

# ERL入射器に求められる性能と その達成へのシナリオ

羽島 良一

日本原子力研究開発機構

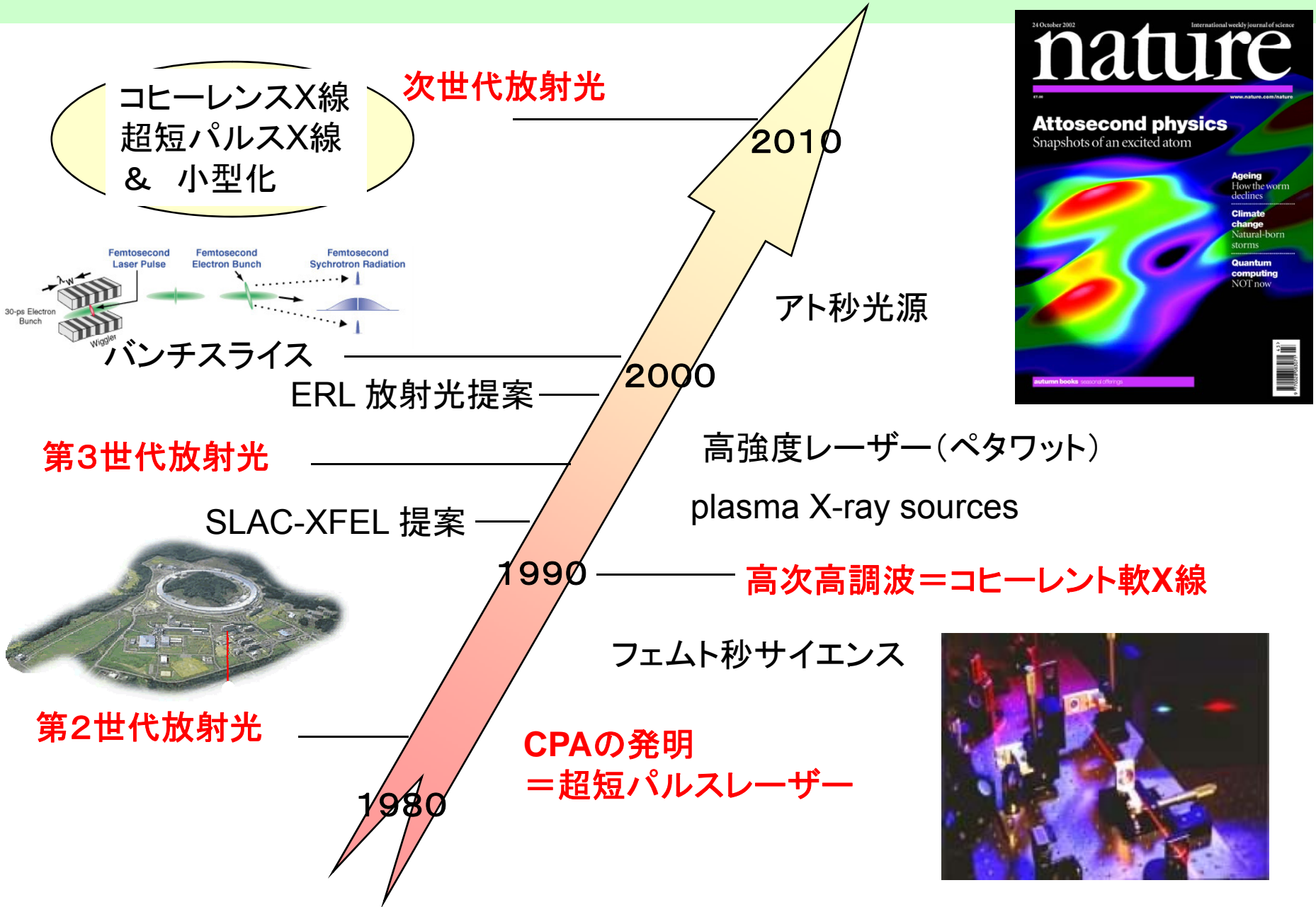
広島大学高輝度電子源検討会

2009年1月22日

# アウトライン

- ERL放射光源に必要な電子ビーム特性(電子銃の性能)
- 初期エミッタンス、エミッタンス増大、エミッタンス補償
- ERL入射器の構成と最適設計
- 所要の電子ビームを得るための研究開発項目

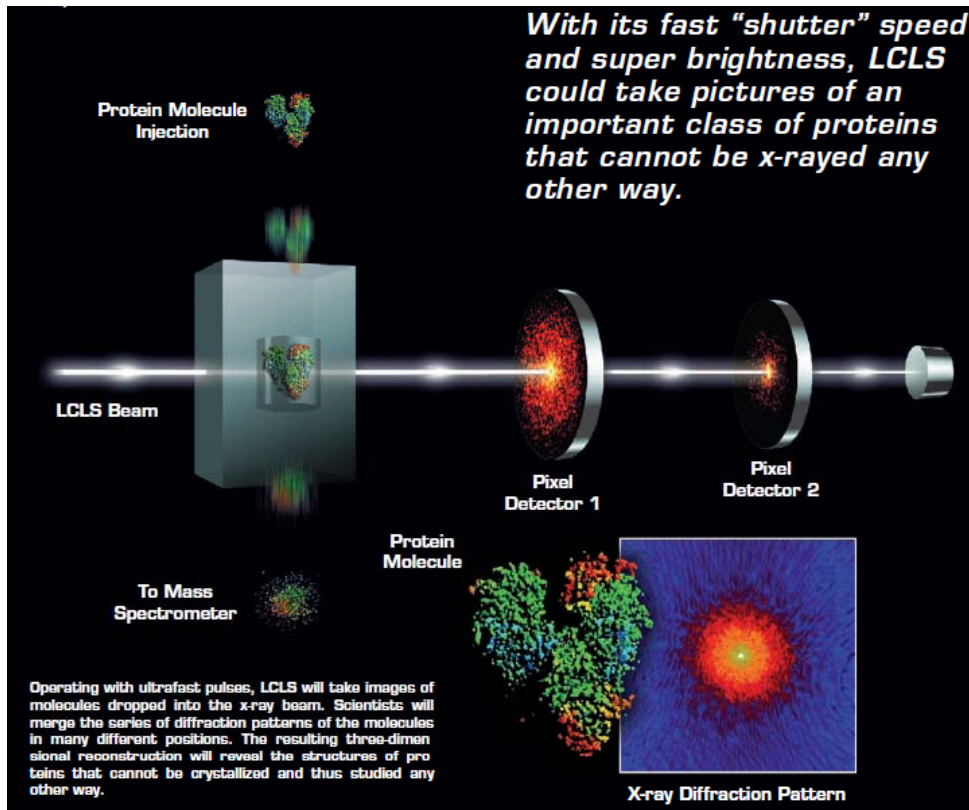
# 放射光、レーザーの進化



# コヒーレントX線の利用

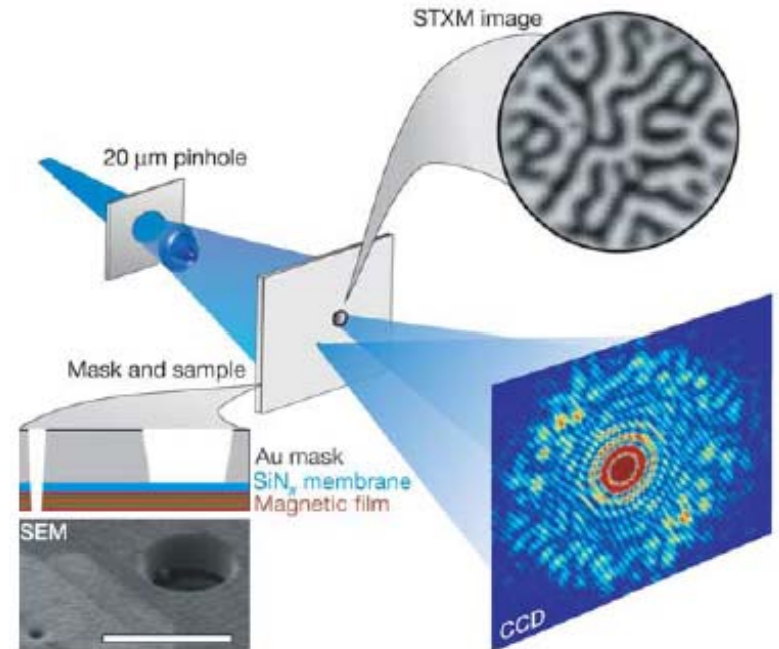
単一分子のイメージング  
結晶を必要としないX線構造解析

LCLS (X線FEL) の利用提案



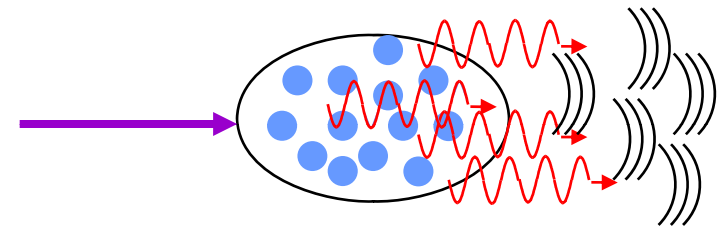
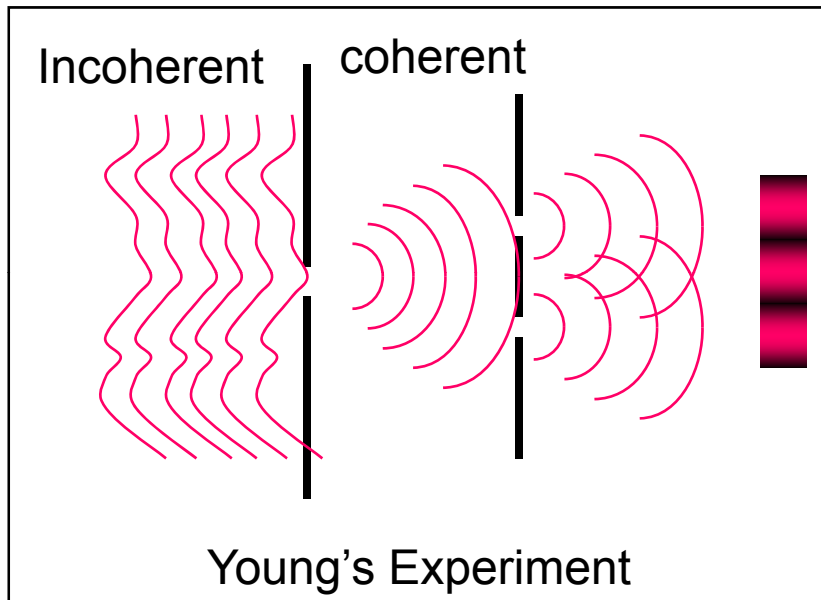
LCLSパンフレットから

