

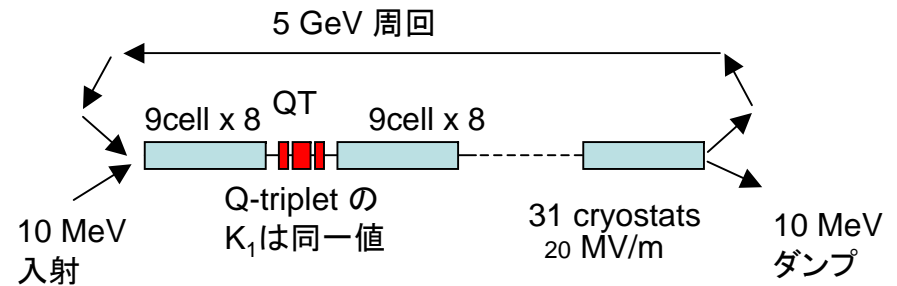
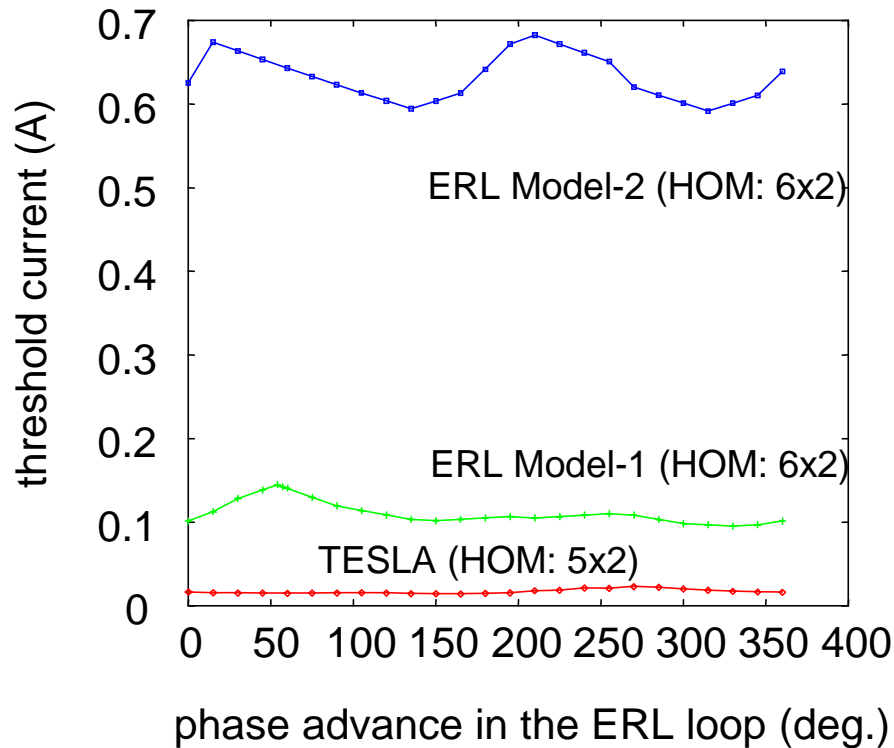


電子銃シミュレーションについて、  
および  
HOM randomization の効果

羽島 良一  
日本原子力研究開発機構  
2007年1月19日

# HOM randomization の効果 (1)

周回のベータatron位相進みと閾値電流 (BI)



入射エネルギー  $E_{inj} = 10 \text{ MeV}$

周回エネルギー  $E_{loop} = 5 \text{ GeV}$

リニアックを含めた周長  $L = 1466.1 \text{ m}$  (RF x 6357.5)

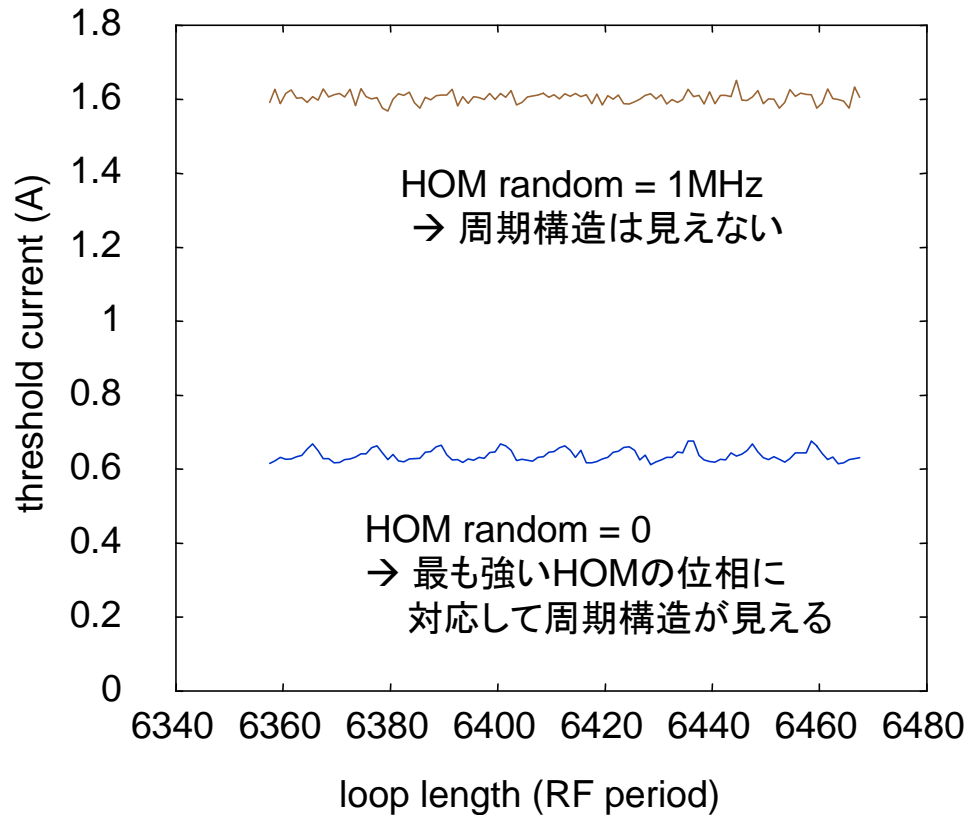
加速勾配  $E_{acc} = 20 \text{ MV/m}$

収束磁石 QT  $K_1 = 2 \text{ m}^{-2}$  (BI)

