

無衝突垂直衝撃波の 2次元PICシミュレーション

千葉大学宇宙物理学研究室
長谷部英賢

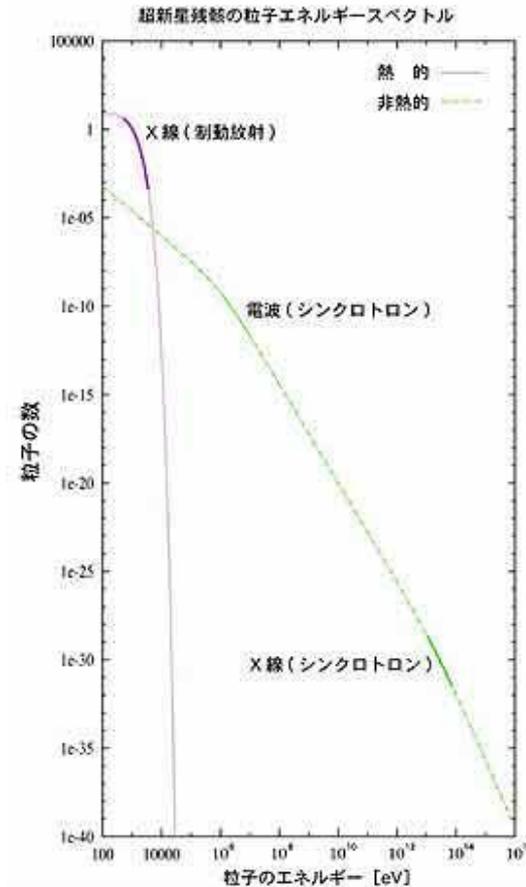
イントロダクション

宇宙には非常に高エネルギーの粒子が存在
エネルギー分布がMaxwell型でなくべき乗型

→非熱的粒子とよばれる

これらはどうやって
加速されているのか？

→現在様々なメカニズムが
提案されている



SNRショック

超新星残骸での衝撃波 (SNRショック) で
多くの加速の証拠が見つまっている

宇宙プラズマでの
クーロン衝突は非常に稀



無衝突衝撃波での
加速メカニズムを調べる



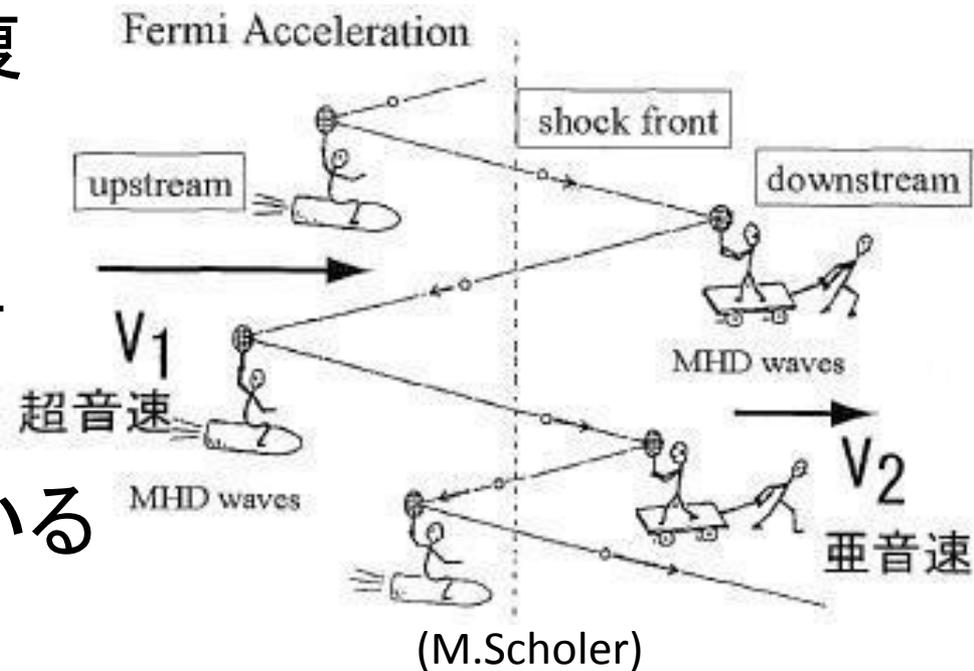
SN1006のX線画像 (チャンドラ衛星観測)

