

Dec. 15 2005

プラズマセパレータを用いた高強度レーザーによる 高エネルギー電子ビームの生成

宇都宮大学大学院工学研究科
電気電子工学専攻 川田研究室

MT043217

酒井 計

Background

近年のレーザー技術(CPA)の発達により、
高強度短パルスレーザーの生成が可能となった

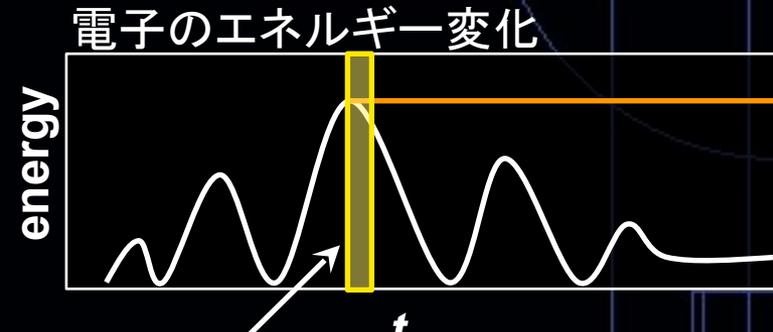


- + プラズマを媒体として電子を加速させるレーザー航跡場加速
- + 真空中の電子バンチに高強度レーザーを照射させることによる電子加速
- + 高密度の薄いプラズマにレーザーを照射させることによるイオン加速



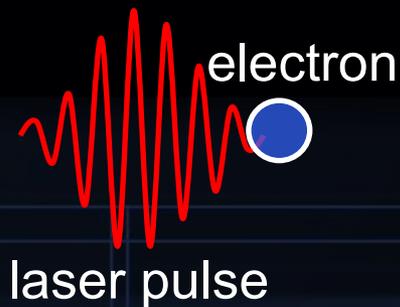
高強度レーザーを用いた荷電粒子加速器は加速勾配が非常に高く、従来使われている加速器を小型にすることができ、粒子線を用いたがん治療、新しい点光源技術などへの応用が期待されている。

Purpose (Plasma separator)



レーザーのみプラズマセパレータで反射するため
電子のエネルギーロスが抑えられる。

Acceleration process



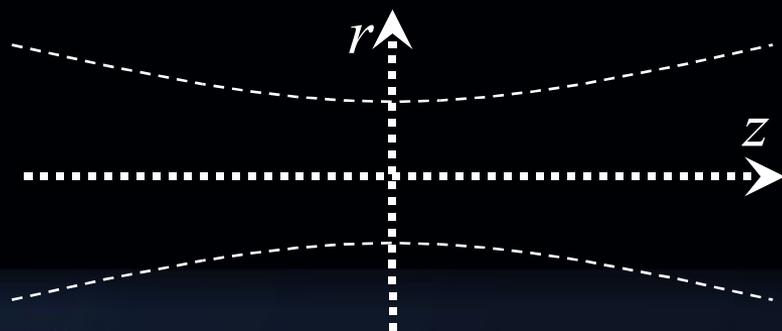
Plasma separator



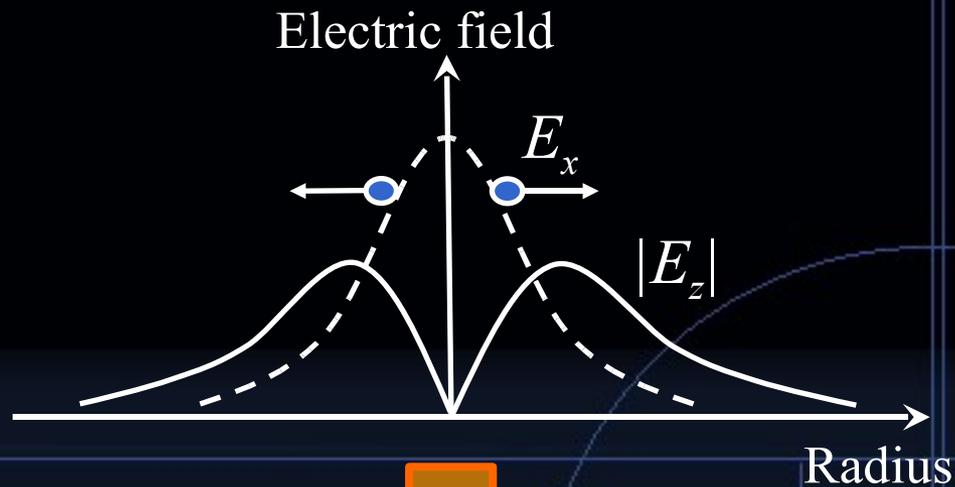
Purpose (TEM₀₀ mode laser)

