

# すざく衛星を用いた銀河団の 広帯域・多波長観測

広帯域: Abell2319

(Sugawara et al., PASJ in press, arXiv:09091358)

多波長: ZwCl0803.2+0425周辺領域

滝沢元和、菅原知佳、渡邊 瑛里(山形大)

中澤知洋(東京大)、岡部信宏(ASIAA)、川原田円(理研)

浜名崇、宮崎聡(国立天文台)

広帯域： Abell2319

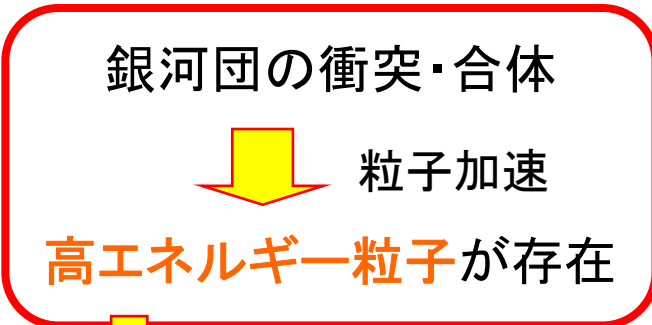
Sugawara et al., PASJ in press,  
arXiv:09091358

# Introduction 銀河団の高エネルギー現象

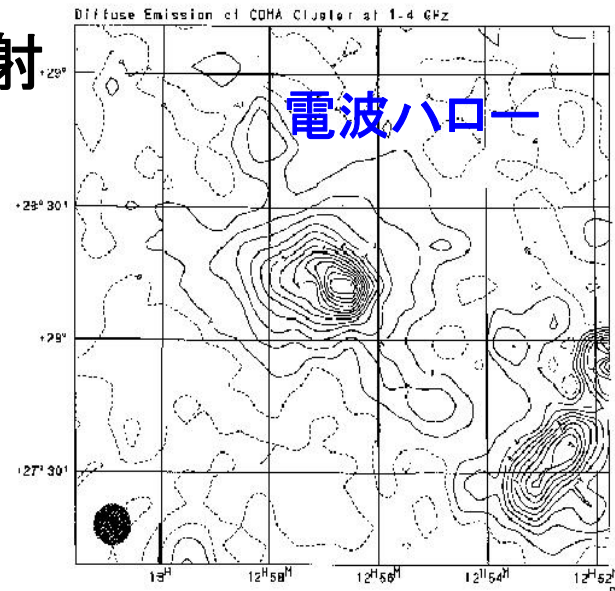
銀河団は、衝突・合体を繰り返しながら成長している

## 衝突銀河団からの非熱的放射

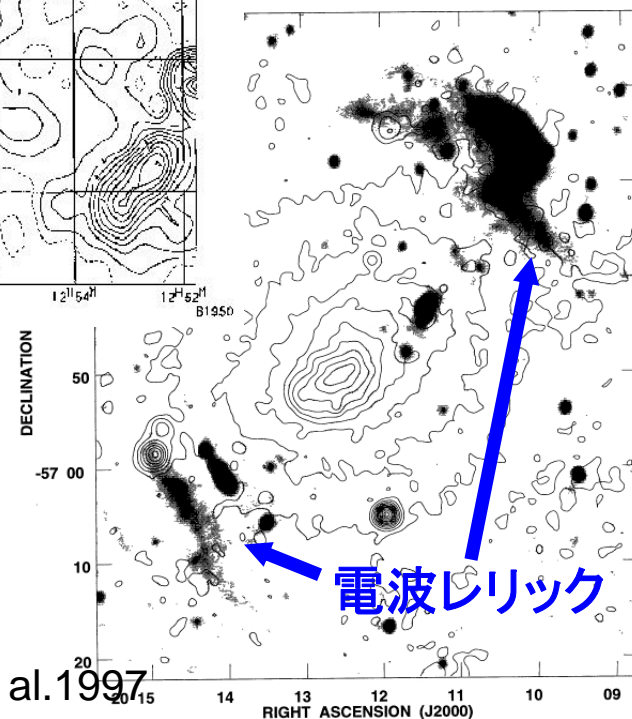
- ◆ シンクロトロン放射
  - 銀河団スケールにひろがる
  - $\gamma \sim 10^4$ の電子と0.1-10  $\mu$ Gの磁場の相互作用



↓  
CMB光子との逆コンプトン散乱 (硬X線)は？

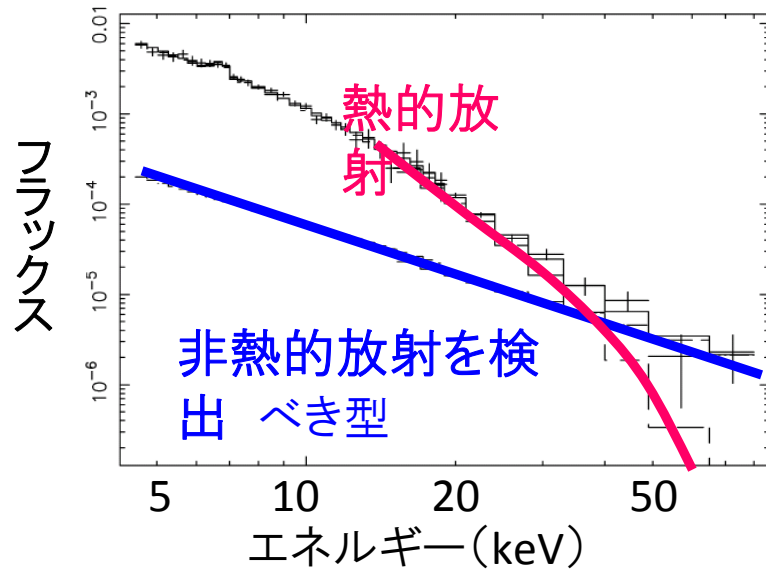


Coma Cluster  
Deiss et al. 1996

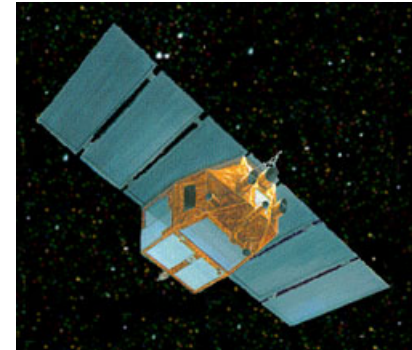


# 硬X線観測

Coma ClusterのX線～硬X線領域のスペクトル



Beppo-SAX(1996-2002)



Beppo-SAXによって  
Coma Clusterから、  
非熱的な硬X線放射  
を検出した？

シンクロトロン放射している電子が、  
宇宙背景放射の光子(CMB)を  
逆コンプトン散乱したもの

**Beppo-SAX**  
vs  
**SUZAKU**

すざく衛星では、  
非熱的成分は検出されていない、  
Wik et al. (2009)

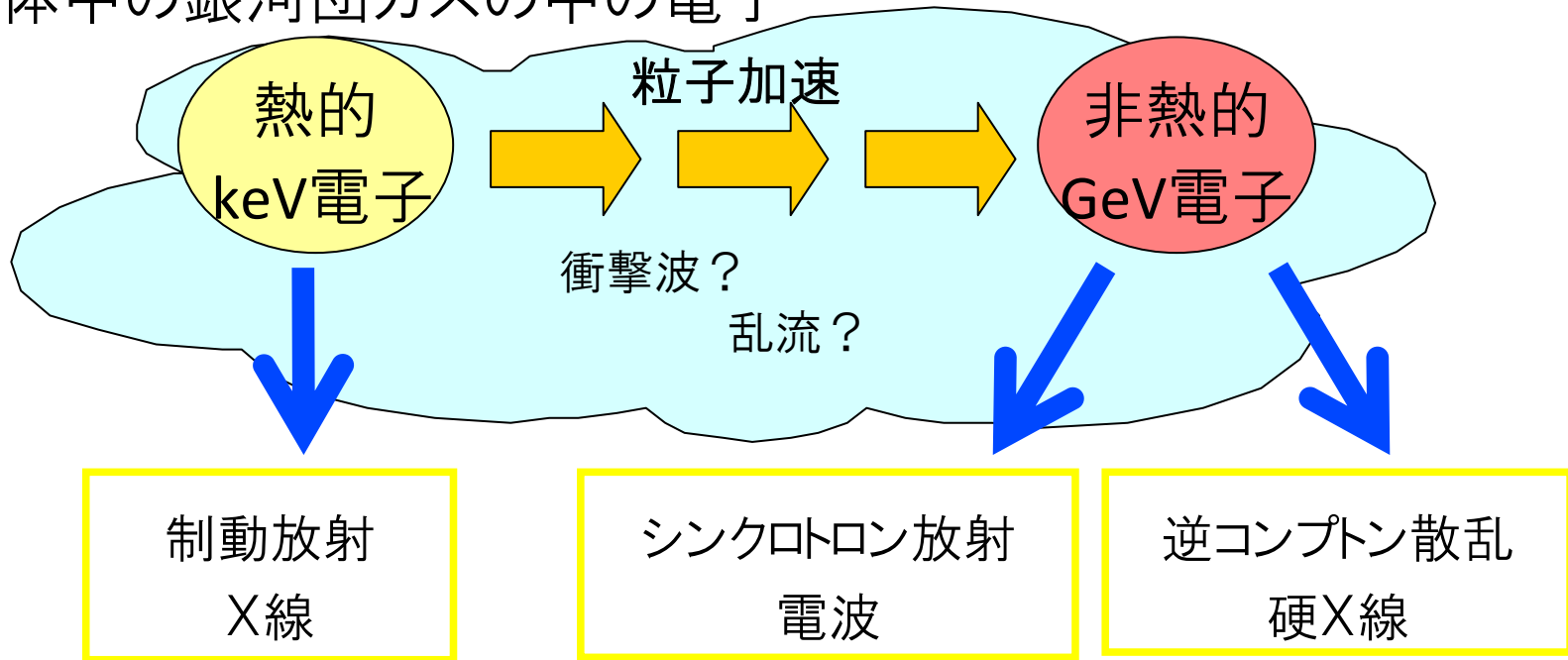
これまでに明らかに硬X線領域の  
非熱的成分が検出された例はない!!



