}^2 - \sigma_{\delta 2}^2}$ 、 $\sigma_{\delta 1}$:周回前, $\sigma_{\delta 2}$:周回後

1. $\Delta\sigma_\delta = 1.3 \times 10^{-5}$
2. $\Delta\sigma_\delta = 1.3 \times 10^{-5}$
3. $\Delta\sigma_\delta = 1.3 \times 10^{-5}$
4. $\Delta\sigma_\delta = 1.3 \times 10^{-5}$

$\Delta\sigma_\delta$ の解析解はトラッキングと一致した。

放射励起の影響について II

6通りの初期値で計算を行った。

1. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 1e-20, 2 \times 1e-10)$
2. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 1e-20, 2 \times 1e-3)$
3. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 1e-7, 2 \times 1e-10)$
4. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 1e-7, 2 \times 1e-3)$
5. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 1e-6, 2 \times 1e-10)$
6. $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}) = (1 \times 1e-4, 2 \times 1e-10)$

2. emittance増加 $\Delta\epsilon_x$ を2つの定義で比較

解析解: $2.6 \times 1e-13$ [mrad]

トラッキングの解 $\Delta\epsilon_x = \text{sqrt}(\epsilon_{x1}^2 - \epsilon_{x2}^2)$

1. $\Delta\epsilon_x = 2.6 \times 1e-13$ [mrad]
2. $\Delta\epsilon_x = 2.6 \times 1e-13$ [mrad]
3. $\Delta\epsilon_x = 2.9 \times 1e-12$ [mrad]
4. $\Delta\epsilon_x = 2.9 \times 1e-12$ [mrad]
5. $\Delta\epsilon_x = 8.5 \times 1e-12$ [mrad]
6. $\Delta\epsilon_x = 5.5 \times 1e-11$ [mrad]

解析解: $2.6 \times 1e-13$ [mrad]

トラッキングの解 $\Delta\epsilon_x = \epsilon_{x1} - \epsilon_{x2}$

1. $\Delta\epsilon_x = 2.6 \times 1e-13$ [mrad]
2. $\Delta\epsilon_x = 2.6 \times 1e-13$ [mrad]
3. $\Delta\epsilon_x = 2.4 \times 1e-13$ [mrad]
4. $\Delta\epsilon_x = 2.4 \times 1e-13$ [mrad]
5. $\Delta\epsilon_x = 2.1 \times 1e-13$ [mrad]
6. $\Delta\epsilon_x = 0.9 \times 1e-13$ [mrad]

$\Delta\epsilon_x = \text{sqrt}(\epsilon_{x1}^2 - \epsilon_{x2}^2)$ と定義したときは、 ϵ_x の初期値に大きく依存するが、
 $\Delta\epsilon_x = \epsilon_{x1} - \epsilon_{x2}$ では ϵ_x の初期値に関わらず、ほぼ一定で解析解に近い。

以降のページでは、 $\Delta\epsilon_x = \text{sqrt}(\epsilon_{x1}^2 - \epsilon_{x2}^2)$ と定義している。

CSR wakeの影響について I

放射励起の影響を除くため、synch_rad=0, ISR=0とした。
 RF curvatureの影響を除くため、RF周波数を1.3kHzとした。
 加速直後と減速直前の $\Delta\epsilon_x$ および $\Delta\sigma_\delta$, $\Delta\delta$ を計算した。

初期値: $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}, Q, \sigma_z) = (1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-3}, 77\text{pC}, 2 \text{ ps})$
 直線部に流れるCSR wakeについて評価した。
 遮蔽効果は考慮していない。

1. CSR wakeによるemittance増加

統計的な誤差以上の優位な $\Delta\epsilon_x$ はなかった。
 $(\Delta\epsilon_x \sim \Delta\epsilon_y)$

2. CSR wakeによるenergy spread増加

$\Delta\sigma_\delta$	CSRDRIFTなし: 9.1×10^{-6} ($0.66 \times 10^{-5} \rightarrow 1.12 \times 10^{-5}$)
	CSRDRIFTあり: 2.8×10^{-5} ($0.66 \times 10^{-5} \rightarrow 2.87 \times 10^{-5}$)

$\Delta E/E_0 (= \Delta\delta)$	CSRDRIFTなし: -1.4×10^{-6}
	CSRDRIFTあり: -3.8×10^{-5}