$$E_x = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[-\frac{x^2}{w(z)^2} - \frac{(z-ct)^2}{(\tau/2)^2} \right] \sin \left(kz - \omega t - \phi(z) + \frac{kx^2}{2R(z)} \right)$$

$$E_z = \frac{i}{k} \frac{\partial E_x}{\partial x} \left(E_0: \text{振幅}, w_0: \text{ビームウエイスト}, w(z): \text{スポットサイズ}, \tau: \text{パルス長}, \phi(z): \text{位相因子}, R(z): \text{波面曲率} \right)$$



中心軸上に強度ピークを持つ

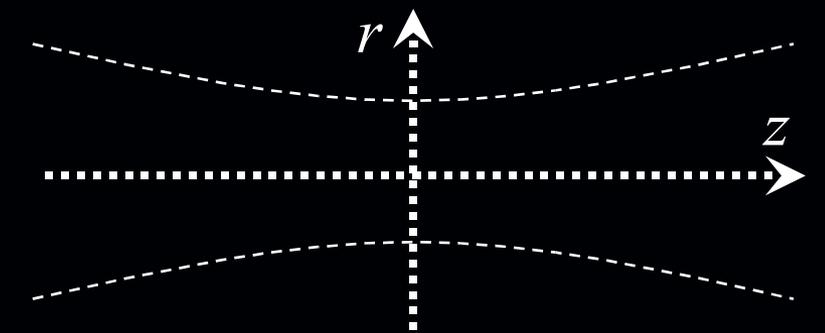


電子の散乱

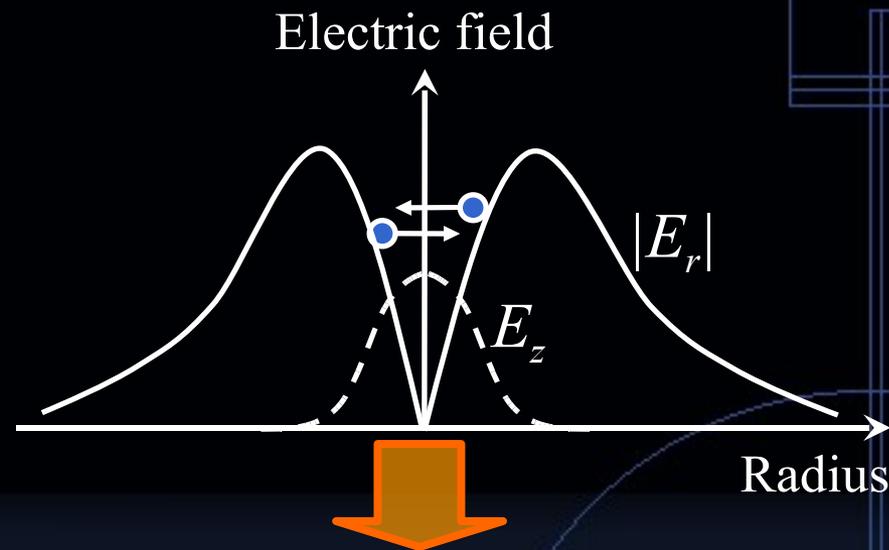
Purpose (TEM₁₀+TEM₀₁ mode laser)

$$E_r = 2\sqrt{2}E_0 r \frac{w_0}{w(z)^2} \exp\left[-\frac{r^2}{w(z)^2} - \frac{(r-ct)^2}{(\tau/2)^2}\right] \sin\left(kz - \omega t - 2\phi(z) + \frac{kr^2}{2R(z)}\right)$$

