

Preliminary

非熱的粒子を考慮した磁気流体シミュレーション

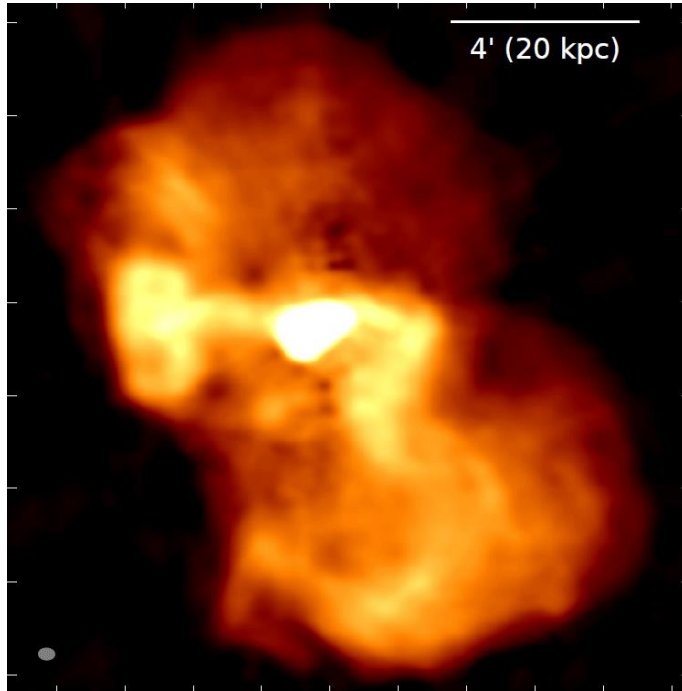
MHD simulations of head-tail
galaxy with cosmic-ray electrons

大村 匠 (ICRR)

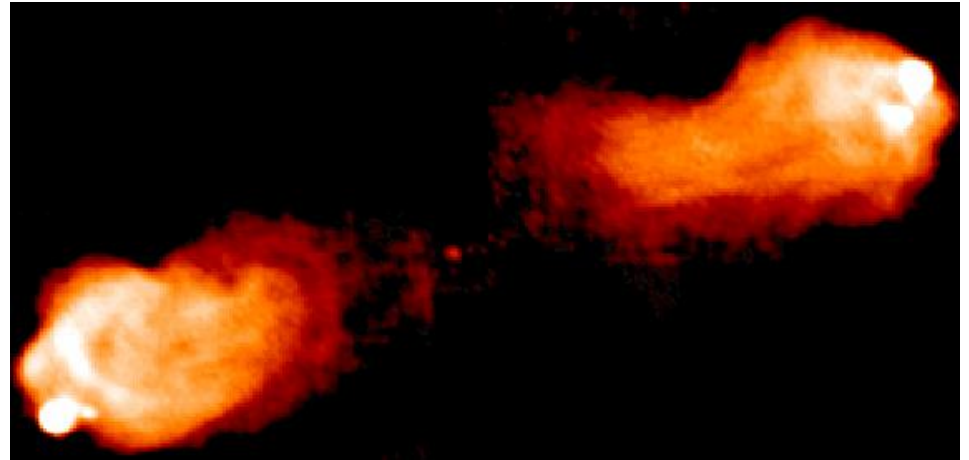
高エネルギー現象で探る宇宙の多様性I, 2021年10月18-19日

1. 導入 – Radio Galaxy (AGN jets)

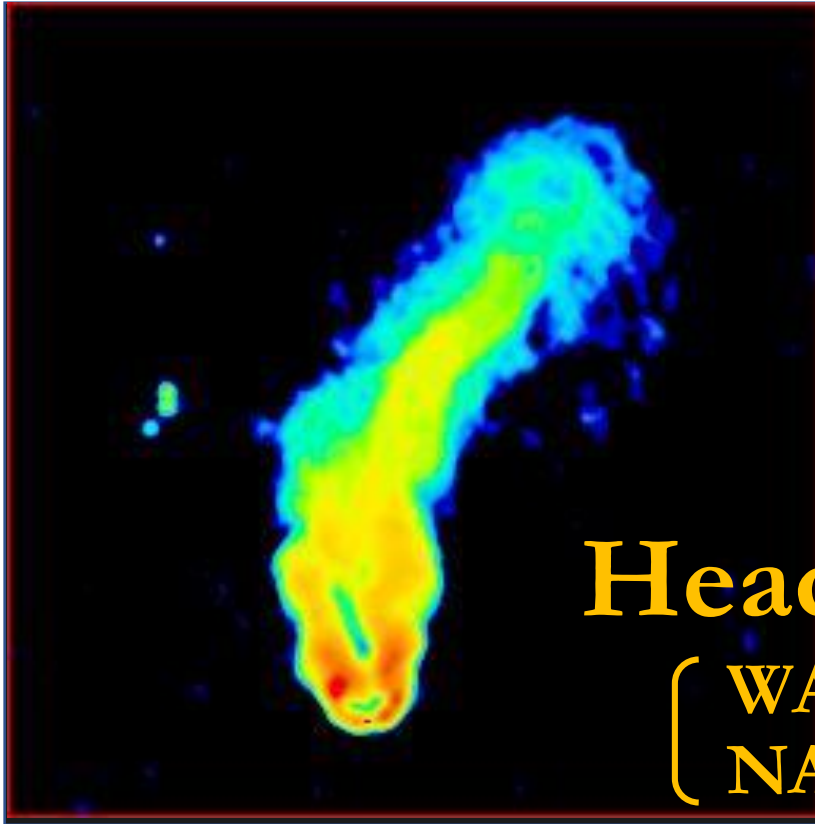
FR I radio galaxy (M87)



FR II radio galaxy (Cygnus A)



1. 導入 – Radio Galaxy (AGN jets)



FR II radio galaxy (Cygnus A)



Head-tail Radio Galaxy

[WAT: Wide-angle tailed galaxy
NAT: Narrow-angle tailed galaxy]

- ・ フィードバック機構 (長峯さんトーク)
- ⇒ ジェットのエネルギー, 活動年齢, プラズマ組成 ???
- ・ 銀河団への宇宙線の供給源 (西脇くんトーク)
- ⇒ 宇宙線の注入率, 加速機構 ???

