

入射器超伝導空洞の振幅、 位相誤差の影響(2)

2009年2月17日(火)14時～
第34回ビームダイナミクスWGミーティング
KEK 3号館5F会議室

高エネルギー加速器研究機構 放射光源研究系
宮島 司

計算の目的

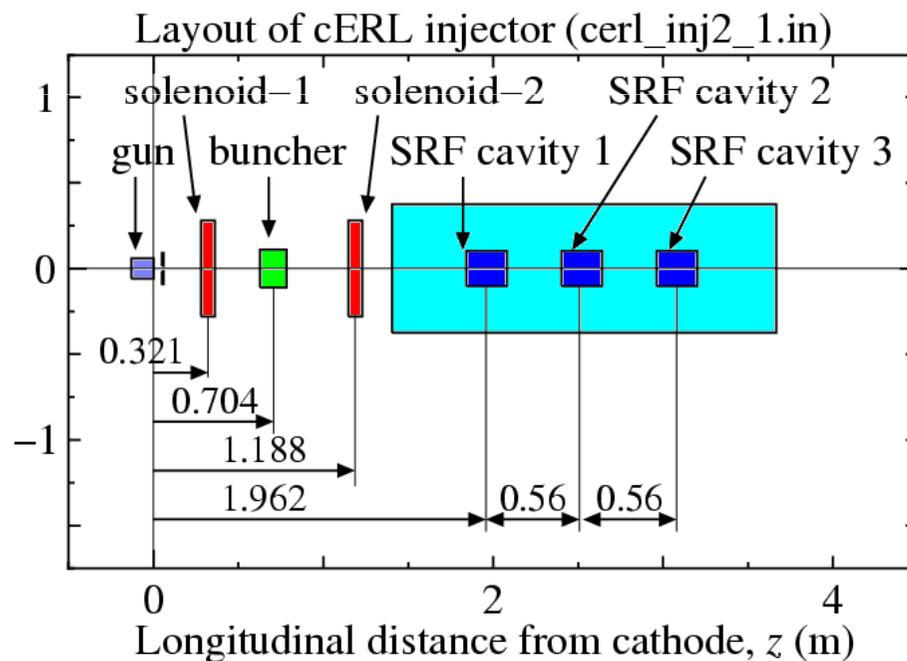
- CERL入射器超伝導空洞(3台)およびバンチャー空洞のパワーソースの仕様を決めるため
- RFの振幅、位相の許容誤差を見積もる
- 計算のステップ
 1. 入射器超伝導空洞出口での計算(RF電磁場による加速と収束の影響の評価)
 2. 合流部出口での計算(分散関数のある場所での影響の評価)
- 2009年1月30日ERLビームダイナミクスの打ち合わせでは、振幅誤差の表現が良くなかったので修正した
- 振幅誤差0.1%、位相誤差0.1度の場合の影響について計算した(高エネルギーモード(8 MeV)の場合のみ)
- 合流部(分散関数あり)での影響(エネルギー拡がり、到達時間のずれ)を調べる
- Elegantで合流部でのR56を計算し、超伝導入射器出口でのエネルギー変化量から、合流部出口での到達時間のずれを計算する

計算方法(ステップ1)

- 振幅、位相の誤差がビームの質に与える影響を調べる
- 入射器超伝導空洞:3台
- 入射器バンチャー空洞:1台
- 加速空洞で設定する量:RF電磁場の振幅、位相
- 空洞1台ずつに、振幅あるいは位相の誤差を与える
 - 振幅誤差:設定値の $\pm 1\%$
 - 位相誤差:設定値を中心として、 ± 1 度
- GPTを用いて、空間電荷効果を含んだトラッキングを行う
- 空洞出口(カソード面から 4.5 mの位置)まで計算
- 計算する物理量:
 - 規格化エミッタンス
 - rmsビームサイズ
 - rmsバンチ長
 - 運動エネルギー
 - rmsエネルギー拡がり
 - 空洞出口までの到達時間

今回の計算

- ステップ1:カソード面から空洞出口まで
- 入射器超伝導空洞3台、バンチャー空洞
- 位相と振幅の誤差
- 出口でのビームエネルギー:8 MeV

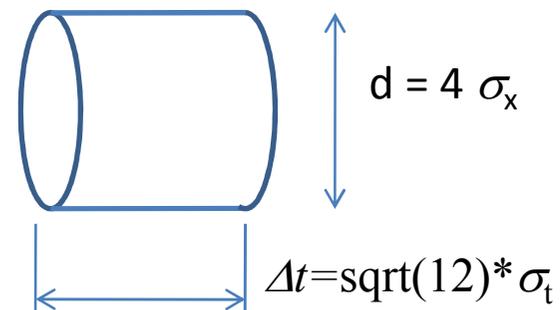


誤差を与えたパラメタ:6つ

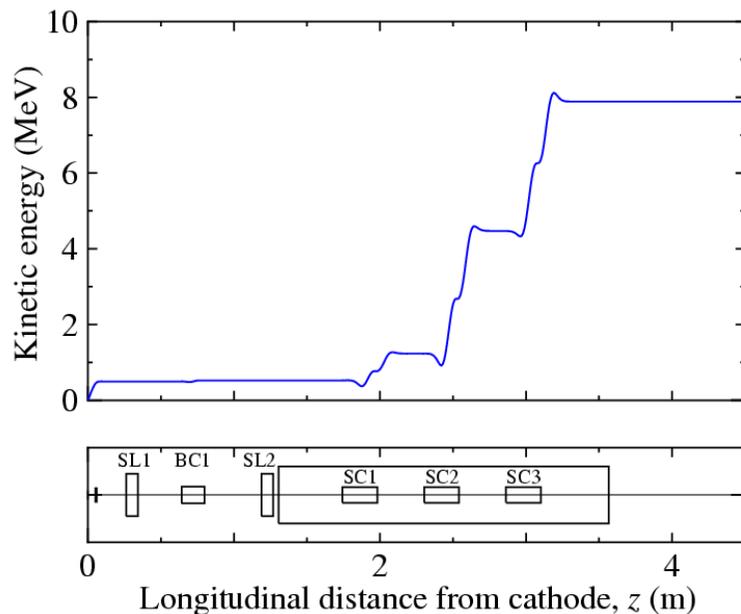
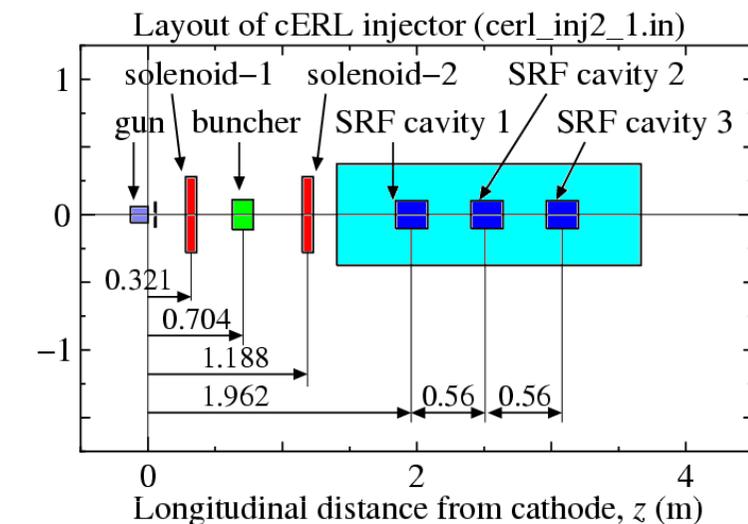
- BCA01:振幅(±1%)、位相(±1度)
- SCA01:振幅(±1%)、位相(±1度)
- SCA02:振幅(±1%)、位相(±1度)
- SCA03:振幅(±1%)、位相(±1度)

