

2007年度秋季年会@岐阜大学 07/09/26

# すざく衛星によるPerseus銀河団 の鉄輝線共鳴散乱の測定

○梅木 勇大、深沢泰司(広島大学)

## Introduction

銀河団の構成

星(銀河)、高温プラズマ(ICM)、ダークマター



**乱流**が生じているのでは...? (銀河団同士の衝突・合体など)

乱流の輝線ドップラーシフトは検出できない...

必要なエネルギー分解能 @6keV  
乱流ドップラー  $v_{turb}/c \doteq 0.1\%$ ; **6eV**

↑  
数100km/s オーダー

現状のX線CCDの分解能  
~ **130eV**@6keV

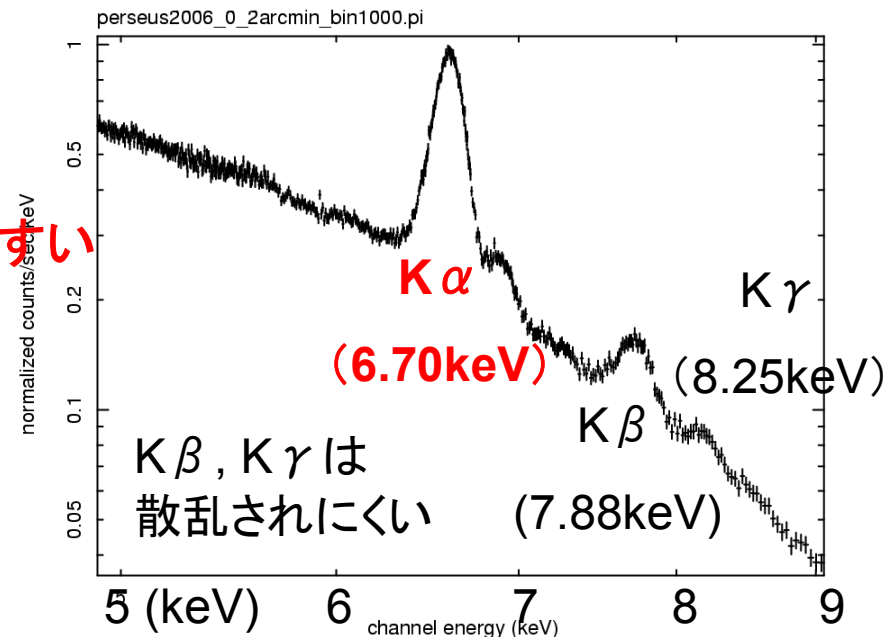
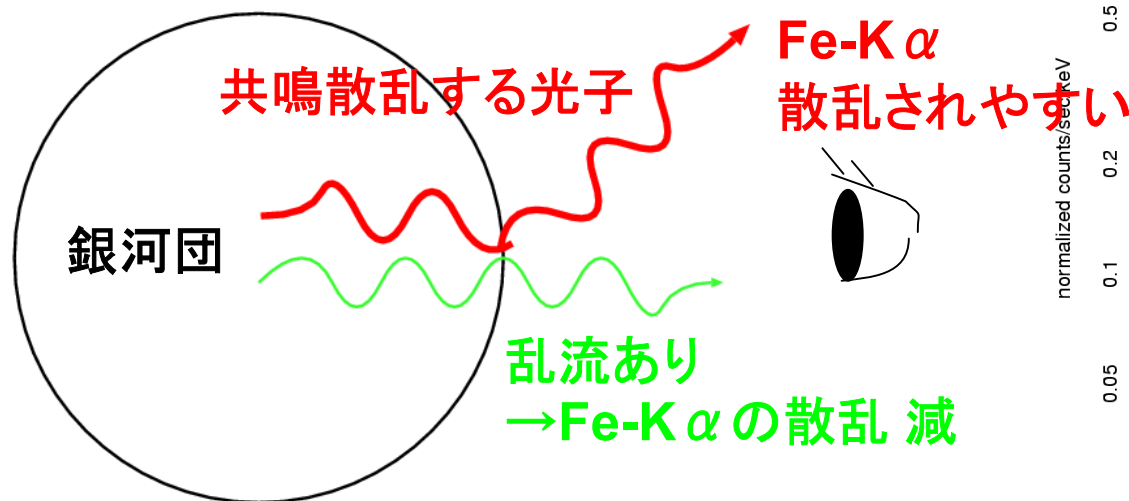


(高分解能検出器が登場しない限り)他の方法で測定するしかない!

→ **共鳴散乱**を利用した乱流の測定

→ 輝線強度が強いかつ共鳴散乱しやすい**Fe-K line** (電離度同じ)を使う

# 銀河団における共鳴散乱と乱流



散乱断面積 E.Churazov et al. (MNRAS 347, 29-35 (2004))

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{\pi} h r_e c f}{\Delta E} \exp \left[ -\frac{(E_0 - E_{RS})^2}{2\Delta E^2} \right]$$

$$\Delta E = E_0 \frac{\sqrt{v_{ion}^2 + v_{turb}^2}}{c}$$

(高温プラズマの熱運動 + 乱流の平均速度)

$E_0$ : photon energy  
 $E_{RS}$ : resonant energy  
 $f$ : oscillator strength

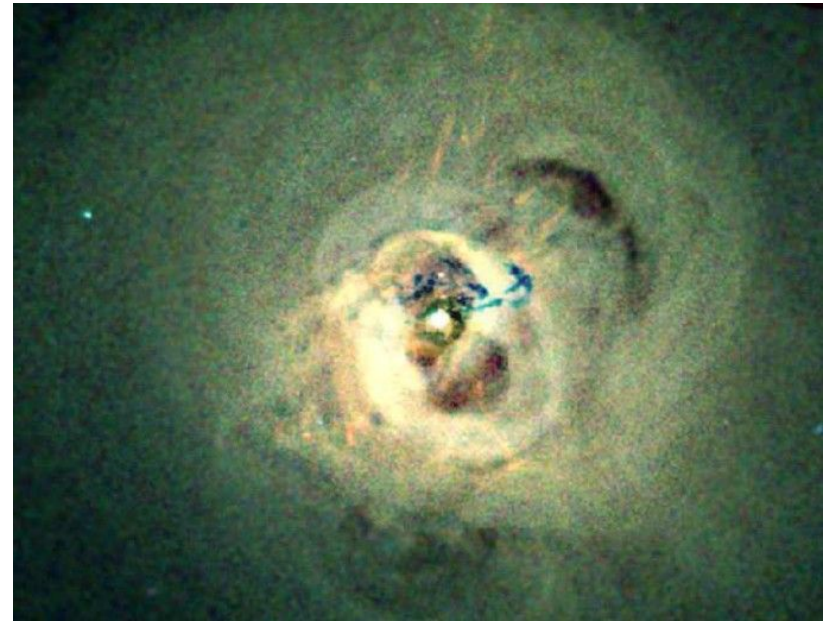
→ 今回、乱流の共鳴散乱に対する寄与をモンテカルロシミュレーションによって再現 (乱流の測定基準となる)

## Perseus銀河団：ターゲット

X線で非常に明るい  
先行研究により乱流が起きている  
と示唆されている

> 350km/s (E. Churazov et al. 2004)

(銀河団同士の衝突合体に伴う乱流(?) →)



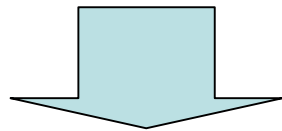
共鳴散乱を測定するにあたって

輝線強度をより精度良く調べるには...

→ **大面積**かつ**低バックグラウンド**の検出器が有利

→ XMM-Newton衛星もすざく衛星と同等の性能

→ 観測時間 (Perseus銀河団)      **すざく**      **203** ks (2006年計2回)



Newton      50 ks

すざく衛星の方がデータ統計が良いという点で**有利**

## 解析の流れと目的

すざく衛星によるPerseus  
銀河団の観測データを  
スペクトル解析して  
鉄輝線強度 ( $K\alpha$ ,  
 $K\beta$ ) を求める

モンテカルロシミュ  
レーションにより  
Perseus銀河団の共鳴散  
乱を定量的に見積もる

観測データとシミュレーションの  
解析結果を比較

共鳴散乱が実際にどの程度起こっている  
かを評価 (= 乱流速度に制限を)

# Perseus銀河団における共鳴散乱のモンテカルロシミュレーション

ツール: Geant4 (ver. 8.1)

方法: 過去の観測データを元にモデル化したPerseus銀河団内で光子を共鳴散乱させる

パラメータ=密度、温度、etc  
E.Churazov et al.

Chandra, XMM-Newton 観測より

仮定、条件など:

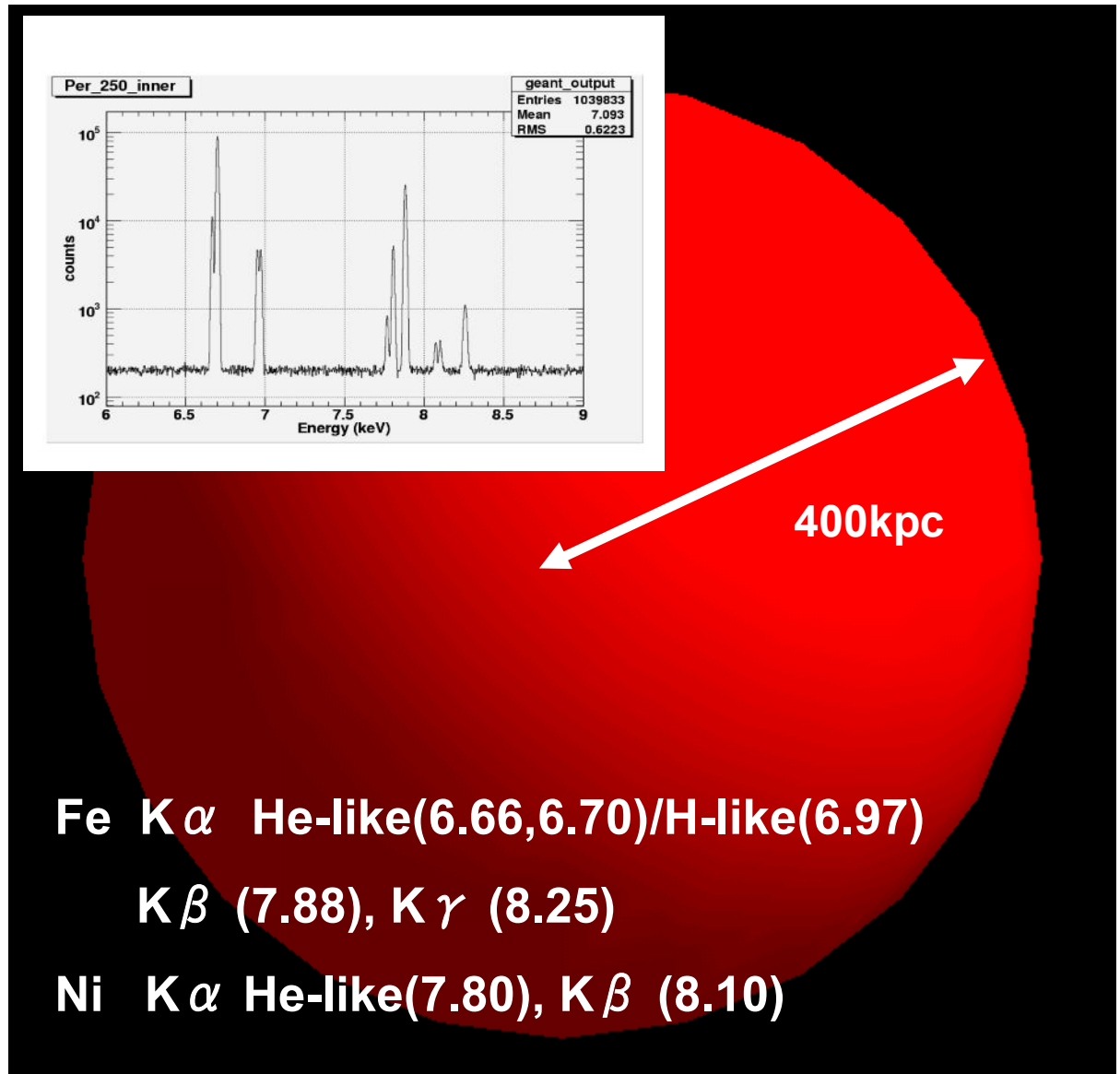
- ・高温プラズマ... 球対称分布
- ・銀河団内の光子 順次 $10^7$ 個
- 発生位置  $\propto$  (密度) $^2 \times$  (半径) $^2$
- 6-9keV (等温+Fe,Ni 輝線)

・乱流速度(5段階)

0, 125, 250, 500, 1000

[km/s] 各々シミュレート

- ・比較のため、共鳴散乱なしのシミュレーションも行う



# Perseus銀河団における共鳴散乱のモンテカルロシミュレーション

ツール: Geant4 (ver. 8.1)

方法: 過去の観測データを元にモデル化したPerseus銀河団内で光子を共鳴散乱させる

パラメータ=密度、温度、etc  
E.Churazov et al.

