

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 Mima**², **H. Nagatomo**¹, **Y. Sentoku**¹,
H. Nishimura¹ and **H. Azechi**¹

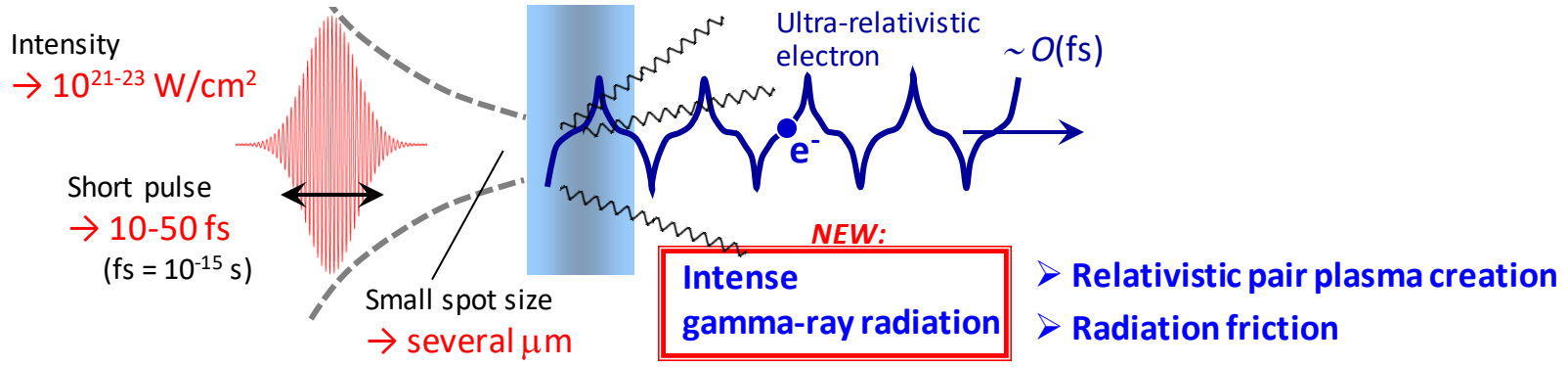
¹Institute of Laser Engineering, Osaka Univ., Japan,

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

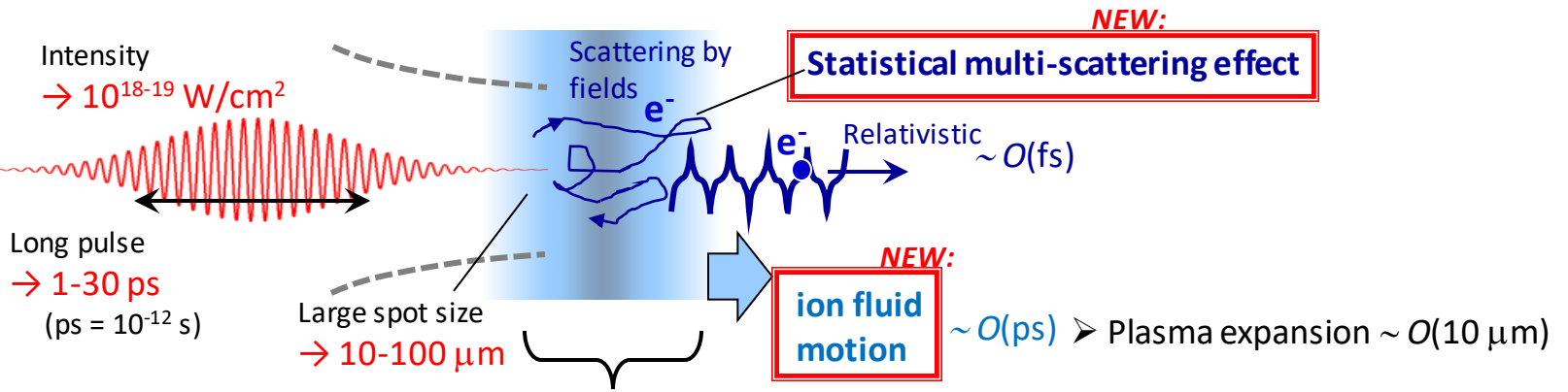
キロジュールクラス高強度レーザーの発展により 開拓される新しいレーザープラズマ相互作用領域

kJ laser energy
→

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



2) **multi-picosecond long pulse**, intense laser (LFEX, OMEGA-EP, NIF-ARC)



Quasi 1D long-time interaction

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

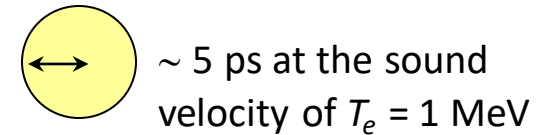
LFEX laser (ILE, Osaka Univ.)



1 kJ on target (by 4 beams)

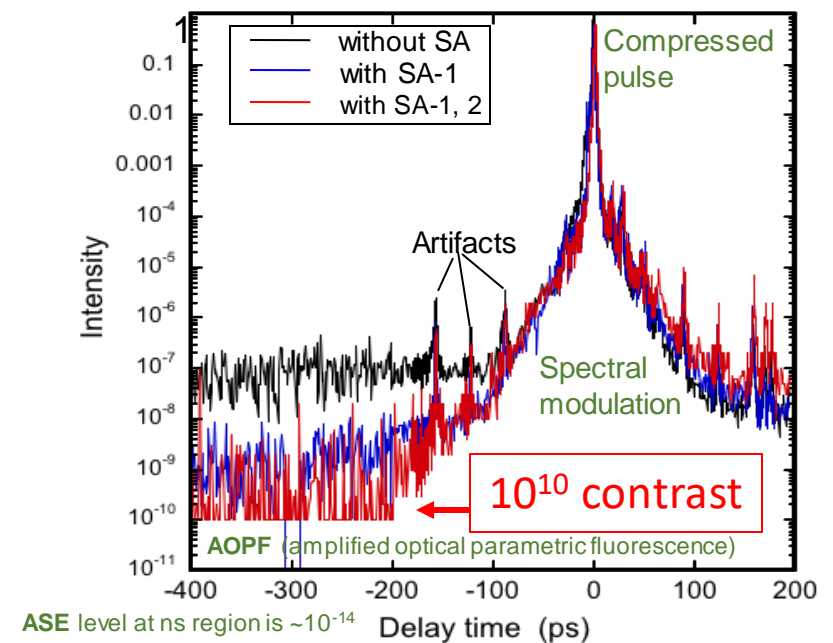
Pulse duration: **1.5 ps** FWHM (each beam)

Spot size: **70 μm** FWHM



Intensity: 10^{18-19} W/cm²

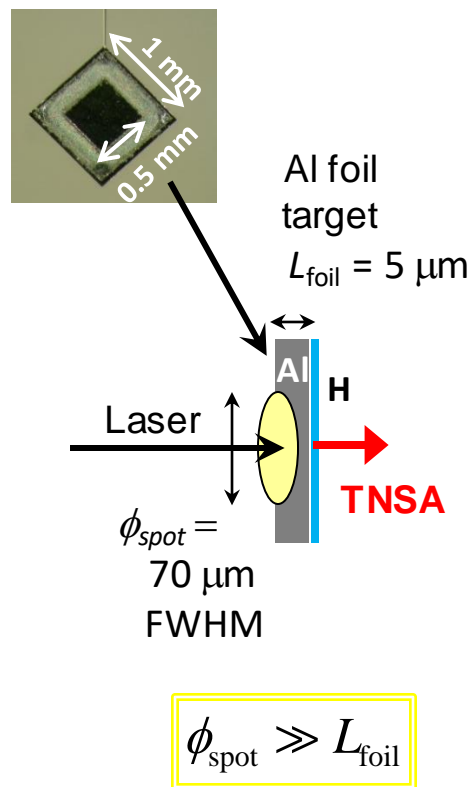
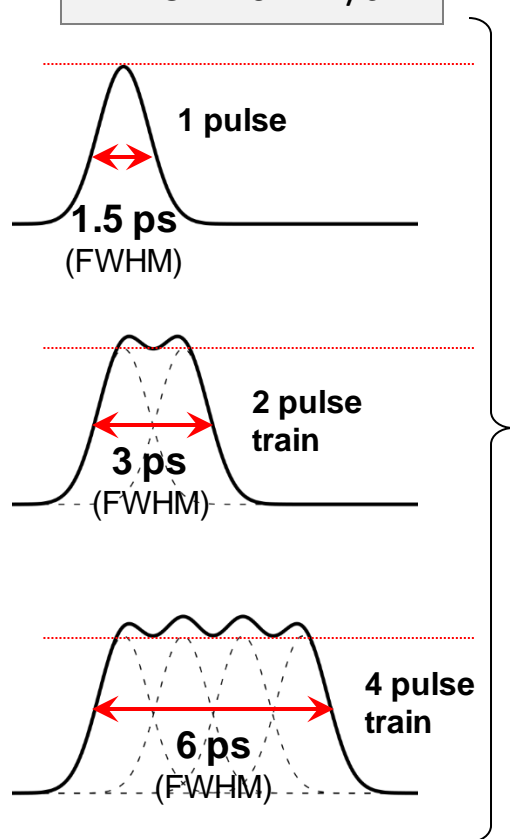
Pulse contrast measured at the front end