Z=4.5 mの位置で物理量を計算

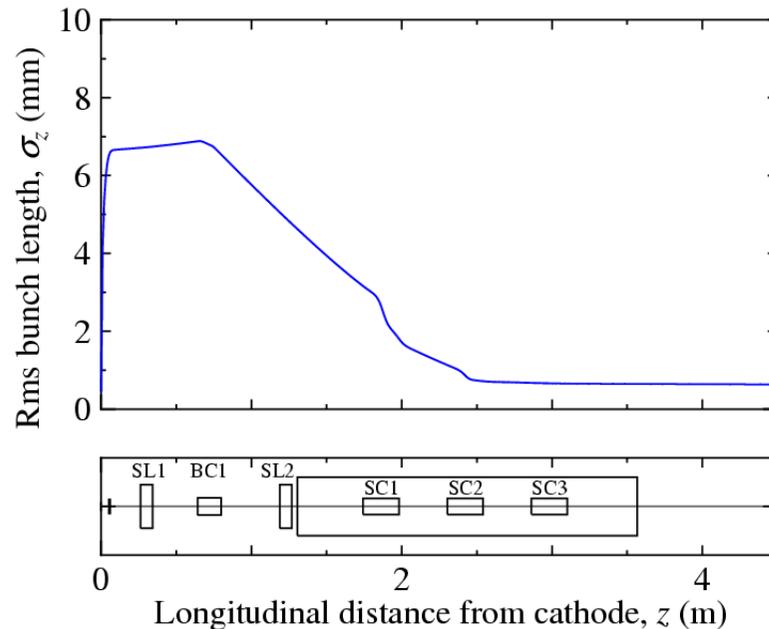
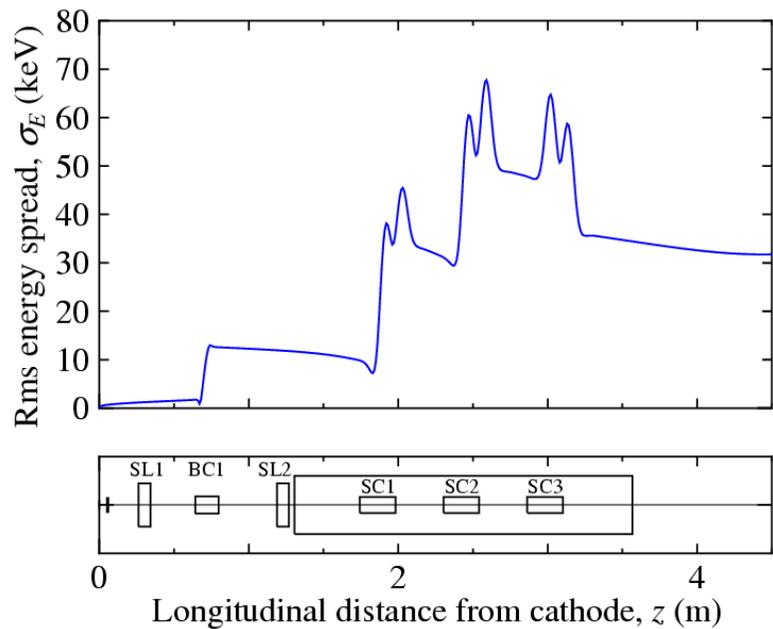
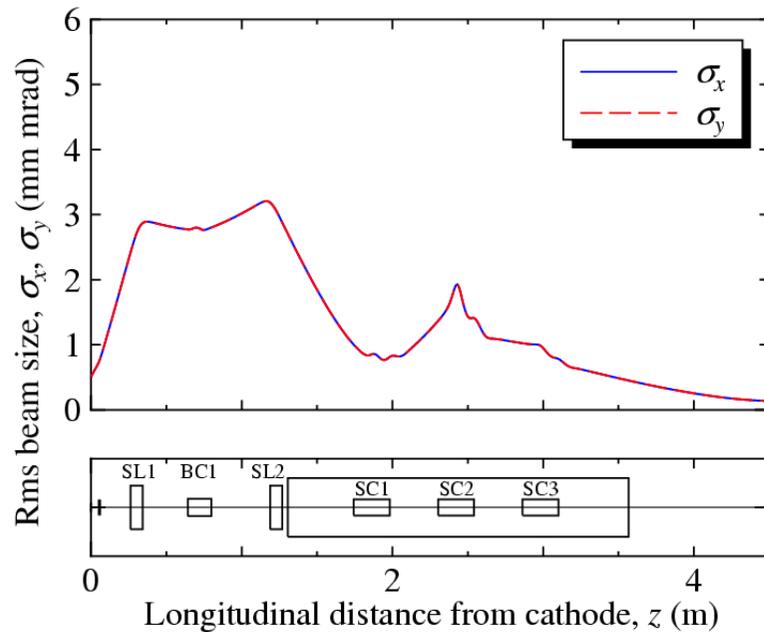
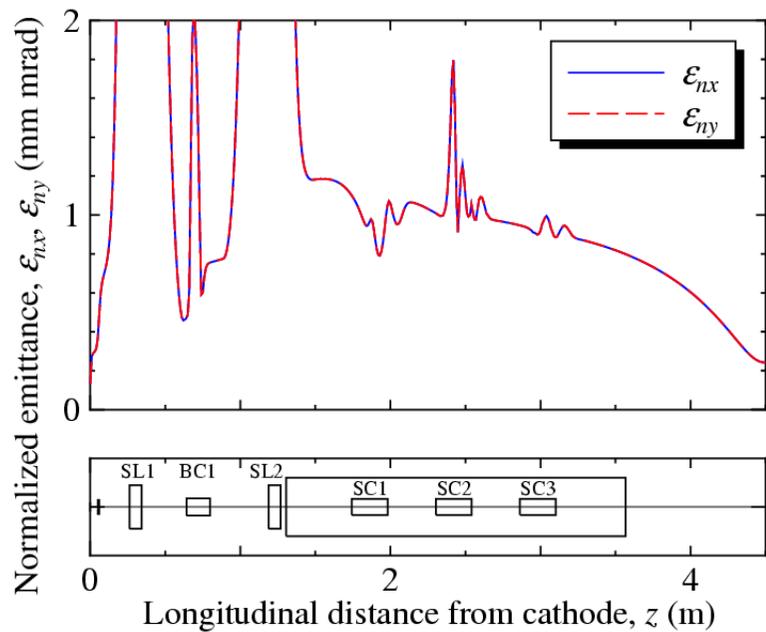
カソード表面での初期粒子分布:ピア缶



高エネルギーモード



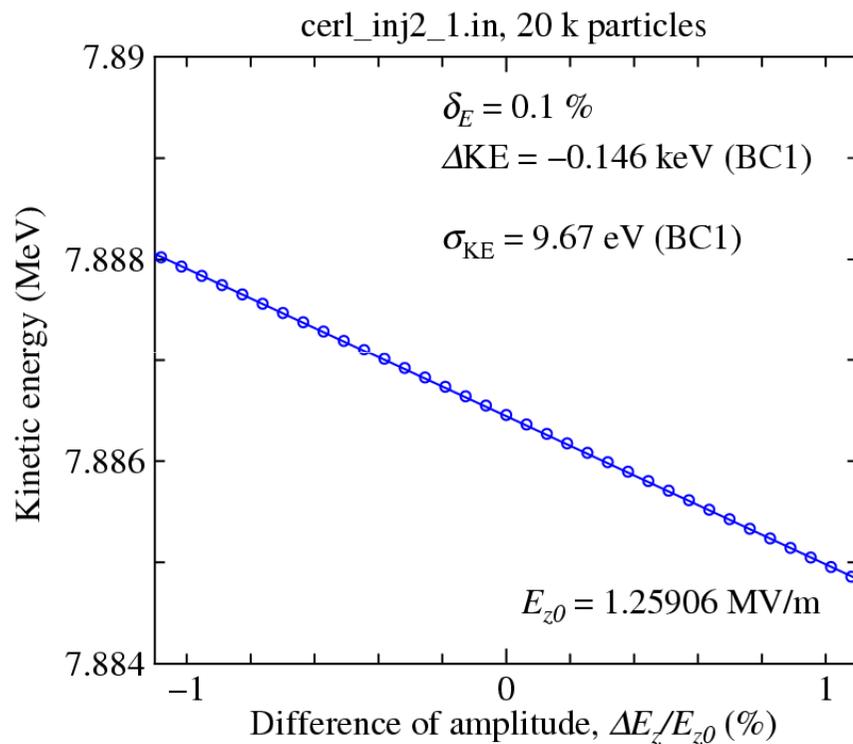
- $\text{Max}(E_z) = 30 \text{ MV/m}$ に制限 (E_{acc} で 15 MV/m)
- バンチ電荷: -80 pC
- 粒子数: 20 k particles
- 空間電荷効果計算 (3d-mesh, CG)
- ビームサイズ: 0.503367 mm
- レーザーパルス長: 25.2024 ps
- ソレノイド1の磁場: 0.0370703 T
- ソレノイド2の磁場: 0.0297391 T
- バンチャー空洞の加速電場: 1.25906 MV/m
- 1番目SRFの加速電場: 8.1881 MV/m
- 2番目SRFの加速電場: 29.99 MV/m
- 3番目SRFの加速電場: 30.0 MV/m
- バンチャー空洞の位相: -89.801度
- 1番目SRFの位相: -39.8224度
- 2番目SRFの位相: -16.5836度
- 3番目SRFの位相: 9.81271度
- ソレノイド1の中心位置: 0.321 m
- ソレノイド2の中心位置: 0.704 m
- バンチャー空洞の中心位置: 1.128 m



入射器超伝導空洞の振幅誤差(1)

運動エネルギー

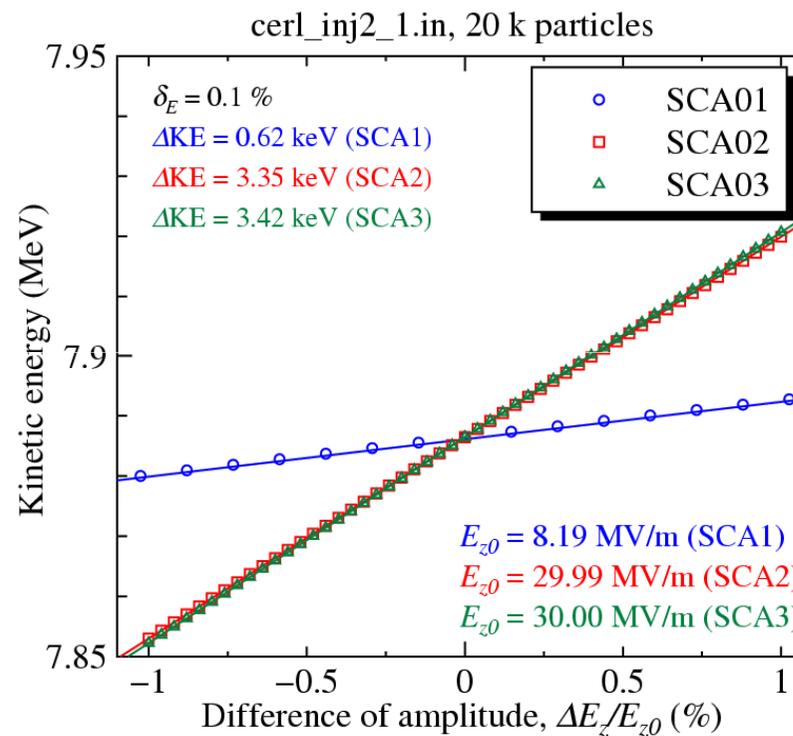
バンチャークラック



$\delta_E = 0.1 \%$

- $-0.146 \text{ keV} / 7.89 \text{ MeV} (-0.002\%)$

超伝導空洞



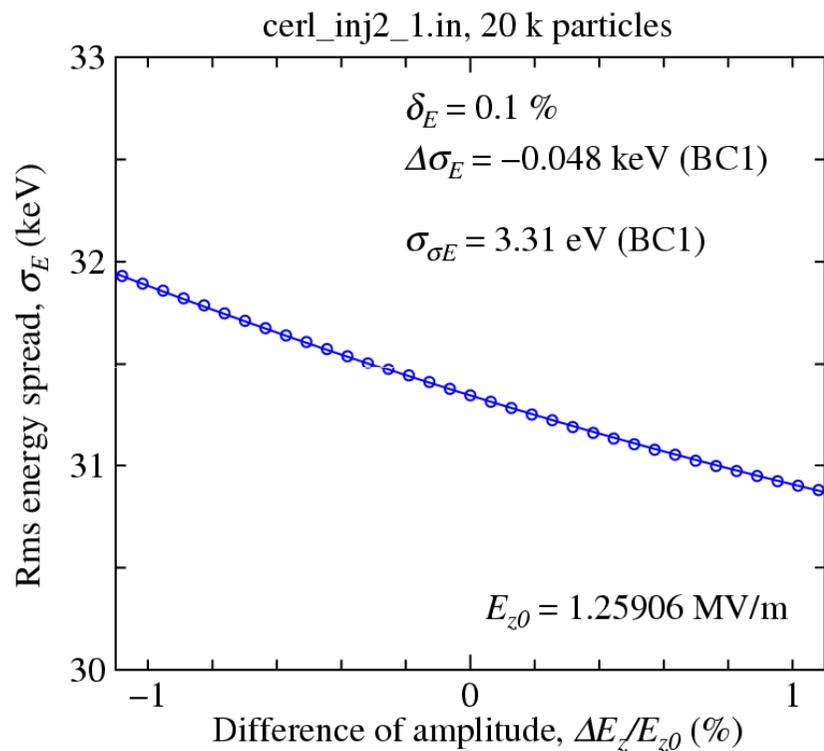
$\delta_E = 0.1 \%$

- $0.62 \text{ keV} / 7.89 \text{ MeV} (0.008\%) \text{ (SCA01)}$
- $3.35 \text{ keV} / 7.89 \text{ MeV} (0.042\%) \text{ (SCA02)}$
- $3.42 \text{ keV} / 7.89 \text{ MeV} (0.043\%) \text{ (SCA03)}$

