

# **A Cool core disturbed: Observational evidence for coexistence of sub-sonic sloshing gas and stripped shock-heated gas around the core of RX J1347.5-1145**

滝沢元和

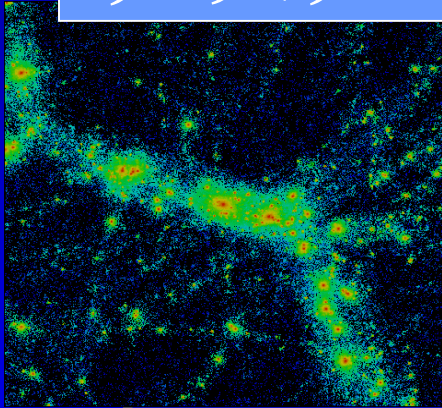
山形大宇宙グループ談話会(2019.5.20)

S. Ueda, T. Kitayama, M. Oguri, E. Komatsu, T. Akahori, D. Iono, T. Izumi, R. Kawabe, K. Kohno, H. Matsuo, N. Ota, Y. Suto, S. Takakuwa, M. Takizawa, T. Tsutsumi, K. Yoshikawa  
*The Astrophysical Journal* (2018) 866, 48

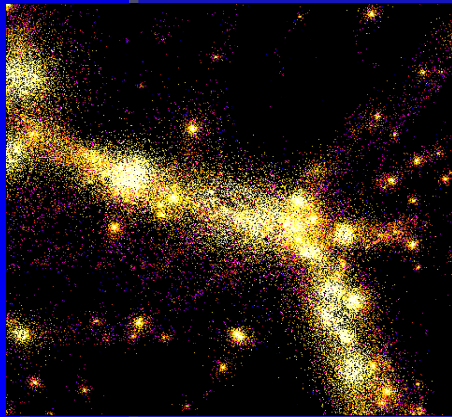
# Introduction

Yoshikawa et al. (2003)

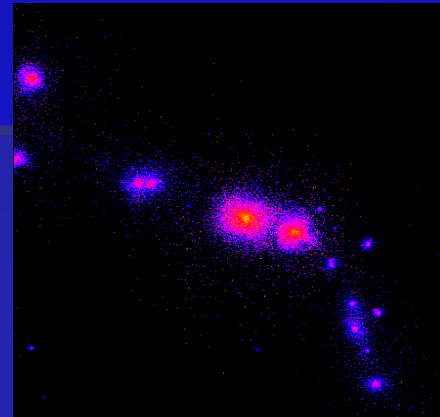
ダークマター



銀河



銀河間ガス  
( $\sim 10^5$  K)

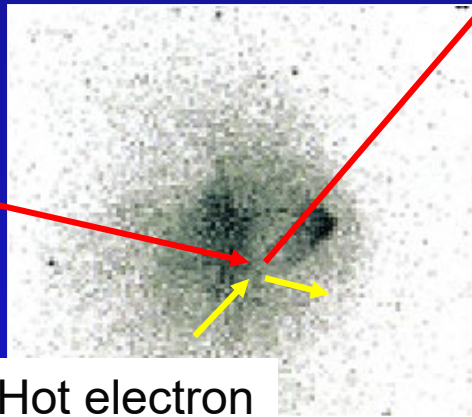


銀河団ガス  
( $\sim 10^7$  K)

- 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
  - 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
    - 大部分は高温ガスに (X-ray, Sunaev-Zel'dovich効果)

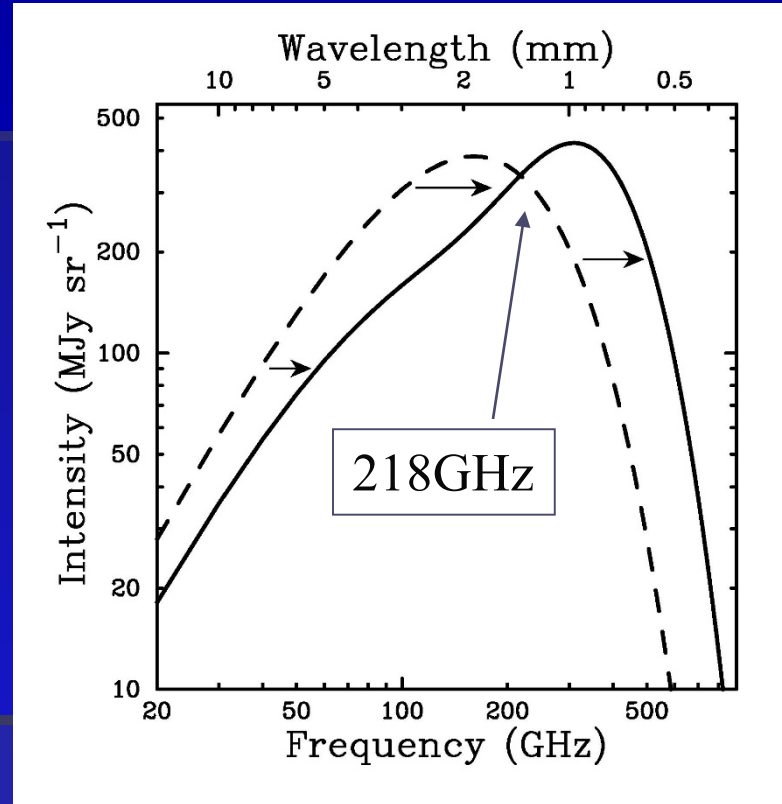
# Sunyaev-Zel'dovich Effect (SZE)

逆コンプトン散乱



Hot electron  
(10<sup>7-8</sup>K)

CMB光子  
(2.7K  
black body)

