

Abell 3395 と Abell 3391 の連結領域のX線観測

滝沢元和

2018年5月17日(木)@研究室談話会

Suzaku Observations of the Outskirts of the Galaxy Cluster Abell 3395
including a Filament toward Abell 3391

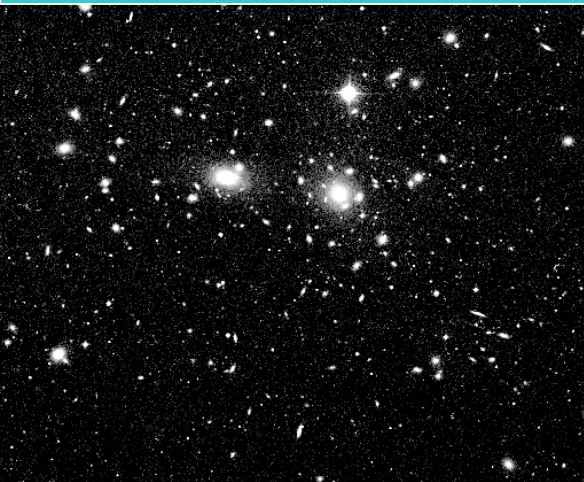
Y. Sugawara, M. Takizawa, M. Itahana, H. Akamatsu, Y. Fujita,
T. Ohashi, Y. Ishisaki, PASJ, 2017, 69, 93

Chandra and XMM-Newton Observations of the Abell 3395/Abell 3391
Intercluster Filament

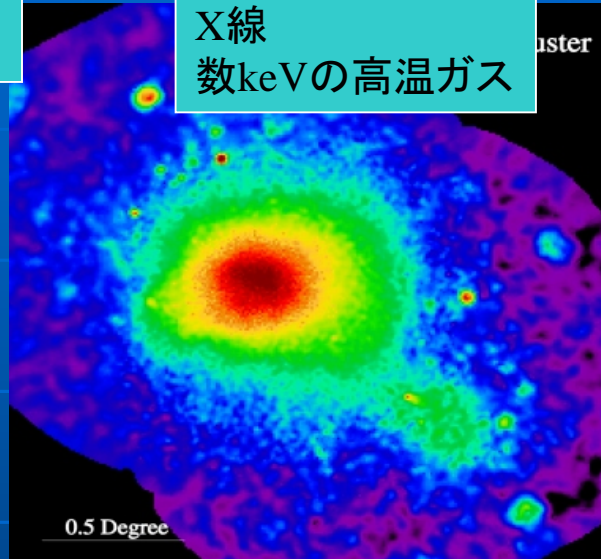
Alvarez, G. E., Randall, S. W., Bourdin, H., Jones, C., Holley-
Bockelmann, K., ApJ, 2018, 858, 44

Introduction: 銀河団

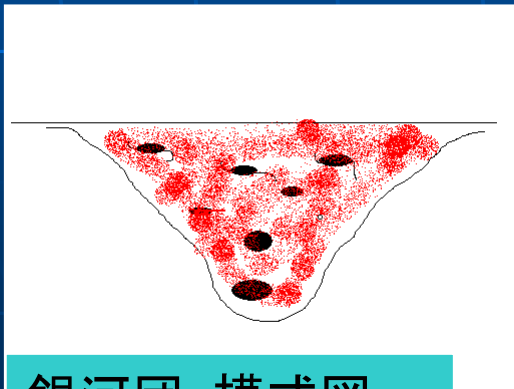
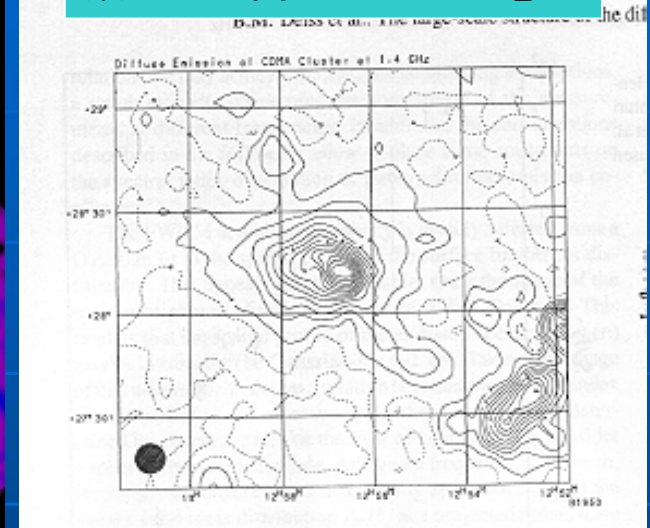
可視光
(数100個の銀河の集まり)



X線
数keVの高温ガス

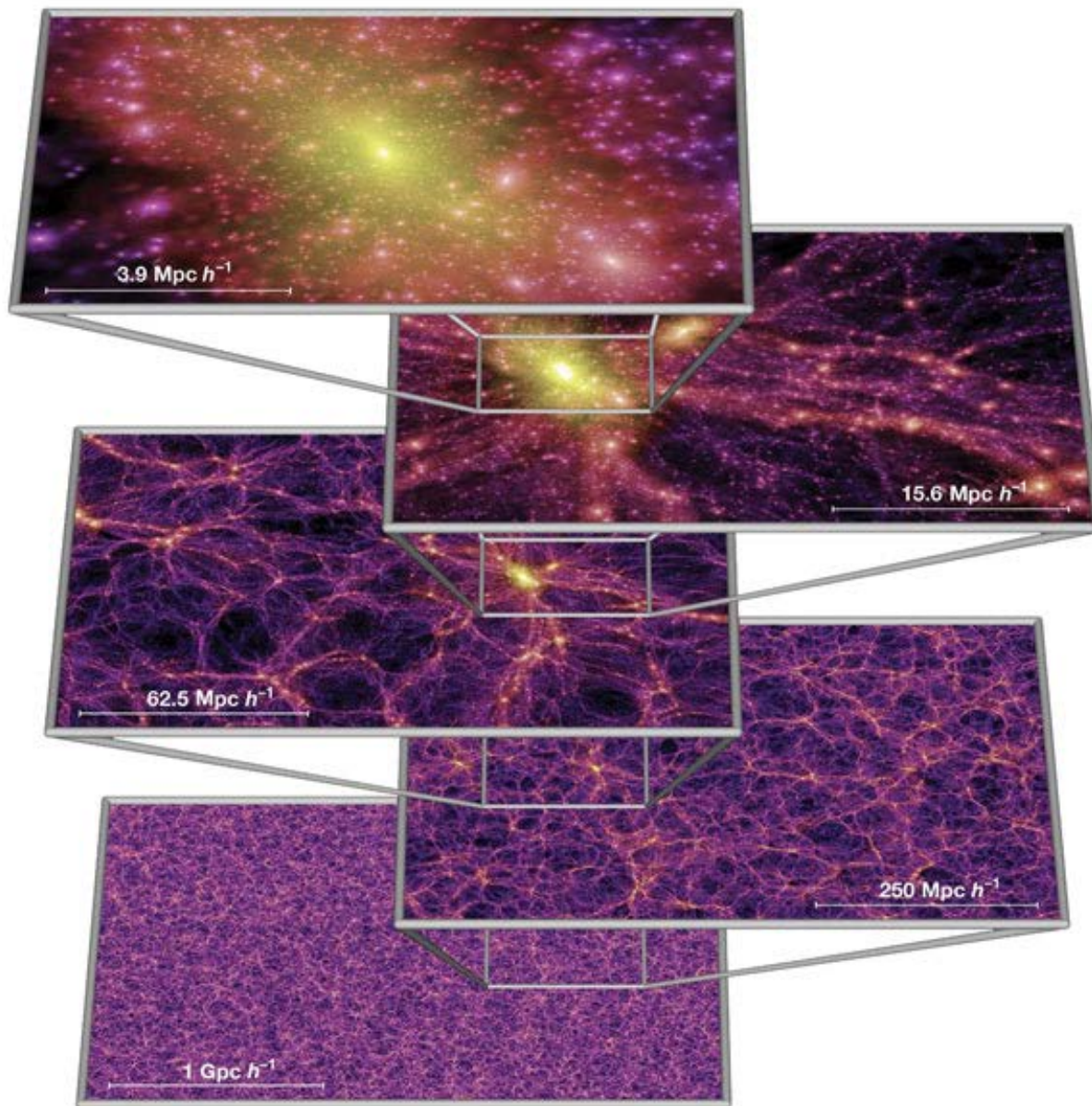


電波
数GeVの高エネルギー電子



銀河団: 模式図

- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ($T \sim 10^7 - 8K$) 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)



