

高強度レーザーと薄膜との 数ピコ秒の相互作用に関するPICシミュレーション

Natsumi IWATA¹,

Akifumi Yogo¹, Kunioki Mima², H.Nagatomo¹, Y. Sentoku¹,
H. Nishimura¹ and H. Azechi¹

¹Institute of Laser Engineering, Osaka Univ., Japan,

²The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, Japan

キロジュールクラス高強度レーザーの発展により 開拓される新しいレーザープラズマ相互作用領域

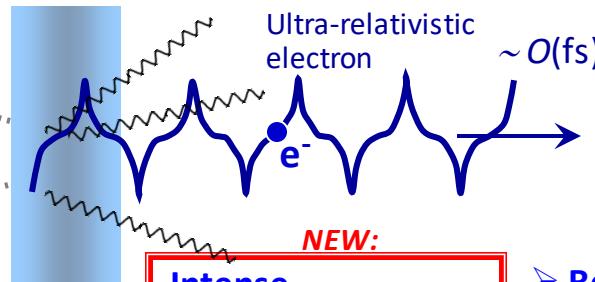
kJ laser
energy

1) femtosecond pulse, **ultraintense** laser (J-KAREN-P, ELI)

Intensity
 $\rightarrow 10^{21-23} \text{ W/cm}^2$

Short pulse
 $\rightarrow 10-50 \text{ fs}$
($\text{fs} = 10^{-15} \text{ s}$)

Small spot size
 $\rightarrow \text{several } \mu\text{m}$



NEW:
Intense
gamma-ray radiation

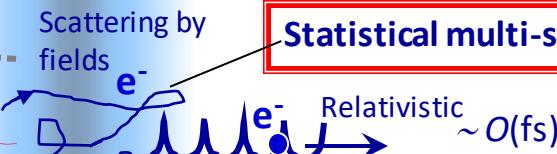
- Relativistic pair plasma creation
- Radiation friction

2) **multi-picosecond long pulse**, intense laser

Intensity
 $\rightarrow 10^{18-19} \text{ W/cm}^2$

Long pulse
 $\rightarrow 1-30 \text{ ps}$
($\text{ps} = 10^{-12} \text{ s}$)

Large spot size
 $\rightarrow 10-100 \mu\text{m}$



NEW:
Statistical multi-scattering effect

NEW:
ion fluid
motion

$\sim O(\text{ps})$ ➤ Plasma expansion $\sim O(10 \mu\text{m})$

Quasi 1D long-time interaction

kJ, high contrast, large spot size, picosecond laser LFEX

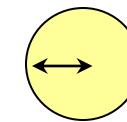
■ LFEX laser (ILE, Osaka Univ.)



1 kJ on target (by 4 beams)

Pulse duration: **1.5 ps** FWHM (each beam)

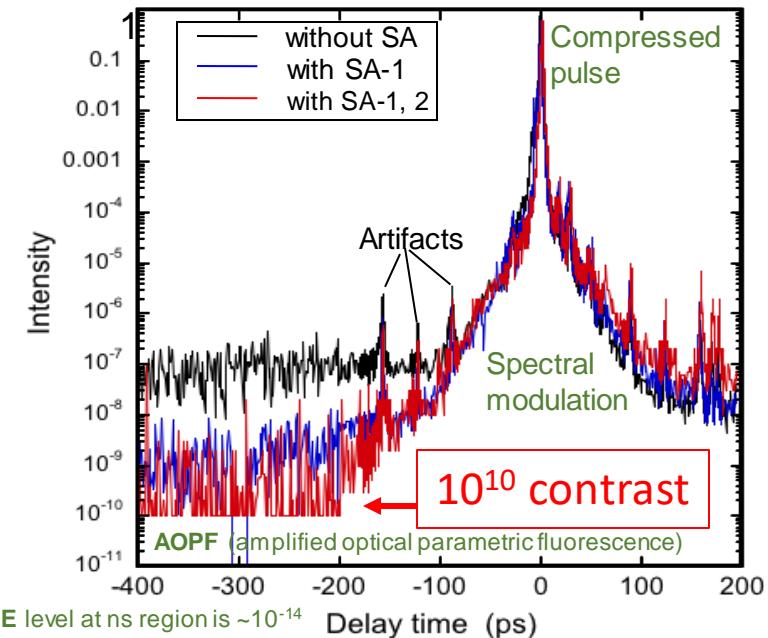
Spot size: **70 μm** FWHM



~ 5 ps at the sound velocity of $T_e = 1 \text{ MeV}$

Intensity: $10^{18-19} \text{ W/cm}^2$

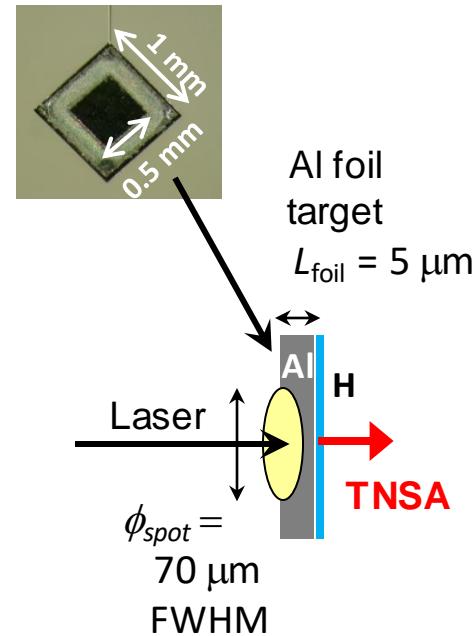
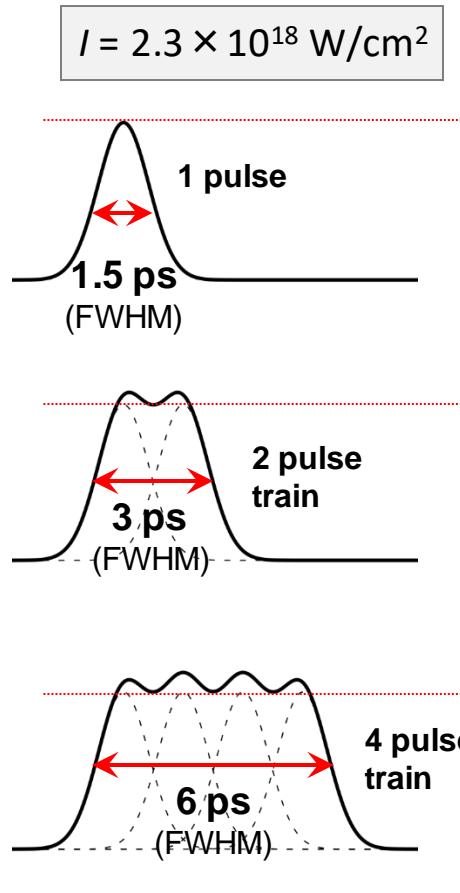
Pulse contrast measured at the front end



LFEXによるイオン加速実験

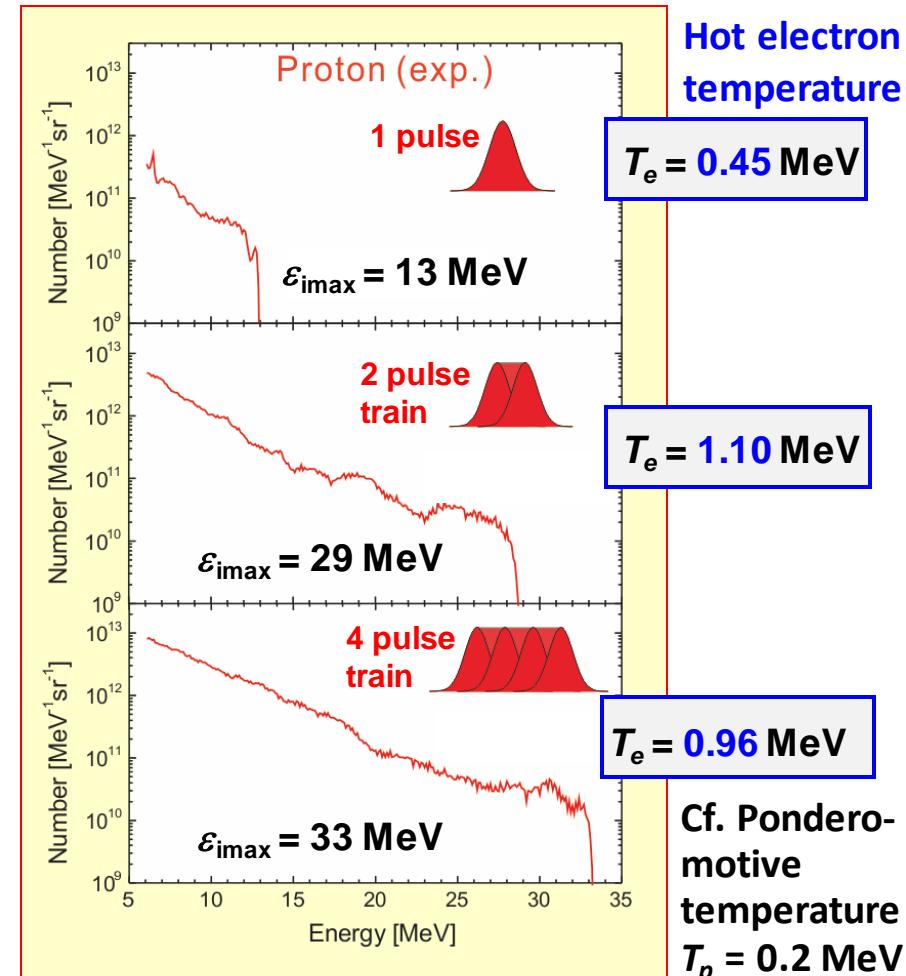
“Boosting laser-ion acceleration with multi-picosecond pulses”