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

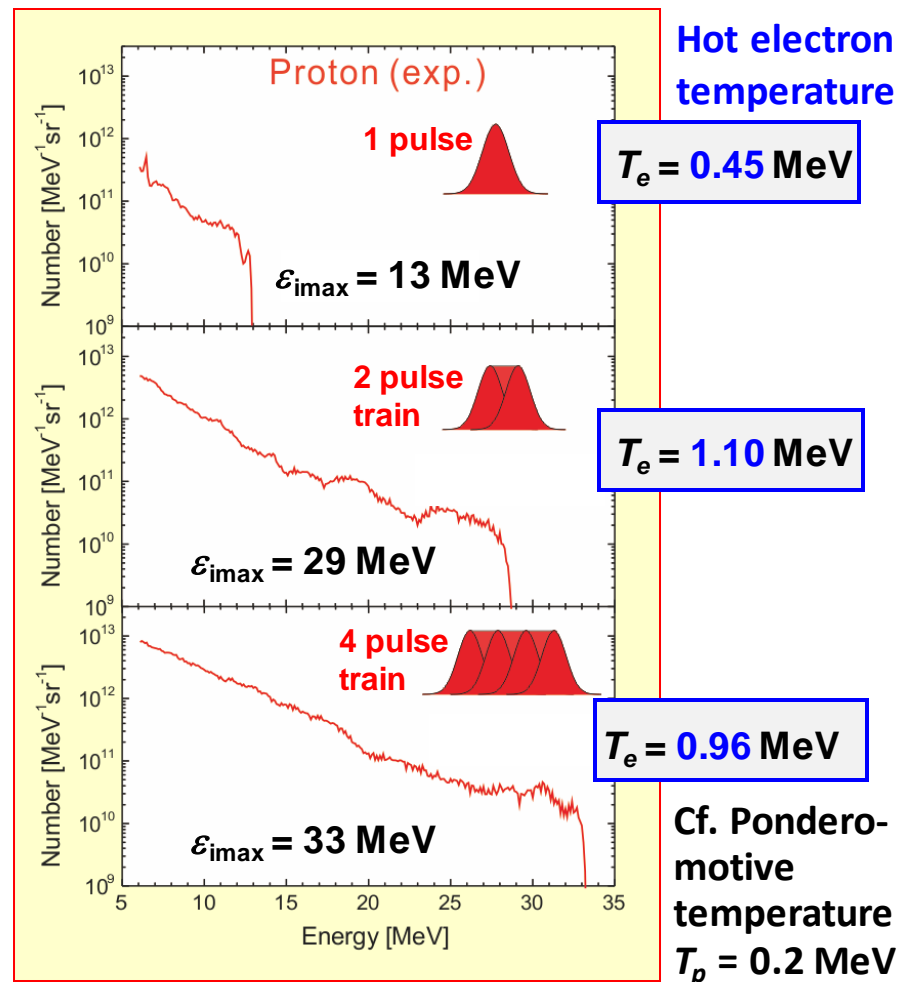
- Ion acceleration experiment using 1.5 - 6 ps laser pulses by LFEX laser

$$I = 2.3 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$$



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

(fs regime)

Pulse duration τ_{pulse}

(ps regime)

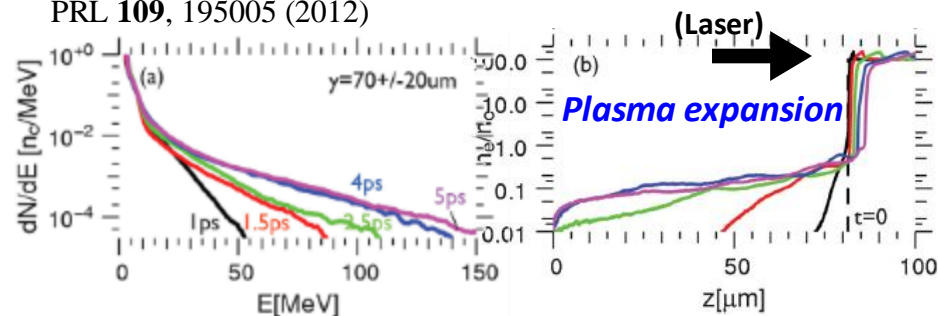
100 fs

1 ps

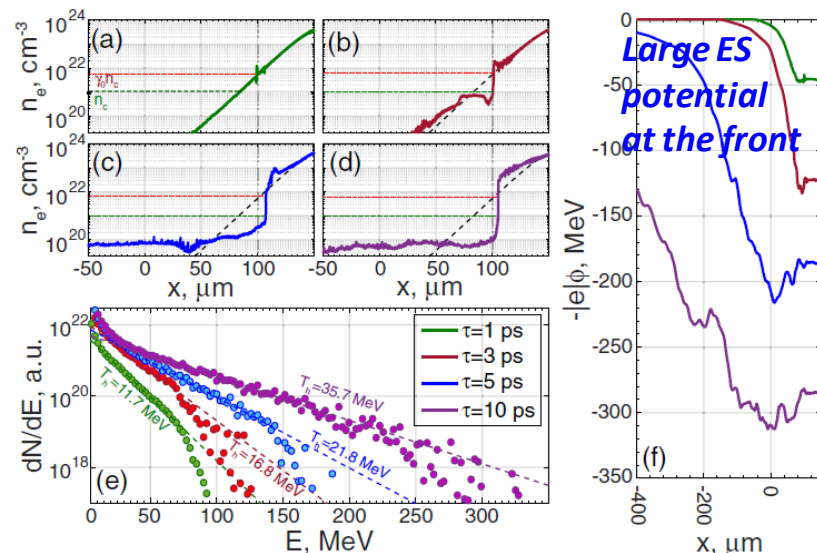
10 ps

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

(Semi-infinite plasma)



- S. Kojima *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **717**, 012102 (2016).
- A. Sorokovikova *et al.*, PRL **116**, 155001 (2016)



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)

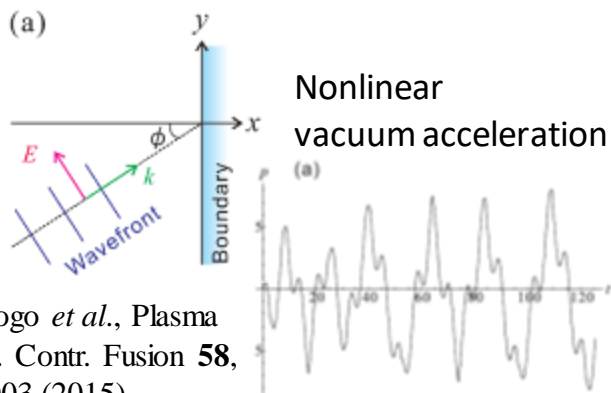
Pulse duration τ_{pulse}

(ps regime)

100 fs

1 ps

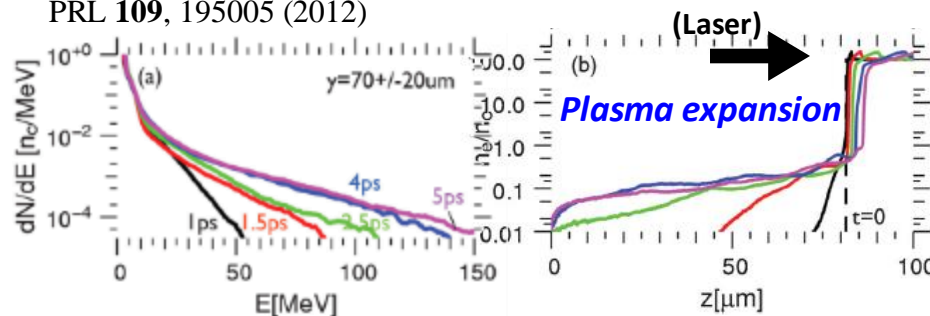
10 ps



A. Yogo *et al.*, Plasma Phys. Contr. Fusion **58**, 025003 (2015)

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

(Semi-infinite plasma)

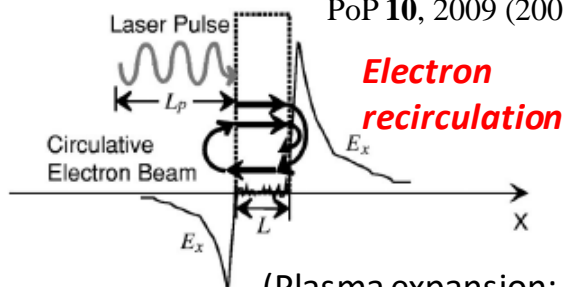


● S. Kojima *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **717**, 012102 (2016).

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

(II) $L < L_p/2$

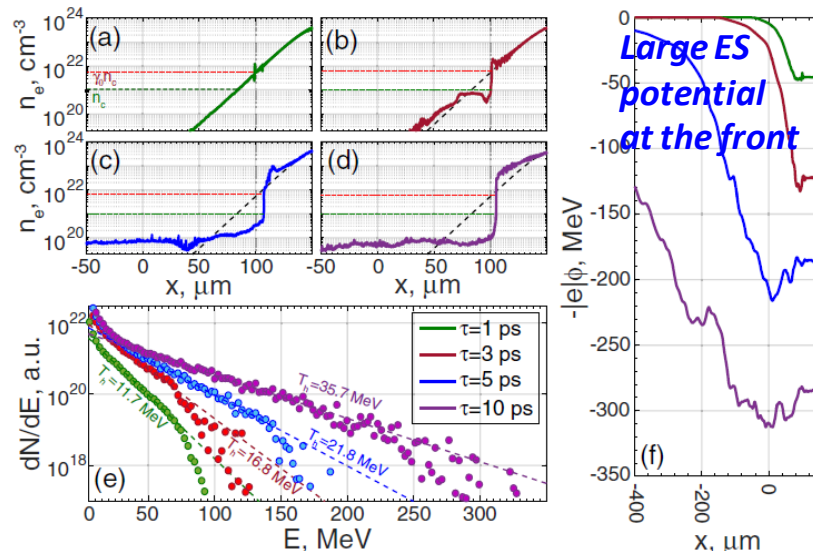
Y. Sentoku *et al.*, PoP **10**, 0909 (2003)



