

相対論的ジェットとの PICシミュレーション： spine構造の形成と電子加速

川島朋尚

共同研究者：

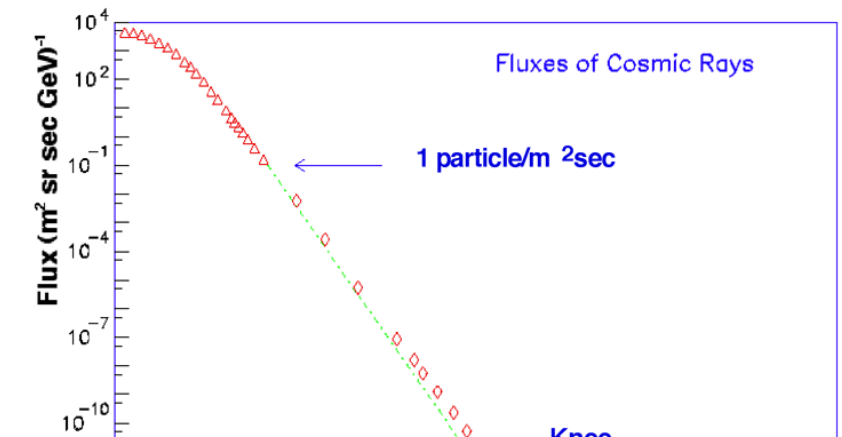
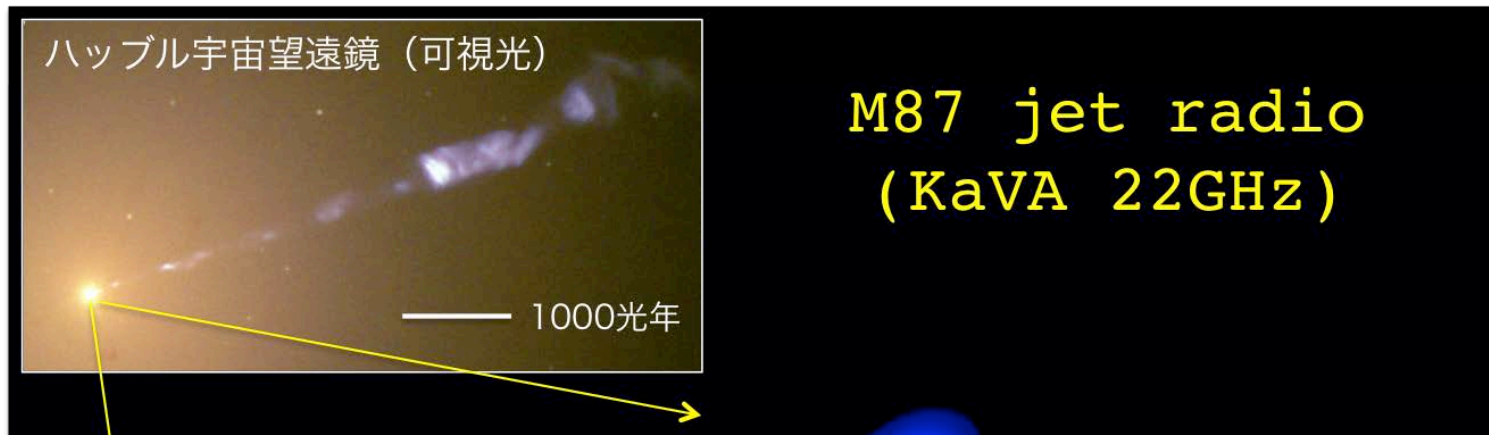
石黒静児, 森高外征雄, 堀内利得(核融合研)

富阪幸治 (国立天文台)