Chandra, XMM-Newton 観測より

仮定、条件など:

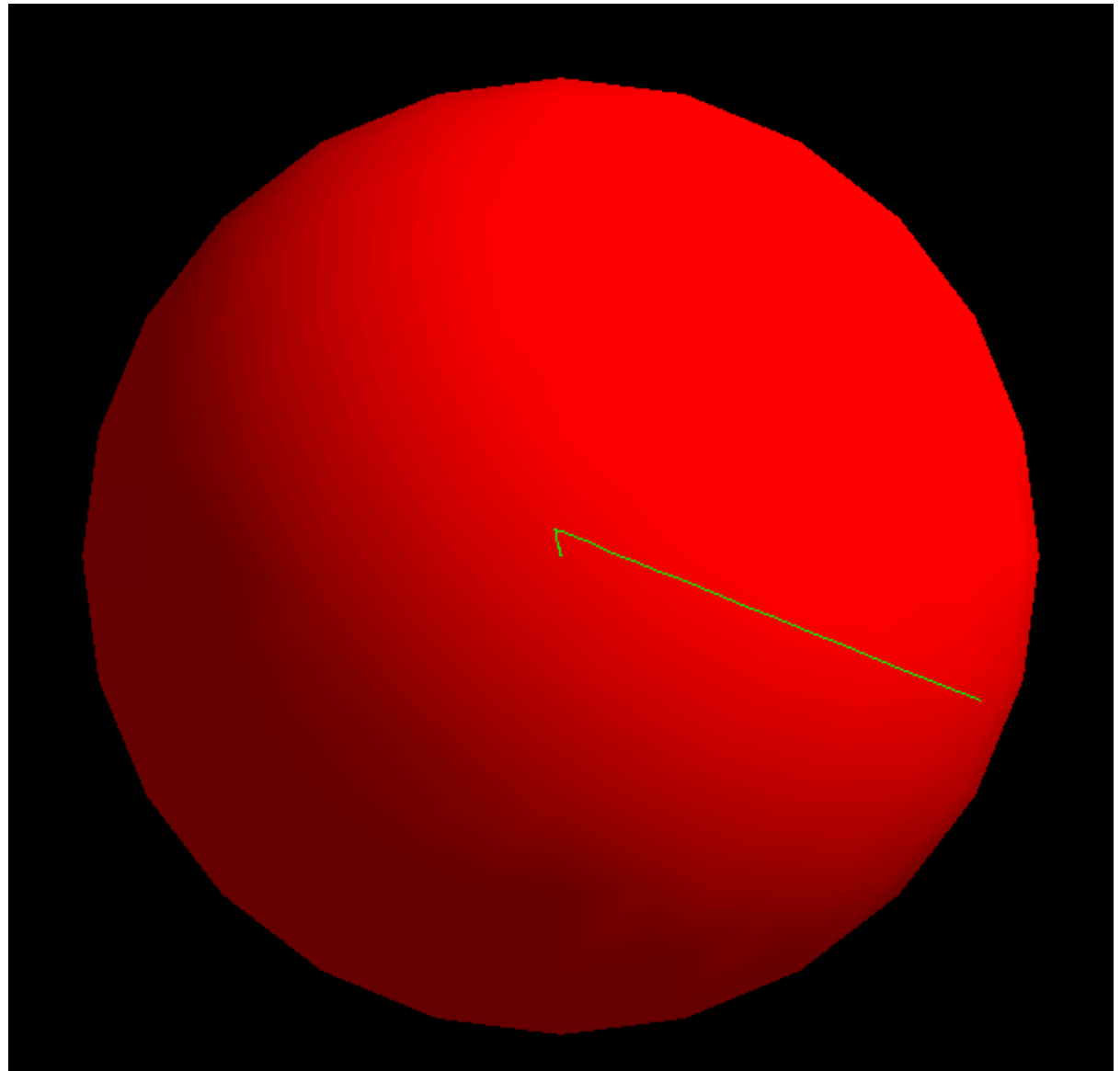
- ・高温プラズマ... 球対称分布
- ・銀河団内の光子 順次 $10^7$ 個  
発生位置  $\propto$  (密度) $^2 \times$  (半径) $^2$   
6-9keV (等温+Fe,Ni 輝線)

・乱流速度(5段階)

**0, 125, 250, 500, 1000**

**[km/s] 各々シミュレート**

- ・比較のため、共鳴散乱なしのシミュレーションも行う



# Perseus銀河団における共鳴散乱のモンテカルロシミュレーション

ツール: Geant4 (ver. 8.1)

方法: 過去の観測データを元にモデル化したPerseus銀河団内で光子を共鳴散乱させる

パラメータ=密度、温度、etc  
E.Churazov et al.

Chandra, XMM-Newton 観測より

仮定、条件など:

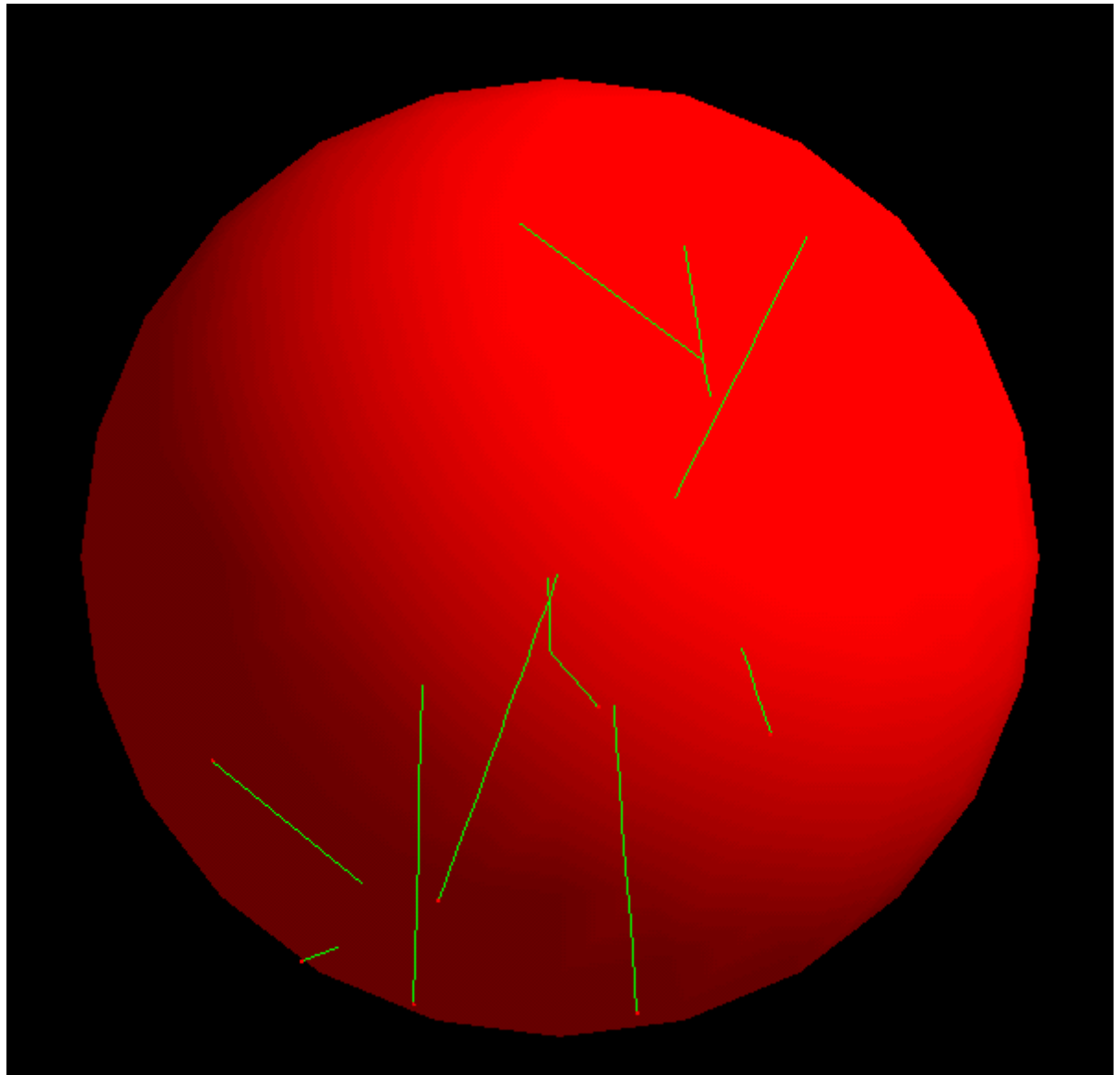
- ・高温プラズマ... 球対称分布
- ・銀河団内の光子 順次 $10^7$ 個  
発生位置  $\propto (\text{密度})^2 \times (\text{半径})^2$   
6-9keV (等温+Fe,Ni 輝線)

・乱流速度(5段階)

**0, 125, 250, 500, 1000**

**[km/s] 各々シミュレート**

- ・比較のため、共鳴散乱なしのシミュレーションも行う





# Perseus銀河団における共鳴散乱のモンテカルロシミュレーション

ツール: Geant4 (ver. 8.1)

方法: 過去の観測データを元にモデル化したPerseus銀河団内で光子を共鳴散乱させる

パラメータ=密度、温度、etc

E.Churazov et al.

Chandra, XMM-Newton 観測より

仮定、条件など:

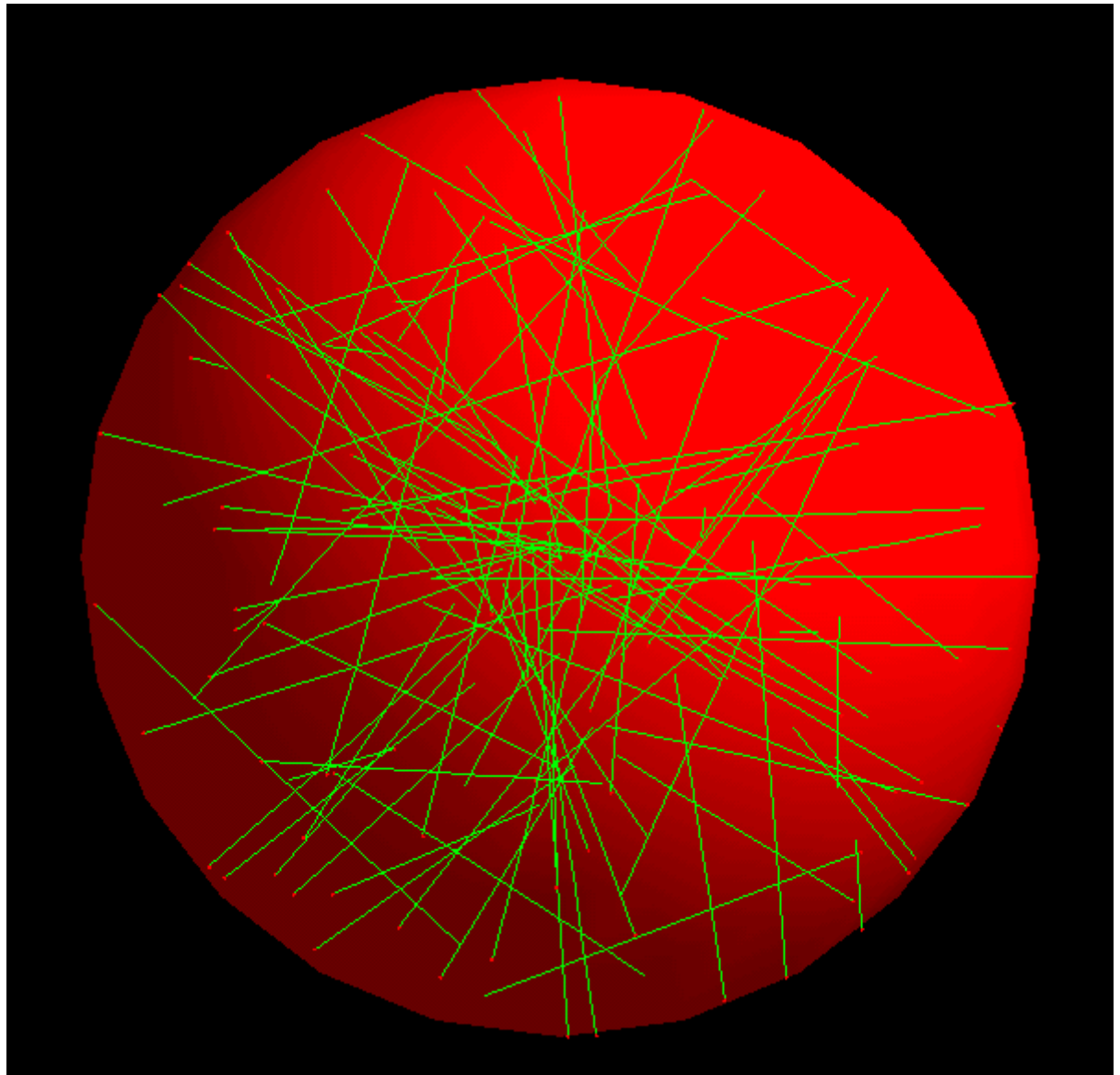
- ・高温プラズマ... 球対称分布
- ・銀河団内の光子 順次 $10^7$ 個
- 発生位置  $\propto$  (密度) $^2 \times$  (半径) $^2$
- 6-9keV (等温+Fe,Ni 輝線)

・乱流速度(5段階)

**0, 125, 250, 500, 1000**

**[km/s] 各々シミュレート**

- ・比較のため、共鳴散乱なしのシミュレーションも行う



# Perseus銀河団における共鳴散乱のモンテカルロシミュレーション

ツール: Geant4 (ver. 8.1)

方法: 過去の観測データを元にモデル化したPerseus銀河団内で光子を共鳴散乱させる

パラメータ=密度、温度、etc  
E.Churazov et al.

