

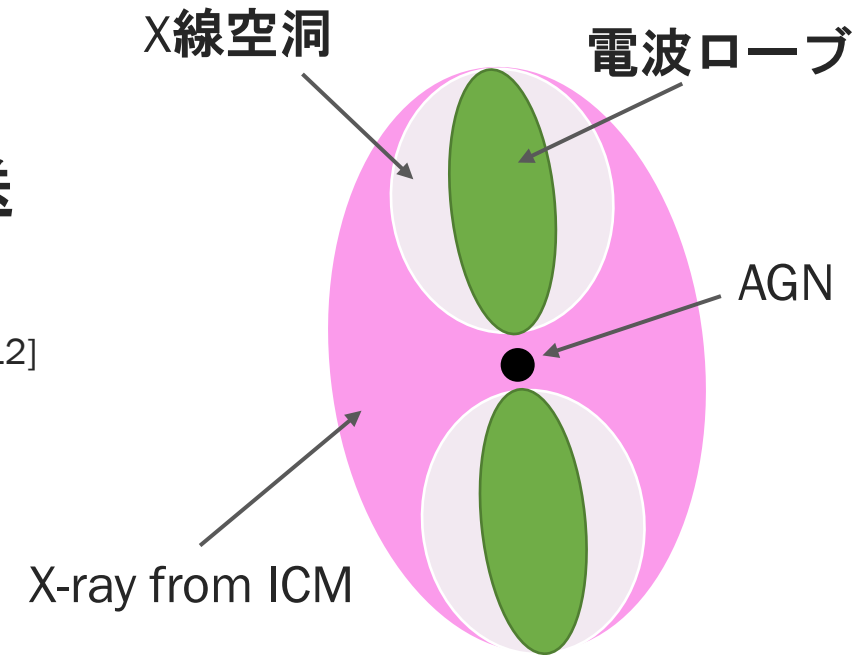
富岳を用いたAGNジェット伝搬の 2温度磁気流体シミュレーション

大村 匠 (東京大学 宇宙線研究所)

町田 真美 (国立天文台), 松本洋介 (千葉大学), 大須賀健 (筑波大学), 松元亮治 (千葉大学)

AGNジェット

- 中心BHの莫大な重力エネルギーを大スケールへと輸送
周辺物質の加熱・質量降着の抑制
⇒ Radio-mode AGNフィードバック機構 [McNarama & Nulsen 2012]
- フィードバック機構のより詳細な理解には、まず
ジェットのエネルギーや活動史を知る必要がある
- 最高エネルギー宇宙線の生成起源？

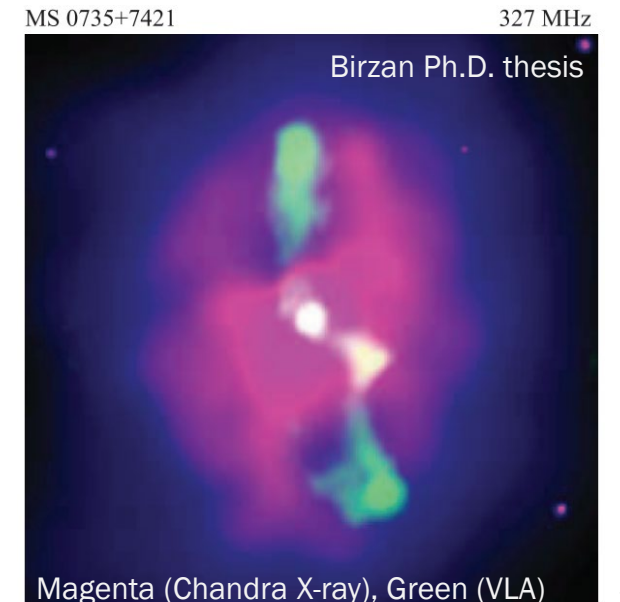


ジェット基本構造 (kpcスケール)

電波ローブとX線空洞 = コクーン (ジェットに付随するガス)
ジェットにより輸送された高エネルギーなプラズマによって形成された巨大なエネルギー貯蔵庫



ジェットの組成, 粒子・磁場エネルギーを知る手がかり



2温度プラズマ

■ 電子と陽子の(クーロン衝突による)エネルギー緩和時間

$$t_{ei} = 2.0 \times 10^8 \text{ yr} \left(\frac{n_i}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T_e}{10^8 \text{ K}} \right)^{3/2} > 10^{10} \text{ yr} \text{ (活動年齢を超える)}$$

$$\text{ジェット} : n_i < 10^{-3}, T_e > 10^9 \text{ K}$$

一度乖離した電子と陽子の温度は、一致しない！！

2温度プラズマ

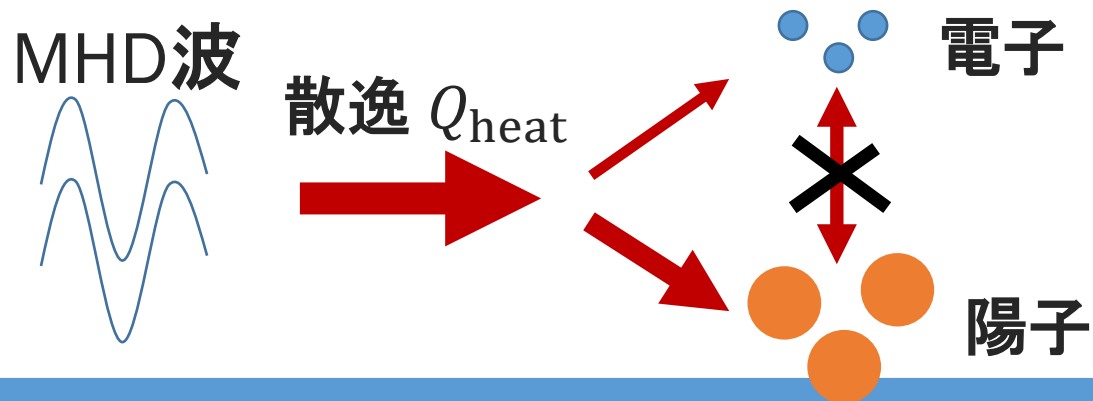
■ 電子と陽子の(クーロン衝突による)エネルギー緩和時間

$$t_{ei} = 2.0 \times 10^8 \text{ yr} \left(\frac{n_i}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T_e}{10^8 \text{ K}} \right)^{3/2} > 10^{10} \text{ yr} \text{ (活動年齢を超える)}$$

