

Universal Profiles of the Intracluster Medium from Suzaku X-Ray and Subaru Weak Lensing Observations

N. Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, Y. Fujita, M. Takizawa, Y. -Y. Zhang,
K. Matsushita, T. Hamana, Y. Fukazawa, T. Futamase, M. Kawaharada,
S. Miyazaki, Y. Mochizuki, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, T. Sasaki,
K. Sato, and S. I. Tam, (2014) PASJ, 66, 99

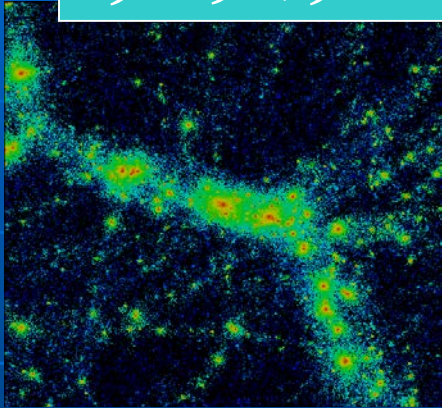
滝沢元和

2016.5.20 研究室談話会

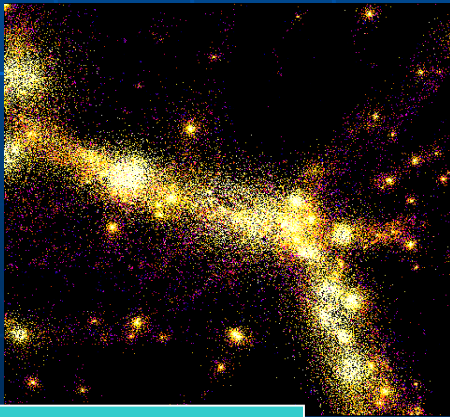
Introduction

Yoshikawa et al. (2003)

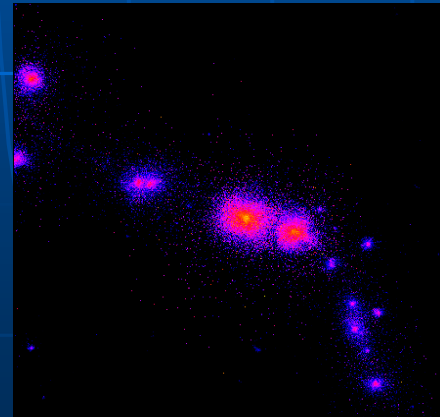
ダークマター



銀河



銀河間ガス
(10^5 K)



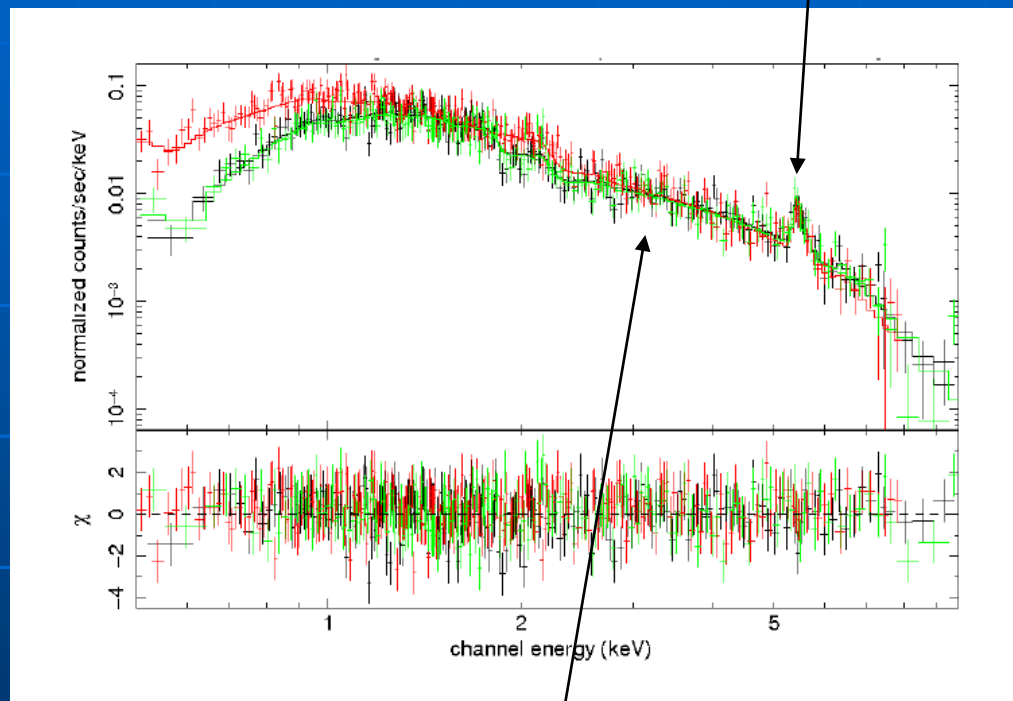
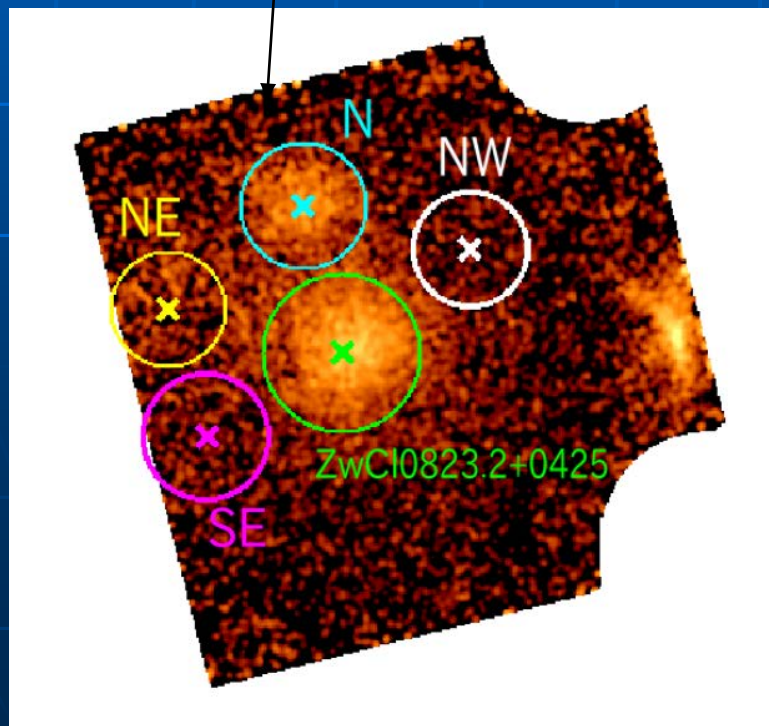
銀河団ガス
(10^7 K)