■ Ion acceleration experiment using 1.5 - 6 ps
laser pulses by LFEX laser

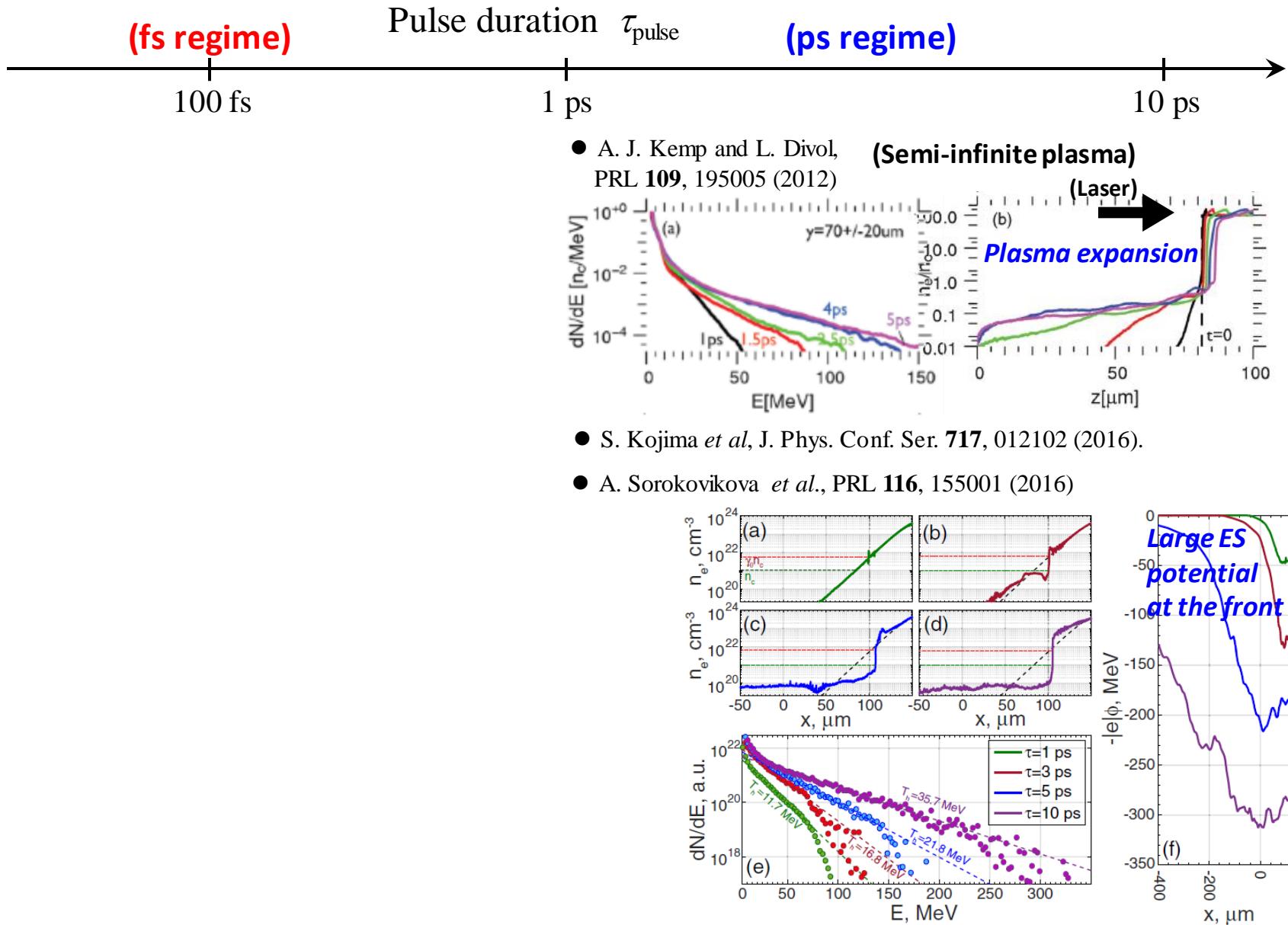


A. Yogo, K. Mima, N. Iwata *et al.*, accepted for Sci. Rep.

- The maximum energy of TNSA protons was enhanced by more than 2 times as we extend the pulse duration.



Ponderomotive スケーリングを超えるレーザープラズマ電子加熱



Ponderomotive スケーリングを超えるレーザープラズマ電子加熱

(fs regime)

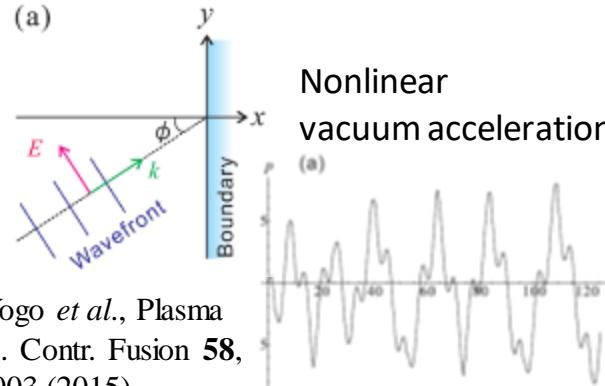
Pulse duration τ_{pulse}

(ps regime)

10 ps

1 ps

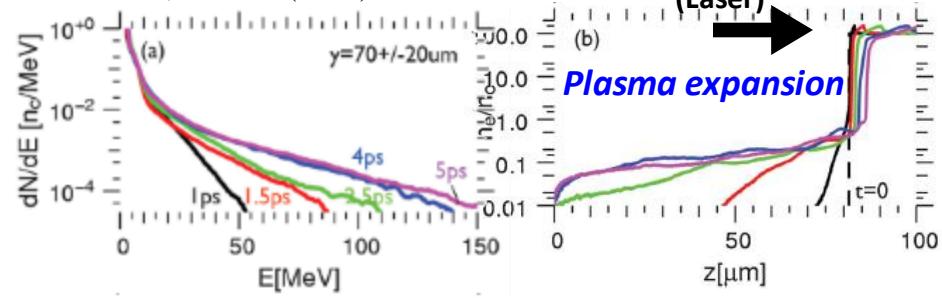
100 fs



- A. J. Kemp and L. Divol, PRL **109**, 195005 (2012)

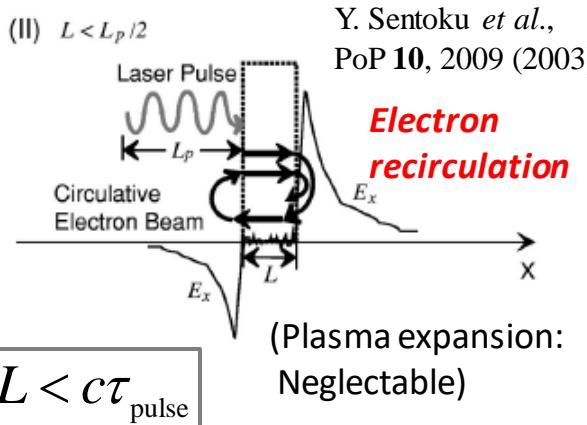
(Semi-infinite plasma)

(Laser)



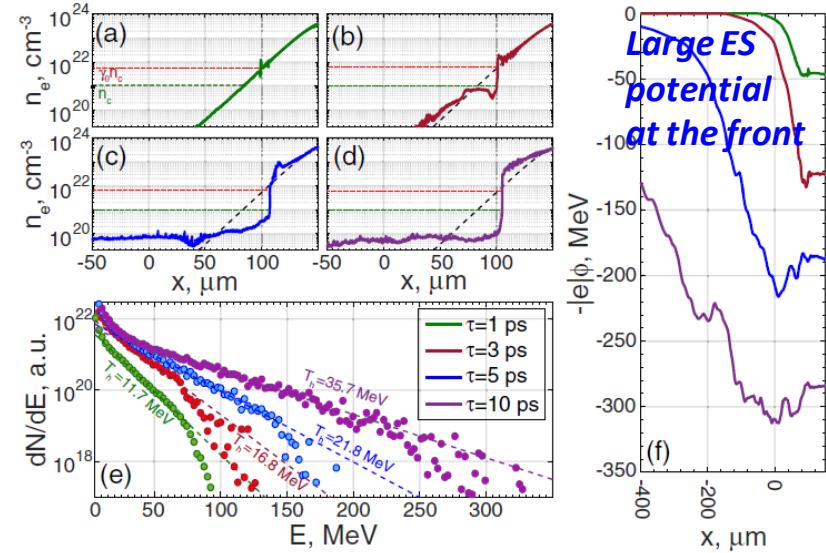
- S. Kojima *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **717**, 012102 (2016).

