

# ERL 入射器における ビームダイナミクス

原研、光量子、FEL グループ

羽島 良一

# ERL 入射器に要求される性能

- 大電流 --- 平均電流 100mA 以上 ( $77\text{pC} \times 1.3\text{GHz} = 100\text{mA}$ )  
規格化エミッタンスは 1mm-mrad 程度 (小さいほどよい)

第3世代放射光と同程度の電流値 (X線フラックス) を確保

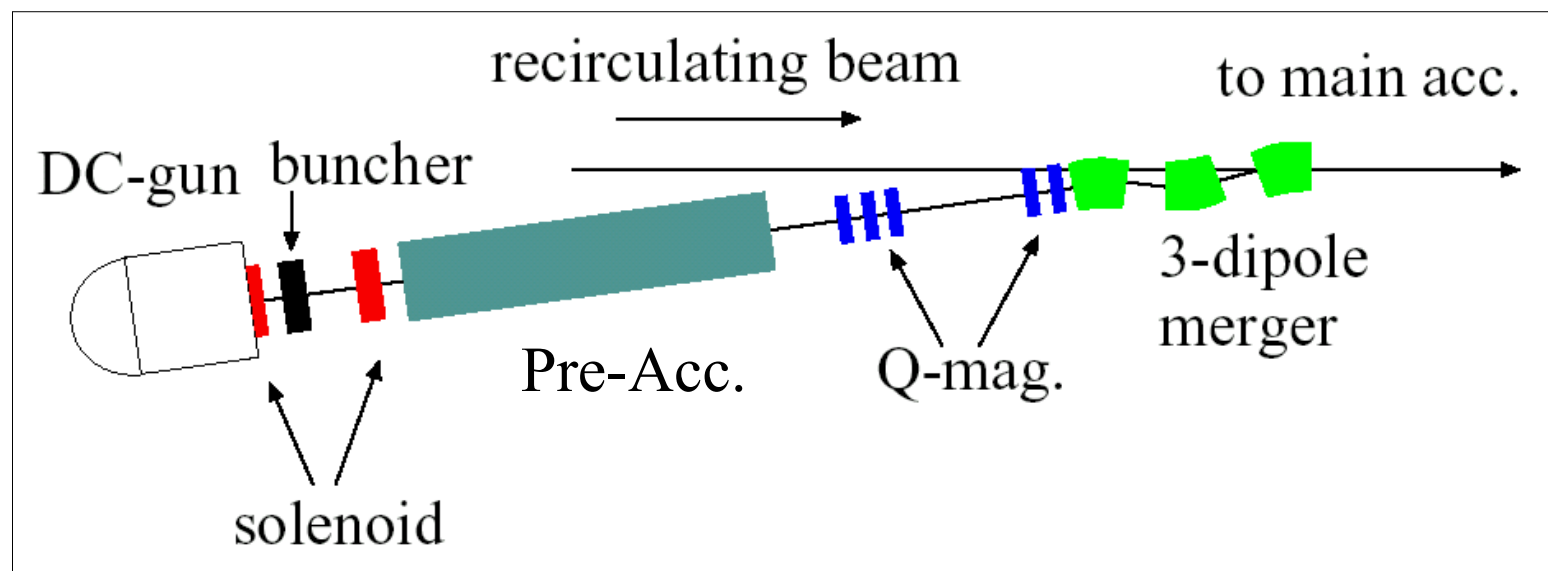
- 低エミッタンス --- 規格化エミッタンス 0.1mm-mrad 以下  
電流は 10mA 程度 (大きいほどよい)

1 Å の X 線がコヒーレントになる条件

$$\varepsilon_n / \gamma < \lambda / 4\pi$$

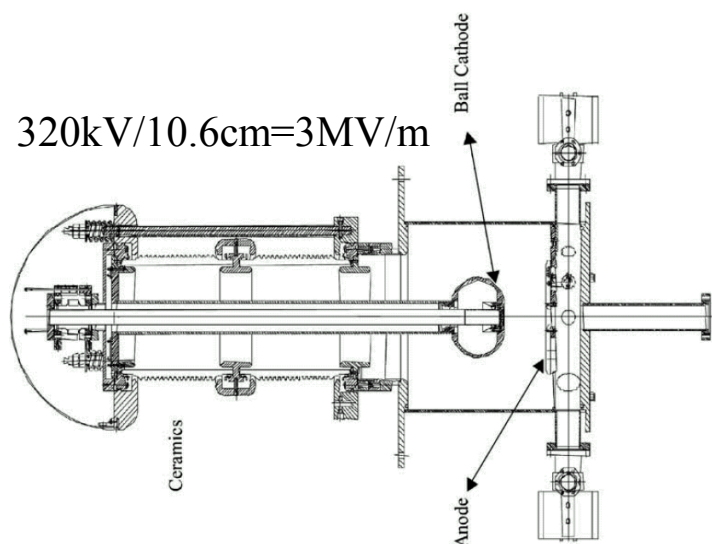
- 上記二つは、同時に達成されなくてもよい (切り替え運転)
- 電流、エミッタンスは、入射器で決まる

# ERL 入射器の構成

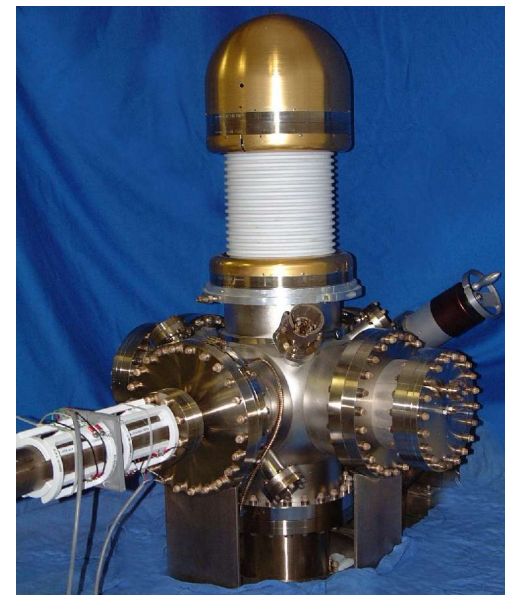


- ▶ 電子銃、入射加速器、収束磁石等からなる
- ▶ 電子バンチの特性 ( エミッタンス、バンチ長 ) は、merger 出口まで変化する
- ▶ 偏向磁石を含む = x-y 非対称のビームエンベロープ
- ▶ 工学的課題も存在 ( 本発表では触れない )  
 カソード寿命、high-power coupler、HOM など

# DC フォトカソード電子銃



T.Siggins et al., NIMA-475, 549 (2001)

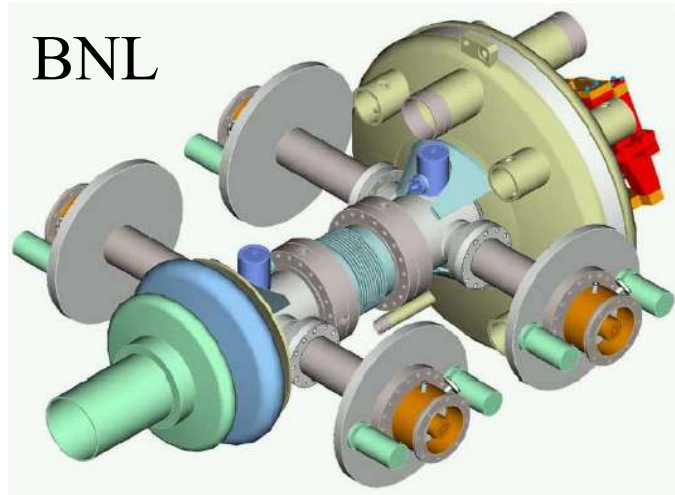


[http://www.jlab.org/accel/inj\\_group/btllpeg/Aug02.html](http://www.jlab.org/accel/inj_group/btllpeg/Aug02.html)

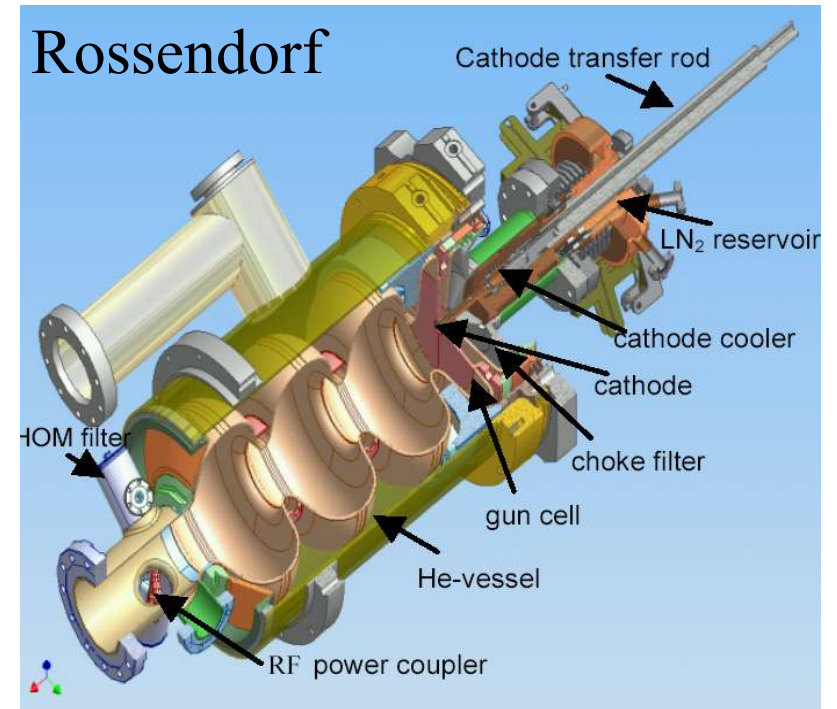
## ビームダイナミクスの観点から

- 大電流が可能 ( $Q.E.=10\%$ ,  $P_{\text{laser}}=1.6\text{W} \rightarrow 100\text{mA}$ )
- 小さな初期エミッタンス (熱エミッタンスが小さい)
- 加速勾配、加速電圧の限界
- バンチ長の制約 (吸収深さから  $>10\text{ps}$ )
- 時間依存の電磁場がない (エミッタンス補償が容易)

# 超伝導 RF フォトカソード電子銃



I.Ben-Zvi et al., FEL-2004.



