平成28年度　阪大レーザー研共同研究 2016C-JOZAKI
一般課題型共同研究（(c)レーザーエネルギー学に関する研究会）

レーザープラズマ科学のための最先端シミュレーションコードの共同開発・共用に関する研究会
日 時：平成29年1月10日（火）10:00 ～ 1月11日（水）17:00, 会 場：大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 研究棟(I棟-3階) 大会議室

キロテスラ級強磁場下での レーザー電子加速

城﨑知至[1], 甲斐祐亮[1], 武田志十朗[1], 遠藤琢磨[1],
千徳靖彦[2], 畑昌育[2], 田口俊彦[3], 三間国興[4]
[1]広島大学, [2]大阪大学, [3]摂南大学, [4]光産業創成大学院大学

HIROSHIMA UNIVERSITY

背景

- 電子ビーム駆動高速点火における、電子ビームガイディング用磁場の必要性

目的

- 10 kTクラス強磁場下での相対論的レーザープラズマ相互作用による電子加速並びにガイディング特性の評価

相対論的臨界密度以下の磁化プラズマ中でのレーザープラズマ相互作用

- 粒子(プラズマ） → 電磁場 : Faraday rotation, Whistler wave
- 電磁場 → 粒子 Cyclotron resonance
- ･･･

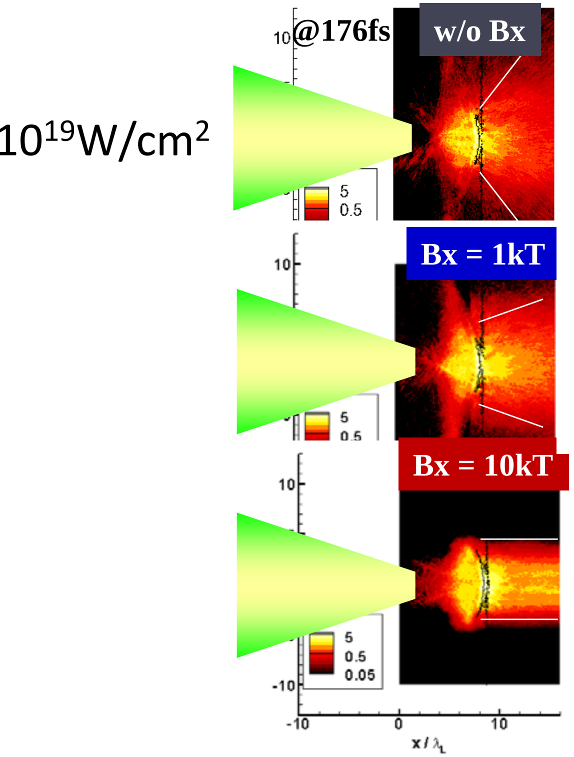
背景 磁化コーンターゲットでのレーザープラズマ相互作用

Previously, we have evaluated the magnetic field effects on LPI, where a plane target was assumed, by PIC simulations.

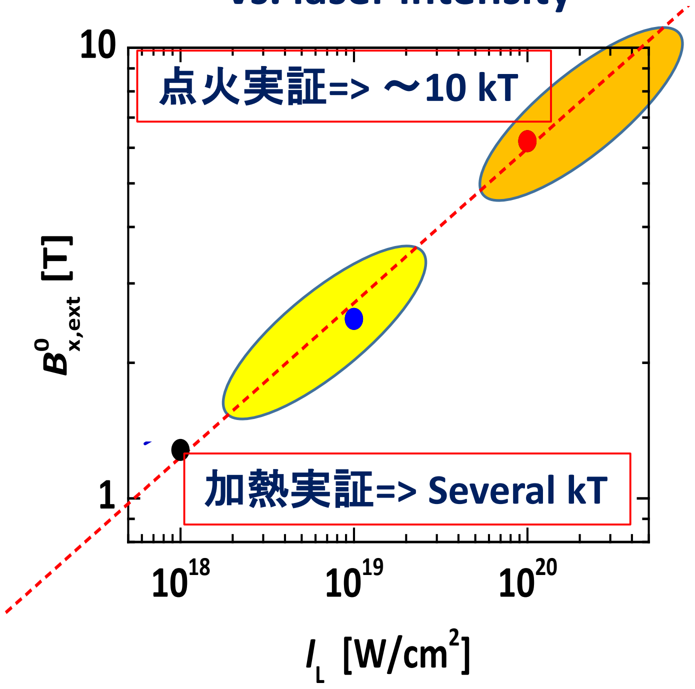
100fs pulse sim.

1ps & mirror field sim. For heating demo. (FIREX-I)

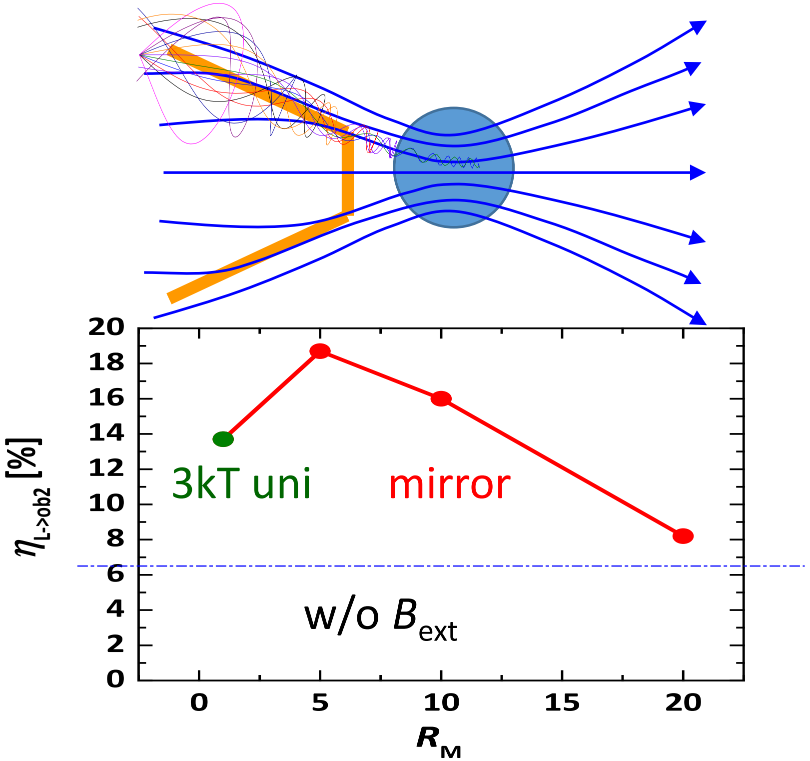
Fast electron energy density



Required B-field strength vs. laser intensity



Mirror field effect



T. Johzaki, et al., J. Phys.: Conf. Seri. 688, 012041 (2016)

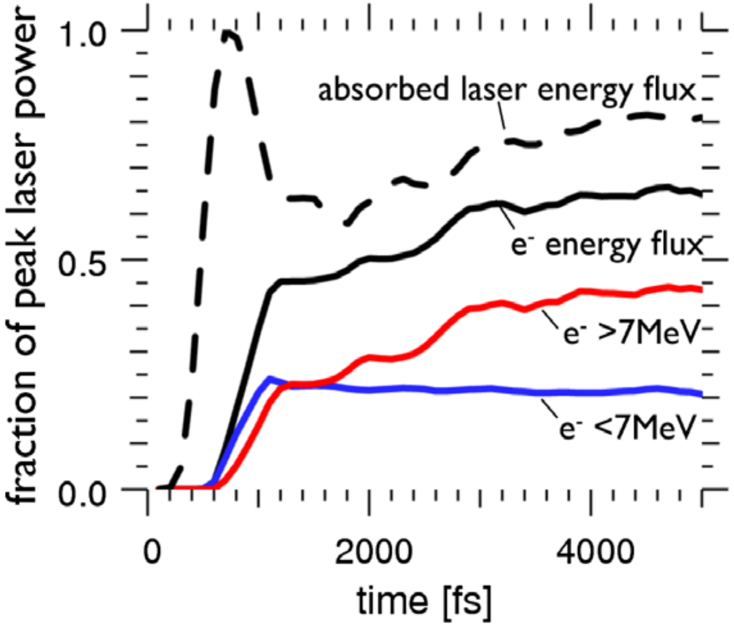
T. Johzaki, et al., Nucl. Fusion 55, 053022 (2015)

長パルス (> ps)照射により長尺の低密度プラズマが生成

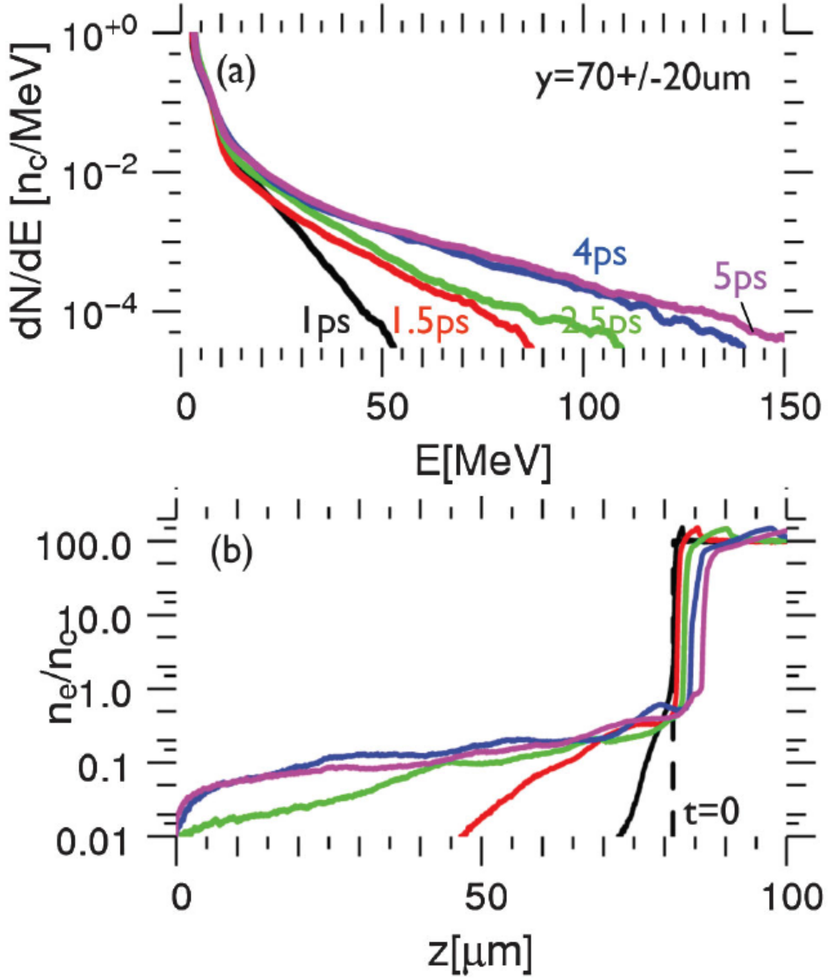
2D PIC simulation

Target: Fully-ionized D+ plasma
- 100 n_{cr} dense plane w/o pre-plasma

Laser: liner-polarized (Ey & Bz) pulse
- 1.37×10^{20} W/cm^2
- $\lambda_L = 1\ \mu m$
- 200fs ramping and semi-infinite
- $r_0 = 20\ \mu m$