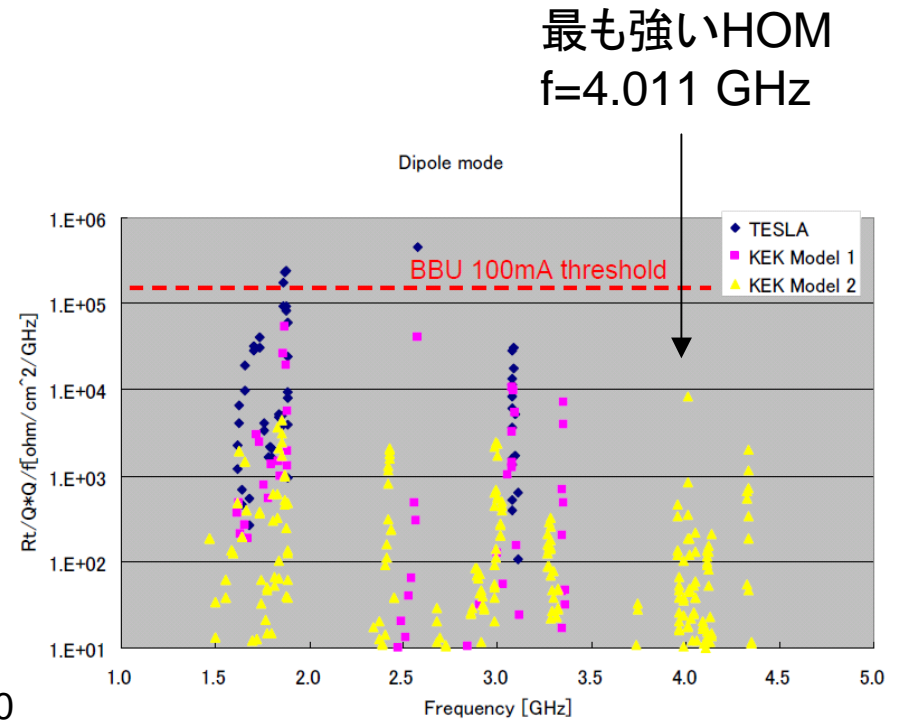
$K_1 = \text{最適化}$  (BBU-R)

# HOM randomization の効果 (2)

周長と閾値電流 (BBU-R)

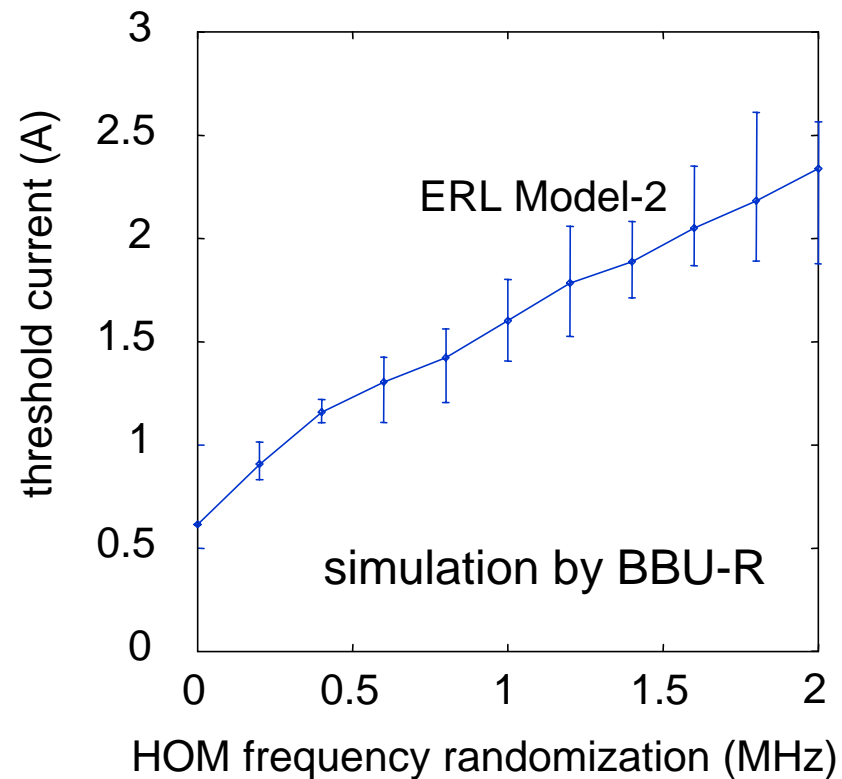
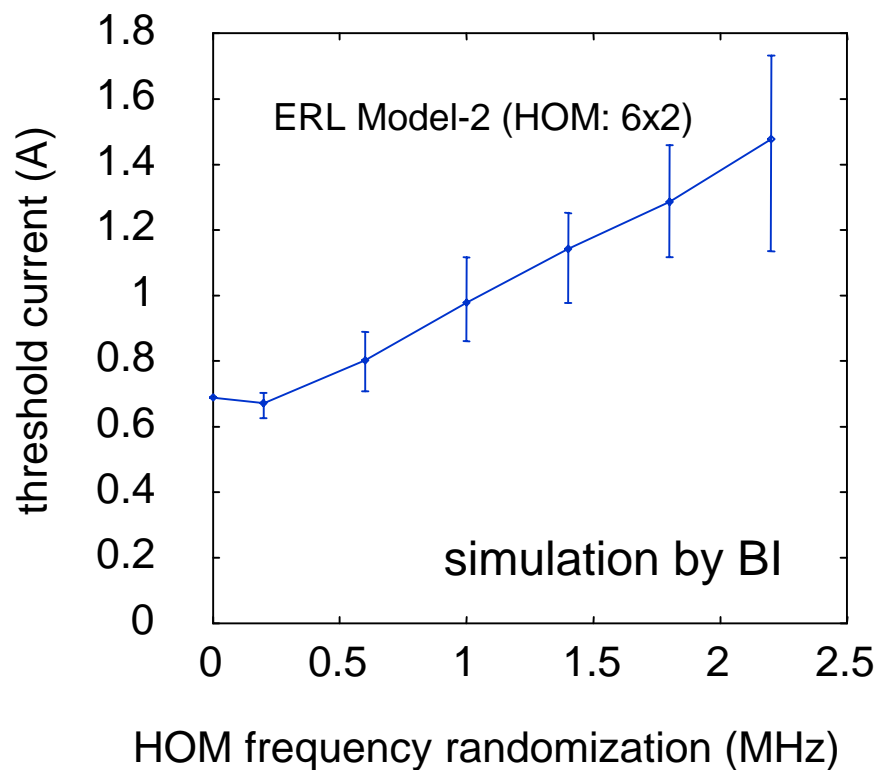