Transientの長さが $L_0 = 1.7\text{m}$ と、電磁石の長さ1mより長い。

→ 偏向電磁石中より、直線部に出た後のCSR wakeの影響が非常に大きい。
 $\Delta\sigma_\delta$ は放射励起より大きい、同程度である。

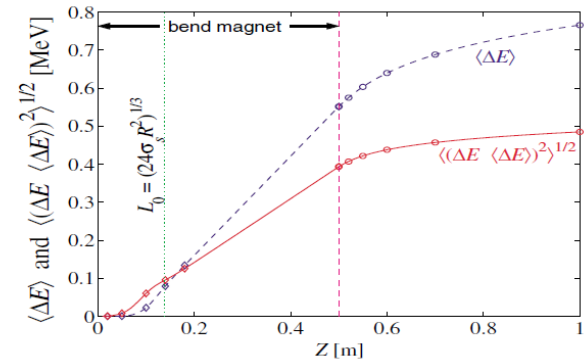


Figure 4: Energy loss (blue), $\langle \Delta E \rangle$, and rms energy spread (red), $\langle (\Delta E - \langle \Delta E \rangle)^2 \rangle^{1/2}$, along 50-cm bend magnet and its exit drift section. The diamonds are the locations corresponding to the curves in Fig. 1, while the circles are the locations corresponding to the curves in Fig. 2.

G. Stupakov-SlacPub 9242 (2002)

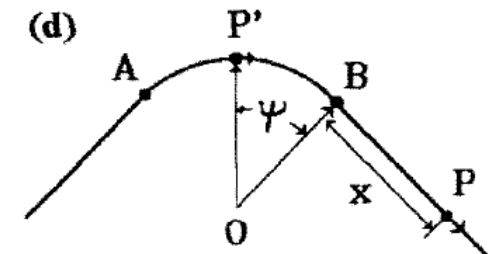
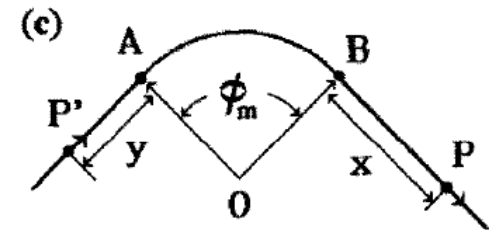
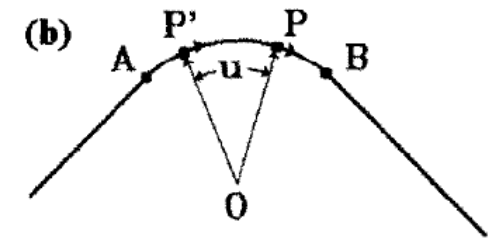
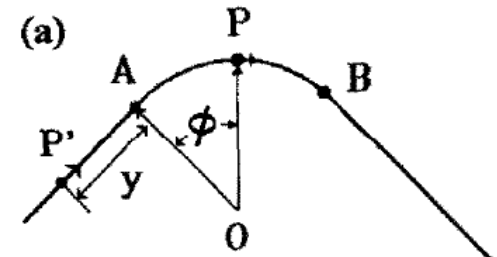
偏向電磁石後の直線部に流れる
 CSR wakeによる ΔE および $\Delta\sigma_\delta$