D.Janssen et al., FEL-2004.

## ビームダイナミクスの観点から

- 1nC 程度の電荷量まで対応 (電界  $\sim 10\text{MV/m}$ )
- 印加磁場に制約 (超伝導状態の破壊) = エミッタンス補償に工夫が必要  
    端板の傾斜 (収束電場)、TE-mode 励起 (収束磁場) などの提案
- input-coupler, HOM-coupler による非軸対称性

# ERL 入射器構成の選択

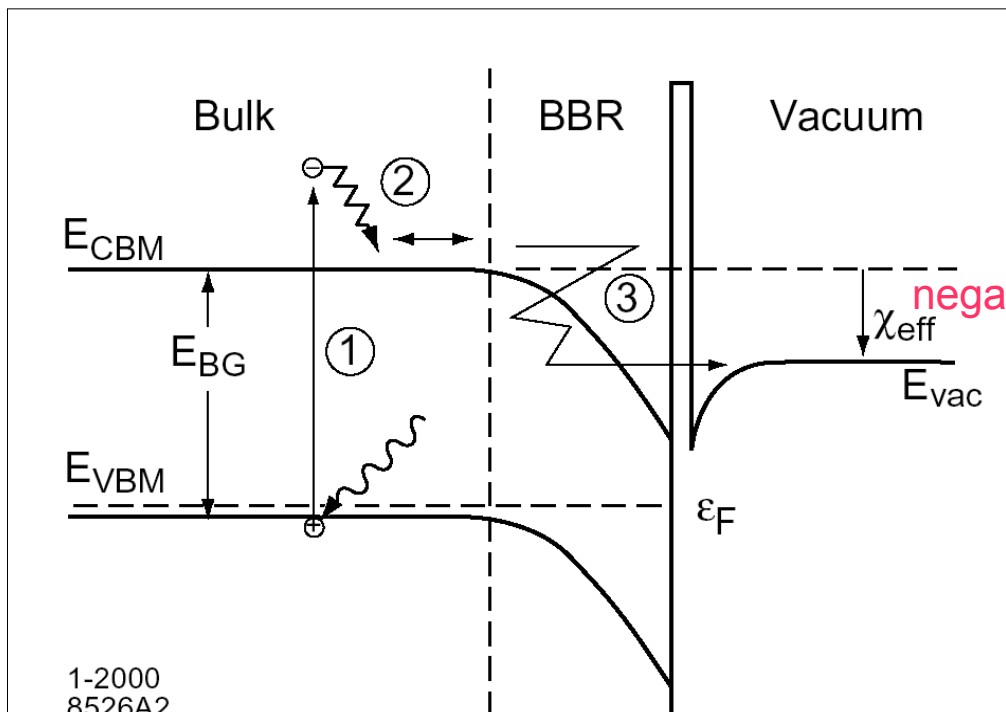
## DC-photocathode gun

- 0.1mm-mrad を狙える唯一の候補 (NEA カソード利用可能)
- 熱エミッタンス : バンド構造と密接な関係
- 空間電荷 ( $E_r$ ) : ソレノイド磁場による補償 (RF-gun と同様)
- バンチャーが必要 : 15ps  $\rightarrow$  3ps

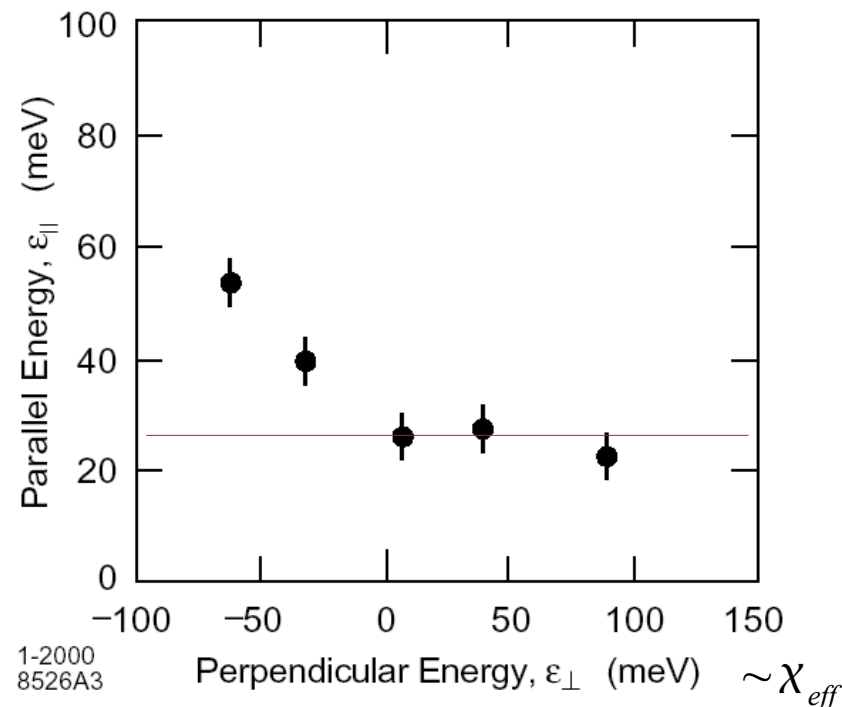
## SRF-photocathode gun

- 1nC/1mm-mrad を狙える (DC より高い加速勾配)
- カソードは、CsTe や KCsSb など
- 平均電流の制約 (レーザー出力、波長変換)
- ダイヤモンド薄膜による電子増倍の提案 (BNL)
  - ▶ アンペア級の平均電流が実現?

# GaAs-NEA カソードの熱エミッタンス



1. photon absorption
2. diffusion, thermalization of electrons
3. approach to surface (band-bending region)  
tunnel through the barrier to vacuume



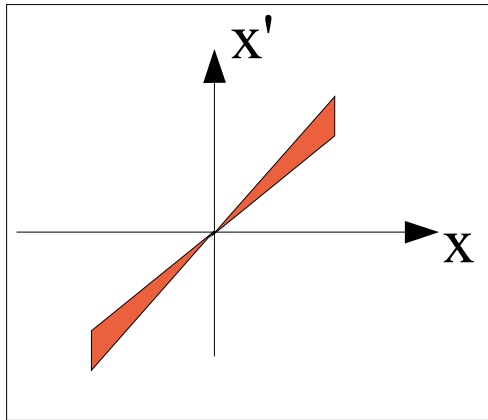
J.E.Cledenin et al., SLAC-PUB-8355(2000).

$$\varepsilon = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

$$\varepsilon_{th} = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}$$

$$r = 1 \text{ mm}, \quad kT = 35 \text{ meV} \rightarrow \varepsilon_{th} = 0.13 \text{ mm-mrad}$$

# 投影エミッタンスの増大 (Er)



位相平面における蝶ネクタイ状の変形

ソレノイド磁石によるエミッタンス補償が可能

B.E.Carlsten[1] 以来、多数の解析、実験

[1] NIMA-285, 313 (1989).

これらは、軸対称ビームを前提にしている

ERL 入射器合流部における、Er の効果

$E=5\text{ MeV}$ ,  $I_p=5\text{ A}$ ,  $\sigma_r=0.4\text{ mm}$  として空間電荷が無視できるか？

$\frac{I}{2I_0} \frac{\sigma_r^2}{\beta\gamma} \ll \varepsilon_{n,slice}^2$       ビームエンベロップが emittance-dominated になる条件

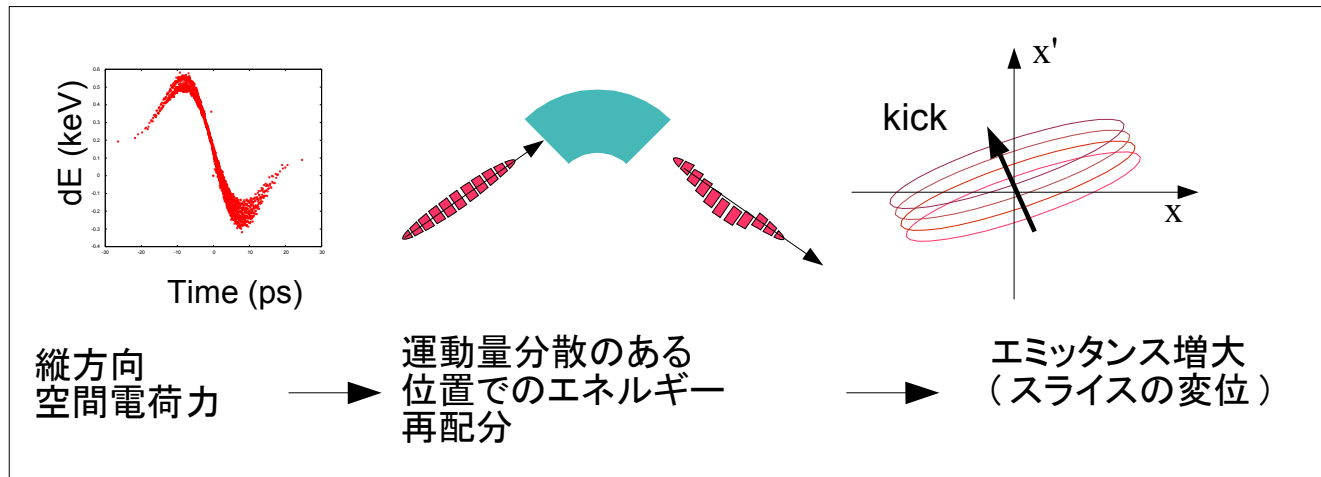
$2 \times 10^{-12} \text{ m}^2 > 0.02 \times 10^{-12} \text{ m}^2$       空間電荷 (Er) の効果が無視できない