$$E_z = \frac{i}{k} \frac{\partial E_r}{\partial r}$$

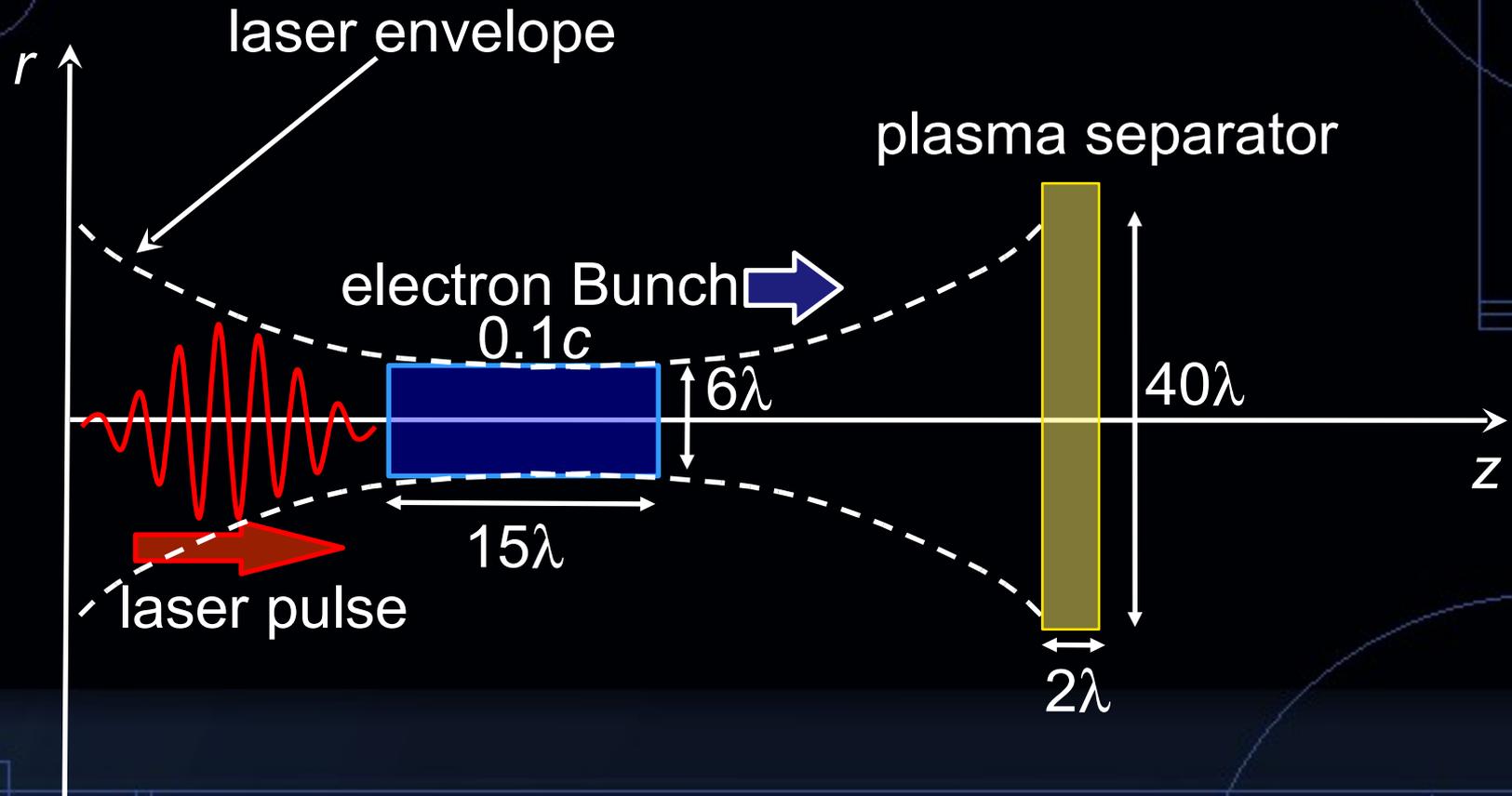


半径方向に対しリング状の強度分布



- + 電子の散乱の抑制
- + レーザー進行方向の電場による加速

Simulation model



Initial parameter values

Laser parameter

laser Intensity	$1.8 \times 10^{19} \text{Wcm}^{-2}$ ($a_0=2.6$)
pulse length	50fs
minimum spot size (radius)	3λ
wave length	1.053 μm