~20%

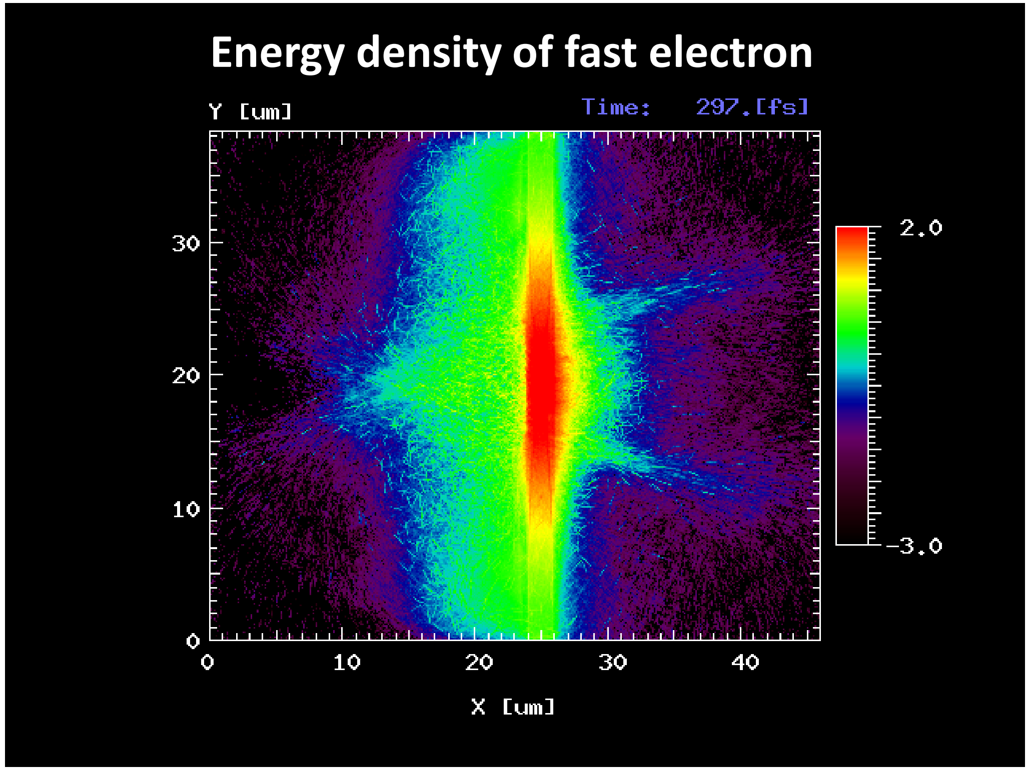


A. J. Kemp and L. Divol, PRL **109**, 195005 (2012)

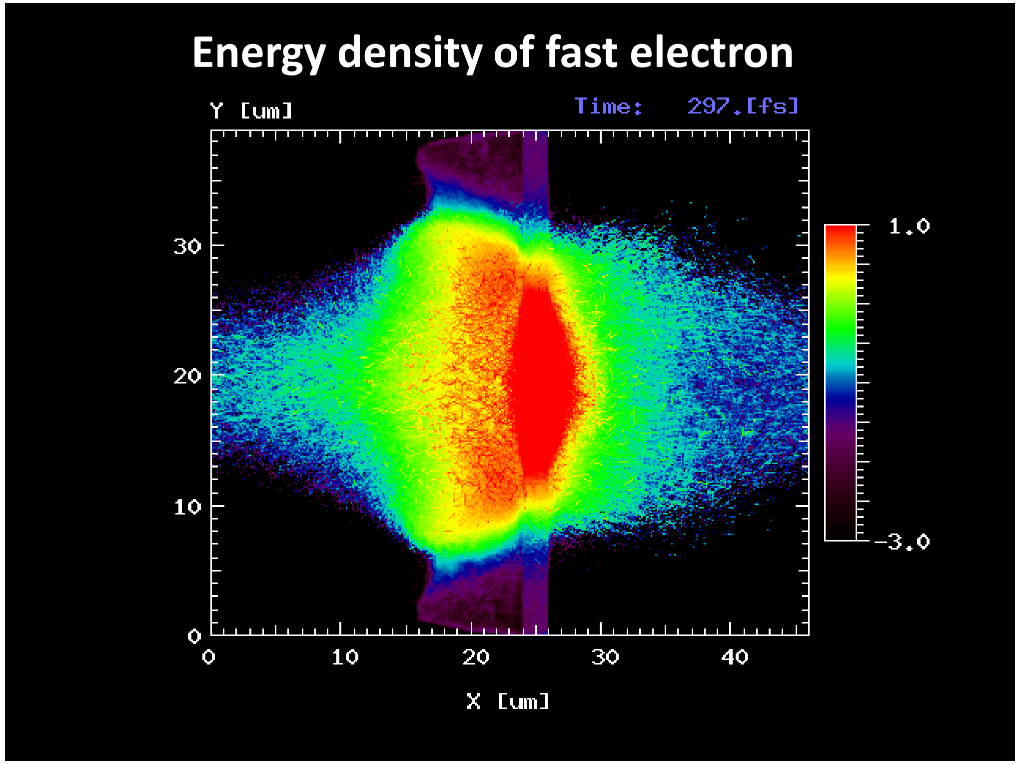
イオン加速(TNSA)への応用
ターゲット表面に沿った電子逃走を抑え、イオン加速効率を向上

Al (2micron, 100ncr) + 10^{20}W/cm^2 pulseによるTNSAイオン加速予備計算

外部磁場無しの場合 at 90 τ_L (297fs)



外部磁場 B_{x0} = 10 kT 場合 at 90 τ_L (297fs)



サイクロトロン共鳴加速により電子温度が上昇すれば、より高効率になるか？

HIROSHIMA UNIVERSITY

目的

- 自己点火実証には 強度$I_L > 10^{20}$W/cm^2, パルス長 $\tau_L > 10$ psの加熱レーザーが必要
- ピコ秒オーダーのレーザープラズマ相互作用では、プレパルスフリーでも、加熱レーザーによるターゲット加熱によりターゲット表面に相対論的臨界密度以下の低密度プラズマが形成される。
- 生成する電子ビームのガイディングには~10 kTクラスの磁場が必要

１０キロテスラクラスの強磁化プラズマ中で相対論レーザープラズマ相互作用による電子加速特性の評価

- 粒子(プラズマ）→ 電磁場 : Faraday rotation, Whistler wave
- 電磁場 → 粒子 Cyclotron resonance

相対論的強度のレーザー電磁場下での単一電子の運動*

基礎式

規格化単位系

$$\hat{t} = \omega_L t \qquad \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{v}/c$$

$$\hat{\mathbf{x}} = k_L \mathbf{x} \qquad \hat{\mathbf{p}} = \mathbf{p}/(m_e c)$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \frac{e\mathbf{A}}{m_e c}$$

運動量保存

$$\frac{d\hat{\mathbf{p}}}{d\hat{t}} = -\left(\hat{\mathbf{E}} + \hat{\mathbf{v}} \times \hat{\mathbf{B}}\right)$$

エネルギー保存

$$\varepsilon_e = m_e c^2 \gamma \Rightarrow \frac{d\varepsilon_e}{dt} = m_e c^2 \frac{d\gamma}{dt}$$

$$\frac{d\gamma}{d\hat{t}} = -\hat{\mathbf{v}} \cdot \hat{\mathbf{E}}$$

規格化単位系 $\Rightarrow \dfrac{d\gamma}{dt} = \hat{\mathbf{v}} \cdot \dfrac{d\hat{\mathbf{p}}}{dt}$

真空中での電場E・磁場Bとベクトルポテンシャルの関係

$$\hat{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \hat{\mathbf{A}}}{\partial \hat{t}}$$

$$\hat{\mathbf{B}} = \hat{\nabla} \times \hat{\mathbf{A}}$$

x方向に伝播する電磁波のベクトルポテンシャル

$$\hat{\mathbf{A}} = (0, \delta a_0 \cos\hat{\phi}, (1-\delta^2)^{1/2} a_0 \sin\hat{\phi})$$

$$a_0 = \frac{eE_0}{m_e c \omega_L}, \hat{\phi} = \hat{t} - \hat{x},$$

$$\delta = \begin{cases} \pm 1, 0 \text{ for linear polarization} \\ \pm 1/2 \text{ for circular polarization} \end{cases}$$

運動する電子から見た電磁場の位相

$$\frac{d\hat{\phi}}{d\hat{t}} = \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \hat{t}} + \hat{v}_x \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \hat{x}}$$

↓ これらを連立してとくと

*P. Gibbon, “*Short Pulse Laser Interactions with Matter: An Introduction*”, Imperial College Press (2001)

相対論的強度のレーザー電磁場下での電子の運動(解析解）

x方向に伝播する直線偏光（電場はy方向）の場合；外部磁場無し

初期条件：$p_x = p_y = 0$ at $t = 0$

運動量

$$\frac{p_x}{m_e c} = \frac{a_0^2}{4}[1+\cos 2\phi]$$

$$\frac{p_y}{m_e c} = a_0 \cos\phi$$

$$\frac{p_z}{m_e c} = 0$$

$$\frac{p_\perp}{m_e c} = a_0 \cos\phi$$

$$\frac{p}{m_e c} = a_0\sqrt{\frac{a_0}{16}(1+\cos 2\phi)^2 + \cos^2\phi}$$

位置

$$k_L x = \frac{a_0^2}{4}\left[\phi + \frac{1}{2}\sin 2\phi\right]$$

$$k_L y = a_0 \sin\phi$$

$$k_L z = 0$$

エネルギー

$$\frac{\varepsilon}{m_e c^2} = \gamma = 1 + \frac{a_0^2}{4}[1+\cos 2\phi]$$

振動周期に対して平均化したx方向のドリフト速度

$$\frac{v_{x,D}}{c} = \frac{a_0^2}{4+a_0^2}$$

振動周期に対して平均化したエネルギー

$$\frac{\bar{\varepsilon}}{m_e c^2} = \bar{\gamma} = 1 + \frac{a_0^2}{4}$$

v_Dで動く系での電磁場の位相

$$\frac{d\hat{\phi}}{d\hat{t}} = \frac{\alpha}{\gamma} \rightarrow \hat{\phi} = \frac{\hat{t}}{\gamma} \quad \text{for } \alpha = 1 \rightarrow \phi_e = \frac{t\omega_L}{\gamma} \approx \frac{t\omega_L}{\bar{\gamma}} = \frac{4\omega_L}{4+a_0^2}t$$

v_Dで動く系での電子の軌跡

$$16(k_L x')^2 = (k_L y')^2[4q^2 - (k_L y')^2]$$

$$q = a_0/(2\gamma_0),\ \gamma_0 = \sqrt{1+a_0^2/2}$$

x方向に伝播する平面波下での電子の運動（解析解）

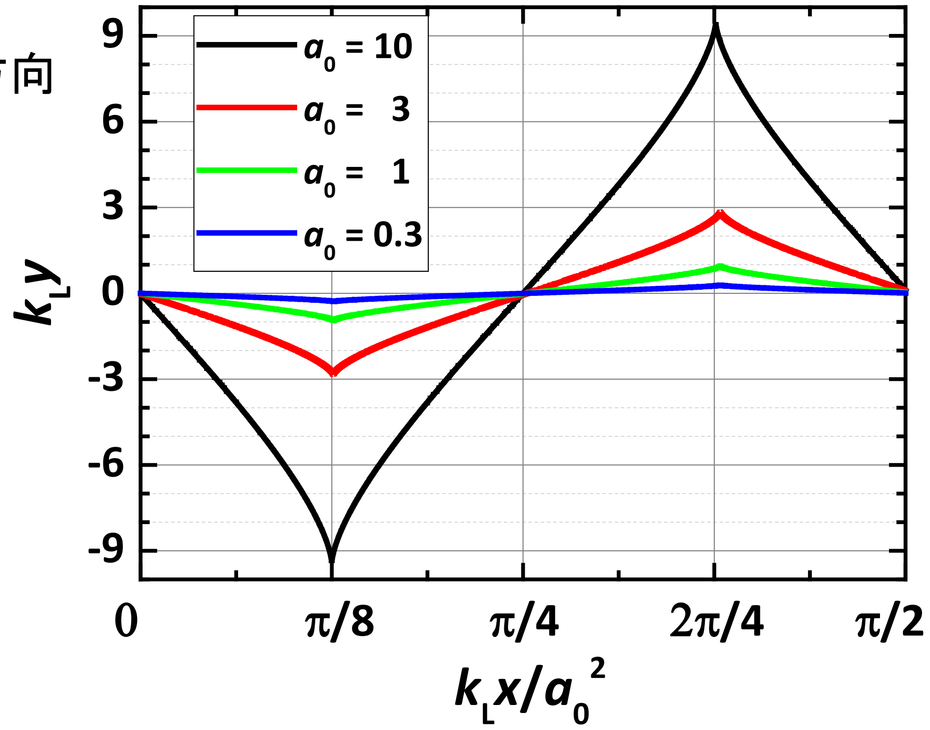
外部磁場無し

実験室系での軌跡

$$k_L x = \frac{a_0^2}{4}\left[\phi + \frac{1}{2}\sin 2\phi\right]$$

$$k_L y = a_0 \sin\phi$$

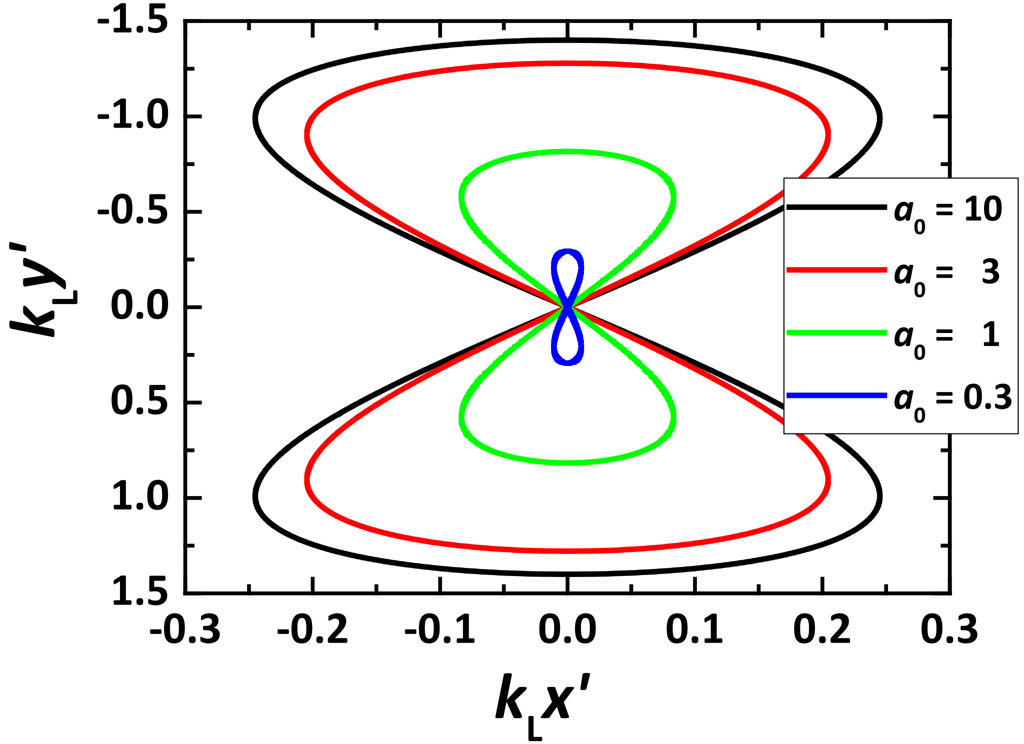
電場の方向



v_Dで動く系での軌跡

$$16(k_L x')^2 = (k_L y')^2[4q^2 - (k_L y')^2]$$

$$q = a_0/(2\gamma_0),\ \gamma_0 = \sqrt{1 + a_0^2/2}$$



直線偏光平面波下での単一電子の軌道計算*

基礎式

運動方程式

$$\frac{d\hat{\mathbf{p}}}{d\hat{t}} = -\left(\hat{\mathbf{E}} + \hat{\mathbf{v}} \times \hat{\mathbf{B}}\right)$$

電磁場

$$\hat{\mathbf{A}} = (0, a_0 \cos\hat{\phi}, 0)$$

$$\hat{\mathbf{E}} = -\frac{\partial\hat{\mathbf{A}}}{\partial\hat{t}} = (0, a_0 \sin\hat{\phi}, 0)$$

$$\hat{\mathbf{B}} = \hat{\nabla} \times \hat{\mathbf{A}} = (0, 0, a_0 \sin\hat{\phi})$$