コヒーレントX線による  
磁気構造の観察(ホログラフィ)



S. Eisebitt et al.,  
Nature 432, 885 (2004)

# 回折限界ビームによるコヒーレントX線の発生



電子バンチからのアンジュレータ放射

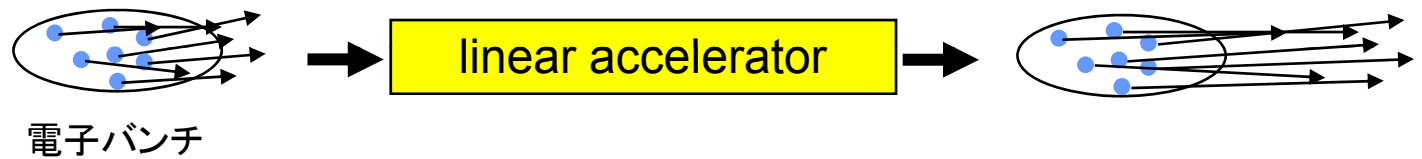
光源が十分に小さければ、スリットで切らなくてもよい。

回折限界条件 = 光自身のもつ発散(波長の関数)

$$\Delta x \Delta \theta = \lambda / 4\pi$$

# ERLで実現可能なエミッタンス

線形加速によるエミッタンスの断熱収縮



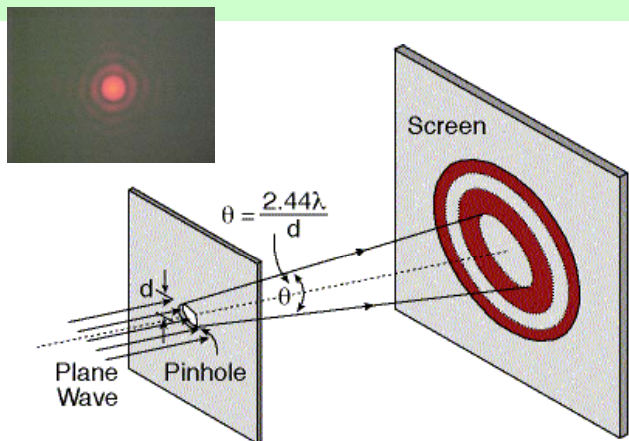
電子源の規格化エミッタンス

$$\varepsilon_n = 0.1 \text{ mm} - \text{mrad} \xrightarrow[\substack{5 \text{ GeV 加速} \\ \gamma \sim 10^4}]{\text{ }} \frac{\varepsilon_n}{\gamma} = 10 \text{ pm} - \text{rad}$$

↓

10 keV X線の回折限界

# 電子ビームエミッタンスとX線コヒーレンス



光源サイズが十分に小さければ  
光は干渉性(コヒーレンス)を持つ

## 放射光がコヒーレントになる条件

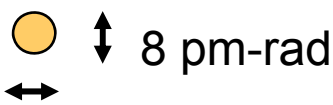
$$\varepsilon < \lambda / 4\pi$$

放射光の回折

1 Å 放射光では  
 $\varepsilon < 8 \text{ pm-rad}$

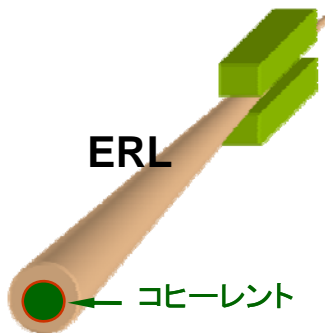
エミッタンス  
= 電子ビームの広がり  
= 光源サイズ

## ERL のエミッタンス

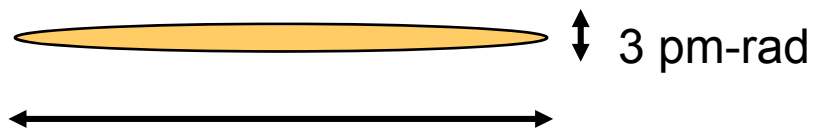


8 pm-rad

エミッタンス増大なし、  
縦横同一エミッタンス

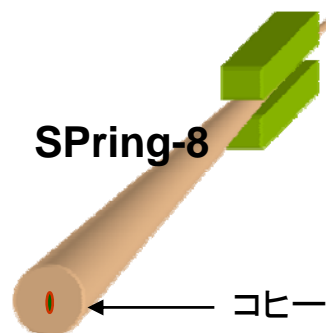


## SPring-8 のエミッタンス



3 nm-rad

多数周回に伴う  
エミッタンス増大



# 共振器型X線自由電子レーザーの提案

完全結晶によるX線のBragg反射を利用した共振器型のX線FELの提案。



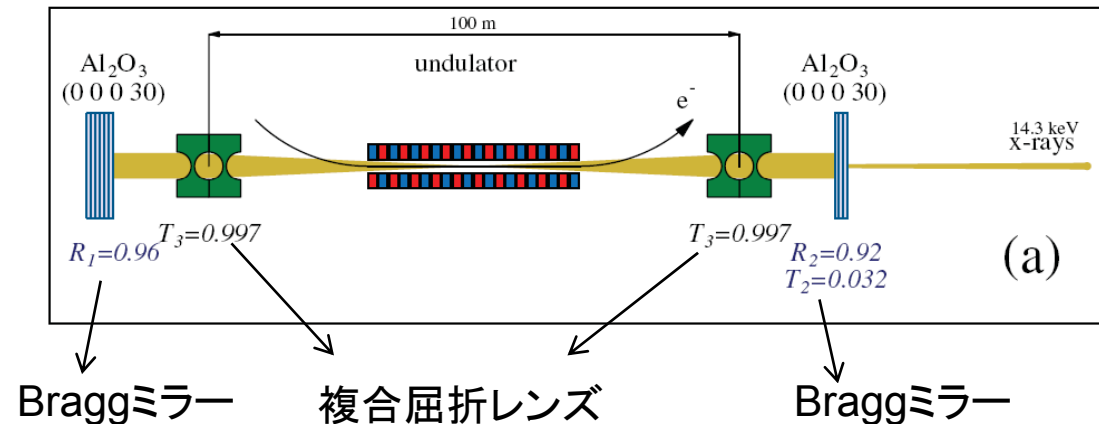
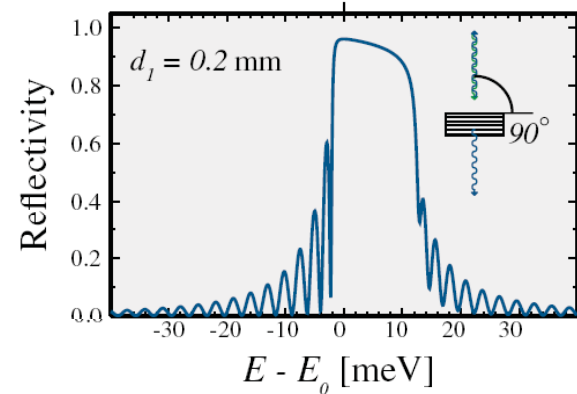
K-J. Kim ら ERL-2007 WS  
PRL 100, 244802 (2008)

SASE とは異なるX線レーザー  
空間・時間コヒーレンスに優れる  
高輝度電子バンチ >1MHz が前提  
ERL 放射光源のオプションとなる



低エミッタンス電子ビーム  
の実現が必須条件

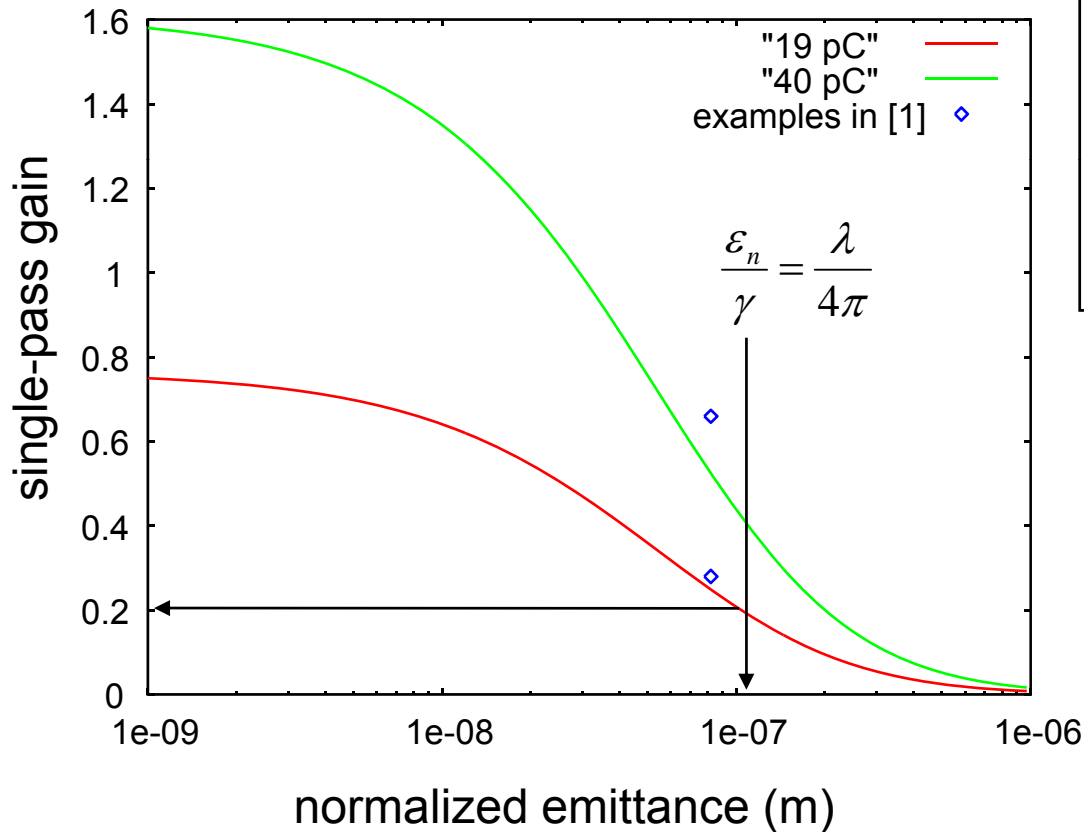
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>によるBragg反射(14.3keV)





# 解析式によるFELゲインの計算

FEL波長 = 1Å



ERL の典型的なパラメータに基づく

$E = 7 \text{ GeV}$

$q = 19/40 \text{ pC}$

$\sigma_t = 2 \text{ ps}$

$\sigma_E/E = 1e-4$

$a = 1, \lambda_u = 1.88 \text{ cm}, N_u = 3000$

$\beta^* = Z_R = 10 \text{ m}$

共振器型FELの発振が可能！

19 pC,  $\varepsilon_n = 0.1 \text{ mm-mrad}$   
 $\rightarrow \text{gain} \sim 20 \%$

完全結晶によるBragg反射  
 を用いれば loss  $\sim 10\%$

loss < gain で発振

[1] K-J. Kim, Frontiers in FEL Physics and Related Topics, Sep. 8-14, 2007, Elba Island, Italy

# コヒーレントX線のための低エミッタンス電子源

規格化エミッタンス 0.1mm-mrad (1 Å放射光の回折限界を満たす条件)

XFEL用フォトカソードRF電子銃より1桁小さい値

大きな挑戦である!