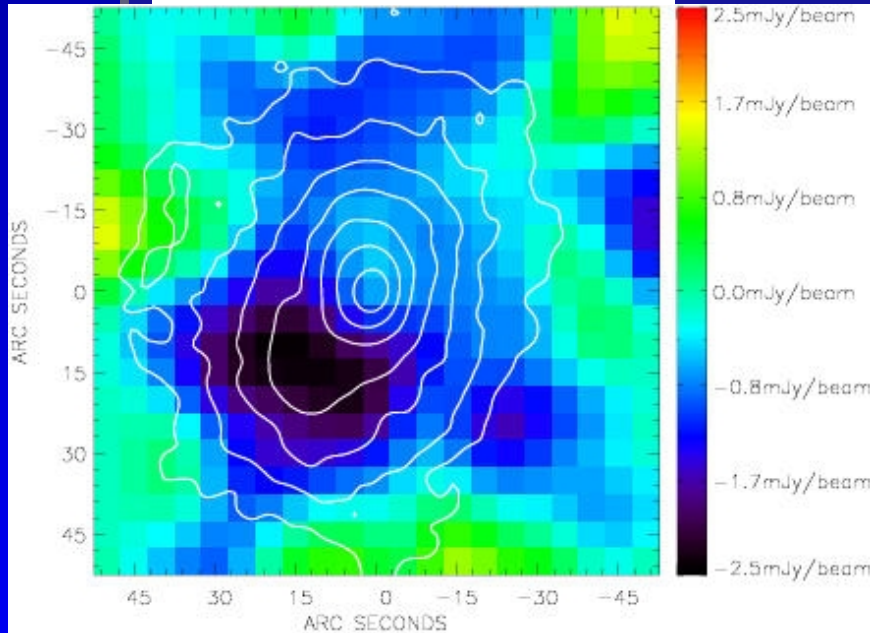


銀河団などの高温ガスによる逆コンプトン散乱で  
Cosmic Microwave Background (CMB) のスペクトルが変形。

- ミリ波帯 (R-J側) では decrement
- サブミリ波帯 (Wein側) では increment

# SZE vs X-ray maps of RX J1347.5-1145

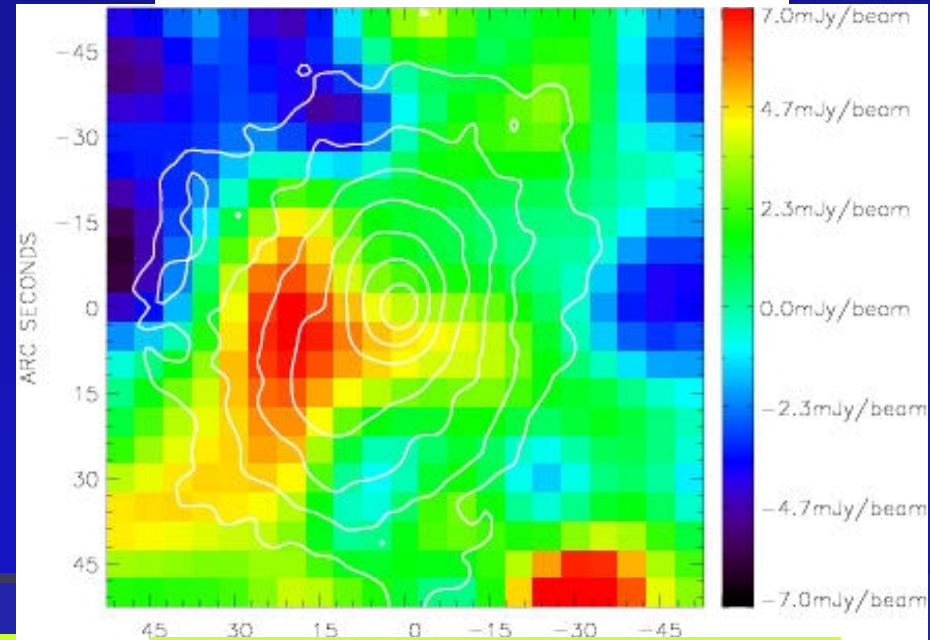
ミリ波 (decrement)



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

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

サブミリ波 (increment)



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



# Thermal, Kinematic, and others

- Thermal SZE: Maxwell分布をした熱電子によるCMBスペクトルの変形。(Sunyaev&Zel'dvich 1972)

-----今回の話題はここまで-----

- Kinematic SZE: CMBに対するガス雲の運動によるCMBスペクトルの変形(Sunyaev&Zel'dvich 1980)

-----普通はせいぜいここまで-----

- Non-thermal SZE: 非熱的電子による  
(Blasi et al. 2000, Colafrancesco et al. 2003など)
- Grad-T SZE: 熱伝導による (Hattori&Okabe 2005)

# (Thermal) SZE 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、SZEは圧力構造の良いprobe。

両者を組み合わせるとイメージングデータのみから  
温度の情報を求められる

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

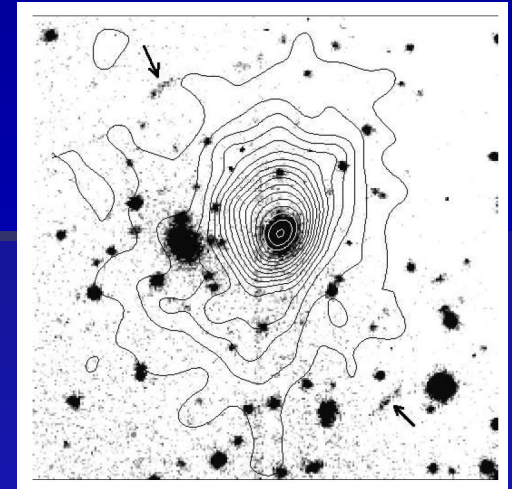
$$I_{SZ} \propto (1+z)^0 \quad (U_{CMB} \propto (1+z)^4 \text{ のため})$$

high z object にはSZEが相対的に有利

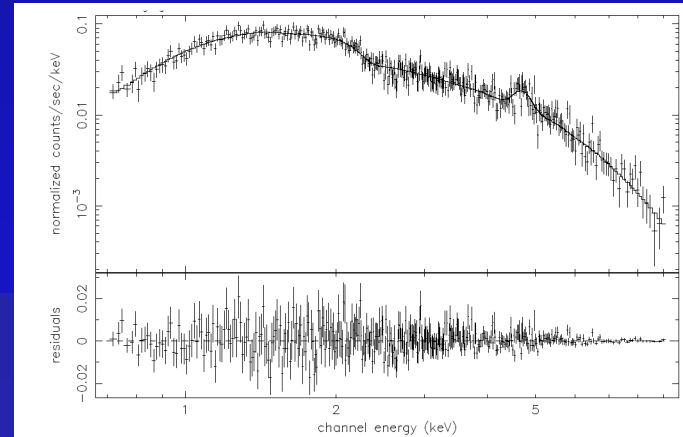
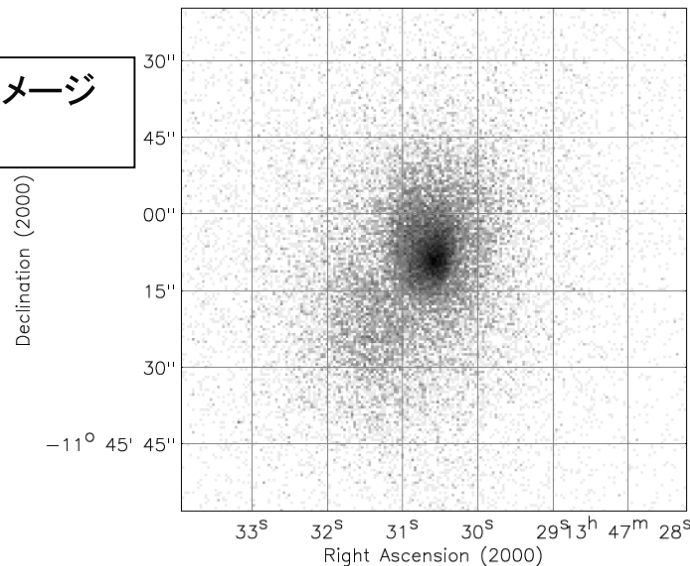
# RXJ1347.5-1145