Chandra, XMM-Newton 観測より

仮定、条件など:

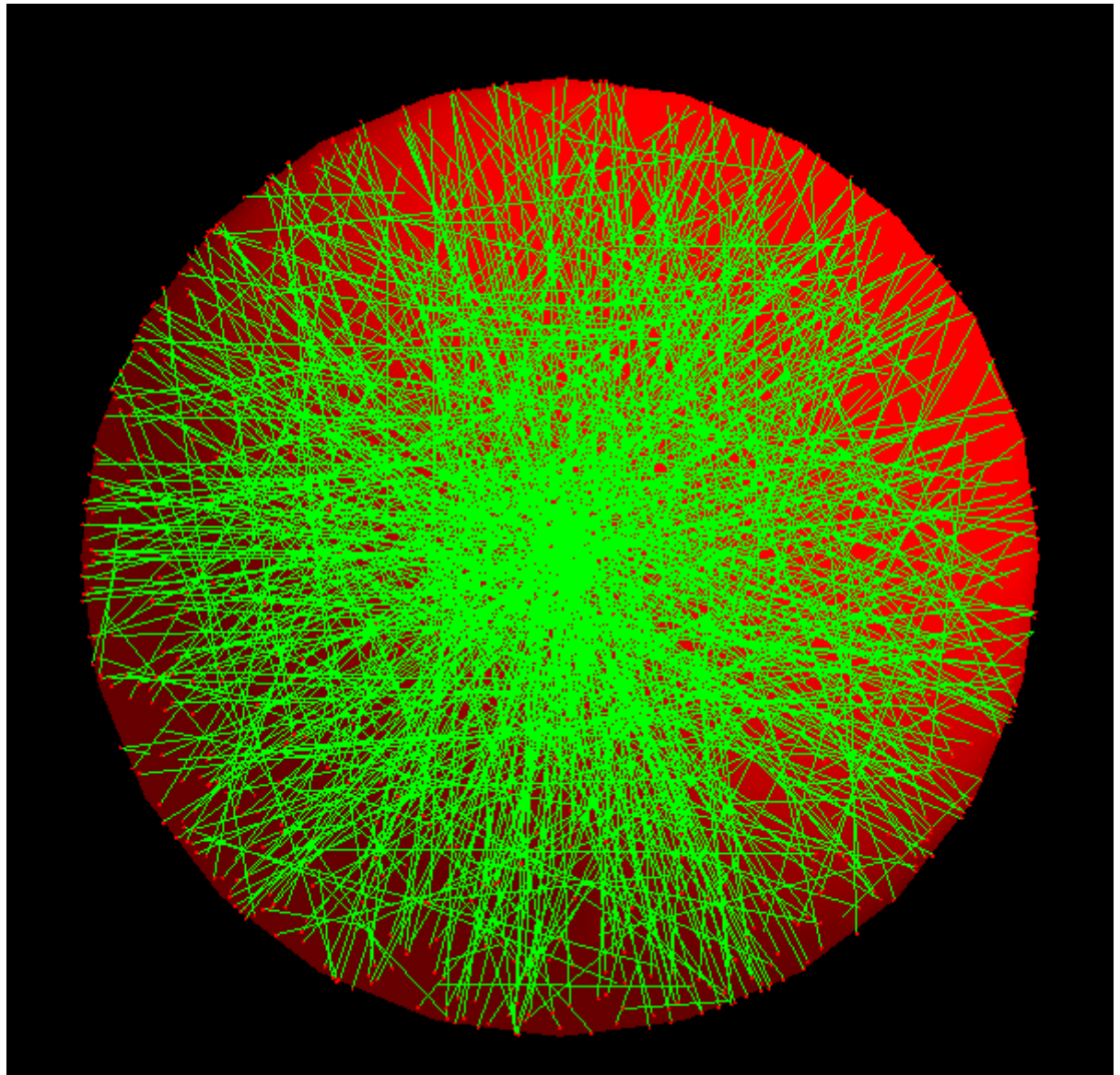
- ・高温プラズマ... 球対称分布
- ・銀河団内の光子 順次 $10^7$ 個
- 発生位置  $\propto$  (密度) $^2 \times$  (半径) $^2$
- 6-9keV (等温+Fe,Ni 輝線)

・乱流速度(5段階)

**0, 125, 250, 500, 1000**

**[km/s] 各々シミュレート**

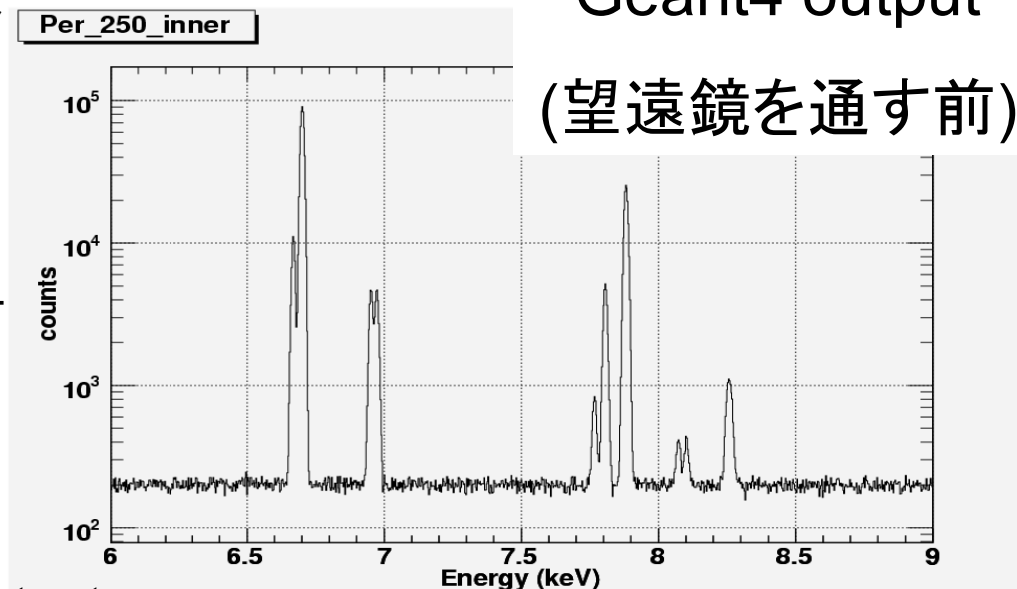
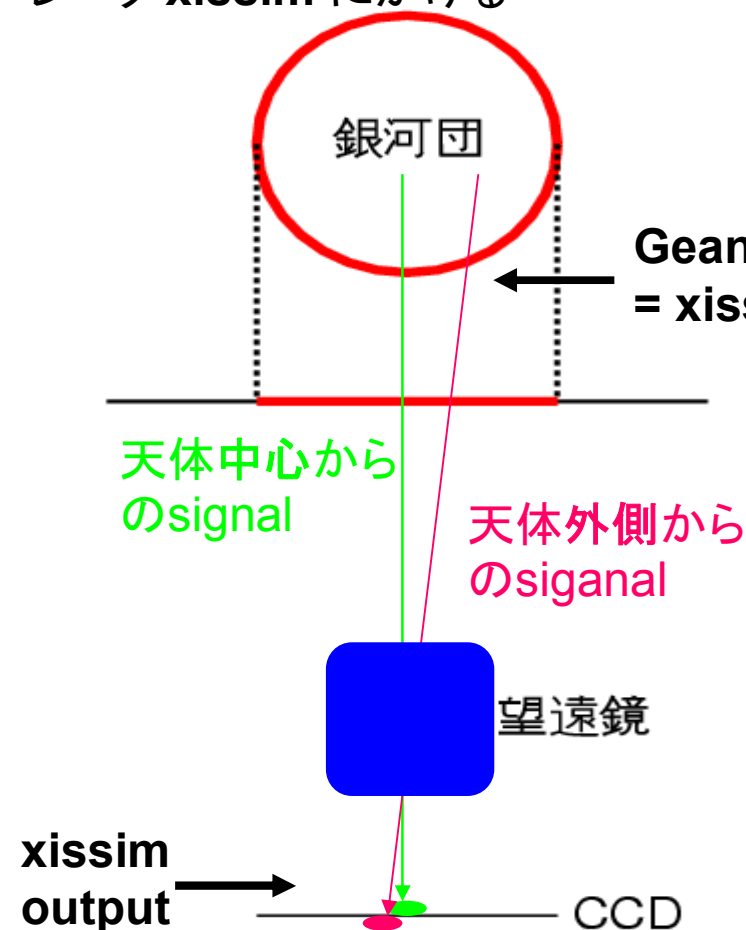
- ・比較のため、共鳴散乱なしのシミュレーションも行う



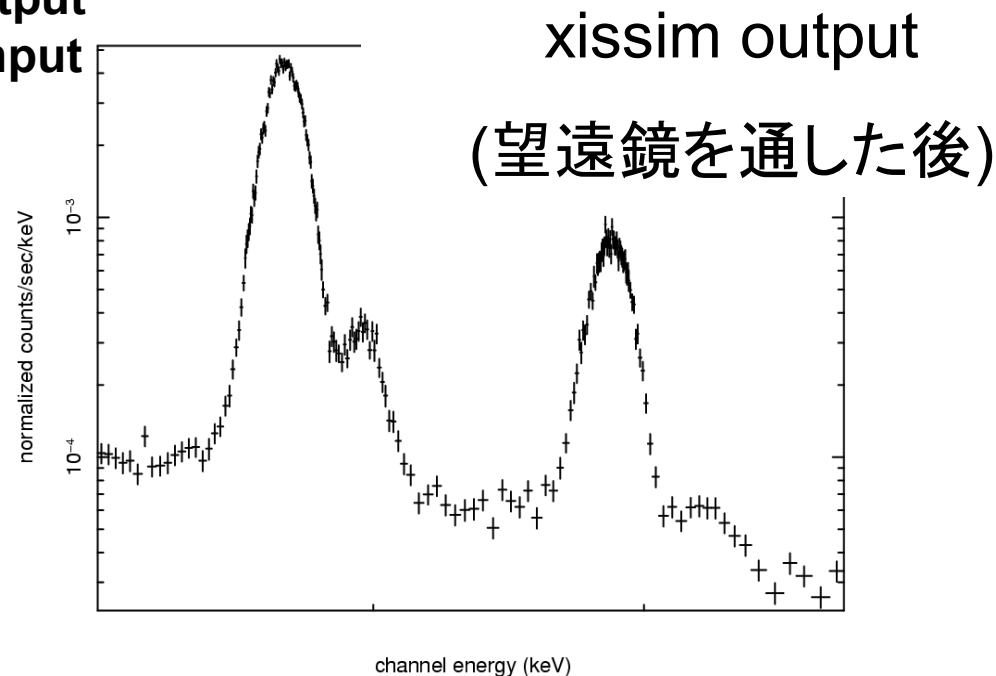
# Perseus銀河団における共鳴散乱のモンテカルロシミュレーション

すざく衛星搭載の望遠鏡は結像がそれほど良くないため signal が混ざり合う  
→PSFを考慮する

→Geant4のoutputをすざくの観測シミュレータ xissim にかける



Geant4 output  
(望遠鏡を通す前)



