

ビームダイナミクスの課題

羽島良一

原子力機構、ERLグループ

ERLービームダイナミクスWG

2006年4月14日

ERLにおけるビームダイナミクスのキーワード

入射器: エミッタンス増大とその補償、バンチ圧縮、空間電荷効果、
位相空間における折り畳み回避、多数パラメータの最適化
フォトカソード、レーザー
実証機と実用機で共通

合流部 (merger): 縦方向／横方向空間電荷効果、エミッタンス増大
CSR(コヒーレントシンクロトン放射)
エンベロープマッチング
実証機と実用機でほぼ共通

周回部: multi-bunch multi-pass BBU、HOM、バンチ圧縮、エネルギー圧縮、
エミッタンス増大、CSR、SR、イオントラップ
実証機と実用機で異なる

入射器

バンチ圧縮 (15ps→3ps)、エミッタンス補償、加速を同時に行う。

数値計算に頼らざるを得ないが、基本的な原理と指針は与えられている。
(エンベロープ方程式、エミッタンス補償の原理、折りたたみ回避など。)

急いすべきこと

Cornell's design の再現、JAEA's design の改良
複数コードでの相互チェック (PARMELA、ASTRA、GPT、、、)
常伝導オプションを排除してよいか確認

個人的な興味の対象

1nC/1mm-mrad が出せるのか？ (XFELが発振可能なパラメータ)
multi-objective GAに代わる効率よい最適化手法？

入射器設計の課題(ビームダイナミクス)

- 1nC バンチの計算(超短パルス、低繰り返しモード)
- 入射器におけるバンチ圧縮の可能性検討
- 250kV gun 利用の可否検討
- 複数コードでの比較(PARMELA、ASTRA、GPT、、、)
- カソードモデルの改良(時間波形、初期運動量、鏡面電荷、、、)
- イオンによる空間電荷の部分的な中和の効果
- 磁石、空洞のエンジニアリングモデルを反映した配置決定
- バンチャー形状のモデル(現状、zero-length model)
- merger部の空間電荷効果、CSR、周回電子との相互作用
- 安定性、jitter の許容値
- ……

合流部

低エネルギー、高エネルギー電子を同一軌道に合流する。
ERLに固有の要素。

いくつかの基本的な原理と指針は与えられている。

急いすべきこと

3次元空間電荷効果、CSRの計算法(当面は近似でも可)
エミッタンス増大の評価
これらを踏まえて、構成の決定 zigzag or 3-dipole ?

個人的な興味の対象

1nC以上の電荷量に対するエミッタンス増大の抑制
入射エネルギーはどこまで下げてよいか？

- ERL-WG では、open questions への回答をまとめる作業を行う
- “vacuum and apertures” を羽島が担当
 - ERL放射光源に必要な vacuum and apertures の仕様を決定したい
 - 必要な真空度とポンプの構成（本田さん）
 - ビームロス、放射線発生
 - イオントラップ（坂中さん）
 - ビームとダクトの相互作用、発熱除去
 - CSR 遮蔽
 - 磁石ギャップと製作費用の考慮
 - その他
- 相談に乗っていただけの方、よろしくお願いします。

ERLの入射器

ERLの性能(放射光特性)は
入射器で決まる。

入射器の開発＝最優先課題

平均電流 100mA

→ 十分な放射光フラックス

規格化エミッタンス 0.1mm-mrad

→ 5-6GeV で回折限界

バンチ長 100fs

→ 超高速現象の科学

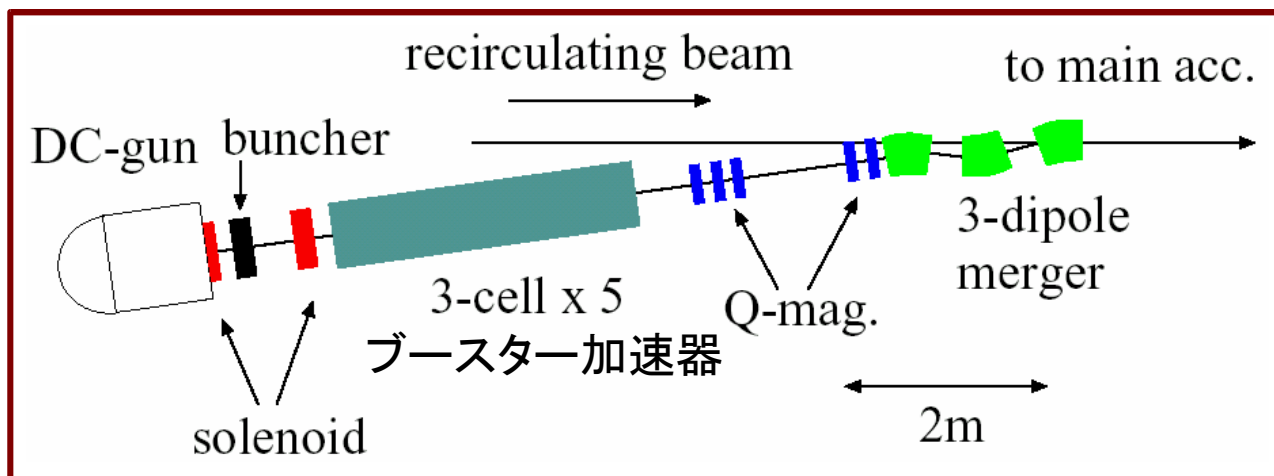
これらの条件を満たす入射器として、

NEAカソード + DC 電子銃 → 室温と等価な極小熱エミッタンス

ブースター超伝導加速器 → 5-10 MeVまで加速して入射

入射器の設計

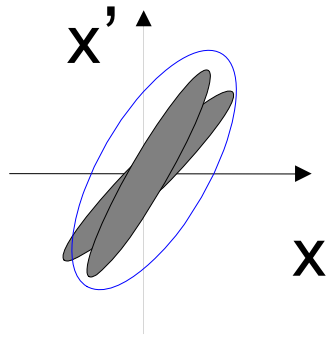
多数のパラメータを含んだ最適設計が必要



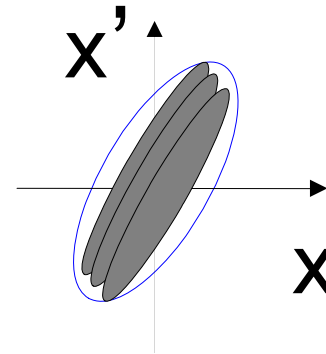
■ 電子ビームのダイナミクスを決める変数

- ▶ 横方向の運動に関連: ソレノイド x 2, 四極 (Q-mag.) x 5 = 7 変数
- ▶ 縦方向の運動に関連: バンチャーと入射空洞の振幅と位相、12変数
- ▶ さらに、各機器の位置関係、カソード駆動レーザーのパラメータ等

入射部におけるエミッタンス増大



横方向の空間電荷力
によるエミッタンス増大



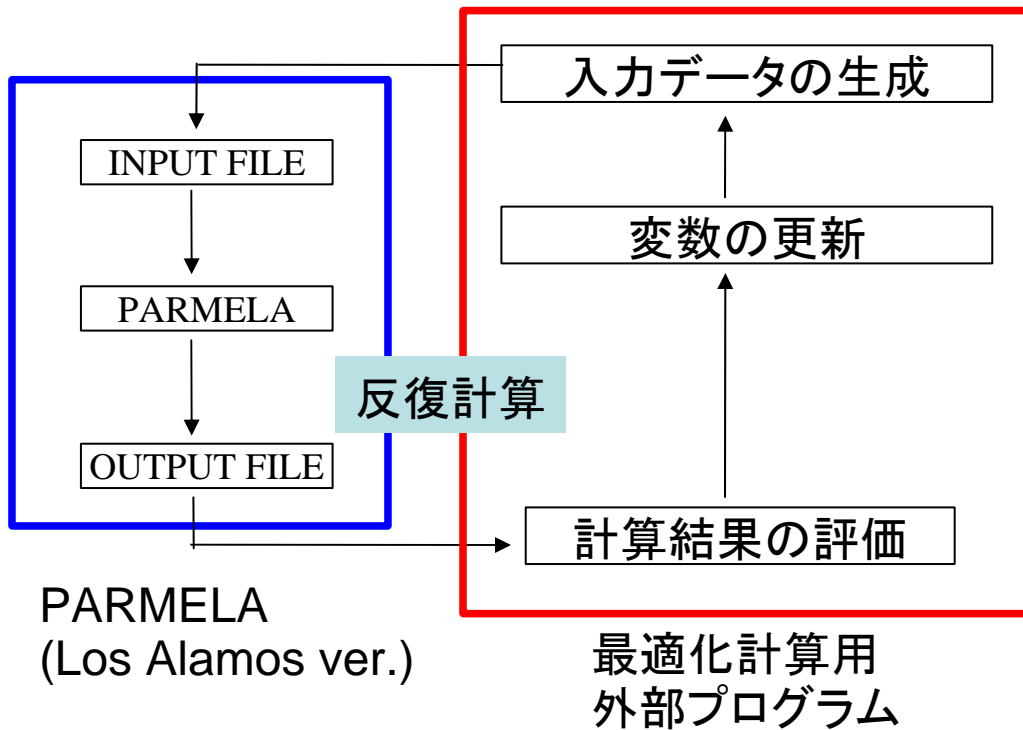
縦方向の空間電荷力
によるエミッタンス増大

- カソードからの電子バンチ(14 ps)を適切に圧縮(3 ps)して主加速器へ
- エミッタンス増大の補償回復

空間電荷力を含んだビームダイナミクス解析

—————> 粒子追跡型のシミュレーションコード

加速器設計コードへの最適化ルーチン組み込み



計算結果評価プログラム
 — 以前作成したコードの一部を流用 (JAVA)