- 発見された当時としては最も $L_x$ の大きい銀河団( $L_{bol}=2 \times 10^{46}$ erg/s)。
- ROSATによる観測ではガスの空間分布はcooling flow 銀河团的(中心集中度が高くほぼ円形)。
- 一方、ASCAで温度は高め(kT  $\sim$  11keV)
- その後、Chandra、XMMによって南東方向に伸びたsubstructureが見つかる(major merger cluster?)

等高線:X線(ROSAT)  
(Schindler et al. 1997)



Chandra によるX線イメージ  
(Allen et al. 2002)

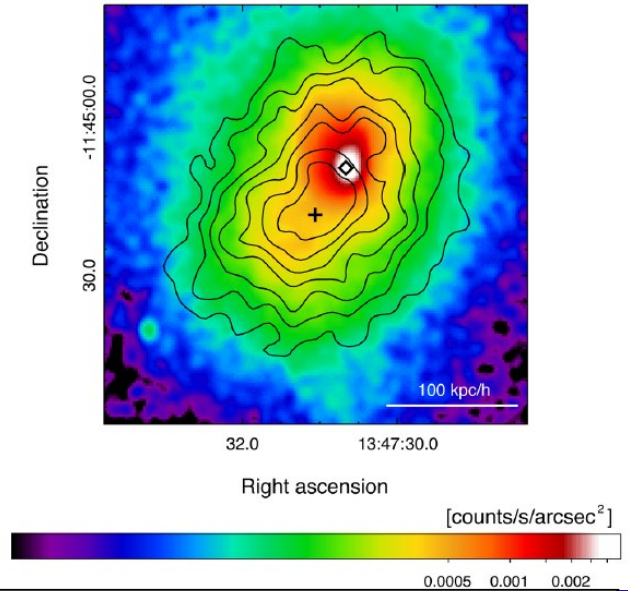


ASCA GISによるスペクトル  
(Schindler et al. 1997)

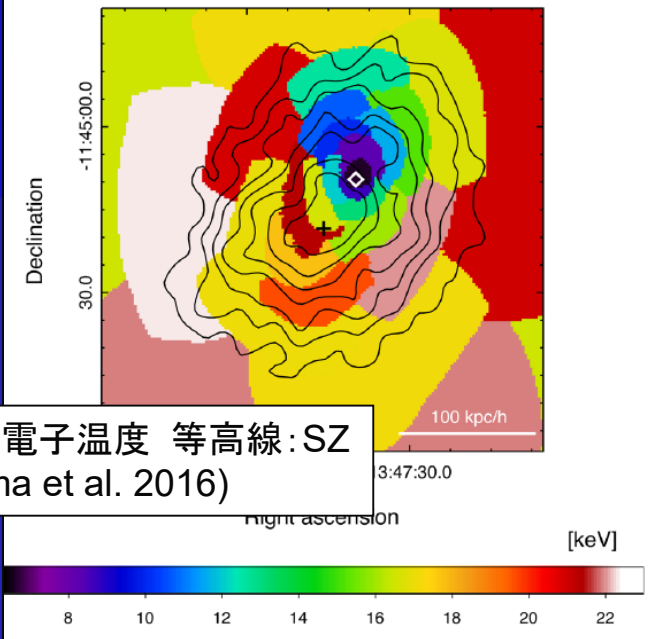
# RXJ1347.5-1145 (続き)

- Suzakuによる広帯域X線スペクトル解析から30keV近い高温ガスの存在 (Ohta et al. 2008)
- XとSZE(ALMA)でimageのピーク位置が異なる。SZEのピーク付近に20keV程度の高温成分 (Kitayama et al. 2016)

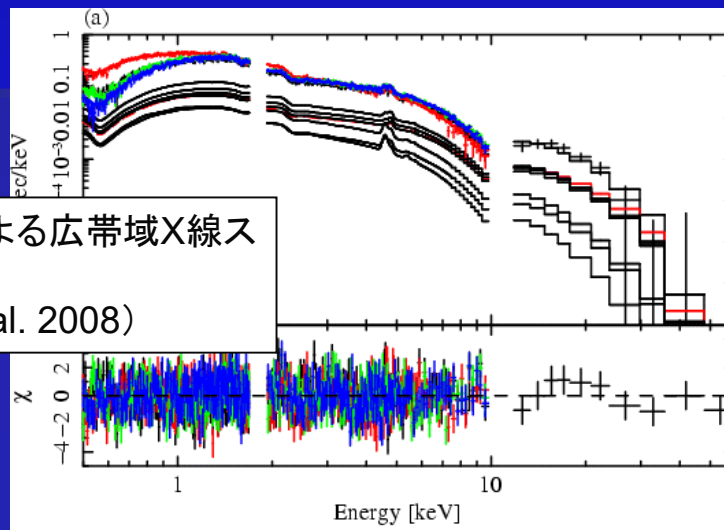
カラー: X線表面輝度 等高線: SZ (Kitayama et al. 2016)



(b) Electron temperature



カラー: 電子温度 等高線: SZ (Kitayama et al. 2016)



すざくによる広帯域X線スペクトル (Ota et al. 2008)

# Observations

- Kitayama et al. (2016)で使ったデータ+可視(HST)
- SZE(ALMA)
  - 2014年8月—2015年1月にかけて、都合13回に分けて観測。  
12m-array ~155min、7m-array ~335min
  - Band3(中心波長 92GHz、帯域幅7.5GHz)
- X線(Chandra)
  - アーカイブデータ(233.8ks)
  - BGDはX-ray peakから2'.5-3'.5の同一視野内データを使用
- 可視(HST)
  - アーカイブデータを重力レンズの解析で使用