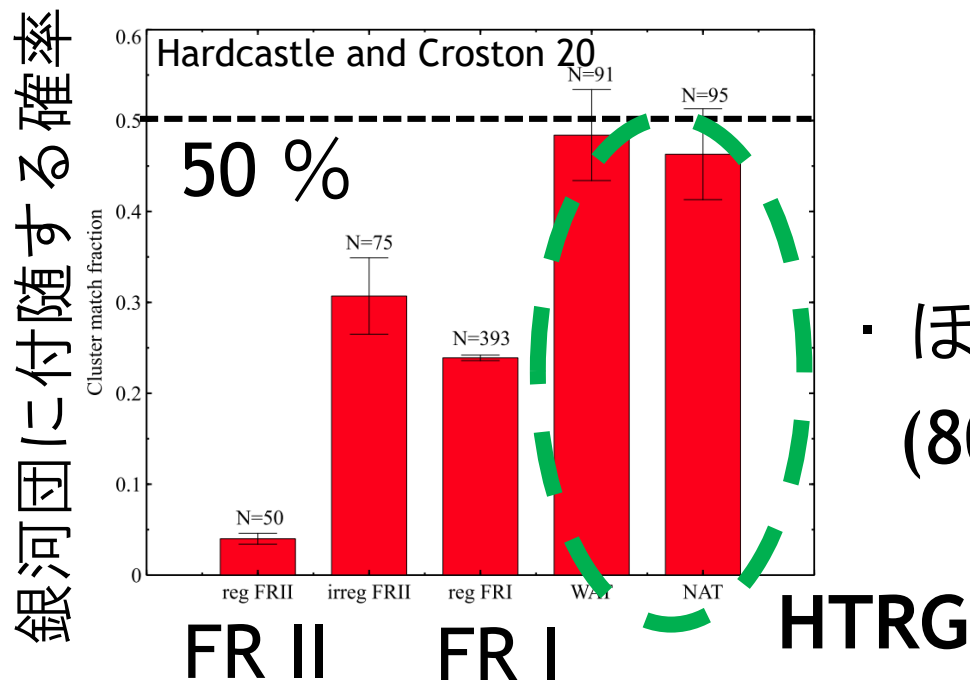
1. 導入 – Head-tail Radio Galaxy

Head-tail radio Galaxy (HTRG)

- ・ 銀河団ガスからのラム圧
[e.g., Begelman and Rees 79]
- ・ 磁場との相互作用
[Chibueze, Sakemi, TO+ 21]

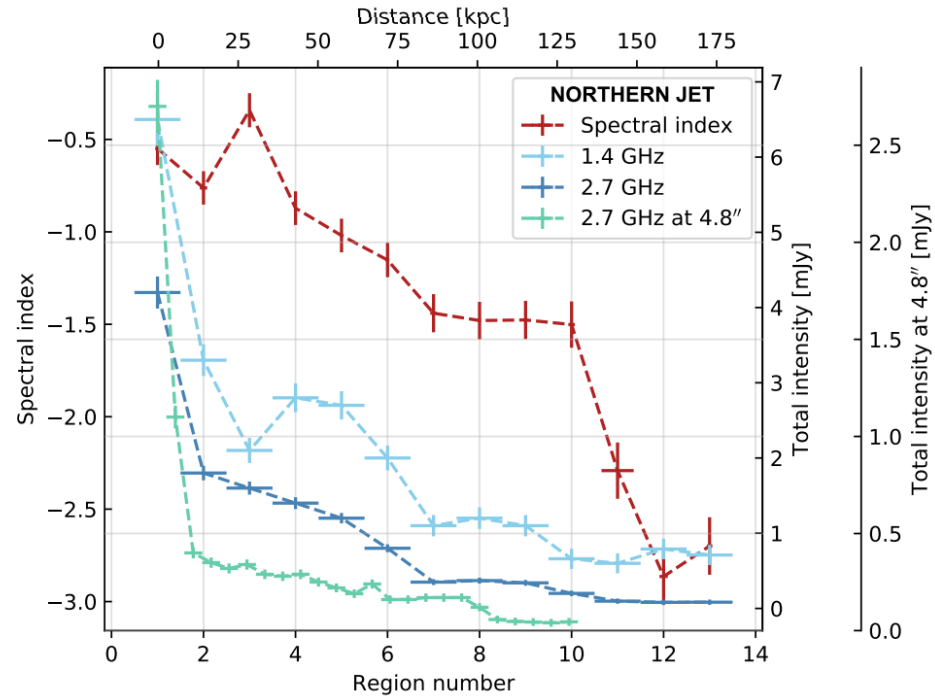
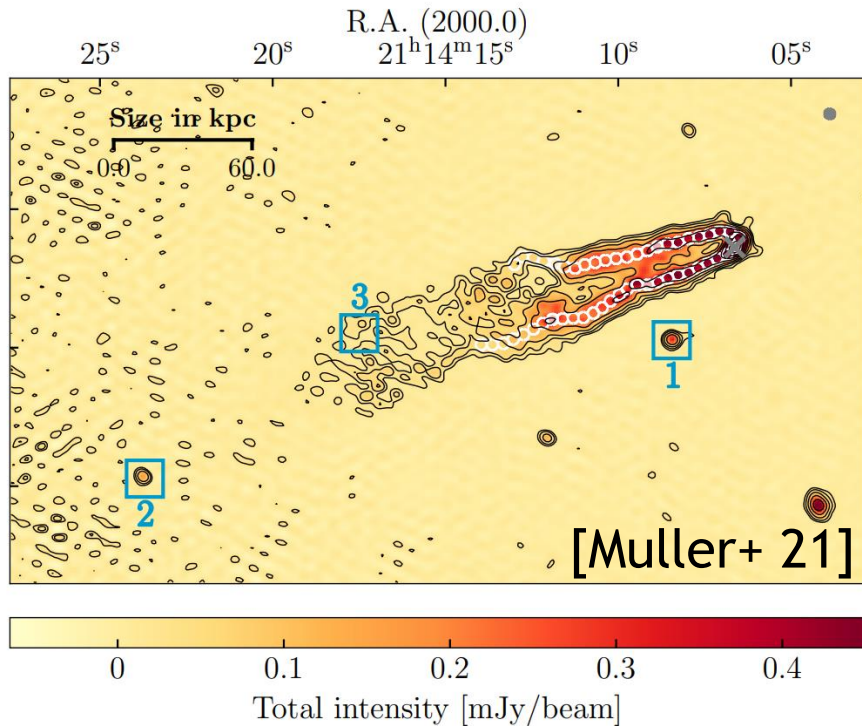
NGC 1265