R. Hajima, Proc. ICAP-98.

入力データ作成を含む最適化計算の指揮
 — wrapper script (Perl)

master input file

```

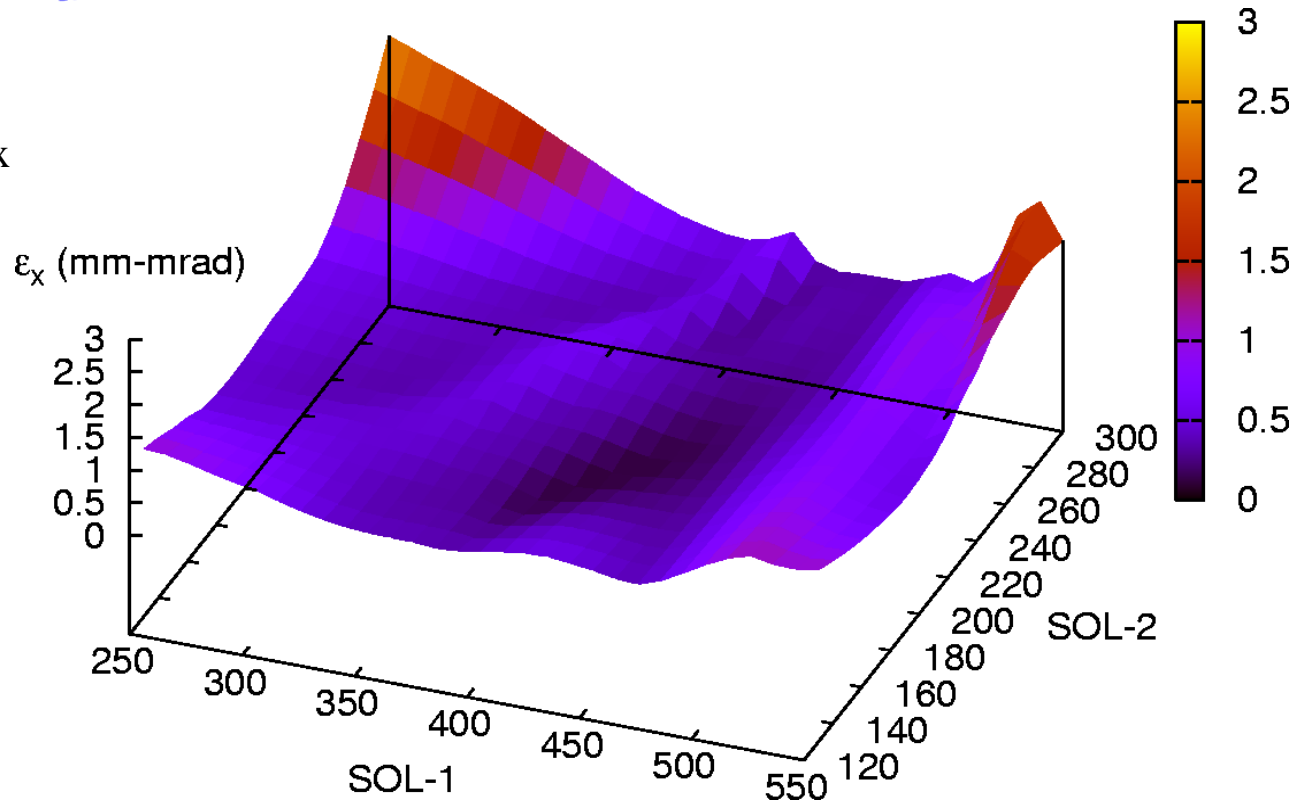
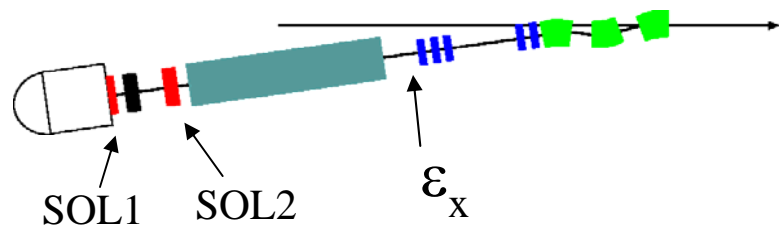
;# VARY SOL1 200 100 300
;# MAXLOOP 100
;# FIT ENX ENY + 2 POW
SOLENOID 10 5 1 SOL1
DRIFT 20 5 1
.....
  
```

最適化計算の指示は PARMELA
 入力ファイルのコメント文として挿入

動かす変数を指示
 目的関数を指示 (逆ポーランド記法)

反復計算のための入力ファイルは
 動的に生成される

Solenoid vs ϵ_x before the Quad's

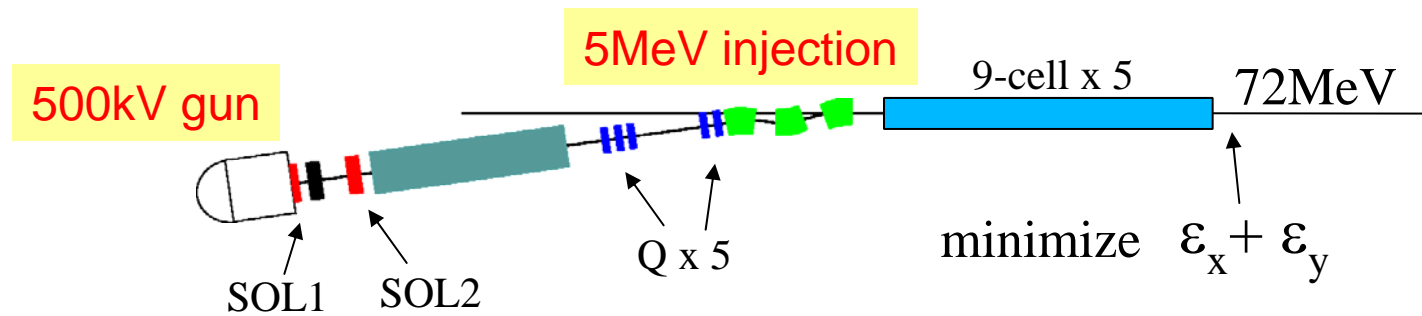


ϵ_x is a smooth function of SOL-1 and SOL-2.
But there are local minima.

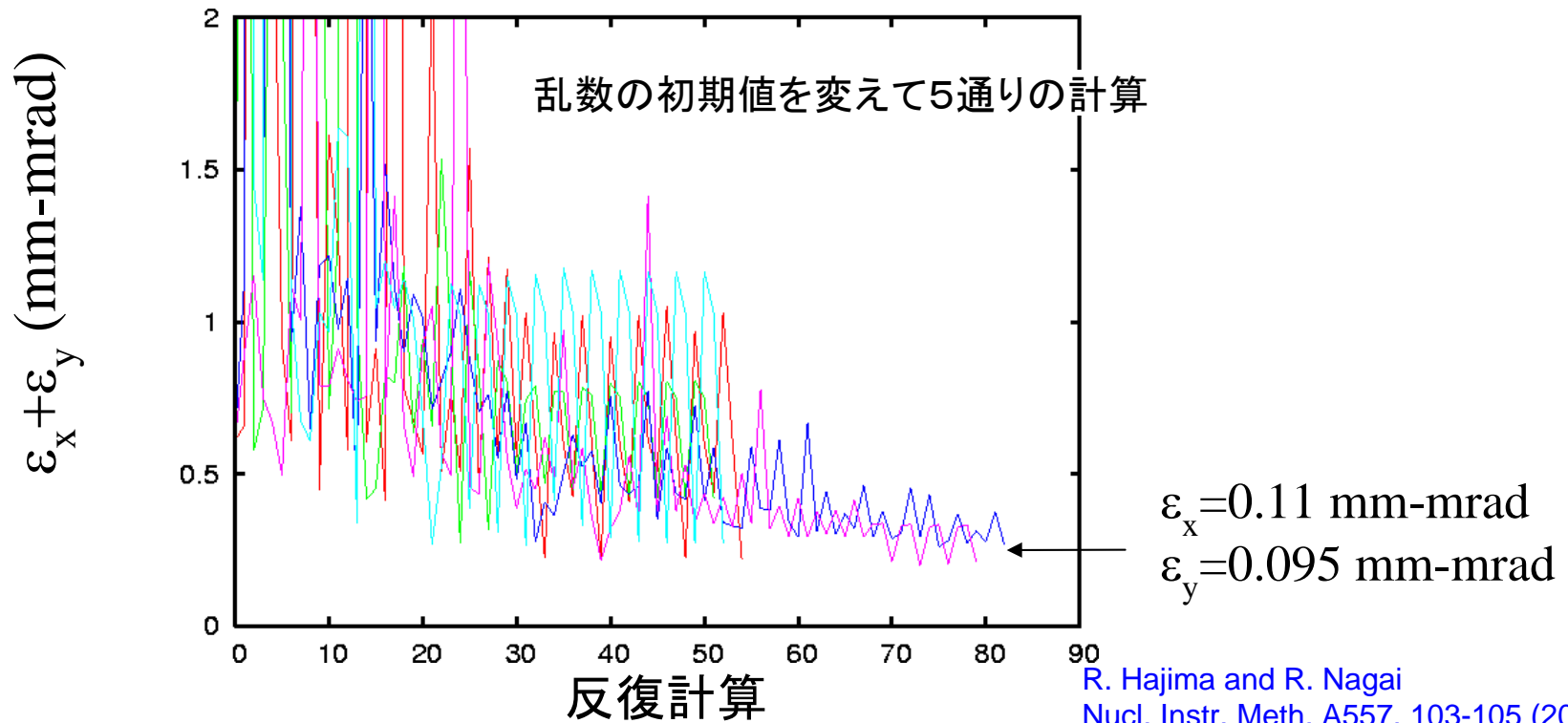
滑降シンプレックス

we apply "down-hill simplex" to the optimization.