- A. Sorokovikova *et al.*, PRL **116**, 155001 (2016)



高温電子密度の増加

→効率的なTNSA イオン加速 A. J. Mackinnon *et al.*, PRL **88**, 215006 (2002)



Ponderomotive スケーリングを超えるレーザープラズマ電子加熱

(fs regime)

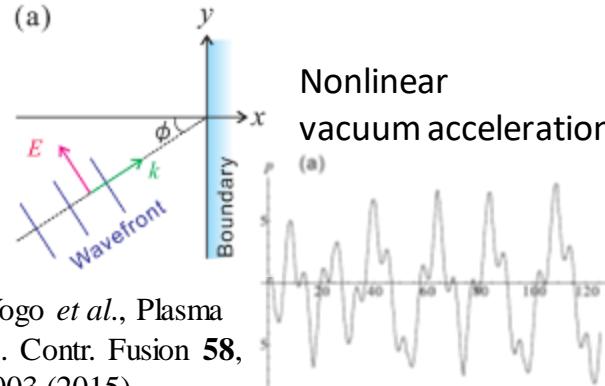
Pulse duration τ_{pulse}

(ps regime)

100 fs

1 ps

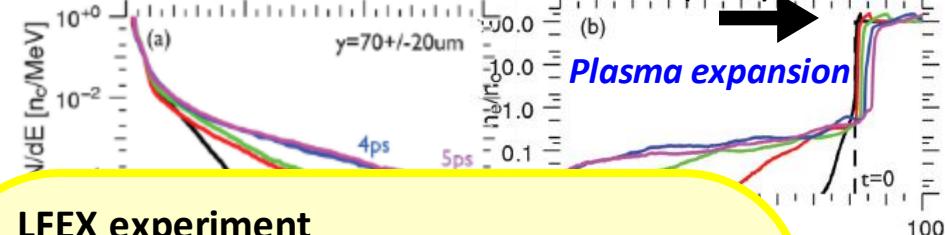
10 ps



- A. J. Kemp and L. Divol, PRL **109**, 195005 (2012)

(Semi-infinite plasma)

(Laser)



LFEX experiment

 L

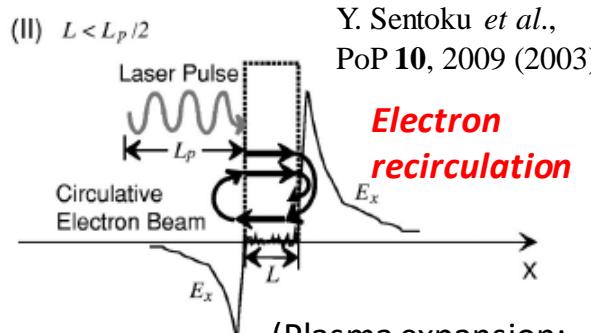
Laser

Plasma expansion

Electron recirculation

Ion acceleration

$$2L < c\tau_{\text{pulse}}$$



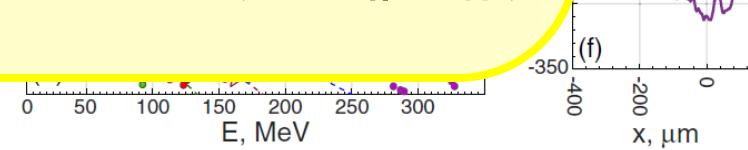
$$2L < c\tau_{\text{pulse}}$$

高温電子密度の増加

→効率的なTNSA イオン加速

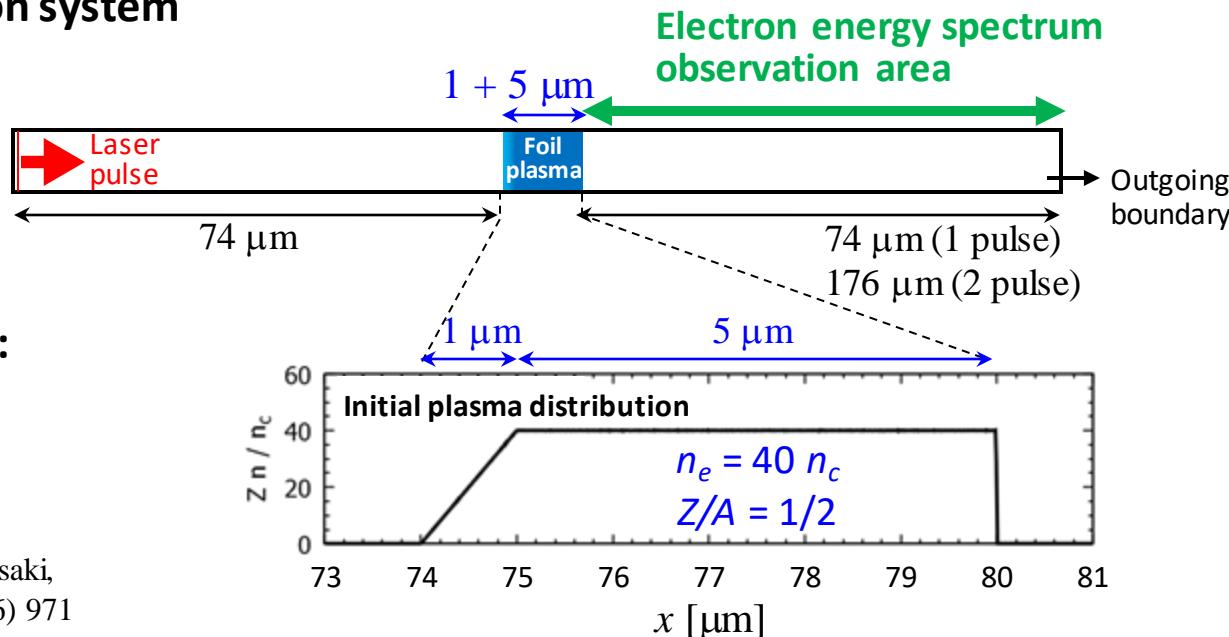
A. J. Mackinnon *et al.*, PRL **88**, 215006 (2002)

電子周回運動を伴う
マルチピコ秒レーザープラズマ相互作用



マルチピコ秒高強度レーザーと薄膜 plasmaとの一次元相互作用 PICシミュレーション

■ 1D PIC simulation system



■ Simulation code:

EPIC3D [1]

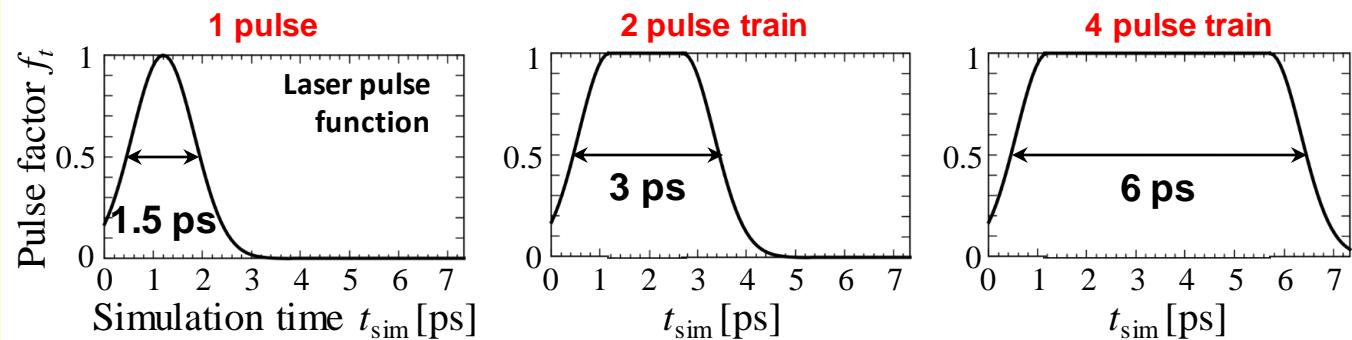
(collision = off,
ionization = off)

[1] Y. Kishimoto and T. Masaki,
J. Plasma Phys. **72** (2006) 971

■ Laser wavelength
 $\lambda_L = 1.05 \mu\text{m}$

■ Peak normalized amplitude
 $a_0 = 1.42$

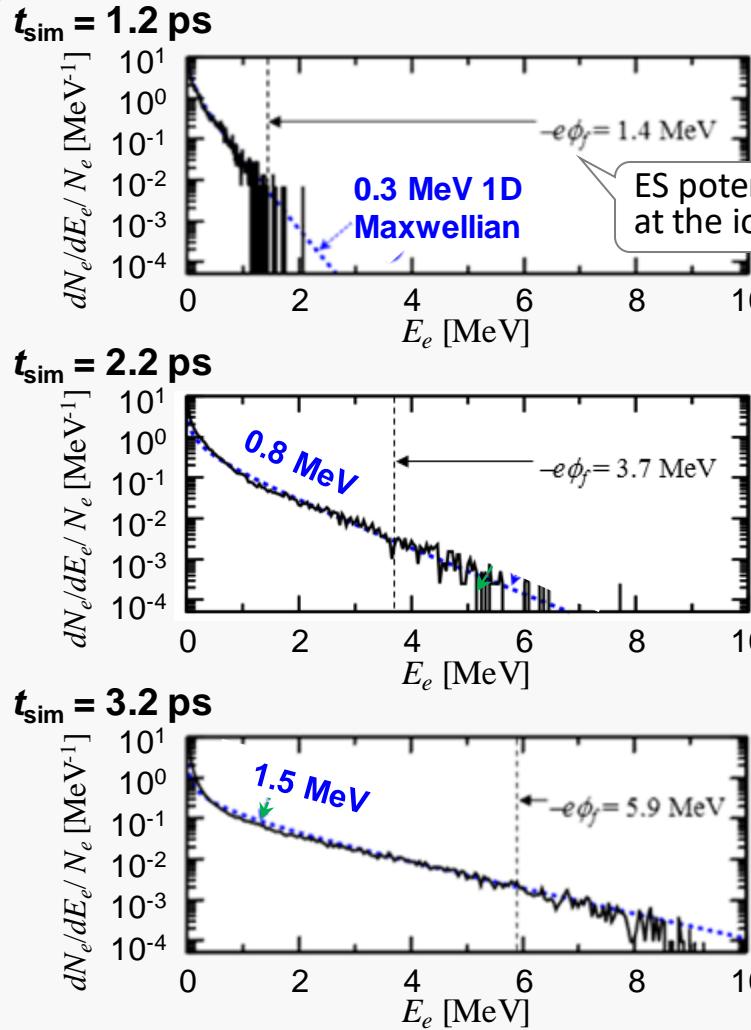
↔ Peak intensity
 $2.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$



