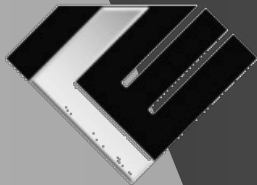


レーザープラズマ科学のための最先端シミュレーションコードの共同開発・共用に関する研究会
平成29年1月10日(火)10:00 ~ 1月11日(水)17:00
於 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心-研究棟大会議室

強磁場中の高強度レーザープラズマ相互作用



OSAKA UNIVERSITY



M. Hata, H. Sakagami¹, and H. Nagatomo

Institute of Laser Engineering, Osaka University



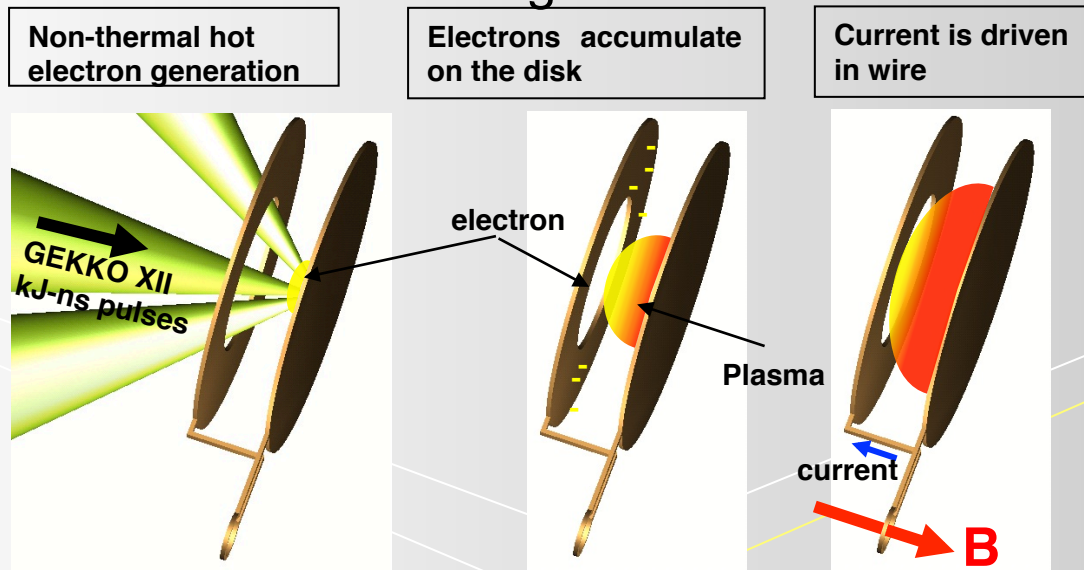
Fundamental Physics Simulation Research Division, National Institute for Fusion Science¹

目次

- 研究背景・目的
- シミュレーション条件
- $B_{\text{ext}} < B_{\text{ECR}}$ の計算結果
 - フィラメントおよび密度構造の形成
 - 磁気パイプ構造
 - 高速電子特性
- $B_{\text{ext}} > B_{\text{ECR}}$ の計算結果
 - 高密度領域へのレーザー伝播
- まとめ

kT-class magnetic field generation using kJ-ns laser

- Kilo-Tesla B field generation due to capacitor-coil*¹
 - kJ-ns laser irradiation to capacitor coil target causes potential difference between two disks and it drives large currents and generates kilo-Tesla magnetic field.

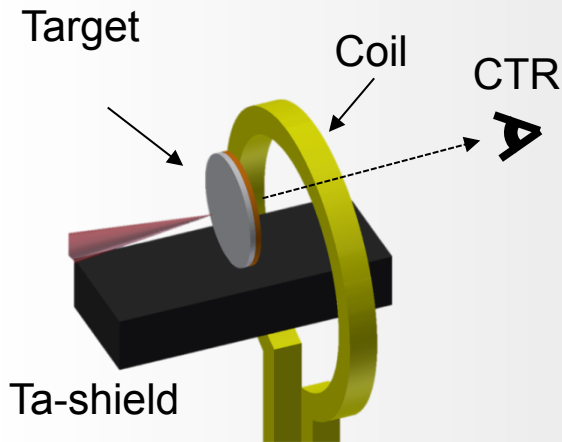


- Kilo-Tesla B field generation via magnetic field compression using kJ-ns laser*²
 - Seed B field is compressed with target by kJ-ns laser.

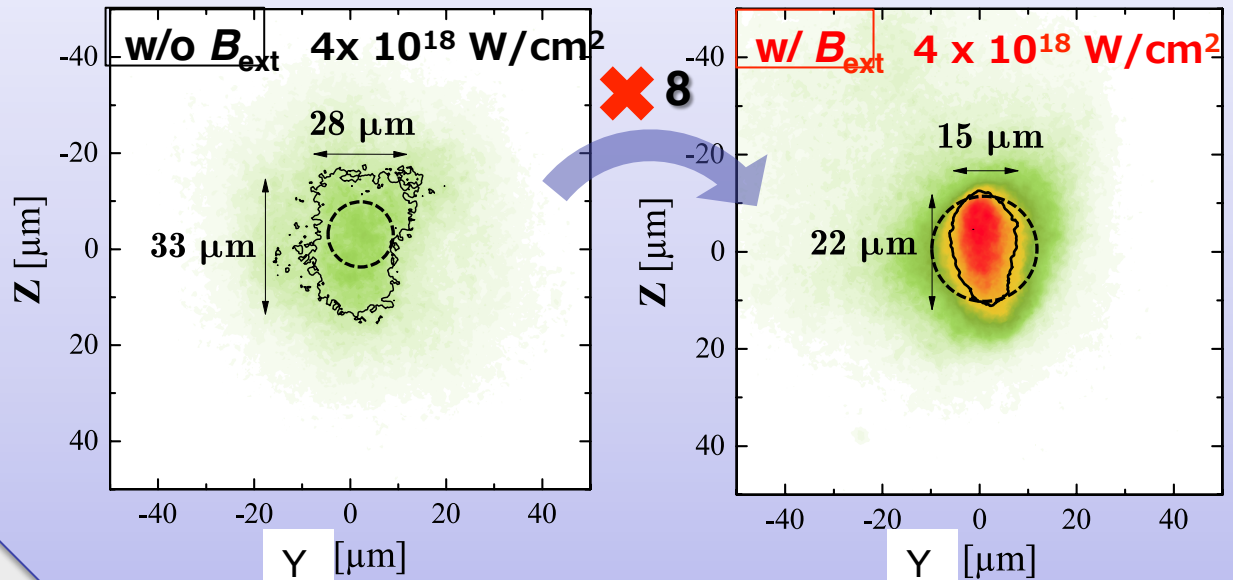
*¹ S. Fujioka *et al.*, *Sci. Rep.* **3**, 1170 (2013).

