

# X線鉄輝線共鳴散乱を用いた銀河団内 高温プラズマでの乱流の大きさの制限

枝廣育実, 深沢泰司(広島大学)

# Introduction

## 銀河団内高温プラズマ(ICM): 乱流の存在が示唆

乱流の大きさが分かると

- ・銀河団の質量構成
- ・銀河団の形成の歴史
- ・高エネルギー粒子の加速機構の解明

につながる

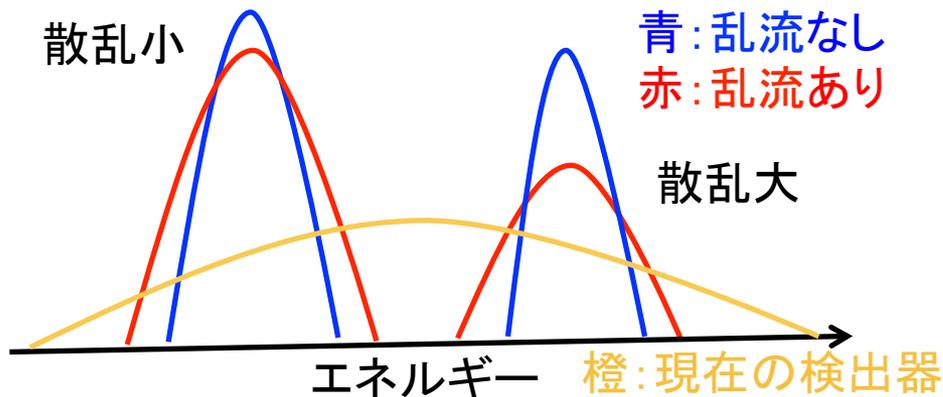


ペルセウス銀河団

### 乱流を探る方法

- ・輝線スペクトルのドップラー幅 → 運動の大きさ ○ 運動の種類 ×
- ・乱流の大きさに影響される **共鳴散乱(RS)**

<振動子強度の異なる2つのライン>



乱流の大きさが強度比が変化

☆検出器の分解能の良さが重要

ASTRO-H/SXS(Soft X-ray Spectrometer)

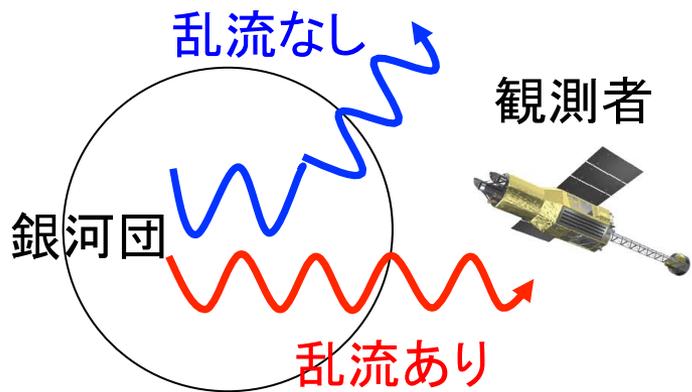
マイクロカロリメータ:広がった天体の測定可  
優れたエネルギー分解能(~7eV)

→ これまで分離できなかったラインを  
分離可能

# Introduction

目的: 銀河団の合体の歴史の情報を引き出したり、銀河団内の質量構成 (銀河、ICM、DM) により強い制限をつけるため、ASTRO-HやSuzakuの観測により銀河団内高温プラズマ(ICM)の乱流情報を得たい

手法: 銀河団内ICMでのFe-Kライン共鳴散乱シミュレータをGeant4を用いて構築  
観測データとシミュレーション結果の比較により乱流の大きさを制限



共鳴散乱 断面積	乱流なし	乱流あり
大	散乱されやすい	<b>共鳴散乱が減少</b>
小	散乱されにくい	変化なし
強度比		小さくなる

衛星の観測データから  
得られる強度比



比較により乱流の大きさに  
制限をつけることができる

様々な乱流の大きさを  
シミュレーションし、  
強度比を求める

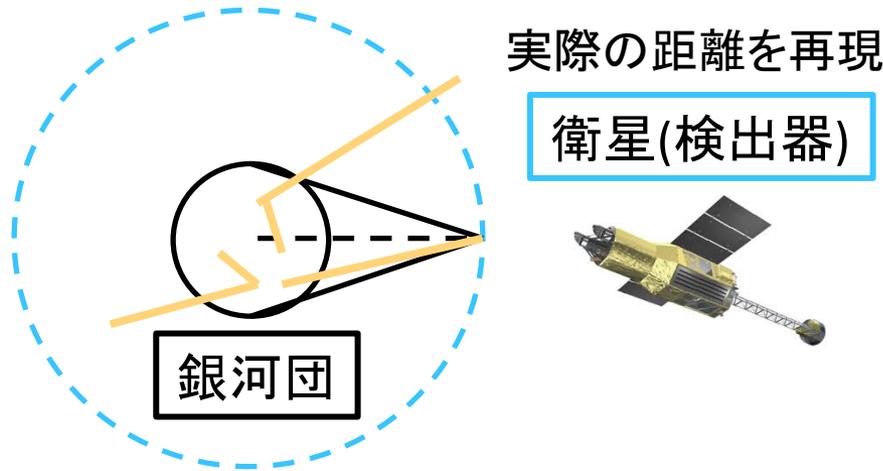
先行研究

Churazov+04,Zhuravleva+13

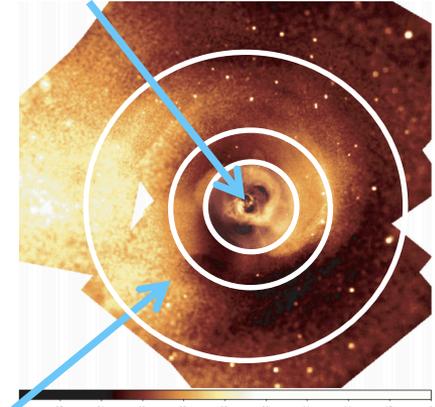
# シミュレータの構築

球対称の銀河団を用意し散乱過程を再現

密度分布・重元素アバundance・温度(後述): ペルセウス銀河団のデータ  
散乱過程・散乱断面積



1分角以内: 銀河団中心



2-4分角以内: 銀河団の外側

共鳴散乱断面積

$$\sigma_{RS} = \frac{\pi e^2}{m_i c} f_{12} \frac{h}{\sqrt{2\pi\Delta E}} \exp\left\{-\frac{(E_0 - E_{RS})^2}{2\Delta E^2}\right\}$$

$$\Delta E \approx E_0 \left[ \frac{k_B T}{m_i c^2} \left( 1 + 1.4 \frac{m_i}{m_p} M^2 \right) \right]^{1/2}$$