ソレノイド、四極磁石の最適化



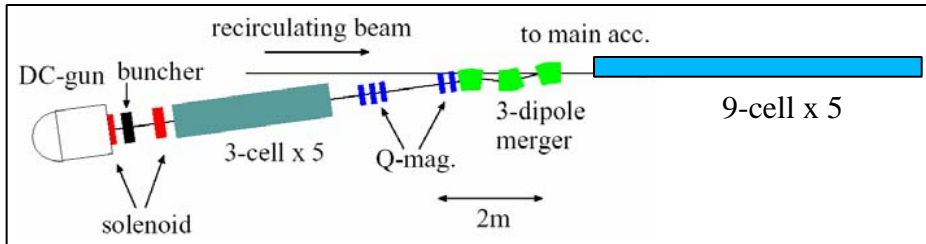
滑降シンプレックス、7つの変数 (ソレノイド×2、四極×5)



R. Hajima and R. Nagai
 Nucl. Instr. Meth. A557, 103-105 (2006).

7.7pC バンチに対して最適化した入射器

バンチ電荷 7.7pC (10mA)



カソードパラメータ

実効温度 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、ガウシアン $\sigma_t = 14\text{ps}$

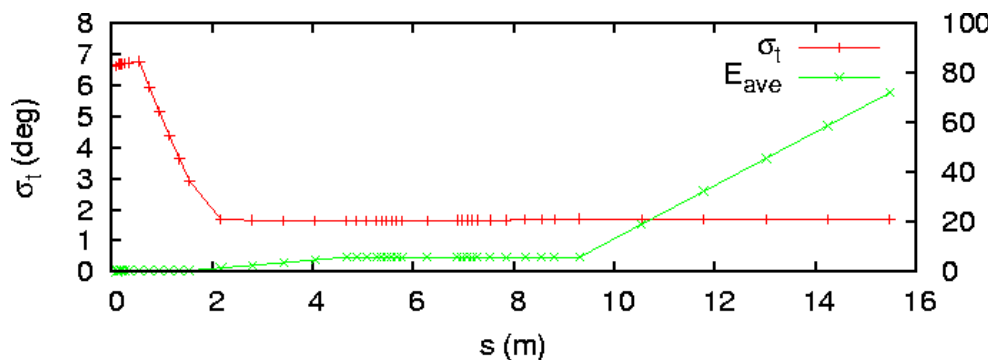
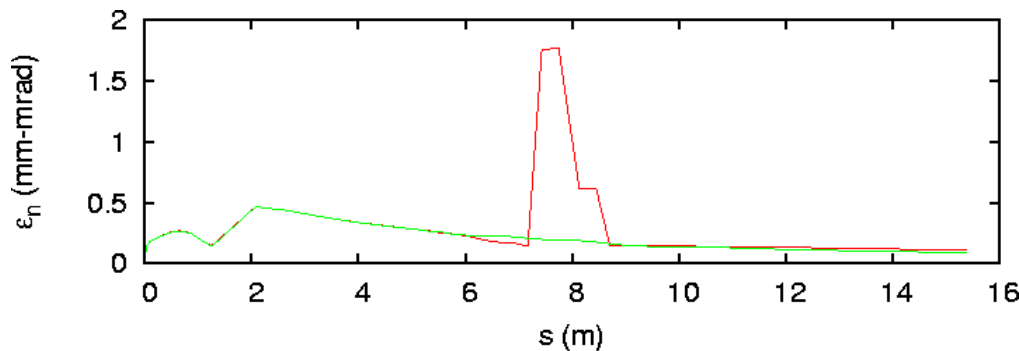
72MeV 加速後 (9-cell x 5)

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

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

$$\varepsilon_z = 51 \text{ deg - keV}$$

$$\sigma_t = 3.6 \text{ ps}$$

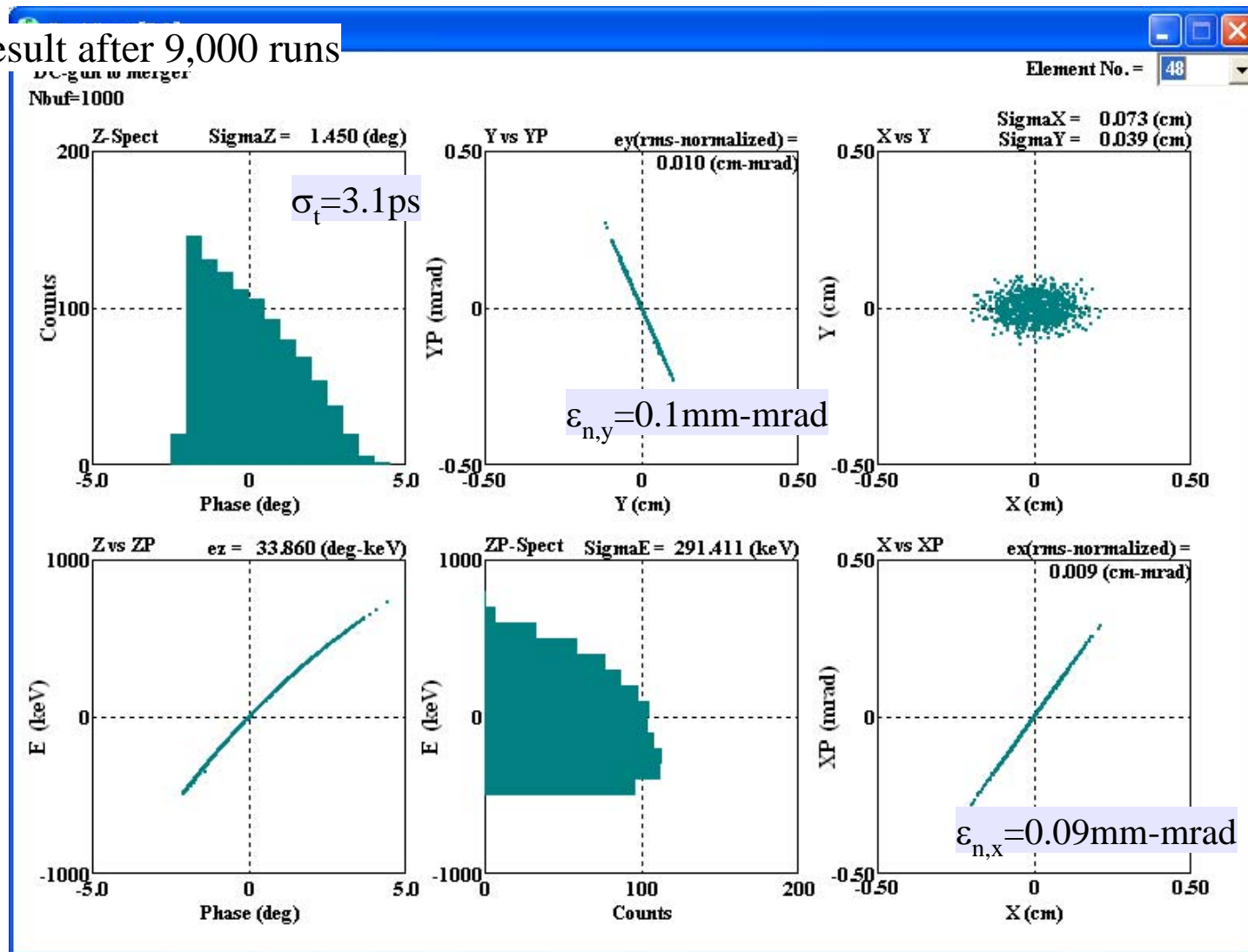


規格化エミッタンス = 0.1mm-mrad 、10 keV X線の回折限界条件を満たす

simulated annealing (SA)による最適化

7.7pC bunch, targeting $\sigma_t=3\text{ps}$, $\varepsilon_n=0.1\text{mm-mrad}$ at 70MeV

best result after 9,000 runs



energy spread can be reduced if 9-cell phase is tuned manually.