*² H. Yoneda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **109**, 125004 (2012).

Experiments of CTR measurement under external magnetic fields



Results



Santos et al., IFSA2015, Fr.O.3.2

- Spot size of CTR becomes small in the case with external B_x fields and its intensity is amplified to around 8 times compared to no external B field case.

背景・目的

- 研究背景

- 近年可能になったkT級磁場生成

- kT級磁場下でのレーザープラズマ相互作用実験

⇒ 上記背景から、強磁場下における高強度レーザープラズマ相互作用実験が今後精力的に行われていくと予想されるが、その物理はあまりよく調べられていない。

- 研究目的

- 本研究では、kT級磁場とプリプラズマ存在下における高強度レーザープラズマ相互作用およびその結果生じる高速電子特性について明らかにするべく、2D-PICによるシミュレーション研究に着手した。

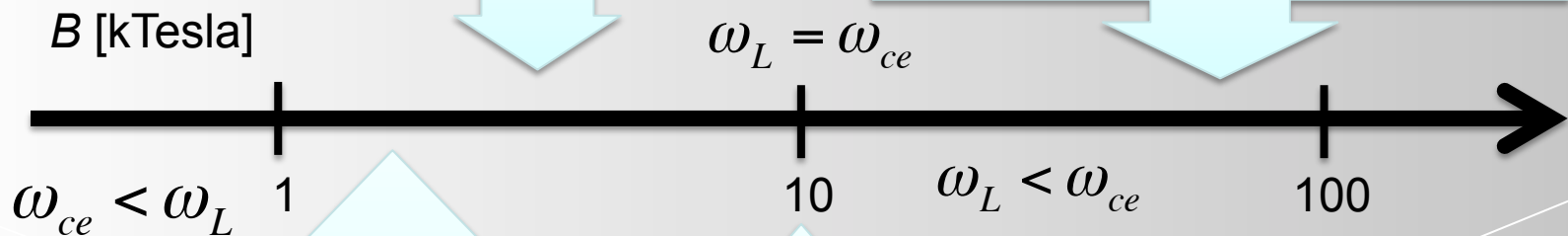
磁場に依存して起こる現象と高速点火への応用

☆磁場強度に依存して起きるであろう現象
(レーザー波長は1 μm を仮定)

✓ 効率的なエネルギー輸送

電子ビームガイディングが
顕著に見える領域

電磁波がホイッスラー波となって臨
界密度を超えて伝播できる領域



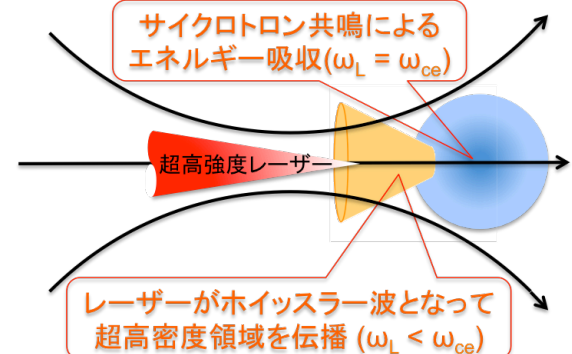
レーザー周波数とサイクロトロン周波数
が一致する電子サイクロトロン共鳴点

✓ 効率的なエネルギーデポジション

自己組織化による磁場構造
形成が起こる領域？

磁場に依存してドラスティックに変化する超高強度レーザープラズマ相互作用を、注目すべき現象に焦点を当て磁場強度毎に分類し、多次元電磁粒子コードを用いて解析することで、体系的な研究展開を図る。

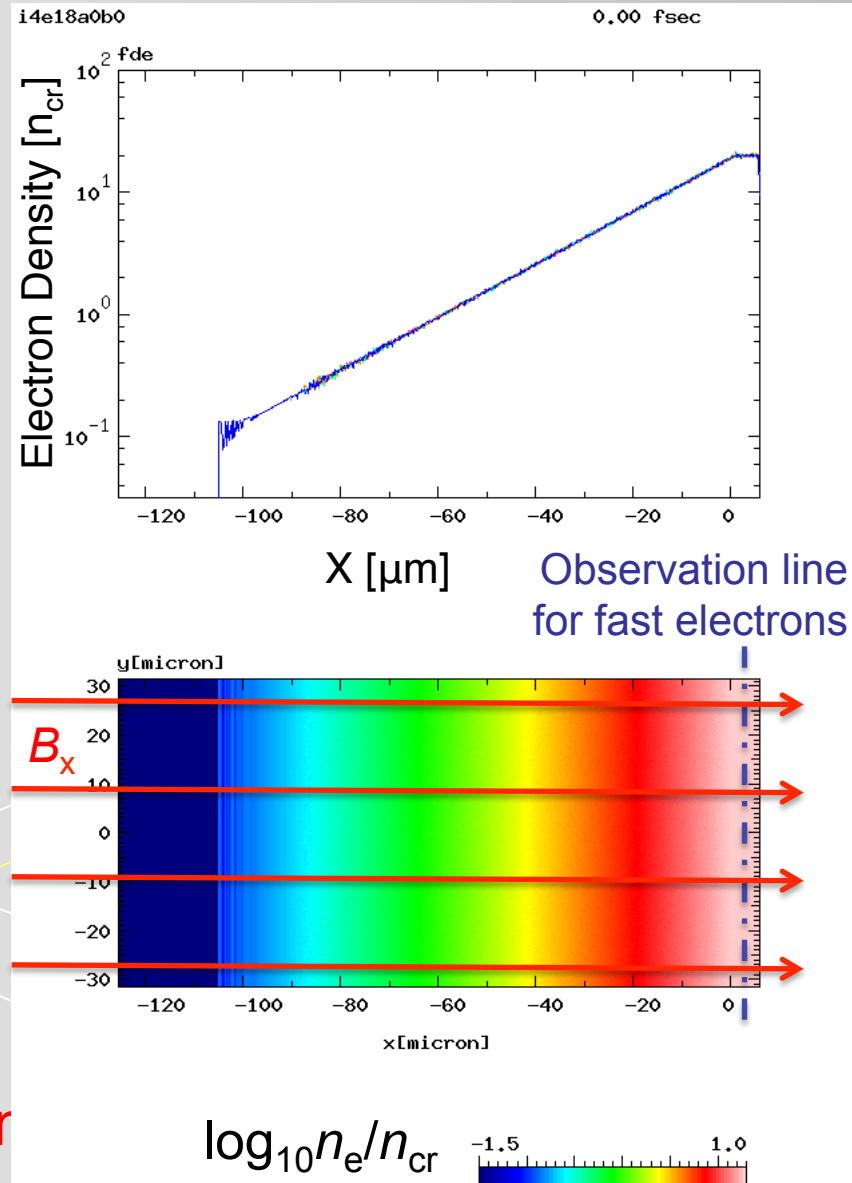
本研究の高速点火への応用例



Simulation condition for 2D-FISCOF

- Laser
 - $I_L = 4 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$
 - $\lambda_L = 1.06 \text{ }\mu\text{m}$
 - $\Phi_{\text{FWHM}} = 20 \text{ }\mu\text{m}$
 - Spatially Gaussian and temporally semi-infinite flattop
- Plasma
 - CH ($Z=3.5, A=6.5, n_{\text{max}} = 20 n_{\text{cr}}$)
 - $L_{\text{preplasma}} = 20 \mu\text{m}$
- External B fields
 - $B_x = 0, 5, 10, 50 \text{ MG}^*$
($B_{x,\text{ECR}} = 100 \text{ MG}$ w/o Relativ. Eff.)
*10 MG = 1 kTesla