## 解析方法

銀河団の内側 (**INNER**; 0-2arcmin) と 外側 (**OUTER**; 2-4arcmin) に切り分けて、

$K\alpha$  (6.70keV)line、 $K\beta$  (7.88keV)line の photon数の比 を取る

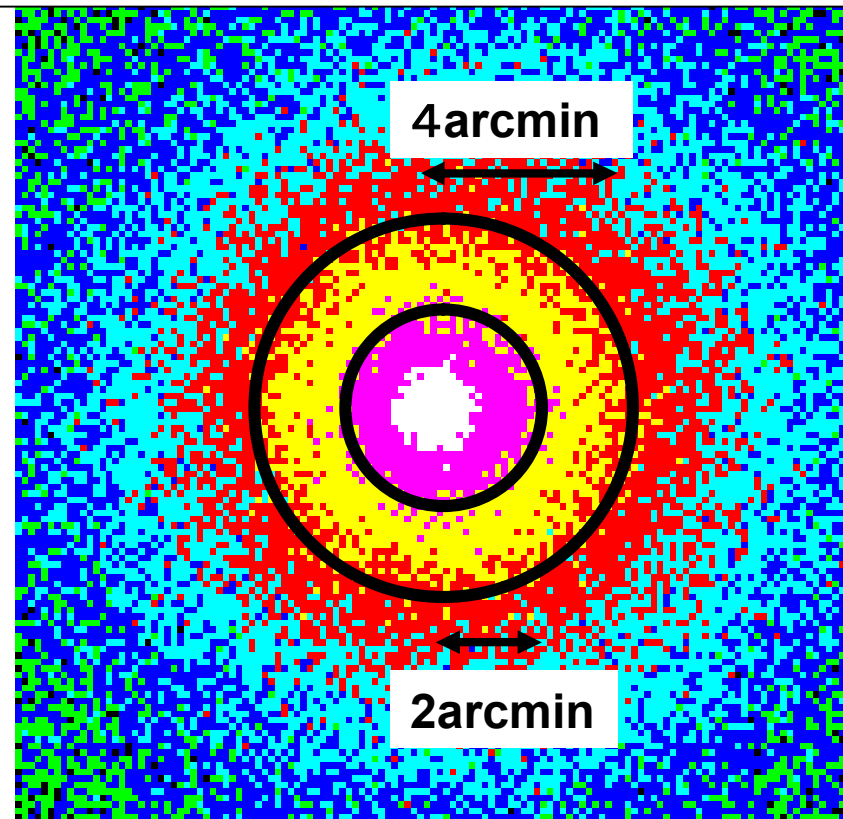
散乱されやすい(注目!!!)

$$\frac{K\alpha/K\beta \text{ (INNER)}}{K\alpha/K\beta \text{ (OUTER)}}$$

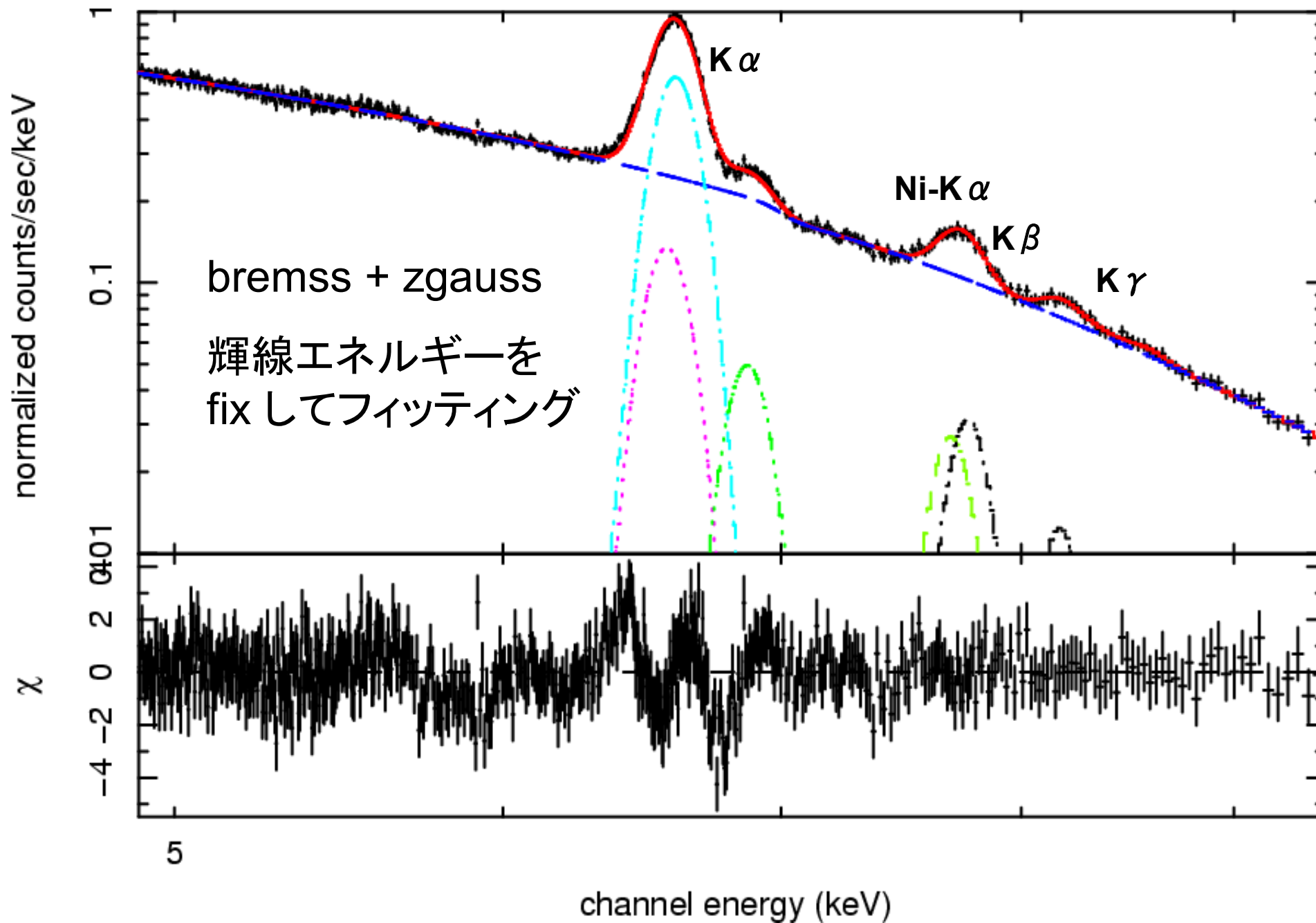
すざくデータ と シミュレーション を比較する

乱流5段階

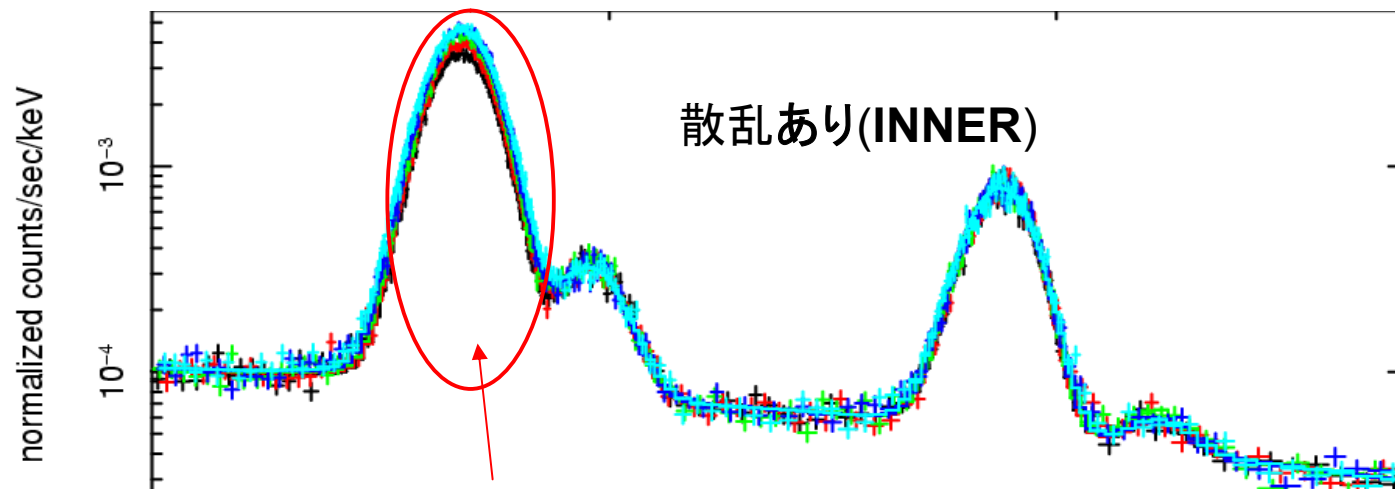
Perseus銀河団 (シミュレーション)



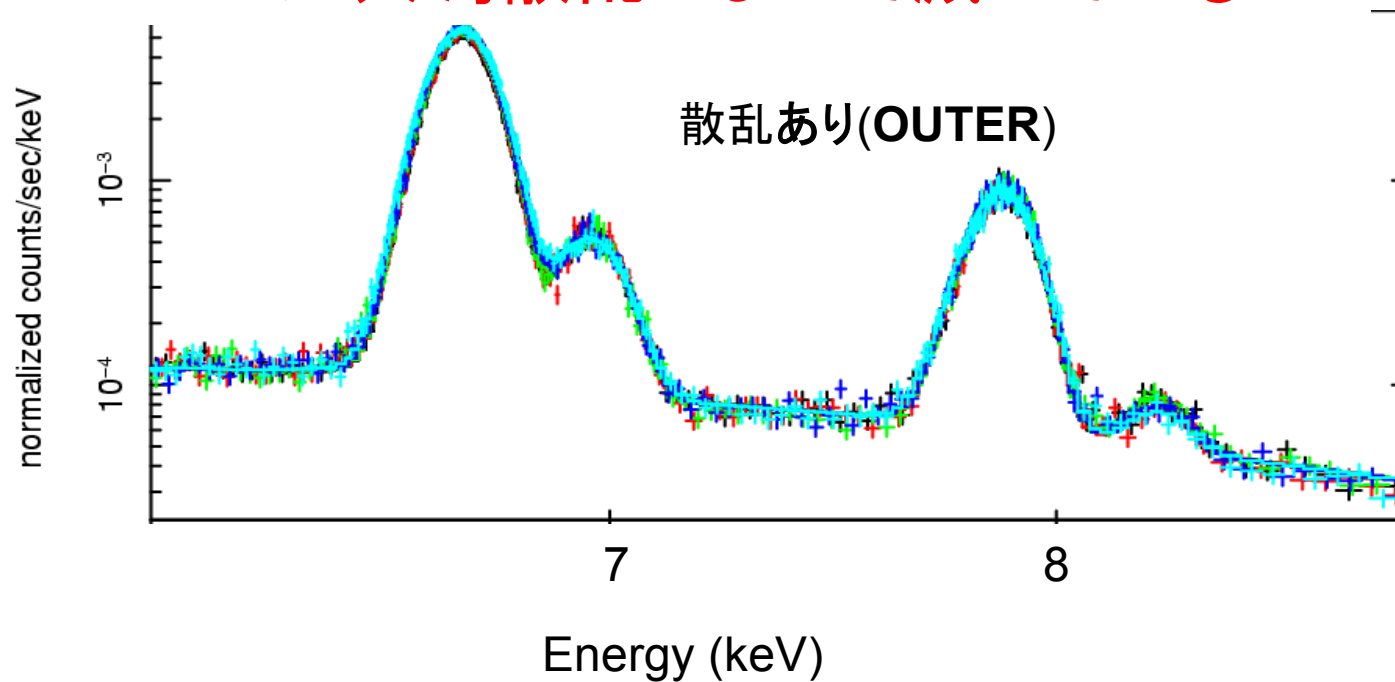
# すざくデータ; 2006年INNER (0-2arcmin)