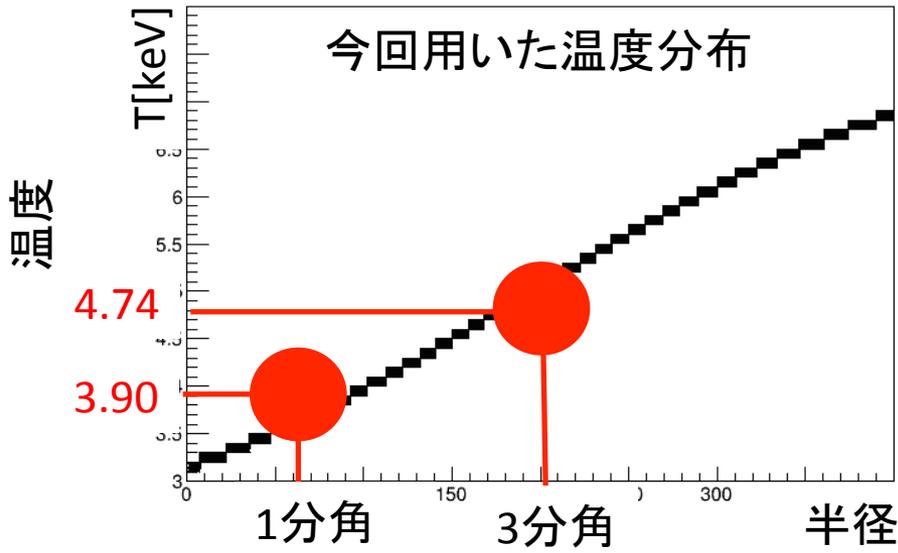
$f_{12}$  振動子強度

$E_0$  入射光子のエネルギー

$E_{RS}$  共鳴エネルギー

$\Delta E$  熱的および乱流のドップラー効果による共鳴エネルギー幅

# シミュレータの構築



Suzaku/XIS観測データの6.7, 7.0keVラインの強度比とapecモデルとの比較により求めた温度

観測データと合う温度分布を組み込んだ

Ion	upper level		$E_{RS}$ [keV]	$f_{12}$
Fe <sup>24+</sup>	$1s^1 2s^1 \ ^3S_1$	K $\alpha$	6.637	$1.60 \times 10^{-5}$
Fe <sup>24+</sup>	$1s^1 2p^1 \ ^3P_1$	K $\alpha$	6.668	0.0562
Fe <sup>24+</sup>	$1s^1 2p^1 \ ^3P_2$	K $\alpha$	6.682	$2.81 \times 10^{-7}$
Fe <sup>24+</sup>	$1s^1 2p^1 \ ^1P_1$	K $\alpha$	6.7011266	0.703
Fe <sup>25+</sup>	$2p^1 \ ^2P_{1/2,3/2}$	K $\alpha$	6.9519639, 6.9731781	0.44
Ni <sup>26+</sup>	$1s^1 2p^1 \ ^3P_1$	K $\alpha$	7.7668938	0.0883
Ni <sup>26+</sup>	$1s^1 2p^1 \ ^1P_1$	K $\alpha$	7.8062340	0.683
Fe <sup>24+</sup>	$1s^1 3p^1 \ ^1P_1$	K $\beta$	7.8820244	0.138
Ni <sup>27+</sup>	$2p^1 \ ^2P_{1/2,3/2}$	K $\beta$	8.0731039, 8.1017429	0.44
Fe <sup>25+</sup>	$3p^1 \ ^2P_{1/2,3/2}$	K $\beta$	8.2636944, 8.2526875	0.046

シミュレータに組み込んだライン  
 Fe He-like, H-likeのK $\alpha$ , K $\beta$   
 Ni He-like, H-likeのK $\alpha$ , K $\beta$  計13本

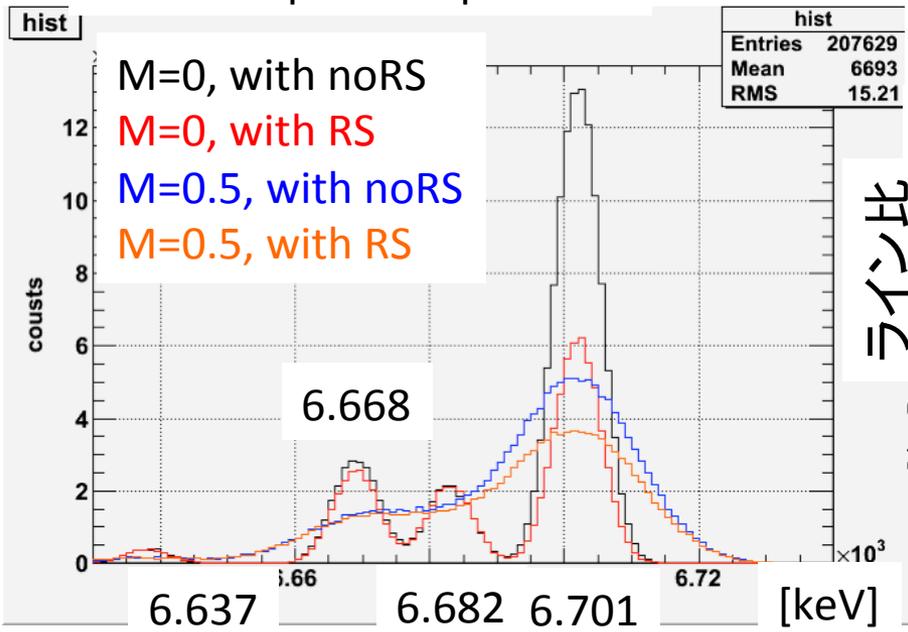
振動子強度大

# ASTRO-H シミュレーション

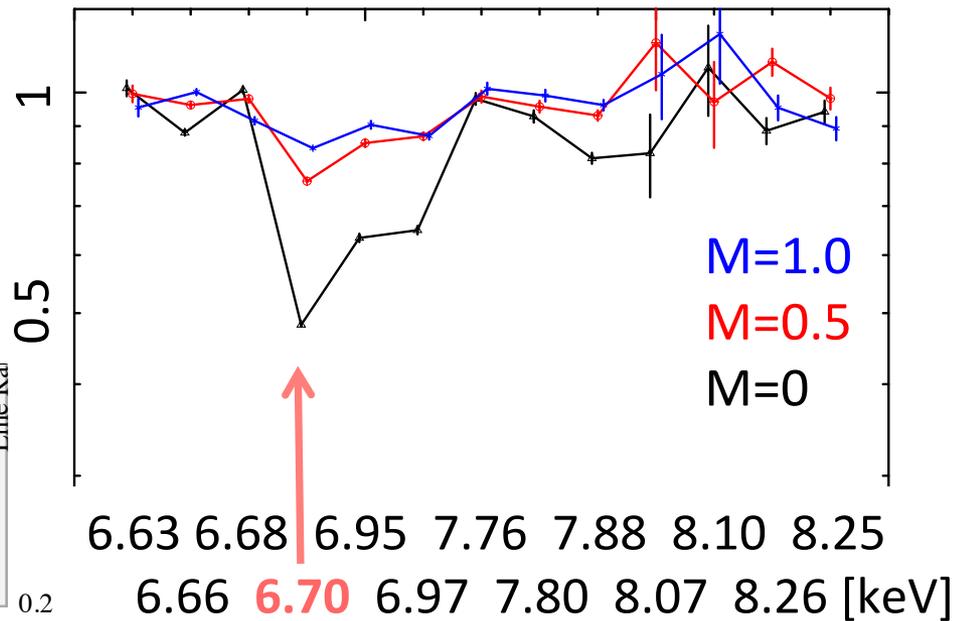
ASTRO-Hシミュレーション...ASTRO-H/SXSの分解能を考慮したもの

ASTRO-Hシミュレーション: 乱流の大きさの違いによるライン強度の変化

Fe-K multiple line spectrum



中心1分角以内, ライン比の変化(RS/noRS)



1分角以内: 乱流の大きさによってライン強度が変化 (特に6.70keV)  
マッハ数大で共鳴散乱減  
(Zhuravleva+13でも同様の結果が得られている)