エミッタンスの値 = エミッタンスの初期値 + エミッタンスの増大

電子生成時の熱運動

エミッタンス補償の技術  
増大を抑制できる

熱エミッタンス

$$\varepsilon_{th} = \frac{r_c}{2} \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}$$

カソード半径と温度

$$r_c = 1 \text{ mm}$$

$$kT = 25 \text{ meV}$$

$$\varepsilon_{th} = 0.1 \text{ mm-mrad}$$

NEA表面を持ったフォトカソードが唯一の候補である。

# 電子銃のエミッタンス

エミッタンス = 初期エミッタンス + ~~エミッタンス増大~~

エミッタンス補償

陰極からの電子引き出しの物理で決まる。

熱エミッタンス

$$\varepsilon_{th} = \frac{r_c}{2} \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}$$

カソード半径と温度

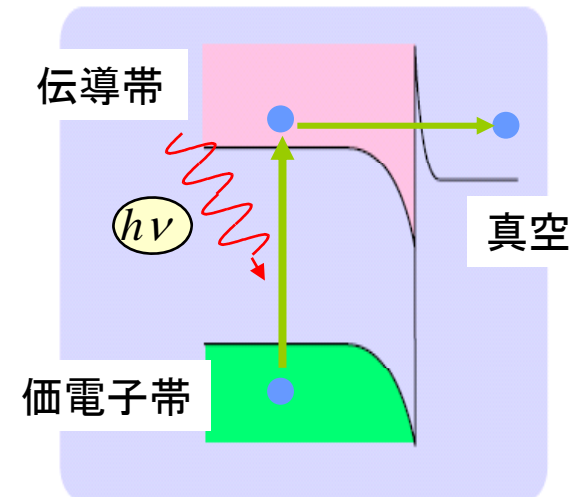
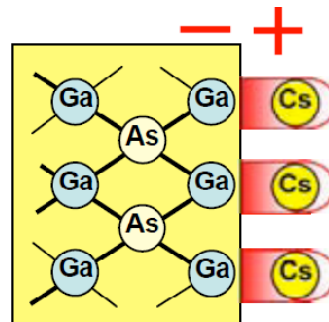
$$r_c = 1 \text{ mm}$$

$$kT = 25 \text{ meV}$$

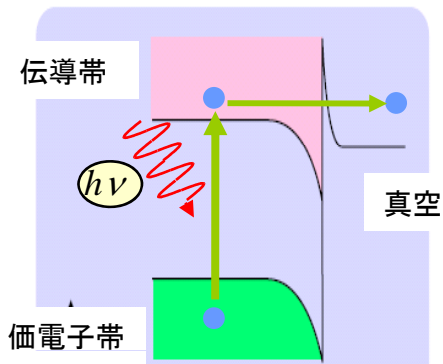
$$\rightarrow \varepsilon_{th} = 0.1 \text{ mm - mrad}$$

熱陰極 (> 1000°C) は不可

光陰極 (negative-electron affinity) が唯一の候補

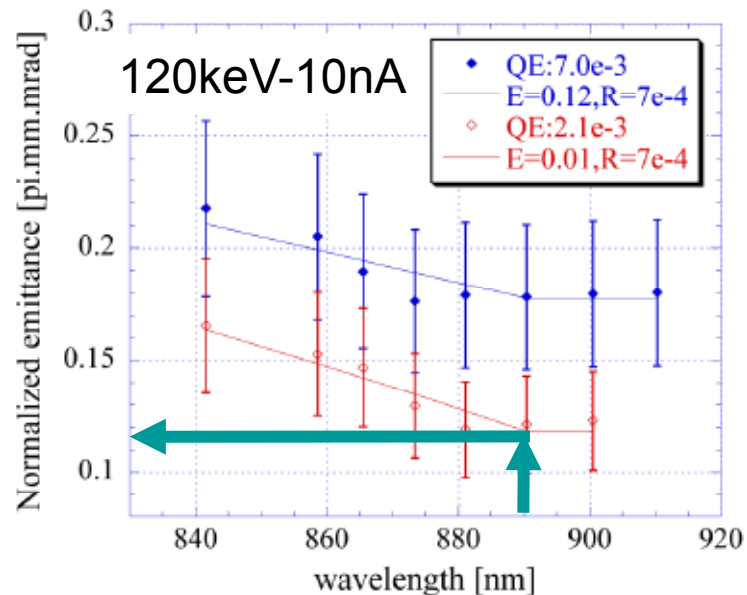
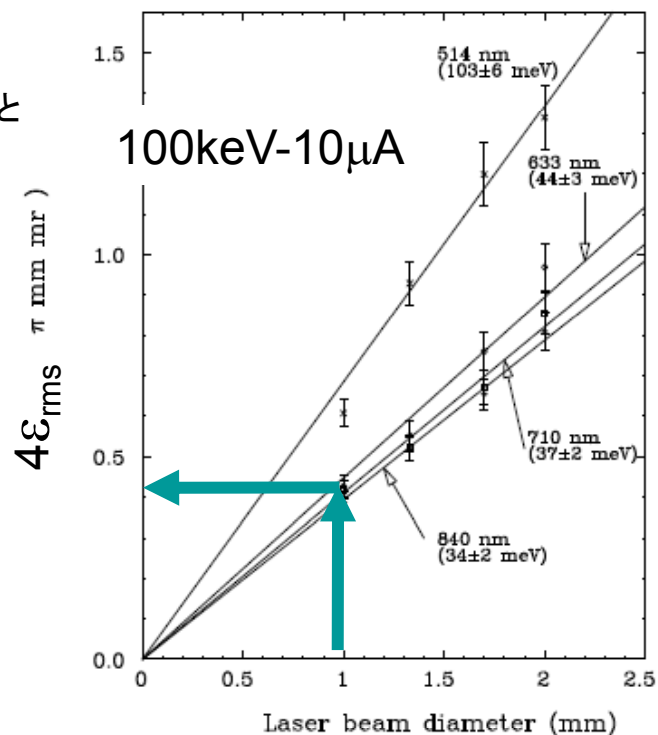


# NEA-GaAs 光陰極のエミッタンス



励起レーザー波長、  
レーザースポットサイズと  
エミッタンス

B.M. Dunham et al.,  
PAC-1995, 1030.



励起レーザー波長とエミッタンス  
山本尚人他、加速器学会(2006)

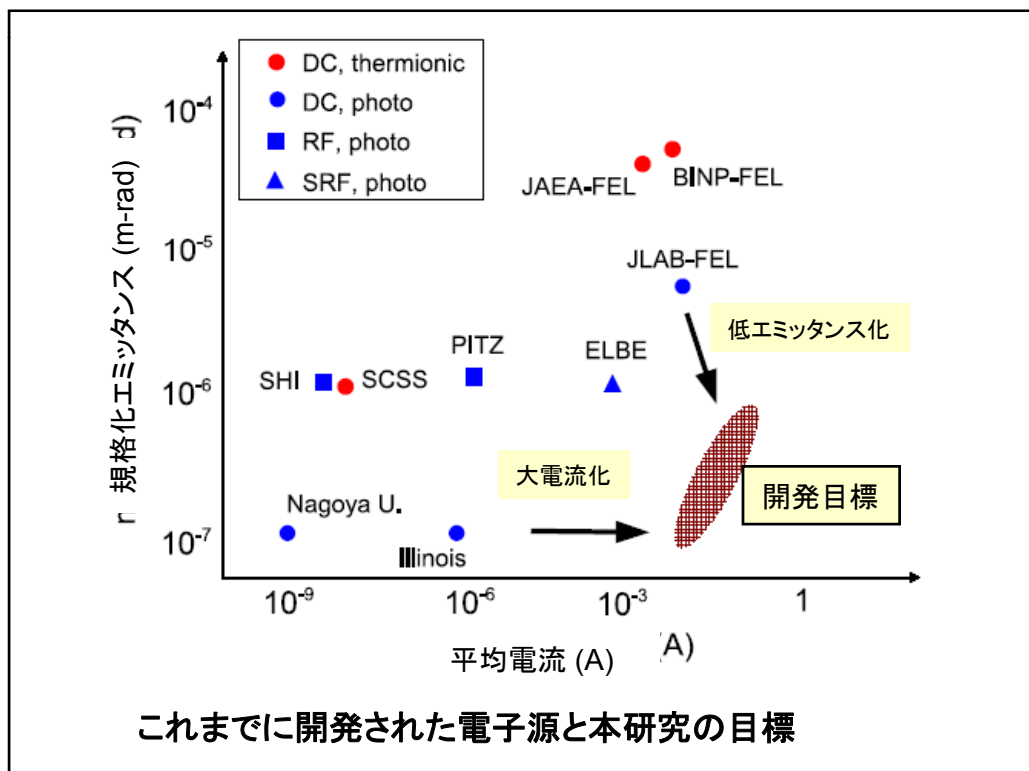
これら小電流の実験  
バンド構造、レーザー波長を選べば  
室温相当の熱エミッタンスで電子発生

