

# X線天文衛星を用いた楕円銀河内の鉄輝線共鳴散乱の評価による乱流速度の制限

広島大学 理学研究科 物理科学専攻  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文研究室

M154801 寺前拓人

主査（指導教官）：深沢泰司 副査：志垣賢太

2017年2月28日

## 概要

本研究で着目する楕円銀河は、中心に ISM と呼ばれる X 線で明るい高温ガスを有することが 1980 年初頭に知られ、ISM 内の  $Fe^{+16}:0.826\text{keV}$  の輝線は共鳴散乱と呼ばれる現象を起こしやすい。共鳴散乱とは光子がイオンに吸収された際に光子がランダムな方向に再放射する現象である。故に観測的にはこの作用が起こった輝線のみ地球に届く光子の数が減少し、理論値モデルと合わなくなる。共鳴散乱断面積は振動子強度  $f$  に正比例し、一般的な輝線の振動子強度は  $f < 1$  であるのに対し、 $Fe^{+16}:0.826\text{keV}$  の振動子強度は  $f = 2.73$  である。この輝線の強度を同じく  $Fe^{+16}$  が放射する  $0.727\text{keV}$  の輝線 ( $f=0.12$ ) の強度と比較することで、共鳴散乱の影響を定量的に求めることが出来る。共鳴散乱の程度は楕円銀河内で起こる乱流に対し負の相関を持ち、故に共鳴散乱の影響を定量的に評価することで乱流の速度等パラメータに制限をつけることが本研究のモチベーションである。

楕円銀河における共鳴散乱の可能性は 2002 年、楕円銀河 NGC4636 において「XMM-Newton」RGS を用いた解析により初めて明らかにされ (Xu et al.2002)、その後、複数報告されてきた。本研究では、NGC4636 に似た特徴 (光度  $L_{X,soft} \approx 10^{41}\text{ergs}^{-1}$ ) を持つ 12 天体に対して解析を行った。この 12 天体の中には、過去共鳴散乱に関する解析が行われていない天体を 7 天体含んでいる。

本研究では、2005 年日本が打ち上げた「すざく」、1999 年にヨーロッパ諸国によって打ち上げられた「XMM-Newton」の二つを用いた。「すざく」XIS は過去日本が打ち上げた X 線天文衛星に比べ、より広いエネルギー領域に対して高エネルギー分解能かつ高感度で観測ができ、これにより正確に楕円銀河のコア領域の重元素分布を観測することができるようになった。一方「XMM-Newton」に搭載の RGS 検出器は無類の空間分解能の良さを誇り、しかし広い視野における観測は得意とするところではない。上記二種の衛星、検出器を用いた観測結果の解析を行い、考察を行う。同時に、シミュレーションプログラム「Geant4」を用いて、仮想的な楕円銀河、検出器を作成し、乱流等のパラメータを変化させながら共鳴散乱を起こすことで、銀河内で起こっていると考えられる乱流速度、及び他パラメータの整合性を確認する。上記の通り解析を行った所、12 天体の内 9 つの天体において共鳴散乱の兆候を確認することに成功し、実際のデータとモデルを比較することでその程度を定量的に評価した。また、視野半径を変えた解析や共鳴散乱輝線以外の輝線の強度比と比較することで、共鳴散乱の存在に対する不定性を低くした。またこれらの天体に対し Geant4 による解析を適用し、実際のデータによる解析結果と比較することで楕円銀河における共鳴散乱の存在の裏付けを行い、また乱流の規模を変えながら解析を行うことで各楕円銀河における乱流の制限を試みた。

# 目次

<b>第 1 章 Introduction</b>	<b>10</b>
1.1 研究背景	10
1.2 研究の目的	11
<b>第 2 章 楕円銀河およびその X 線観測</b>	<b>12</b>
2.1 楕円銀河	12
2.2 楕円銀河の X 線放射	13
2.3 共鳴散乱	14
2.3.1 共鳴散乱の概要	14
2.3.2 楕円銀河中での共鳴散乱	15
2.3.3 銀河団における共鳴散乱	16
2.3.4 共鳴散乱を観測する意義	18
<b>第 3 章 本研究で用いた解析ツール</b>	<b>19</b>
3.1 X 線天文衛星「すざく」	19
3.1.1 X 線望遠鏡 XRT(X-Ray Telescope)	20
3.1.2 X 線検出器 CCD カメラ XIS(X-ray Imaging Spectrometer)	22
3.2 X 線天文衛星「XMM-Newton」	23
3.2.1 X 線反射望遠鏡	24
3.2.2 X 線 CCD カメラ EPIC(European Photon Imaging Camera)	25
3.2.3 RGS(Reflection Grating Spectrometer)	26
3.3 各衛星を用いる意義	27
<b>第 4 章 解析手法</b>	<b>28</b>
4.1 解析用天体	28
4.2 「すざく」、「XMM-Newton」における解析条件	30
4.2.1 解析領域	30
4.2.2 各種解析用ファイル	31
4.2.3 各種バックグラウンド	33
4.3 model fitting	36
4.3.1 モデルの種類	36
4.3.2 最小自乗法	39
4.4 vapec モデルを中心としたモデルフィッティング	39
4.4.1 二温度モデル	41

4.5	ZGAUSS モデル中心のフィッティング	42
4.6	銀河のガス密度導出	43
<b>第 5 章</b>	<b>結果</b>	<b>45</b>
5.1	XIS,RGS による VAPEC モデル中心のモデルフィッティング	45
5.1.1	NGC4636 の解析結果	46
5.1.2	全楕円銀河の vapec モデルによるフィッティング	48
5.2	XIS,RGS による ZGAUSS モデル中心のモデルフィッティング	49
5.3	高温ガスの密度分布導出と optical depth の計算	52
<b>第 6 章</b>	<b>Geant4 によるシミュレーション</b>	<b>57</b>
6.1	Geant4 の概要	57
6.2	Geant4 の構成要素	57
6.3	NGC4636 による解析結果	59
6.4	全天体による解析結果	61
<b>第 7 章</b>	<b>考察、まとめ</b>	<b>63</b>
7.1	各天体における共鳴散乱と他パラメータの相関	63
7.2	まとめ	67

# 目次

1.1	Xu et al.2002 にて掲載されたスペクトル。黒い線が観測データ、赤い線が bestfit model である。スペクトルでの Wavelength=15.01Å の <i>FeXVII</i> の輝線が上に記した $kT=0.826\text{keV}$ の輝線に相当するが、このスペクトルの解析から観測データが model に比べて intensity が減少していることが解析から分かった。 . . . . .	11
2.1	楕円銀河 M87 . . . . .	12
2.2	渦巻銀河 M51 . . . . .	12
2.3	不規則銀河 M82 . . . . .	12
2.4	「すざく」による楕円銀河 NGC4636 (左)、活動銀河核 NGC6552 (右) の撮像 . . . . .	13
2.5	共鳴散乱の簡単な描像。 . . . . .	15
2.6	Zhuravleva et al.2013 におけるシミュレーション結果。左が乱流を考慮しない場合 (黒 : 共鳴散乱を考慮しない場合、赤 : 共鳴散乱を考慮した場合)、右が乱流を考慮した場合 (黒 : $M=0$ 、紫 : $M=0.25$ 、赤 : $M=0.5$ 、実線 : 共鳴散乱無し、点線 : 共鳴共鳴あり) の共鳴散乱輝線付近のスペクトルである。 . . . . .	16
2.7	ペルセウス銀河団の観測領域のイメージ (左) と観測されたスペクトル (右)。 . . . .	17
2.8	楕円銀河内ジェット of 簡単な描像。 . . . . .	18
3.1	「すざく」の構造 . . . . .	19
3.2	XRT の外観 . . . . .	20
3.3	Wolter-I 型望遠鏡の構造 . . . . .	21
3.4	XIS の外観 . . . . .	22
3.5	FI 型検出器 (左) BI 型検出器 (右) の外観 . . . . .	22
3.6	XMM-Newton の外観 . . . . .	23
3.7	X 線反射望遠鏡の外観 . . . . .	24
3.8	mos (左) 及び pn (右) 検出器の外観。 . . . . .	25
3.9	X 線反射望遠鏡内の RGS の構造。 . . . . .	26
3.10	RGA (左) 及び RFC (右) の外観。 . . . . .	26
3.11	X 線反射望遠鏡内の RGS の構造。 . . . . .	27
4.1	XIS による NGC4636 のイメージ。中心の緑の円が各々 0-2 分角、2-4 分角の解析領域を表す。 . . . .	30
4.2	NGC4636 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)。スペクトルに関しては黒 : FI 型、赤 : BI 型である。0-2 分角ののスペクトルでは 0.82keV 付近に負の残差が見える一方、2-4 分角では残差が無くなっており、共鳴散乱の影響が確認できない。 . . . .	30
4.3	ftool を用いた衛星データ解析の概要 . . . . .	31

4.4	左:NGC4636 のイメージ。右:NGC4636 の 0'-2' の加工していないスペクトル。黒が FI 型、赤が BI 型である。 . . . . .	32
4.5	NGC4636 のスペクトル。左: XIS でのスペクトルであり、黒、赤: FI、BI の実データ 緑、青: FI、BI の NXB データ。右: RGS でのスペクトルであり、黒、赤: RGS1、RGS2 の実データ 緑、青: RGS1、RGS2 の NXB データ。 . . . . .	34
4.6	陽子フレアの影響を受けた mos2 のイメージ。イメージ全体が明るくなっているのが見て取れる。 . . . . .	35
4.7	mos1 カメラのバックグラウンドを表現したスペクトル。0.5keV より低エネルギー側の盛り上がりが見出し器によるノイズ。 . . . . .	35
4.8	XIS による NGC4649 のスペクトル。黒: NGC4649 の実データ 赤、緑、青: 各々 VAPEC モデル、BREMS 模型、APEC 模型 を表す fake スペクトル。APEC 模型の片方は影響が薄かったためスペクトル上には現れていない。 . . . . .	40
4.9	XIS による NGC4636 のスペクトル。左が 0'-2'、右が 2'-4' のスペクトルであり、黒: FI 型、赤: BI 型検出器である。十字型のプロットが実データであり、そのプロットに重なるようにモデル曲線が描かれている。 . . . . .	40
4.10	NGC4472 の一温度モデル (左) と二温度モデル (右) の比較。 . . . . .	41
4.11	XIS による NGC4636 のスペクトル。黒: FI 型、赤: BI 型を表し、ガウシアン型の点線が ZGAUSS モデルによる各輝線の立ち上がりを表現している。 . . . . .	43
4.12	NGC4636 のガス密度分布。NGC4636 は大戸修論 (2002) と比較している。本研究の結果を黒い点、比較論文の値を赤い点にて示している。 . . . . .	44
5.1	NGC4636 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右) . . . . .	46
5.2	RGS による NGC4636 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。 . . . . .	47
5.3	ZGAUSS モデルでフィットした NGC4636 のスペクトル。(左) XIS によるスペクトル。黒: FI 型、赤: BI 型検出器であり、山形の点線が gaussian モデル、横に向かって伸びている連続成分が brems 模型を表している。(右) RGS によるスペクトル。黒: RGS1、赤: RGS2 の検出器である。モデルの概略は XIS と同じ。 . . . . .	50
5.4	XIS(左)、RGS (右) での ZGAUSS モデルの強度比 . . . . .	51
5.5	各天体の $X_{real}/X_{fake}$ 。青い線が XIS、赤い線が RGS を表す。 . . . . .	51
5.6	NGC4636 のガス密度分布。NGC4636 は大戸修論 (2002) と比較している。本研究の結果を黒い点、比較論文の値を赤い点にて示している。 . . . . .	53
5.7	Chandra による NGC4374(左)、及び NGC720(右) の X 線イメージ。比較的等方的な形をしている NGC720 に対して、NGC4374 の高温ガスが擾乱によりかき乱されて不定形をとっているのが分かる。 . . . . .	55
5.8	M=0 時の Optical depth と $X_{obs}/X_{model}$ の関連をプロットした表。黒: 天体内に擾乱が確認できない天体、赤: 天体内に擾乱が確認された天体。 . . . . .	55
6.1	Geant4 で想定している空間内の状況。 . . . . .	58
6.2	Geant4 による NGC4636 のイメージ。このイメージから解析領域を 0'-1'、2'-4' に分ける。 . . . . .	58

6.3	Geant4 を用いて作成した NGC4636 のシミュレーションスペクトル。上段が $r=1$ , 下段が $r=2-4$ であり、左から順に $M=0,0.5,1.0$ である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合	60
6.4	NGC5846(左上)、NGC4472(右上)NGC1399(下)における Geant4 のイメージ。	62
7.1	各天体の共鳴散乱の様相とパラメータの関係性。左の図が XIS、右の図が RGS の結果である。縦軸は $X_{rs}/X_{nors}$ 、横軸は上から順に温度 $kT(\text{keV})$ 、軟 X 線光度 $L_x(\text{erg/s})$ 、中心密度 $n_0(\text{cm}^{-3})$ 、Optical depth である。温度以外の図は、横軸は log プロットとしている。	65
7.2	NGC4649 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	68
7.3	RGS による NGC4649 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	69
7.4	NGC4472 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	70
7.5	RGS による NGC4472 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	71
7.6	NGC1404 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	72
7.7	XIS で撮像した NGC1399 のイメージ。画像の左上に写り込んでいる天体が NGC1404 である。	72
7.8	RGS による NGC1404 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	73
7.9	NGC1399 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	74
7.10	RGS による NGC1399 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	75
7.11	NGC5044 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	76
7.12	RGS による NGC5044 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	77
7.13	NGC5846 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	78
7.14	RGS による NGC5846 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	79
7.15	NGC4406 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	80
7.16	RGS による NGC4406 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	81
7.17	NGC720 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	82
7.18	RGS による NGC720 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	83
7.19	NGC1316 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)	84
7.20	RGS による NGC1316 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	85
7.21	RGS による NGC4374 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	86
7.22	RGS による NGC4382 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。	87
7.23	ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右) を再現している。 flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	88
7.24	各輝線の強度比。	88
7.25	ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右) flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	89
7.26	各輝線の強度比	89
7.27	ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右) を再現している。 flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	90
7.28	各輝線の強度比。	90
7.29	ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右) flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	91
7.30	各輝線の強度比。	91

7.31 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。	
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	92
7.32 各輝線の強度比。	92
7.33 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。	flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s) 93
7.34 各輝線の強度比。	93
7.35 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。	
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	94
7.36 各輝線の強度比。	94
7.37 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。	flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s) 95
7.38 各輝線の強度比。	95
7.39 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。	
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	96
7.40 各輝線の強度比。	96
7.41 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。	flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s) 97
7.42 各輝線の強度比。	97
7.43 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。	
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	98
7.44 各輝線の強度比。	98
7.45 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。	flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s) 99
7.46 各輝線の強度比。	99
7.47 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。	
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	100
7.48 各輝線の強度比。	100
7.49 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。	flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)101
7.50 各輝線の強度比。	101
7.51 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。	
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	102
7.52 各輝線の強度比。	102
7.53 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。	flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)103
7.54 各輝線の強度比。	103
7.55 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。	
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	104
7.56 各輝線の強度比。	104
7.57 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。	flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)105
7.58 各輝線の強度比。	105
7.59 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。	
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	106
7.60 各輝線の強度比。	106
7.61 ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。	flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)107

7.62	各輝線の強度比。 . . . . .	107
7.63	ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。 flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	108
7.64	各輝線の強度比。 . . . . .	108
7.65	ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。 flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm <sup>2</sup> /s)	109
7.66	各輝線の強度比。 . . . . .	109
7.67	XIS での ZGAUSS モデルの強度比 . . . . .	111
7.68	RGS での ZGAUSS モデルの強度比 . . . . .	112
7.69	各天体の半径ごとのガス密度分布。 黒いプロットが本研究の結果、赤い点が大戸修論、青い点 が Shigeyama et al.1997 を各々表す。 . . . . .	114
7.70	Geant4 を用いて作成した NGC4649 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤 いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	115
7.71	Geant4 を用いて作成した NGC4472 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤 いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	116
7.72	Geant4 を用いて作成した NGC1404 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤 いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	117
7.73	Geant4 を用いて作成した NGC1399 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤 いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	117
7.74	Geant4 を用いて作成した NGC5044 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤 いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	118
7.75	Geant4 を用いて作成した NGC5846 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤 いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	118
7.76	Geant4 を用いて作成した NGC4406 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤 いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	119
7.77	Geant4 を用いて作成した NGC720 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデ ータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	119
7.78	Geant4 を用いて作成した NGC1316 のシミュレーションスペクトル。 上段が r=1, 下段が r=2-4 であり、左から順に M=0,0.5,1.0 である。 黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤 いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合 . . . . .	120

