

# 多波長観測で探る銀河団 高温プラズマ、高エネルギー粒子、暗黒物質

滝沢元和(山形大学理学部物理学科)

天文・天体物理若手夏の学校

2011年8月2日

# 今日の予定

- Introduction
- 銀河団高温ガス(X線、SZ効果)
- 暗黒物質(重力レンズ)
- X線と重力レンズのジョイント解析
- 銀河団高エネルギー粒子
- 銀河団と宇宙論
- まとめ

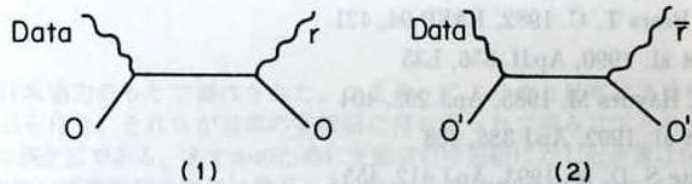


# 理論家？観測家？

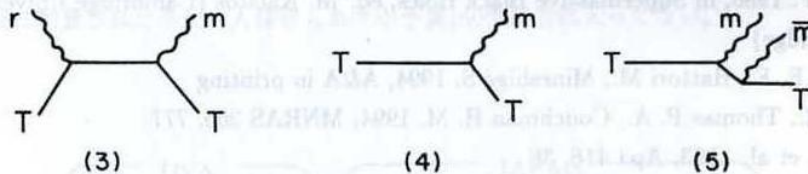
- 「理論」、「実験」、「観測」etcはあくまでも手段であって目的ではない。真の目的は自然を理解すること。
- 共同研究まで含めれば「理論」も「観測」もというのは自然な流れ
- (ある程度発展した観測分野では)理論家が観測に参入しやすい環境がある。
  - 「観測」側での分業化(装置を作る人≠結果の解析をする人)  
→観測結果の解析が”user friendly”に
  - 観測の分解能(空間、エネルギー、時間)向上  
→観測天体の選定、解析の方向性、結果の解釈などにさいして理論的素養の重要性が増大
  - 感度向上にともなう観測可能天体の増加  
→結果を解析する人が足りない、、、せっかくの貴重なデータが、、

# Fundamental Theory of Astrophysicist Processes

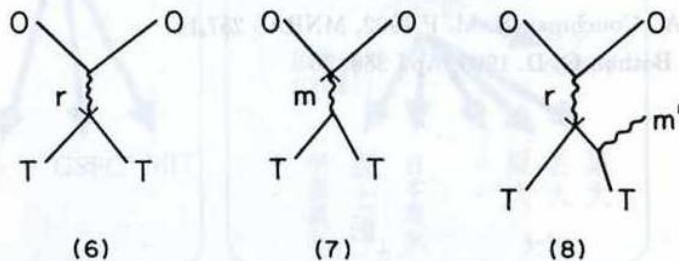
## OBSERVERS



## THEORISTS



## INTERACTION

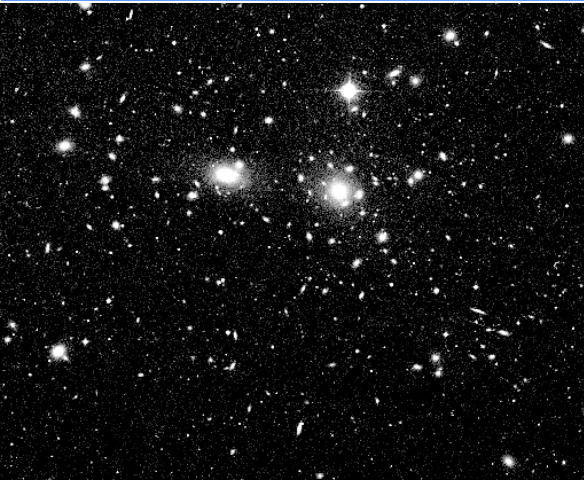


“宇宙物理学者プロセス”のファイマン  
 ダイアグラム  
 1994年天文天体物理若手夏の学校の  
 収録から  
 石坂千春さん(現:大阪市立科学館)  
 作成

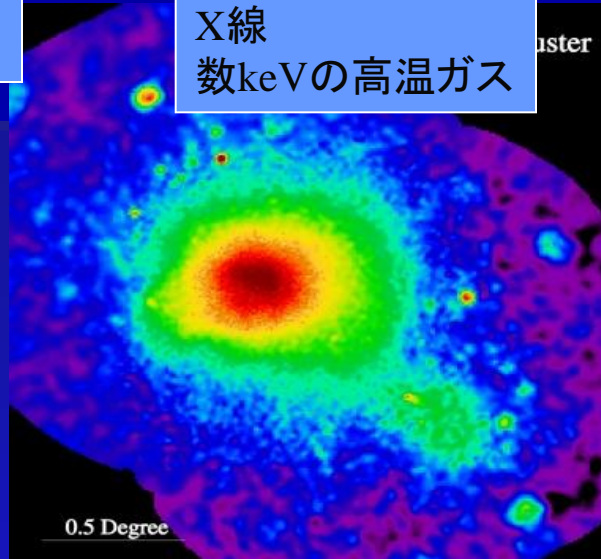
Figure 1. Fundamental Theory of Astrophysicist Processes. (1) Emission of a result  $r$  by an observer  $O$  after obtaining data. (2) Emission of the opposite result  $\bar{r}$  by a different observer  $O'$  in response to the same data. (3) Emission of a model  $m$  by a theorist  $T$  after absorption of an observational result  $r$ . (4) Spontaneous emission of a model. (5) Emission of a model  $m$  and its opposite  $\bar{m}$ . (6) & (7) Elastic scattering of observers and theorists. (8) Rare process in which theorist emits a modified model  $m'$  in response to a new result from an observer.

# Introduction: 銀河団

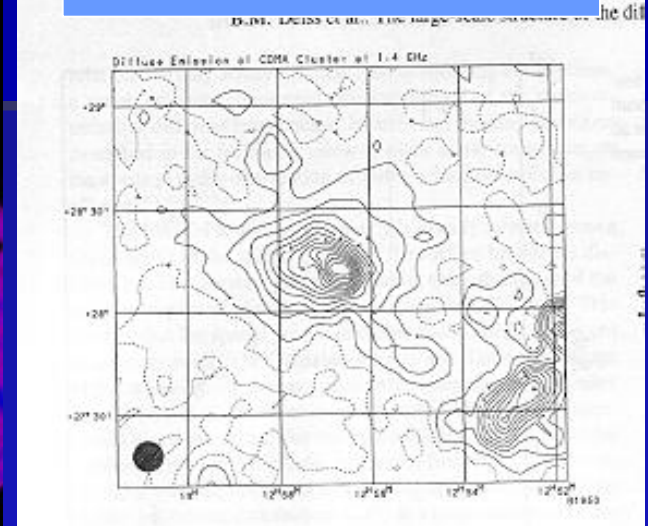
可視光  
(数100個の銀河の集まり)