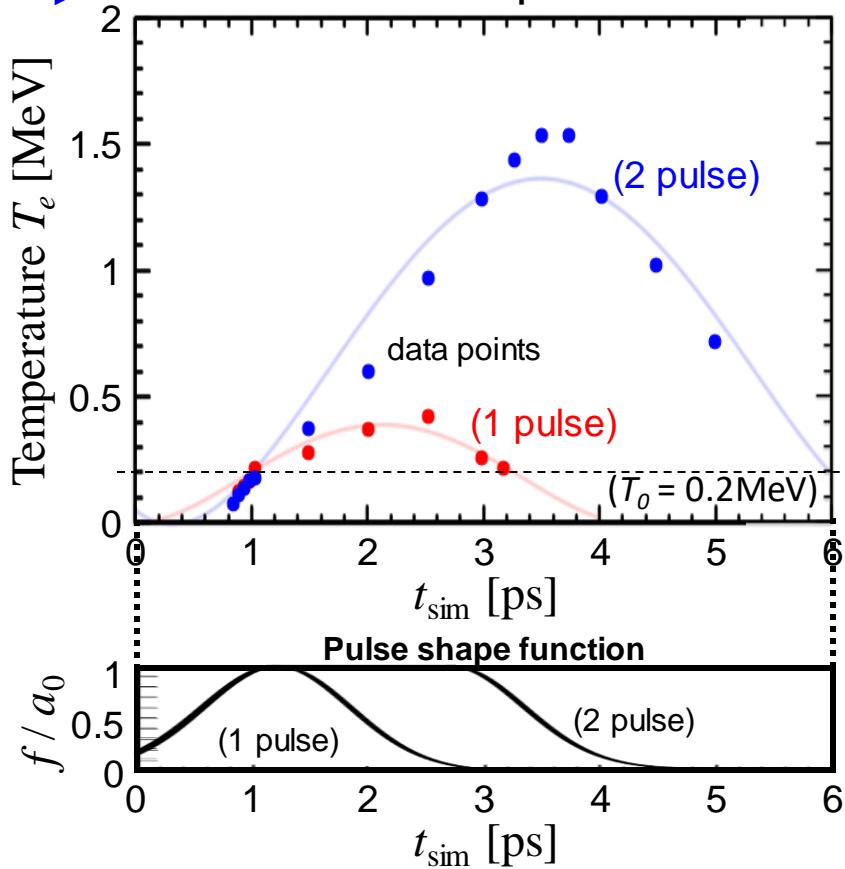
Numerical simulations are performed on the supercomputer of ACCMS, Kyoto Univ. and on LPI cluster system at Osaka Univ.

PICシミュレーションで得られた 電子スペクトルと電子温度時間発展

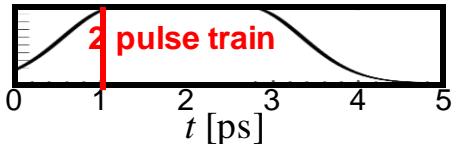
(2 pulse) Electron energy spectra at each time



Electron temperature



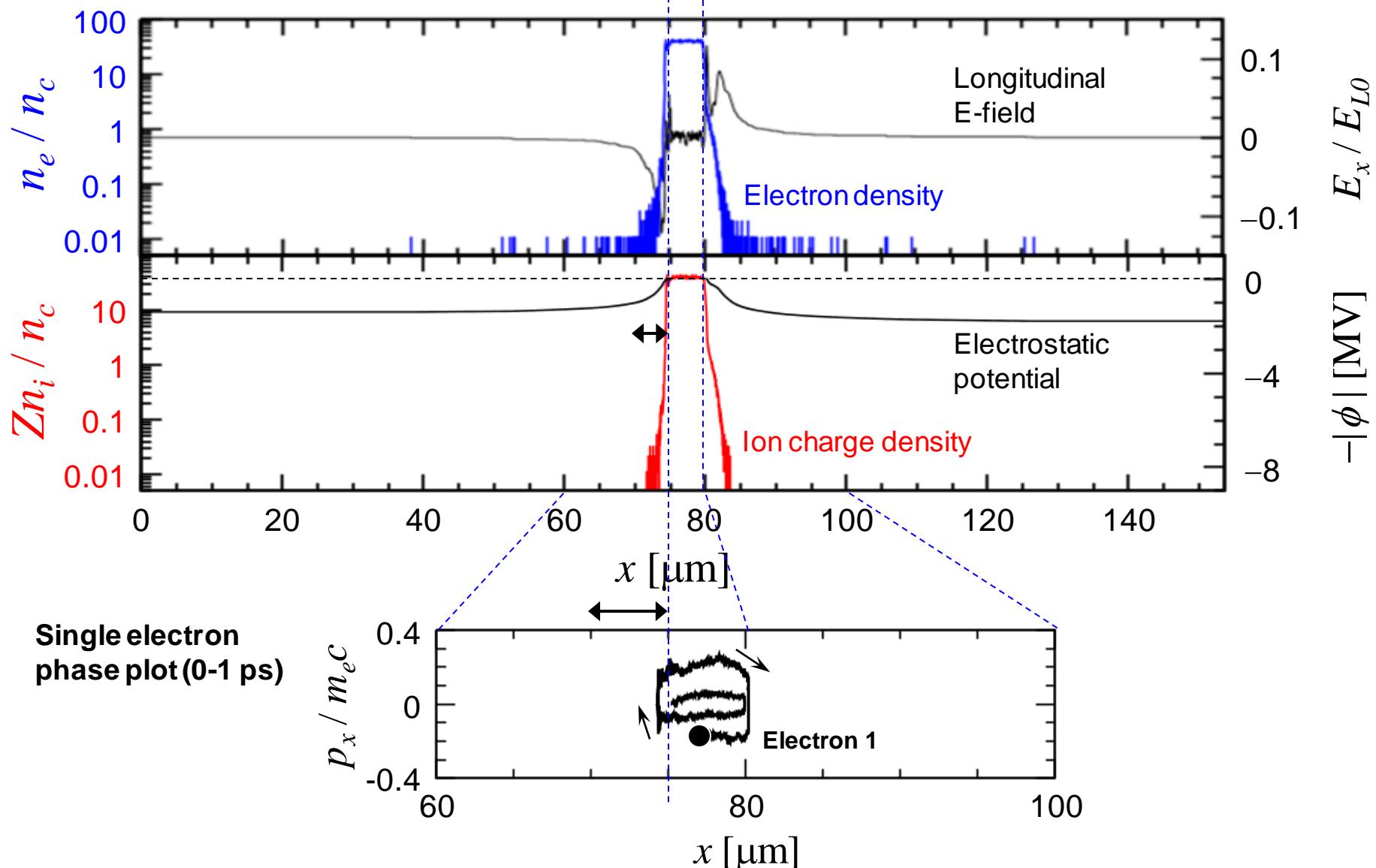
- In obtaining T_e , we assumed 1D Maxwellian to the spectrum below the ES potential energy at the ion expansion front.

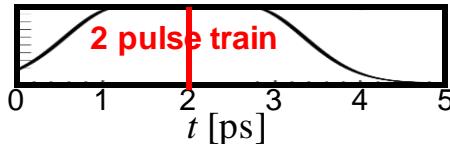


プラズマ膨張の様子と電子の位相図(2パルスの場合)

$t = 1 \text{ ps}$

■ Snap shot of plasma densities and ES fields

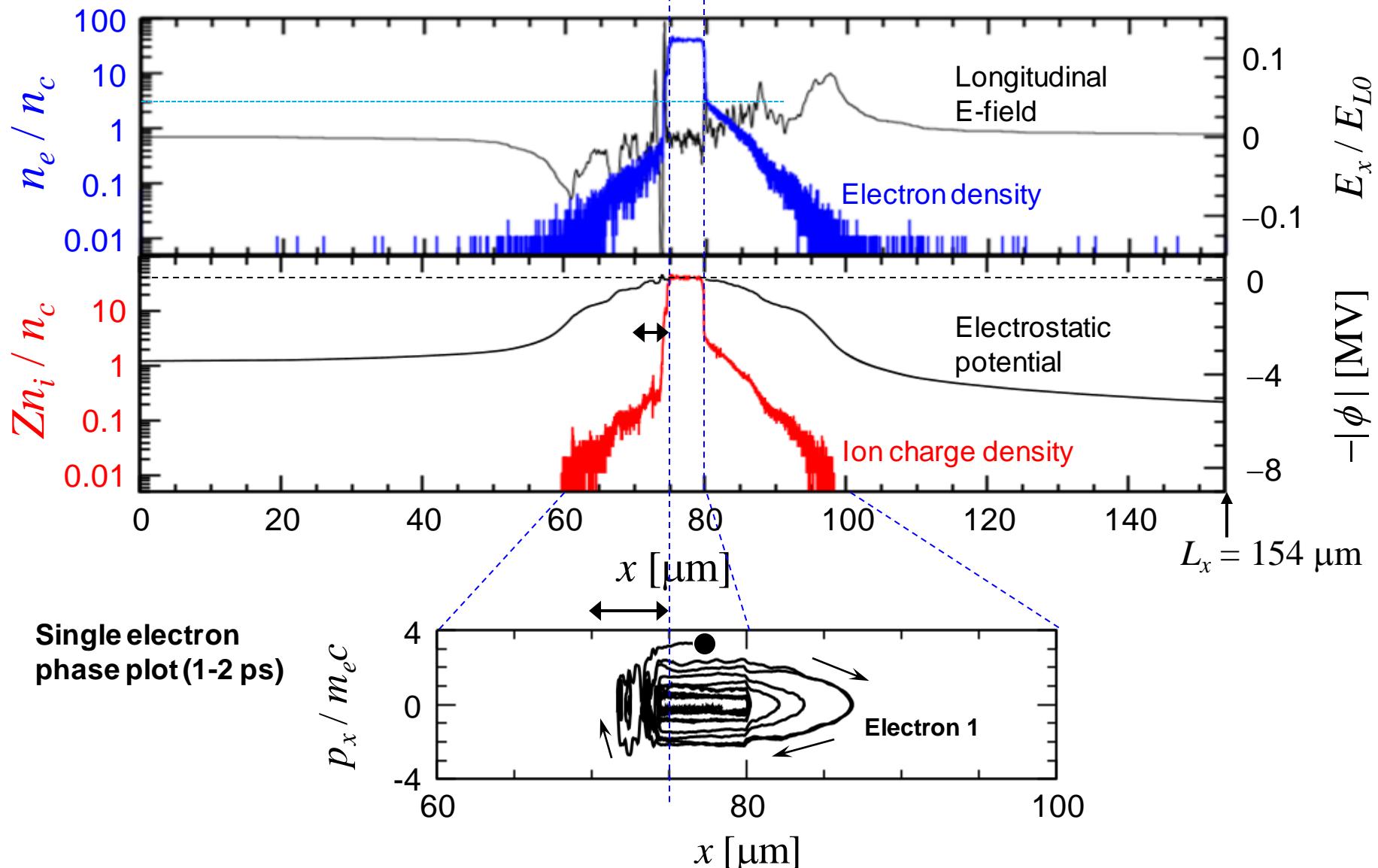


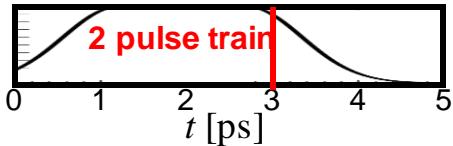


プラズマ膨張の様子と電子の位相図(2パルスの場合)