Electron parameter

Initial electron density	$1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$
Initial electron temperature	1.0eV

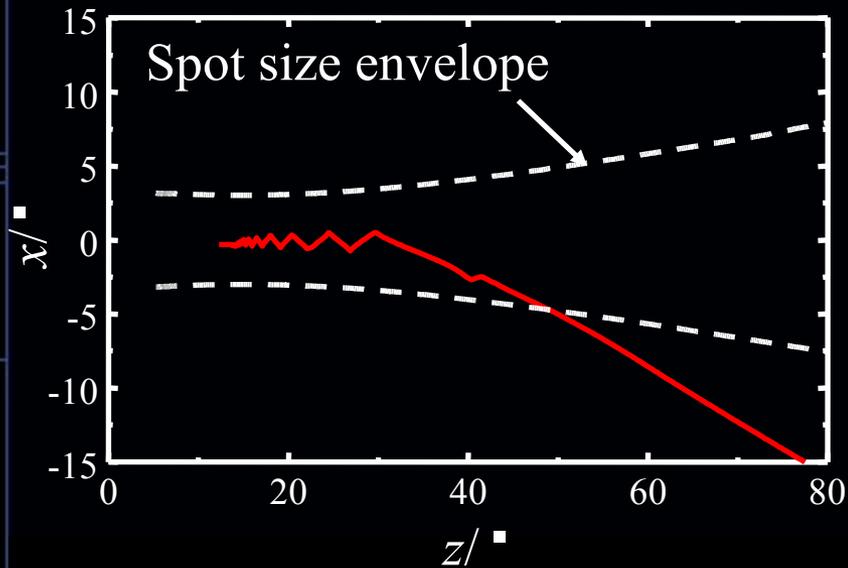
Plasma parameter

Initial plasma density	$3n_c$ (n_c :critical density)
Initial plasma temperature	100eV

Simulation results

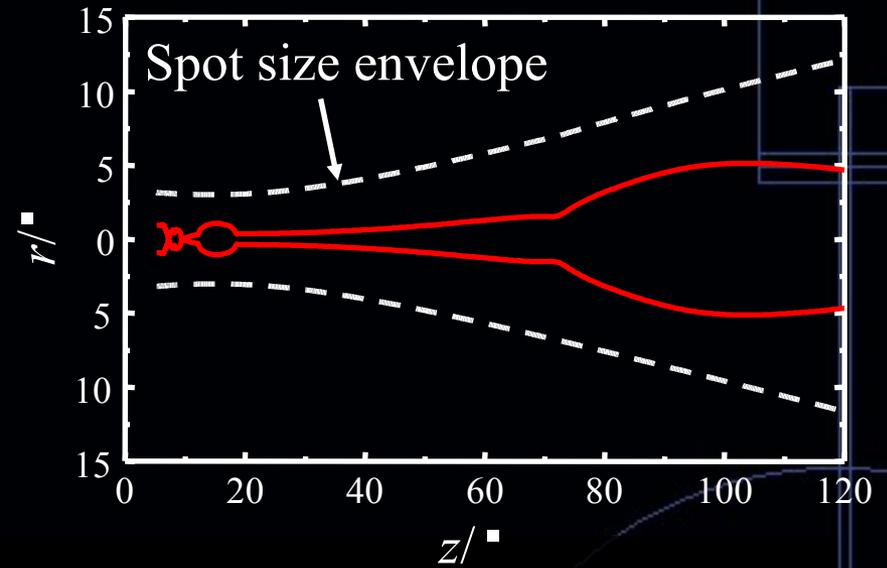
(Electron trajectory without plasma separator)