$$\text{ジェット: } n_i < 10^{-3}, T_e > 10^9 \text{ K}$$

一度乖離した電子と陽子の温度は、一致しない！！

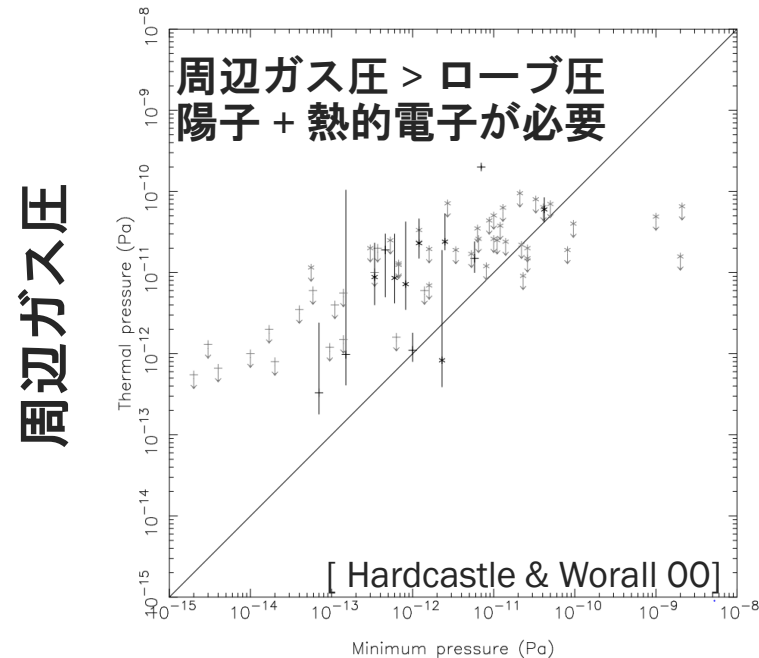
散逸過程(ミクロなプラズマ物理)においての、
電子と陽子のエネルギー交換(分配)によって温度進化が決定づけられる。



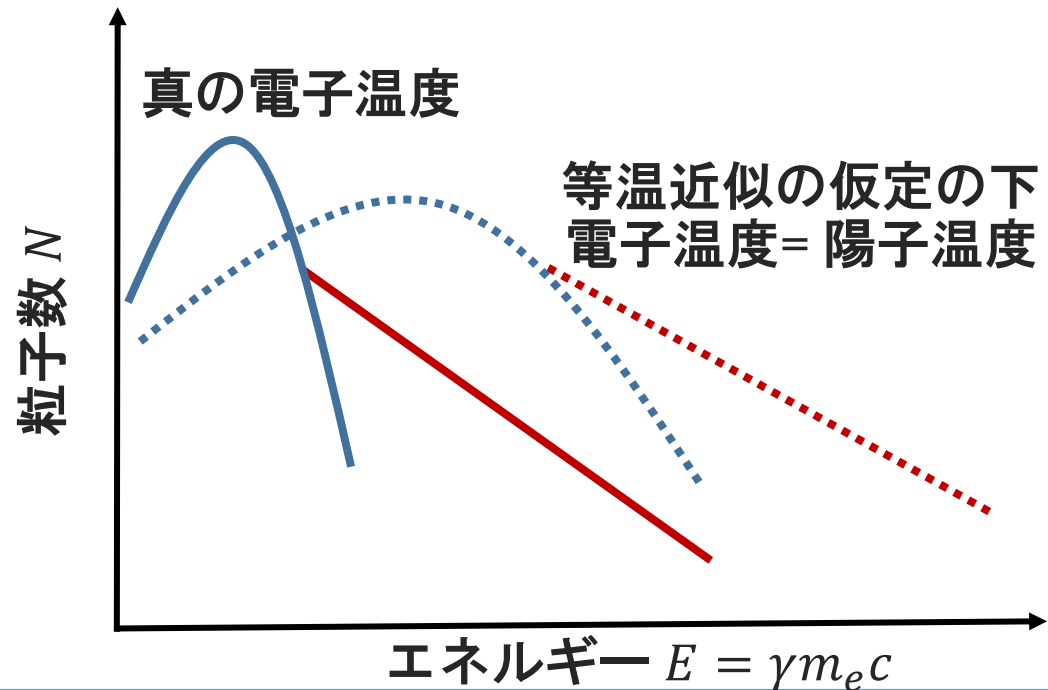
2温度プラズマの重要性

- 加速理論 . . . 熱浴となる熱的電子の一部が高エネルギーまで加速
⇒ 加速粒子の総エネルギー(電波放射強度)も大きく影響する
- “観測できない” 陽子のローブ圧力に対する寄与
⇒ 観測・理論モデル共に熱粒子の存在を示唆 [Hardcastle & Worall 00, Ito+ 08]

より定量的な議論には、電子と陽子それぞれの熱進化を解く必要がある



ローブ圧力 (ローブの相対論電子のみ)



ジェットエネルギー同定手法

■ $P_{\text{cav}} - L_{\text{radio}}$ 関係 [Birzan 2004, 2008]

P_{cav} : X線空洞を維持・形成に必要なエネルギー
 $\Rightarrow P_{\text{cav}} = 4pVt_{\text{age}}^{-1} \Rightarrow$ 力学的エネルギーの下限値

L_{radio} : 電波ローブからの
 シンクロトロン放射エネルギー

$$\Rightarrow P_{\text{cav}} \sim (1 - 1000)L_{\text{radio}}$$

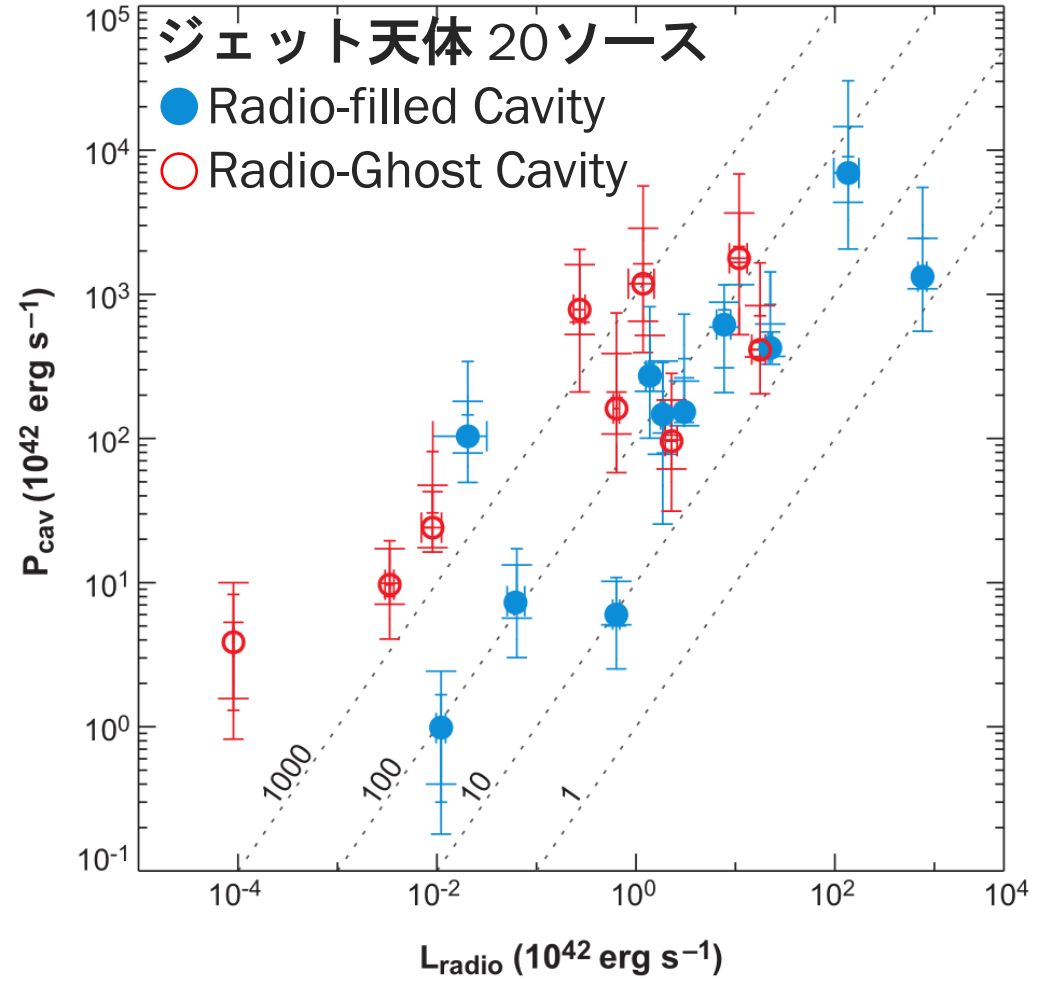
大きなバラツキ

要因：陽子と電子のエネルギー比

年齢の見積もり，

相対論電子の放射冷却 etc....