X線  
数keVの高温ガス

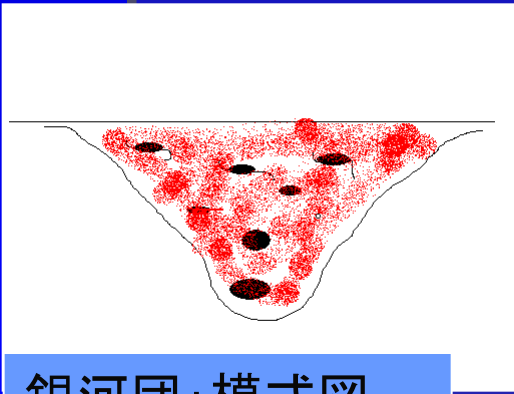


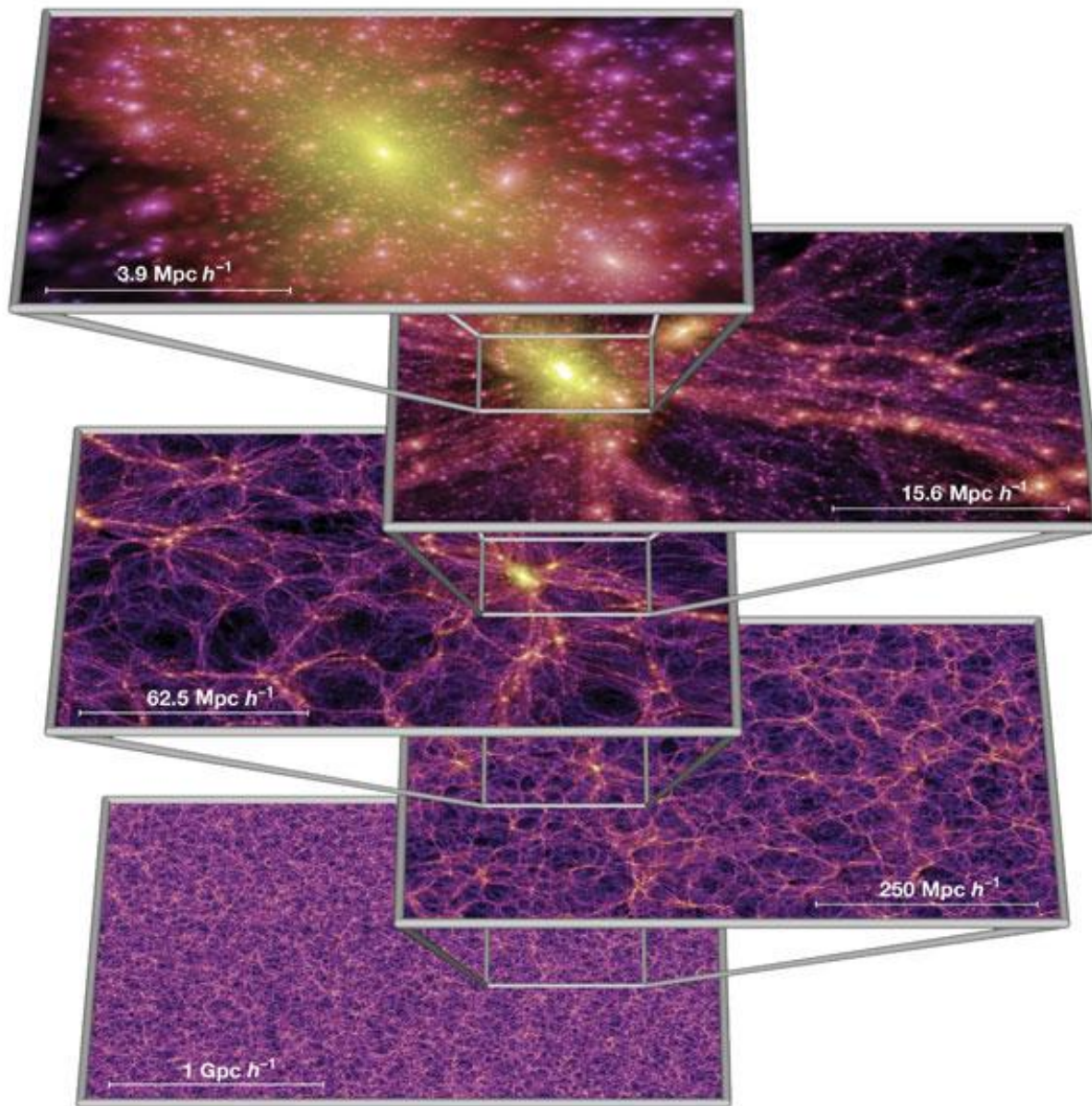
電波  
数GeVの高エネルギー電子



- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ( $T \sim 10^7 - 8 \text{K}$ ) と銀河のかたまり。
- 宇宙で最大のビリアライズした天体 ( $R \sim \text{Mpc}$ ,  $M \sim 10^{14-15}$  太陽質量)
- 宇宙の構造形成の(観測可能な)現場
- プラズマ物理の実験場(理想的な無衝突プラズマ)
- 暗黒物質の実験場(重力レンズ、self-interacting dark matter など)

銀河団: 模式図





宇宙の大規模構造の  
N体シミュレーションの例  
(Springel et al. 2005)

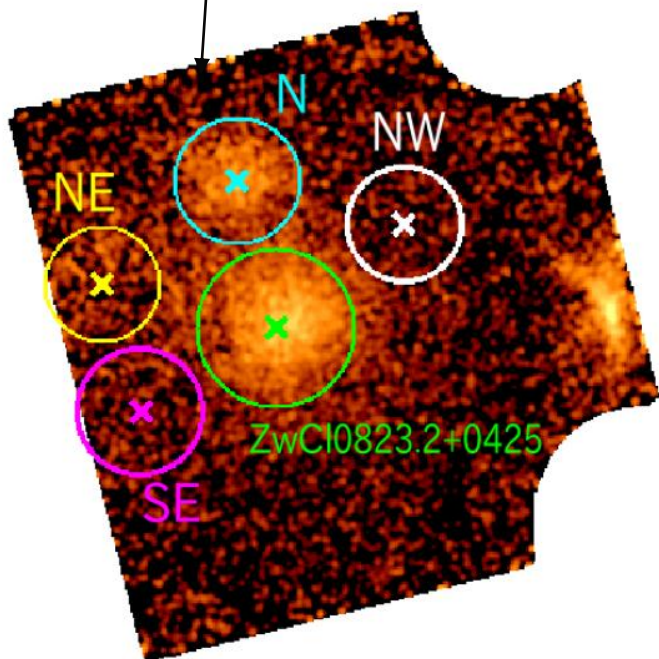
$$N=(2160)^3 \\ \doteq 1.0078 \times 10^{10}$$

重力不安定性の成長による  
構造形成

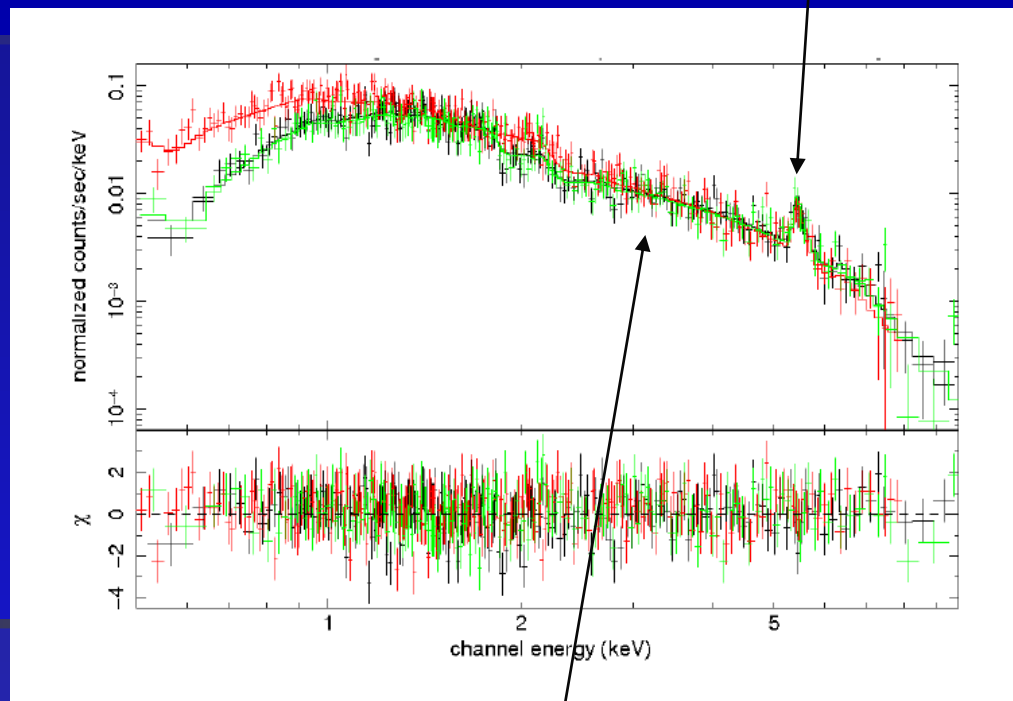
現在も周囲の物質を降着させ  
ながら成長している。

# X線で見える銀河団

X線表面輝度  $\propto n_e n_i T^{0.5} L$   
→ バリオンの密度分布



重元素の輝線  
→ 重元素量、赤方変位、  
(将来的には) ドップラー変位

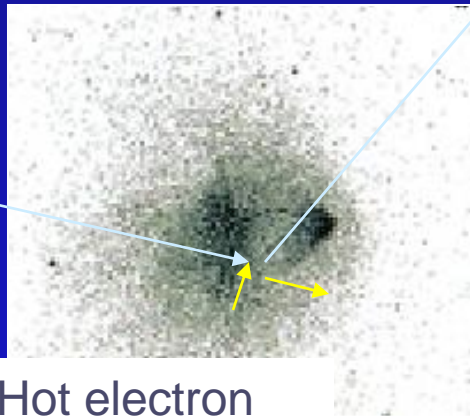


連続成分の形  
→ 温度



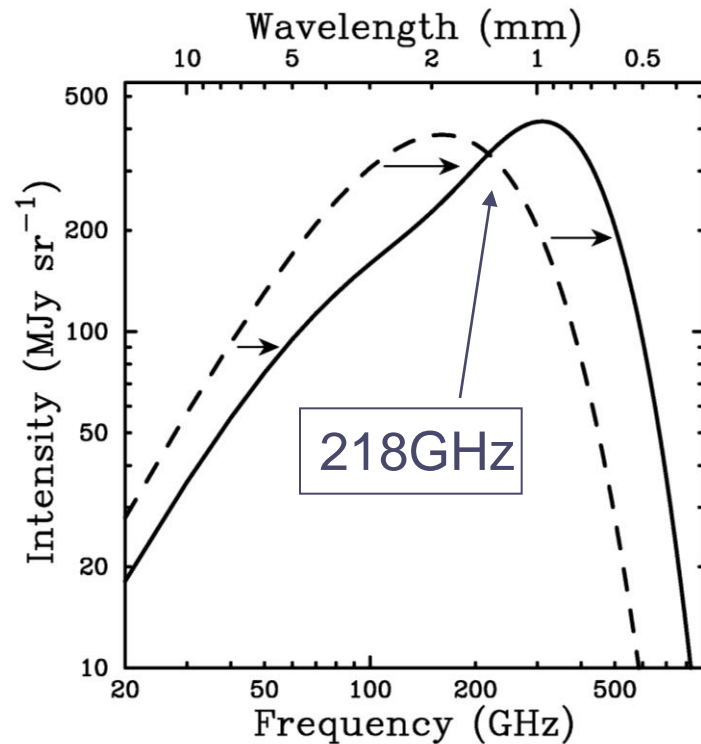
# Sunyaev-Zel'dovich 効果

逆コンプトン散乱



CMB光子  
(2.7K  
black body)