静磁場

$$\hat{\mathbf{B}} = (\hat{B}_{x0}, 0, 0)$$

初期条件

t = 0にて

$$\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = (0,0,0)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = (\hat{p}_{x,\max}, \hat{p}_{y,\max}, 0)$$

$$= (\frac{a_0^2}{2}, a_0, 0)$$

$$\hat{\phi} = \hat{t} - \hat{x} = 0$$

$$\hat{B}_{x0} = \text{const.}$$

計算条件

$a_0 = 9$ → I_L = 10^{20} W/cm^2 for λ_L = 1.053 μm

$$\gamma_0 = \sqrt{1 + a_0^2/2} = 41.5$$

$$v_{x,D} = \frac{a_0^2}{4 + a_0^2} = 0.953c$$

$$\frac{\bar{\varepsilon}}{m_e c^2} = \bar{\gamma} = 1 + \frac{a_0^2}{4} = 21.25$$

$$\phi_{EM,e} = \frac{\omega_L}{\bar{\gamma}} = \frac{\omega_L}{21.25}$$

$$\lambda_{EM,e} = \frac{2\pi v_{x,D}}{\omega_{EM,e}} = 21.32 \ \mu\text{m}$$

$$\hat{B}_{x0} = 0,\ 0.098,\ 0.295,\ 0.492,\ 0.983,\ 1.47$$

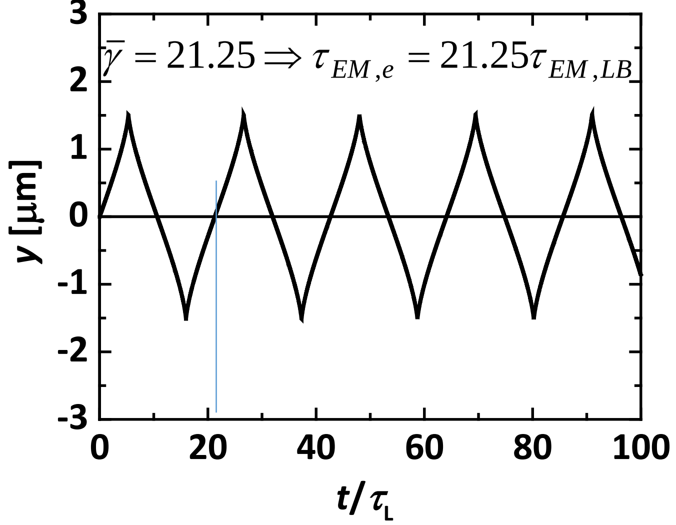
→ B_{x0} = 0, 1, 3, 5, 10, 15 kT

***using Boris algorithm (J. P. Boris, 1970)**

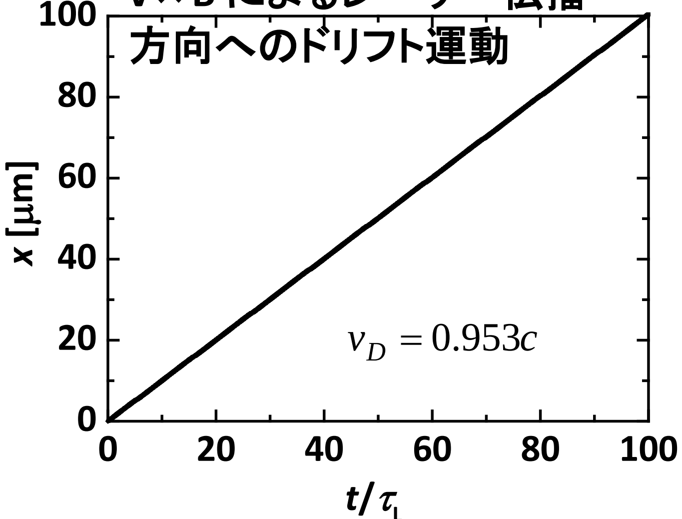
直線偏光平面波 a_0 = 9 (B_{x0} = 0 外部磁場無し)

HIROSHIMA UNIVERSITY

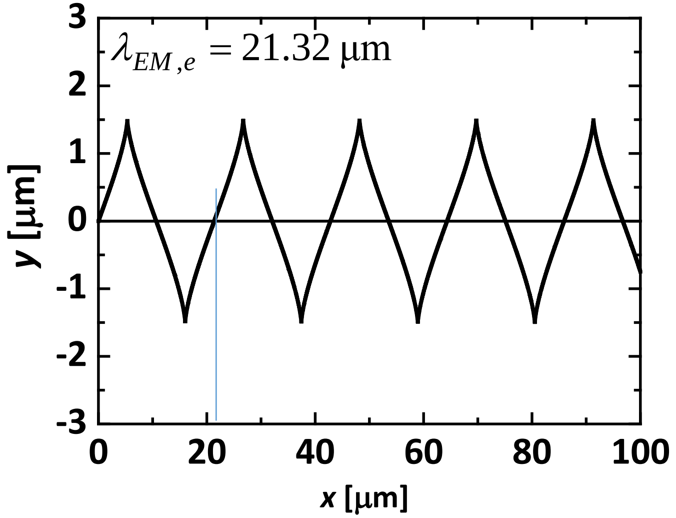
レーザー電場-eE_yによる振動 → y方向のみの運動



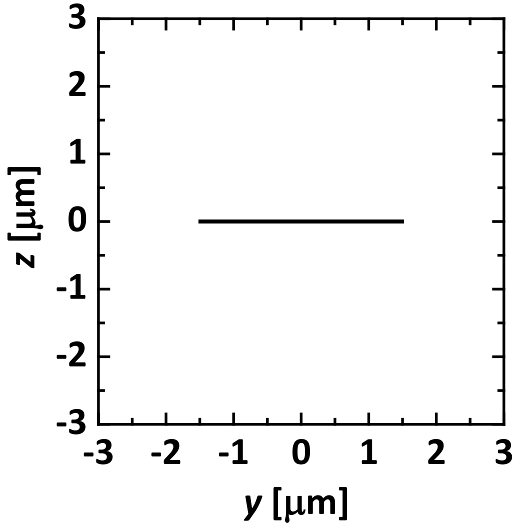
v × B によるレーザー伝播方向へのドリフト運動



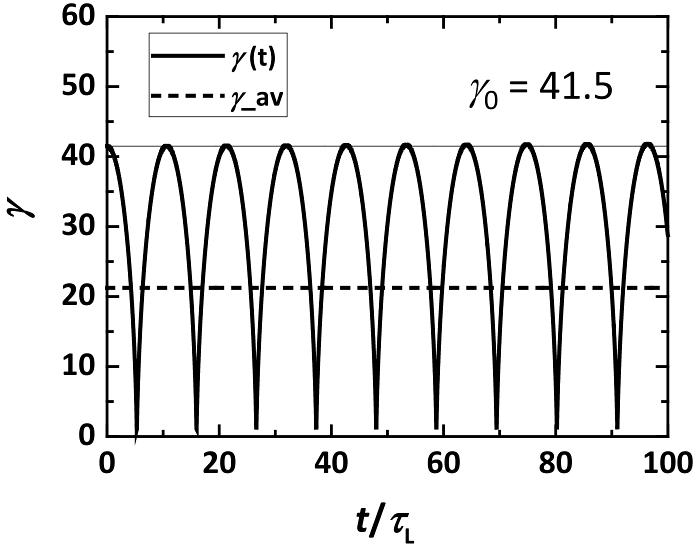
x-y平面上での電子の軌跡



y-z平面上での電子の軌跡



Lorentz因子の時間発展

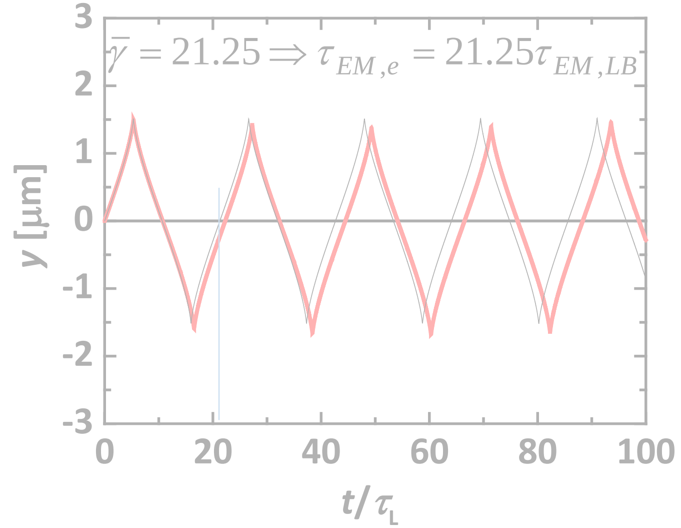


HIROSHIMA UNIVERSITY

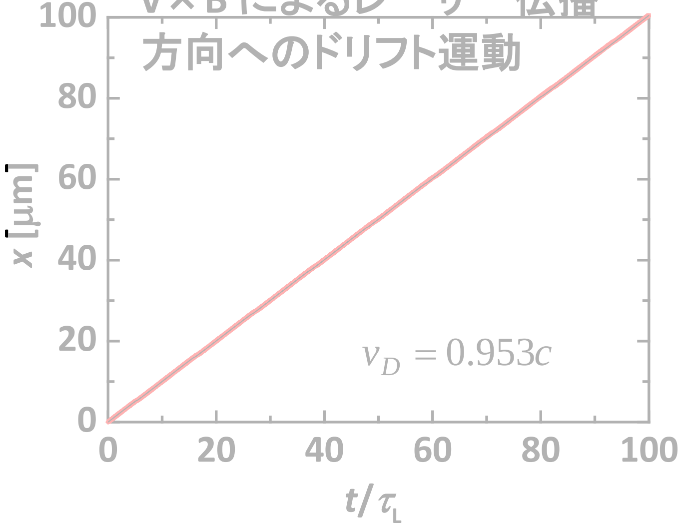
縦磁場を印加した場合

直線偏光平面波 a_0 = 9 (B_{x0} = 1 kT)

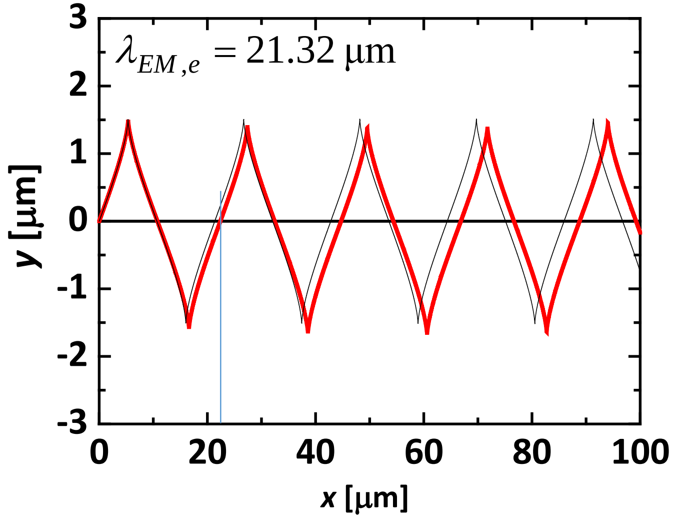
レーザー電場-eE_yによる振動
→ y方向のみの運動



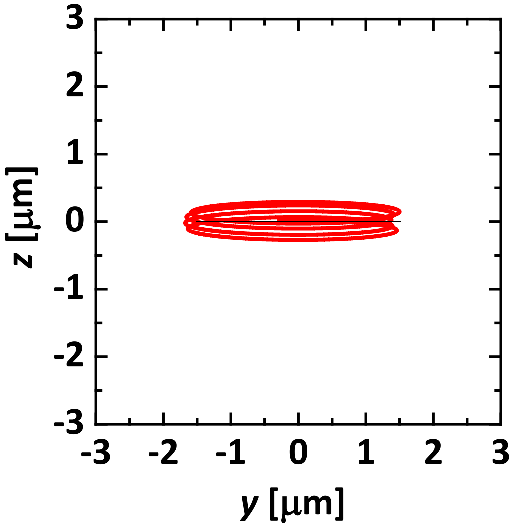
v × B によるレーザー伝播
方向へのドリフト運動



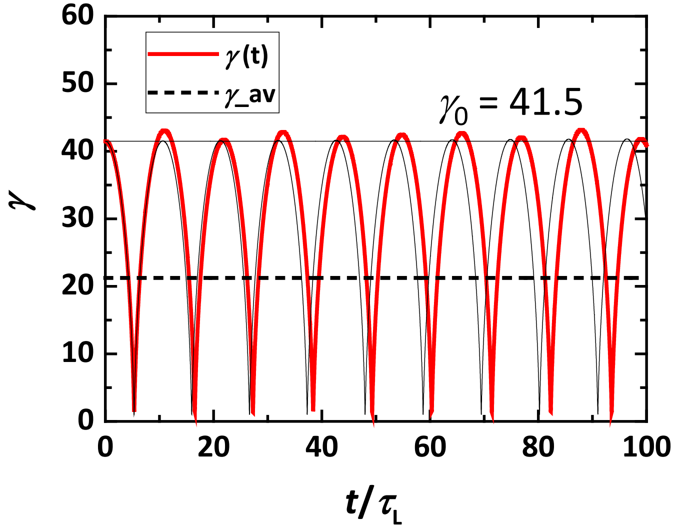
x-y平面上での電子の軌跡



y-z平面上での電子の軌跡



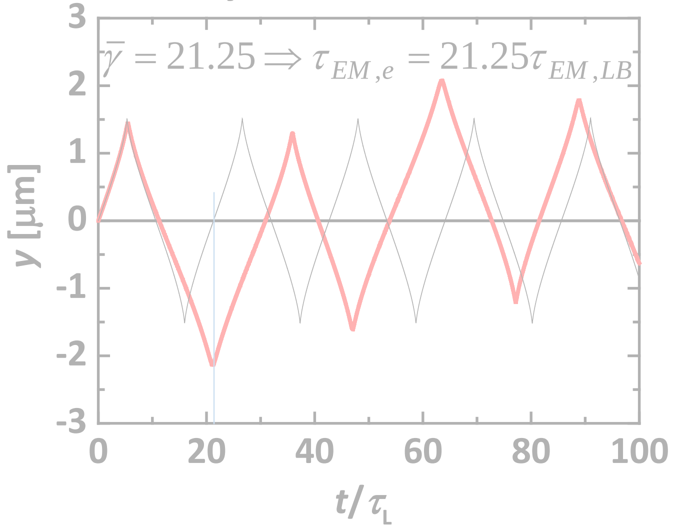
Lorentz因子の時間発展



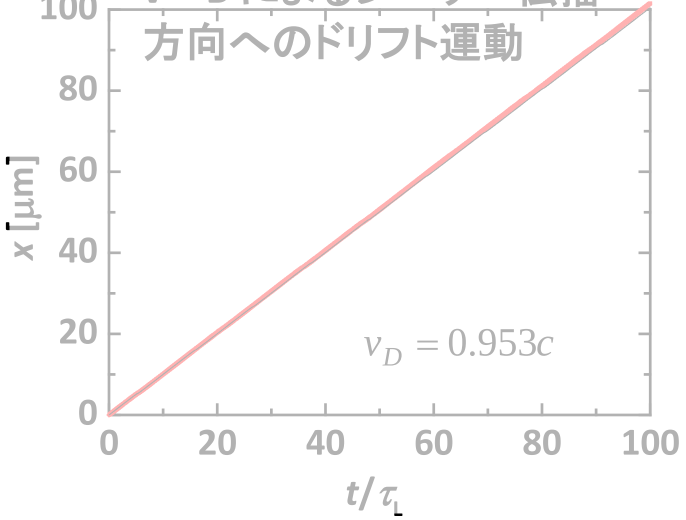
直線偏光平面波 a_0 = 9 (B_{x0} = 3 kT)