# X-ray imaging analysis

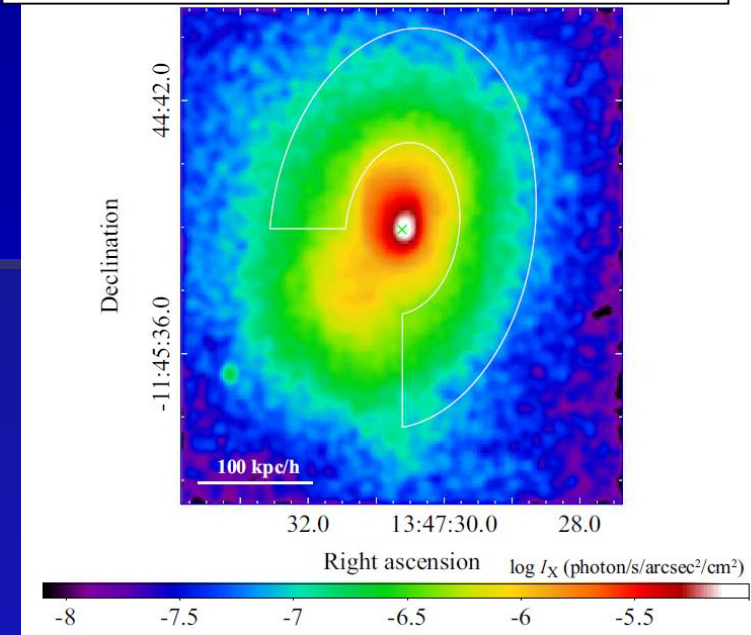
- エネルギー帯: 0.4--0.7 keV
- 15"—35" (除く南東部) で最適な楕円モデルを求める。

--> axis ratio: 0.66,  
position angle:  $-8.7^\circ$

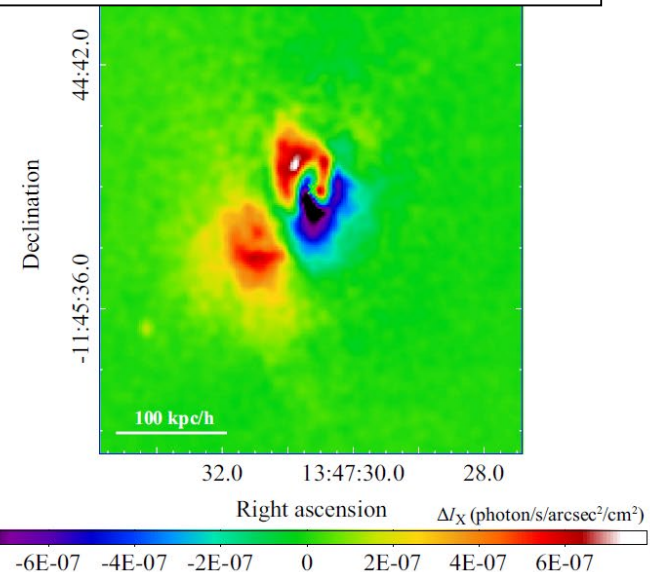
- イメージから平均楕円プロファイルを引いて残差イメージを求める。

---> 南東部に超過成分  
中心部に渦巻き状の  
ダイポールパターン

カラー: X線表面輝度  
白枠は楕円モデルを求めるのに使った領域



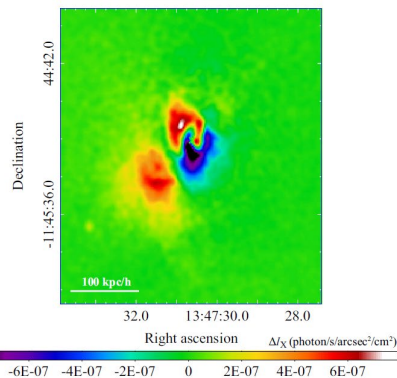
カラー: 平均楕円プロファイルからの残差



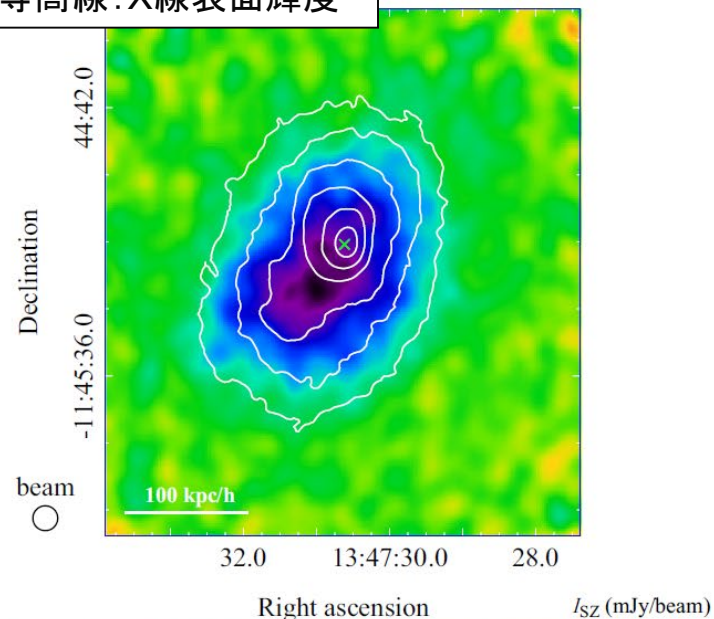
# SZE imaging analysis

- X線イメージのときと同様にしてSZEでも残差イメージを算出。
- 南東部に超過成分。X線での超過成分よりも有意に広がっている。
- 
- X線のダイポールパターンに対応するものは見つからない。