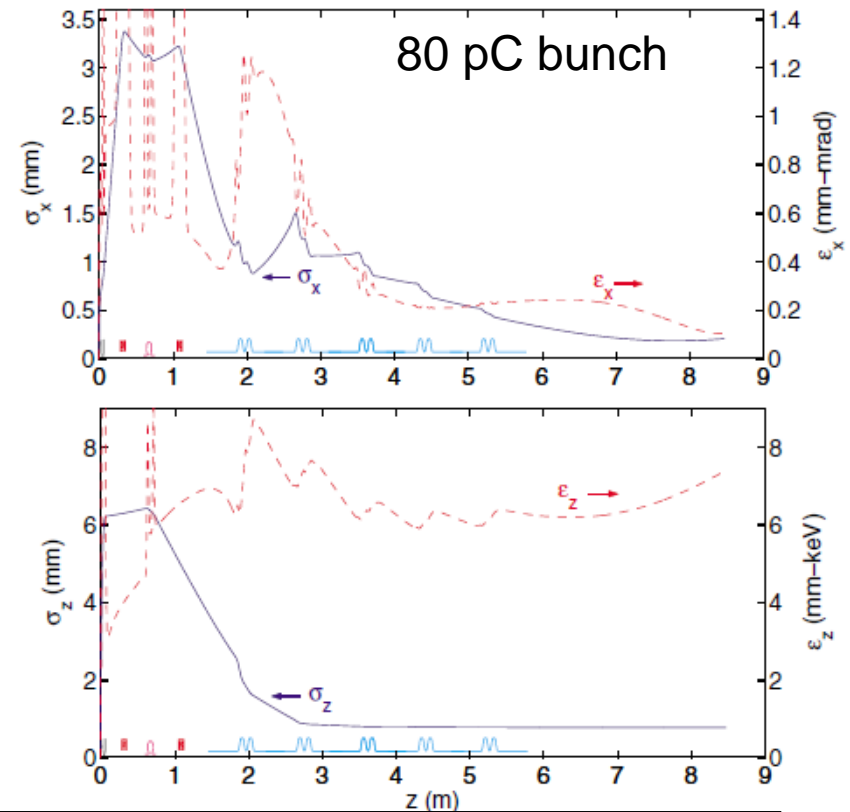
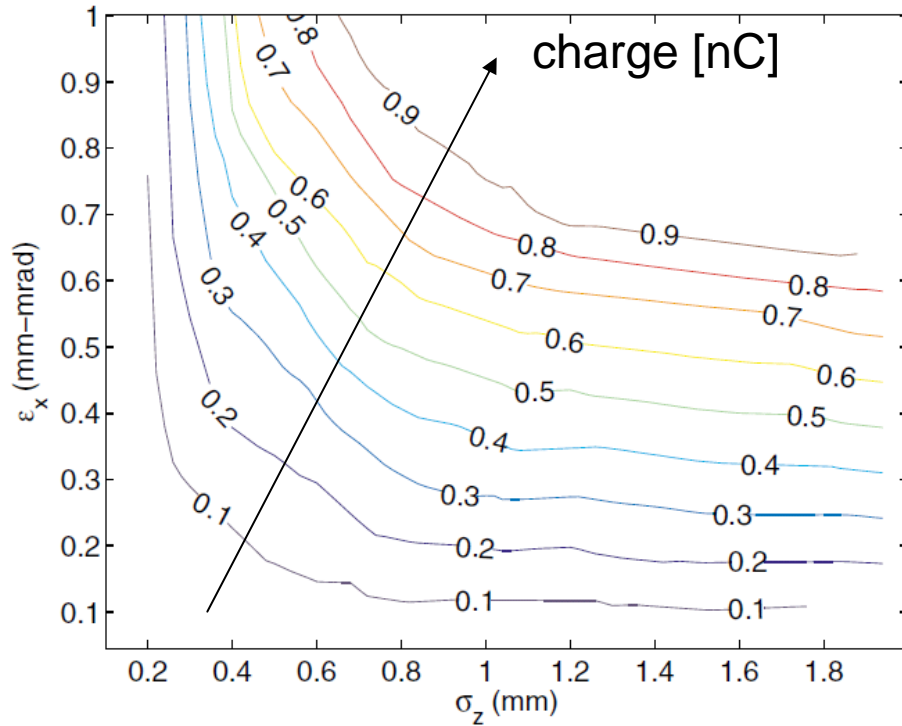
Cornell—入射器の最適化(20以上のパラメータ)

multi-objective GA 遺伝的アルゴリズム

カソード条件

熱エネルギー = 35 meV

610 kV gun, 12.6 MeV injector



$$\epsilon_n = Q(0.75 + 0.15 / \sigma_z^{2.3})$$

I. Bazarov, C. Sinclair
PRST-AB 8, 034202 (2005)

100mA, 0.1mm-mrad 実現可能

ERL入射器の設計まとめ

ERL放射光源の目標 100mA、0.1mm-mrad、100fs

500 kV DC 電子銃 + 5 MeV ブースター の構成で以下の性能

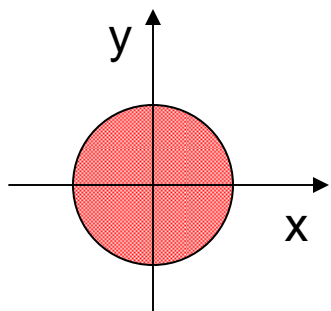
high-flux	100mA (77pC x 1.3GHz)	1mm-mrad	3ps	
high-coherence	10mA (7.7pC x 1.3GHz)	0.1mm-mrad	3ps	
ultrafast (速度集群)	(77pC x 1-100MHz)	2mm-mrad	180fs	$\sigma_E / E = 0.01\%$
ultrafast (磁気圧縮)	(77pC x 1-100MHz)	2mm-mrad	100fs	$\sigma_E / E = 0.34\%$

まずは、この構成をベースに、設計作業を始めたい。

参考資料

横方向空間電荷力によるエミッタンス増大

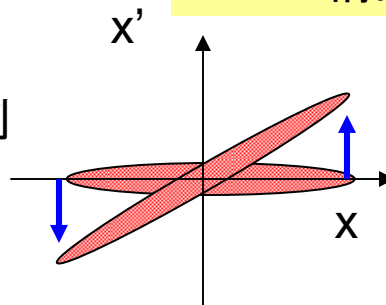
半径方向に一様分布
を持った電子バンチ



空間電荷による
発散力は半径に比例

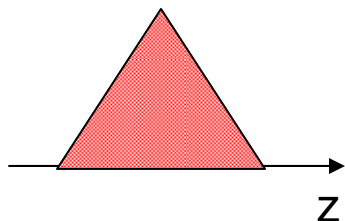


ビーム楕円の回転



エミッタンスの
増大なし

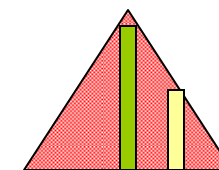
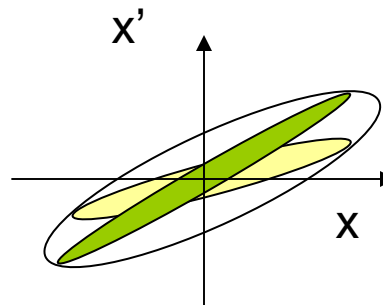
半径方向に一様だが
時間方向に非一様分布
を持った電子バンチ



ビーム楕円の回転
は時間位置に依存



バンチスライス

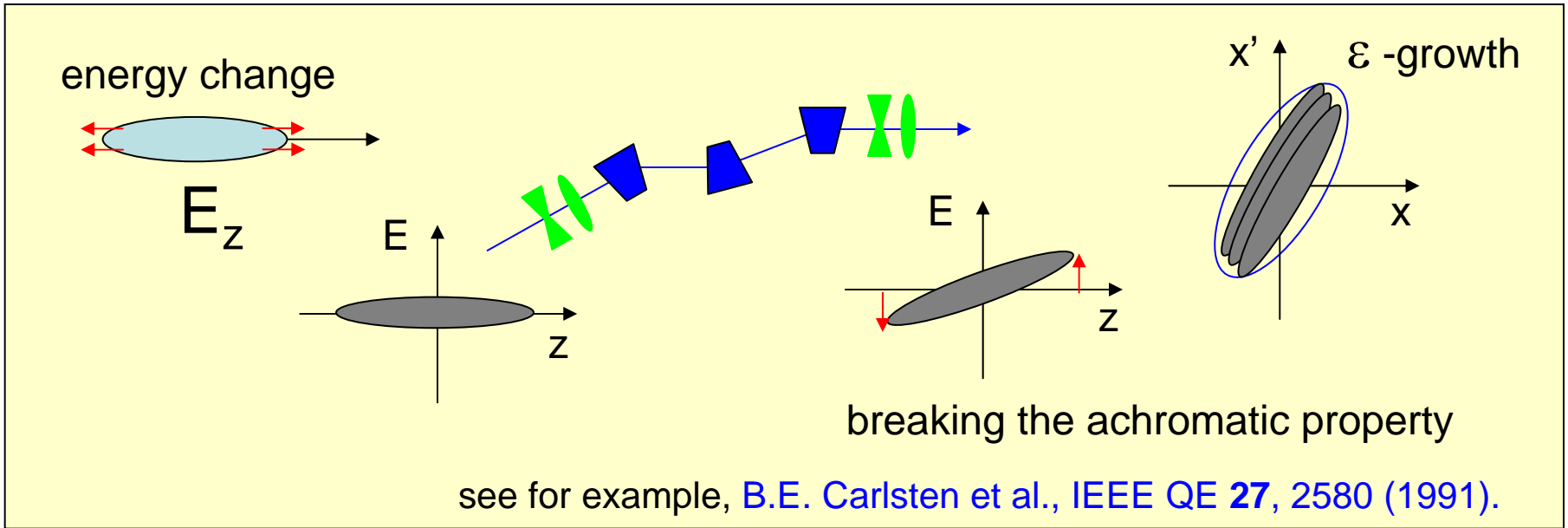


エミッタンスの
増大が生じる

各バンチスライスのエミッタンスは保存するので、増大したエミッタンスを回復できる
「エミッタンス補償」 -- Nucl. Instr. Meth. A285, 313 (1989).