HIROSHIMA UNIVERSITY

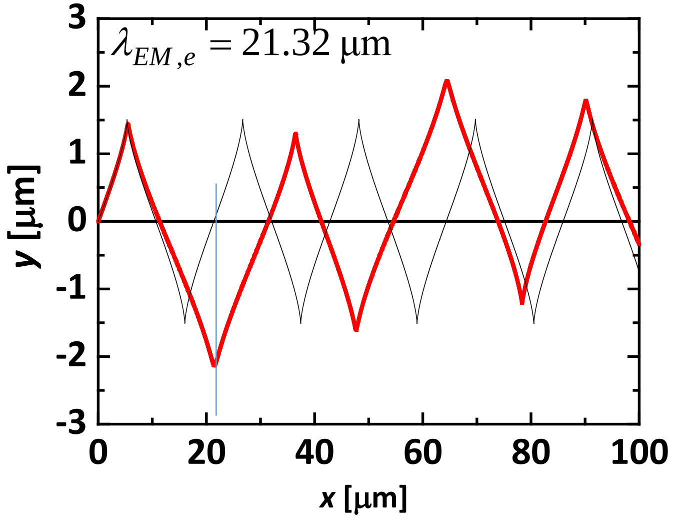
レーザー電場-eE_yによる振動
→ y方向のみの運動



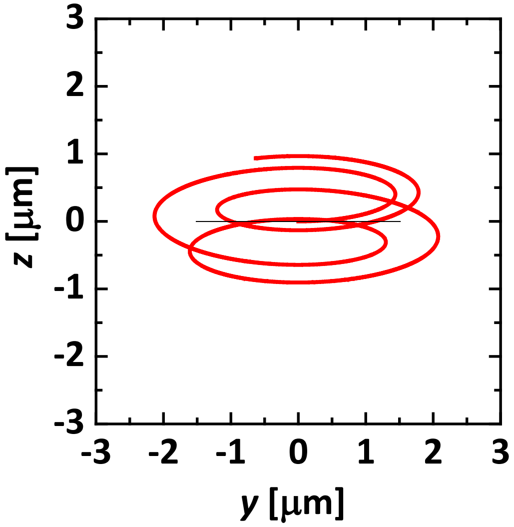
v × B によるレーザー伝播
方向へのドリフト運動



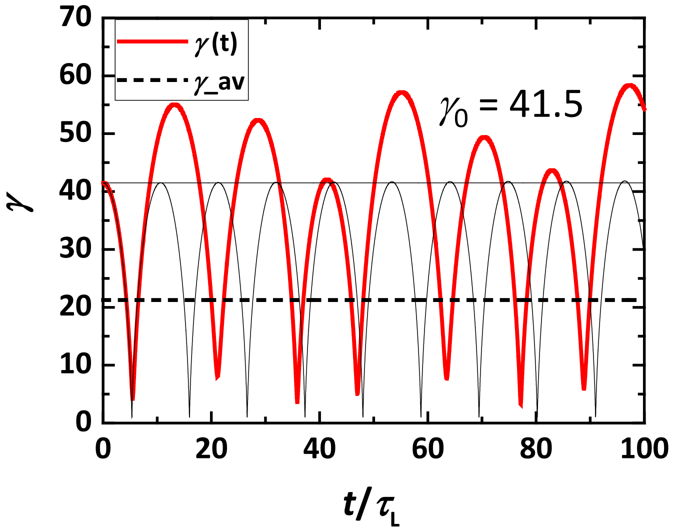
x-y平面上での電子の軌跡



y-z平面上での電子の軌跡



Lorentz因子の時間発展



HIROSHIMA UNIVERSITY

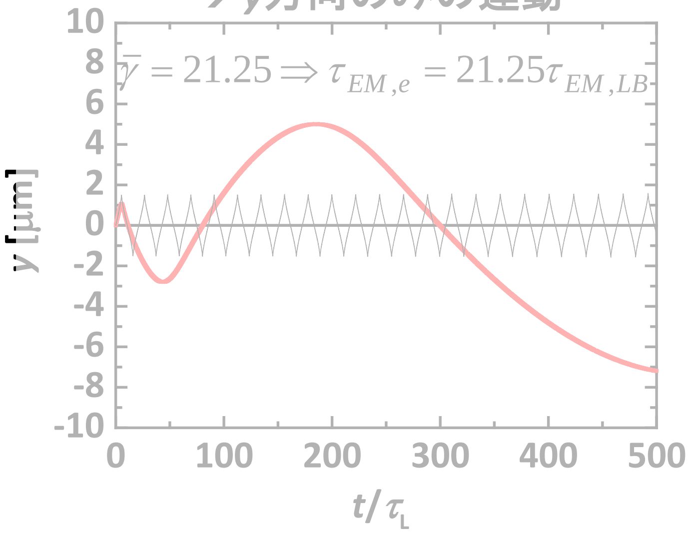
Resonance condition

$\omega_L = \omega_c$

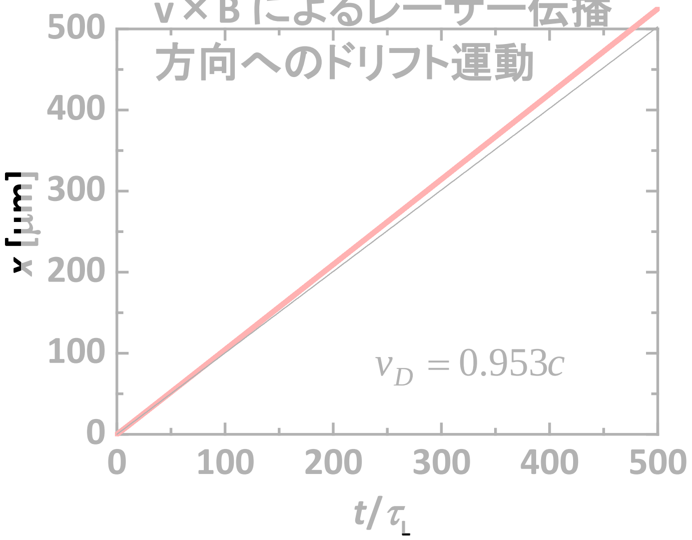
直線偏光平面波 $a_0 = 9$ $(B_{x0} = 10\ \mathrm{kT})$

Reactive Gas Dynamics Laboratory

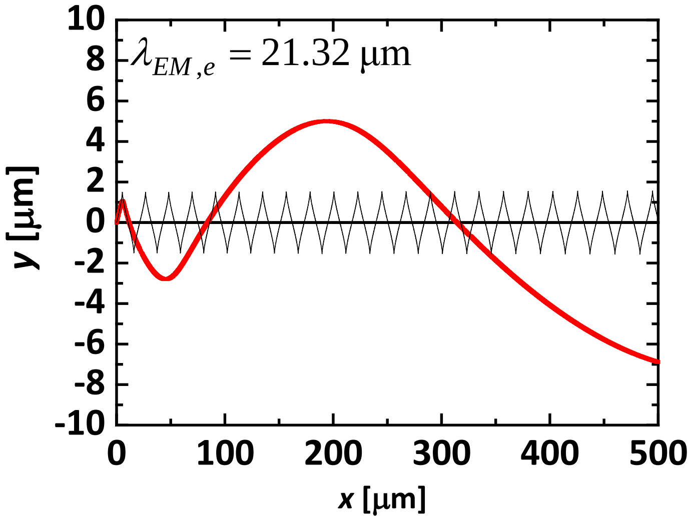
レーザー電場$-eE_y$による振動
→ y方向のみの運動



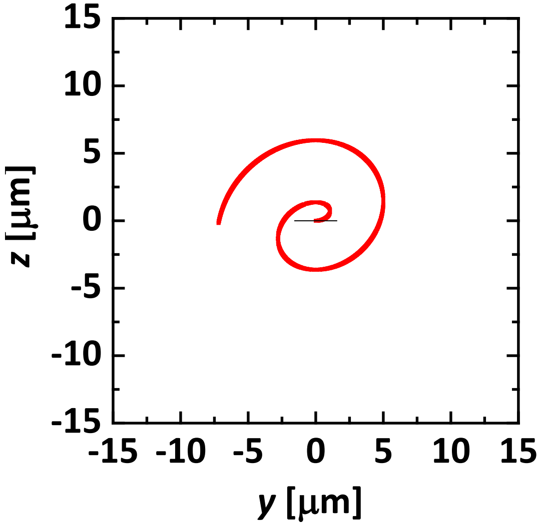
v × B によるレーザー伝播方向へのドリフト運動



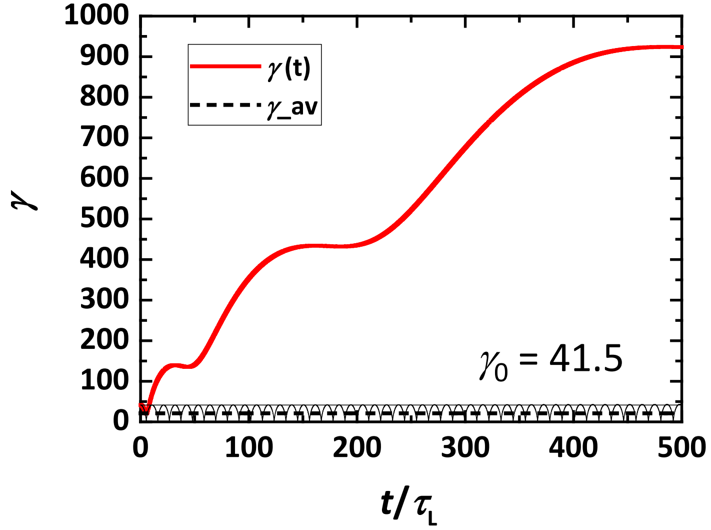
x-y平面上での電子の軌跡



y-z平面上での電子の軌跡



Lorentz因子の時間発展



縦磁場印可時のレーザー加速とサイクロトロン運動の共鳴

HIROSHIMA UNIVERSITY

Reactive Gas Dynamics Laboratory

v_Dで動く電子から見た電磁場の振動周波数

$$\omega_{L,e} = \frac{\omega_L}{\bar{\gamma}} = \frac{4\omega_L}{4 + a_0^2}$$

➡ 実験室系での周波数の $1/\bar{\gamma}$ 倍となる

レーザー伝播方向(x)に印可した静磁場による旋回周期は、周期平均した電子のローレンツ因子を用いると

$$\omega_c = \frac{eB_{x0}}{\bar{\gamma} m_e}$$

電子から見たレーザー場の振動周期と外部磁場による旋回周期が等しくなるところで、x軸を中心とした旋回運動と、レーザー電場によるy方向への加速が共鳴的に生じる。この時の縦磁場強度は、

$$\boxed{\omega_c = \omega_{L,e} \Rightarrow \frac{\omega_L}{\bar{\gamma}} = \frac{eB_{x0}}{\bar{\gamma} m_e} \Rightarrow B_{x0} = \frac{m_e \omega_L}{e}}$$

共鳴条件は、レーザー強度によらず、波長(もしくは周波数)にのみ依存する。

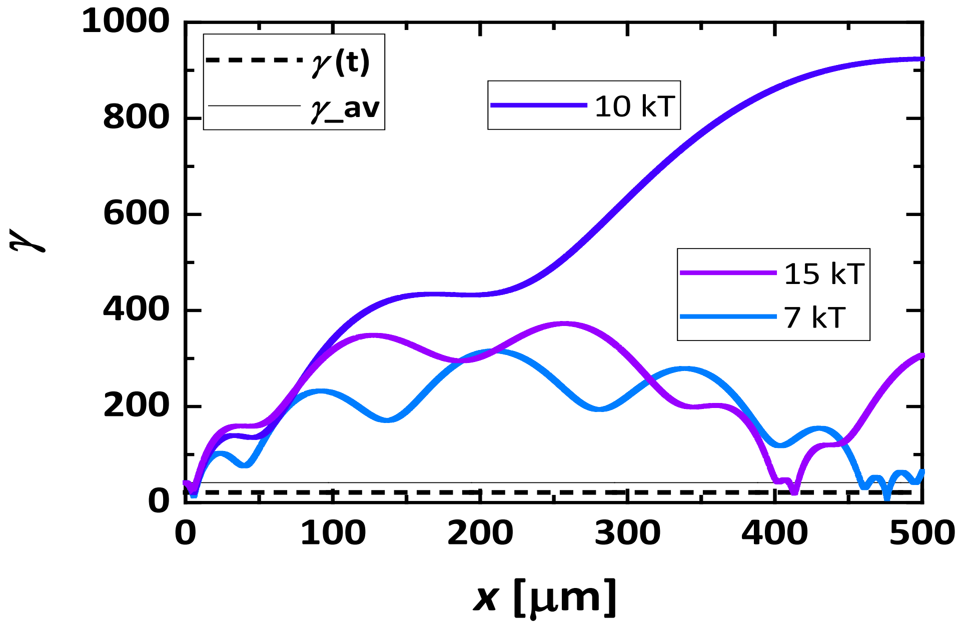
レーザー波長 l_L = 1.053 μmの場合、

$$\omega_L = 1.7888 \times 10^{15} \ [2\pi/\mathrm{s}]$$

$$\Rightarrow B_{x0} = \frac{m_e \omega_L}{e} = 10.2\,[\mathrm{kT}]$$

→ B_{x0} ～ 10 kTで共鳴吸収が生じる。

縦磁場印可＋平面電磁波下での単一電子の軌道計算



共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 1

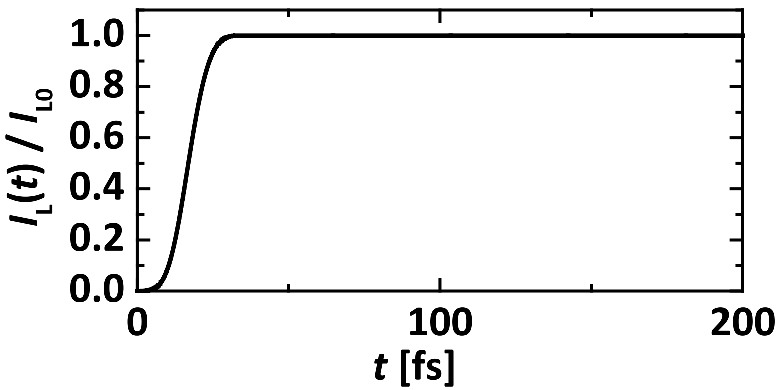
HIROSHIMA UNIVERSITY

Code: PICLS2D*･･･collisional PIC code

- **プラズマ集団効果がほぼ無視できる場合は？ ($\omega_p << \omega_L$)　分散関係 →** $c^2k^2 = \omega^2 - \cancel{\dfrac{\omega_p^2}{1 \mp \omega_c/\omega_L}} \approx \omega^2$