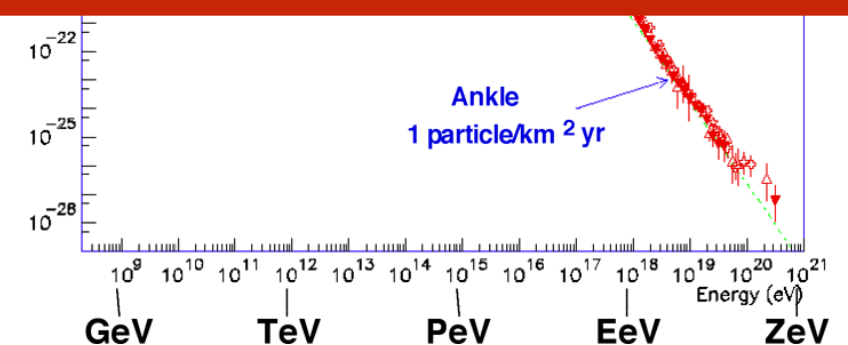


ブラックホールから噴出する相対論的ジェット

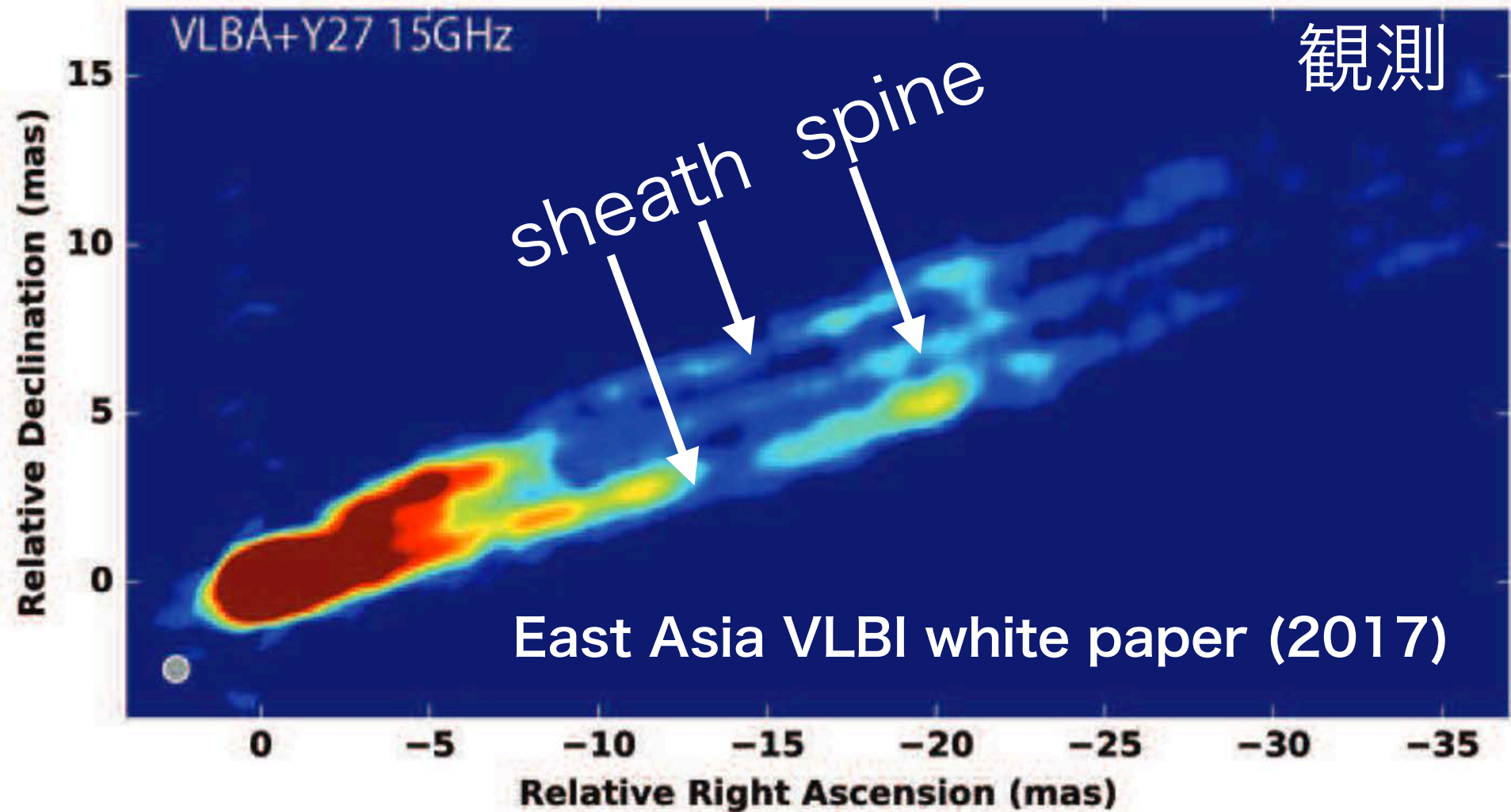
- ブラックホール近傍から噴出するほぼ光速のプラズマ流
最終到達速度 $v > 0.9c$
ローレンツ因子 $\Gamma \sim 10$ ($\Gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$)
- 極めて細く絞られたまま伝搬する (開口角 ~ 数度)
- 最高エネルギー宇宙線の生成現場である可能性が高い