入射器超伝導空洞の振幅誤差(2)

rmsエネルギー拡がり

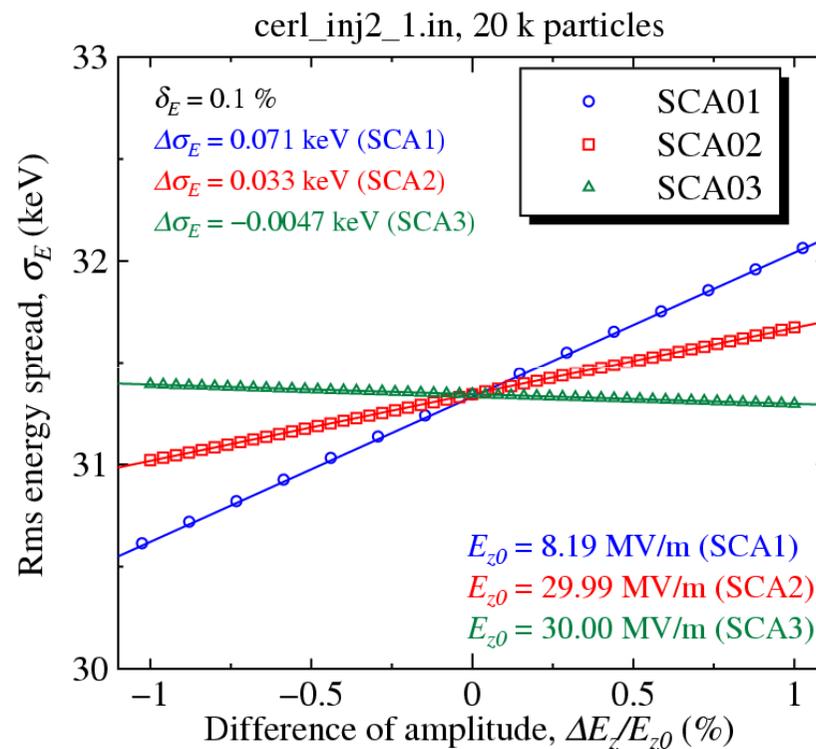
バンチャー空洞



$\delta_E = 0.1 \%$

- 0.048 keV / 31.3 keV (-0.154%)

超伝導空洞

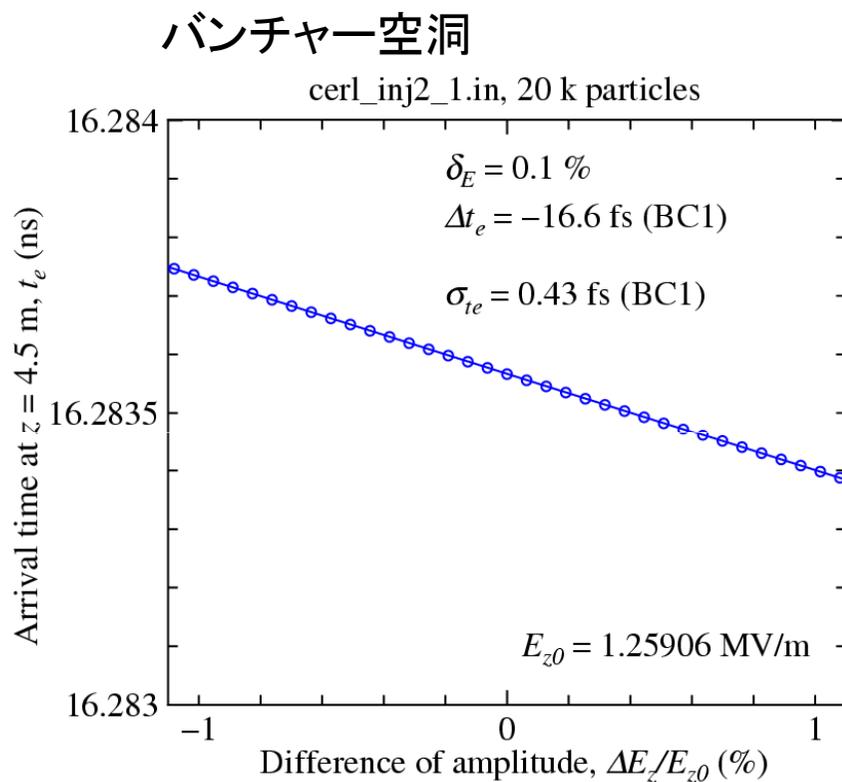


$\delta_E = 0.1 \%$

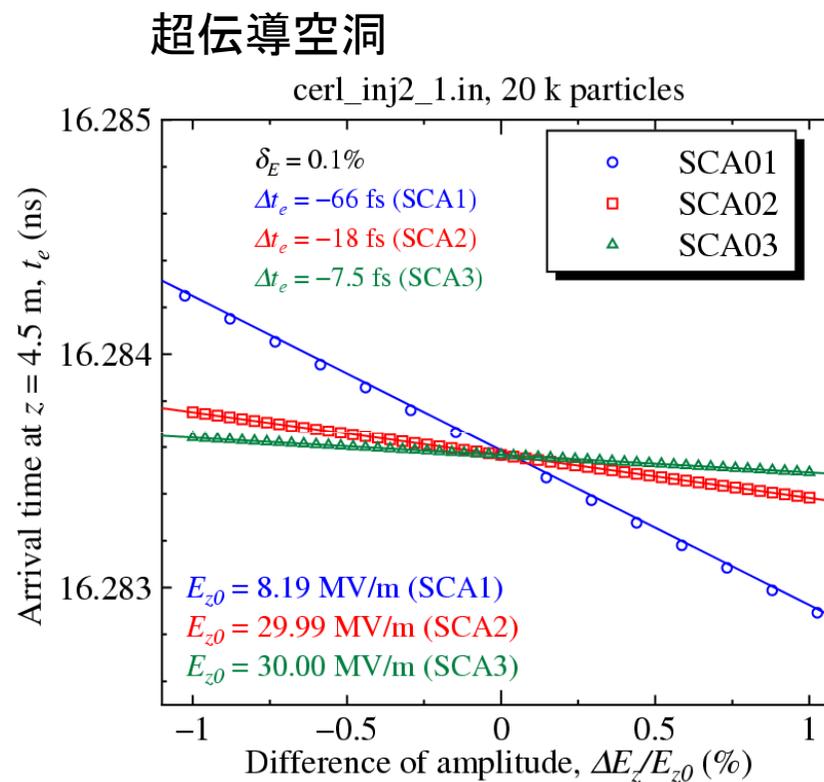
- 0.071 keV / 31.3 keV (0.227%) (SCA01)
- 0.033 keV / 31.3 keV (0.104%) (SCA02)
- -0.0047 keV / 31.3 MeV (-0.015%) (SCA03)

入射器超伝導空洞の振幅誤差(3)

$z = 4.5$ mまでの到達時間



- $\delta_E = 0.1 \%$
- -16.6 fs

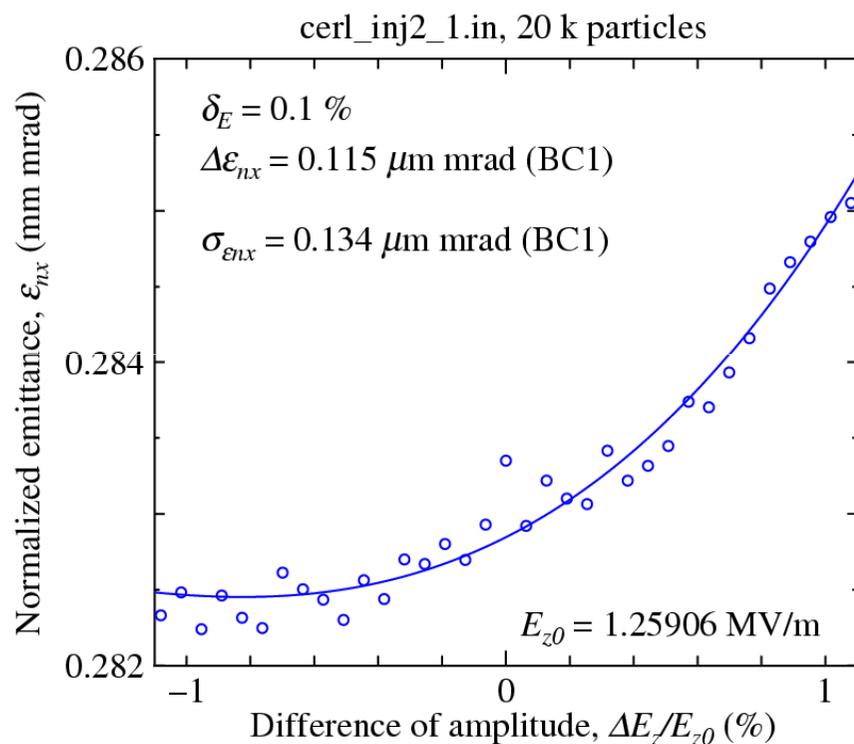


- $\delta_E = 0.1 \%$
- -66 fs (SCA01)
 - -18 fs (SCA02)
 - -7.5 fs (SCA03)

入射器超伝導空洞の振幅誤差(4)

