

相対論的衝撃波における航跡場の 励起に伴う粒子加速

2020/12/17

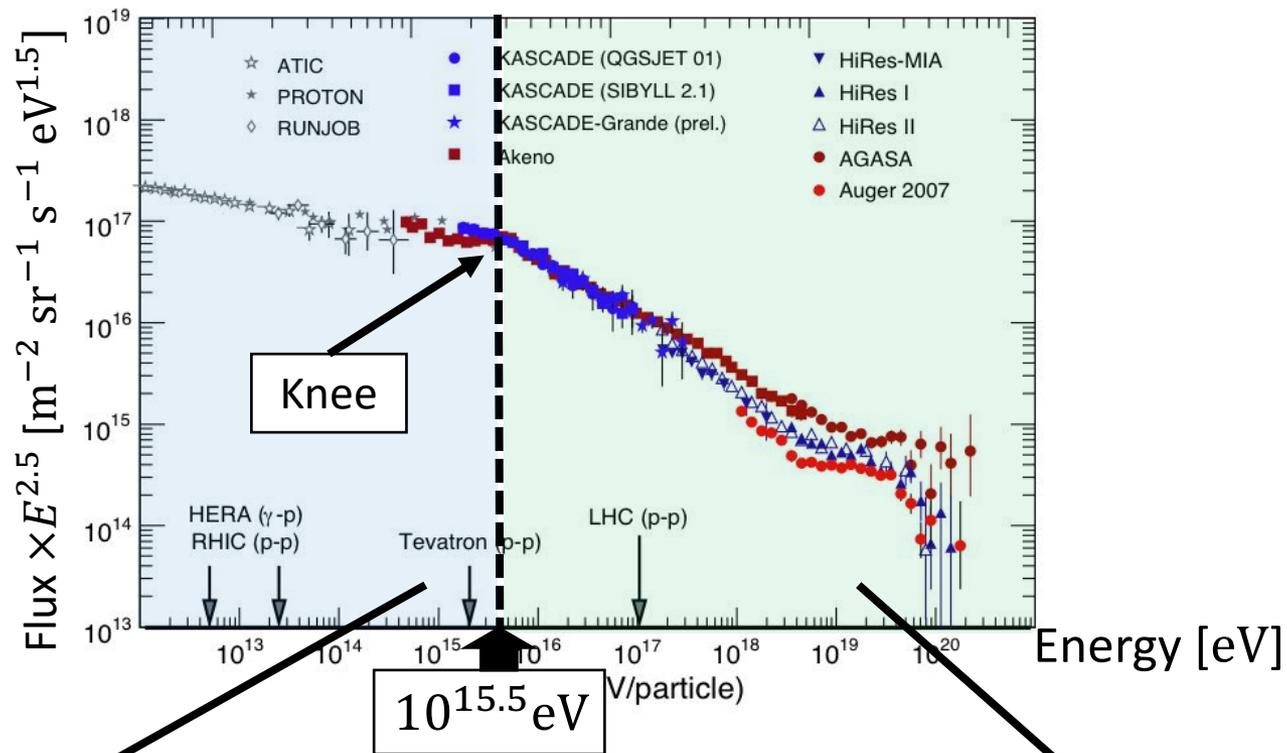
岩本昌倫¹,

天野孝伸², 松本洋介³, 松清修一¹, 星野真弘²

[1]九州大学; [2]東京大学; [3]千葉大学

高エネルギー宇宙線

[Gelmini 2009]



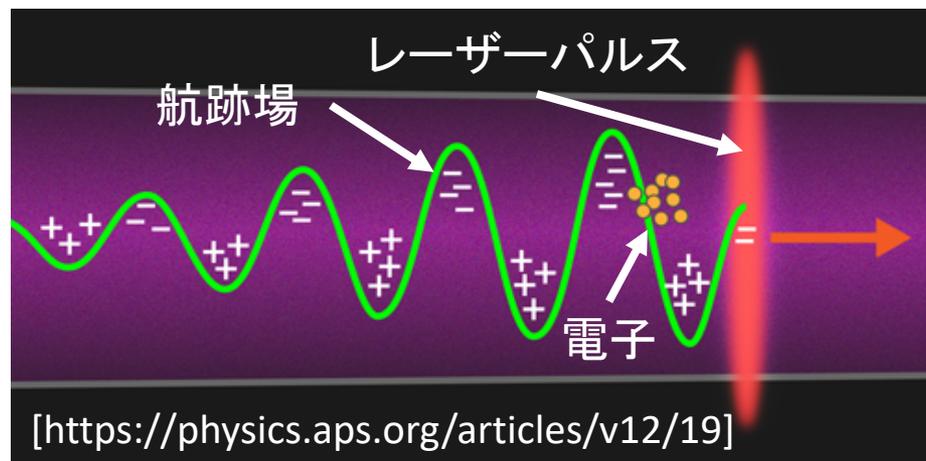
$\text{Energy} \lesssim 10^{15.5} \text{ eV}$

- ✓ 生成場所: 超新星残骸の衝撃波
- ✓ 加速機構: フェルミ加速

$\text{Energy} > 10^{15.5} \text{ eV}$

- ✓ 生成場所: 高エネルギー天体?
- ✓ 加速機構: 相対論的衝撃波?

- ✓ 超高強度レーザーがプラズマ中を伝搬すると、レーザーパルスの後部に電場(=航跡場)が励起される
- ✓ 航跡場とうまくランダウ共鳴した電子が加速される



天体で超高強度レーザーに匹敵する放射が可能か？

天体からのコヒーレント放射

黒体放射

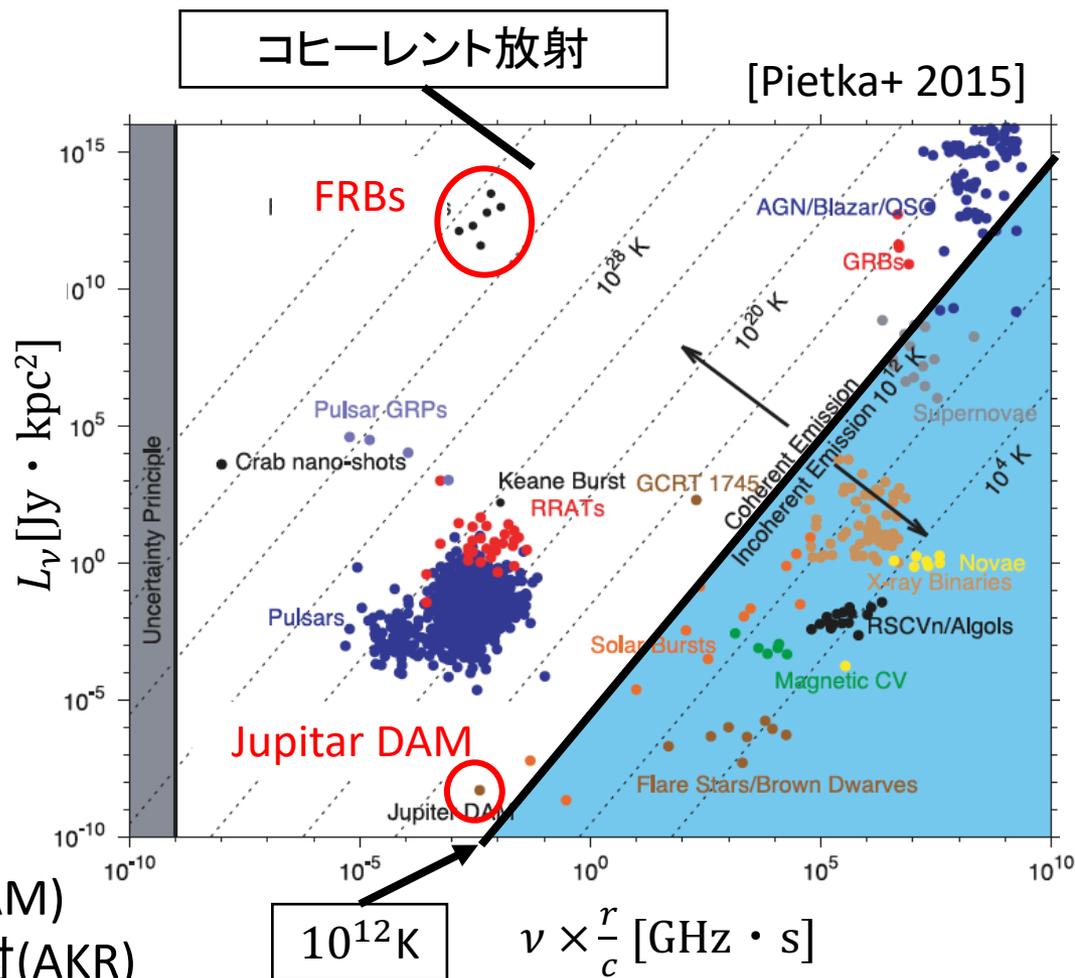
$$L_\nu = \frac{2k_B T_B \nu^2}{c^2} 4\pi r^2$$