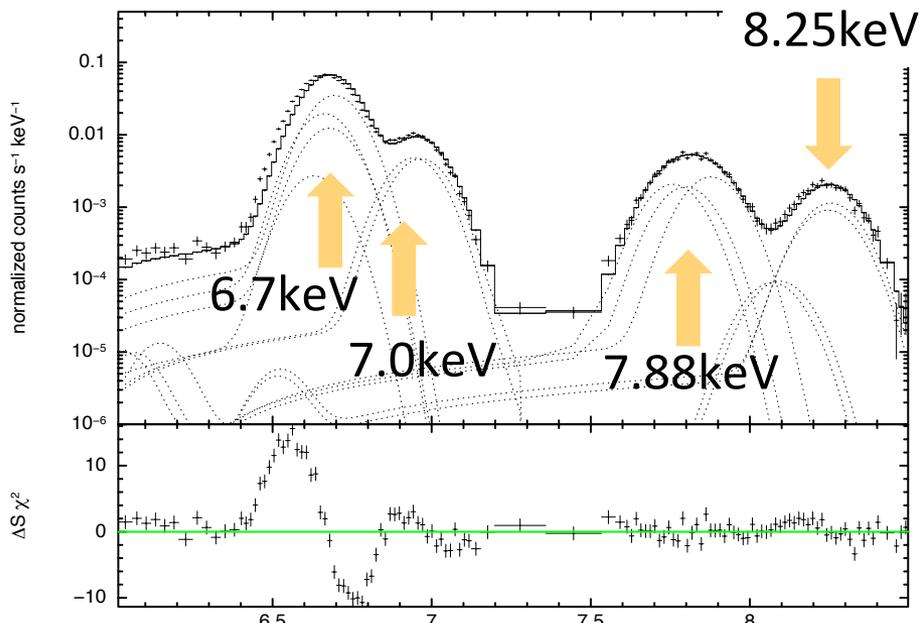
分解能を考慮してもラインが分離、ライン比の変化を確認  
→ASTRO-Hの観測データを用いた乱流の大きさの制限が期待

# Suzaku/XISによる乱流の制限

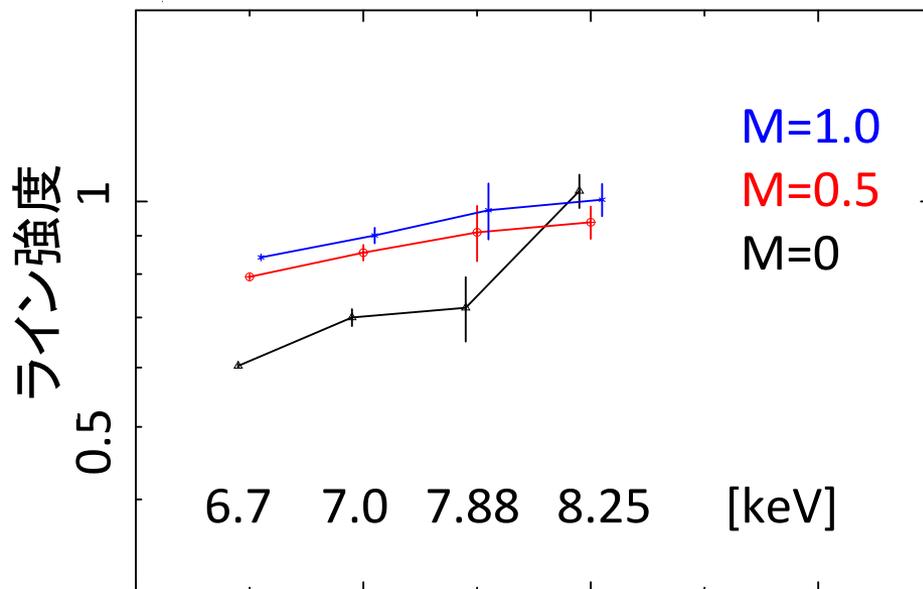
現在運用中のSuzaku/XISのデータを用い、乱流の制限を試みる  
分離できないラインでも乱流の違いによる強度比の変化が見えるか？

Suzakuシミュレーション：乱流の大きさの違いによるライン強度の変化

スペクトル(M=0,RS,r<1)



中心1分角以内(RS/noRS)

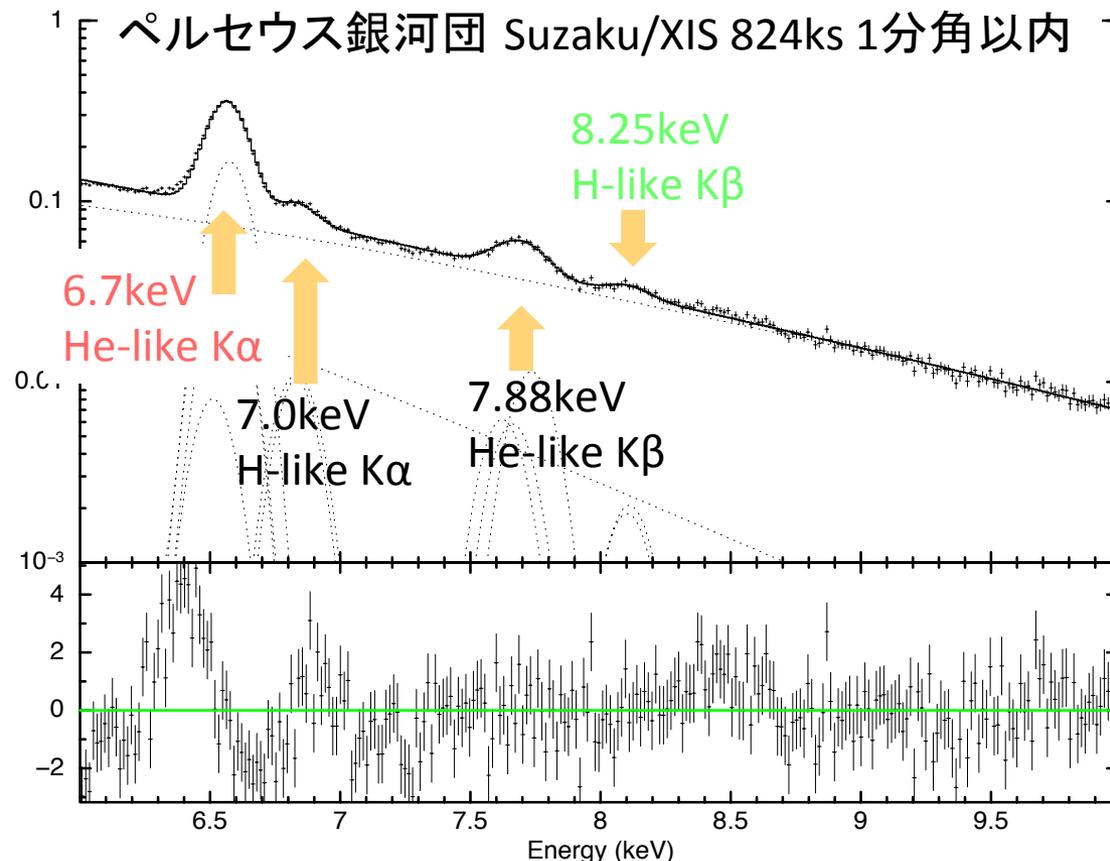


1分角以内：乱流の大きさによってライン強度が変化がわかる

ラインの分離はできていないが、マッハ数の違いにより乱流の効果が現れている  
→観測による強度比との比較へ

# Suzaku/XISによる乱流の制限

Suzaku/XIS 824ksデータとシミュレーションとの比較により乱流の制限を試みる  
 →統計がよく、He-like, H-likeのK $\beta$ を用いることができる  
 (Zhuravleva+13ではXMM-Newtonを用い、He-like K $\beta$ のみ)



Energy [keV]	含むライン[keV]	振動子強度
6.7 He-like K $\alpha$	6.637 6.668 6.682 <b>6.701</b>	$1.60 \times 10^{-5}$ 0.0562 $2.81 \times 10^{-7}$ <b>0.703</b>
7.0 H-like K $\alpha$	6.951 6.973	0.44 0.44
7.88 He-like K $\beta$	7.766(Ni) 7.801(Ni) 7.882	0.0883 0.683 0.138
8.25 H-like K $\beta$	<b>8.252</b> <b>8.263</b>	<b>0.046</b> <b>0.046</b>