つまり、非軸対称ビームの「蝶ネクタイ状変形」と「復元」を扱う必要がある

リングにおける incoherent tune shift と似た現象



# 投影エミッタンスの増大 ( Ez, CSR )



空間電荷ポテンシャル一定の近似のもと、線形解析が可能

ref. 羽島、加速器学会 (2004)

$$x'' = -\frac{x}{\rho^2} + \frac{1}{\rho} \underbrace{(\delta_0 + \delta_{SC} - \kappa [s - s_0])}_{\text{空間電荷効果}}$$

$\rho$  : 偏向軌道の曲率半径       $\kappa$  : 規格化した空間電荷ポテンシャル

$\delta_{SC}$  : 上流で生じた空間電荷による運動量変化      : 偏向磁石入口の座標

→ R-matrix 解析が使える

$$\vec{x}(s) = (x, x', \delta_0, \kappa L, \kappa)^T \quad \vec{x}(s_1) = R \vec{x}(s_0)$$

# 投影エミッタンスの増大 ( Ez, CSR )

## 空間電荷分散関数の定義

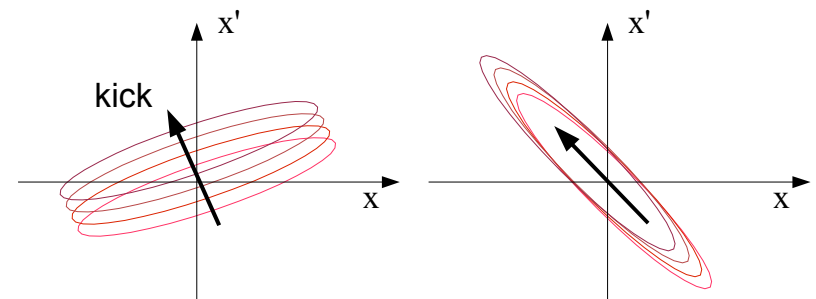
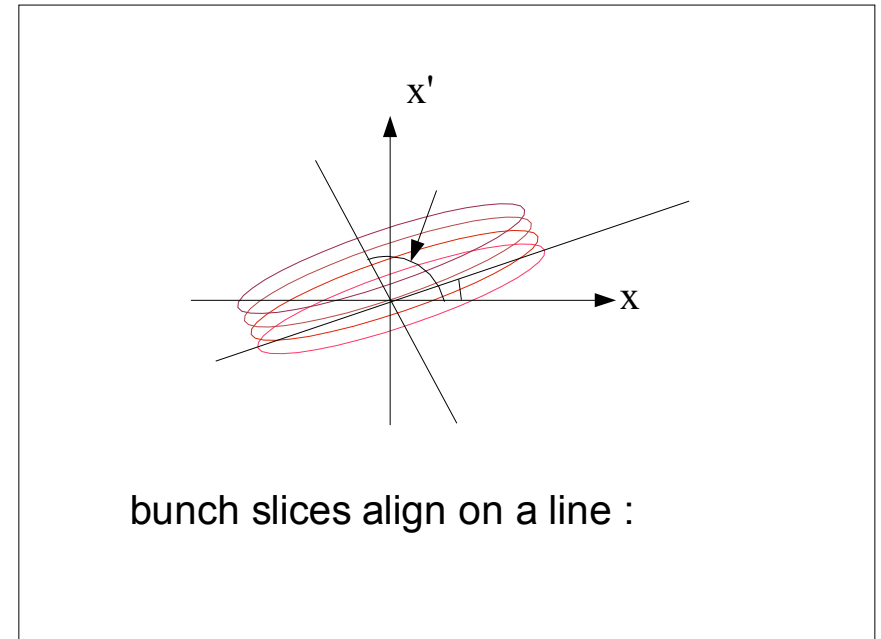
$$\begin{pmatrix} \zeta_x(s_1) \\ \zeta'_x(s_1) \\ 0 \\ L(s_1) \\ 1 \end{pmatrix} = R_{0 \rightarrow 1} \begin{pmatrix} \zeta_x(s_0) \\ \zeta'_x(s_0) \\ 0 \\ L(s_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

スライス変位の広がり = ポテンシャルの広がり x 分散関数

$$(D, D') \equiv \kappa_{rms}(\zeta, \zeta')$$

軌道中の任意位置におけるエミッタンス

$$\varepsilon^2 = (\varepsilon_0 \beta_x + D^2)(\varepsilon_0 \gamma_x + D'^2) - (\varepsilon_0 \alpha_x - DD')^2$$

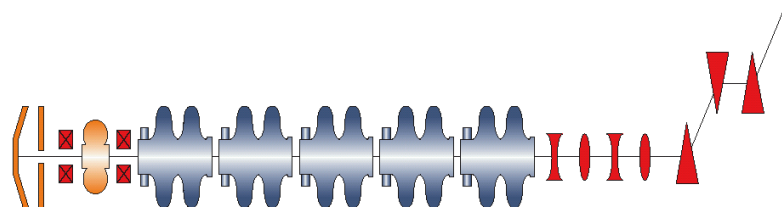


投影エミッタンスは、ビームエンベロープ  $(\alpha, \beta)$  に依存する

最適なエンベロープの存在 = envelope matching

# 設計例 ( Cornell ERL )

I.V.Bazarov et al., PAC-2003.



電子銃電圧 500-750kV

入射加速 6-15MeV

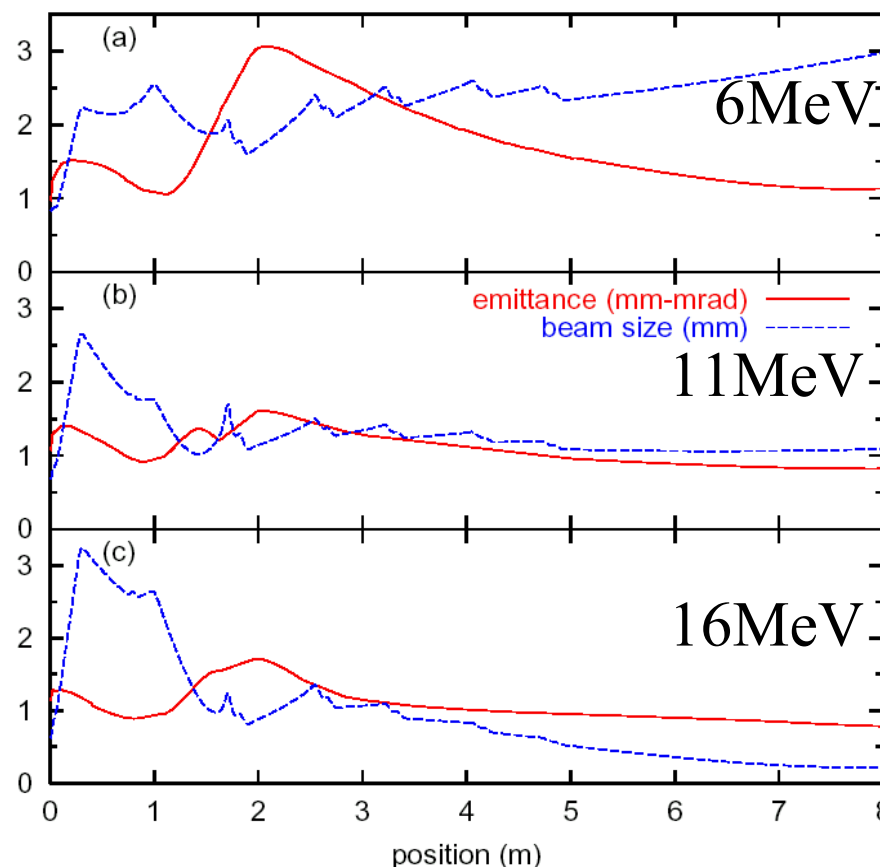
ASTRA: before merger

PARMELA: space charge @ merger

ELEGANT: CSR @ merger

77pC で 1mm-mrad

7.7pC で 0.2mm-mrad



77pC の計算 (ASTRA)

15MeV の時、空間電荷 (+5%)、  
CSR(+25%) のエミッタンス増大

## ▶ 二つのモードの両立

大電流モード:  $77\text{pC} \times 1.3\text{GHz} = 100\text{mA}$ ,  $\epsilon_n = 1\text{mm-mrad}$

コヒーレントモード:  $7.7\text{pC} \times 1.3\text{GHz} = 10\text{mA}$ ,  $\epsilon_n = 0.1\text{mm-mrad}$

## ▶ 電子銃電圧、入射加速エネルギー

→ 低いほどよい(工学的観点、経済的観点)

Cornell (750kV + 15MeV) 低くできないか?