(ペルセウス銀河団)



- ・ ほとんどが銀河団に付随
(80%以上? [Pal and Kumari 21])

1. 導入 – Radio Feature



- 放射強度 ↘ / 偏波放射 ↗ with distance
- スペクトル指数 . . . プラトーが存在 ↘

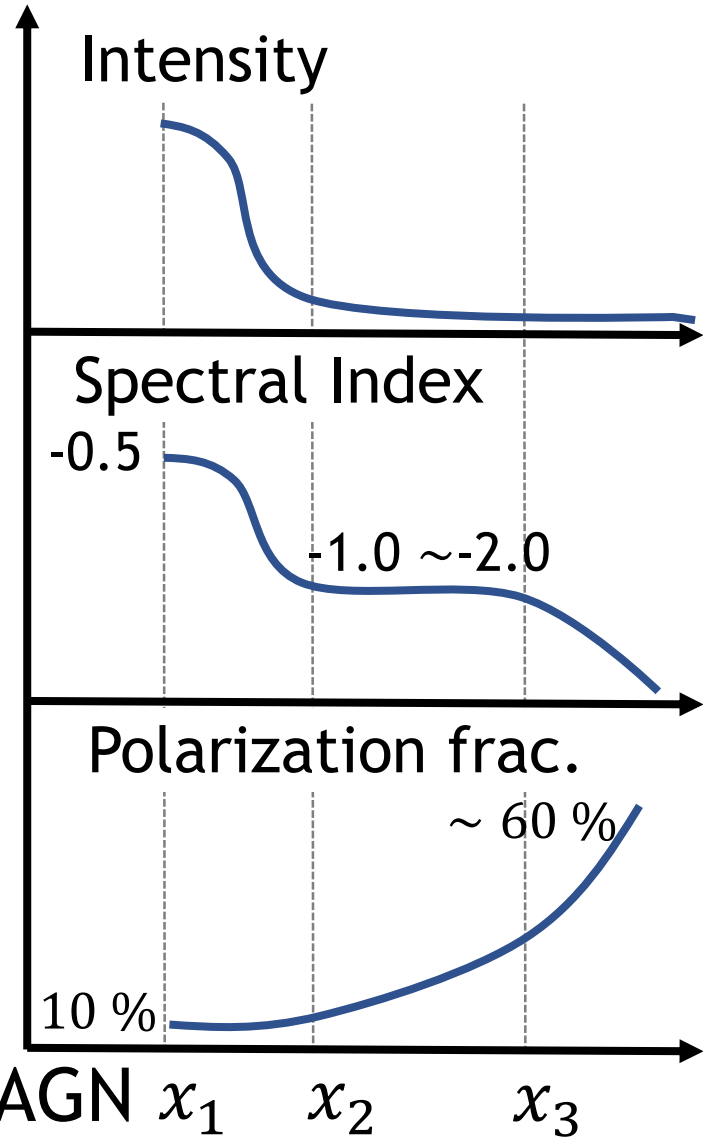
磁場 (equitation) : $\sim \mu\text{G}$

活動期間(冷却時間) : 10 – 100 Myr

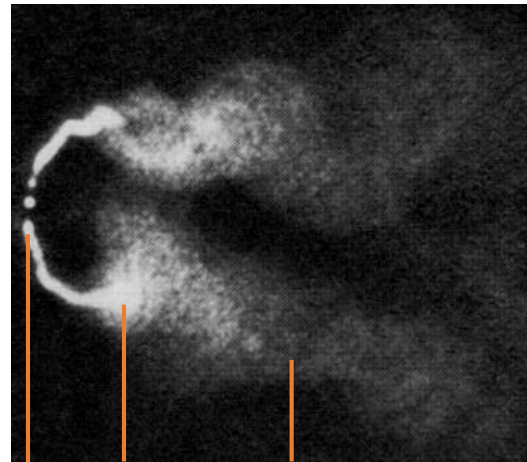
1. 導入 – Spectral Model [Pacholczyk and Scott 1976]

ワンゾーンモデル

$$\frac{\partial N_e}{\partial x} = \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial p} [(\dot{p}_{\text{cool}} + \dot{p}_{\text{reacc}}) N_e], \quad v = \text{const.}$$



$x_1 < x < x_2$	断熱膨張 + 放射冷却
$x_2 < x < x_3$	放射冷却 + 乱流再加速
$x_3 < x$	放射冷却 (乱流が消失)



x_1 x_2 x_3

1. 導入 – Dynamical Model [e.g., Pfrommer and Jones 11]

典型的な折れ曲がり半径 r_{bent}

ジェット流体素片の持つ運動量

$$\rho_{\text{jet}} v_{\text{jet}} \pi r_{\text{jet}}^2 l_{\text{jet}}$$

||

折れ曲がるまでに受ける力積

$$\rho_{\text{ICM}} v_{\text{ICM}}^2 2r_{\text{jet}} l_{\text{jet}} \pi r_{\text{bent}} / (2v_{\text{jet}})$$