# 表 目 次

2.1	ISM 温度付近で優勢な輝線放射のリスト	14
3.1	XRT-I のステータス	20
3.2	XIS のステータス	22
3.3	XMM-Newton の X 線反射望遠鏡のステータス	24
3.4	XMM-Newton 搭載の各検出器の性能。	25
4.1	各楕円銀河のパラメータ。D は天体までの距離。 $L_{x_{soft}}$ , D:Fukazawa et al.2006、NED から引用	28
4.2	CXB モデルに入力した情報。normalization は 20 分角の広さの一様な空に大して作った ARF を想定して求められた (Hayashi et al.2009)。	36
4.3	各 APEC モデルの記入情報	36
4.4	重元素の太陽組成比。値は水素との原子数の比を表している。	37
4.5	ZGAUSS モデルを対応させる輝線。記載の通り、左が XIS の場合に入力するモデル、右が RGS の場合に入力するモデルである。	42
5.1	一温度モデル (左)、二温度モデル (右) の歳の入力パラメータ。	45
5.2	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。	46
5.3	RGS におけるフィッティング結果。	47
5.4	XIS における各楕円銀河の 0'-2' でのフィッティング結果。NGC4636,NGC4649,NGC1404,NGC720 は一温度モデル、他の天体は二温度モデルである。 $V_1norm, V_2norm$ は二つの VAPEC モデルの各 normalization である。	48
5.5	RGS における各楕円銀河のフィッティング結果。	49
5.6	ZGAUSS モデルの情報	50
5.7	全楕円銀河に対するガス密度分布を導出した際の密度分布パラメータ。	53
5.8	M=0 時の optical depth 及び各パラメータ	54
5.9	各天体の擾乱及び有する AGN の有無。( )NGC4406 の擾乱は銀河団との相互作用により引き起こされている。	54
5.10	全天体での Optical depth の導出結果。	56
6.1	NGC4636 の各パラメータでの $X_{rs}/X_{nors}(X = I_{0.826keV}/I_{0.727keV})$ 。	60
6.2	全天体での各パラメータでの $X_{rs}/X_{nors}(X = I_{0.826keV}/I_{0.727keV})$ 。	61
6.3	全天体での各パラメータでの $X_{rs}/X_{nors}(X = I_{0.826keV}/I_{0.727keV})$ 。	61

7.1	天体の各パラメータと各天体の共鳴散乱の様相の比較。 . . . . .	64
7.2	全天体での各パラメータでの $X_{rs}/X_{norms}(X = I_{0.826keV}/I_{0.727keV})$ 。 . . . . .	64
7.3	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	68
7.4	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	69
7.5	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	70
7.6	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	71
7.7	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	72
7.8	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	73
7.9	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	74
7.10	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	75
7.11	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	76
7.12	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	77
7.13	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	78
7.14	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	79
7.15	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	80
7.16	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	81
7.17	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	82
7.18	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	83
7.19	XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$ は VAPEC モデルの各 normalization である。 .	84
7.20	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	85
7.21	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	86
7.22	RGS におけるフィッティング結果。 . . . . .	87

# 第1章 Introduction

## 1.1 研究背景

X線天文学は1962年、最初のX線源をさそり座から発見して以来急激に進歩し、それ以来多くの天体に対してX線観測が行われるようになり、そしてX線天文学の進歩による成果は天文学全体に波及した。その過程で行われたのが「楕円銀河」と呼ばれる天体のX線観測である。楕円銀河と呼ばれる天体は基本的に古い星で構成されており、X線を用いた観測から、楕円銀河内に冷たい星間ガス (ISM: InterStellar Medium) を有することが判明した。楕円銀河ISMの温度は0.5~1.0keVであり、軟X線領域で比較的強く輝く。そしてISMの温度領域内で放射される輝線の中でも、 $Fe^{+16}$ :0.826keVの輝線は「共鳴散乱」と呼ばれる現象を起こしやすいとされている。共鳴散乱は、各輝線に対しある一定の確率で進行方向をランダムにするという現象であり、この現象が起こった輝線は観測的に地球に到来する数が減少する。楕円銀河のX線観測から、推定されるモデルに対して特定の輝線のみ到来数が明らかに少ない、といったことが判明したため、このような現象が起こっていると予想された。そして共鳴散乱がどの程度起こっているか、ということは、ISM内で起こっている乱流の速度と負の相関を持つため、共鳴散乱の影響を定量的に評価することで銀河内乱流のパラメータが得られると予測される。

楕円銀河内で共鳴散乱が起こっていることは、2002年、楕円銀河NGC4636において「XMM-Newton」衛星のRGS検出器を用いて初めて定量的に解析され (Xu et al. 2002)、この論文を皮切りに多くの楕円銀河にて共鳴散乱に関する解析が行われている。しかし、必ずしも全ての楕円銀河で上記の効果を観測できるわけではなく、楕円銀河ISMの温度、密度、乱流速度によっては0.826keV輝線の共鳴散乱が検出されないということも多々ある。そこで私は本論文にて、多種楕円銀河に対し、様々なアプローチから共鳴散乱の影響を定量的に評価すると共に、シミュレーションプログラムを用いた温度等パラメータと共鳴散乱の相関の評価を行うことで、多種楕円銀河内の共鳴散乱に関して綿密な考察を行いたいと考える。

宇宙から到来するX線放射の観測は、大気の影響から地上観測は不可能なので、X線天文衛星と呼ばれる観測衛星を用いた解析を行う。本研究では、2005年日本が打ち上げた「すざく」、1999年にヨーロッパ諸国によって打ち上げられた「XMM-Newton」を利用する。「すざく」XIS(X-ray Imaging Spectrometer)は過去日本が打ち上げたX線天文衛星に比べ、より広いエネルギー領域に対して高エネルギー分解能かつ高感度で観測ができ、これにより正確に楕円銀河のコア領域の重元素分布を観測することができるようになった。一方「XMM-Newton」に搭載のRGS(Reflection Grating Spectrometer)と呼ばれる検出器は、天体中心に向けて無類の空間分解能の良さを誇り、しかし広い領域における観測は得意とするところではない。上記二種の衛星、検出器を用いた観測結果の解析を行い、考察を行う。同時に、シミュレーションプログラム「Geant4」を用いて、仮想的な楕円銀河、検出器を作成し、乱流等のパラメータを変化させながら共鳴散乱を起こすことで、銀河内で起こっていると考えられる乱流速度、及び他パラメータの整合性を確認する。

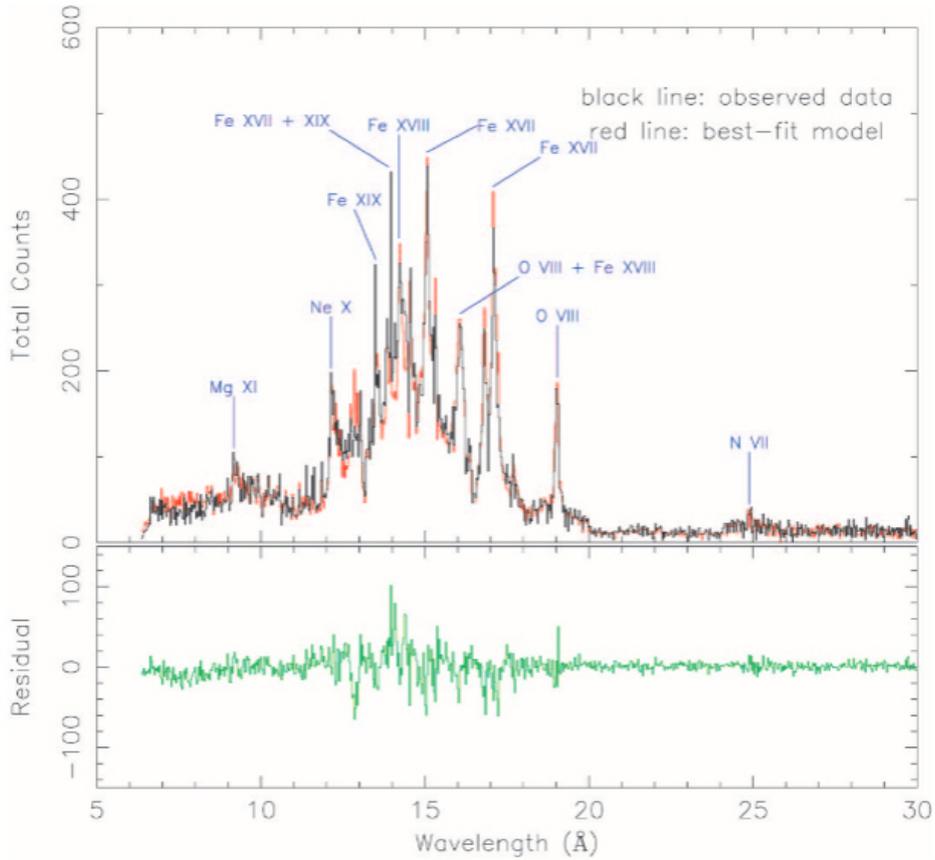


図 1.1: Xu et al.2002 にて掲載されたスペクトル。黒い線が観測データ、赤い線が bestfit model である。スペクトルでの Wavelength=15.01Å の *FeXVII* の輝線が上に記した  $kT=0.826\text{keV}$  の輝線に相当するが、このスペクトルの解析から観測データが model に比べて intensity が減少していることが解析から分かった。

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、多種(本論文では 12 個)の楕円銀河において X 線天文衛星「すざく」、「XMM-Newton」、及びシミュレーションプログラム「Geant4」を用いた軟 X 線領域 (1keV 付近) の解析を行い、楕円銀河における共鳴散乱の度合い、及び乱流等の他パラメータとの相関を定量的に見積もること、とする。

また、基本的なゴールは共鳴散乱に関する解析結果から乱流の速度に関する考察を行うことと設定するが、最終的には楕円銀河の Optical depth の考察や、乱流以外のパラメータとの相関など、共鳴散乱に関する考察を可能な限り行った上で本論文を締めくくろうと考える。

## 第2章 楕円銀河およびその X 線観測

### 2.1 楕円銀河

銀河は形態の特徴ごとに大きく分類され、その中で一般的なものは 1936 年に E.Hubble が提唱したハッブル分類である。その分類に従うと、本研究のメインテーマとして用いる楕円銀河は、特に星が球状あるいは楕円体状に集まったバルジ（ここでは銀河中心の楕円体状の成分のこと）のみを有する銀河を指す。他に大きく、星が円盤状の領域に集まった、バルジとディスクを有する渦巻銀河や、どちらにもあてはまらず明瞭な中心核を持たない銀河を持たない不規則銀河、等が存在する。以下は各々の銀河のイメージである。



図 2.1: 楕円銀河 M87



図 2.2: 渦巻銀河 M51

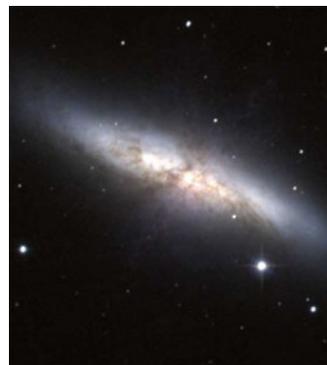


図 2.3: 不規則銀河 M82

楕円銀河は、恒星の材料となる冷たい星間ガスが少ないため星形成活動が活発ではなく、銀河が形成された初期段階で殆どの構成天体が形成され終わった銀河なので、基本的に古い星で形成されている。だがその一方で、X 線による観測から、銀河全体を数百万度以上の X 線で輝く高温ガス (ISM: Interstellar Medium) が満たしていることが分かった。ISM が有する温度は  $kT=0.5-1.0\text{keV}$  程度、軟 X 線光度は  $L_{x,soft} = 10^{39} - 10^{42} \text{ergs}^{-1}$  程度であり、楕円銀河からの軟 X 線の主成分は ISM によるものだと考えられる。

構造上の特徴としては、光が中心に集中し、外側に向かうに従って指数関数的に光度が減少していく、といった三次元的な広がりを持つ天体であるという点にある。この特徴から点源のような天体とは解析手法が異なり、特に天体全体が有するフラックスを導出するには注意が必要である。図 2.4 は X 線天文衛星「すざく」の検出器 XIS の観測イメージであるが、活動銀河核 NGC6552 のイメージに比べ、楕円銀河 NGC4636 のイメージはかなり広範囲に広がっているのが見て取れる。

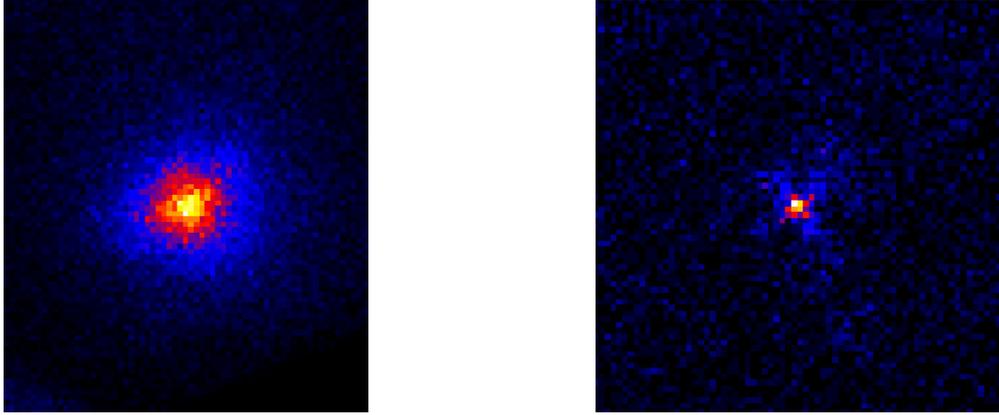


図 2.4: 「すざく」による楕円銀河 NGC4636 (左)、活動銀河核 NGC6552 (右) の撮像

## 2.2 楕円銀河の X 線放射

銀河が有する多様な成分は、各々が温度や状態に即した電磁波を放射している。銀河からの放射を波長ごとにわけた強度分布を SED(Spectral Energy Distribution) と呼び、この外観から銀河の構成要素を知ることになる。前セクションにも記載したとおり、楕円銀河の SED における X 線領域の放射は ISM からの放射に依るものが主である。

1978 年打ち上げの Einstein 衛星の観測から、X 線領域における楕円銀河からの放射は、ISM からのソフトな X 線放射と、銀河内 X 線点源である低質量 X 線連星 (LMXB) からのハードな X 線放射の重ね合わせであることが明らかになった (Forman et al. 1985; Canizares et al. 1987)。また、ISM からのソフトな X 線放射は、光学的に薄い高温プラズマから放射される熱制動放射 (Bremsstrahlung) の連続成分と、ISM 中の重元素からの輝線放射 (line emission) の重ね合わせである、と考えられる。

一般的な熱制動放射の放射率は次の式 (2.1) のように表される。

$$\epsilon_{\nu}^{ff} = 6.8 \times 10^{-48} \sum_i Z_i^2 n_e n_i T^{-1/2} e^{-h\nu/kT} g(T, \nu) [\text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-3} \text{Hz}^{-1}] \quad (2.1)$$

ここで  $Z_i$ 、 $n_i$  は原子番号  $i$  のイオンの電荷、数密度を表し、 $n_e$  は電子の数密度、 $g(T, \nu)$  はガウントファクターといい、熱制動放射における量子的補正を表す。また、輝線放射の放射率を  $\epsilon_{\nu}^{lines}$  とおくと、ISM からの全 X 線光度は以下の式 (2.2) のように表すことができる。

$$L_x = \int dV \int (\epsilon_{\nu}^{ff} + \epsilon_{\nu}^{lines}) d\nu [\text{ergs}^{-1}] \quad (2.2)$$

高温なプラズマガスからのスペクトルは、これまでに Raymond-smith モデル (Raymond & smith 1977) や MEKAL モデル (Liedahl, Osterheld & Goldstein 1995) 等いくつかのモデルが提唱されたが、これらの違いは主に各々の重元素ラインの強さの違いで分かれており、明確にどれかが正しいという線引きは無い。

楕円銀河の ISM には多種重元素が含まれており、温度は酸素、窒素、マグネシウムなどの K 殻のイオン化ポテンシャルとほぼ等しい。それ故これらの重元素は電子数が H, He と同じ状態のイオンか、あるいは完全に電離した状態にあり、衝突励起によって共鳴 X 線を放射する。また、鉄の L 殻のイオン化ポテンシヤ

ルとほぼ等しいので、鉄の L 輝線が強く出る。ISM の温度 ( $kT = 0.5 - 1\text{keV}$  近辺) で起こる重元素放射のリストを以下のようにまとめる。

イオン	E(keV)	$\lambda(\text{\AA})$	イオン	E(keV)	$\lambda(\text{\AA})$
$N^{5+}$	0.431	28.77	$Fe^{17+}$	0.704	17.61
$N^{6+}$	0.500	24.80		0.771,0.775	16.08,16.00
$O^{6+}$	0.561	22.10		0.793	15.64
	0.574	21.60		0.853	14.54
$O^{7+}$	0.654	18.96		0.863	14.37
$Fe^{16+}$	0.727	17.08		0.873	14.20
	0.739	16.78	$Fe^{18+}$	0.917	13.52
	0.812	15.27	$Ne^{8+}$	0.922	13.45
	0.826	15.01	$Ne^{9+}$	1.022	12.13