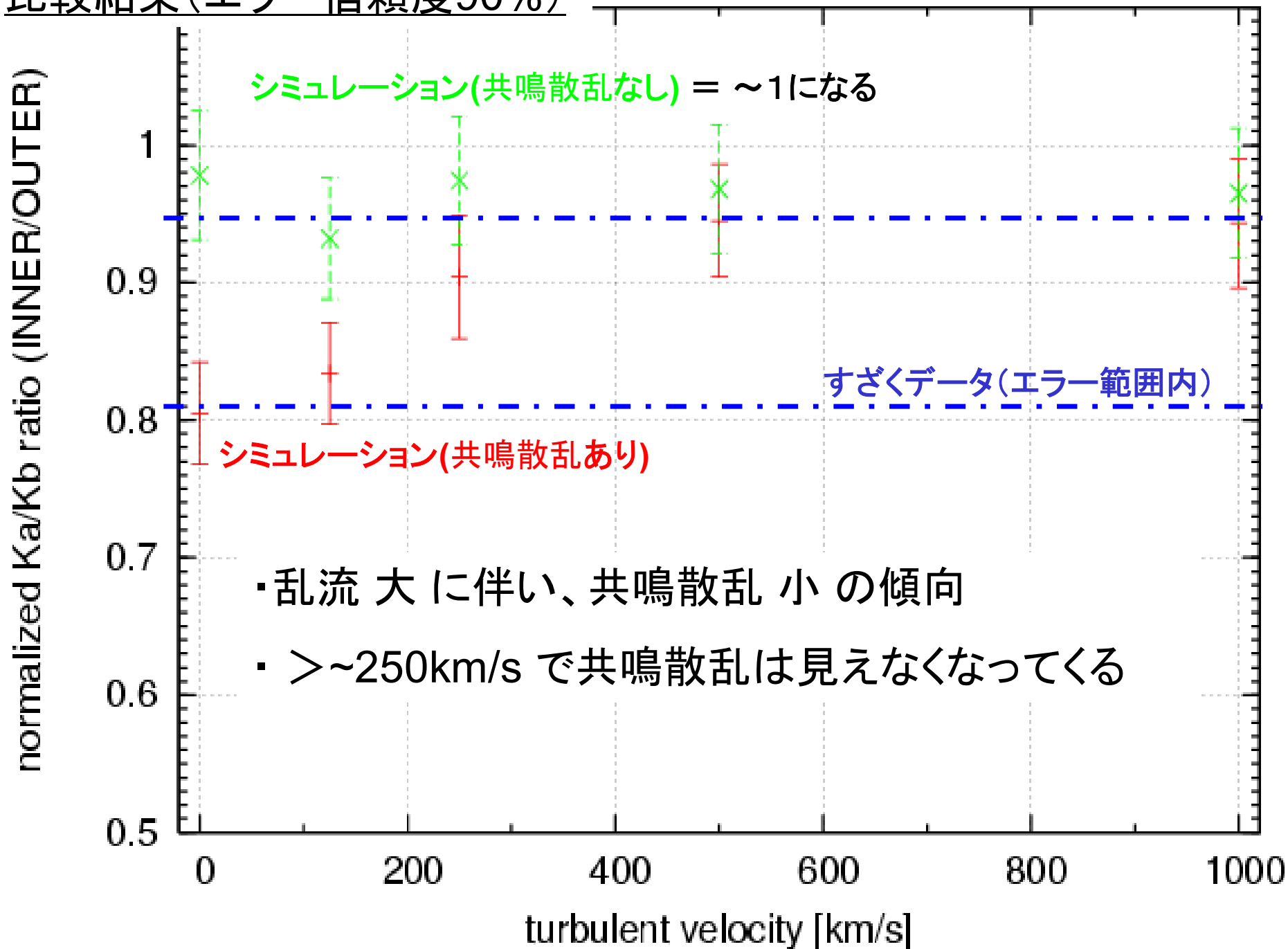
# シミュレーション; 乱流速度 5段階の重ね合わせ



**K $\alpha$  が共鳴散乱によって減っている!!!**



# 比較結果 (エラー信頼度90%)



## まとめ

・モンテカルロシミュレーションにより銀河団における共鳴散乱を再現し、乱流速度が大きくなると共鳴散乱が弱くなることを定量的に見積もることができた。

・Perseus銀河団のすざくデータとシミュレーションとの比較により、乱流速度を制限しようと試みた。

が、エラー大のため制限することはできなかった。

・データ統計が増えればエラーが抑えられて乱流下限をつけられる可能性はある。

→ 半年に1回観測(キャリブレーション目的)

→ 統計が良くなれば、 $K\gamma$ も解析に使えるようになる。



終

# outline

1. 銀河団と共鳴散乱  
について

2. 共鳴散乱と乱流の関係付け

3. Perseus銀河団について

観測: offset 半年に1回

Newton < すぎく (観測時間)

4. モンテカルロシミュレーション  
(visualizeも見せる?)

5. 解析方法

6. シミュレーションと実データの関係付け  
+ 結果 結論

Perseus銀河団のモデル式

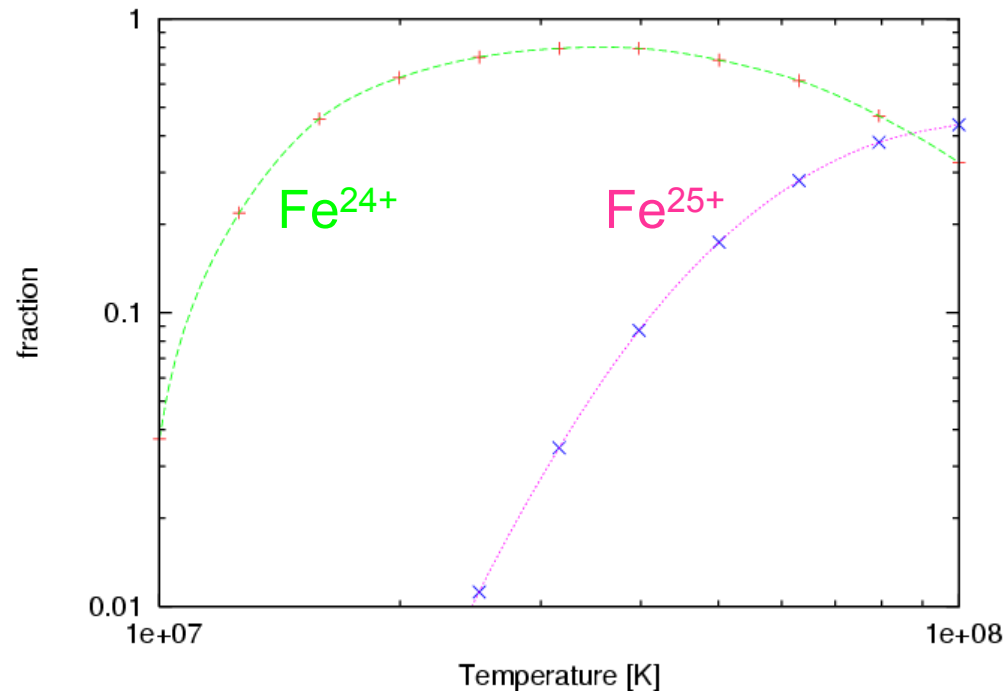
$$n_e = \frac{4.6 \times 10^{-2}}{\{1 + (r / 57)^2\}^{1.8}} + \frac{4.8 \times 10^{-3}}{\{1 + (r / 200)^2\}^{0.87}} \quad [\text{cm}^{-3}]$$

$$T = 7 \frac{1 + (r / 71)^3}{2.3 + (r / 71)^3} \quad [\text{keV}]$$

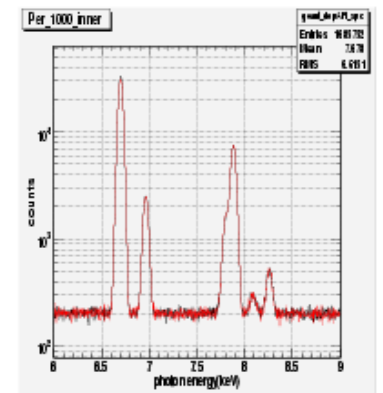
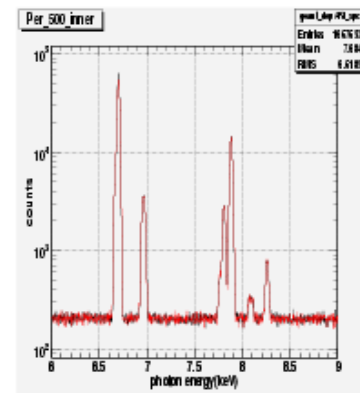
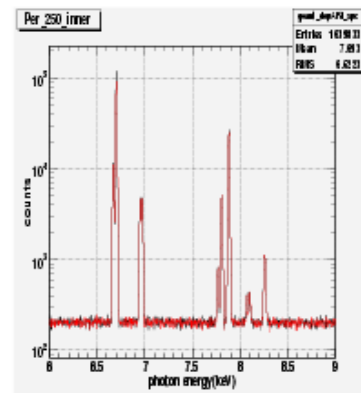
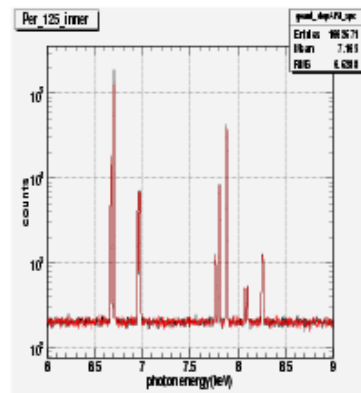
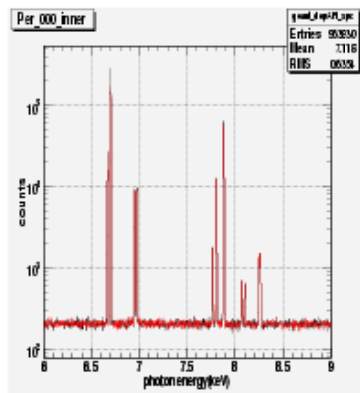
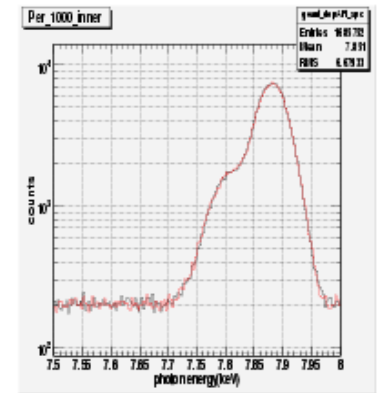
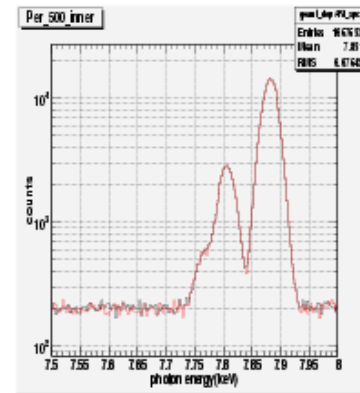
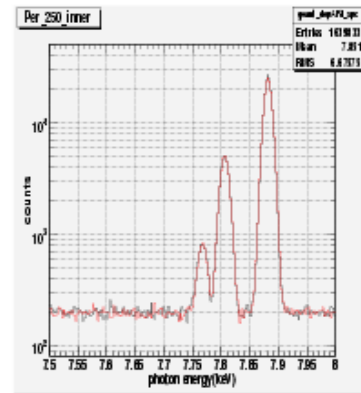
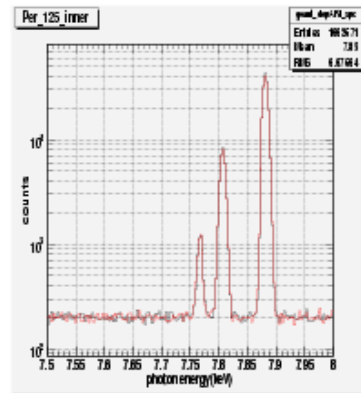
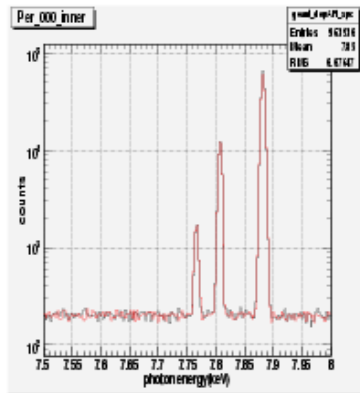
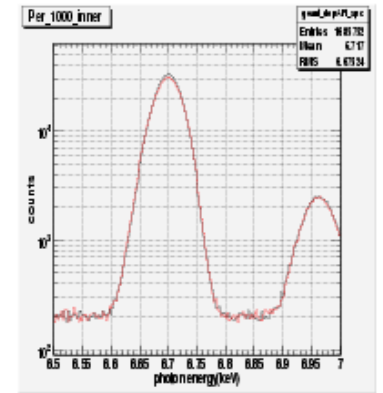
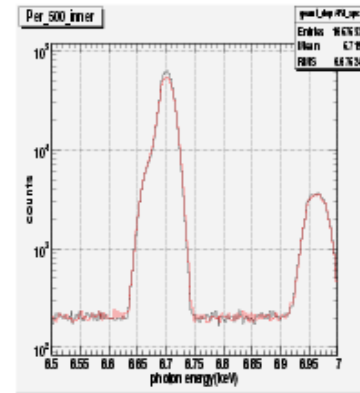
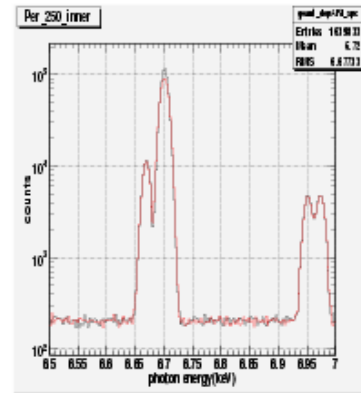
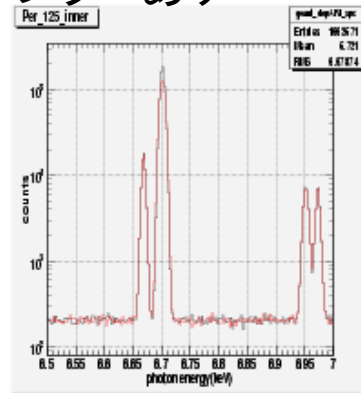
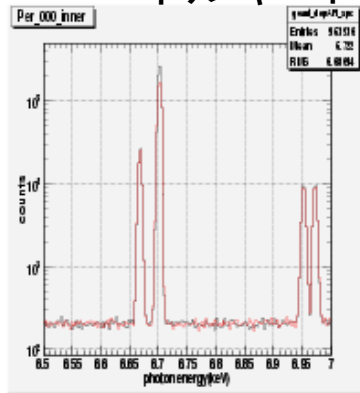
E.Churazov et al.

