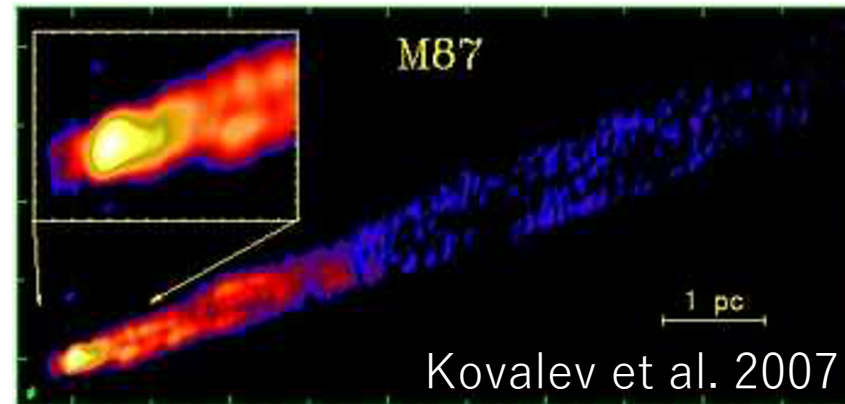
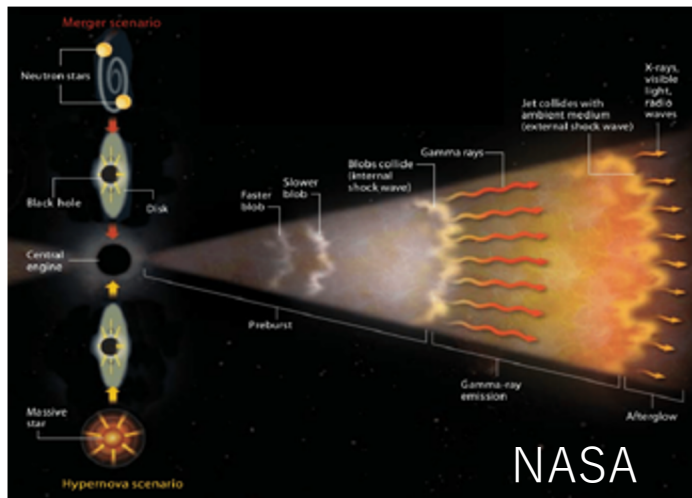


# 相対論的無衝突衝撃波での 磁場増幅機構

富田 沙羅（東北大学 学際研）  
大平 豊（東京大学）  
当真賢二<sup>1</sup>，富田賢吾<sup>1</sup>，木村成生<sup>1</sup>（<sup>1</sup>東北大）

# 無衝突衝撃波近傍の磁場

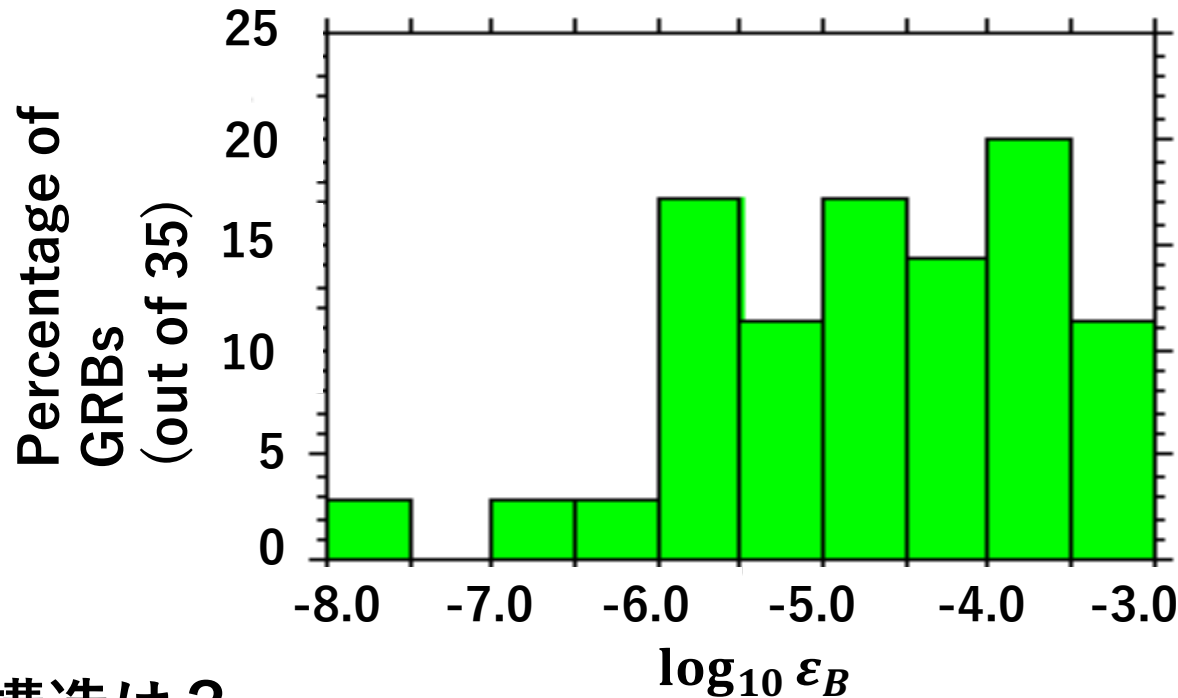
高エネルギー天体現象でできる無衝突衝撃波：  
宇宙線の生成機構、高エネルギー光子の放射領域  
→ 衝撃波近傍の**磁場**の情報が重要。 → **未知!!**