## ▶ バンチ圧縮とエミッタンス補償を同時に行う

(超電導空洞には磁場をかけられない点も制約)

## ▶ 合流部に偏向磁石がある

$E_z$ 、CSR → エミッタンス増大

(x,y) 非対称のビームエンベロップ → Q が必要

# ERL 入射器の設計例

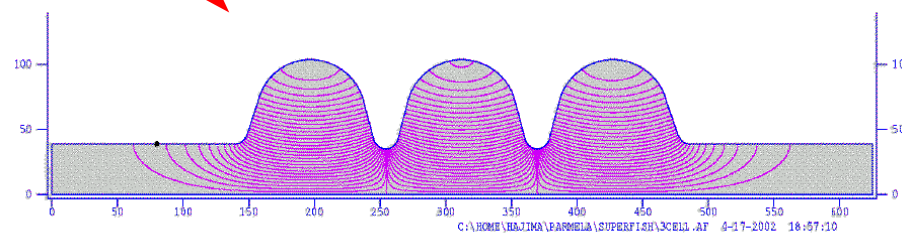
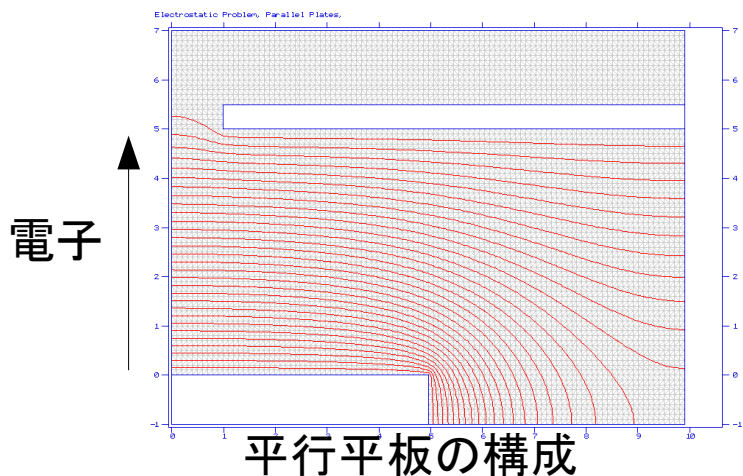
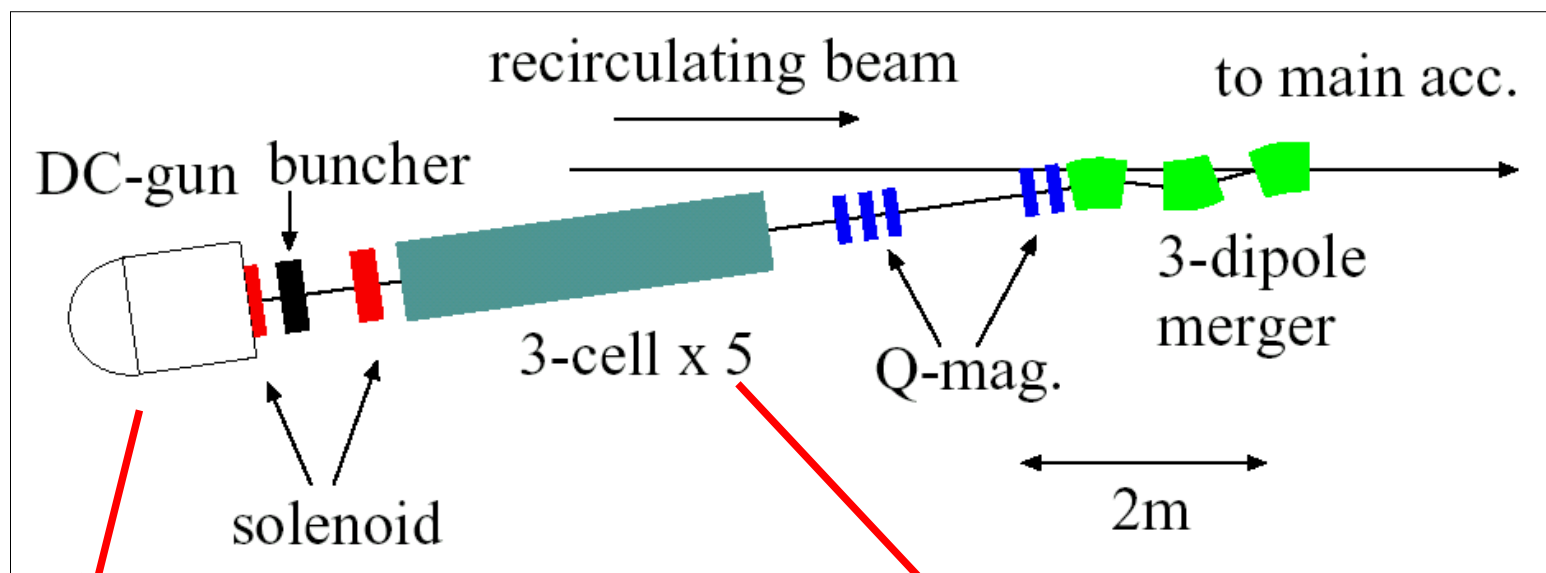
検討課題をふまえて、設計を行ってみる。

大電流モード:  $77\text{pC} \times 1.3\text{GHz} = 100\text{mA}$ ,  $\varepsilon_n = 1\text{mm-mrad}$

コヒーレントモード:  $7.7\text{pC} \times 1.3\text{GHz} = 10\text{mA}$ ,  $\varepsilon_n = 0.1\text{mm-mrad}$

- 電子銃 500kV + 入射エネルギー 5MeV とする
- バンチ圧縮とエミッタンス補償の両立  
多次元のパラメータ探査が容易に行える手法を提案
- 合流部におけるエミッタンス増大の抑制  
merger 構成の最適化と envelope matching

# 入射器の構成例



TESLA 9-cell を縮めた形状の 3-cell cavity  
1 cavity あたり 最大 100kW (1MeV x 100mA)

カソード、アノード間 = 500kV / 50mm  
アノード穴  $\phi$  20mm

電子銃、空洞ともに、最適化の余地あり (今後の検討)