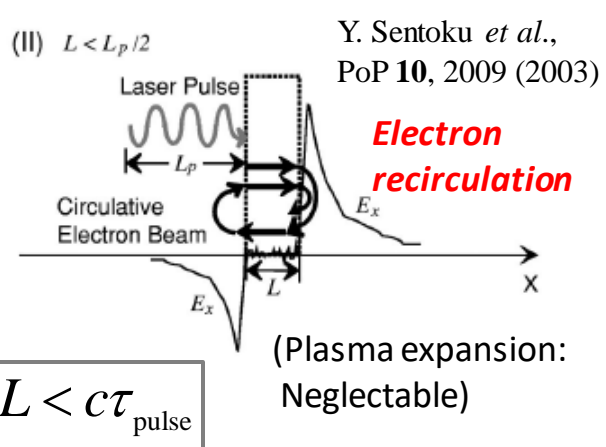
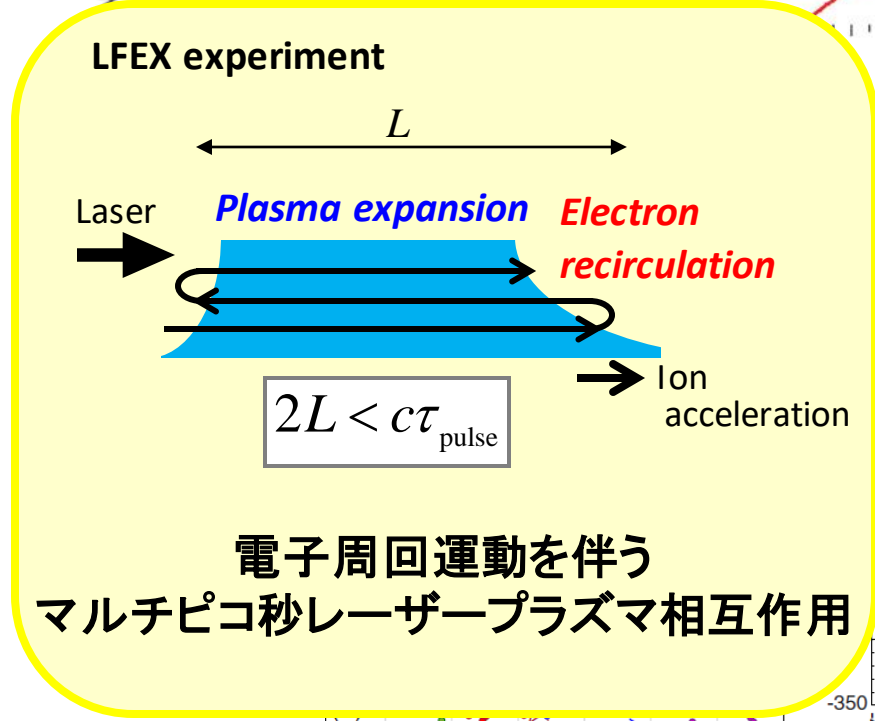
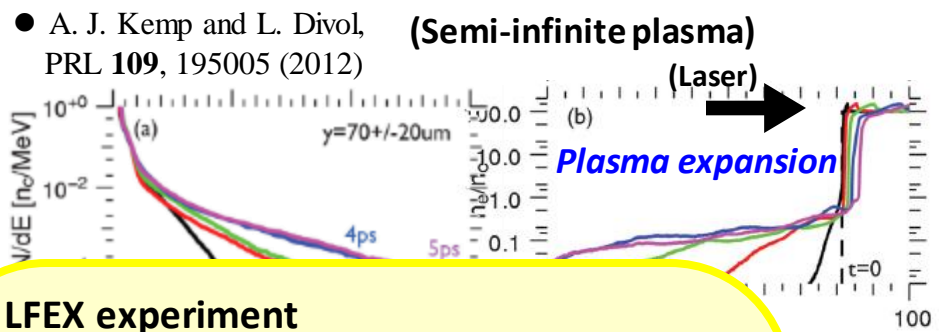
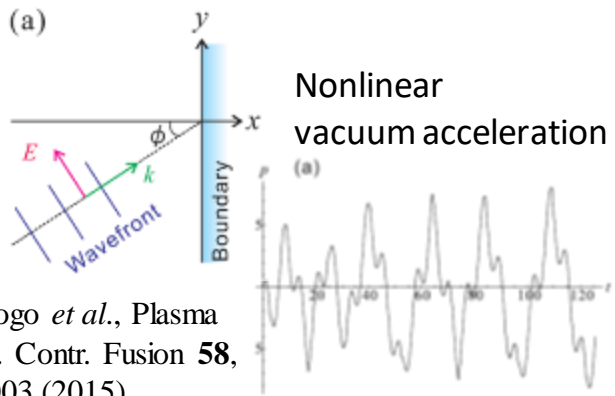
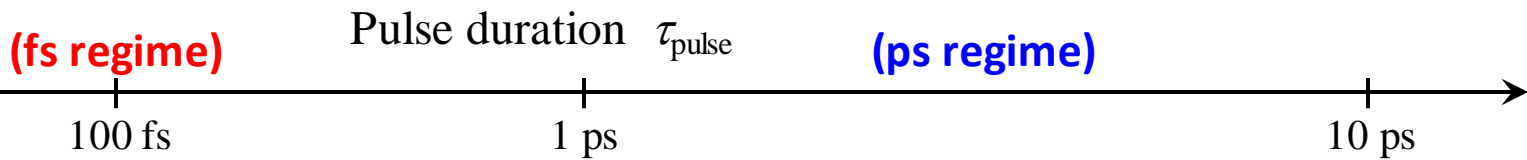
$$2L < c\tau_{\text{pulse}}$$

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)

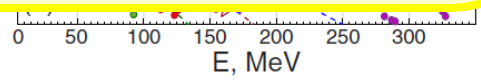
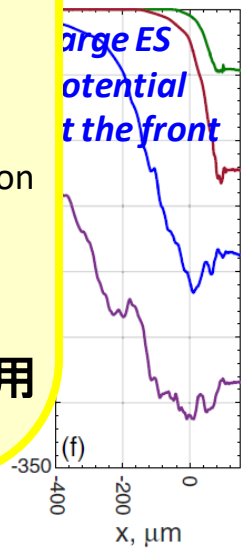


Ponderomotive スケーリングを超えるレーザープラズマ電子加熱



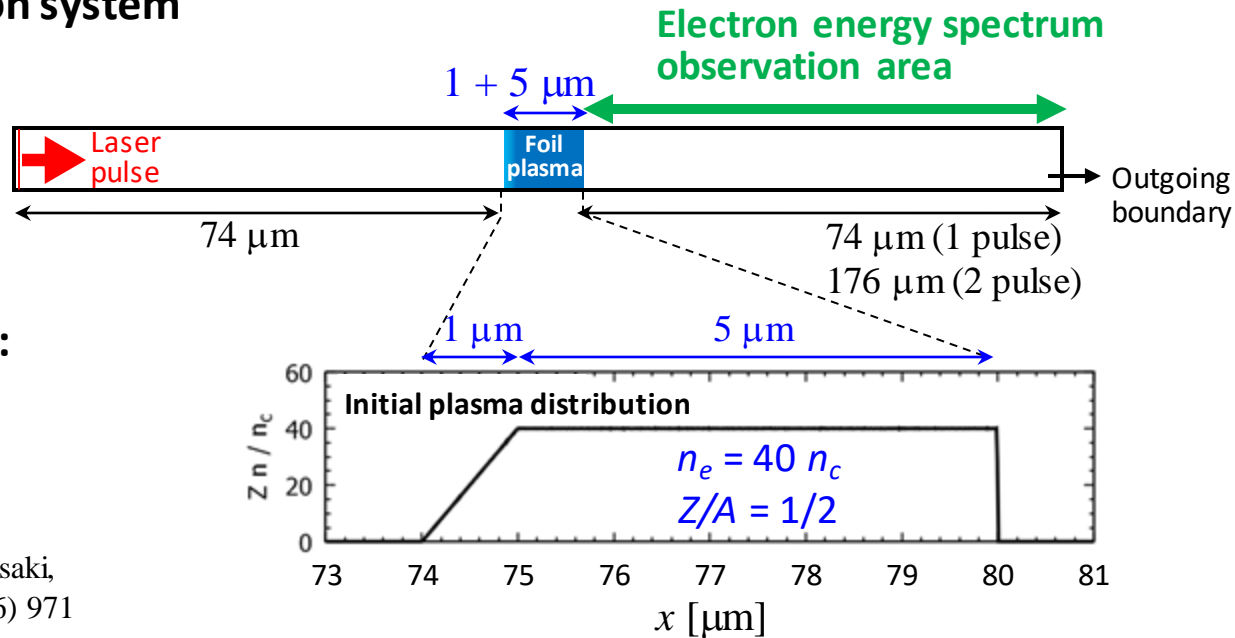
高温電子密度の増加
→効率的なTNSA イオン加速

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



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

1D PIC simulation system



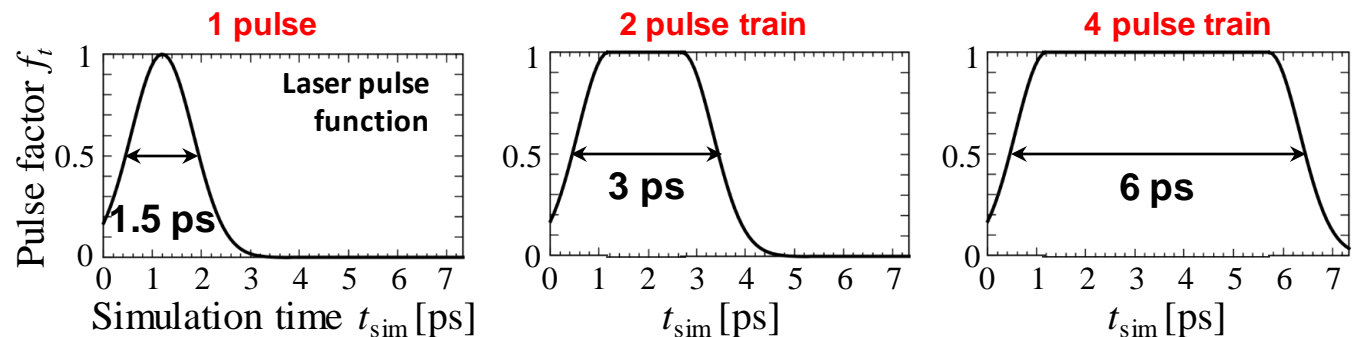
Simulation code:

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

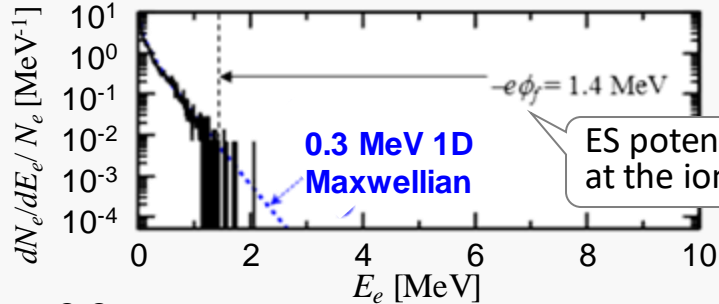


Numerical simulations are performed on the supercomputer of ACCMS, Kyoto Univ. and on LPI cluster system at Osaka Univ.