T_B :輝度温度

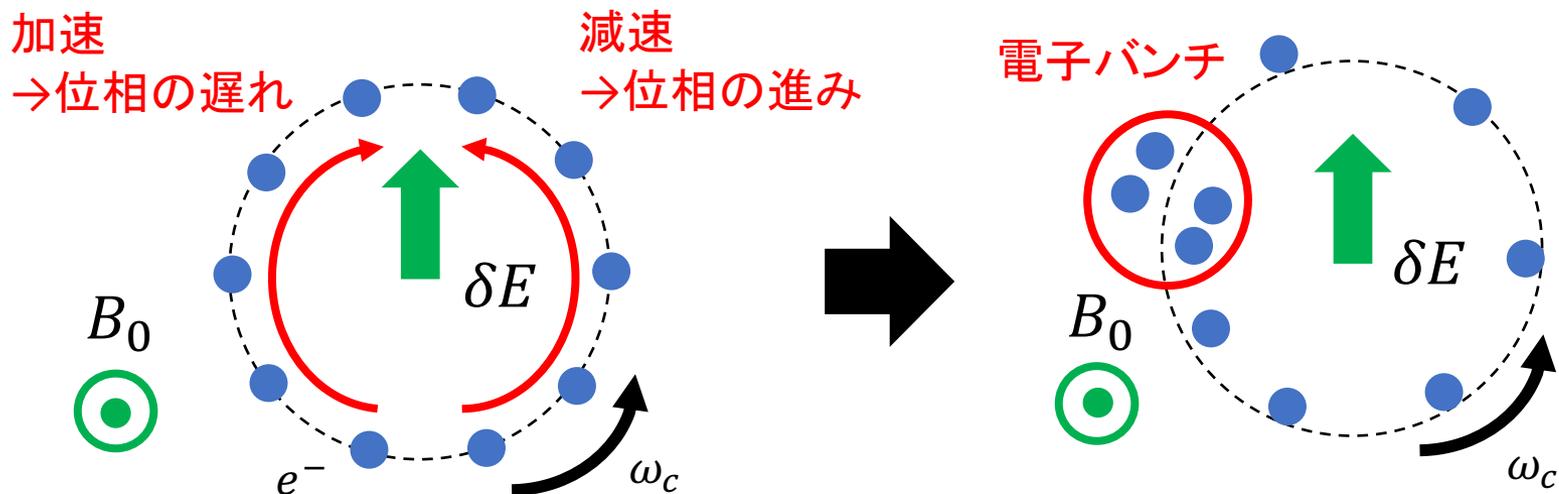
輝度温度が高い($T_B > 10^{12} K$)
 →制動放射やシンクロトロン放射
 では説明できない

→**コヒーレント放射**

- ✓ 高速電波バースト(FRB)
 - ✓ 木星のデカメートル電波放射(DAM)
 - ✓ 地球のオーロラキロメートル波放射(AKR)
- などはコヒーレント放射



シンクロトロンメーザー不安定(SMI)

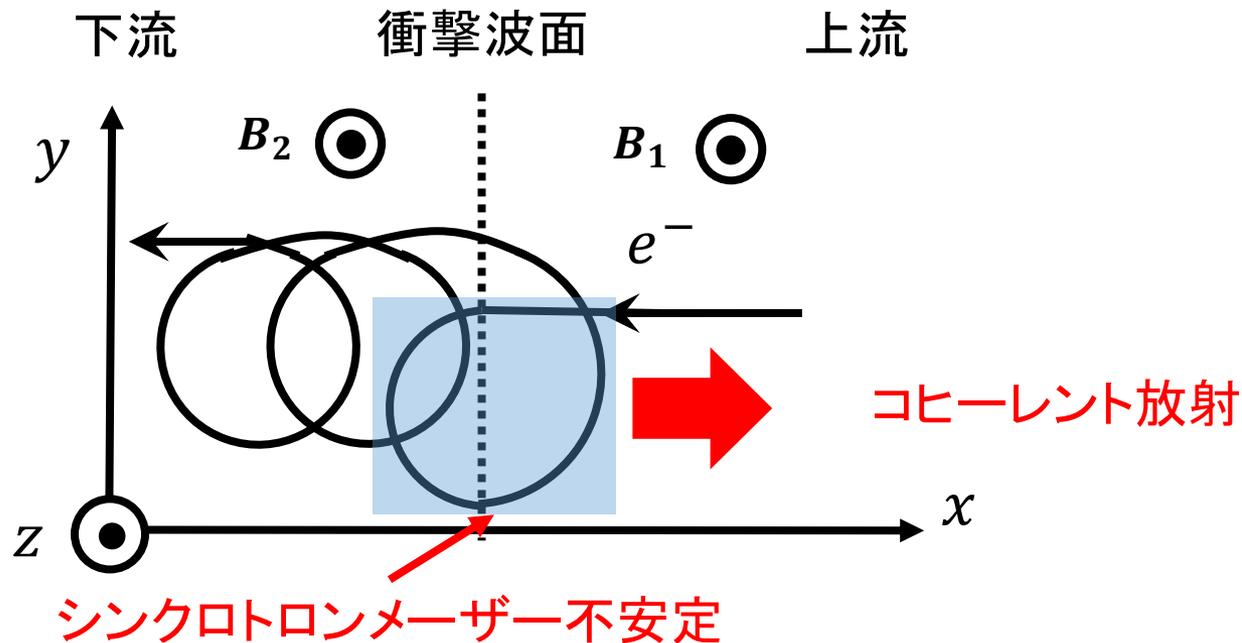


$$\omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

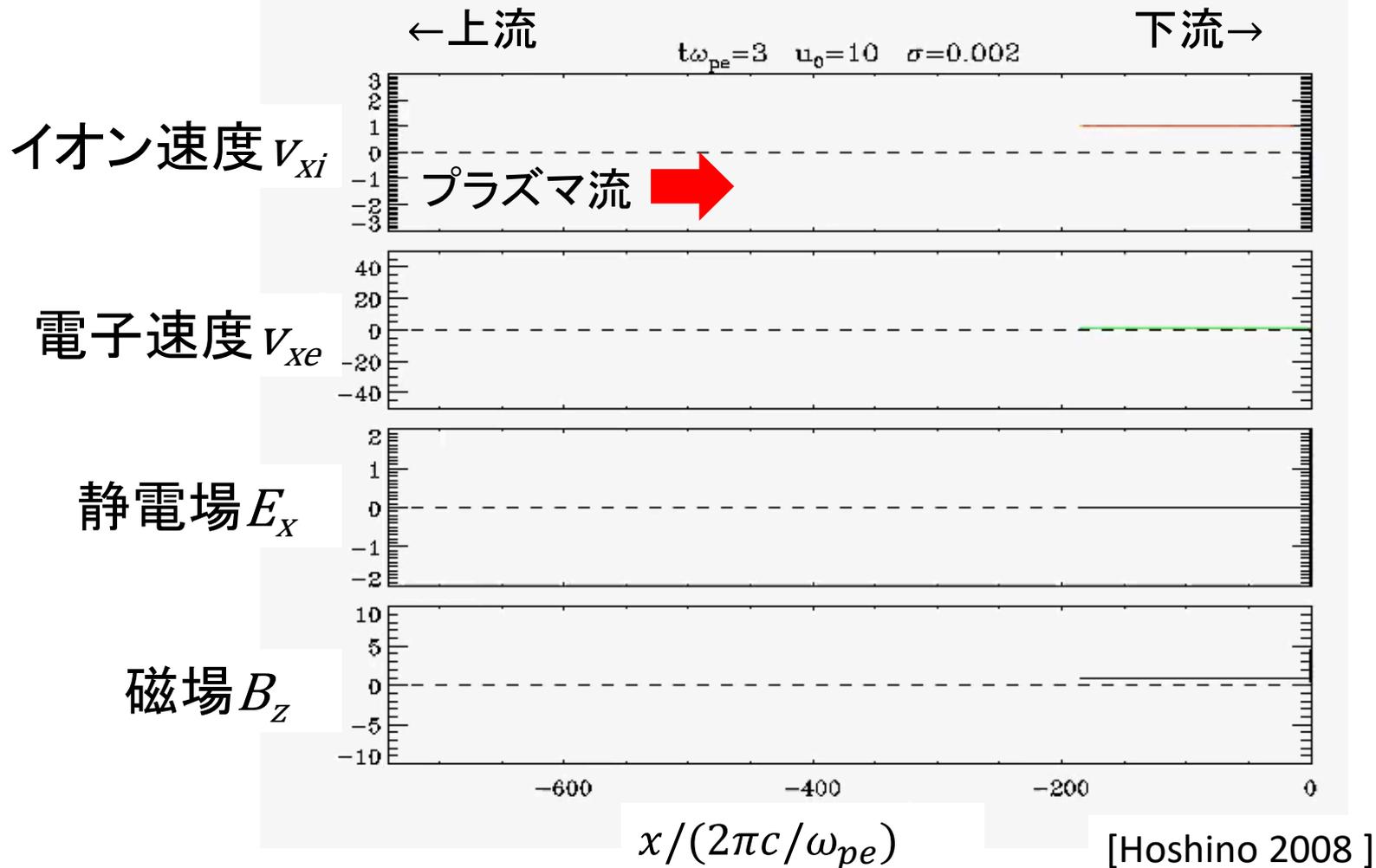
- ✓ AKR,DAM,(FRB?)の放射機構
- ✓ 電子がリング状の分布をしていると不安定化
- ✓ 電子バンチを自己無撞着に生成→コヒーレント放射