磁場の情報がわかれば、  
宇宙線加速機構や天体の周辺環境が理解できる！

# 衝撃波近傍磁場についての問題点

- 星間磁場( $\sim \mu\text{G}$ )を衝撃波圧縮した時、 $\epsilon_B = \frac{B^2/8\pi}{\Gamma m n c^2} \sim 10^{-9}$



- 磁場構造は？
- 衝撃波上流の磁場の情報は未知。

**磁場増幅機構の理解が必要！！**

# 衝撃波での乱流ダイナモによる磁場増幅

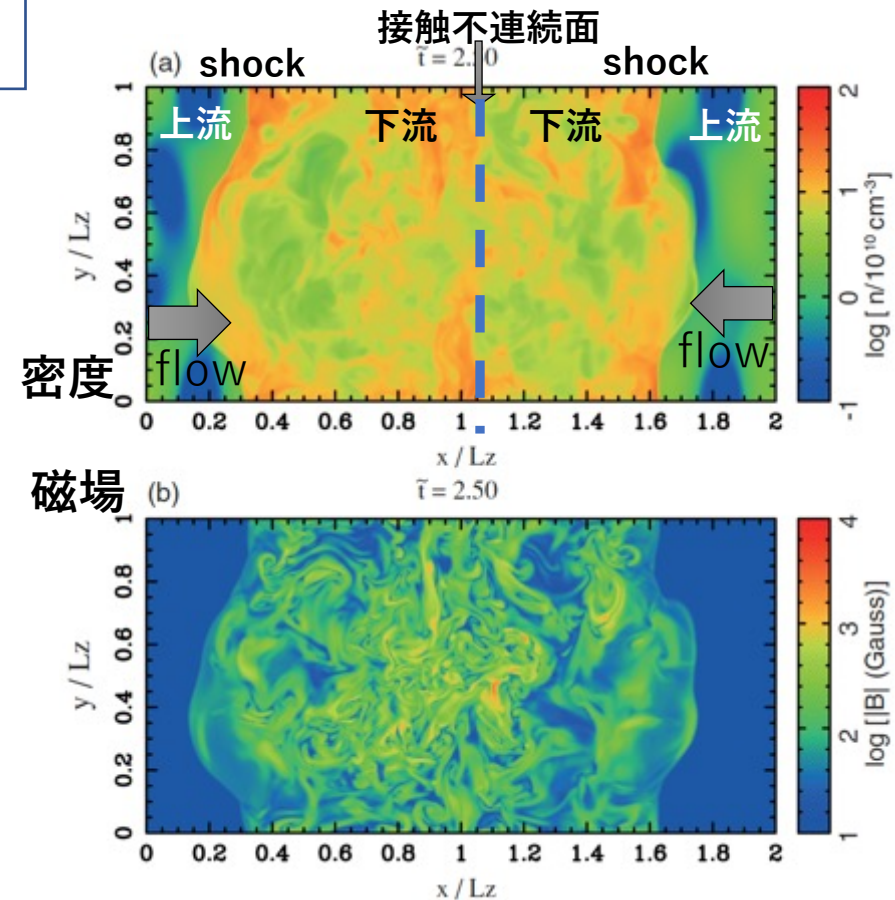
磁気流体(MHD)シミュレーション(Inoue et al. 2011)