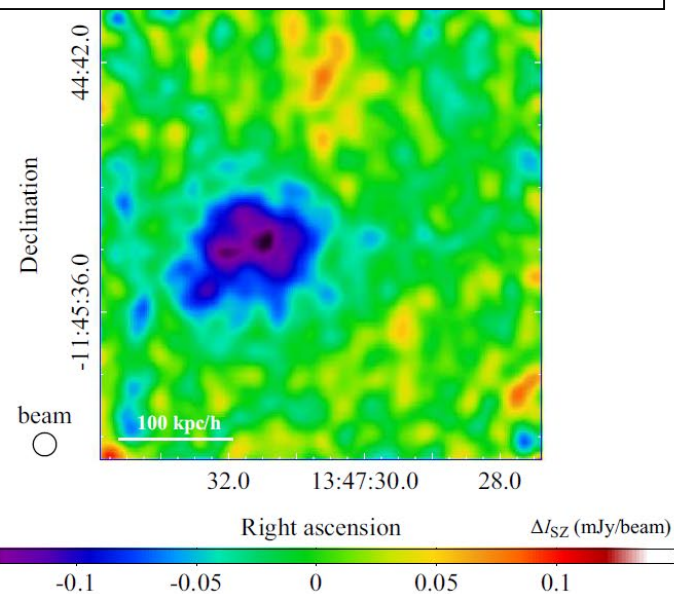
再掲：X線の残差イメージ



カラー：SZE表面輝度  
等高線：X線表面輝度

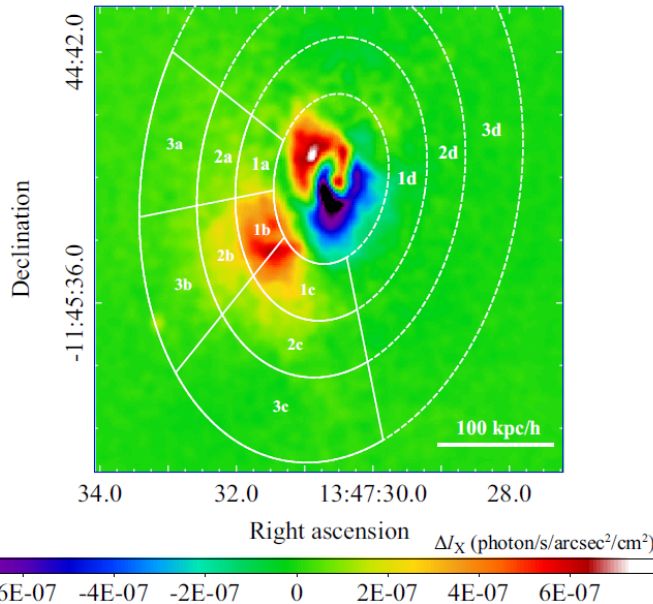


カラー：平均楕円プロファイルからの残差

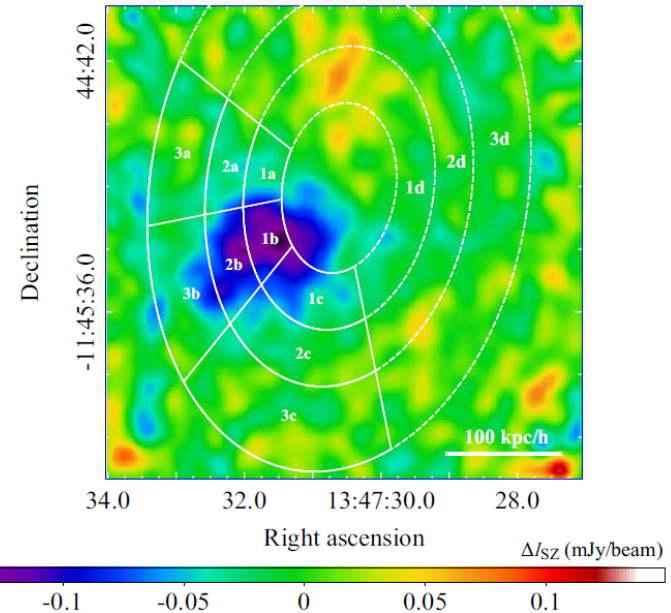


# 南東超過成分のX線スペクトル解析(1)

X線の残差イメージと使用領域



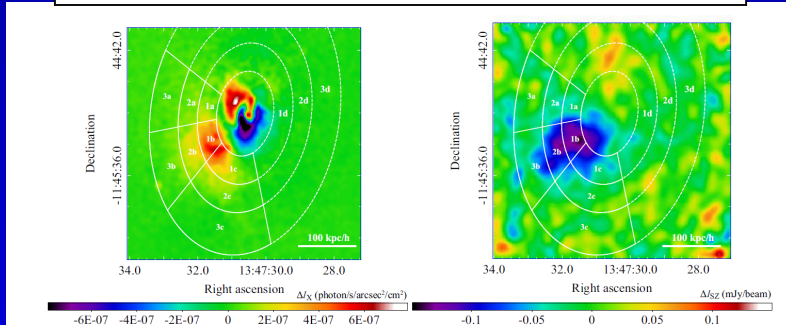
SZEの残差イメージと使用領域



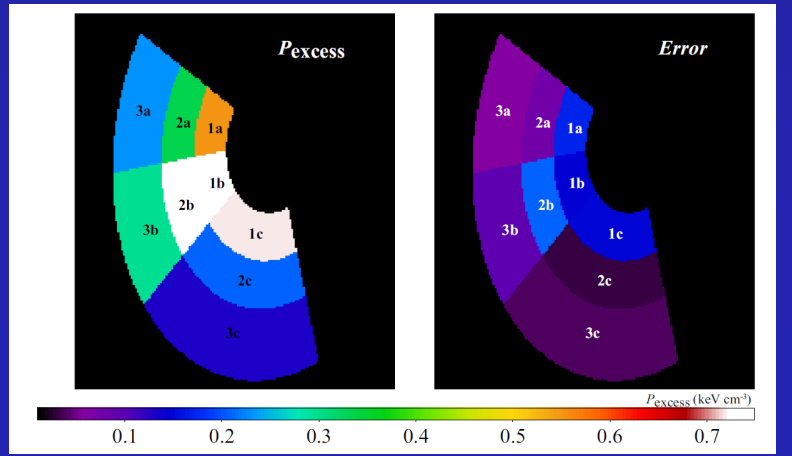
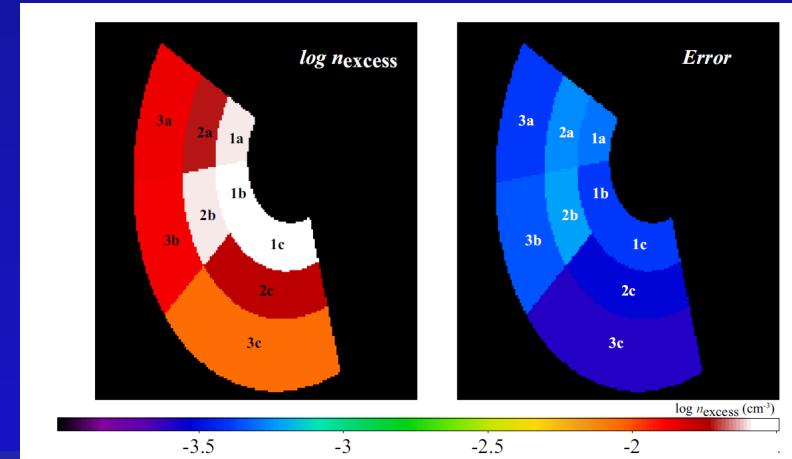
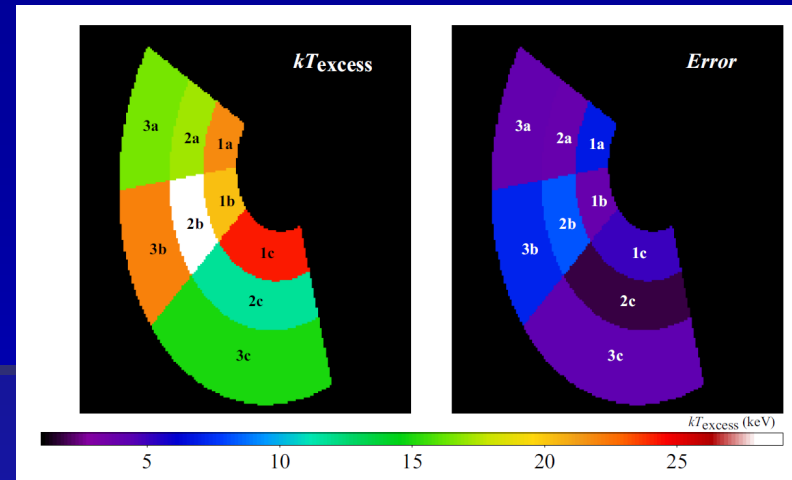
- 南東部をのぞいた楕円環を一温度プラズマモデル  $\text{phabs}^* \text{apec}$  でfitして  $kT_{\text{single}}$  などを求める。
- 南東部を二温度モデル  $\text{phabs}^*(\text{apec}_{\text{single}} + \text{apec}_{\text{excess}})$  でfit。  $\text{apec}_{\text{single}}$  には一温度モデルの結果を適宜用いて、超過成分のスペクトルを求める。