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。

銀河団外縁部の観測

■ 銀河団外縁部観測の意義

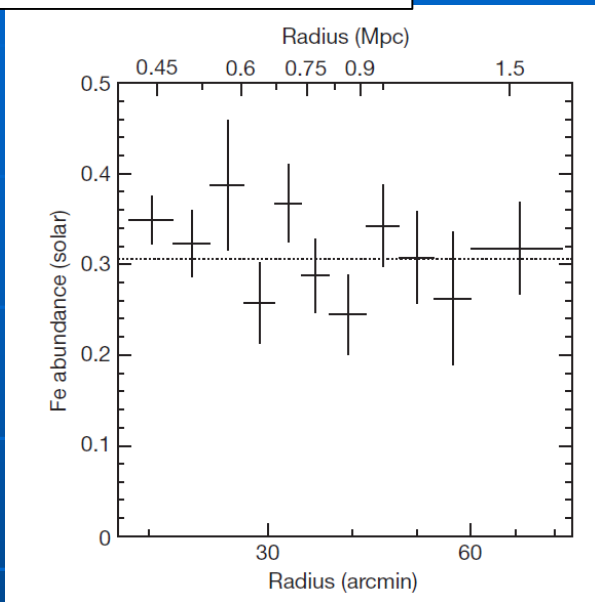
- 宇宙の構造形成の現場を見る。
- 高温ガスやダークマターの構造や物理状態がどうなっているのか。
- 銀河の形態分化の手がかり。
- 銀河団の総質量、バリオンの存在比など

■ 銀河団外縁部観測の難しさ

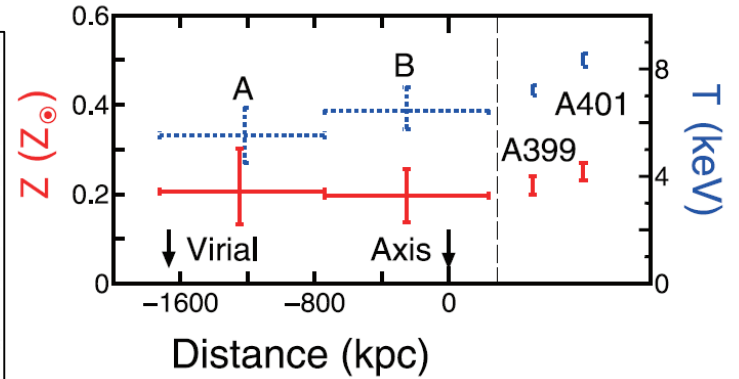
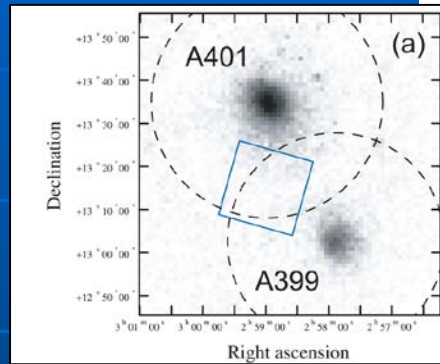
- 高温ガスの密度が低い(X線が暗い、ただし大規模構造フィラメント方向だと少し有利)
- 見かけのサイズが大きい
- 強い重力レンズはできない

銀河団外縁部の重元素量

Perseus座銀河団の
アバundance分布
Werner et al. (2013)



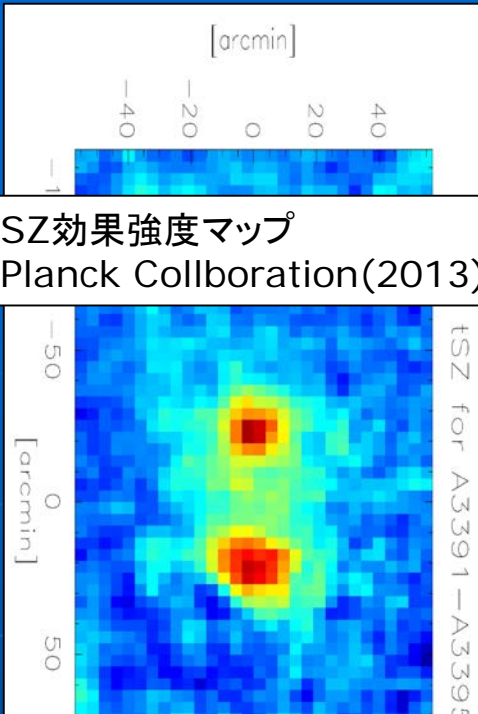
A399&A401
Fujita et al. (2008)
新しいアバundanceテーブルでZ~0.3相当



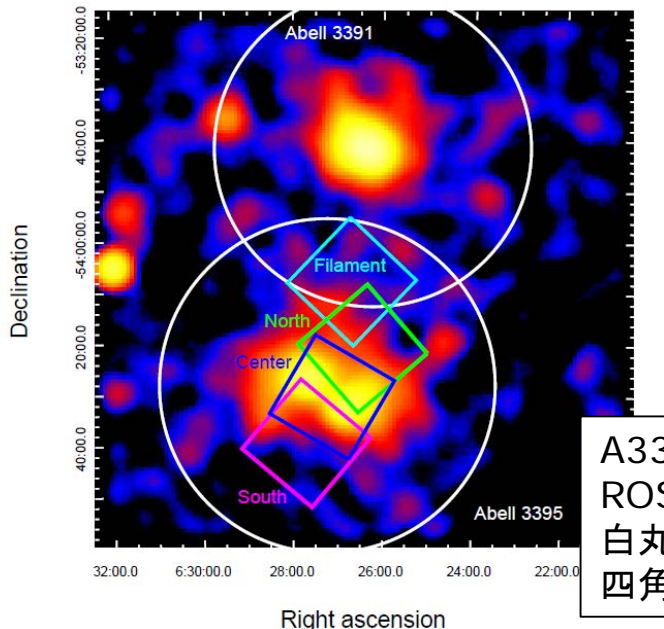
- 銀河団外縁部の重元素量は銀河からの重元素輸送過程や輸送時期の情報を含んでいる。
- 外縁部は暗いのでヴィリアル半径付近の重元素量の観測例は限られている (A401&A399、Perseus, Virgo)が、いずれも $Z \sim 0.3$ solar と高めの値。
- 銀河団形成前の超新星やAGN等によるoutflow起源を示唆 (early enrichment scenario)。
- 普遍的な傾向なのかを知るためもっとサンプルを増やしたい。

Abell 3395 & Abell 3391

SZ効果強度マップ
Planck Collaboration(2013)