- 標準的な構造形成理論によれば、宇宙の構造は小さなものから大きなものへ (bottom up scenario)
 - Cold Dark Matter
 - Dark Halo, filaments (重カレンズ)
 - バリオン (CDMの重力ポテンシャルで加熱)
 - 一部は冷えて銀河、星へ (可視赤外)
 - 大部分は高温ガスに (X線)

X線で見える銀河団

重元素の輝線
→重元素量、赤方変位、
ドップラー変位

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



連続成分の形
→温度

重力レンズ: strong lensing

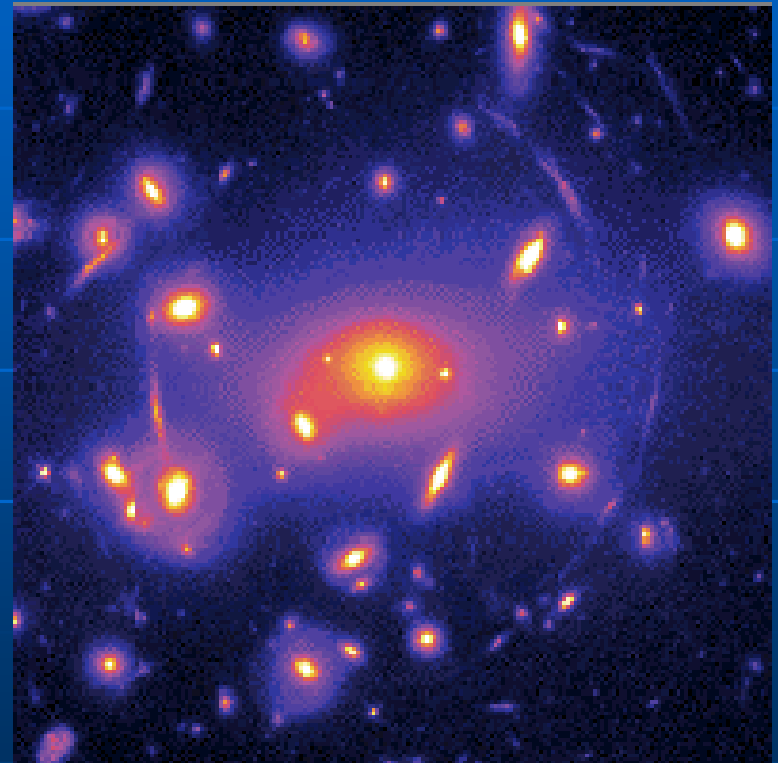
特別な条件がそろえば円弧状の多重像が観測される

たとえば、軸対象レンズならば、アーク内の平均面密度がちょうど Σ_{cr} のとき。したがってレンズとソースのred shift がわかればアーク内の総質量が求まる

$$M_{\text{lens,arc}}(r < r_{\text{arc}}) = \pi r_{\text{arc}}^2 \Sigma_{\text{cr}}$$