# 多次元パラメータ空間の探査

それぞれが、エミッタンス増大、バンチ圧縮と関連している

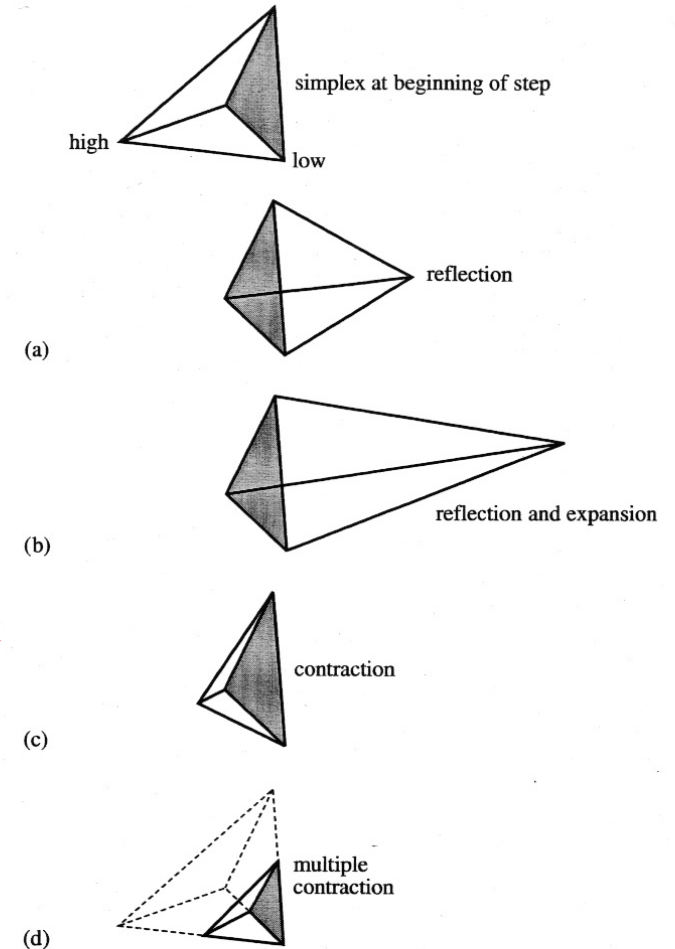
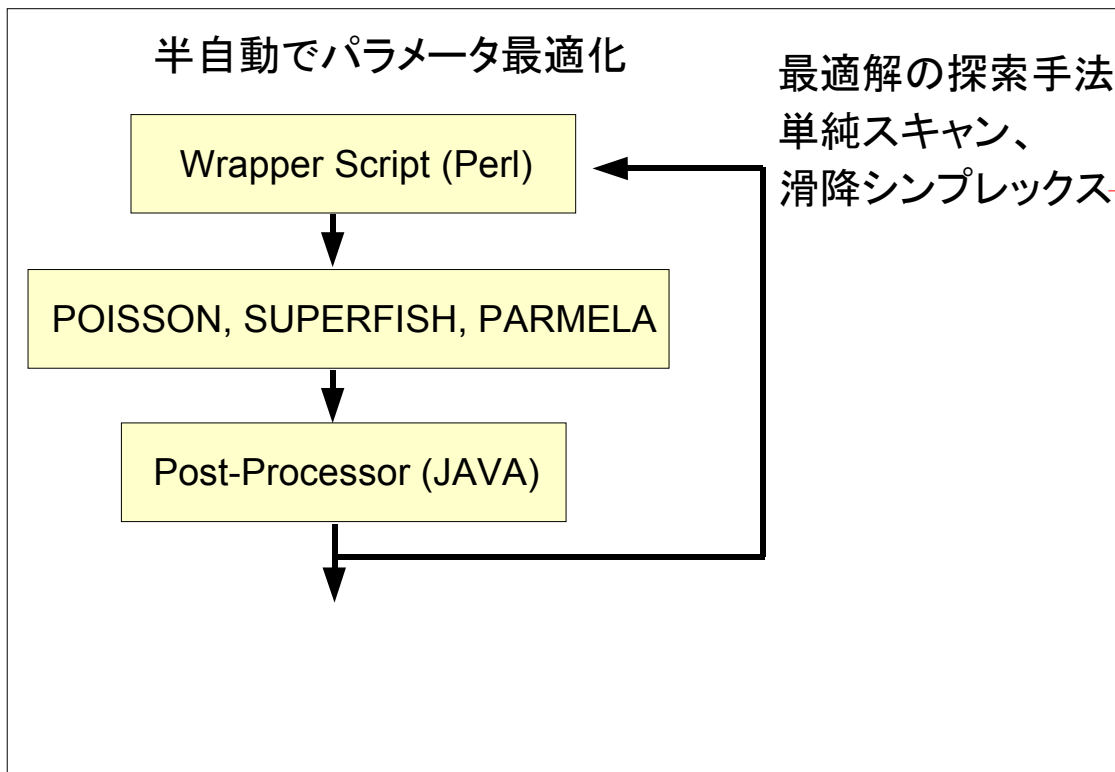
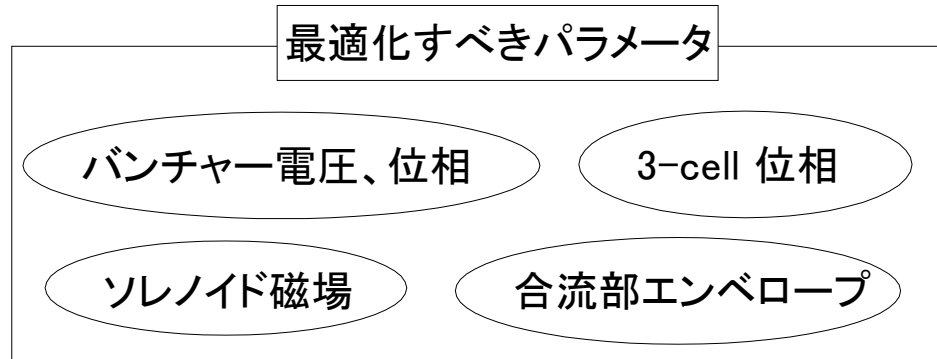
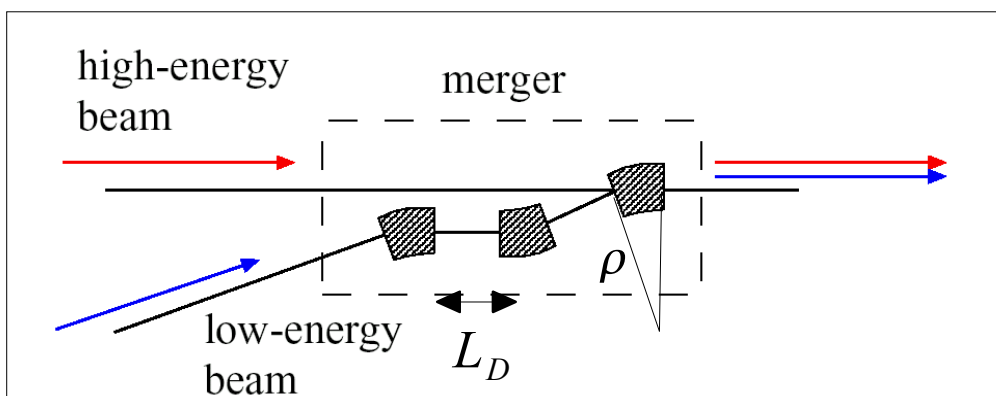


Figure 10.4.1. Possible outcomes for a step in the downhill simplex method. The simplex at the beginning of the step, here a tetrahedron, is shown, top. The simplex at the end of the step can be any one of (a) a reflection away from the high point, (b) a reflection and expansion away from the high point, (c) a contraction along one dimension from the high point, or (d) a contraction along all dimensions towards the low point. An appropriate sequence of such steps will always converge to a minimum of the function.

# merger の最適化

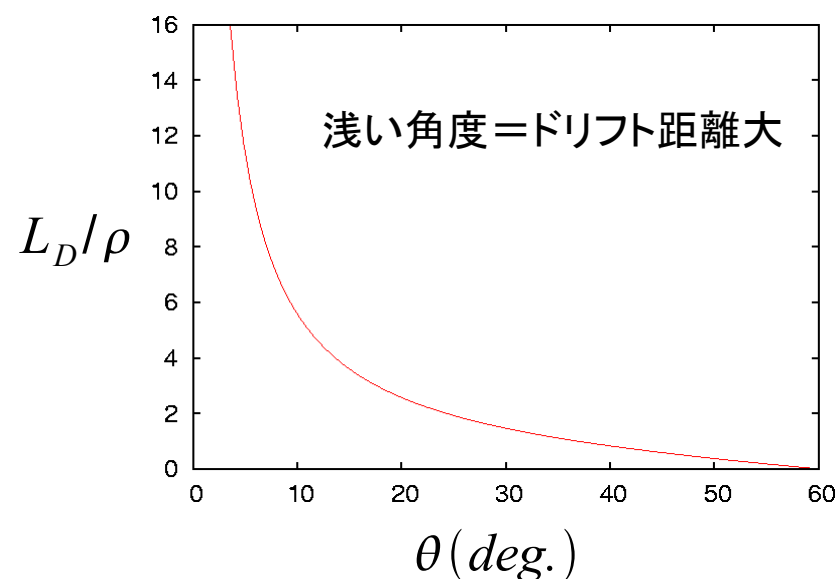


浅い偏向角度と短いドリフトを  
両立させる解

中央磁石にエッジ角を与える  
異なる偏向角度の組み合わせる

アクロマティックになる条件 (エッジ角をつけない場合)

$$L_D / \rho = \cot(\theta) - \tan(\theta/2)$$



合流部偏向磁石 15-22+15 = 8 deg.

エッジ角 -20 deg.

軌道半径  $\rho = 1$  m

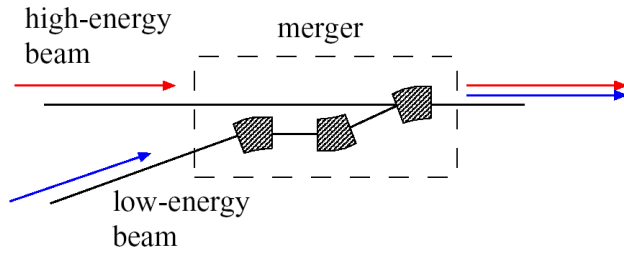
磁石間ドリフト 0.316m

R56 = 0.044m

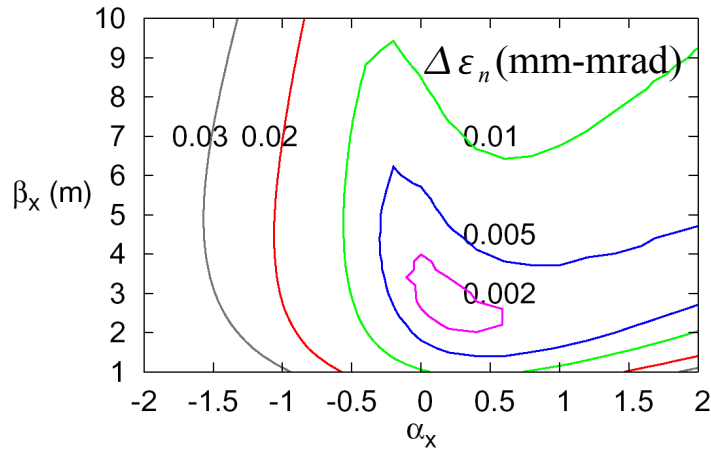
cryomodule ( $\phi 670$ mm) が干渉しない  
ぎりぎりの合流角度を選んだ



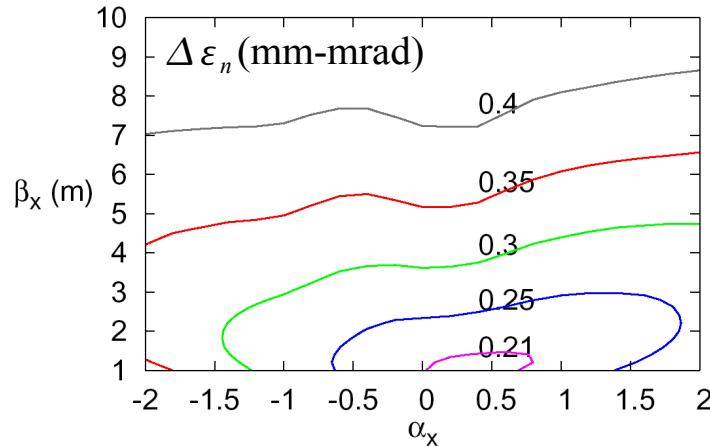
# envelope matching ( Ez の影響を最小に)