衝撃波下流の  
乱流のエネルギー > 磁場のエネルギー

である限り、磁場を増幅できる。

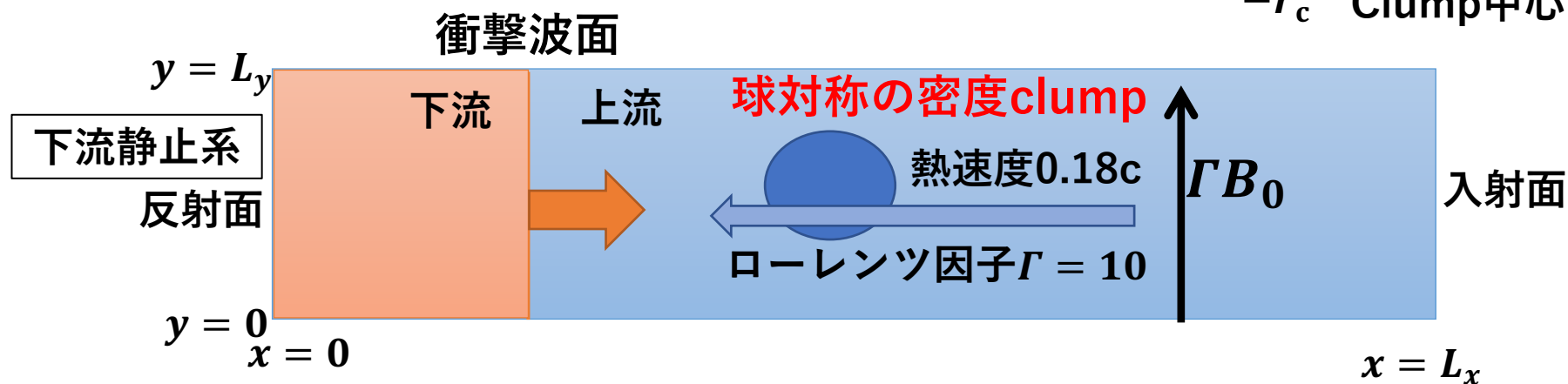
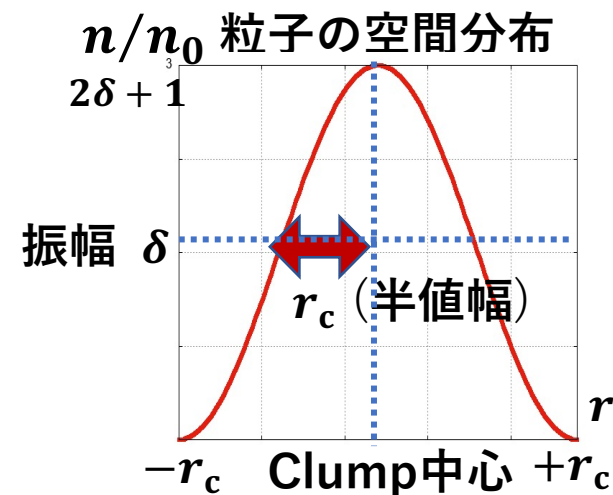
しかし、現実は無衝突衝撃波。

- 非熱的粒子の生成
  - 宇宙線による磁場増幅
  - 粒子拡散
- MHD近似は常に成り立つか？



# 衝撃波のシミュレーションセットアップ

- 松本(洋)さん(千葉大)の2次元PICコード、Athena++のMHDコードを使用。
- $e^\pm$ プラズマ (相対論的衝撃波下流では電子陽子プラズマに等しいと近似可能)
- 計算機 : Cray XC50 (3000コア) @国立天文台
- 計算領域 :  $L_x = 3120 c/\omega_{pe}$ ,  $L_y = 1200 c/\omega_{pe}$   
( $\Delta x = \Delta y = 0.1 c/\omega_{pe}$ )
- 粒子数 : 80個/cell, 全粒子数 $\sim 10^{12}$ 個



# 衝撃波のシミュレーションセットアップ

- 上流の磁化パラメター  $\sigma_e = B_0^2 / 4\pi n_0 m_e c^2$
- (密度clumpのサイズ  $2r_c$ ) / (ジャイロ半径  $r_{ge}$ ) と振幅  $\delta$  の設定

	$\delta$	$\sigma_e$	$2r_c/r_{ge}$
case1	0.5	$10^{-3}$	9.5
case2	0.5	$10^{-5}$	0.9
case3	10	$10^{-3}$	9.5

(GRB残光の場合)