すざく(2005～)

# 研究目的

衝突・合体中の銀河団ガスの中の電子



XIS(X線CCDカメラ)  
ガスの構造・運動



HXD(硬X線検出器)  
硬X線の検出

衝突・合体している銀河団を**すざく衛星**で観測し、  
銀河団ガスの構造や進化を探る⇒粒子加速機構の解明

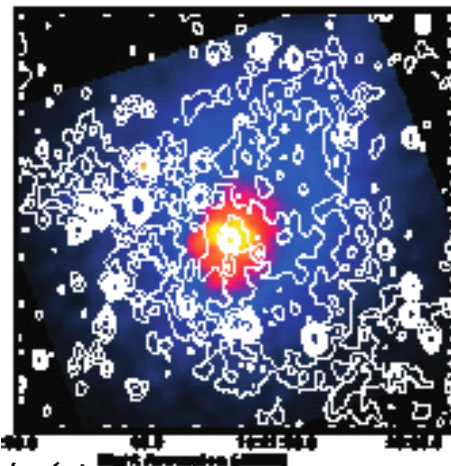
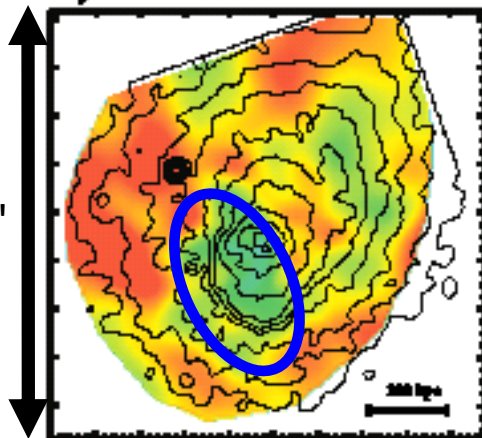

# Abell 2319銀河団

赤径 19h21m12s 赤緯 43° 56' 45'' redshift 0.0557

## 特徴

- 視線方向に二つのグループ
- 非一様な温度分布とコールドフロント
- ひろがった電波ハロー

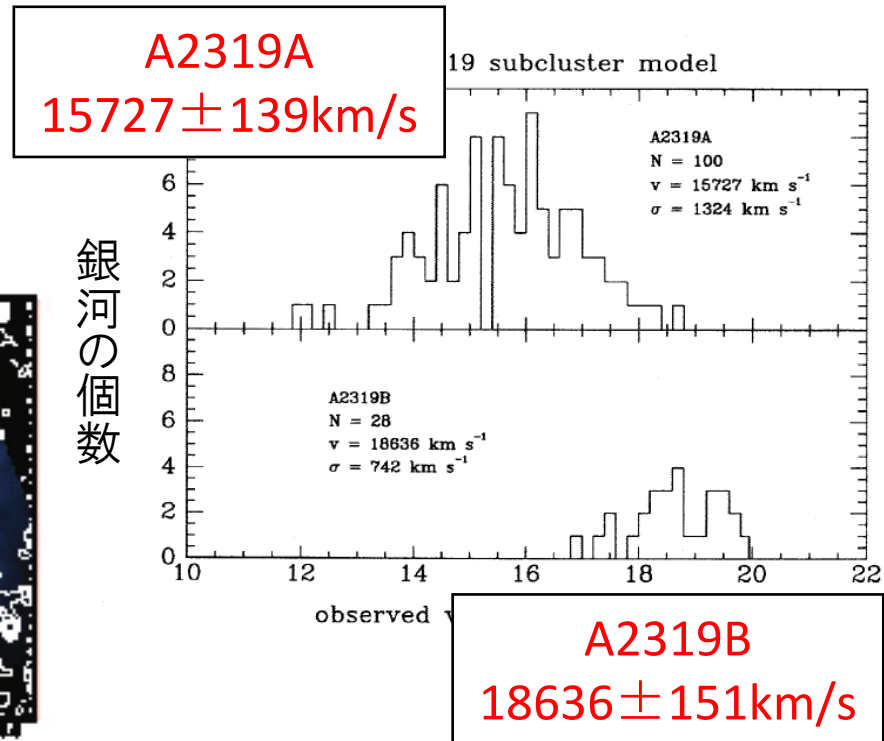
6 8 10 12 keV



左:X線(コントア)温度分布(カラー)

右:X線(カラー)電波(コントア) Govoni et al.2004

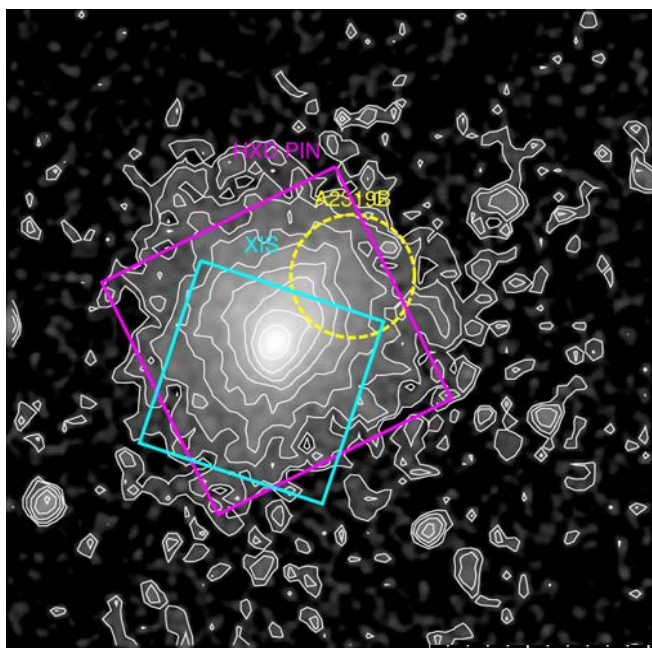
## 銀河の視線速度分布



後退速度(km/s)

Oegerle et al.1995

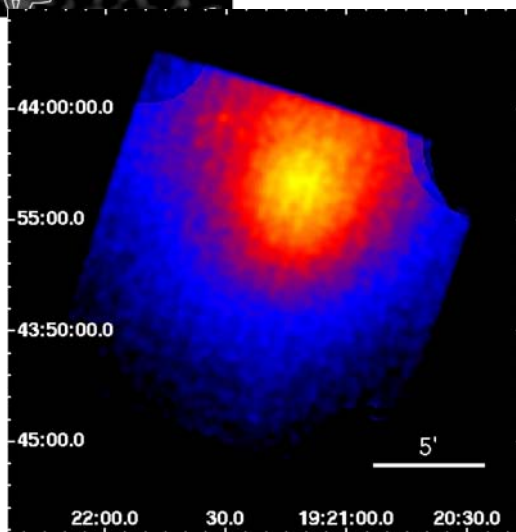
# すざく衛星による観測



ROSAT衛星によるX線画像に  
すざく衛星の視野を重ねたもの  
マゼンダ:HXD PIN、水色:XIS  
黄色:A2319Bサブグループ

- 観測日:2006年10月27日から  
2006年10月30日
- 有効観測時間:

XIS	99.5ksec
HXD/PIN	93ksec
- 電荷注入(SCI) ON観測

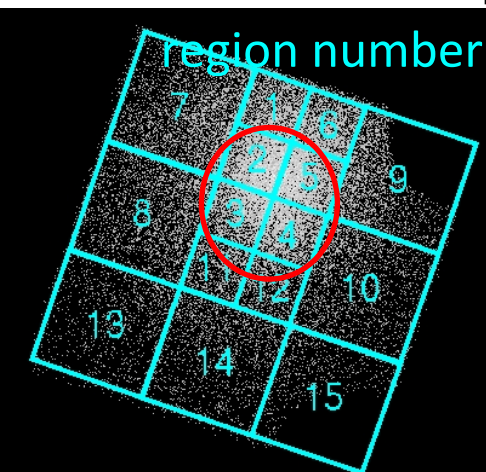
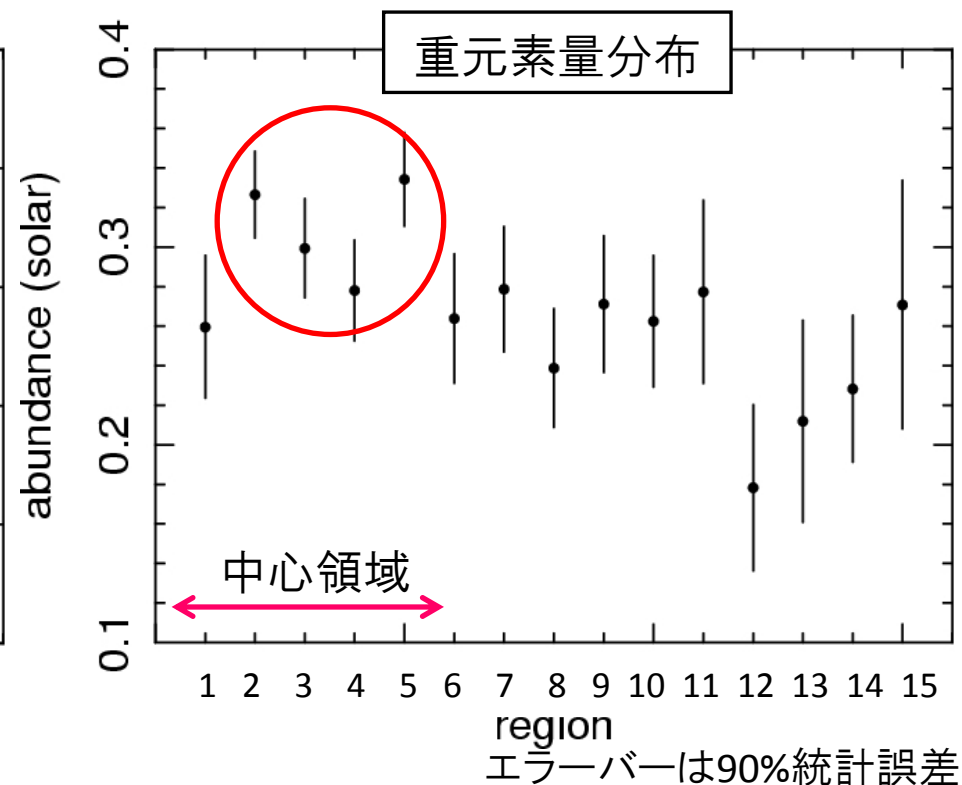
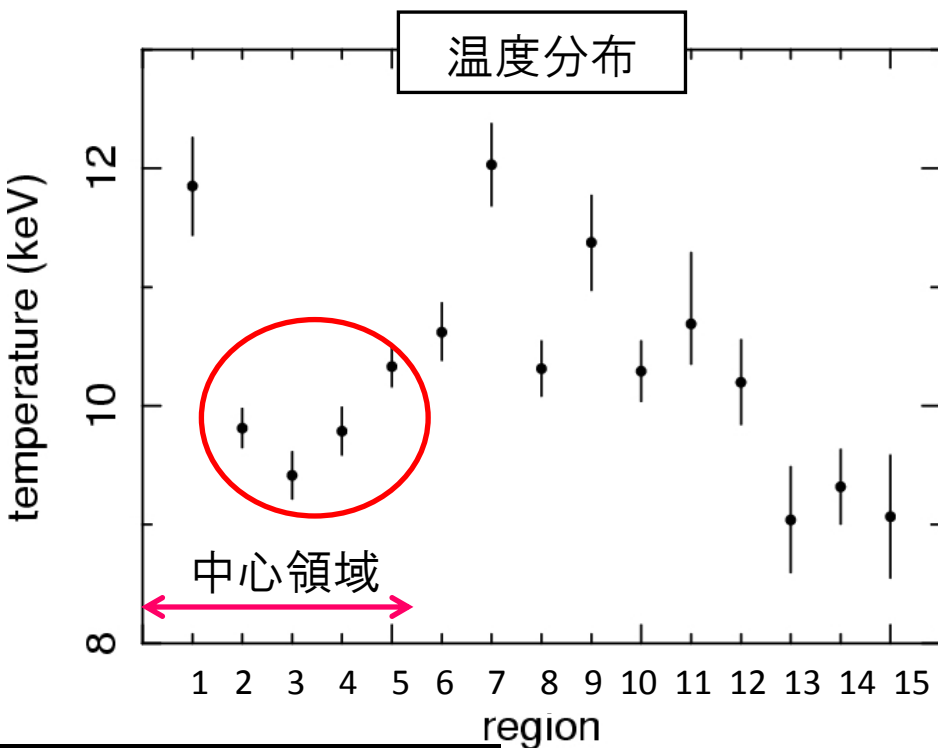


すざく衛星による  
前面照射型X線CCD  
カメラのX線画像

## 目的

- ✓XISとHXDを組み合わせた広帯域スペクトル解析から**非熱的硬X線**や**超高温成分**を**探査**する
- ✓**磁場強度の下限值**を得る

# 温度とアバンダンス

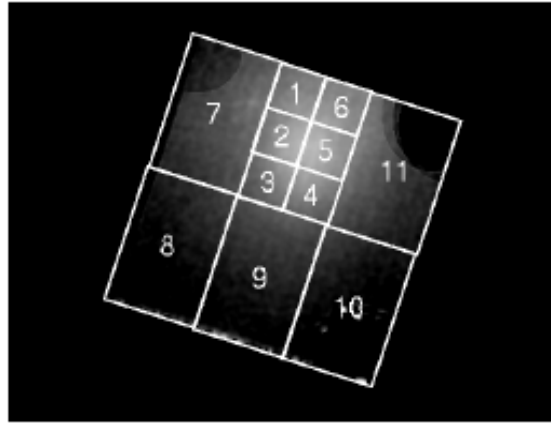


- ①温度分布・・・これまでの結果とおおよそ一致
- ②重元素分布・・・中心が高く外側が低い傾向、我々が初めて
- ③中心領域に温度が低く重元素量の多い領域が存在  
⇒過去に衝突・合体したガスの生き残り？



# バルクモーション

中心: 3' × 3'  
外側: 6' × 9'

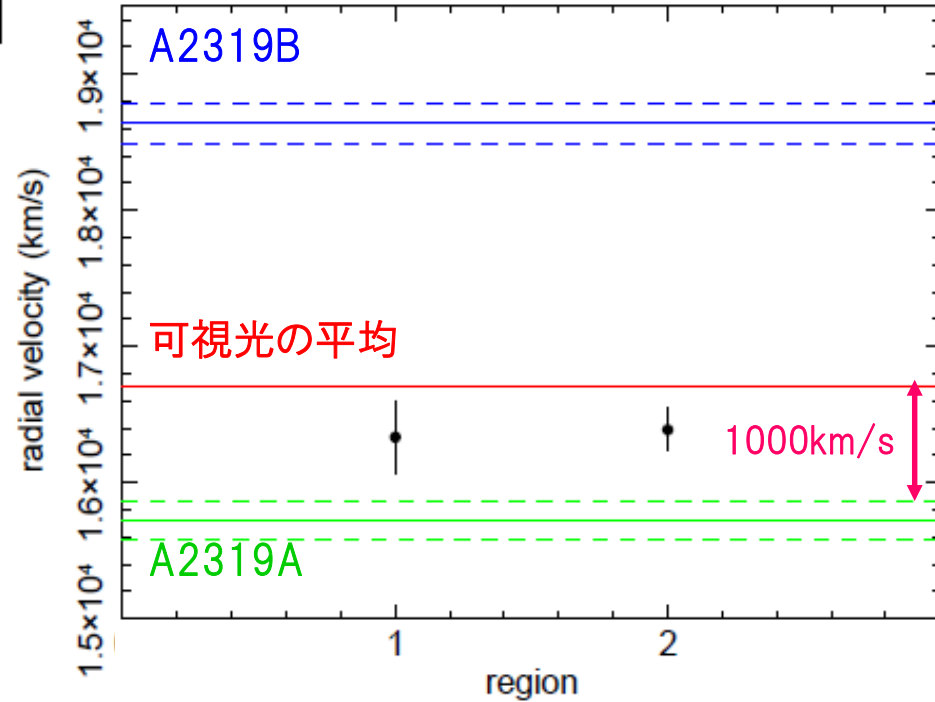
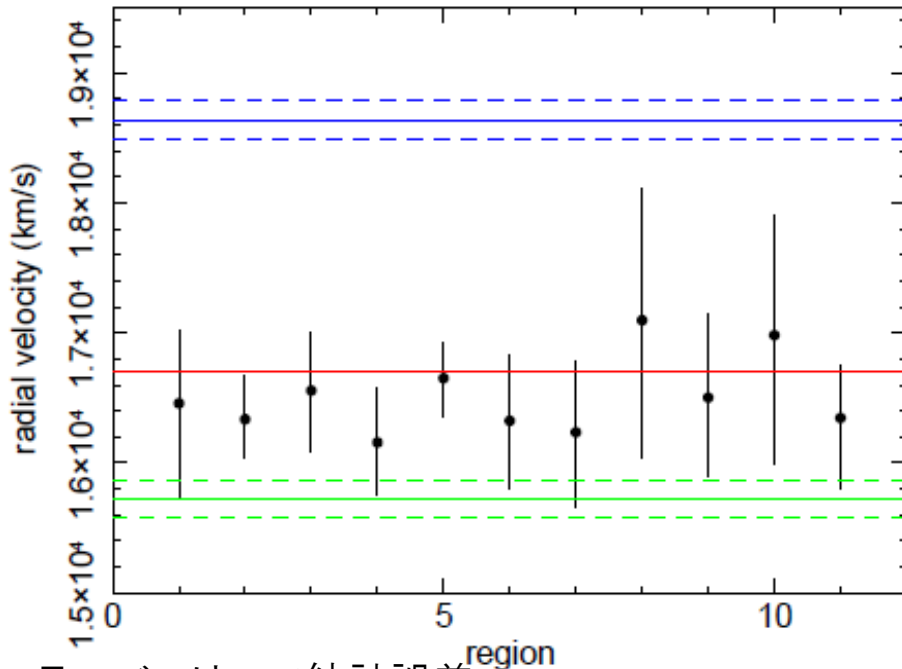