Phys. Rev. ST Accel. Beams 3, 094201 (2000)

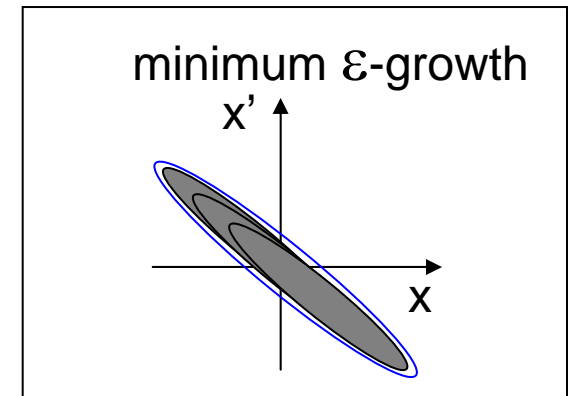
縦方向空間電荷力によるエミッタンス増大



emittance compensation by envelope-matching

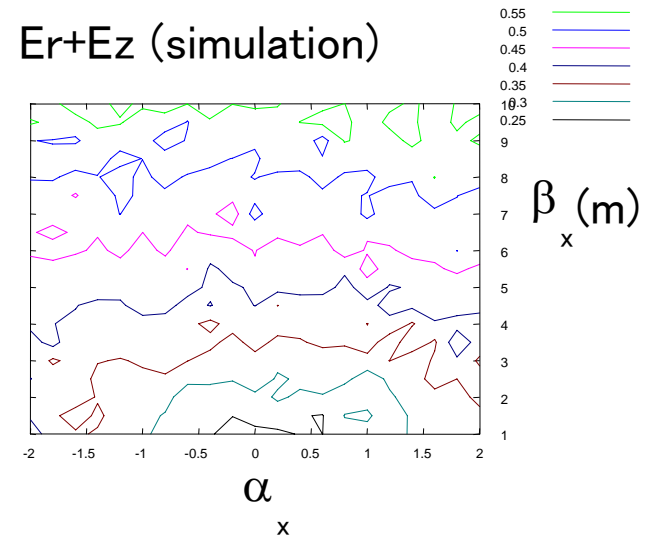
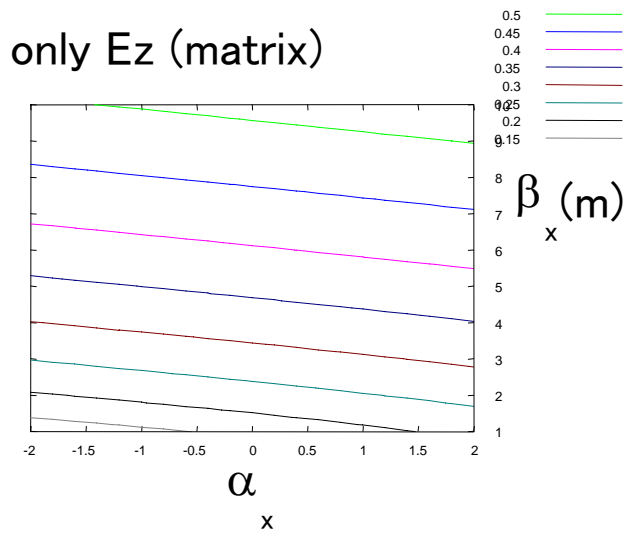
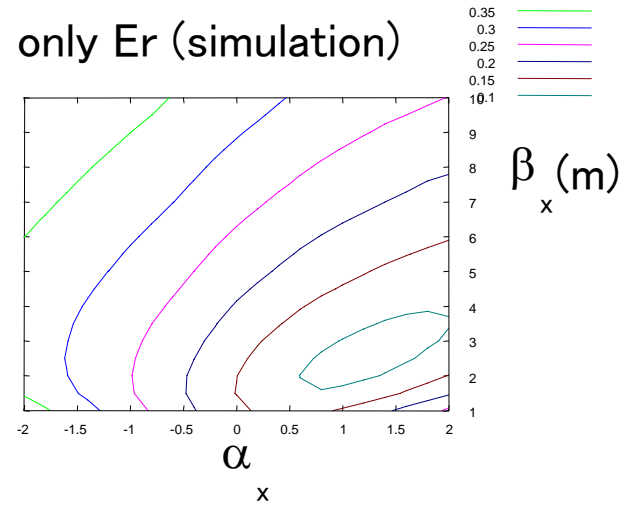
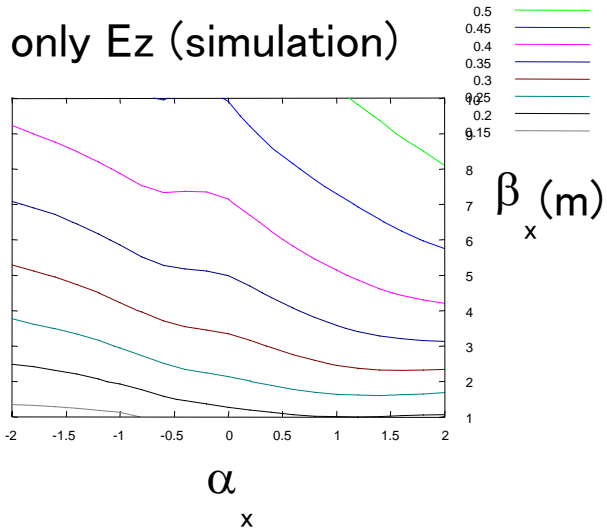
- matching the space-charge kick to the beam ellipse.
- similar to the CSR case.
- is it compatible with ε -compensation for E_r ?

see CSR case, [R. Hajima, JJAP 42 \(2003\) L974-L976](#).