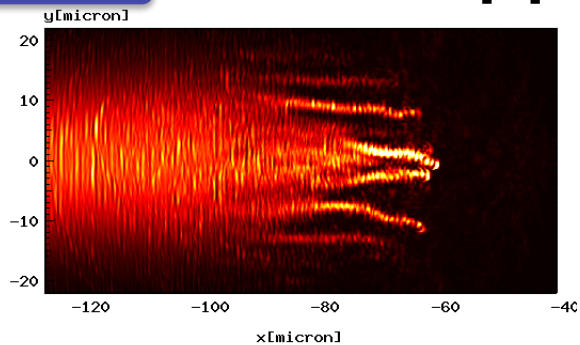
500 fs calculations have been done



2D profiles of laser field and electron density at 500 fs

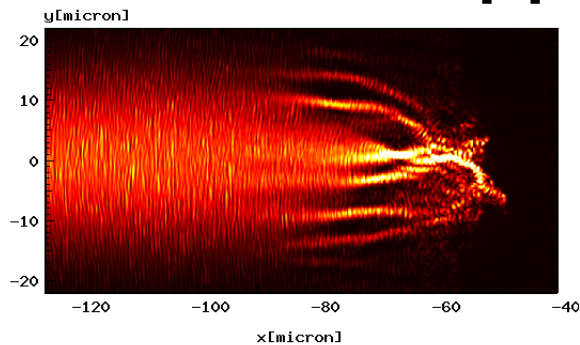
0 MG

$t = 250$ [fs]



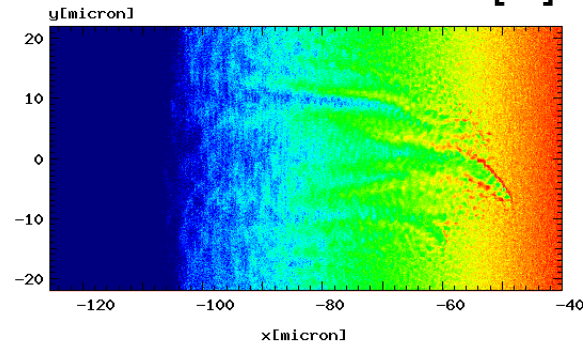
i4e18a0b0 fea

$t = 500$ [fs]



i4e18a0b0 fde

$t = 500$ [fs]



5 MG

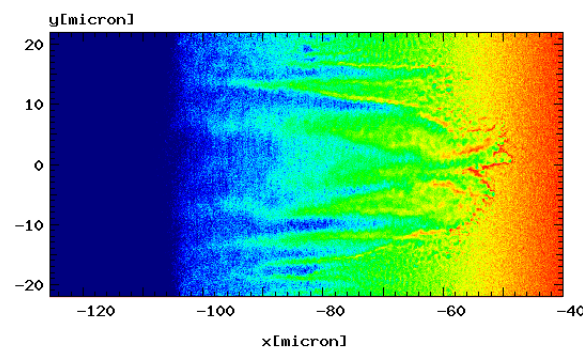
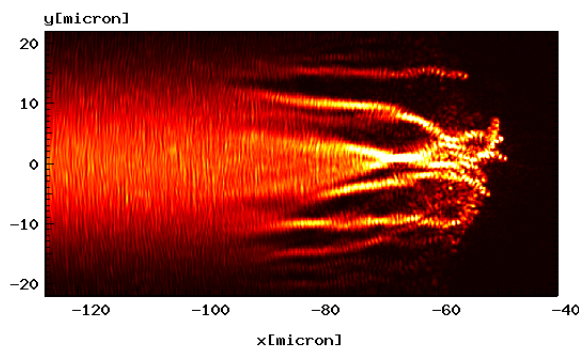
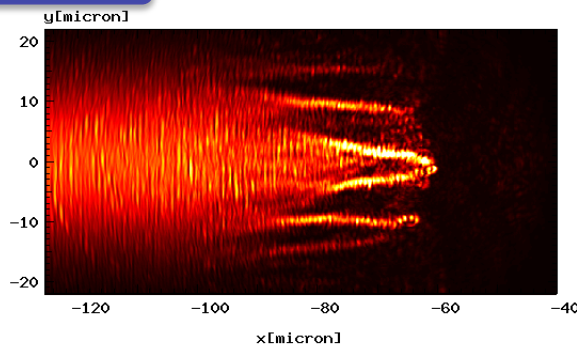
250.00 fsec

i4e18a0b5 fea

500.00 fsec

i4e18a0b5 fde

500.00 fsec



$\langle I \rangle$ [10^{20} W/cm²] 0.0 0.10

0.00 0.10

$\log_{10}(n_e/n_{cr})$ -1.0 0.5

- Laser filamentation and density structure are generated.
- Structure of electron density is clearer in the 5 MG case than that of no B field case.

2D profiles of laser field and electron density at 500 fs

10 MG

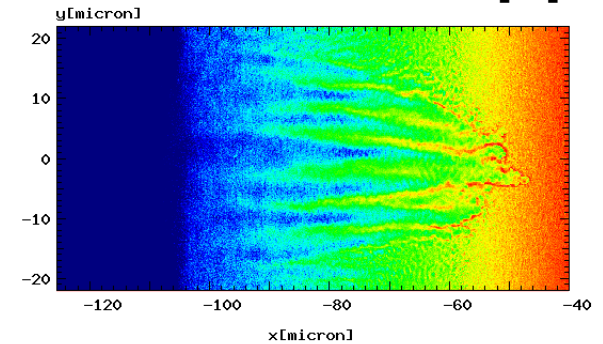
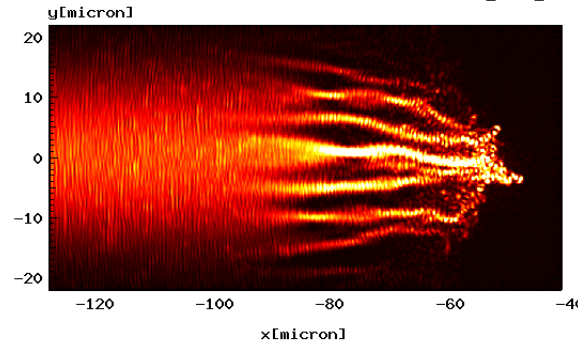
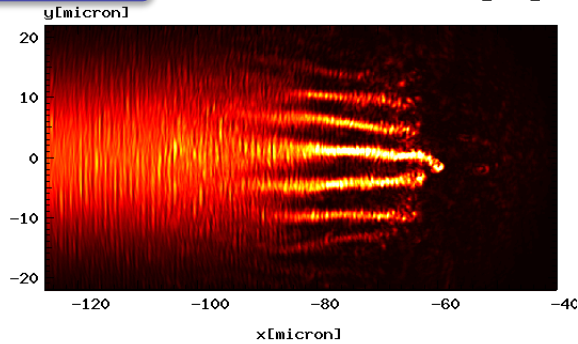
$t = 250$ [fs]