コールドフロント  
付近



後退速度

後退速度



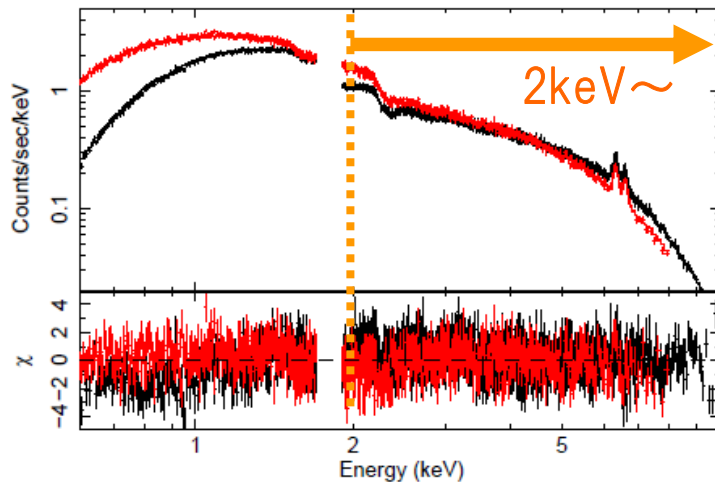
観測視野内はA2319Bとは異なる速度をもつ

エラーバーは90%統計誤差

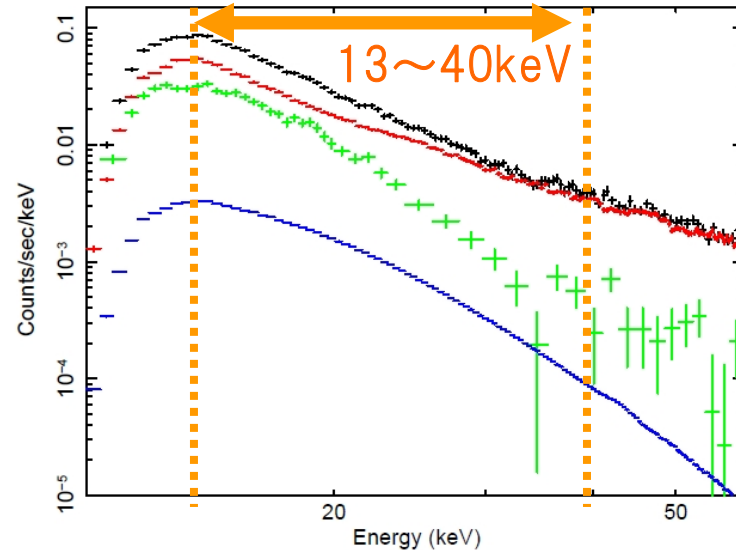
# 広帯域スペクトル解析①

XIS

黒: XIS-FI、赤: XIS-BI



HXD-PIN



使用するエネルギー帯域

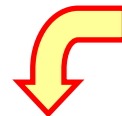
- XIS-FI・・・2.0 - 10.0keV
- XIS-BI・・・2.0 - 8.0keV
- HXD-PIN・・・13.0 - 40.0keV

黒: データ、赤: NXBモデル

緑: (データ) - (NXB)、青: CXBモデル

HXD-PINのバックグラウンド

- 非X線バックグラウンド(NXB)
- 宇宙X線背景放射(CXB)



NXB:  $\pm 4.5\%$ 、CXB:  $\pm 18\%$  振って影響を系統誤差として評価する

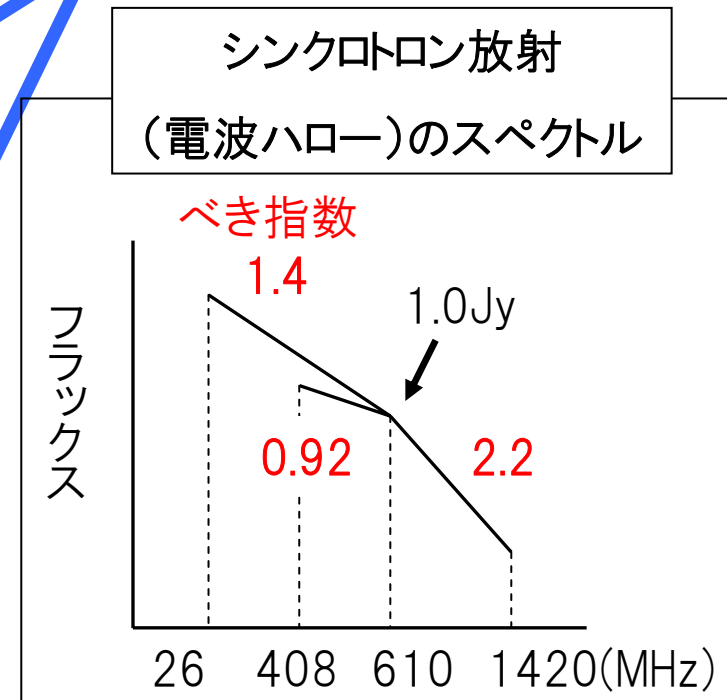
# 広帯域スペクトル解析②

## 使用したモデル

- ① 1温度プラズマモデル  
WABS × APEC
- ② 1温度プラズマ + 非熱的放射モデル  
WABS × (APEC + POWERLAW)
- ③ 2温度プラズマモデル  
WABS × (APEC + APEC)
- ④ 2温度プラズマ + 非熱的放射モデル  
WABS × (APEC + APEC + POWERLAW)

シンクロトン放射  
している電子による

## 逆コンプトン散乱



非熱的放射は、電波放射から予想されるphoton indexをとる

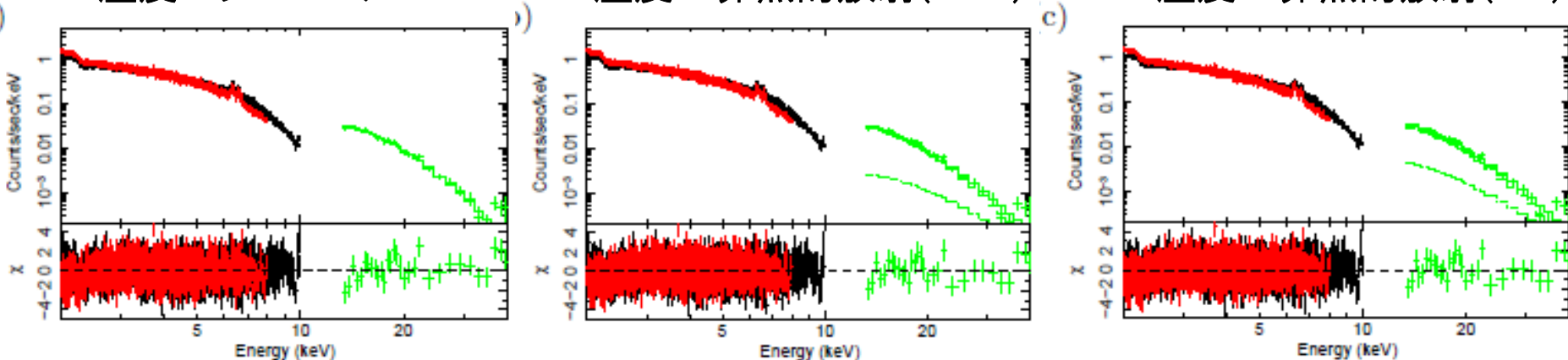
磁場を $0.1 - 1.0 \mu\text{G}$ と仮定すると、**数十～数百MHz** ⇒ 1.4と0.92を採用

# スペクトルフィットの結果①

1温度プラズマモデル

1温度+非熱的放射(1.92)

1温度+非熱的放射(2.4)



	1温度	1温度+PL(1.92)	1温度+PL(2.4)
$kT_{\text{low}}$ (keV)	$9.7^{+0.1}_{-0.1}$	$9.7^{+0.1}_{-0.1}$	$9.7^{+0.1}_{-0.1}$
$kT_{\text{high}}$ (keV)	-----	-----	-----
$Z(Z_{\odot})$	$0.26^{+0.01}_{-0.01}$	$0.26^{+0.01}_{-0.01}$	$0.26^{+0.01}_{-0.01}$
$N_{\text{H}}$ ( $10^{20}\text{cm}^{-2}$ )	7.93(Fixed)	7.93(Fixed)	7.93(Fixed)
$\Gamma_{\text{PL}}$	-----	1.92(Fixed)	2.4(Fixed)
$\chi^2/\text{d.o.f}$	3215.6/2978=1.1	3210.9/2976=1.1	3211.2/2976=1.1

エラーは90%統計誤差

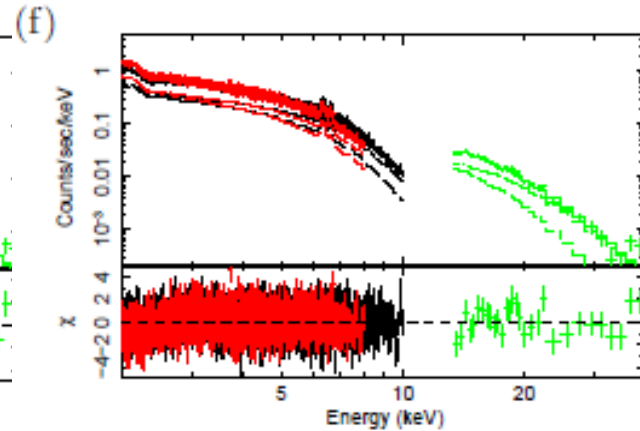
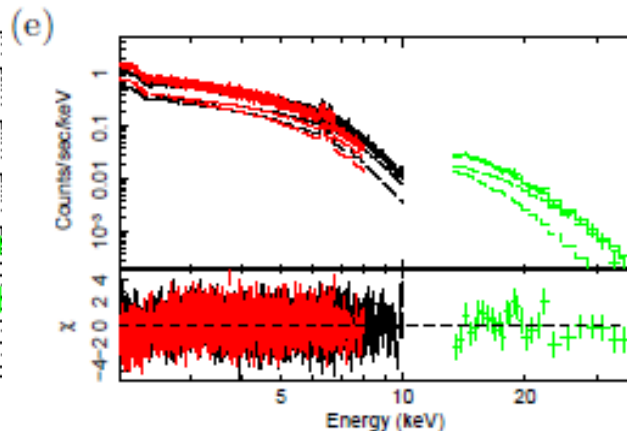
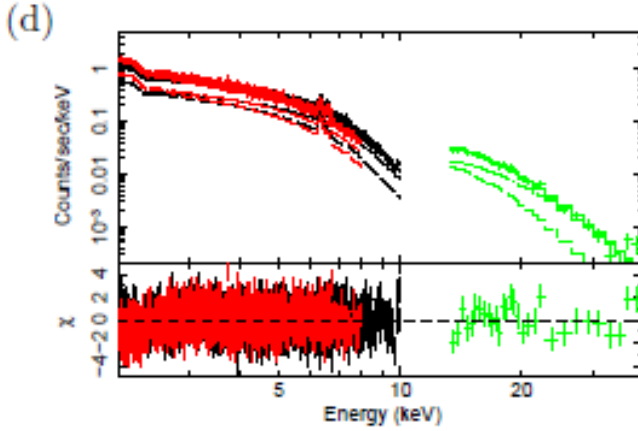
どのモデルも結果に大差ない⇒非熱的成分を積極的に入れる必要がない