~0.1mm-mradが原理的に可能である

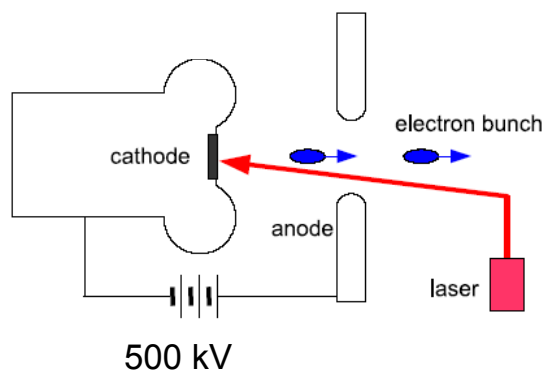
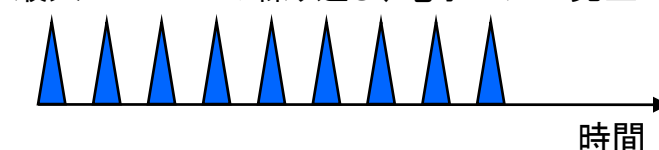
# DC電子銃による低エミッタンス大電流電子ビームの発生

ERL型次世代放射光源のため、

- 連続運転(CW)が可能なDC電子銃
- 低エミッタンスと大電流を両立する光陰極とDC加速技術
- 実用機の運転条件を満たす、量子効率と寿命の実現

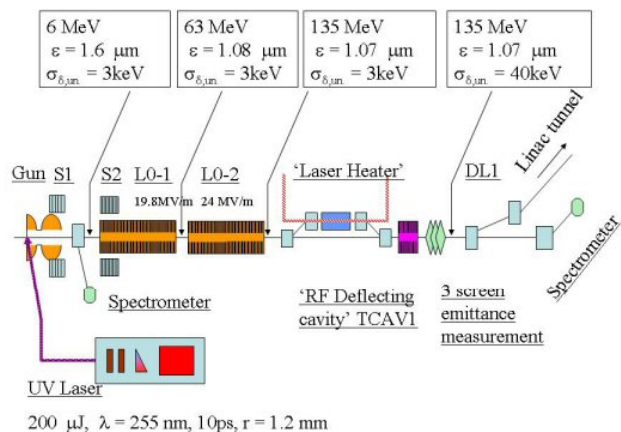


最大1.3 GHzの繰り返し、電子パルス発生



# 2つの代表的な低エミッタンス電子銃・入射器

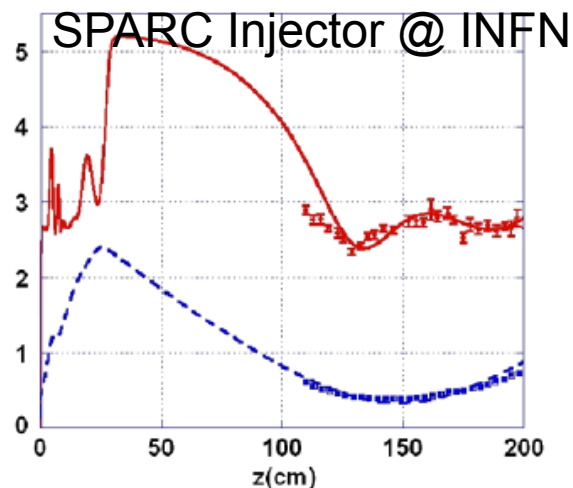
## RF 光陰極電子銃 + ブースターリニアック



Example: SLAC-LCLS Injector

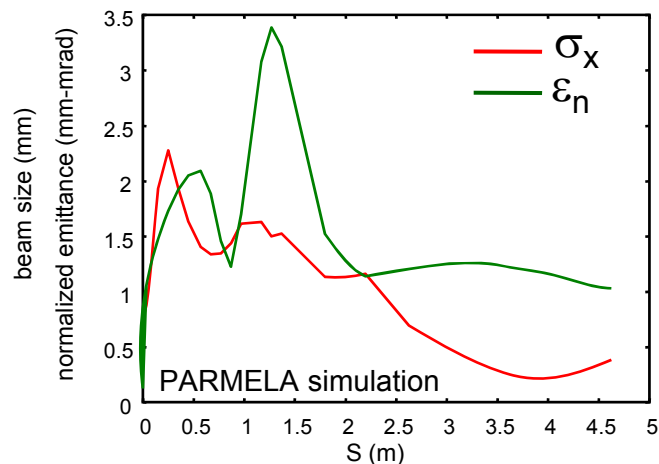
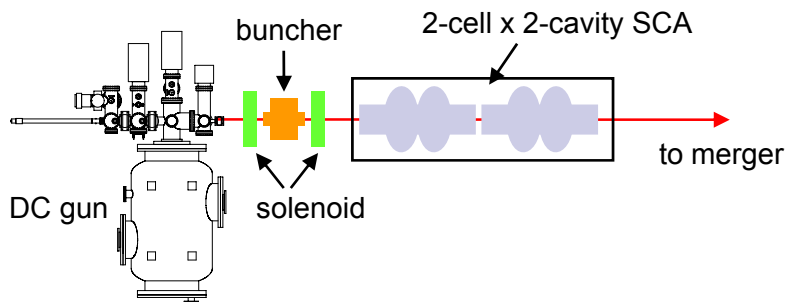
## エミッタンス測定実験とシミュレーション

### SPARC Injector @ INFN

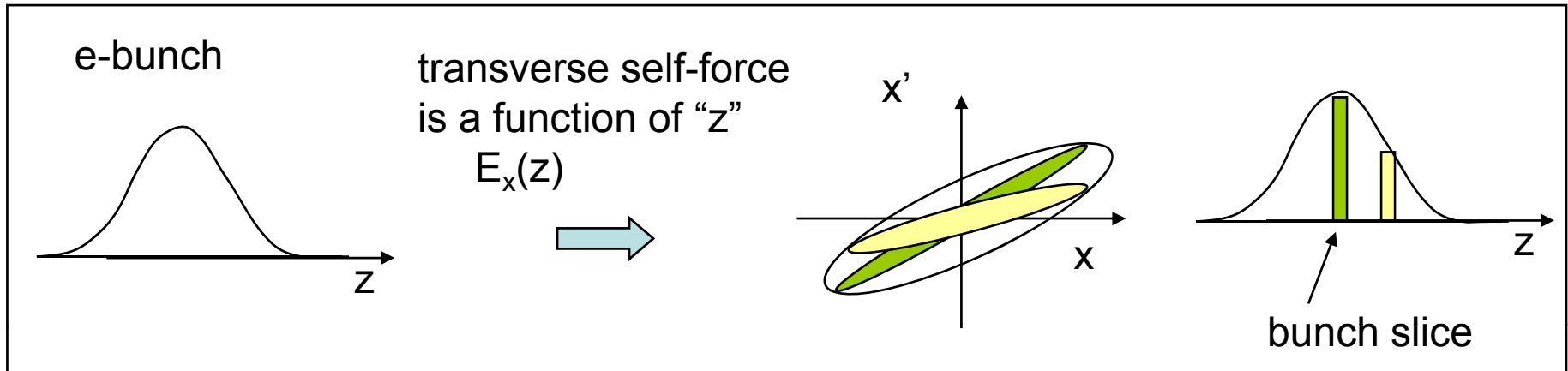


M.Ferrario et al., PRL 99, 234801 (2007)

## DC 光陰極電子銃 + ブースターリニアック



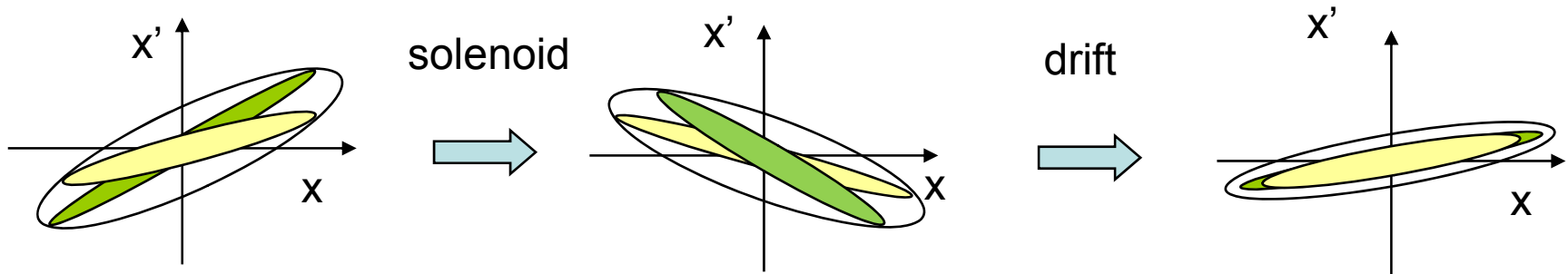
# emittance growth by transverse space charge force



total emittance grows, but slice emittance is preserved  
emittance compensation is possible

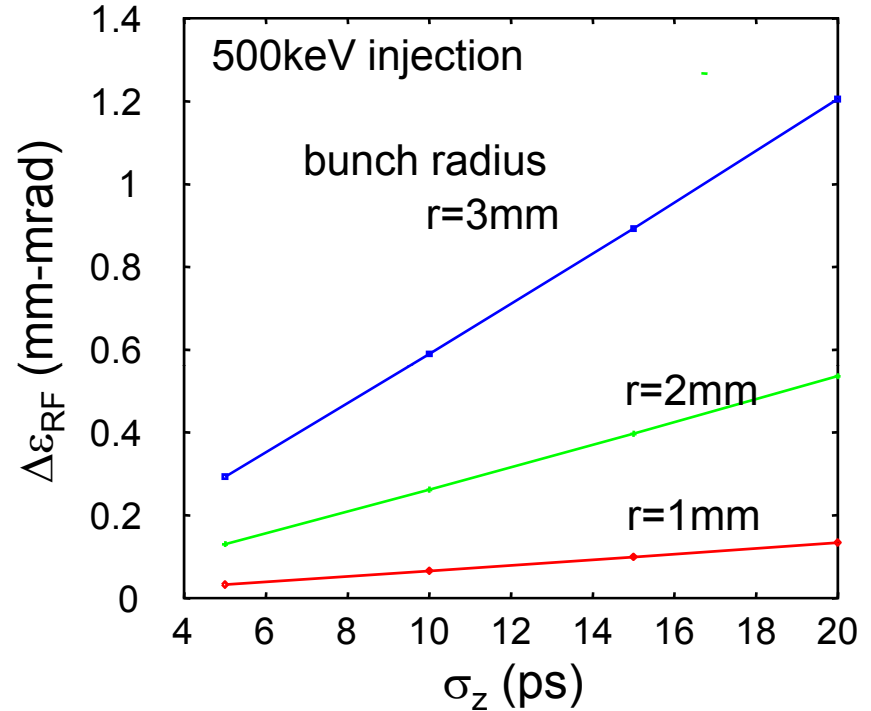
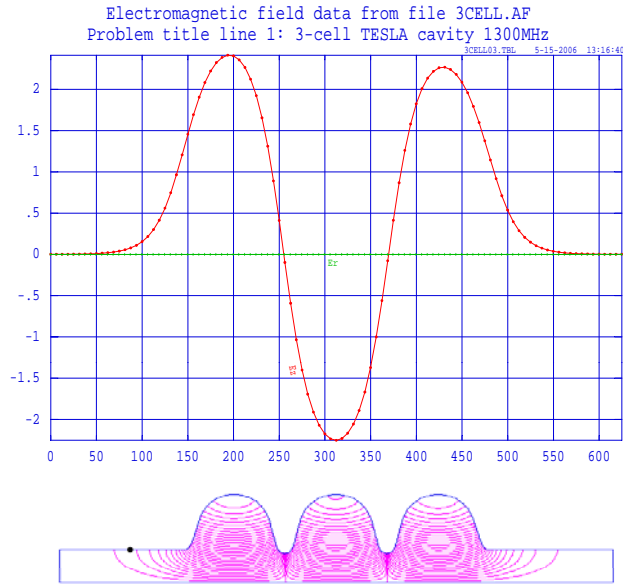
[B.E. Carlsten, NIM-A285, 313 \(1989\).](#)