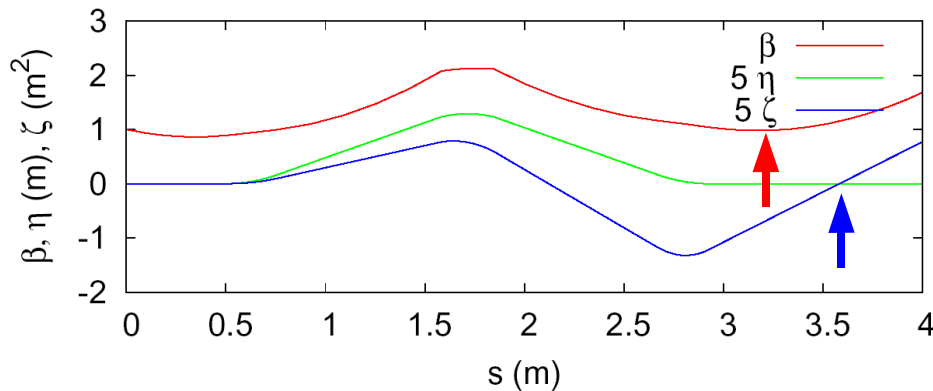
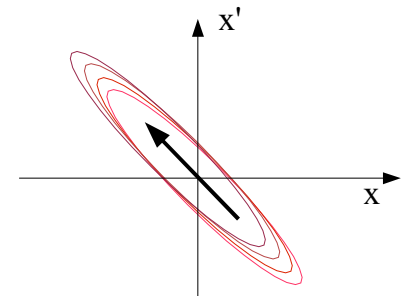
merger 入射時のビームエンベロップを変えながら、エミッタンス増大を計算  
 ( PARMELA シミュレーション,  $E=10\text{MeV}$ ,  $q=77\text{pC}$ ,  $\epsilon_n=1\text{mm-mrad}$ ,  $\sigma_t=6\text{ps}$  )



合流部におけるエミッタンス増大  
 ( 空間電荷なしの場合, 高次収差 )



合流部におけるエミッタンス増大  
 ( 空間電荷ありの場合 )

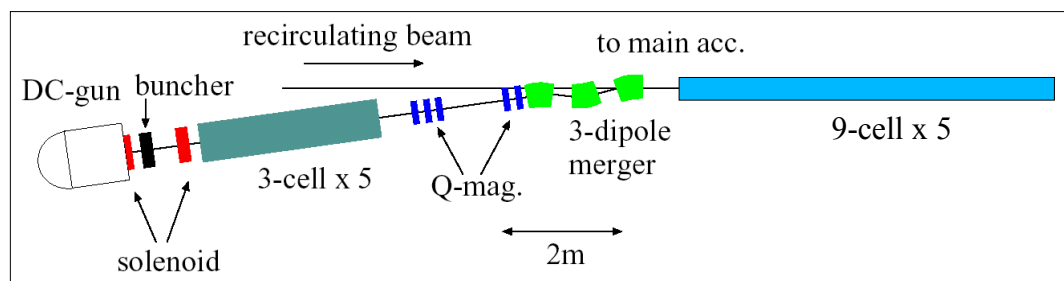


エミッタンス最小となるエンベロップは  
 線形解析で得られる最適解に近い



線形解析の結果を初期値として、  
 最適解を探索すればよい

# 大電流モードの最適解

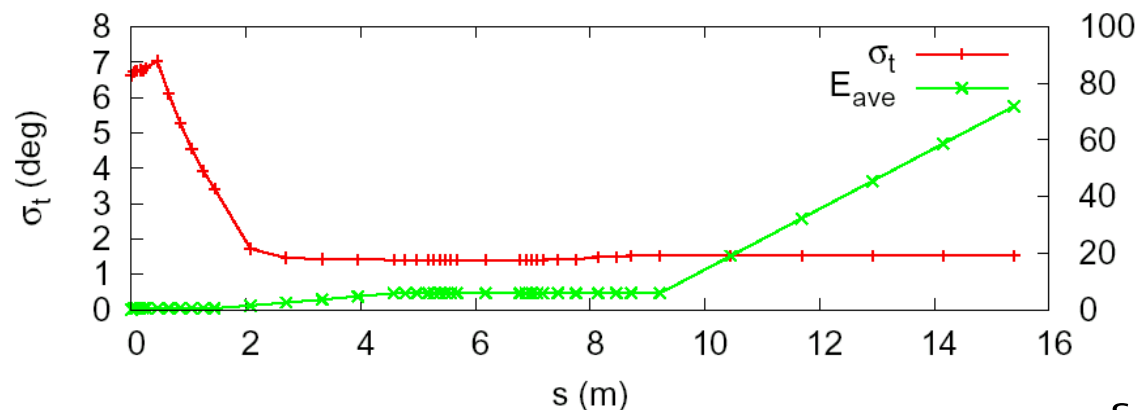
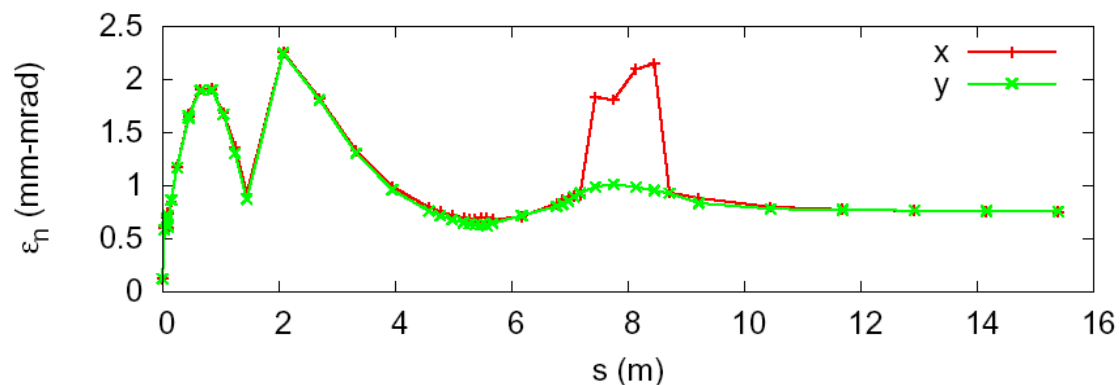


電荷量 77pC (100mA)

カソード面における初期値  
 電子温度(横方向) 35meV  
 空間分布: 一様  $r=1.5\text{mm}$

熱エミッタンス  $0.2 \pi\text{mm-mrad}$

時間分布: Gaussian  $\sigma_t = 14\text{ps}$



72MeV 加速 (9-cell x 5 通過) 位置で

$$\varepsilon_{n,x} = 0.75 \pi \text{ mm-mrad}$$

$$\varepsilon_{n,y} = 0.76 \pi \text{ mm-mrad}$$

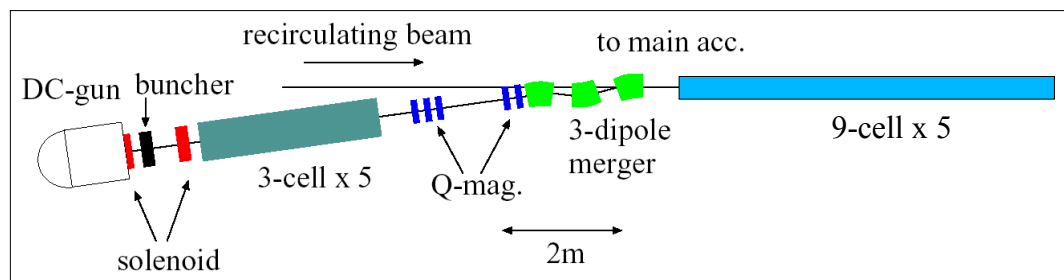
$$\varepsilon_z = 38 \text{ deg-keV}, \quad \sigma_t = 3.2 \text{ ps}$$