Transient 効果

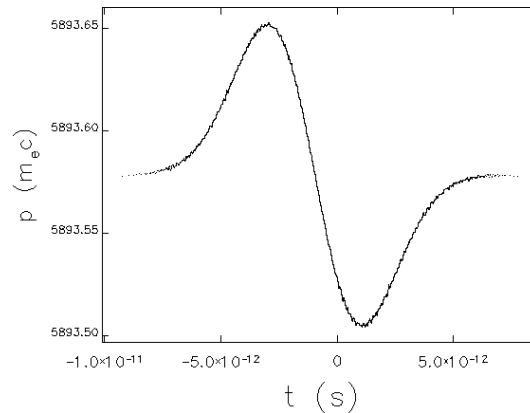
周回後の縦方向の位相分布

初期値: $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}, Q, \sigma_z)$

= $(1 \times 1e-20, 2 \times 1e-10, 77\text{pC}, 2 \text{ ps})$

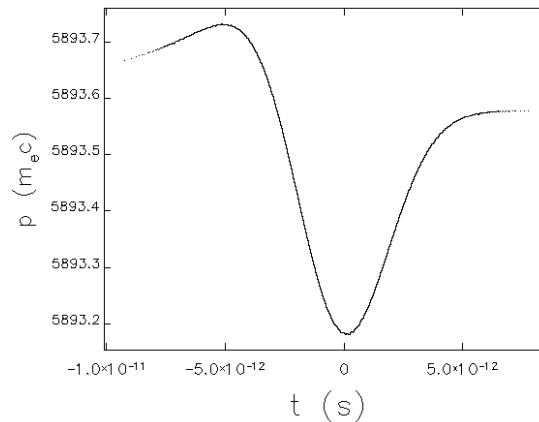


CSR DRIFTなし



watch-point phase space--input: 30eV.ele lattice: 30eV-20120604--onlyCSR.lite

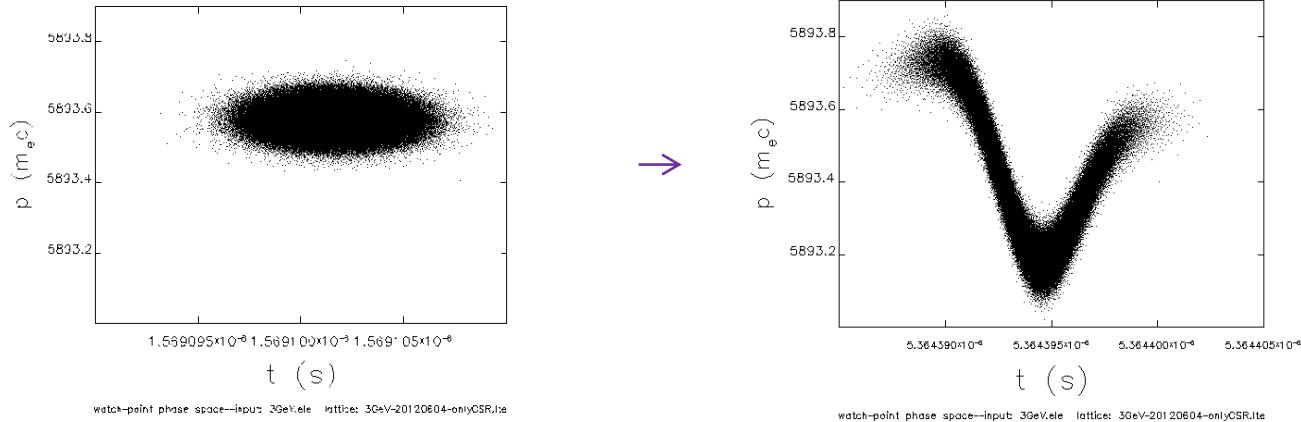
CSR DRIFTあり



watch-point phase space--input: 30eV.ele lattice: 30eV-20120604--onlyCSR.lite

CSR wakeの影響について II

1. 位相空間の粒子分布の変化



縦方向位相空間: (左)加速直後周回前、(右)周回後・減速直前
スケールは同じ。スケージングの都合で中心がずれている。

2. 曲率半径10mのケースと比較

$\Delta\sigma_\delta$

$\rho = 20 \text{ m} : 2.79 \times 10^{-5}$
($0.663 \times 10^{-5} \rightarrow 2.87 \times 10^{-5}$)
 $\rho = 10 \text{ m} : 2.77 \times 10^{-5}$
($0.663 \times 10^{-5} \rightarrow 2.85 \times 10^{-5}$)

$\Delta E/E_0 (= \Delta\delta)$ $\rho = 20 \text{ m} : -3.78 \times 10^{-5}$
 $\rho = 10 \text{ m} : -3.85 \times 10^{-5}$