[S. G. Anderson and J. B. Rosenzweig, PRST-AB 3, 094201 \(2000\)](#)



emittance compensation by solenoid

# “RF emittance growth” at injection SCA



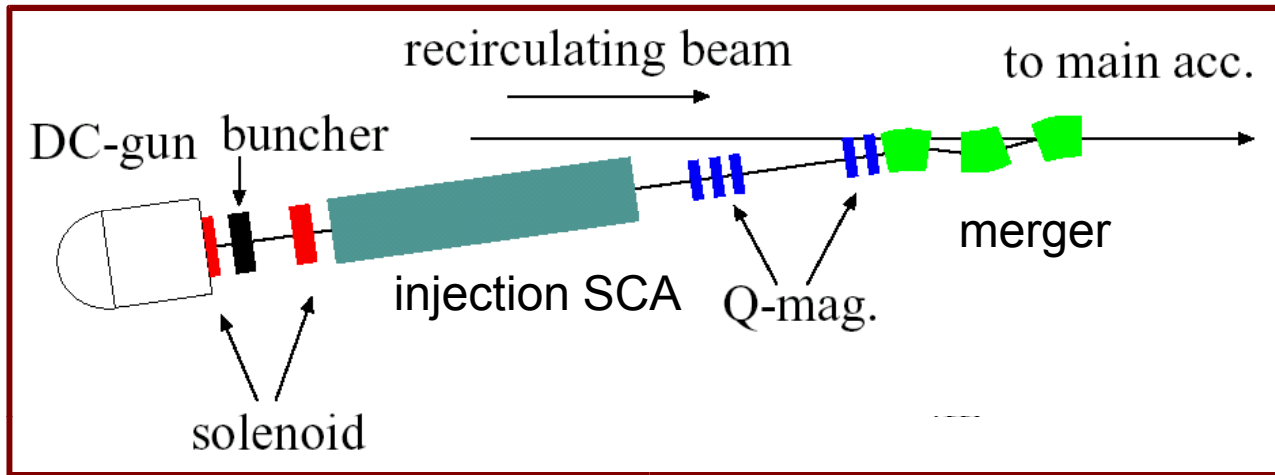
no space charge assumed = only RF emittance growth

injection phase is chosen for maximum energy gain, 1MeV

→ scaling :  $\Delta\epsilon_{RF} \propto \sigma_r^2 \sigma_z$  (depending on the fringe field profile)



# How solenoids work in an ERL injector



solenoids are necessary for

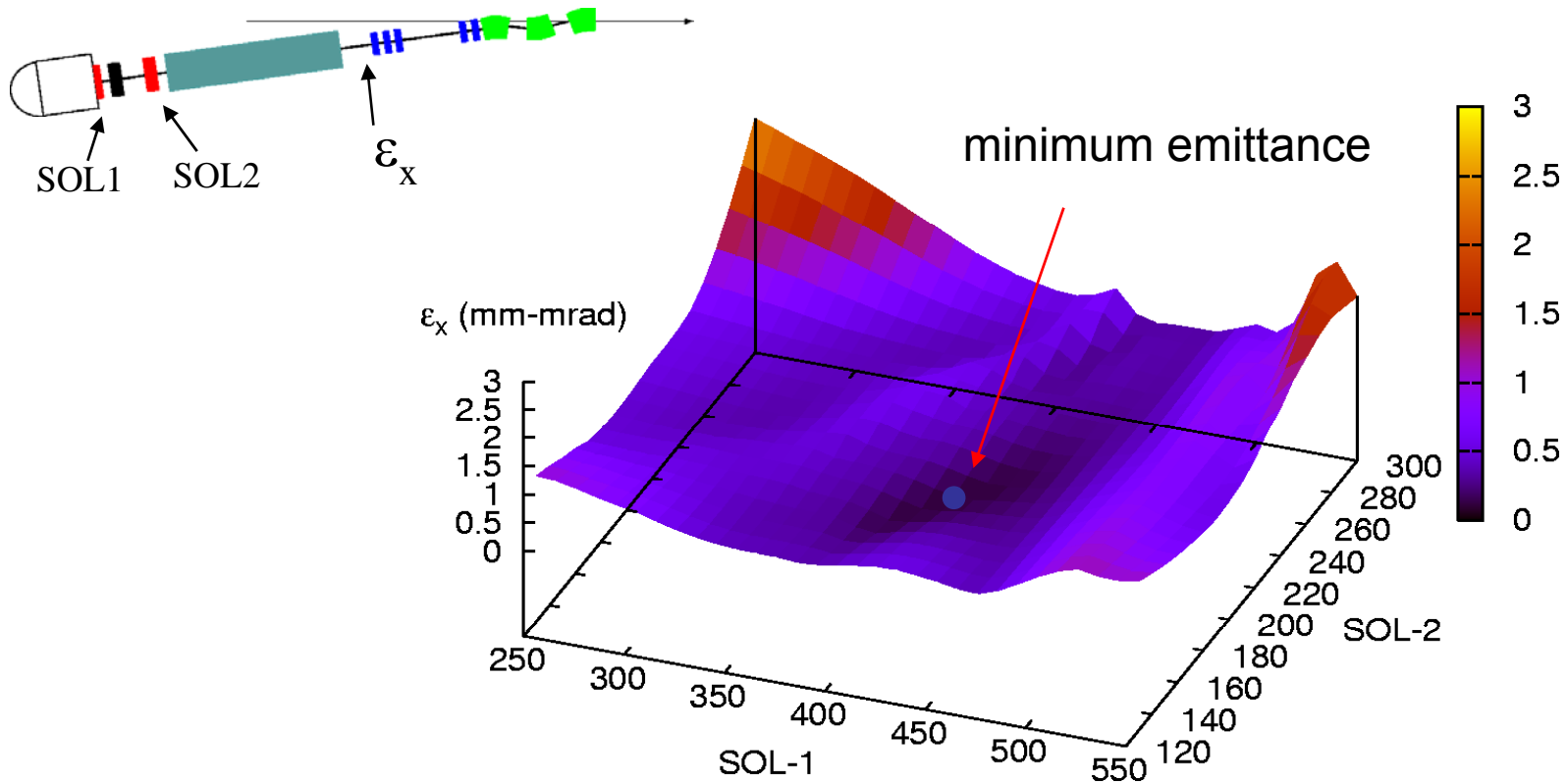
1. minimizing  $\varepsilon_{SC}$  and  $\varepsilon_{RF}$  by emittance compensation technique
2. minimizing  $\varepsilon_{RF}$  by controlling radial size at the buncher and the entrance of injection SCA.

1 and 2 are generally incompatible,  
but there may be a solution to minimize  $\varepsilon_{SC} + \varepsilon_{RF}$ .

See "correlation of  $\varepsilon_{SC}$  and  $\varepsilon_{RF}$ " discussed in [1].

[1] K-J. Kim, NIMA-275, 201 (1989)

# Solenoid field vs $\epsilon_x$ after the injection SCA



$\epsilon_x$  is a smooth function of solenoid field,  
and there is a set of solenoid field to minimize the emittance.

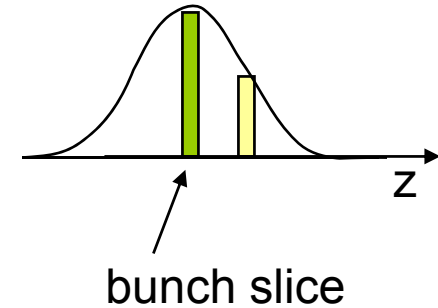
Here, we fix the position of solenoids.

See Bazarov's simulation, which changes the position and field of solenoids.

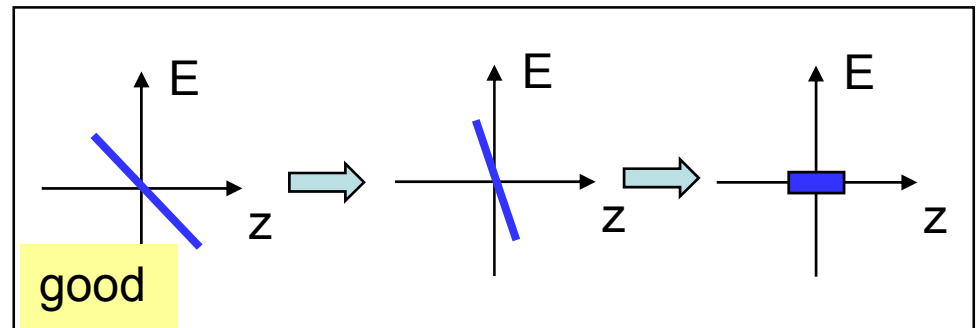
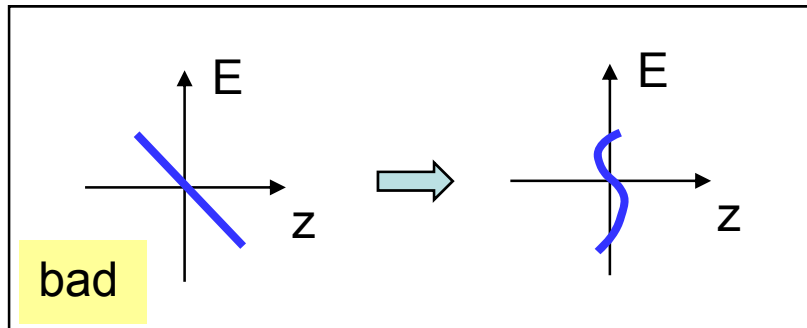
PRST-AB 8, 034202 (2005)

# emittance compensation and bunch compression

In the emittance compensation scheme, it is essential to keep the order of bunch slices.