規格化rmsエミッタンス

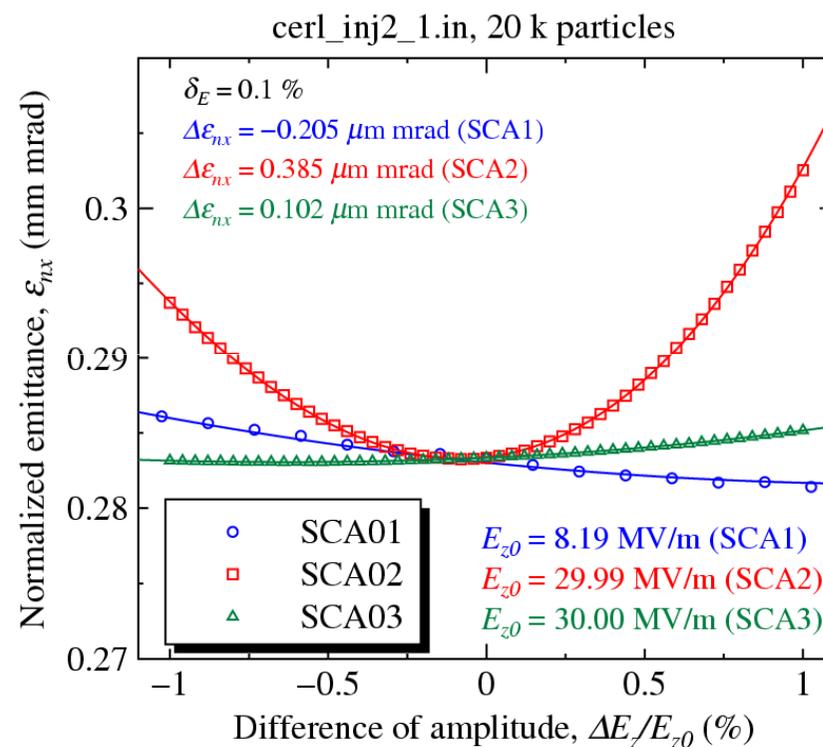
バンチャー空洞



$\delta_E = 0.1 \%$

- $0.015 \mu\text{m rad} / 0.283 \text{ mm mrad (0.041\%)}$

超伝導空洞



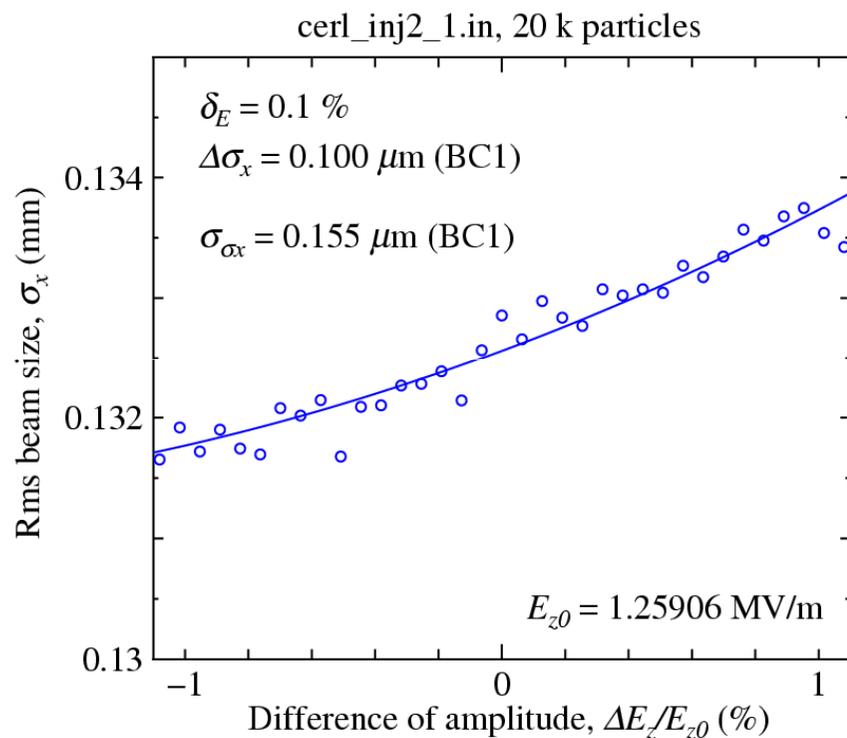
$\delta_E = 0.1 \%$

- $-0.205 \mu\text{m mrad} / 0.283 \text{ mm mrad (-0.072\%) (SCA01)}$
- $0.385 \mu\text{m mrad} / 0.283 \text{ mm mrad (0.136\%) (SCA02)}$
- $0.102 \mu\text{m mrad} / 0.283 \text{ mm mrad (0.036\%) (SCA03)}$

入射器超伝導空洞の振幅誤差(5)

rms水平方向ビームサイズ

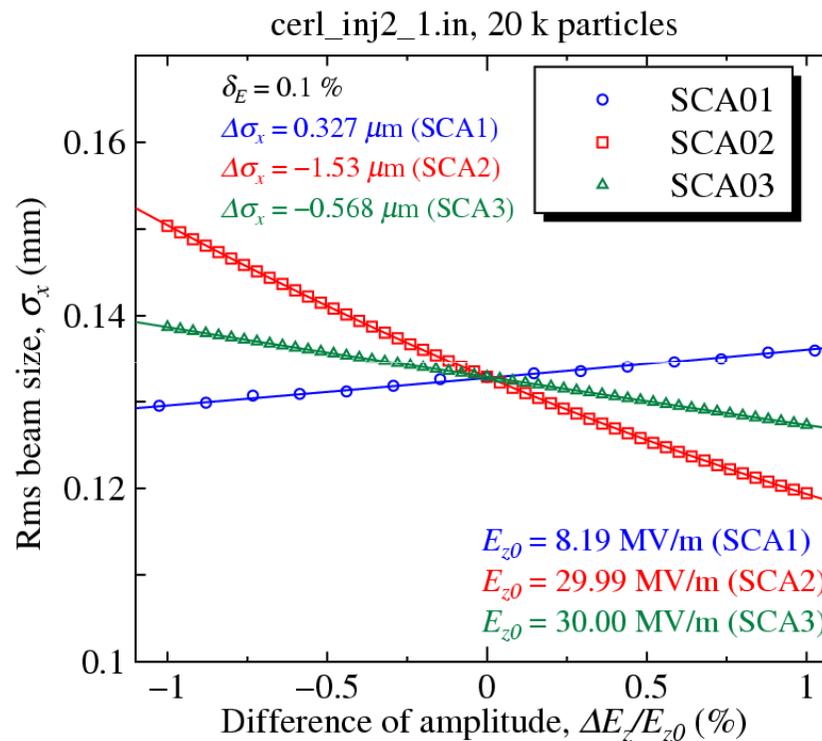
バンチャークラック



$\delta_E = 0.1 \%$

- $0.100 \mu\text{m} / 0.133 \text{ mm}$ (0.076%)

超伝導空洞

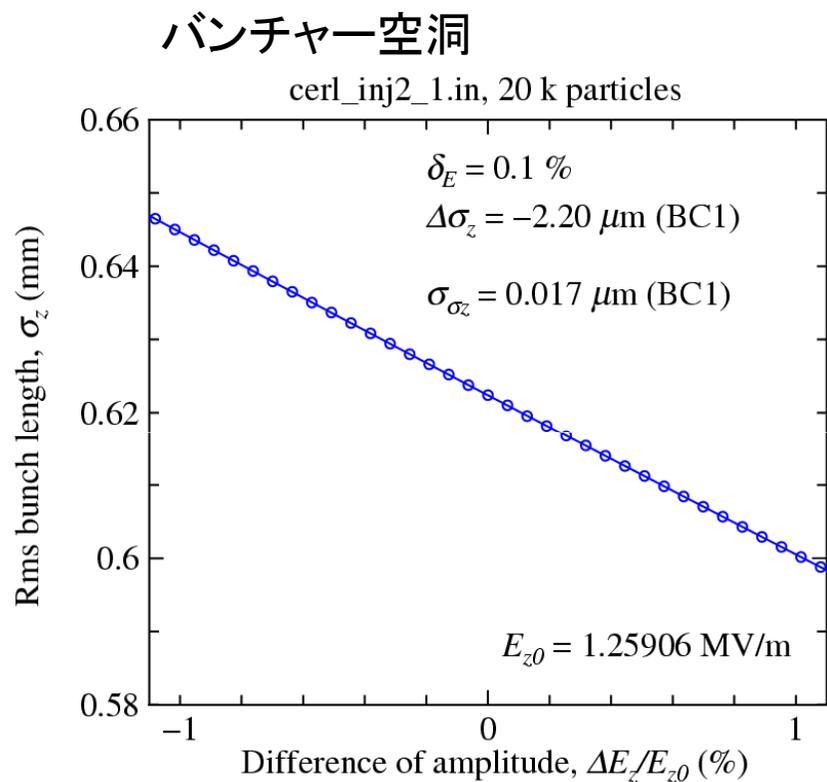


$\delta_E = 0.1 \%$

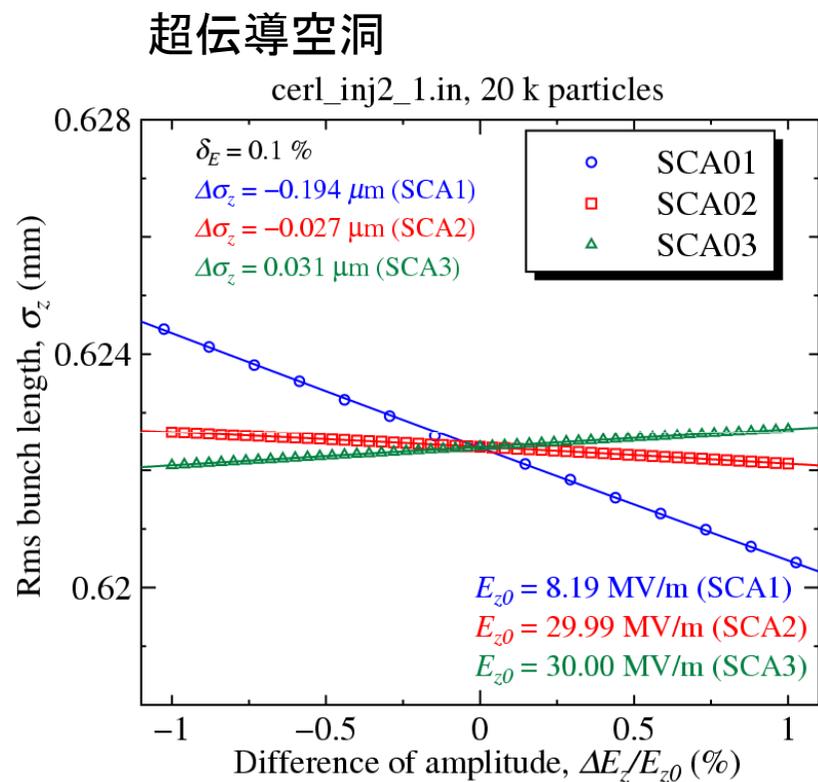
- $0.327 \mu\text{m} / 0.133 \text{ mm}$ (0.246%) (SCA01)
- $-1.53 \mu\text{m} / 0.133 \text{ mm}$ (-1.16%) (SCA02)
- $0.568 \mu\text{m} / 0.133 \text{ mm}$ (-0.427%) (SCA03)

入射器超伝導空洞の振幅誤差(6)

rmsバンチ長



- $\delta_E = 0.1 \%$
- 2.20 $\mu\text{m} / 0.622 \text{ mm}$ (-0.354%)



- $\delta_E = 0.1 \%$
- 0.194 $\mu\text{m} / 0.622 \text{ mm}$ (-0.031%) (SCA01)
 - 0.027 $\mu\text{m} / 0.622 \text{ mm}$ (-0.004%) (SCA02)
 - 0.031 $\mu\text{m} / 0.622 \text{ mm}$ (0.005%) (SCA03)