発見から100年経つが、ジェットの形成機構、加速機構、非熱的粒子の発生機構、全てが謎

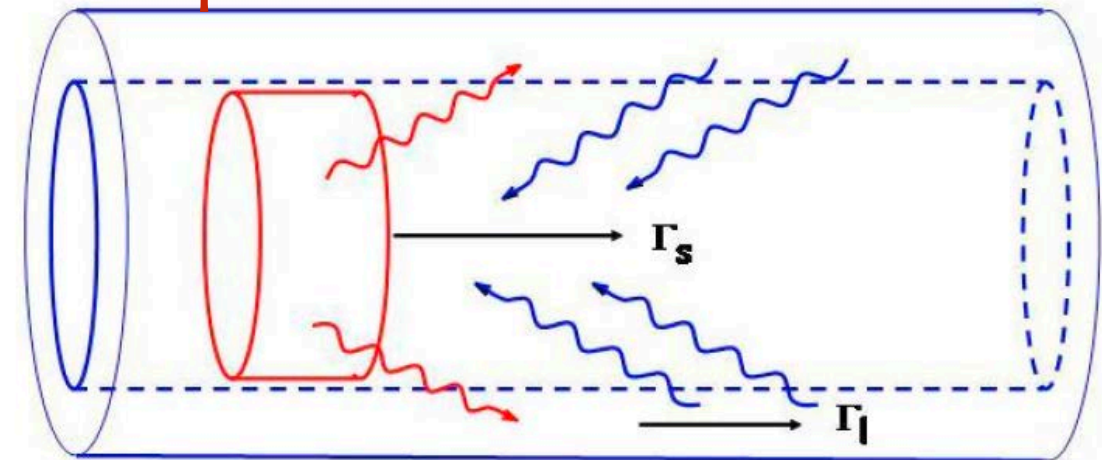


ジェットの超高分解能観測: 3本構造の発見

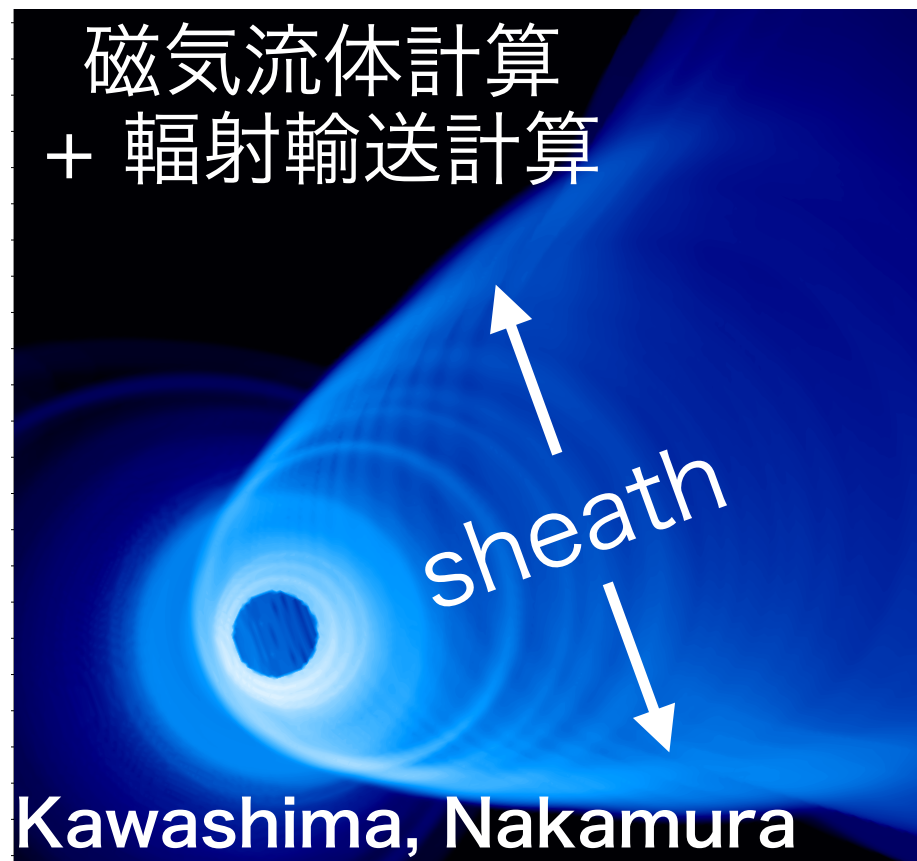


- 近年、ジェット内部構造が空間分解されはじめた。
- これまで遠方ジェットの観測性質を説明するために考えられていた **spine-sheath**構造が見えた!?