相対論的衝撃波でのSMI

- ✓ 相対論的衝撃波は高強度電磁波を放射する(e.g., Langdon+ 1988)
- ✓ 衝撃波面にリング状の速度分布を形成
→SMIによるコヒーレント放射 (Hoshino & Arons 1991)
- ✓ 衝撃波さえ形成できれば自己無撞着にコヒーレント放射



一次元衝撃波の数値計算



✓ コヒーレント放射→航跡場の励起→粒子加速を実証(Hoshino 2008)

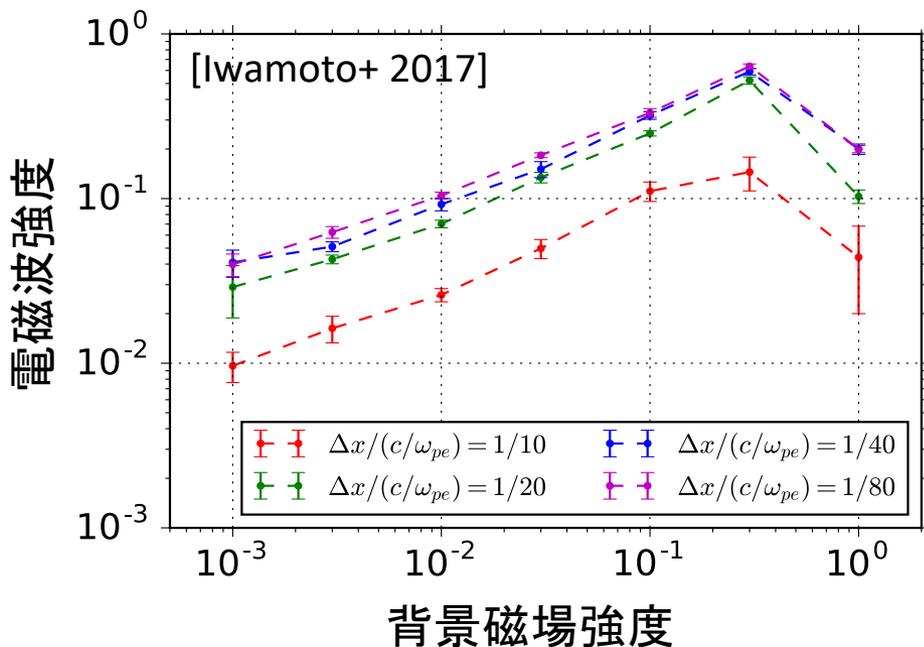
相対論的衝撃波におけるSMIの問題点

問題点

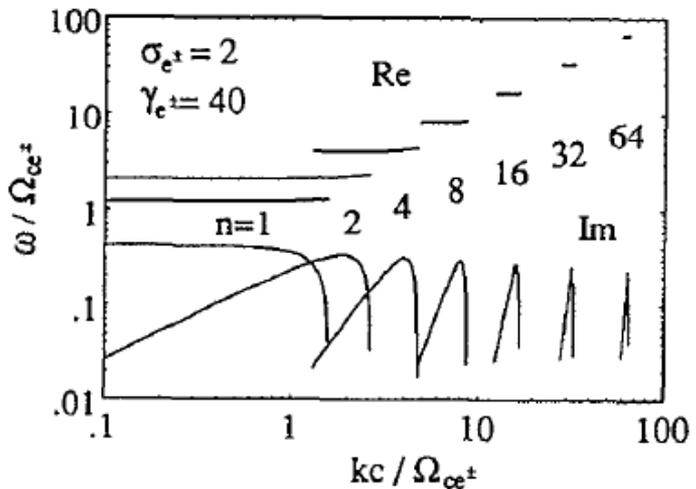
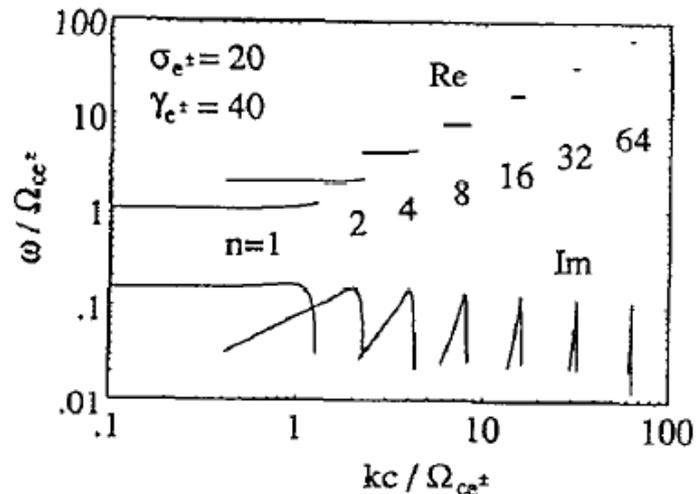
多次元系では衝撃波面の非一様性がリング分布を乱しコヒーレント放射は持続しない?

(Sironi & Spitkovsky 2009)

SMIは高調波を励起(Hoshino & Arons 1991)
→ 先行研究は解像度が不十分



[Hoshino & Arons 1991]



シミュレーション設定

第一原理に基づくPICコード(Ikeya&Matsumoto 2015)を使用

定数

- ✓ 時間ステップ:

$$\omega_{pe}\Delta t = 1/40$$

- ✓ 格子幅:

$$\Delta x/(c/\omega_{pe}) = 1/40$$

- ✓ 1セルあたりの粒子数:

$$N_1\Delta x^2 = 64$$

- ✓ 上流のローレンツ因子:

$$\gamma_1 = 40$$

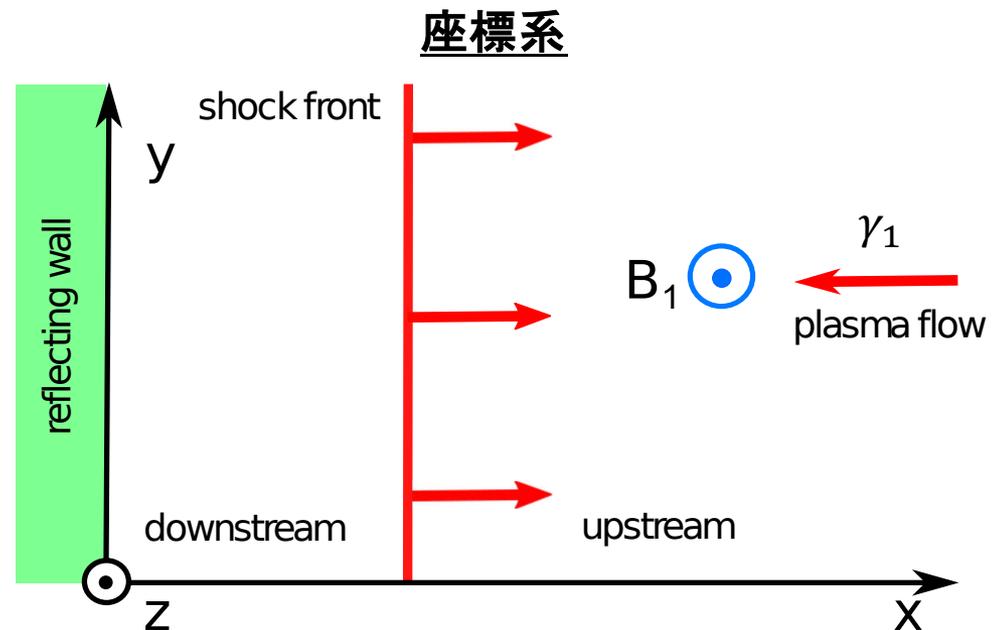
変数

- ✓ 質量比

$$\frac{m_i}{m_e} = 50$$

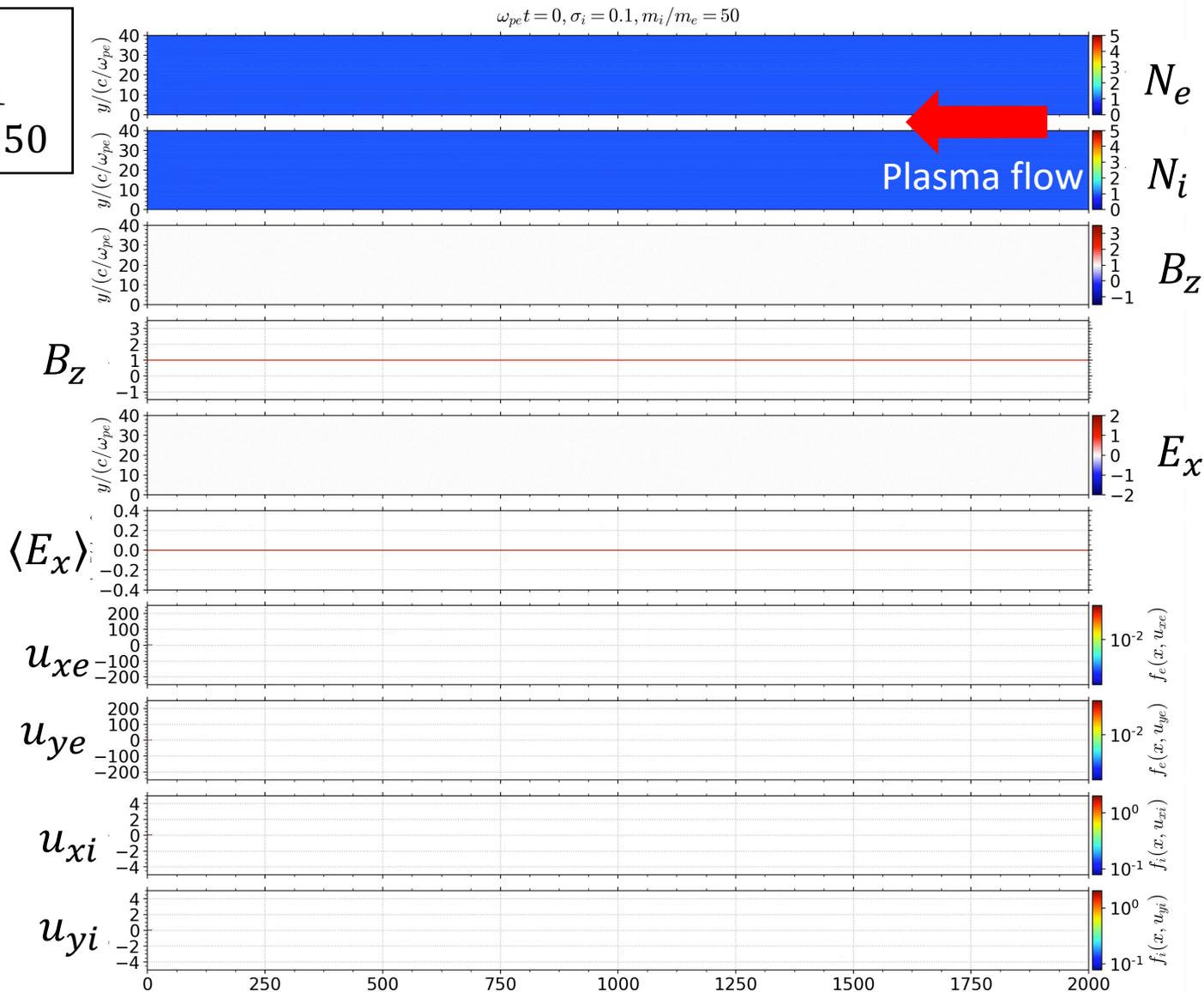
- ✓ 背景磁場強度

$$\sigma_e \equiv \frac{B_1^2}{4\pi\gamma_1 N_1 m_e c^2} = 5, \sigma_i \equiv \frac{B_1^2}{4\pi\gamma_1 N_1 m_i c^2} = 0.1$$