まとめ

バンチャー空洞、超伝導空洞3台の振幅誤差

- 振幅誤差の影響(1台ずつ0.1%の振幅誤差を与えた)
- Rmsビームサイズの変化量が一番大きいのが、1%程度

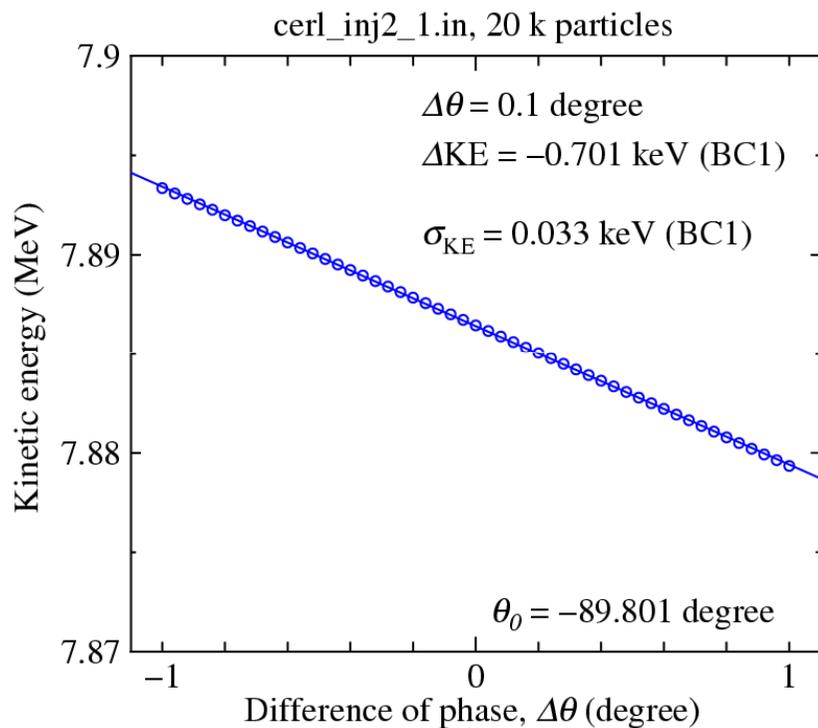
	バンチャー空洞	超伝導空洞3台
振幅の変化, $\Delta E_z/E_{z0}$ (%)	0.1 %	0.1 %
運動エネルギーの変化	-0.146 keV / 7.89 MeV (-0.002%)	3.42 keV / 7.89 MeV (0.043%) , SCA03
エネルギー拡がりの変化	-0.048 keV / 31.3 keV (-0.154%)	0.071 keV / 31.3 keV (0.227%) , SCA01
到達時間の変化	-16.6 fs (-0.00777 degree)	-66 fs , (-0.0309 degree) SCA01
規格化エミッタンスの変化	0.015 $\mu\text{m rad}$ / 0.283 mm mrad (0.041%)	0.385 $\mu\text{m mrad}$ / 0.283 mm mrad (0.136%), SCA02
Rmsビームサイズの変化	0.100 μm / 0.133 mm (0.076%)	-1.53 μm / 0.133 mm (-1.16%), SCA02
バンチ長の変化	-2.20 μm / 0.622 mm (-0.354%)	-0.194 μm / 0.622 mm (-0.031%), SCA01

振幅誤差0.1%であれば、ビームの品質は問題なさそう(合流部前まで)

入射器超伝導空洞の位相誤差(1)

運動エネルギー

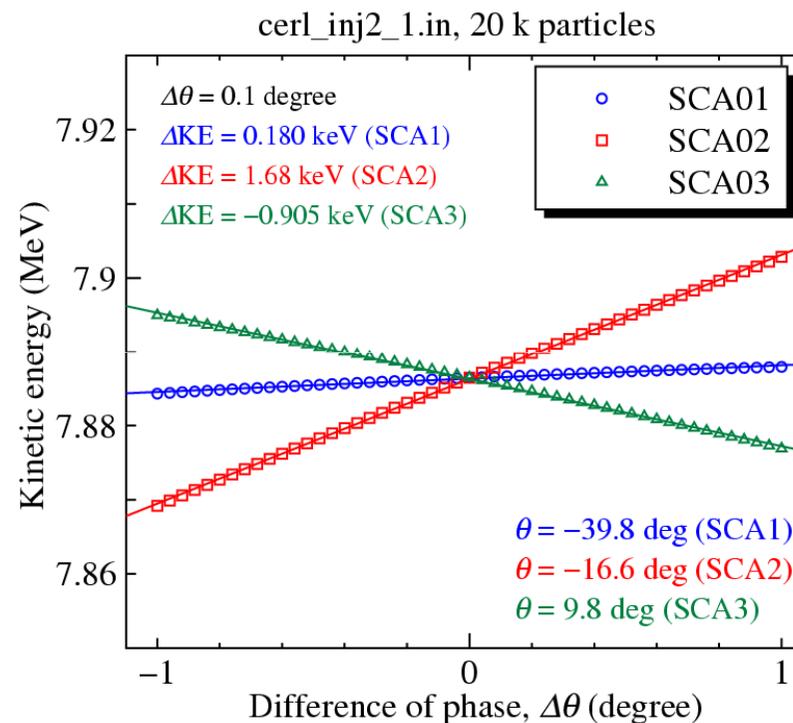
バンチャー空洞



$\delta_\theta = 0.1$ degree

- -0.701 keV / 7.89 MeV (-0.009%)

超伝導空洞



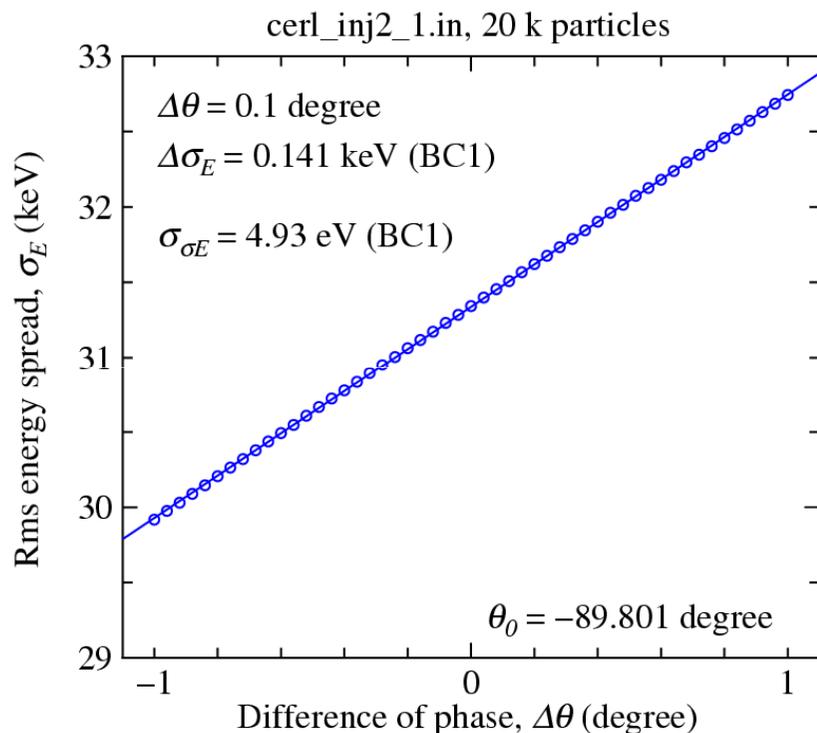
$\delta_\theta = 0.1$ degree

- 0.18 keV / 7.89 MeV (0.002%) (SCA01)
- 1.68 keV / 7.89 MeV (0.021%) (SCA02)
- -0.905 keV / 7.89 MeV (0.012%) (SCA03)

入射器超伝導空洞の位相誤差(2)

rmsエネルギー拡がり

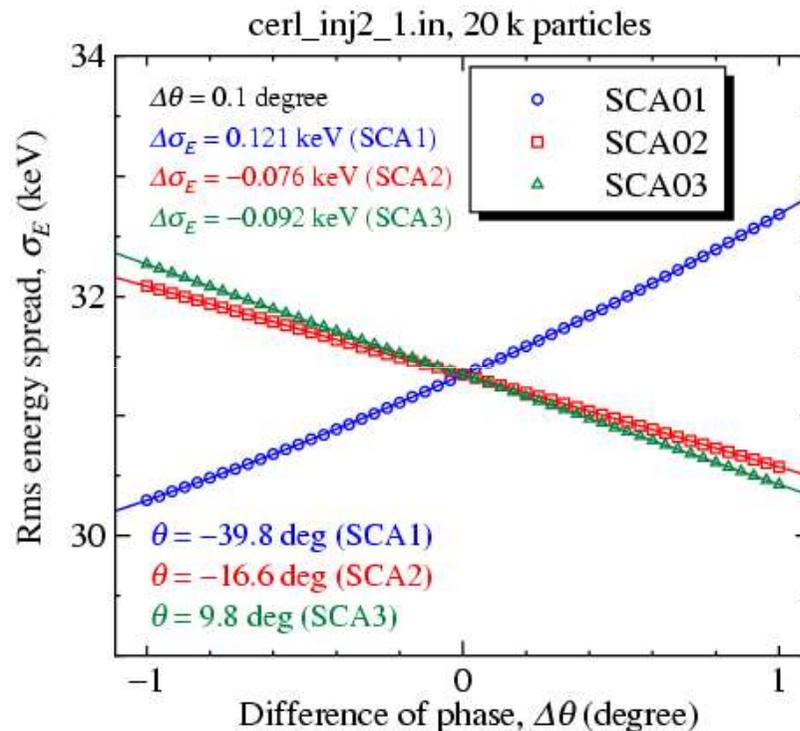
バンチャークラック



$\delta_\theta = 0.1$ degree

- 0.141 keV / 31.3 keV (0.450%)

超伝導空洞



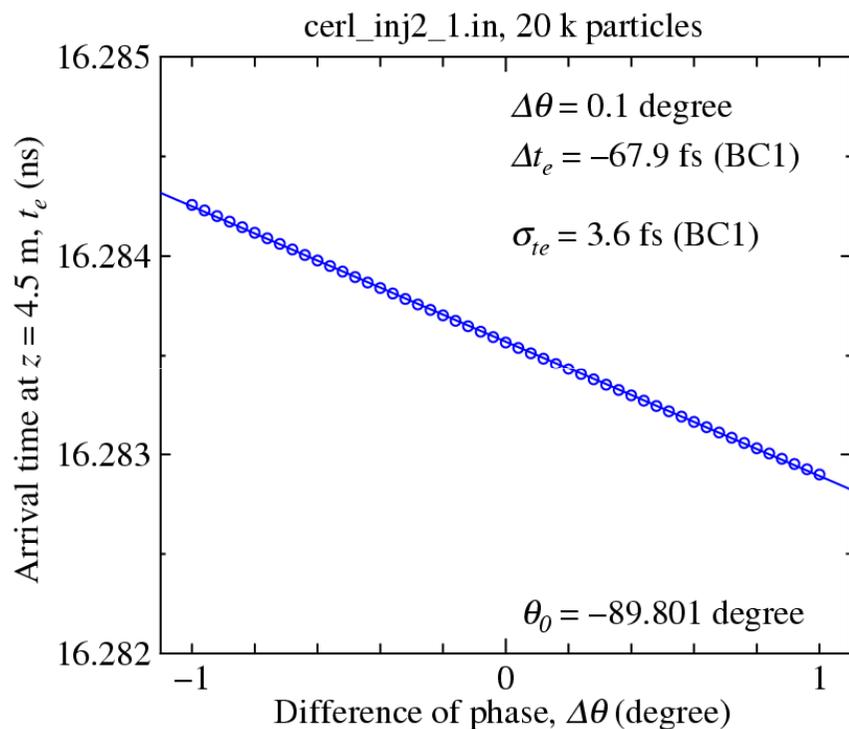
$\delta_\theta = 0.1$ degree

- 0.121 keV / 31.3 keV (0.386%) (SCA01)
- -0.076 keV / 31.3 keV (-0.242%) (SCA02)
- -0.092 keV / 31.3 MeV (-0.294%) (SCA03)