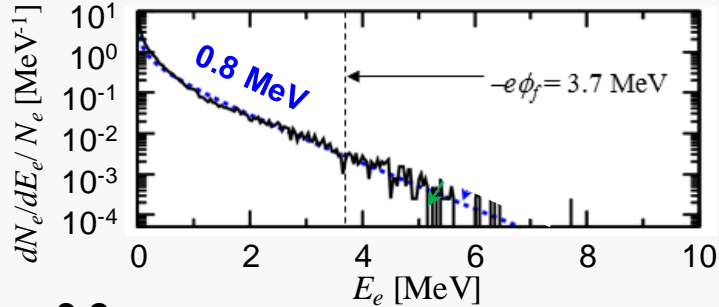
PICシミュレーションで得られた 電子スペクトルと電子温度時間発展

(2 pulse) Electron energy spectra at each time

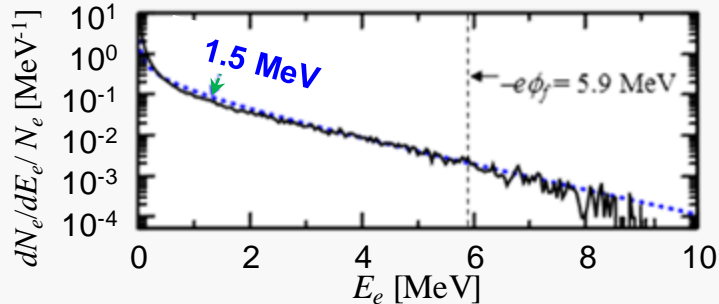
$t_{\text{sim}} = 1.2 \text{ ps}$



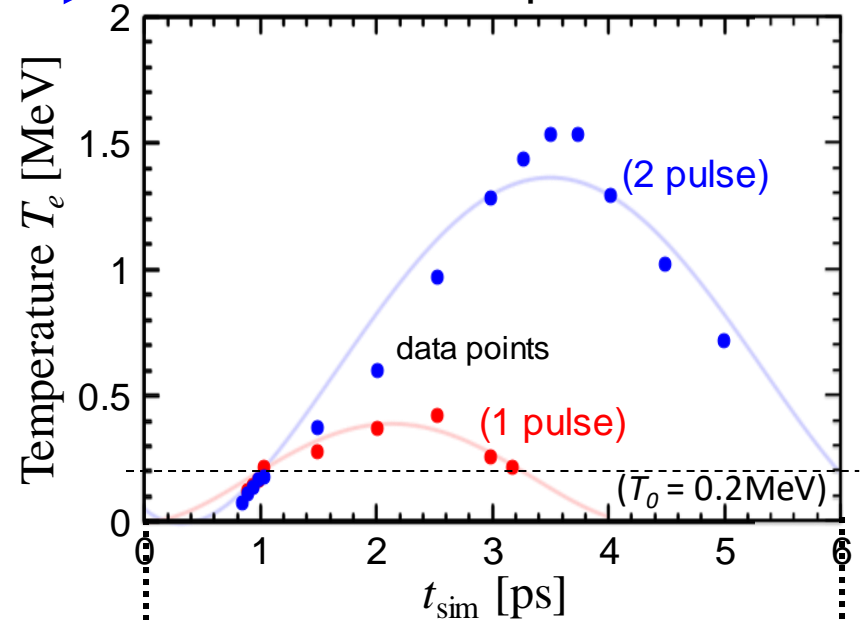
$t_{\text{sim}} = 2.2 \text{ ps}$



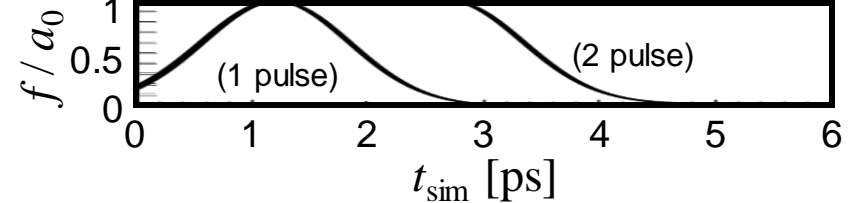
$t_{\text{sim}} = 3.2 \text{ ps}$



Electron temperature



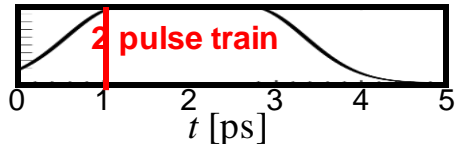
Pulse shape function



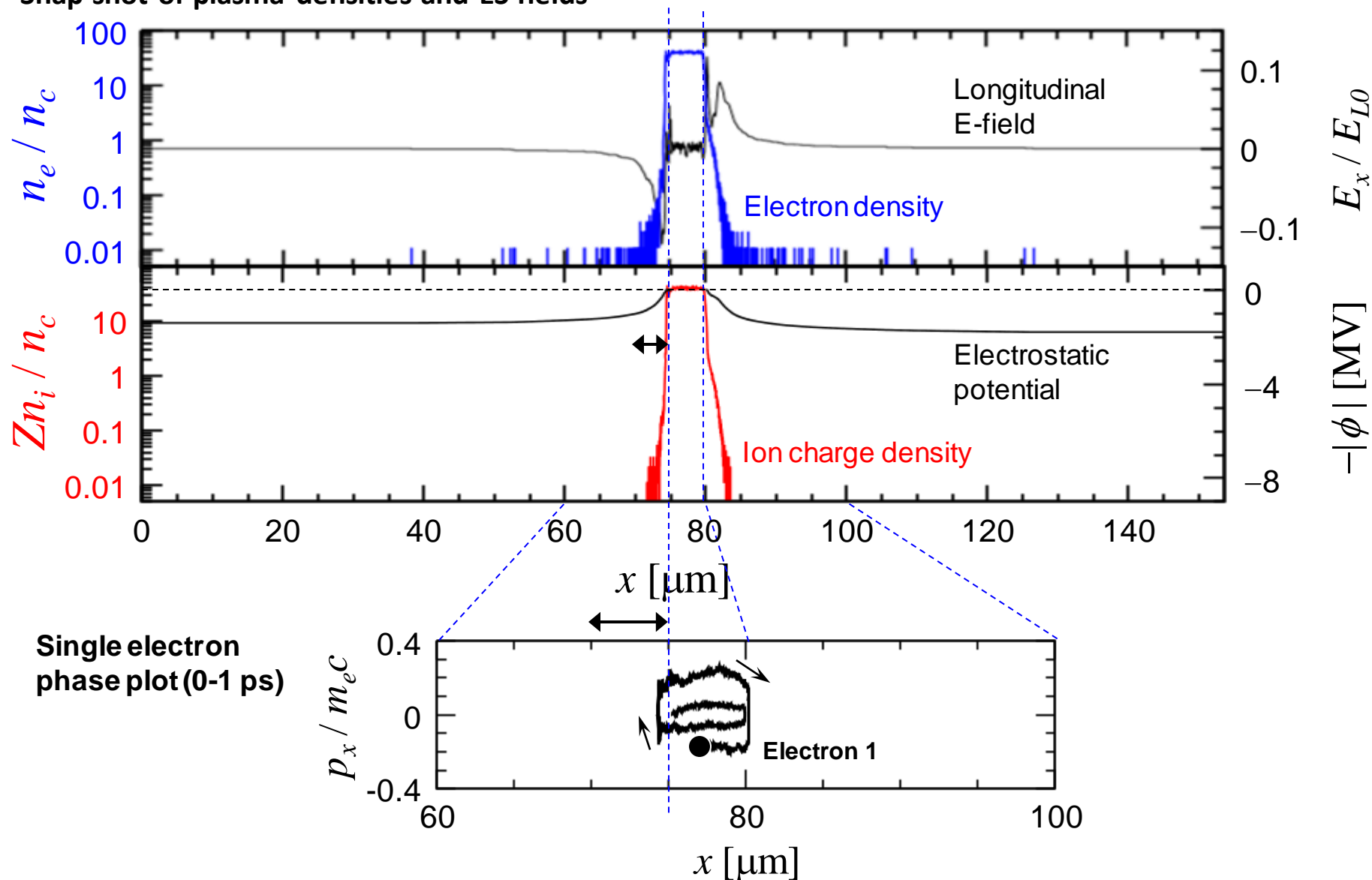
- In obtaining T_e , we assumed 1D Maxwellian to the spectrum below the ES potential energy at the ion expansion front.