# スペクトルフィットの結果②

2温度プラズマモデル

2温度+非熱的放射(1.92)

2温度+非熱的放射(2.4)



	2温度	2温度+PL(1.92)	2温度+PL(2.4)
$kT_{\text{low}}$ (keV)	$6.5^{+0.5}_{-0.5}$	$6.5^{+0.5}_{-0.5}$	$6.5^{+0.5}_{-0.6}$
$kT_{\text{high}}$ (keV)	$15.7^{+1.2}_{-1.0}$	$15.7^{+0.9}_{-1.1}$	$15.7^{+0.9}_{-1.1}$
$Z(Z_{\odot})$	$0.28^{+0.01}_{-0.01}$	$0.28^{+0.01}_{-0.01}$	$0.28^{+0.01}_{-0.01}$
$N_{\text{H}}$ ( $10^{20}\text{cm}^{-2}$ )	7.93(Fixed)	7.93(Fixed)	7.93(Fixed)
$\Gamma_{\text{PL}}$	-----	1.92(Fixed)	2.4(Fixed)
$\chi^2/\text{d.o.f}$	3136.6/2975=1.1	3136.7/2973=1.1	3136.7/2973=1.1

エラーは90%統計誤差

1温度モデルから若干改善⇒高温成分はあるかも？ただし積極的に入れる必要はない

# 非熱的硬X線のFlux上限値

## モデル

1 温度＋非熱的放射(1.92、2.4)

2 温度＋非熱的放射(1.92、2.4)

## 系統誤差の評価

非X線バックグラウンド(NXB)・・・±4.5%振って影響を考慮する

宇宙X線背景放射(CXB)・・・±18%振って影響を考慮する

## ◆ 10-40keVの非熱的硬X線のFlux上限値

$$F_{IC} < 2.6 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

### 他衛星との比較

Beppo-SAX (Molendi et al. 1999)

(Suzaku換算で)  $2.9 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ただし視野はずっと広い

Swift (Ajello et al. 2009) 99%、50-100keVを90%、10-40に換算

Swift単独  $2.9 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Swift+XMM  $1.7 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

ちなみに1mCrabは  $\sim 1.6 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ちょっと低すぎないか???

# 磁場強度の下限值

## ◆シンクロトン放射と逆コンプトン散乱の関係

先行研究による  
磁場強度 ( $\mu\text{G}$ )

$$\frac{F_{\text{IC}}}{F_{\text{sync}}} = \frac{U_{\text{CMB}}}{U_B} = \frac{U_{\text{CMB}}}{B^2/8\pi}$$

Beppo-SAX(1.92)	0.04
Beppo-SAX(2.2)	0.035
Swift(1.92)	0.1
Swift/XMM-Newton(1.92)	0.15

## ◆CMB光子のエネルギー密度

$$\begin{aligned} U_{\text{CMB}} &= 4.2 \times 10^{-13} (1+z)^4 \\ &= 5.2 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-3} (z = 0.0557) \end{aligned}$$

Beppo-SAX:90%信頼度

Swift:99%信頼度

## ◆シンクロトン放射(電波)のFlux

$$F_{\text{synch}} = 2.3 \times 10^{-13} \times B^{0.08} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

## ◆逆コンプトン散乱(硬X線)のFluxの上限值

$$F_{\text{IC}} < 2.6 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

磁場強度の下限值

1温度+非熱的放射(べき1.92)  $B > 0.19\mu\text{G}$

# エネルギー密度

## 熱的な粒子のエネルギー密度

- 先行研究 (ROSAT衛星の観測) による電子密度から、

$$U_{\text{th}} = 0.4 \times 10^2 \text{ eV/cm}^3$$

## 磁場のエネルギー密度

- すざく衛星による磁場強度の下限値  $0.2 \mu\text{G}$  から、

$$U_B > 0.1 \times 10^{-2} \text{ eV/cm}^3$$

$$\frac{U_{\text{th}}}{U_B} < 2.0 \times 10^3$$

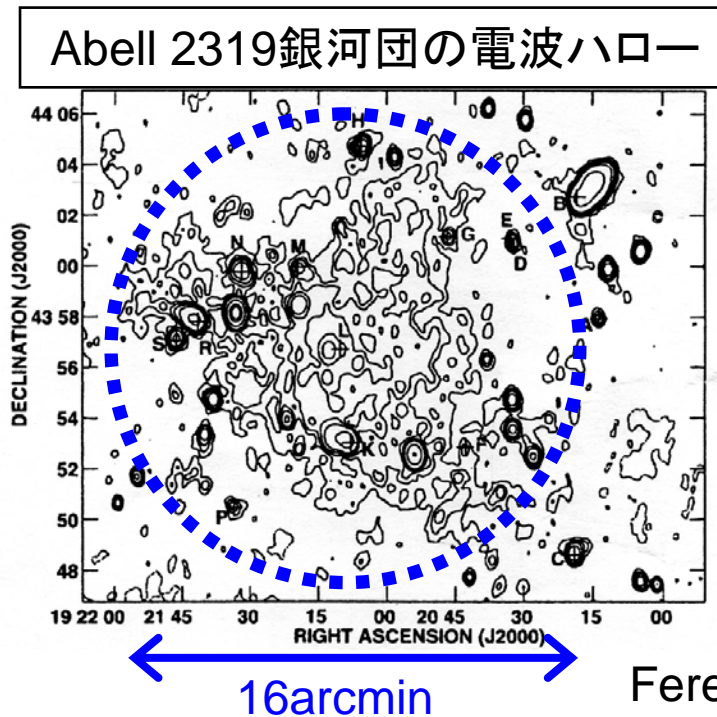
## 相対論的な電子のエネルギー密度

- すざく衛星による非熱的硬X線の flux 上限値から、

$$U_e < 0.2 \times 10^{-1} \text{ eV/cm}^3$$

$$\frac{U_{\text{th}}}{U_e} > 4.0 \times 10^4$$

電波ハローが球対称に分布していると仮定



Feretti et al.1997



# 粒子加速シナリオ

- cold front を伴った低温・高アバundance領域--->過去に吸収された小銀河団のcool coreの名残？
- 超高温成分は卓越せず。XISの視野内の速度差 ( $940^{+1083}_{-1131}$  km/s) は音速 (1700 km/s) より小さい。-->衝撃波は発達していない。A2319Bとの衝突はまだそこまで近づいていない。
- cold frontに関係ある過去のmergerで引き起こされた乱流による粒子加速がもっともらしい。

多波長： ZwCl0803.2+0425周  
辺領域

# ZwCl0823.2+0425銀河団周辺領域

赤経:08h25m57.83s 赤緯:04°14m48.3s  
Redshift 0.2248

## the Local Cluster Substructure Survey(LoCuSS)

- \* 周辺部に小型のダークマターハローが存在
  - ・北, 北東, 北西, 南東 の4方向
  - ・特にZwCl0823.2と北に強い質量コントア

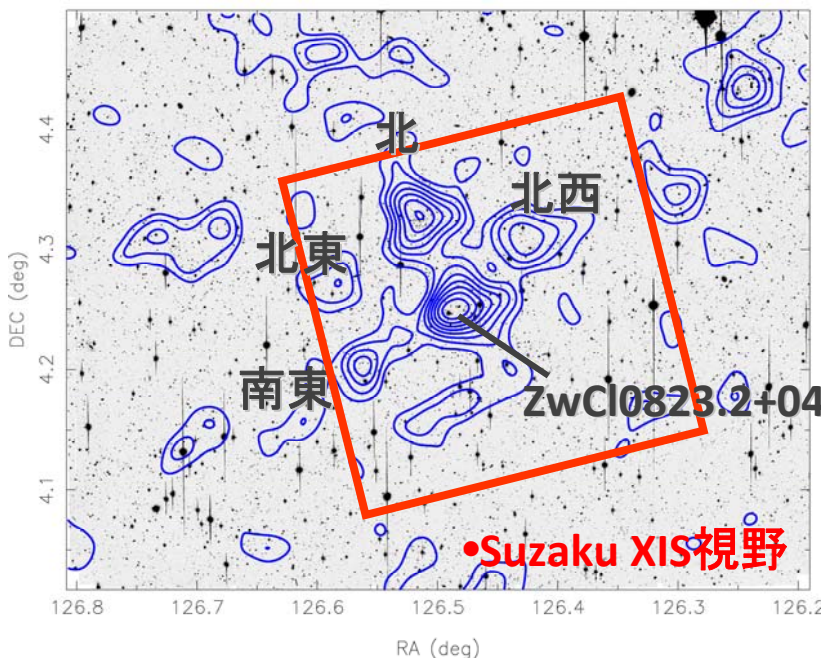
## Slone Digital Sky Survey (SDSS)

- ・北、北東  $z=0.472$
- ・ZwCl0823.2, 北西  $z=0.2248$
- (・南東  $z=0.10318$ )

可視光写真(白黒)に  
質量分布のコントア(青)を重ねた図。  
Okabe et al. 2009 より

Suzaku XISの視野に小型ダークマターハローがたくさん入る!

