

3次元粒子コードの諸問題について

(カソード上でのイメージチャージの扱いについて)

(財)高輝度光科学研究センター (SPring-8)
水野 明彦

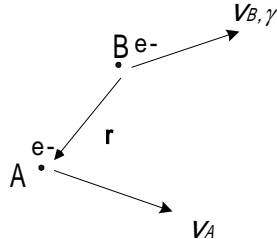
Contents

- SPring-8での3次元粒子シミュレーションコードの紹介
- コードの問題点
- 問題点の原因は？
 - freespaceでのビームサイズ
 - 実験とのエミッタンスの違い
 - カソードでのイメージチャージの計算
- まとめにならないまとめ

SPring-8 RFgun

- ・3次元である。
任意の非対称性、(cavity、入射レーザープロファイル等)を計算できる。
- ・マクロ粒子を用いて、各粒子の相互作用を全て計算。

粒子の相互作用



$$\mathbf{E}_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\gamma^2} \frac{-e\mathbf{r}}{\left[|\mathbf{r}|^2 - \frac{|\mathbf{v}_B \times \mathbf{r}|^2}{c^2}\right]^{3/2}} \quad \mathbf{B}_A = \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_B \times \mathbf{E}_A$$

$$\mathbf{F}_A = -e(\mathbf{E}_A + \mathbf{v}_A \times \mathbf{B}_A)$$

運動方程式の扱い

$$-e(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E}) = \frac{d\mathbf{P}}{dt} = m_0 \frac{d(\gamma\mathbf{v})}{dt} \longrightarrow \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{e}{\gamma m_0} \left(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E} - \frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{E})}{c^2} \mathbf{v} \right)$$

Runge-Kutta method

この仮定は重要！！

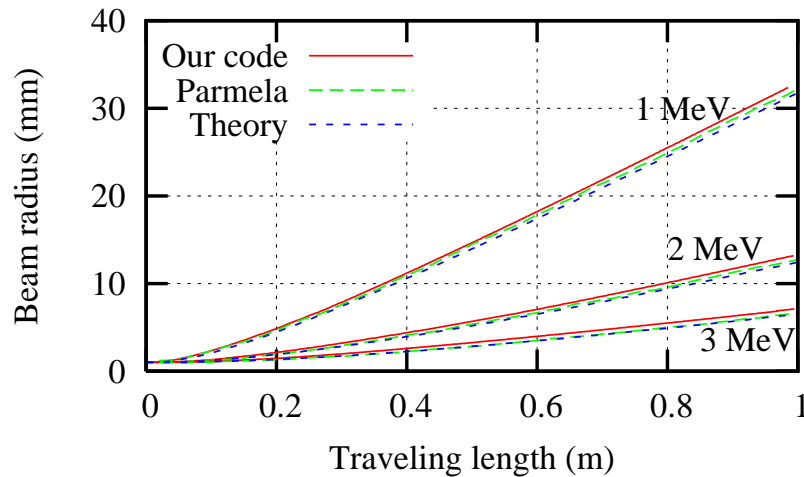
計算上の仮定は、2点のみ。

- ・粒子Bは、等速直線運動をしている。
- ・粒子はマクロ電子である。

仮定が少ないから
精度がよいであろう。

コードの精度について

フリースペースのビームサイズについては、
精度が良さそう。



初期条件

ビーム半径: 1.0 mm

バンチ長: 6.0 mm

粒子の分布:

時間方向、径方向共にuniform

Theory (beam envelop equation)

改良版

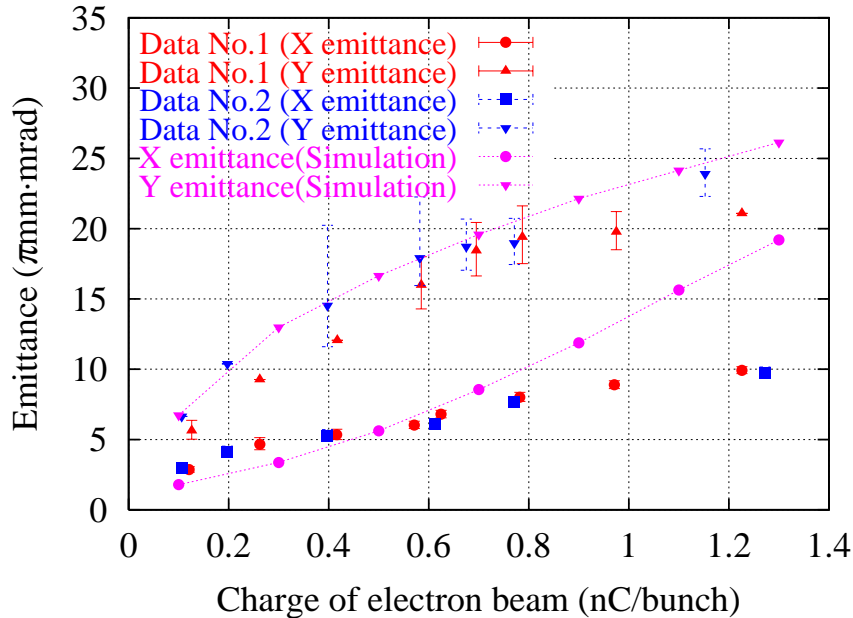
$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{eQ}{4\pi\epsilon_0 m_0 C^2 \gamma^3 \beta^2 \cdot r} \frac{1}{\sqrt{\frac{r^2}{4} + \frac{r^2}{\gamma^2}}}$$