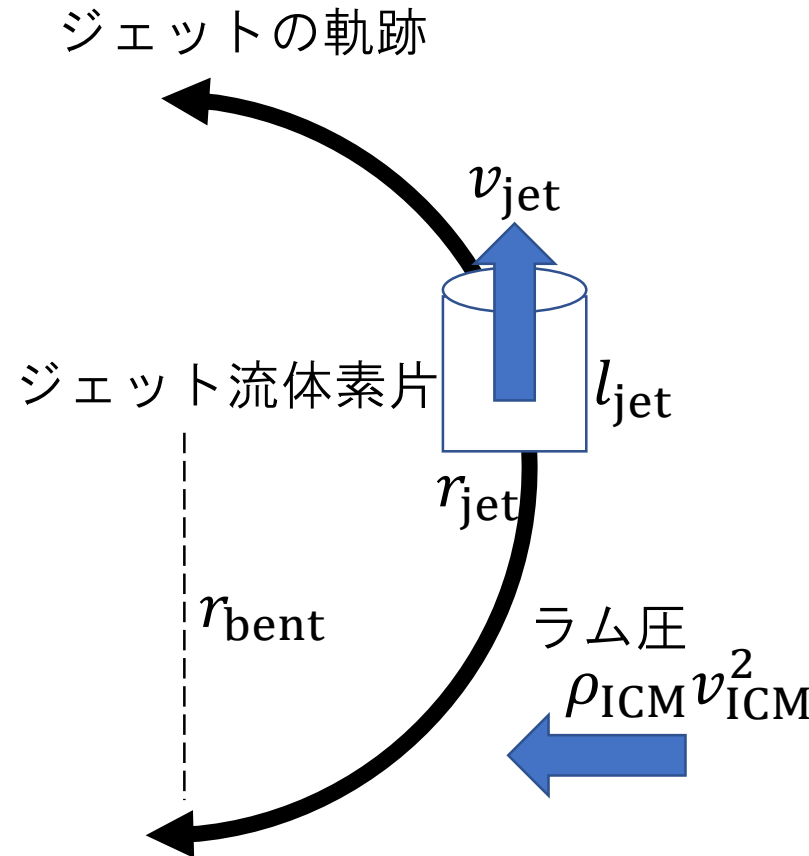
$$\frac{r_{\text{bent}}}{r_{\text{jet}}} = \frac{\rho_{\text{jet}} v_{\text{jet}}^2}{\rho_{\text{ICM}} v_{\text{ICM}}^2}$$

典型的なICM密度

$$\rho_{\text{ICM}} \sim 10^{-3} - 10^{-1} m_p \text{ [g/cc]},$$

ICM速度 (銀河の速度分散 or a few C_{ICM})

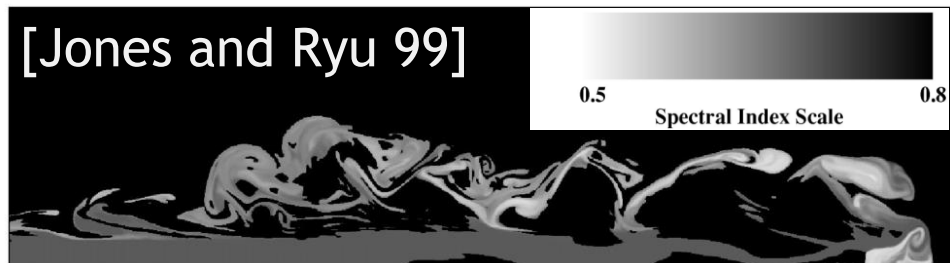
$$v_{\text{ICM}} \sim 700 - 1000 \text{ [km/s]}$$



1. 導入 – CRe MHD Simulation

WAMBAT コード

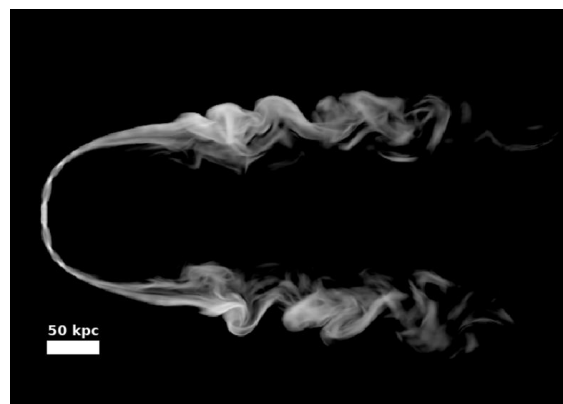
[Jones and Ryu 99]



空白の期間...

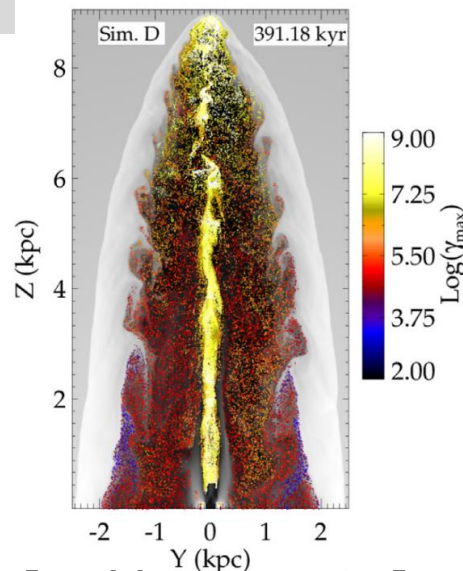
Equipartitionを仮定

WAMBAT コード



[Nolting+ 19]

PLUTO コード



[Mukherjee+ 21]