陽子・電子を含む力学的エネルギー



電波輝度(非熱的電子×磁場エネルギー)

目的

プラズマの2温度性に着目した3次元MHDジェットを実施し、
ジェット-銀河団間ガスの相互作用問題におけるエネルギー収支を定量的
に理解する。

特に、 $P_{\text{cav}} - L_{\text{radio}}$ 関係における2温度プラズマの寄与を調査する。

数値シミュレーションの必要性

■ MHD不安定性 vs HD不安定性

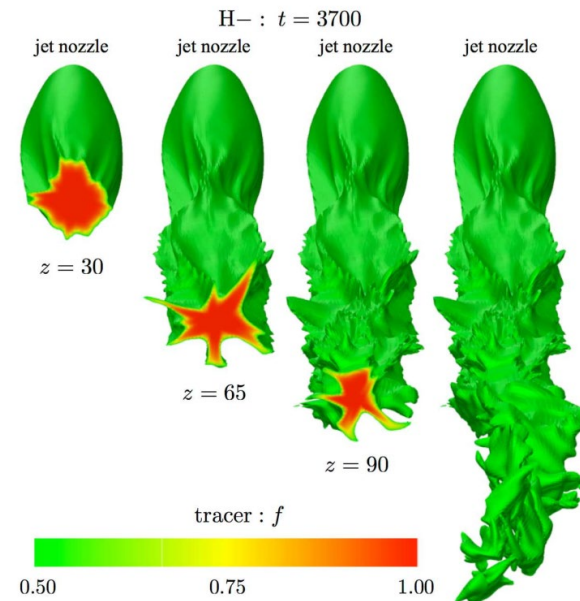
電流駆動型キック不安定性

[e.g., Nakamura & Meier 04, Mizuno+ 11, Tchekhovskoy 16]

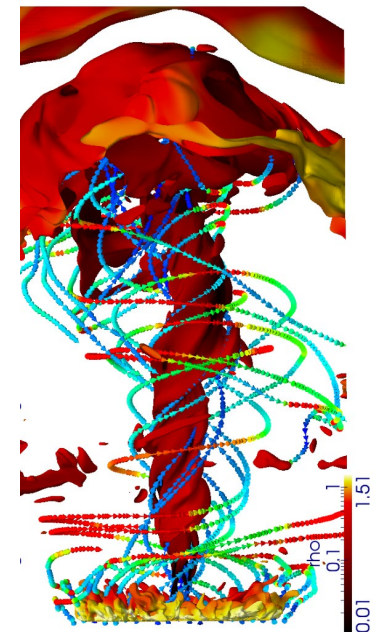
ケルビンヘルムホルツ不安定・レイリーテイラー不安定

[e.g., Bodo+ 94, Mastumoto & Masada 13, Toma+ 17]

磁場は、ジェットの運動や電波放射強度、電子加熱
に影響する重要な物理量



[Matsumoto & Masada 2019]



[Porth 2013]

MHD方程式

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

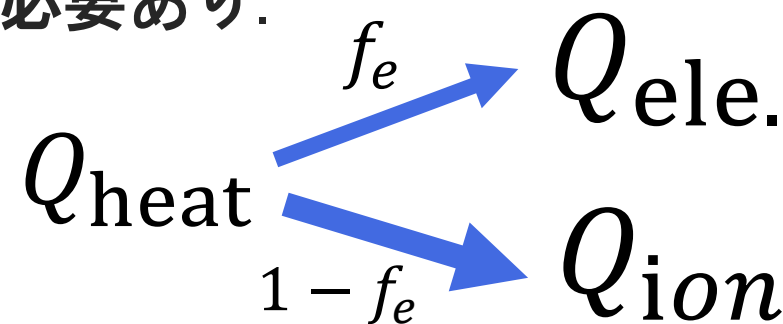
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\mathbf{v} \left(E + p_{\text{gas}} + \frac{B^2}{8\pi} \right) - \frac{\mathbf{B}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})}{4\pi} \right] = -q_{\text{rad}}$$

$n, m_i, \mathbf{v}, \mathbf{B}, p_{\text{gas}}, E, q_{\text{rad}}$: 数密度, 陽子質量, 流速, 磁場, ガス圧, 全エネルギー, 輻射冷却

単一温度(熱平衡)プラズマ ($p_i = p_e$) → 二温度(非熱平衡)プラズマ ($p_i \neq p_e$)

電子と陽子それぞれの熱進化(Thermodynamics)を解く必要あり.

$$p_{\text{gas}} = p_i + p_e, \quad E = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{p_i}{\gamma_i - 1} + \frac{p_e}{\gamma_e - 1} + \frac{B^2}{8\pi}$$



$$\left[\begin{array}{l} T_e \frac{ds_e}{dt} = f_e Q_{\text{heat}} + q_{ie} - q_{\text{rad}}, \\ T_i \frac{ds_i}{dt} = (1 - f_e) Q_{\text{heat}} - q_{ie}, \end{array} \right.$$

クーロンカップリング : $q_{ie} \propto (T_i - T_e)n^2$

熱制動放射 : $q_{ie} \propto n^2 \sqrt{T_e}$ [Stepney & Guilbert 1983, Dermer+ 1991]

電子加熱モデル

磁気乱流モデル

■ 無衝突MHD乱流中での電子と陽子のエネルギー分配をジャイロ運動論を用いて調査

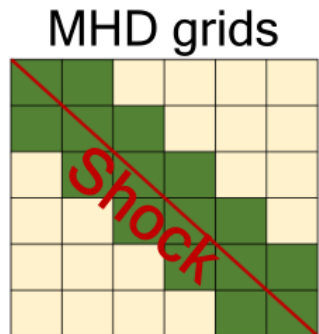
$$f_e|_{\text{turb}} \equiv \frac{Q_e}{Q_e + Q_i} = \frac{1}{1 + Q_i/Q_e}, \quad \frac{Q_i}{Q_e} = \frac{35}{1 + (\beta_i/15)^{-1.5} \exp(-0.1T_e/T_i)} \quad [\text{Kawazura+ 18, 20}]$$