CSR の効果 (ELEGANT)

$$\Delta \varepsilon_{n,x} = 0.089 \pi \text{ mm-mrad}$$

$$\varepsilon_{n,x} = \sqrt{0.75^2 + 0.089^2} \simeq 0.76 \pi \text{ mm-mrad}$$

# 低エミッタンスモードの最適解



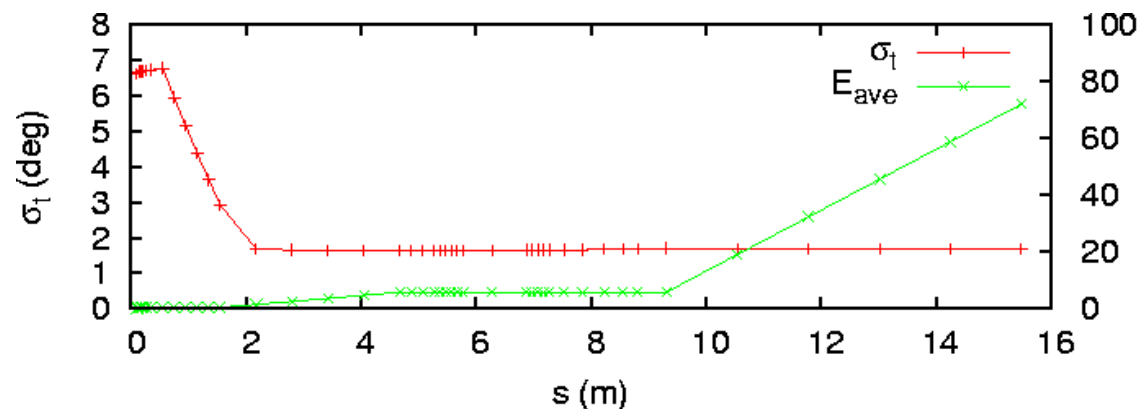
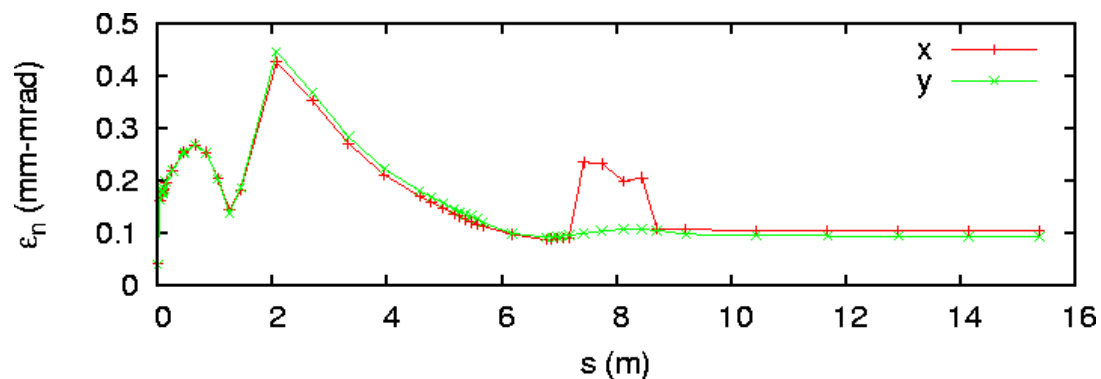
電荷量 7.7pC (10mA)

カソード面における初期値  
 電子温度(横方向) 35meV  
 空間分布: 一様  $r=0.5\text{mm}$

熱エミッタンス  $0.065\pi\text{mm-mrad}$

時間分布: Gaussian  $\sigma_t = 14\text{ps}$

72MeV 加速 (9-cell x 5 通過) 位置で



$$\varepsilon_{n,x} = 0.105 \pi \text{ mm-mrad}$$

$$\varepsilon_{n,y} = 0.094 \pi \text{ mm-mrad}$$

$$\varepsilon_z = 48 \text{ deg-keV}, \quad \sigma_t = 3.6 \text{ ps}$$

CSR の効果 (ELEGANT)

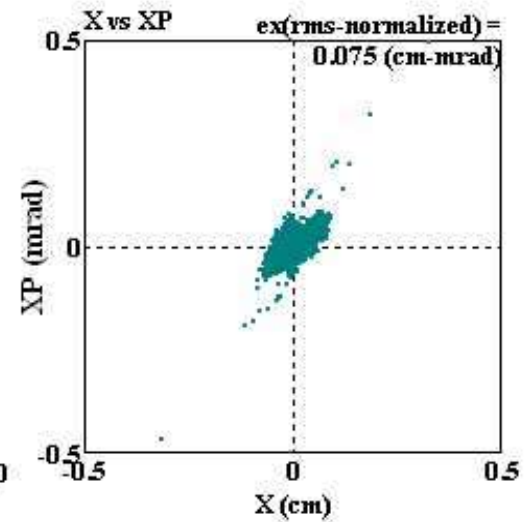
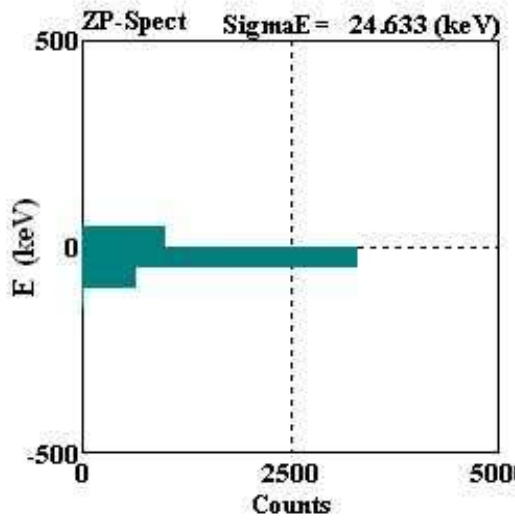
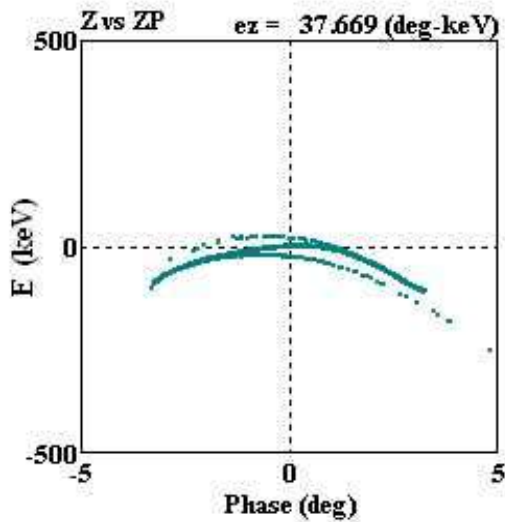
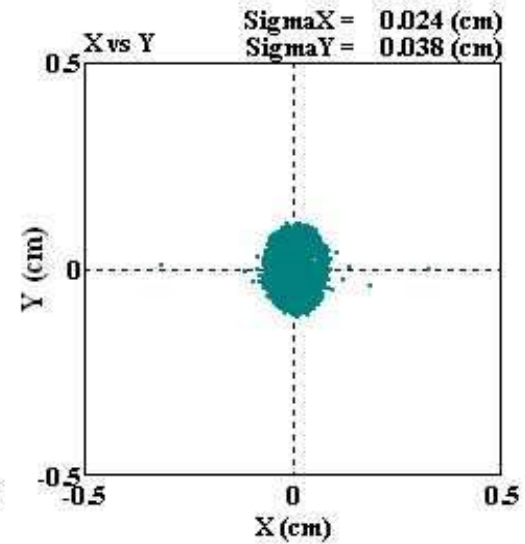
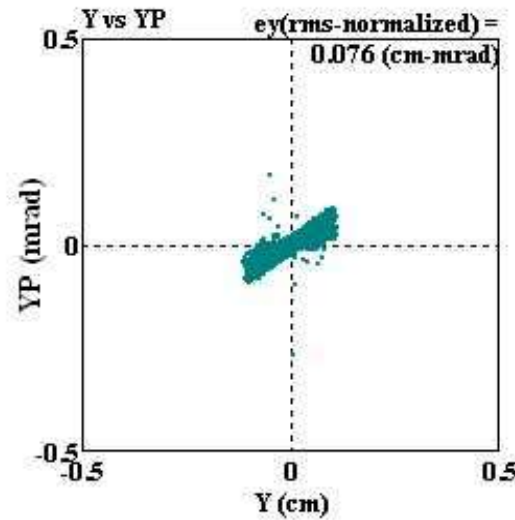
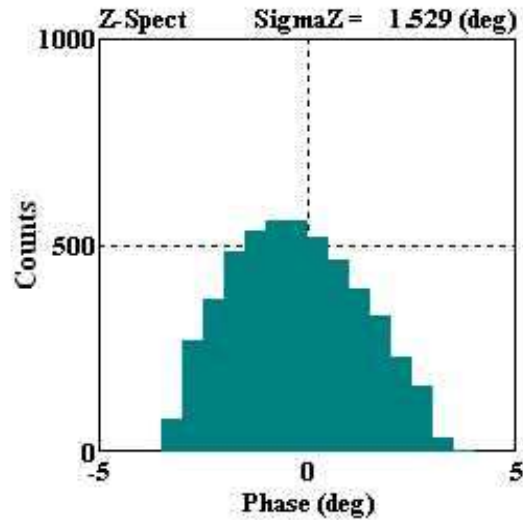
$$\Delta \varepsilon_{n,x} = 0.003 \pi \text{ mm-mrad}$$

$$\varepsilon_{n,x} = \sqrt{0.105^2 + 0.003^2} \simeq 0.105 \pi \text{ mm-mrad}$$