# 南東超過成分の X線スペクトル解析(2)

再掲: X & SZEの残差イメージと使用領域



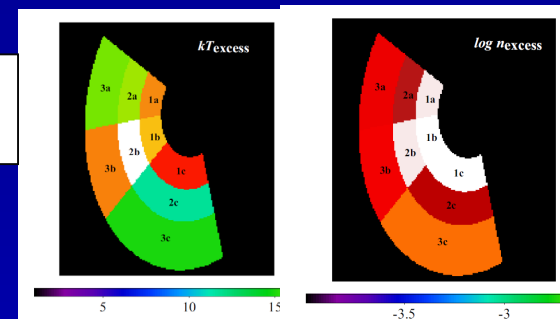
- 領域2bで  
 $kT_{\text{excess}} = 29.1^{+9.4}_{-6.9} \text{keV}$
- 密度超過のピークは領域1b
- 領域2a,bの温度差に Rankine-Hugoniot 関係を適用すると  $M = 1.68^{+0.69}_{-0.47}$





# 南東超過成分の X&SZEイメージ解析

再掲: X線スペクトル  
解析での結果



$$\Delta I_X \propto n_{\text{excess}}^2 \times \Lambda(T_{\text{excess}}) \times L_{\text{excess}},$$

$$\Delta I_{\text{SZ}} \propto n_{\text{excess}} \times kT_{\text{excess}} \times L_{\text{excess}} \times f_r(T_{\text{excess}}) \times f_c$$

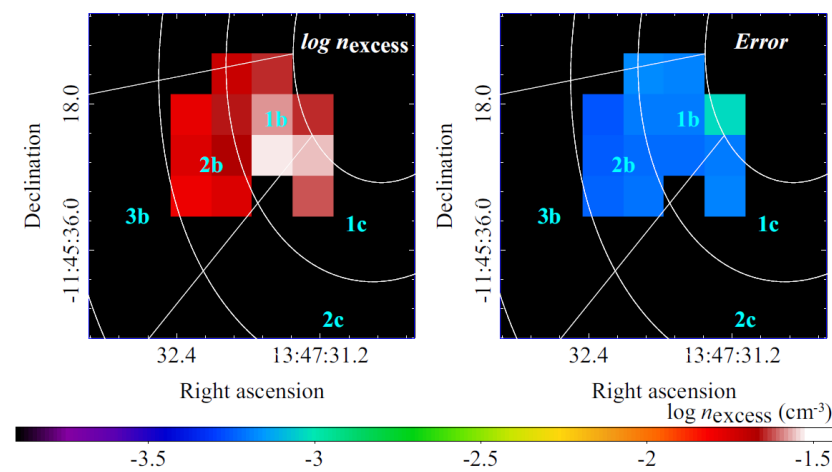
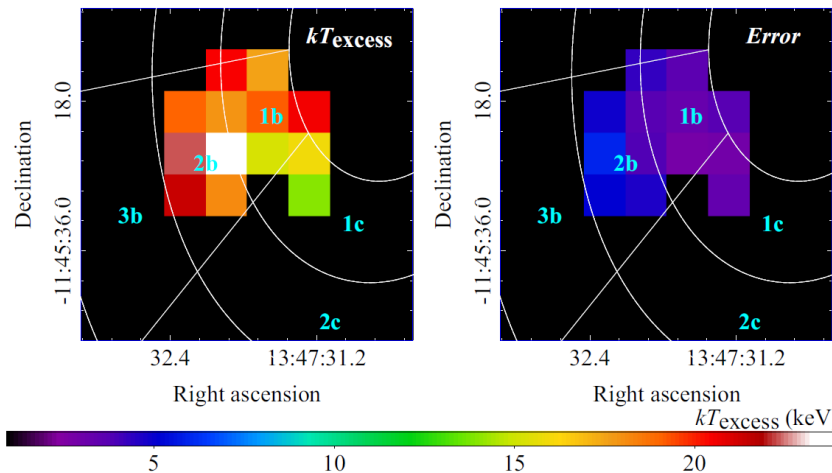
$\Lambda(T)$ : X-ray emissivity (0.4-0.7keV)