i4e18a0b10 fea

$t = 500$ [fs]

i4e18a0b10 fde

$t = 500$ [fs]



250.00 fsec

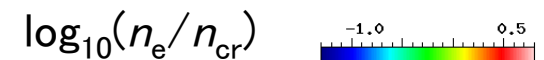
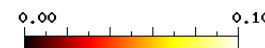
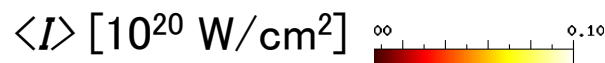
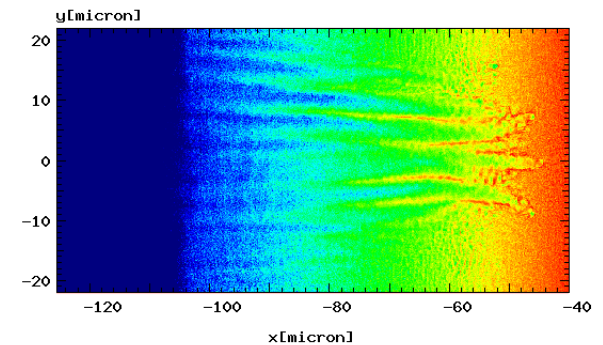
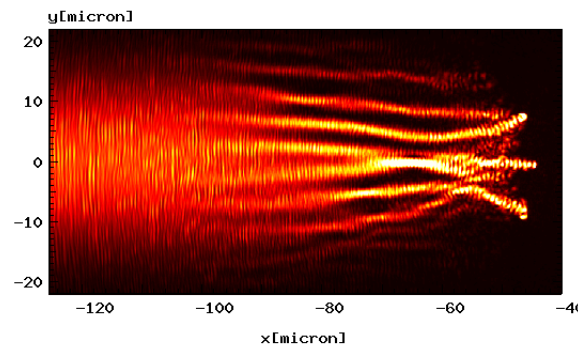
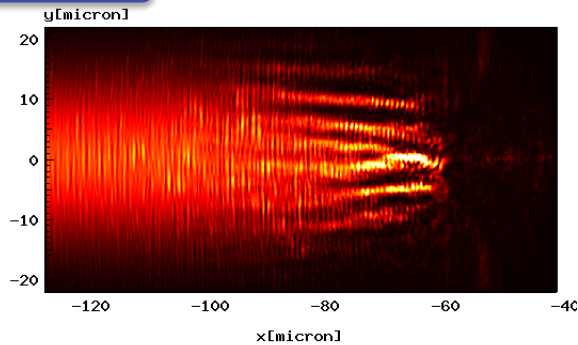
i4e18a0b50 fea

