

ERL入射器のシミュレーション

初段加速空洞のビームの運動

2007年2月21日(水)

第11回ビームダイナミクスWGミーティング

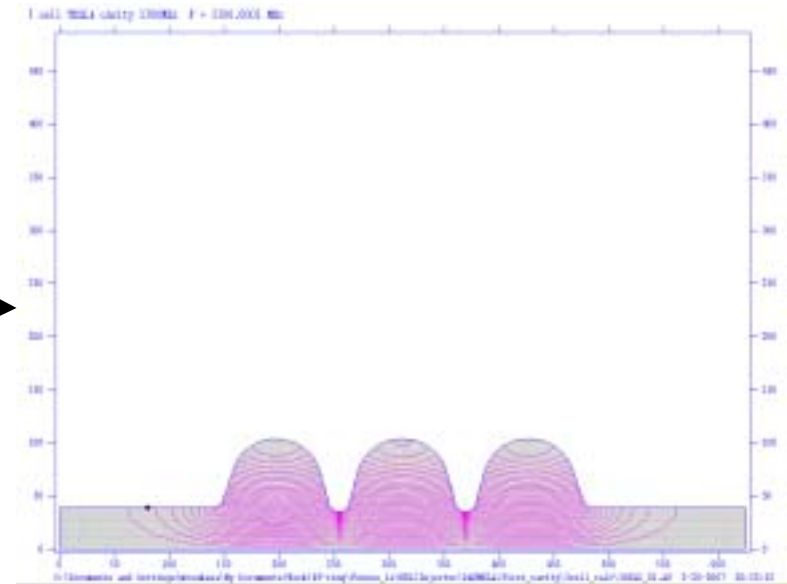
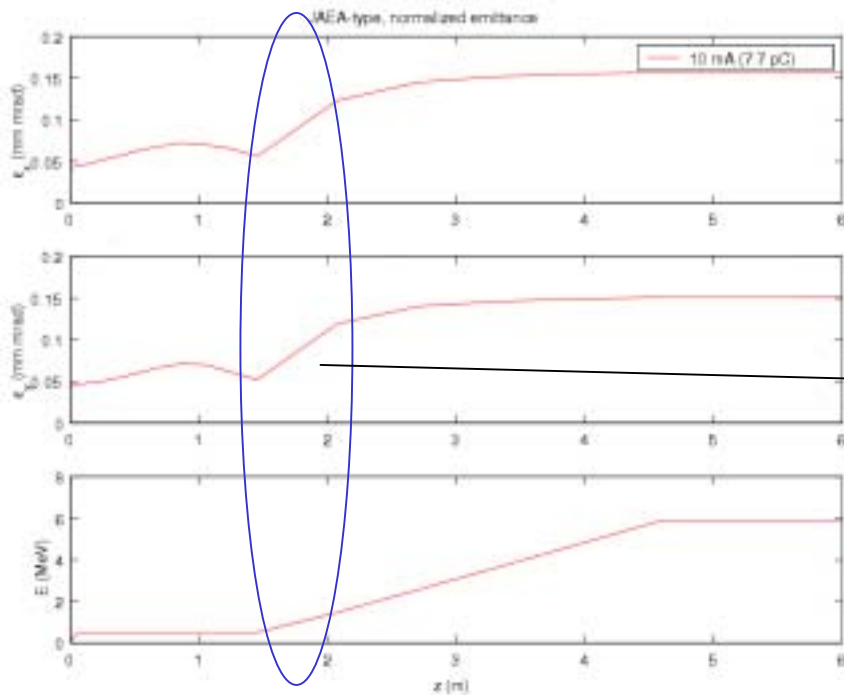
宮島 司

初段加速空洞でのビームの運動

- 羽島さんから電子銃後の最初の空洞での加速勾配には最適な値があるのではとご指摘いただき、資料を頂いた
- その資料を再現することを試みた
- ERL入射器で使用する空洞
 - 超伝導空洞: 定在波による加速
- fringe field があるためビームの運動に影響を及ぼす
- どのような影響を与えるか?
PARMELA を用いて計算してみた
- 定在波中でのビームの運動はどのように記述できるか?