Lawson's equation

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{eI}{2\pi\epsilon_0 m_0 C^3 \gamma^3 \beta^3 \cdot r}$$



しかし、実験結果とは一致しない部分がある。



Parameters (for both experiment & our simulation)

- Maximum field on the cathode 135 MV/m
- Initial RF phase 85 degree
- First solenoid coil 1560 Gauss
- Second solenoid coil 780 Gauss
- Laser incident angle 66 degrees
- Laser spot distribution Gaussian like figure
- Laser spot radius 0.3 mm (1σ)
- Laser temporal length 5 ps (FWHM)

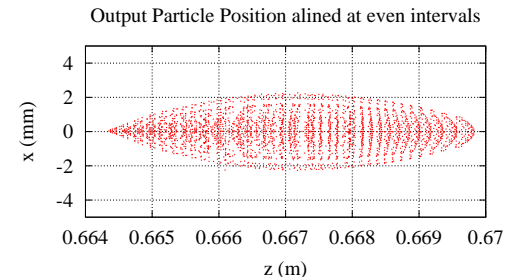
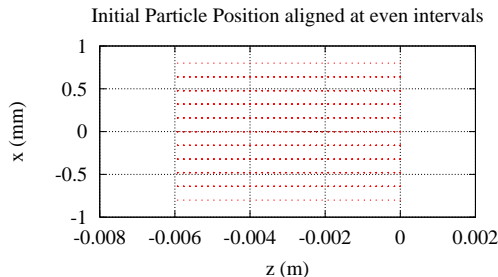
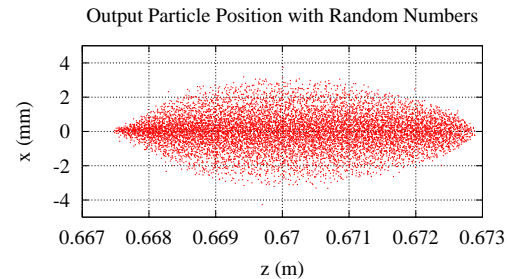
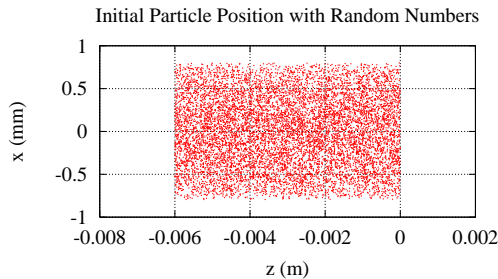
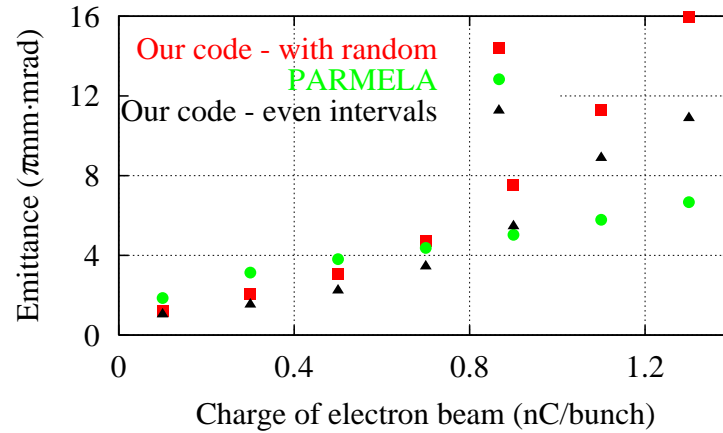
- 概ね0.8nC/bunch以下では計算と実験は一致？
- レーザー斜め入射の効果は説明できている。
- 0.8nC/bunch以上では、一致しているとは言いがたい。
- エミッタンスのCharge量依存性が、実験と計算で若干違う。