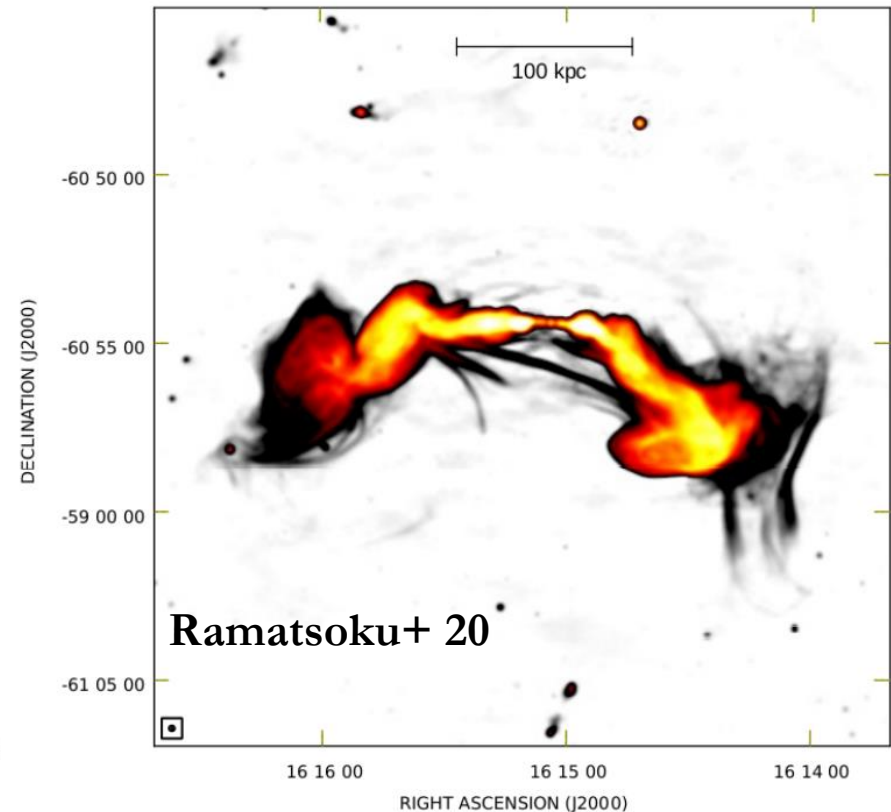
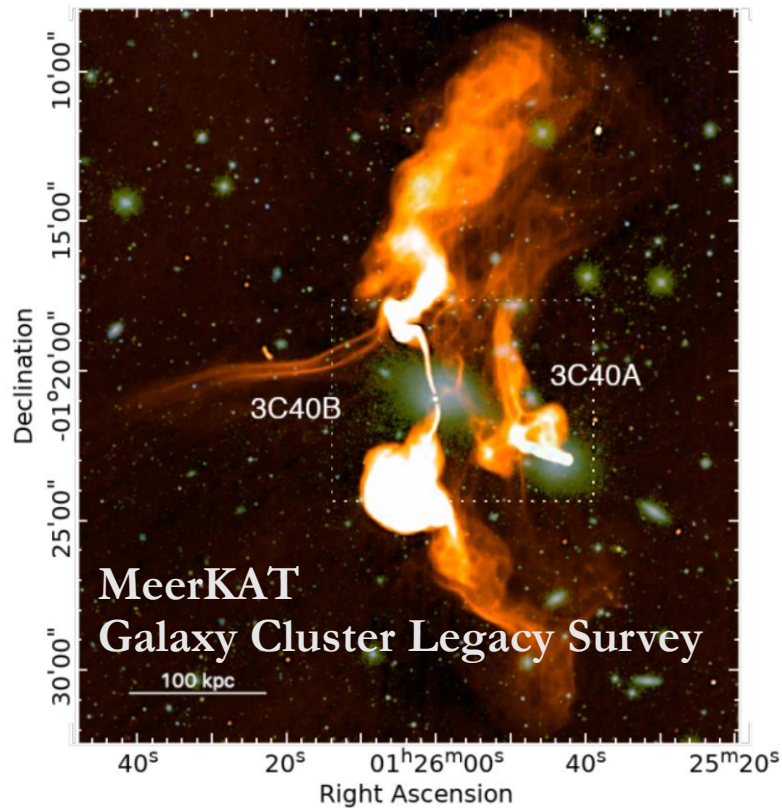
ENZO コード



[Vazza+ 21]

AREPOコードなども実装 (Winner+ 19, see 長峯さんスライド)

1. 導入 – MeerKAT and SKA era



ユニークな電波銀河が続々と見つかる

→ ジェットと大局的な銀河団磁場の接続？

宇宙線輸送過程の解明へのヒント？

1. 導入 – Aim of this study

手法

宇宙線電子進化+MHDシミュレーション

電波観測と数値モデルを直接比較

ゴール

ジェットの活動年齢や速度、乱流によるエネルギー注入率を決定

- ・ワンゾーンモデルとの相違点
- ・等分配の議論がどれほど適切か？

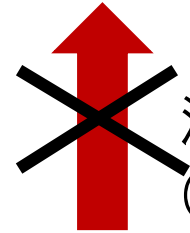
2. 手法 – Basic Equations

理想MHD 方程式

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) = 0, \quad m_i n \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} \right] = -\nabla p_{\text{gas}} - \nabla \left(\frac{B^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}, \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\mathbf{v} \left(E + p_{\text{gas}} + \frac{B^2}{8\pi} \right) - \frac{\mathbf{B}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})}{4\pi} \right] = 0 \end{array} \right.$$



MHD物理量を提供



流体へのフィードバック
(今回は無視, $U_e \ll U_{th}$)

フォッカープランク方程式 (空間3次元 + 運動量空間1次元)

$$\frac{DN_e}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial p} [\dot{p} N_e]}_{\text{輻射冷却 + 断熱過程}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial p} (D_{pp} N_e) + \frac{\partial}{\partial p} \left[-\frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} (p^2 D_{pp}) N_e \right]}_{\text{運動量拡散}} + \underbrace{\nabla \cdot (D_{xx} \nabla N_e)}_{\text{空間拡散}} + \underbrace{Q_{inj}}_{\text{注入}}$$

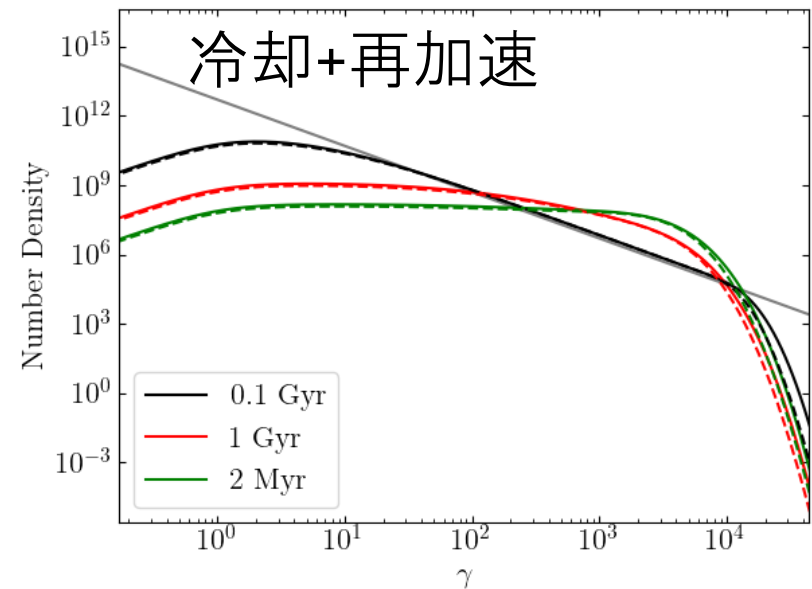
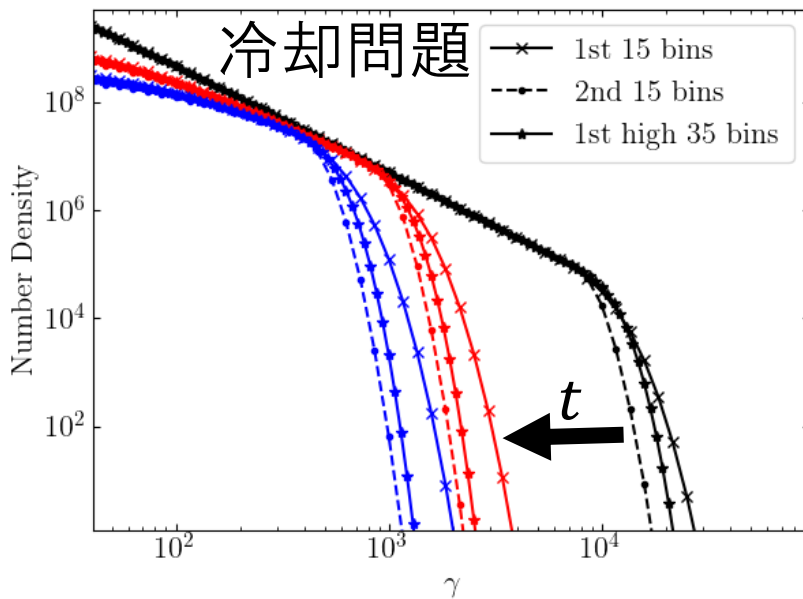
$$N_e = N_e(p, \mathbf{x}, t), \quad \dot{p} = \dot{p}_{\text{rad}} + \dot{p}_{\text{C}} + \dot{p}_{\text{adv}}$$