500.00 fsec

i4e18a0b50 fde

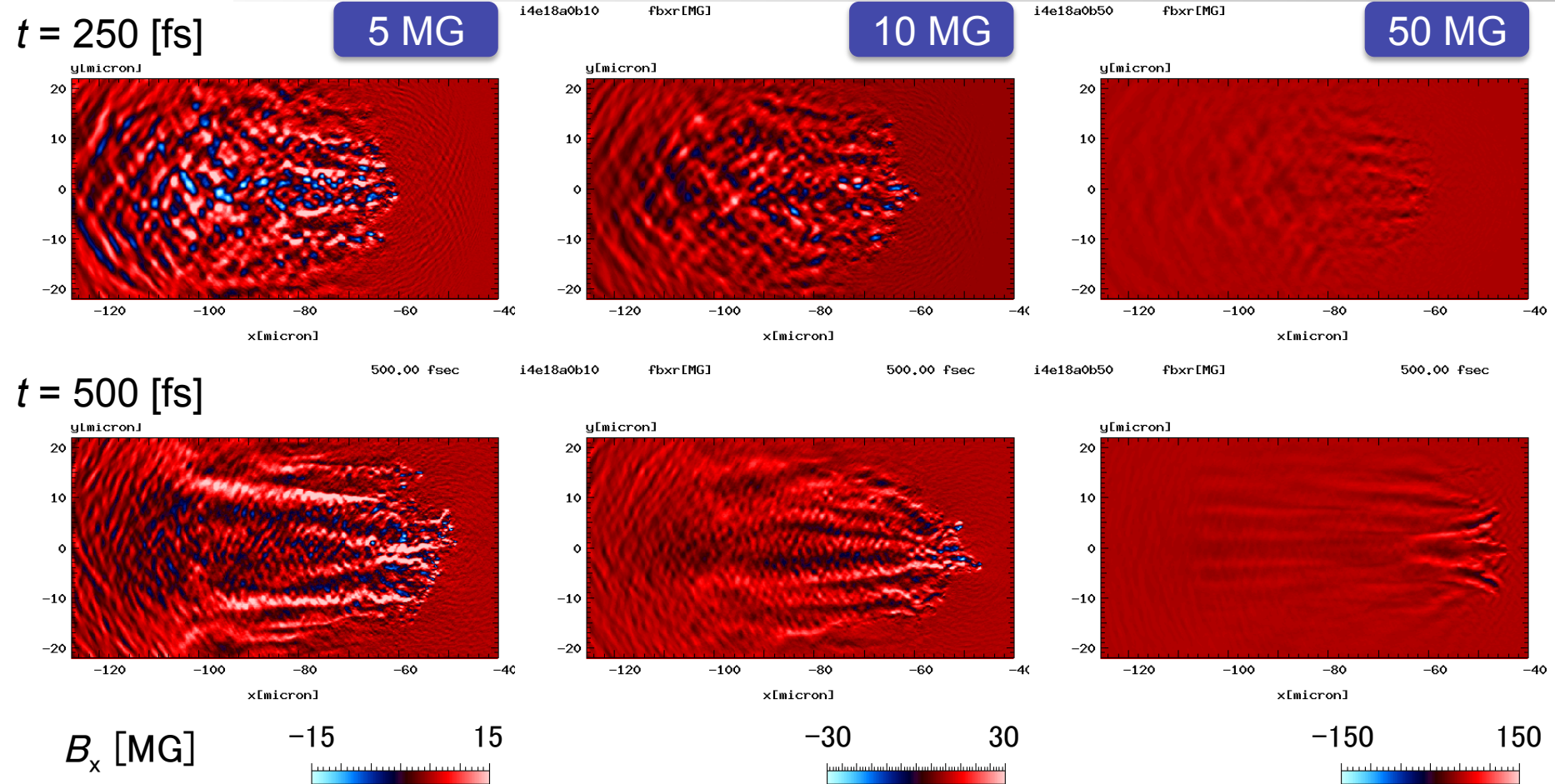
500.00 fsec

50 MG



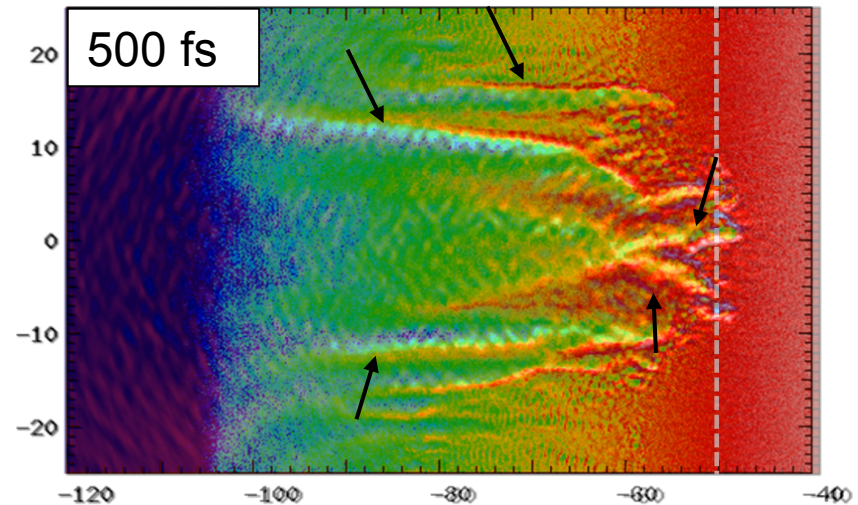
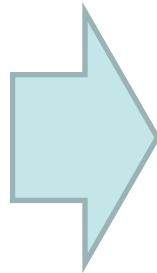
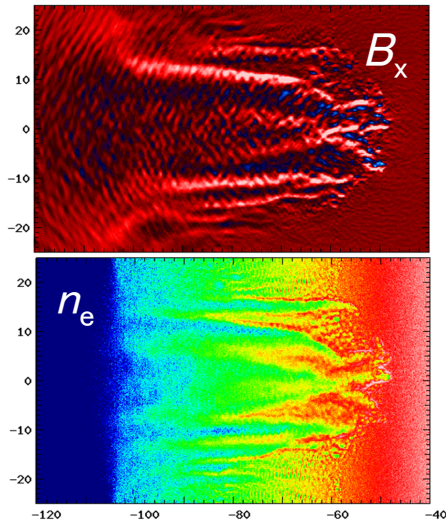
- Structure of electron density becomes clear with initial magnetic field strength.
 - In the initially 50 MG case, structure is smooth compared to other.

2D profiles of magnetic field B_x (including $B_{x,ext}$)



- More than 4 times compression of magnetic field occurs in the case of initially 5 MG.
 - 3 and 1.5 times compression at initially 10 and 50 MG case