12周期/1.3GHz = 37周期/4.011GHz



# HOM randomization の効果 (3)

HOM周波数の分布は正規分布を仮定  
乱数の初期値を変えながら10回計算し、最大、最小、平均をプロット



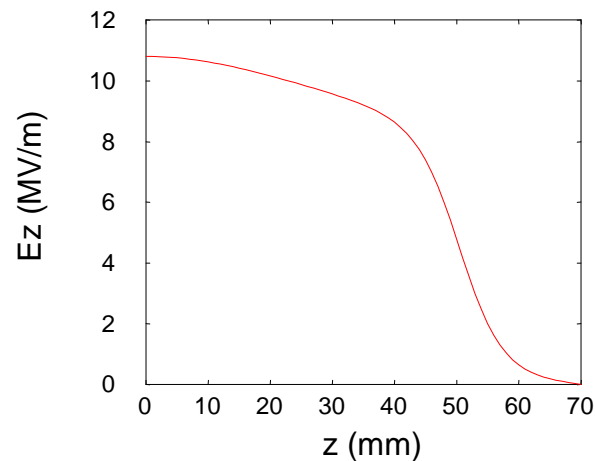
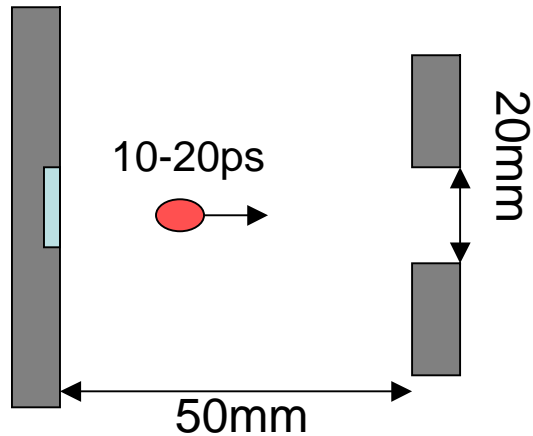
# 電子銃シミュレーション

これまでの高輝度電子銃(入射器)と異なる

- 多数パラメータを含んだ最適化計算
- より高精度の計算(0.1mm-mrad)
- 複雑な物理現象を考慮した計算

- 小さなエミッタンス ( $\varepsilon_n \sim 0.1\text{mm-mrad}$ )  
カソードモデル=光電子生成過程、表面における空間電荷など  
高精度の計算=粒子数、メッシュ数を増やす(?)
- 合流部に偏向磁石を含む  
CSR、非慣性軌道の空間電荷効果
- 大きな平均電流 ( $I \sim 100\text{mA}$ , CW)  
イオン捕獲の影響、放射線防護の観点からビームハローの除去

# 光陰極DC電子銃のシミュレーション



より高精度の計算 & 複雑な物理現象を含んだ計算

- 低エネルギー部での空間電荷効果
- 光陰極のモデル
- イオン捕獲 (CW 運転に特有の現象)

容易に拡張できるシミュレーションコード(自作が望ましい)

# PASTEL – PArticle tracking SimulaTor for Electron Linac



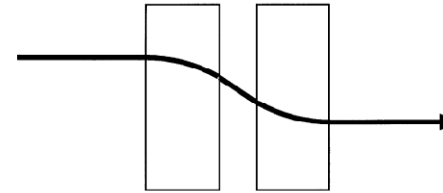
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 429 (1999) 315–319



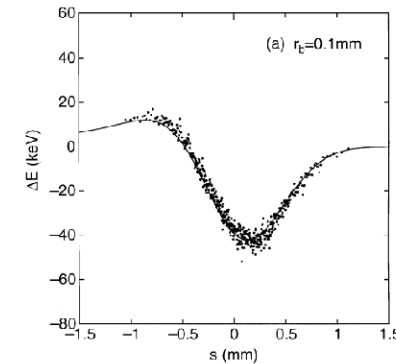
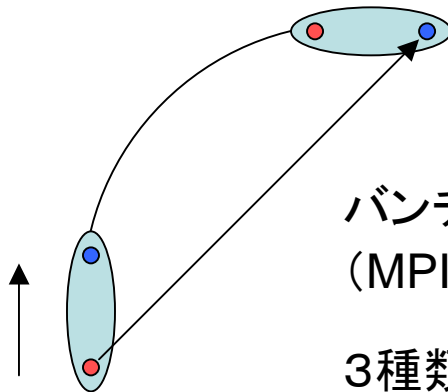
Numerical analysis of shielded coherent radiation and noninertial space-charge force with 3-D particle tracking