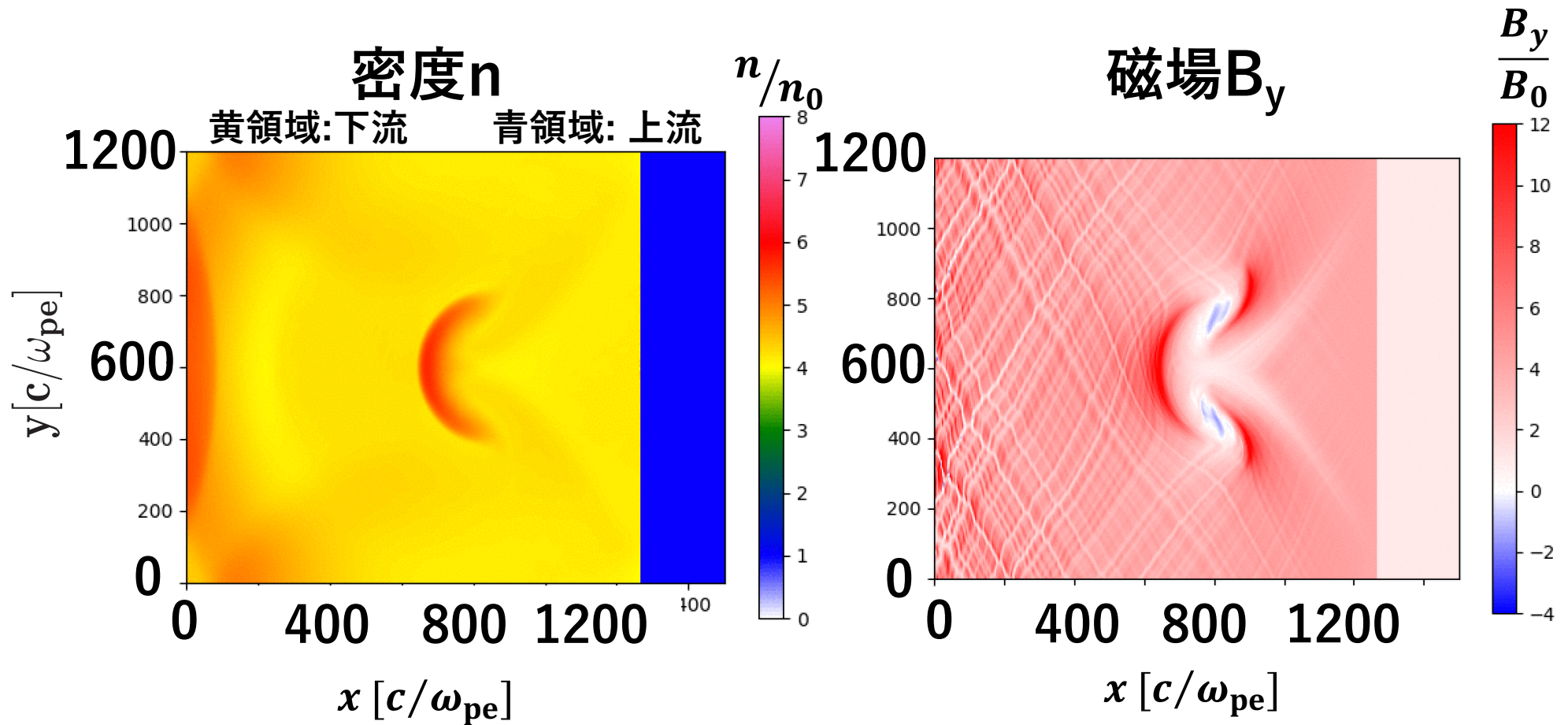
乱流ダイナモによる磁場増幅に必要な”密度揺らぎのサイズとジャイロ半径の比”

• “Eddy Turn Over Time  $\leq$  衝撃波の減速時間” :  $\frac{\lambda}{c} \leq t_{dec}$

• 上流磁場が  $3 \mu G$

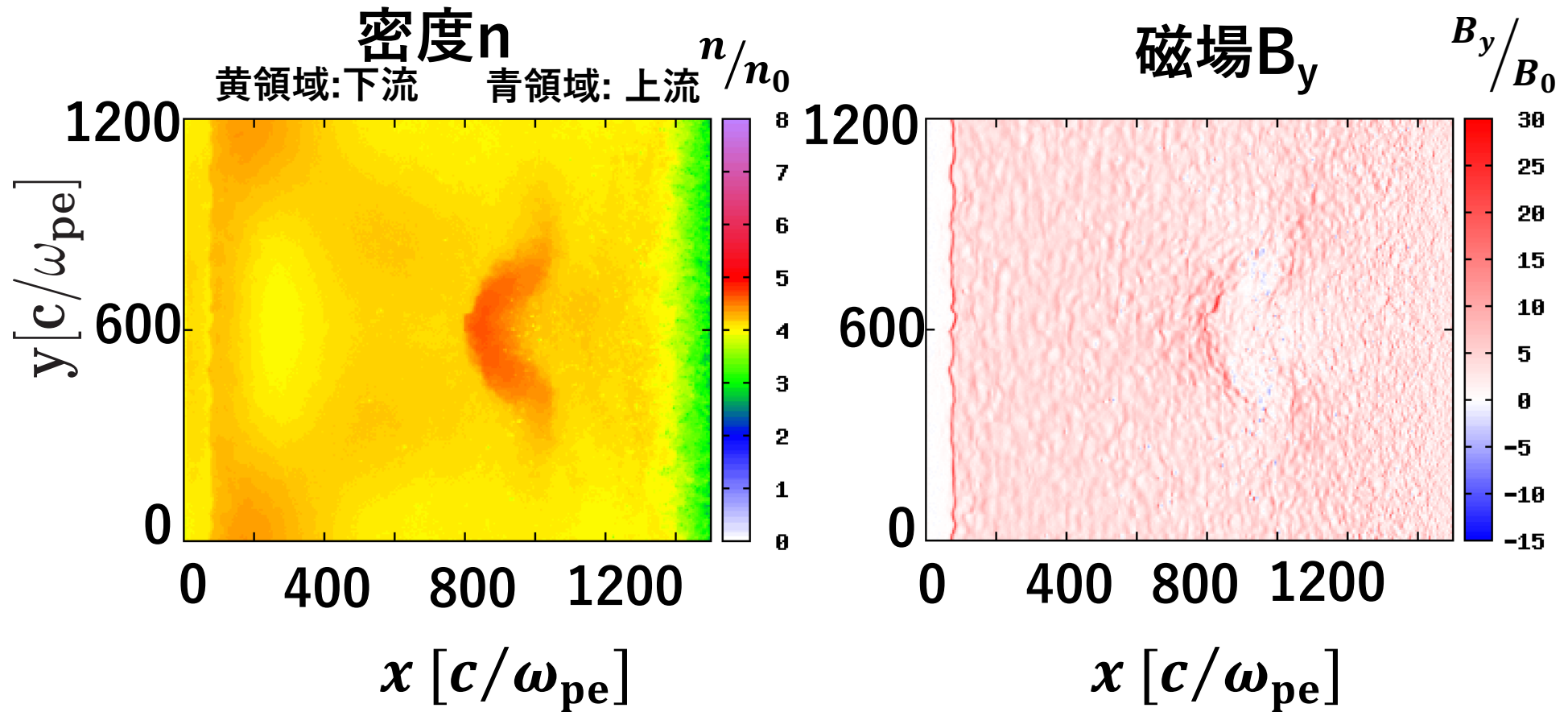
より、 $\frac{\lambda}{r_{gi}} \approx 10-100$  (下流静止形).