SPring-8 RFGun

乱数で初期位置を与えるとノイズが増えるので、規則正しく初期位置を与えたほうが良い？



絶対値は小さくなるが、電荷量依存性等は変わらない。



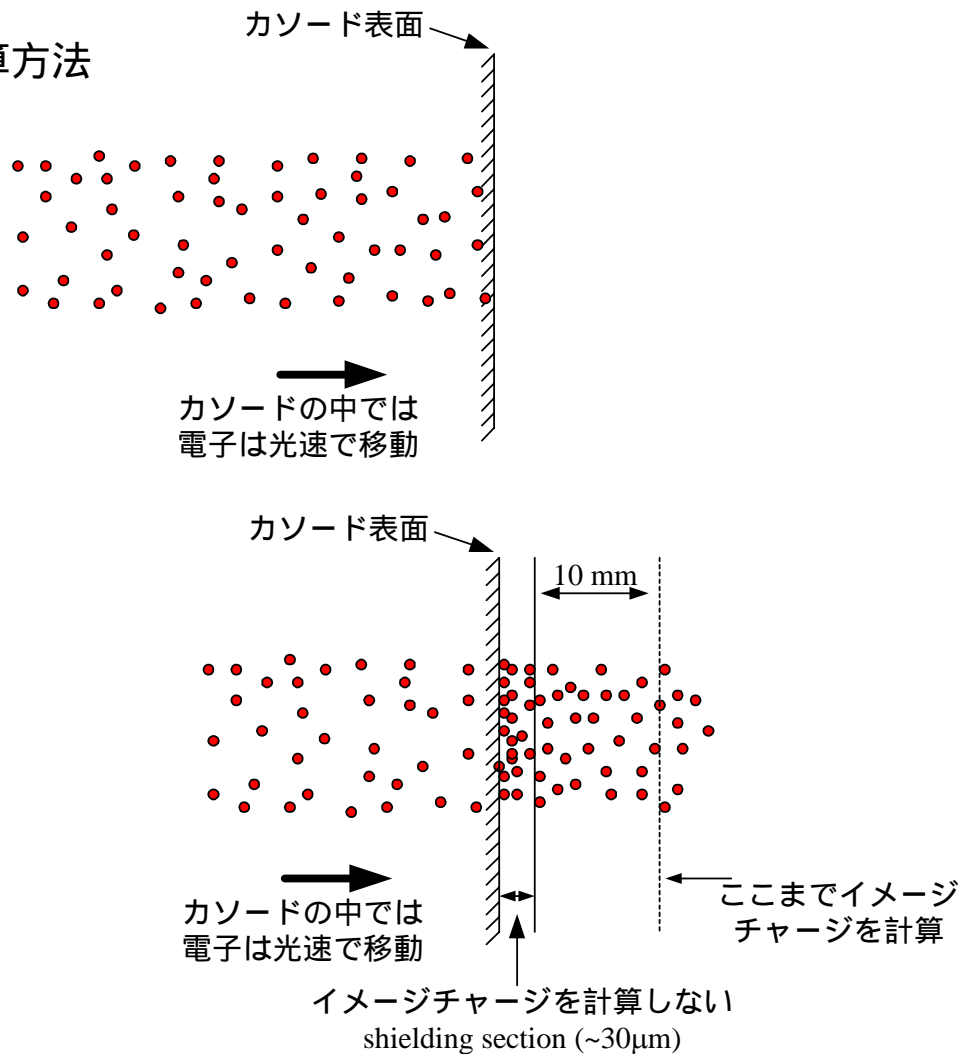
- ・フリースペースでは？ **ビームサイズ**はパルメラ、および理論式と一致。
この部分では、粒子数、タイムステップ等の問題は少ないだろう。
- ・しかし、実験とシミュレーションでのエミッタンスは、値と同時に電荷量依存性も異なる。
乱数で粒子位置を設定したことによるノイズとも関係なさそう。



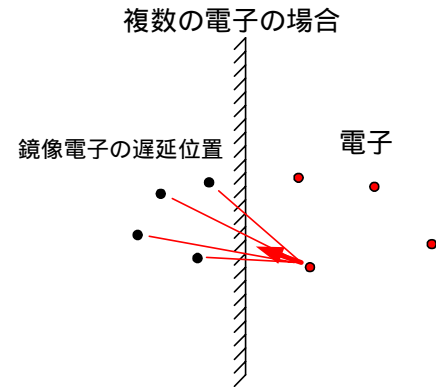
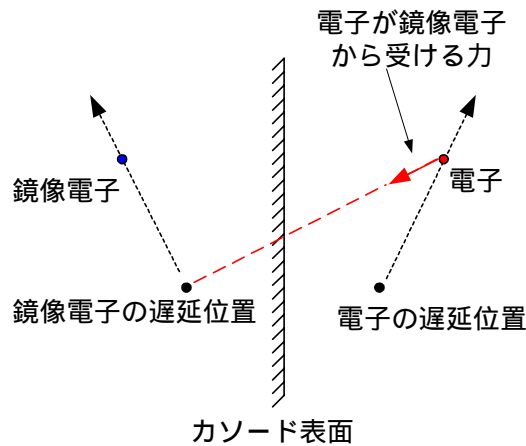
その他の原因がありそう