Ryoichi Hajima\*, Eisuke Ikeno

Department of Quantum Engineering and Systems Science, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan



CSR = radiative tail-to-head interaction



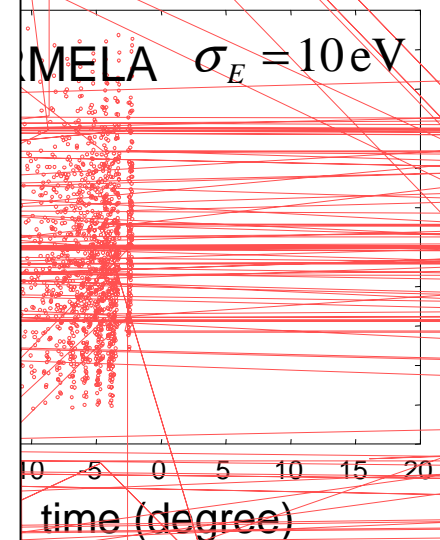
バンチ圧縮器におけるCSR効果を調べるために作成 (1998)  
(MPIを使った並列化の組み込み)

3種類の空間電荷ルーチン  
リング (PARMELA SCHEFF)、点電荷、線分電荷

DC電子銃の計算ができるように拡張 (2006)

(保存)

” となるはず

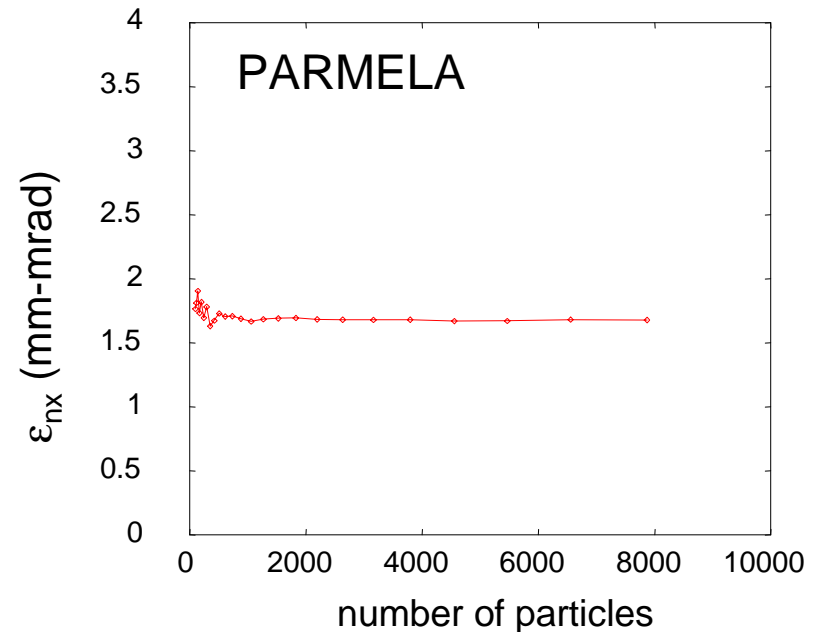
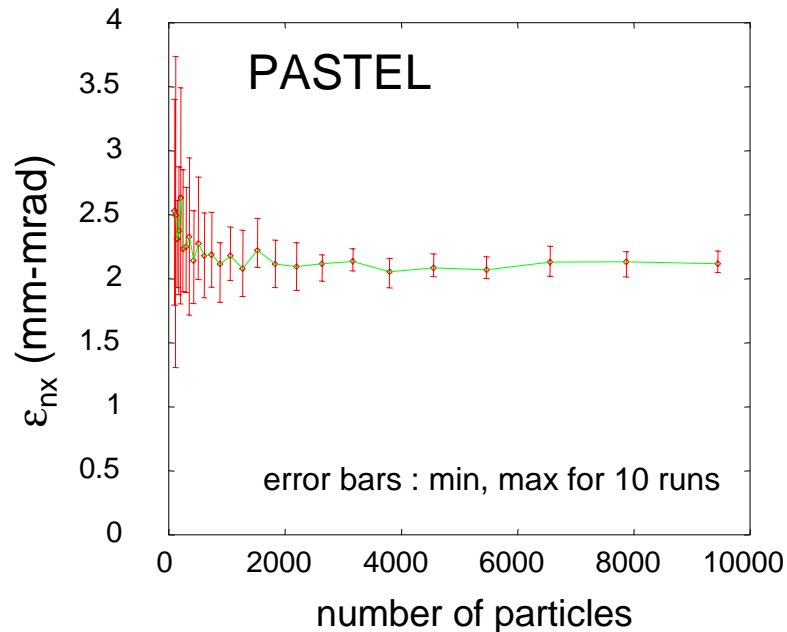


エネルギー広がり $10^{-5}$  → 積分誤差 (時間を独立変数にとっているため誤差が大きい?)  
縞模様が見える → 積分誤差? 初期分布の不具合?  
下流での不安定性の種となるので、解決しておかねばならない。



# 有限の粒子数に起因する人工的なノイズ

アノード下流20cmにおけるエミッタンス(77-pCバンチ、空間電荷あり、ソレノイドなし)



- 粒子生成時の乱数の初期値によりエミッタンスが変わる。
- 粒子が少ないときに大きなバラつき (統計に起因)