$t = 2 \text{ ps}$

■ Snap shot of plasma densities and ES fields

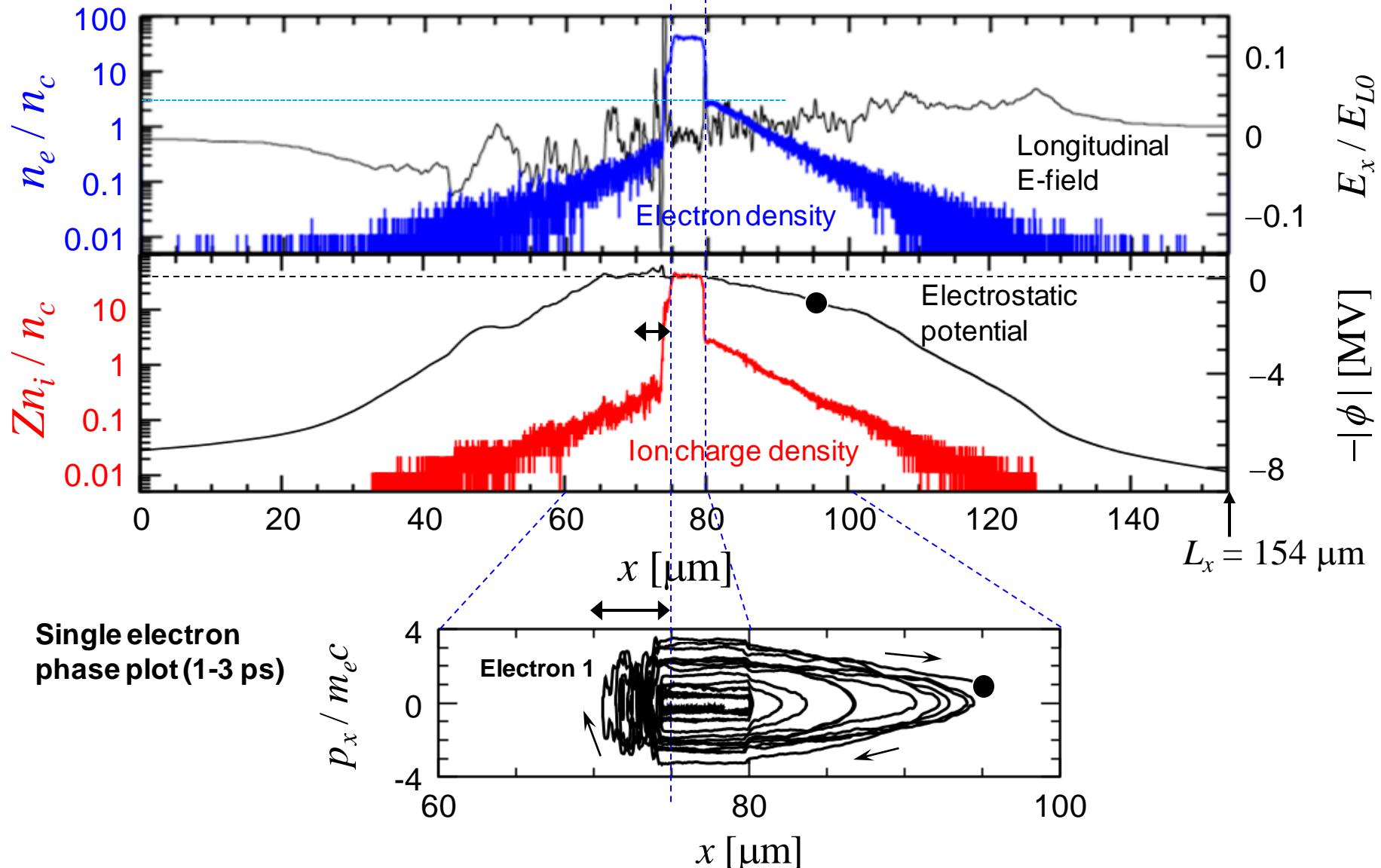




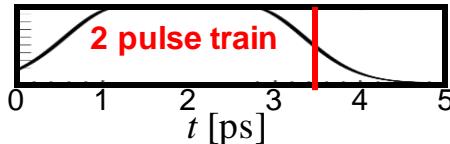
プラズマ膨張の様子と電子の位相図(2パルスの場合)

$t = 3 \text{ ps}$

■ Snap shot of plasma densities and ES fields

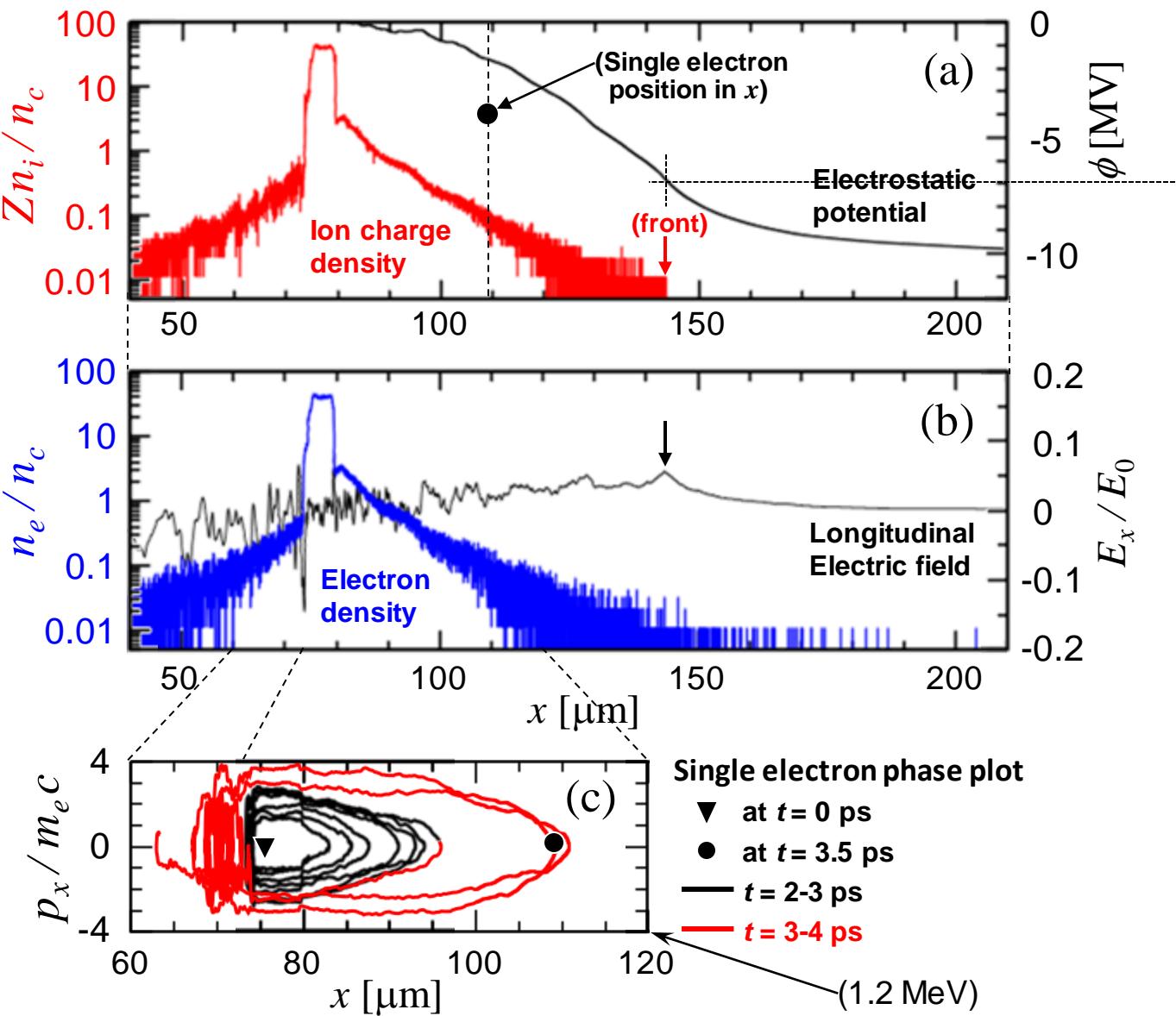


Single electron
phase plot (1-3 ps)