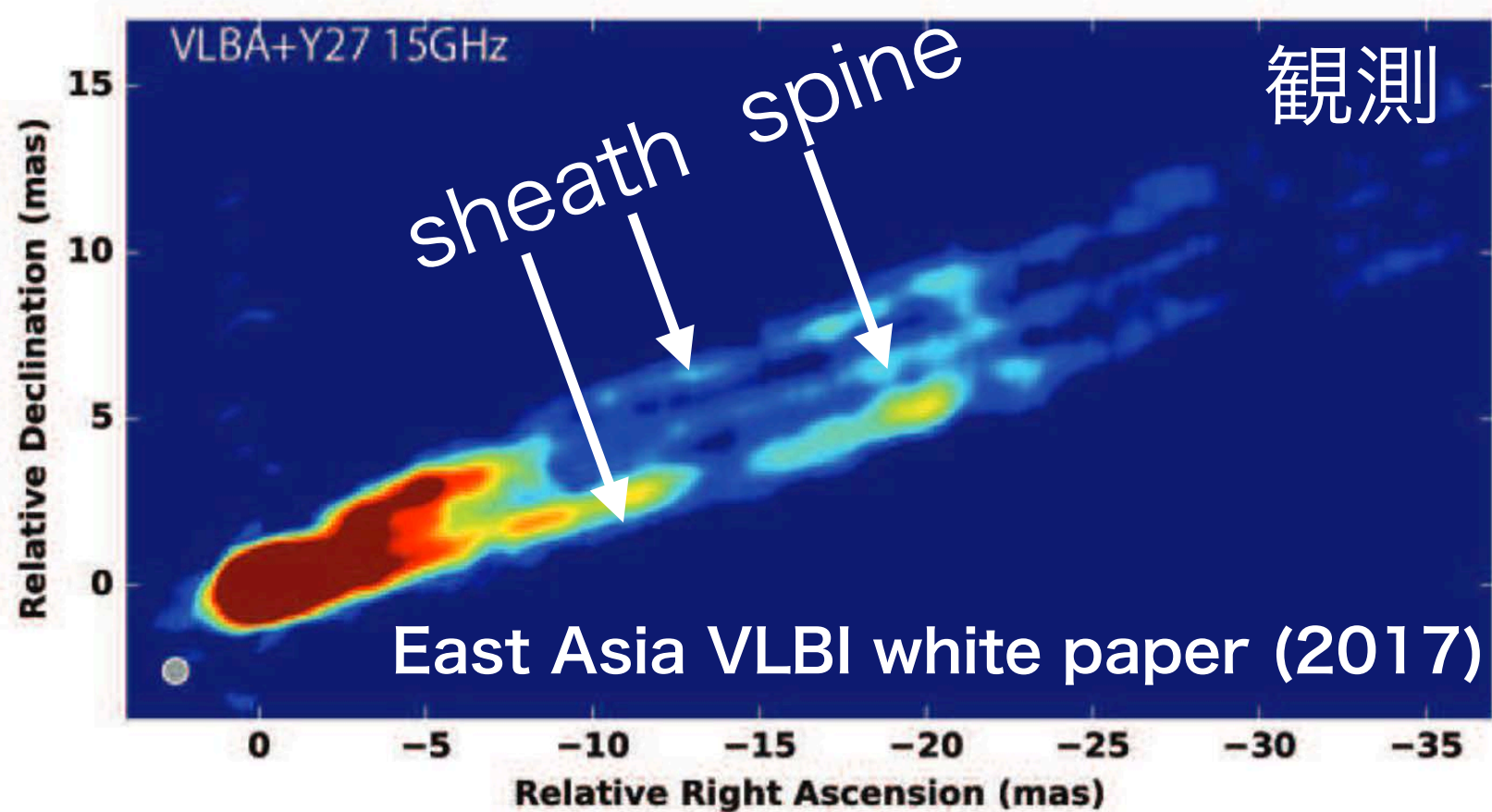
fast spine + slow sheath



磁気流体計算結果の「見え方」



+ in prep.



- 磁気流体計算 + 輻射輸送計算 (シンクロトロン放射 + 吸収)