- 計算ごとに再現 = 乱数を使っていない
- 粒子数~100でもほぼ同様の結果

# PARMELAにおける粒子生成ルーチン

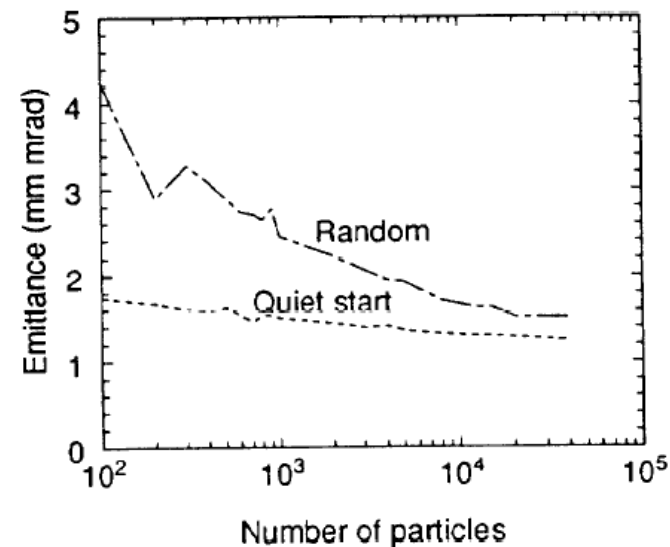
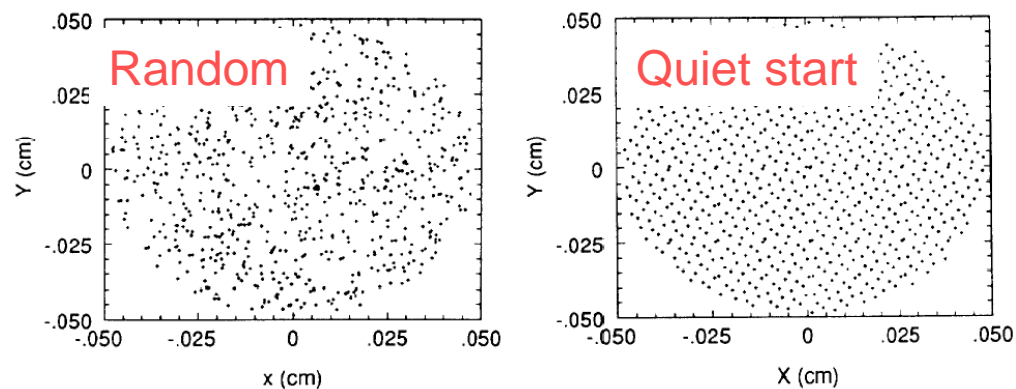
PARMELA manual (type 9 INPUT = Gaussian distribution)

Then the routine generates a series of numbers called the Hammersley's sequence. ["Modified Parmela particle input routine," RLS:05-96, October 22, 1996.] describes the effect of the Quiet start routine *Type 9 INPUT* lines.

PAC-1993

Quiet Start and Autotasking  
for PARMELA

J. Gonichon, S. C. Chen, L. C-L. Lin, R. J. Temkin,  
Plasma Fusion Center  
MIT



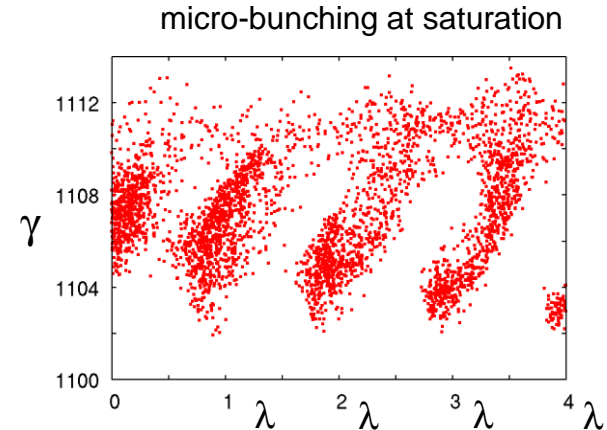
Quiet start = Hammersley's sequence

# FELシミュレーションにおける“Quiet start”

FEL “shot-noise” から成長する不安定性現象

shot-noise = synchrotron radiation

$$\frac{d^2 I}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{3\pi^2 c} \left(\frac{\omega\rho}{c}\right)^2 \left(\frac{1}{\gamma^2} + \theta^2\right) \left[ K_{2/3}^2(\xi) + \frac{\theta^2}{(1/\gamma^2) + \theta^2} K_{1/3}^2(\xi) \right]$$