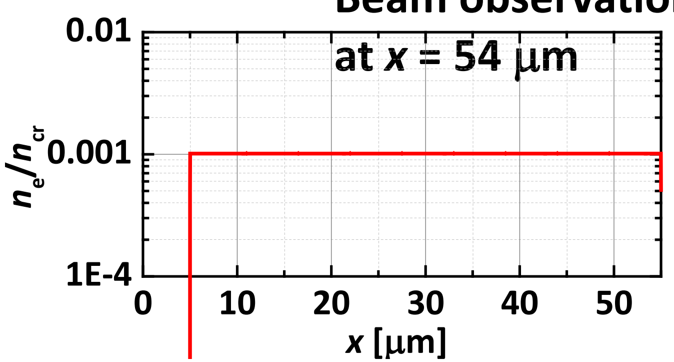
Laser (p-pol.; E-field in y-direction)

λ_L = 1.0 μm
I_L = 1e20 W/cm^2 (a_0 = 8.549)
Spatial profile…plane wave
Temporal profile
10τ_L Super-Gaussian ramp
→ semi-infinite



(laser B-field; B_{y0} ~ 92 kT)

Target fully-ionized Deuteron (D^+)
$n_e = n_d =$ **0.001n_{cr}**



Box: 55μm x 0.1 μm
Grid: 100cells /λ_L
Particle: ele &ion 20 /cell
Boundary condition
- escaping in x- dir
- Periodic in y-dir

both for particles & fields

External Field

B_{x0} = 0 or 10.71 kT
(uniform)

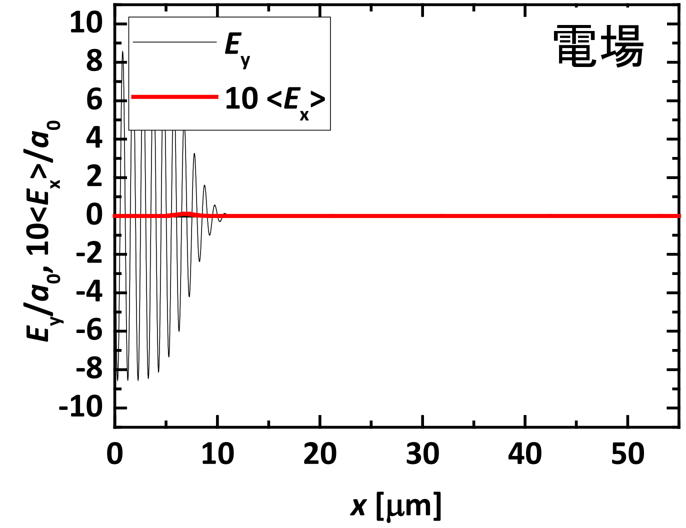
共鳴磁場強度

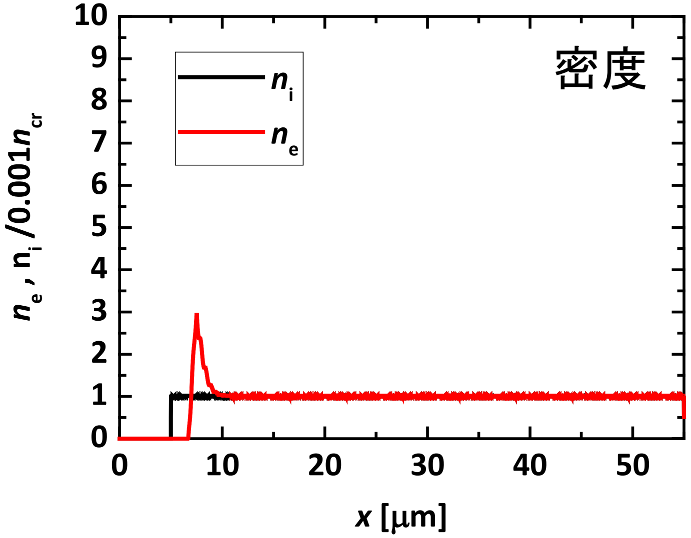
$\omega_L \sim \omega_c$
→ **B_{x0} = 10.71kT**

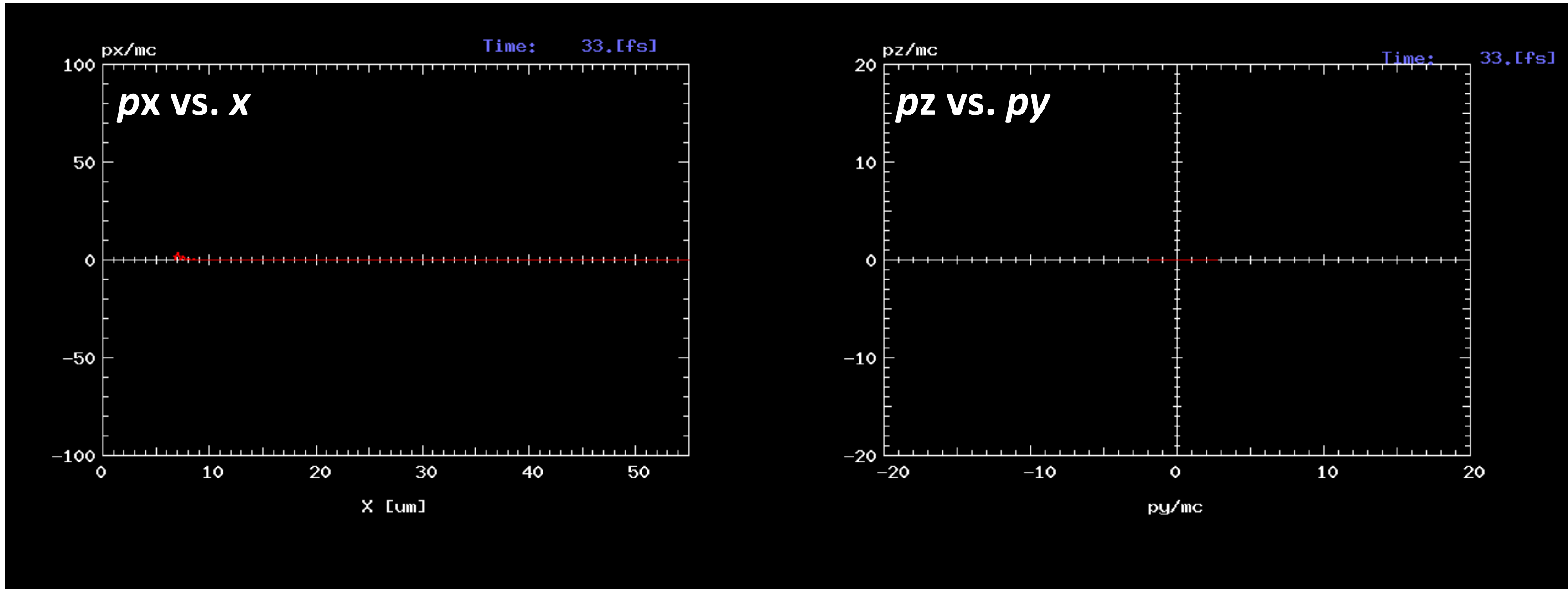
*Y. Sentoku and A. J. Kemp, J. Comp. Phys. **227**, 6846 (2008).

共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 1

外部磁場無しの場合 at 10 τ_L (33fs)

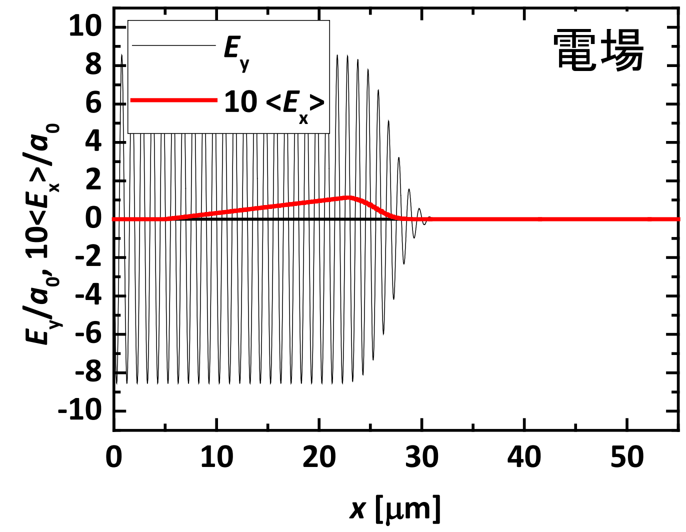


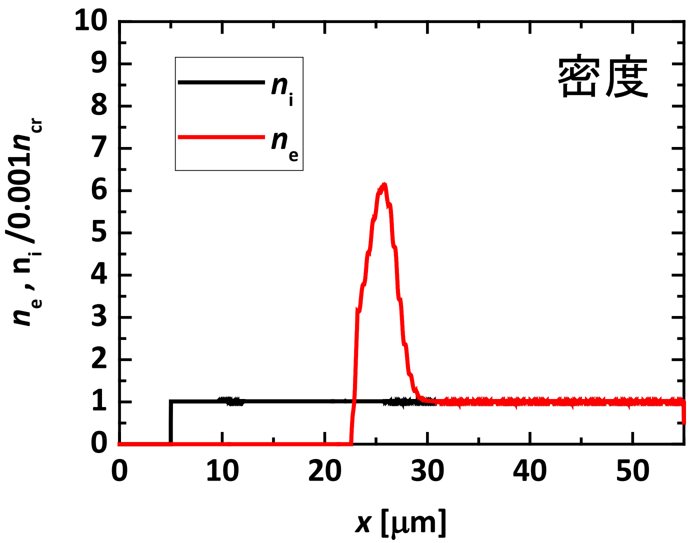


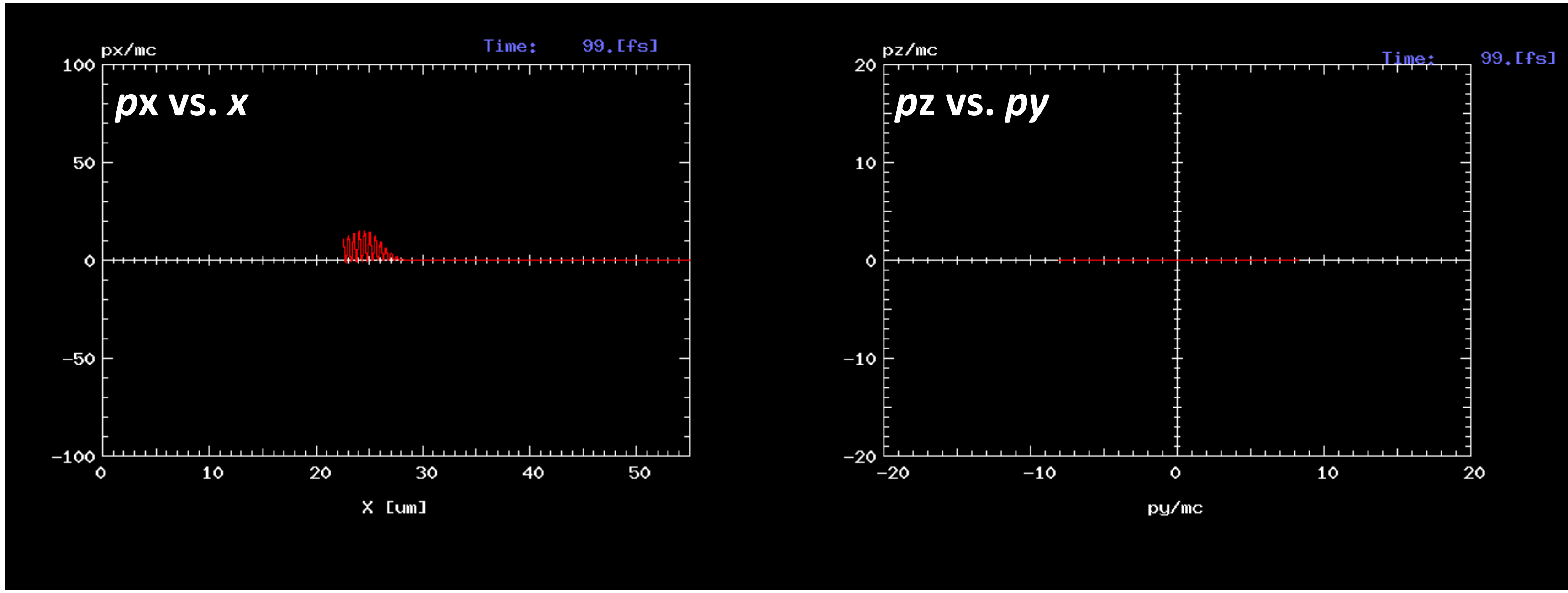


共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 1

外部磁場無しの場合 at 30 τ_L (99fs)