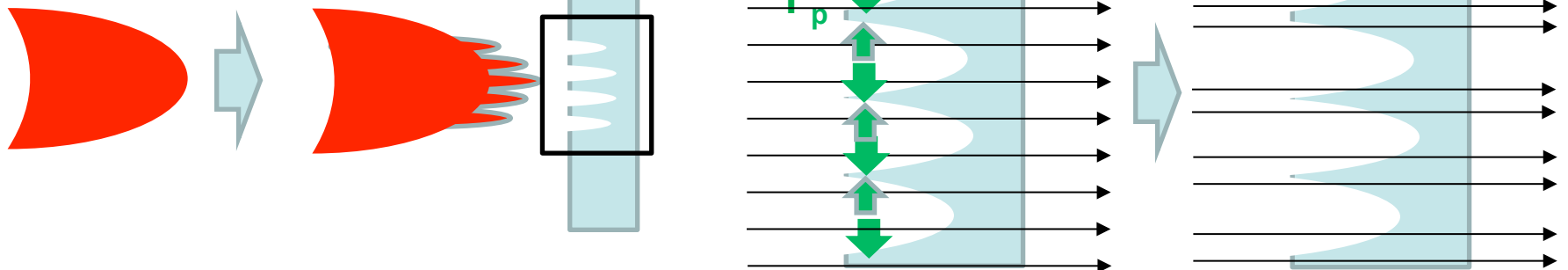
Formation of magnetic pipe structure



Laser filamentation

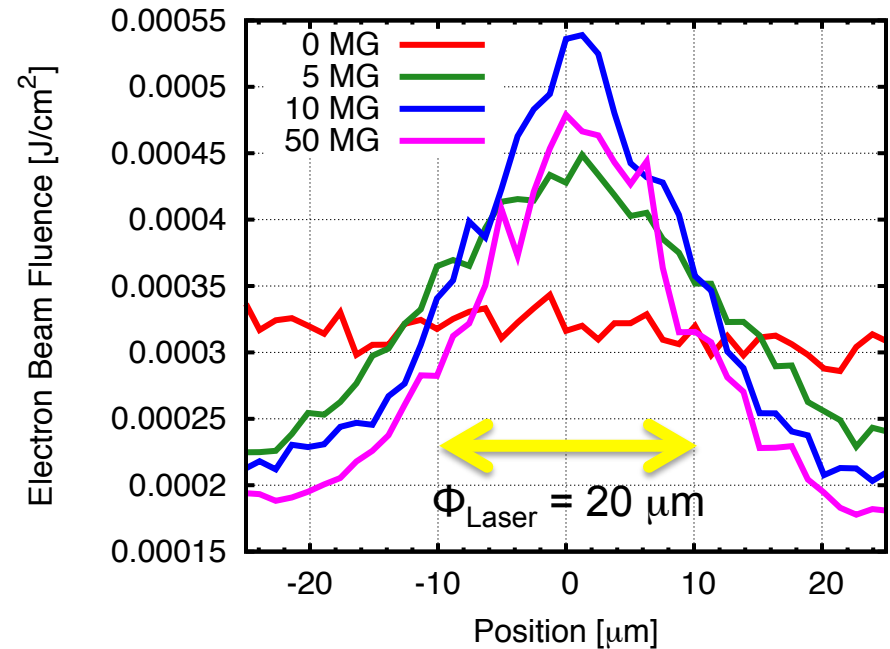
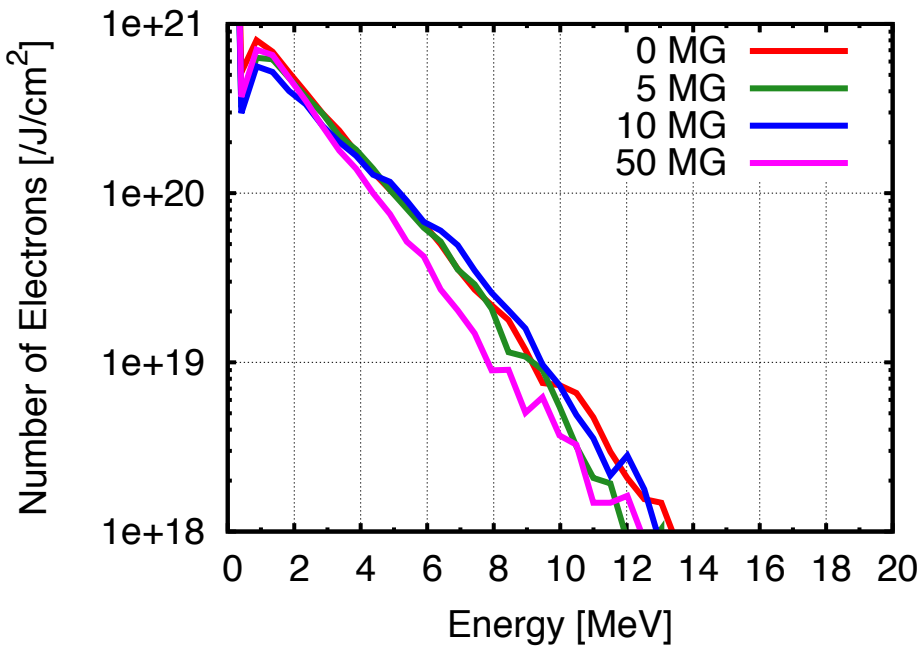
Ejection of electron

Compression of magnetic flux line



- External magnetic field is compressed with ejection of electrons and magnetic pipe structure is formatted.


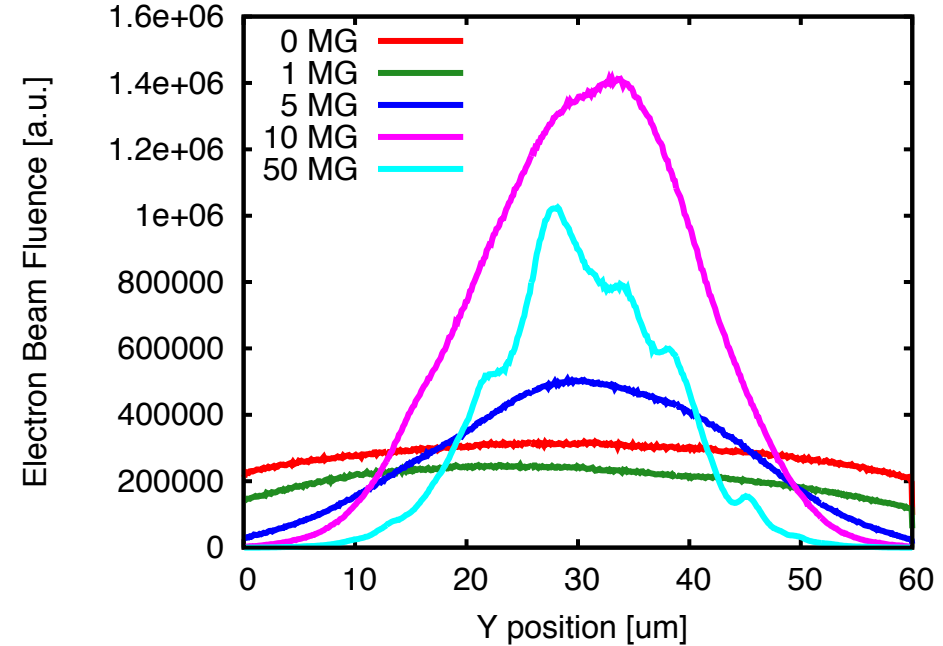
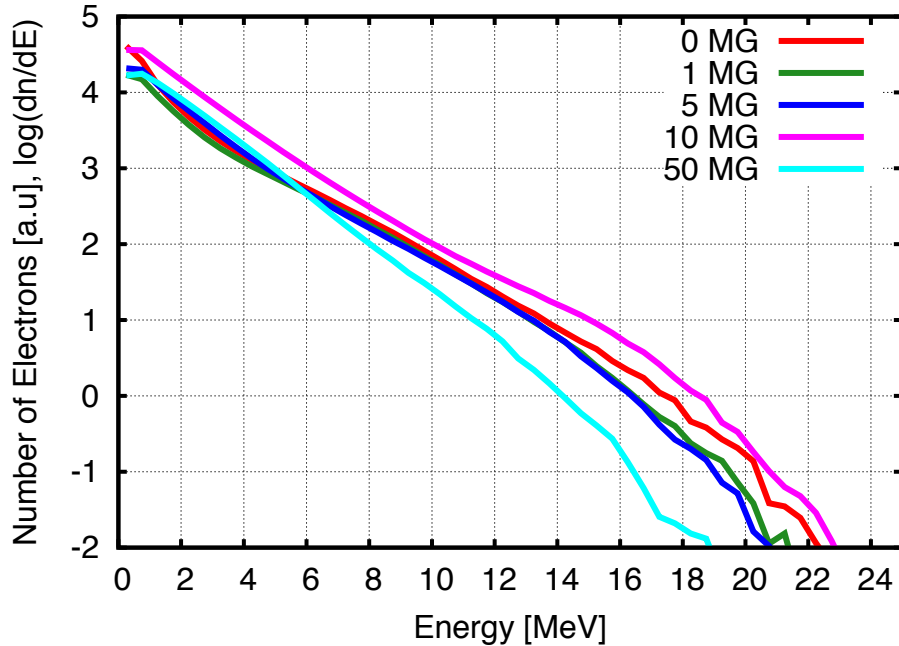
Characteristics of generated fast electrons



- Time-integrated energy spectra are almost similar, but it is seemed that the slope temperature at 50 MG case becomes low.
 - In 50 MG case, self focusing is disturbed because laser filaments grow straight. In contrast, filaments merges at the center in other cases.
 - More longer calculation may show some difference.
- Guiding effects of external B field is clearly seen in electron beam fluence profile. ($\Phi_{5, 10, 50 \text{ MG}} = \sim 40, \sim 30, \sim 30 \mu\text{m}$).