結果: MHD ( $\sigma_e = 10^{-5}$ , 振幅  $\delta = 0.5$ )





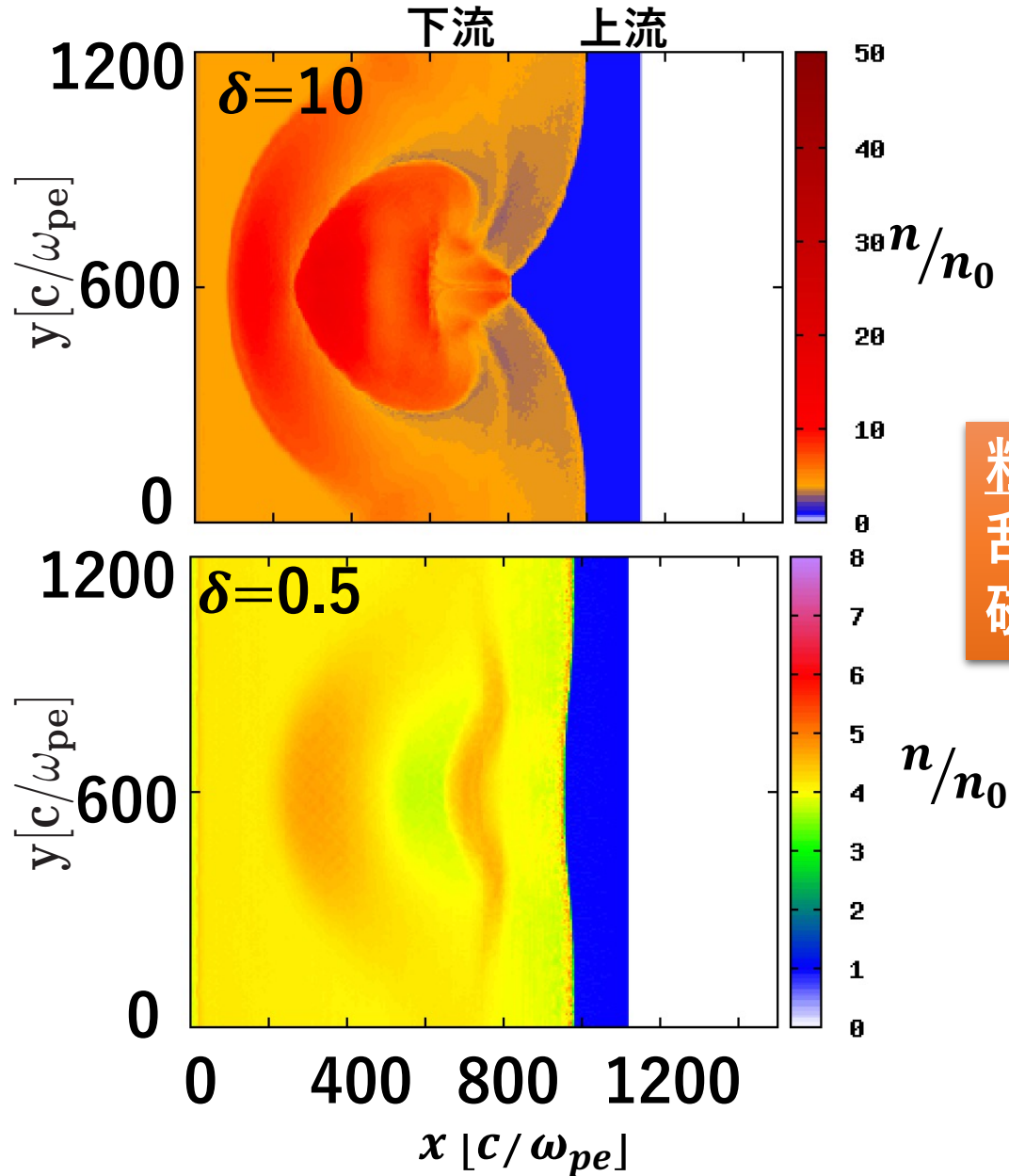
結果: PIC ( $\sigma_e = 10^{-5}$ , 振幅  $\delta = 0.5$ )