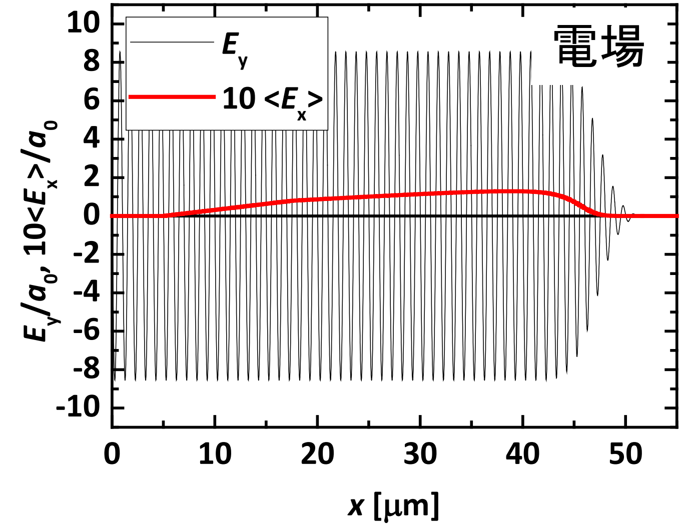


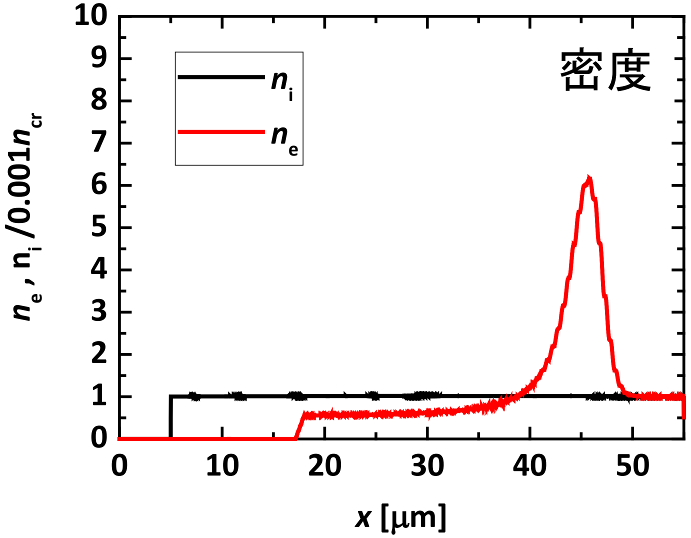


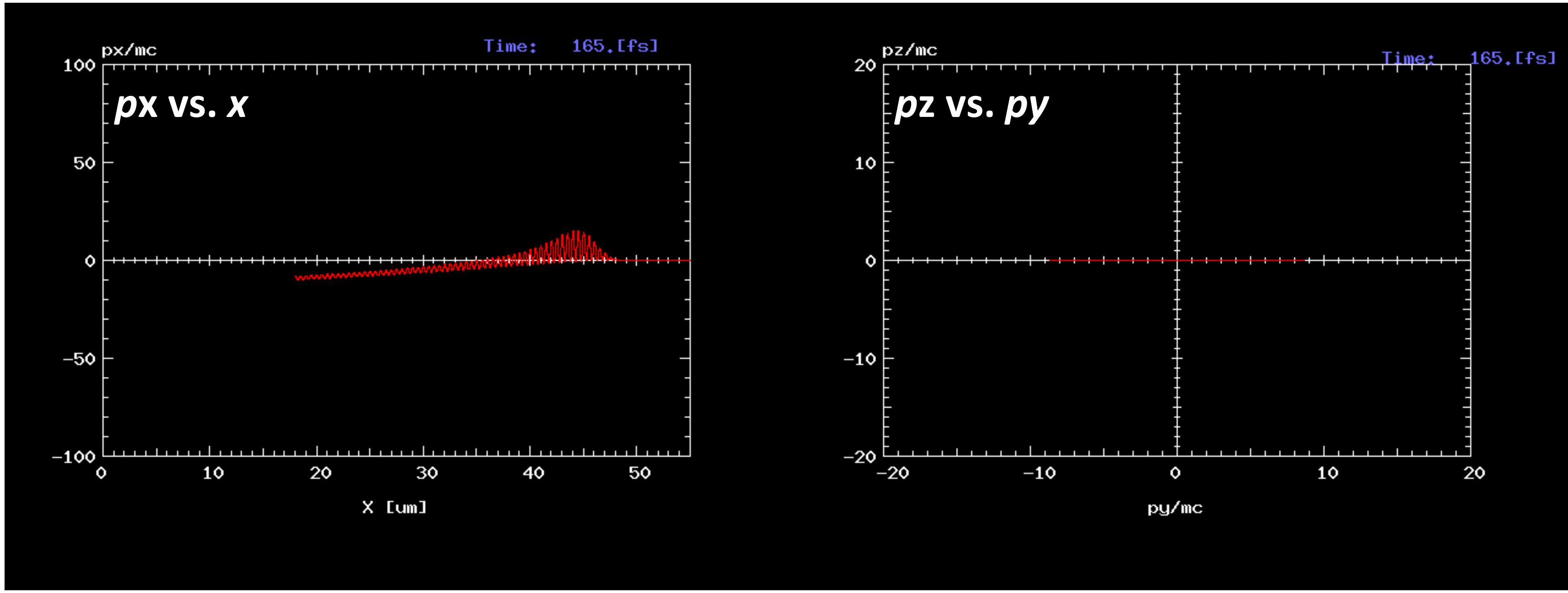


共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 1

外部磁場無しの場合 at 50 τ_L (165fs)

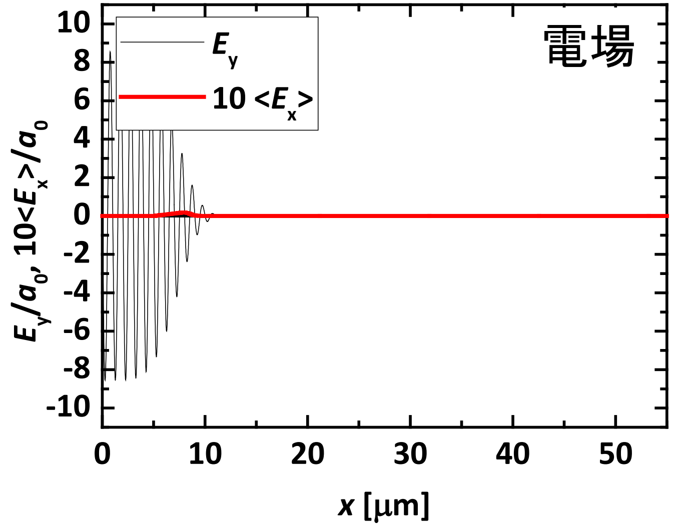


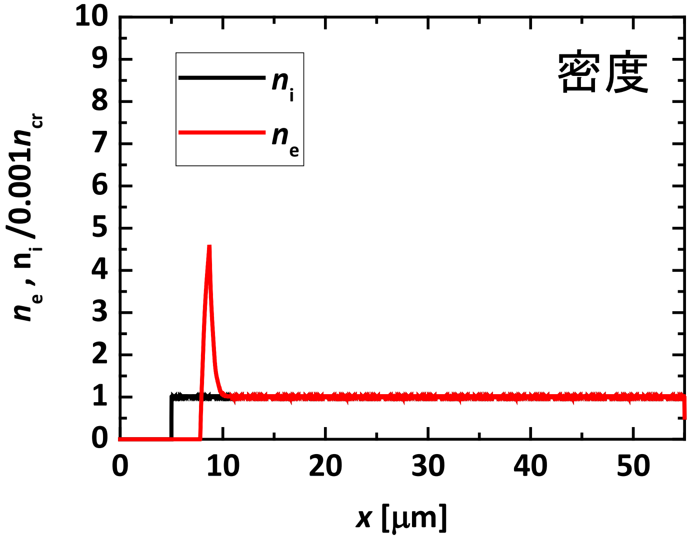


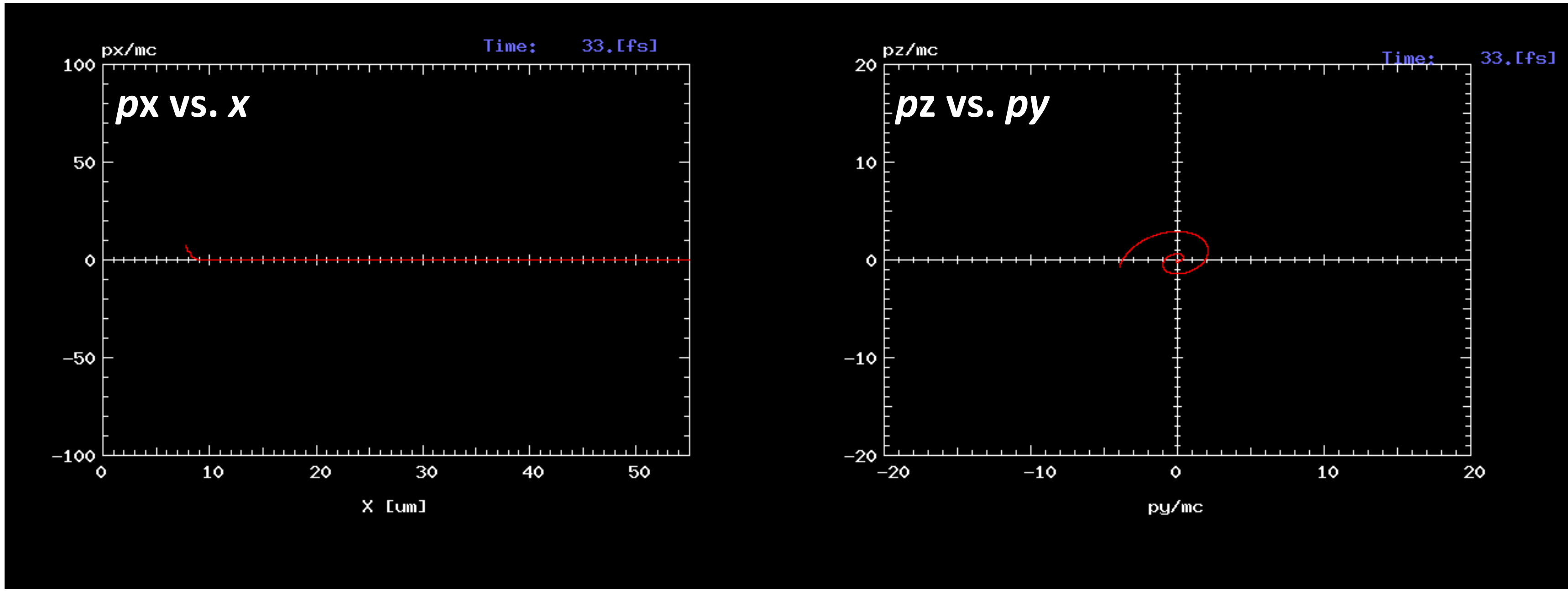


共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 1

外部磁場 B_{x0} = 10.7 kT 場合 at 10 τ_L (33fs)

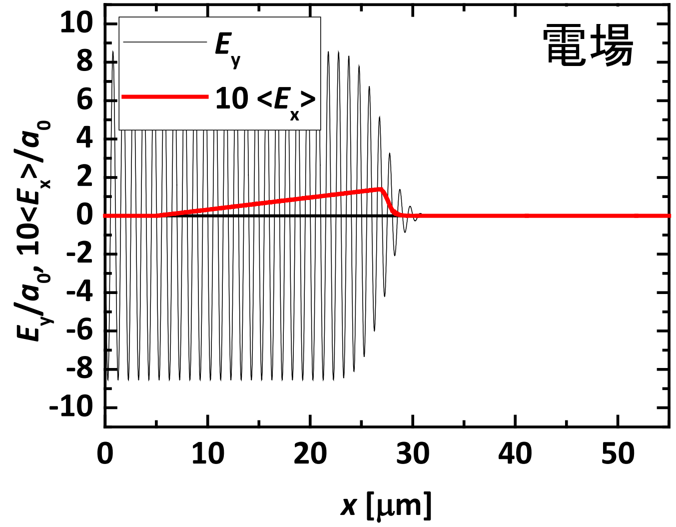


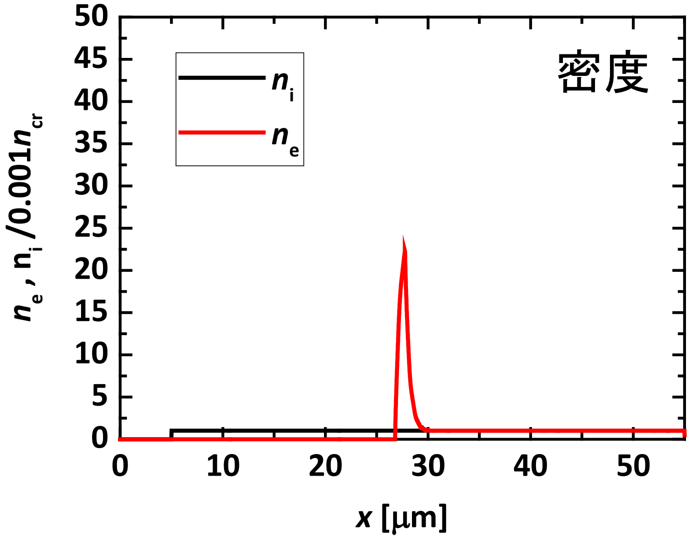


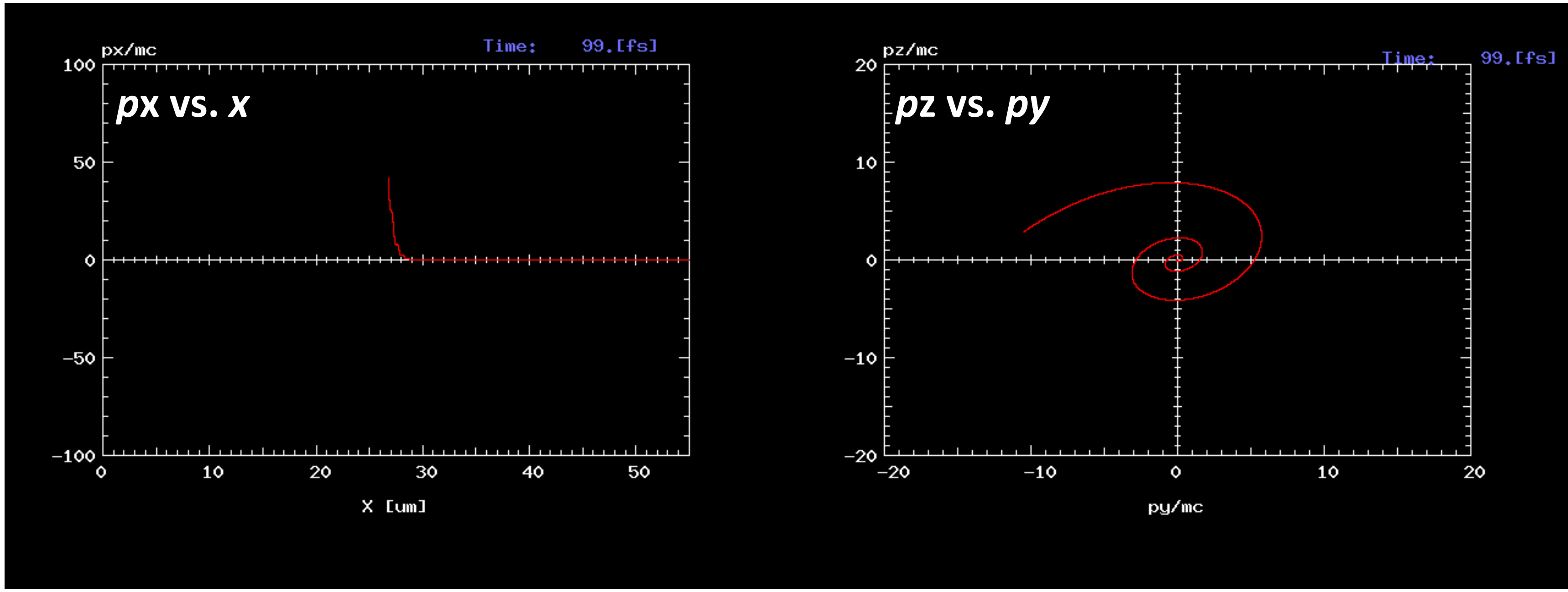


共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 1

外部磁場 B_{x0} = 10.7 kT 場合 at 30 τ_L (99fs)