(MNRAS 347, 29-35 (2004))

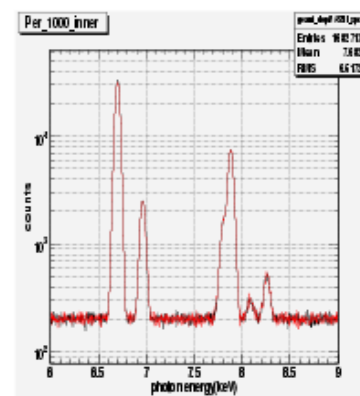
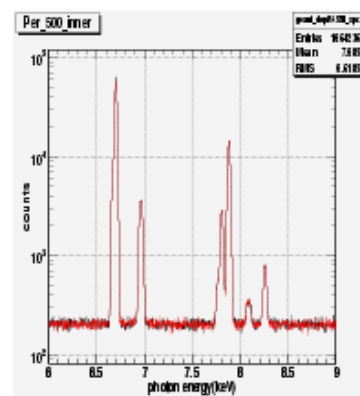
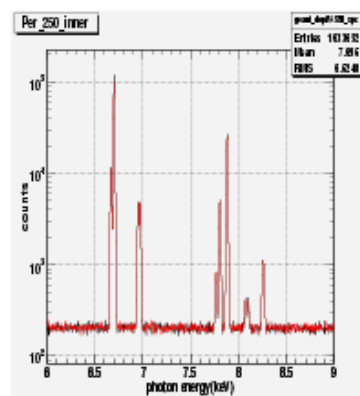
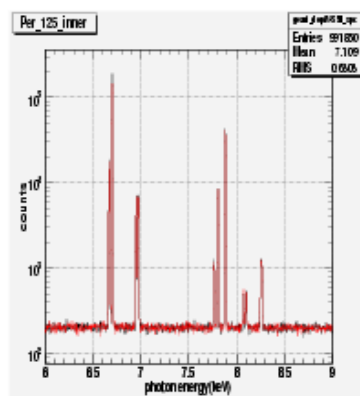
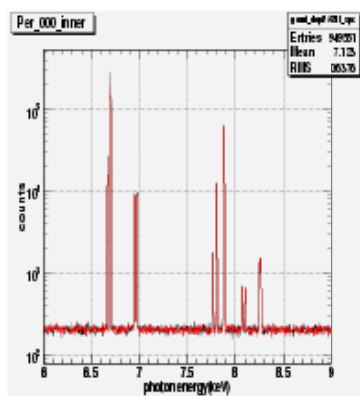
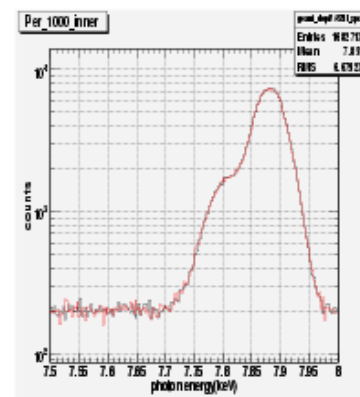
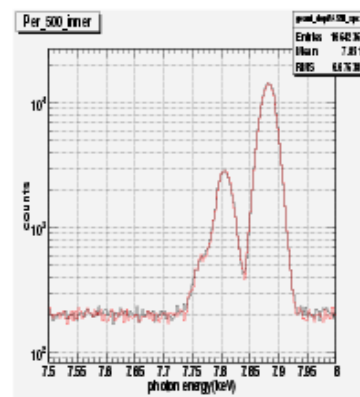
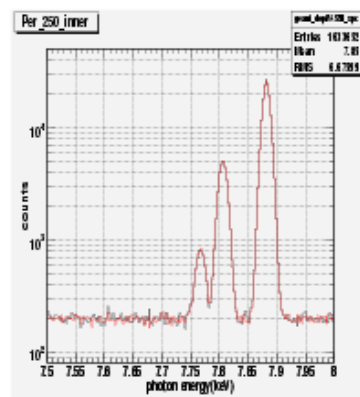
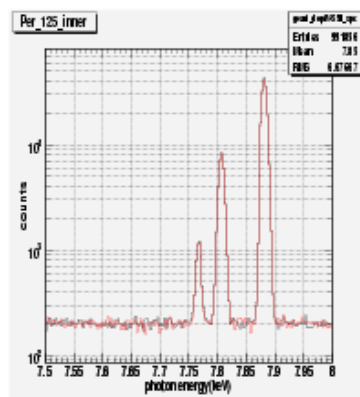
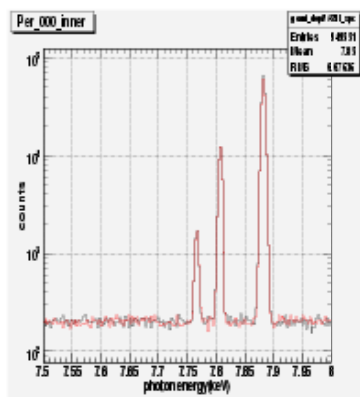
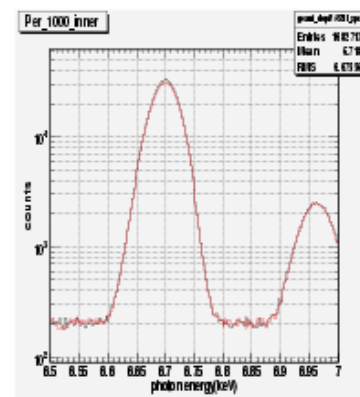
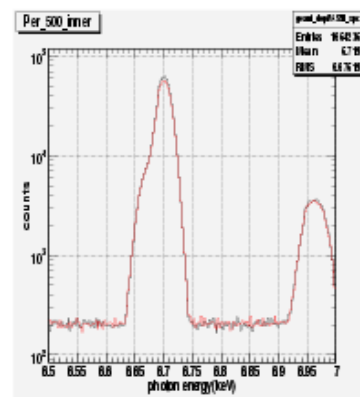
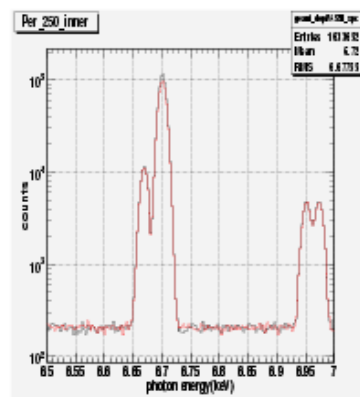
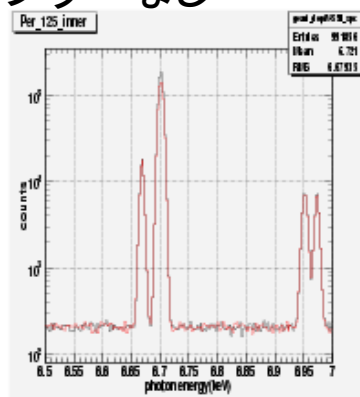
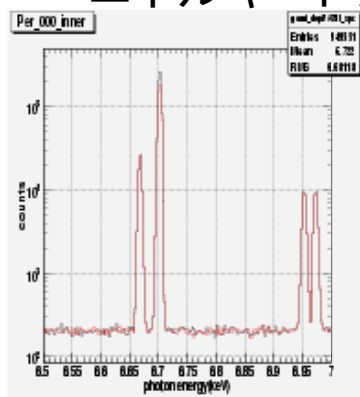
Feイオン fraction