\* 密度の布の白領域はまだ粒子は注入されていない。

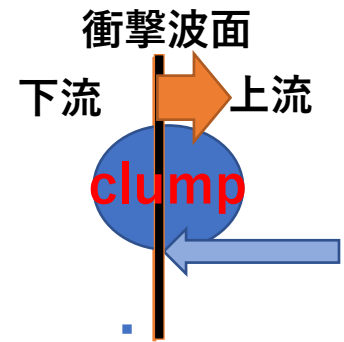


# 結果: 振幅依存性 ( $\sigma_e = 10^{-3}$ ) PIC 密度の空間分布

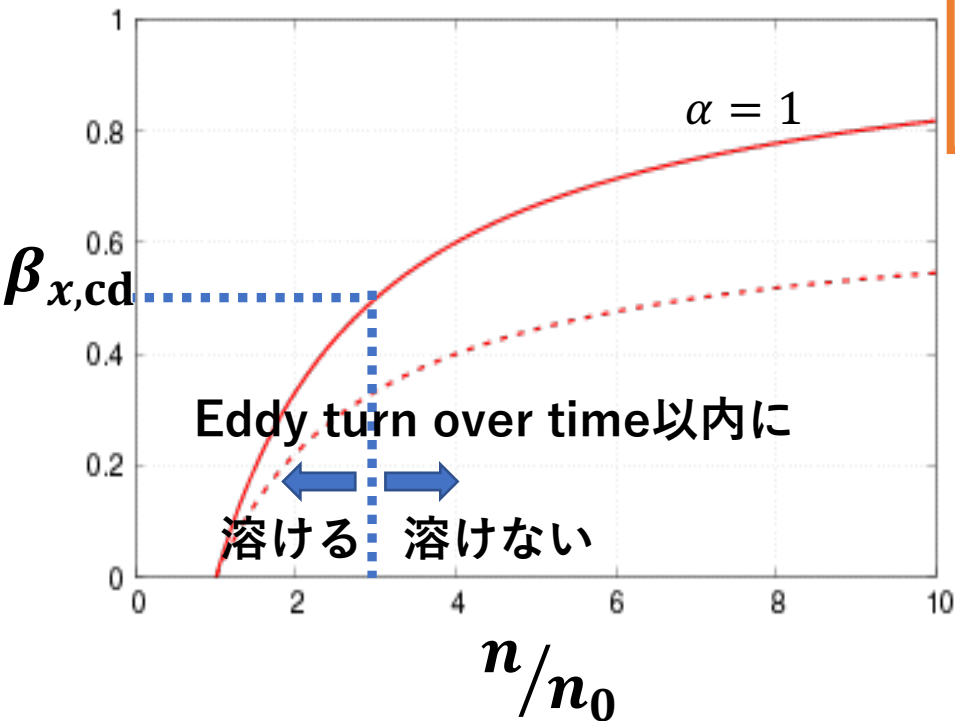
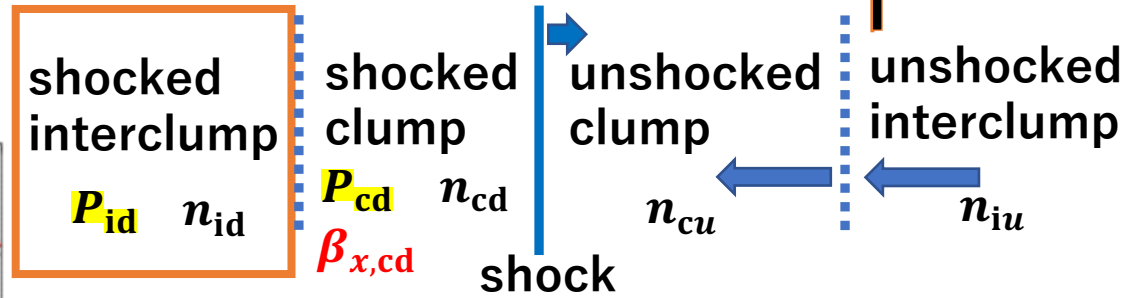