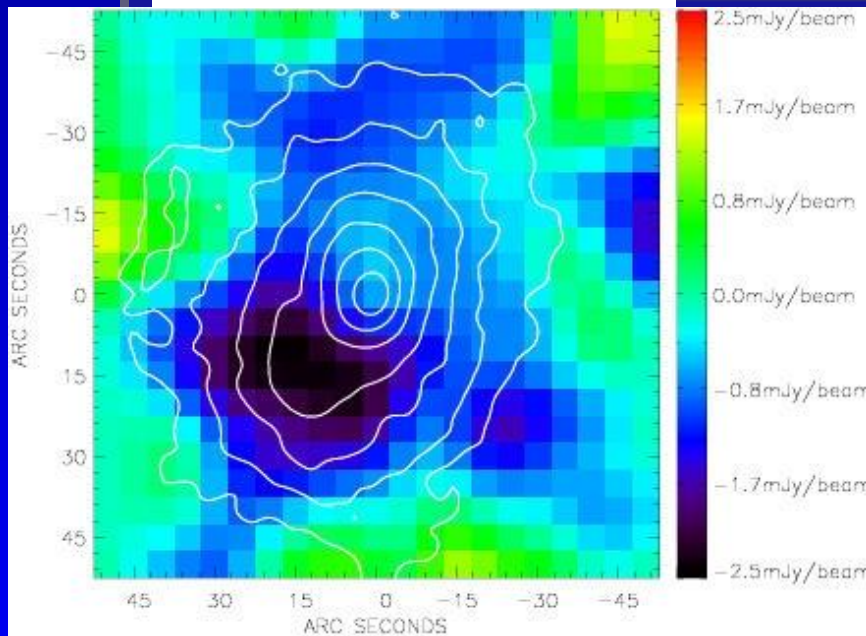
Hot electron  
( $10^7-8K$ )



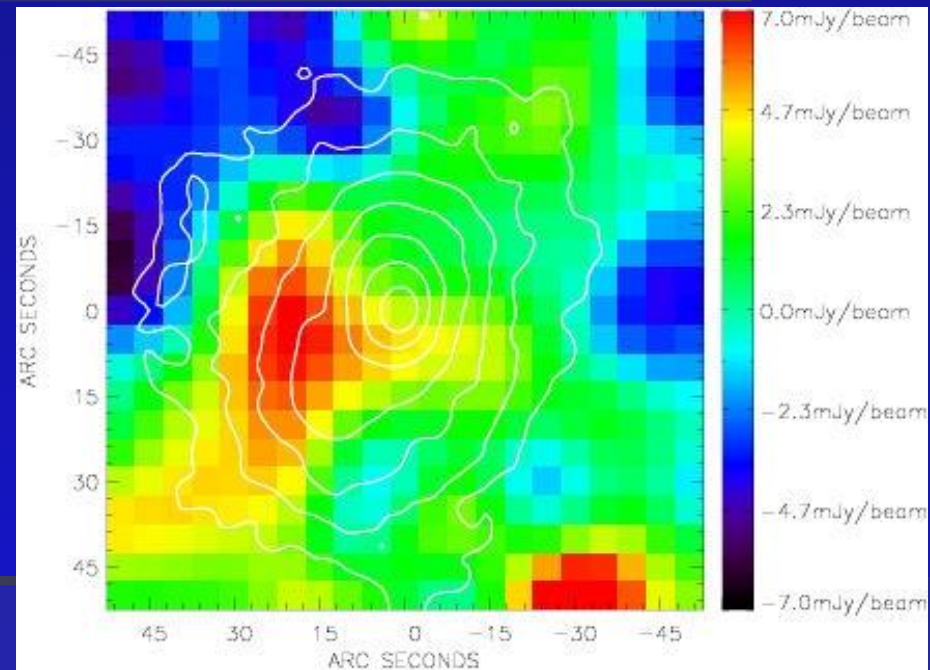
- 銀河団(など)の高温ガスによる逆コンプトン散乱で  
Cosmic Microwave Background (CMB) のスペクトルが変形。
- ミリ波帯(R-J側)ではdecrement
  - サブミリ波帯(Wein側)ではincrement

# SZE maps of RX J1347.5-1145

ミリ波 (decrement)



サブミリ波 (increment)



150GHz, NOBA on Nobeyama 45m  
**13" beam**, 15" smoothing  
(Komatsu et al. 2001)

Contours: Chandra X-ray (Allen et al.  
2002)

350GHz, SCUBA on JCMT 15m  
**15" beam**, 15" smoothing  
(Komatsu et al. 1999)

# (Thermal) SZ vs X-ray

$$I_X \propto \int n_e^2 T_e^{-1/2} dl$$

$$I_{SZ} \propto \int n_e T_e dl$$

X線は密度構造に、SZは温度構造によりsensitive。

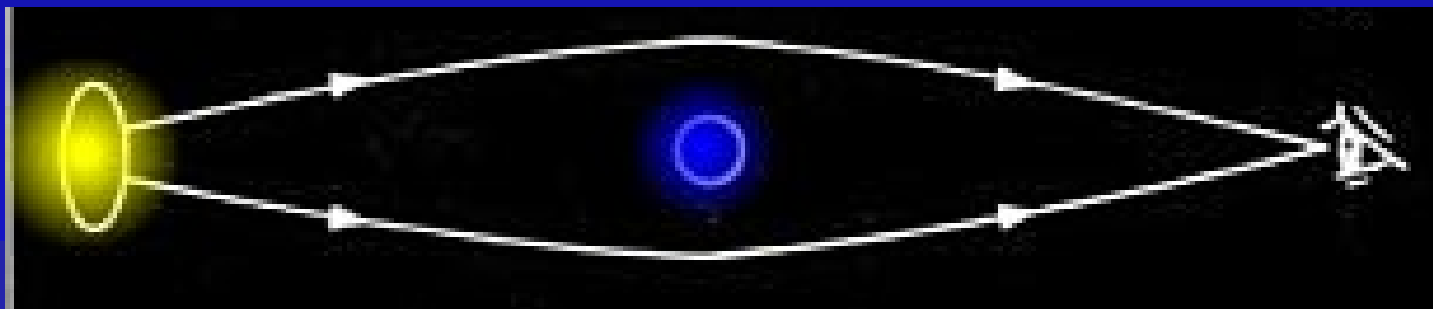
$$I_X \propto (1+z)^{-4}$$

$$I_{SZ} \propto (1+z)^0 \quad (U_{CMB} \propto (1+z)^4 \text{ のため})$$

high z object にはSZが有利

# 暗黒物質を直接見る：重力レンズ

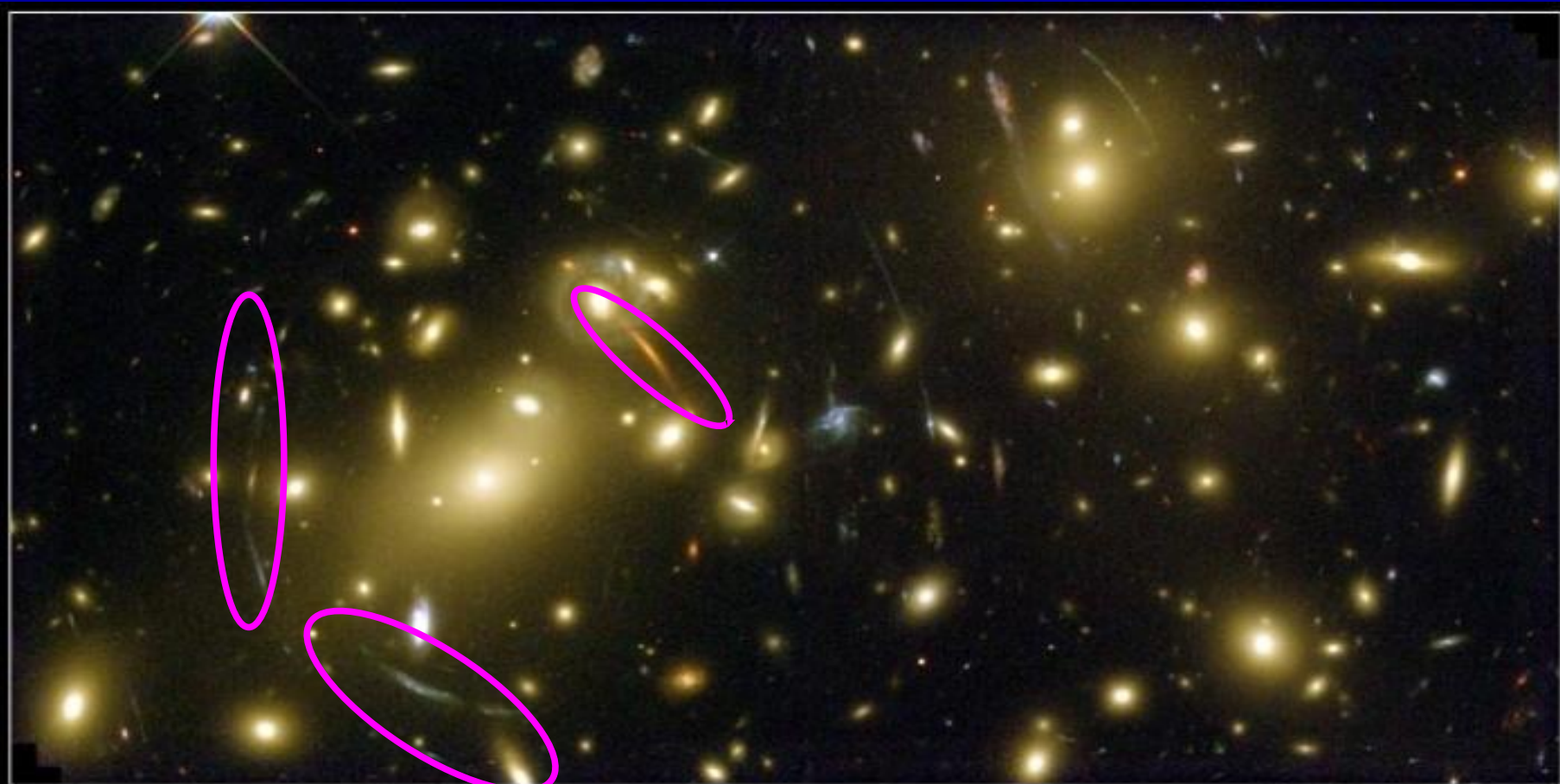
アインシュタインの一般相対論によると、重力とは時間空間のゆがみである。その結果、光も重力によって曲げられる。重たい天体があたかもレンズのような役割をする(重力レンズ)