$L_{\text{excess}}$ : 奥行き、150kpcで固定

$f_r(T)$ : SZEの相対論的補正

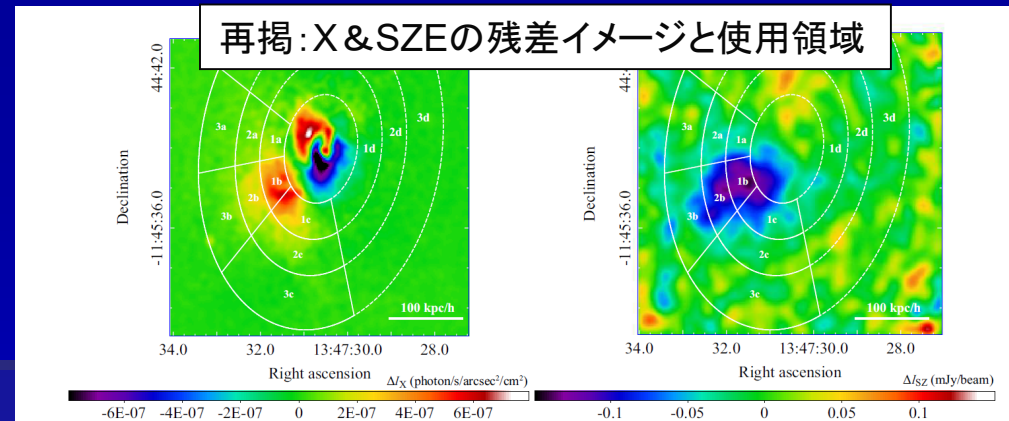
$f_c$ : missing fluxの補正、0.88を適用(Kitayama et al. 2016)

- XとSZEのイメージから南東超過成分の温度、密度を求める。
- 基本的にはX線スペクトル解析の結果とconsistent
- ただしkT,nどちらも $L^{-1/2}$ の不定性
- ALMA以外ではChandraにみあった空間分解能は達成できなかった。





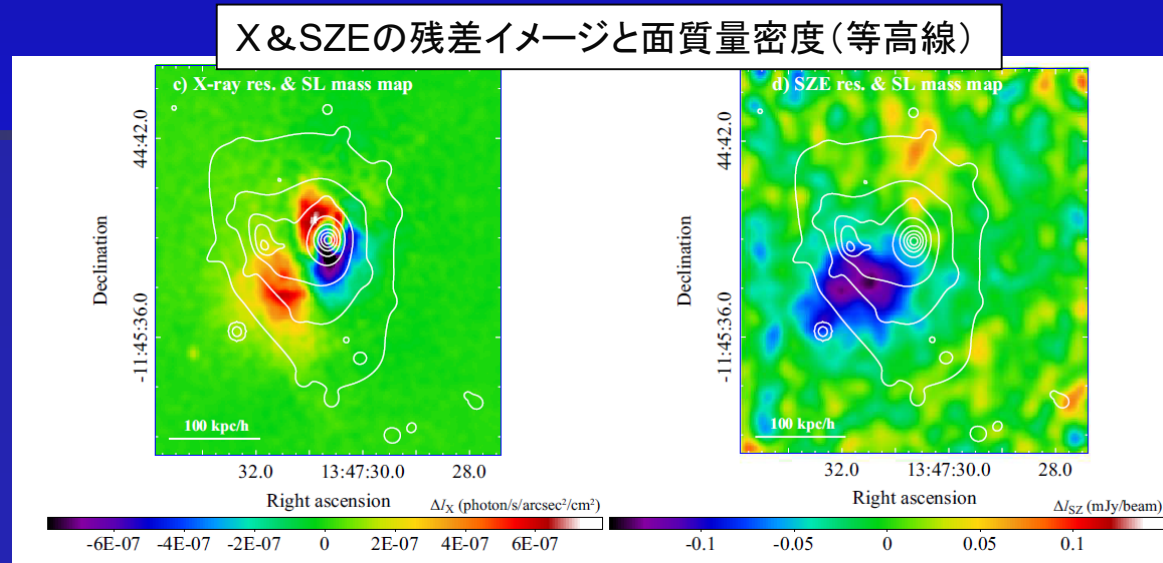
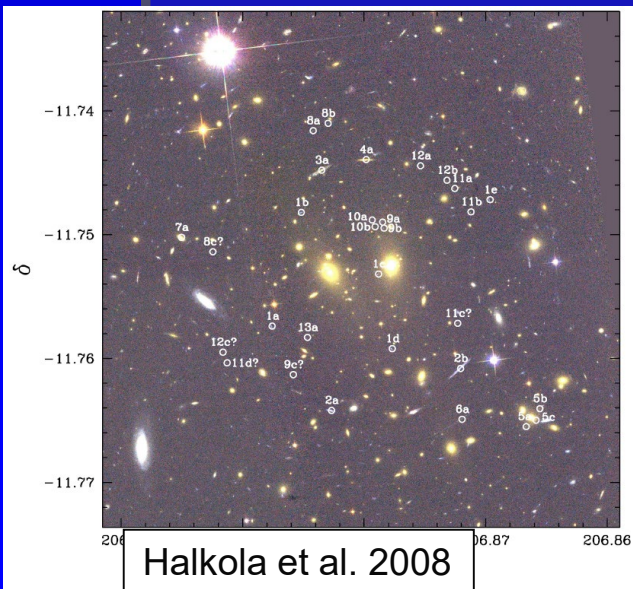
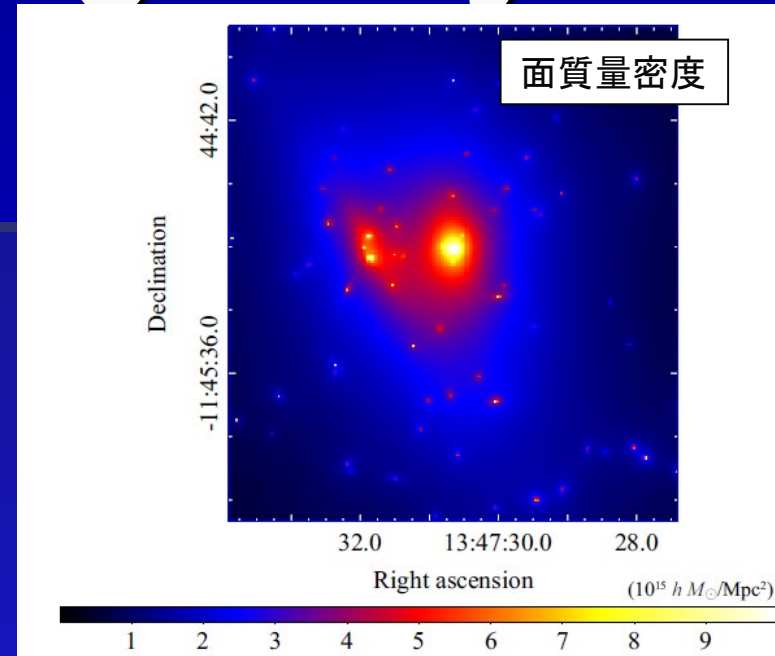
# Nature of gas sloshing in the core