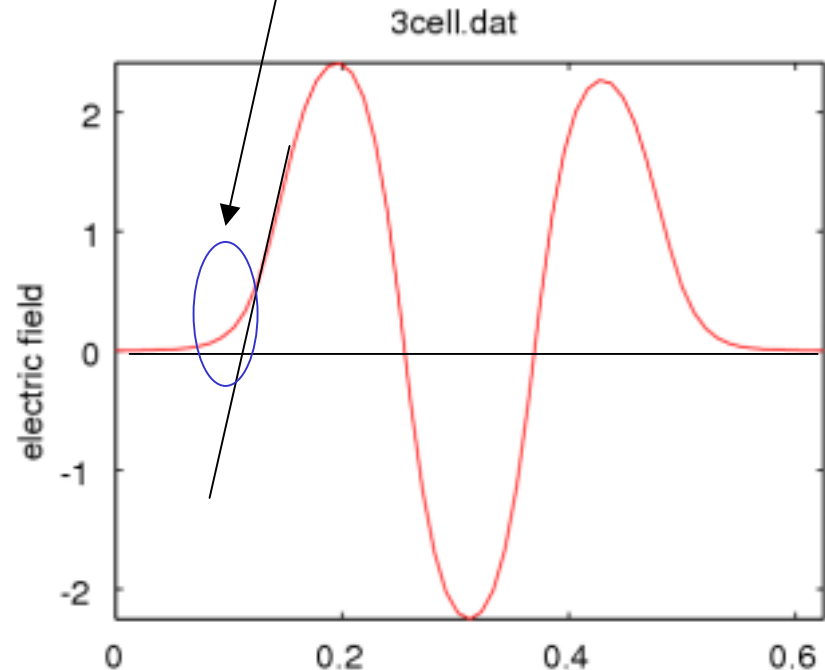
ERL入射器の空洞

- 超伝導空洞: 定在波で加速
- 入口、出口の部分にはfringe fieldが生じる
- 特に、電子銃直後の初段空洞では、低エネルギー状態のときに減速されるため、その影響は大きい



超伝導空洞のfringe field

- 入口のfringe field
- 加速に最適な位相に調整すると、fringe field による減速は避けられない
- 加速勾配が大きいと入口での減速も大きい
最適な値があるのでは？
- 空洞への入射位相が変化したとき、加速・減速はどのようになるか？

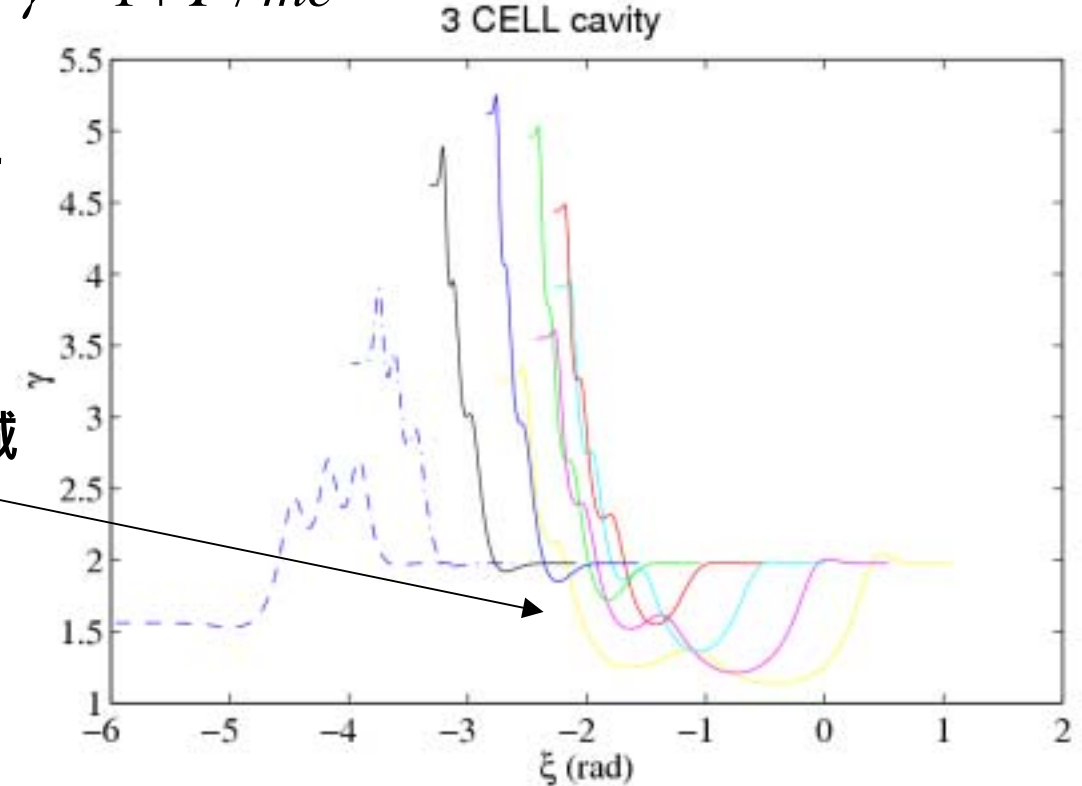


初段空洞での位相空間中の軌道

- 空洞への入射位相を変えたときの様子を計算(PARMELA使用)
- 位相: $\xi = kz - \omega t - \varphi_0 - \varphi_{CELL}$
- 運動エネルギー, T: $\gamma = 1 + T / mc^2$

- k は $\beta=1$ として計算した
- 入射ビームは、ほぼ
 $\gamma=2$
- Fringe field によって減速され、加速初めに
 $\gamma < 2$ になる