入射器超伝導空洞の位相誤差(3)

$z = 4.5$ mまでの到達時間

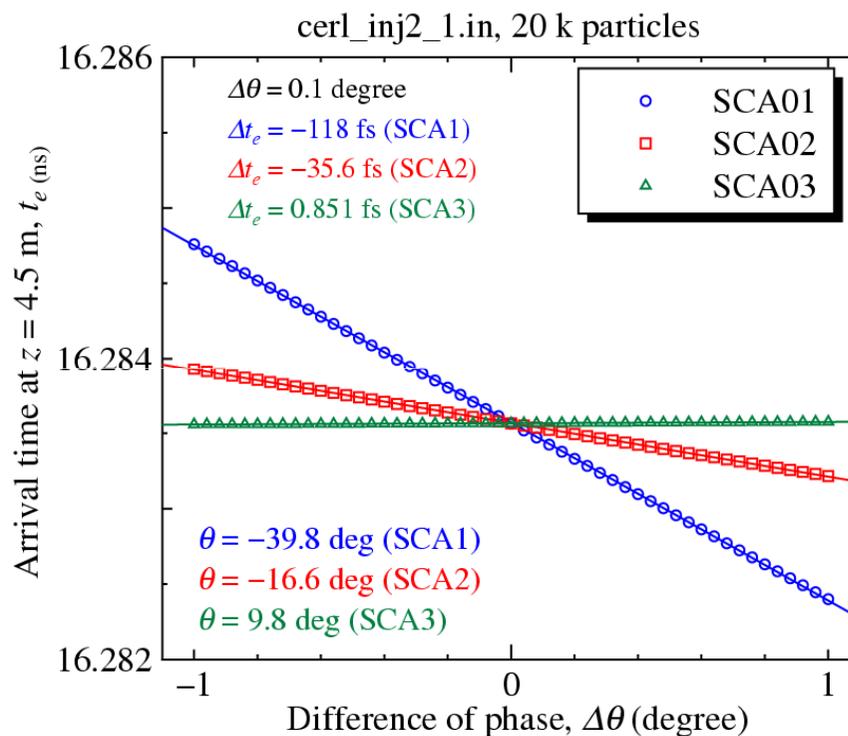
バンチャー空洞



$\delta_\theta = 0.1$ degree

- -67.9 fs

超伝導空洞

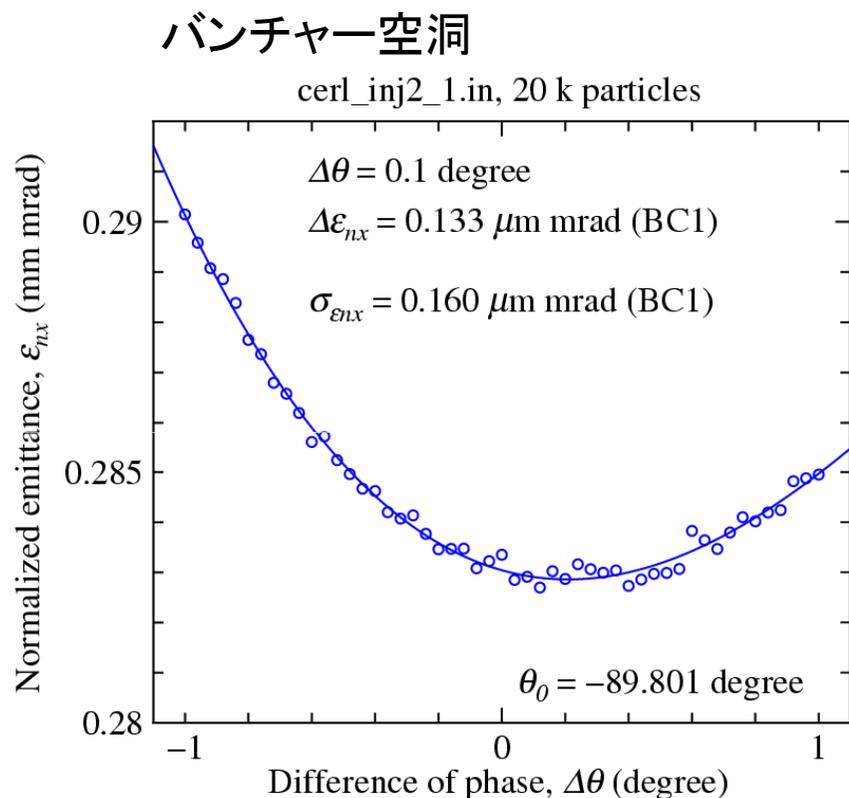


$\delta_\theta = 0.1$ degree

- -118 fs (SCA01)
- -35.6 fs (SCA02)
- 0.851 fs (SCA03)

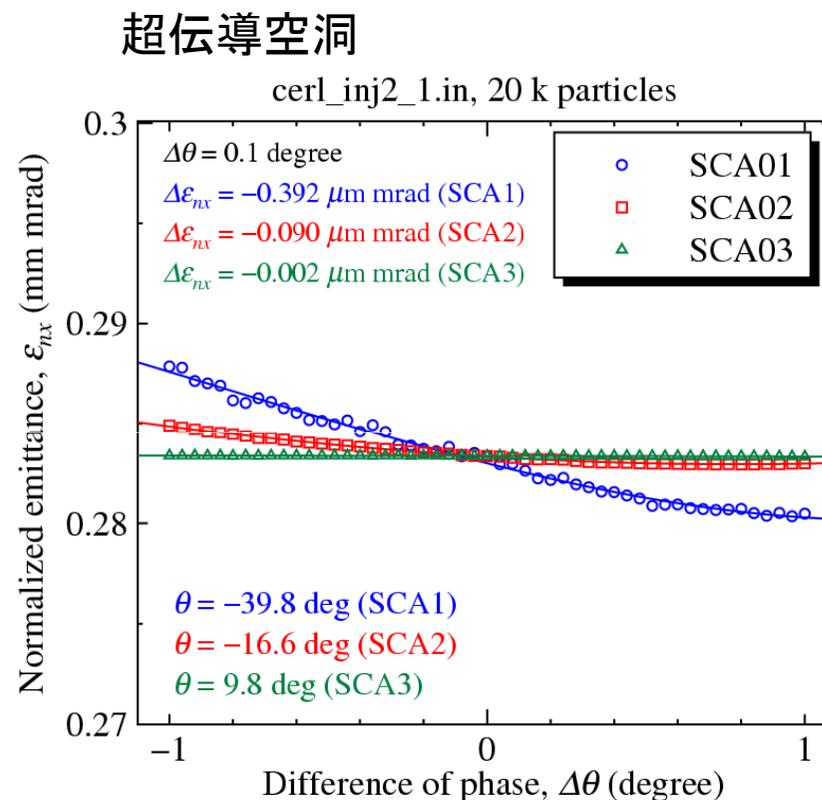
入射器超伝導空洞の位相誤差(4)

規格化rmsエミッタンス



$\delta_\theta = 0.1$ degree

- $0.133 \mu\text{m rad} / 0.283 \text{ mm mrad}$ (0.047%)



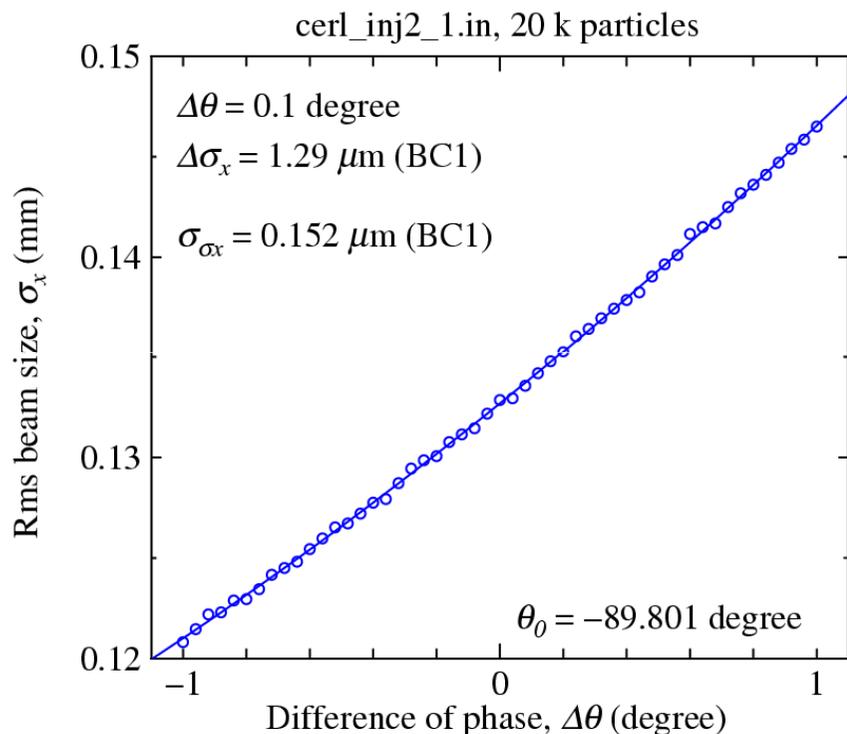
$\delta_\theta = 0.1$ degree

- $-0.392 \mu\text{m mrad} / 0.283 \text{ mm mrad}$ (-0.138%) (SCA01)
- $-0.090 \mu\text{m mrad} / 0.283 \text{ mm mrad}$ (-0.032%) (SCA02)
- $-0.002 \mu\text{m mrad} / 0.283 \text{ mm mrad}$ (-0.0008%) (SCA03)