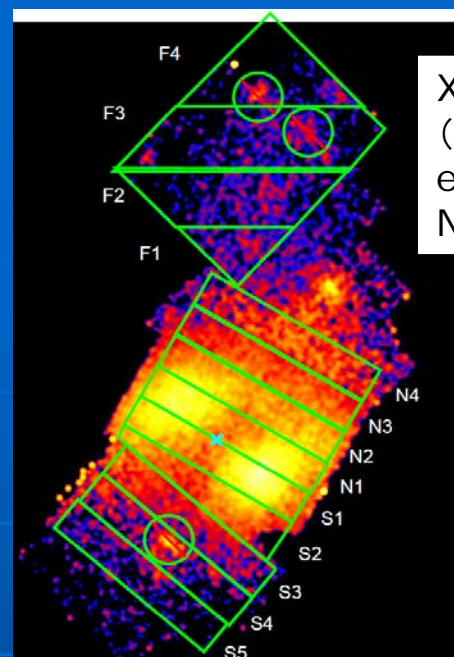
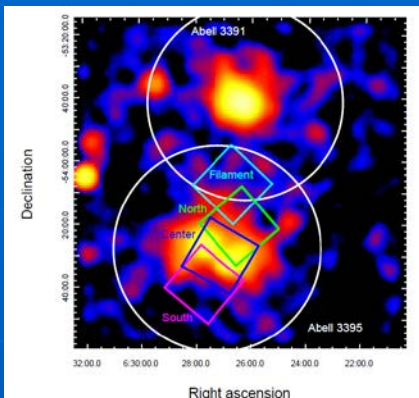
- お互いのvirial半径が重なっている銀河団ペア。pre-merger?
- 連結領域で高温ガスの観測例
 - ROSATとASCAによるDiffuse X-ray emission 検出 (Tittley & Henriksen 2001)。
 - SZ効果検出 (Planck Collaboration 2013)
- 両銀河団の相互作用のため外縁部のわりには明るめで重元素観測に適している(A399&A401と同様)。



A3395&3391
ROSAT image
白丸はヴィリアル半径
四角はすざくのXISの視野

すざく による観測

(Sugawara et al. 2017)

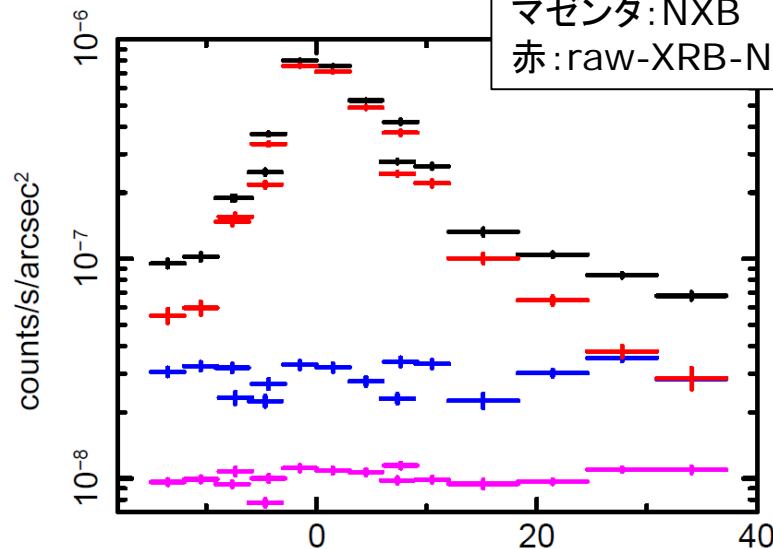


XIS3 image
(0.5-8.0keV)
exposureと
NXBの補正済み

Name (Obs.ID)	(RA, Dec)	Observation Date	Exposure (ksec)*
Filament (809033010)	(96°691, -54°123)	2014/5/14-15	71.8
North (807031010)	(96°614, -54°349)	2013/2/6-7	33.5
Center (803020010)	(96°784, -54°507)	2008/12/15-17	81.2
South (807032010)	(96°927, -54°657)	2013/2/16-17	39.3
Background (804089010)	(101°409, -54°203)	2009/5/20-23	87.8

- 連結領域+Abell 3395 本体のアーカイブデータ
- X-ray BGDはA3404外縁部のアーカイブデータで評価(2.5秒角オフセット)
- 目視でわかる点源
($\sim 3 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)を除去
- 最も暗い領域(連結領域)でもX-ray BGDと同程度のICM放射を検出。

南北方向の表面輝度分布

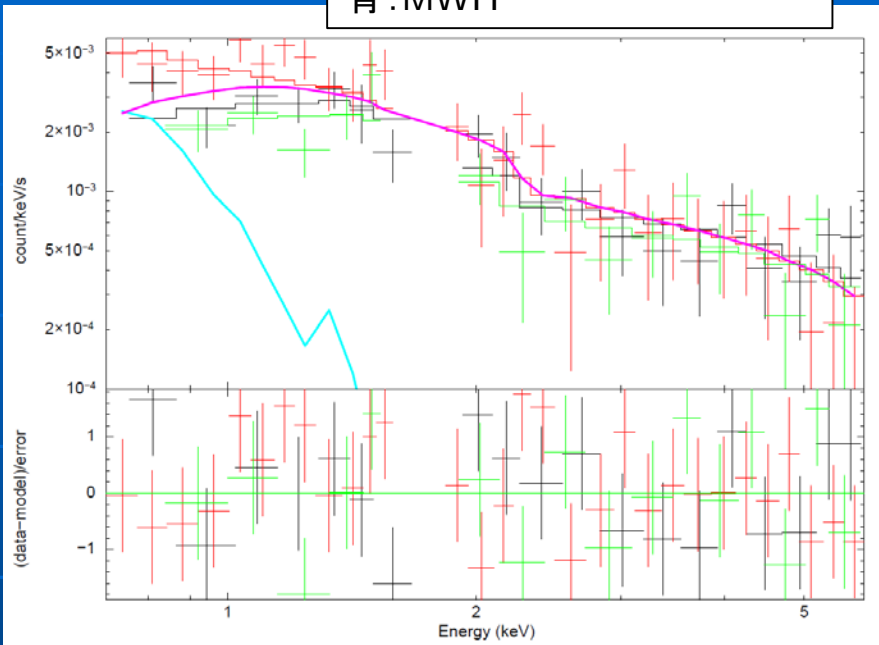


黒:raw image
青:X-ray BGD
マゼンタ:NXB
赤:raw-XRB-NXB

南 <-----> 北

X-ray BGDのXISスペクトル
マゼンタ: CXB
青: MWH

X-ray BGD model



Model Component	Parameter	Value
LHB	kT^*	0.08 (fixed)
	N^\dagger	$1.63_{-0.74}^{+1.78 \times 10^4} \times 10^{-5}$
MWH	kT^*	0.3 (fixed)
	N^\dagger	$5.57_{-3.70}^{+2.38} \times 10^{-4}$
CXB	Γ^\ddagger	1.4 (fixed)
	N^\S	$8.79_{-0.72}^{+0.72} \times 10^{-4}$
$\chi^2/d.o.f$		53.08/62

- X-ray BGDはA3404外縁部のアーカイブデータで評価 (2.5秒角オフセット)
- Local Hot Bubble, 銀河系円盤の吸収、銀河系ハロー高温ガス、CXBを考慮した以下のようなモデル

$$\text{apec}_{\text{LHB}} + \text{wabs} \times (\text{apec}_{\text{MWH}} + \text{powerlaw}_{\text{CXB}})$$

スペクトル解析

$$\text{const} \times \{ \text{apec}_{\text{LHB}} + \text{wabs} \times (\text{apec}_{\text{MWH}} + \text{powerlaw}_{\text{CXB}} + \text{apec}_{\text{ICM}}) \}$$

- スペクトル解析に使用したのは上記モデル。
- ICM成分以外はX-ray BGDの解析で決めたパラメータで固定。
- CXBの系統誤差はShafer(1983)より