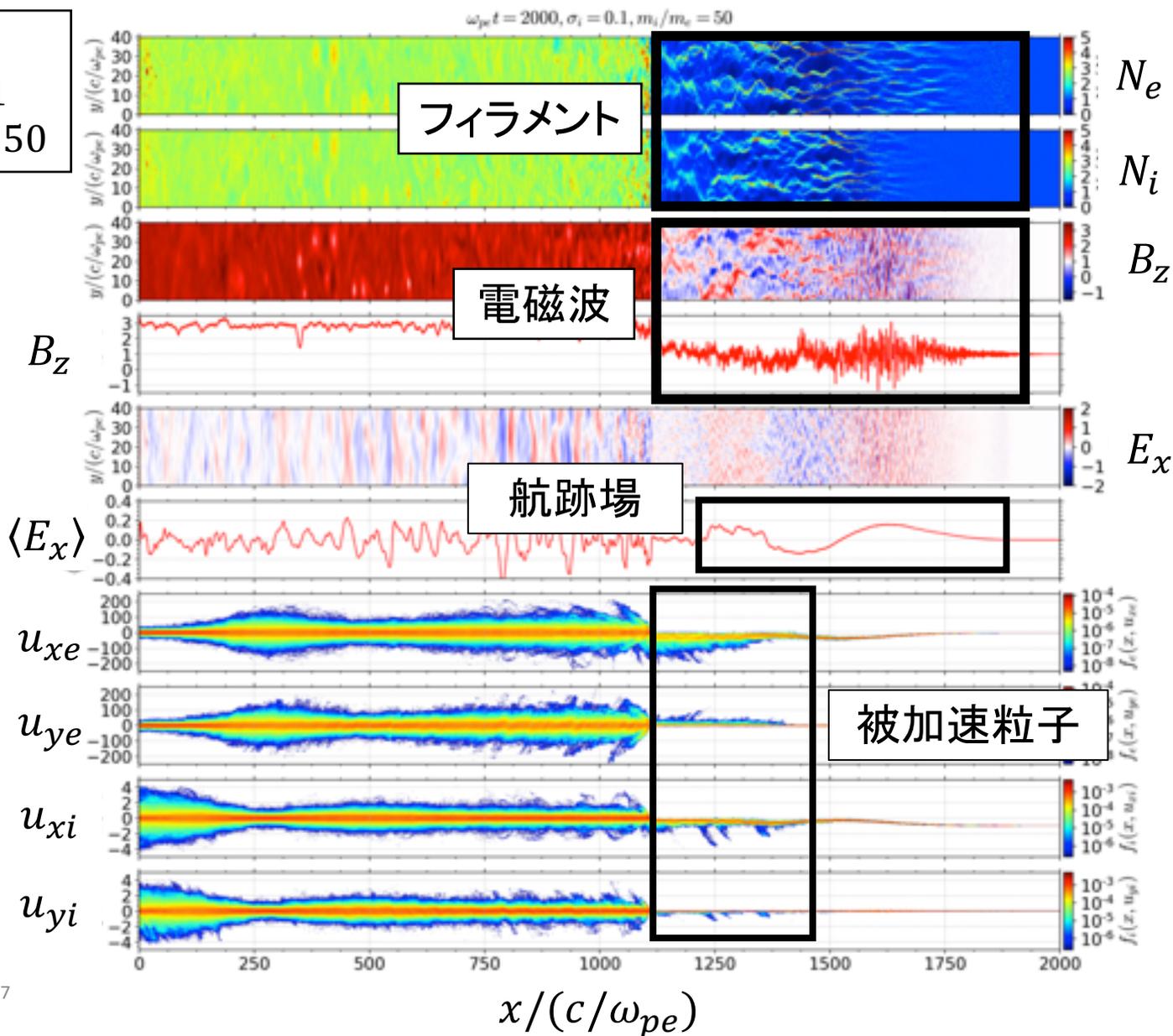
計算結果：二次元衝撃波

$\sigma_e = 5$
 $\sigma_i = 0.1$
 $m_i/m_e = 50$



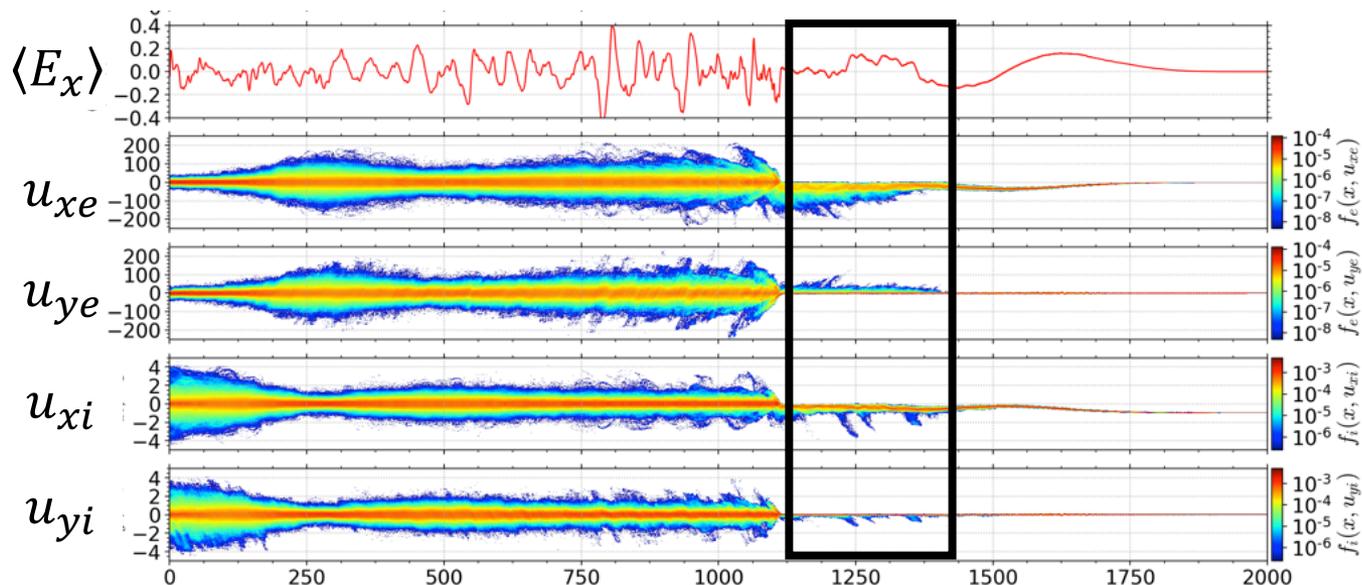
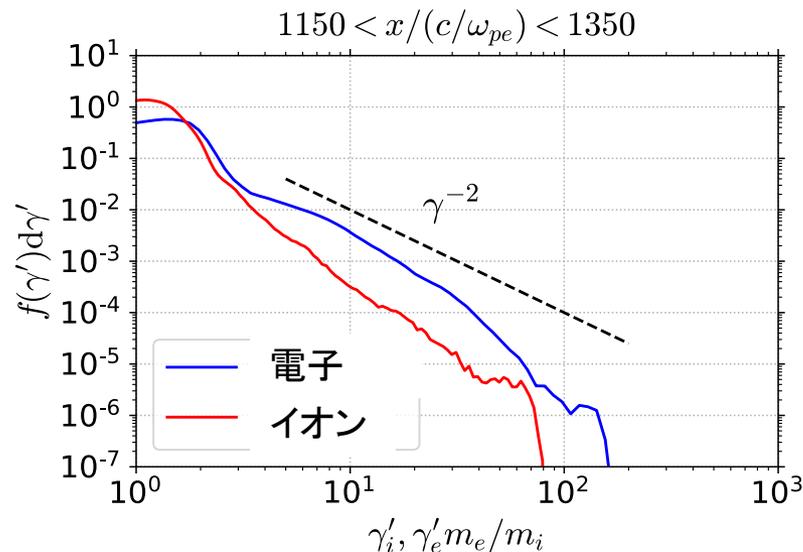
計算結果：二次元衝撃波

$\sigma_e = 5$
 $\sigma_i = 0.1$
 $m_i/m_e = 50$

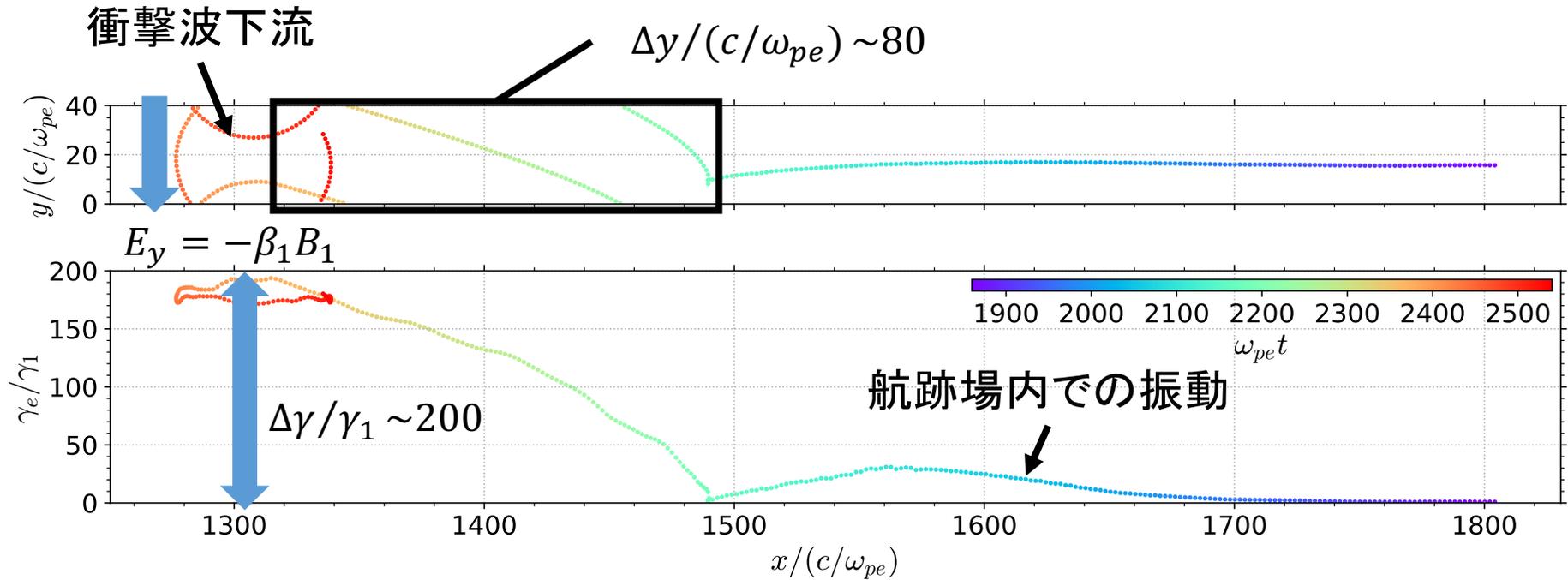


粒子のエネルギースペクトル

- ✓ 非熱的な電子とイオンが衝撃波上流で生成される
- ✓ ベキ型の分布を形成
- ✓ 電子とイオンがエネルギーを等分配



非熱的電子の軌道

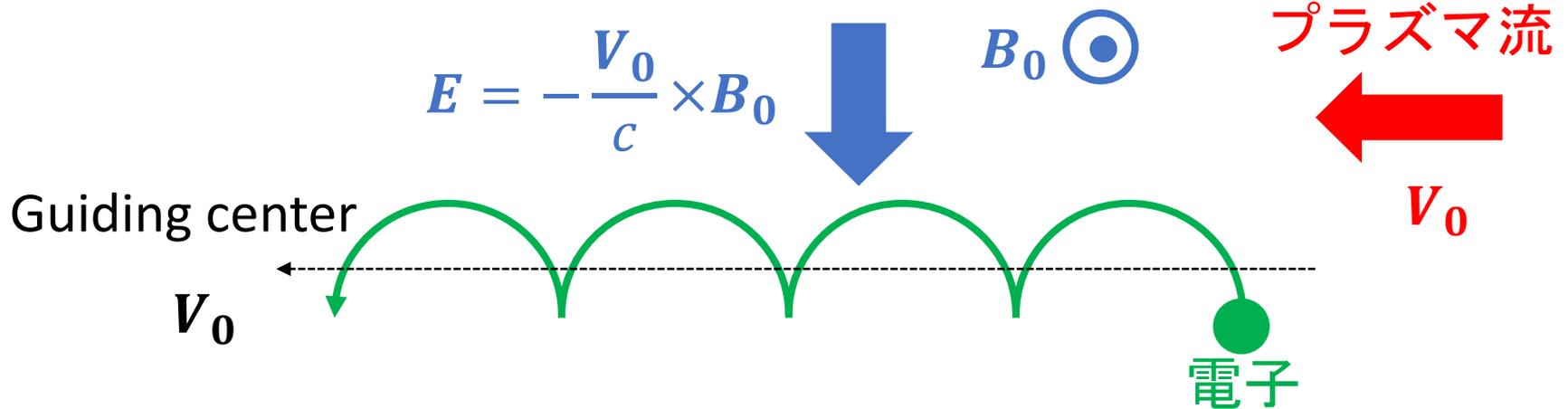
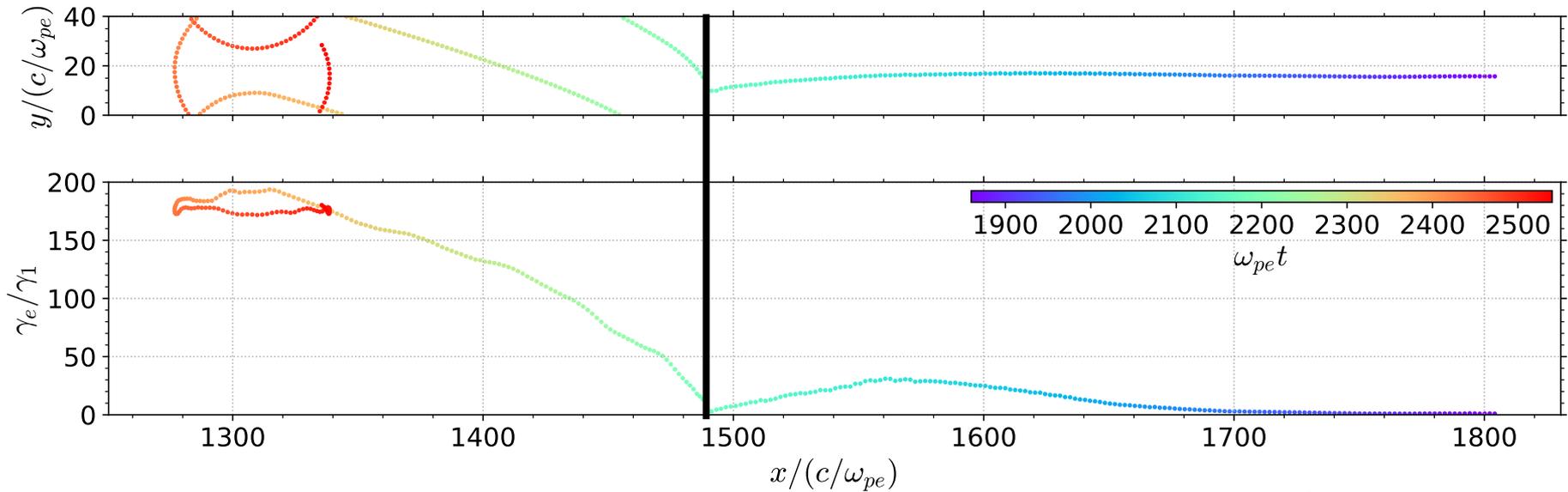


