

# 宇宙線による 銀河団ガスの加熱

Fujita, Y., & Ohira, Y., Ap.J. **783** 182(2011)

大阪大学宇宙進化グループ

木村創大

1

## Outline

- Cooling Flow Problem
- Cosmic Ray Streaming Heating
- モデルと計算
- 結果
- まとめ

2

## Cooling Flow Problem

銀河団ガスの温度は $\sim 10^8\text{K}$   
→X線放射による冷却が効く

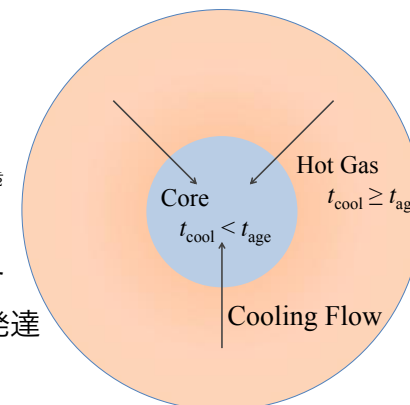
X線放射による冷却時間

$$t_{cool} = 8.5 \times 10^{10} \text{yr} \left( \frac{n_g}{10^{-3} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{10^8 \text{K}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

密度の高いコアの冷却時間は $\sim 10^8\text{yr}$   
→圧力を支えきれずガスの流れが発達  
→Cooling Flow

観測では低温ガス $\sim 10^6\text{K}$ に対応する重元素のline emissionが見えない

→Cooling Flowの発達を妨げる加熱源が存在？  
→Cooling Flow Problem



3

## 加熱源の候補

- TCモデル  
周囲の高温ガスからの熱伝導を加熱源とするモデル
  - MCモデル  
AGNの活動に伴う衝撃波や音波によるメカニカルな加熱を考えたモデル
- これらのモデルは加熱の安定性に問題がある  
→AGNの活動に伴って発生する宇宙線の streamingによる加熱に注目した

4

# Cosmic Ray Streaming Heating

宇宙線がプラズマ中を流れるとAlfvén波と共鳴し  
Alfvén波を増幅する

$$\frac{\partial U_A}{\partial t} = \mathbf{v}_{st} \cdot |\nabla P_{CR}|$$

Alfvén波のエネルギーが背景磁場のエネルギーまで  
増幅されると、non-linear dampingする

- dampingした分のエネルギーがガスに渡される
- ガスの加熱源になる

$$\Gamma_{st} \sim \mathbf{v}_{st} \cdot |\nabla P_{CR}|$$

5

# Cosmic Ray Injection

宇宙線源として銀河団中心に存在するAGNを考える  
宇宙線は  $r_0 < r < r_1$  の範囲で注入されるとする

$$\dot{S}_{CR} \propto L_{AGN} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\nu} (1 - e^{-(r/r_0)^2}) e^{-(r/r_1)^2} \quad (\nu \sim 3)$$

ここでbubbleの観測から  $r_0 = 20$  kpc、  
mini-haloの観測から  $r_1 = 150$  kpc とする

$L_{AGN}$  は銀河団中心に流れ込むガスの量に比例させる

$$L_{AGN} = \epsilon \dot{M} c^2$$

ここで  $\epsilon$  はAGNでのエネルギー変換効率を表すパラメータ

7

# 基礎方程式

球対称を仮定、添字のgはガスをCRは宇宙線を表す

$$\text{EOC: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho u) = 0$$

EOM:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho u^2) = -\rho \frac{GM(r)}{r^2} - \frac{\partial}{\partial r} (P_g + P_{CR} + P_B)$$

Energy eq. of gas:

$$\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \varepsilon_g u) = -P_g \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \kappa_{th} \frac{\partial T}{\partial r} \right] - \rho^2 \Lambda(T) + \Gamma_{st} + \Gamma_{coll,g}$$

Energy eq. of CR:

$$\frac{\partial \varepsilon_{CR}}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \varepsilon_{CR} \tilde{u}) = -P_{CR} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tilde{u}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \kappa_{st} \frac{\partial \varepsilon_{CR}}{\partial r} \right] - \Gamma_{coll,CR} + \dot{S}_{CR}$$