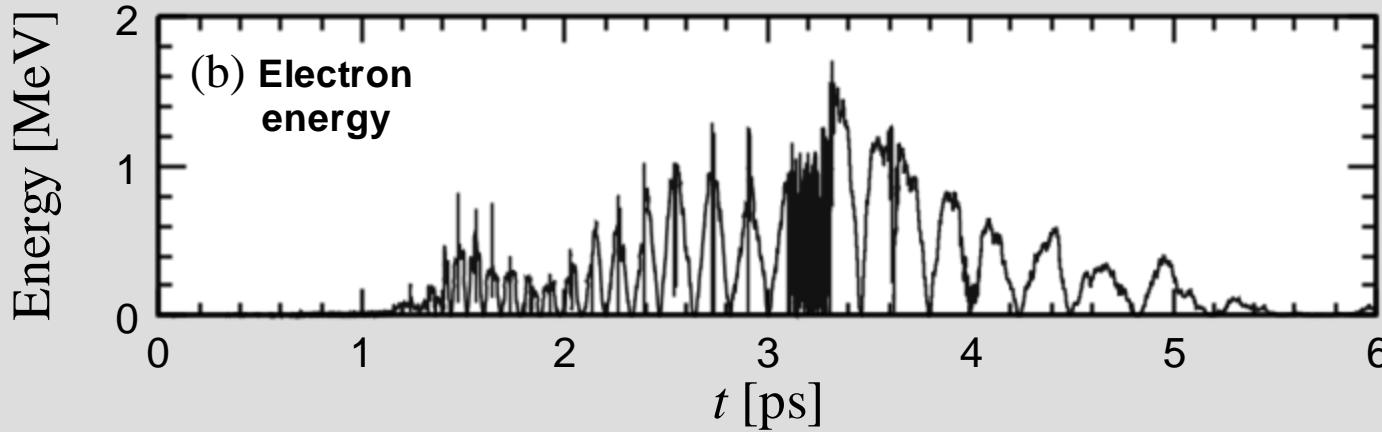
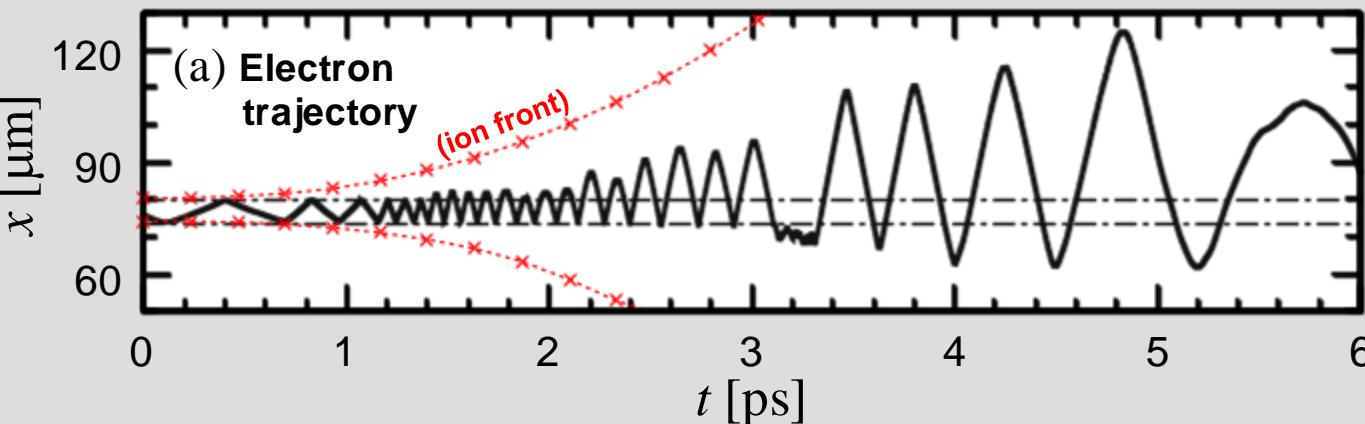
プラズマ膨張の様子と電子の位相図(2パルスの場合)

Snap shot of plasma densities and ES fields ($t = 3.5$ ps)



- ◆ イオンフロント位置での静電(シース)ポテンシャルは7 MVに及ぶ。
→ 運動エネルギーが7 MeV以下の電子はシース場に閉じ込められる。
- ◆ イオンフロントは3.5 psの間に約60 μm 進展。電子は $x = 200 \mu\text{m}$ を超えて分布。
- ◆ 電子は薄膜+100 μm に及ぶコロナプラズマ中を周回しながらエネルギーを増加。
 $t = 3-4$ psにおいてレーザー照射面で電磁場からの強いキックを受け、周回の振動距離が急激に増加。