表 2.1: ISM 温度付近で優勢な輝線放射のリスト

ISM による熱制動放射と輝線放射の重ねあわせた X 線放射は地球に来るまでの過程で、銀河系や楕円銀河自身が周囲に持つ低温ガスによって光電吸収を受ける。この低温ガスの量が多いほど多くの光子が光電吸収され、観測できる X 線スペクトルの低エネルギー側が減少してしまう。光電吸収の基準は水素柱密度  $N_H$  (視線方向に水素がどれだけあるかを示す指標) と表現され、楕円銀河を観測する際の水素柱密度の一般的なオーダーは  $10^{20}\text{cm}^{-2}$  程度とされている。

一方、低質量 X 線連星 (LMXB) は典型的に光子のエネルギー  $k_B T < 10\text{keV}$  であり、比較的ソフトな連続成分ではあるものの、楕円銀河 ISM の温度帯においては、 $1.0\text{keV}$  以上の高エネルギー側で ISM 成分よりも卓越した連続成分を見せるようになる。

上記のように、実際に取得する X 線スペクトルはターゲットとなる ISM の重元素の放射に加え、高温プラズマからの連続成分、LMXB からの連続成分、光電吸収等、様々な要素を含んだモデルであると想定する必要があり、またこれらに加えて多種バックグラウンドも観測内容に含まれるため (4.2.3 節参照)、解析は複雑なものとなる。

## 2.3 共鳴散乱

### 2.3.1 共鳴散乱の概要

共鳴散乱とは前章にも記載の通り、イオンと光子が接触した際に光子の進行方向がランダムになってしまう現象である。まず、とある重元素イオンに対し、重元素イオンが有する電子の遷移エネルギーと同じエネルギーを持った光子が入射した場合を考える。この時イオン内の電子は励起されてエネルギー準位が上がり、電子等の素過程の中間状態にある、束縛状態ではないがそれによく似た、有限寿命で崩壊する状態のことを準束縛状態、または共鳴状態と呼ばれる状態になる。共鳴状態にある励起された電子はハイゼンベルグの不確定性原理より有限寿命であるので元の準位に戻ろうとする。この際に入射光子は再度放出されるが、入射してきた方向に関係なく等方的に放出されるため、見かけ上散乱されて見える。こうした影

響が特定の輝線に起こることで、その輝線のみ地球への到来数が減少する。ただの散乱と異なる点として、あくまで寿命の間は光子を抱え続けることにあり、一方ただの散乱の場合、光子が衝突すると同時にすぐに光子を出してしまう。

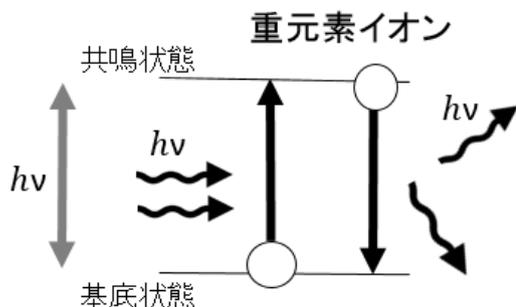


図 2.5: 共鳴散乱の簡単な描像。

共鳴散乱断面積（共鳴散乱の起こりやすさ）を  $\sigma_{RS}$  とおくと、以下の式 (2.3) で表すことができる。

$$\sigma_{RS} = \frac{\pi e^2}{m_e \nu_0} f_{12} \sqrt{\frac{m_i}{2\pi \Delta E}} \exp\left[-\frac{m_i c^2 (\nu - \nu_0)^2}{2\Delta E \nu_0^2}\right] [cm^2] \quad (2.3)$$

ここで  $m_i$  はイオン  $i$  の質量、 $\nu$  は入射光子の振動数、 $\nu_0$  は輝線固有の振動数、 $f_{12}$  は振動子強度である。 $\Delta E$  は乱流の速度  $v_{turb}$ 、マッハ数  $M (= v_{turb}/c_s, c_s = \text{音速})$  を用いて以下の式 (2.4) のように表すことが出来る。

$$\Delta E = E_0 \left( \frac{kT}{m_i c^2} + \frac{v_{turb}^2}{c^2} \right)^{1/2} = E_0 \left[ \frac{k_B T}{m_i c^2} \left( 1 + 1.4 \frac{m_i}{m_p} M^2 \right) \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

のように表すことが出来る。式 (2.3) は CGS 単位系を用いているため、電気素量  $e$  は esu を単位とし、 $e[\text{esu}] = e[\text{C}] \times c[\text{cm/s}] \times 10^{-1}$  のように表され、また他の単位も [cm,g,s] を単位にすることに注意が必要である。 $\sigma_{RS}$  は基本的に定数、及び輝線固有の振動数に左右される形に記述されているが、その中で振動子強度  $f_{12}$  と正比例の関係にあることが分かり、この値が大きい輝線に関して光子強度の減少数を測定することで共鳴散乱の度合いを知ることが出来る (2.3.2 節に記述)。また、(2.3) 式の exp 項はドップラーシフトにより変動する項であり、乱流速度が大きいほど exp 項が減少し、共鳴散乱が起こりづらくなることが言える。

### 2.3.2 楕円銀河中での共鳴散乱

楕円銀河 ISM 内の高温プラズマは大量の重元素イオンを有し、特に密度が高い中心付近で共鳴散乱が起きやすい。ISM の温度  $kT=0.5-1.0\text{keV}$  において、共鳴散乱の観測に適しているのは、 $Fe^{+16}$  が放射する  $0.826\text{keV}$  のラインと、 $0.727\text{keV}$  のラインである。この二本の輝線は ISM の温度帯で特に到来数が多い輝線であり、共に同イオンから放射されるため、その存在比は重元素比によって左右されない。しかし両輝線の振動子強度を比較すると、 $0.727\text{keV}$  の輝線においては  $f_{12}=0.12$  であるのに対し、 $0.826\text{keV}$  の輝線は  $f_{12}=2.45$  である (SPEX:ver(3.02.0),SRON 出典)。この二本の輝線の強度比  $X = I_{0.826\text{keV}}/I_{0.727\text{keV}}$  は共

鳴散乱の規模に比例して増減を起こすため、共鳴散乱の規模を定量的に見積もる際の指標にすることが出来る。

楕円銀河の中心から離れるほど重元素密度は小さくなり、同時に共鳴散乱の影響も銀河中心から離れるにつれ小さくなる。故に中心領域と、中心から離れた領域のスペクトルを比較した時、上記の  $Fe^{+16}$  のライン比の変化が定量的に現われる。こういったアプローチから共鳴散乱の存在の不定性を消すことが出来るため、「すざく」の XIS 検出器を用いた外部領域の解析も同時に行う。

### 2.3.3 銀河団における共鳴散乱

本研究では取り扱っていないが、銀河団において楕円銀河と同様、共鳴散乱の可能性が報告されている。銀河団は多数の銀河やダークマター等で構成される宇宙で最大の自己重力系であり、典型的な温度は楕円銀河と比較しても約 1 オーダー高い  $kT=2-10\text{keV}$  ほどの値をとるため、楕円銀河とは放射領域が異なる。銀河団の共鳴散乱に関する研究では、 $Fe^{24+}$  イオンが放射する  $6.701\text{keV}$  輝線の振動子強度が  $f=0.703$  であり比較的共鳴散乱を起こしやすいため、着目されやすい。

銀河団における共鳴散乱の影響の評価は銀河団内乱流の速度に制限をつけるために重要である。銀河団内乱流の速度等の不定性が大きいと銀河団質量や質量構成等にも不定性が現れ、なかなか正しい値の決定が出来ない。故にこれらの不定性を消すため共鳴散乱に関して考察がシミュレーションや観測結果等で行われる。

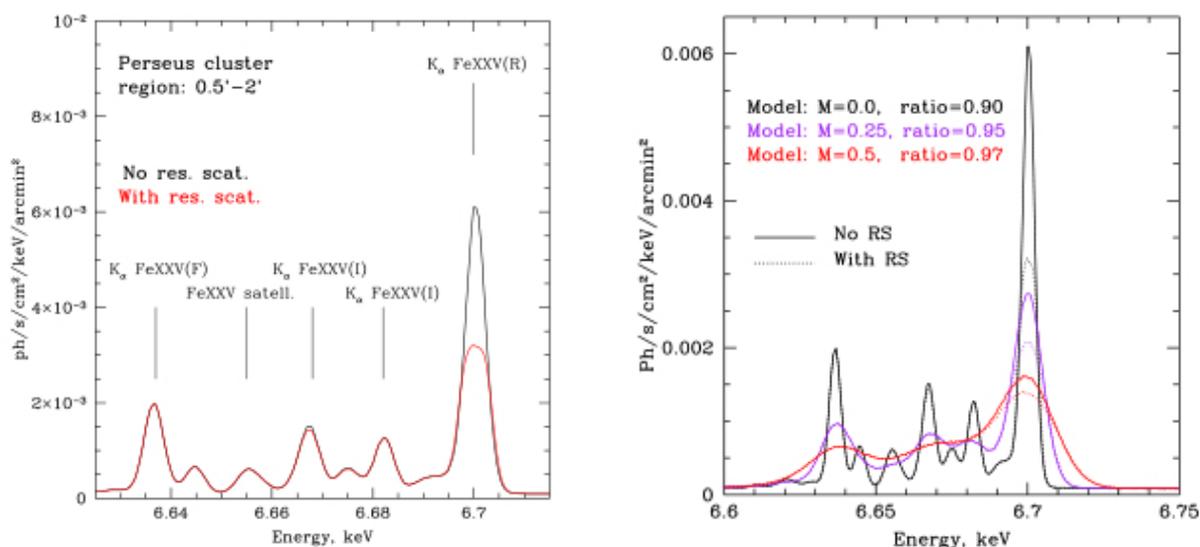


図 2.6: Zhuravleva et al.2013 におけるシミュレーション結果。左が乱流を考慮しない場合（黒：共鳴散乱を考慮しない場合、赤：共鳴散乱を考慮した場合）、右が乱流を考慮した場合（黒：M=0、紫：M=0.25、赤：M=0.5、実線：共鳴散乱無し、点線：共鳴共鳴あり）の共鳴散乱輝線付近のスペクトルである。

Zhuravleva et al.2013 にてペルセウス銀河団における共鳴散乱の ASTRO-H の性能を想定したシミュレーションが行われた。図 2.6 左のスペクトルから、他の輝線に比べて振動子強度が大きい  $6.7\text{keV}$  の鉄輝線は

大きく強度が減少しているのが判断できる。また、図 2.6 右のスペクトルから、 $M$ (マッハ数)の値が大きくなるほど共鳴散乱が有無による残差が大きくなり、また輝線の幅も大きくなっているのが見て取れる。この論文から、シミュレーションによってペルセウス銀河団から共鳴散乱は観測できると判断され、また過去行われたペルセウス銀河団に対する研究とも矛盾しないと述べた。

また、2016年に打ち上げられ、約二週間観測を行った日本のX線天文衛星「ひとみ」は、活動期間中にペルセウス銀河団の観測を行ったため、現在までで幾つかの中心における共鳴散乱の解析が行われた。図 2.7 右図のスペクトルにおいて、やや低エネルギー側にシフトしているが、6.6keV付近でフィットされている輝線が今回着目している6.701keVの輝線である。いずれも他の輝線と比べて6.6keV付近の輝線はモデルに比べて強度が低くなっている。また、輝線の幅から乱流は180km/s程度と非常に低い値( $M \sim 0.15$ )が報告された。このことから研究チームは、ペルセウス銀河団内に低乱流下で一定量の共鳴散乱があると結論づけた。

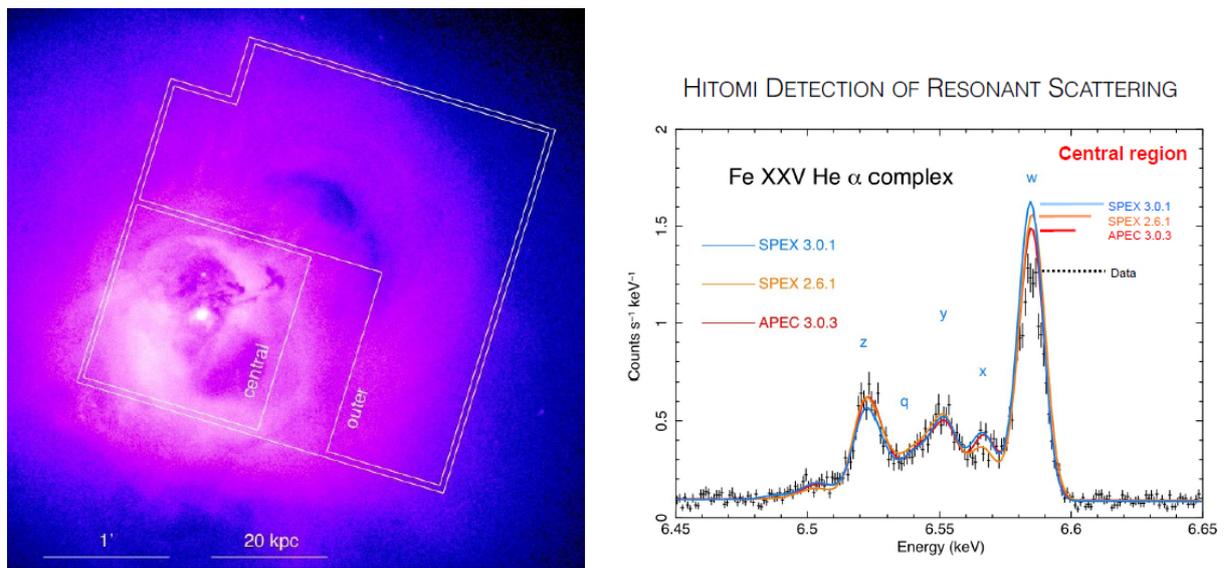


図 2.7: ペルセウス銀河団の観測領域のイメージ(左)と観測されたスペクトル(右)。

### 2.3.4 共鳴散乱を観測する意義

(2.3.1) 節に記載の通り、共鳴散乱断面積  $\sigma_{RS}$  は乱流速度と負の相関を持つと言えるため、共鳴散乱の度合いの定量的な見積りから乱流速度に制限をつけることが可能であると考えられる。故に本研究においては「楕円銀河 ISM 内の乱流速度に制限をかけること」が共鳴散乱の解析を行う意義となる。そしてこうした乱流の作用は、楕円銀河が有する巨大ブラックホール等の中心核から放たれるジェットの楕円銀河中心への衝突に依るものが理由として考えられ、乱流のエネルギーを見積もることによって外的要因であるジェットの情報を得られることが期待される。

また、本研究では乱流の効果の見積りは Geant4 によるシミュレーションでも行う。将来 X 線分光検出器 SXS によって乱流速度を定量的に見積もることが可能であると考えられ、そうした将来研究につながると考えられる。

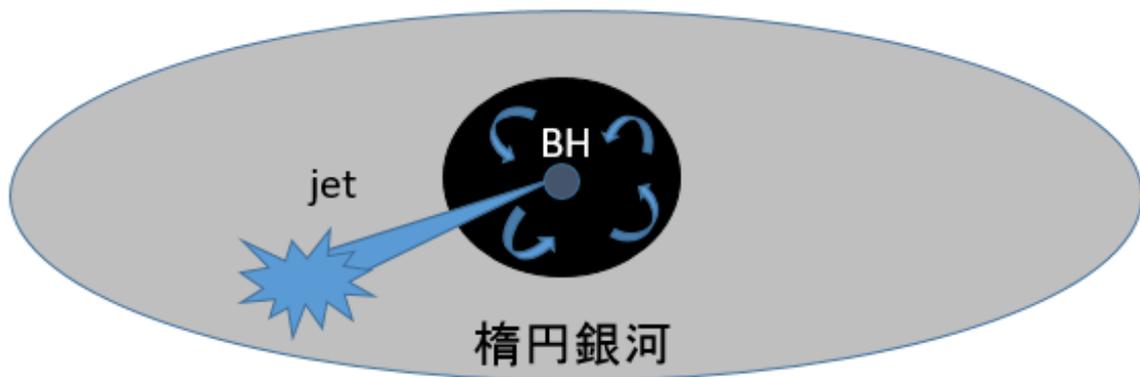


図 2.8: 楕円銀河内ジェットの簡単な描像。

## 第3章 本研究で用いた解析ツール

本研究では解析に際して、X線天文衛星「すざく」、「XMM-Newton」の観測データを用いた。本章ではこれらの衛星に対する解説を行う。

### 3.1 X線天文衛星「すざく」

X線天文衛星「すざく」(ASTRO-E2)は、2005年に日本が打ち上げたX線天文衛星である。国内で打ち上げられたX線天文衛星としては、過去日本が打ち上げた「はくちょう(1979年)」、「てんま(1983年)」、「ぎんが(1987年)」、「あすか(1993年)」に続く5台目のX線天文衛星であり、この衛星の登場から多くのX線天文衛星に対して、広いエネルギー帯域(0.3~600keV)でのより高エネルギー分解能且つ高感度な観測が行えるようになった。「すざく」の打ち上げ時の目標寿命は2年間と設定されていたが、2015年にバッテリー等のトラブルから運用を終了するまでの約10年間、多くのX線による観測結果を残すことに成功している。