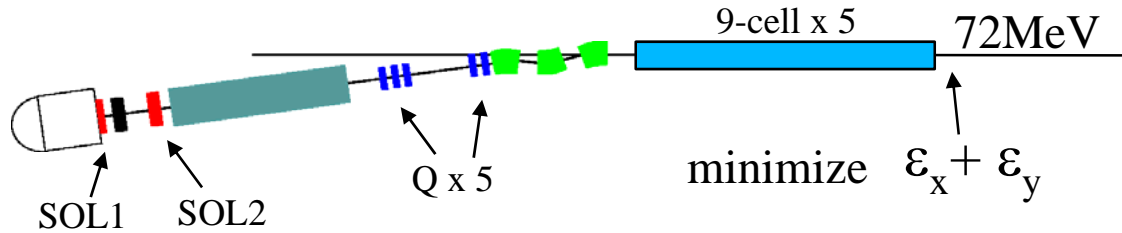


In the injection SCA, emittance compensation is performed during bunch compression.



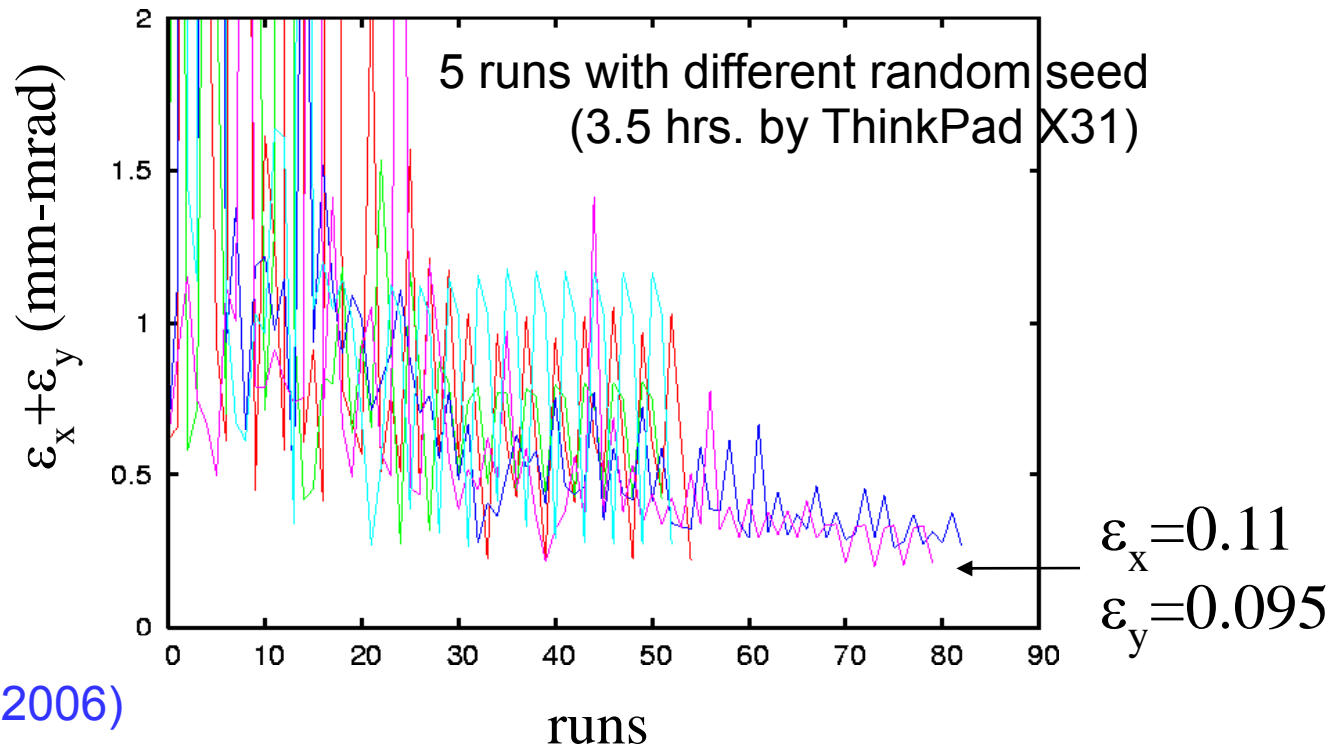
Over compression destroys the emittance compensation.  
we must avoid longitudinal mixing of bunch slices

# Solenoid and Quad optimization

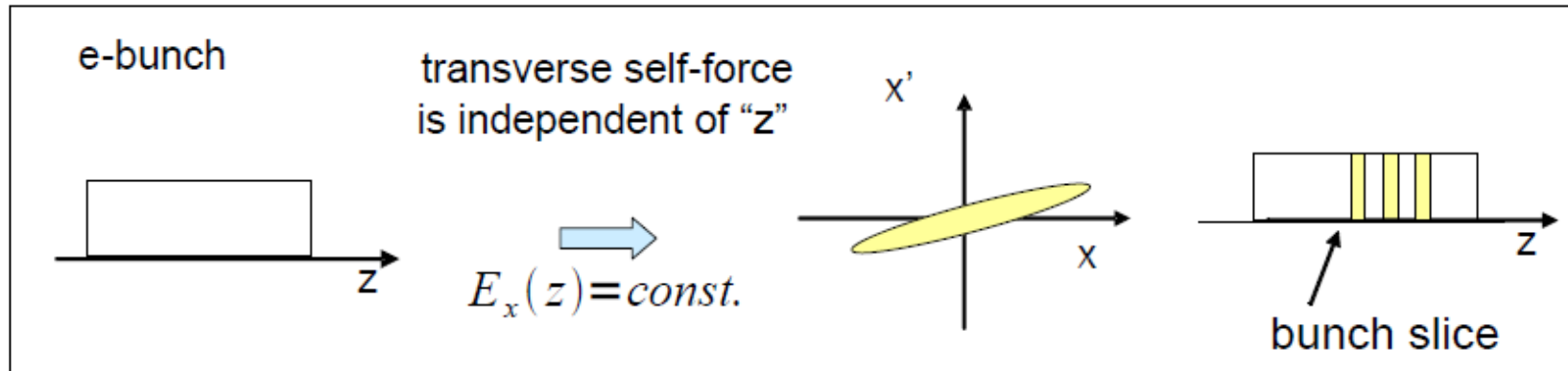
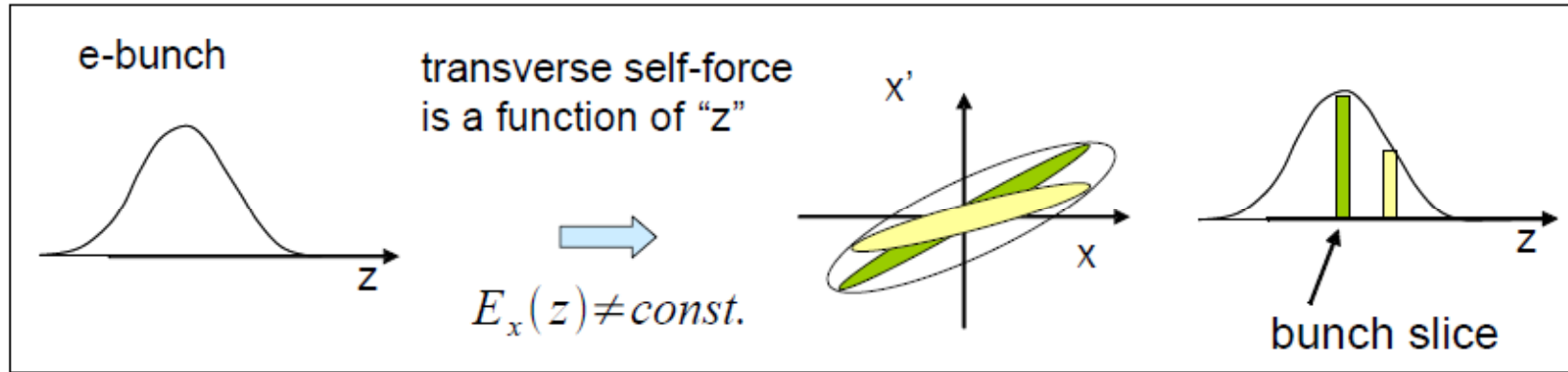


**down-hill simplex** with 7 parameters (2 Sol. + 5 Quad.)

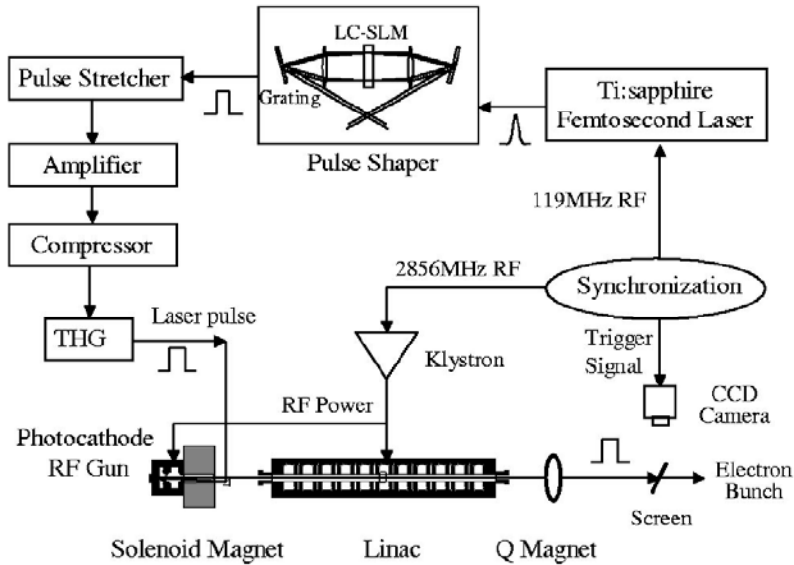
starting from the initial values obtained by envelope matching.