衝撃波フェルミ加速

粒子が衝撃波の前後を往復する度にエネルギーを得る

ベキ乗型のエネルギー分布を説明可能

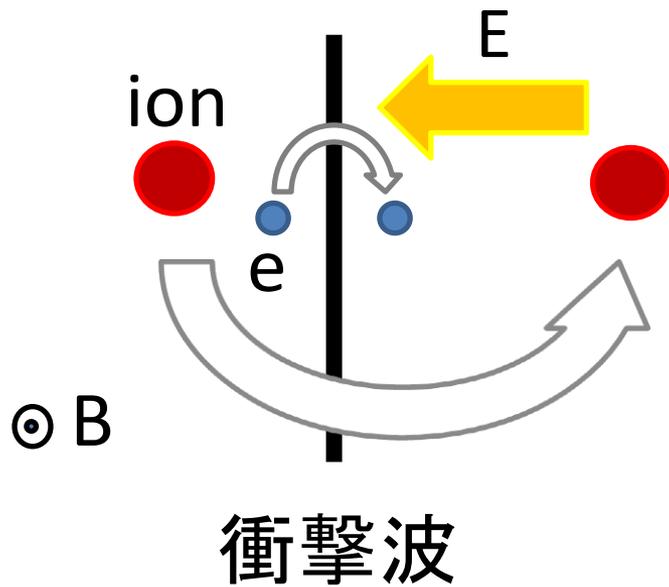
→最も妥当だと思われる



しかし、熱的な電子にはあまり効かない

➡ 前段階として何らかの加速メカニズムが必要

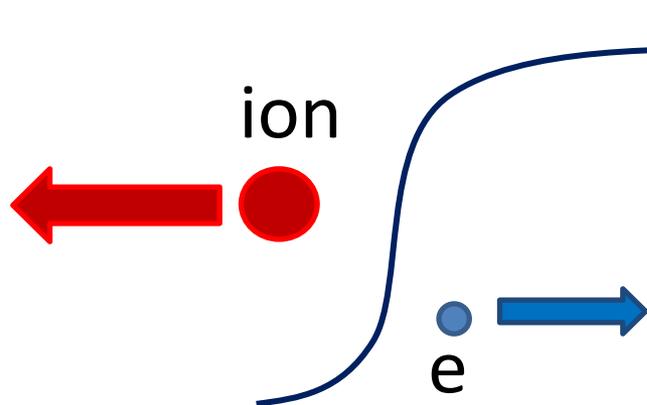
垂直衝撃波



垂直衝撃波:

衝撃波面の法線 \perp 磁場

ジャイロ半径の大きいイオンが
より深く侵入
→分極電場



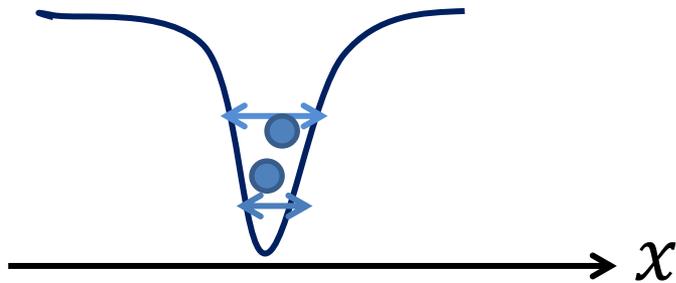
ポテンシャルにより**イオンが反射**
電子は反射されない

→イオン-電子2流体不安定性
(Buneman不安定性)