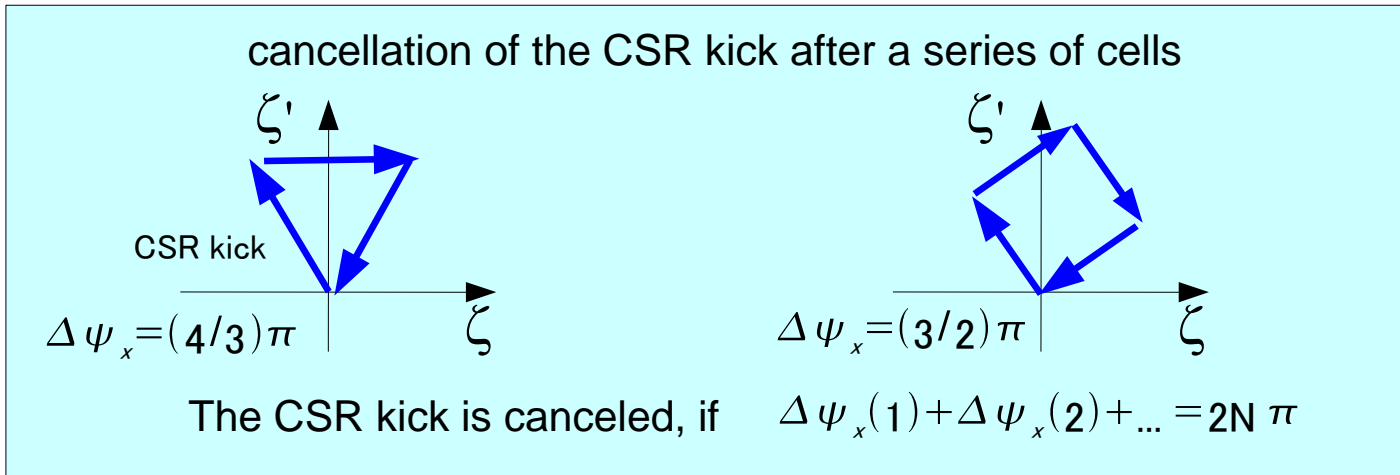


Optimum injection to a 3-dipole merger

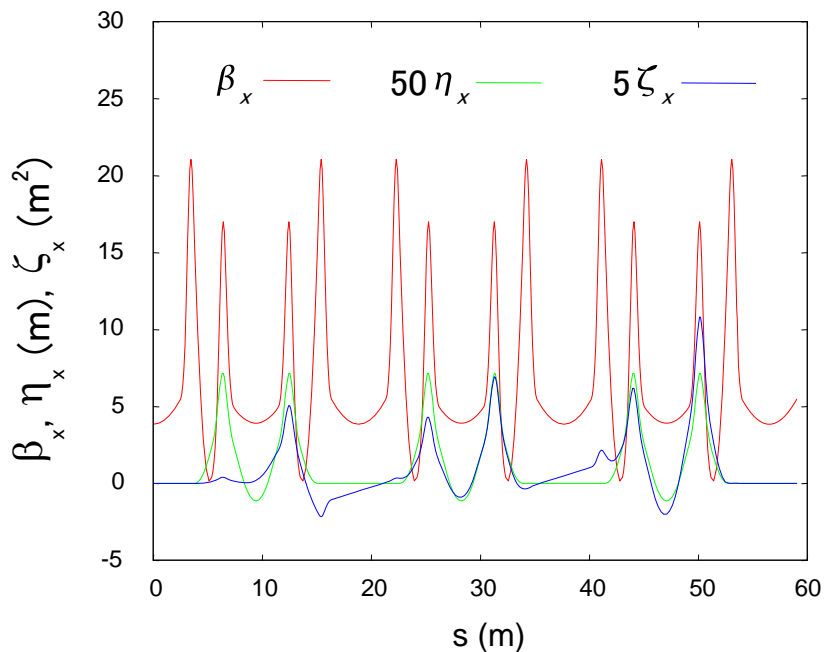
calculate emittance growth with varying injection parameters (α_x, β_x)



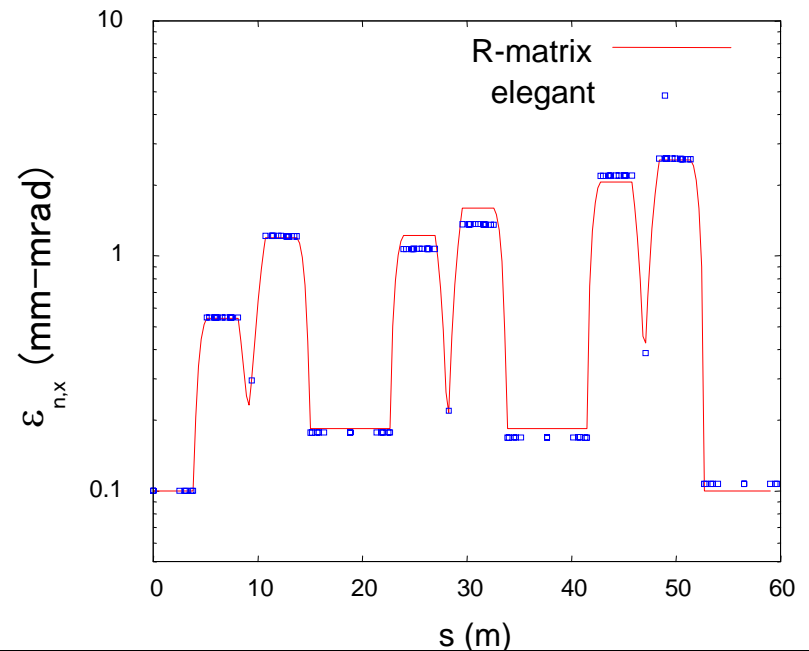
Emittance Compensation by cell-to-cell Phase Matching



example for $\Delta \psi_x = (8/3)\pi$

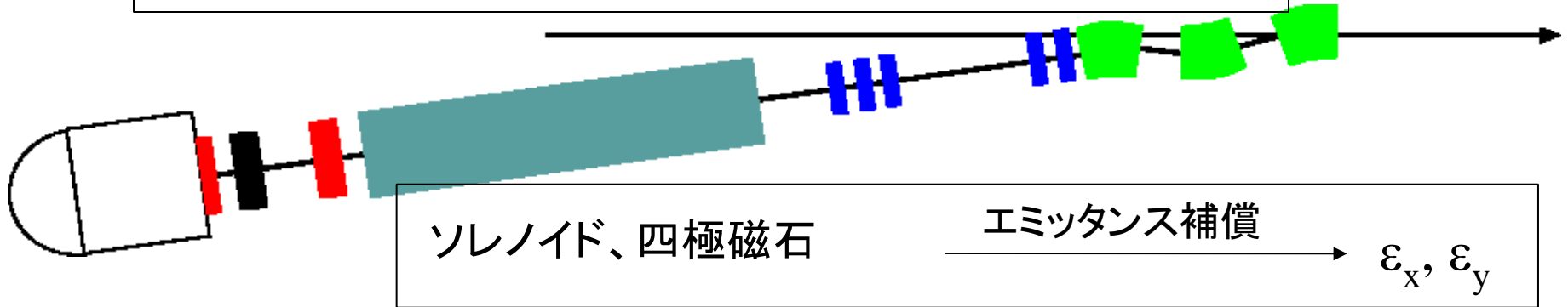
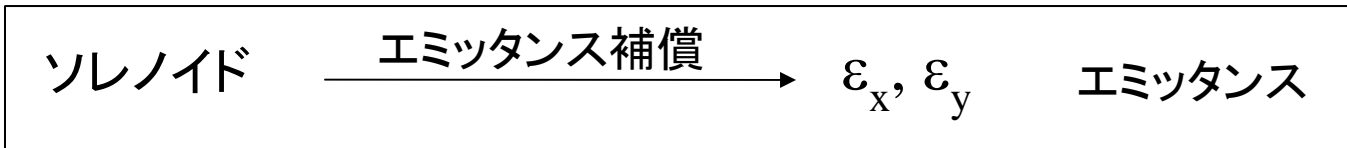
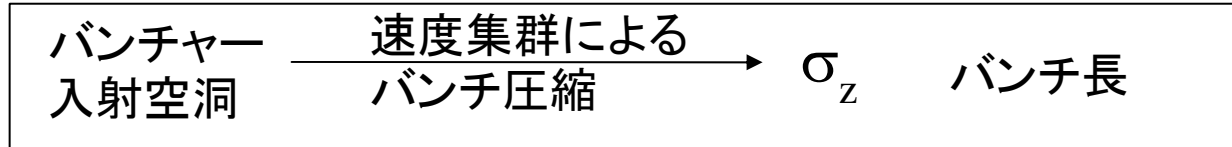