プラズマ膨張の様子と電子の位相図(2パルスの場合)

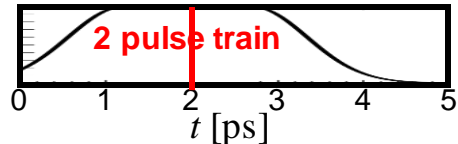
$t = 1 \text{ ps}$



■ Snap shot of plasma densities and ES fields

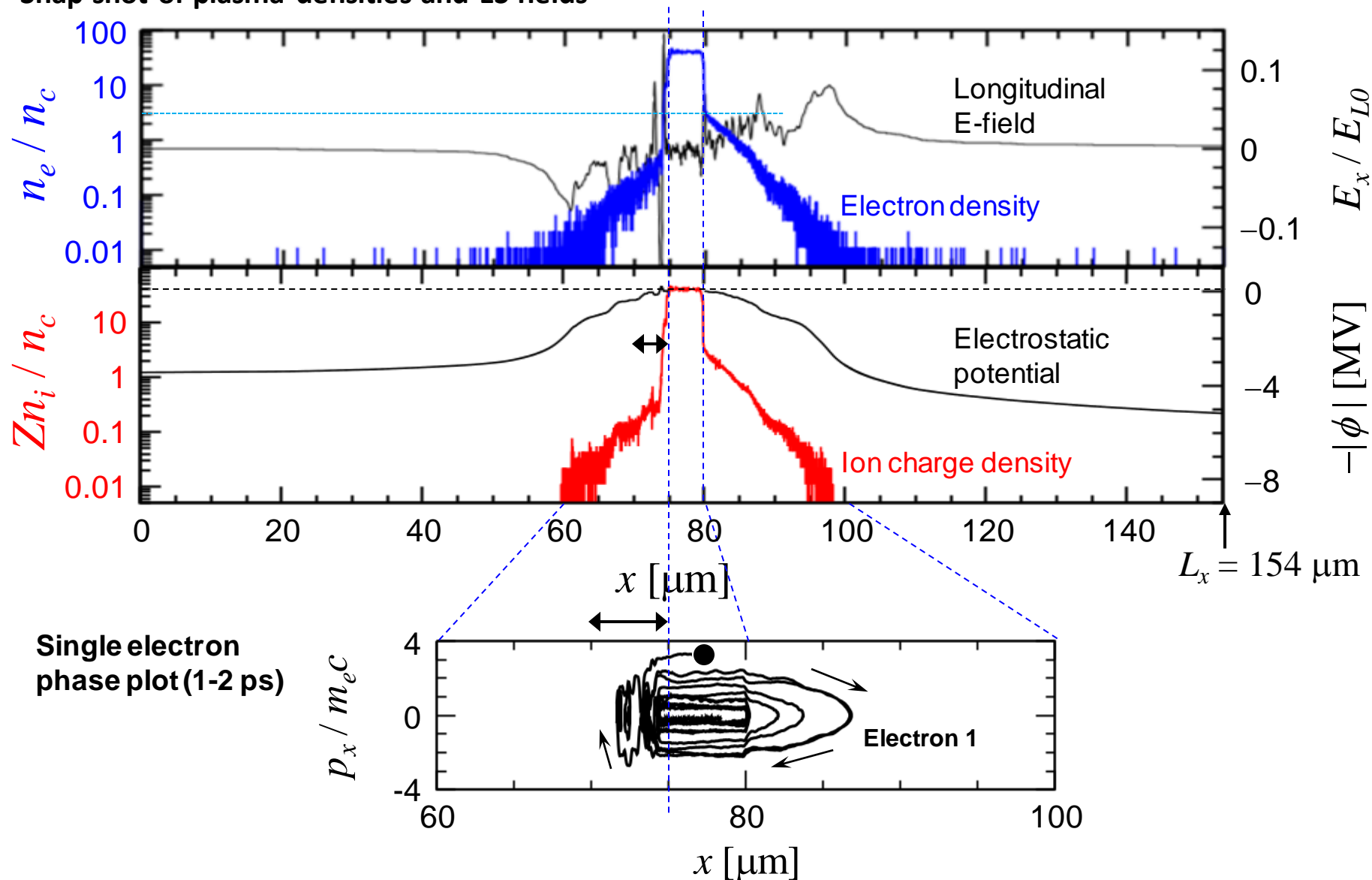


プラズマ膨張の様子と電子の位相図(2パルスの場合)



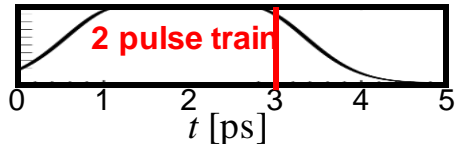
$t = 2$ ps

■ Snap shot of plasma densities and ES fields

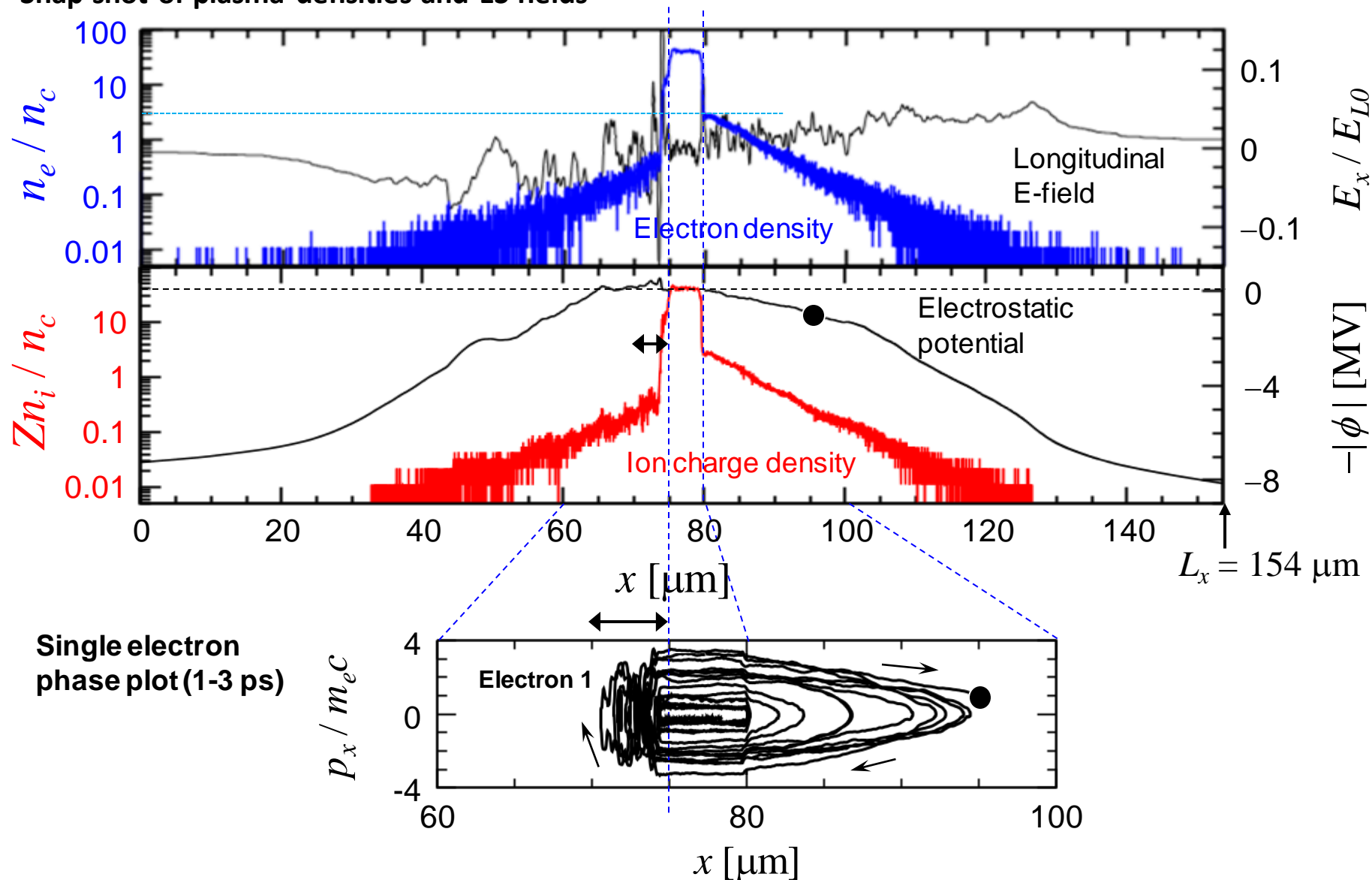


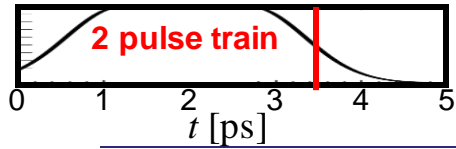
プラズマ膨張の様子と電子の位相図(2パルスの場合)