Low β_i (磁気圧 \gg ガス圧) \Rightarrow 電子加熱, High $\beta_i \Rightarrow$ 陽子加熱

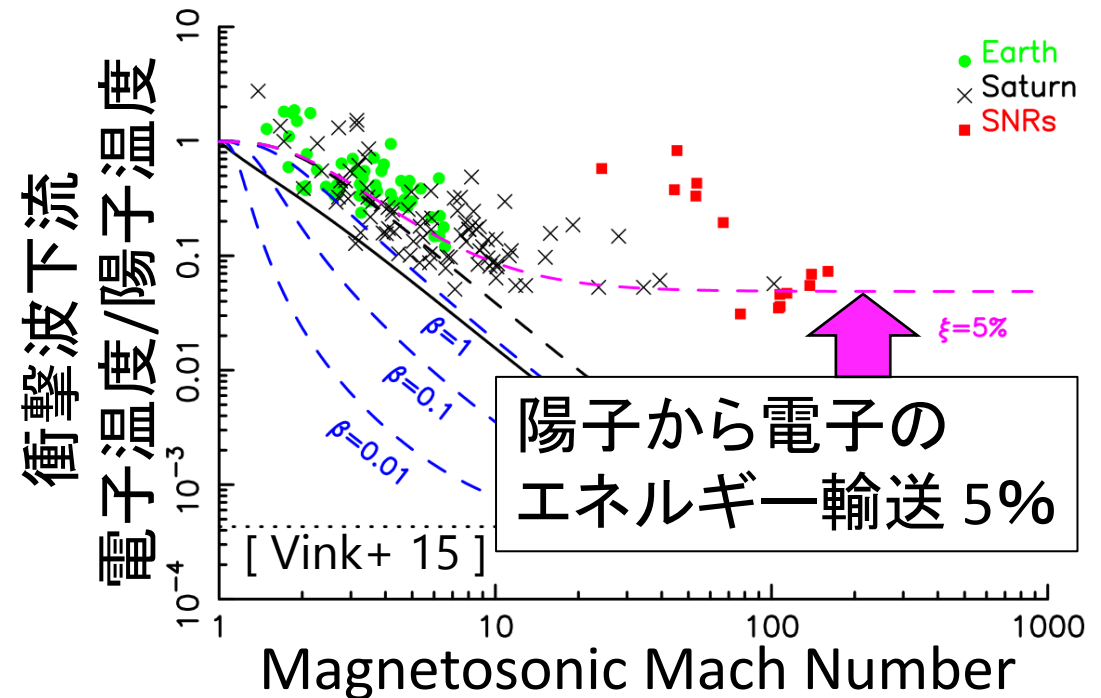
衝撃波モデル

■ 衝撃波で生じた熱エネルギーのうち5%を電子へと分配すると仮定

$$f_e|_{\text{shock}} = 0.05$$



Normal zone
 $f_e = f_e|_{\text{turb}}$
 Shock zone
 $f_e = f_e|_{\text{shock}}$



セットアップ

MHDコード：CANS+ (Matsumoto+ 19)

ICM 密度-温度 プロファイル・・・等温 β -model

$$\rho_{\text{ICM}}(r) = \rho_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-3\beta/2}$$

コア密度	$\rho_0 = 8.35 \times 10^{-26} \text{ g/cm}^3$, $\beta = 0.5$
コア半径	$r_c = 20 \text{ kpc}$, 温度 $T_e = T_i = 5 \text{ keV}$

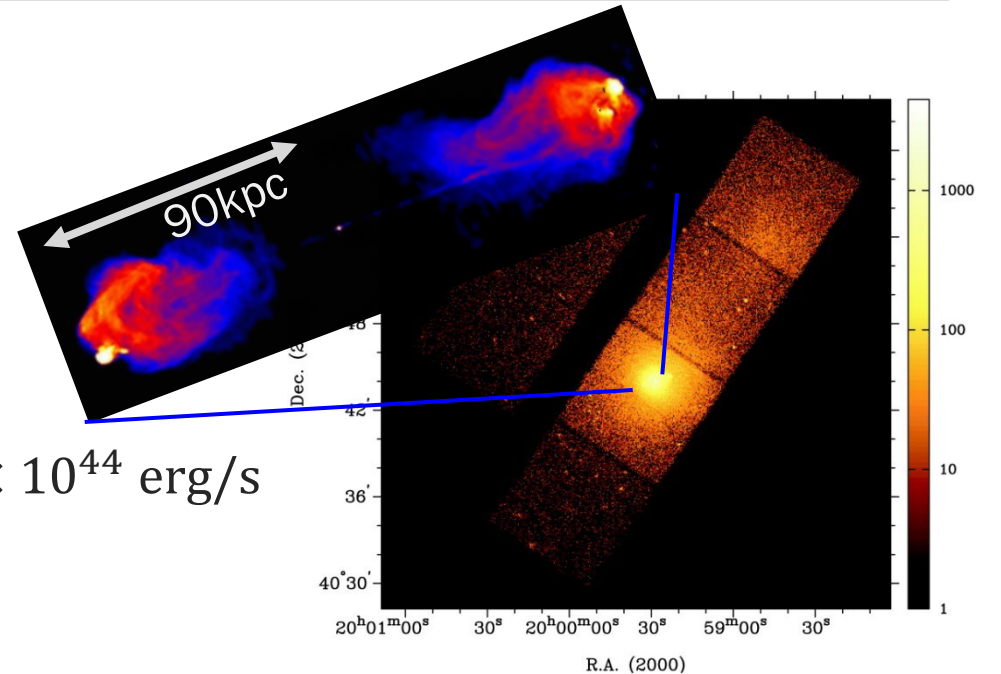
Jets Model

境界条件として超音速プラズマを注入しジェットを生成
 ($x^2 + y^2 < 1 \text{ kpc}$, and $z = 0 \text{ kpc}$)

速度 $v_z = 0.3c$, 温度 $T_e = T_i = 1.0 \times 10^{10} \text{ K}$,
 運動エネルギー $L_{\text{kin}} = 5 \times 10^{45} \text{ erg/s}$, 熱エネルギー $L_{\text{th}} = 4 \times 10^{44} \text{ erg/s}$