# エネルギードップラーあり

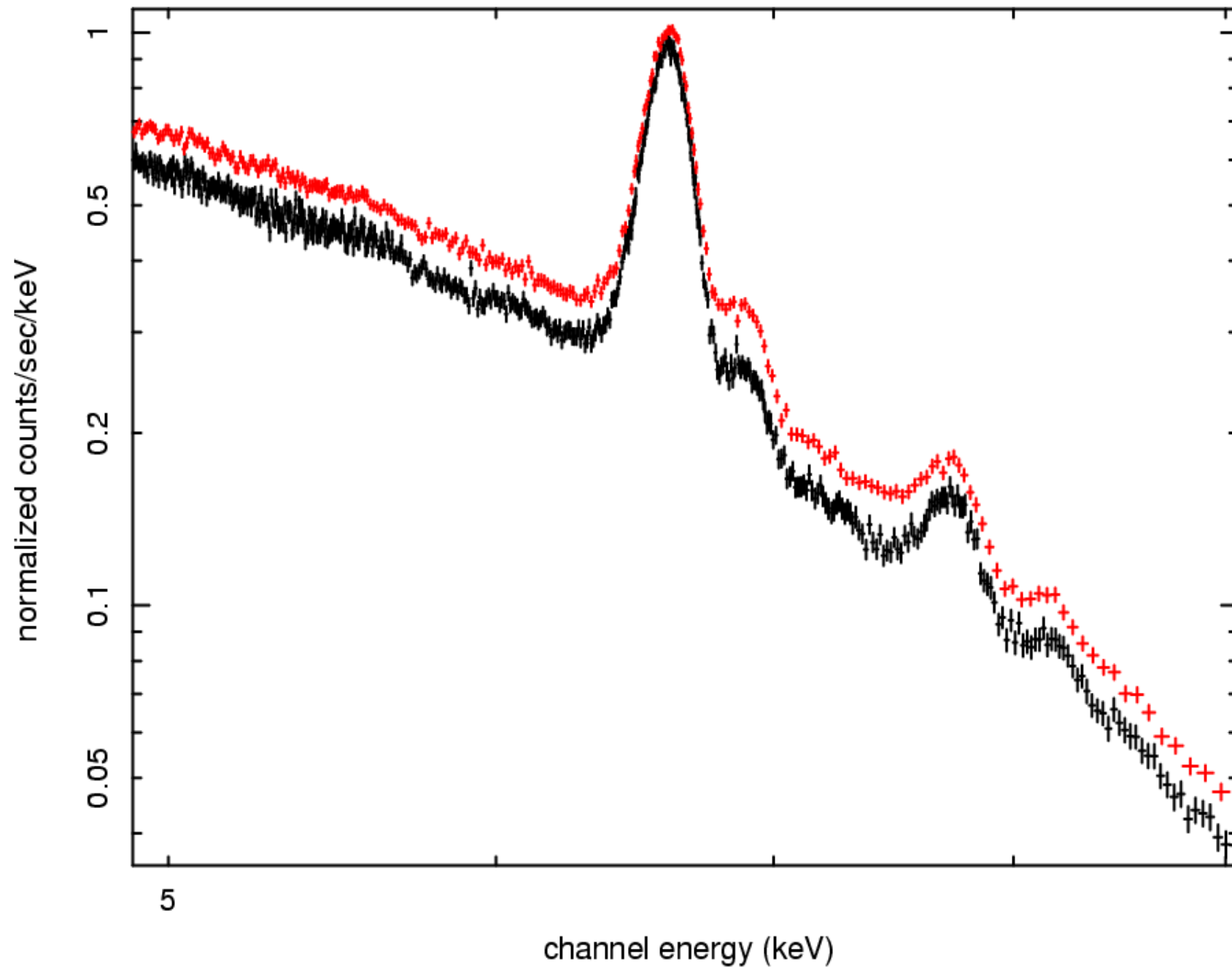


# エネルギードップラーなし



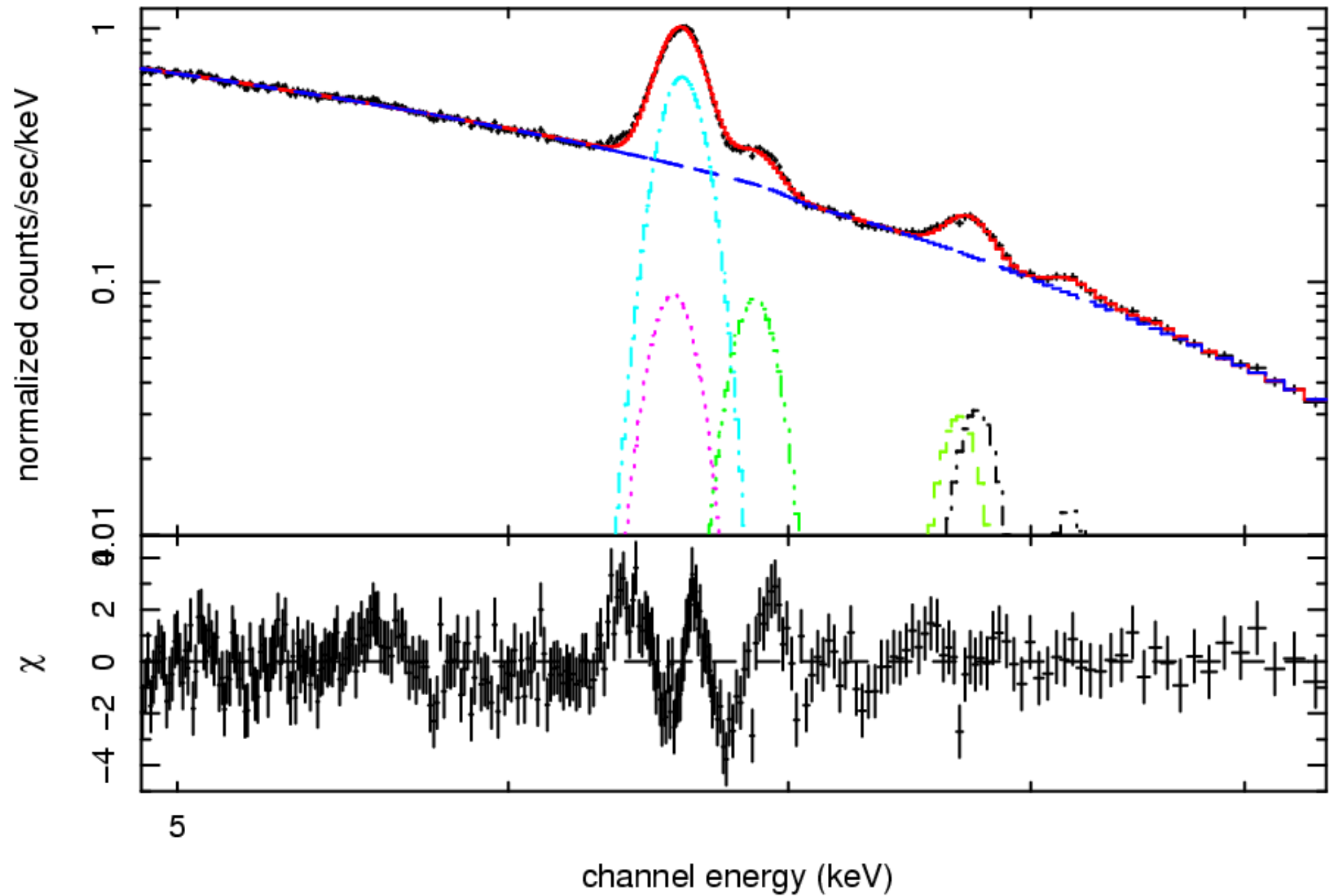
data and folded model

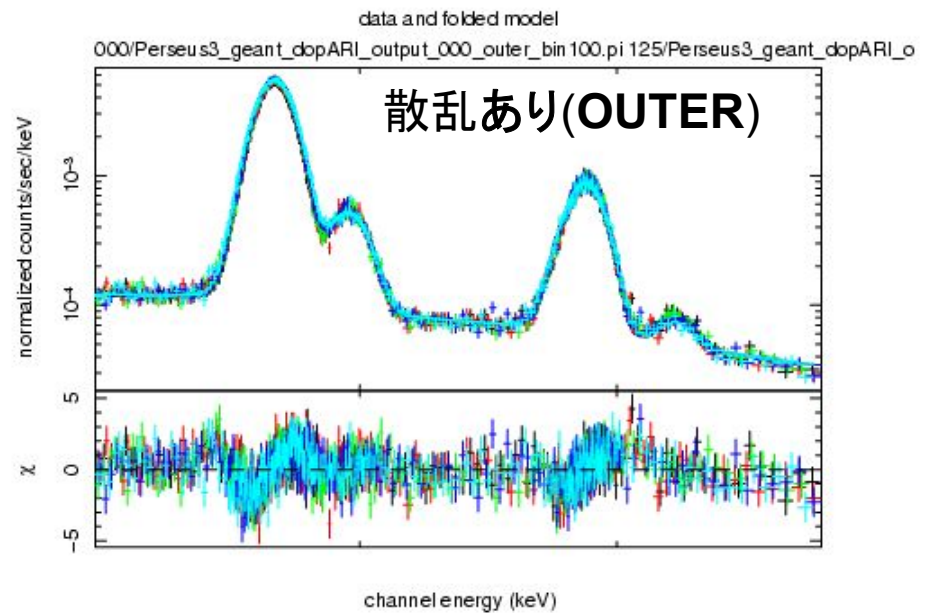
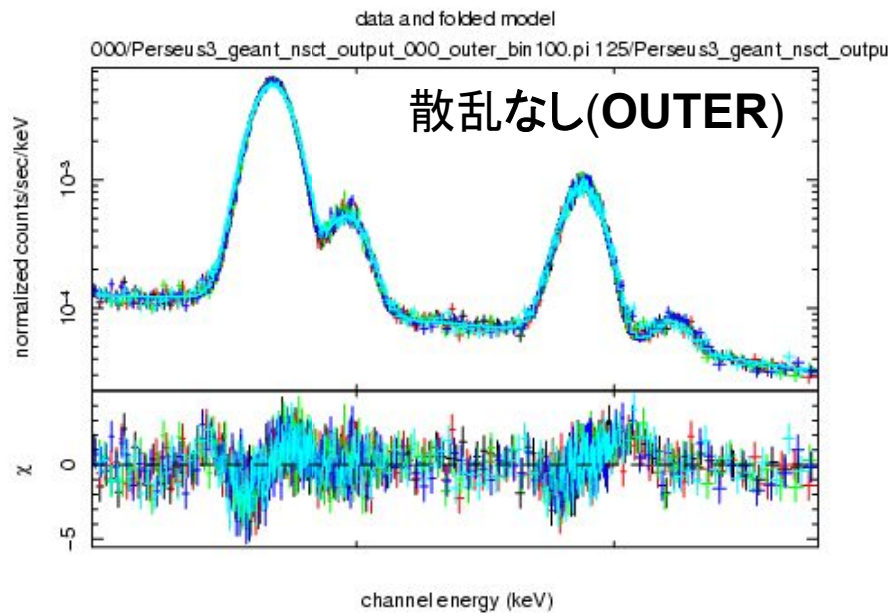
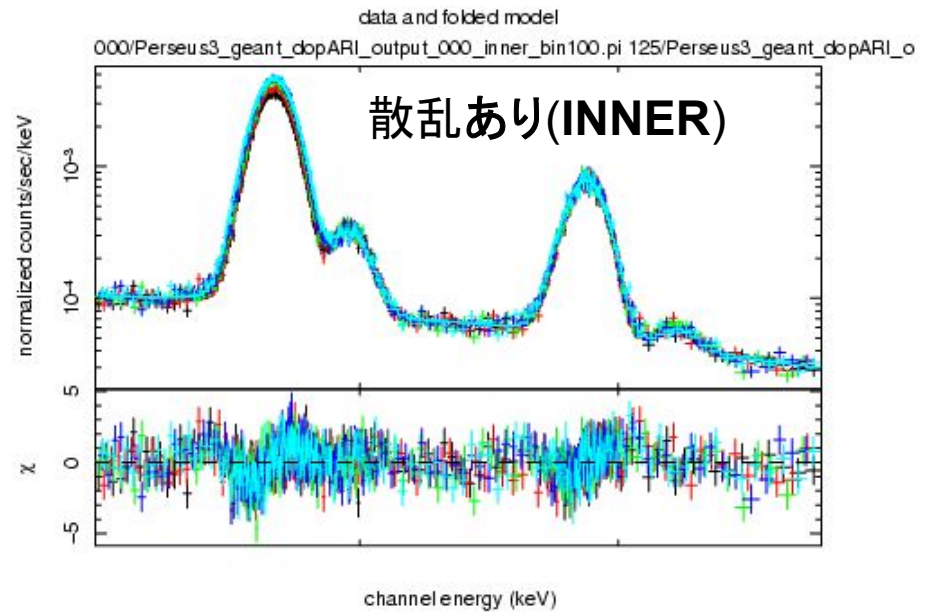
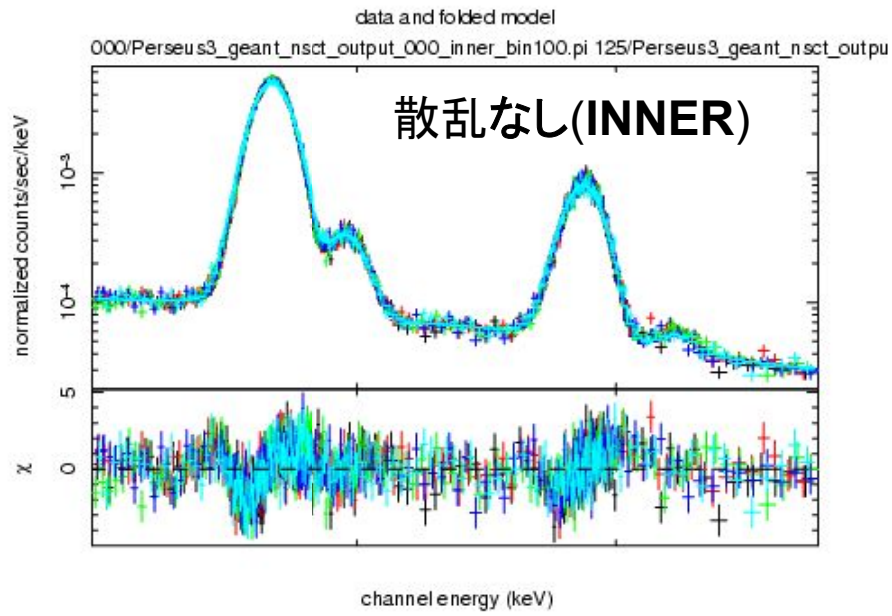
perseus2006\_0\_2arcmin\_bin1000.pi perseus2006\_2\_4arcmin\_bin2500.pi