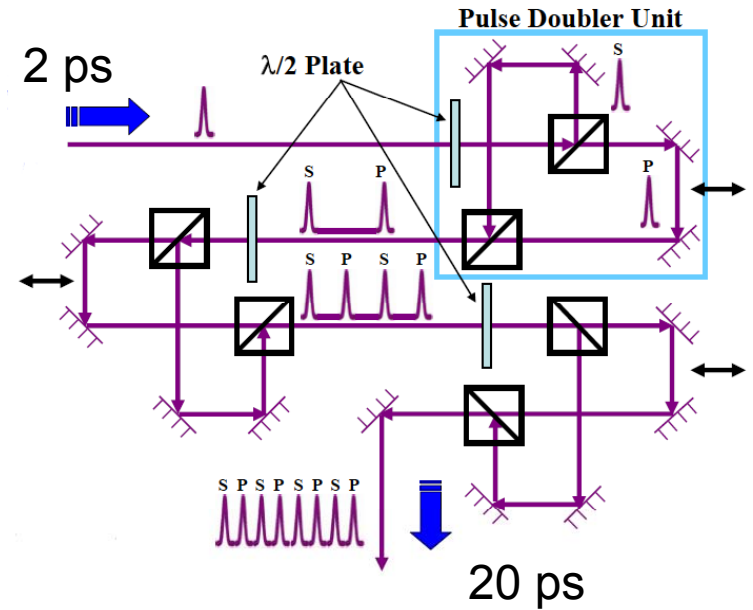
# 時間波形整形 = エミッタンス増大の抑制



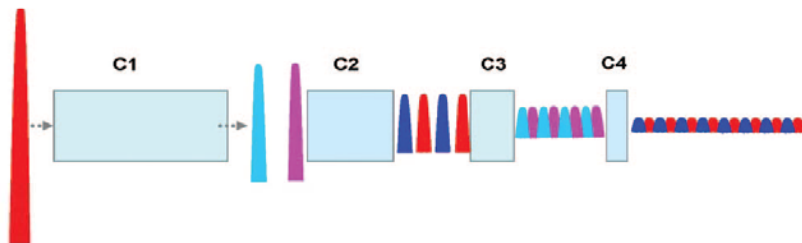
# 時間波形整形の例



J. Yang et al., J. Appl. Phys. 92, 1608-1612 (2002).



富沢, 高周波電子銃研究会 2007.

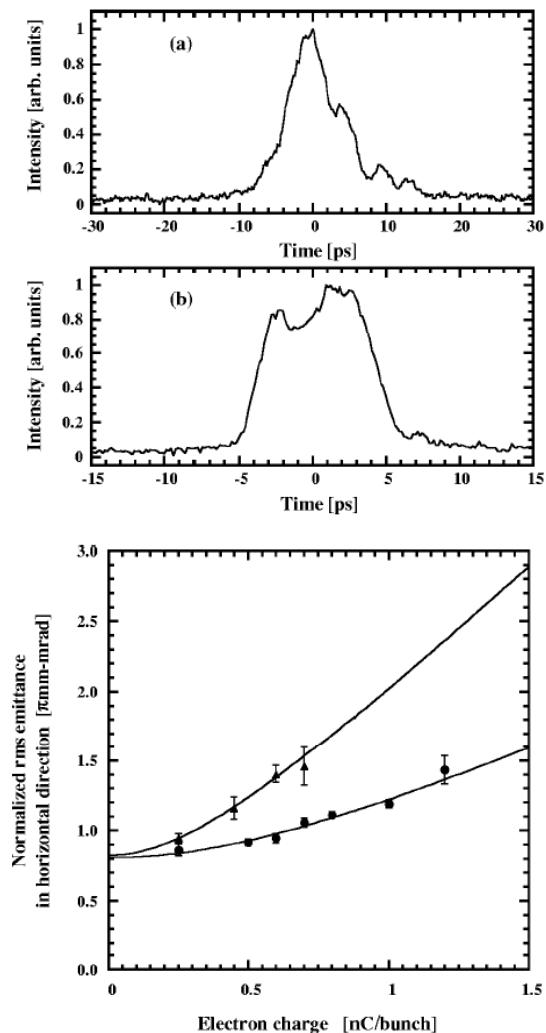


Shian Zhou et al., Applied Optics, 46, pp. 8488-8492 (2007)

レーザ波長、パルス幅に応じて  
いくつかの方法が試みられている

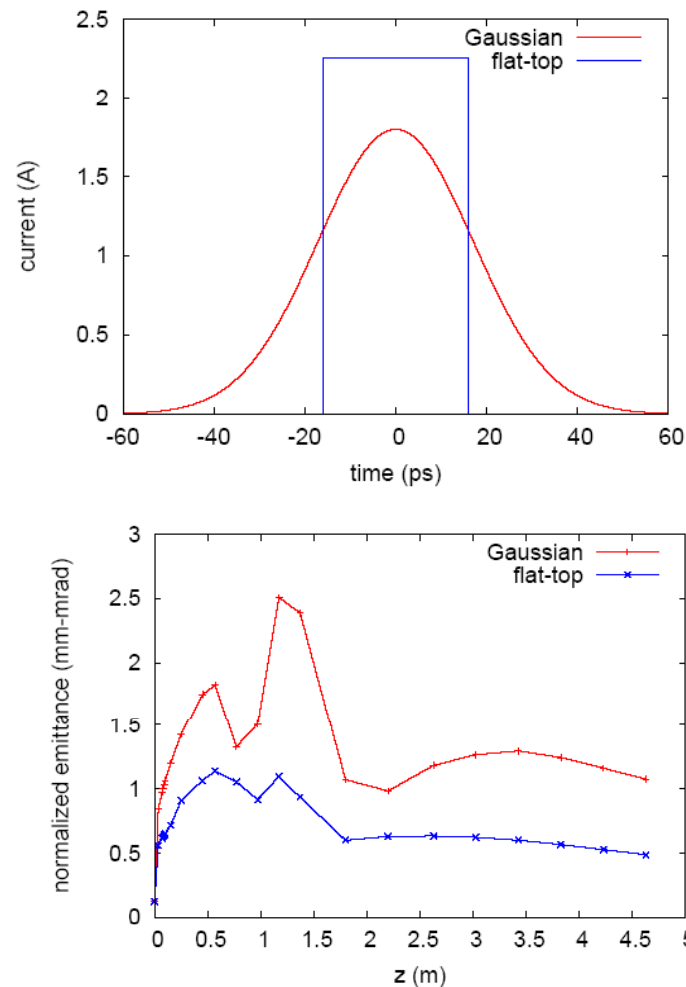
# 波形整形の有効性の例

## RF 電子銃の実験



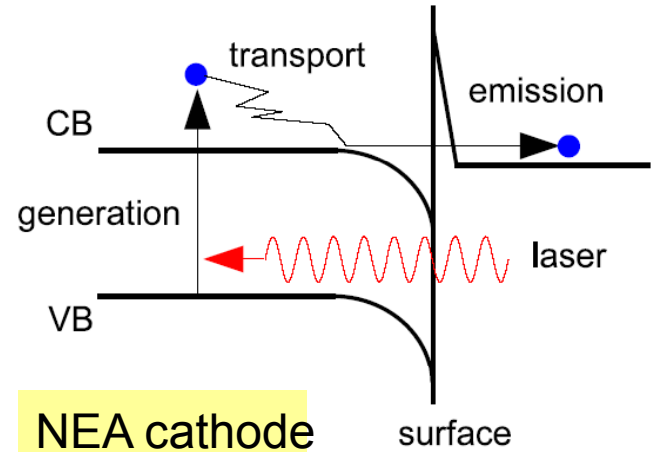
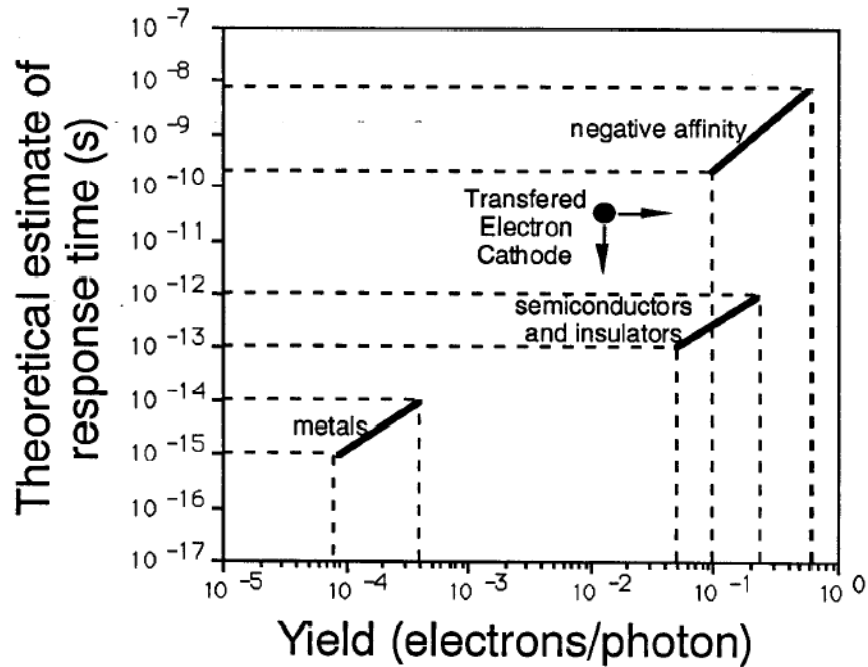
J. Yang et al., J. Appl. Phys. 92, 1608-1612 (2002).

## DC 電子銃の計算



羽島 他, KEK Report 2007-7 / JAEA-Research 2008-032.