入射器超伝導空洞の位相誤差(5)

rms水平方向ビームサイズ

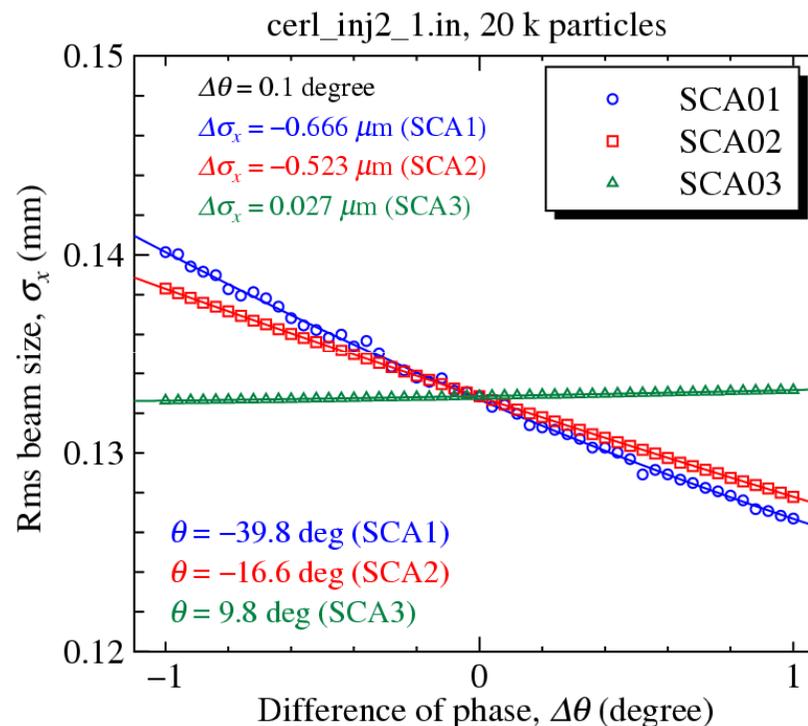
バンチャークラック



$\delta_\theta = 0.1$ degree

- $1.29 \mu\text{m} / 0.133 \text{ mm}$ (0.971%)

超伝導空洞



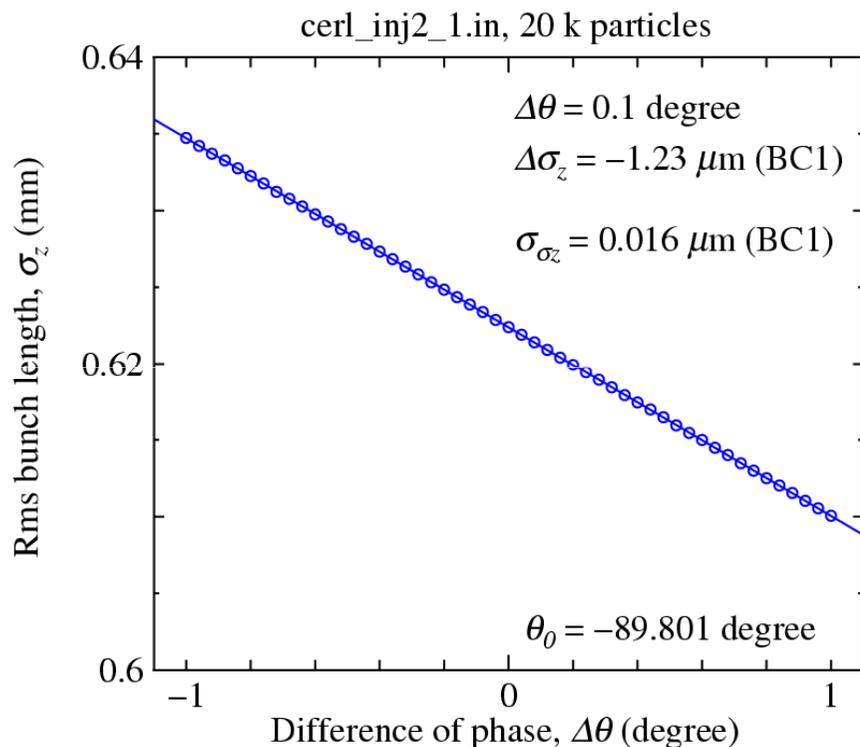
$\delta_\theta = 0.1$ degree

- $-0.666 \mu\text{m} / 0.133 \text{ mm}$ (-0.502%) (SCA01)
- $-0.523 \mu\text{m} / 0.133 \text{ mm}$ (-0.394%) (SCA02)
- $0.027 \mu\text{m} / 0.133 \text{ mm}$ (0.020%) (SCA03)

入射器超伝導空洞の位相誤差(6)

rmsバンチ長

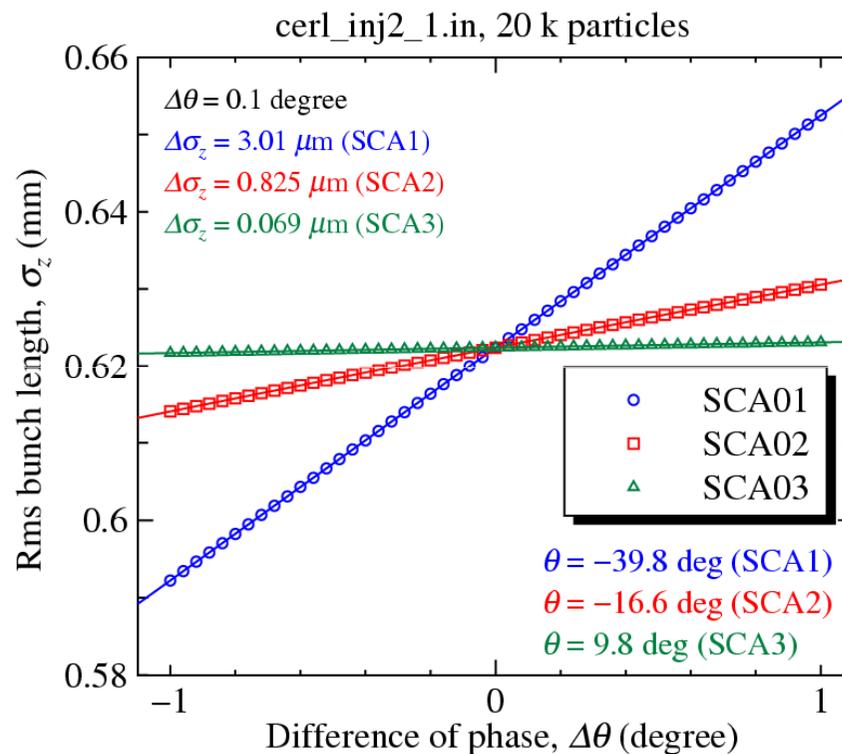
バンチャー空洞



$\delta_\theta = 0.1$ degree

- $-1.23 \mu\text{m} / 0.622 \text{ mm}$ (-0.198%)

超伝導空洞



$\delta_\theta = 0.1$ degree

- $3.01 \mu\text{m} / 0.622 \text{ mm}$ (0.484%) (SCA01)
- $0.825 \mu\text{m} / 0.622 \text{ mm}$ (0.132%) (SCA02)
- $0.069 \mu\text{m} / 0.622 \text{ mm}$ (0.011%) (SCA03)

まとめ

バンチャー空洞、超伝導空洞3台の位相誤差

- 位相誤差の影響(1台ずつ0.1度の位相誤差を与えた)
- Rmsビームサイズの変化量が一番大きい、1%程度

	バンチャー空洞	超伝導空洞3台
位相の変化量	0.1 degree	0.1 degree
運動エネルギーの変化	-0.701 keV / 7.89 MeV (-0.009%)	1.68 keV / 7.89 MeV (0.021%), SCA02
エネルギー拡がりの変化	0.141 keV / 31.3 keV (0.450%)	0.121 keV / 31.3 keV (0.386%), SCA01
到達時間の変化	-67.9 fs (0.0318 degree)	-118 fs (0.05522 degree), SCA01
規格化エミッタンスの変化	0.133 $\mu\text{m rad}$ / 0.283 mm mrad (0.047%)	-0.392 $\mu\text{m mrad}$ / 0.283 mm mrad (-0.138%), SCA01
Rmsビームサイズの変化	1.29 μm / 0.133 mm (0.971%)	-0.666 μm / 0.133 mm (-0.502%), SCA01
バンチ長の変化	-1.23 μm / 0.622 mm (-0.198%)	3.01 μm / 0.622 mm (0.484%), SCA01

位相誤差0.1度であれば、ビームの品質は問題なさそう(合流部前まで)

ステップ2: 合流部での計算

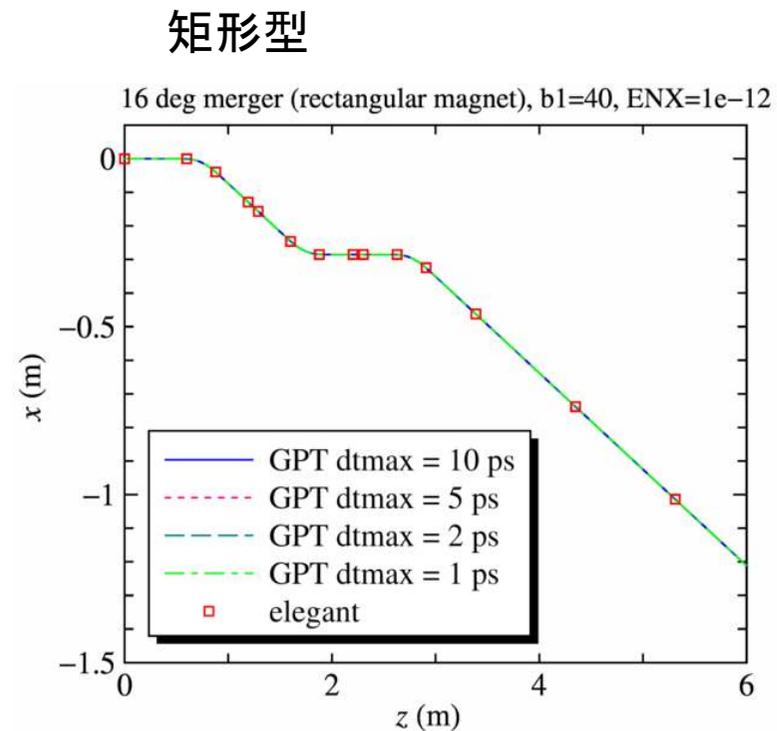
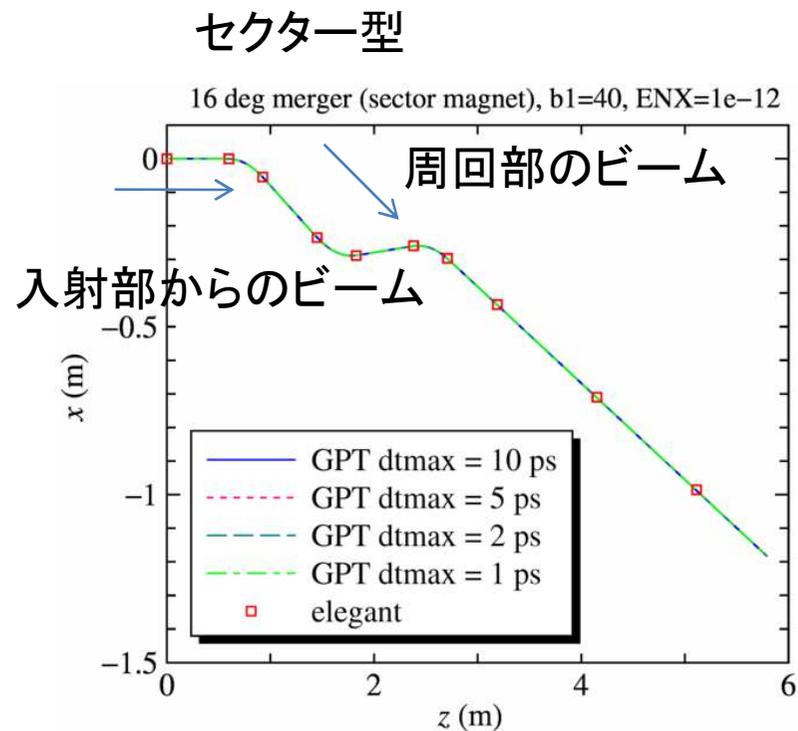
- 合流部(分散関数あり)での影響(エネルギー拡がり、到達時間のずれ)を調べる
- 単粒子計算:
 - 合流部入口から出口まで
 - ステップ1で計算した、ビームのエネルギー、エネルギー拡がりを利用
 - 空間電荷効果なし
 - 合流部でのR56の値から到達時間のずれを計算
- 複数粒子計算:
 - 超伝導空洞入口から合流部出口まで
 - 空間電荷効果あり
 - 分散関数、空間電荷効果を含んだ全ての影響を調べる(時間が掛かる)
- 今回は、elegantで合流部のR56を計算し、ステップ1の計算で得られたエネルギー変化量から、合流部出口での遅れ時間を計算する
- また、ステップ1のエネルギー拡がりの変化量から、バンチ長の変化量を計算する
- 対象とする合流部: 2つ
 - 入射角16度、セクター型偏向電磁石3台(エッジフォーカス付き)
 - 入射角16度、矩形型偏向電磁石3台+四極電磁石2台