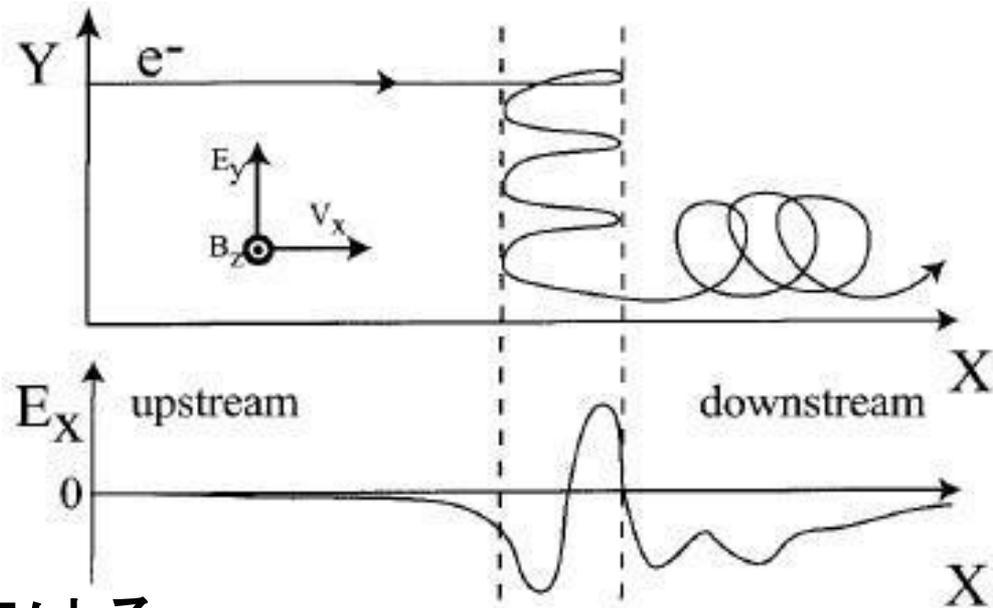
電子の波乗り加速

Buneman不安定性→大振幅電場 E_x が励起

→ $m_e v_x^2 / 2 < e\phi$ の電子は**静電ポテンシャルに捕捉**



ローレンツ力 $> E_x$ の力
となり捕捉を逃れるまで
対流電場 E_y で加速され続ける



(Hoshino & Shimada 2002)

垂直衝撃波のシミュレーション

よく似たパラメータで行った2つの計算

主な違い

	Amano&Hoshino (2009)	Kato&Takabe (2010)
磁場	z方向 (xy平面計算)	y方向 (xy平面計算)
プラズマ β	0.5 (cold)	26 (hot)



加速が見られた



加速は見られなかった

電磁粒子 (PIC) シミュレーション

使用コード:

宇宙流体数値シミュレーション統合ソフトウェア
(CANS) 型PICコード

PICコード

運動方程式の計算

$$F_k \rightarrow v_k \rightarrow x_k$$

場の情報 → 粒子の情報

$$(E, B)_i \rightarrow F_k$$

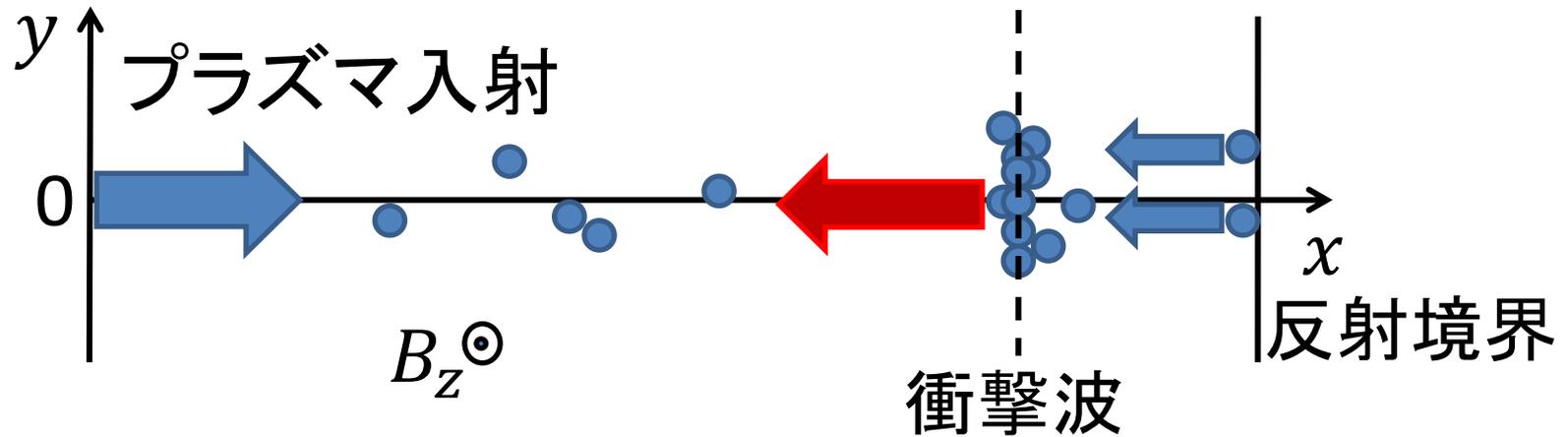
粒子の情報 → 場の情報

$$(x, v)_k \rightarrow (\rho, j)_i$$

Maxwell方程式の計算

$$(\rho, j)_i \rightarrow (E, B)_i$$

計算モデル



イオンプラズマベータ : $\beta = 0.5$

上流のAlfvenマッハ数 : $M_A = 20$