4.29 MV/mで計算

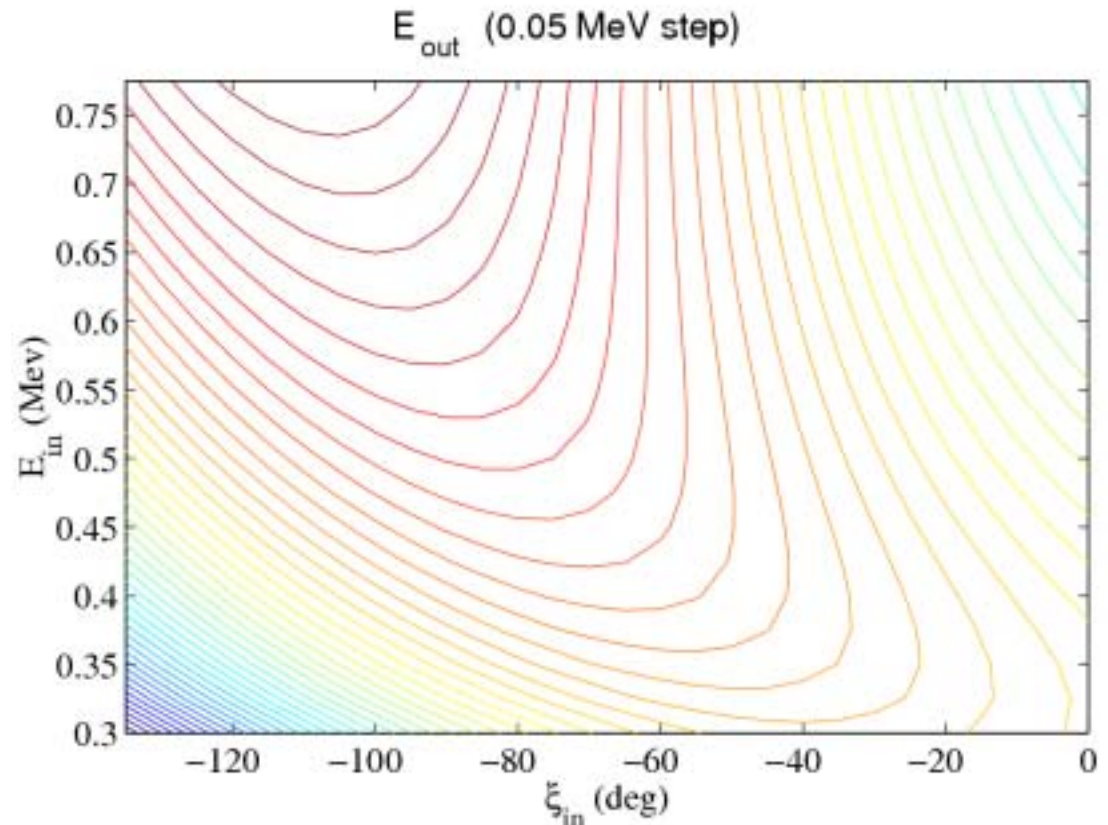


入射条件に対する初段加速空洞出口 での運動エネルギーと位相

- 初段加速空洞に入射するビームの条件(運動エネルギー、位相)が、出口での運動エネルギーと位相にどのような影響を与えるか？
- 3Cell 空洞を例にとりて計算
- PARMELA を使用して、入射条件を変更して、出口での運動エネルギー、位相を計算
- 等エネルギー線、等位相線をプロット