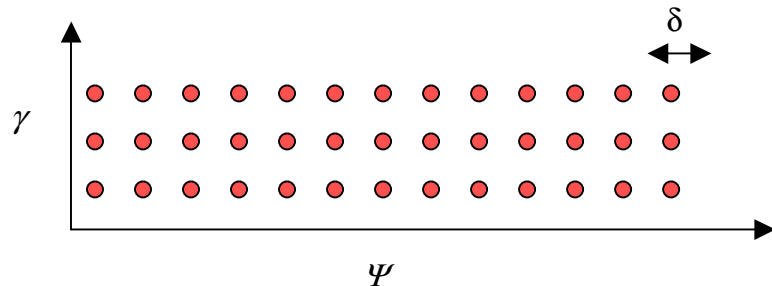
マクロ粒子を使うとき shot-noise を過大評価してしまう可能性がある。

## “quiet start” の二つの方法

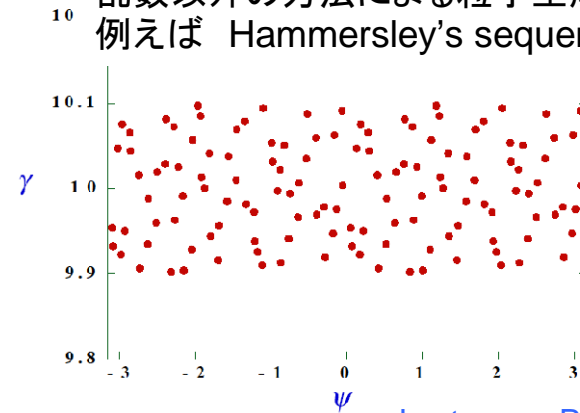
規則的な粒子生成 + 微小揺らぎ

$$\delta^2 \approx 3n/N$$

n: # of macro particles  
N: # of electrons



乱数以外の方法による粒子生成  
例えば Hammersley's sequence

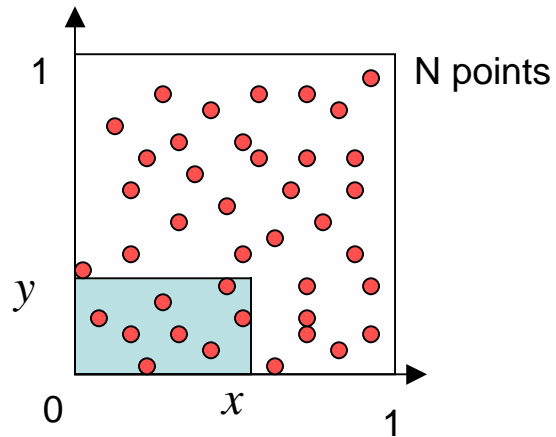


C. Penman, B.W.J. McNeil, Opt. Comm. 90 (1992) 82

ERL,ビームダイナミクスWG、2007年1月19日

Lecture on Physics of FEL,  
D. Whittum, Stanford (1996)

# Low discrepancy sequence (LDS)



discrepancy for a 2-D system

$$D_N = \sup_{0 \leq x, y \leq 1} \left| \frac{\#(x, y)}{N} - xy \right|$$

low-discrepancy sequences

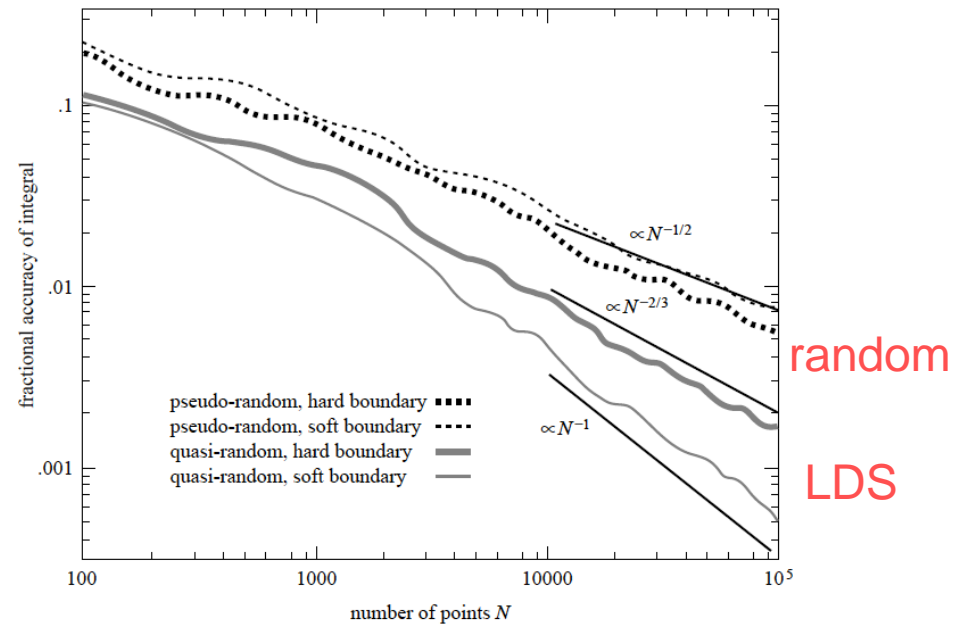
- Hammersley's sequence
- Halton's sequence
- Sobol's sequence
- Faure's sequence
- .....

Monte Carlo integration

$$\int_V f dv = \frac{1}{N} \sum f(x_i)$$

314

Chapter 7. Random Numbers

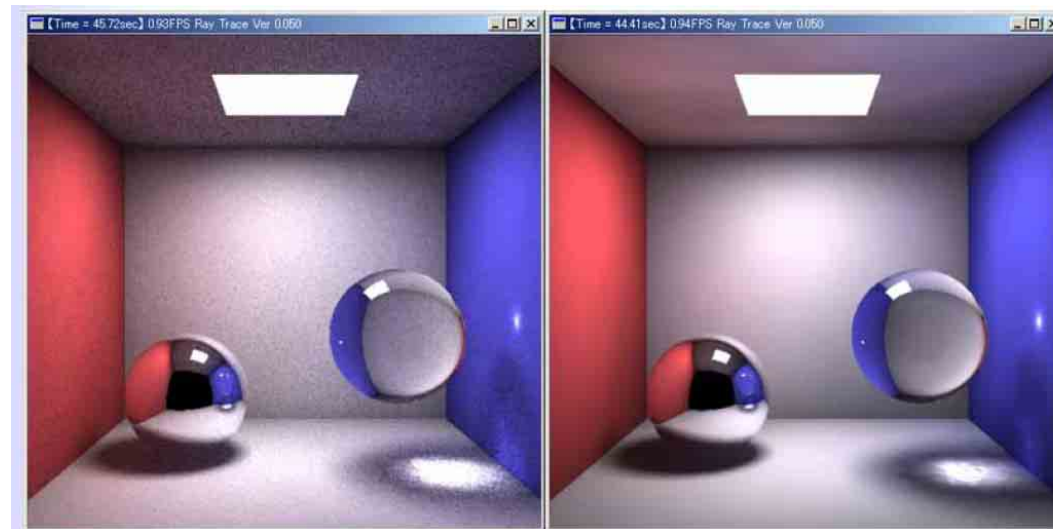


Numerical Recipes in C, 2nd ed.