分解能の影響により振動子強度の異なるラインの分離観測は不可  
 →7.0/6.7, 7.88/6.7, 8.25/6.7 強度比の比較により議論する

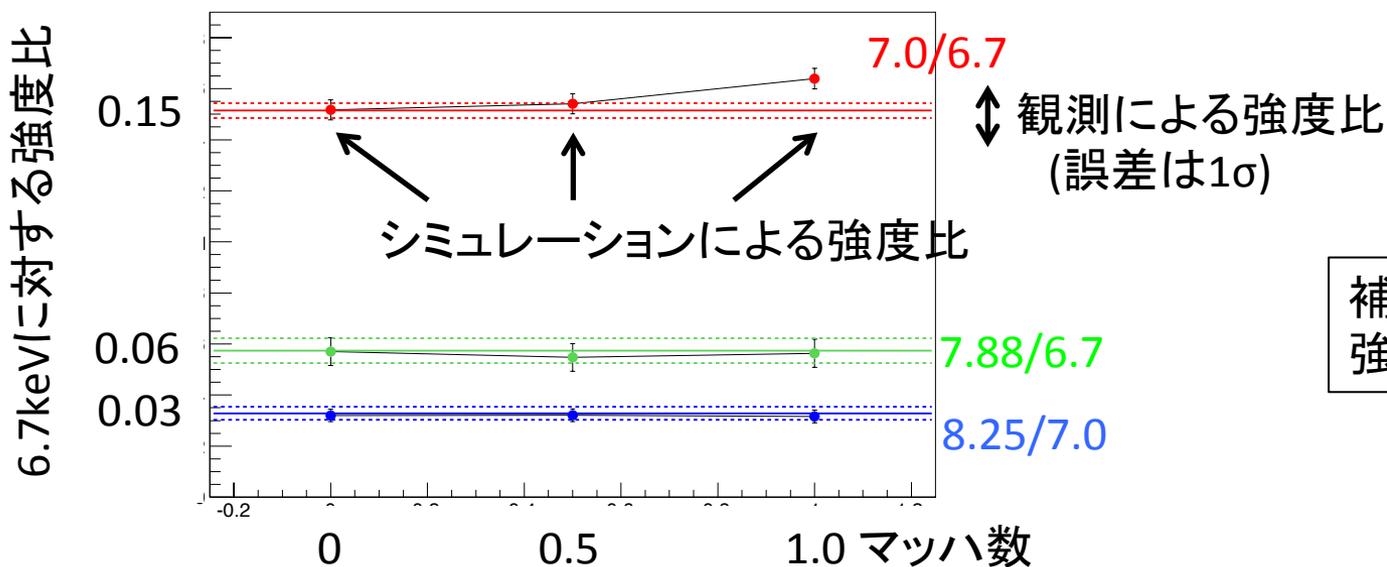
# Suzaku/XISによる乱流の制限

銀河団中心2-4分角での強度比・・・観測とシミュレーションの強度比の一致が理想  
 →温度分布やapecモデルのライン強度の不定性

	観測の r2'-4'強度比	Suzaku simの r2'-4'強度比	補正比 観測/Suzaku sim
7.0/6.7	0.151±0.002	0.154±0.001	0.980
7.88/6.7	0.057±0.004	0.050±0.017	1.12
8.25/6.7	0.032±0.002	0.0396±0.0007	0.808

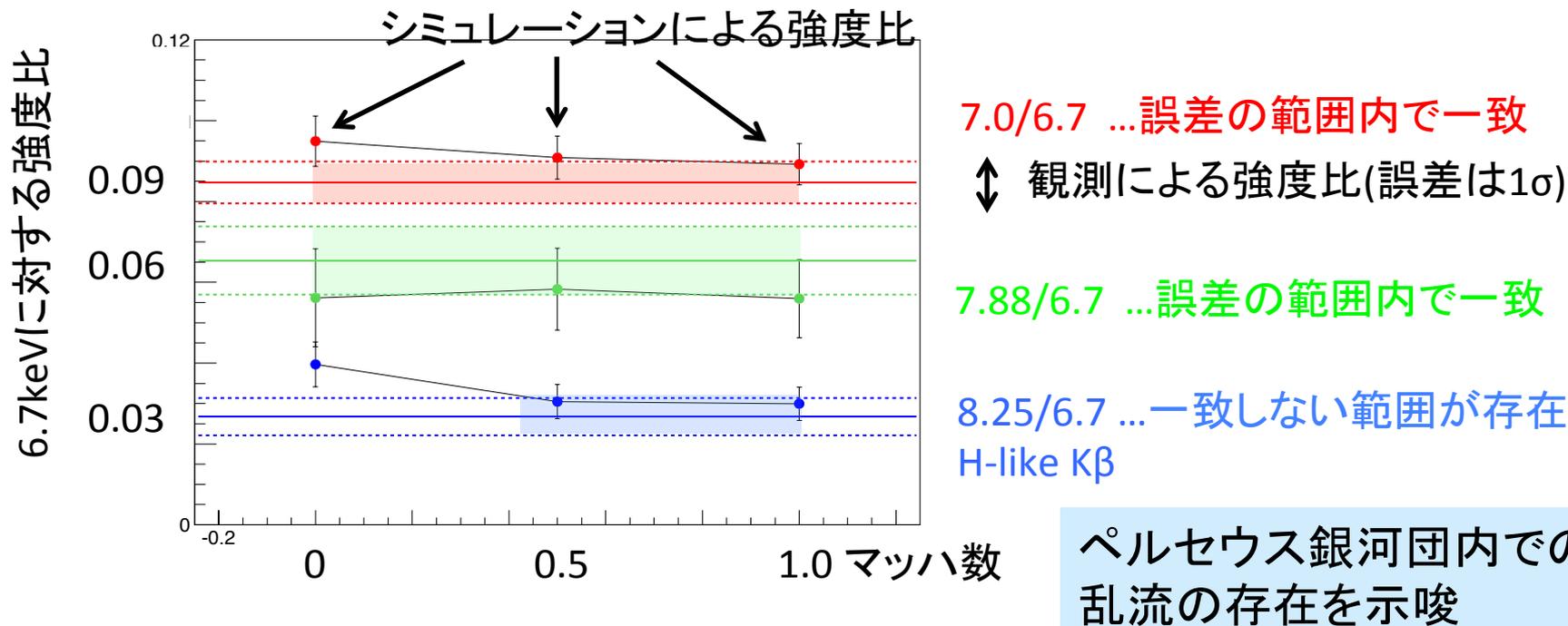
補正比を1分角以内のシミュレーション強度比にかけて補正

銀河団2-4分角での強度比



# Suzaku/XISによる乱流の制限

銀河団1分角以内での強度比：観測とシミュレーションとの比較



8.25(H-like K $\beta$ )/6.7の強度比について、観測による強度比の信頼度を2 $\sigma$ とすると、ペルセウス銀河団内のマッハ数 $M > 0.1$ となった

## まとめ

- ・銀河団内の乱流の大きさの制限のため、ASTRO-H観測データとの比較に向けてシミュレータを構築した
- ・ASTRO-Hシミュレーションではマッハ数大でもラインの分離ができ、観測データの比較による乱流の大きさの制限が期待される
- ・Suzaku観測データとSuzakuシミュレーションの比較により8.25(H-like  $K\beta$ )/6.7比を用いてマッハ数 $M > 0.1(2\sigma)$ となった