$$\frac{\Delta \gamma_e}{\gamma_1} = \frac{e E_y \Delta y}{\gamma_1 m_e c^2} = \beta_1 \sqrt{\sigma_e} \frac{\Delta y}{c/\omega_{pe}} = \sqrt{5} * 80 \sim 200$$

→主に $v \times B$ 電場により加速されている

ピックアップ過程

上流プラズマにピックアップ



解析解

0次の背景磁場・ $v \times B$ 電場のみを考慮した運動方程式の解析解

$$x_s \sim x_{0s} - c\beta_{0s}t$$

$$y_s \sim y_{0s} \pm \Gamma_b \gamma_{0s} (\beta_b - \beta_{0s}) \frac{c}{\omega_{cs}} \left[1 - \cos \left(\frac{\omega_{cs} t}{\Gamma_b^2 \gamma_{0s} (1 - \beta_b \beta_{0s})} \right) \right]$$

$$\gamma_s \sim \Gamma_b^2 \gamma_0 \left[(1 - \beta_b \beta_{0s}) - \beta_b (\beta_b - \beta_{0s}) \cos \left(\frac{\omega_{cs} t}{\Gamma_b^2 \gamma_{0s} (1 - \beta_b \beta_{0s})} \right) \right]$$

✓ $\beta_0 \sim \beta_b$:

$$\gamma_s \sim \gamma_{0s}$$

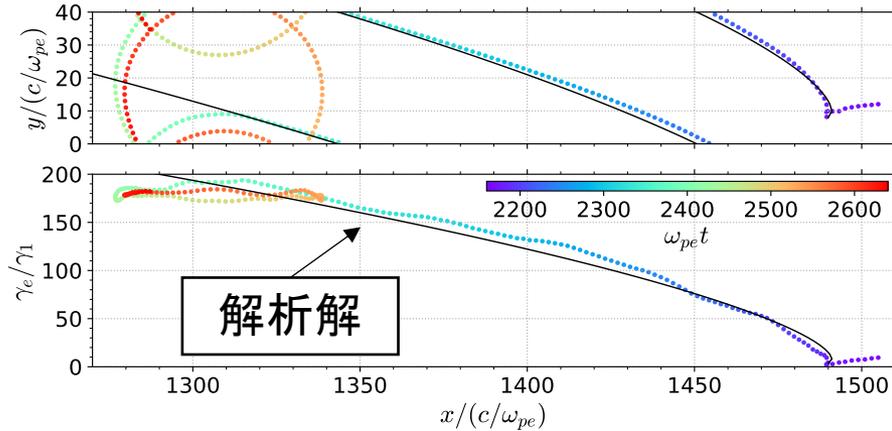
✓ $\beta_0 \ll \beta_b$:

$$\gamma_s \sim \Gamma_b^2 \gamma_{0s} \left[1 - \beta_b^2 \cos \left(\frac{\omega_{cs} t}{\Gamma_b^2 \gamma_{0s}} \right) \right]$$

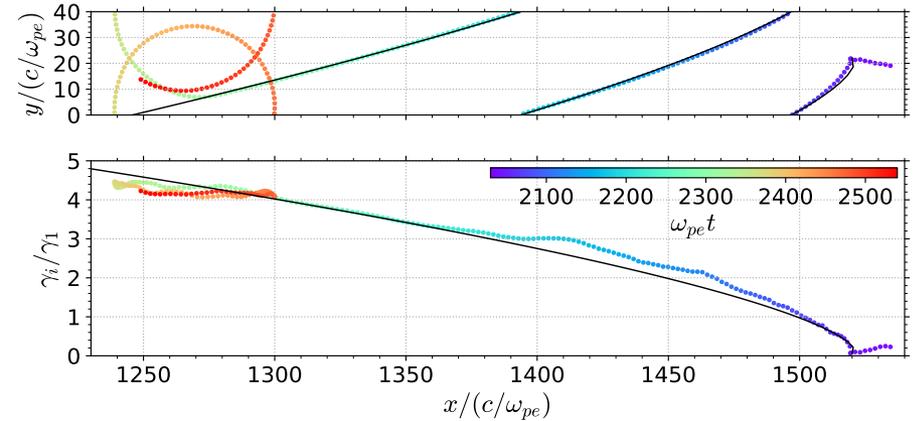
プラズマ流からデカップル → $v \times B$ 電場による加速

解析解との比較

電子



イオン



- ✓ 解析解と一致
→ 非熱的粒子は上流プラズマにピックアップされて加速
- ✓ 最高エネルギー: $\gamma_{max} \sim \Gamma_b^2 \gamma_0$

どのようにしてピックアップ過程に注入する?

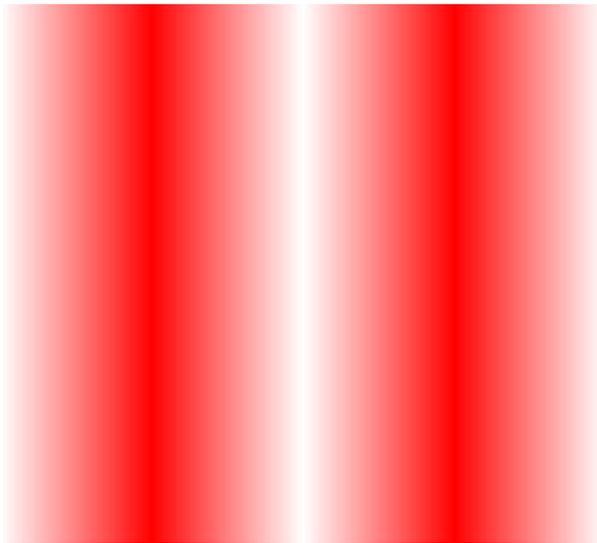
テスト粒子計算

- ✓ 航跡場とフィラメント構造を考慮
- ✓ 電磁波は無視

wakefield

$$E_x = \delta E \sin(2\pi/l_w(x - ct))$$

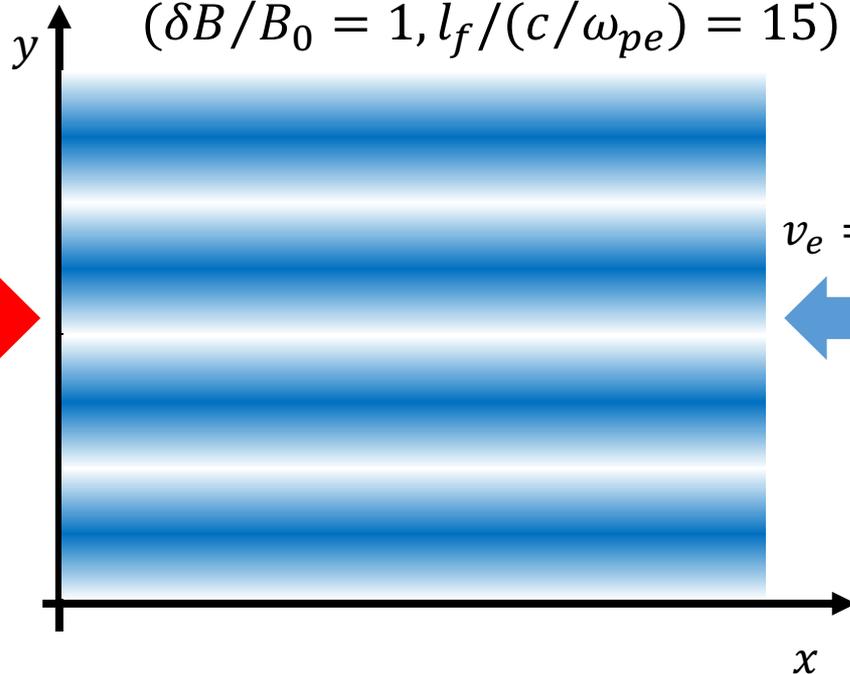
$(\delta E/B_0 = 0.2, l_w/(c/\omega_{pe}) = 500)$