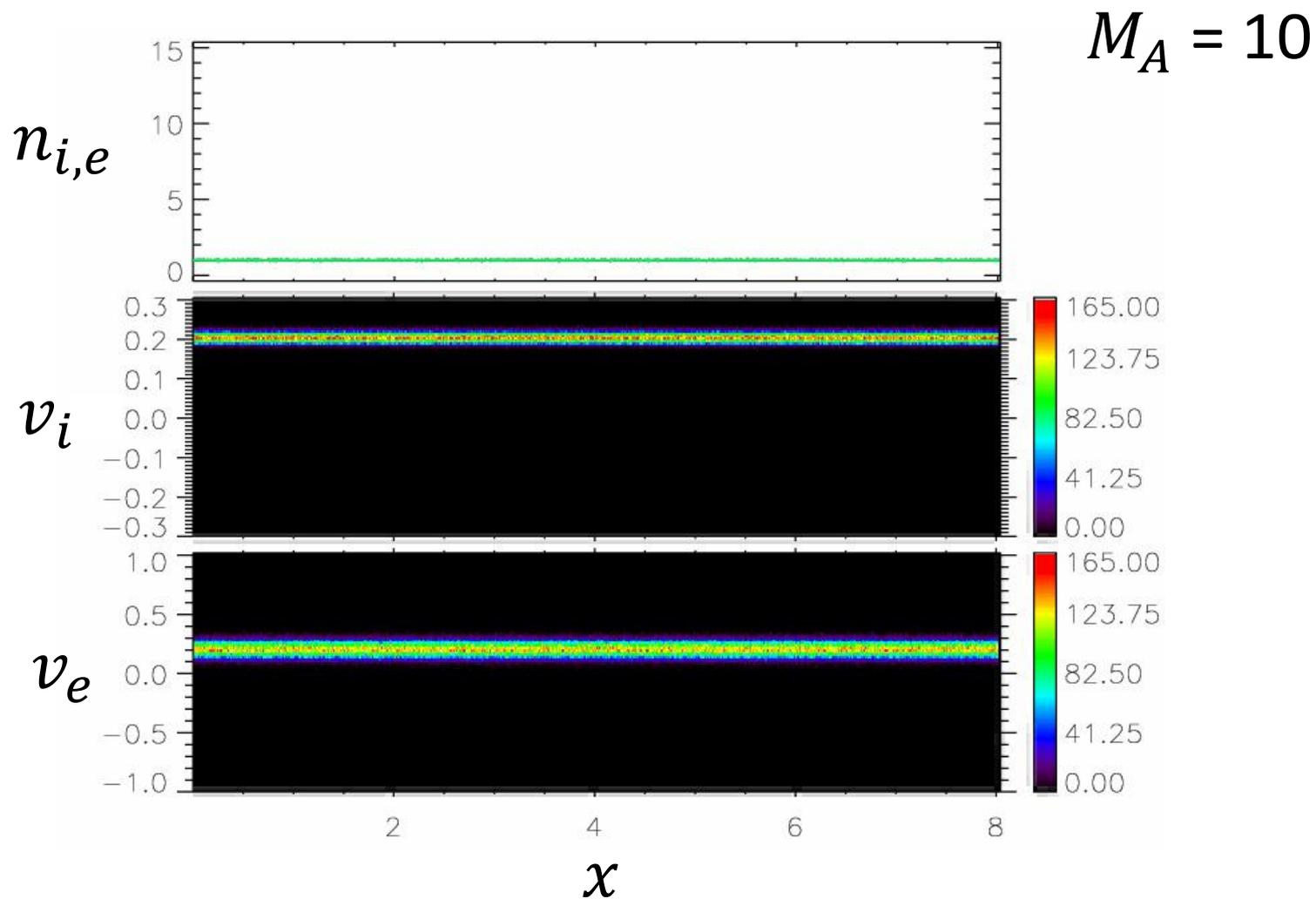
Alfven速度 : $v_A/c = 0.02$

質量比 : $m_i/m_e = 25$

光速 : $c = 1$

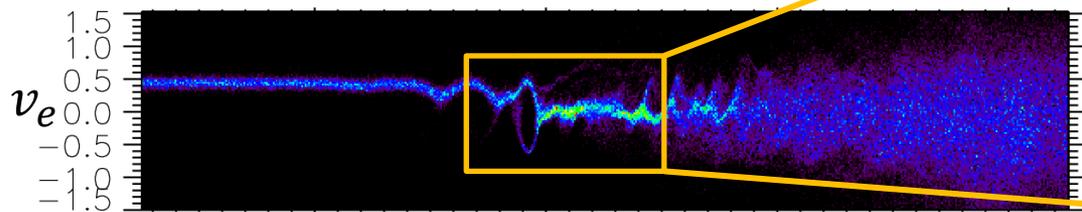
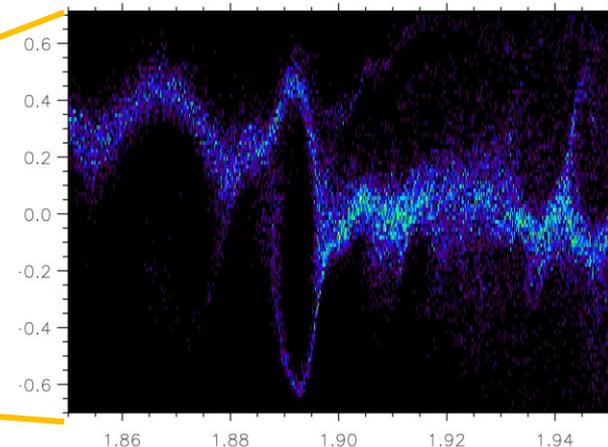
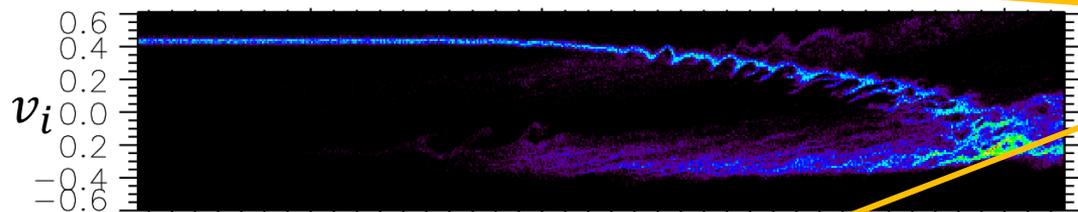
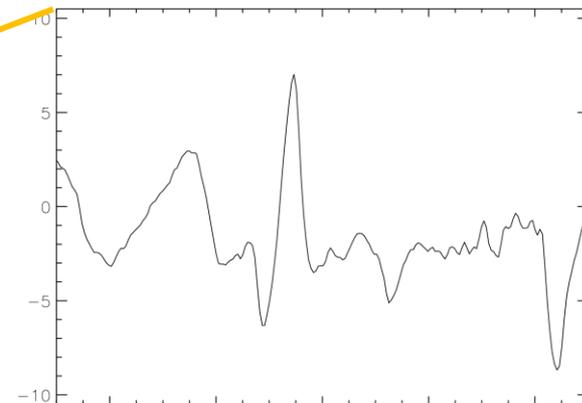
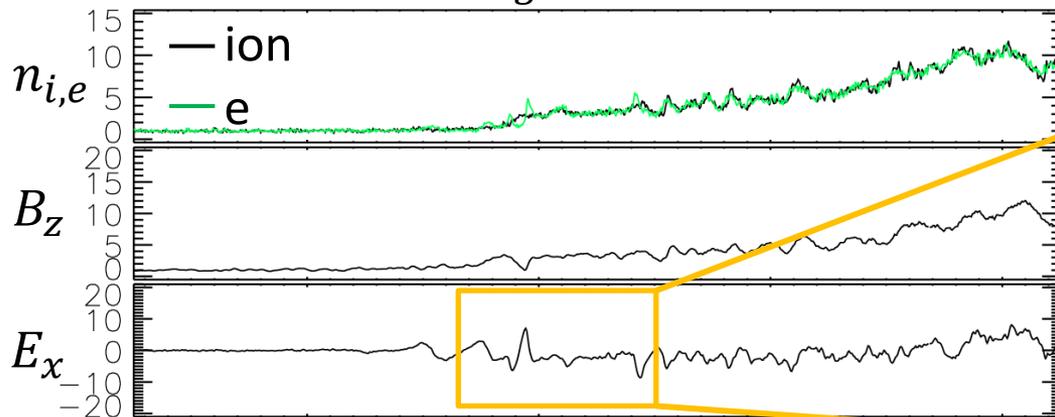
グリッド数 : $n_x = 8192$