# 大電流モードの電子分布 (72MeV 位置)

DC-gun to merger  
Nbuf=5000

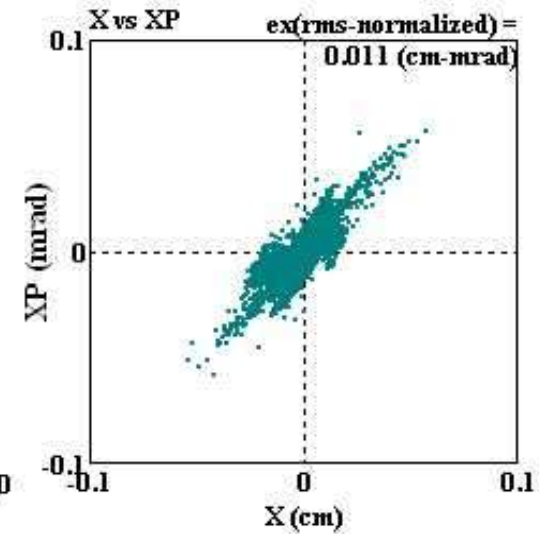
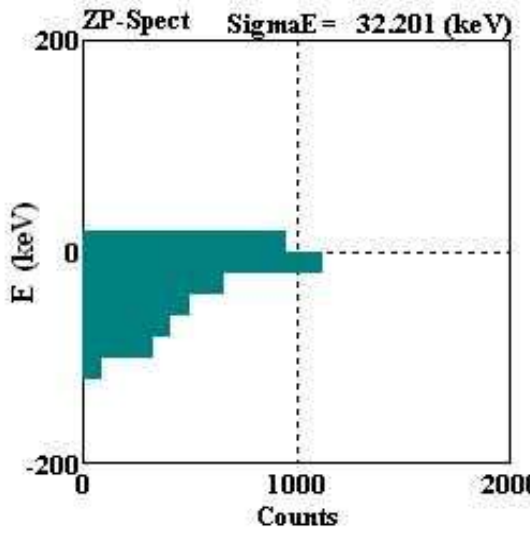
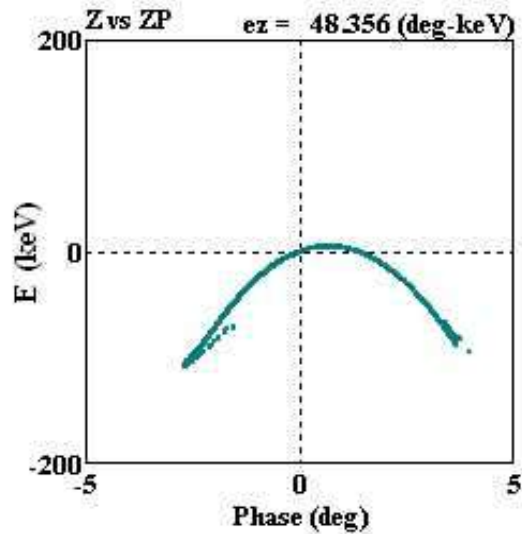
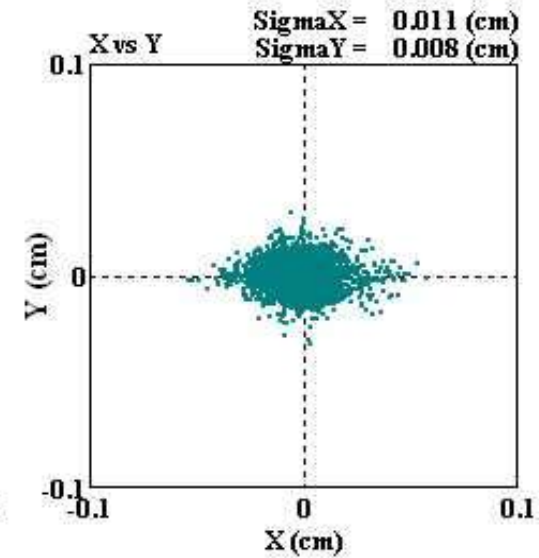
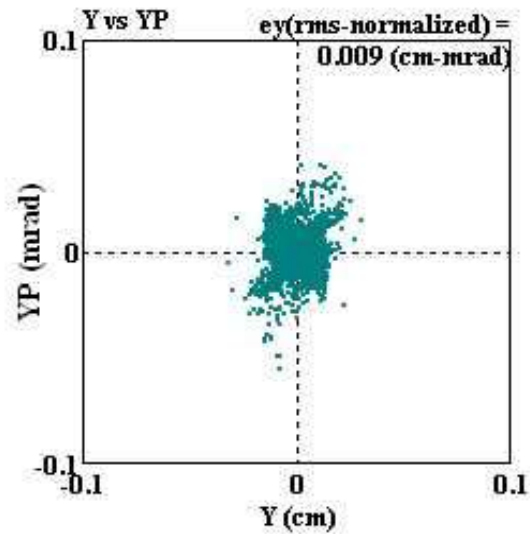
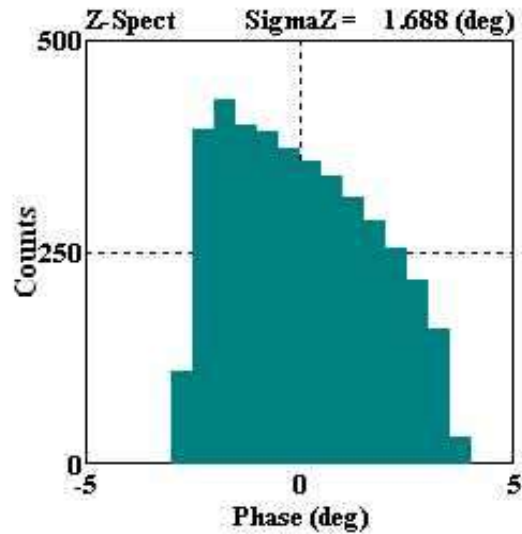
Element No. = 42



# 低エミッタンスモードの電子分布 (72MeV 位置)

7.7pC, high-coherence mode  
Nbuf=4069

Element No. = 48

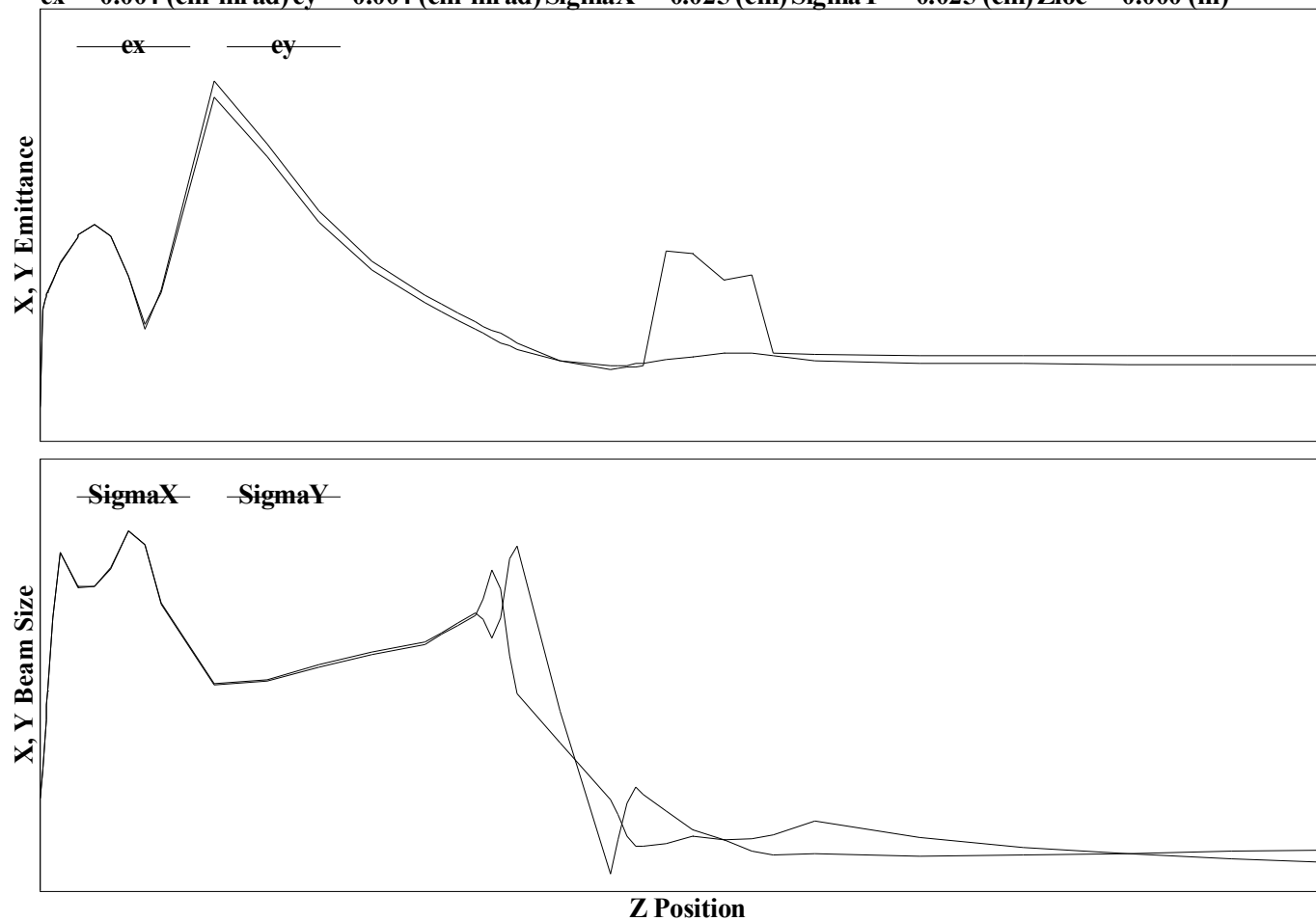


# 低エミッタンスモード

7.7pC, high-coherence mode

Element No. = 1

ex= 0.004 (cm-mrad) ey= 0.004 (cm-mrad) SigmaX= 0.025 (cm) SigmaY= 0.025 (cm) Zloc= 0.000 (m)



# まとめ

- DC-photocathode gun を使った ERL 入射器について、

エミッタンス増大のメカニズムと抑制方法  
最適設計の手法

を示した。

- 大電流モード (100mA)、低エミッタンスモード (0.1mm-mrad) の設計が可能なことを確認した (500kV+5MeV の構成)

- 手付かずの課題

- 軸対称を仮定しない空間電荷計算、
- CSR を含んだ start-to-end シミュレーション、
- 電子銃電極、RF 空洞形状の最適化など、