$t = 3 \text{ ps}$



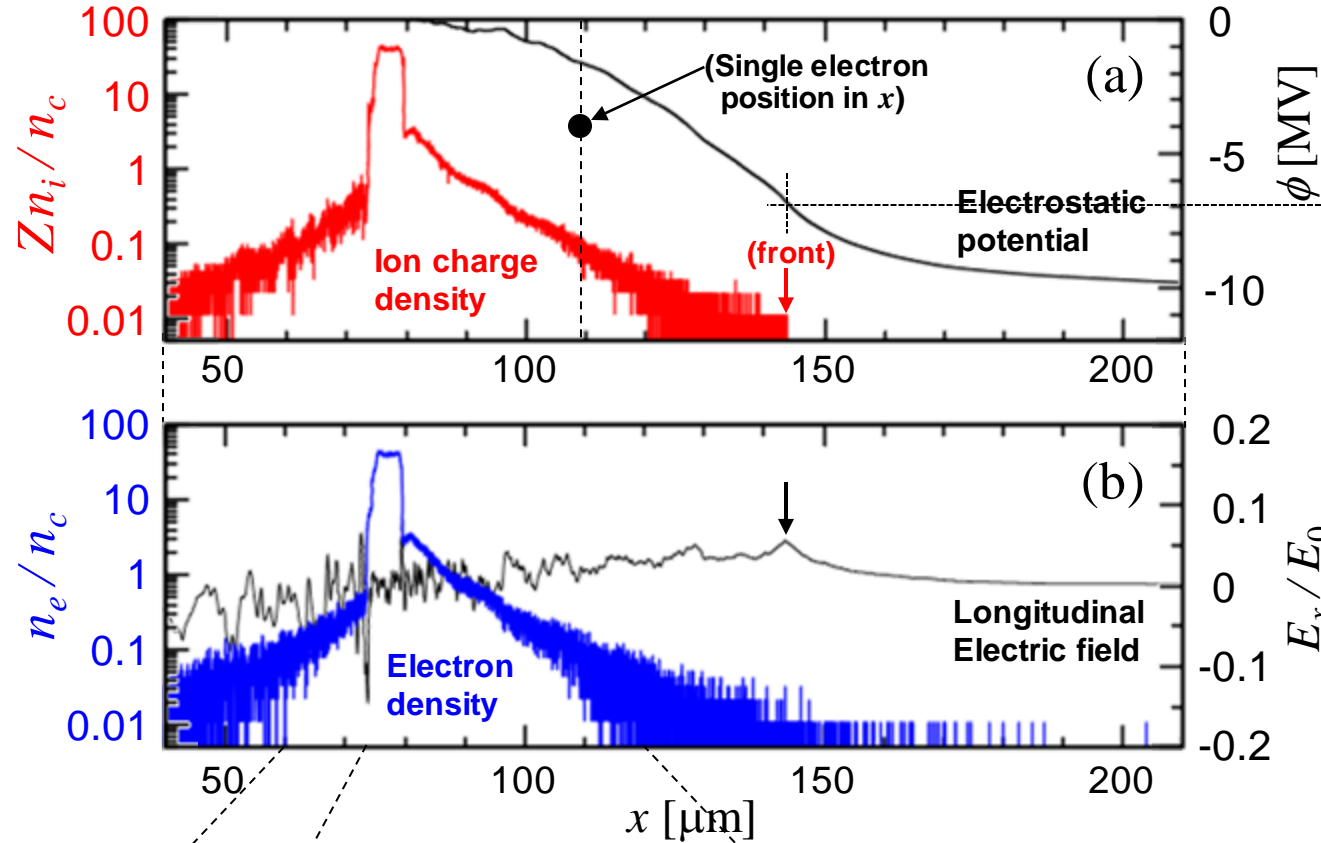
■ Snap shot of plasma densities and ES fields





プラズマ膨張の様子と電子の位相図(2パルスの場合)

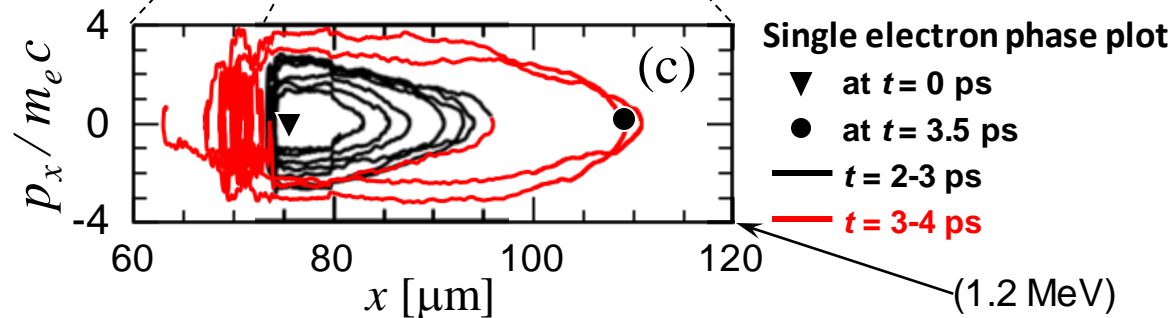
Snap shot of plasma densities and ES fields ($t = 3.5$ ps)



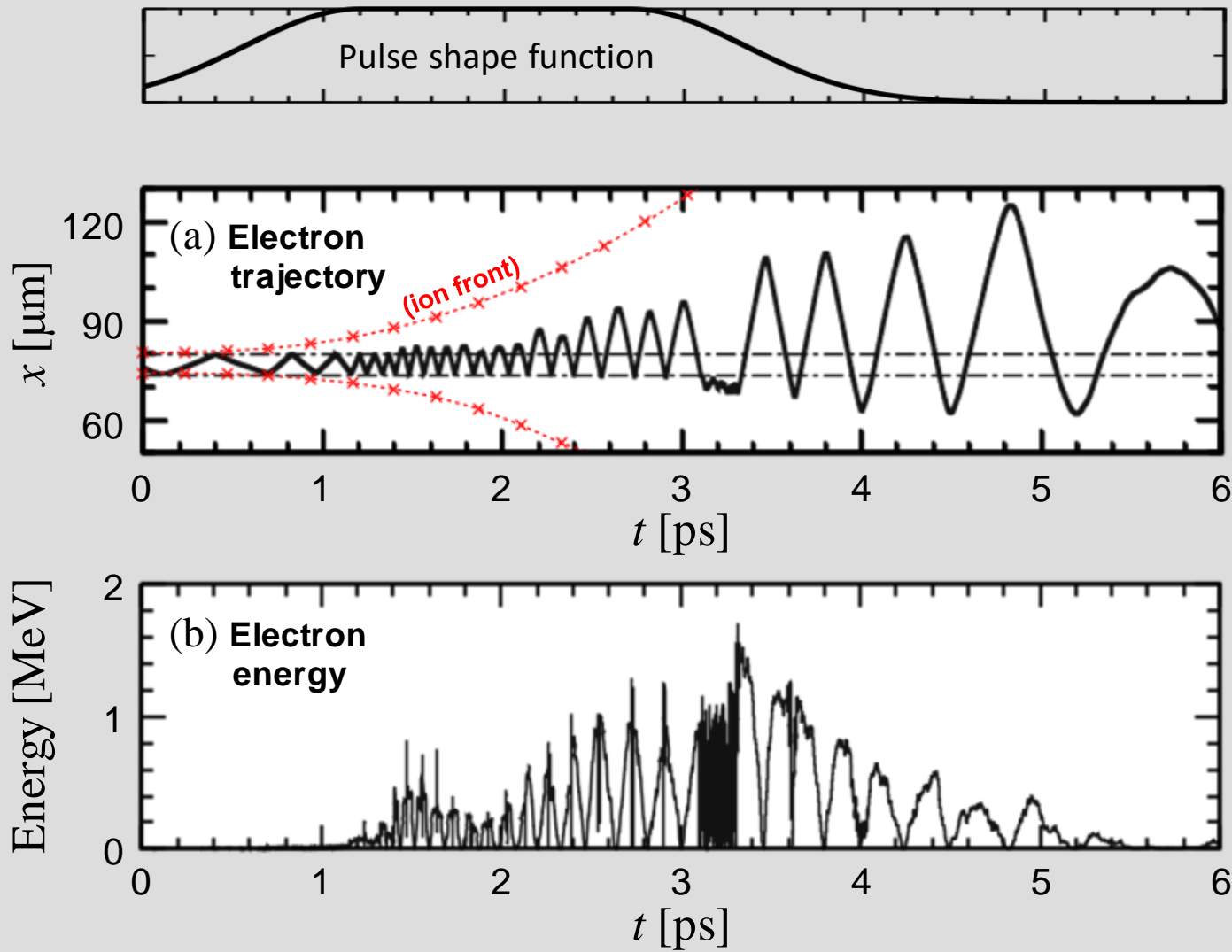
◆ イオンフロント位置での静電(シース)ポテンシャルは7 MV に及ぶ。
 → 運動エネルギーが7 MeV 以下の電子はシース場に閉じ込められる。