data and folded model

perseus2006\_2\_4arcmin\_bin2500.pi

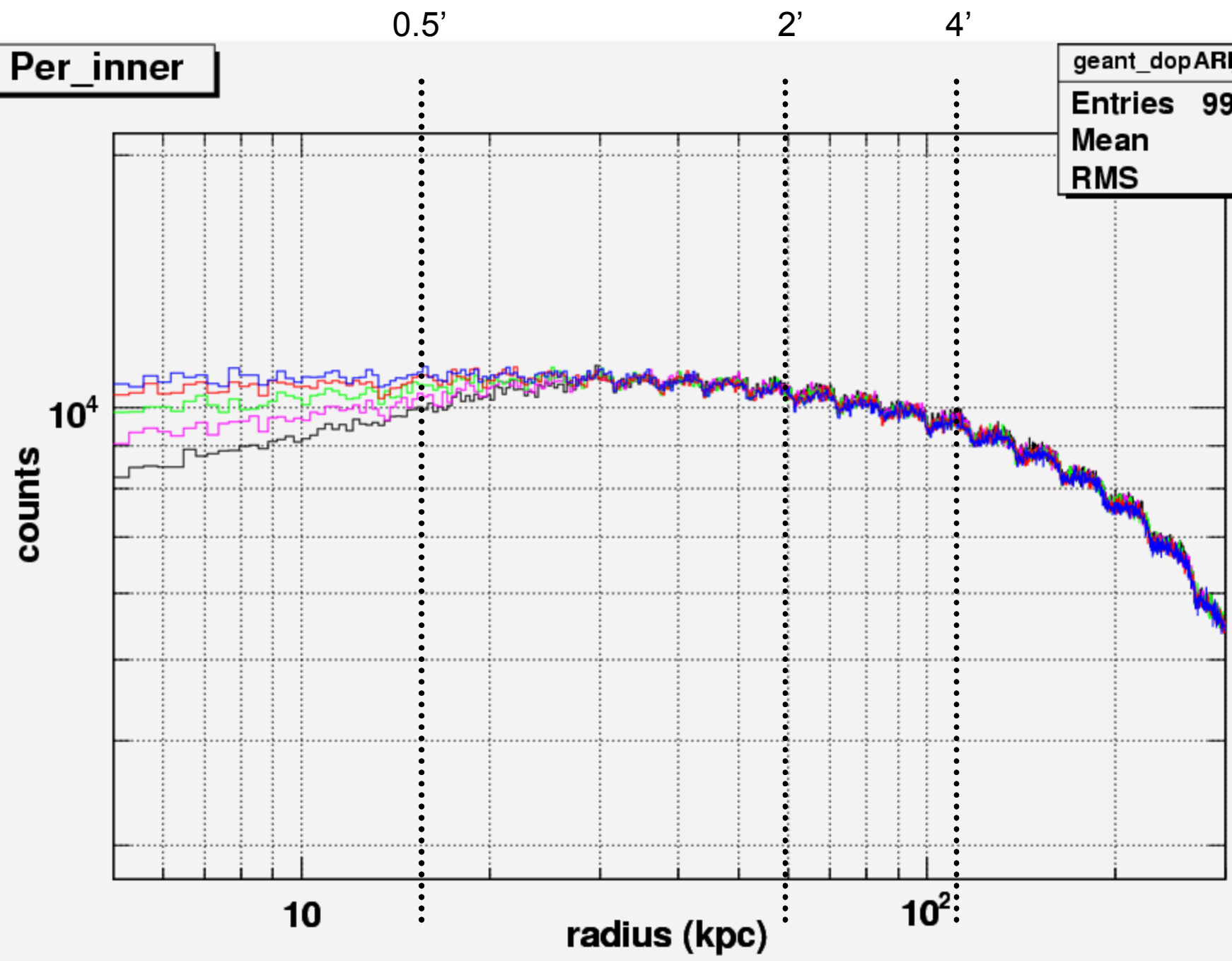






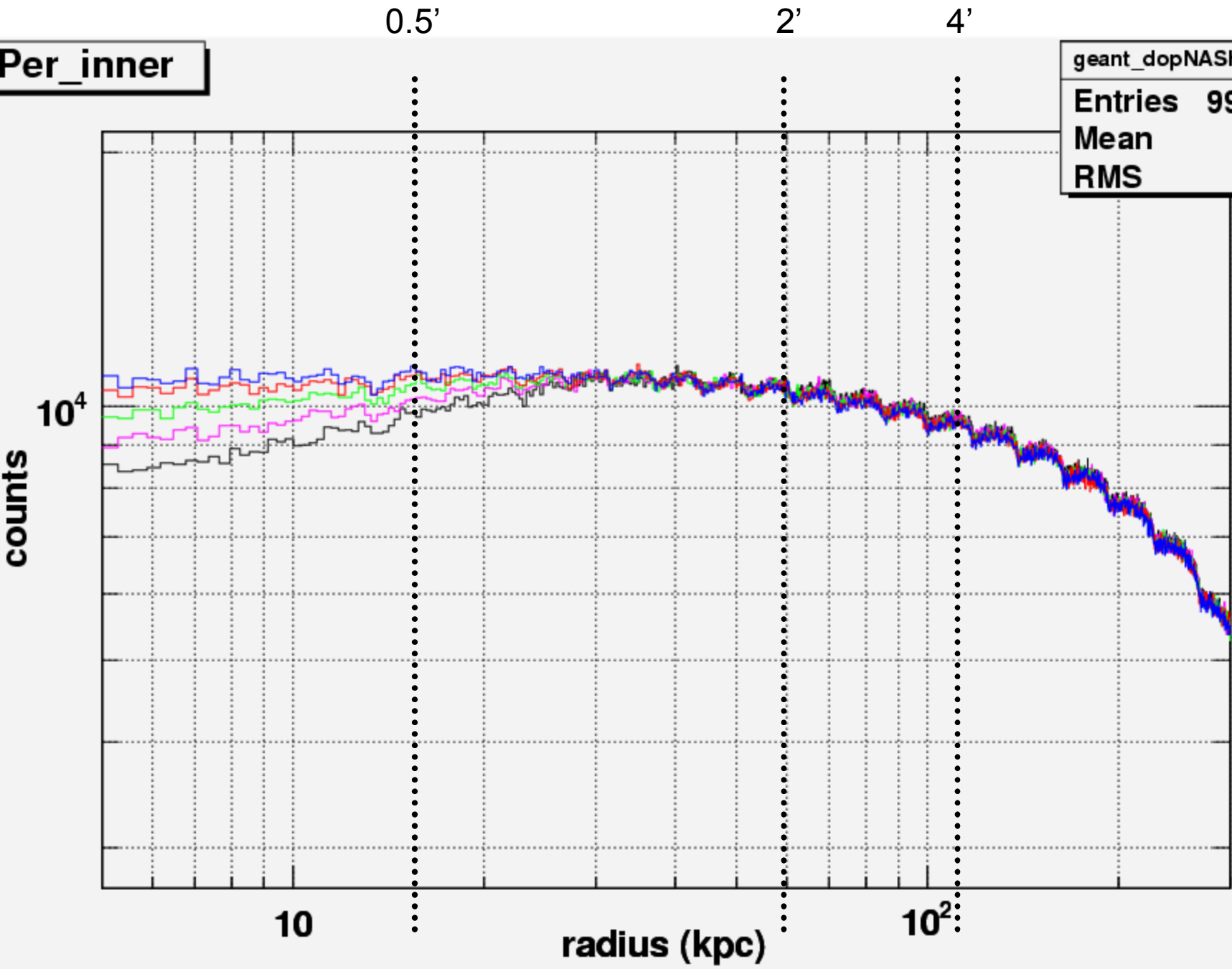
**Per\_inner**

geant_dopARI_radius	
Entries	9977985
Mean	135.9
RMS	82.91



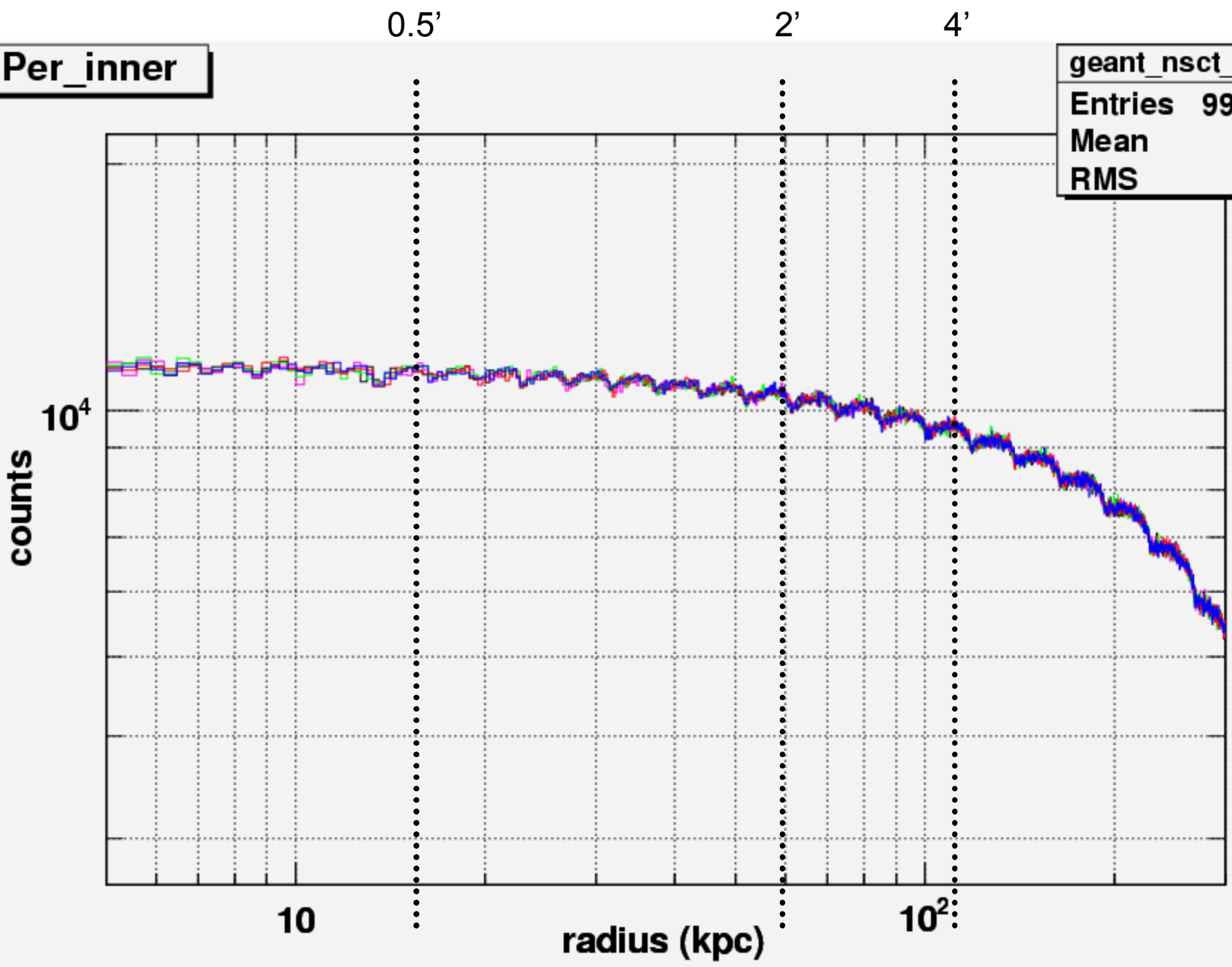
Per\_inner

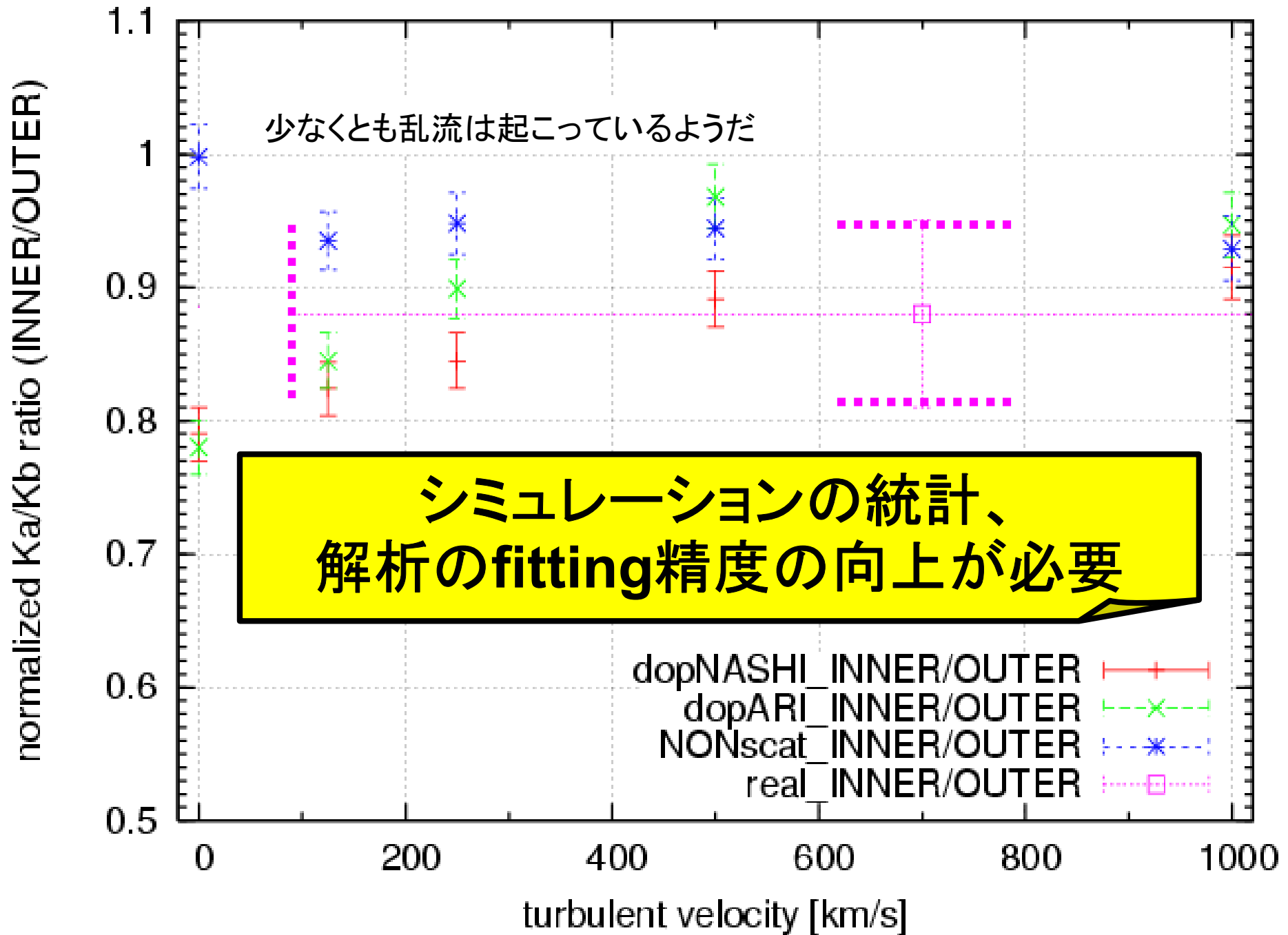
geant_dopNASHI_radius	
Entries	9977693
Mean	136
RMS	82.91



Per\_inner

geant_nsct_radius	
Entries	9980086
Mean	135.5
RMS	83.01

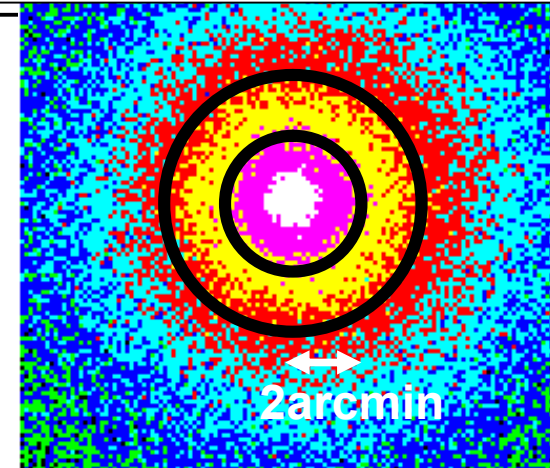




# 解析方法・手順

銀河団の内側 (**INNER**; 0-2arcmin) と外側 (**OUTER**; 2-4arcmin) に切り分けて、  
それぞれスペクトルの **K $\alpha$**  (6.70keV)line、**K $\beta$**  (7.88keV)line の **photon数の比** を取る  
= 共鳴散乱の指標 (**K $\alpha$ /K $\beta$** )

Perseus銀河団 (シミュレーション)



**point.** 散乱のしやすさ

$K\alpha > K\beta$ 、INNER > OUTER

$K\alpha/K\beta$  (inner)

$K\alpha/K\beta$  (outer)

すざくデータの  $K\alpha/K\beta$  とシミュレーションの  $K\alpha/K\beta$  を比較する

(規格化のため、OUTERに対するINNERの  $K\alpha/K\beta$  の比 (INNER/OUTER) をとる)

**point.** 共鳴散乱の断面積  
は乱流速度に依存

Perseus銀河団の乱流の速度下限をつけたい (目標)