衝撃波の伝わる様子(1次元計算)



電子の位相空間ホール → 電場励起

$\omega_{gi}t = 4.8$



1.8 1.9 2.0 2.1

x

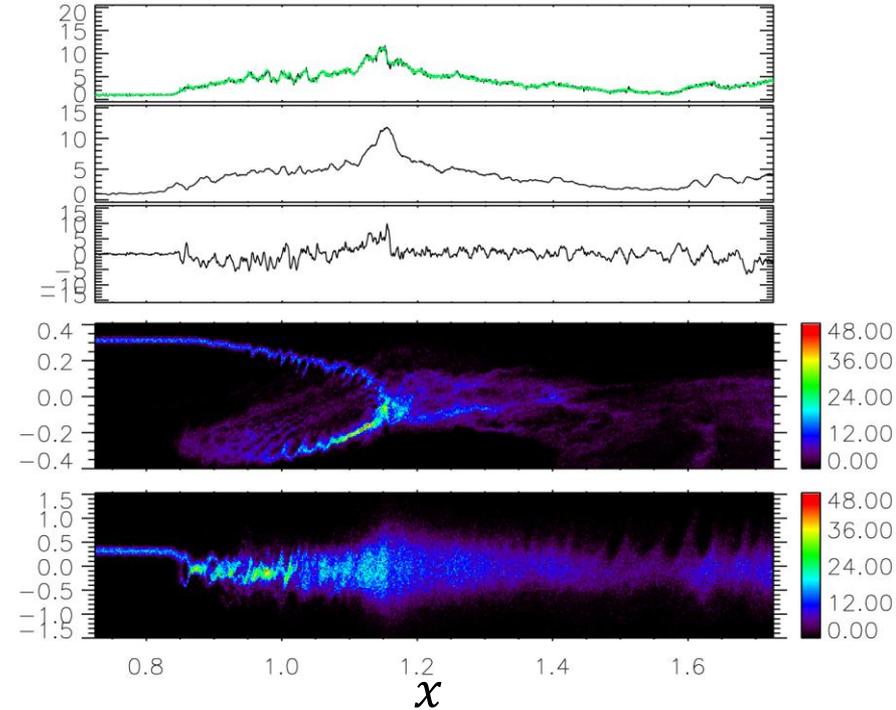
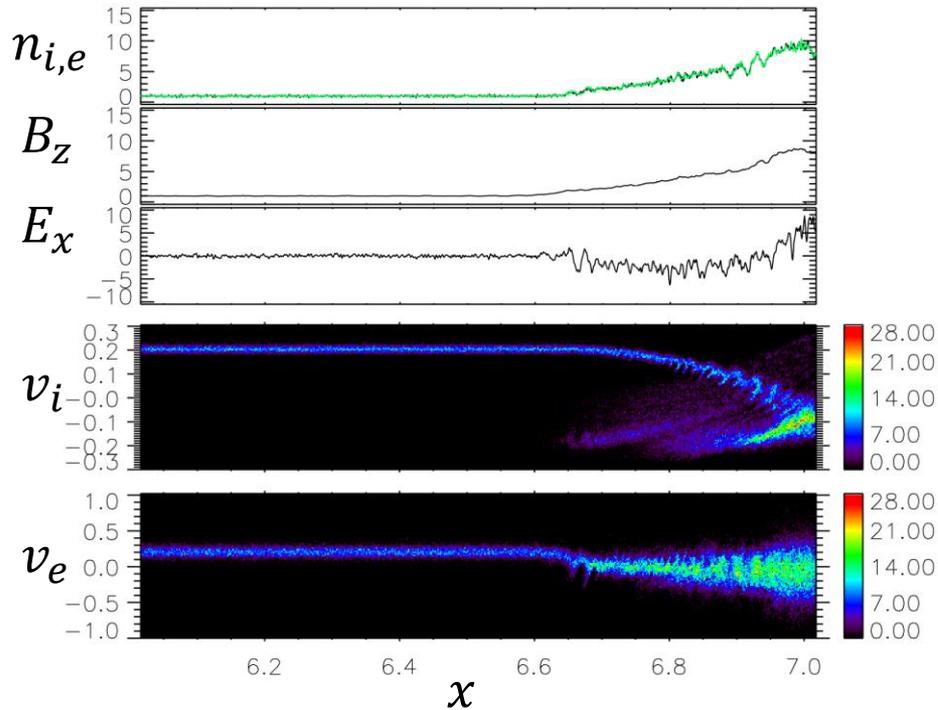
(上流の速度による変化)