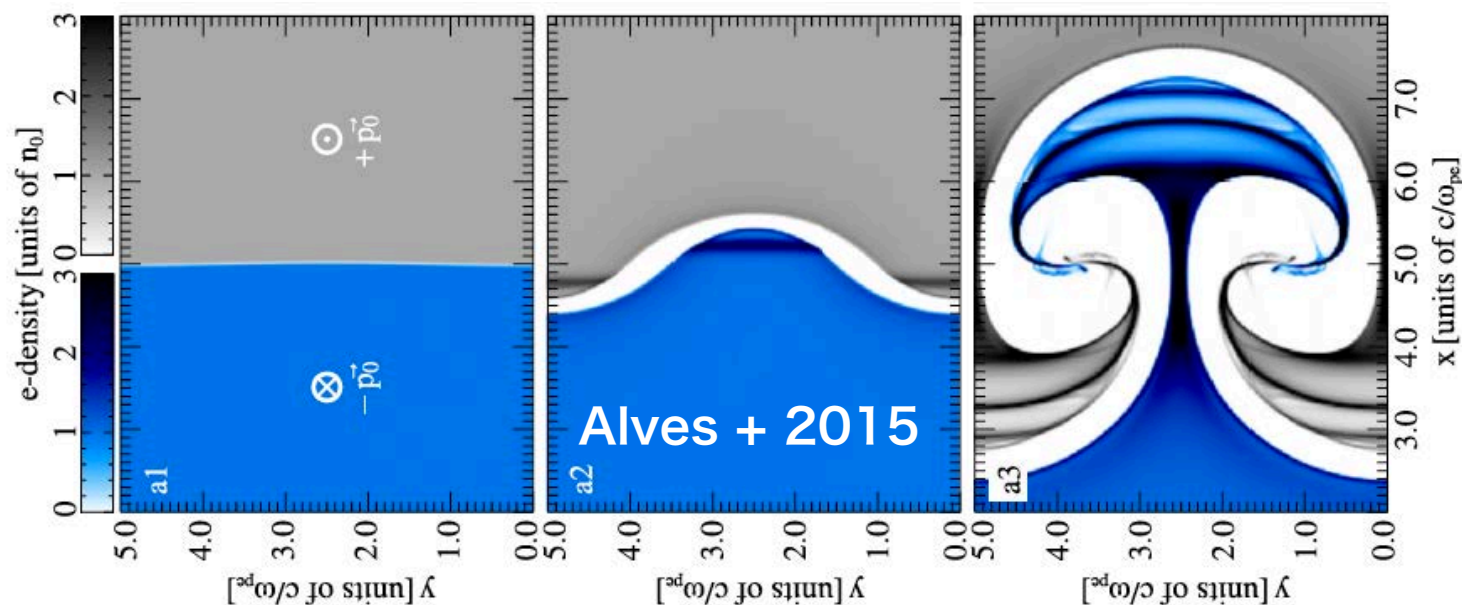
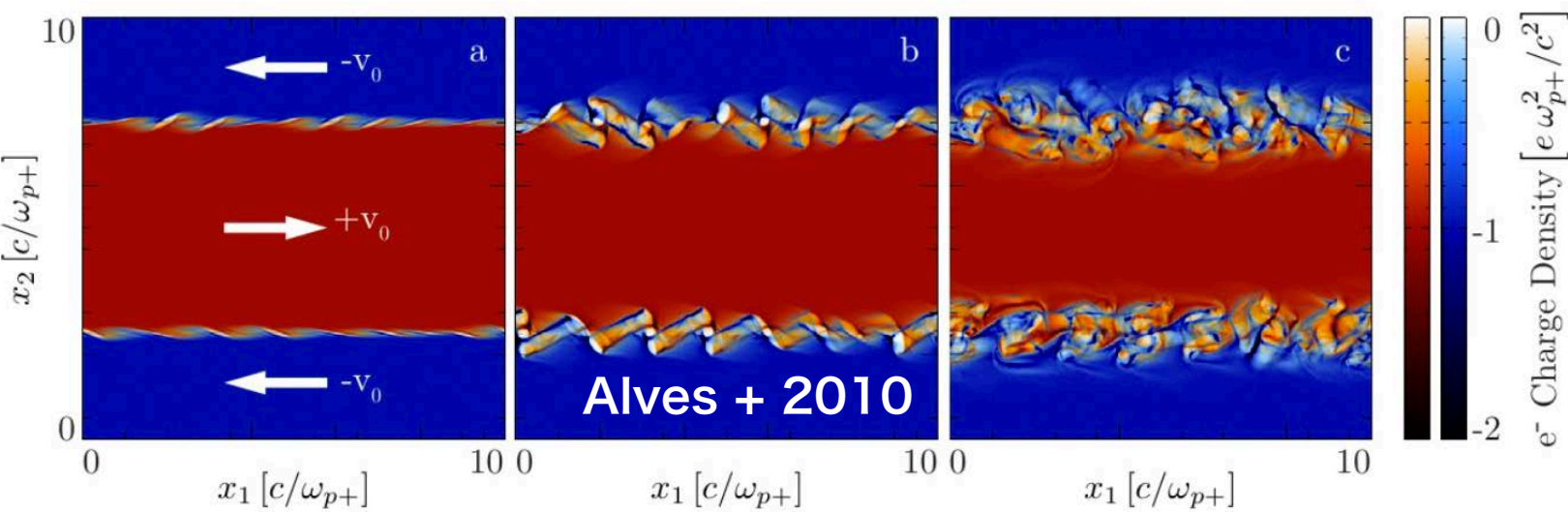
sheathは現れるがspineが見えない。磁気流体近似の限界？
核融合研で開発されたプラズマ粒子シミュレーション (PIC) コードを用いて調べる