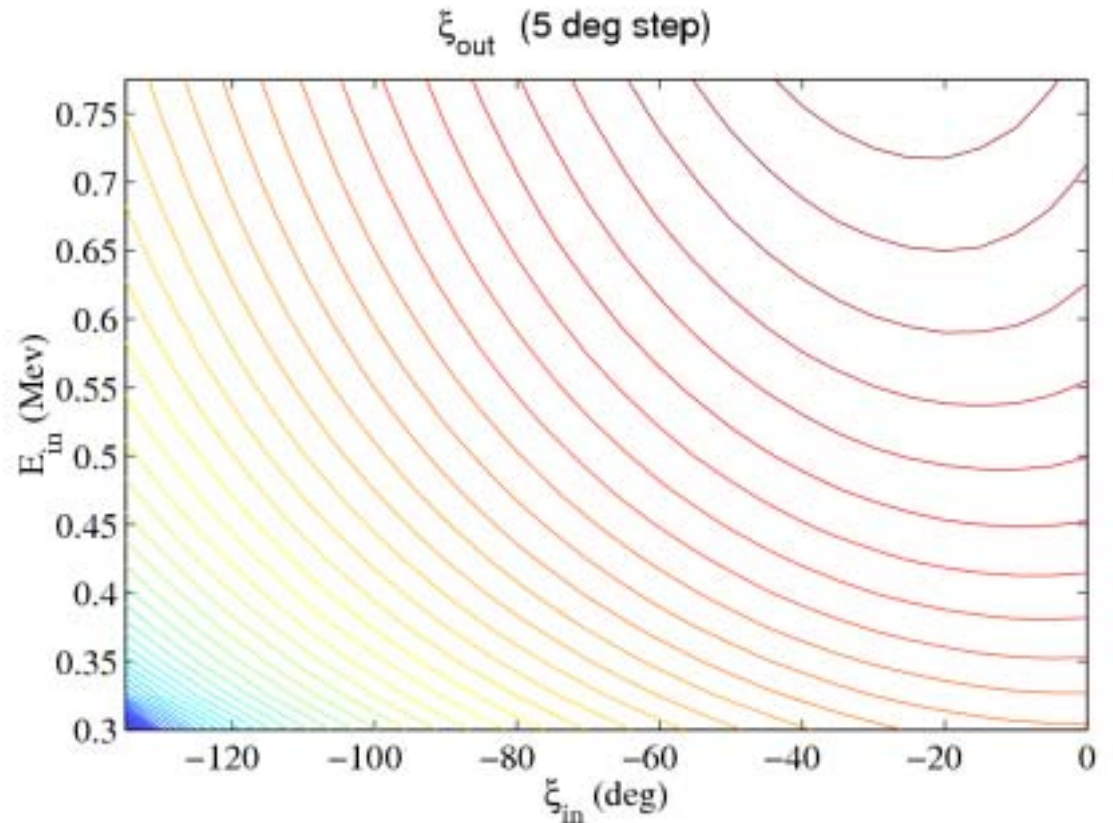
入射条件に対する初段加速空洞出口での運動エネルギー

- 4.29 MV/m
- 等エネルギー線をプロット
- 電子銃での加速電圧を500kVとすると、 $E_{in} = 0.5(\text{MeV})$ が参照粒子の入射エネルギー



入射条件に対する初段加速空洞出口での位相

- 4.29 MV/m
- 等位相線をプロット
- 電子銃での加速電圧を500kVとすると、 $E_{in} = 0.5(\text{MeV})$ が参照粒子の入射エネルギー

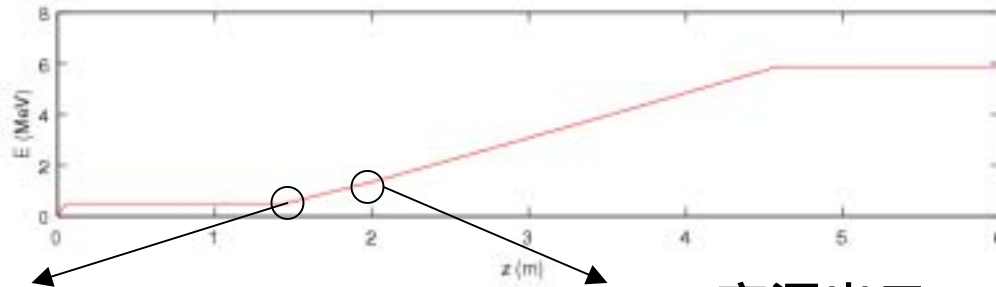


エミッタンスを最小化する条件との比較

- 10mAで最小エミッタンスが得られるときの空洞入口の分布を計算
- 加速電場: 2.7 MV/m
- $Emit_x = 0.158 \text{ mm mrad}$ (10mA, 7.7pC)
- これを先ほどの図にプロットして比較する
- 入口の粒子分布はPARMELA を使用して計算

- 等エネルギー線、等位相線とどのような関係にあるか？
 - 等エネルギー線: 出口でのエネルギーが揃う
 - 等位相線: 出口での位相が揃う

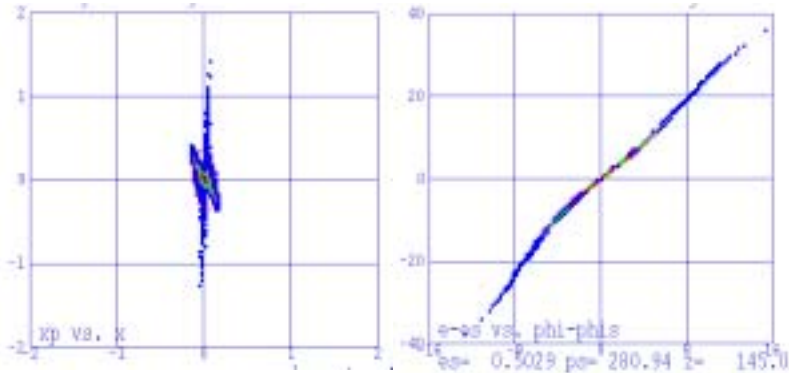
初段空洞入口、出口での分布



• 空洞入口

(x, x')

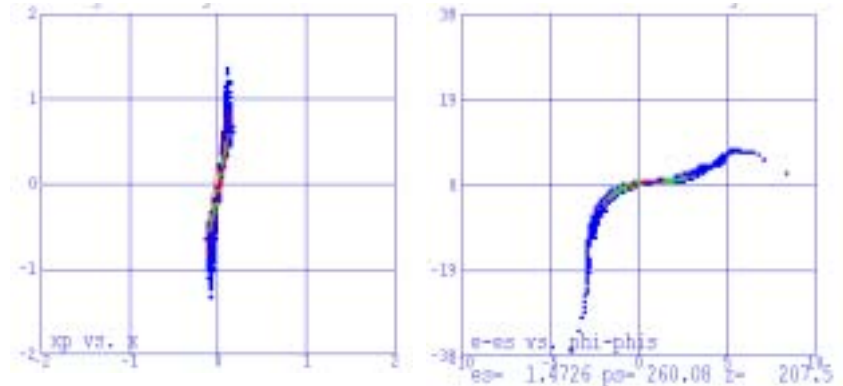
(E, ϕ)



• 空洞出口

(x, x')

(E, ϕ)