TEM₀₀ mode laser



電子の散乱

TEM₁₀ + TEM₀₁ mode laser

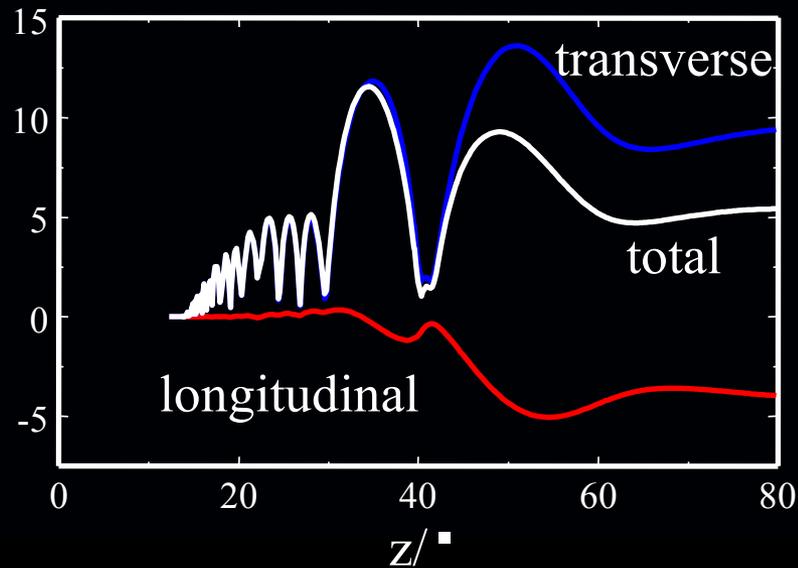


電子散乱の抑制

Simulation results

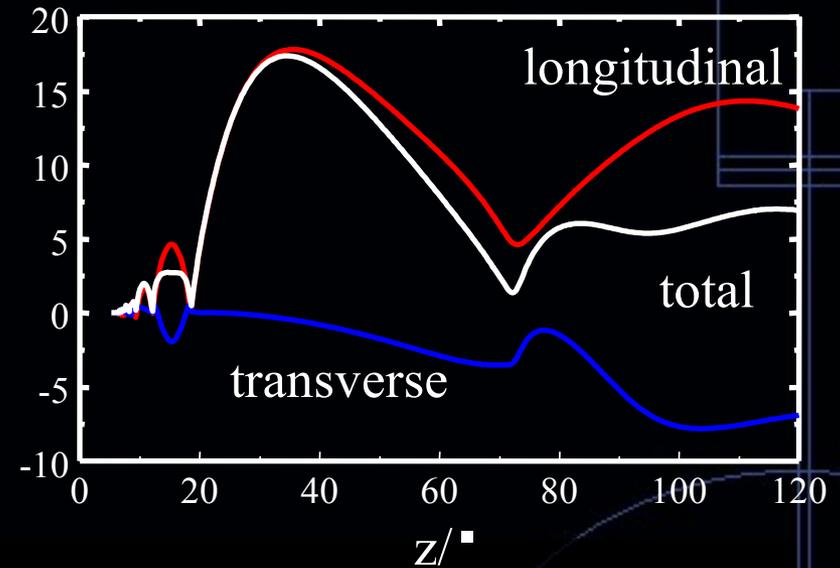
(Electron energy history without plasma separator)