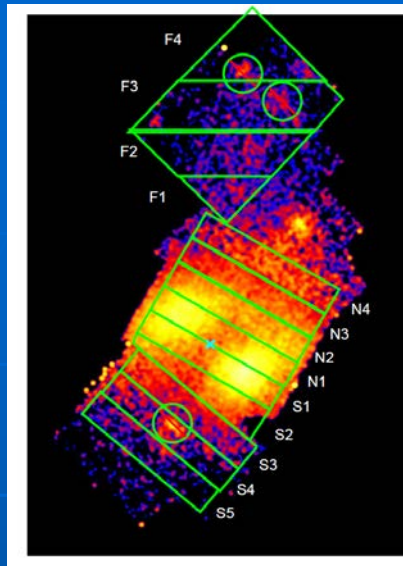
$$\frac{\sigma_{\text{CXB}}}{I_{\text{CXB}}} = 2.8\% \left(\frac{\Omega_e}{15.8 \text{ deg}^2} \right)^{-0.5} \left(\frac{S_c}{8 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}} \right)^{0.25}$$

ただし、点源の解析結果を考慮して

$S_c = 1 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ とした。

- NXBの系統誤差は90%信頼度で4.9%(Tawa et al. 2008)

温度分布

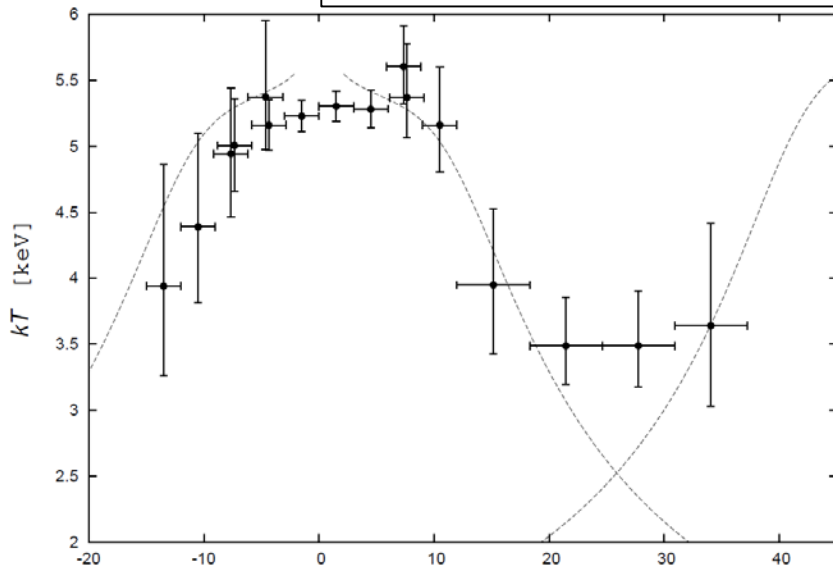


南北方向の温度分布
点線はOkabe et al. (2014)
の普遍的温度プロファイル

- A3995南側から北側(A3391との連結領域)までの温度分布
- Okabe et al. (2014)の普遍的温度プロファイルと比較
- 概ね一致するが、連結領域で高めの兆候

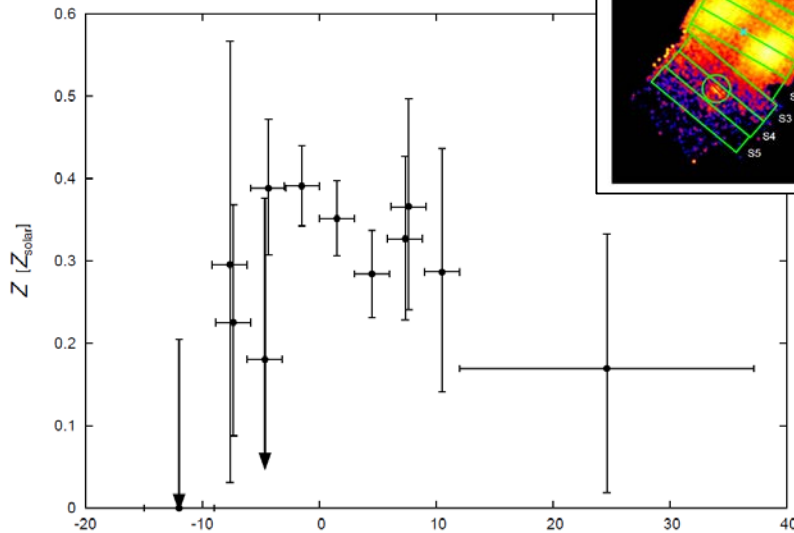
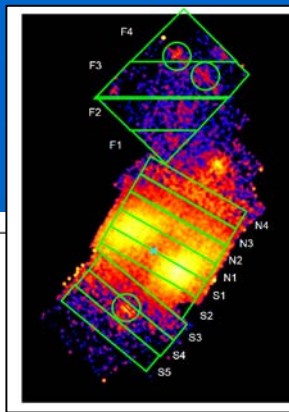
----->

mergerによる加熱か？



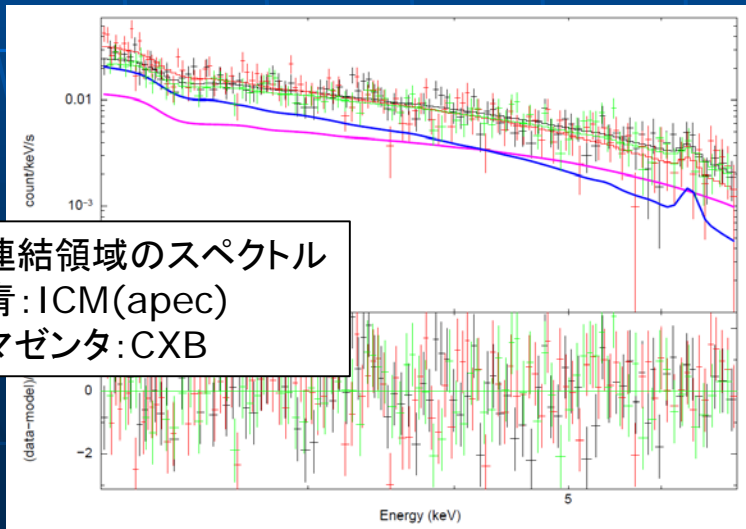
南 <-----> 北

南北方向の重元素量分布



南 <-----> 北

連結領域のスペクトル
青: ICM(apec)
マゼンタ: CXB



重元素量分布

- 2-7keVでスペクトルfit(Fe-Lの影響を除くため)
- 連結領域で以下の値を得た。

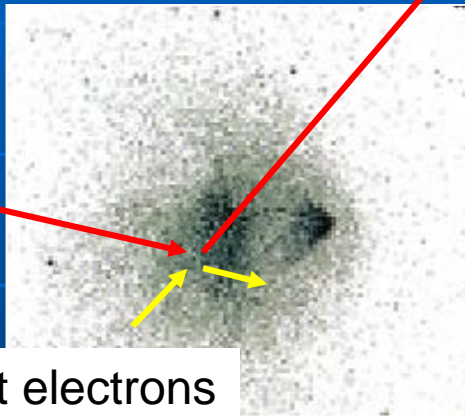
$$Z = 0.169^{+0.164+0.009+0.018}_{-0.150-0.004-0.015} \text{ solar}$$

- A399&A401, Perseusなどの結果($Z \sim 0.3$)とconsistent
- ---> Early enrichment scenarioを示唆
- ちなみに0.7-7keVでfitすると $Z < 0.120$ になってしまう。
(Fe-Lによるバイアス、Sasaki et al. 2015, Simionescu et al. 2015)