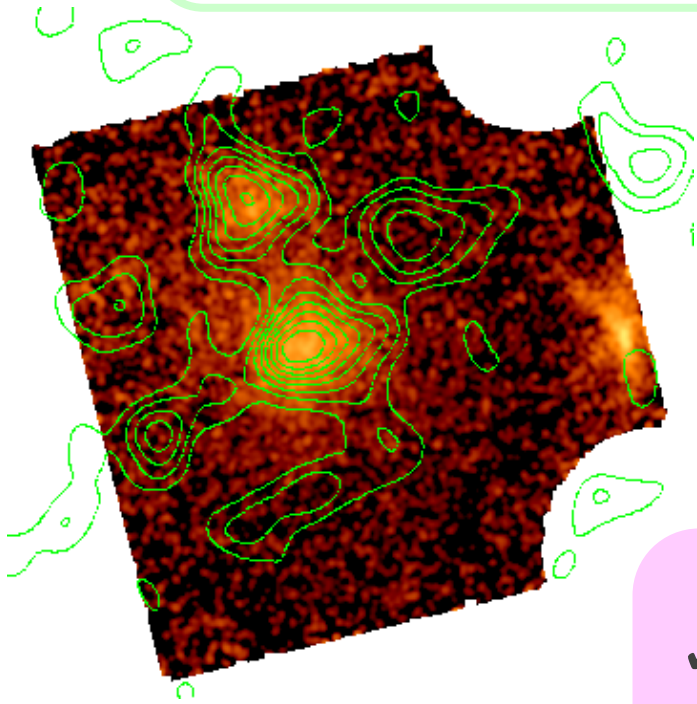
✓ 少なくとも2つの大規模構造が重なっている。



# Observation

## AO-3期

- 観測日 2008年05月17日～2008年05月18日
- 有効観測時間 XIS 41.3ksec
- 電荷注入(SCI) ON観測



Suzaku XIS0 image に  
質量分布のコントア(緑)を  
重ねたもの

\* ZwCl0823.2+0425, 北

- ・質量大
- ・強いX線放射

\* 北東

- ・質量小
- ・かすかなX線放射

\* 北西, 南東領域

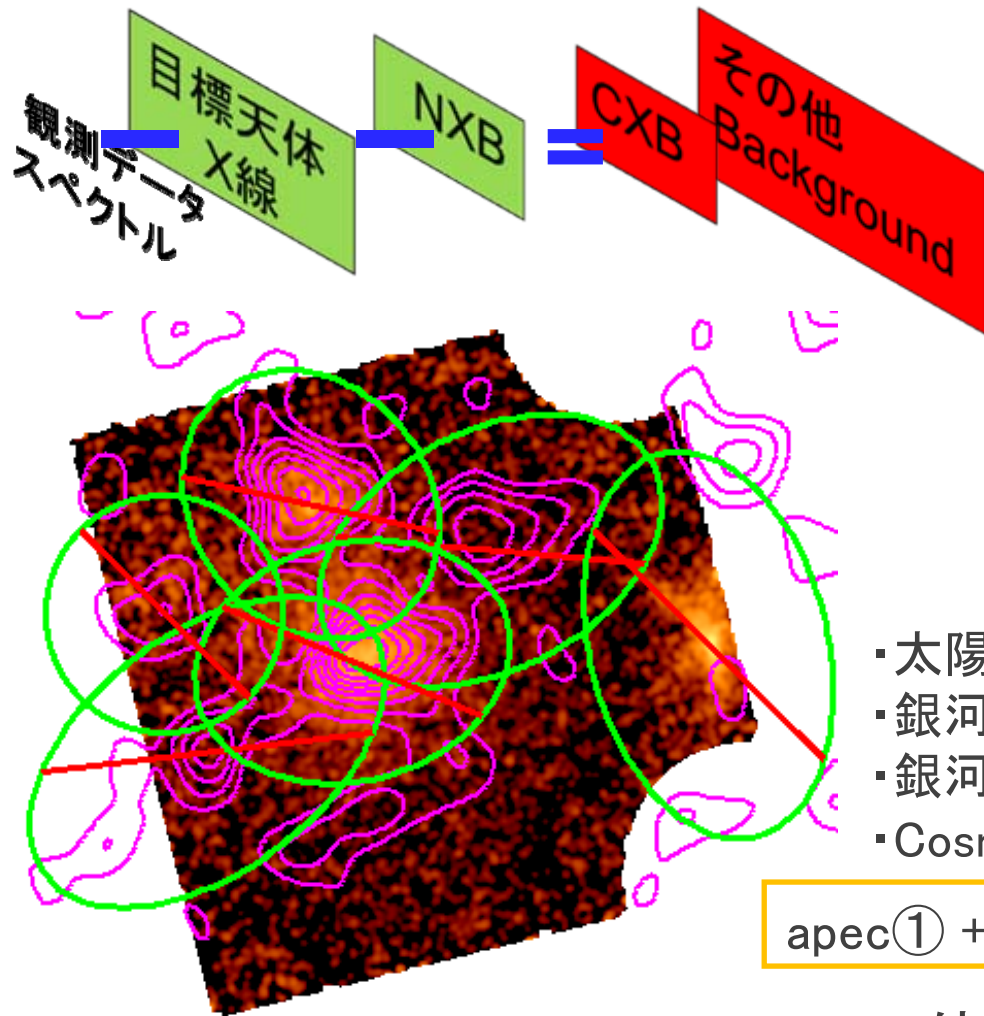
- ・質量中
- ・X線放射があまり見られない

- ✓ 質量分布は積分量であること
- ✓ 生データでコントアを作成していること

## 目的

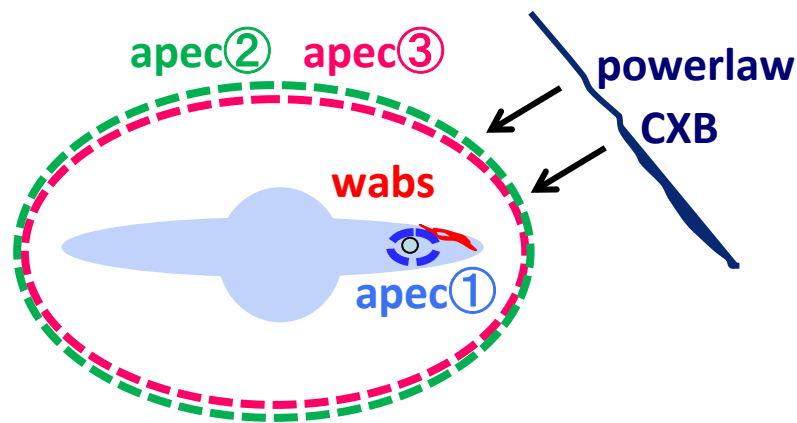
- ✓ 小型ダークマターハローの温度、アバンダンス  
Luminosityをしらべる
- ✓ Lx-kT, M-kT relationを調べる。
- ✓ 北西、南東領域についてはX線放射の上限値

# Background modelの作成



XIS0 imageに  
質量分布のコンア、  
切り抜いた領域(緑)を重ねた図

## \* Background 成分



- ・太陽系周辺のホットガス apec①
- ・銀河系の吸収 wabs
- ・銀河系周辺のハロー (2温度) apec②, apec③
- ・Cosmic X-ray Background power law

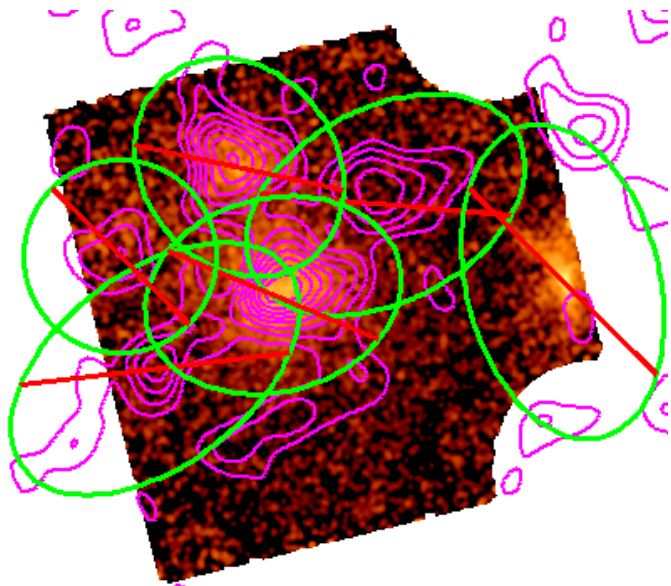
$$\text{apec①} + \text{wabs} \times (\text{apec②} + \text{apec③} + \text{power law})$$