ただし、アーク内部の質量分布や、アークの外の質量は直接はわからない。

非軸対象の場合もだいたい同じ



A2218銀河団とアーク

重力レンズ: weak lensing

アークがない領域でも背景銀河は重力レンズ効果を受けている。

背後に丸い(円)天体があれば下図のようにゆがめられる。楕円の離心率にはレンズ天体の質量分布の情報が入っているはず。

しかし、実際の天体(銀河)は丸くない、、、

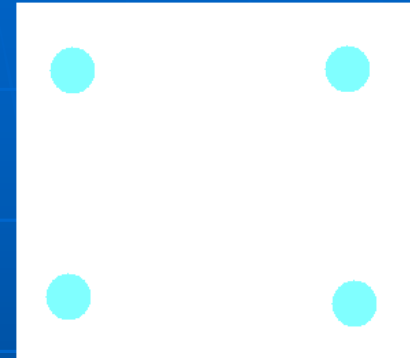
が、楕円の長軸方向はランダムに分布し平均的には離心率ベクトルは0。

背景銀河の平均的な離心率ベクトルをはかって質量分布を再構成

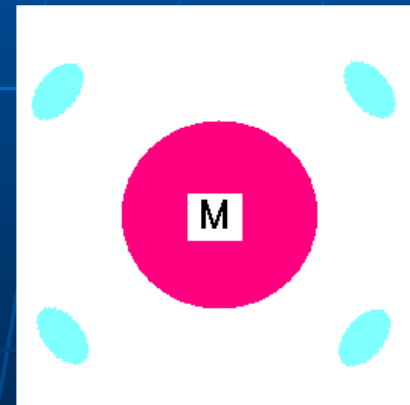
Non-parametricに質量”分布”が求まる。

Mass sheet degeneracy の問題

→strong lensing と組み合わせることで解決

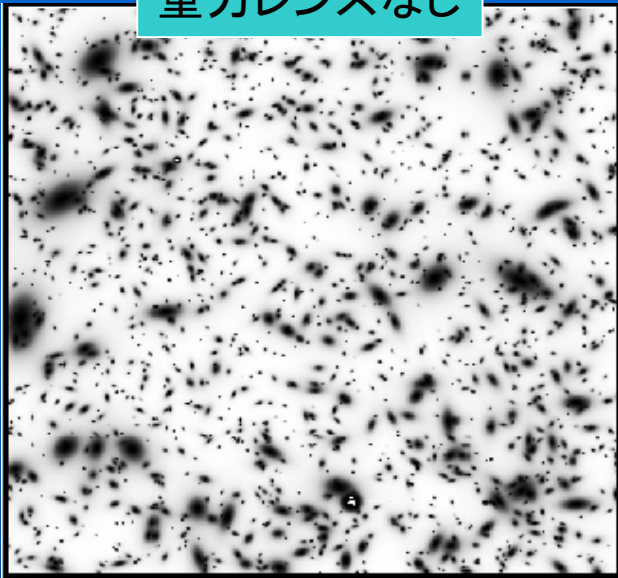


lens なし



lens あり

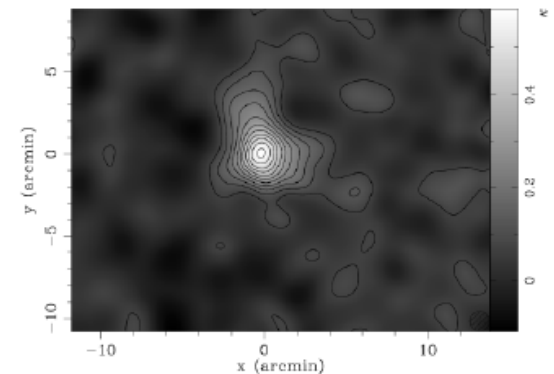
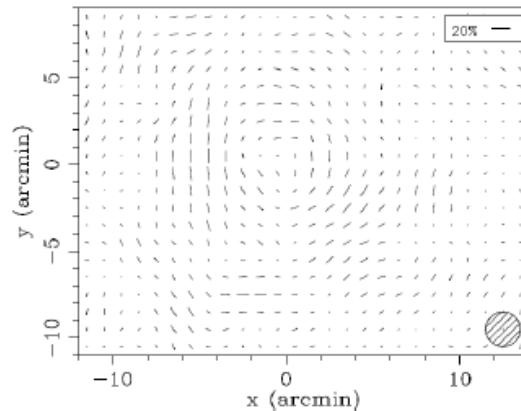
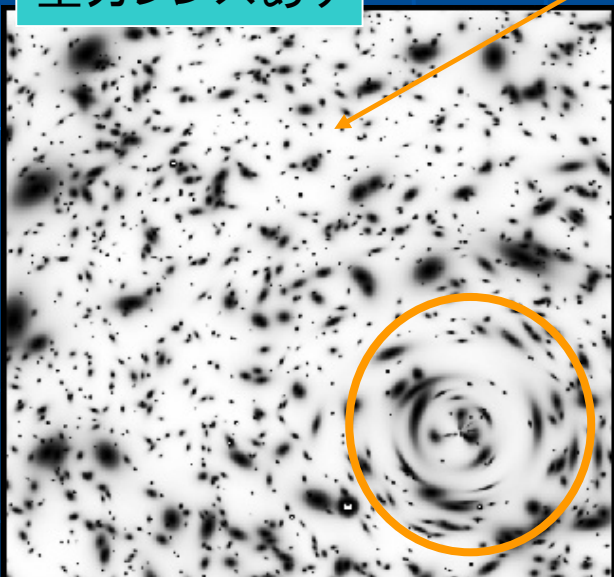
重カレンズなし



(弱い) 重カレンズ

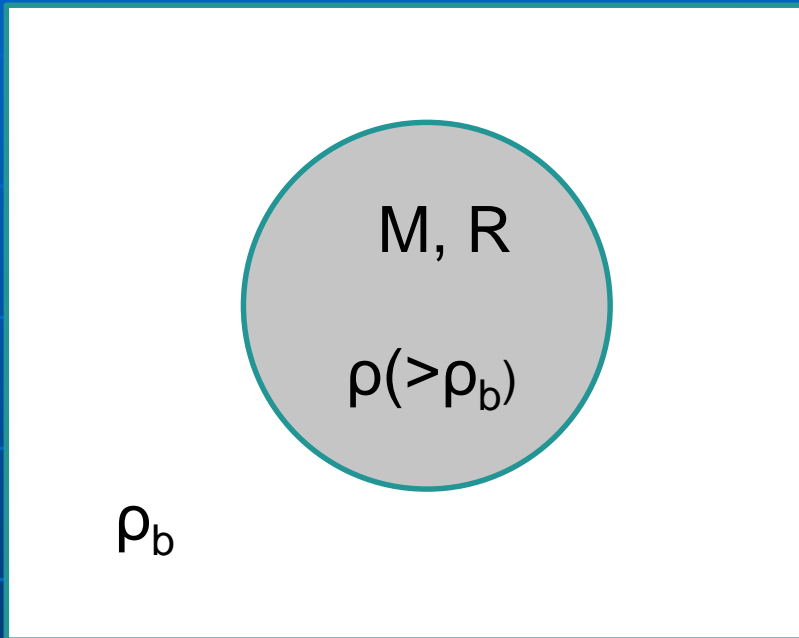
実はこのあたりにある銀河も
重カレンズ効果をうけて少しづつ
ゆがんでいる。
多数の銀河のゆがみ具合の平均
をとることで、重カレンズ効果を
検出できる