プラズマ中の電子軌道と電子エネルギー（2パルスの場合）



- イオンフロントの進展、電子エネルギーの発展と共に電子の周回振幅が増大。

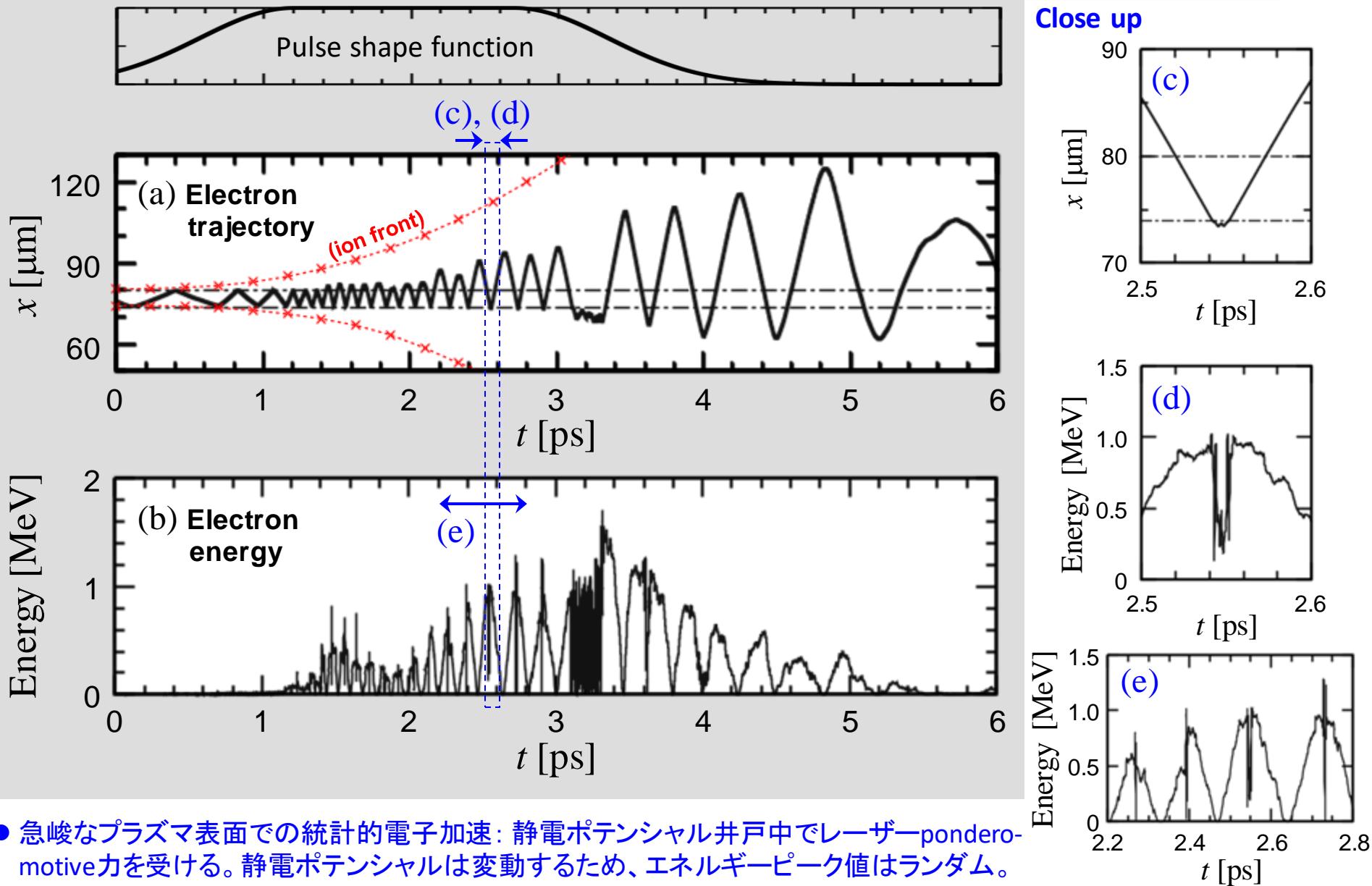
- レーザーピーク時間中、電子エネルギーのピーク値はランダムに変動。

← 電子がレーザー照射面に戻ってきたときの位相のランダム性による。

- 電子エネルギー增加
→ 周回振動数 増加

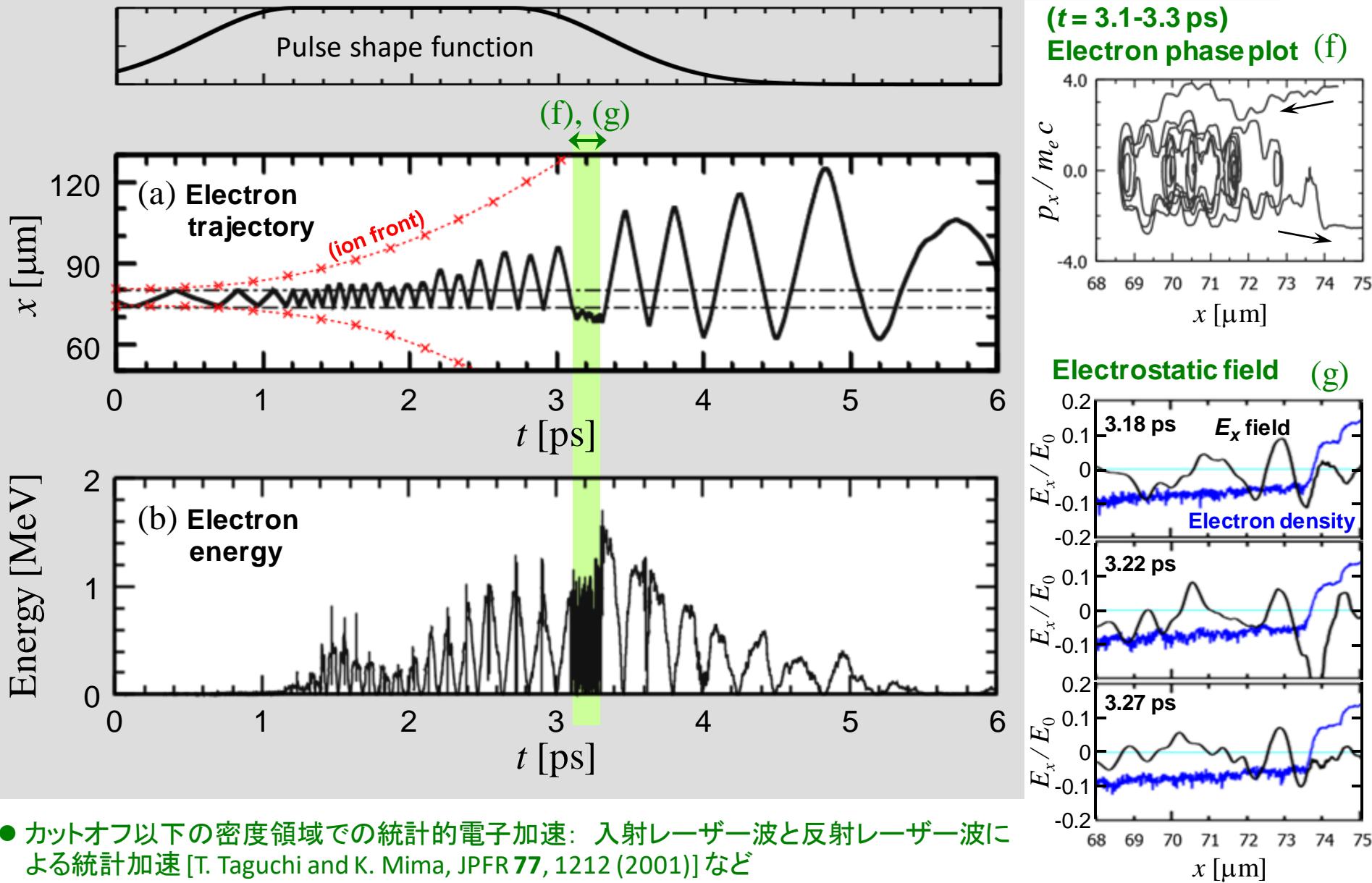
周回振幅 増加
→ 周回振動数 減少

プラズマ中の電子軌道と電子エネルギー(2パルスの場合)



- 急峻なプラズマ表面での統計的電子加速：静電ポテンシャル井戸中でレーザー ponderomotive力を受ける。静電ポテンシャルは変動するため、エネルギーピーク値はランダム。

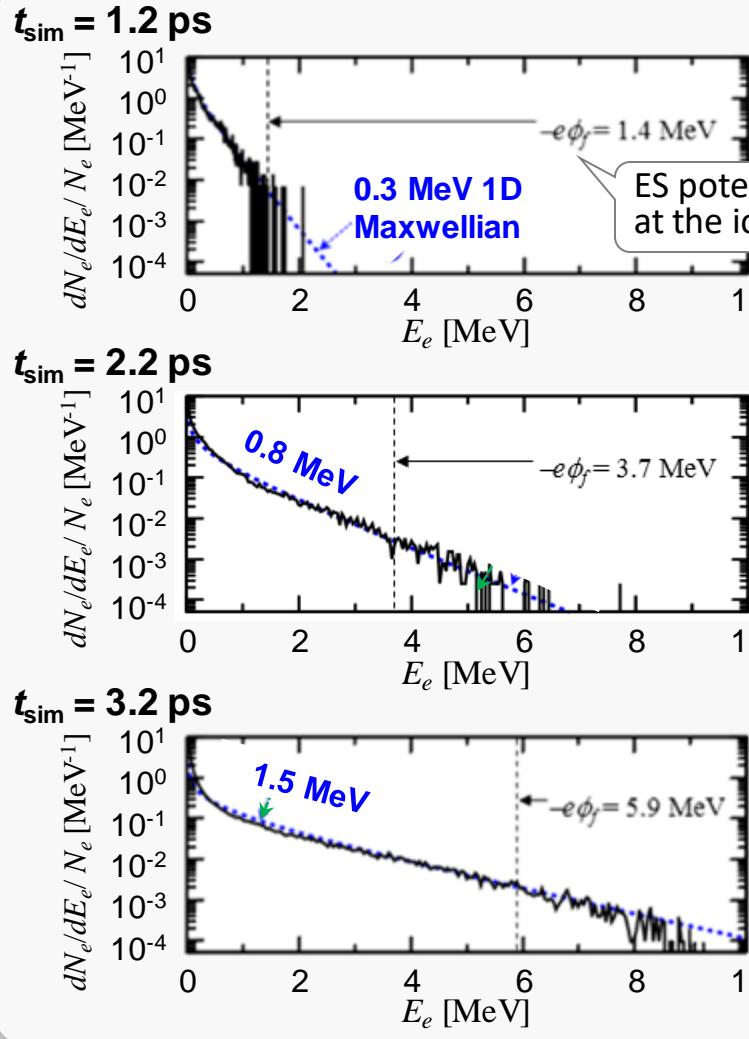
プラズマ中の電子軌道と電子エネルギー（2パルスの場合）



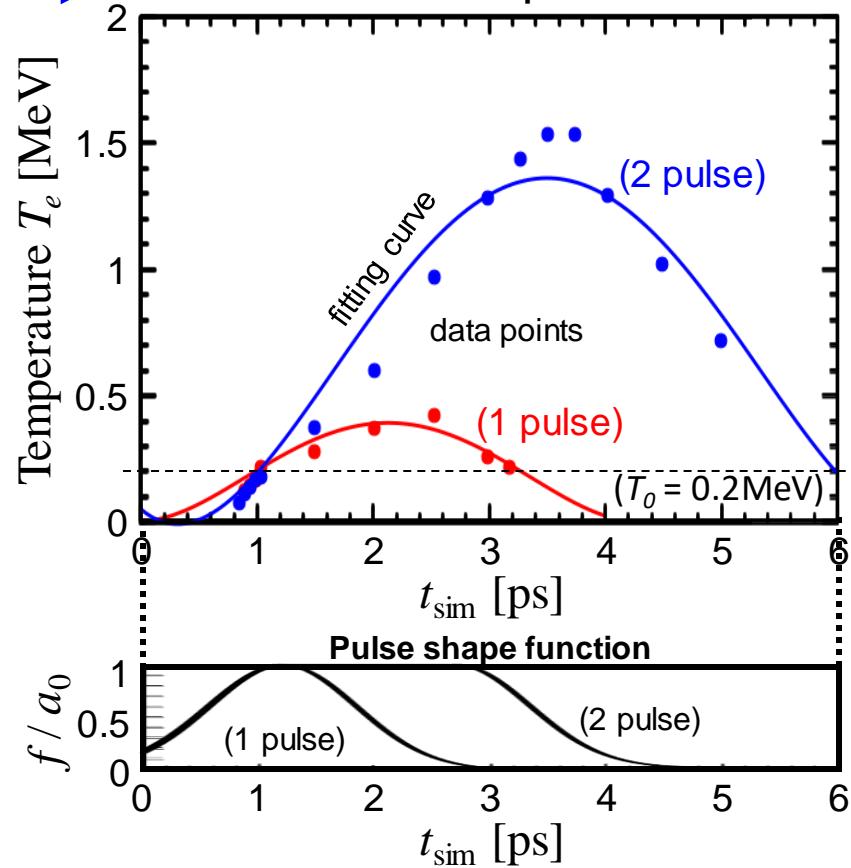
- カットオフ以下の密度領域での統計的電子加速：入射レーザー波と反射レーザー波による統計加速 [T. Taguchi and K. Mima, JPPR **77**, 1212 (2001)] など

PICシミュレーションにより得られた 数ピコ秒レーザー薄膜相互作用における電子温度時間発展

(2 pulse) Electron energy spectra at each time



Electron temperature



- Fitting function of electron temperature :

$$T_e = T_0 \left[1 + \alpha - \alpha \left(1 - \frac{t}{t_{\max}} \right)^2 \right]^2; \quad \alpha = \sqrt{\frac{T_{\max}}{T_0}} - 1,$$

T_{\max} : Maximum temperature,
 t_{\max} : Time at which T_e takes the maximum value.

- In obtaining T_e , we assumed 1D Maxwellian to the spectrum below the ES potential energy at the ion expansion front.