Table 5.2: Numerical Models

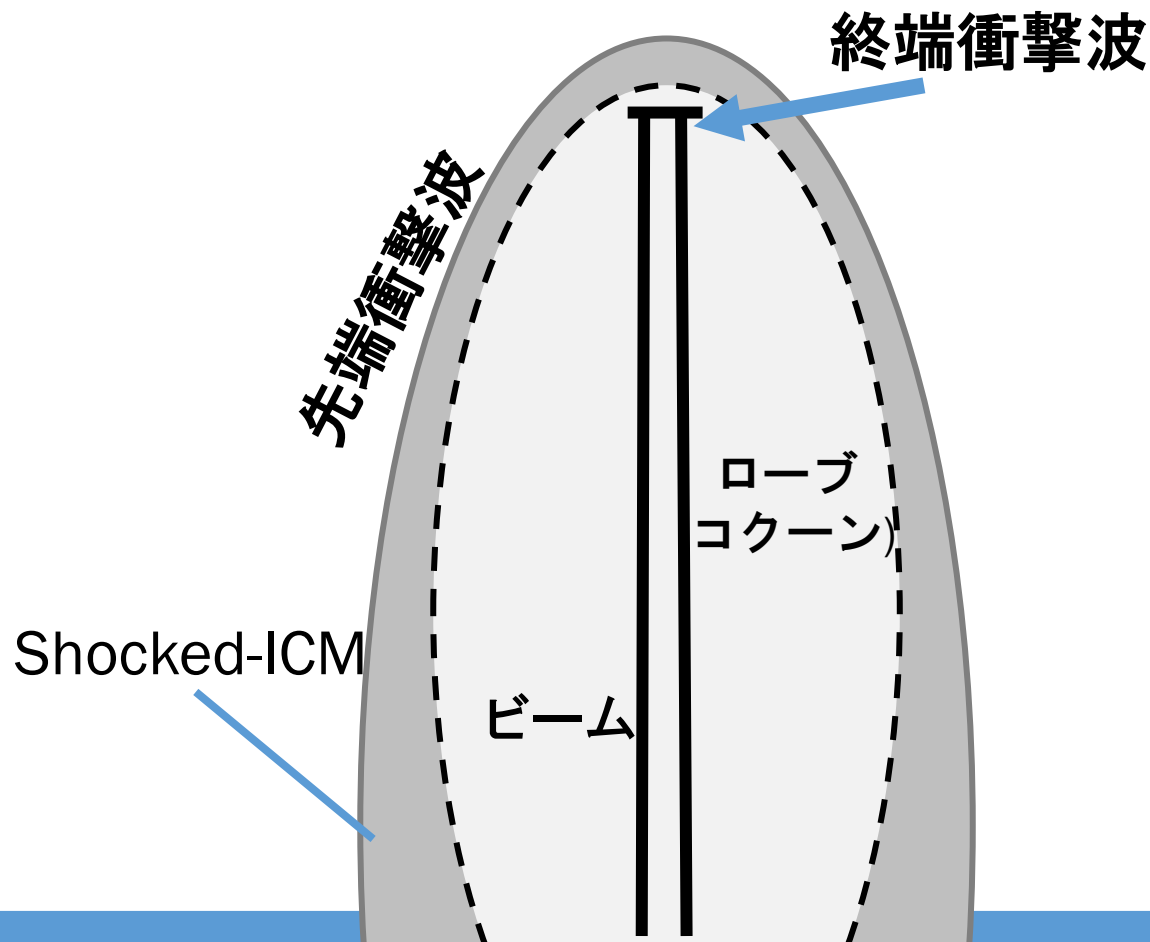
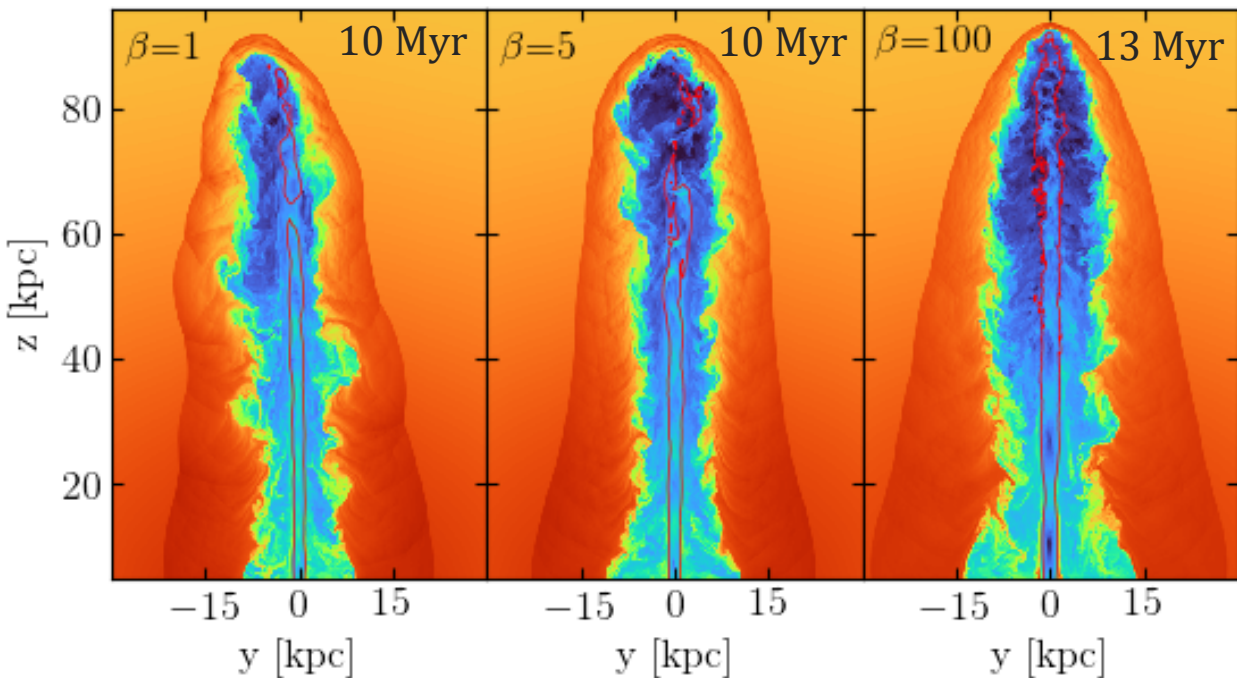
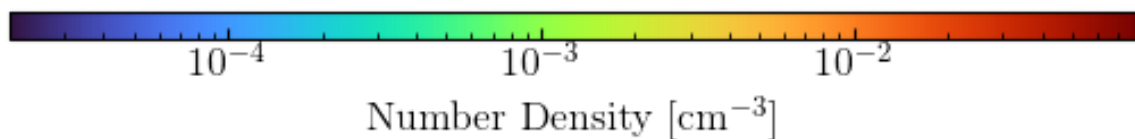
Model	$\beta_{\text{gas, jet}}$	\mathcal{M}_A	$B_{\text{jet}} [\mu\text{G}]$	$L_x \times L_y \times L_z [\text{kpc}]$	$N_x \times N_y \times N_z$
A	1	4.9	138	$64 \times 65 \times 96$	$640 \times 650 \times 960$
B	5	11	62	$64 \times 64 \times 96$	$640 \times 640 \times 960$
C	100	49	14	$64 \times 65 \times 96$	$640 \times 650 \times 960$