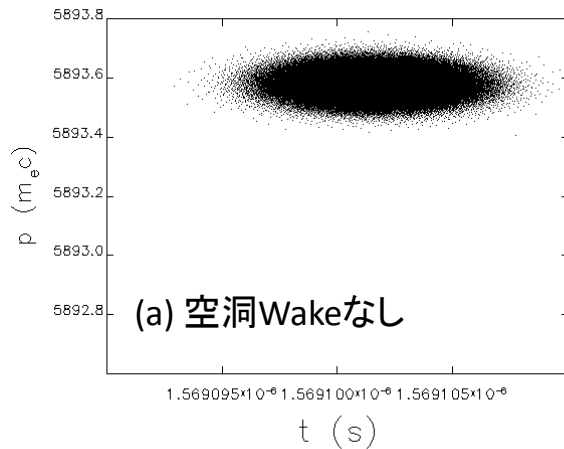
曲率半径による大きな差はなかった

Longitudinal wake

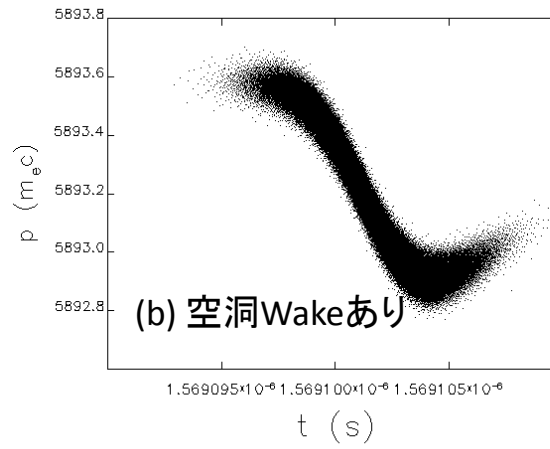
RF curvatureの影響を除くため、RF周波数を1.3kHzとした。

加速直後の $\Delta\sigma_\delta$ および $\Delta\delta$ を計算した。

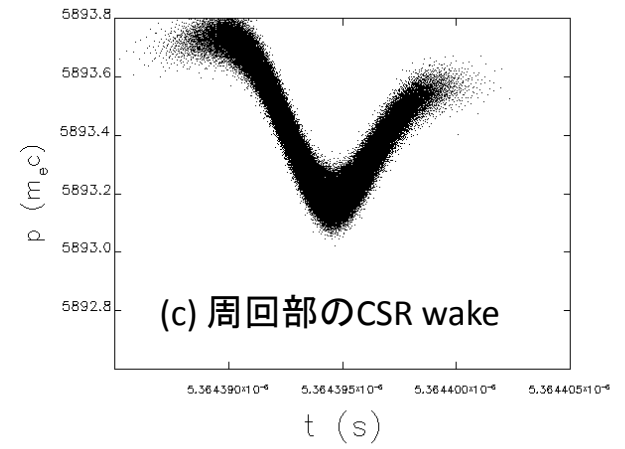
初期値： $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}, Q, \sigma_z) = (1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-3}, 77\text{pC}, 2 \text{ ps})$



watch-point phase space--input 3GeV.ele lattice: 3GeV-20120604-onlyCSR.lite



watch-point phase space--input 3GeV.ele lattice: 3GeV-20120604-onlyCAV.lite



watch-point phase space--input 3GeV.ele lattice: 3GeV-20120604-onlyCSR.lite

Wakeによる縦方向位相空間

(a): 3GeV加速直後、空洞wakeなし、(b): 3GeV加速直後、空洞wakeあり

(c): 周回後・減速前、空洞wakeなし、CSR wakeあり、(CSRDRIFT込み)

1. 空洞の縦方向のwakeによるenergy spread増加

$$\begin{array}{ll} \Delta\sigma_\delta & 3.5 \times 10^{-5} \quad (0.66 \times 10^{-5} \rightarrow 3.6 \times 10^{-5}) \\ \Delta E/E_0 (= \Delta\delta) & -6.7 \times 10^{-5} \end{array}$$

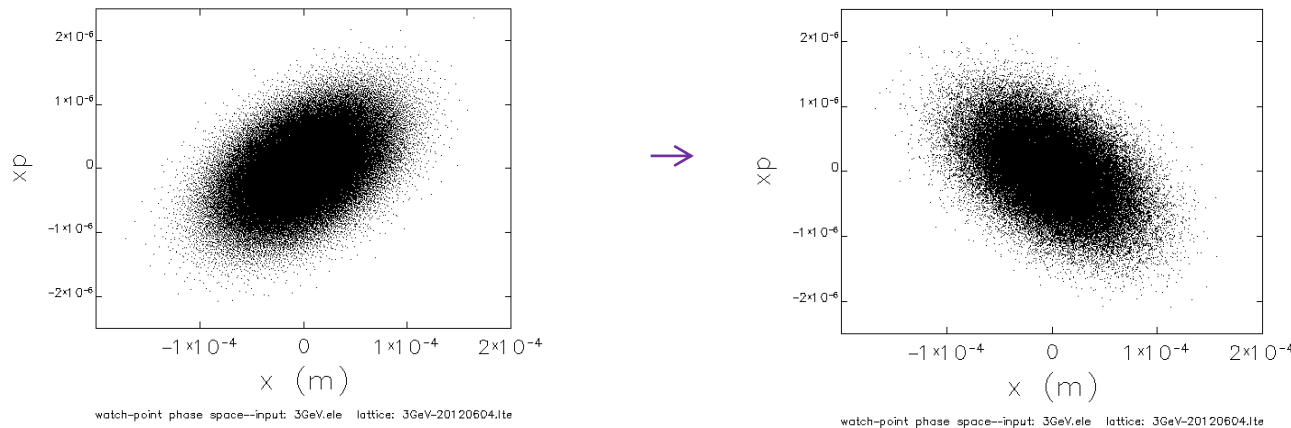
$\Delta\sigma_\delta$ および $\Delta E/E_0$ は放射励起・CSR wakeより大きい。