filament

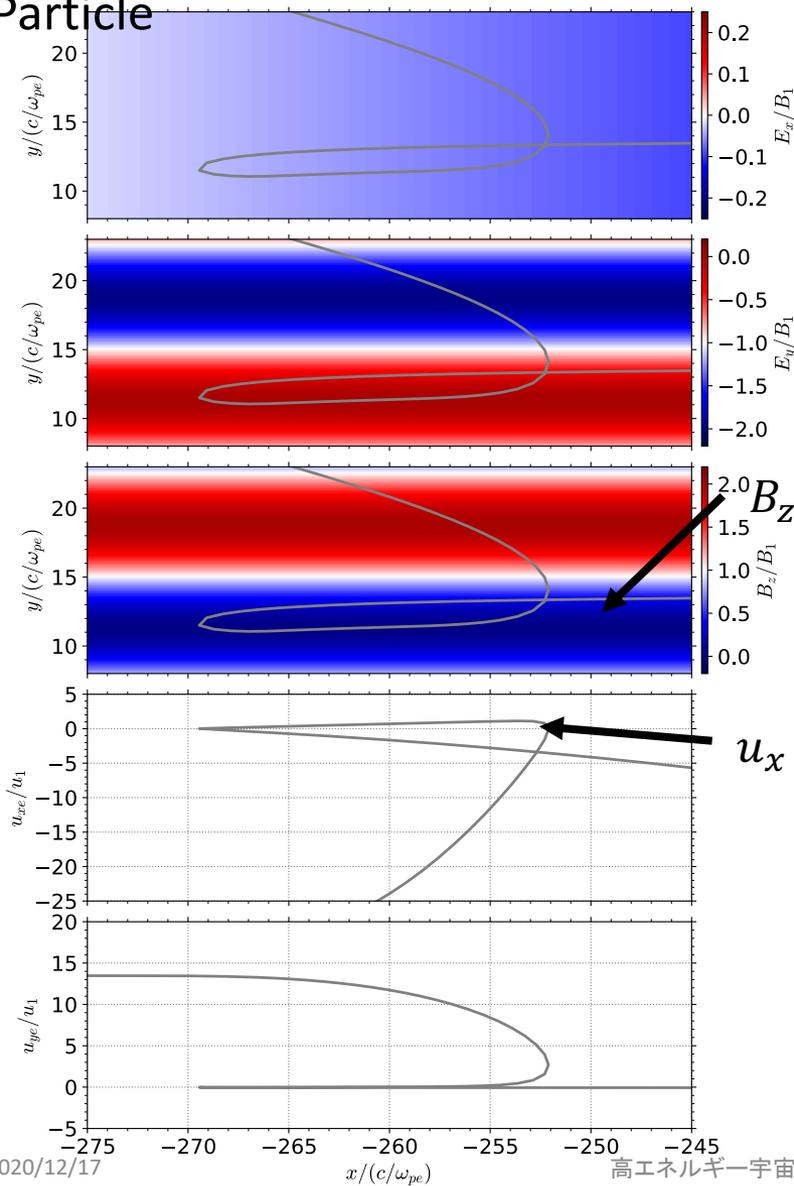
$$B_z = B_0 + \delta B \sin(2\pi y/l_f), E_y = -V_0 B_z/c$$