遠くにある天体

レンズ天体

観測者



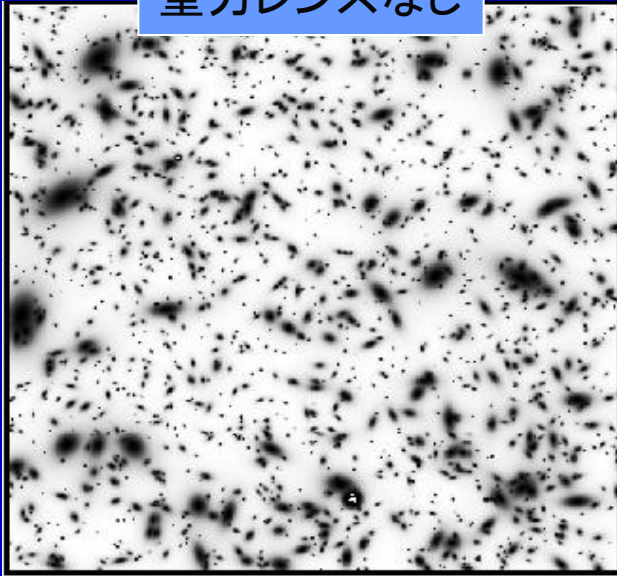
**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

円弧状に見えているのは遠くにある銀河が重力レンズ効果を受けてゆがんで見えているもの

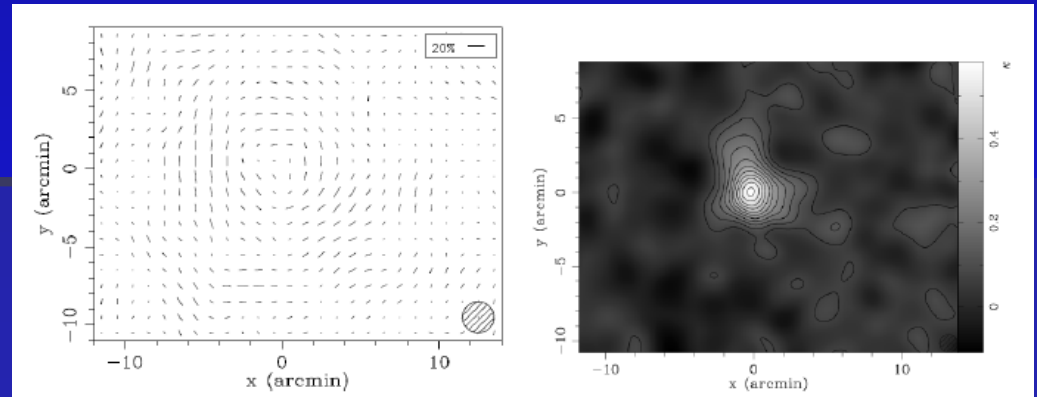
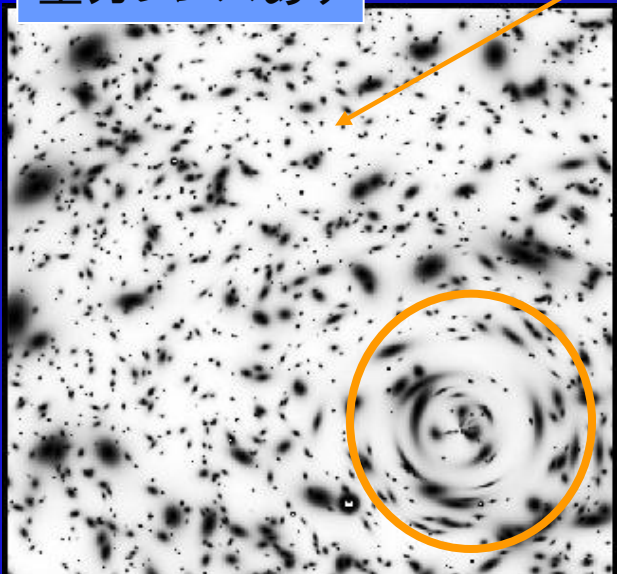
重カレンズなし



# 弱い重力レンズ効果

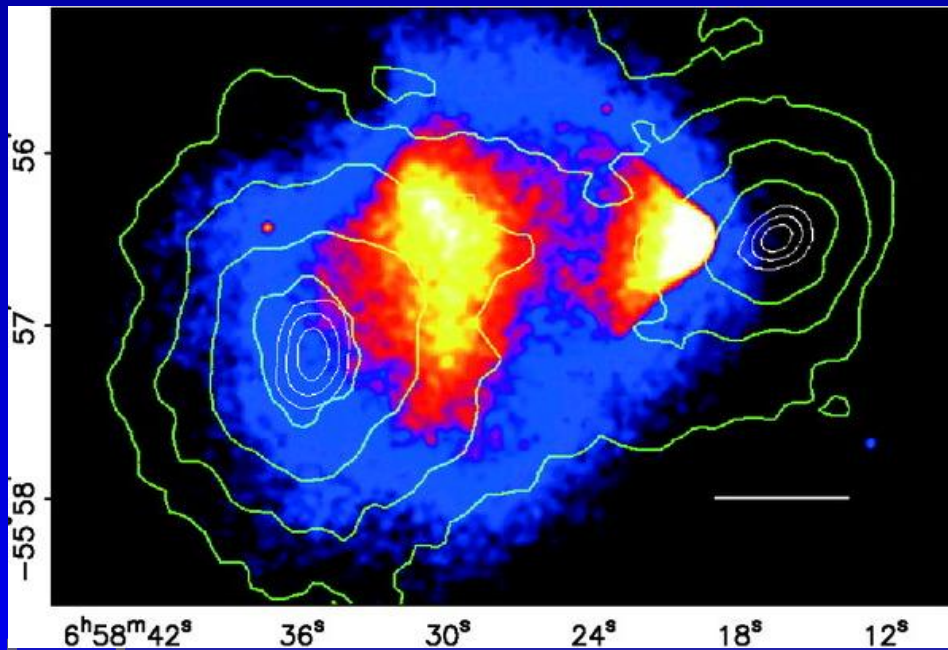
実はこのあたりにある銀河も重力レンズ効果を受けて少しずつゆがんでいる。  
多数の銀河のゆがみ具合の平均をとることで、重力レンズ効果を検出できる

重力レンズあり



左: 銀河の平均的なゆがみ具合  
右: それから再現した質量分布

# 1E 0657-56: 質量分布



X線イメージ(カラー)  
質量分布(等高線)  
Clowe et al. (2006)

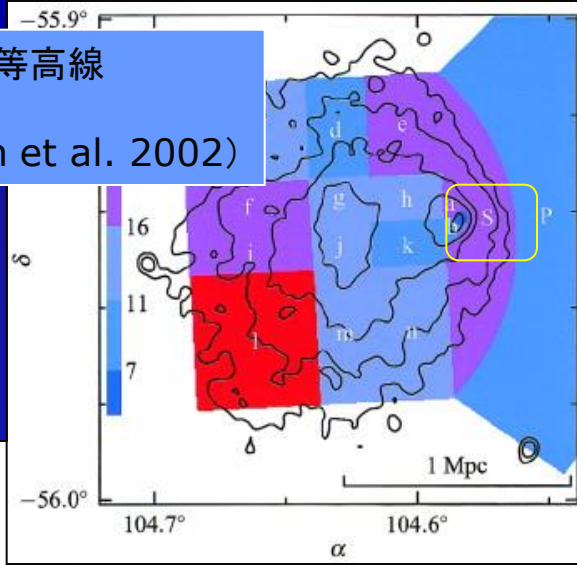
- Weak lensing で質量分布が求められた。
- ICMと質量分布のピークにずれ。(質量分布と銀河分布はほぼ一致)

ガスがram pressureによってDMのポテンシャルからはぎとられたため。

本当かなあ、、、？

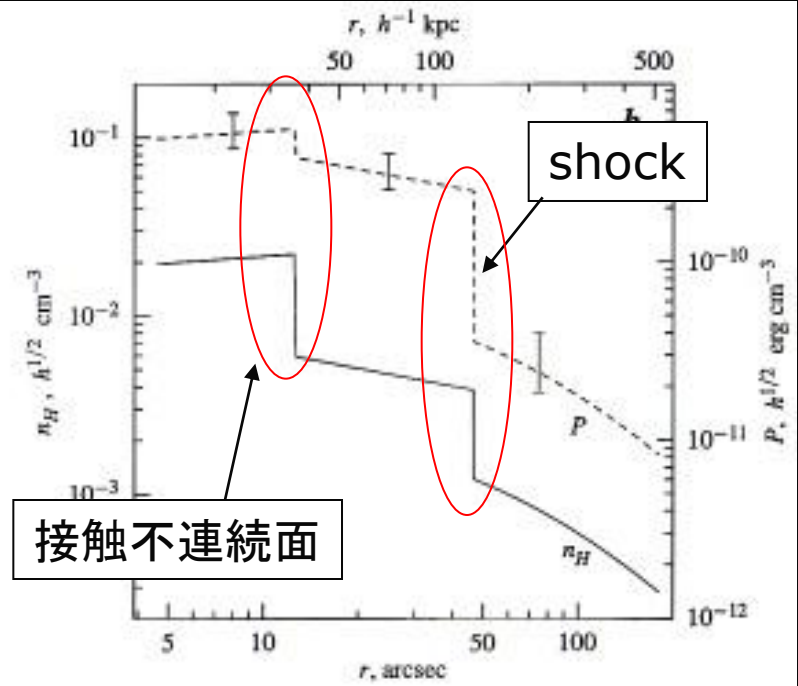
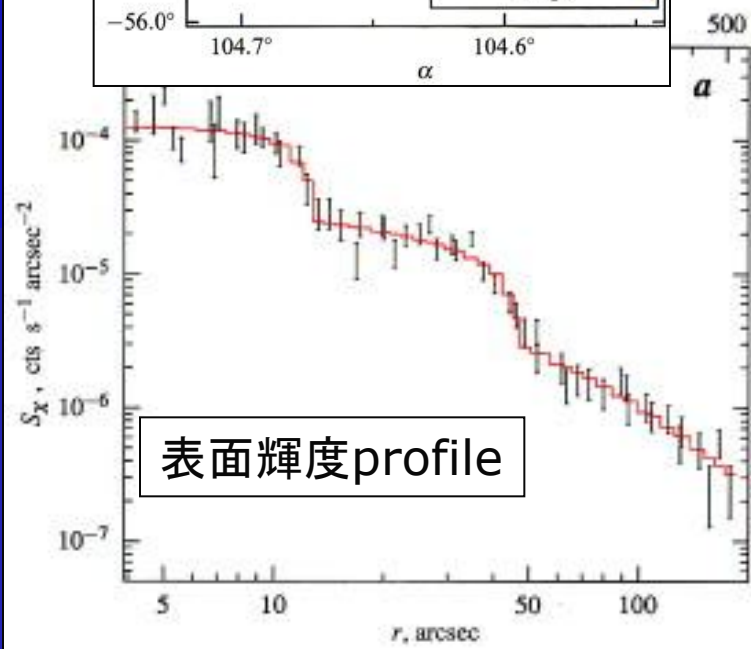
# 1E 0657-56: cold front & bow shock