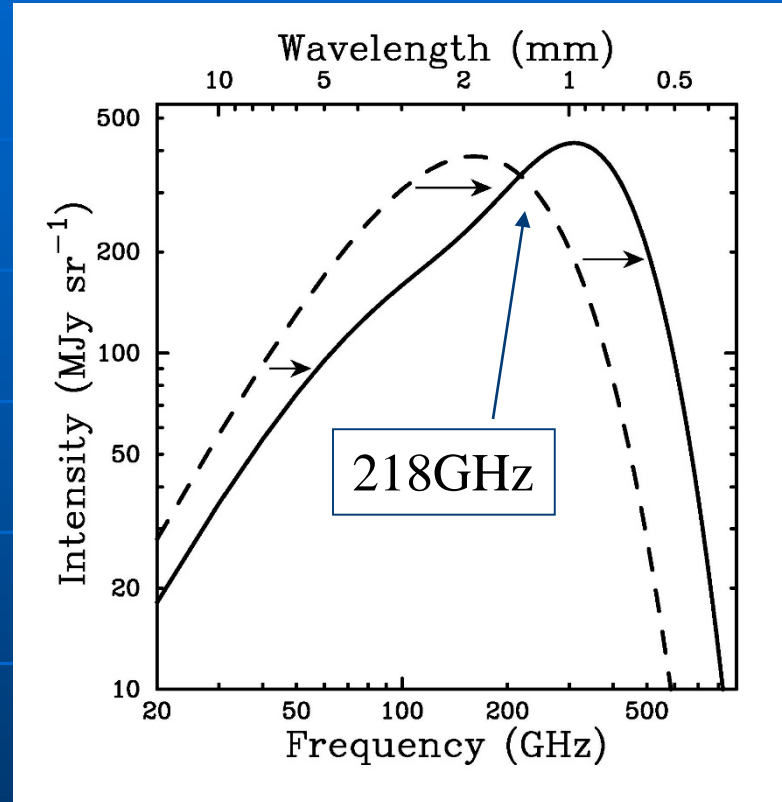
Sunyaev-Zel'dovich effect

Inverse Compton Scatterings

CMB photons
(2.7K black body)



Hot electrons
(10^7-8 K)



Cosmic Microwave Background (CMB) spectrum is modified because of inverse Compton scattering with hot gas such as ICM

- Decrement in mm band (R-J side)
- Increment in sub-mm band (Wein side)

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-ray is more sensitive to density structures, while SZ is relatively sensitive to temperature structures.

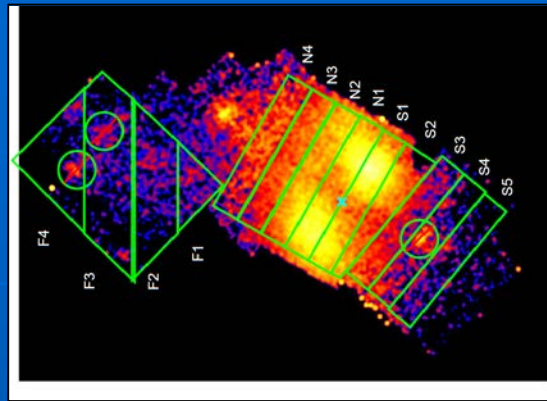
$$I_X \propto (1+z)^{-4}$$

$$I_{SZ} \propto (1+z)^0, \text{ because } U_{\text{CMB}} \propto (1+z)^4$$

連結領域でX線観測結果から出した y パラメータ

Compton y parameters in the filament

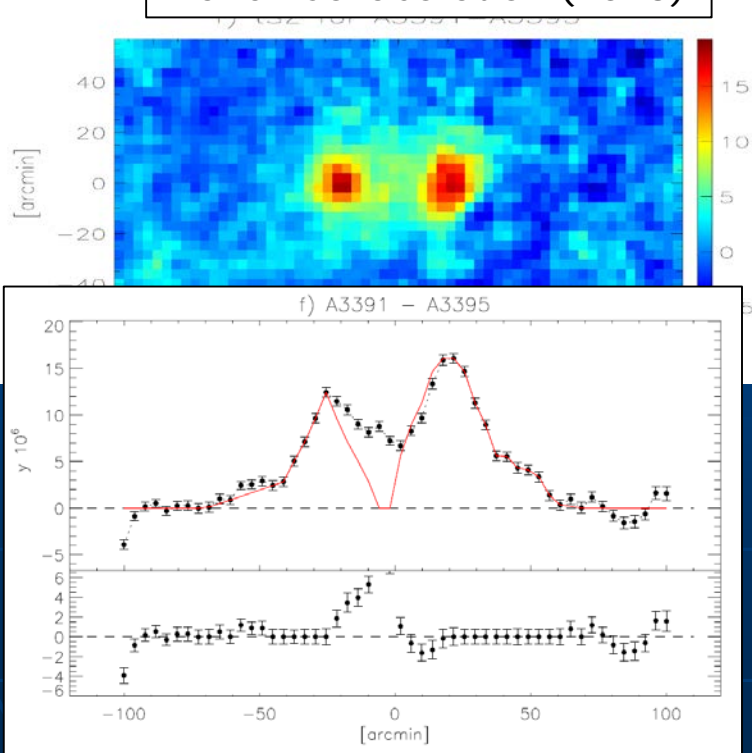
Region Number	y (10^{-6})*
F1	$4.28^{+0.67+0.54+0.12}_{-0.60-0.68-0.13}$
F2	$2.90^{+0.31+0.41+0.13}_{-0.25-0.37-0.12}$
F3	$2.74^{+0.33+0.39+0.15}_{-0.25-0.36-0.13}$
F4	$2.95^{+0.64+0.54+0.19}_{-0.51-0.58-0.22}$



SZ効果観測との比較

$$y = \int \left(\frac{kT_e}{m_e c^2} \right) n_e \sigma_T dl,$$

Planck Collaboration (2013)



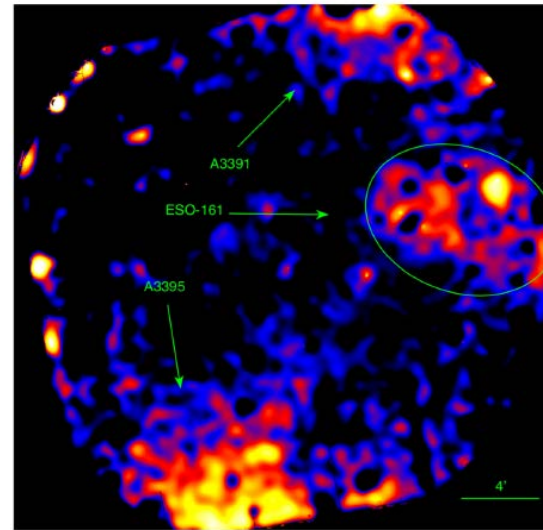
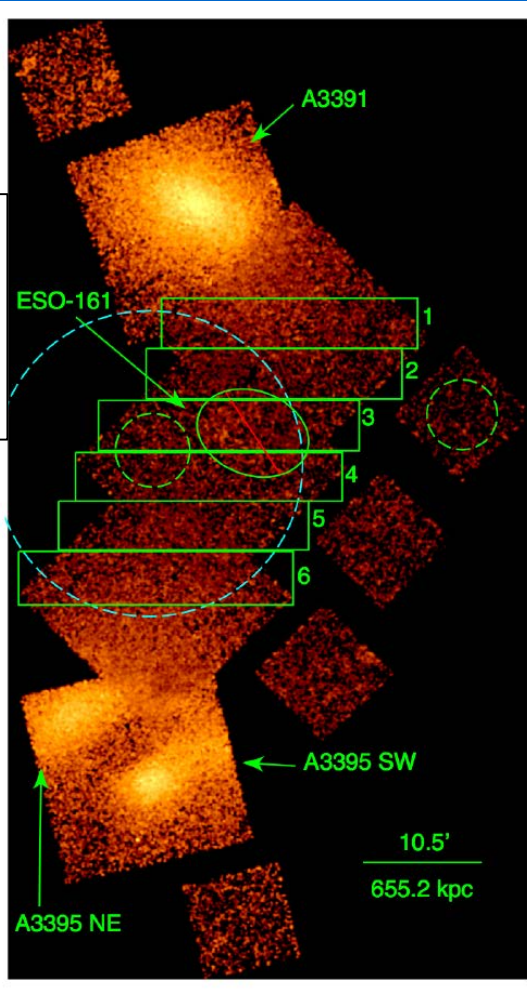
- 単純な円柱 (XISの視野の対角線を高さとして直径) を仮定してX線の結果 (kT , n_e) のみでCompton y パラメータを算出 --- $\rightarrow \sim 3 \times 10^{-6}$
- Planckによる結果 ($\sim 7 \times 10^{-6}$) より明らかに小さい。
- 視線方向にのびている?
(or 視線方向に傾いている?)
- X線で温度を過小評価している?