電子温度が変化する場合の 一次元プラズマ膨張理論モデルの構築

■ Base equations

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial n_i}{\partial t} \Big|_x + n_i \frac{\partial v_i}{\partial x} \Big|_t + v_i \frac{\partial n_i}{\partial x} \Big|_t = 0 \quad \text{Ion continuity eq.} \\ \\ \frac{\partial v_i}{\partial t} \Big|_x + v_i \frac{\partial v_i}{\partial x} \Big|_t = - \frac{Ze}{M_i} \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_t \quad \text{Ion eq. of motion} \\ \\ 0 = en_e \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_t - \frac{\partial}{\partial x} (n_e T_e) \Big|_t \quad \text{e- eq. of motion; steady state} \\ \qquad \qquad \qquad \longrightarrow (\text{Boltzmann dis.}) \\ \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_t = 4\pi e (n_e - Zn_i) \quad \text{Poisson eq.} \end{array} \right.$$

■ Electron temperature has a time dependence

$$T_e = T_e(t)$$

→ Sound velocity C_s
also depends on time: $C_s(t) = \sqrt{\frac{ZT_e(t)}{M_i}}$

→ Define a new variable ξ

$$\xi \equiv \frac{x}{R(t)}; \quad R(t) = \int_0^t C_s(t) dt$$

Cf. Conventional self-similar variable $\xi = \frac{x}{C_s t}$; $C_s = \text{const.}$

→ coordinate transformation $(x, t) \mapsto (\xi, t)$

■ Assumption (approximation)

$$\frac{R}{C_s} \frac{\dot{T}_e}{T_e} = O(\varepsilon) \ll 1$$

Time evolution of temperature is slow compared with the time scale of plasma expansion.

Perturbation expansion based on the smallness parameter ε

$$\begin{cases} v_i(\xi, t) = v_i^{(0)} + \varepsilon v_i^{(1)} + \dots \\ n_i(\xi, t) = n_i^{(0)} + \varepsilon n_i^{(1)} + \dots \\ \phi(\xi, t) = \phi^{(0)} + \varepsilon \phi^{(1)} + \dots \end{cases}$$

構築したモデルに基づき、 TNSAイオンの最大エネルギーの理論式を導出

■ Solution up to the 1st order of ε

Ion velocity

$$v_i^{(0+1)}(t, \xi) = C_s(t) \left(1 + \xi - \varepsilon \frac{b}{2} \xi \right)$$

Ion density

$$n_i^{(0+1)}(t, \xi) = n_{i0}(t) \exp\left(-\frac{e\phi^{(0+1)}}{T_e(t)}\right),$$

Electrostatic potential

$$e\phi^{(0+1)}(t, \xi) = -T_e(t) \xi \left(1 + \varepsilon \frac{b}{2} \right)$$

where

$$b(t) \equiv \frac{R\dot{C}_s}{C_s^2}$$

Time scale of plasma expansion / Time scale of temperature evolution

Front velocity of ions

$$v_f^{(0+1)} = \frac{2\dot{R}(1-b/2)}{(1+b/2)^2} \left(1 + b + \ln(R/\lambda_{D0}) \right)$$

1st order

Cf.

$$v_f^{(0)} = 2C_s \left[1 + \ln(R/\lambda_{D0}) \right] = 2C_s \left[1 + \ln(\omega_{pi0} t) \right]$$

0th order
(isothermal)

$$\begin{cases} \frac{dv_f}{dt} = \frac{Ze}{M} E_f & \text{Eq. of motion} \\ \varepsilon_{i\max} = \frac{1}{2} M v_f^2 & \text{Energy relation} \end{cases}$$

• **Electrostatic field at the front:**

$$E_f = \frac{2T_e}{e\lambda_{D0}} \frac{\Theta}{\sqrt{2e_N + R^2/\lambda_{D00}^2}}$$

where $e_N = \ln 1$,
 λ_{D00} : Debye length for $n_i = n_{i0}$
 and e- temperature $T(t=0) = T_0$,

■ Ion maximum energy

$$\varepsilon_{i\max} = 2ZT_0 \left(\int_0^\tau \frac{\Theta \tilde{T}_e(\tau')}{\sqrt{1 + \tilde{R}^2(\tau')}} d\tau' \right)^2$$

$$\Theta = \frac{1-b/2}{(1+b/2)^2} \left[1 - b + b \ln\left(\frac{R}{\lambda_{D0}}\right) \right]$$

For isothermal case, $\Theta = 1$

PICで得られた電子温度変化を用いたTNSA最大エネルギー理論値と実験、PICシミュレーションとの比較

Solution up to the 1st order of ϵ

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ion velocity} \\ v_i^{(0+1)}(t, \xi) = C_s(t) \left(1 + \xi - \epsilon \frac{b}{2} \xi \right) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ion density} \\ n_i^{(0+1)}(t, \xi) = n_{i0}(t) \exp \left(-\frac{e\phi^{(0+1)}}{T_e(t)} \right), \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Electrostatic potential} \\ e\phi^{(0+1)}(t, \xi) = -T_e(t) \xi \left(1 + \epsilon \frac{b}{2} \right) \end{array} \right.$$

where $b(t) \equiv \frac{R\dot{C}_s}{C_s^2}$

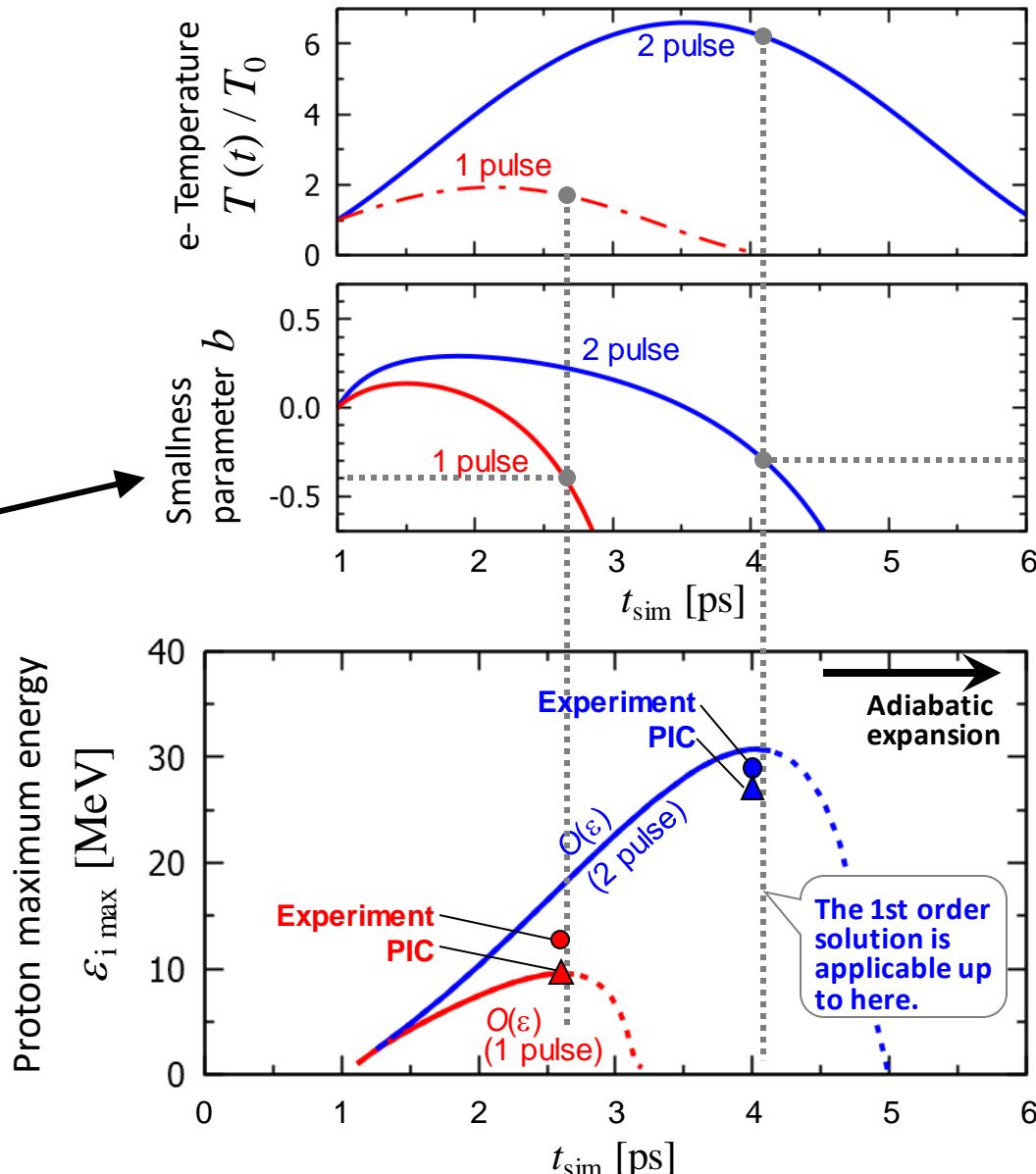
Time scale of plasma expansion / Time scale of temperature evolution

Ion maximum energy

$$\boxed{\epsilon_{i\max} = 2ZT_0 \left(\int_0^\tau \frac{\Theta \tilde{T}_e(\tau')}{\sqrt{1 + \tilde{R}^2(\tau')}} d\tau' \right)^2}$$

$$\Theta = \frac{1-b/2}{(1+b/2)^2} \left[1-b + b \ln \left(\frac{R}{\lambda_{D0}} \right) \right]$$

For isothermal case, $\Theta = 1$



Conclusion

- 数ピコ秒、大集光径、高強度パルスレーザーと薄膜プラズマとの相互作用における電子加速・加熱機構とTNSAイオン加速過程を、PIC粒子シミュレーションにより解析した。
- 薄膜プラズマは、数MVに及ぶシースポテンシャルを形成しながら膨張し、する。電子は裏面のシース場と表面のレーザー場の間にトラップされ、数ピコ秒の間、膨張プラズマの周りを周回する。
- 電子は周回運動をしながら統計的加速を受け、電子温度はピコ秒の時間スケールでponderomotiveスケーリングを上回って上昇する。
- シミュレーションで得た電子温度変化を基に、温度の時間依存性を取り入れた一次元プラズマ膨張TNSA理論モデルを構築し、実験、シミュレーションと良い一致を得た。

Future work

- 電子加速・加熱機構の詳細解析
周回運動と統計加速の関係、低密度領域でのエネルギー吸収、2次元効果など