emittance compensation every 3-cells



入射器の最適化

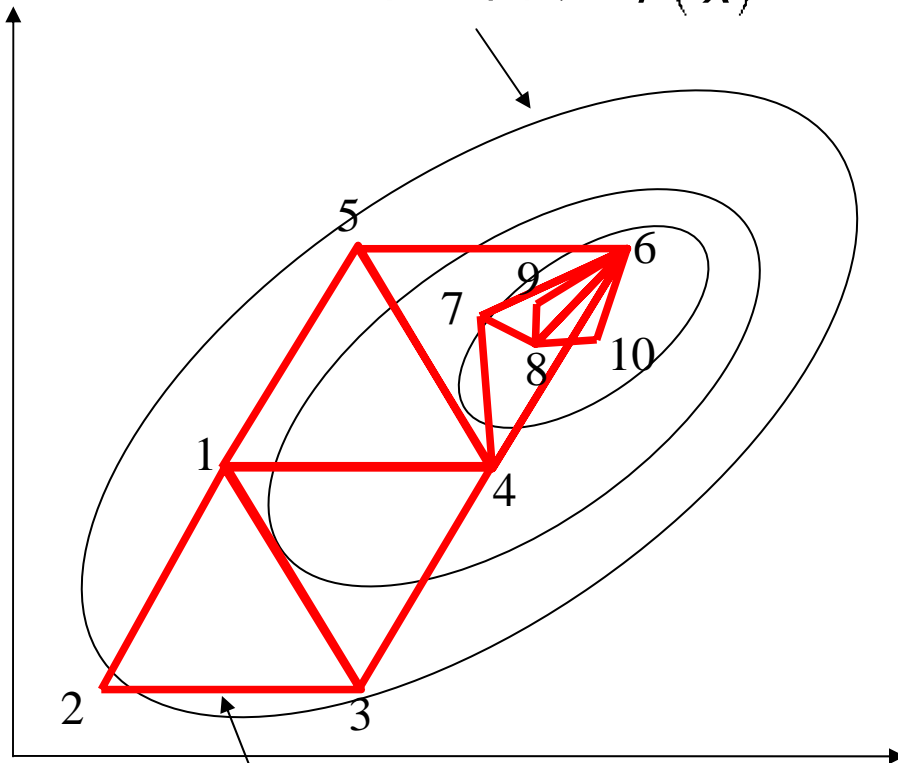
ビーム動力学の知識を援用 — 変数と目的関数の対応付け



これらの対応付けに基づいて、上流から順に最適化
下流まで最適化を行い、必要に応じて反復

滑降シンプレックス法

目的関数: $f(\vec{x})$

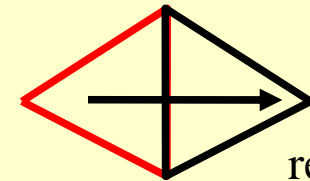


シンプレックス

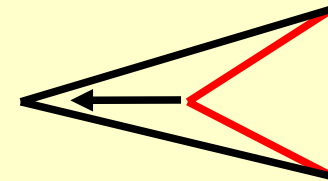
シンプレックス、
n次元空間内の(n+1)個の頂点で囲まれた領域

各頂点における目的関数を評価

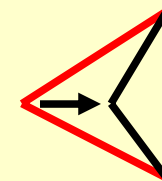
目的関数が小さくなるようシンプレックスを変形



reflection



expansion



contraction

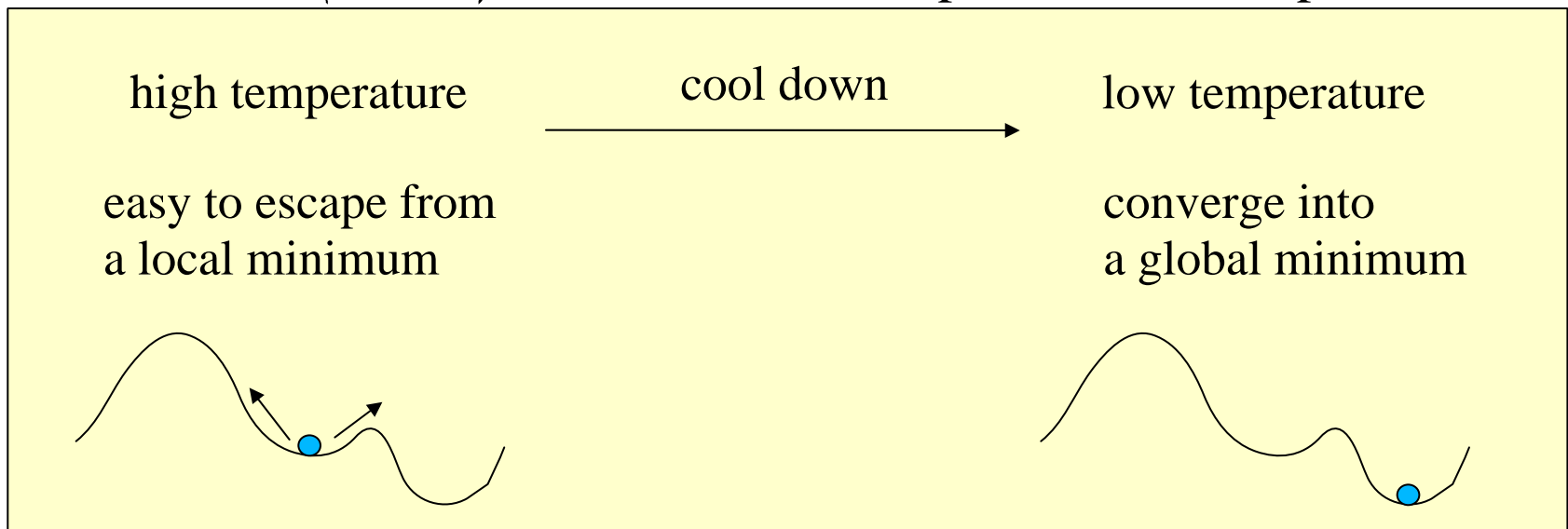
Optimization without any knowledge a priori

simulated annealing (SA)

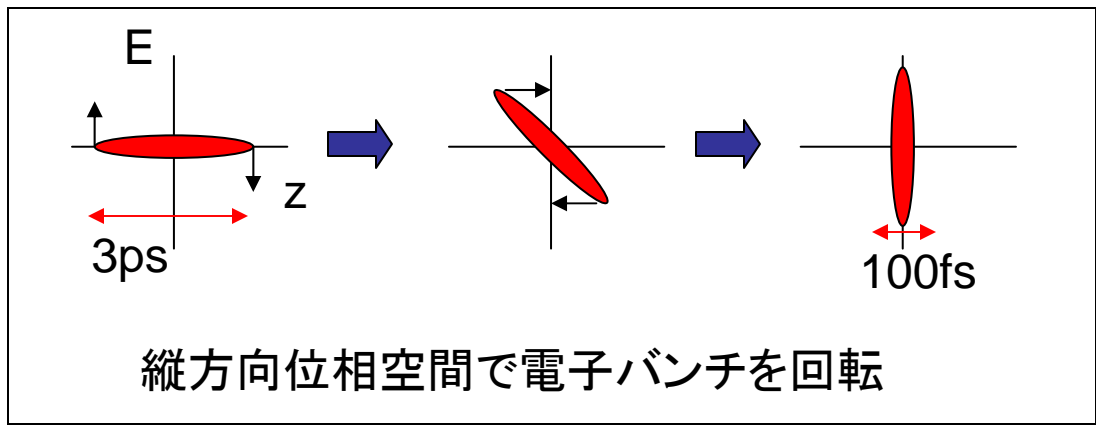
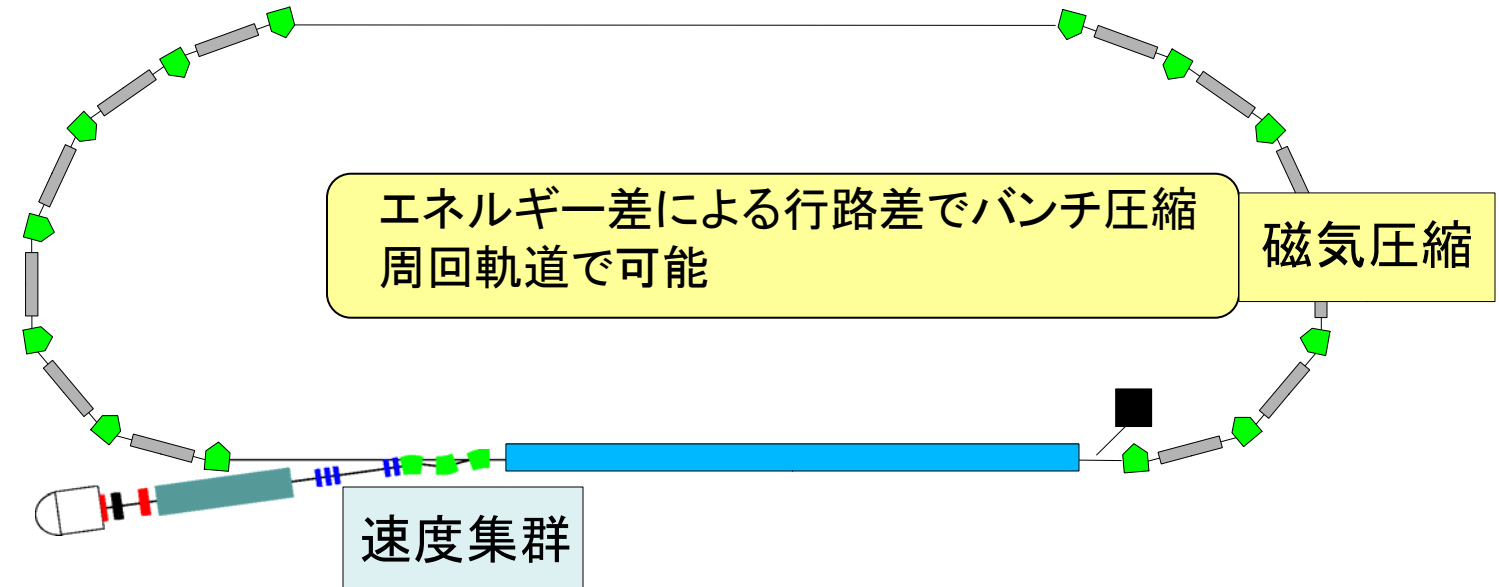
- analogy to the annealing process
= metal cooling and freezing into a minimum energy crystalline structure.
- random search for down-hill, but accept up-hill results with a probability

$$p = \exp\left(-\frac{\delta f}{T}\right)$$

δf : increase in the objective function
 T : control parameter = temperature



フェムト秒電子バンチの生成方法



速度集群	磁気圧縮
CSR なし	CSRによる エミッタンス増大
二次項の補正 不可	二次項の補正 容易
最終エネルギー 広がり小さい	最終エネルギー 広がり大きい