TEM₀₀ mode laser



進行方向のポンデロモーティブ力

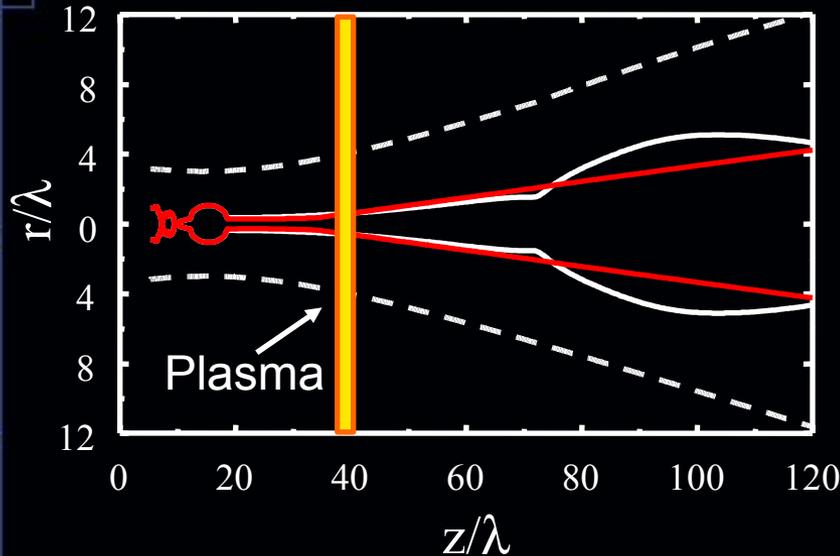
TEM₁₀ + TEM₀₁ mode laser



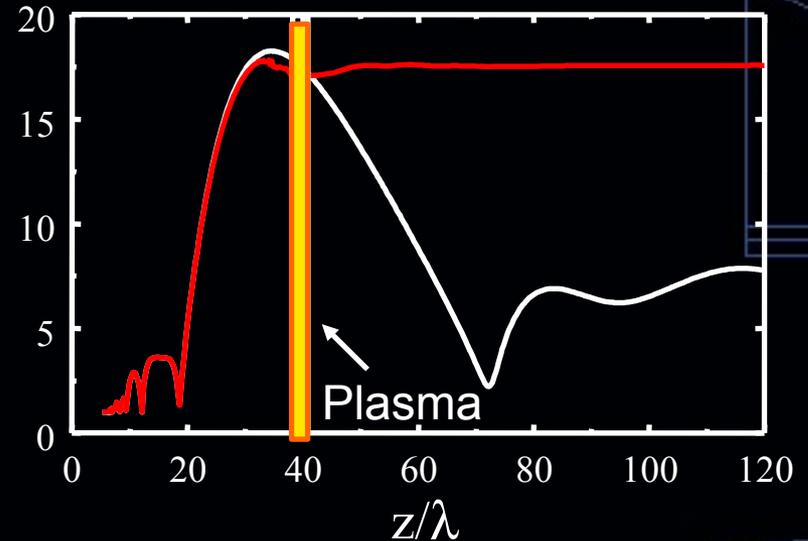
進行方向の電場成分

Simulation results

(Electron trajectory with plasma separator)



— With plasma separator
— Without plasma separator



プラズマセパレータ通過後, レーザーによる影響がなくなり電子のエネルギーは一定に保たれる

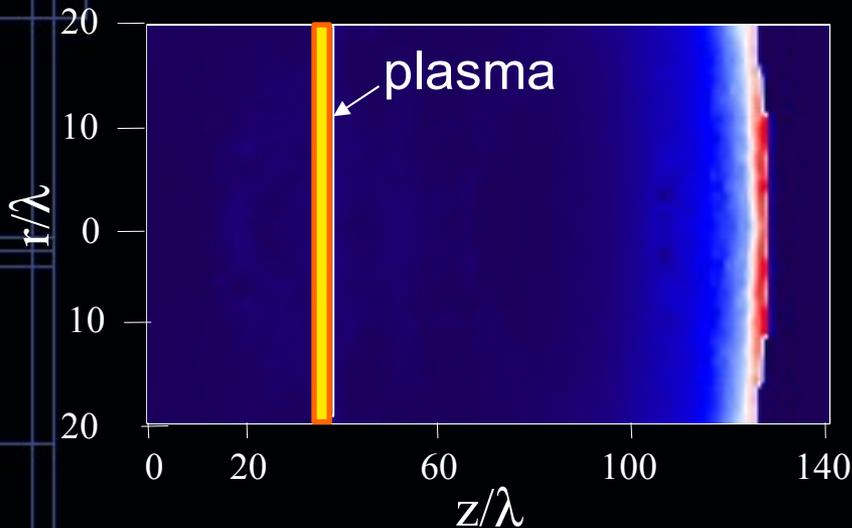
電子の最大エネルギー

- ✦ with plasma separator ≈ 17.5 (8.9[MeV])
- ✦ without plasma separator $\gamma = 7.9$ (4.0[MeV])