X線イメージ:等高線  
 温度:カラー  
 (Markevitch et al. 2002)



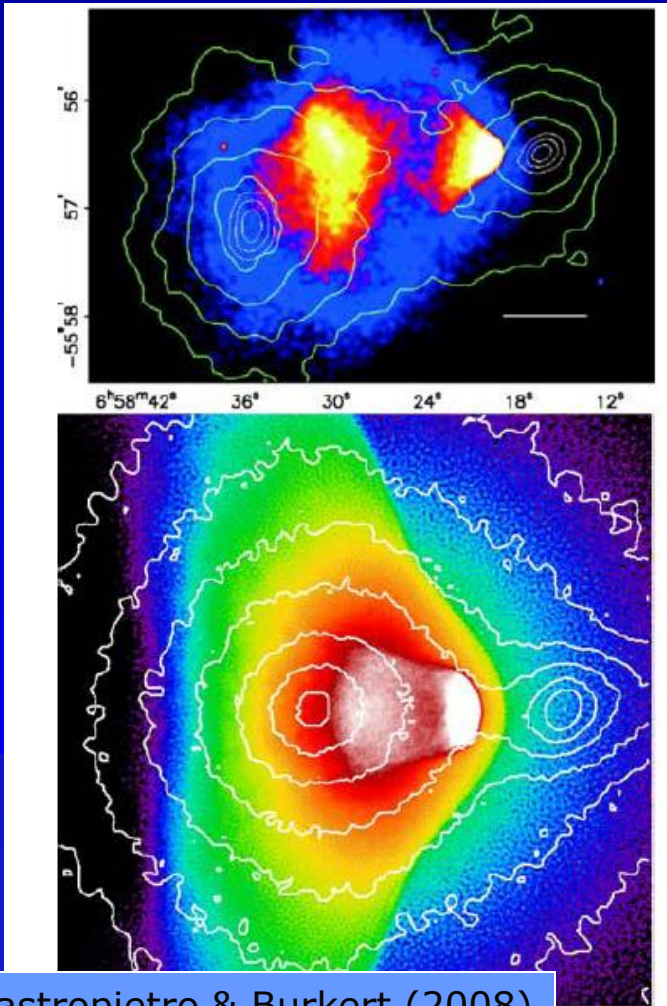
Substructure 前面の密度、圧力 profileから、

$M = 3.0 \pm 0.4$   
 $V_s = 4740^{+710}_{-550} \text{ km/s}$   
 (ちなみに  $v_{200} = 2380 \text{ km/s}$ )



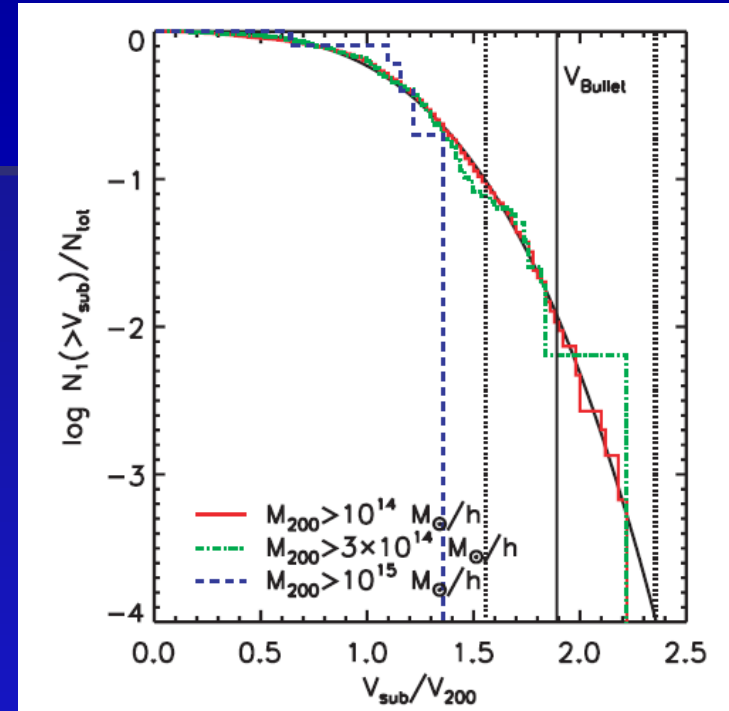


# 1E0657-56 シミュレーションなど



Mastropietro & Burkert (2008)

他にSpringel & Farrar (2007)  
Takizawa (2006) など



$$V_s = 4740^{+710}_{-550} \text{ km/s}$$

(ちなみに  $v_{200} = 2380 \text{ km/s}$ )

宇宙論的N体シミュレーションのデータで調べてみた。(Hayashi & White 2006)

こういう高速衝突は非常に珍しい。(～0.01)

ほとんどありえない？(Lee & Komatsu 2010)

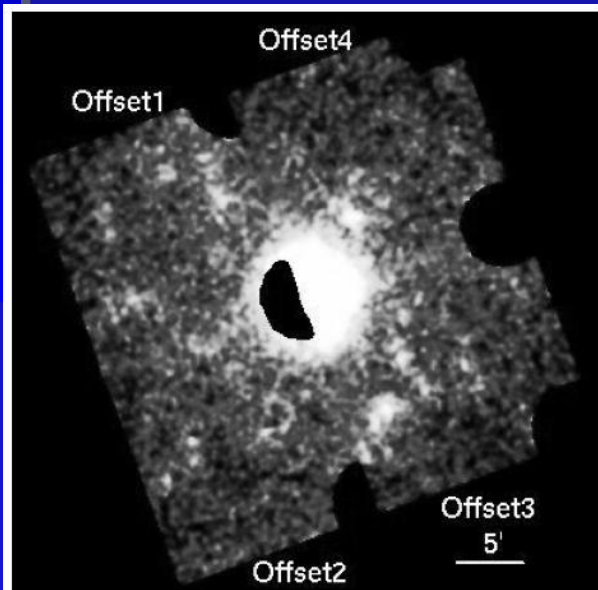
# A1689

(Kawaharada, Okabe, Umetsu, Takizawa, et al. 2010)

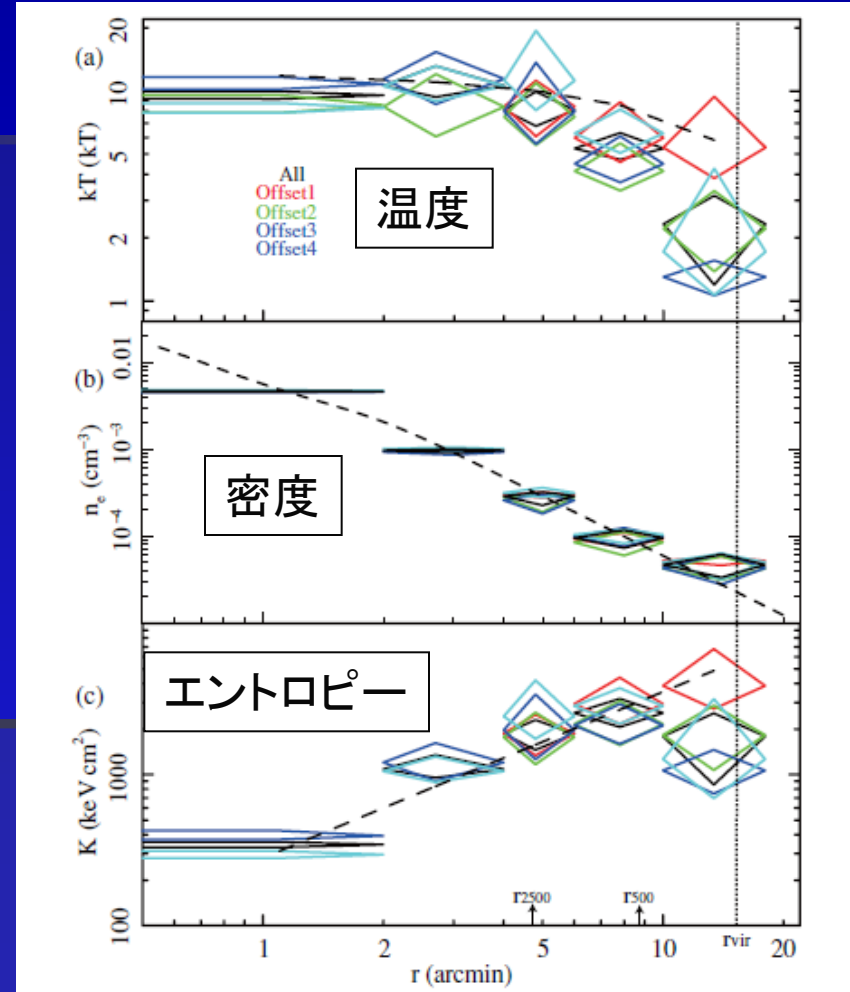
非常によく調べられている重力レンズ銀河団

CDMの予測よりも非常に中心集中度の高い質量分布を持つ。

3軸不等??