## 今後

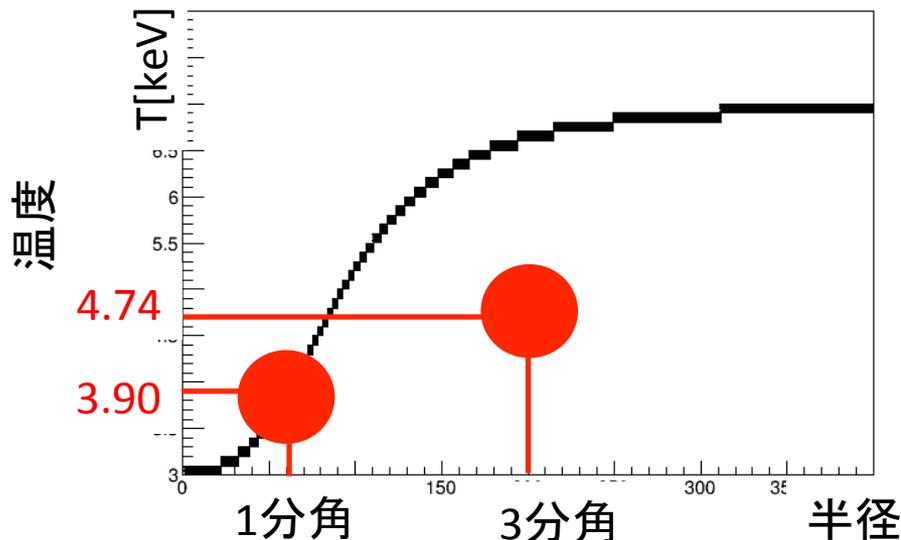
- ・温度分布を含めた系統誤差の評価
- ・ASTRO-H観測データとの比較に向けて、組み込むラインを増やす
- ・一様等方の乱流の組み込みから非対称の乱流の組み込み
- ・ライン形状と共鳴散乱を合わせた総合的な解析を目指す



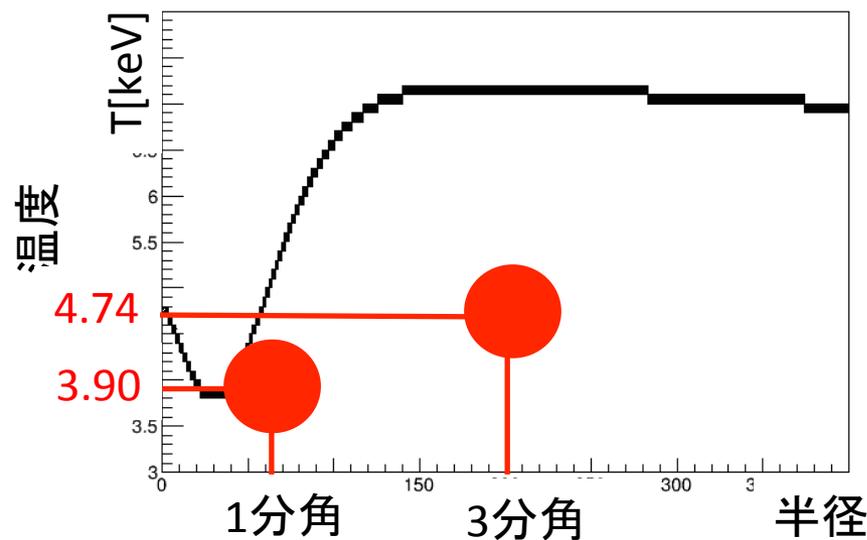
# Suzaku/XISによる乱流の制限

## シミュレーションに組み込む温度分布

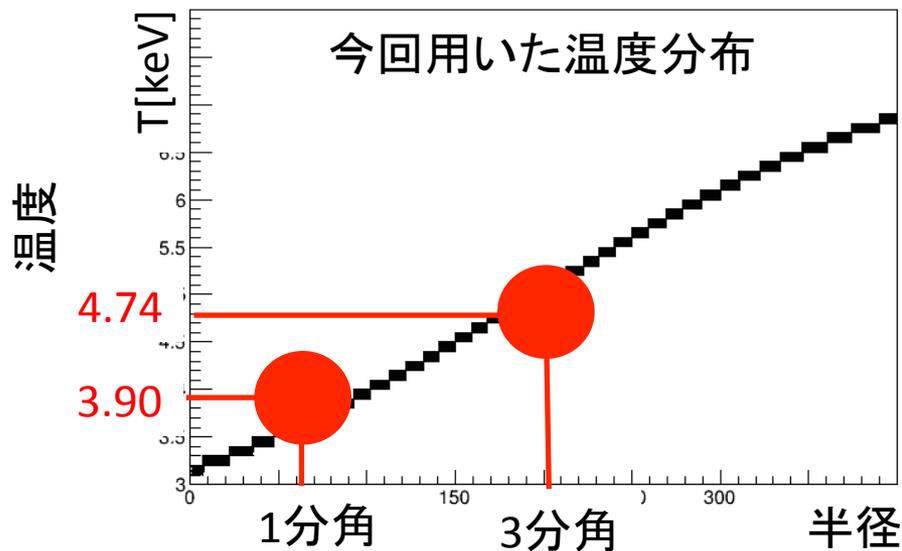
Sunders+06の温度分布



Zhuravleva+13の温度分布



今回用いた温度分布

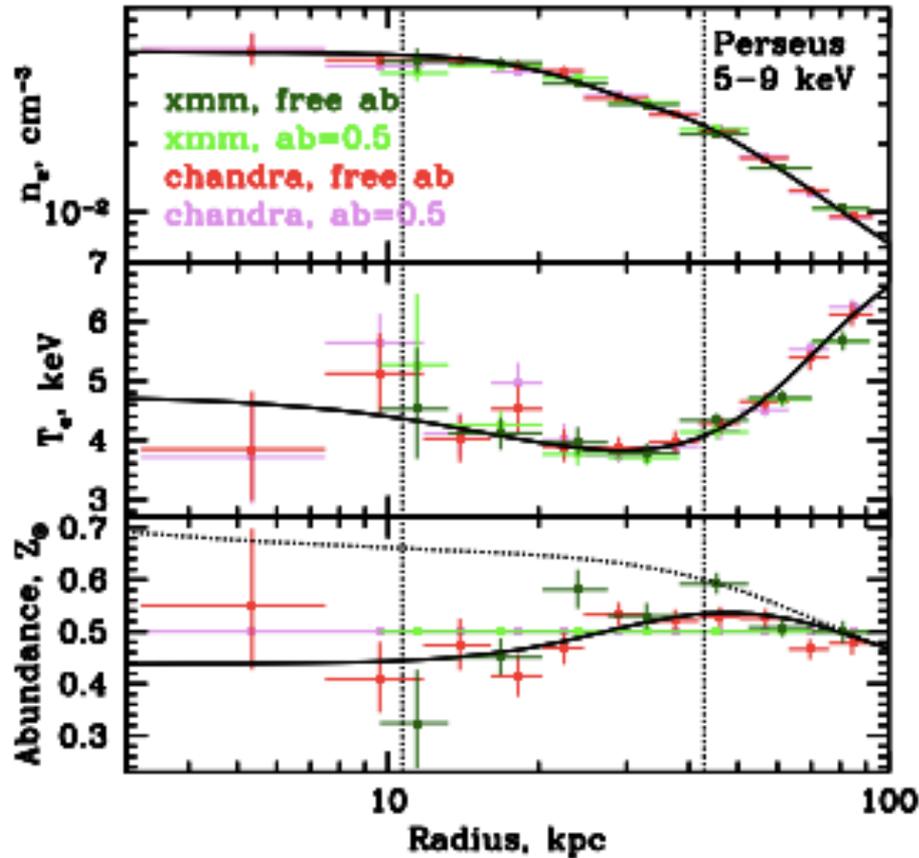


観測による強度比とapecモデルとの比較により求めた温度

観測データと合う温度分布を組み込んだ

$$T = \frac{2.8e^{0.004(r-190)} - 2.8e^{-0.004(r-190)}}{e^{0.004(r-190)} + e^{-0.004(r-190)}} + 4.94$$