# LDS in various applications

LDS is used in various applications nowadays.

- financial analysis;  
Monte Carlo simulations of trends in bond markets (derivatives)
- computer graphics; ray tracing

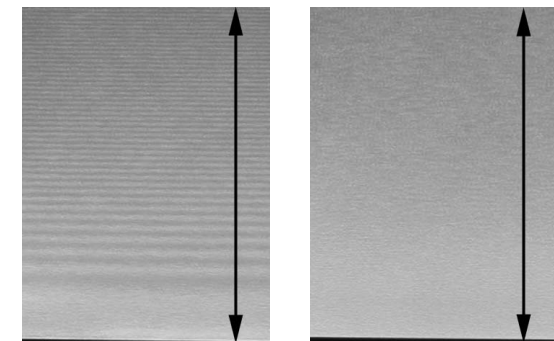


モンテカルロ法

LDSを用いた準モンテカルロ法

東北大学大学院 情報科学研究科  
システム情報科学専攻 徳山研究室所属  
博士課程前期1年 関野剛永

- Moiré-free LCD panel

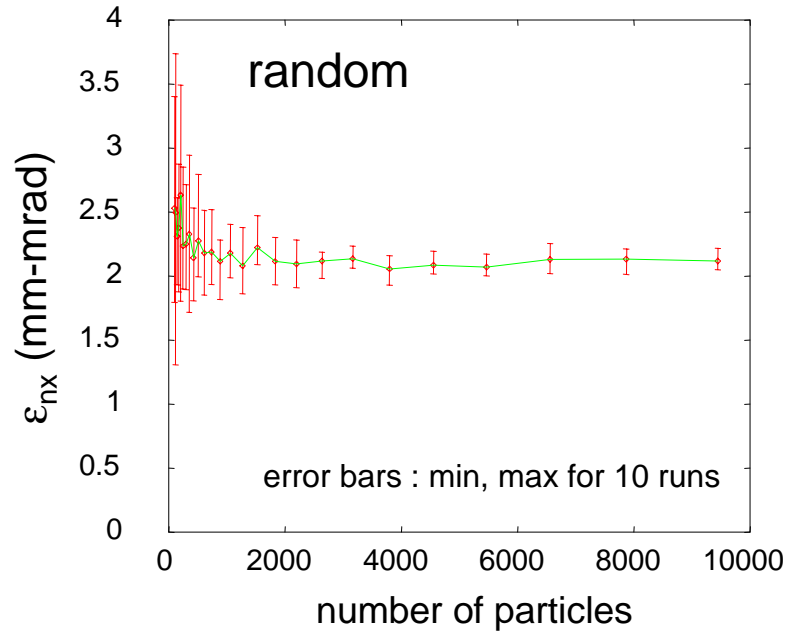


IBM ThinkPad  
A30/A30p

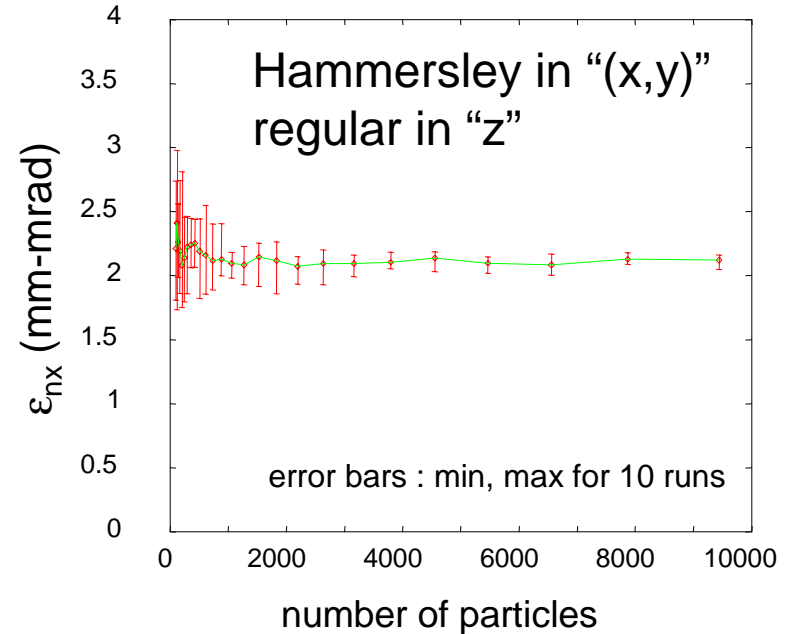


[T. Idé](#), IBM Tokyo Research Lab

# PASTEL Simulations with LDS

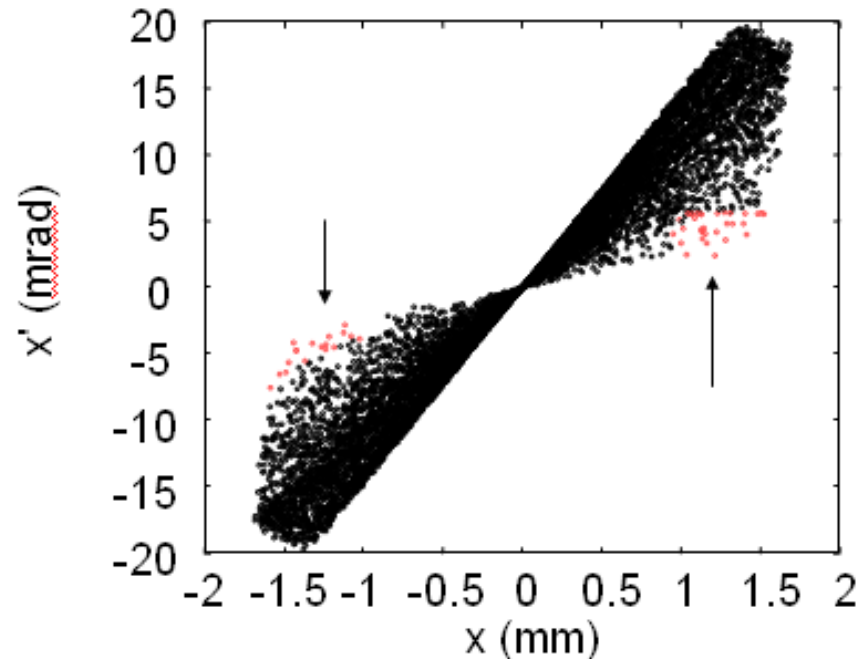


- (1) generation particles  
with random Gaussian in (x, y)
- (2) random Gaussian in "z"



- (1) generation particles  
in (x, y) with Hammersley's sequence
- (2) random shuffling of the particles
- (3) regular Gaussian distribution in "z"

# ノイズは除去すべきものなのか？



一部の粒子が”コア”から外れて  
エミッタンス増大に寄与する  
(粒子の初期分布に依存)

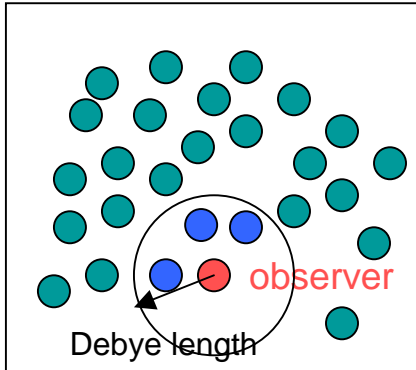
- 除去すべき数値ノイズ？
- ビームハローに関連する  
意味のある現象？

(放射線防護の観点からERLsの  
周回ビーム損失は $10^{-7}$ 以下が  
求められる。ビームハローの生成と  
除去は重要な研究対象。)

FELシミュレーションでは、最大成長率をもつ不安定性が既知であり、  
ノイズは、この不安定性の初期値として定量的な議論が可能

高輝度電子ビームの場合は？

# Debye length for an electron beam



$$\text{force} = (\text{smooth force}) + (\text{collisional force})$$

完全電離プラズマと同様に、電子ビームにおいて「デバイ長」を定義する

デバイ長の内側の粒子 → 衝突力を与える

デバイ長の外側の粒子 → 空間的に滑らかな力を与える