## \* 使用したエネルギーバンド

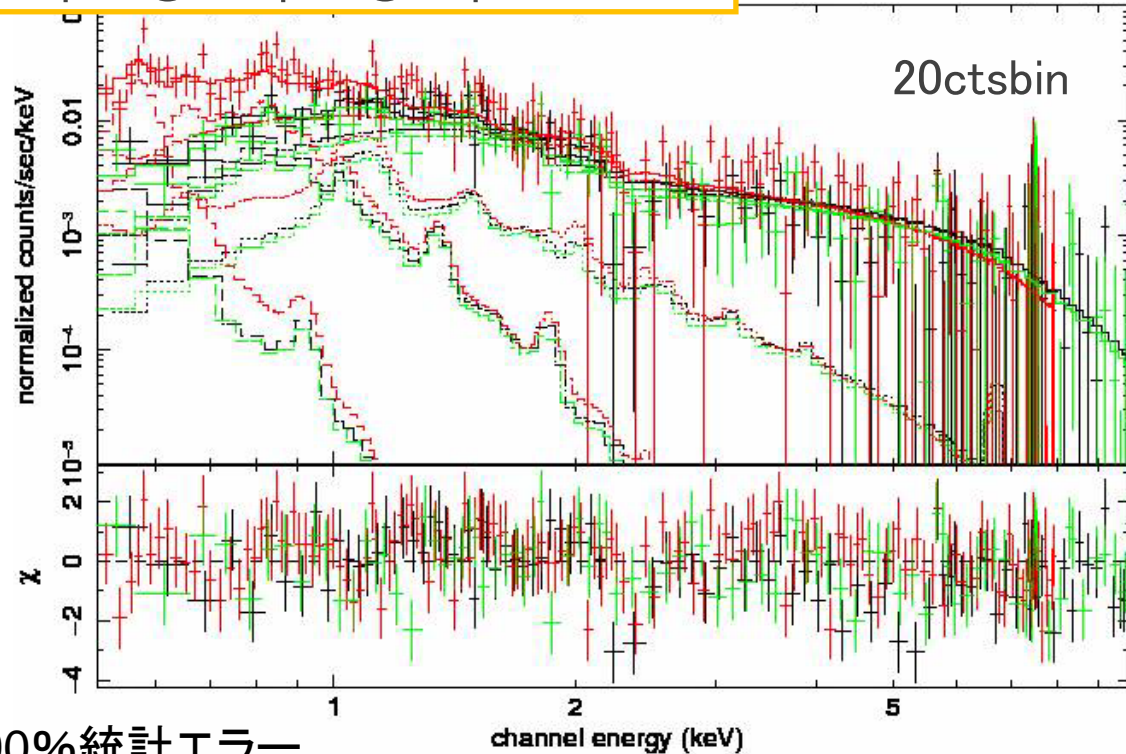
- ・XIS0, XIS3表面照射型 0.5–10.0 keV
- ・XIS1裏面照射型 0.5–8.0keV

# Background 解析結果

$$\text{apec}\textcircled{1} + \text{wabs} \times (\text{apec}\textcircled{2} + \text{apec}\textcircled{3} + \text{power law})$$



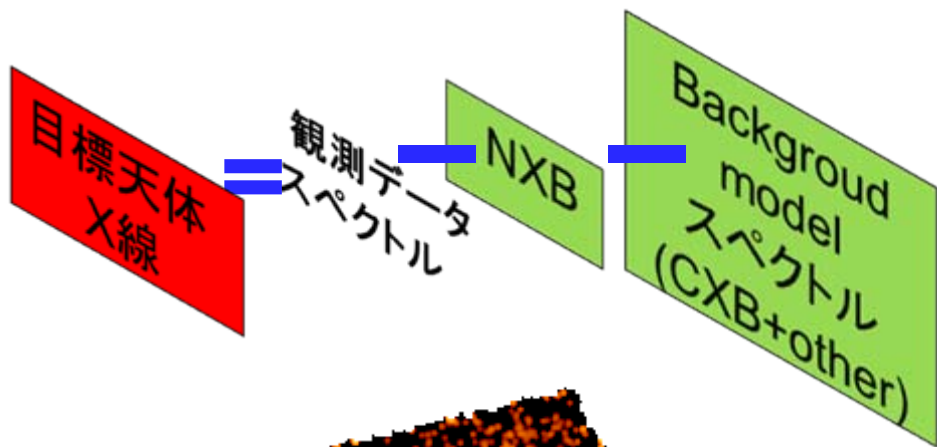
$$\chi^2 / \text{dof} = 355.7 / 337$$



90%統計エラー

	kT (keV)	Abundance	Redshift	Norm
APEC①	0.08(fixed)	1.0(fixed)	0.0(fixed)	1.08e-2 (6.83e-3, 1.47e-2)
APEC②	0.33 (0.28, 0.38)	1.0(fixed)	0.0(fixed)	6.02e-4 (4.01e-4, 7.89e-4)
APEC③	1.74 (1.48, 2.32)	1.0(fixed)	0.0(fixed)	6.05e-4 (4.19e-4, 8.45e-4)

# 各天体の解析方法



## \* スペクトルフィットモデル

- ・銀河団、各ハローからの放射 apec
- ・銀河系による吸収 wabs

$$\text{wabs} \times \text{apec}$$

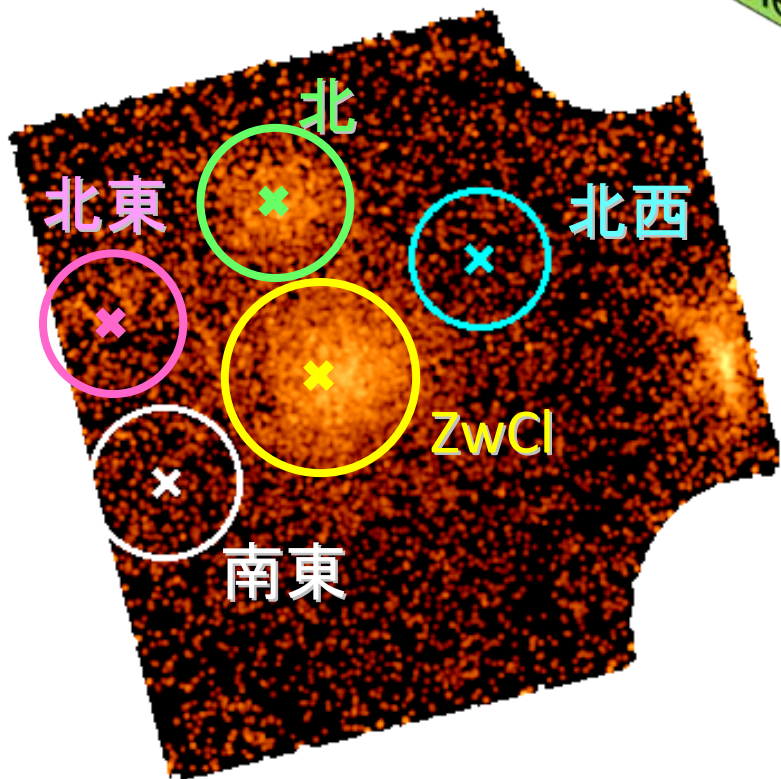
## \* フィットに使った領域

弱重力レンズ解析の結果から

- ・ZwCl0823銀河団 2.5min
- ・北, 南東 2min
- ・北東, 北西 1.8min

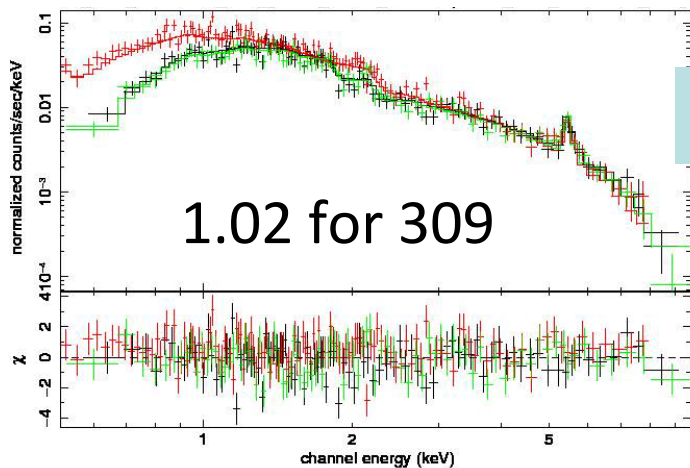
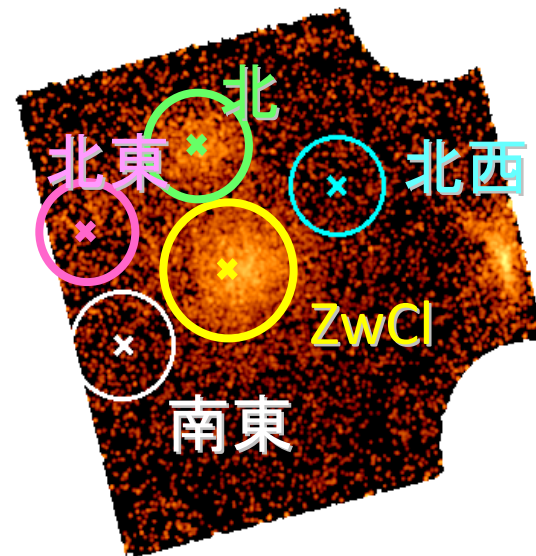
## \* 使用したエネルギーバンド

- ・XIS0, XIS3 0.5–10.0 keV
- ・XIS1 0.5–8.0keV



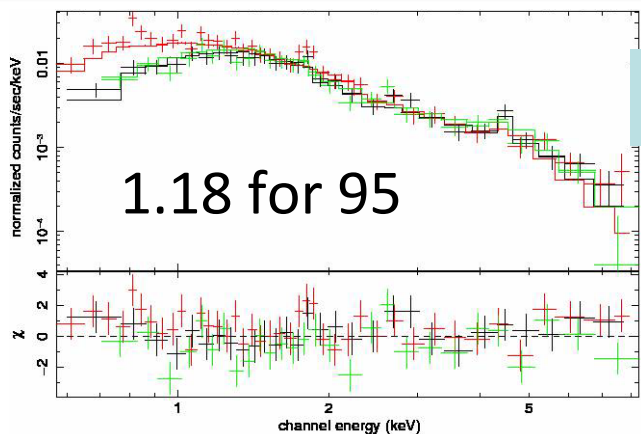
\* ZwCl0823.2, 北, 北東はbeta-modelを仮定したARFを使用

# 解析結果 (1)



Zwcl

	kT(keV)	abundance	redshift	norm
40ctsbins	4.68 (4.46 4.90)	0.34 (0.27 0.41)	0.2248 (fix)	3.23e-3 (3.16e-3 3.34e-3)