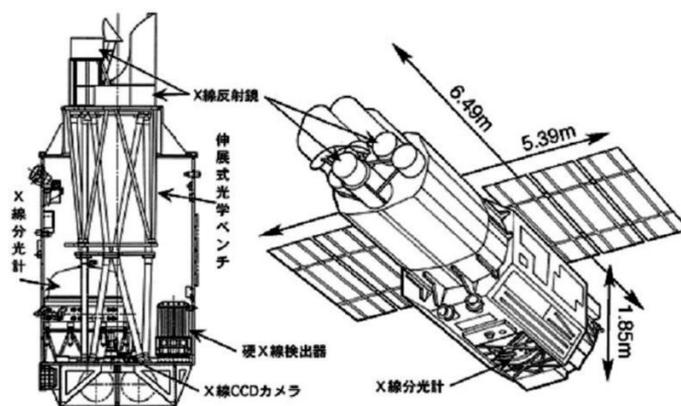


図 3.1: 「すざく」の構造

外形としては全長6.5m(鏡筒伸展後)、半径2.1mの八角柱をベースとした形状をしており、太陽パネルを展開した時の横幅は5.4m、質量は1680kgである。基本的に動作させるための電力は太陽電池パネルから補っているため、衛星の姿勢は太陽電池パネルが常に太陽から30度以内を向くように制限され、検出器は太陽電池パネルと垂直方向に配置されているため、観測できる範囲は太陽方向から60-120度の範囲に限定される。衛星軌道としては、初期は近地点高度250km、遠地点高度550km、軌道傾斜角31度の楕円軌

道に投入され、その軌道から搭載二次推進系を用いて最終的に、高度 570km の円形軌道におさまった。軌道周期は 96 分（一日に地球を 15 周）であり、そのうち鹿児島県内之浦の地上局から衛星と通信できるのは 5 回であるので、追跡オペレーションは 1 日 5 回、10 分ずつ行われる。

「すざく」は軟 X 線-硬 X 線領域を観測することができ、その各々の領域をカバーすることができる 3 種類の検出器を搭載している。軟 X 線領域の観測には「XIS(X-ray Imaging Spectrometer)」「XRS(X-Ray Spectrometer)」が用いられ (0.4-10keV)、一方、硬 X 線領域の観測には「HXD(Hard X-ray Detector)」が用いられる (10-600keV)。XIS は X 線 CCD カメラであり、典型的なエネルギー分解能は 6keV 領域において 130eV、観測可能なエネルギー帯域は 0.2~12keV である。XRS は X 線マイクロカロリメータであり、エネルギー帯域は XIS と同程度、典型的なエネルギー分解能は 6eV である。しかし XRS が用いている液体ヘリウムが打ち上げ後に消失し、XRS による観測は不可能になったため、本研究では考慮しない。また、更に高いエネルギー帯域を観測するために HXD が開発されたので、衛星全体として広範囲のエネルギーの観測に適している。また、この 3 種類の検出器に対して、各々に対応した X 線反射望遠鏡 XRT(X-Ray Telescope) が搭載されている。本研究においては 0.5-1.0keV 領域の解析を主とするため、そのエネルギー帯に関連する XIS、及び X 線望遠鏡である XRT を次節から紹介する。

### 3.1.1 X 線望遠鏡 XRT(X-Ray Telescope)

XRT は「すざく」に計 5 台 (XRT-I × 4, XRT-S × 1) 搭載された X 線望遠鏡である。XIS 用に用いられた XRT-I の外観、ステータスを以下に載せる。

台数	4 台
焦点面距離	4.75m
直径	399mm
重量	19.5kg
鏡面	Au(金)
一台あたりの鏡面数	1400
入射角	0.24° - 0.60°
角分解能 (HPD)	2.0'
視野 (FWHM)	17'@1.5keV, 13'@8keV
有効面積	440cm <sup>2</sup> @1.5keV, 250cm <sup>2</sup> @8keV



表 3.1: XRT-I のステータス

図 3.2: XRT の外観

X 線観測用の望遠鏡は、X 線の特性から可視光と同様の形状に作ることは出来ない。X 線は物質中で吸収されやすく、屈折率は 1 よりわずかに小さい程度であるため、X 線の光学系に屈折レンズを用いることは適しておらず、反射鏡には全反射のみ利用することが出来る。また、屈折率は 1 に非常に近い値であるため、全反射は鏡面に対し入射角が殆ど 90 度の X 線に対してのみ起こりうる。この角度は X 線のエネルギー

ギーが大きくなるにつれてより 90 度に近くなる。以上の性質から、X 線観測用の望遠鏡には全反射鏡と呼ばれる特殊な反射鏡を用いる必要がある。

「すざく」もこの全反射鏡を用いた望遠鏡を使用しており、形状としては「Chandra」にて使用された Wolter-I 型の望遠鏡によく似た「多重薄板型 X 線望遠鏡」を用いている。Wolter-I 型望遠鏡とは図 3.3 に示したような構造の望遠鏡を指し、望遠鏡に入射した X 線を二枚の反射鏡で中央に集め、検出するという仕組みを採用している。「すざく」XRT の異なる点としては、「Chandra」では直接研磨法と呼ばれる分厚いガラスを直接研磨して反射鏡を作っている一方で、「すざく」XRT ではレプリカ法と呼ばれる手法を用いており、厚さ  $150 \mu\text{m}$  程度のアルミに金を蒸着させて鏡面を製作し、その極薄の鏡面 175 枚を望遠鏡内に投入して曲面を作っている（但し、鏡面の膨大さから Wolter-I 型の双曲線の厳密な再現は行っておらず、二つの円錐で近似している）。この望遠鏡により、以前日本が打ち上げた「あすか」と比べて二倍ほど良い角分解能を得ることに成功し、また焦点距離の伸長による高エネルギー側での二倍ほど向上した反射率も同時に実現した。また「すざく」XRT では、反射鏡の上にプリコーリメータを追加しており、これにより迷光を「あすか」から一桁も減少させている。「Chandra」と比較すると、薄い鏡面を使ったために「Chandra」の約  $1/100$  の重量、 $1/3$  の口径で同等の有効面積を実現することができ、一方でその枚数故全ての鏡面を正確な位置に固定できないので、高角度分解能が実現できなかったという欠点も存在する。

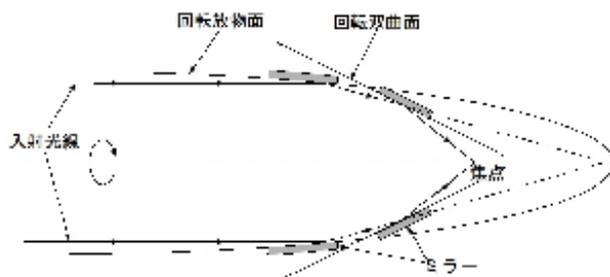


図 3.3: Wolter-I 型望遠鏡の構造

### 3.1.2 X線検出器 CCD カメラ XIS(X-ray Imaging Spectrometer)

XISは「すざく」に4台搭載された軟X線 CCD (Charge-Coupled Device) 検出器である。以下にステータスと外観を載せる

エネルギー帯域	0.2-12.0keV
有効画素数	1024×1024
1画素のサイズ	24μm×24μm
エネルギー分解能	~130eV@6keV
有効面積 (XRT 込み)	340cm <sup>2</sup> (FI), 390cm <sup>2</sup> (BI) @1.5keV
	350cm <sup>2</sup> (FI), 100cm <sup>2</sup> (BI) @8keV
時間分解能	8s (Normal model) 7.8ms (P-sum mode)



表 3.2: XIS のステータス

図 3.4: XIS の外観

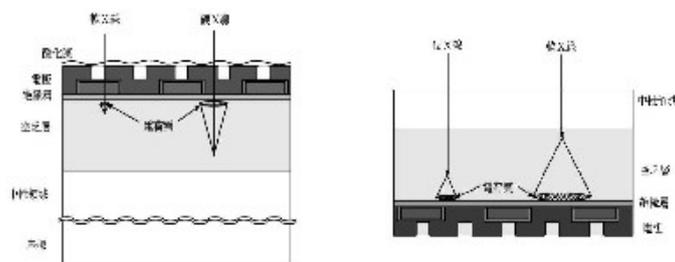


図 3.5: FI 型検出器 (左)、BI 型検出器 (右) の外観

CCD 検出器とは、小さな Si 半導体検出器の電極を網目状に分割した検出器であり、通常の半導体検出器に比べて位置分解能が大幅に向上している。しかし一方で、各ピクセルに入射した電荷を一つ一つ読み出すため、時間分解能は悪くなる。

Si 半導体検出器は図 3.5 のような構造をしており、電圧をかけると電極下に空乏層ができ、またかけられた電圧により電場が同時に発生する。Si のギャップエネルギーよりエネルギーが大きい電磁波が Si 検出器のあるピクセルに入射した時、その電磁波は空乏層で光電吸収を起こす可能性がある。この時生まれた光電子は、自らのエネルギーを失うまで周囲の Si 原子と衝突を繰り返し、電子および正孔対を作る。正孔対の数は  $\sim E/W_{Si}$  ( $W_{Si}$ =Si の平均電離エネルギー  $\sim 3.65\text{eV}$ ) で表現され、入射 X 線のエネルギーが大きいほど多くの対ができることになる。X 線の入射にて発生した電子は、発生している電場によって電極下に集められ、電子雲を生成する。この電子雲の検出から入射 X 線のエネルギーを知ることができる。

XIS は X 線検出器として、以前日本で打ち上げた「あすか」に搭載された検出器 SIS と比べて多箇所にグレードアップがなされており、

- 空乏層を 30μm→70μm に拡大したことに依り 7keV 付近での検出効率を向上

- 動作温度を-60度 → -90度ほどまで下げることで熱によるノイズを軽減した
- 各検出器に軌道上校正線源を設置し、放射線損傷のエネルギースケールへの影響を確認できるようにした。
- SIS では一台の検出器に対し4台の CCD を用いていたのに対し、XIS では一枚の CCD で全範囲をカバーしているので、CCD 間の隙間のデータ漏れを無くした。

などの変化がなされた。

「すざく」に搭載された4台のXISはそれぞれXIS0,XIS1,XIS2,XIS3とナンバリングされており、内XIS2は2006年12月の故障によりそれ以降の観測においてデータが使用できないため、主にデータ解析に用いたのはXIS0,1,3である。この3台の内、XIS0,3は表面照射型FI(Frontside Illuminated)、XIS1は裏面照射型BI(Backside Illuminated)とそれぞれ呼ばれる。FI型の検出器は空乏層がX線の入射方向から遠い位置に設置されており、到達までに電極や絶縁層によってX線が吸収されてしまうことも多く、低エネルギー側のX線に対する有効面積が減少する。一方、BI型の検出器は電極と逆側からX線が入射するように設置されているため、電極等で止められることなく空乏層に突入でき、ゆえに低エネルギー側の有効面積がFI型の検出器より大きくなりやすい。欠点としてBI型の検出器は加工が難しく、またX線の吸収される位置が性質上電極から遠い場所になりやすいため、7keV付近の高エネルギー側のデータはFI型の方が信憑性が高いと判断でき、こういった点から「すざく」に搭載する検出器が上記のように割り振られた。

### 3.2 X線天文衛星「XMM-Newton」

「XMM(X-ray Multi-Mirror Mission)-Newton」は1999年、ESA(European Space Agency's)によって打ち上げられたX線天文衛星である。この衛星は「すざく」打ち上げより6年も前に稼働し始めたにも関わらず現在も運用が続いており、多くの成果を残してきた。

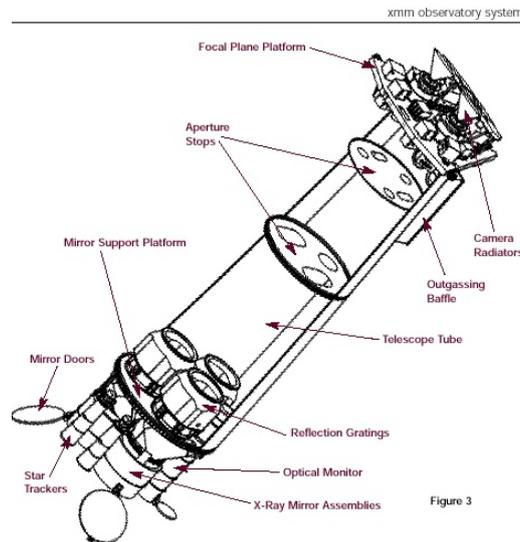


図 3.6: XMM-Newton の外観

全長 10m、総重量 4000kg とかなり大型の人工衛星であり、ESA がそれまでに打ち上げた衛星の中では最大の衛星である。近地点 6000km、遠地点 115000 km の極端な楕円軌道に打ち上げられ、地球を約 48 時間で周回する。3 つの高スループット且つ有効面積の大きい X 線望遠鏡、及び可視、紫外線用の Optical Monitor(OM) を搭載している。3 つの X 線望遠鏡の焦点面には各々に EPIC(European Photon Imaging Camera) と呼ばれる X 線 CCD カメラが設置されており、また同時に RGS(Reflection Grating Camera) と呼ばれる回折格子の原理を用いた分光システムも搭載されている。これらの検出器から、0.4-12.0keV までの範囲の解析が行うことが出来ると同時に、RGS を用いた 0.4-2.0keV 間の非常に良いエネルギー分解能の観測結果を用いた解析を行うことが出来る。本論文では主に研究と関連する X 線望遠鏡、及び EPIC(PN,MOS の 2 種類が存在する)、RGS について紹介する。

### 3.2.1 X 線反射望遠鏡

XMM-Newton は X-ray-Multi-Mirror Mission の名の通り望遠鏡が最大の特徴であり、三台の X 線望遠鏡を用いた有効面積は既存の衛星の中で最大であるため、暗い天体の観測に適している。以下に外観とステータスを記載する。

台数	3 台
焦点面距離	7.5m
直径	700mm
重量	425kg
鏡面	Au(金)
一台あたりの鏡面数	58
角分解能 (HPD)	0.25'
視野 (FWHM,pn)	6.6" @1.5keV, 6.6" @8keV
有効面積	1500cm <sup>2</sup> @2.0keV, 900cm <sup>2</sup> @7.0keV

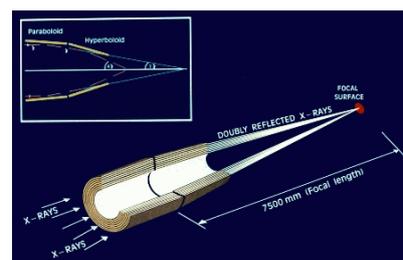


図 3.7: X 線反射望遠鏡の外観

表 3.3: XMM-Newton の X 線反射望遠鏡のステータス

XMM-Newton は 3.1.1 節で述べた通り、Wolter-I 型と呼ばれる望遠鏡を使用しており、また製作法は「すざく」XRT と同じくレプリカ法を採用している。衛星には 3 台の望遠鏡が搭載されており、全長 7.5m、反射鏡の直径は 70cm にも及び、その各々に 58 枚の Wolter-I 型の Mirror が組み込まれている。これらの望遠鏡は、なるべく広い範囲で最大限の有効面積を得るというモチベーションから、Mirror 系の回折角を 30 度程度まで絞ることで高エネルギー側での十分な反射率を確保している。3 台の望遠鏡の焦点面には EPIC と呼ばれる CCD カメラが設置されており、その各々でデータを抽出する。内 2 台は MOS という FI 型の検出器、1 台は PN という BI 型の検出器である (3.2.2 節で記述)。また、望遠鏡と検出器の間に回折格子を模した分散機が設置されており、これにより入射光子の一部の分散角を測定、エネルギーを検出する仕組みを搭載している (RGS)。この仕組みの搭載から、視野中心に対して非常に高い波長分解能を獲得した。

### 3.2.2 X線 CCD カメラ EPIC(European Photon Imaging Camera)

前節に記載の通り、XMM-Newton には EPIC と呼ばれる CCD カメラを 3 台搭載している。内 2 台が MOS と呼ばれる前面照射型の検出器、一台が pn と呼ばれる裏面照射型の検出器であり、その性能差は「XIS」の節にて記載した内容と一致する。また、それ以外にも二種の CCD カメラの性能には違いがあるため、以下で各々の性能を記述する。

#### MOS(Metal Oxide Semi-conductor)

MOS は一枚の CCD で構築されていた「すざく」XIS とは異なり、7 枚の表面照射型 CCD で構築されている。MOS と望遠鏡の間には RGS を機能させるための分散機が設置されており、これにより入射光子の半分程度は分散され、全光子の 44% を検出することになる。故に pn と比較すると、単純に一台当たりの光子の取得数は減少する。MOS の各 CCD は  $600 \times 600$  pixel で構築されており、一つの pixel の大きさは  $40 \mu\text{m}$  である。エネルギー帯域は 0.15-12keV である。

#### Pn

Pn は 12 枚の裏面照射型 CCD で構築されている。

Pn 型は裏面照射型であるため低エネルギー（ $\sim 1\text{keV}$ ）付近の検出効率は良いが、引き換えに MOS に比べてエネルギー分解能は劣る。各 CCD は  $200 \times 64$  pixel であり、pixel の大きさは  $150 \mu\text{m}$  である。エネルギー帯域は 0.15-15keV である。