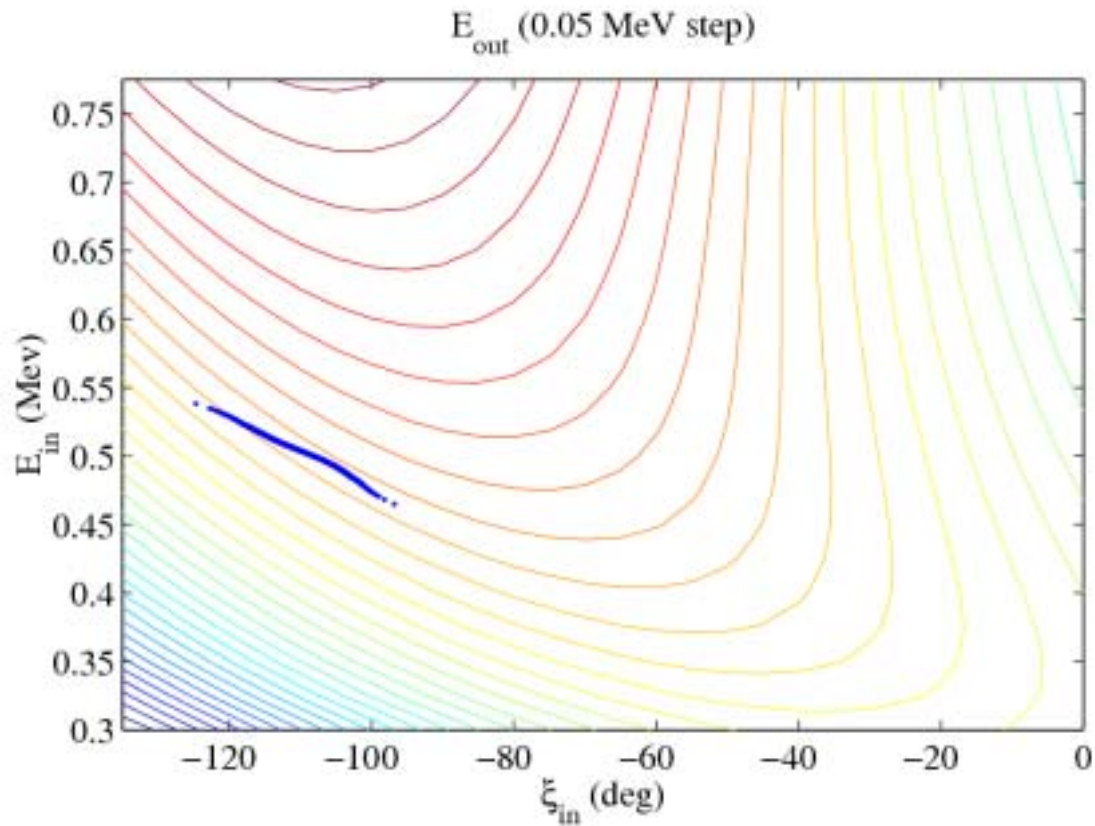


$\phi = \omega t + \phi_0$ であるので、 $\xi = kz - \omega t - \phi_0 - \phi_{CELL} = kz - \phi - \phi_{CELL}$
つまり、 ξ で位相を表すと符合が逆(向きが逆)になる