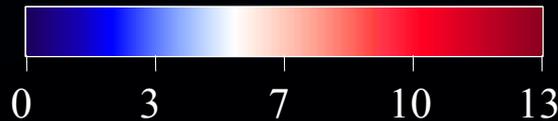
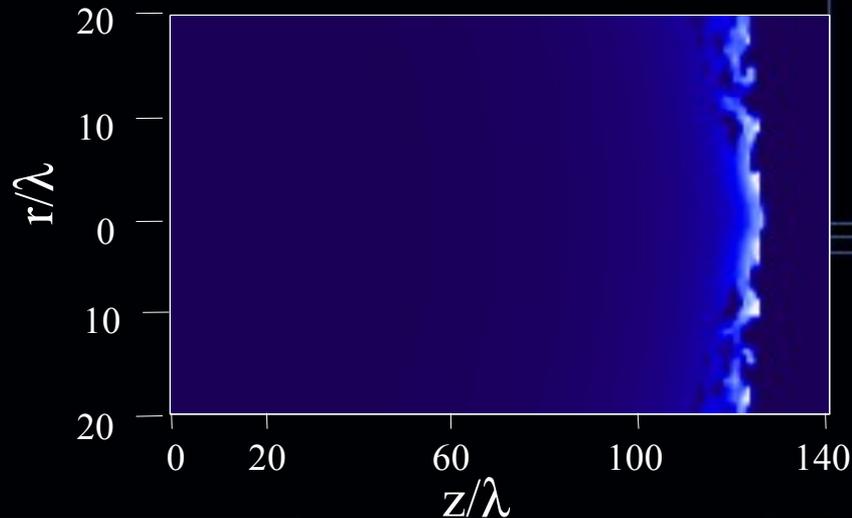
Simulation results (Electron energy distribution)

$t=492\text{fs}$ における電子のエネルギー分布

with plasma separator



without plasma separator



電子バンチの平均エネルギー

✦ with plasma separator $\bar{\gamma}=8.1$ (4.1MeV)

✦ without plasma separator $\bar{\gamma}=4.3$ (2.1MeV)

Estimation of plasma instability (two-stream instability)

電子ビームがプラズマセパレータを通過する際の電子ビームとプラズマ中の電子間の 流体不安定性におけるプラズマの成長率

$$\delta_{\max} = \omega_p \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{n_b}{n_p} \frac{V_b^2}{u_b^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right)$$

δ_{\max} : 最大成長率, ω_p : プラズマ周波数, n_b : 電子ビーム密度,
 n_p : プラズマ密度, V_b : 電子ビーム速度, u_b : 電子ビーム熱速度

今回のパラメータでは $\delta_{\max} \tau = 0.39 < 1$

(τ : 電子ビームのプラズマ通過時間)



電子バンチへの影響は少ない

Estimation of plasma instability (Filamentation instability)