本研究において、天体のガス密度を計算する際にこれら EPIC のデータを用いて解析を行った。

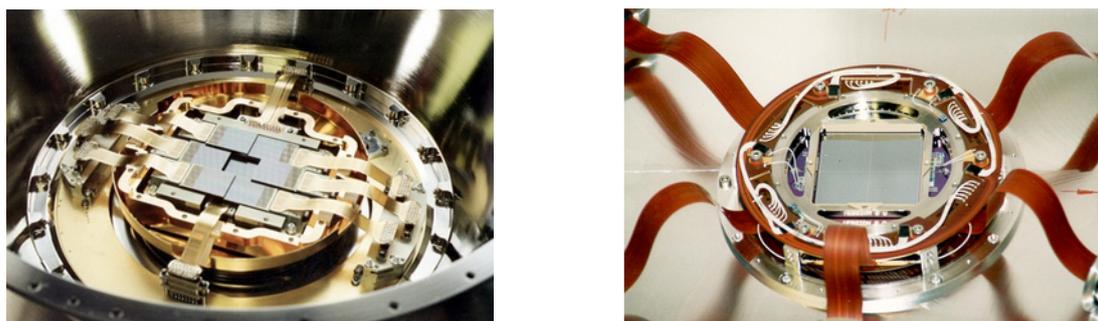


図 3.8: mos (左) 及び pn (右) 検出器の外観。

検出器	mos	pn	RGS
台数	2 台	1 台	2 台
視野	30'	30'	$\sim 5'$
PSF(FWHM/HEW)	5"/14"	6"/15"	N/A
ピクセルサイズ	$40\mu\text{m}$	$150\mu\text{m}$	$81\mu\text{m}$
時間分解能	1.75ms	0.03ms	0.6s
エネルギー帯域@1keV	$\sim 70\text{eV}$	$\sim 80\text{eV}$	$0.04/0.25\text{\AA}$

表 3.4: XMM-Newton 搭載の各検出器の性能。

### 3.2.3 RGS(Reflection Grating Spectrometer)

RGS は望遠鏡に入射した X 線光子を一部回折させ、回折角による位置決定から分光を行うことで低エネルギー帯において非常に高い分解能を得たシステムのことを指す。以下に概略図を示す。

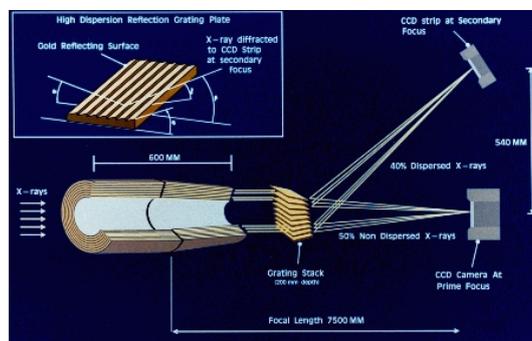


図 3.9: X 線反射望遠鏡内の RGS の構造。

RGS は基本的に回折するための RGA(Reflection Grating Array) と回折した光子を検出する CCD 検出器 RFC(Focal plane Camera) の二箇所に分かれる (正確には CCD に RAE,RDE と呼ばれるアナログ、デジタルの読み出し機器が装着されている)。回折格子は 182 枚の格子から成り、MOS 用の望遠鏡から入射してきた光子の約 40%を RFC に向けて回折させる。分散の式は以下のように表すことができる。

$$m \lambda = d(\cos \theta_i - \cos \theta_r) \quad (m \text{ はスペクトル次数}) \quad (3.1)$$

標準的には  $\sin \theta_i / \sin \theta_r = 0.53$  程度になる

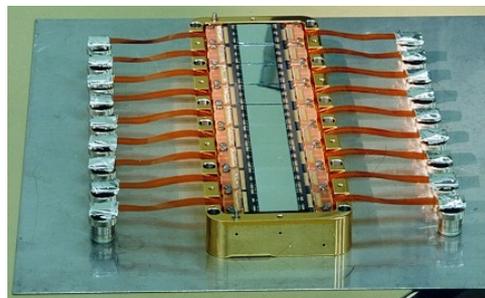


図 3.10: RGA (左) 及び RFC (右) の外観。

各 RGA は 182 枚の格子で構築されている。各測定機器の幅は 10 × 20cm。RFC は 9 枚の CCD で構成されている。

バックグラウンドが大きく CCD の損傷からデータ抜けも多い (RGS1 は 1keV 付近、RGS2 は 0.55keV 付近のデータが欠けている。)ものの、エネルギー分解能は 0.2-2.0keV にて現在打ち上げられた衛星の中でも無類の良さを誇り、特に共鳴散乱の解析を行わんとしているエネルギー帯域において性能の良さを発揮するため、すざく「XIS」の結果と比較しながらより正確な影響を評価するために用いる。

### 3.3 各衛星を用いる意義

本研究では共鳴散乱の解析において「すざく」XIS, 「XMM-Newton」RGS を用いることとしたが、似た性能の「XMM-Newton」EPIC, 「Chandra」の性能を比較したものが以下の表である。

	<b>Newton</b> (ヨーロッパ)	<b>Chandra</b> (アメリカ)	<b>Astro-E2</b> (日本-アメリカ)
打ち上げ (年)	1999	1999	2005
衛星の重量 (t)	4	4.8	1.7
全長 (m)	10	14	6
軌道 近地点 (km)	7,000	16,000	約 7,000
遠地点 (km)	114,000	133,000	(円軌道)
軌道周期	48時間	64時間	約100分
望遠鏡の有効面積 *1	1500×3台	800×1台	450×5台
空間分解能	6"	0".5	<90"
エネルギー分解能 *2	3 (RGS)	60 (ACIS)	6 (XRS)
エネルギー分解能 *3	150 (EPIC)	150 (ACIS)	6 (XRS)
エネルギー帯域 (keV)	RGS 0.05-2.5 EPIC 0.2-12	ACIS 0.4-10 LETG 0.1-6 HETG 0.6-10	XRS 0.4-10 XIS 0.4-10 HXD 10-600

図 3.11: X 線反射望遠鏡内の RGS の構造。

「すざく」自身は他二つの衛星と比較して「HXD」による硬 X 線領域の観測もメリットの一つとして挙げることができるが、本研究ではそれらのエネルギー帯域は加味しないため優位な点とはしない。まず「すざく」XIS のメリットとして、周回軌道の違いによるバックグラウンドの小ささが挙げられる。「すざく」は常に地上から 570km の円形の低周回軌道をとるが、「Chandra」「XMM-Newton」は近地点高度も 6,000km と「すざく」よりも一桁大きい軌道を通り、遠地点高度に至っては 115,000km という非常に遠距離を通る楕円周回軌道をとっている。本研究で考慮しない「Chandra」も、近地点高度 16,000km、遠地点高度 133,000km という極端な楕円周回軌道を取り、これらの楕円周回軌道は宇宙線由来のバックグラウンドや非 X 線のバックグラウンドの時間変動が激しく推定が難しいとされたが、一定の周回軌道をとる「すざく」においてはバックグラウンドの推定が容易であることが利点の一つとして挙げられる。また、これら 3 つの衛星が有する検出器の中で、XIS は 1keV 付近でのエネルギー分解能が 2 番目に良く、1keV 付近での分解能が最も良い RGS はバックグラウンドも大きく特性上広い視野の測定もできないので、広がった天体である楕円銀河の観測において XIS が最も適していると考えられる。これに比べ「XMM-Newton」RGS は、前述のとおり広がった天体の観測自体には本来適していないものの、1keV 前後の X 線観測において歴代でもずば抜けた分解能の良さを誇り、また空間分解能の良さから特に中心のみに焦点を絞った観測が行えることから共鳴散乱の影響を最もよく見ることができるといえる。しかし、前述のとおりバックグラウンドやデータ漏れの観点から不定性は高く、XIS の結果と比較してようやく結果の正当性を主張できるとしてよいから、これら二つの結果を用いた共鳴散乱の解析を行う。一方、ガス密度解析に用いた「XMM-Newton」EPIC は、望遠鏡の有効面積の広さからより広い半径での質量観測ができ、またこうした広がった天体用の解析のために ESAS ( Extended source analyze ) が用意されていることもあり、楕円銀河の半径 密度分布を求めるにあたって最も適していると判断したため用いた。

## 第4章 解析手法

### 4.1 解析用天体

本研究において、解析には以下の表の天体を用いた。

天体	z	方向 (ra,dec)	観測日付 (XIS)	観測日付 (RGS)	$L_{x_{soft}}$ (ergss <sup>-1</sup> )	D(Mpc)
NGC4636	0.003129	190.7243,2.7556	05-12-06 06:38	01-01-05 10:44	$2.3 \times 10^{41}$	15.9
NGC4649	0.003703	190.9148,11.5570	06-12-29 10:05	01-01-02 16:14	$1.1 \times 10^{41}$	15.9
NGC4472	0.003272	187.4441,8.0050	06-12-03 20:13	04-01-01 03:07	$1.8 \times 10^{41}$	15.9
NGC1404	0.0065	54.7163,-35.5944	06-12-03 20:13	05-07-30 07:26	$1.2 \times 10^{41}$	18.1
NGC1399	0.004753	54.6442,-35.4855	05-09-13 01:30	06-08-23 02:57	$2.7 \times 10^{41}$	18.1
NGC5044	0.0092	198.8504,-16.3899	06-07-02 18:18	01-01-12 20:58	$1.9 \times 10^{42}$	30.2
NGC5846	0.0057	226.6234,1.6025	08-07-28 14:51	14-01-22 09:31	$2.6 \times 10^{41}$	22.9
NGC4406	-0.000747	186.5483,12.9401	09-06-19 18:14	02-07-01 17:51	$2.0 \times 10^{40}$	16.0
NGC720	0.005821	28.2521,-13.7386	05-12-30 08:49	02-07-13 07:43	$3.7 \times 10^{40}$	20.8
NGC1316	0.005871	50.6738,-37.2082	06-12-22 14:49	05-08-11 06:55	$3.9 \times 10^{40}$	18.1
NGC4374	0.003392	186.2656,12.8870	×	11-06-01 05:22	$4.5 \times 10^{40}$	15.9
NGC4382	0.002432	186.3504,18.1915	×	10-12-18 18:11	$1.2 \times 10^{40}$	15.9

表 4.1: 各楕円銀河のパラメータ。D は天体までの距離。  $L_{x_{soft}}$ , D: Fukazawa et al.2006、NED から引用

NGC(New General Catalogue) とは 1888 年に出版された、7840 個の天体名が記載されたカタログである (ナンバリングはカタログへの登録順である)。

- NGC4636

楕円銀河内で初めて共鳴散乱の存在が確認された天体 (Xu et al.2002)。現在では「XMM-Newton」RGS、「すざく」XIS による解析結果 (Hayashi et al.2006) が論文化されており、この天体をベースとして複数天体に対して共鳴散乱に関する解析を行った論文も存在する (Werner et al.2009)。共鳴散乱が特によく見える理由として、温度 kT 及び軟 X 線光度  $L_x$  が適切な値であることが理由と考えられ、単純にガス密度や  $L_x$  が小さい天体では光子とイオンの衝突が起きづらく、逆に NGC4636 よりも 1 オーダー光度が高い天体からは、共鳴散乱輝線がより温度の高い放射に埋もれて影響が観測できないといった結論も先の Werner et al.2009 にて述べられている。地球近傍の Virgo 銀河団内に存在し、比較的大きな X 線光度を誇る。

- NGC4649,4472,NGC1404,NGC5846,NGC1399

これらの天体は地球からの距離、軟 X 線光度が NGC4636 に比較的近い天体である。Werner et al.2009 において、NGC4636 に軟 X 線光度が近い天体において共鳴散乱がよく観測できるのではないかという考察が行われており、その論文の中では NGC4649,NGC4472,NGC1404 に対し共鳴散乱に関する考察が行われた。内 NGC4472,NGC1404 において共鳴散乱の存在が優位であるという結論を残している。

例外的に、NGC1399 は NGC4636 と比較しても軟 X 線光度自体は近いが、中心の推定温度が NGC4636 のほぼ倍であり ( $kT \sim 1.1\text{keV}$ )、共鳴散乱輝線自体がその温度帯で弱くて、ほかの天体とは異なる結果が得られると予想される。NGC4649、NGC4472 は NGC4636 と同様 Virgo 銀河団内に存在する楕円銀河であり、NGC1399、NGC1404 は炉座銀河団内、NGC5846 は LGC393 銀河群に各々属する。

- NGC5044

この天体に限り、NGC4636 と比較して軟 X 線光度が 1 桁ほど高く、 $L_{x,soft} \approx 10^{42}\text{ergs}^{-1}$  程度の値をとり、一方地球からの距離  $D$  は  $\approx 30\text{Mpc}$  程度あり、NGC4636 と比較すると地球から倍の距離がある。より熱く巨大な系では、そもそも  $Fe^{17+}$  の輝線が弱くなるため、共鳴散乱の影響が確認できないという報告がされていた (Werner et al.2009)。しかし今回 RGS の解析から、わずかに共鳴散乱らしき影響を確認することが出来たため、比較対象として本研究で用いる。乙女座の系外に属する楕円銀河。

- NGC4406,NGC720,NGC1316,NGC4374,NGC4382

これらの天体は軟 X 線光度  $L_{x,soft} \approx 10^{40}\text{ergs}^{-1}$  ほどの値をとり、NGC4636 と比較すると軟 X 線光度のオーダーが 1 桁低い。故に光子の取得数が少なくなり、観測データそのものに不定性が多い。NGC4406、NGC4374、NGC4382 は Virgo 銀河団内に存在する銀河であり、NGC1316 は炉座銀河団内、また NGC720 は孤立した楕円銀河であり、銀河団等の影響を受けていない。

これらの天体の内、NGC4374、NGC4382 は「すざく」による観測結果は存在しなかったため、「XMM-Newton」のみの観測結果を用いる。

## 4.2 「すざく」、「XMM-Newton」における解析条件

「すざく」「XMM-Newton」の性能の違いを前章で述べたが、故に解析における設定や条件等異なっている部分が多いため、各衛星における解析条件を記述する。

### 4.2.1 解析領域

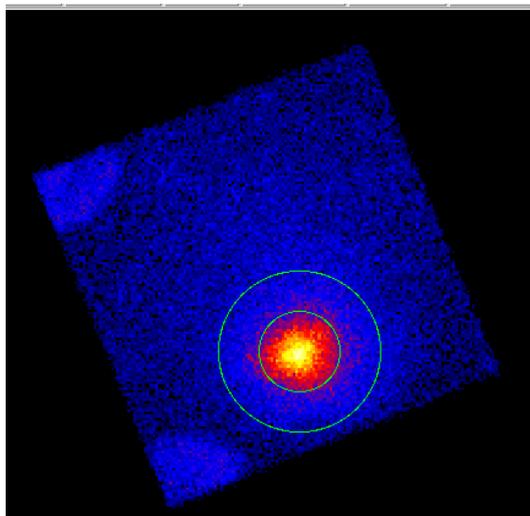


図 4.1: XIS による NGC4636 のイメージ。中心の緑の円が各々0.2 分角、2.4 分角の解析領域を表す。

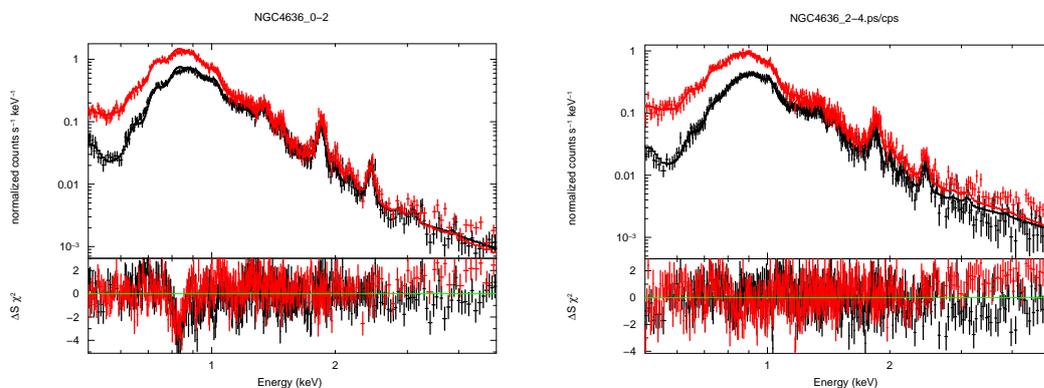


図 4.2: NGC4636 の 0.2 分角でのスペクトル (左)、2.4 分角でのスペクトル (右)。スペクトルに関しては黒 : FI 型、赤 : BI 型である。0.2 分角のスペクトルでは 0.82keV 付近に負の残差が見える一方、2.4 分角では残差が無くなっており、共鳴散乱の影響が確認できない。