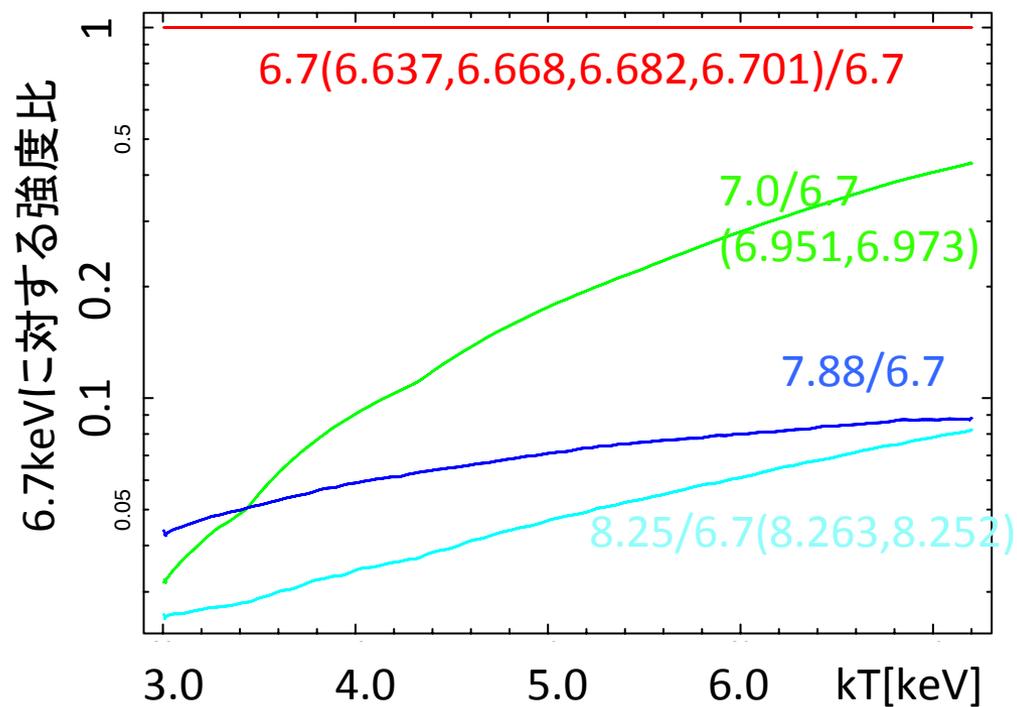
# シミュレータの構築



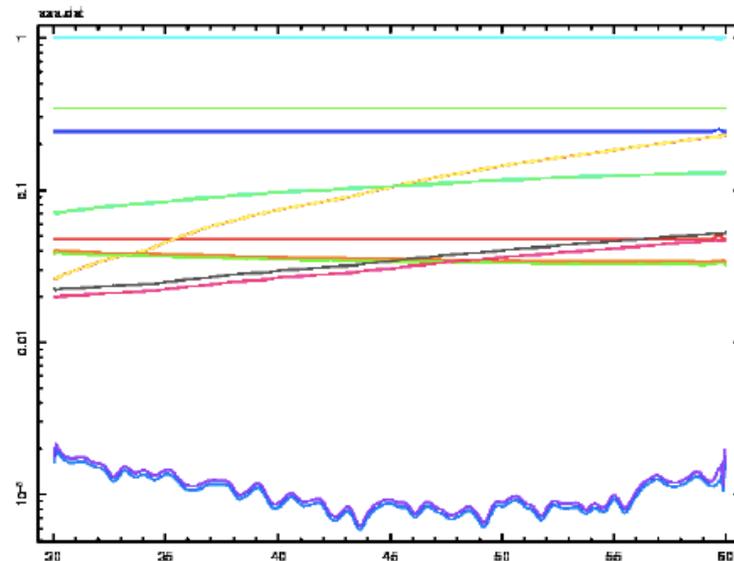
ペルセウス銀河団内の分布  
上: 電子の数密度  
中: 温度分布  
下: 重元素アバンドランスの分布  
(Sunders+06)

# シミュレータの構築

APECモデルを用いた6.7keVに対する強度比



半径(温度)に対し、  
APECモデルを組み込んだ



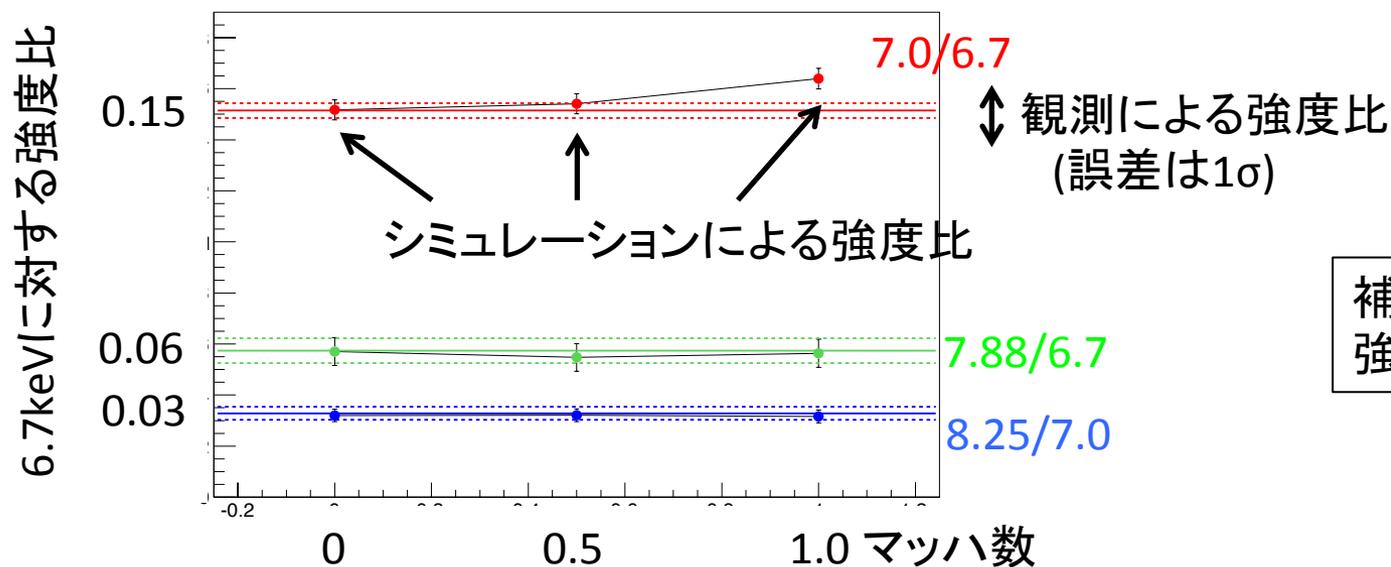
# Suzaku/XISによる乱流の制限

銀河団中心2-4分角での強度比・・・観測とシミュレーションの強度比の一致が理想  
 →温度分布やapecモデルのライン強度の不定性

	観測の r2'-4'強度比	Suzaku simの r2'-4'強度比	補正比 観測/Suzaku sim
7.0/6.7	0.151±0.002	0.154±0.001	0.980
7.88/6.7	0.057±0.004	0.050±0.017	1.12
8.25/6.7	0.032±0.002	0.0396±0.0007	0.808