→ **無衝突プラズマ**

spine構造と電子の加速を説明できる？

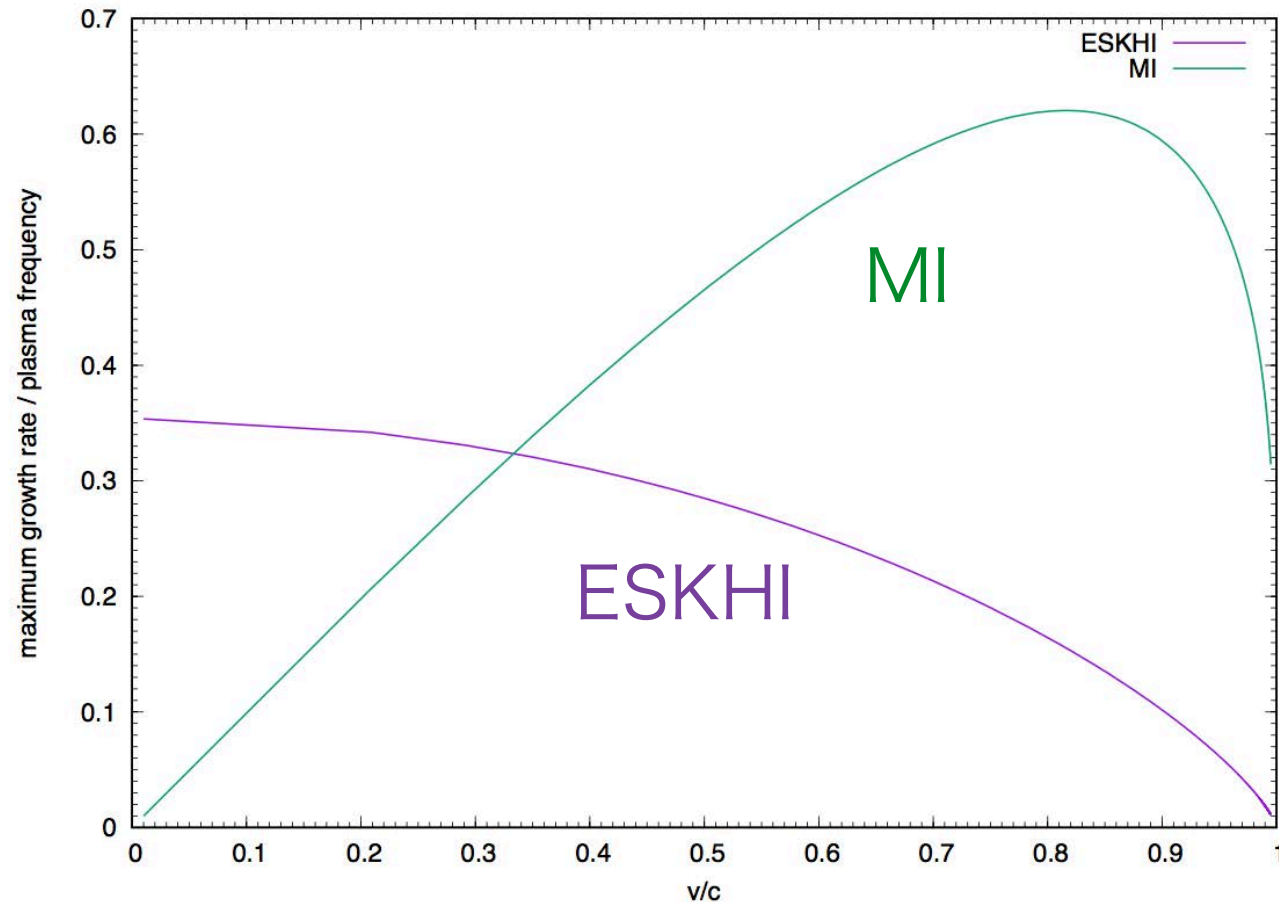
相対論的シア流における電子スケールの不安定性

- 電子スケールのケルビン・ヘルムホルツ不安定性 [ESKHI (Alves + 2010, Nishikawa + 2014等)]
- マッシュルーム不安定性 [MI (Alves + 2015等)]
- 最近になり相対論的シア流のプラズマ粒子シミュレーション(PIC)が行われ始めているが、**速度シア不安定性が大局的な構造や粒子加速に与える影響はよくわかっていない。**特に相対論的な場合MIが重要。
→ MIの空間2D(物理量3D)のPICシミュレーションを実施。

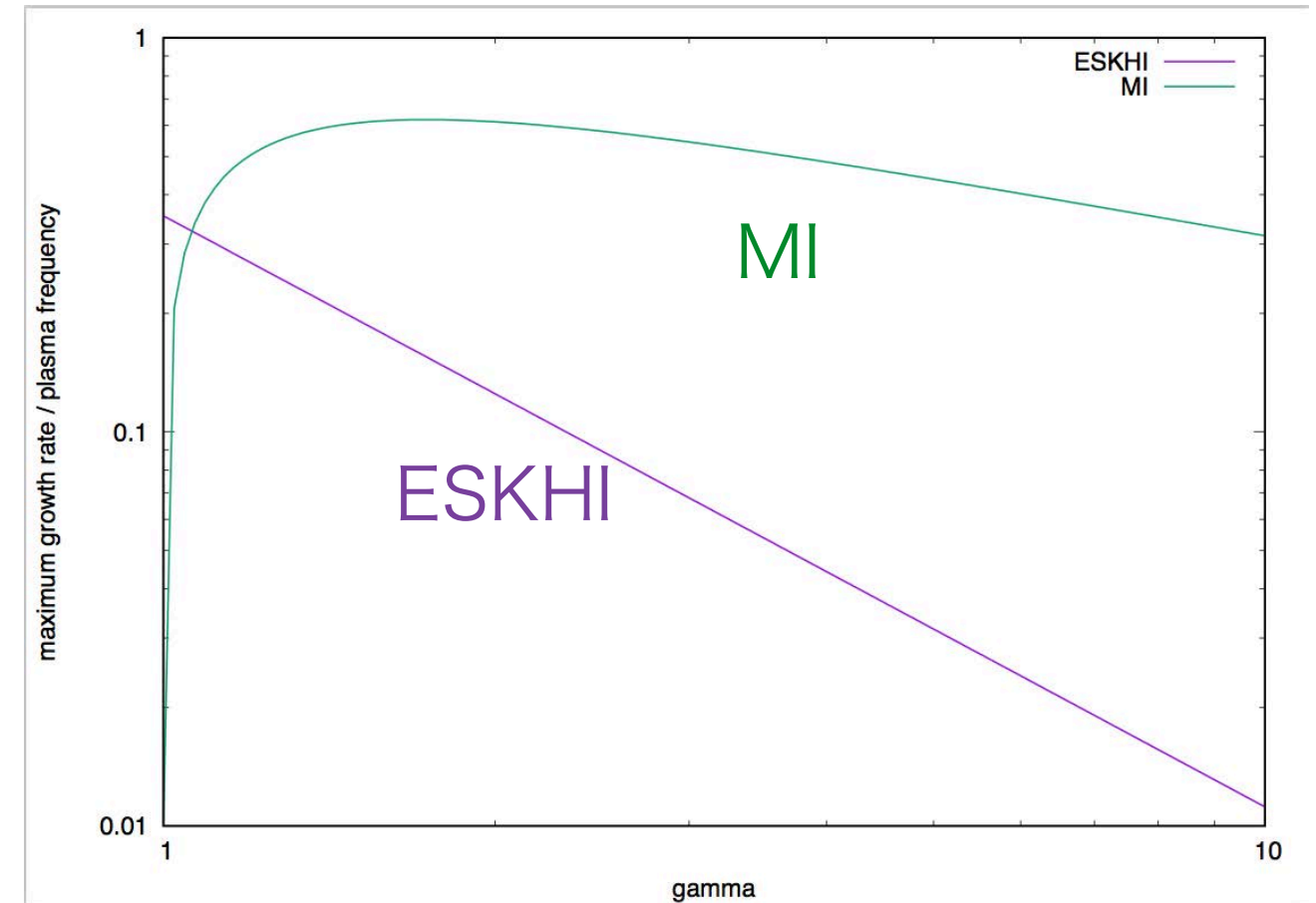


なぜマッシュルーム不安定性(MI)?