Ultimate mode I

初期値: $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}, Q, \sigma_z) = (1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-3}, 77\text{pC}, 2 \text{ ps})$

放射励起の影響・RF curvatureの影響を含めて、synch_rad=1, ISR=1、RF周波数を1.3GHzに戻した。
直線部に流れるCSR wakeについて評価したが、遮蔽効果は考慮していない。

1. Emittanceの変化



水平方向位相空間: (左)加速直後周回前、(右)周回直後減速直前
スケールは等しい。 β 関数はほぼ同じ、 α の符号は逆である。

$\Delta\epsilon_x$ [mrad]

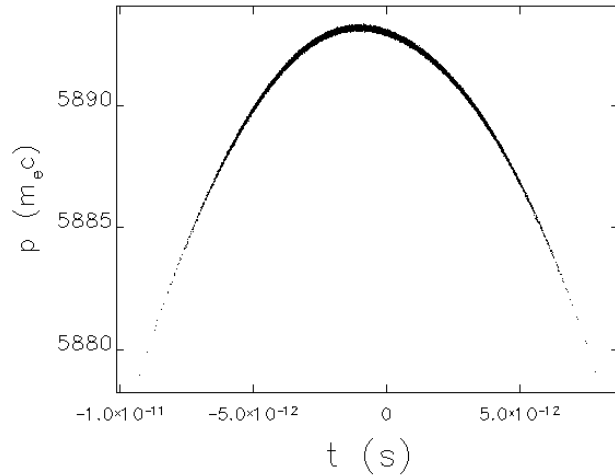
3.0×10^{-12}

$(1.699 \times 10^{-11} \rightarrow 1.725 \times 10^{-11})$

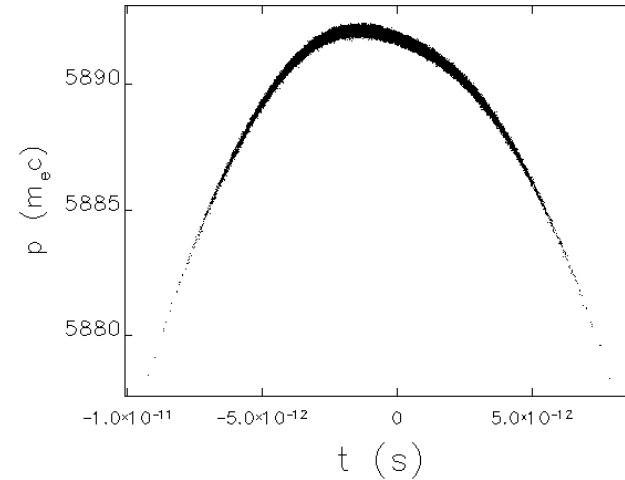
$(\Delta\epsilon_x = \text{sqrt}(\epsilon_{x1}^2 - \epsilon_{x2}^2))$ と定義)

✓ $\Delta\epsilon_x$ は放射励起のみの計算結果に近く、CSR wakeによるものはほとんど無いと考えられる。

Ultimate mode II



watch-point phase space--input: 3GeV.ele lattice: 3GeV-20120604.lte



watch-point phase space--input: 3GeV.ele lattice: 3GeV-20120604.lte

縦方向位相空間: (左)加速直後・周回前、(右)周回直後減速直前
スケールは等しい。スケーリングの都合で中心がずれている。

$$\Delta\sigma_{\delta} \quad -7.0 \times 1e-5 \\ (1.867 \times 1e-4 \rightarrow 1.731 \times 1e-4)$$

$$\Delta E/E_0 \quad -1.6 \times 1e-4$$

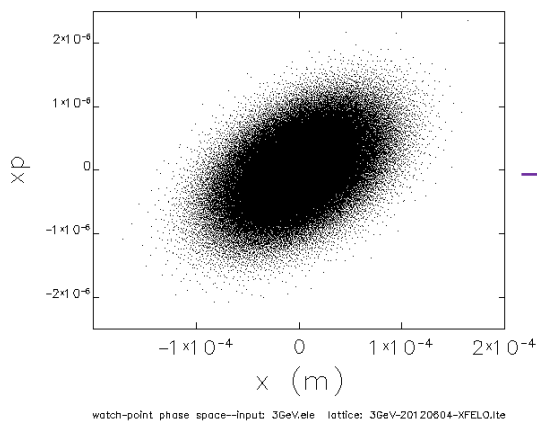
- ✓ CSR wakeによってRF curveの中心が押しつぶされ、全体の σ_{δ} は下がる傾向。
- ✓ スライス σ_{δ} は放射励起によって増加する。