重カレンズあり



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

球対称密度揺らぎモデル



球状の高密度領域を考えると、

$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{GM}{R^2}$$

これは解析的に解けて、 $R(t)$ はサイクロイド解になる。

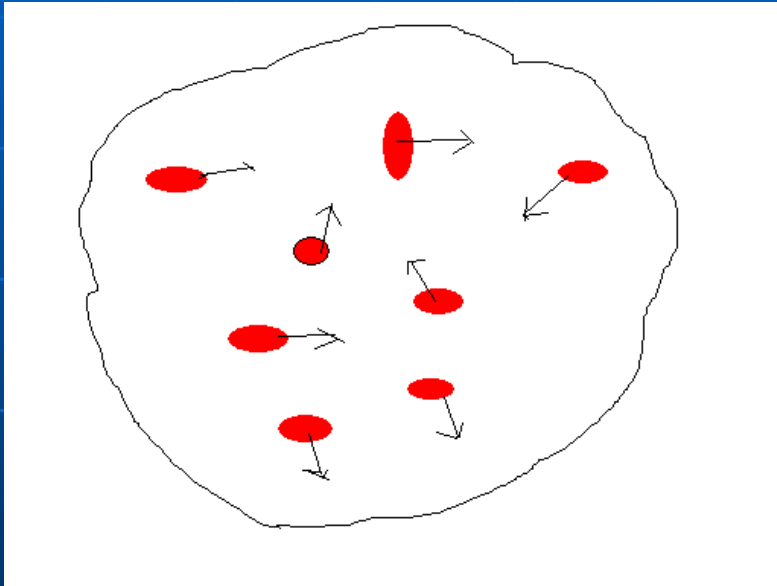
$$\begin{cases} R = A^2(1 - \cos \theta) \\ t = \frac{A^3}{\sqrt{GM}}(\theta - \sin \theta) \end{cases}$$



$\theta = 2\pi$ で $R=0$ で密度無限大？

ヴィリアル半径、ヴィリアル質量

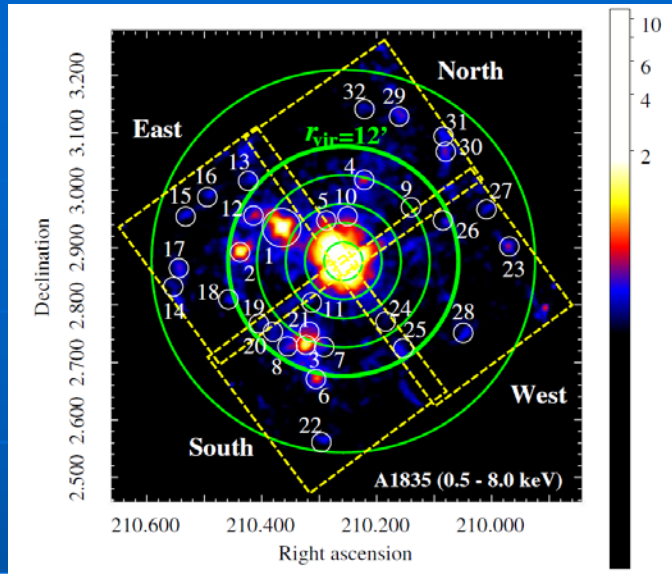
- 実際には力学平衡から決まるある半径 r_{vir} に落ち着くであろう。
- $K+W=(\text{一定})$ (無散逸を仮定)
- $2K+W=0$ (ヴィリアル定理)
- 結果として、 r_{vir} より内側の平均密度は、天体形成時の宇宙の臨界密度の約180倍となる。
- 実際には r_{200} (内側の平均密度が臨界密度の200倍)などがよく使われる。
- $M_{200} = 200 \rho_{\text{crit}} (4\pi/3) (r_{200})^3$
(r_{200} の内側に含まれる質量)



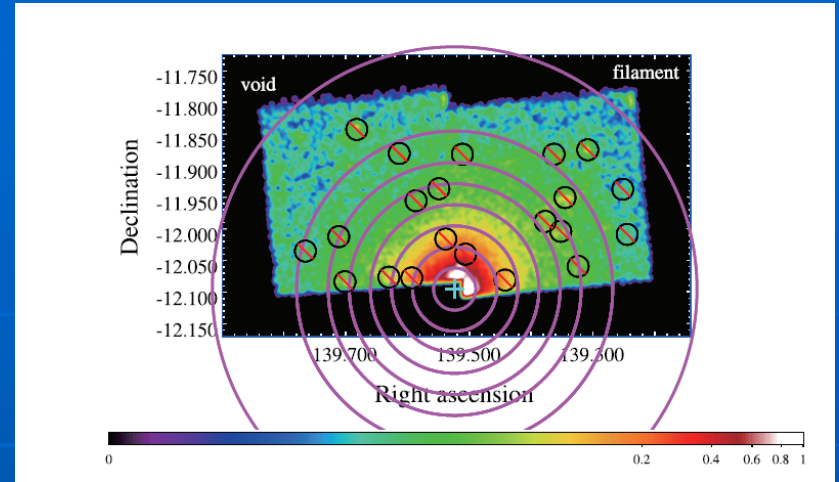
サンプルと観測目的

Name	z	L_X [10^{45}ergs^{-1}]	$\langle k_B T \rangle$ [keV]	M_{200} [$h_{70}^{-1} 10^{14} M_\odot$]	<i>Suzaku</i>	<i>XMM-Newton/Chandra</i>
Hydra A	0.0538	0.27	3.0	$3.72^{+2.11}_{-1.44}$	Sato et al. (2012)	David et al. (2001)
A 478	0.0881	0.72	7.0	$13.05^{+4.12}_{-3.30}$	Mochizuki et al. (2014)	Sanderson et al. (2005)
A 1689	0.1832	1.25	9.3	$16.73^{+4.88}_{-3.44}$	Kawaharada et al. (2010)	Zhang et al. (2007)
A 1835	0.2528	1.97	8.0	$10.35^{+2.80}_{-2.40}$	Ichikawa et al. (2013)	Zhang et al. (2007)