Characteristics of generated fast electrons @ similar calculations using PICLS

$\Phi_{\text{Laser}} = 20 \mu\text{m}$

- 先ほどまでの計算と同様な傾向の結果が得られた.
- 電子ビームフルーエンスを見ると, 50 MGの場合にフィラメント構造を反映したような構造がみられることがわかった.
 - ラーモア半径 < スポット径 → よくガイドされる.
 - ラーモア半径 < フィラメント径 → 構造が見える.

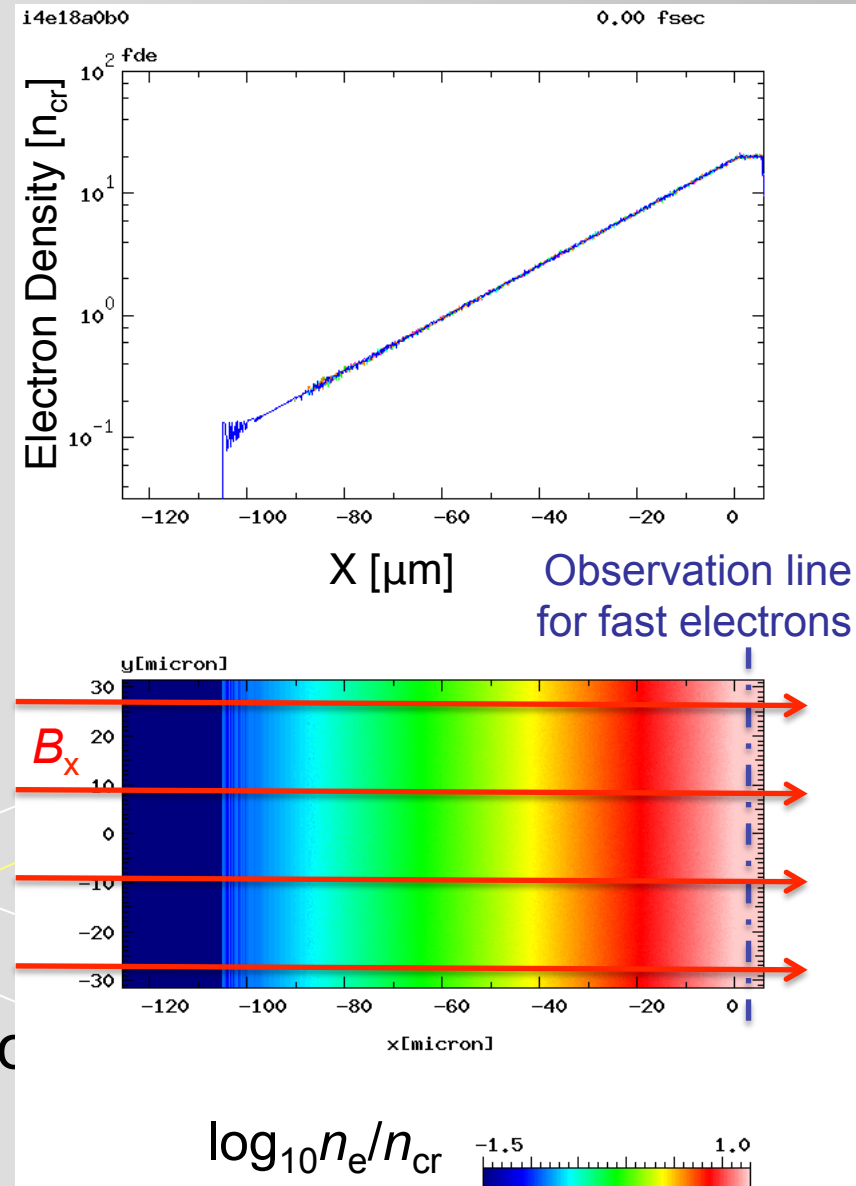
$$r_L = \frac{\gamma m_e v_{\perp}}{eB} = 17 \frac{\gamma v_{\perp}}{c B_{[MG]}} [\mu\text{m}],$$

for MeV e^- ($v_{\perp} \sim c$), 10 MG, $r_L \sim 5.1 \mu\text{m}$

Simulation condition for 2D-PICLS

- Laser
 - $I_L = 4 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$
 - $\lambda_L = 1.06 \text{ }\mu\text{m}$
 - $\Phi_{\text{FWHM}} = 20 \text{ }\mu\text{m}$
 - Spatially Gaussian and temporally semi-infinite flattop
- Plasma
 - C&H ($n_{\text{max}} = 20 n_{\text{cr}}$)
 - $L_{\text{preplasma}} = 20 \mu\text{m}$
- External B fields
 - $B_x = 500 \text{ MG}^*$
 - *10 MG = 1 kTesla

1000 fs calculations have been done



$B_{x,\text{ext}} = 500 \text{ MG}$ ($B_{\text{ext}} > B_{\text{ECR}}$) の場合

EM field energy, a_0^2

0.00 fsec

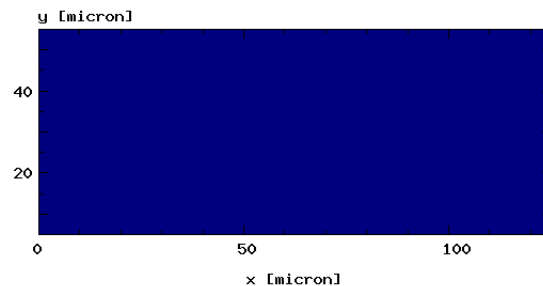
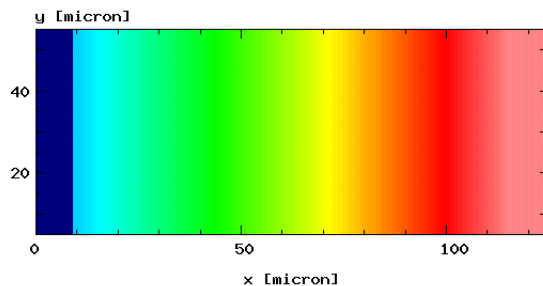
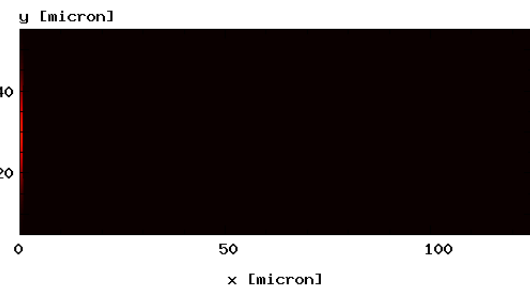
dnss

0.00 fsec

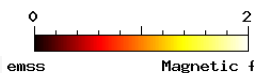
gmns

Energy density [keV*n_cr]