6

熱伝導

宇宙線衝突

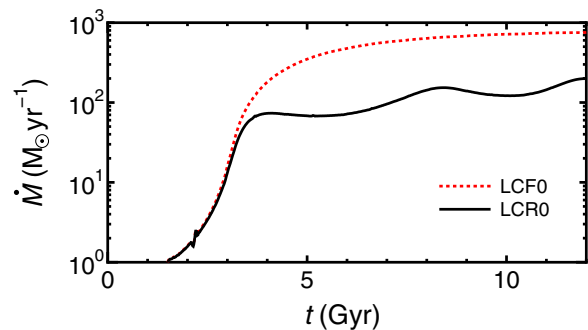
( $\tilde{u} = u + v_{st}$ )

# 初期条件

- 密度分布は観測の結果を用いる
- ガスは等温であるとする  
Perseus-type cluster :  $T(t=0) = 7$  keV  
Virgo-type cluster :  $T(t=0) = 2.4$  keV
- $u(t=0) = 0$
- $P_{CR}(t=0) = 0$
- 背景磁場  $B = 10 \mu\text{G}$

8

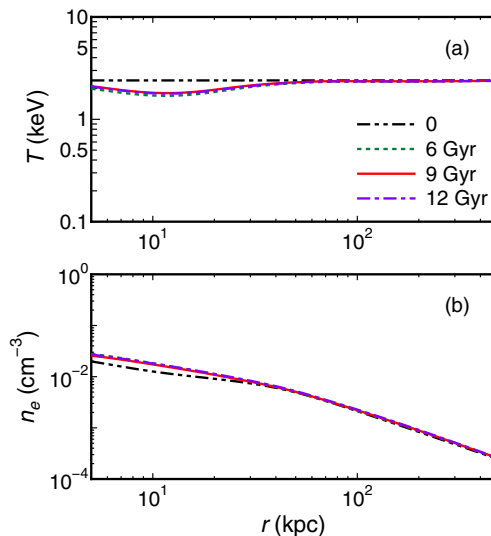
## 結果



- : 加熱なし、pure cooling flow model
- : CR streaming model (Perseus-type、 $\epsilon = 2.5 \times 10^{-4}$ )  
→宇宙線はCooling Flowの発達を妨げる

9

## 結果

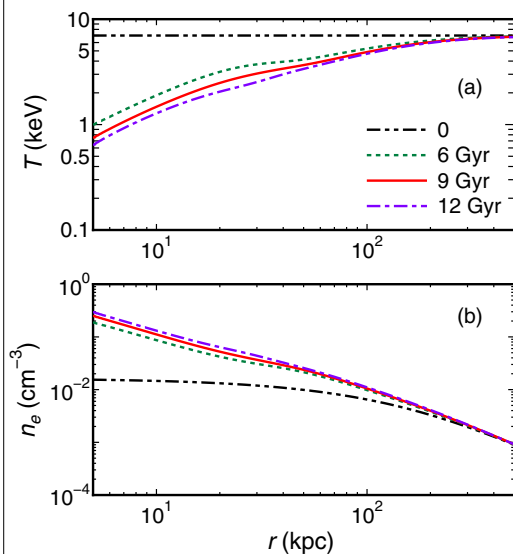


- Virgo-type cluster
- $\kappa_{\text{th}} = 0$
- $\epsilon = 1 \times 10^{-4}$
- $T(t=0) = 2.4 \text{ keV}$   
( $2.8 \times 10^7 \text{ K}$ )

低温の銀河団についても  
コアを加熱できている

11

## 結果



- Perseus-type cluster
- $\kappa_{\text{th}} = 0$
- $\epsilon = 2.5 \times 10^{-4}$
- $T(t=0) = 7 \text{ keV}$   
( $8.1 \times 10^7 \text{ K}$ )

温度が0.6 – 1 keVの  
範囲で変動している  
→銀河団年齢程度で安定

10

## まとめ

- CR streamingによって銀河団コアを加熱できるかを調べた
- CR streamingによる加熱は銀河団の年齢程度では安定
- 低温の銀河団についてもCooling Flowの発達を抑える
- CR streamingは銀河団コアの加熱源として有力

12