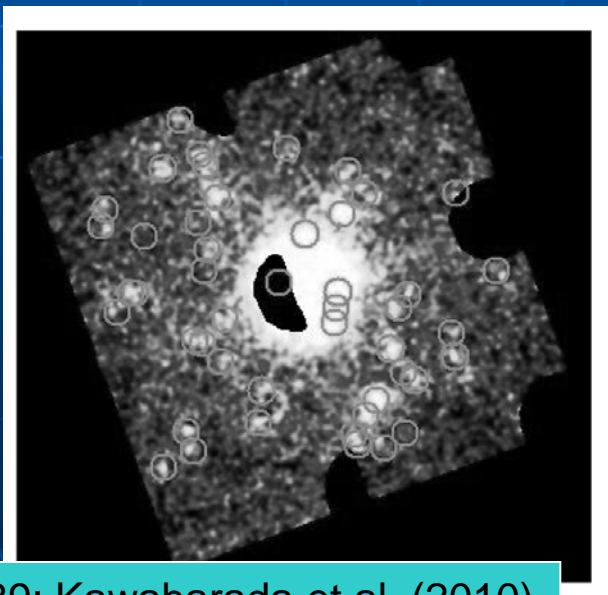
- 力学平衡に達した銀河団では、系のサイズに応じて適当にスケールしたならば普遍的な温度分布、密度分布、etcが得られないだろうか？
- すざく(X線)とすばる(弱重力レンズ)の両者で観測しやすく($z \sim 0.1$)、力学的に緩和していき、質量の範囲をそれなりにとりたい。



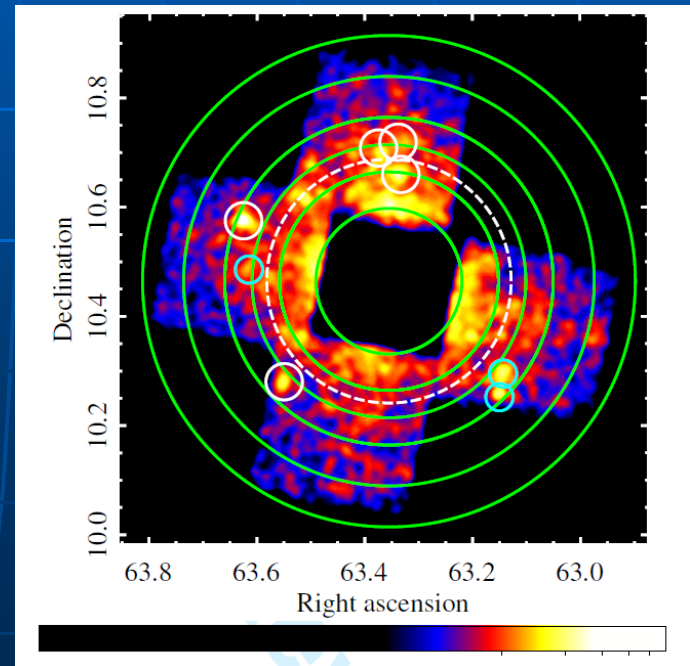
A1835: Ichikawa et al. (2013)



HydraA: Sato et al. (2012)

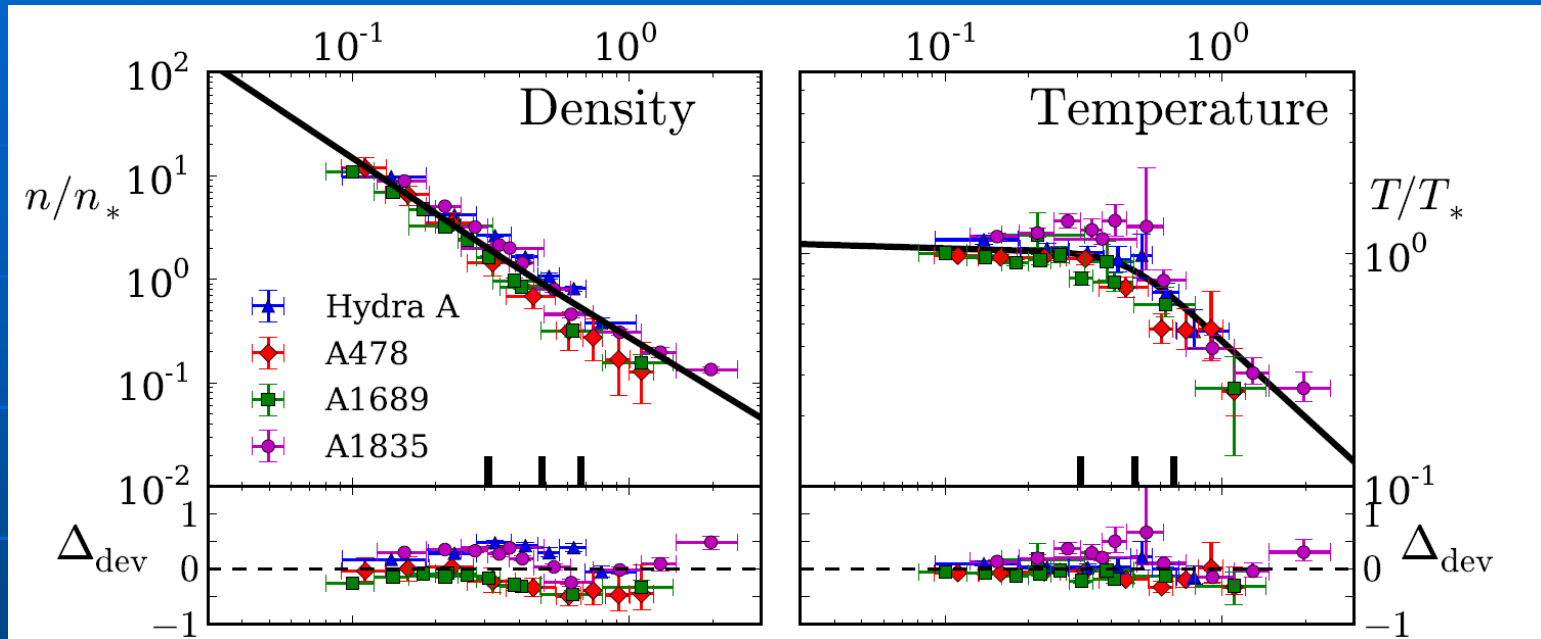


A1689: Kawaharada et al. (2010)