粒子拡散が抑えられ、  
乱流ダイナモが駆動したため、  
磁場増幅が見られた！

# Clumpが維持されるために 必要な密度揺らぎの振幅



静止系



$P_{id} = P_{cd}$  より、

$$n/n_0 \approx \frac{1 + \beta_{x,cd}}{1 - \beta_{x,cd}}$$

“Shocked clumpの速度” >  
“磁力線方向へ拡散する粒子の平均速度”より、

$$\beta_{x,cd} > \langle \beta_{th,\parallel} \rangle \approx 0.5c$$

$$\Rightarrow n/n_0 \gtrsim 3$$

$\beta_{x,cd}$ : 衝撃波通過後の  
clump 領域の速度

# まとめ

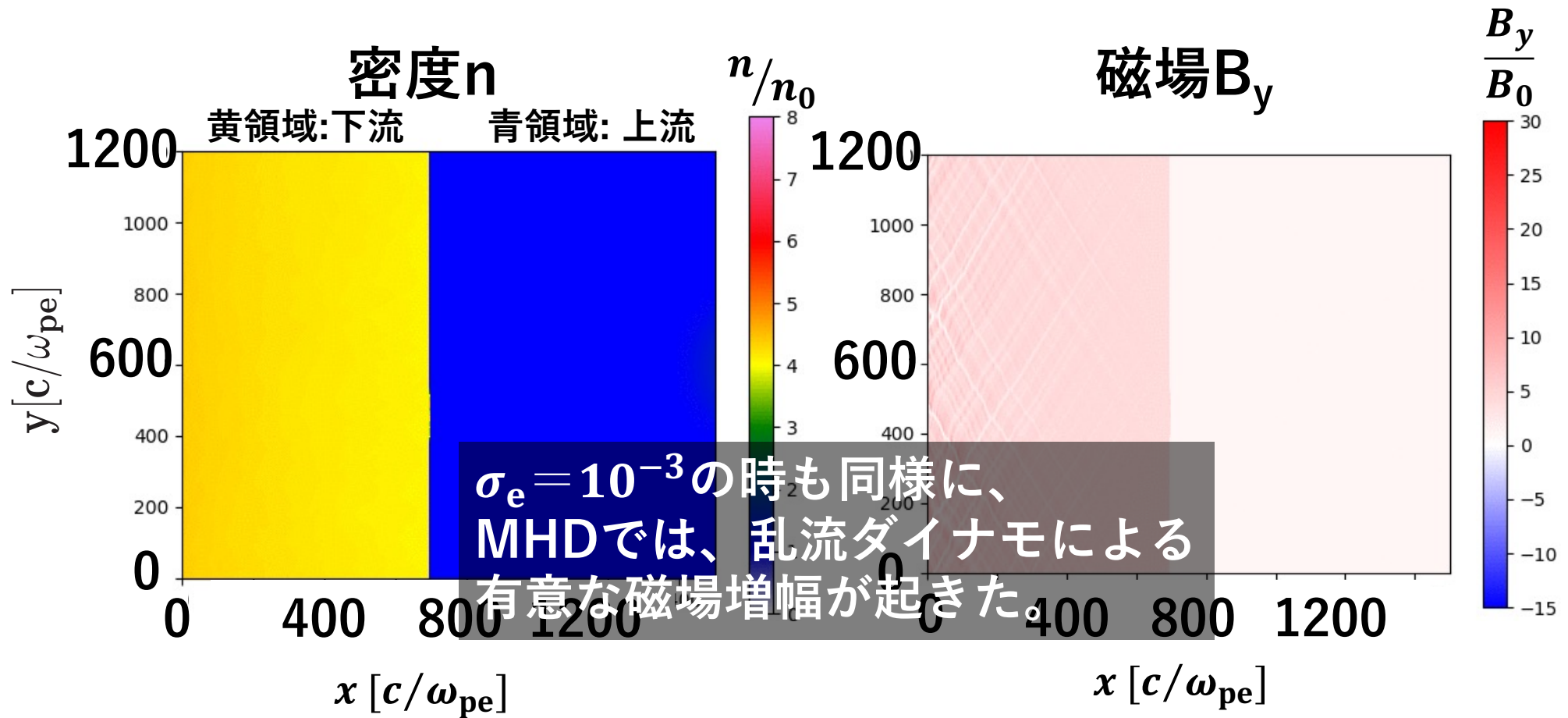
非一様な媒質中を伝播する無衝突衝撃波のPICシミュレーション：

✓ clump サイズがジャイロ半径よりも大きい場合でも、  
 $n/n_0 \leq 1$ 程度の密度揺らぎでは、  
効率的な乱流ダイナモによる磁場増幅は起きない。