RGS は性質上、中心の観測結果のみを用いることとなるが、XIS における観測結果は、本研究では図 4.1 に表した 0'-2' の円形領域、及び 2'-4' のドーナツ型の領域を用いて解析を行う。一般的に楕円銀河は中心に密度が集中しているため共鳴散乱が起こりやすく、外側に向かうほど密度が下がっていき共鳴散乱が起こりづらくなる。実際に NGC4636 において図 4.2 のようにスペクトルを作成すると、0'-2' のスペクトルに

において共鳴散乱輝線 (0.826keV) 付近に負の残差が生まれている一方で、 $2'-4'$  ではその残差が生じていない。もし  $0'-2'$  における負の残差が共鳴散乱によるものならスペクトルにこのような違いが生まれるはずであり、XIS の観測においては共鳴散乱の不定性を下げるためこの二領域において解析を行う。

#### 4.2.2 各種解析用ファイル

- データ取得過程

まず、すざくの解析データに関しては、ISAS/JAXA の DARTS が一般公開しているデータを用いる。観測された生のデータは衛星の姿勢や軌道等を考慮した構成情報が付加され、それに加え Bad event を除去した「cleaned event」に変換されるため、XIS に関してはこれらのデータを用いて解析を行う。

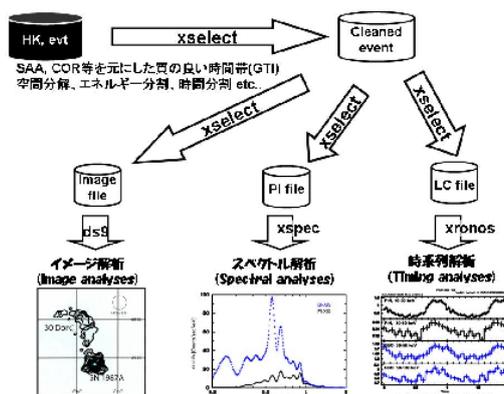


図 4.3: ftool を用いた衛星データ解析の概要

RGS の解析データも XIS と同様、ESA が一般公開している「XMM-Newton science archive」からデータをダウンロードし、使用することとする。一般的に XMM-Newton の解析には SAS(Source Analysis Software) を用いる必要があるため、RGS の解析には SAS を用いて解析を行う (後のガス密度導出の際には ESAS:Extended Source Analysis Software と呼ばれるソフトウェアを用いる)。XMM-Newton ではデータをダウンロードした際に「ODF(Observation Data File)」及び「PPS(Pipeline Process)」の二つがダウンロードされ、これらをコマンドで加工することで解析用のイベントファイルを取得する。但し、XMM-Newton による観測は前章に記述の通り、地球から遠く離れる楕円周回軌道をとっているため、宇宙線や陽子フレア等によるバックグラウンドが激しいので、これらのバックグラウンドも較正を行う必要がある。イベントファイルは XIS と同様 ftool を用いて解析した。

- FITS(Flexible Image Transport System) ファイル,PI(Pulseheight Invariant) ファイル

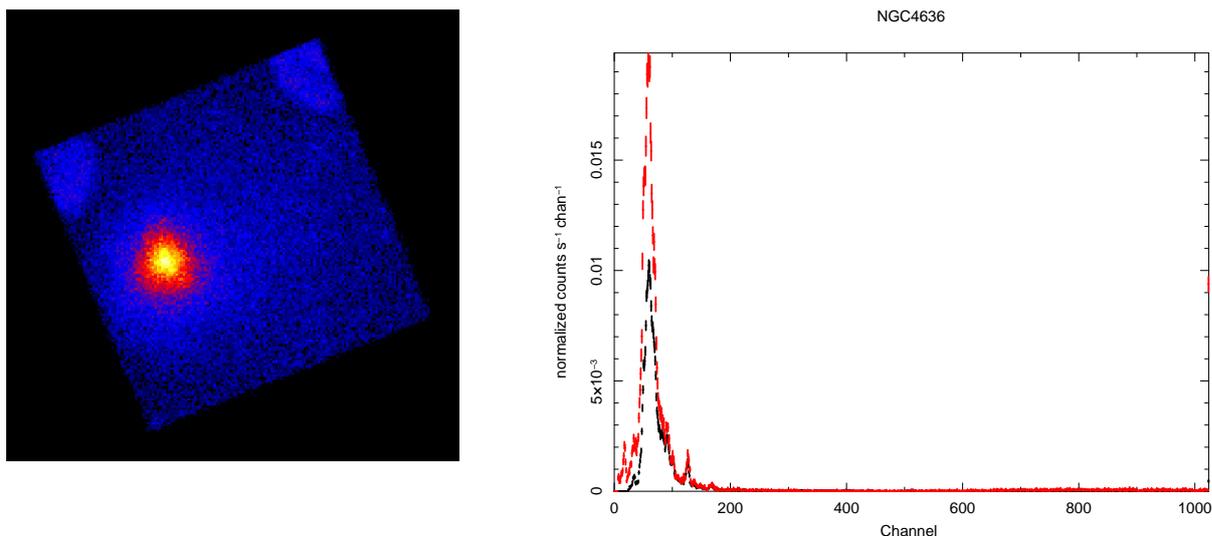


図 4.4: 左 : NGC4636 のイメージ。右 : NGC4636 の 0'-2' の加工していないスペクトル。黒が FI 型、赤が BI 型である。

一般的に天体のイメージは fits という形式で保存される。fits ファイルの可視化には ds9 と呼ばれるソフトウェアを用いて行う。天頂座標等の情報も含まれているため、天体の中心座標を決定したり、解析領域を設定するのに用いる。

スペクトルファイルは一般的に PI ファイルと呼ばれる形式で保存する (RGS においてはスペクトルも FITS ファイルから抽出する)。スペクトルファイルは検出器の生の channel 波高値 (PHA) の gain を一つのシリコン原子の平均電離エネルギーを基準にゲインを 3.65eV/ch のように区分したものである。このファイルのみではエネルギーや有効面積等とのパラメータの関連付けができておらず、またバックグラウンドも差し引かれていないため、他のファイルを並行して用いて解析を行う必要がある。

- レスポンスファイル (.rsp)

前節に記述の通り、スペクトルファイルは単体ではエネルギーとの対応関係が含まれていないため、光子のイベントとエネルギーを対応させるためにはレスポンスファイルを用いる必要がある。

レスポンス関数には RMF(Redistribution Matrix File) と ARF(Ancillary Response File) の二種類が存在し、これらのファイルを足しあわせたものをレスポンスファイルとして扱う。

#### rmf

スペクトルファイルは上記の通り、エネルギー分解能や各検出器の CCD の劣化による検出効率の減衰等は時間により異なることからエネルギーと 1:1 の対応関係を持っていないため、観測された光子は channel 波高値でしか記述できない状態にある。故に解析に際し、これらの内容が記述されたファイルを適用する必要がある。rmf ファイルにはとあるエネルギー E で入射した光子のスペクトルファイルでの分布が行列で記述されており、このファイルを適用することでレスポンスファイルの ch とエネルギーを対応させることが出来る。

arf

検出器で得られた光子の情報は、望遠鏡、検出器の各々の有効面積を考慮しなければ正確に導き出すことは出来ない。ターゲットに対する検出器の有効面積は入射 X 線のエネルギーや衛星の姿勢や軌道、それによる入射 X 線の角度の時間変化等を考慮する必要がある。またそれに加え、天体から放射された X 線がある入射角度で X 線望遠鏡に入射したとすると、望遠鏡で反射されて検出器に入射した X 線は望遠鏡の角分解能によって広がりを持つため、こうした広がりを考慮するためにターゲット天体の分布や検出器で観測した光子の抽出領域をも考慮しなければならない。これらの有効面積等の情報が記述されているのが arf ファイルである。arf ファイルは対象天体によって作成方法が異なり、それらは以下のようなモードで区切ることが出来る。

- source mode ターゲット天体の分布の指定

SKYFITS/DETFITS : FITS 形式のイメージファイルから分布を決定する。広がった天体の解析に有効である。

SKYREG/DETREG/J2000 : 天体の中心座標を手動で入力する。点源の解析で用いる。

UNIFORM : ある半径で一様な明るさを持つ円形天体を仮定する。CXB (後述) の解析のために用いる。

- region mode 解析したい領域の検出器で抽出する部分の情報の指定

SKYFITS/DETFITS : FITS 形式のイメージファイルを参考に解析領域を決める。

SKYREG/DETREG : region ファイルを参考に解析領域を決める。

- limit mode 検出する模擬光子に関する指定

NUM-PHOTON : シミュレーションに用いる光子数を指定する。数が多いほど精度が増す。

accuracy : 各エネルギー bin ごとの計算の正確さを指定する。

MIXED : 上の 2 つを同時に指定できる。

- energy step file どのようなエネルギーステップで有効面積を計算するかを決定する。full→dense→medium→sparse の順にステップが大きくなるが、その分ファイル生成が終わるのが速くなる。

これらの設定を行うことで天体の条件にあった arf を作成することが出来る。スペクトルファイルに対応したレスポンスを作成したら、後はバックグラウンドを取り除くことで適切な解析を行うことが可能となる。次節から各種バックグラウンドについて記述する。

### 4.2.3 各種バックグラウンド

- NXB(Non X-ray Background)

NXB は名称の通り非 X 線放射によるバックグラウンドである。

XIS においては宇宙線によるものが主であり、楕円銀河のような  $kT \approx 1\text{keV}$  程度の天体の観測の際には、特に 5~7keV において支配的になるが、1keV 領域に大きな影響は与えにくい。NXB の大きさは COR(Cut Of Rigidity) と呼ばれる地球に向かってくる宇宙線を曲げる地磁気の強さの指標によ

て変化する。故に NXB のバックグラウンドファイルを作成する際は、指定した観測領域においてイメージ、スペクトルを COR ごとに分け、GTI(Good Time Interval) を考慮して COR の値ごとに重み付けを行うことでファイルを作成する。

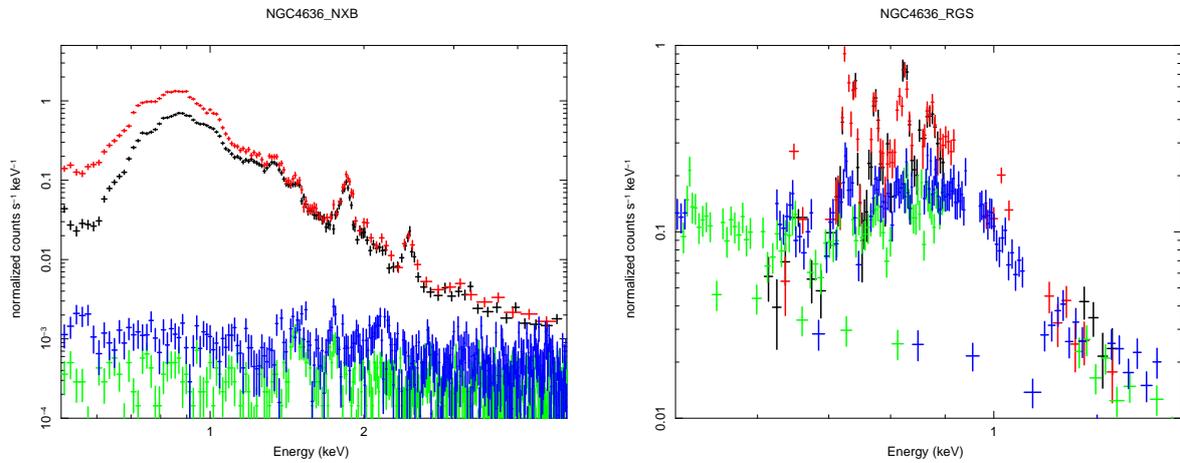


図 4.5: NGC4636 のスペクトル。左 : XIS でのスペクトルであり、黒、赤 : FI、BI の実データ 緑、青 : FI、BI の NXB データ。右 : RGS でのスペクトルであり、黒、赤 : RGS1、RGS2 の実データ 緑、青 : RGS1、RGS2 の NXB データ。

上のスペクトルのように、1keV 付近の領域においては大きな影響を与えないが、5keV 付近の領域では大きな影響を持つ。

一方 XMM-Newton の観測における NXB は、低エネルギー側 ( $\approx 300\text{eV}$ ) の検出器由来のノイズと、荷電粒子が検出器等との相互作用によって起こすバックグラウンド (数 keV 以上) が主である。荷電粒子のバックグラウンドはフレアによるものと検出器内部からの成分の 2 つに分けることが出来る。RGS による解析には大きな影響は与えないが、EPIC による解析には一定量の影響を与えてくるため、コマンドによって取り除く必要がある。

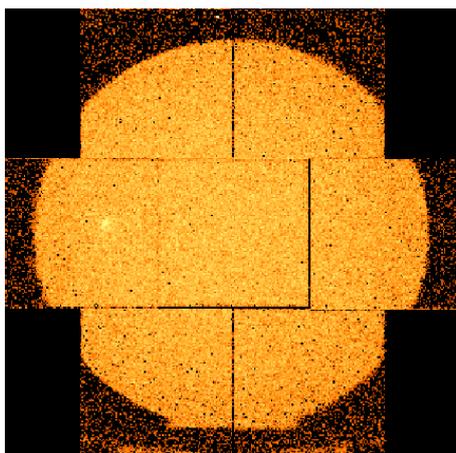


図 4.6: 陽子フレアの影響を受けた mos2 のイメージ。イメージ全体が明るくなってしまっているのが見て取れる。

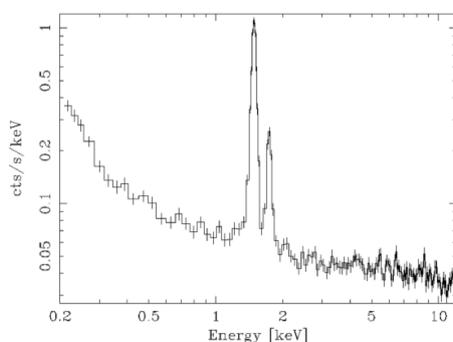


図 4.7: mos1 カメラのバックグラウンドを表現したスペクトル。0.5keV より低エネルギー側の盛り上がりが見出し器によるノイズ。

- CXB(Cosmic X-ray Background)

CXB は宇宙全体に存在する無数の X 線源による放射の重ねあわせによるバックグラウンドであり、このバックグラウンドによる影響は全天一様である。CXB に放射式は以下のように得ることが出来る。

$$CXB(E) = 9.412 \times 10^{-3} (E/1\text{keV})^{-1.29} \times \exp(-E/40\text{keV}) \text{photons/cm}^2/\text{s}/4\text{deg}^2/\text{keV} (\text{erg/cm}^2/\text{s}/\text{deg}^2/\text{keV})$$

([http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/analysis/pin\\_cxb.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/analysis/pin_cxb.html))

CXB の放射モデルは一般的に以下のようなモデルで仮定することが出来るため、検出器のレスポンスで重み付けをしてスペクトルから差し引くことで CXB の影響を取り除くことが出来る。

モデル CONST*POWERLAW*HIGHECUT	
factor	1
photon-index	1.29
normalization(photons/cm <sup>-2</sup> /s/keV)@1keV	8.21e-4
cut-off energy(keV)	1e-4
e-folding energy(keV)	40

表 4.2: CXB モデルに入力した情報。normalization は 20 分角の広さの一様な空に大して作った ARF を想定して求められた (Hayashi et al.2009)。

- **GXB(Galactic X-ray Background)**

GXB は Lumb et al.2002 に記述された天の川銀河からの放射によるバックグラウンドである。典型的な成分は 2 つに分けられ、天の川のハロー MWH(Milky Way Halo) からの 0.30keV の放射、及びオリオン座方向の銀河腕が有する高温ガス LHB(Local Hot Bubble) による 0.12keV の放射が各々バックグラウンドとなる。

これらのモデルはスペクトルに fit するモデルの中に APEC モデルとして組み込み、normalization を free にして差し引く。以下の表が GXB を仮定する際に APEC モデルに入力した値である。

放射要素	MWH	LHB
温度 kT(keV)	0.30	0.12
アバundance $A_{Fe}$ (solar)	1	
赤方偏移	0	
normalization	free	

表 4.3: 各 APEC モデルの記入情報

## 4.3 model fitting

model fitting とは、提供されたデータに対し仮定したモデルを当てはめることで、適切なデータの成分を導出する手法である。XIS や RGS の観測データによって作成されたスペクトルは楕円銀河の高温ガスが放射する成分のみではなく、他の天文物質が放射した成分や検出器由来のイベントを含んでいる。これらの成分が混同されている時点では、高温ガス自体の温度や重元素比を決定することが出来ない。故にこれらの複合的な観測データから楕円銀河由来の成分を導出するのにモデルフィッティングは適切な手法と言える。

### 4.3.1 モデルの種類

本研究で用いたモデルは以下のものがある。

- const

定数値を与えるモデル。天体の放射に直接関係する成分ではなく、検出器依存のモデルである。同一の天体の観測データを扱っていても検出器の性能差から normalization が異なることが多いため、この性能差の帳尻を合わせるために一方の const を固定してもう一方の const を free パラメータにすることで適切な値に揃えることが出来る。