2. 手法 – Solver and One Zone Test

コード: CANS+ (Matsumoto+ 19) HLLD + MP5

フォッカープランク方程式 (オペレータスプリット)

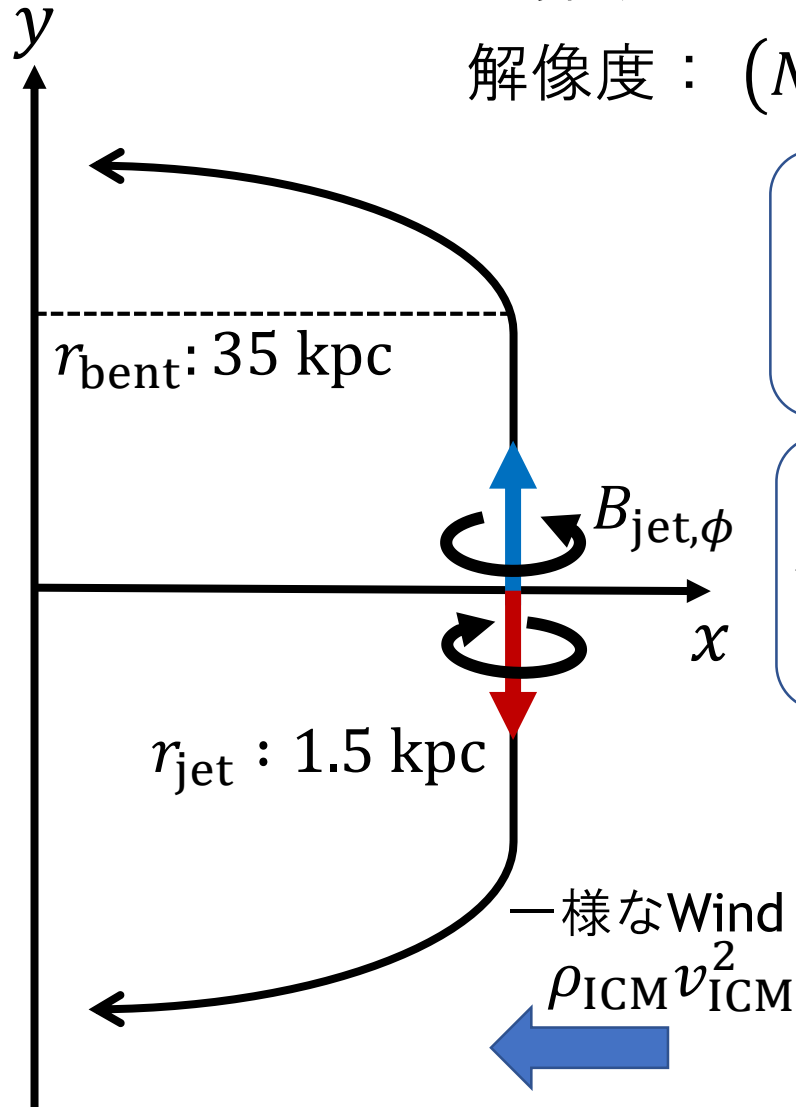
$$\left[\begin{array}{l} \frac{\partial N_e}{\partial t} + \nabla \cdot (v N_e) = 0, \text{ 連続の式} \quad \text{MP5スキーム} \\ \frac{\partial N_e}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial p} [\dot{p} N_e]}_{\text{2次精度TVDスキーム}} - \frac{\partial}{\partial p} (D_{pp} N_e) + \underbrace{\frac{\partial}{\partial p} \left[-\frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} (p^2 D_{pp}) N_e \right]}_{\text{中心差分}} \end{array} \right.$$



2. 手法 – Numerical Model

計算領域 : $(-75, 45) \times (-82, 82) \times (-26, 26)$ kpc

解像度 : $(N_x, N_y, N_z) = (640, 880, 280)$



ICM (No B-field)

$$n_{\text{ICM}} = 4 \times 10^{-3} \text{ 1/cc}, T_{\text{ICM}} = 5 \text{ keV}$$

$$v_{\text{ICM}} = 400 \text{ km/s}$$

Jet (Pure-toroidal B-field)

$$n_{\text{jet}} = 0.001 n_{\text{ICM}}, v_{\text{jet}} = 0.12c = 2M_{\text{jet}}$$