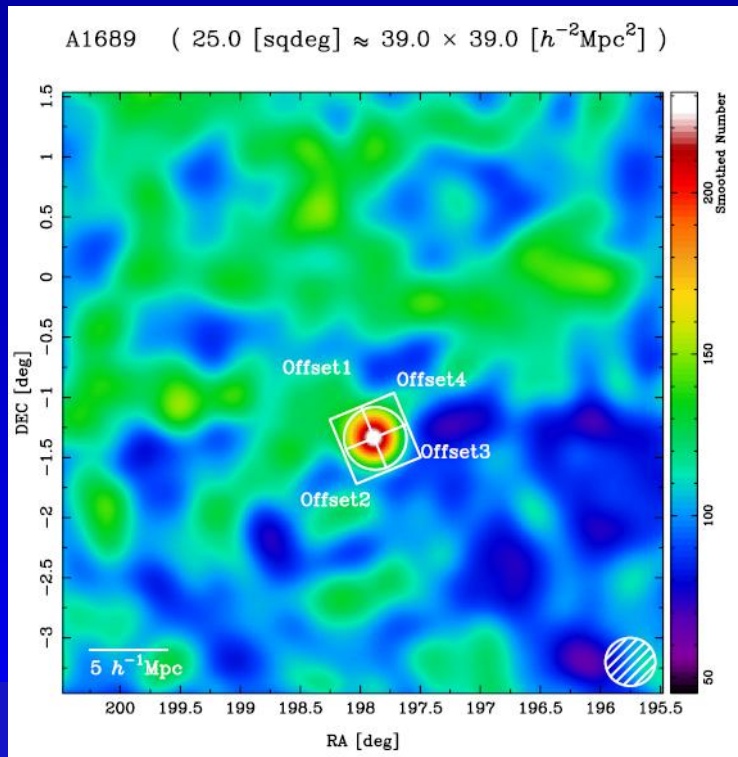
すざくによるA1689のX線イメージ



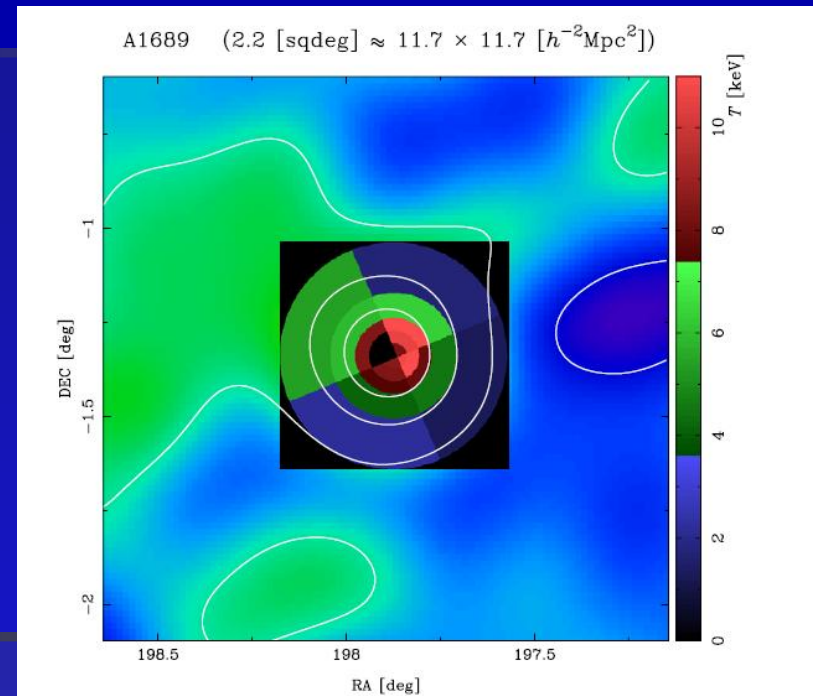
各方位ごとの温度、密度、エントロピー分布  
Offset1のみ外側で温度、エントロピーが高い

# A1689

(Kawaharada, Okabe, Umetsu, Takizawa, et al. 2010)



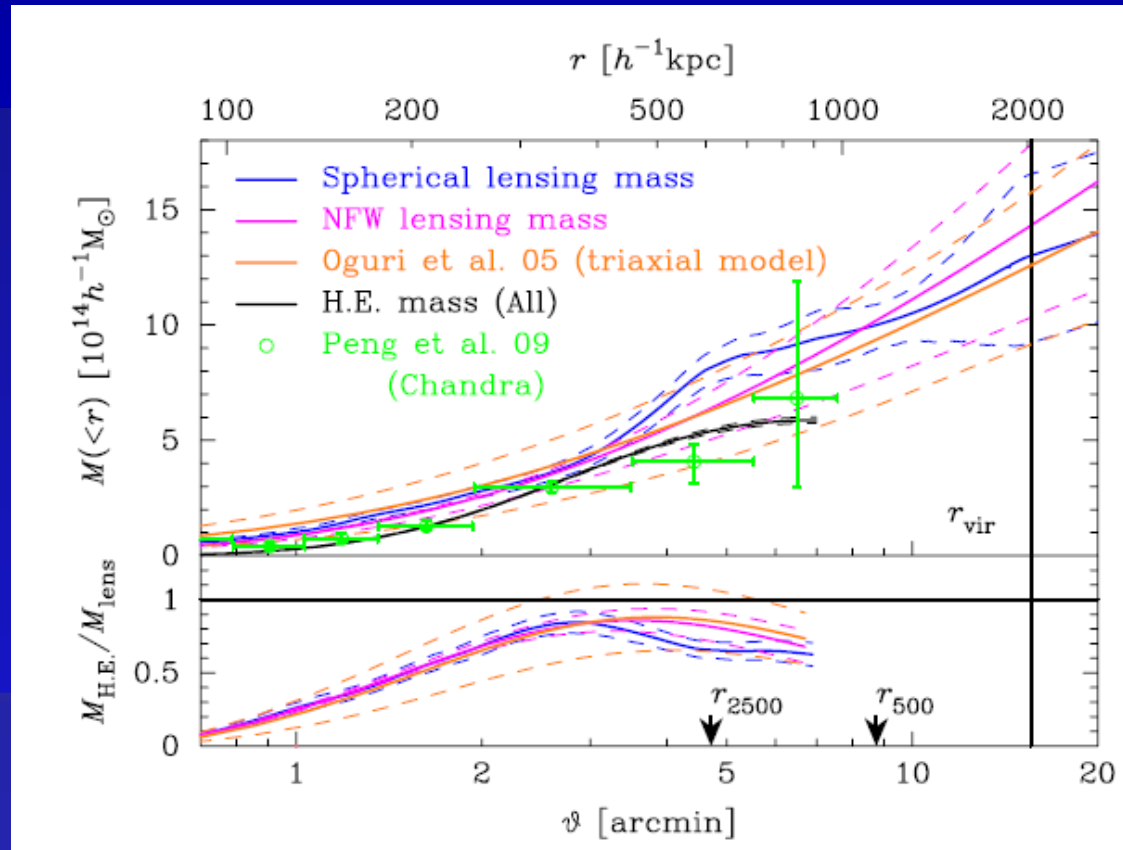
A1689周辺の銀河の個数分布  
Offset1方向に大規模構造フィラメント  
のようなものがある。



中心部:A1689の温度分布  
周辺部:銀河の個数分布(左のを拡大したもの)

# A1689

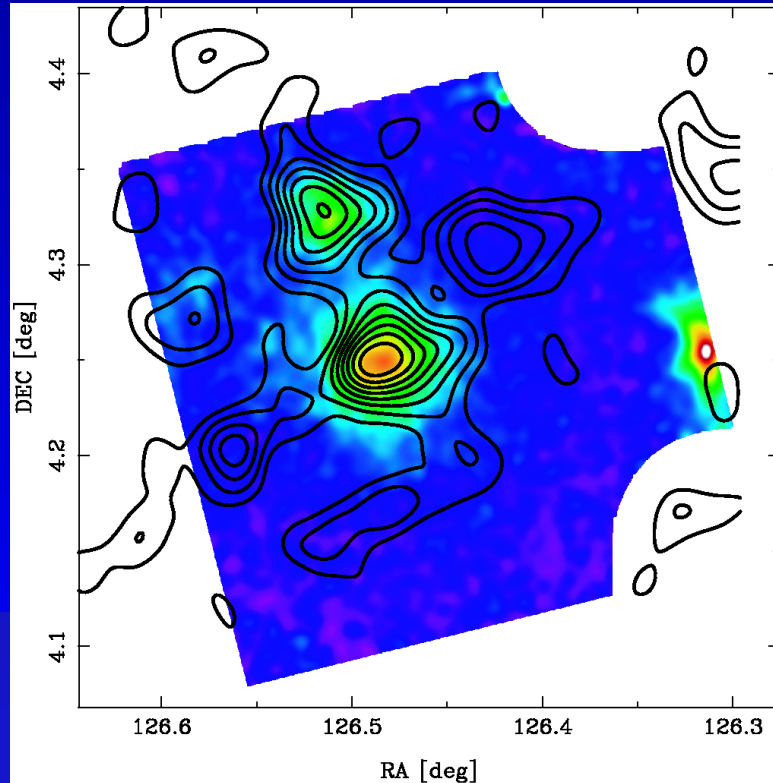
(Kawaharada, Okabe, Umetsu, Takizawa, et al. 2010)