# カソードの時間応答



W.E. Spicer, SLAC-PUB-6306 (1993)

金属は電子-電子散乱

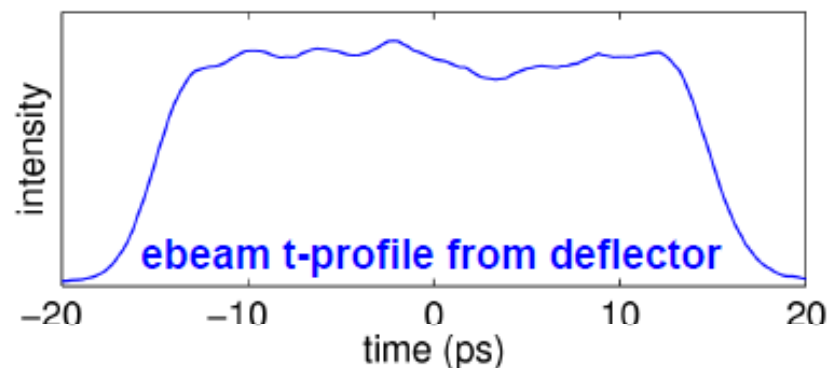
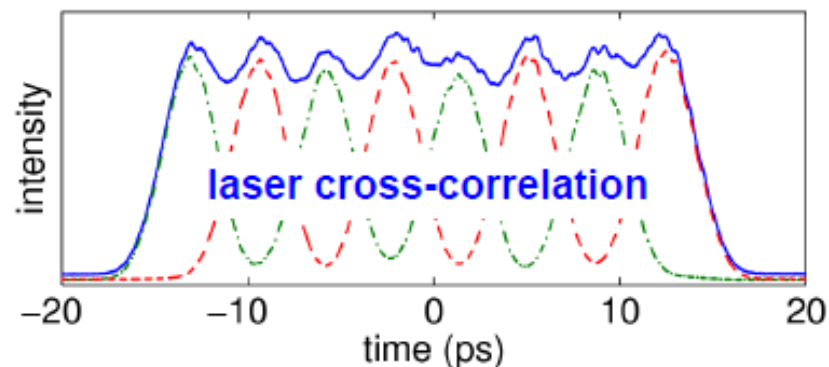
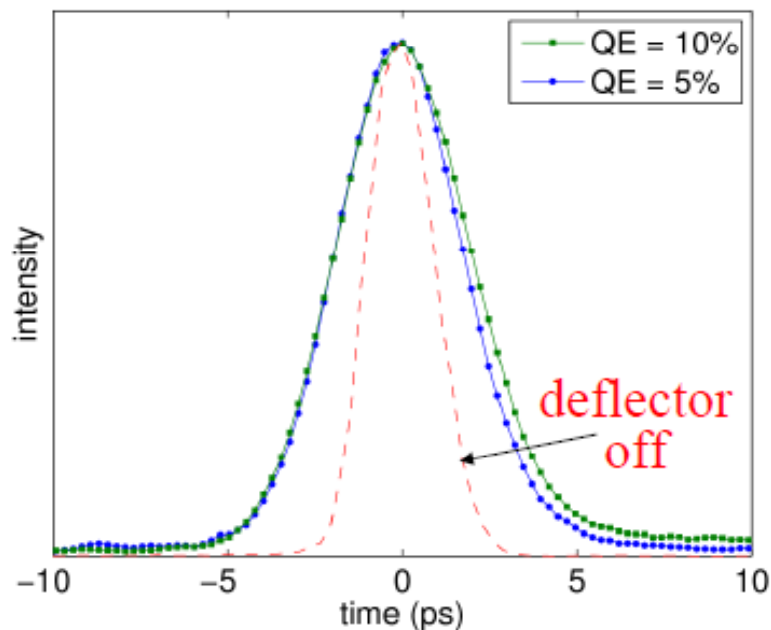
半導体は電子-格子散乱

Material	Dominating mode of scattering	Equation for $\tau$	Estimate range of $\tau$ (sec)	Typical yield (el/photon) 1 eV above threshold
Metals	Electron-electron	$\tau = \frac{L}{v_a} \quad (9)$	$10^{-15}$ to $10^{-14}$	$8 \times 10^{-5}$ to $4 \times 10^{-4}$
Semiconductors and insulators (Cs <sub>3</sub> Sb or multialkali)	Electron-lattice	$\tau = \frac{E_k}{\Delta E_p} \frac{l_p}{v_a} \quad (13)$	$10^{-13}$ to $10^{-12}$	0.05 to 0.25
Negative affinity	Electron-lattice (thermal diffusion of electrons in CBM)	$\tau = \frac{L_D^2}{\mu kT/q} \quad (14)$	$2 \times 10^{-10}$ to $7 \times 10^{-9}$	0.1 to 0.6



# Cornell 電子銃の実験 NEA-GaAs

I.V. Bazarov, PRST-AB 11 (2008) 040702

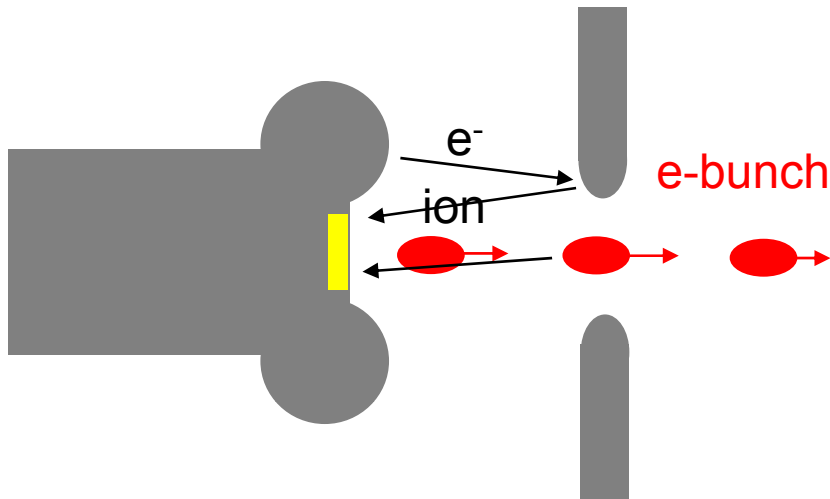


520 nm レーザで 1ps のレスポンスが得られている。

Spicer のモデルでは説明できない。レーザ光の吸収深さの効果？

→ JAEA 電子銃でも実験を準備してる

# NEA光陰極の寿命



## NEA表面劣化(破壊)のメカニズム

- 残留ガスの衝突、吸着
- 暗電流(カソード、アノード間の増倍)
- 逆流イオン (ion back bombardment)
- レーザーによる加熱?

必要な寿命  $> 10^6 \text{C/cm}^2$ ,  $> 10,000 \text{C}$   
100mA /  $\phi 2\text{mm}$ 、 $> 1\text{day}$

## これまでの実績

CEBAF-偏極電子源(100kV, 0.1mA)

未使用状態で3ヶ月以上保持

引き出し電荷量の上限(寿命)  
 $2 \times 10^5 \text{C/cm}^2$

真空  $\sim 2 \times 10^{-11} \text{ torr}$

JLAB-ERL電子源(330kV, 9mA)

引き出し電荷量の上限(寿命)  
 $450\text{C} \rightarrow \sim 4 \times 10^3 \text{C/cm}^2$

真空  $\sim 3 \times 10^{-11} \text{ torr}$

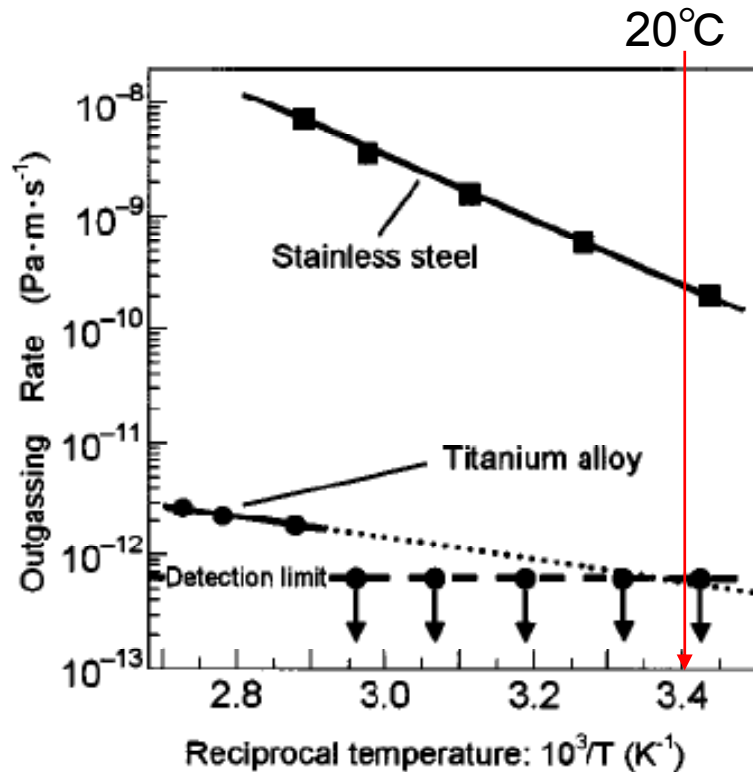
電極にセシウムが飛ばない構造  
暗電流の出にくい電極材料  
高い真空(ガス放出の少ない材料)

# 光陰極長寿命化の対策

## 真空の向上

Ti 製真空チェンバーの利用

NEDO産業技術研究助成事業  
「新規真空材料チタン合金を用いた  
省エネルギー型超高真空装置の開発」



チタン合金製真空容器及び真空部品  
特許出願番号：特願2001-088100, 特許公開番号：特開2002-282673  
発明者：栗巣普揮、松浦満、山本節夫、部坂正樹、武村厚  
出願人：有限会社山口ティー・エル・オー、新光産業株式会社、株式会社神戸製鋼所

TITANIUM ALLOY VACUUM CONTAINER AND VACUUM PART  
PCT国際出願番号：PCT/JP02/02566  
アメリカ出願番号：10/312,701  
ヨーロッパ出願番号：EP20020761963 20020318  
発明者：栗巣普揮、松浦満、山本節夫、部坂正樹、武村厚

SUSに比べて2～3桁低いガス放出

JAEA 電子銃では、  
すべての真空チェンバーをチタン製とした

H. Kurisu et al., J. Vac. Sci. A21 (2003) L10.

# 研究開発項目

- 500kV DC電子銃技術の完成
  - 大電流CW電源、セラミック管
  - カソード表面洗浄・活性化・搬送装置
  - 真空の追求＝長寿命カソードの実現
- フォトカソード
  - バルクGaAs → バルクAlGaAs → 超格子
  - バックアップとしてマルチアルカリ(ただし、エミッタンス1mm-mrad)
  - 寿命、初期エミッタンス、時間応答の測定
- ドライブレーザ
  - 1 $\mu$ m帯ファイバーレーザのSHG(~500nm, ~2W)
  - 波形整形技術→波長変換技術→大出力化
- 性能向上のマイルストーン
  - 大電流の達成(10mA → 50mA → 100mA)
  - 寿命の改善(100C → 1000C → 10000C)
  - 低エミッタンスの達成(10mm-mrad → 1mm-mrad → 0.1mm-mrad)
  - シミュレーションによる支援