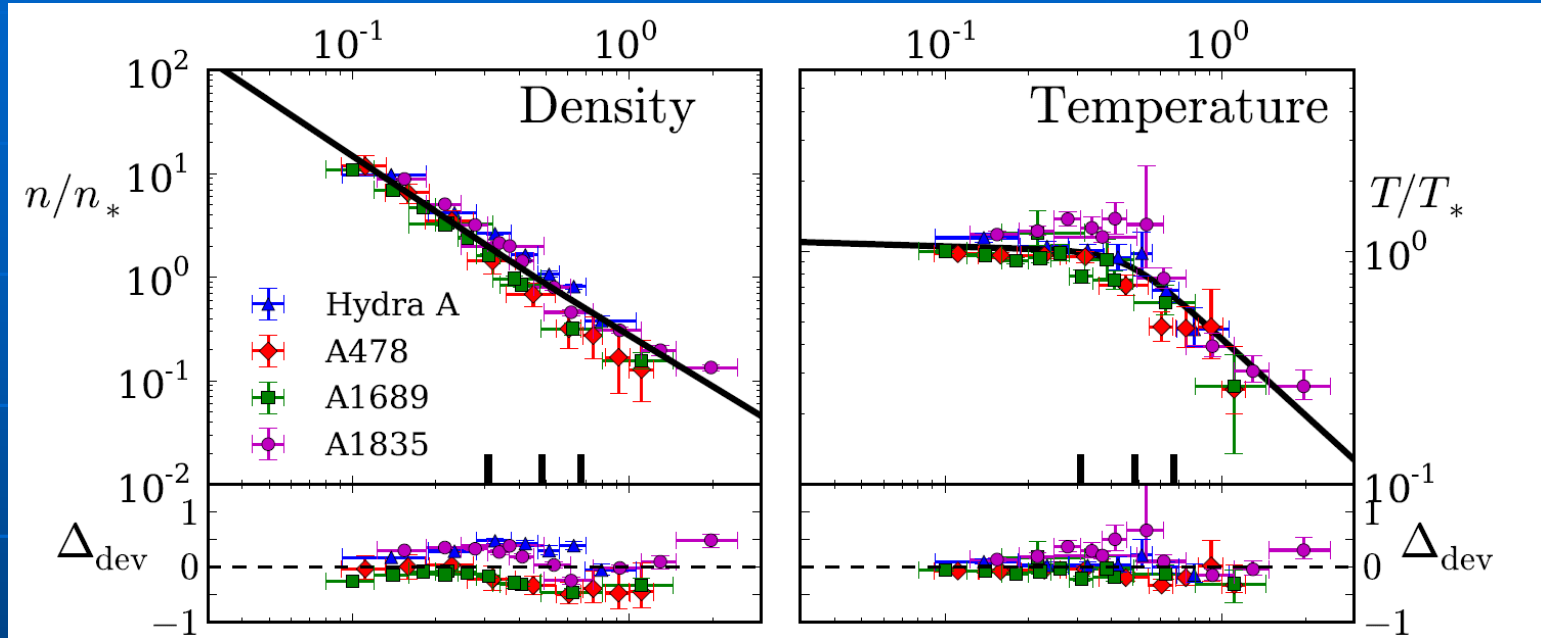
A478: Mochizuki et al. (2016??)

ガス密度と温度の普遍プロファイル



- 半径方向は r_{200} で規格化(質量のみの関数)
- n_* , T_* は M_{200} のべき乗(質量のみの関数)

ガス密度と温度の普遍プロファイル



$$f_n = n_0 E(z)^2 \left(\frac{M_\Delta E(z)}{10^{14} h_{70}^{-1} M_\odot} \right)^{\frac{3}{5}(b-a)}$$

$$\times (\tilde{r}/\tilde{r}_0)^{-\frac{3}{5}(\alpha+\gamma)} (1 + (\tilde{r}/\tilde{r}_0)^\beta)^{-\frac{3}{5}(\delta-\gamma-\alpha)/\beta},$$

$$f_T = T_0 \left(\frac{M_\Delta E(z)}{10^{14} h_{70}^{-1} M_\odot} \right)^{\frac{3}{5}a + \frac{2}{5}b}$$

$$\times (\tilde{r}/\tilde{r}_0)^{\frac{3}{5}\alpha - \frac{2}{5}\gamma} (1 + (\tilde{r}/\tilde{r}_0)^\beta)^{-(\frac{2}{5}\delta - \frac{2}{5}\gamma + \frac{3}{5}\alpha)/\beta},$$