y パラメーターの食い違いについて (幾何学的要因など)

- apecのnormalization N は奥行きを L と仮定して
 $N \propto n_e^2 L$
- Compton y パラメーターは $y \propto n_e L$
- よって、 N を固定すると $y \sim L^{1/2}$
- 仮定した L が実際の L よりも小さいと y を過小評価してしまう。
- 今回の食い違いの原因がこれだけだとすると、奥行きを天球面内の構造と比べて5倍程度長くとらないといけない。
- あるいは衝突軸が視線方向と10度程度しか傾いていないとしても同様な状況になる。
- ちょっとこれだけで説明するのは難しいか？(X線で温度を過小評価しているなど別の要因も必要)

Chandra & XMM による観測 (Alvarez et al. 2018)

Chandra
image
(0.3-7.0keV)
exposure と
BGDの補正済み

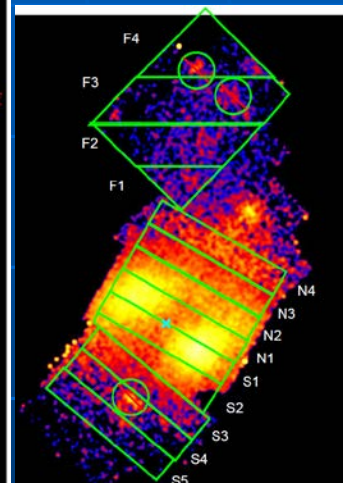
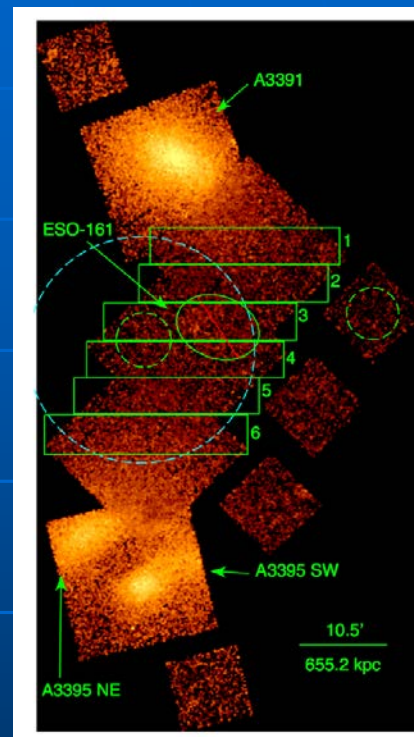
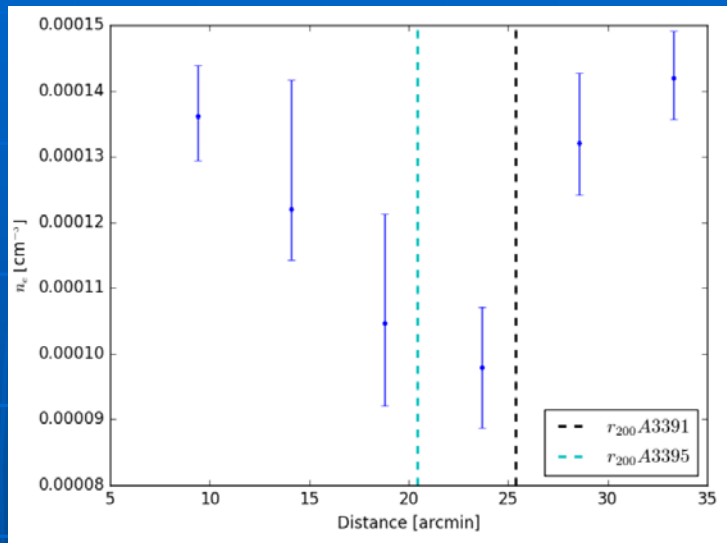


XMM image
(0.3-2.5keV)
exposure と
BGDの補正済み

Observatory	Pointing	ObsID	RA	Dec	Date Obs	Exposure [ks]		PI
						ACIS-I	EMOS1/EMOS2/EPN	
<i>Chandra</i>	A3391	4943	06 ^h 26 ^m 22 ^s .20	-53 ^d 41 ^m 37 ^s .50	2004-01-15	18.3		T. Reiprich
<i>Chandra</i>	Filament North	13525	06 ^h 25 ^m 22 ^s .52	-53 ^d 53 ^m 54 ^s .09	2012-08-18	48.4		S. Randall
<i>Chandra</i>	Filament Center	13519	06 ^h 26 ^m 10 ^s .69	-54 ^d 05 ^m 08 ^s .53	2012-08-17	47.1		S. Randall
<i>Chandra</i>	Filament South	13522	06 ^h 26 ^m 46 ^s .24	-54 ^d 17 ^m 05 ^s .87	2012-08-12	48.8		S. Randall
<i>Chandra</i>	A3395	4944	06 ^h 26 ^m 49 ^s .56	-54 ^d 32 ^m 35 ^s .16	2004-07-11	20.7		T. Reiprich
<i>XMM-Newton</i>	Filament Center	0400010201	06 ^h 26 ^m 31 ^s .62	-54 ^d 04 ^m 44 ^s .7	2007-04-06	38.2/38.5/23.1		M. Henriksen