エミッタンスを最小化する条件との比較

1. 運動エネルギー

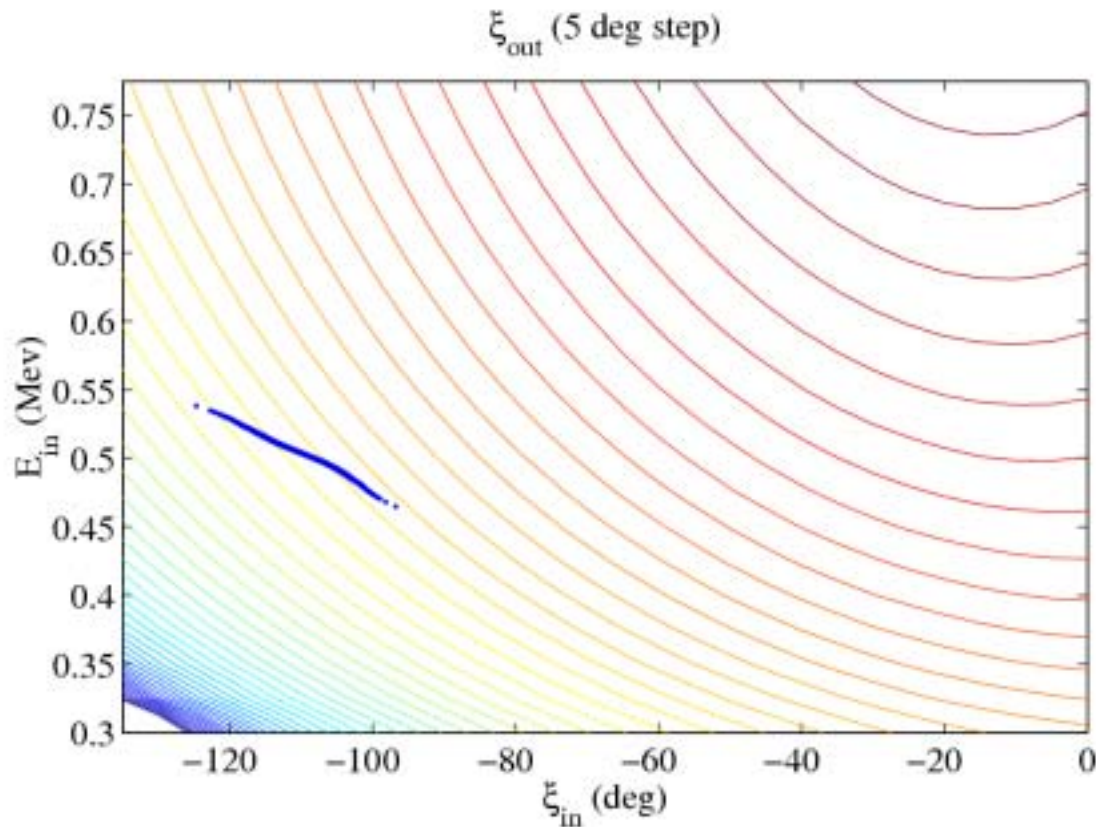
- 入射分布: 端を除いてほぼ等エネルギー線上にある



エミッタンスを最小化する条件との比較

2. 位相

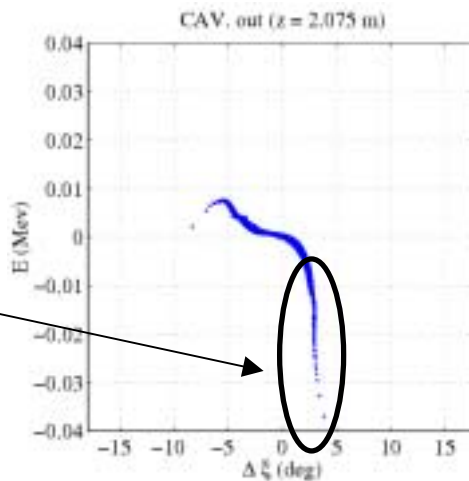
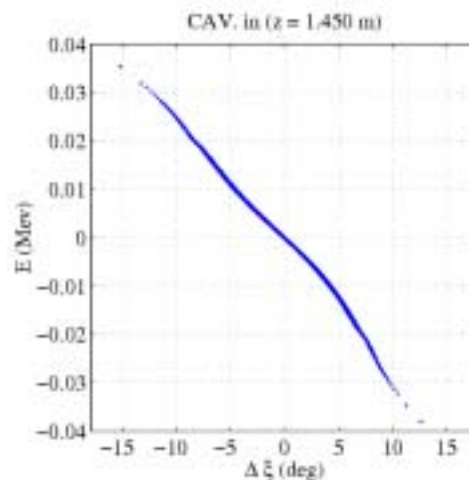
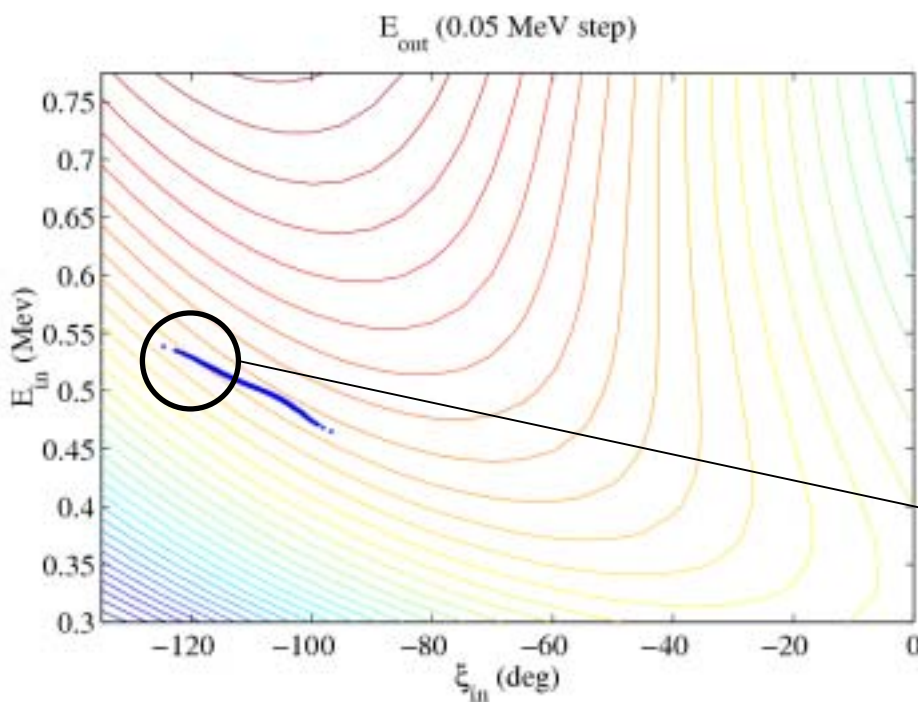
- 入射分布: 等位相位相線上にわりと平行しているように分布