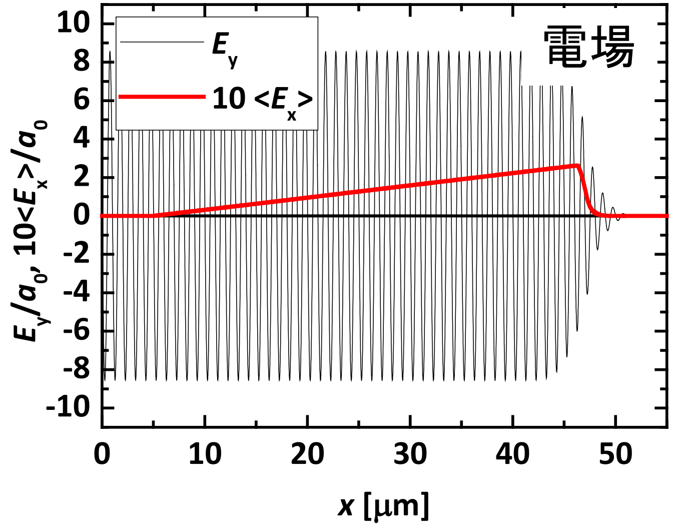


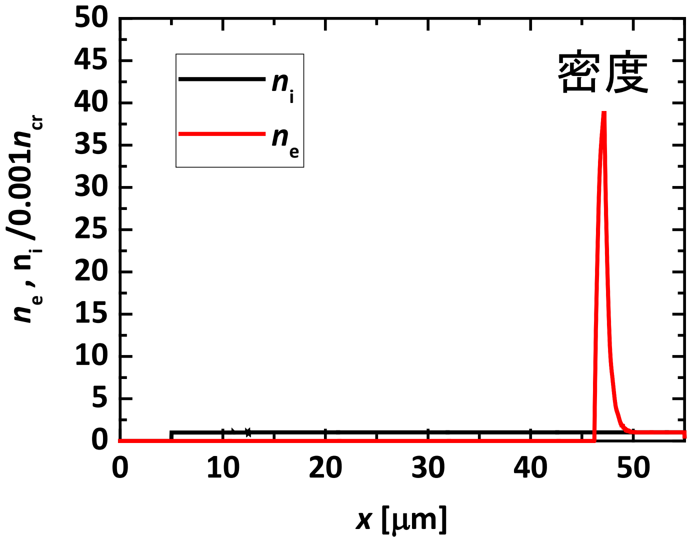


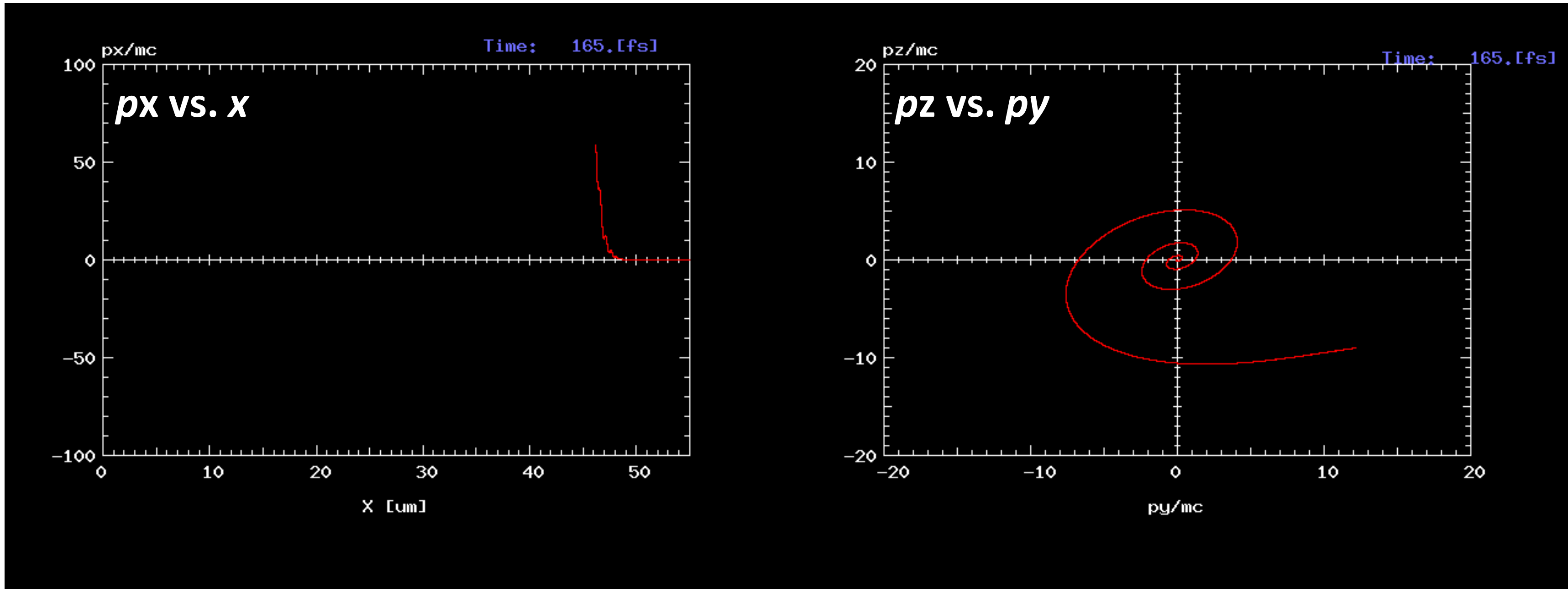


共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 1

外部磁場 B_{x0} = 10.7 kT 場合 at 50 τ_L (165fs)



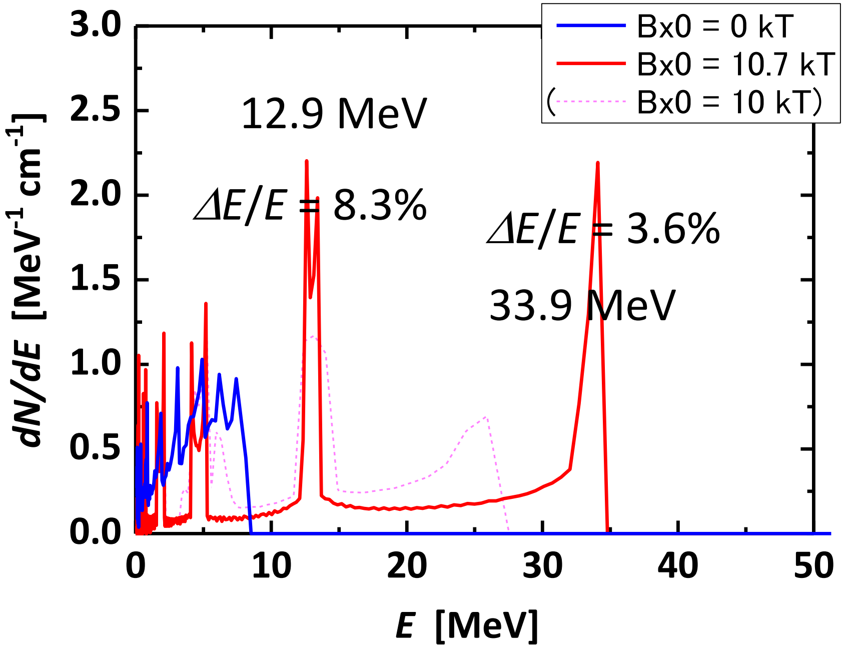


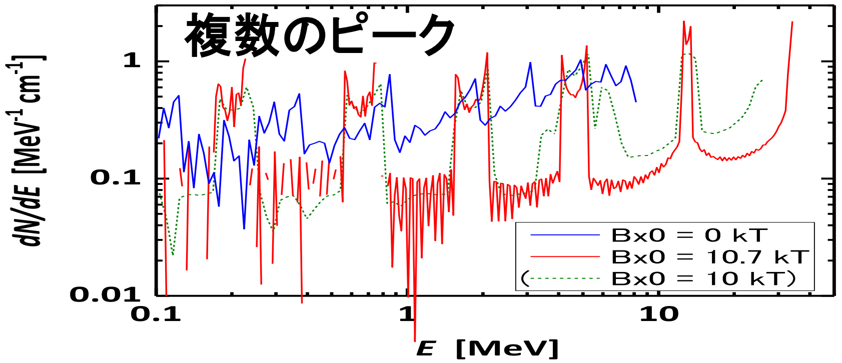


共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 1

● プラズマ集団効果がほぼ無視できる場合 ($\omega_p << \omega_L$) $n_e = 0.001\ n_{cr}$

ターゲット裏面近傍で観測したエネルギースペクトル





50 μm 伝播に伴う粒子加速

- 単一粒子の運動の場合

  E_{max} = 18.7 MeV, (E_{av} = 9.3 MeV) w/o B_{ext}

  E_{max} = 73.5 MeV with B_{ext} = 10.7 kT

  → ~4倍

- Quasi-1D PIC simulation

  E_{max} = 8.1 MeV w/o B_{ext}

  E_{max} = 34.3 MeV with B_{ext} = 10.7 kT

  → ~4倍

- 最大エネルギーは、PIC simulation結果は、単一粒子の運動の場合の約半分→ 荷電分離による静電場の影響？
- サイクロトロン共鳴による加速効率向上割合は一致。
- サイクロトロン共鳴により、単色性の高いビームが生成
- スペクトルに複数のピークが存在→静電場によるディフェーズ＆再共鳴の効果か？

※ 変換効率は未評価

共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 2

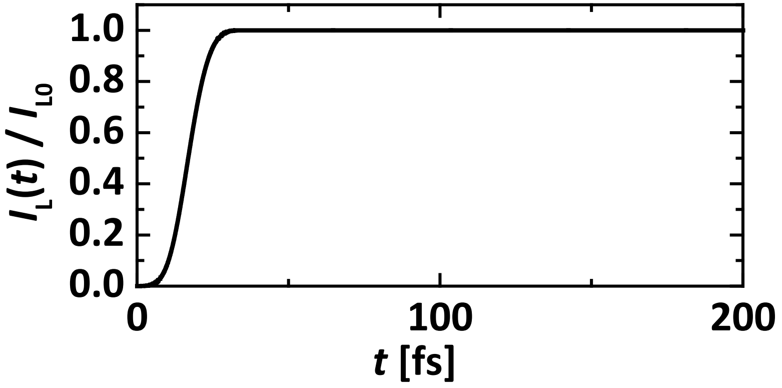
Code: PICLS2D*・・・collisional PIC code

● プラズマ集団効果が顕著(ω_p ~< ω_L)な場合

Exp. a_0 = 9 (λ_L = 1.053 μm, I_L = 10^{20}W/cm^2), n_e = 3 n_{cr}

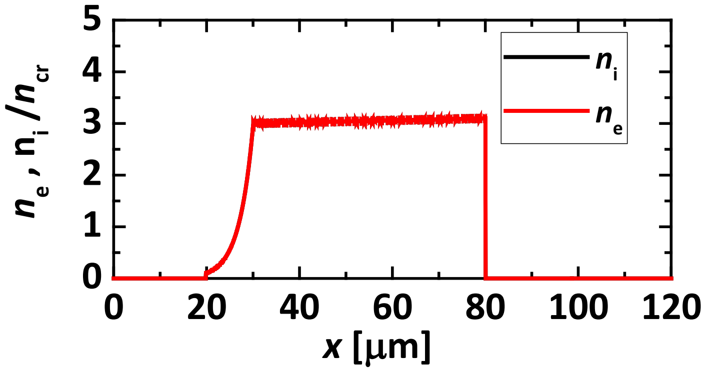
Laser (p-pol.; E-field in y-direction)

λ_L = 1.053 μm
I_L = 1e20 W/cm^2 (a_0 = 9)
Spatial profile…plane wave
Temporal profile
10τ_L Super-Gaussian ramp
→ semi-infinite



(laser B-field; B_{y0} ~ 92 kT)

Target fully-ionized Deuteron (D$^+$)
n_e = n_d = **3n_{cr} (相対論的臨界密度以下)**



Box: 120 μm x 0.1 μm
Grid: 50cells /λ_L
Particle: ele &ion 20 /cell
Boundary condition
- escaping in x- dir
- Periodic in y-dir

both for particles & fields

External Field

B_{x0} = 0 or 10 kT
(uniform)

真空中での共鳴磁場強度

ω_L ~ ω_c
→ **B_{x0} = 10.2kT**

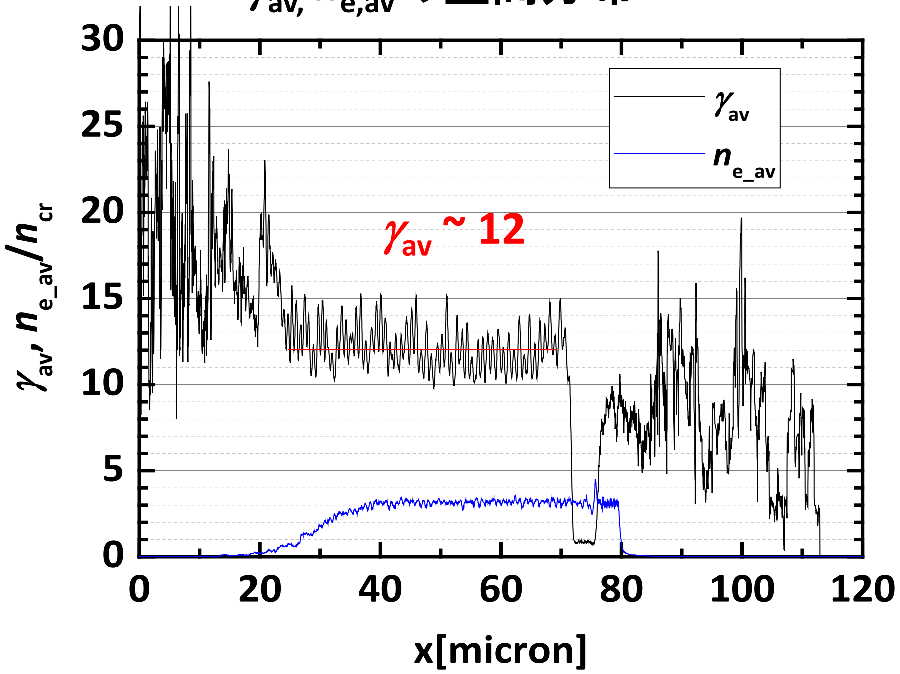
*Y. Sentoku and A. J. Kemp, J. Comp. Phys. **227**, 6846 (2008).