XFEL mode I (Case A)

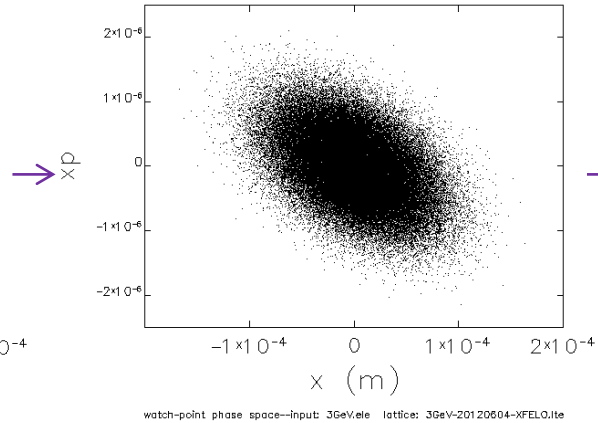
初期値: $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}, Q, \sigma_z) = (1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-3}, 20 \text{ pC}, 1 \text{ ps})$

放射励起の影響・RF curvatureの影響を含めて、synch_rad=1, ISR=1, RF周波数を1.3GHzに戻した。
直線部に流れるCSR wakeについて評価したが、遮蔽効果は考慮していない。

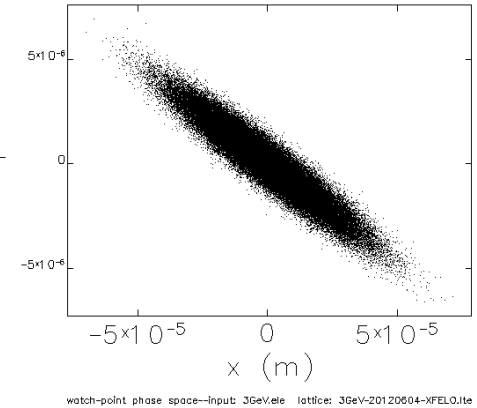
1. Emittanceの変化



加速直後周回前



周回後再加速直前



再加速後
(スケールは左図と異なる。)

規格化エミッタンス ϵ_{nx}

$\epsilon_{nx} : 1.001 \times 10^{-7}$ [mrad]

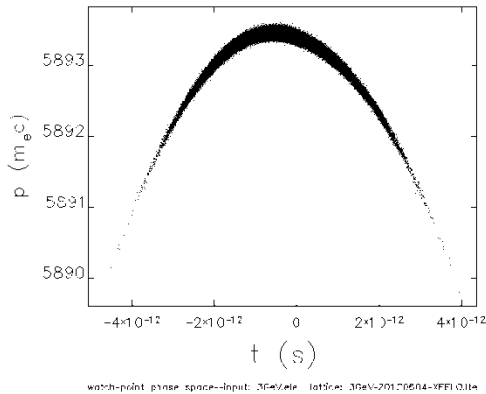
$\epsilon_{nx} : 1.015 \times 10^{-7}$ [mrad]

$\epsilon_{nx} : 1.015 \times 10^{-7}$ [mrad]

- ✓ 規格化エミッタンス0.1 mm-mradは1%程度の精度で維持可能である。
- ✓ 周回前後(3GeV)の $\Delta\epsilon_x$ はおよそ 2.8×10^{-12} であり、放射励起のみの計算結果に近く、CSR wakeの影響は見られない。

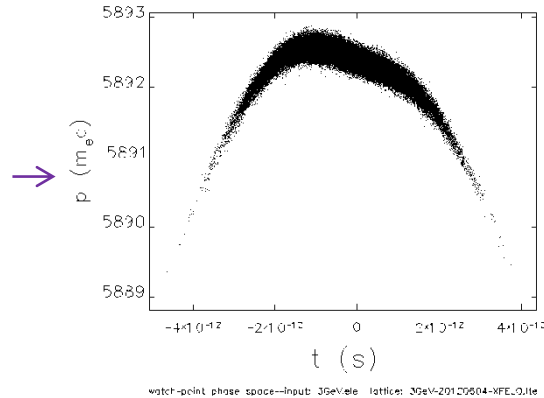
XFELO mode II (Case A)