$$B_{\text{jet},\phi} = 4 \mu\text{G}, \quad p_{\text{jet}} = p_{\text{ICM}}$$

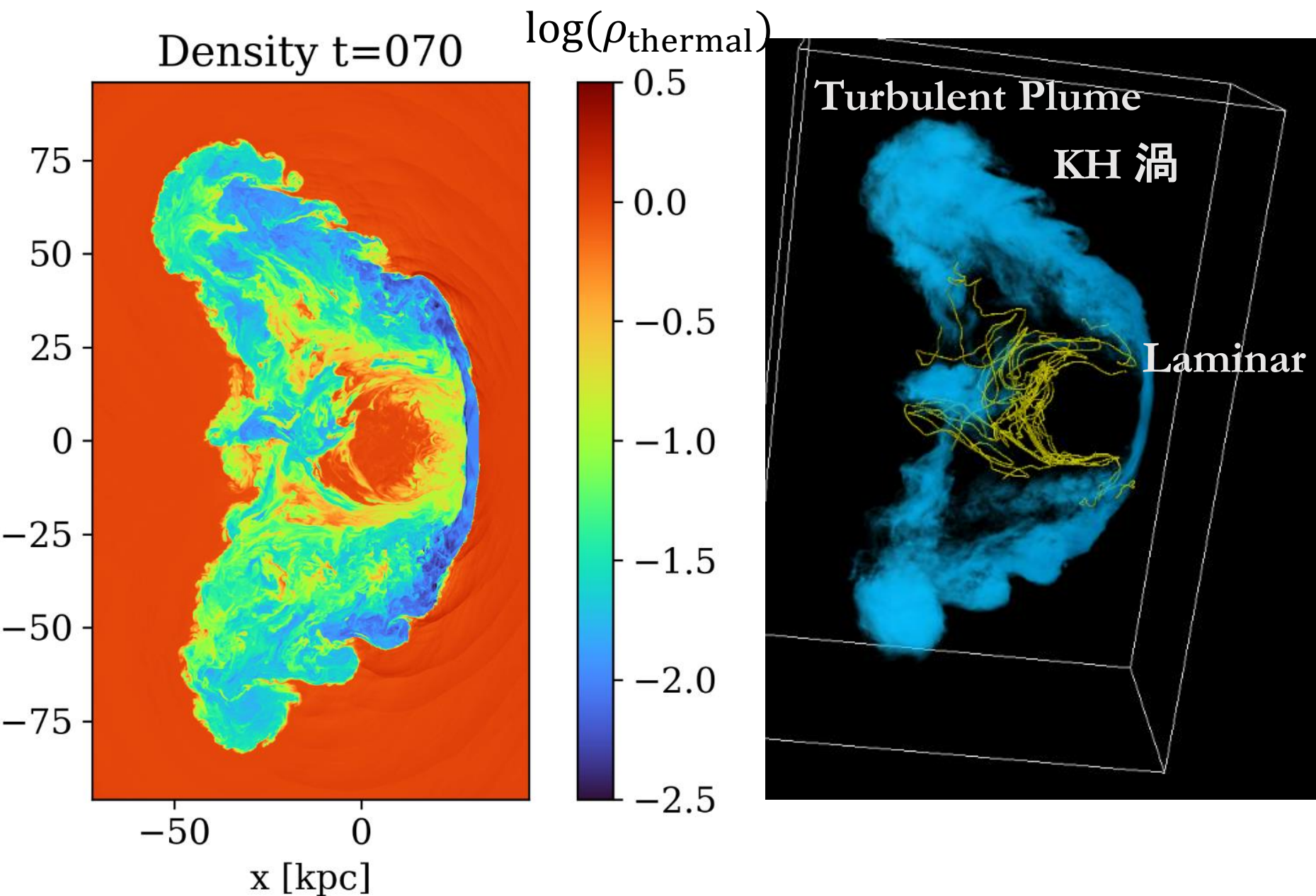
宇宙線電子注入

$$Q_{inj} \propto N_0 \gamma^{-2.1} (\gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max})$$

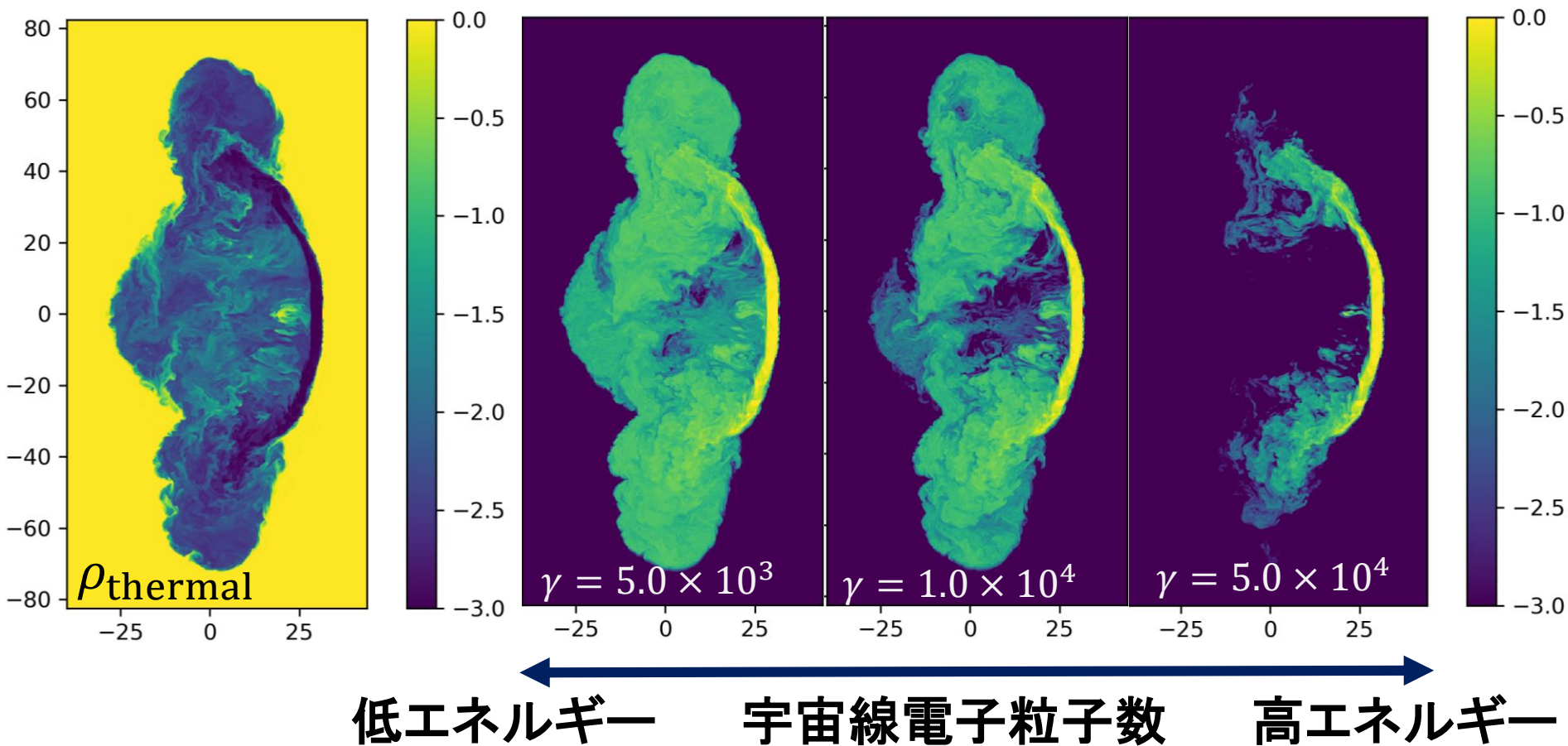
$$\gamma_{\min} = 50, \gamma_{\max} = 5 \times 10^6$$