- Positive in X:  $kT=8.8^{+0.2}_{-0.2}$  keV,  $Z=0.47^{+0.04}_{-0.03} Z_{\text{solar}}$   
Negative in X:  $kT=10.6^{+0.4}_{-0.3}$  keV,  $Z=0.37^{+0.05}_{-0.05} Z_{\text{solar}}$   
-->metal rich, cool, and dense gas is moving around the central galaxy
- 対応するパターンはSZでは見えず→等圧的(subsonic motionを示唆)
- 摂動の“状態方程式”  $w \equiv \Delta p / \Delta \rho$  で定量評価すると  
 $w^{1/2} = 420^{+310}_{-420}$  km/s (cf.  $c_s \sim 1630$  km/s @10keV)

# HST strong lensing analysis

- HSTのアーカイブイメージには6つのsourceによる21のlensed imageが見つかった(Halkola et al. 2008など)。
- 二つのelliptic NFW dark halo, member galaxyのhalo, および外部重力場のモデルで上記観測結果を再現するパラメータセットを探す(GLAFIC, Oguri et al. 2010)
- メインの質量ピークに加えて南東超過成分の少し北にずれて第2ピークが。



# discussion

## ■ 南東超過成分について

- 高温部分を摂動の“状態方程式”  $w \equiv \Delta p / \Delta \rho$  で定量評価すると

$$w^{1/2} = 1970^{+150}_{-150} \text{ km/s} \quad (\text{cf. } c_s \sim 2310 \text{ km/s @ 20 keV})$$

----> 断熱圧縮的、低マッハ数衝撃波として矛盾はない

- 第2質量ピークと南東超過成分の位置に明確なずれ
- Major merger (質量比2.5程度 from strong lensing 解析)によってラム圧ではぎ取られたガスが低マッハ数衝撃波で加熱されているという描像で矛盾はない。

## ■ Self-interaction cross section for dark matter

- ガスとDMでずれが生じている → DMのself-interactionに制限

$$\Sigma \sigma / m < 1 \quad \text{---->} \quad \sigma / m < 3.7 \text{ h}^{-1} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

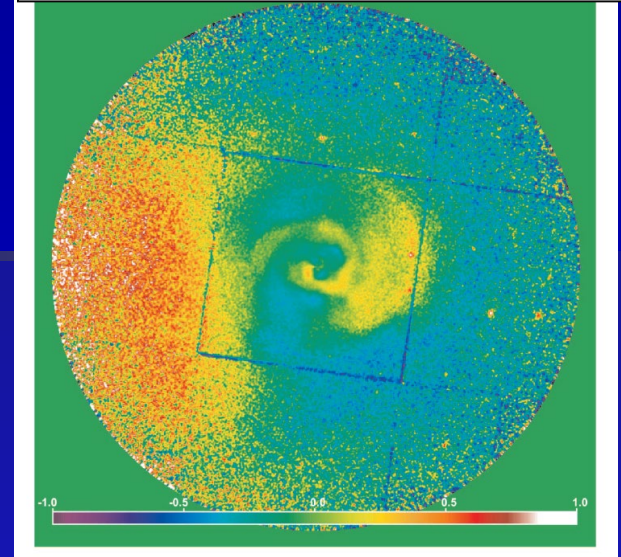
( $\Sigma$ : 面質量密度、 $\sigma$ : DM collision cross section、 $m$ : mass of DM particle)

他の銀河団で求められてるものとだいたい同じ (Markevitch et al. 2004, Harvey et al. 2015)



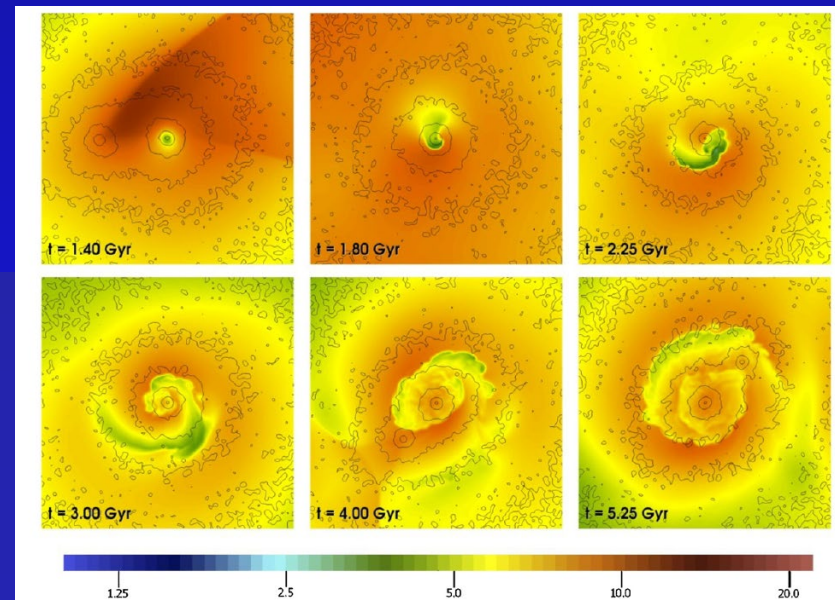
# Discussion(続き)

Perseus銀河団中心部の  
残差X線イメージ(Churazov et al. 2003)



## ■ 中心部のspiral pattern

- (高密度、低温 & 高アバンダンス) vs (低密度、高温 & 低アバンダンス)の組み合わせ。
- 等圧的(subsonic motion を示唆)
- 似たようなものはRelaxed clusterの中心部で見ついている。
- Minor merger によるgas sloshingのsimulationで再現されている(Zuhone et al. 2010など)。
- ただ南東超過成分(major merger)との関連はよくわからない



Zuhone et al. (2010)

# Summary

- 銀河団RX J1347.5-1145について、ALMAのband3 (92GHz)、ChandraによるX線、HSTの可視光データをあわせて解析した。
- X線とSZの残差イメージの解析を行った。
  - 南東部分に断熱圧縮的な超過成分
  - 中心部に渦巻き状の等圧的双極成分
- HSTのデータでstrong lensing modelingを行った。
  - 南東超過成分からずれた第二質量ピーク
- 南東超過成分は、major mergerによってはぎ取られたガスが低マッハ数衝撃波で加熱されている、という描像で矛盾はない。
- 中心部の渦巻き状パターンはrelaxed clusterで見つかるgas sloshingによるものと似ているが、形成シナリオはよくわからない。南東超過成分と直接関連づけるのは難しそう。