0.00 fsec



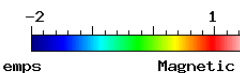
$\langle E^2 + B^2 \rangle$



all

$\log_{10}(n_e/n_{cr})$

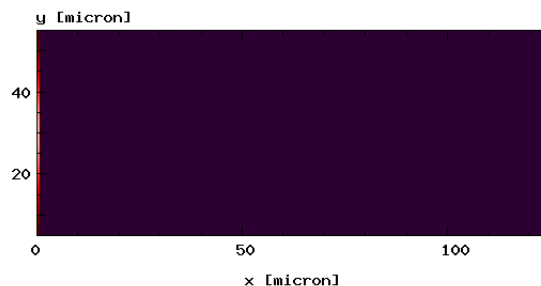
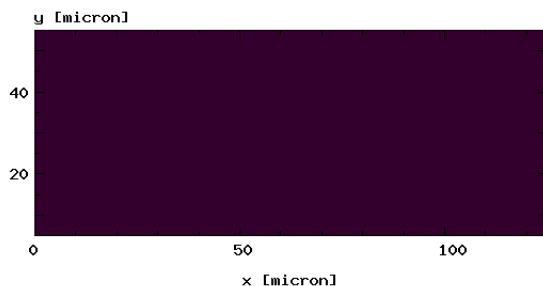
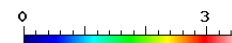
0.00 fsec



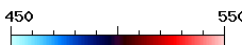
all

$\log_{10}(\epsilon_e)$

0.00 fsec

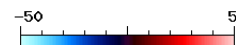


$\langle B_x \rangle$



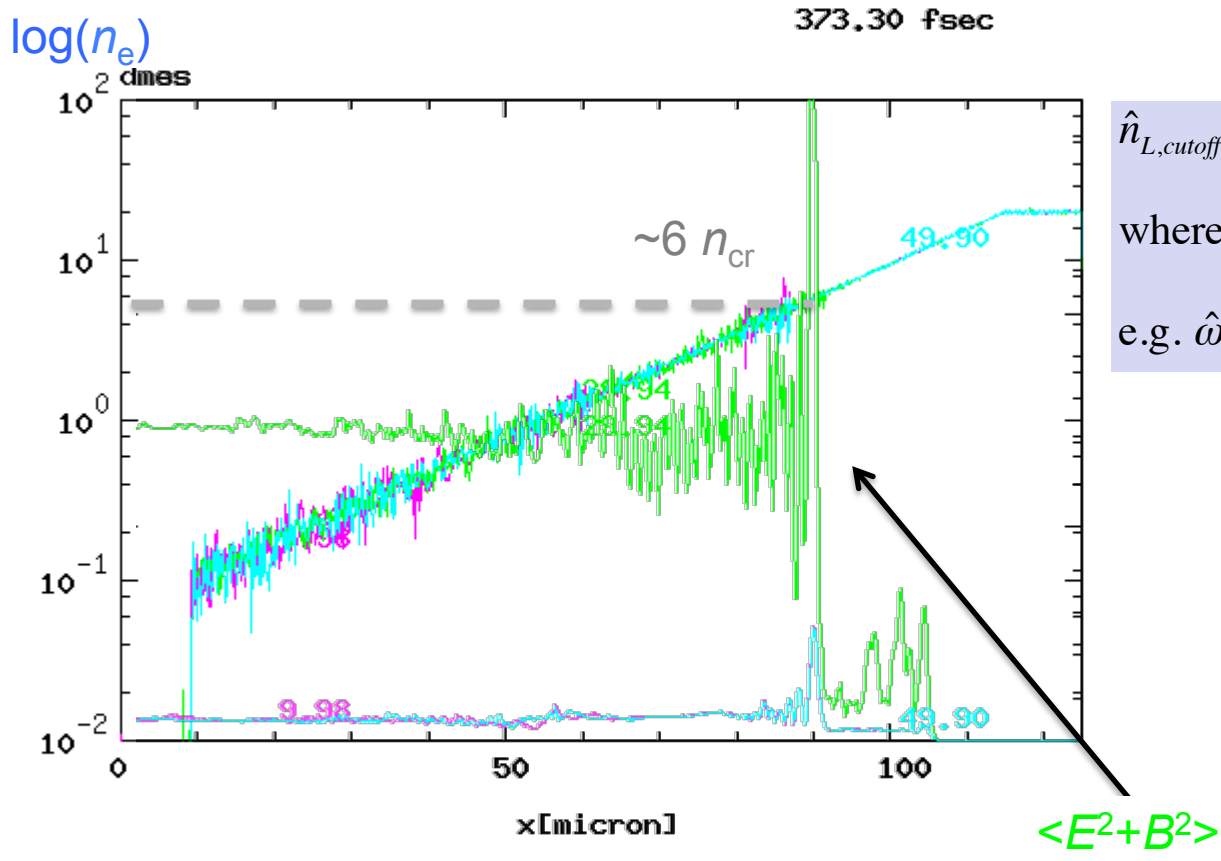
all

$\langle B_z \rangle$



- 一部の電磁波が高密度領域に伝播しているが、ある密度で反射が起きている。また、高密度領域伝播は初期に限定されている。

電磁場エネルギーと電子密度のレーザー軸上 プロファイル



$$\hat{n}_{L,cutoff} = 1 + \hat{\omega}_c,$$

$$\text{where } \hat{n}_{L,cutoff} = \frac{n_{L,cutoff}}{n_{cr}}, \quad \hat{\omega}_c = \frac{\omega_c}{\omega_L}$$

$$\text{e.g. } \hat{\omega}_c = 5 \Rightarrow \hat{n}_{L,cutoff} = 6$$

- 直線偏光のL波成分がL波カットオフで反射している。
- R波成分は高密度領域に伝播しているが、初期においてのみ伝播できている。(原因については今後の課題)

まとめ

- 平行外部磁場印加下における高強度レーザープラズマ相互作用の物理を理解するためにシミュレーション研究を行った.
 - $B_{\text{ext}} < B_{\text{ECR}}$ の領域で,
 - 磁場による電子ビームガイド効果を確認した.
 - 初期の外部磁場がプラズマの排斥とともに押しつけられ、フィラメント内部では磁場が弱く、外部では磁場が強くなることがわかった.
 - さらに、高速電子のラーモア半径がフィラメント径より小さい場合には、フィラメント形状が電子ビームフルーエンス形状に影響を及ぼすことがわかった.
 - $B_{\text{ext}} > B_{\text{ECR}}$ の領域で,
 - L波のカットオフおよびR波の高密度領域伝播をみた.
 - R波の高密度領域伝播は初期にのみ起こり、その後はレーザーはL波のカットオフより奥に侵入することができないことがわかった.
- ⇒ メカニズムについては今後の研究課題