$$M_A = 10$$

$$M_A = 15$$

$$\omega_{git} = 1.5$$

$$\omega_{git} = 4.8$$

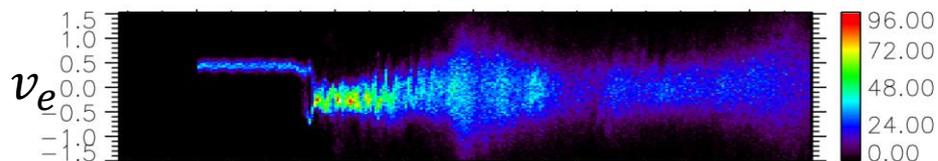
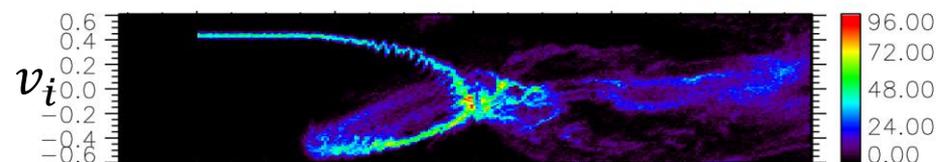
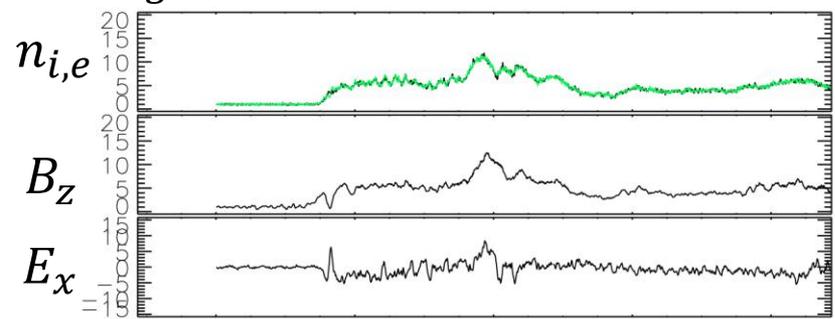


上流の速度が遅いと電場は励起されにくい

(上流の β による変化)

$\beta=1.0$

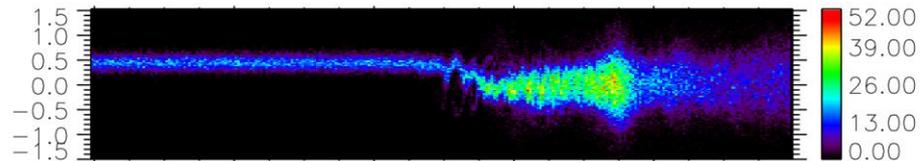
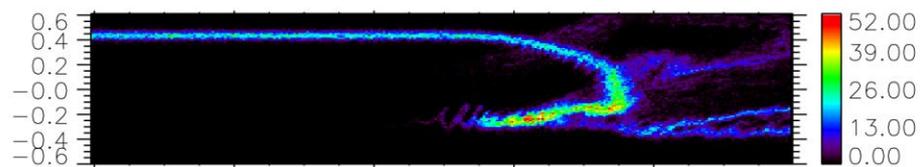
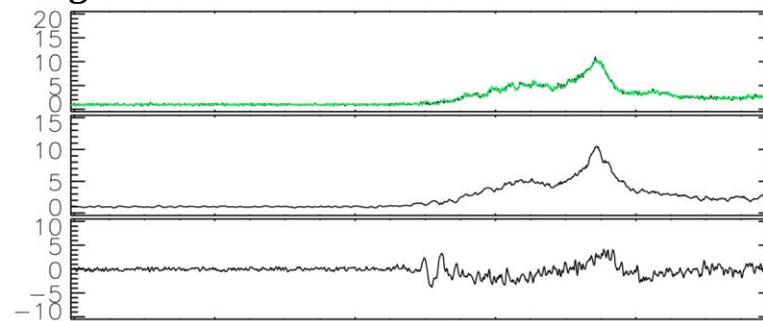
$\omega_{git} = 1.4$