$$\Delta z = R_{56} \delta$$

$$\delta = \frac{P - P_0}{P}$$

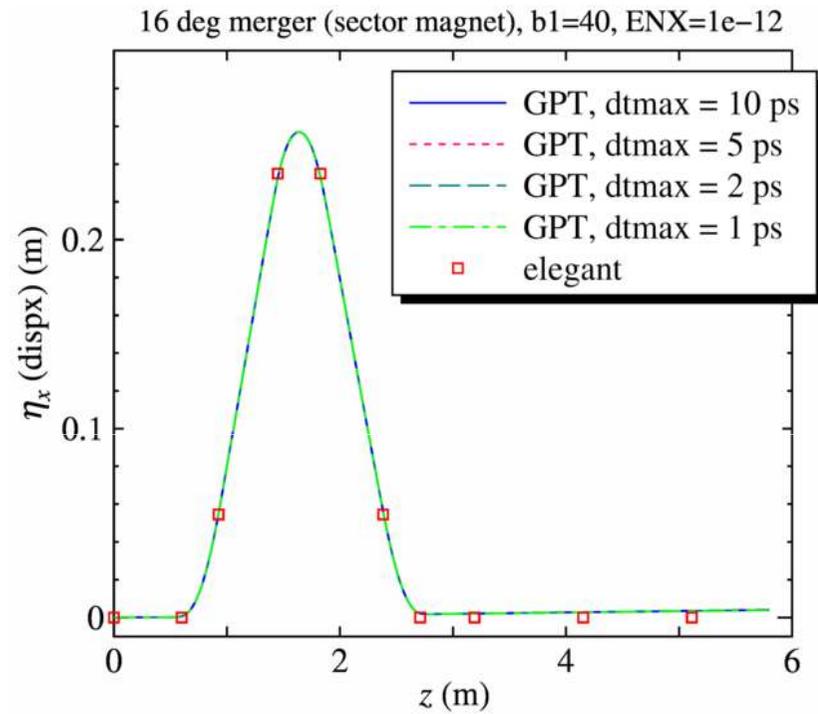
対象とする合流部

- 次の2つの合流部(入射角16度)について計算した
 - セクター型: セクター型偏向電磁石3台(-19度、22度、-19度、エッジフォーカス付き)
 - 矩形型: 入射角16度、矩形型偏向電磁石3台(-16度、16度、-16度) + 四極電磁石2台
- 2つの合流部に対して、elegantを用いてR56を計算
- R56とステップ1で求めたエネルギーのずれ量から合流部出口での到達時間の遅れを計算

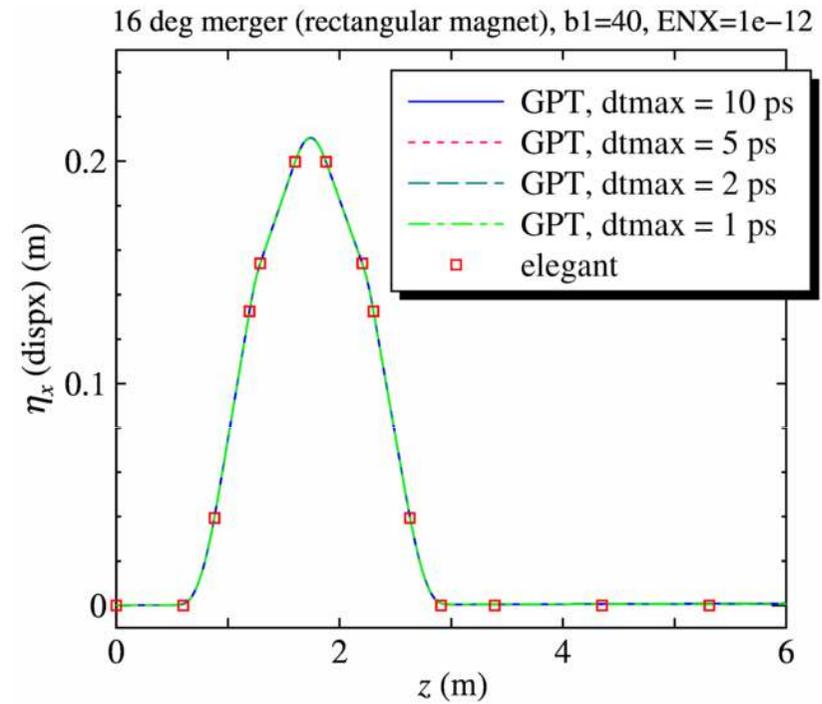


分散関数

セクター型



矩形型



セクター型の場合、偏向電磁石間には四極電磁石は配置しない
2番目の偏向電磁石の出入口に角度を与えて、合流部出口での分散関数をゼロにする

矩形型の場合、B1-B2間、B2-B3間に四極電磁石を配置する
これを利用して、合流部出口での分散関数をゼロにする

中心エネルギーのずれによる合流部出口での 到着時間の遅れ

- ステップ1で計算した位置から、合流部出口までのR56の計算値 (elegantにより計算)
 - セクター型: $R56 = -0.08404$ (m)
 - 矩形型: $R56 = -0.05064$ (m)
- 誤差なしの場合の運動量: $P_0 = 8.38186$ (MeV/c)
- 誤差ありの場合の運動量: $P = 8.38529$ (MeV/c) ← $\Delta KE = 3.42$ keV
振幅のずれ0.1%のとき
- 運動量のずれ量: $\delta = (P_0 - P)/P = 0.00040878$

$$\Delta z = R_{56} \delta$$

$$\delta = \frac{P - P_0}{P}$$
- エネルギーの違いによる到達時間の遅れ
 - セクター型 (z=4.5 mから合流部出口まで $\Delta S=3.1559$ (m))
 - $dt_{KE} = \Delta S/c * (1/\beta - 1/\beta_0) = -15.95$ (fs)
 - 矩形型 (z=4.5 mから合流部出口まで $\Delta S=3.2691$ (m))
 - $dt_{KE} = \Delta S/c * (1/\beta - 1/\beta_0) = -16.53$ (fs)
- R56による到達時間の遅れ
 - セクター型: $dt_{R56} = -R56 * \delta / (\beta * c) = 114.81$ (fs) [0.053729 degree]
 - 矩形型: $dt_{R56} = -R56 * \delta / (\beta * c) = 69.19$ (fs) [0.032379 degree]
- エネルギーの違い + R56による到達時間の遅れ
 - セクター型: $dt = 98.85$ (fs) [0.046263 degree]
 - 矩形型: $dt = 52.66$ (fs) [0.024644 degree]

エネルギー拡がりの変化によるバンチ長の変化

- エネルギー拡がりの変化 (バンチャー空洞の0.1度位相変化)
- $\sigma_E = 0.141 \text{ keV}$
- $\sigma_\gamma = 0.0002759$
- $\sigma_p = mc^2 * (\text{sqrt}((\gamma_0 + \sigma_\gamma)^2 - 1) - \text{sqrt}(\gamma_0^2 - 1)) = 0.0001413 \text{ (MeV/c)}$
- $\delta = \sigma_p / P_0 = 1.685\text{e-}005$

- エネルギー拡がり と R56 によるバンチ長の伸び (空間電荷効果はなし)
 - (1) セクター型
 $\Delta\sigma_z = R56 * \delta = 1.416 \text{ (\mu m)}$ [バンチ長 0.6 mm に対して]
 - (2) 矩形型
 $\Delta\sigma_z = R56 * \delta = 0.854 \text{ (\mu m)}$ [バンチ長 0.6 mm に対して]

合流部での影響のまとめ

- ステップ1での計算結果(エネルギーの変化、エネルギー拡がり)と、elegantを用いて計算したR56の値を利用して、合流部出口でのビームの到着時間の遅れとバンチ長の変化を計算した
- 合流部は、セクター型と矩形型電磁石を用いた二つのタイプについて計算した
- 合流部出口での到着時間の変化(エネルギー変化量3.4 keVの場合、振幅が0.1%変化したとき)
 - セクター型: $dt = 114.81 \text{ (fs)}$ [0.053729 degree]
 - 矩形型: $dt = 69.19 \text{ (fs)}$ [0.032379 degree]
- 合流部出口でのバンチ長の変化
 - セクター型:
 $\Delta\sigma_z = R56 * \delta = 1.416 \text{ (\mu m)}$ [バンチ長 0.6 mmに対して]
 - 矩形型
 $\Delta\sigma_z = R56 * \delta = 0.854 \text{ (\mu m)}$ [バンチ長 0.6 mmに対して]
- 振幅誤差0.1%、位相誤差0.1度であれば、合流部での影響も十分小さいといえる

課題

- 複数粒子計算:
 - 超伝導空洞入口から合流部出口まで
 - 空間電荷効果あり
 - 分散関数、空間電荷効果を含んだ全ての影響を調べる(時間が掛かる)
- 合流部を含んだGPT用の入力ファイルとそのベンチマークが終了した(Twissパラメタ、分散関数のチェック)
- 四極電磁石5台のマッチング部と合流部のパラメタの最適化を始めている
- 最適化が終了したら、分散関数、空間電荷効果を全て含んだ場合についての振幅・位相誤差の計算を行う予定

ベータatron関数のチェック

左図: セクター型

右図: 矩形型

ElegantとGPTで比較