エミッタンスを最小化する条件との比較

3. 出口でのエネルギー分布

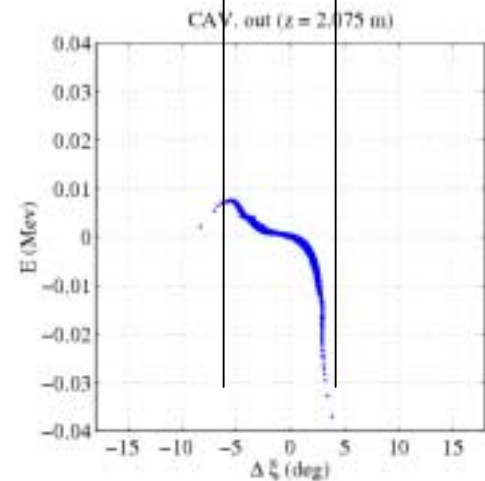
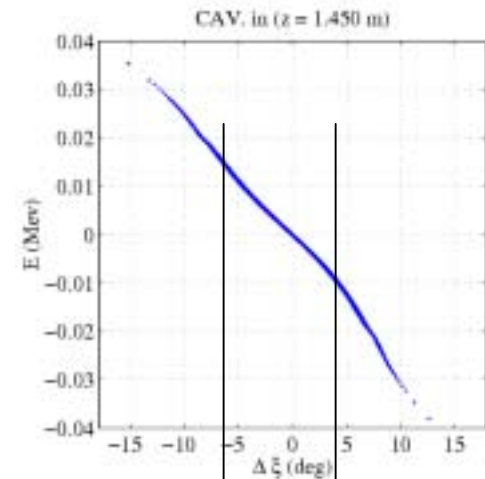
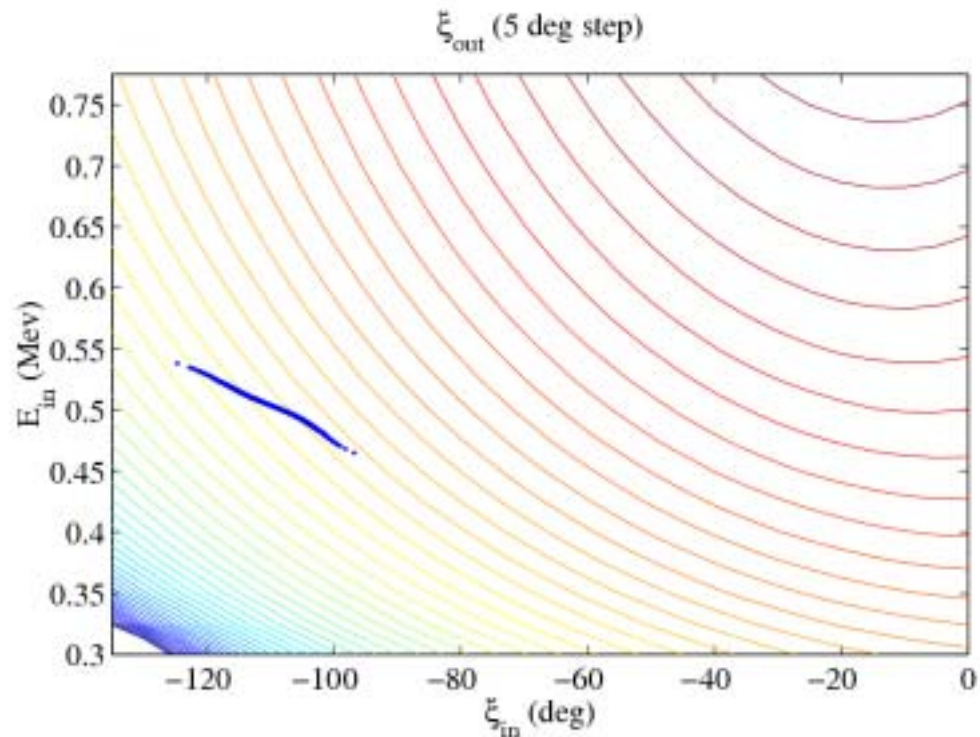
- エネルギーは中心付近で、一定に近くなる
- しかし、端ではエネルギーのずれが大きい



エミッタンスを最小化する条件との比較

4. 出口での位相分布

- 位相の拡がり小さくなっている



エミッタンスを最小化する条件との比較 まとめ

- エミッタンスを最小化する条件での、初段空洞入口の粒子分布をプロットしてみた
- エネルギー
入射ビームの分布は、端を除きほぼ等エネルギー線上にある
- 位相
入射ビームの分布は、等位相線上に近い
- 等高線(等エネルギー、等位相)上に近いところに、入射ビームの粒子分布がきている
- 等高線上近くにあれば、エネルギーあるいは位相の拡がりが増速後も増大しない。このことがエミッタンス増大抑制に効果があるか？

加速空洞中での電子の運動の取り扱い

1. 進行波中での運動(1)

- L. Serafini, AIP Conf. 581
- 羽島さん作成資料
- 進行波中での電子の運動 簡単なハミルトニアンで近似可能
- 進行波: $E_z = -E_0 \sin(\omega t - kz + \Psi_0)$