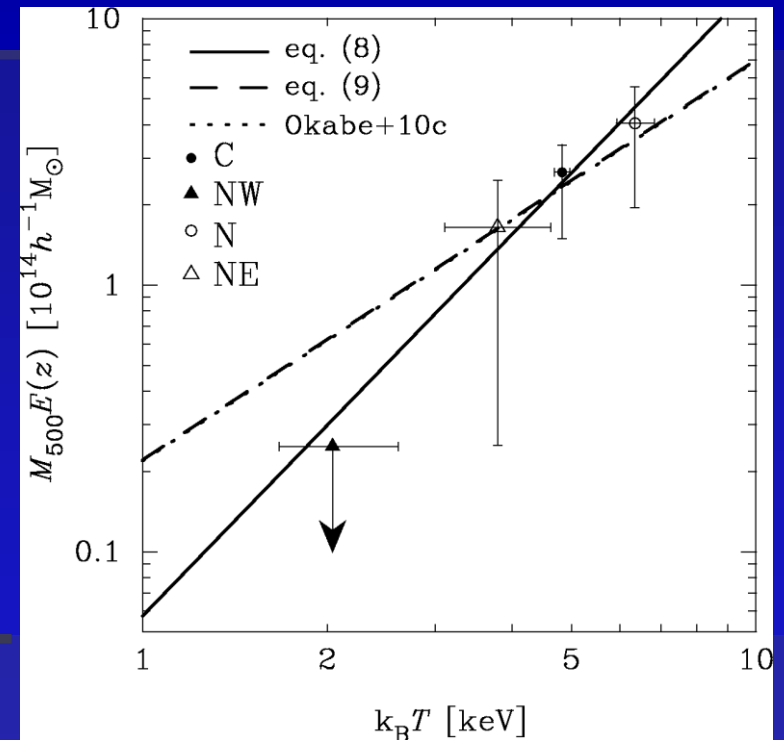
重力レンズから求めた質量と  
X線観測から静水圧平衡を仮定して求めた質量  
の比較。

図にはのっていないが外側でM(r)の非物理的な減少。静水圧平衡の明らかな破れ

# ZwCl0823.2+0425周辺領域 (Watanabe, Takizawa, et al., 2011)



重力レンズから求めた質量分布(等高線)  
すぎくXISの視野



各ハローの温度-質量関係

$$M E(z) \propto (kT)^{\{2.38+0.78, -0.95\}}$$

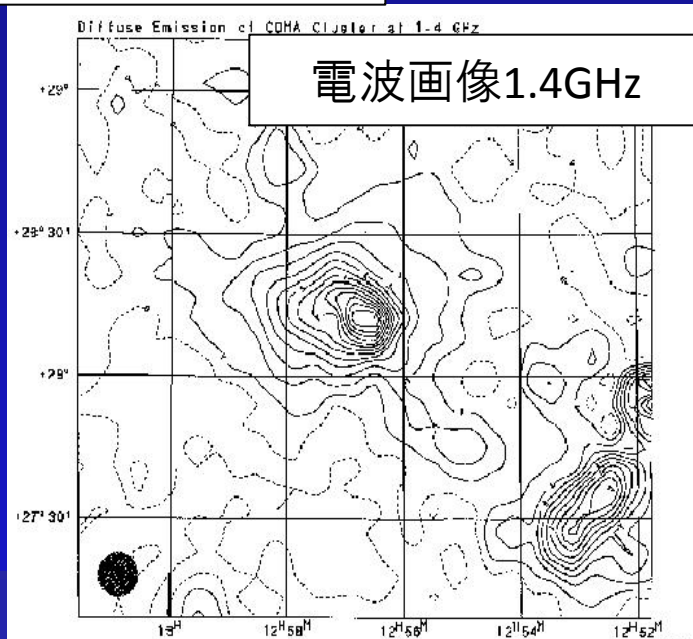
$$E(z) = (\Omega_0(1+z)^3 + \Lambda_0)^{0.5}$$

単純な self-similar model の予言では

$$M E(z) \propto (kT)^{1.5}$$

# シンクロトロン電波ハロー／レリック

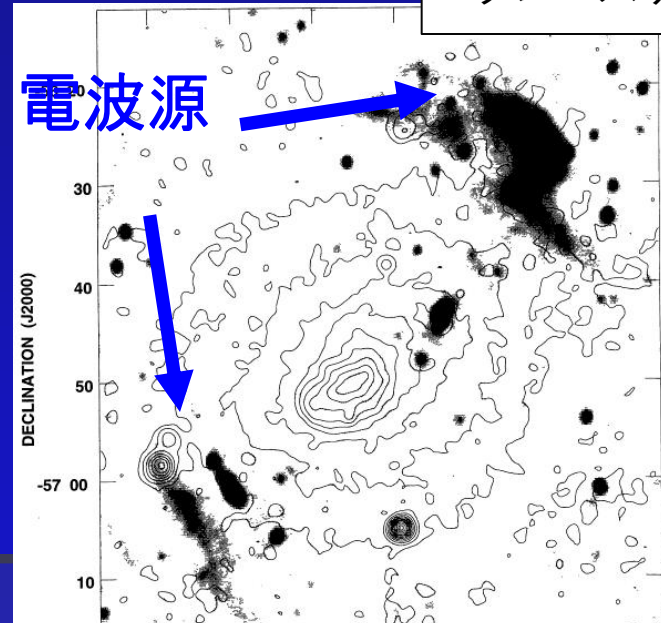
Coma Cluster



## 電波ハロー

◆ 中心から銀河団スケールにひろがる

Abell 3667



## 電波レリック

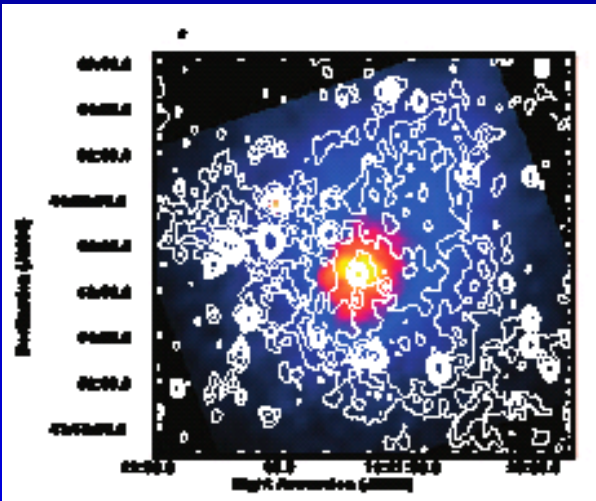
◆ 銀河団外縁部に位置する

コントア: X線  
グレースケール: 電波

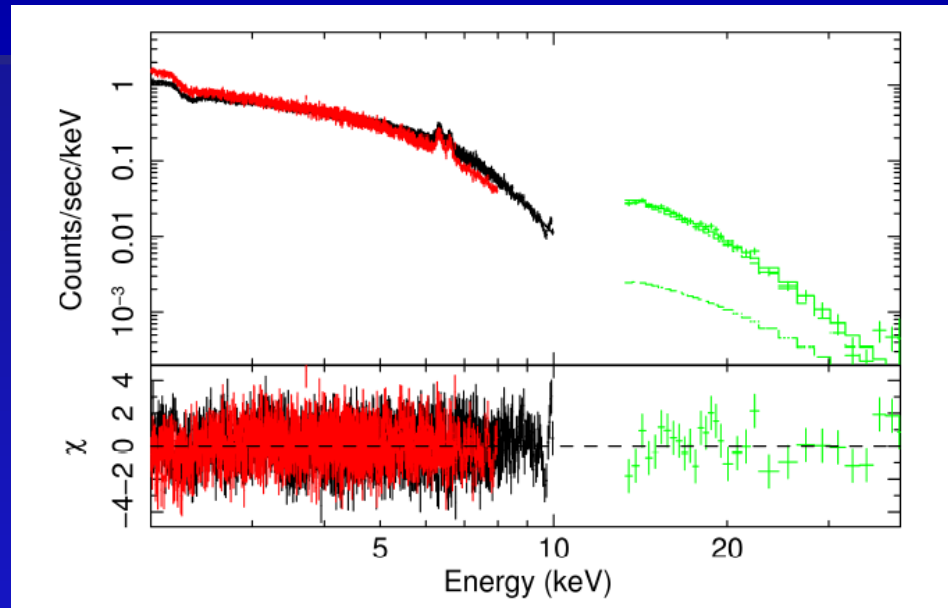
$E_e \sim \text{GeV}$ の電子がおよそ $1\mu\text{G}$ の磁場中をシンクロトロン放射しているもの

# 硬X線観測

シンクロトン放射している電子が、CMB光子を逆コンプトン散乱すると硬X線領域に出るはずだが、



A2319  
ROSAT X-ray image (colors)  
and radio image (contours)  
(Feretti et al. 1997)



A2319  
「すざく」による広帯域X線スペクトル  
(Sugawara, Takizawa, Nakazawa 2009)

これまでに明らかに硬X線領域の非熱的成分が検出された例はない!!