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8
 x

$\beta=2.0$

$\omega_{git} = 1.0$

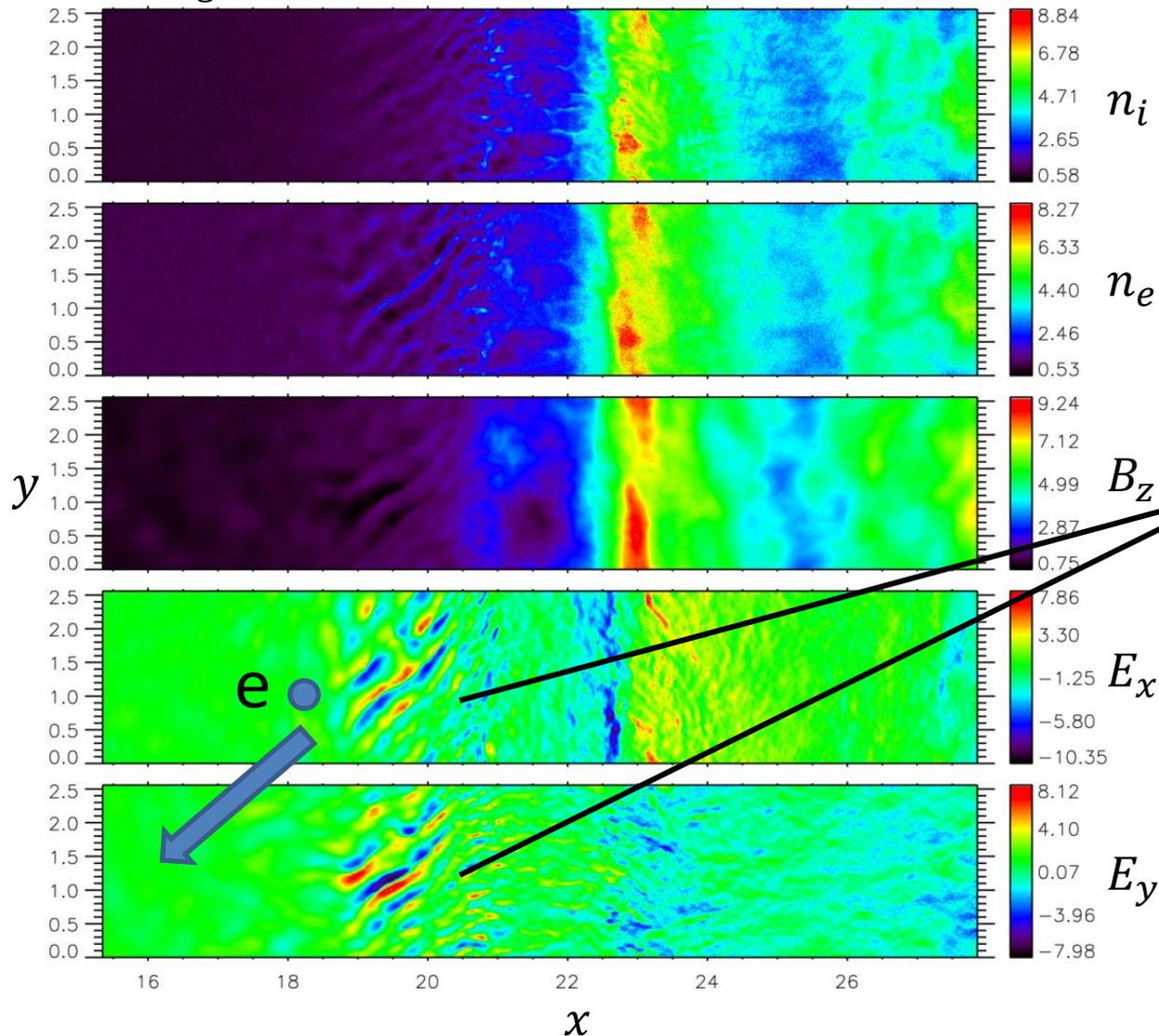


2.4 2.6 2.8 3.0 3.2
 x

β が大きくなると電場は励起されにくい

2次元計算

$\omega_{gi}t = 4.4$



Amano&Hoshino
(2009)
の計算を再現

斜めに波が伝播

捕捉電子が上流
へ戻れる

さらなる加速

まとめと課題

- 1次元計算

電子の位相空間ホール、それによる電場の
励起を確認

課題→粒子の軌道・エネルギー分布など

- 2次元計算

Amano&Hoshino(2009)の計算を再現

課題→詳しい解析・パラメータの変更など