- 進行波中での電子の運動を記述するハミルトニアン

$$H = \gamma - \beta_r \sqrt{\gamma^2 - 1} - \alpha \cos \xi$$

$$\alpha \equiv \frac{eE_0}{mc^2 k}$$

- β_r は進行波の速度
- 電子は $H = \text{const.}$ で運動
- 位相空間は (γ, ξ) 、エネルギーと位相

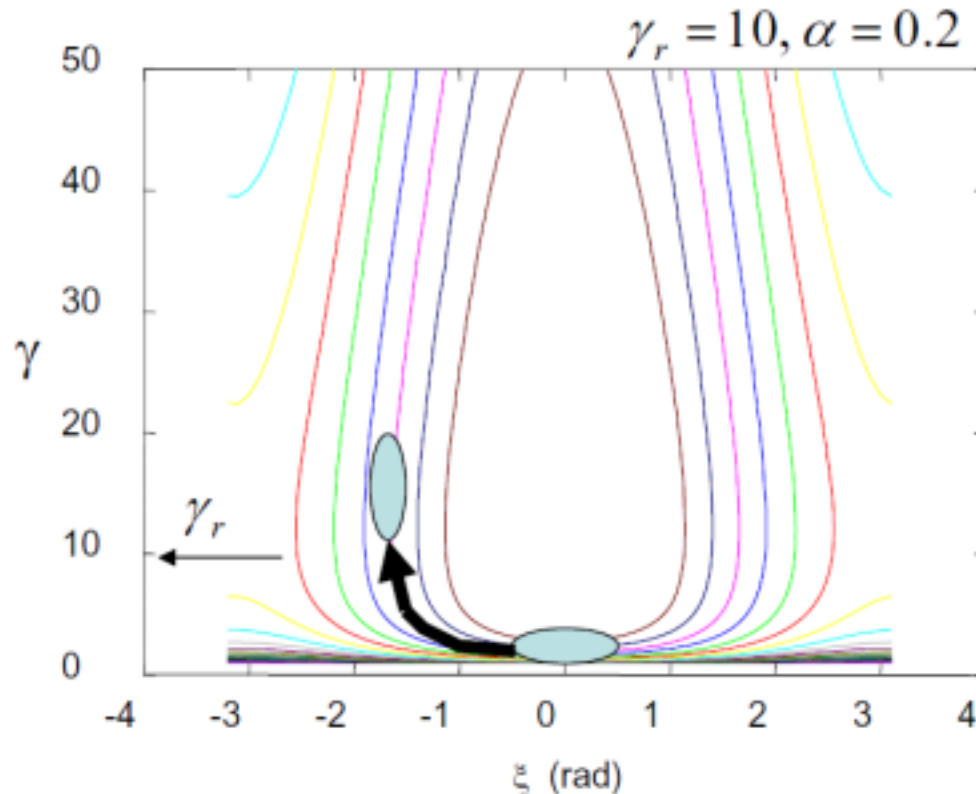
$$\xi = kz - \omega t - \Psi_0$$

$$\gamma = 1 + T / mc^2$$

加速空洞中での電子の運動の取り扱い

1. 進行波中での運動(2)

- 位相空間での軌跡(羽島さんの資料より)

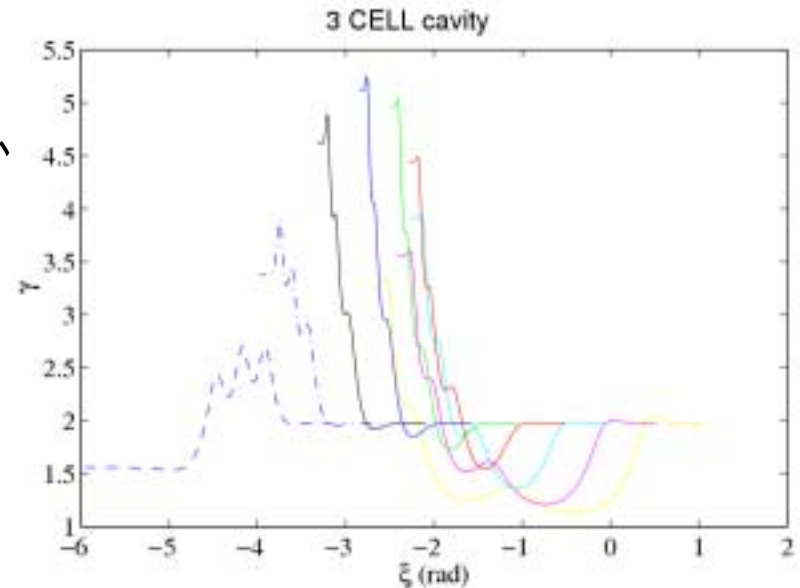


加速空洞中での電子の運動の取り扱い

2. 定在波中での運動

- ERL用超伝導加速空洞: 定在波で加速
- 近似式で良いので解析的に扱えるようにしたい
- どのように定式化するか?
- 進行波に比べて、定式化が複雑になりそう。
- 単純化した場合: $E_z(z, t) = F(z) \sin(\omega t + \varphi_0)$

- さらに、Fringe field がある場合には、周波数成分が単一ではないため、 (γ, ξ) 空間で軌道が交差する
- ハミルトニアンはどのように記述するのか?



まとめ

- 羽島さんから頂いた資料を基にして、初段空洞の加速勾配の影響を評価するために、再現計算を行った。
- 初段空洞への入射条件に対する出口での運動エネルギー、位相の関係を求めた
- 最適化されたときの入射条件
 - ほぼ等エネルギー面上にある
 - 位相も等位相線に平行に近いところにある
- 今回できなかったこと
- 加速勾配を変更して、空洞への入射条件に対する出口の運動エネルギーと位相を計算すること
- 次に、加速勾配が変わったときの最適化を行い、そのときの入射条件が等エネルギー線、等位相線に対してどのような関係にあるかを調る