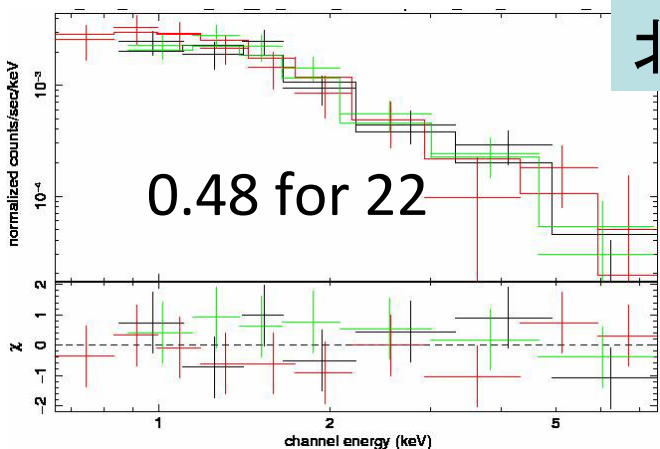
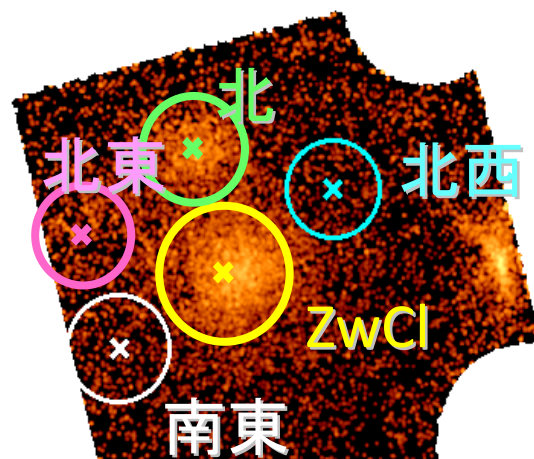


北

40ctsbins①	5.59 (4.97 6.36)	0.40 (0.20 0.64)	0.472 (fixed)	1.45e-3 (1.37e-3 1.53e-3)
------------	---------------------	---------------------	------------------	------------------------------



# 解析結果(2)



北東

南東のフィット  
\* イベント数が足りずフィットができなかった。

kT(keV)

abundance

redshift

norm

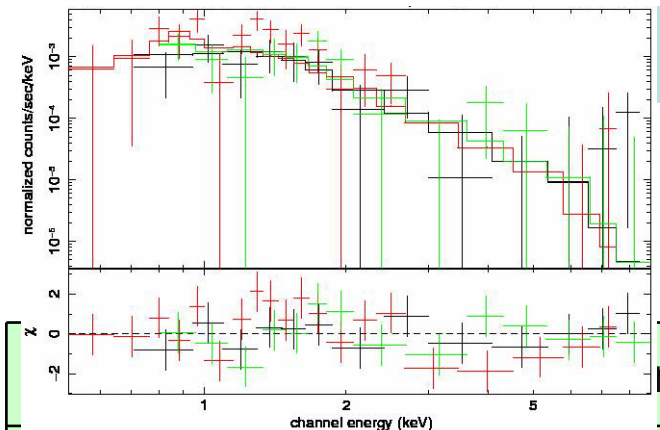
40ctsbin

3.80  
(2.82 5.36)

0.3  
(fixed)

0.472  
(fixed)

2.29e-4  
(2.93e-4 3.01e-4)



北西

Abundance

Redshift

Norm

北西

1.72  
(1.39, 2.32)

0.3(fixed)

0.2248  
(fixed)

7.14e-5  
(5.70e-5, 8.59e-5)

# Lx-kT relation and M-kT relation

Lx-kT relation : 観測的に知られている相関関係。

$$L_x/E(z) \propto k_B T^{2.5-3.0}$$

M-T relation : 単純なself-similar modelから銀河団の質量と温度の相関関係。

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

$$\text{ただし、} E(z) = \{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda\}^{0.5}$$

## The Simple Self-similar Model (Kaiser 1986)

✓ 銀河団のガスの温度はvirial温度

$$kT \propto \frac{M}{R}$$

✓ 銀河団はclustering scenarioに基づいて形成

✓ X線銀河団の構造は自己相似である

$$\rho_{\text{gal}} \propto \rho_{\text{dark}} \propto \frac{M}{R^3}$$

$$L_x \propto \rho_{\text{gal}}^2 R^3 T^{1/2}$$

これより、

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

Lx-kT relationもself-similar modelから導けるが、観測結果とは異なることがわかっている。

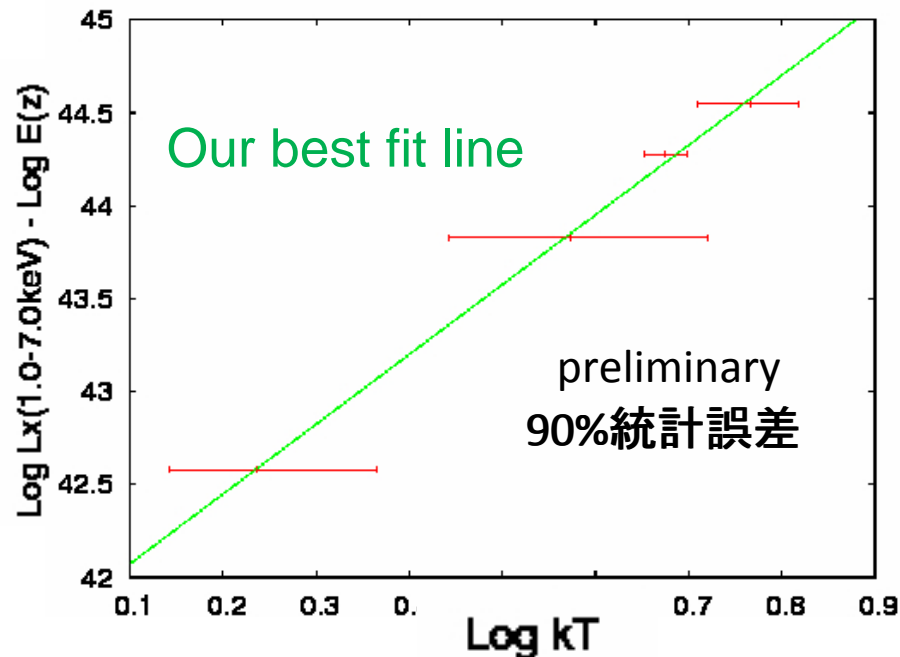
# Lx-kT relation and M-kT relation

## Lx-kT relation

観測的に知られている相関関係。

$$Lx/E(z) \propto k_B T^{2.5-3.0}$$

$$Lx/E(z) \propto k_B T^{3.8(\pm 0.11)}$$

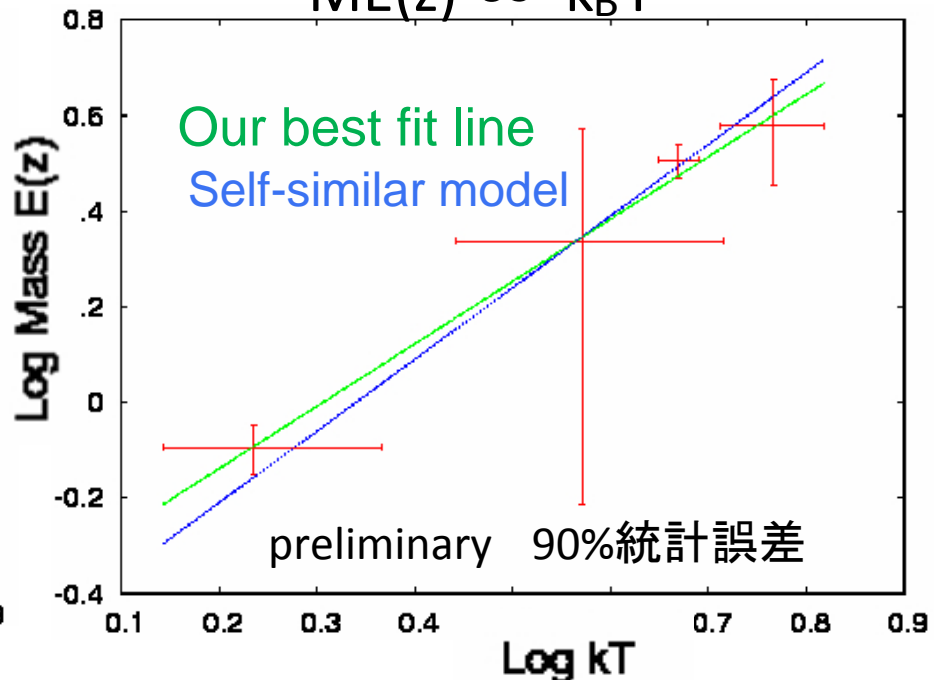


## M-T relation

単純なself-similar modelから銀河団の質量と温度は以下のように関係づけられる。

$$ME(z) \propto k_B T^{1.5}$$

$$ME(z) \propto k_B T^{1.3(\pm 0.07)}$$



Lx-kTは先行研究からずれている。M-T relationも self-similar modeからずれている(約3 $\sigma$ )。(ただし系統誤差、必ずしも独立した銀河団とはいえないことなど、考慮すべきことは多い)

# まとめ

- 電波ハローを持った衝突銀河団と考えられているAbell 2319銀河団をすざく衛星で観測した。
  - cold frontそばに低温・高アバundance領域。
  - 観測領域内のICMの視線速度はA2319Aと一致。領域内での速度差は亜音速。
  - $F_{IC} < 3 \times 10^{-11} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  (90%, 10-40keV),  $B > 0.2 \mu \text{G}$
  - 粒子加速は衝撃波よりは乱流によるのがもっともらしい。
- LoCuSSで複数のダークマターハローが確認されているZwCl0803.2+0425周辺領域をすざくで観測した。
  - 各ダークマターハローのスペクトル解析をおこなった。
  - L-Tは典型的な過去の結果とずれている。M-Tも自己相似もでるとはずれている。ただし、系統誤差はまだ考慮していない。また、各ダークマターハローは必ずしも独立した銀河団とはいえず、解釈には注意が必要。