1桁あたり 15 bin (12*5 = 60 bin)

3. 結果 – Dynamics



3. 結果 – CRe Dynamics

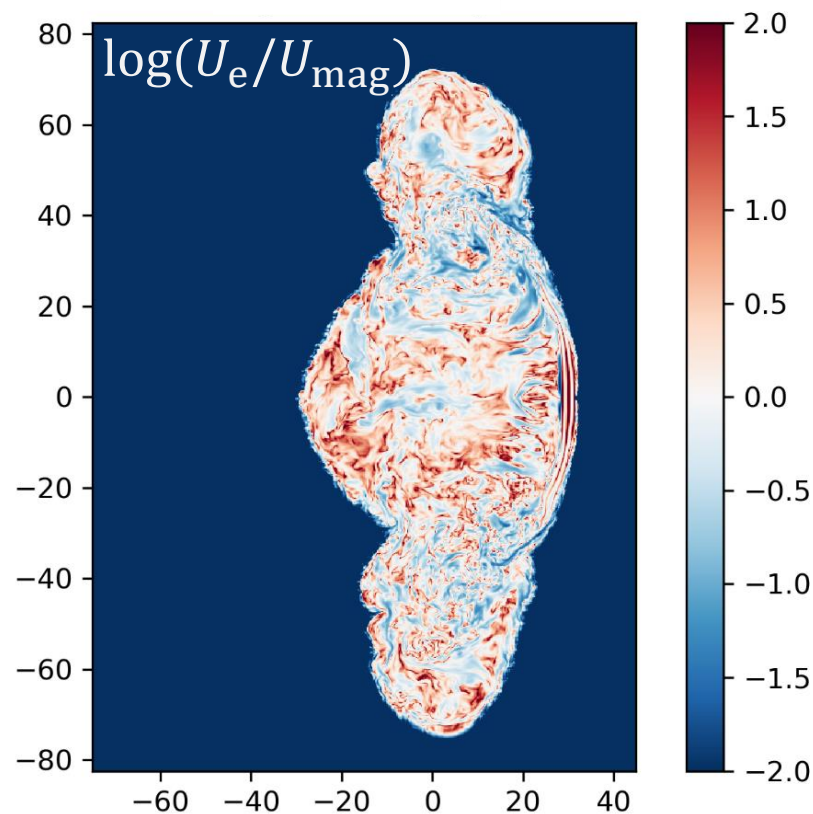
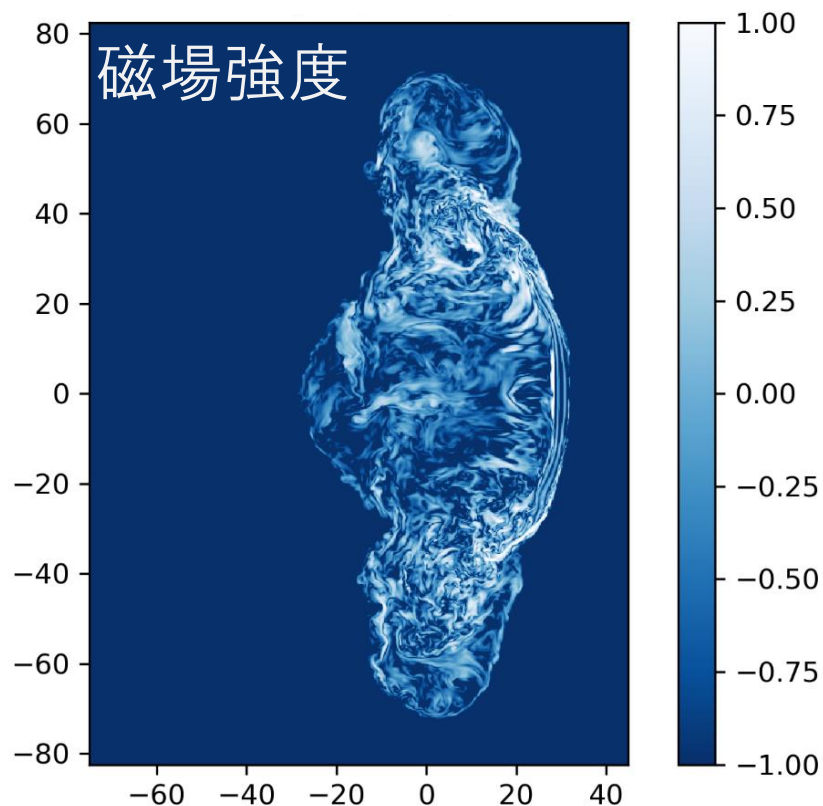


3. 結果 – Energy partition

宇宙線電子エネルギー $U_e = \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \gamma N m_e c^2 d\gamma$

(注入領域で $U_e = U_{\text{mag}}$ と規格化)

- ・磁場エネルギーと宇宙線電子はローカルには反相関
- ・磁場が強いところでは，宇宙線電子エネルギーは低い



4. まとめ

フォッカー-プランク方程式を3次元MHDシミュレーションと組み合わせて解くことに成功

Head-tail Galaxyのシミュレーションに適用

磁場分布と宇宙線エネルギー電子分布は、ローカルには反相関.

伝統的なEquipartitionの議論では、宇宙線密度を正しく扱えない

今後の展望

乱流エネルギーの一部を宇宙線の再加速に分配

シミュレーションデータのMock電波観測して、実際の観測特性やワンゾーンモデルとの比較