- 電磁場の問題？、ウェークの問題？ 寄与は小さいだろう。
- ・電磁場分布は、MAFIA、ポアソン等を使用しているが、正確に計算できるであろう。
 - ・電磁場内のトラッキングは空間電荷効果による電磁場内の計算と変わらない。
 - ・空洞のウェークは計算していない。
が、カソードのイメージチャージの問題の方がクリティカルである。

イメージチャージの計算方法



イメージチャージの計算方法



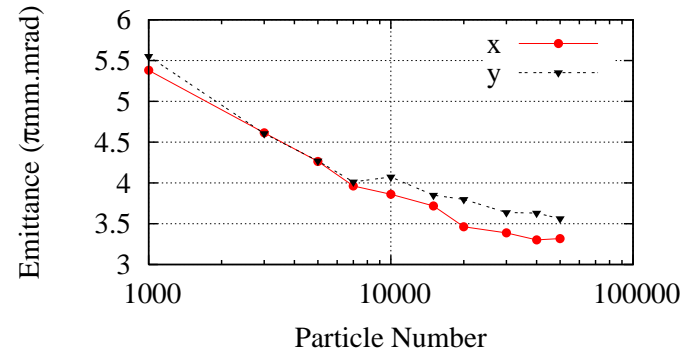
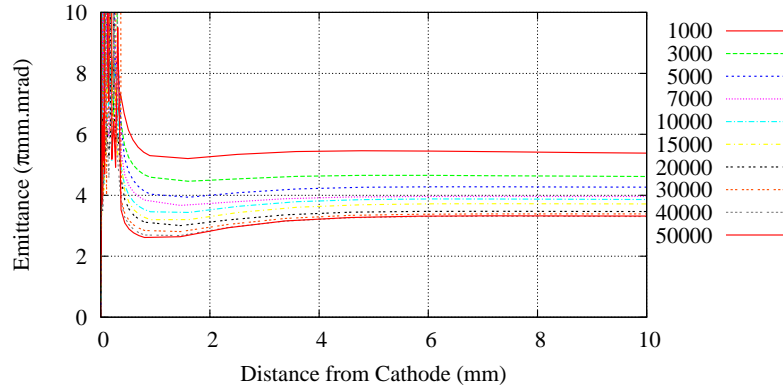
イメージチャージによって、初期エミッタンスは低減される。

- ・ shield sectionの幅は適当か？
- ・ イメージチャージの計算にも遅延ポテンシャルを用いている。
- ・ イメージチャージが等速直線運動することを仮定している。(是か非か？)
- ・ イメージチャージの遅延位置が計算されたとしても、その時間に実粒子が存在しているのか？

SPring-8 RFgun

カソード直後のエミッタンス

Charge : 1 nC/bunch
 Beam radius : 16 mm uniform
 Bunch length : 20 ps



- ・通常は粒子数5000個で計算を行っているが、数万個まで収束しない。
- ・50000個でカソードから10mmの計算 17時間
- ・例えば、Grape等使えないか？ $v \times r$ のtermがあり、現状困難。

$$\mathbf{E}_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\gamma^2} \frac{-e\mathbf{r}}{\left[|\mathbf{r}|^2 - \frac{|\mathbf{v}_B \times \mathbf{r}|^2}{c^2}\right]^{3/2}}$$

世界レベルでの実験結果では1nCで1 内外の結果が出ているが、この計算では3 止まり。原理的にこれ以上エミッタンスは小さくならない。

→ 何かおかしい？

まとめ

- ・シミュレーションコードの精度の問題を議論した。
- ・可能な最小エミッタンスはカソード付近で決まってしまうが、それにはイメージチャージの計算が大きく影響する。
- ・現状のコードでは、粒子数が足りないが、粒子数を増やすと時間がかかりすぎ、で現状では難しい。
- ・エミッタンスがほぼ収束する粒子数で計算しても、 1 nC で 3 mmmrad 程度にしかない。



イメージチャージ計算方法の再検討必要。

(実験の見地からは)

実験結果と計算が一致しない問題については、実験パラメータの精度良い把握が必要。(バンチ幅、バンチ形状、charge分布等)