M. Reiser, "theory and design of charged particle beams"

## 電子ビームにおけるデバイ長

$$\ddot{x} = \omega_p x$$

$$\tilde{v}_x = \sqrt{v_x^2}$$

$$\lambda_D = \frac{\tilde{v}_x}{\omega_p} = \left( \frac{\epsilon_0 \gamma^2 k_B T}{e^2 n} \right)^{1/2}$$

衝突力に起因する現象

縦方向、横方向の  
電子温度の緩和現象  
(低エネルギー)

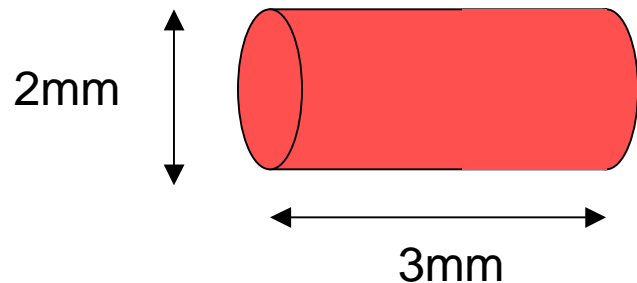
バンチ内散乱  
(高エネルギー蓄積リング)



# 高輝度電子ビームにおけるデバイ長

$$\lambda_D = \frac{\tilde{v}_x}{\omega_p} = \left( \frac{\epsilon_0 \gamma^2 k_B T}{e^2 n} \right)^{1/2} = \left( \frac{\gamma^2 k_B T}{4\pi r_c n m c^2} \right)^{1/2}$$

NEA photo-cathode + DC gun  $\rightarrow k_B T \sim 35\text{meV}$



$$q=100\text{pC}, \gamma=2$$

$$n=6 \times 10^{16}/\text{m}^3$$

$$\lambda_D = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$$

(デバイ長)

$$l_p = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$$

(電子間の平均距離)

$N_D$ : デバイ長を半径とする球内に含まれる電子数

$N_D \gg 1 \rightarrow$  空間的に滑らかな電荷分布と外力を仮定できる

$N_D \leq 1 \rightarrow$  少数の近接電子による瞬間的な反発(衝突)を考慮しなければならない

上の例は近接電子による衝突力を無視できないパラメータ領域にある

-- ビーム温度(熱エミッタンス)が衝突で変化する可能性を詳しく調べる必要性。

## まとめ

- ERL放射光源のための電子銃シミュレーションに特有の課題として
  - ✓ 複数パラメータの最適化
  - ✓ 小さな熱エミッタンス(衝突力が無視できない)
  - ✓ カソードモデル、イオン捕獲の影響、ビームハロー生成のメカニズム
- これら物理現象を取り込み、かつ、高い精度でシミュレーション可能なコードが求められる → 自作コードの拡張
- 多数粒子、多様な物理現象の取り込み = 計算時間の増大  
→ おそらく許容範囲

国内研究者の協力のもと、複数のシミュレーションコードのベンチマークを実施する予定(DC電子銃、RF電子銃)

水野(SPring-8)、楊(阪大)、増田(京大)、濱(東北大)、山本(秋田高専)他