✓ GRB親星の周辺(星間空間/星周空間)には、  
もっと高密度な密度揺らぎが必要？。

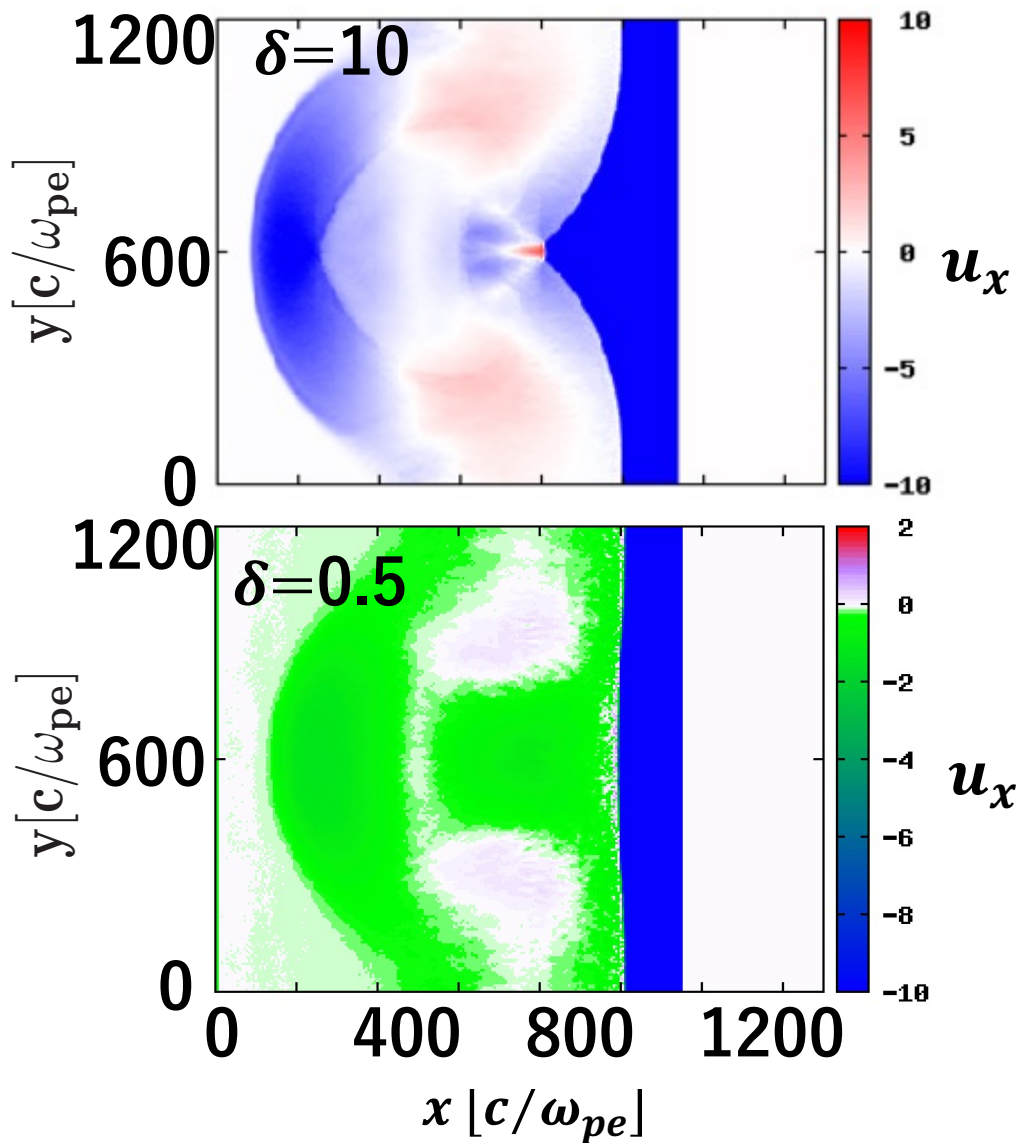
現在、広いパラメータ領域や電子イオン系についても調べ、  
乱流ダイナモによって増幅される磁場や、  
粒子のエネルギースペクトルへの影響について解析中。

結果: MHD ( $\sigma_e = 10^{-5}$ , 振幅  $\delta = 0.5$ )



# 結果:振幅依存性

# 速度( $u_x$ )空間分布



Clump周辺の速度 $>0.3$

衝撃波がclumpを通過後、  
 $y = 600$ での衝撃波面近傍で、  
上流に向かう $u_x \sim +10$ の  
plasma jetが見られる！  
→ Jet in jet ?!  
Blazerの短時間変動の起源かも？

# 乱流ダイナモによる磁場増幅で必要な 密度揺らぎのサイズとジャイロ半径の比

乱流ダイナモが働く条件 “Eddy Turn Over Time  $\leq$  衝撃波の減速時間” から、  
上流の密度揺らぎのサイズが決まる。

\*パラメータ値はガンマ線バーストの場合

相対論の場合： $t_{\text{dec}} \approx 10^3 \text{ sec } E_{\text{iso},53} v_{\text{WR},8.3} \dot{M}_{\text{WR},-5}^{-1} \Gamma_{\text{sh},2}^{-3}, (n_1 \propto r^{-2}),$

$$\approx 10^4 \text{ sec } \left( \frac{E_{\text{iso},53}}{n_{\text{ISM},0}} \right)^{\frac{1}{3}} \Gamma_{\text{sh},2}^{-\frac{5}{3}}, \quad (n_1 \approx \text{const.}).$$

$$t_{\text{eddy}} \approx \frac{\lambda}{c} \leq t_{\text{dec}} \text{ より、 } \lambda \lesssim 10^{14} \left( \frac{E_{\text{iso},53}}{n_{\text{ISM},0}} \right)^{1/3} \Gamma_{\text{sh},2}^{-5/3} \text{ cm} \approx 10^7 \frac{c}{\omega_{\text{pi}}}. \quad (\text{In 下流静止系})$$

\*Wolf-Riet windの分光観測や理論と矛盾しない。

上流磁場が $3 \mu\text{G}$ ならば、下流熱的陽子のジャイロ半径： $r_{\text{gi}} \approx 10^4 \left( \frac{\sigma}{10^{-9}} \right)^{-1/2} c / \omega_{\text{pi}}.$

したがって、Clumpサイズ $\lambda = 10^5 - 10^6 \frac{c}{\omega_{\text{pi}}}$ とすると、

**密度揺らぎサイズとジャイロ半径サイズの比は、 $\frac{\lambda}{r_{\text{gi}}} \approx 10-100.$**  (In 下流静止系)