- wabs

星間吸収を表すモデル。天体から放射された電磁波は地球に届くまでに銀河系内の星間ガスによって光電吸収を受けるため、その影響を考慮してモデルに組み込んだ。単位は水素柱密度  $N_H(\text{cm}^{-2}) = nd$  を用いている。一般的な値のオーダーは  $\approx 10^{20}\text{cm}^{-2}$  程度である。光電吸収の式は以下のように表現することができる。

$$A(E) = \exp\left(-\sum_i n f_i \sigma_i(E) d\right)$$

$n$  は水素の数密度、 $f_i$  は元素  $i$  の割合、 $\sigma_i$  は吸収断面積、 $d$  は吸収物体の厚さである。

- apec

光学的に薄い高温プラズマからの放射を仮定したモデル。放射率は以下のような式で表現することができる。

$$L_X = (10^{-14}/(4\pi(D_A(1+Z))^2)) \int n_e n_H \epsilon(kT, A_{Fe}, E) dV$$

$D_A$  は天体からの距離 ( $\text{cm}^{-3}$ )、 $n_e$ 、 $n_H$  は電子及び水素の数密度である。自由パラメータはプラズマの温度 ( $kT$ )、重元素アバundance比 ( $A_{Fe}$ )、赤方偏移、normalization である。しかし重元素比は太陽の元素組成比で固定されている (表 4.4)。本研究においては、前節にて紹介した二種のバックグラウンド (MWH,LHB) のモデルとして用いた。

H	1	Si	$3.55 \times 10^{-5}$
He	$9.77 \times 10^{-2}$	S	$1.62 \times 10^{-5}$
C	$3.63 \times 10^{-4}$	Cl	$1.88 \times 10^{-7}$
N	$1.12 \times 10^{-4}$	Ar	$3.63 \times 10^{-6}$
O	$8.51 \times 10^{-4}$	Ca	$2.29 \times 10^{-6}$
Ne	$1.23 \times 10^{-4}$	Cr	$4.84 \times 10^{-7}$
Na	$2.14 \times 10^{-6}$	Fe	$4.68 \times 10^{-5}$
Mg	$3.80 \times 10^{-5}$	Ni	$1.78 \times 10^{-6}$
Al	$2.95 \times 10^{-6}$	Co	$8.60 \times 10^{-8}$

表 4.4: 重元素の太陽組成比。値は水素との原子数の比を表している。

- vaped

前述の apec モデルと同様光学的に薄い高温プラズマのモデルだが、apec モデルのパラメータに加えて重元素アバundance比が free パラメータになっている (He,C,N,O,Ne,Mg,Al,Si,S,Ar,Ca,Fe,Ni)。本

研究では楕円銀河 ISM からの放射のモデルとして用い、Fe のアバダンスの変動から共鳴散乱の影響を見積もる。本研究では簡単のため、 $\text{He}=\text{C}=\text{N}=1\text{solar}$ 、 $\text{Al}=\text{Mg}$ 、 $\text{Ar}=\text{Ca}=\text{S}$ 、 $\text{Ni}=\text{Fe}$  に設定する。

- brems

熱制動放射による連続成分のモデル。本研究では低質量 X 線連星 (LMXB) による連続成分のモデルとして用いた。free パラメータは温度と normalization のみである。なお、LMXB の放射を表現する際、温度は典型的な値として  $kT=7.0\text{keV}$  で固定した。

- zgauss

典型的な gaussian のモデルに redshift を考慮したモデル。共鳴散乱輝線 (0.826keV) 付近の輝線強度を一本ずる測定する際、各輝線を表現するモデルとして用いた。free パラメータは輝線幅  $\sigma$ 、redshift、normalization である。放射式は以下のように表される。

$$A(E) = \frac{K}{\sqrt{2\pi\sigma^2(1+z)}} \exp\left(\frac{E(1+z) - E_{line}}{2\sigma^2}\right)$$

$z$  は赤方偏移、 $K$  は normalization である。

- powerlaw

べき乗則に従う曲線のモデルスペクトルを表現している。本研究では CXB のモデルとして用いた。放射式は以下の式で表すことが出来る。

$$A(E) = KE^{-\alpha}(\text{photon/keV/cm}^2/\text{s})$$

ここで  $\alpha$  は光子指数、 $K$  は係数としての単位時間、体積、エネルギーあたりの放射光指数を表している。 $\alpha$  の値が大きければ低エネルギー側の光子数が大きく、小さければ高エネルギー側の光子数も大きくなる。

- highcut

powerlaw モデルのみでは両対数グラフ上では直線になるが、CXB モデルを表現する際にはどこかで光子指数が変化し、折れ曲がりが発生する。このエネルギーを cut off エネルギーといい、これを表すモデルが highcut モデルである。highcut モデル単体の式は以下のように表現される。

$$A(E) = \exp\left(\frac{E_{cut} - E}{E_{e-folding}}\right) (E > E_{cut})$$

$$A(E) = 1 (E < E_{cut})$$

$E_{cut}$  は cut off エネルギー、 $E_{e-folding}$  はスペクトルの折れ曲がりの度合いを表す。

### 4.3.2 最小自乗法

スペクトルとモデルをフィッティングする際に、それらの外形を合致させるために最小自乗法を用いている。モデルスペクトルを  $M(E)$  で表現すると、モデルから得られる波高分布  $M(P)$  は

$$M(P) = \int R(P, E)A(E)M(E)dE$$

のように表すことが出来る。ここで  $R(P, E)$  はチャンネル  $P$  をエネルギー  $E$  に変換する二次元行列関数 RMF、 $A(E)$  は ARF の情報を考慮したエネルギー関数である。

観測されるスペクトルを  $D_{PI}(P)$ 、バックグラウンドスペクトルを  $B(P)$  とすると、純粋な天体からの成分  $D(P)$  は

$$D(P) = D_{PI}(P) - B(P)$$

のように求められ、天体からの実データスペクトル  $D(P)$  とモデルスペクトル  $M(P)$  は  $\chi^2$  分布を用いて下の式のように比較する。

$$\chi^2 = \sum_P \frac{(D(P) - M(P))^2}{\Delta D(P)^2}$$

のように比較する。ここで  $\Delta D(P)$  は測定誤差を表しており、

$$\Delta D(P) = \sqrt{(\sqrt{D(P)})^2 + (\Delta B(P))^2}$$

のように表すことが出来る。これには統計誤差とバックグラウンドの誤差が含まれている。 $\chi^2$  の値が最も小さくなるようにモデルパラメータが決定される。

## 4.4 vapec モデルを中心としたモデルフィッティング

まず、共鳴散乱の有無を視覚的に確かめるため、楕円銀河高温ガスの放射を vapec モデルで改定したモデルでのフィッティングを行う。具体的には以下のようなモデルでフィッティングを行った。

$$\text{CONST} \times \text{WABS} \times (\text{VAPEC} + \text{BREMSS}) + \text{APEC} + \text{APEC}$$

本研究にて各モデルが表す放射は前節のとおりである。このモデルを用いて記述したスペクトルは以下の図 4.8 のようになる。

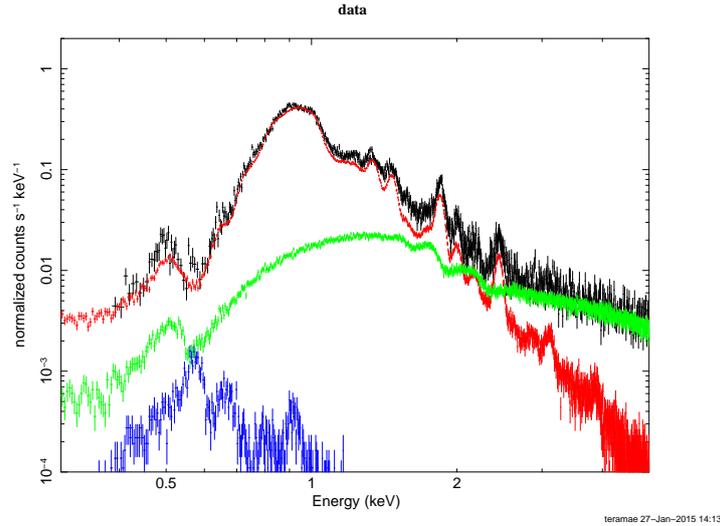


図 4.8: XIS による NGC4649 のスペクトル。黒 : NGC4649 の実データ 赤、緑、青 : 各々 VAPEC モデル、BREMSS モデル、APEC モデル を表す fake スペクトル。APEC モデルの片方は影響が薄かったためスペクトル上には現れていない。

フィッティングは、XIS では 0.5 ~ 5.0keV、RGS では 0.6 ~ 1.5keV の範囲で行った。図 4.8 から特に、1keV 付近の放射は楕円銀河高温ガスの放射が比較的優位であるのが確認できる。エネルギー帯域のとり方の理由として、XIS、RGS 共に、指定したエネルギー範囲外ではデータの精度が良くなかったり、他の放射が優位になってくるのが理由として挙げられる。

上に記したモデルには共鳴散乱の影響は考慮されていない。故にこのモデルによるフィッティングにおいて、実データとモデルにて  $\chi$  自乗検定を行うと、0.826keV 付近に負の残差が出来る場合がある。本研究ではこれを共鳴散乱による影響と判断する。

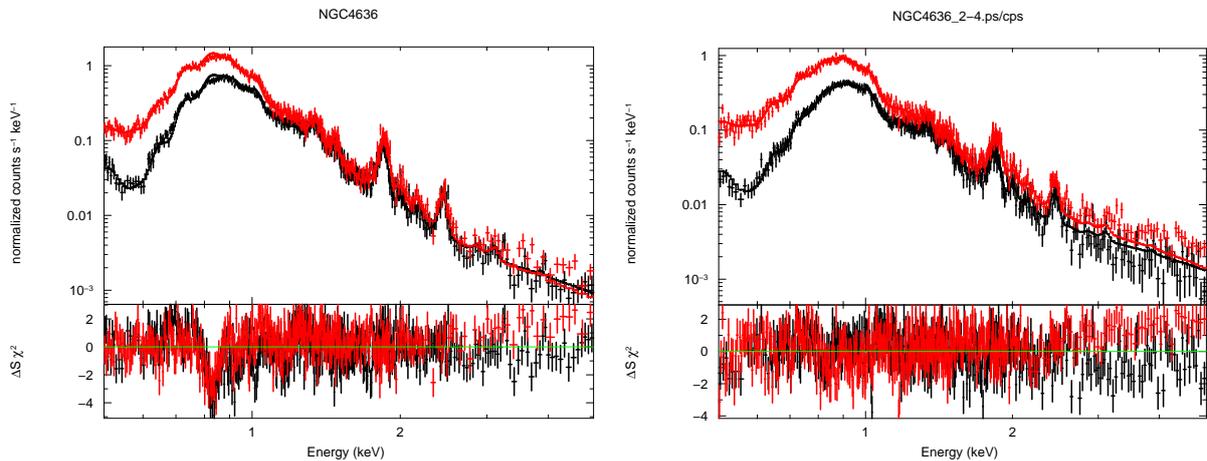


図 4.9: XIS による NGC4636 のスペクトル。左が 0'-2'、右が 2'-4' のスペクトルであり、黒 : FI 型、赤 : BI 型検出器である。十字型のプロットが実データであり、そのプロットに重なるようにモデル曲線が描かれている。

しかしこのモデルのズレが単にプラズマモデル自体が正しくない可能性、また他の物理現象による可能性もまだ棄却されていない。これらを棄却するために XIS の解析において、

- 中心以外に外側 (2' ~ 4') の領域も同様に解析し、外側 (密度が低い空間) では影響が無くなることを確認
- 5keV 付近のエネルギー帯までの解析を行い、モデルの不当性を消す

のような解析を行うことで共鳴散乱の不定性を極力消すよう試みた。

基本は上のようなモデルにて解析を行うが、RGS と比べて広い範囲を見ている XIS においては、楕円銀河の二温度構造が見える場合がある (後述)。その場合は上記のモデルに vapec モデルを 1 つ追加し、二層目の構造も記載する。

#### 4.4.1 二温度モデル

楕円銀河において中心領域は多温度構造となっていることがあり、本研究ではこれらの天体を 2 つの vapec モデルで表すこととした。解析した天体の中で幾つかの天体はこのモデルを用いており、この場合用いる式は以下のものである。

$$\text{CONST} \times \text{WABS} \times (\text{VAPEC} + \text{VAPEC} + \text{BREMSS} + \text{APEC} + \text{APEC})$$

あくまで同じ空間に二つの温度があると仮定するため、重元素アバundanceは二つの VAPEC モデル間で同値とし、温度、normalization のみは各々別とする。

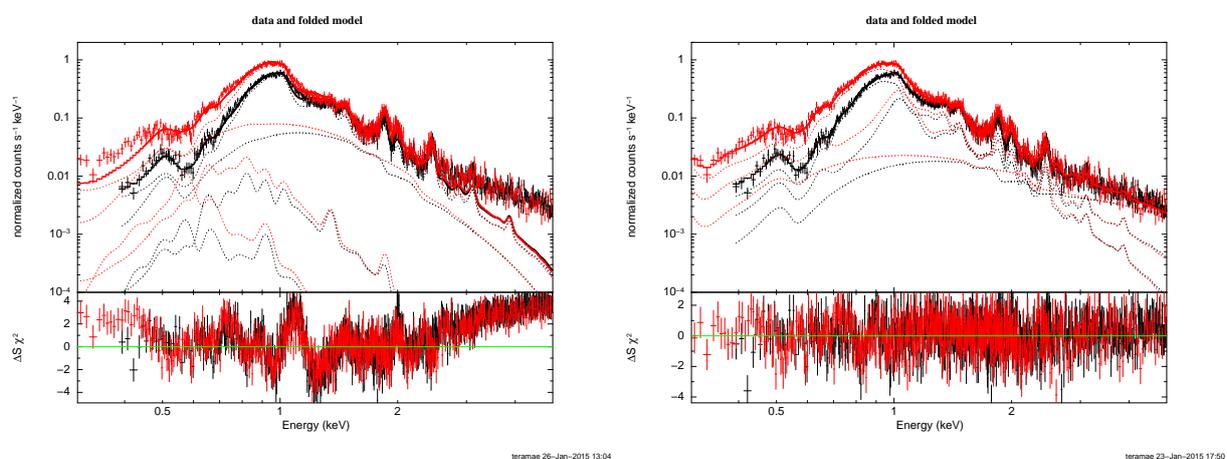


図 4.10: NGC4472 の一温度モデル (左) と二温度モデル (右) の比較。

図 4.10 から、一温度モデルでは 1.1keV 前後のフィッティングが上手く行っておらず、また高エネルギー側のフィッティングがあわないのが分かる。このデータに対し二温度モデルでフィッティングした場合が図 4.10 (右) であり、データの全体に上手くフィッティングで来ているのが見て取れる。

## 4.5 ZGAUSS モデル中心のフィッティング

この解析では楕円銀河からの高温ガス放射の中から、1keV 付近の優位な輝線を一本ずつ Zgauss モデルで仮定し、各輝線の強度を測定することを目的としている。使用するモデルは以下のように記述される。

$$\text{CONST} \times \text{WABS} \times (\text{BREMSS} + \text{BREMSS} + \text{ZGAUSS} + \text{ZGAUSS} + \dots + \text{ZGAUSS})$$

前節の解析で vapec モデルで仮定していた部分を BREMSS モデルと ZGAUSS モデルの重ねあわせで表している。この解析から  $Fe^{+16}$  の 0.826keV の輝線と 0.727keV の輝線の強度比を定量的に見積もることが可能となる。全てのモデルに対し ZGAUSS の幅  $\sigma$  は 0 に固定し、赤方偏移は天体由来の値を代入することとした。2 つの brems モデルは典型的な LMXB の放射である 7.0keV のものと、ISM 放射の連続成分を表現するために vapec モデルにて得た温度 (ex. NGC4636 :  $kT = 0.63\text{keV}$ ) を各々代入する。XIS では 0.5-1.5keV、RGS では 0.6-0.9keV において各々解析を行った。モデルを代入する輝線は XIS, RGS の各々に対して以下のようにした。

XIS		RGS	
元素	E(keV)	元素	E(keV)
$O^{7+}$	0.651	$Fe^{16+}$	0.727
$Fe^{16+}$	0.733	$Fe^{16+}$	0.739
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$Fe^{17+}$	0.771
$Fe^{16+}$	0.817	$Fe^{17+}$	0.784
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$Fe^{17+}$	0.793
$Ne^{8+}$	0.917	$Fe^{16+}$	0.812
$Fe^{19+}$	0.962	$Fe^{16+}$	0.826
$Ne^{9+}$	1.02	$Fe^{17+}$	0.873
$Fe^{16+}$	1.10		
$Mg^{10+}$	1.35		