フィラメント領域の密度

Chandra
ガス密度
20-35 arcmin
がすざくの領域
F4—F2におおよそ
対応



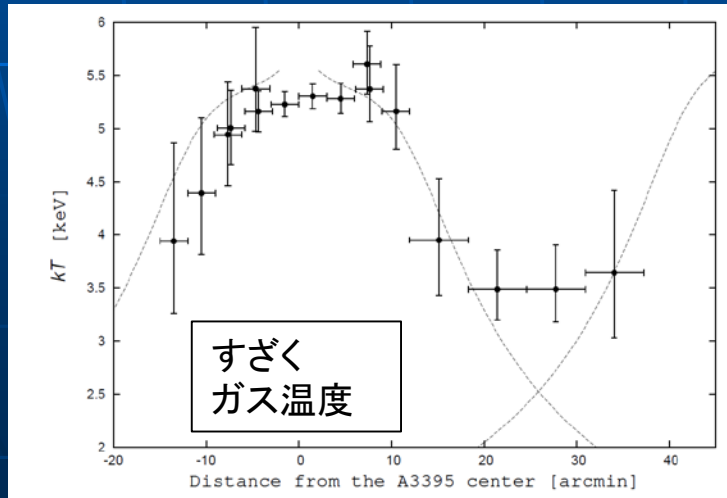
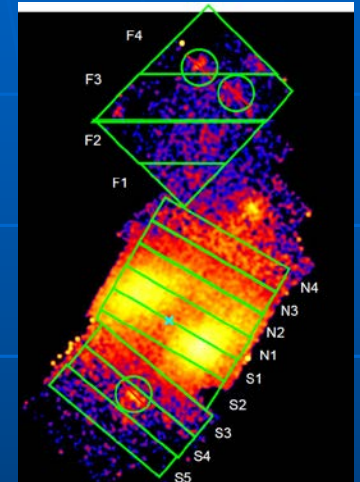
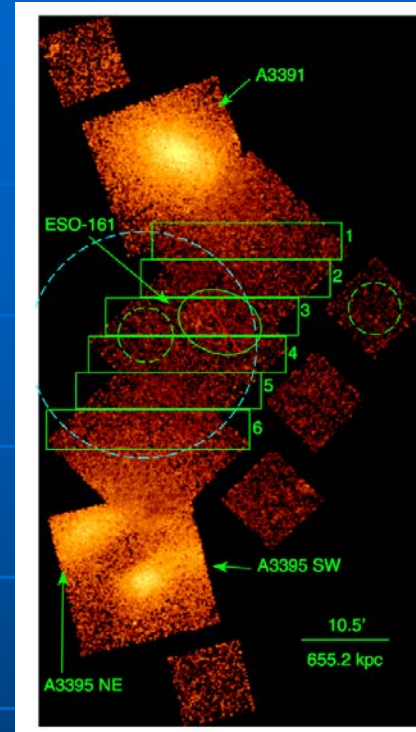
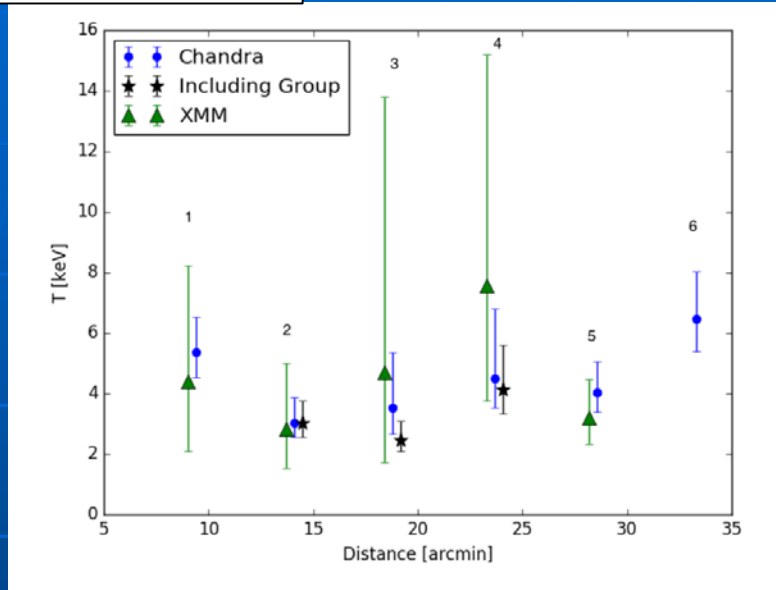
すざく
ガス密度

Region Number	$n_e (10^{-4} \text{ cm}^{-3})^*$
F1	$1.67^{+0.09+0.08+0.00}_{-0.08-0.07-0.00}$
F2	$1.28^{+0.03+0.07+0.01}_{-0.03-0.06-0.01}$
F3	$1.21^{+0.03+0.07+0.01}_{-0.03-0.06-0.01}$
F4	$1.25^{+0.06+0.10+0.01}_{-0.06-0.09-0.01}$

- Chandraとすざくの結果はconsistent
- Chandraではより詳細な構造が見えている

Chandra & XMM
 ガス温度
 20-35 arcmin
 がすぎくの35-20
 におおよそ対応

フィラメント領域の温度

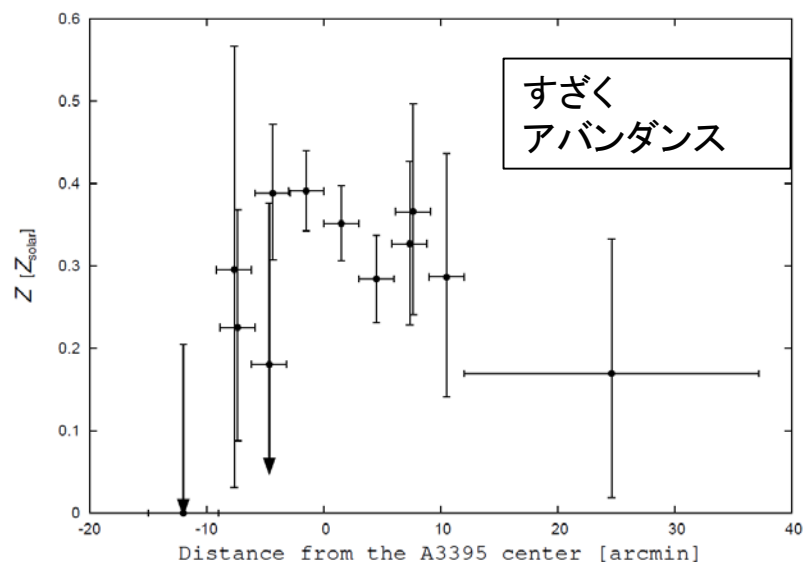
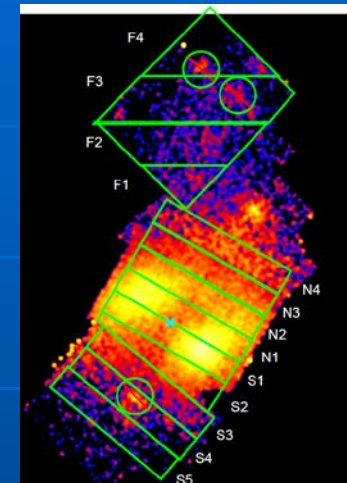
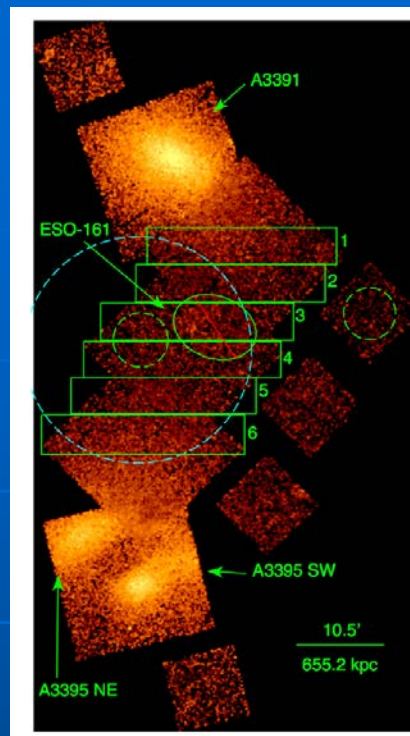


- Chandraの結果は系統的に高めだが誤差を考えると矛盾とまではいえない。
- XMMでは全然だめ

フィラメント領域の アバundance

Chandr
アバundance
(Abundance table
が古いのですごくの結
果より0.1程度低めに
ではず)
Region3-6がおおよ
そ下のグラフの右端に
相当

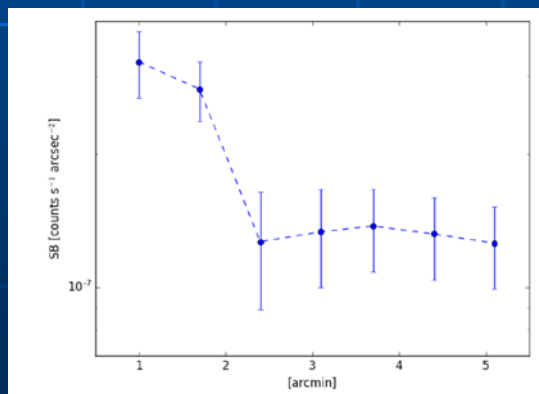
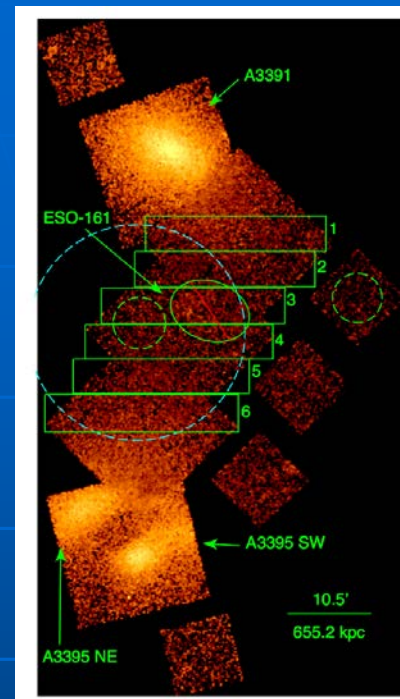
Region	Abundance [Z_{\odot}]
1	< 0.72
2	$0.14^{+0.12}_{-0.12}$
3	< 0.63
4	< 0.65
5	$0.60^{+0.74}_{-0.20}$
6	< 0.63