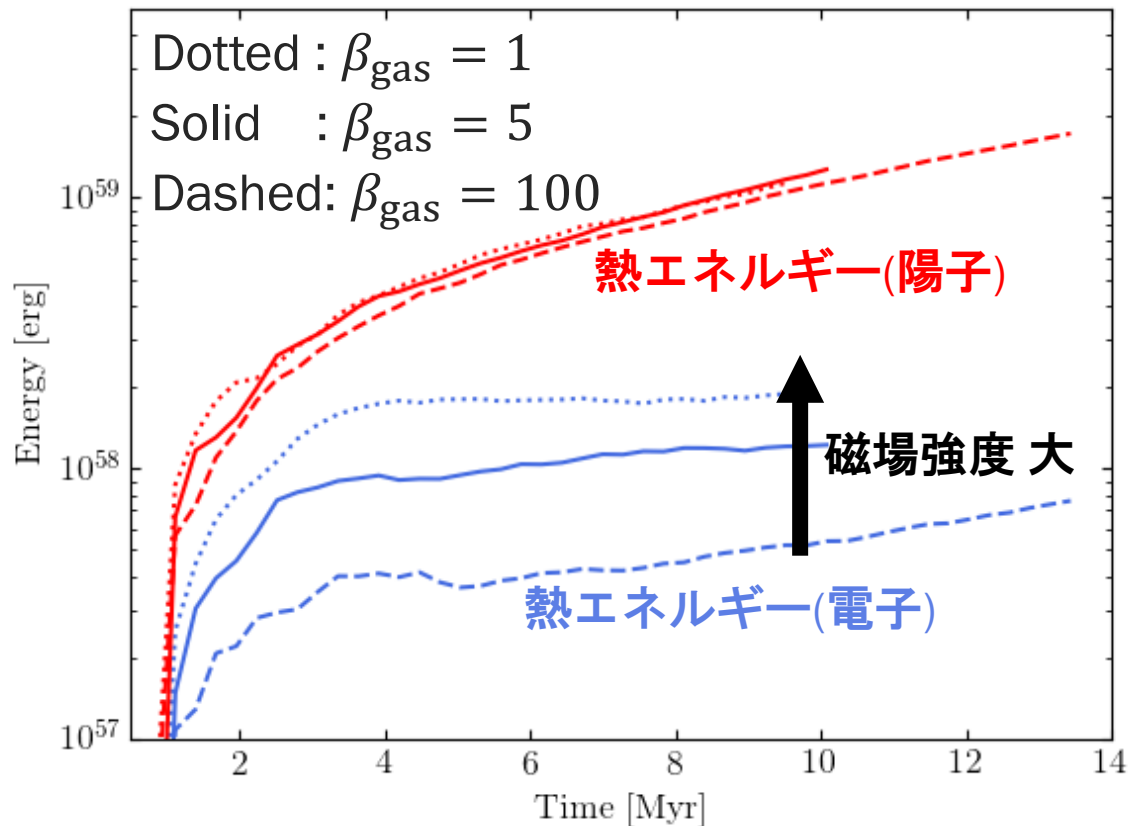
Surface Brightness map of Cygnus A
 Chandra 0.75-8KeV (Smith+ 2012)¹⁰

形態

- 先端衝撃波やコクーン(X線空洞・電波ローブ)を形成
- 強磁場($\beta_{\text{gas}} = 1$ and 5)モデルでは, 磁場によって非軸対称モードが成長
- 弱磁場($\beta_{\text{gas}} = 100$)ジェットは, 到達時間が僅かに遅い



コクーンエネルギー進化



- 衝撃波と乱流散逸による温度乖離
クーロン衝突による熱輸送は無視できる。
- 陽子が熱エネルギー
磁場が強い方が、電子の熱エネルギーが高い
(乱流モデル $f_e \propto U_{\text{mag}}$)
- ローブの熱膨張は、
熱的な陽子が担っていることを示す

議論 $P_{\text{cav}} - L_{\text{radio}}$ 関係

■ シンクロトロン放射強度 : $L_{\text{radio}} \propto U_{e,Nth} B_{\perp}^{0.5(p+1)} \nu^{-0.5(p-1)}$, $dN = N^{-p} dE$

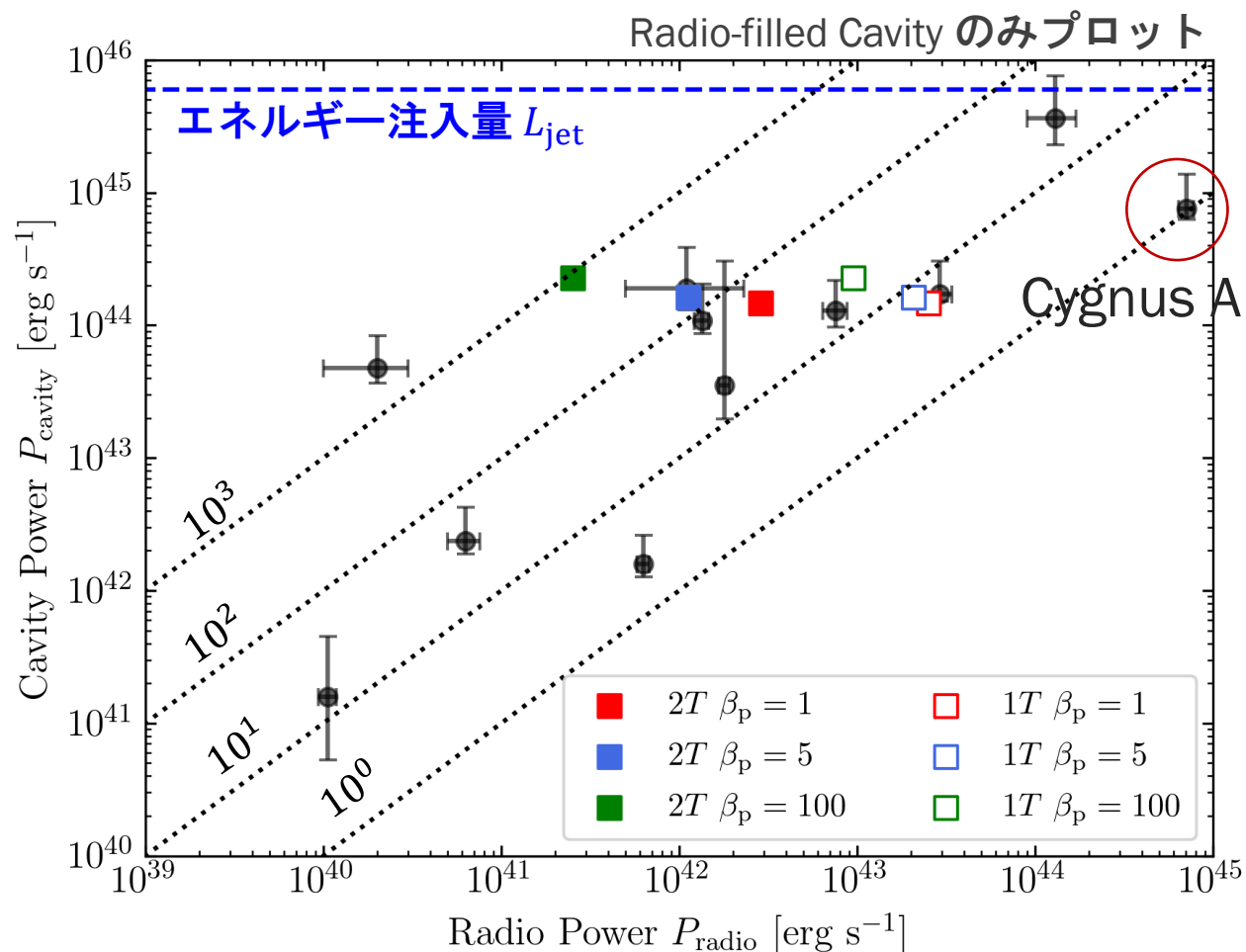
仮定 : $U_{e,Nth} = \begin{cases} \eta U_e (2T) \\ \eta U_p (1T) \end{cases}$, $\eta = 0.2$, $p = -2$, $\nu = 155\text{MHz}$

■ 力学的エネルギー : $P_{\text{cavity}} = 4pVt_{\text{age}}^{-1}$

$t_{\text{age}} = \frac{L}{C_s}$, $C_s^2 = \frac{p_{\text{gas}}}{\rho_{\text{gas}}}$, L : 伝搬距離