共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 2

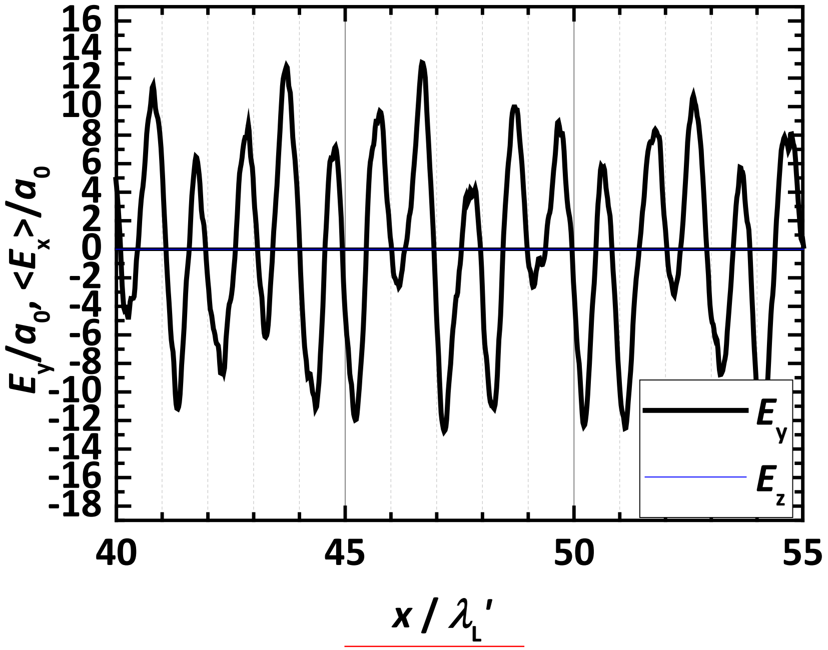
● プラズマ集団効果が顕著(ω_p ~< ω_L)な場合

外部磁場無しの場合 at 150 τ_L (521fs)

γ_{av}, $n_{e,av}$の空間分布



振動電場E_yの空間分布



$$\omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 3n_{cr}}{12m_e} = \frac{1}{4}\omega_L^2 \Rightarrow \lambda_L' = \sqrt{\frac{4}{3}}\lambda_L$$

$$\omega = \sqrt{\omega_L^2 + \omega_p^2} = \sqrt{\frac{7}{4}}\omega_L \sim 1.3\omega_L$$

波長は、真空中での波長λ_Lの$(4/3)^{1/2}$倍。

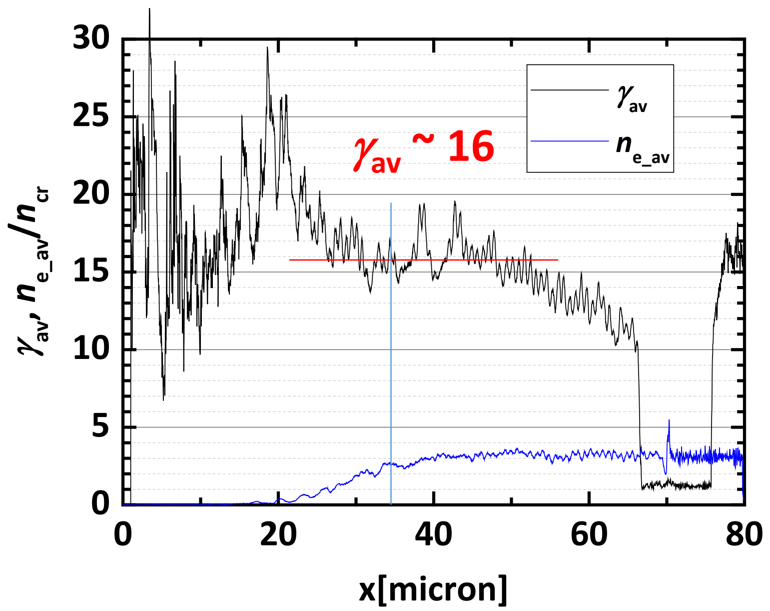
共鳴磁場強度は真空中の1.3倍

共鳴吸収加速に対するquasi-1D PIC simulation 2

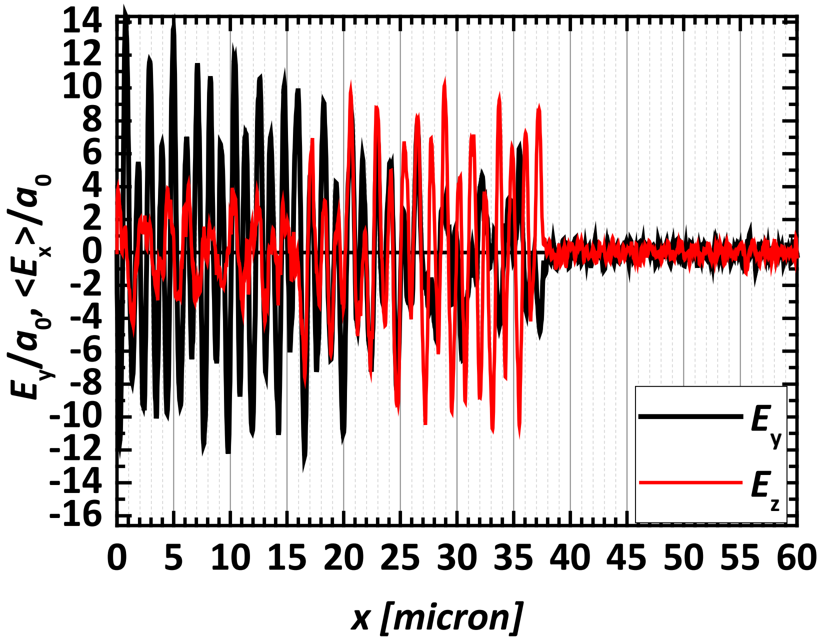
● プラズマ集団効果が顕著(ω_p ~< ω_L)な場合

外部磁場 B_{x0} = 13 kT 場合 at 150 τ_L (521fs)

γ_{av}, $n_{e,av}$の空間分布



振動電場E_yの空間分布



磁場無しの場合に比べて、γ_{av}は高くなっている。12 → 16

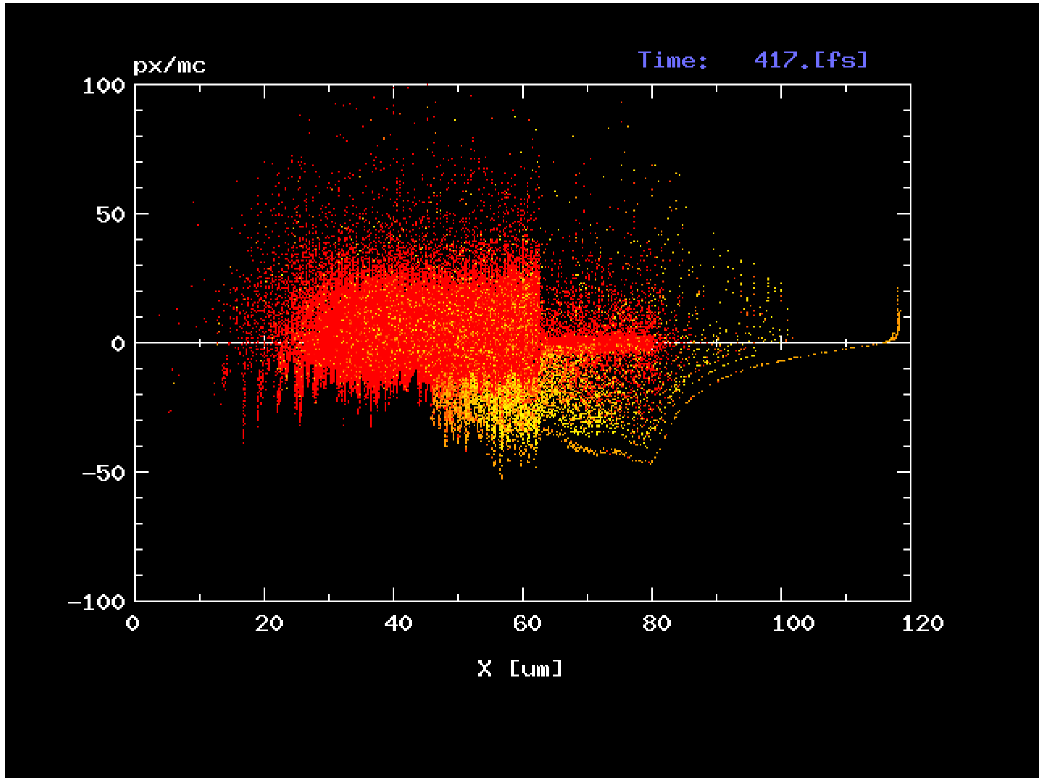
γ_{av} >10と相対論領域でもファラデー回転が顕著

→ 磁場無しにおける評価よりも、より強い縦磁場がサイクロトロン共鳴には必要になる？

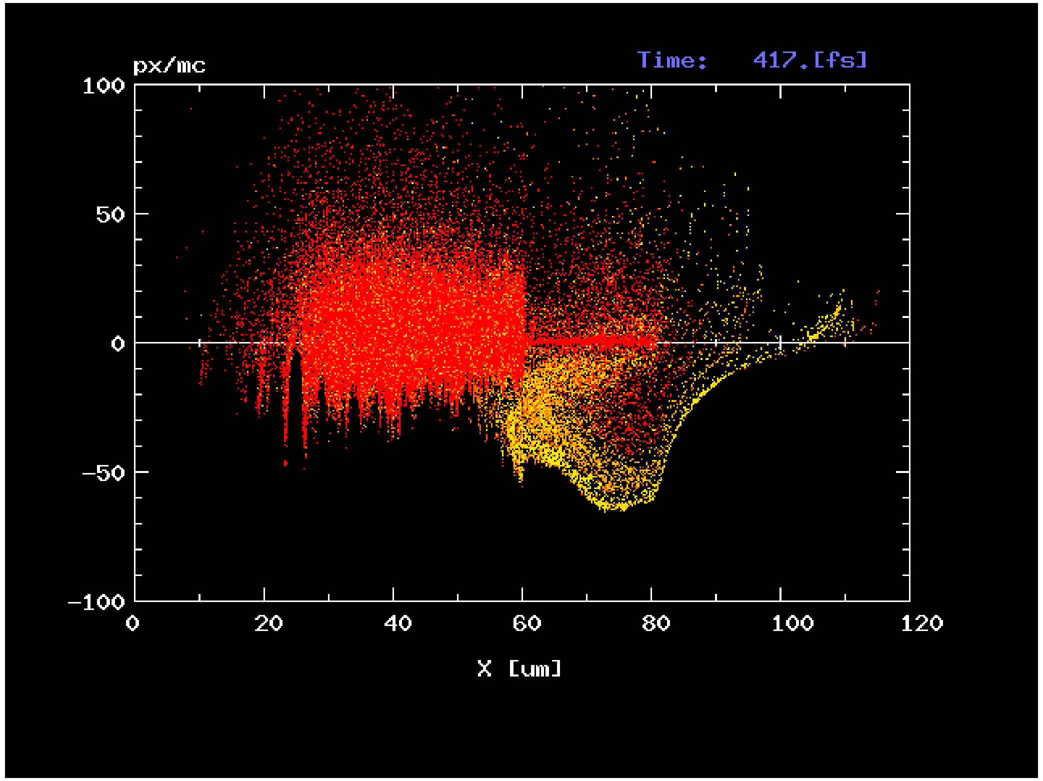
位相比較

● プラズマ集団効果が顕著(ω_p ~< ω_L)な場合

外部磁場無しの場合 at 120 τ_L (417fs)



外部磁場 B_{x0} = 13 kT 場合 at 120 τ_L (417fs)



大差なし → Bext = 10 kT程度では共鳴による顕著な加速は観測されない。

最後に

- 点火実証実験では 強度$I_L > 10^{20}$W/cm^2, パルス長 $\tau_L > 10$ psの加熱レーザーが必要

- ピコ秒オーダーのレーザープラズマ相互作用では、プレパルスフリーでも、加熱レーザーによるターゲット加熱によりターゲット表面に相対論的臨界密度以下の低密度プラズマが形成される。

- 生成する電子ビームのガイディングには~10 kTクラスの磁場が必要

キロテスラクラスの強磁化プラズマ中で相対論レーザープラズマ相互作用による電子加速特性の評価

- 粒子(プラズマ) → 電磁場 : Faraday rotation, Whistler wave
- 電磁場 → 粒子 Cyclotron resonance

自己点火実証クラス(＞10^{20}W/cm^2)での解析