最大成長率とv/cの関係



最大成長率とローレンツ因子の関係



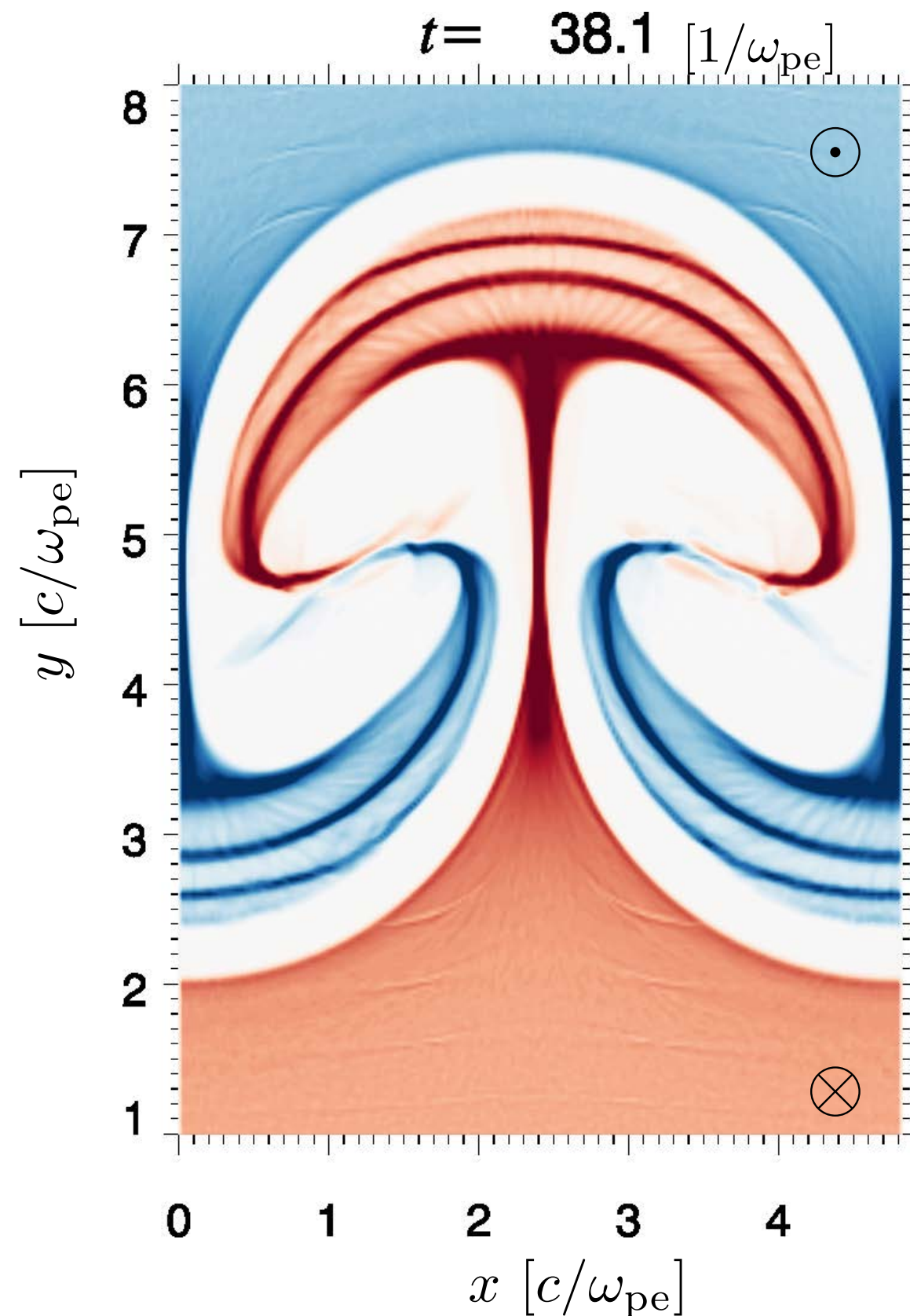
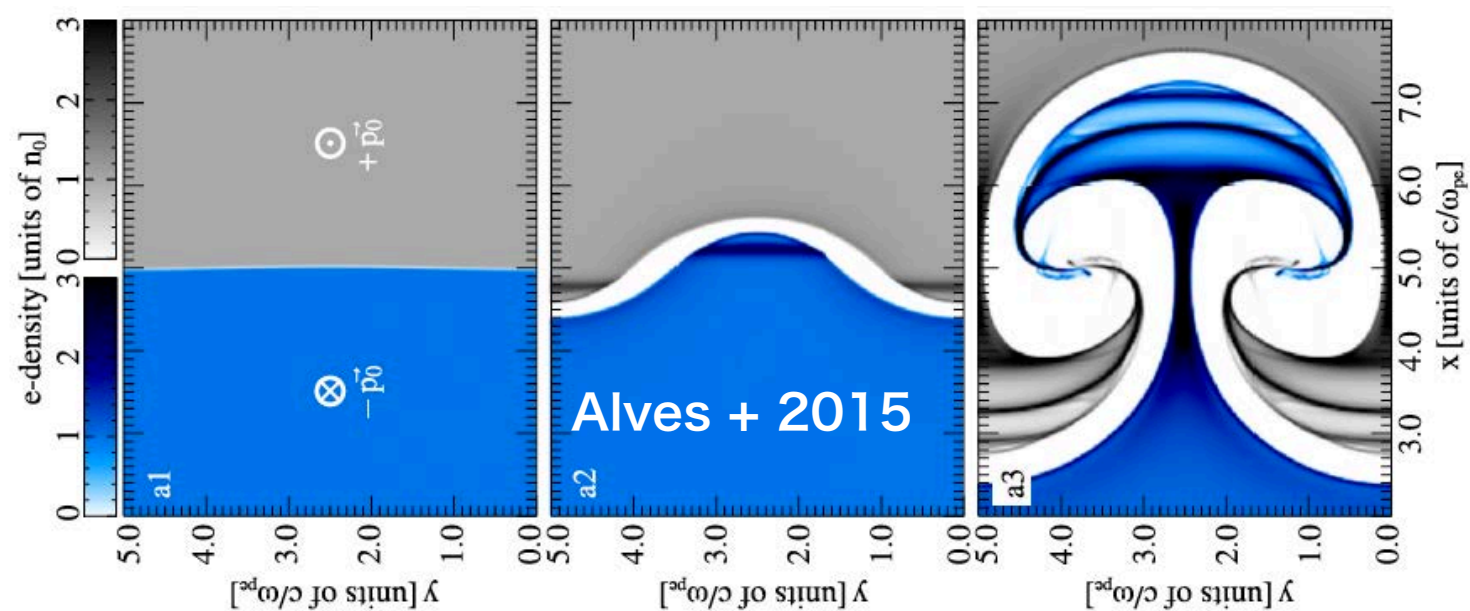
• ESKHI $\Gamma_{\max} = \sqrt{\frac{1}{8}} \omega_{pe} \gamma^{-3/2}$