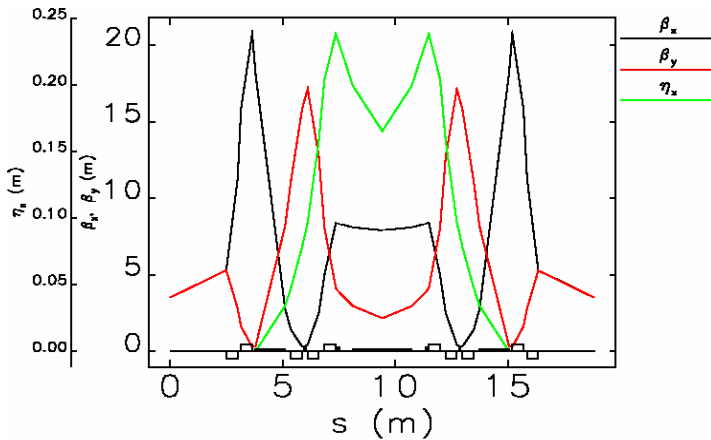
周回軌道における磁気圧縮



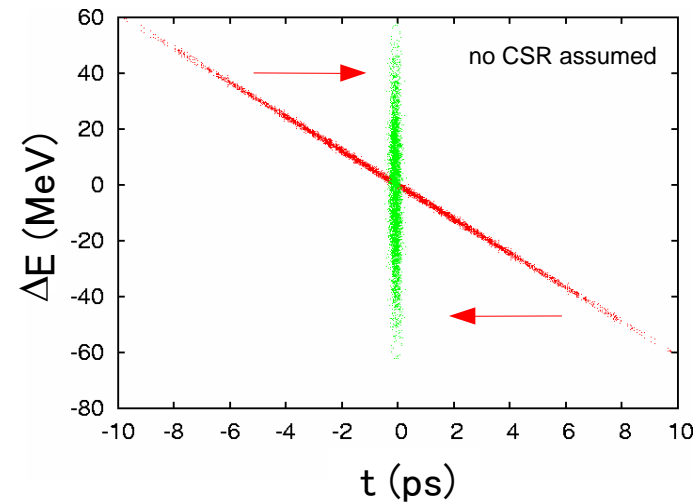
Triple Bend Achromat

$$\rho = 25\text{m}, \theta = 3 + 6 + 3 = 12\text{deg.}$$

$$R_{56} = 2\text{ cm / cell}$$



Twiss parameters--input: TBA12.ele lattice: TBA12.lte



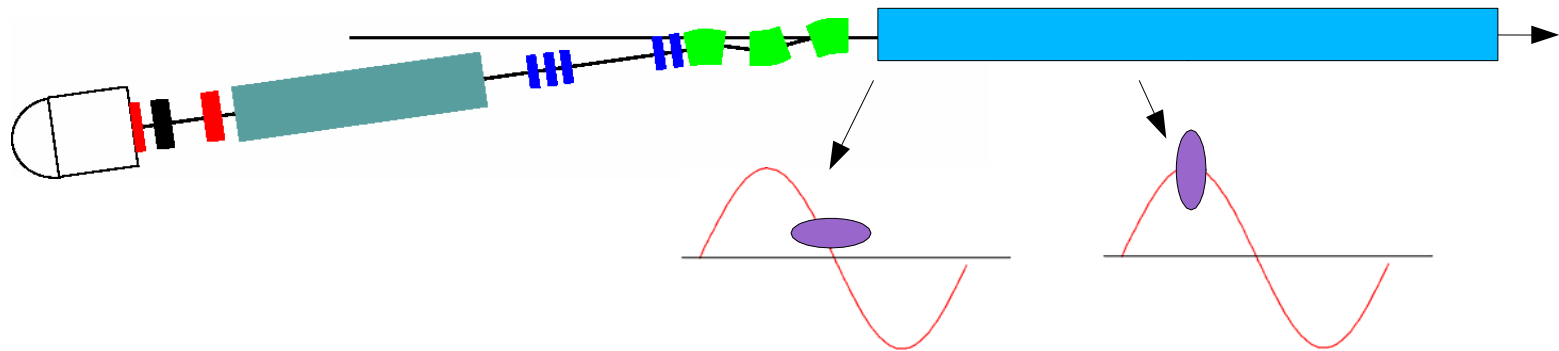
TBAセル(12度) × 15 = 半周 $\sigma_t = 3\text{ ps} \rightarrow 100\text{ fs}$

適切な六極磁場を与えれば、理想的な圧縮(二次項を消せる)

ただし、エネルギー広がり大きい $\sigma_E / E = 0.34\%$

主加速器の初段部における速度集群

速度集群 (velocity bunching) = 電子に速度差を与えてバンチ圧縮する方法



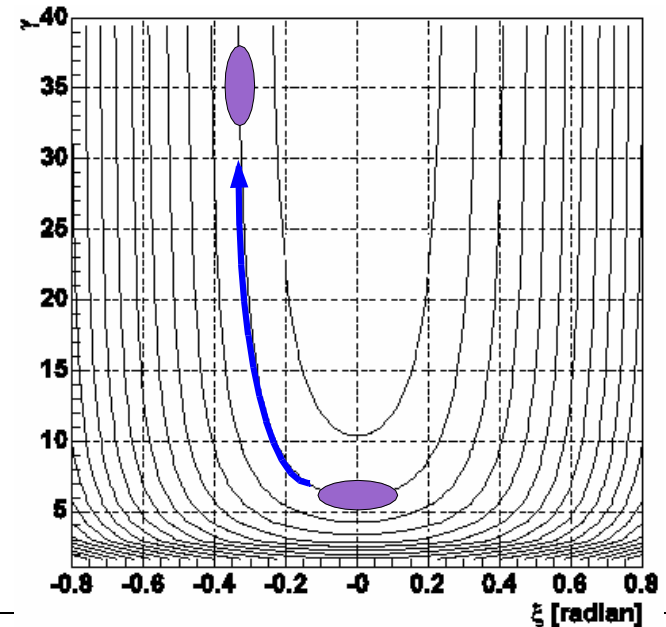
周回軌道における磁気圧縮との比較

最終のエネルギー広がり

— 速度集群が有利

最短のバンチ長

— 磁気圧縮が有利 (2次項の補正)

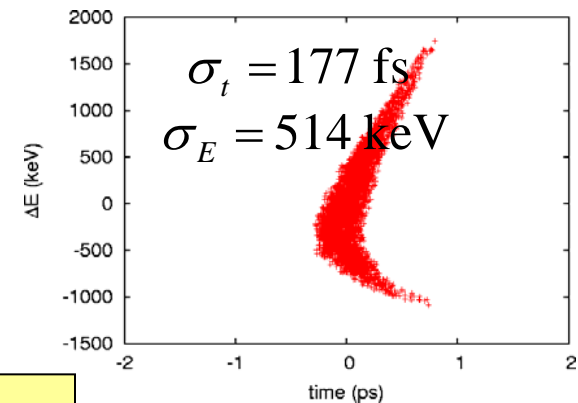
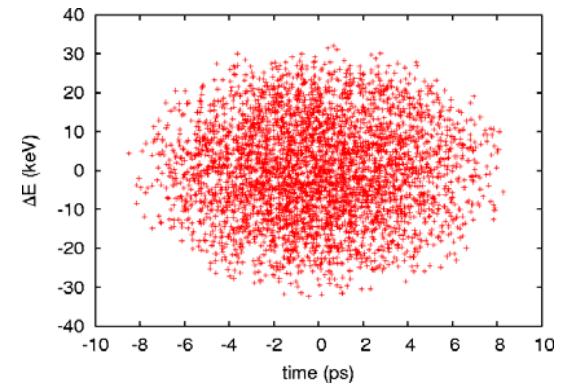
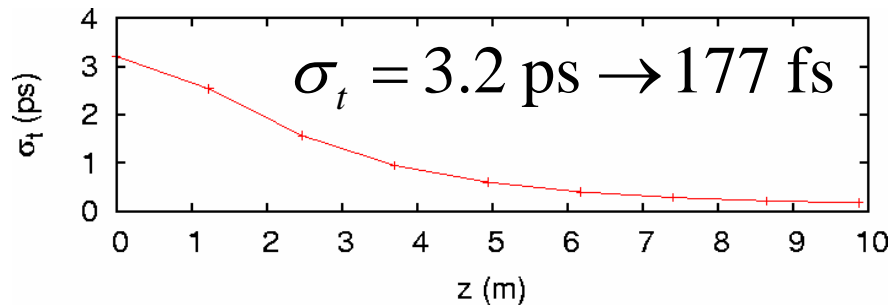
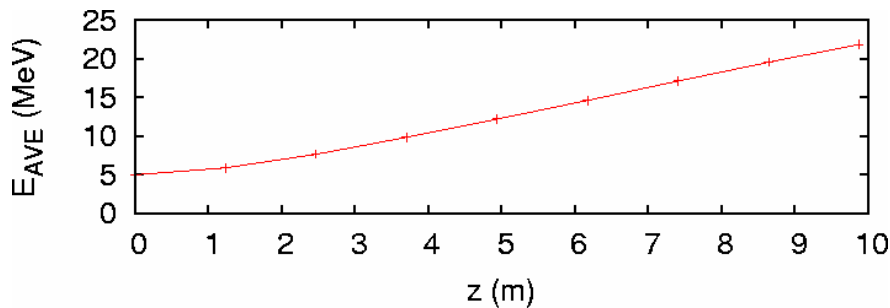


H. Iijima, R. Hajima
Nucl. Instr. Meth. A557, 213-215 (2006).

ERL入射器における速度集群の計算例

初期パラメータ: 5 MeV, 3.2 ps, $\sigma_E = 12.5$ keV, 77 pC, $\epsilon_n = 1$ mm-mrad

Eacc=8.2 MV/m TESLA 9-cell x 8



速度集群により177fsまで圧縮可能
6GeV 加速後の最終のエネルギー広がり 0.01%

← 磁気圧縮より
1桁小さい