結果

- $P_{\text{cav}} < 10^{-1} L_{\text{jet}}$
 \Rightarrow ▪ ジェットからICMへのエネルギー輸送
 ▪ 伝搬時間の過大評価 $t_{\text{sim}} < 0.3 t_{\text{age}}$
- 1温度モデル $L_{\text{radio}}/L_{\text{jet}} \sim 1\%$
 2温度モデル $L_{\text{radio}}/L_{\text{jet}} \sim (0.01 - 0.1)\%$



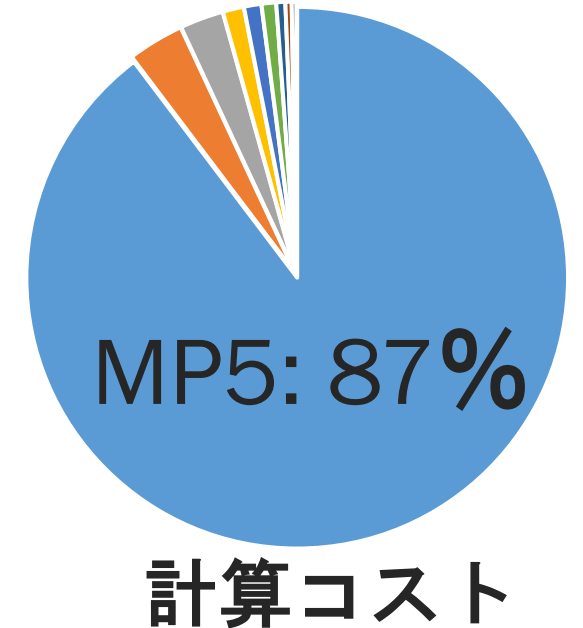
富岳 CANS+におけるチューニング

CANS+ ピーク実行性能 3% (京: 15.7%)

計算コスト: MP5 が大部分

■ SIMD化失敗

■ レジスタ不足 ⇒ SPILL/FILLが多発



➡ 富岳に特化したチューニングが必須

(ループ分割 + 一時変数の削減)

富岳 CANS+におけるチューニング

ループ分割前

```
For k,j,i  
    左右固有行列計算  
    特性量変換  
    MP5  
    特性量変換  
    衝撃波検知  
enddo
```

ループ分割後

```
For k,j,i  
    左右固有行列計算  
enddo  
For k,j  
    For i  
        特性量変換  
    enddo  
    For i  
        MP5  
    enddo  
    For i  
        特性量変換  
    enddo  
    For i  
        衝撃波検知  
    enddo  
enddo
```

最内ループ分割

富岳 CANS+におけるチューニング

最適化後のパフォーマンス結果

	チューニング前	チューニング後
演算速度	2.5079 GFLOPS	4.0275 GFLOPS
ピーク演算性能比	3.56 %	5.72 %
SIMD化効率	13.63 %	64 %

テスト計算

1ノード 1MPI 1次元衝撃波管問題 (1000 step)

今後の課題

OpenMPへの対応, 多次元問題動作確認, その他のルーチンへの対応

富岳によるAGNジェットシミュレーション

□ 従来の(3次元)ジェット伝搬数値実験：100ジェット半径程度

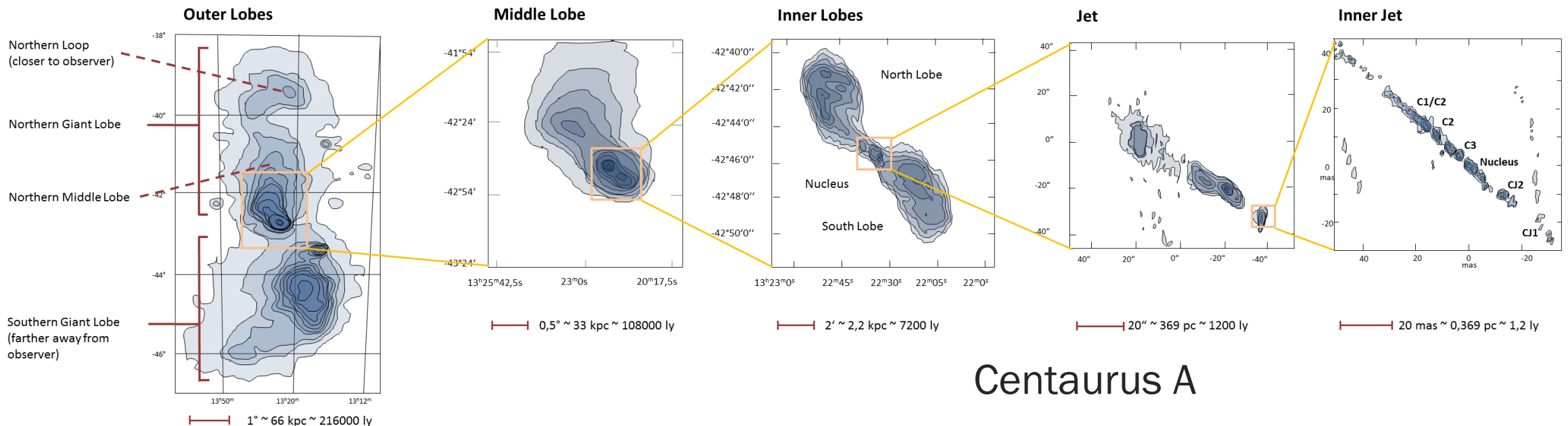
特殊相対論HDやNewton-MHDにおいても2次精度スキームが主流

(磁気圧優勢ジェットのダイナミクスを追跡するには、解像度も伝搬距離も不十分...)