補正比を1分角以内のシミュレーション強度比にかけて補正

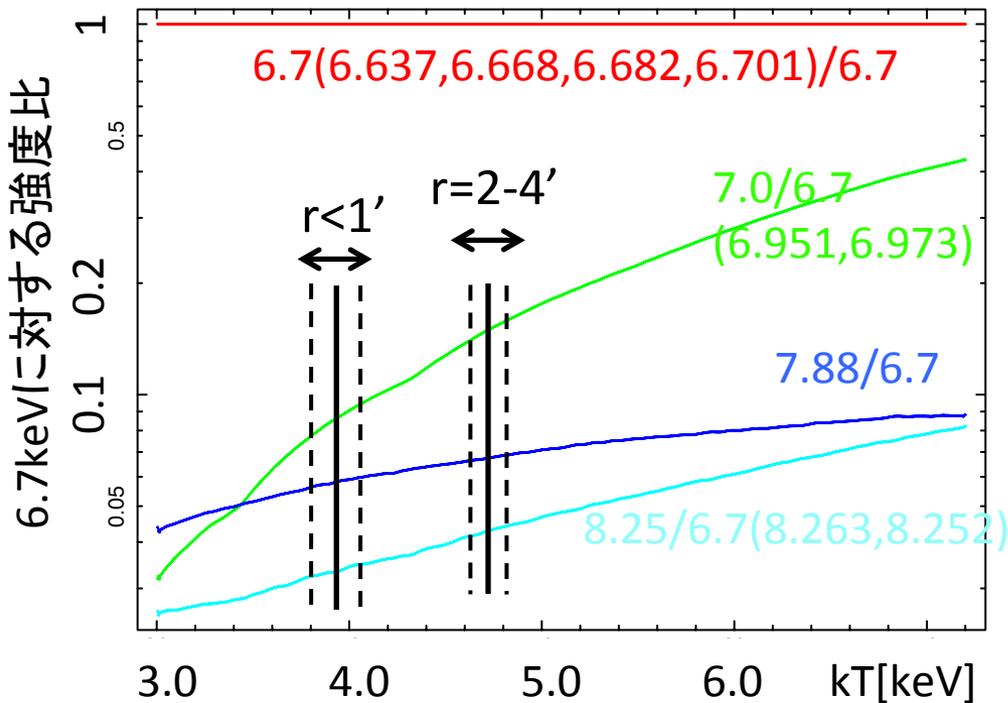
銀河団2-4分角での強度比



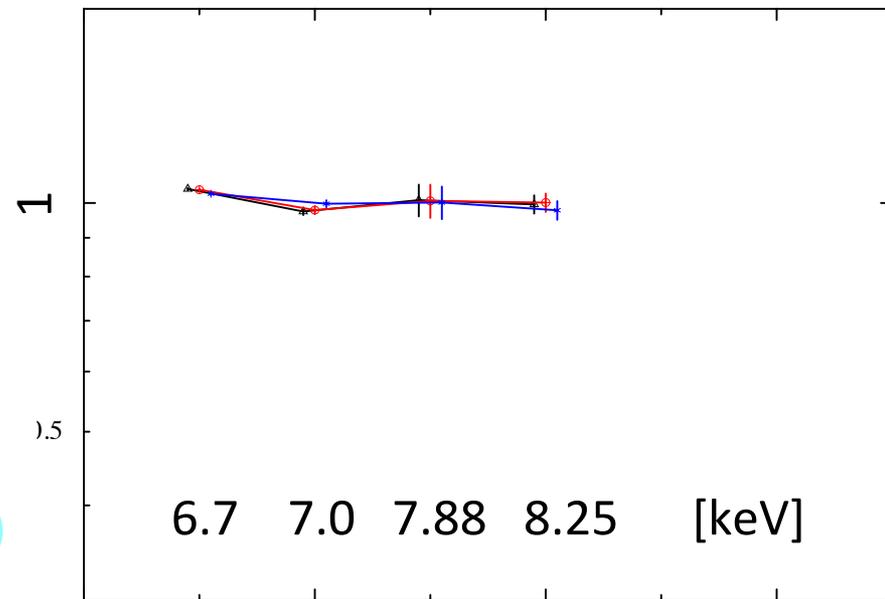
# Suzaku/XISによる乱流の制限

銀河団の半径(温度)で強度比は変化...比較する温度範囲の決定が必要

APECモデルを用いた6.7keVに対する強度比



中心2-4分角以内(RS/noRS)



ライン比1→2-4分角では共鳴散乱なし

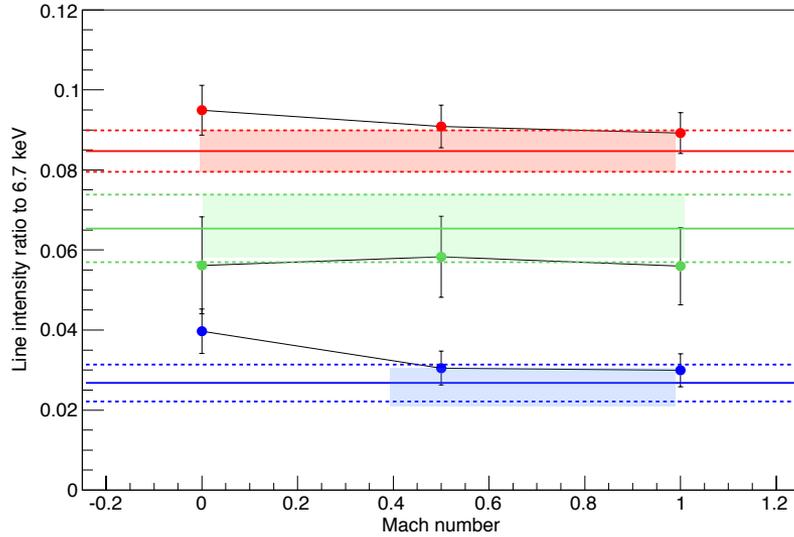
銀河団外側では共鳴散乱なし→観測とシミュレーションの強度比が一致することを仮定

上記の仮定のもと中心でのずれを補正し比較

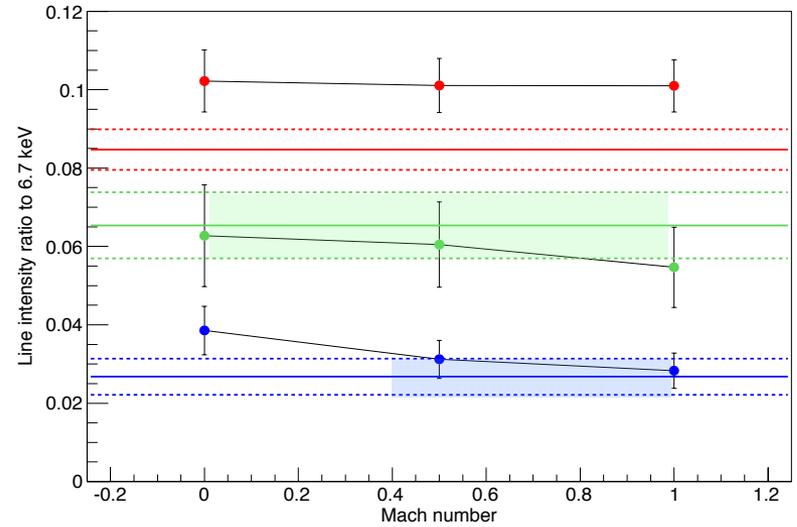
(補正比  $7.0/6.7:0.98$ ,  $7.88/6.7:1.12$ ,  $8.25/6.7:0.80$ )