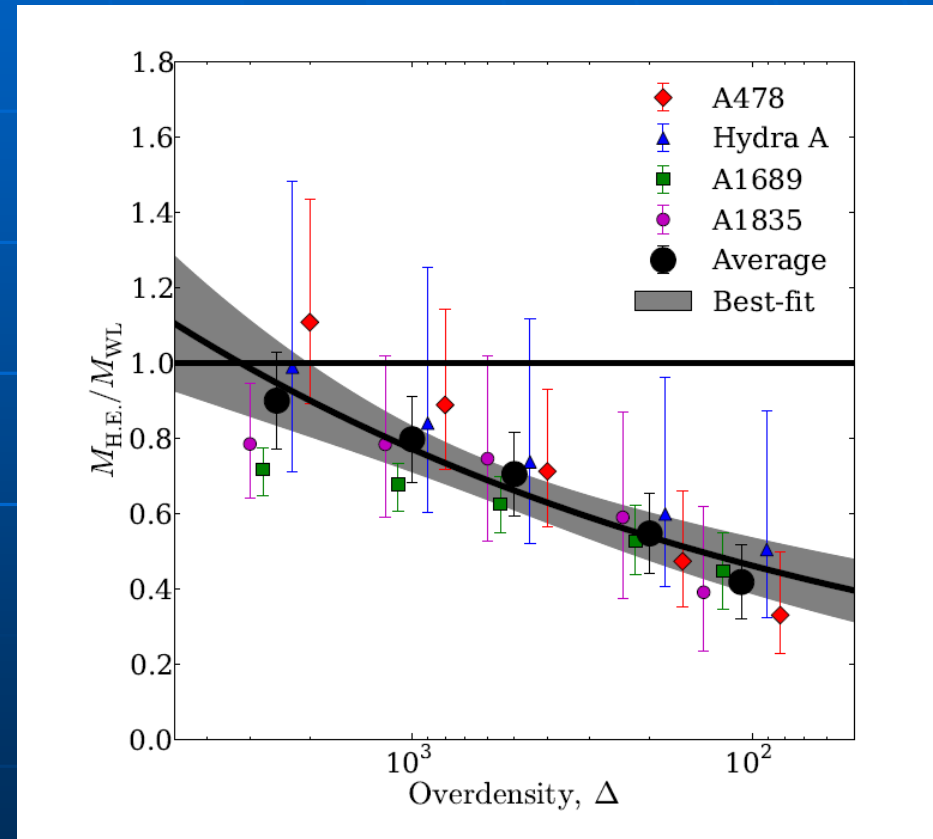
$\log_{10}(n_0)$	T_0	a	b	α	β
$\log_{10}(1\text{cm}^{-3})$	[keV]				
$-3.60^{+0.15}_{-0.14}$	$1.27^{+0.24}_{-0.19}$	2/3 (fixed)	2/3 (fixed)	$1.16^{+0.17}_{-0.12}$	$5.52^{+2.87}_{-2.64}$
γ	δ	r_0	$\sigma_{\ln n}$	$\sigma_{\ln T}$	ρ
		[r_{200}]			
$1.82^{+0.28}_{-0.30}$	$2.72^{+0.34}_{-0.35}$	$0.45^{+0.08}_{-0.07}$	$0.22^{+0.05}_{-0.04}$	$0.07^{+0.06}_{-0.04}$	> 0.49

静水圧平衡のテスト

- 重力レンズからは直接質量が求まる: M_{WL}
- 静水圧平衡を仮定しても質量が求まる: M_{HE}

$$M_X(r) = -\frac{k_B T_{\text{sl}} r}{G \mu m_p} \left(\frac{d \ln \rho_g}{d \ln r} + \frac{d \ln T_{\text{sl}}}{d \ln r} \right)$$

- 両者を比較。
- 明らかに外側では静水圧平衡は破れている。

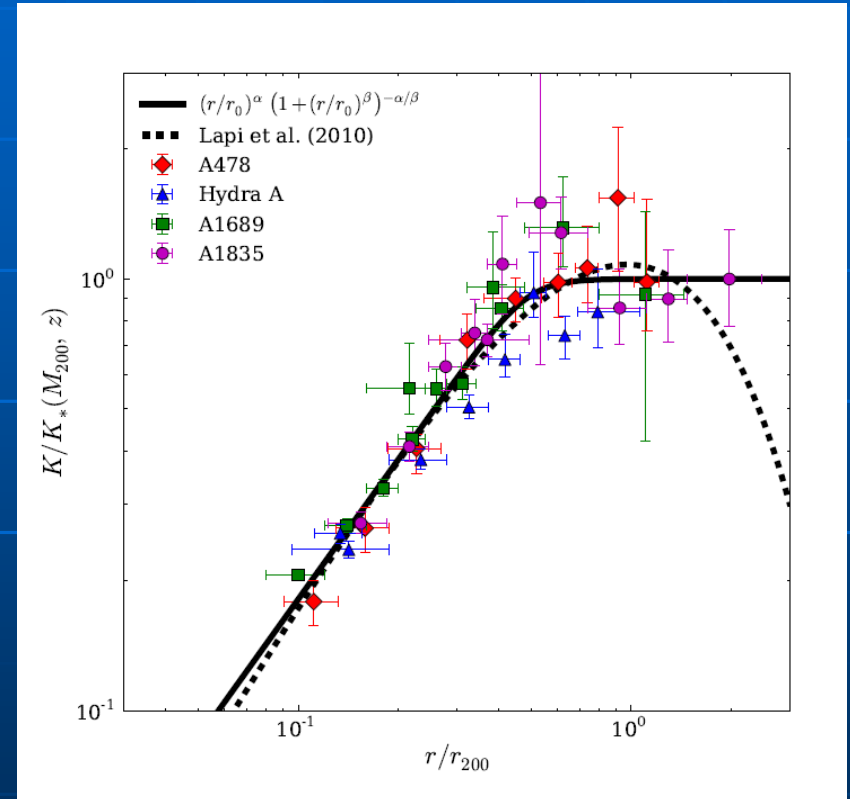


エントロピーの普遍プロファイル

- 正確には擬エントロピー

$$K = k_B T / n_e^{2/3}$$

- 重力エネルギーが効率的に熱エネルギーに変換されていればおおよそ $K \propto r$ (Tozzi&Norman 2001)
- 外側ではずれ。静水圧平衡からずれていることと矛盾はない。