◆ 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。

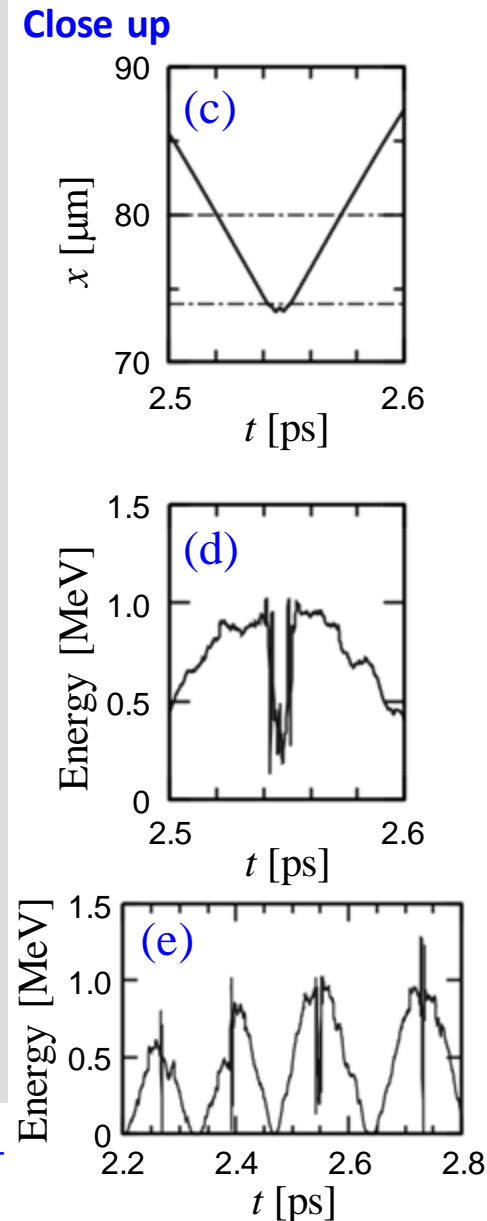
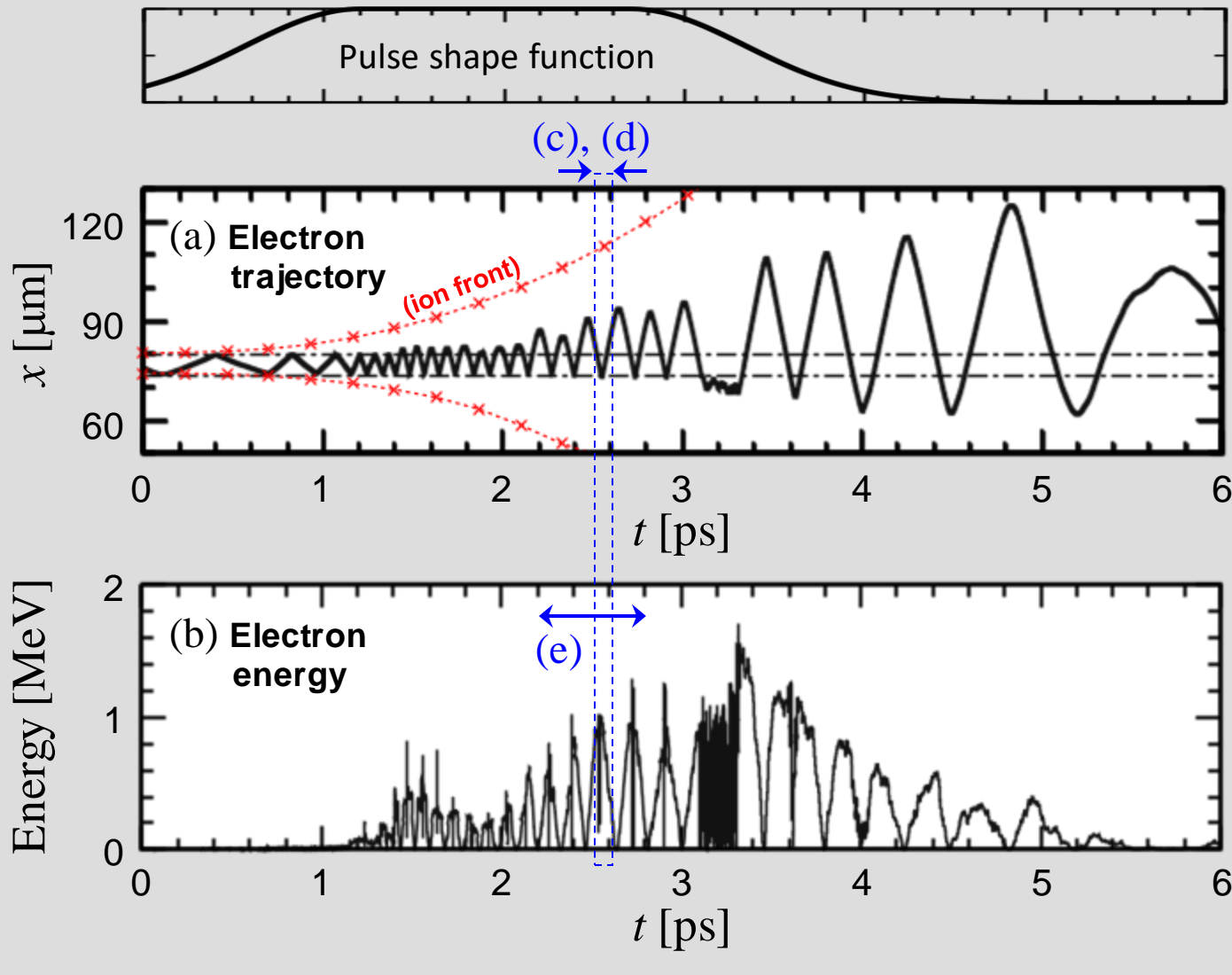


プラズマ中の電子軌道と電子エネルギー (2パルスの場合)



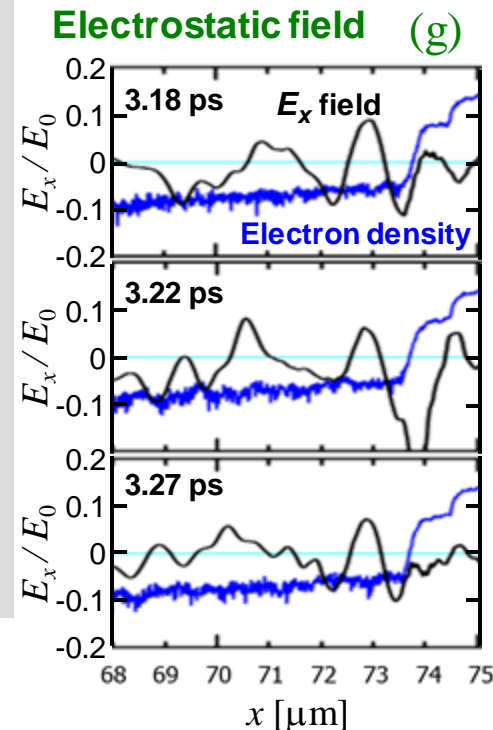
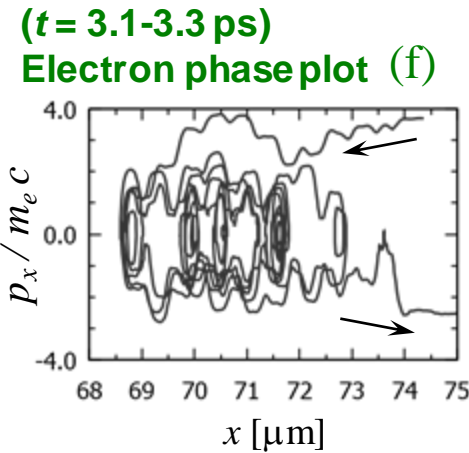
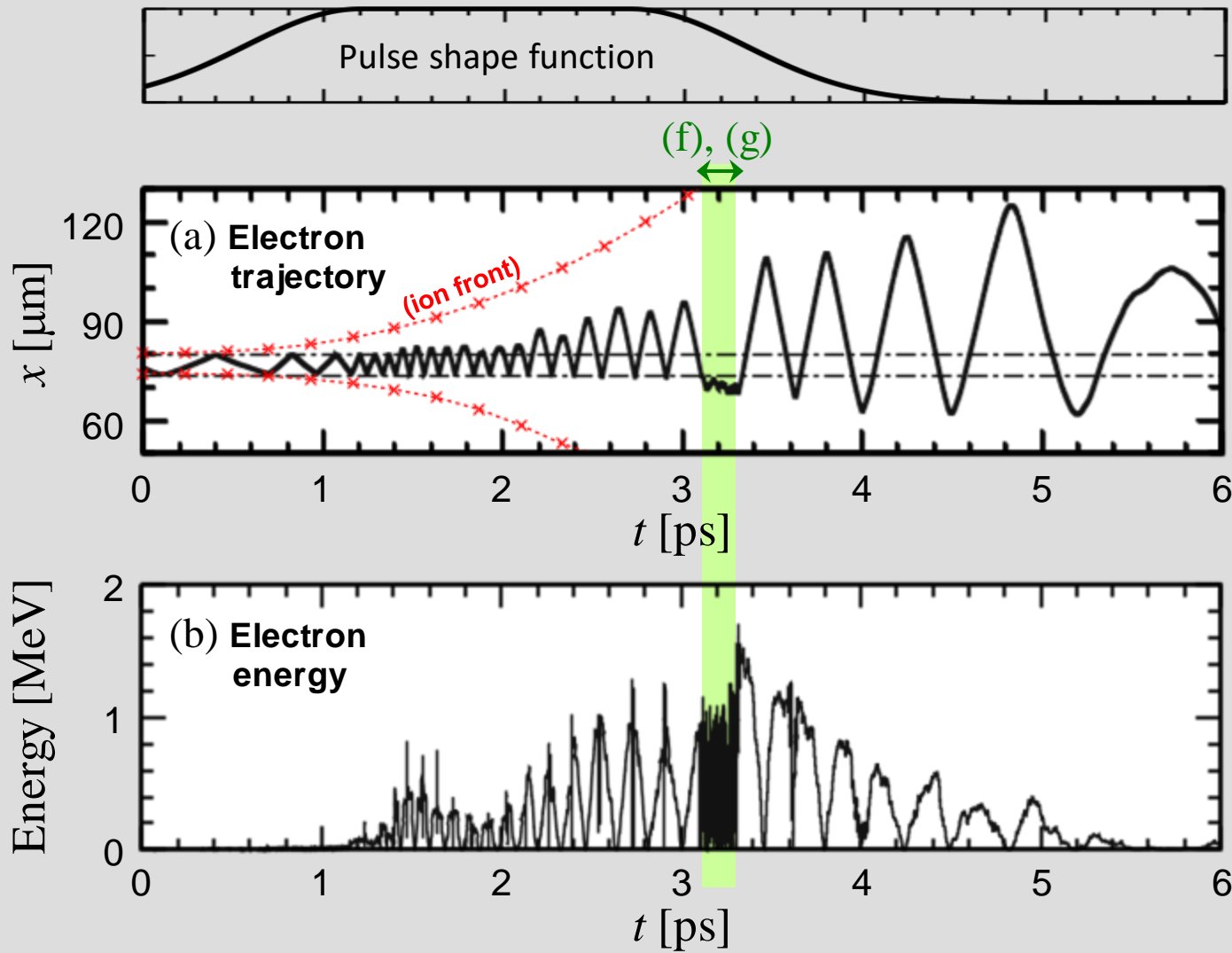
- イオンフロントの進展、電子エネルギーの発展と共に電子の周回振幅が増大。
- レーザーピーク時間中、電子エネルギーのピーク値はランダムに変動。
← 電子がレーザー照射面に戻ってきたときの位相のランダム性による。
- 電子エネルギー増加
→ 周回振動数 増加
周回振幅 増加
→ 周回振動数 減少

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)

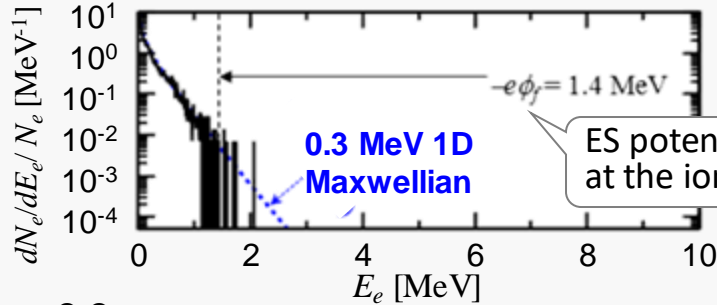


- カットオフ以下の密度領域での統計的電子加速: 入射レーザー波と反射レーザー波による統計加速 [T. Taguchi and K. Mima, JPFR **77**, 1212 (2001)] など