2. Energy spreadの変化



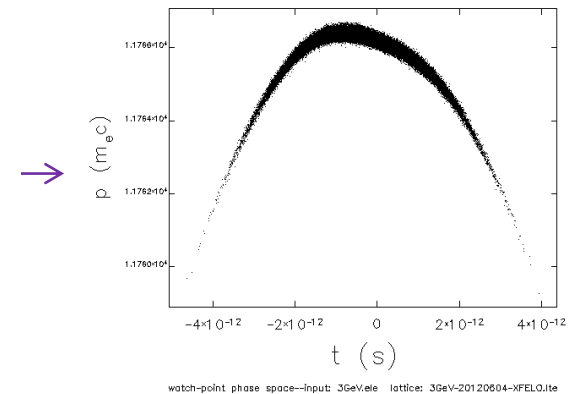
加速直後周回前

σ_δ : 4.799×10^{-5} [mrad]



周回後再加速直前

σ_δ : 4.341×10^{-5} [mrad]



再加速後

σ_δ : 4.390×10^{-5} [mrad]

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

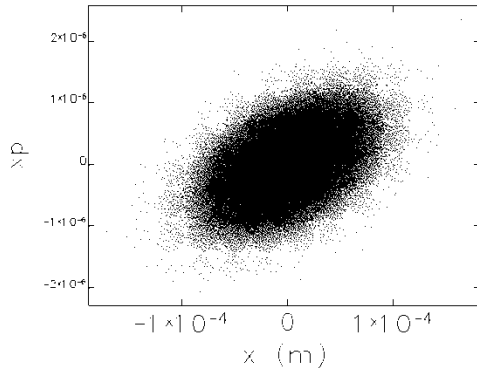
XFEL mode I (Case B)

新しい電子ビームの条件が提示されたので検討

初期値: $(\epsilon_{nx}, \sigma_\delta @ 10\text{MeV}, Q, \sigma_z) = (1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-3}, 7.7 \text{ pC}, 0.38 \text{ ps})$

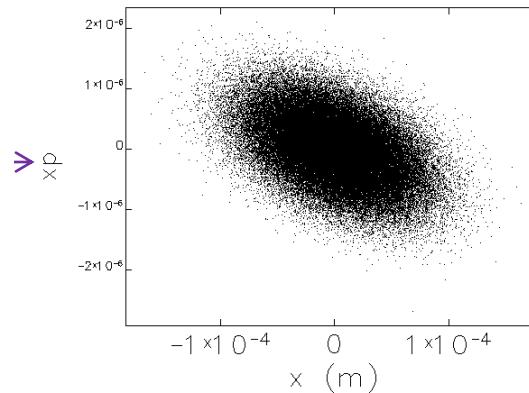
放射励起の影響・RF curvatureの影響を含めて、synch_rad=1, ISR=1, RF周波数を1.3GHzに戻した。
直線部に流れるCSR wakeについて評価したが、遮蔽効果は考慮していない。

1. Emittanceの変化



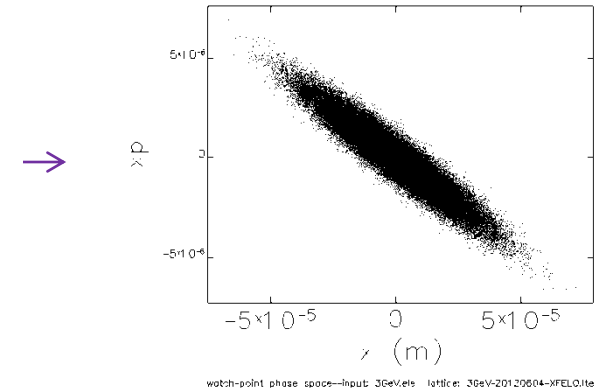
加速直後周回前
規格化エミッタンス ϵ_{nx}

$\epsilon_{nx} : 1.001 \times 10^{-7} \text{ [mrad]}$



周回後再加速直前

$\epsilon_{nx} : 1.015 \times 10^{-7} \text{ [mrad]}$



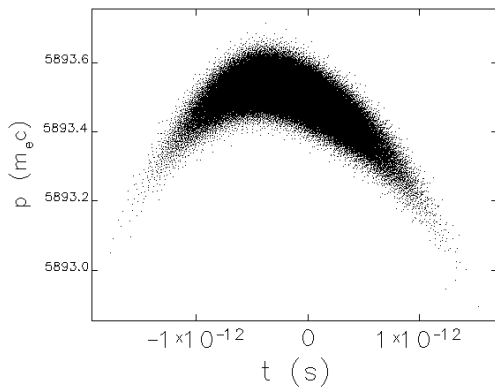
再加速後
(スケールは左図と異なる。)