# 温度分布の違いによる1分角以内の結果(観測とシミュレーションによる強度比の比較)

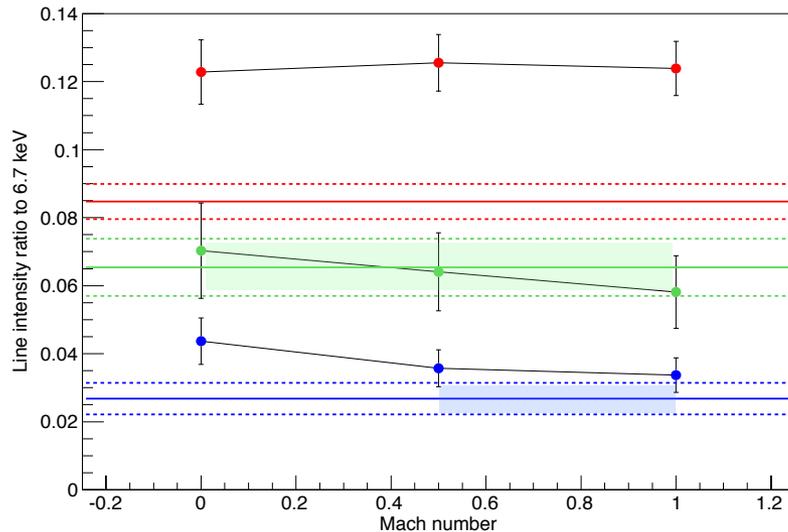
## 今回の温度分布



## Sunders+06による温度分布



## Zhuravleva+13による温度分布



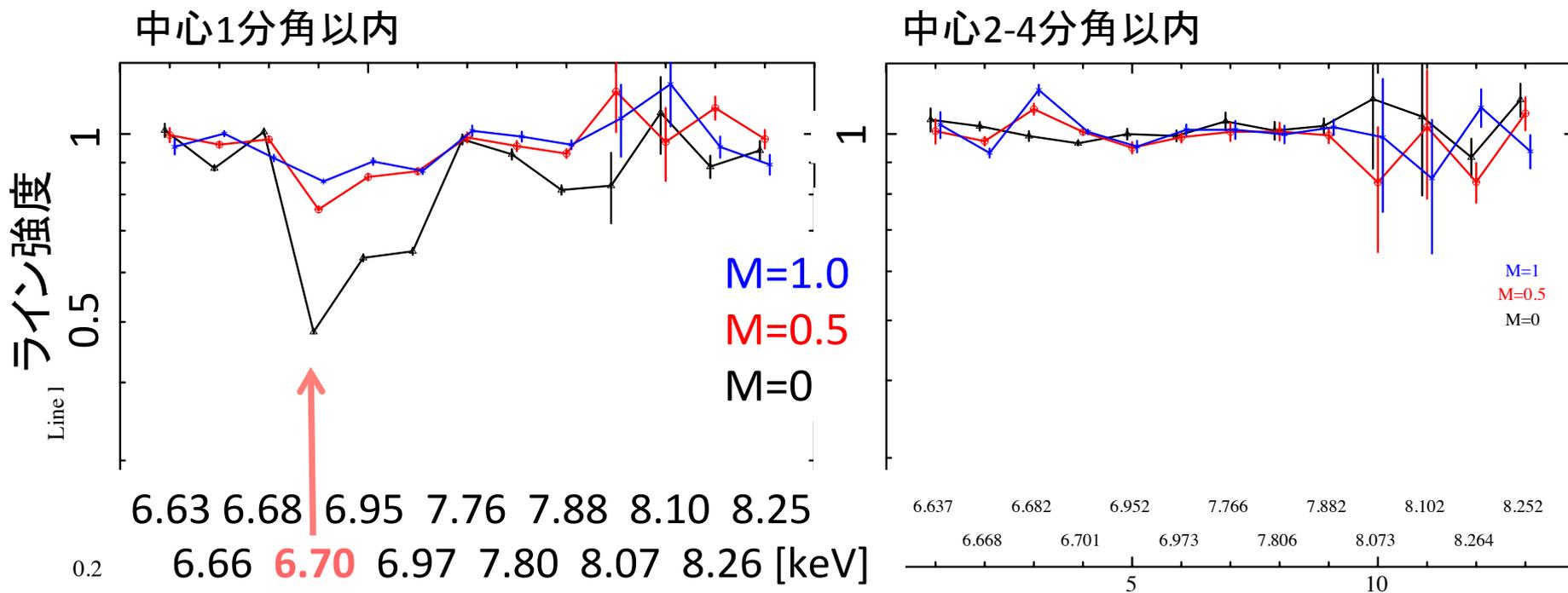
## 温度分布ごとの補正比

温度分布	7.0/6.7	7.88/6.7	8.25/6.7
今回のもの	0.980	1.12	0.808
Fabian+06	0.689	1.03	0.676
Zhuravleva+13	0.618	0.983	0.649

# ASTRO-H シミュレーション

ASTRO-Hシミュレーション...ASTRO-H/SXSの分解能を考慮したもの

乱流の大きさの違いによるライン強度の変化



1分角以内: 乱流の大きさによってライン強度が変化 (特に6.70keV)

2-4分角 : ライン比1→共鳴散乱が生じていない: 密度小のため

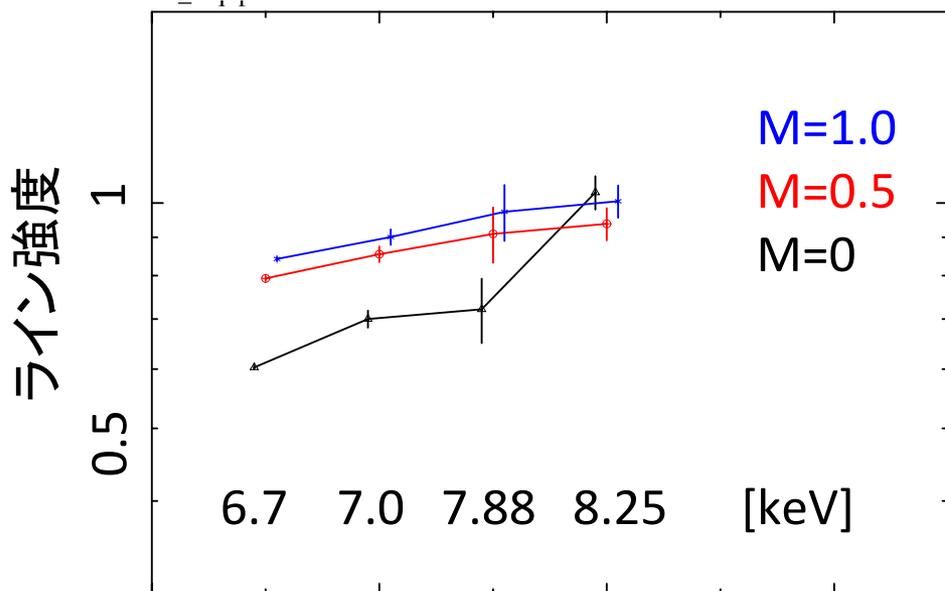
分解能を考慮してもラインが分離、ライン比の変化を確認  
→ASTRO-Hの観測データを用いた乱流の大きさの制限が期待

# Suzaku/XISによる乱流の制限

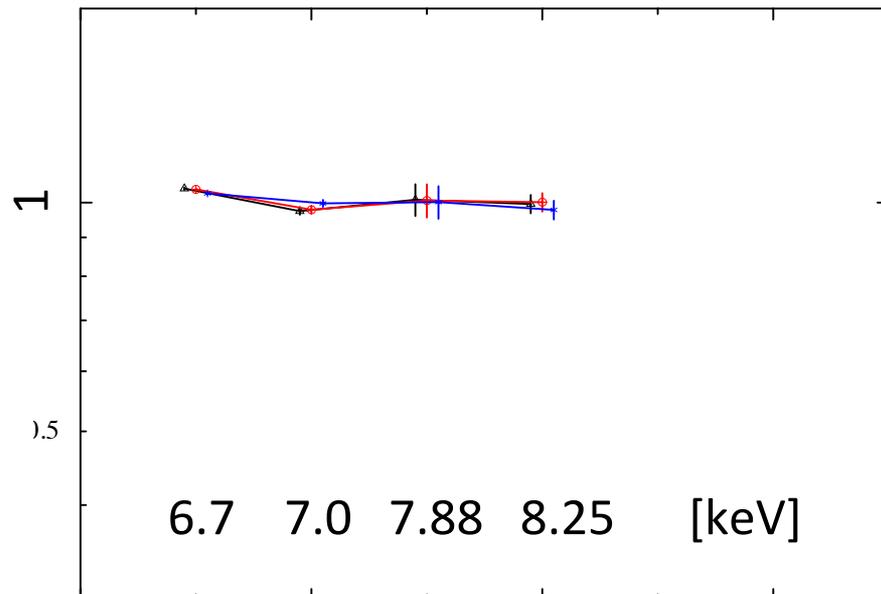
Suzaku/XISデータを用いてシミュレーションとの比較を行い、乱流の制限を試みる

## 乱流の大きさの違いによるライン強度の変化

中心1分角以内(RS/noRS)



中心2-4分角以内(RS/noRS)



1分角以内: 乱流の大きさによってライン強度が変化がわかる

2-4分角 : ライン比1 → 共鳴散乱が生じていない(A-H simと同様)

ラインの分離はできていないが、マッハ数の違いにより乱流の効果が現れている  
→ 観測による強度比との比較へ