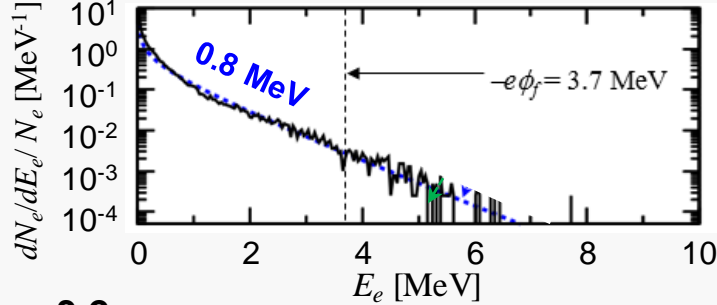
PICシミュレーションにより得られた 数ピコ秒レーザー薄膜相互作用における電子温度時間発展

(2 pulse) Electron energy spectra at each time

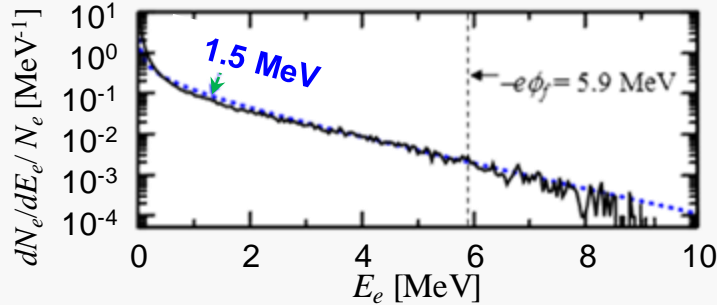
$t_{\text{sim}} = 1.2 \text{ ps}$



$t_{\text{sim}} = 2.2 \text{ ps}$

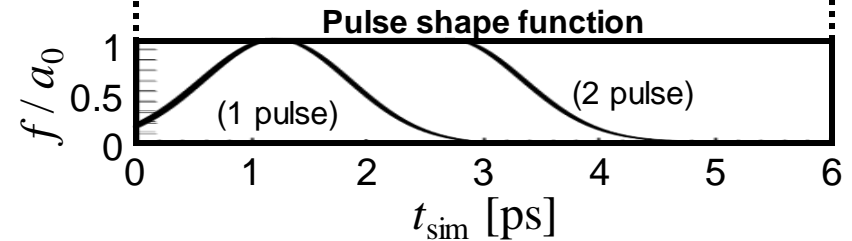
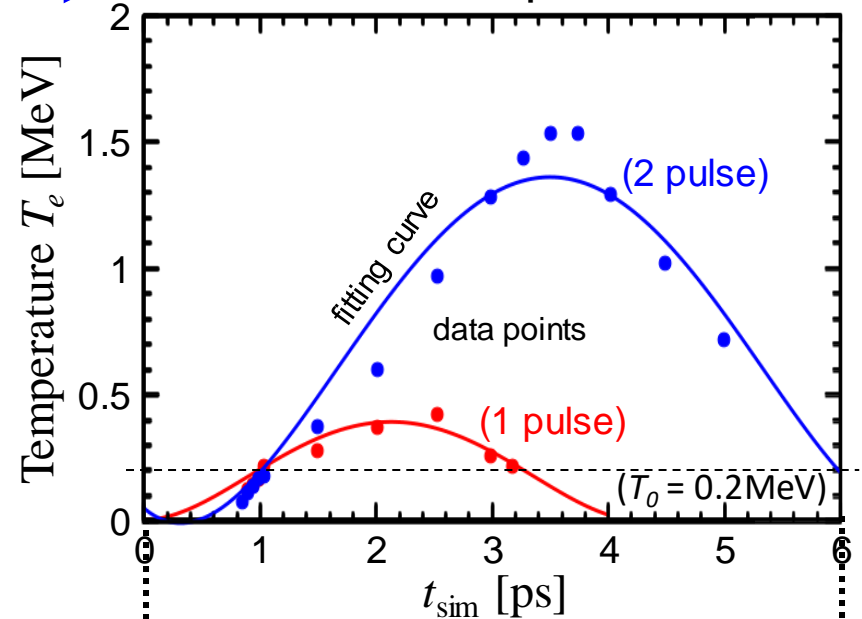


$t_{\text{sim}} = 3.2 \text{ ps}$



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

Electron temperature



- Fitting function of electron temperature :

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

T_{max} : Maximum temperature,

t_{max} : Time at which T_e takes the maximum value.

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

$$\begin{cases} \text{Ion velocity} \\ v_i^{(0+1)}(t, \xi) = C_s(t) \left(1 + \xi \left[-\varepsilon \frac{b}{2} \xi \right] \right) \\ \\ \text{Ion density} \\ n_i^{(0+1)}(t, \xi) = n_{i0}(t) \exp\left(\frac{e\phi^{(0+1)}}{T_e(t)} \right), \\ \\ \text{Electrostatic potential} \\ e\phi^{(0+1)}(t, \xi) = -T_e(t) \xi \left(1 + \varepsilon \frac{b}{2} \right) \end{cases}$$

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

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

1st order

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

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

$$\begin{cases} \text{Ion velocity} \\ v_i^{(0+1)}(t, \xi) = C_s(t) \left(1 + \xi \left[-\varepsilon \frac{b}{2} \xi \right] \right) \\ \\ \text{Ion density} \\ n_i^{(0+1)}(t, \xi) = n_{i0}(t) \exp\left(\frac{e\phi^{(0+1)}}{T_e(t)} \right), \\ \\ \text{Electrostatic potential} \\ e\phi^{(0+1)}(t, \xi) = -T_e(t) \xi \left(1 + \varepsilon \frac{b}{2} \right) \end{cases}$$

where

$$b(t) \equiv \frac{RC_s}{C_s^2}$$

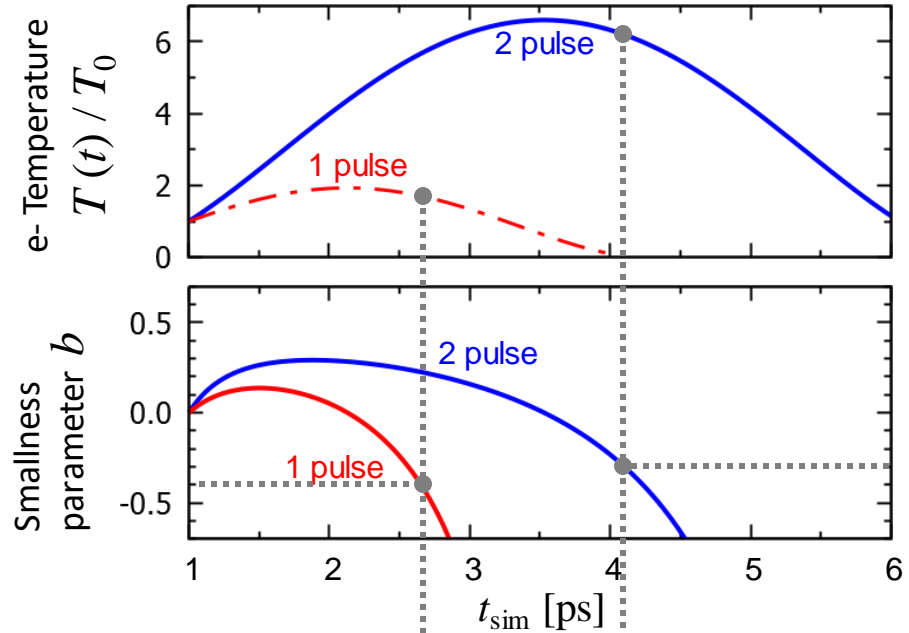
Time scale of plasma expansion / Time scale of temperature evolution

■ Ion maximum energy

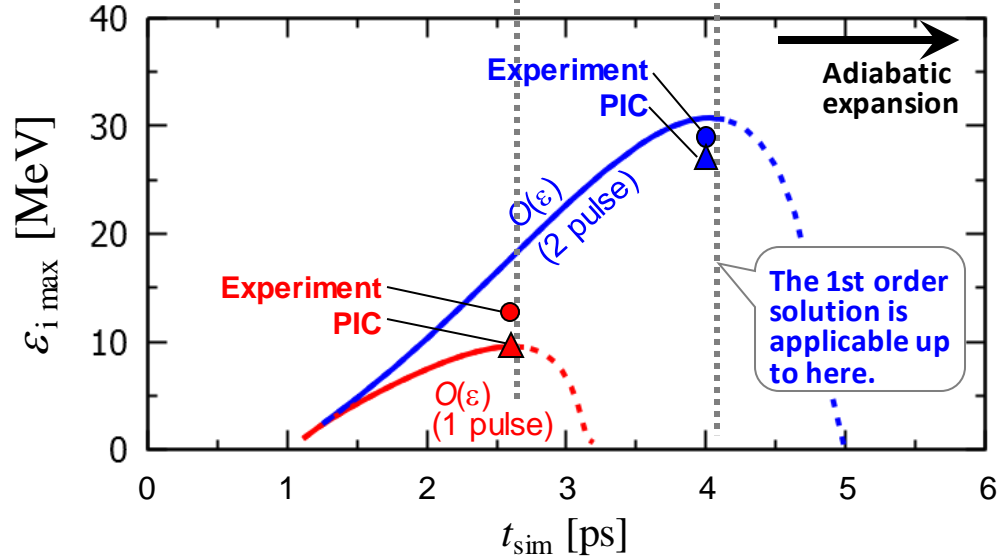
$$\varepsilon_{i \max} = 2ZT_0 \left(\int_0^\tau \frac{\Theta \tilde{T}_e(\tau')}{\sqrt{1 + \tilde{R}^2(\tau')}} d\tau' \right)^2$$

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

For isothermal case, $\Theta = 1$



Proton maximum energy



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