$\epsilon_{nx} : 1.015 \times 10^{-7} \text{ [mrad]}$

- ✓ 規格化エミッタンス0.1 mm-mradは1%程度の精度で維持可能である。
- ✓ Case Aと同様に、放射励起のみの計算結果に近く、CSR wakeの影響は見られない。

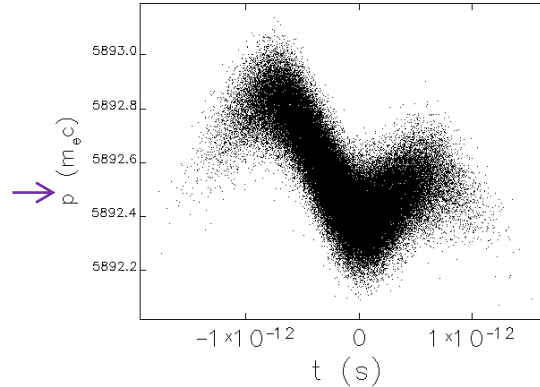
XFEL mode II (Case B)

2. Energy spreadの変化



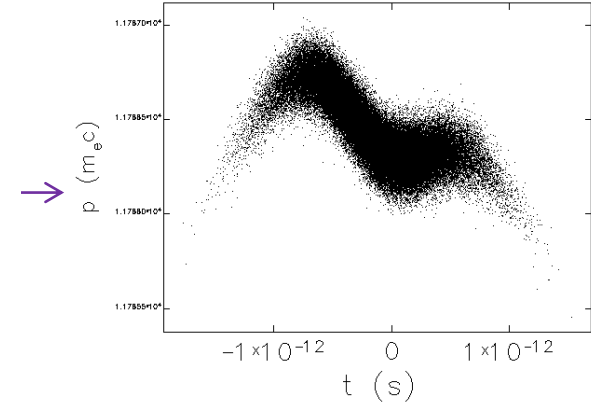
watch-point phase space--input: 3GeV.ele lattice: 3GeV-20120604--XFEL0.lite

加速直後周回前



watch-point phase space--input: 3GeV.ele lattice: 3GeV-20120604--XFEL0.lite

周回後再加速直前



watch-point phase space--input: 3GeV.ele lattice: 3GeV-20120604--XFEL0.lite

再加速後

σ_δ : 1.105×10^{-5} [mrad]

σ_δ : 2.771×10^{-5} [mrad]

σ_δ : 1.496×10^{-5} [mrad]

- ✓ Case Aに比べて、エネルギー広がり小さくなる。
 - ✓ バンチ長が小さいため、RF curveの影響が小さい。
 - ✓ CSR wakeがRF curveを補正するように働く。
 - ✓ Transientの長さはおよそ1m。(Case Aでは1.7m)

まとめ

- 3 GeV ERLのエミッタンス増加やエネルギー広がりを原因毎に評価した。
 - 放射励起
 - $\Delta\sigma_\delta$ は解析解と一致した。 $\Delta\varepsilon_x$ は定義について検討が必要である。
 - CSR wake
 - DRIFTに流れるCSRwakeを考慮すると、 $\Delta\sigma_\delta$ が数倍に増加した。
 - $\Delta\varepsilon_x$ の増加は計算誤差以下であった。
 - 遮蔽効果を入れていないので、今後考慮する必要がある。
 - 空洞の縦方向のwake
 - $\Delta\sigma_\delta$ は放射励起やCSR wakeよりも大きかったが、Off crest加速などで対処出来そうである。
 - 仮にTESLA空洞のwake functionで計算しているため、今後ERL空洞に更新する必要がある。
- 現実的なultimate modeやXFEL modeのパラメータで評価した。
 - エミッタンス増加は放射励起の解析解とほぼ一致し、CSR wakeの影響はほとんどないと思われる。
 - σ_δ の主な原因はRF curvatureであるが、XFELのCase BではCSR wakeの影響も見られる。
 - CSR wakeによってRF curveの中心が押し下げられて σ_δ が減少する。
 - スライス σ_δ は放射励起によって増加する。
 - XFELでは発振に必要な0.1 mm-mradの低エミッタンスや 5×10^{-5} の低いエネルギー広がりを維持できる見込み。