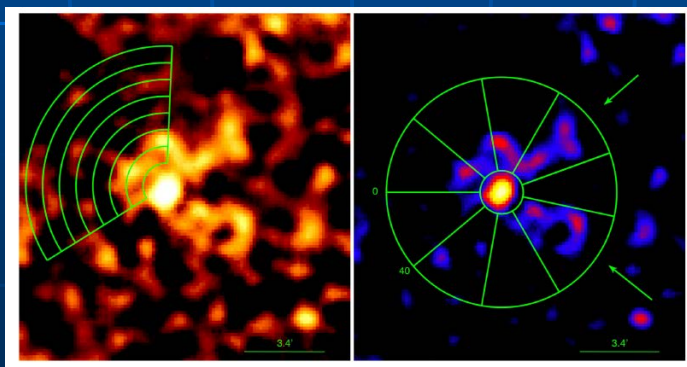
- Chandraではアバundanceはやはり厳しかったか、、、

銀河群ESO-161周辺

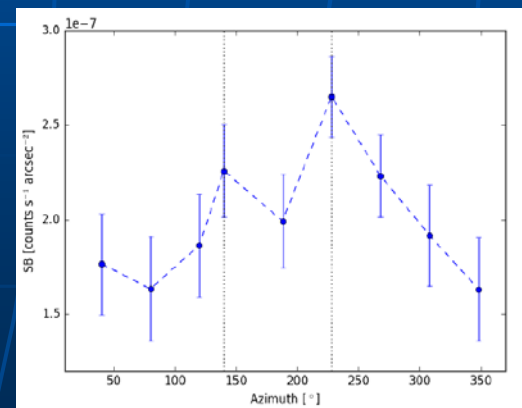
- A3391とA3395の間には銀河群ESO-161が見つかった(すざくでは視野外)。
- 高温ガス成分も付随してるよう。
- 東側にX線輝度のエッジ(接触不連続面?)
- 西側に二股(V字型)のtail構造
- 東に向かって運動していて動圧ではぎ取られている? 低密度領域では珍しい例。



西側表面輝度分布



ESO-161のチャンドラのX線イメージ(0.3-3.0keV)



接線方向表面輝度分布

Summary

- A3391との連結領域を含むA3395周辺のすざくのデータを解析した(Sugawara et al. 2017)。
 - 普遍的温度プロファイル(Okabe et al. 2014)との比較から連結領域でガスの加熱の兆候を得た。
 - 連結領域で $Z \sim 0.3$ と矛盾ない重元素量を得た。これはearly enrichment scenarioを示唆する。
 - 重元素量の測定ではFe-L付近を使わないことが結果におおきな影響を与える。
 - X線の結果のみで求めたCompton y パラメータはPlanckの結果よりも小さい。視線方向に伸びた構造やX線で温度を過小評価していることが原因として考えられる。
- その後、Chandra&XMMの結果も出た(Alvarez et al. 2018)。
 - 概ね我々の結果と矛盾はない。
 - 銀河群ESO-161の運動の兆候を得た

point sources

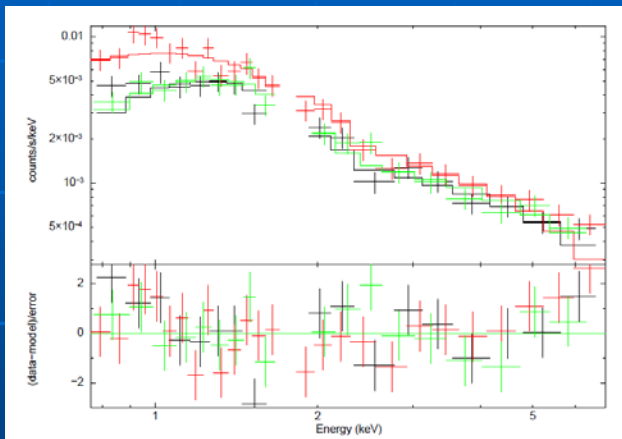
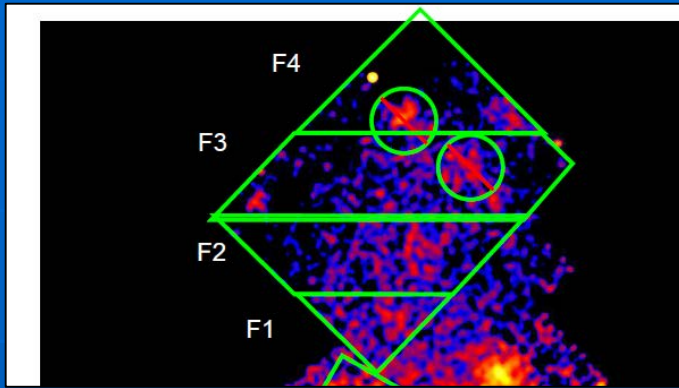


Table 7. Fitting results of the point source A spectra with the power-law model

model component	parameter	value
powerlaw	Γ^*	$1.67^{+0.06}_{-0.06}$
	N^\dagger	$7.49^{+0.48}_{-0.47} \times 10^{-5}$
$\chi^2/d.o.f$		70.23/57

Flux of the point source A for each XIS sensor

sensor	flux ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$)
XIS0	$2.52^{+0.16}_{-0.29} \times 10^{-13}$
XIS1	$3.19^{+0.24}_{-0.17} \times 10^{-13}$
XIS3	$2.20^{+0.06}_{-0.15} \times 10^{-13}$

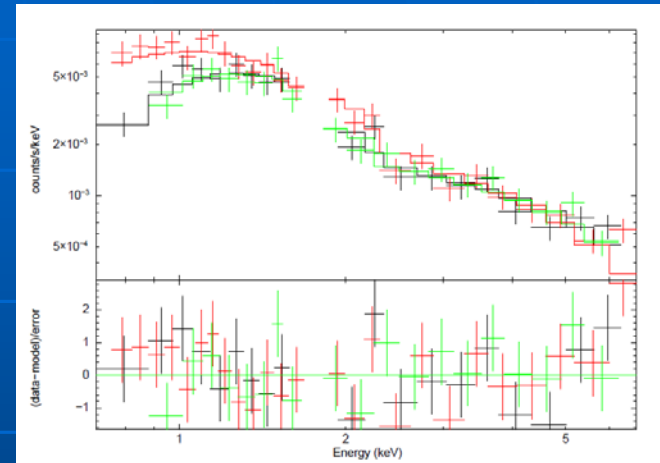


Table 9. Fitting results of the point source B spectra with the power-law model

model component	parameter	value
powerlaw	Γ^*	$1.58^{+0.06}_{-0.06}$
	N^\dagger	$5.81^{+0.39}_{-0.38} \times 10^{-5}$
$\chi^2/d.o.f$		55.12/59

Flux of the point source B for each XIS sensor

sensor	flux ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$)
XIS0	$2.48^{+0.28}_{-0.11} \times 10^{-13}$
XIS1	$2.83^{+0.14}_{-0.11} \times 10^{-13}$
XIS3	$2.41^{+0.14}_{-0.08} \times 10^{-13}$