電子ビームがプラズマセパレータを通過する際の電子ビームとプラズマ中の電子間のフィラメンテーション不安定性におけるプラズマの成長率

$$\delta_{\max} \approx \frac{v}{3} \beta$$

$$\beta = \omega_b^2 / \omega_p^2 + k^2 c^2 / \omega_p^2$$

$$k = \left(\frac{2 \omega_b^2}{9 v^2} \right)^{1/4} \frac{\omega_p}{c}$$

▪ 衝突周波数

c : 光速

ω_p : プラズマ周波数

ω_b : 電子ビーム周波数

今回のパラメータでは

$$\delta_{\max} \tau = 1.39 \times 10^{-4} < 1$$



電子バンチへの影響は少ない

Estimation of collisional energy loss

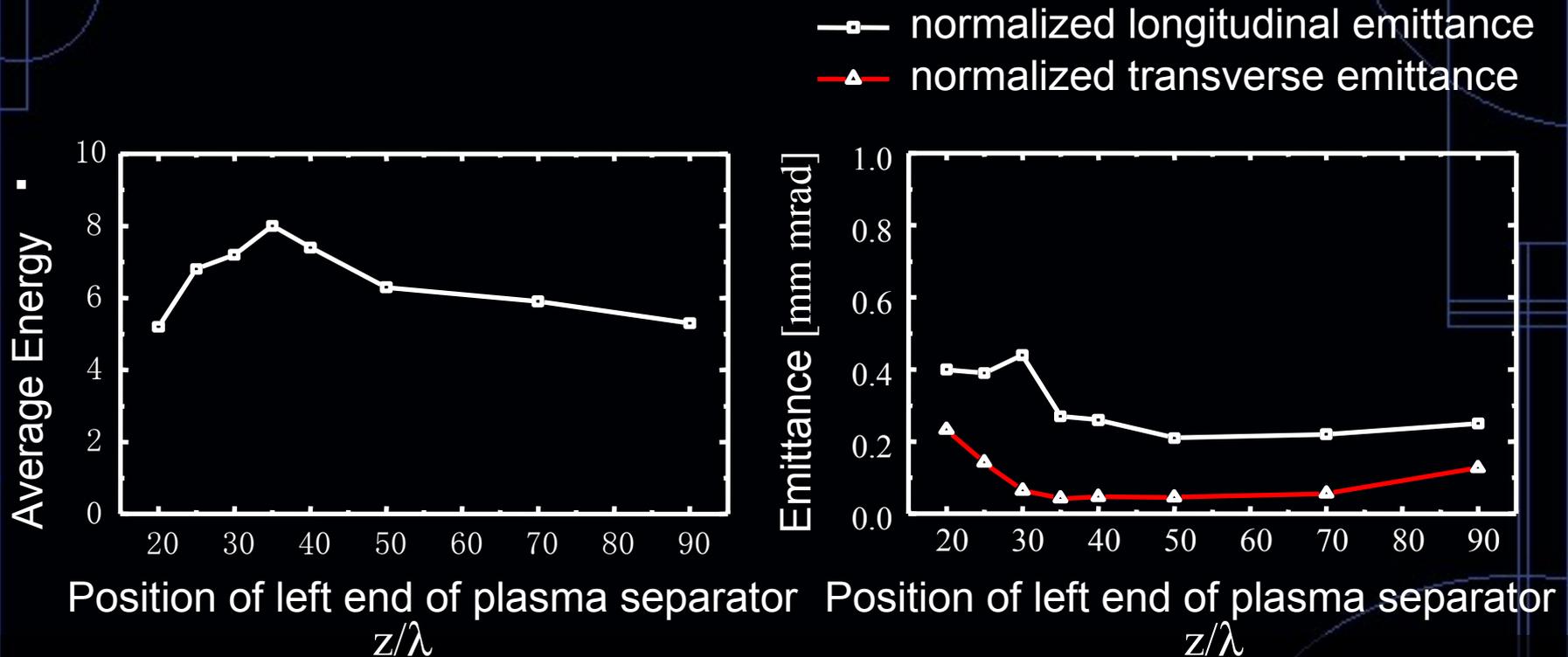
電子ビームがプラズマセパレータを通過する際の
電子ビームのエネルギーロス

$$\left\langle \frac{d\varepsilon}{dt} \right\rangle \cong -\frac{e^4 \ln \Lambda}{4\pi\varepsilon_0^2} \left(\frac{n_p}{m_e} \right) \frac{1}{V_b}$$

$\left[\begin{array}{l} d\varepsilon/dt: \text{電子のエネルギーロス, } e: \text{電荷量} \ln \\ \Lambda: \text{クーロ対数, } m_e: \text{電子質量} \end{array} \right]$

今回のパラメータではセパレータ中を電子が
通過する際の電子のエネルギーロスは
1.31[eV]

Simulation results (parameter study)



プラズマセパレータの位置を変えたときの加速された電子バンチの平均エネルギー(左図), エミッタンスの変化(右図)