$(\delta B/B_0 = 1, l_f/(c/\omega_{pe}) = 15)$

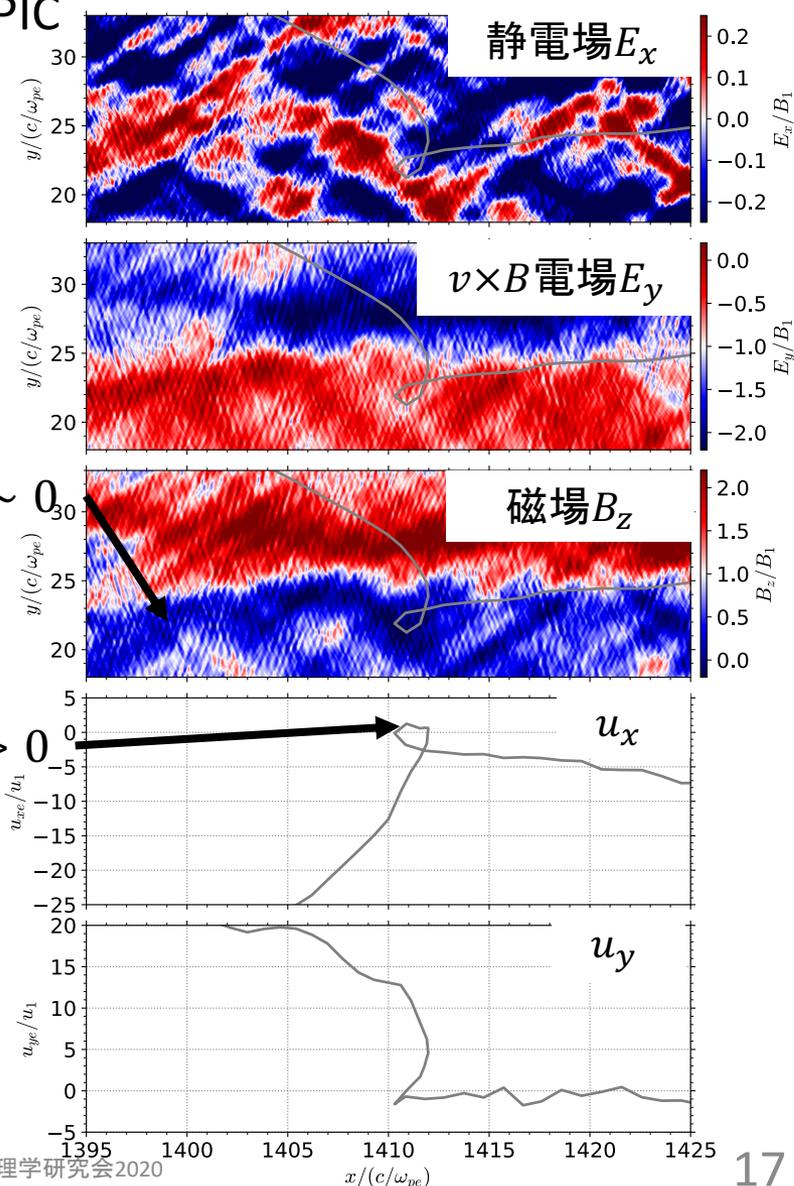


軌跡の比較

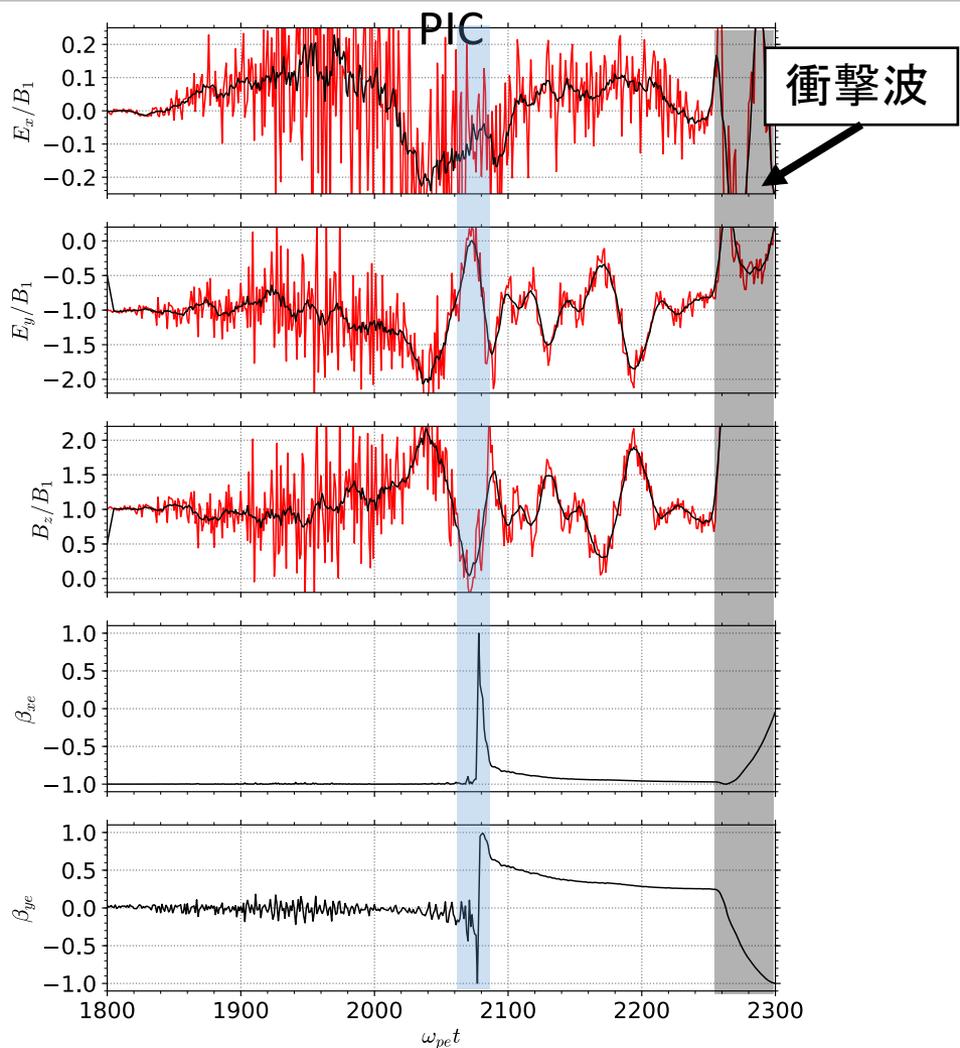
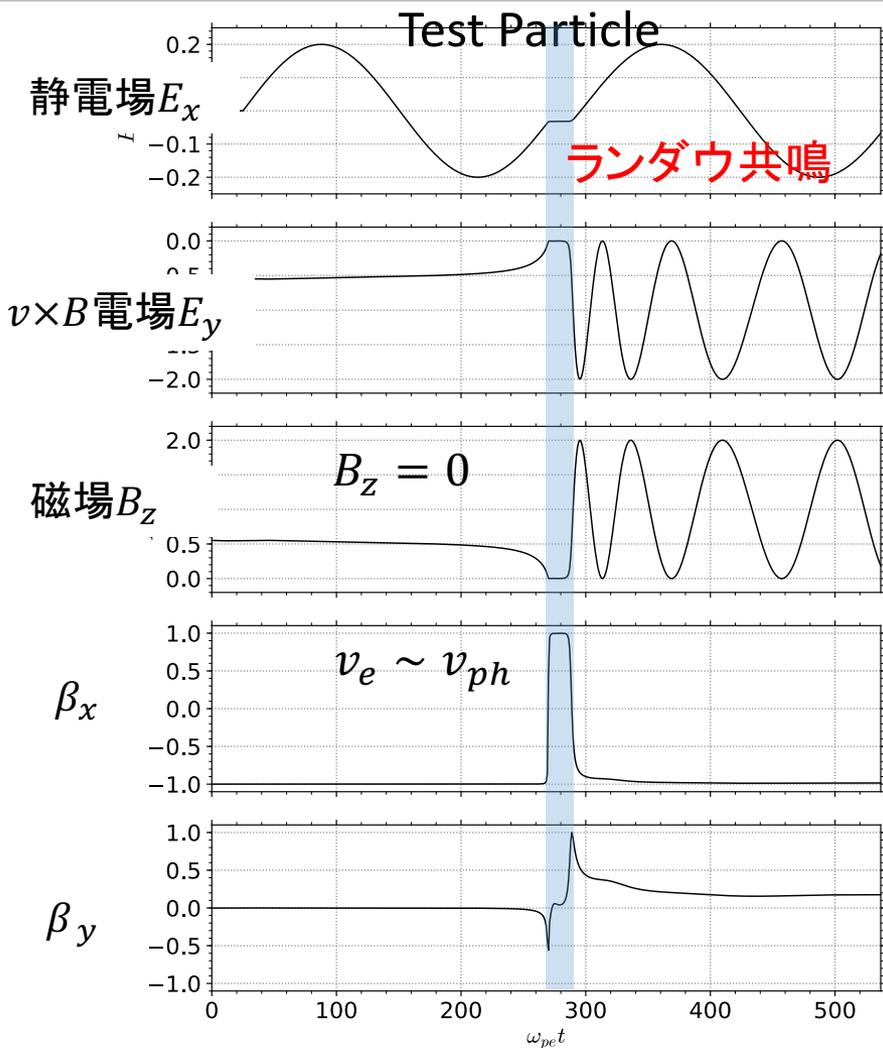
Test Particle



PIC

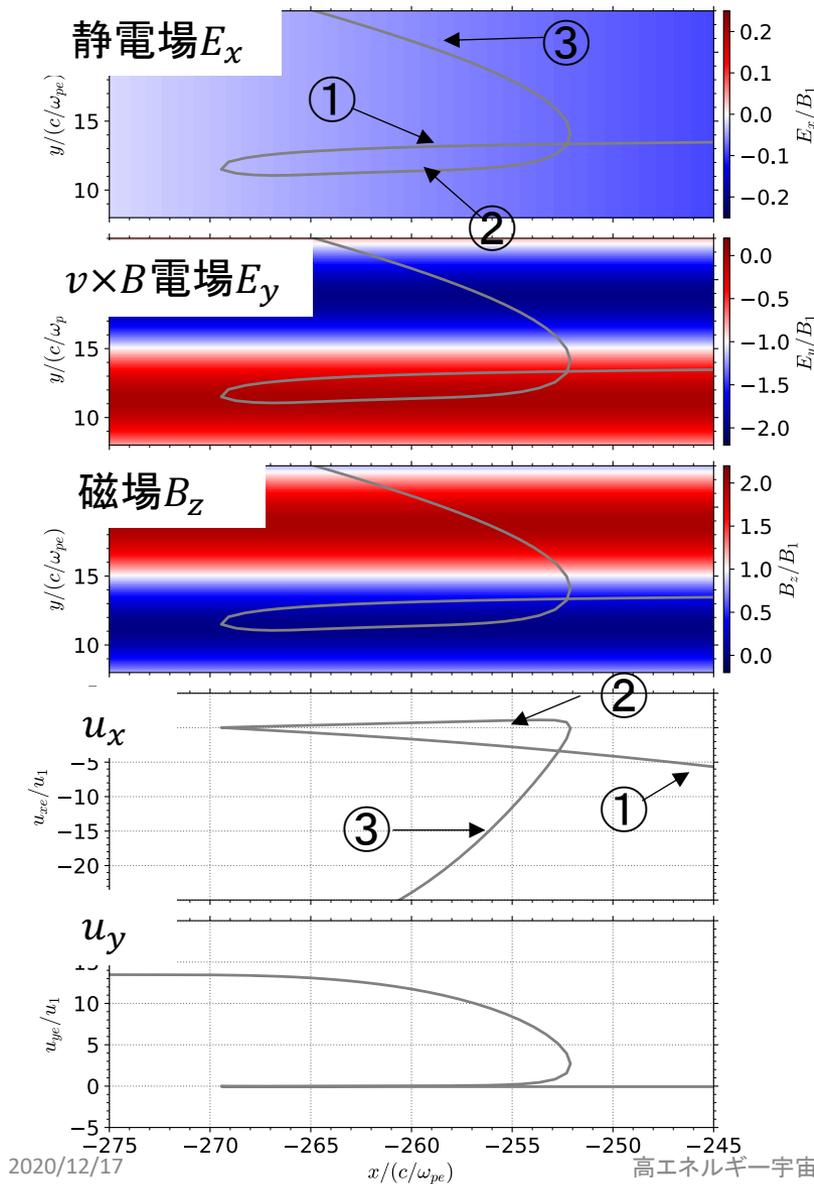


粒子の時間発展



航跡場加速→ピックアップ

ピックアップ過程への注入



1. 電子が航跡場で減速され、フィラメント上に突入
2. フィラメントでは $B_z \sim 0$
 $\rightarrow eE_{wake} > e\beta_y B_z$
 \rightarrow 航跡場に補足されて加速
3. 上流プラズマにピックアップされて $v \times B$ 電場でさらに加速

航跡場加速はピックアップ過程へと粒子を注入

まとめ

高解像度計算を用いて相対論的衝撃波でのシンクロトロンメーザー放射と粒子加速を解析

- ✓ 多次元系でもコヒーレント放射は生じる
 - ✓ 上流プラズマと放射の相互作用により航跡場を形成
- ✓ 電子・イオンともに上流で非熱的な分布を形成
 - 粒子はフィラメント中で航跡場加速
 - 航跡場加速された粒子は上流プラズマにピックアップされて $v \times B$ 電場でさらに加速
 - 最高到達エネルギーは $\gamma_{max} \sim \gamma_1^2$