• MI $\Gamma_{\max} = \left(\frac{v_{\text{bulk}}}{c} \right) \omega_{pe} \gamma^{-1/2}$

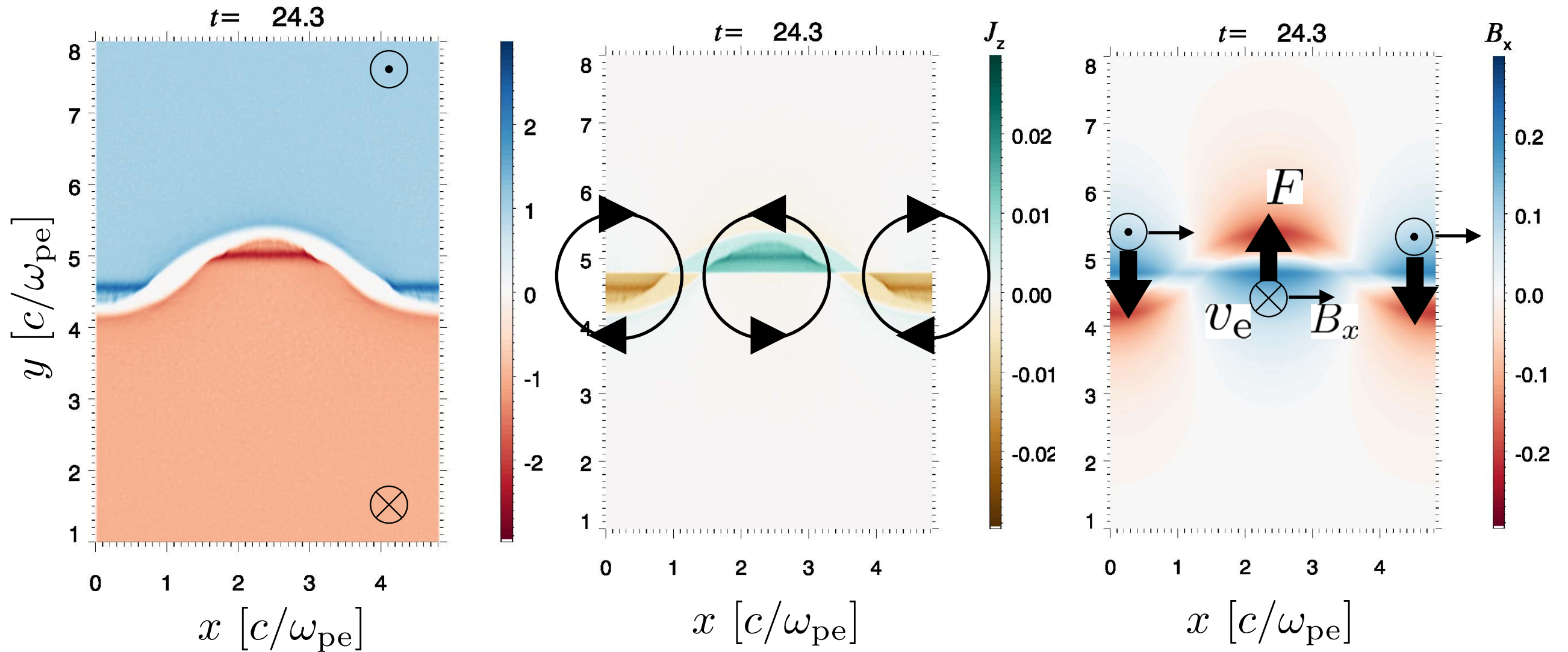
- 相対論的な場合、MIが支配的になる

MIのテスト計算 (Alves et al. 2015の再現)

- メッシュ数 (Nx, Ny) = (192, 768)
- 粒子数 36/cell
- $v_{\text{bulk}} = \pm 0.5 c$
- $v_y = -1.0 \times 10^{-4} \cos(2\pi \cdot x/L)$ の初期擾動
- 電子慣性長を40メッシュ分解
- 各方向に周期境界
- 核融合研・森高先生のPICコード



MIのメカニズム



- シア面の電子の横切り → J_z の発生
- B_x (シア面平行磁場) の発生
- シア面を横切る電子運動をさらに促進

以下、念のため現時点では非公開