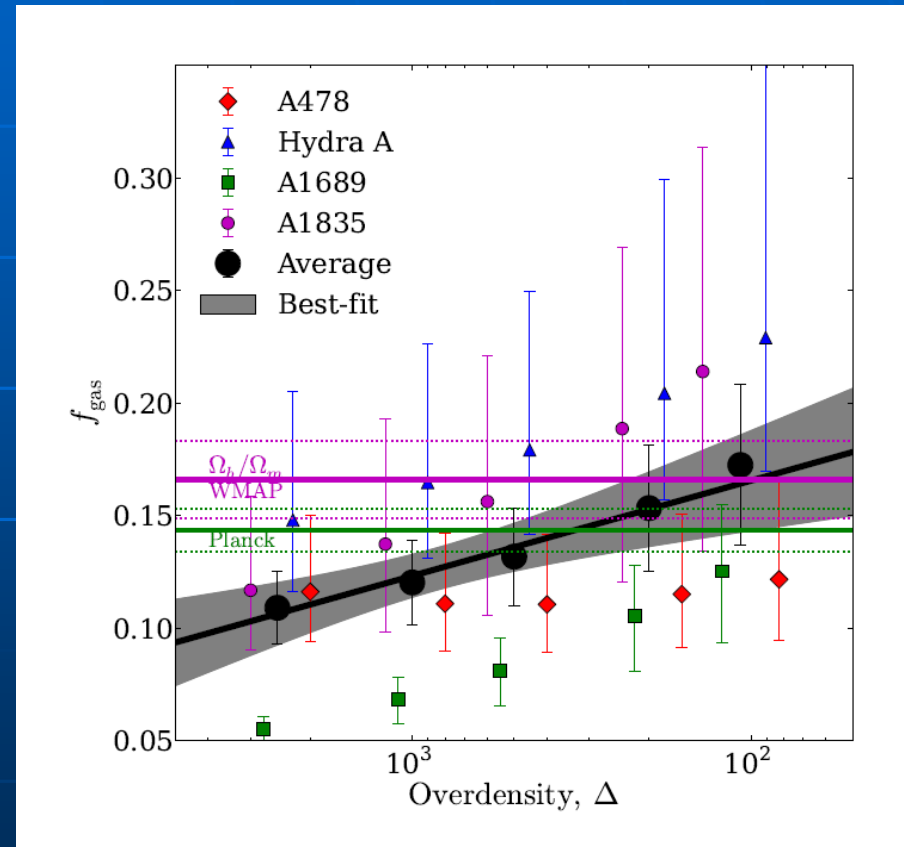


f_{gas} (ガス質量/総質量)

- M_{WL} を使って f_{gas} を求めてみた。
- 結構ばらつくが。
- 外側までいけば宇宙平均と矛盾はない。

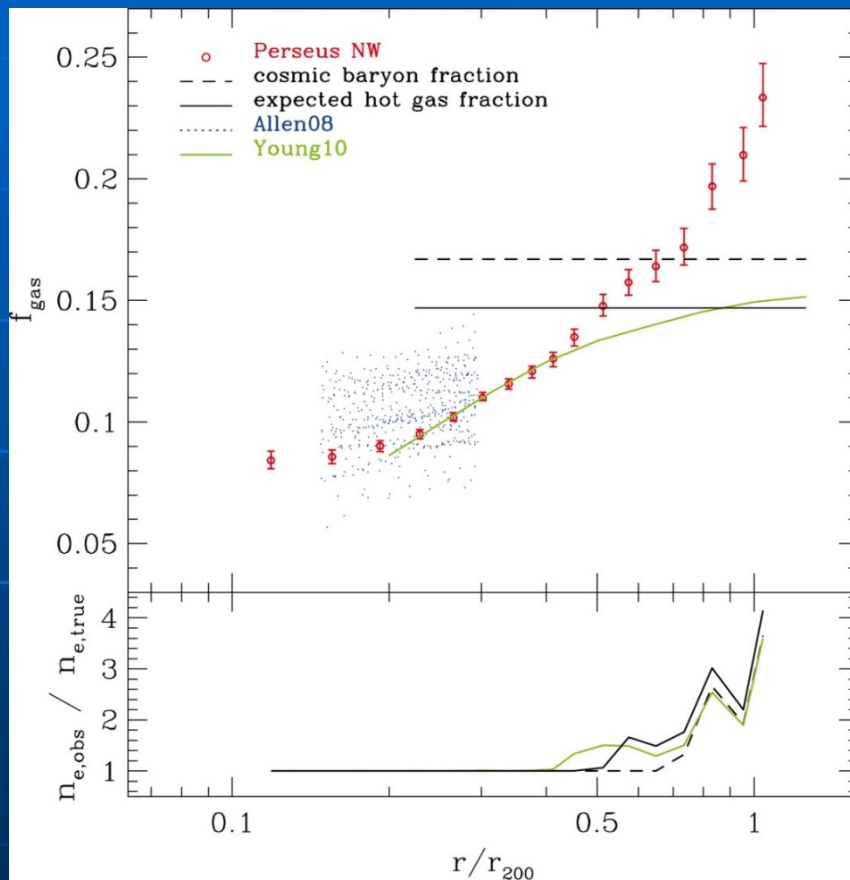
——>

銀河団内ではガスの方が広がっている (or DM のほうが中心集中している) が、全体的には宇宙の平均と同じ。



Perseus Clusterでの f_{gas}

注: 2011.7.15 談話会より (Simionescu et al. 2011)



- f_{gas} (ガス質量/総質量)が r_{200} 付近で宇宙平均を上回る??
- ガスがclumpyなため、ガス密度を過大評価していると主張。(X線から直接求まるのは $\langle n^2 \rangle$ で $\langle n \rangle$ ではない)
- ただ、総質量を静水圧平衡から求めている。総質量を過小評価している可能性は高い。

やっぱりね、、いわんこっちゃない。

まとめ

- 力学的に緩和した4銀河団をすざく(X線)とすばる(可視光&弱重力レンズ)で観測した。
- (弱重力レンズで決めた)質量でスケールすることで普遍的なガス温度、ガス密度分布を得た。
- 外側で静水圧平衡が破れていること、エントロピーの上昇が止まることを確認した。
- f_{gas} は銀河団全体では宇宙平均と矛盾はない。ただし、静水圧平衡で求めた質量を使うと見かけじょう宇宙平均を超える。