⇒ 高解像度CANS+で、1000ジェット半径を伝搬するシミュレーションを目指す

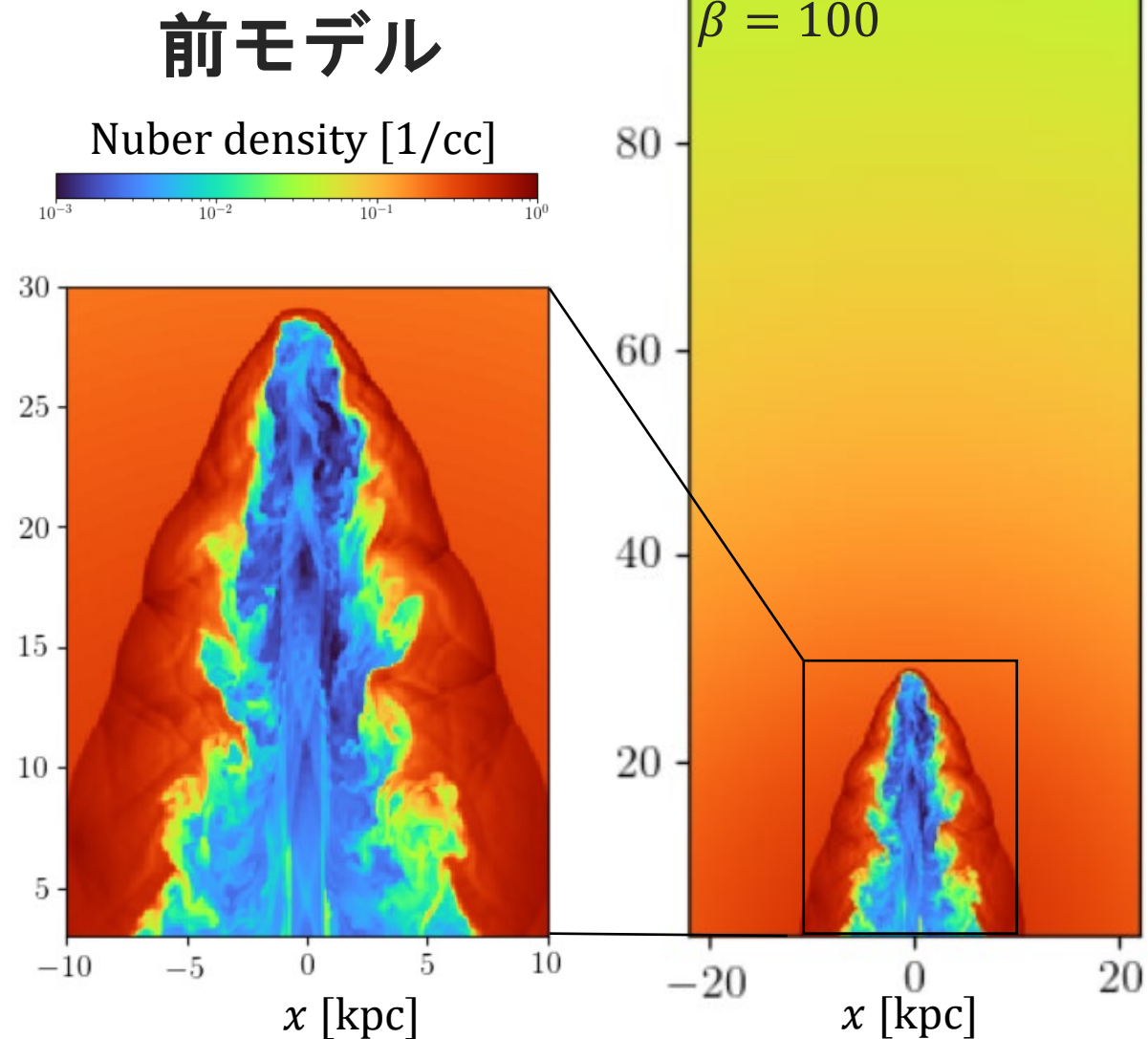
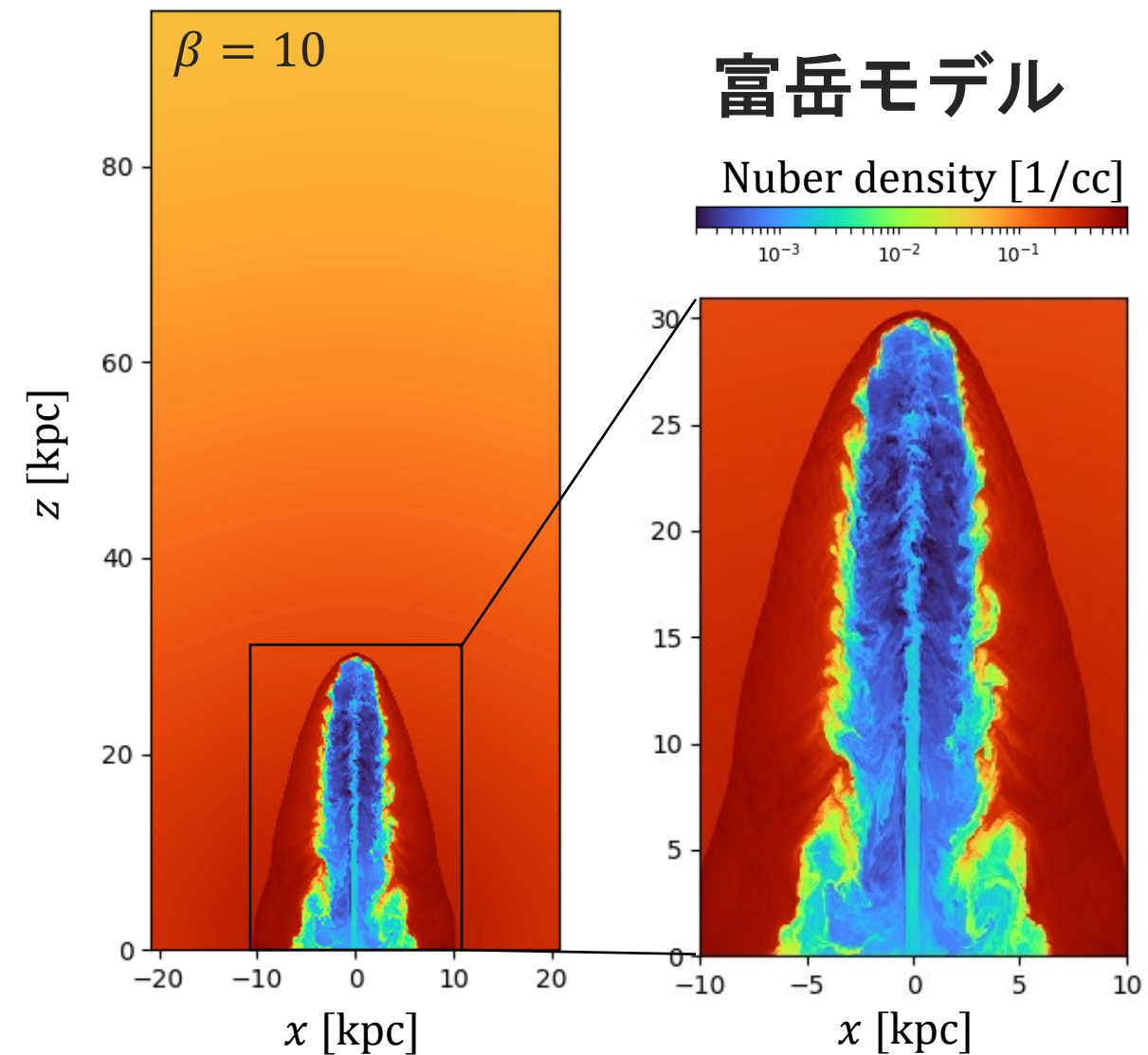
富岳

- ノット形成機構とジェット大規模構造
- 磁気圧優勢ジェット ⇒ ガス圧優勢ジェット を明らかに



富岳プロジェクト 現状報告

□ スナップショット段階での計算時間 10万ノード時間 グリッド数： $(N_x, N_y, N_z) = (1248, 1248, 2880)$



まとめ

- 乱流による電子加熱を考慮した3次元2温度ジェット伝搬MHDシミュレーションを行った
- 乱流加熱モデルを考慮し強磁場ジェットの場合においても、**陽子の熱エネルギーが電子の熱エネルギーを大きく上回る**。これは、ローブの膨張は陽子が担っていることを意味する。
- 磁場は、支配的となる安定性の発展, 及びローブ内の電子温度にも影響を与える。
低温な電子は乱流散逸による加熱が重要な熱源となり、**電子と磁場は等エネルギー状態へと向う**
- 簡単な仮定を用いて3次元モデルから観測量 $P_{\text{cav}} - L_{\text{radio}}$ を計算した。
その結果, 2温度プラズマは, 電波放射エネルギーを単一温度仮定よりも1桁以上低くすることを示した。
- ループ分割をすることで、ピーク性能が2倍弱向上した。
富岳を使うことで・これまで以上に長い空間スケールでの計算が現実的に可能に
・ 相対論的電子のモデル化にも取組中