ASTRO-Hに期待

# 銀河団と宇宙論

- 銀河団の形成、進化---宇宙論的密度揺らぎの成長
- 銀河団の統計的性質は宇宙論に依存

(理論)

ダークハローの質量関数  $N(M)$

PS theory

宇宙論的N体simulations

(観測)

X線光度関数  $N(L_x)$

X線温度関数  $N(T_x)$

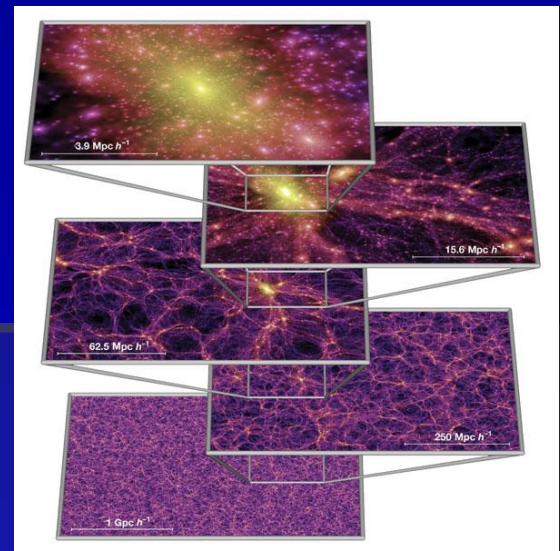
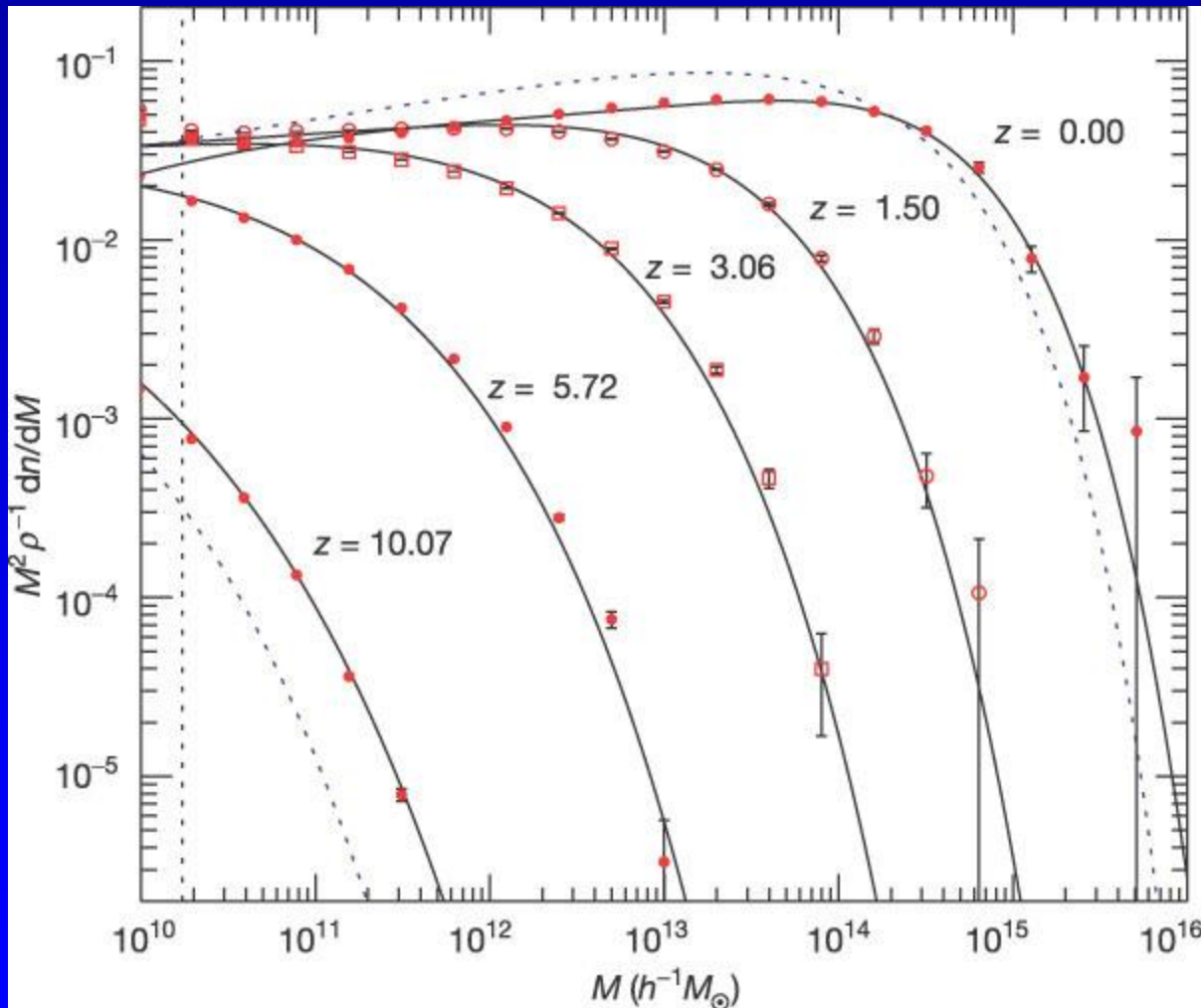
SZ強度関数  $N(Y_{SZ})$

Weak lensing だと質量関数

理論モデル、経験的な相関関係、Mass proxy



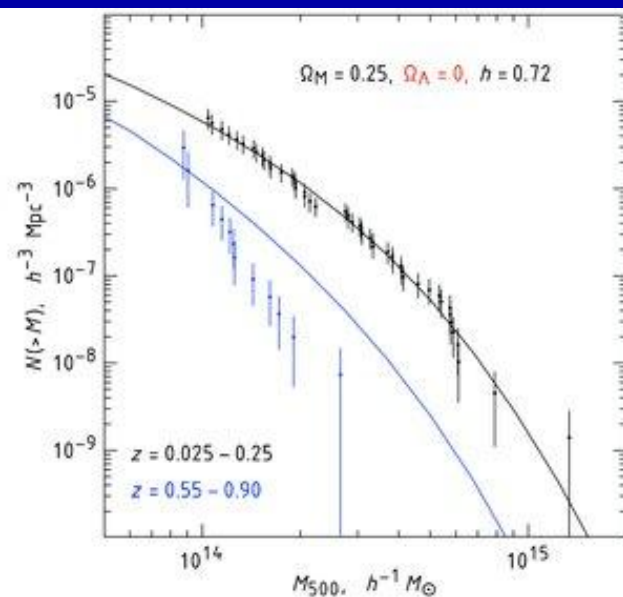
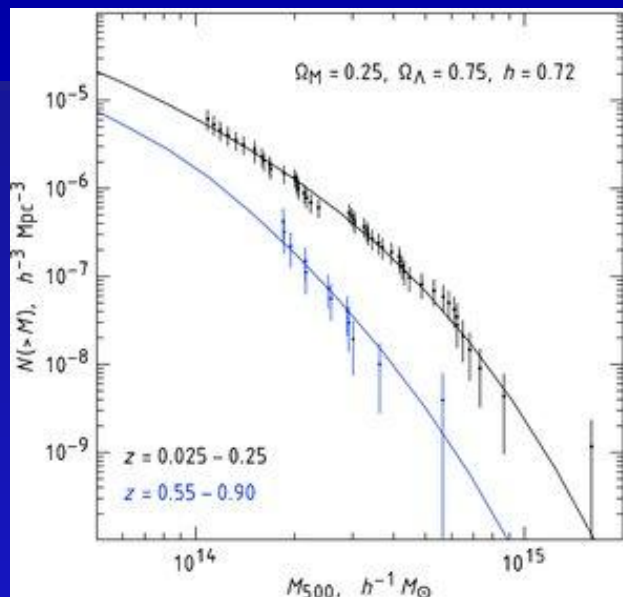
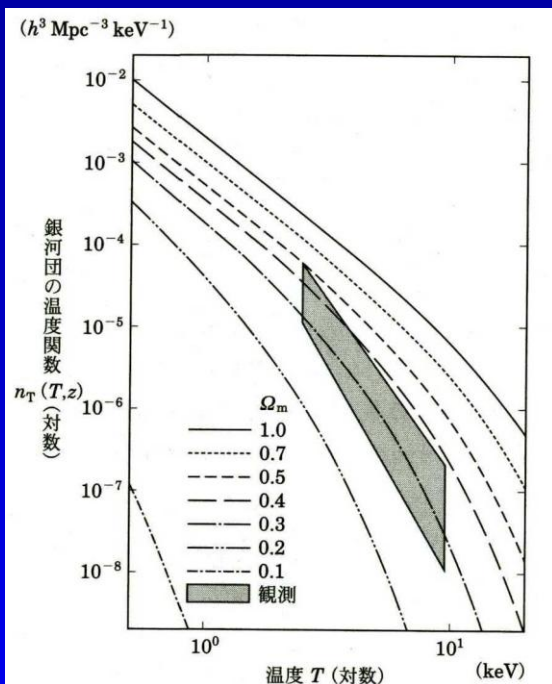
# 質量関数



ダークハローの質量関数  
PS理論(点線)と  
N体シミュレーションの比較  
(Springel et al. 2005)

銀河団は $10^{14-15}$ 太陽質量あ  
たりのダークハローに相当

# 銀河団統計による宇宙論パラメーターの制限



PS理論より予想される銀河団の温度関数と観測データとの比較 (Kitayama&Suto 1996)

$\Omega_m \sim 0.3$ が望ましいことがわかる

質量関数のredshift依存性も (Vikhlinin et al. 2009)

$\Omega_\Lambda \sim 0.75$ が望ましいことがわかる “dark energy”が必要

# 「銀河団で宇宙論」の問題点

- より精密化を目指すには、、(ex. dark energy の状態方程式に迫るetc)、より精密な銀河団自体の理解が必要
- Mass proxy の系統誤差、分散etc
- 数値シミュレーションや多波長観測によるキャリブレーション。

# まとめ

- 銀河団の姿を明らかにするには多波長観測が必須
  - 銀河団ガス---X線、SZ効果
  - 暗黒物質---重力レンズ(可視光)
  - 高エネルギー粒子---電波、将来的には硬X線
- X線+重力レンズで構造形成の現場を見る。
- 銀河団の統計で $\Omega_m$ ,  $\Omega_\Lambda$ がわかってきたが、さらに高精度にするには銀河団自体のさらなる理解が必須。