表 4.5: ZGAUSS モデルを対応させる輝線。記載の通り、左が XIS の場合に入力するモデル、右が RGS の場合に入力するモデルである。

上記のモデルは Xu et al. 2002 に記載された、NGC4636 における「XMM-Newton」での観測で得た輝線を参考にしている。しかし、すざくの 1keV 付近でのエネルギー分解能を考慮すると Newton に比べ、エネルギーが近い輝線はスペクトルで合体して表示されてしまう。故に近いエネルギーで密集している輝線は、30eV より差が小さい輝線同士のエネルギー平均を取り、一本の輝線に近似してモデル化した。また、0.962keV の輝線は先の論文には挙げられておらず、NGC4636 のすざくによる解析を行った論文において重要であるとされたため、本研究の解析でもこの輝線を加えて解析を行なっている (林 克洋 2008, 広島大学)。一方 RGS は XIS に比べてエネルギー分解能が良いため、エネルギー帯が隣合う輝線同士が合体することも無く、故に上の表のような分類をして解析を行った。このモデルでの解析によって得られる  $I_{0.826\text{keV}}/I_{0.727\text{keV}}$  を共鳴散乱の度合いとして用い、このモデルフィッティングから 2 つの輝線の強度比からこの値が求められる。この強度比を実際のデータと vapec1 モデルから作成した simulation スペクトル

(共鳴散乱の影響が考慮されていないので、共鳴散乱輝線の部位のみ実データと外形が異なるはず)の各々で求めることで、共鳴散乱の度合いを定量的に見積もることが出来る。

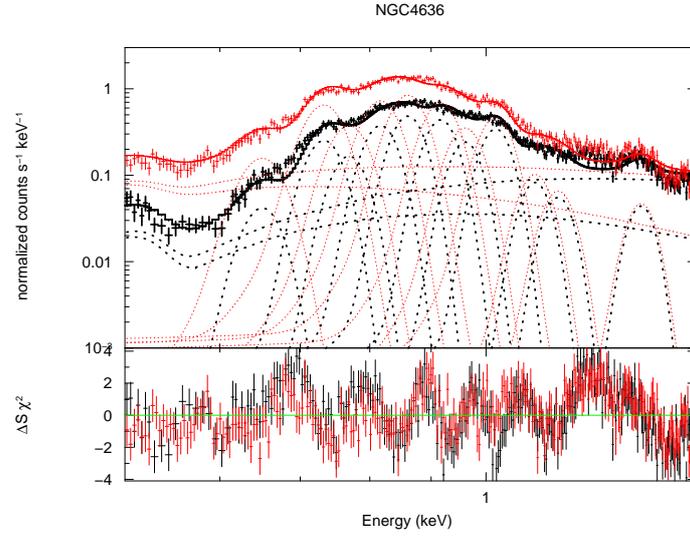


図 4.11: XIS による NGC4636 のスペクトル。黒: FI 型、赤: BI 型を表し、ガウシアン型の点線が ZGAUSS モデルによる各輝線の立ち上がりを表している。

## 4.6 銀河のガス密度導出

本研究では Geant4 へのガス密度の入力、及び Optical Depth の導出 (後述) のために銀河のガス密度を導出した。ガス密度を導出するにあたって、「XMM-Newton」mos1,mos2,pn の X 線イメージから質量を導出した。まず X 線イメージのカウントレートからガス密度分布に変換するために関係式が必要なので、各半径でスペクトルフィットを作ってスペクトルフィットを行う。なお、この導出に関して、楕円銀河内の温度は一定を仮定した。検出結果へのフィッティングは宮岡卒論 (2016) に従い、以下のようなモデルで行った。

gauss + gauss + ... + gauss + const(gauss + gauss + apec + apec + powerlaw \* wabs + (apec + brems) \* wabs)

この内楕円銀河内成分と考えているのは (apec+brems) の項であり、他のパラメータはバックグラウンドを想定している。楕円銀河成分の apec model の normalization は、以下の式

$$N_{ell} = \frac{10^{-14}}{4\pi d^2(1+z)^2} \int n_e * n_p dV$$

のように記述できる。そのスペクトルにおいて、あるエネルギー帯でのカウントレートと  $n_X \times n_p$  の関係式がわかる。これを用いて、 $S_x(\text{counts/sec/deg}^2)$  を積分して密度との関係式を作成すると、

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{S_x(\theta_{min})}{3600 * A} = \frac{10^{-14}}{4\pi d^2(1+z)^2} \int \int_{\theta_1}^{\theta_2} n_e * n_p d\theta d\theta \left(\frac{1}{60}\right)^2 \left(\frac{\pi}{180}\right)^2$$

のように記述でき、この中の  $n_p * n_e(\text{cm}^{-6})$  に対してダブル モデルを用いてフィッティングすると、

$$n_p * n_e = \frac{\text{norm1}}{\left(1 + \frac{r}{r_{c1}}\right)^{-\frac{3\beta_1}{2}}} + \frac{\text{norm2}}{\left(1 + \frac{r}{r_{c2}}\right)^{-\frac{3\beta_2}{2}}}$$

と記述できる。この値を  $N_{ell}$  に代入することで  $S_x$  を得ることが出来、最終的に半径ごとのガス密度分布を得るに至った。

導出結果は以下のようなプロットで表すことができる。

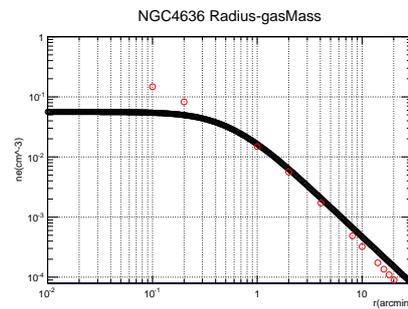


図 4.12: NGC4636 のガス密度分布。NGC4636 は大戸修論 (2002) と比較している。本研究の結果を黒い点、比較論文の値を赤い点にて示している。

本研究では大戸修論や他先行研究 (Shigeyama et al.1997) と密度分布の値、及び外観が適応するかを確認した後、本研究で得た解析結果に対しある程度の信憑性を持った上で Geant4 における解析を行った。

## 第5章 結果

本章では前章にて掲示した 12 天体の観測データに対しての解析結果を掲載する。

### 5.1 XIS,RGS による VAPEC モデル中心のモデルフィッティング

本節では vapec モデルによるフィッティング結果を掲載する。前章に記載の通り基本的には以下のモデル、及びパラメータ設定による解析を行う。

$$\text{CONST} \times \text{WABS} \times (\text{VAPEC} + \text{BREMSS}) + \text{APEC} + \text{APEC}$$

モデル	モデル内の要素	値
const	factor	1(BI は free)
wabs	$N_H(\times 10^{22})$	free
vapec	kT	free
	$A_{Fe}(\text{He,C,N})$	1
	$A_{Fe}(\text{O,Ne,Mg,Si,S,Fe})$	free
	redshift	天体由来の値
brems	kT(keV)	7.0
apec <sub>1,2</sub>	kT(keV)	0.12,0.30
	$A_{Fe}$	1
	redshift	0

モデル	モデル内の要素	値
const	factor	1(BI は free)
wabs	$N_H(\times 10^{22})$	free
vapec <sub>1</sub>	kT	free
	$A_{Fe1}(\text{He,C,N})$	1
	$A_{Fe1}(\text{O,Ne,Mg,Si,S,Fe})$	free
	redshift <sub>1</sub>	天体由来の値
vapec <sub>2</sub>	kT	free
	$A_{Fe2}$	= $A_{Fe1}$
	redshift <sub>2</sub>	=redshift <sub>1</sub>
brems	kT(keV)	7.0
apec <sub>1,2</sub>	kT(keV)	0.12,0.30
	$A_{Fe}$	1
	redshift	0
all	normalization	free

表 5.1: 一温度モデル (左)、二温度モデル (右) の歳の入力パラメータ。

### 5.1.1 NGC4636 の解析結果

まずは NGC4636 を用いて結果の見方を簡単に解説する。

- XIS

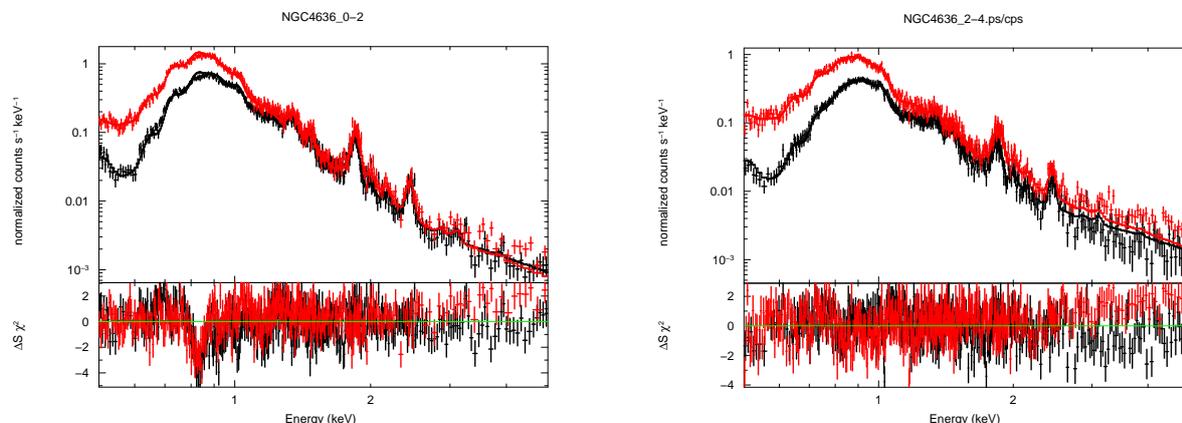


図 5.1: NGC4636 の 0-2 分角でのスペクトル (左)、2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC4636	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.640 \pm 0.003$	×	$1.92 \pm 1.08$	$0.809 \pm 0.023$	$2.13 \pm 0.509$	×
2'-4'	$0.720 \pm 0.004$	×	$4.64 \pm 1.55$	$0.744 \pm 0.108$	$3.30 \pm 0.413$	×

表 5.2: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

上のスペクトルのように、0'-2' において観測を行ったスペクトルでは、 $E=0.826 \text{keV}$  付近の  $\Delta S\chi^2$  に大きな負の残差が生まれるのが見て取れ、この残差は 2'-4' のスペクトルにおいては消えている。このことから、ガス密度が大きい中心区間の方が共鳴散乱が起こりやすいことが確認できる。また表 5.2 から、楕円銀河の温度構造から、中心から外側に向けて温度が上昇していくのが確認できる。

現在 0'-2' に対してフィットしたモデルは、共鳴散乱の影響が出た部位以外は極力正しくフィットされた外形となっているため、このモデルを型に fake スペクトルを作成することで、共鳴散乱の影響がない場合の楕円銀河のスペクトルを作成することが出来る。このモデルと実データに対し gaussian モデルで強度を測定し比較することで、共鳴散乱の影響を定量的に見積もることが出来る。

- RGS

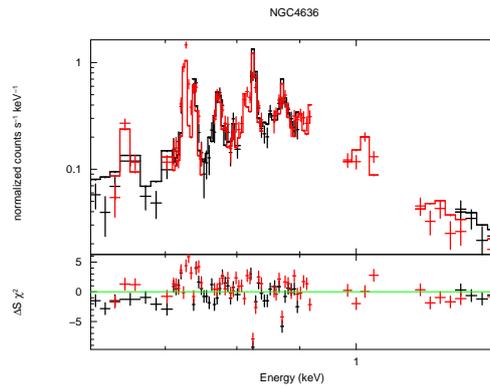


図 5.2: RGS による NGC4636 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC4636	$0.633 \pm 0.156$	$2.86 \pm 30$	$1.151 \pm 0.047$	$1.19 \pm 0.54$

表 5.3: RGS におけるフィッティング結果。

RGS のスペクトルは XIS と比較してエラーが大きいデータ点が多いため、binning を多めに行った上で使用できないと判断したデータ点は Bad Event として排除した。各輝線は XIS と比較して細かく区別することに成功しており、また共鳴散乱による  $0.826 \text{keV}$  の残差が大きく現れている。RGS はごく中心の解析のみしか行えないため、楕円銀河の外側の領域のスペクトルは作成していない。

RGS のエネルギー分解能を考慮すると、XIS の解析時には共鳴散乱の影響が外見上判断できなかった天体からも共鳴散乱の影響を確認できる可能性があるため、XIS の結果と比較しながら解析を行う。

### 5.1.2 全楕円銀河の vpec モデルによるフィッティング

全天体のフィッティングしたスペクトルは appendix に添付することとし、本節では XIS、RGS による各天体の vpec モデルでのフィッティング結果のみを掲載する。なお、XIS での 2'-4' に関するフィッティング結果の表は本節には掲載せず、appendix にて比較として掲載したが、2'-4' でのフィッティングにおいて 0.826keV 領域に負の残差が生まれた天体は存在しなかったことのみ現時点で述べておく。

天体	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{ cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{ norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{ norm}(\times 10^{-3})$
NGC4636	0.640±0.003	×	1.92±1.08	0.809±0.023	3.30±0.509	×
NGC4649	0.772±0.034	×	6.84±0.21	1.006±0.015	1.93±0.45	×
NGC4472	0.778±0.005	1.314±0.185	3.02±1.02	1.055±0.053	1.57±0.22	1.01±0.15
NGC1404	0.589±0.004	×	1.31±1.20	0.527±0.02	2.79±0.44	×
NGC1399	0.810±0.007	1.413±0.044	5.79±0.83	0.843±0.07	1.29±0.15	1.78±0.16
NGC5044	0.748±0.017	1.101±0.059	8.60±1.45	0.58±0.05	8.45±0.69	4.96±0.89
NGC5846	0.571±0.339	0.784±0.397	4.85±1.17	0.665±0.041	1.16±0.20	1.07±0.21
NGC4406	0.723±0.019	1.341±0.107	5.85±1.77	0.87±0.07	1.45±0.28	0.63±0.21
NGC720	0.557±0.004	×	1.58±1.67	1.08±0.027	0.26±0.13	×
NGC1316	0.499±0.031	0.899±0.34	1.17±0.80	1.27±0.62	0.23±0.38	0.16±0.24

表 5.4: XIS における各楕円銀河の 0'-2' でのフィッティング結果。NGC4636,NGC4649,NGC1404,NGC720 は一温度モデル、他の天体は二温度モデルである。 $V_1 \text{ norm}, V_2 \text{ norm}$  は二つの VAPEC モデルの各 normalization である。

- XIS(表 5.4 参照)

XIS に関しては 10 天体中 6 天体が二温度モデルで説明され、しかし中心の主成分の温度はほぼ 0.5 ~ 0.8keV 周辺に集まっているのが分かる。全体的にエラーが小さくフィッティングできているが、天体の光度が小さい NGC720、NGC1316 はエラーが大きいパラメータが存在する。

また、光度の大小は vpec モデルの normalization にも現れており、光度が高い NGC5044 が大きい normalization をとっている一方で、NGC720、NGC1316 は比較的小さな値をとっている。

共鳴散乱の影響はスペクトルを参照すると (appendix 参考) 10 天体中 6 天体に対して目視で共鳴散乱らしき影響が現れているのが確認できた。

- RGS(表 5.5 参照)

RGS はスペクトルのエラーの大きさから、フィッティング結果のエラーも全体的に大きい値をとっている。中心温度の値は XIS の結果と比較しても大きな矛盾はなく、大きく外れたパラメータも存在しないためフィッティングは概ね正確に出来たと判断する。しかし、NGC4382 はデータ点が非常に少なかったためフィッティングが安定せず、 $N_H$  の値を固定して解析を行った。

共鳴散乱らしき影響はスペクトルからは (appendix 参照)、XIS で共鳴散乱らしき残差があると判断した 6 天体に加え、新たに 4 天体、外見からは 0.826keV に残差が生じていると判断できる天体が増えた。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC4636	0.633±0.156	2.86±30	1.151±0.047	1.19±0.54
NGC4649	0.774±0.225	5.79±26.1	1.539±0.119	0.64±0.45
NGC4472	0.805±0.210	2.12±44.6	3.699±0.191	0.34±0.52
NGC1404	0.624±0.317	3.74±64.1	0.629±0.048	1.34±0.879
NGC1399	0.833±0.262	2.36±0.312	4.21±0.33	0.17±0.25
NGC5044	0.771±0.294	7.82±27.2	2.095±0.141	1.10±0.93
NGC5846	0.65±0.25	4.61±53	1.84±0.094	0.37±0.28
NGC4406	0.662±1.05	1.46±1.21	4.887±0.593	0.063±0.302
NGC720	0.495±1.731	1.58±22.7	3.283±0.608	0.035±0.165
NGC1316	0.635±0.414	2.0±72.8	2.217±0.156	0.11±0.13
NGC4374	0.641±0.507	2.30±86.4	1.703±0.131	0.21±0.26
NGC4382	0.37±2.77	2.5(freeze)	0.522±0.325	0.10±4.36

表 5.5: RGS における各楕円銀河のフィッティング結果。

## 5.2 XIS,RGS による ZGAUSS モデル中心のモデルフィッティング

前節での解析から、一定数の楕円銀河に対して 0.826keV 付近に負の残差が見られることが分かった。本節ではそうした共鳴散乱の影響だと思われる負の残差の大きさを定量的に測定し、共鳴散乱の度合いを測定することを目的とする。 $Fe^{16+}$  が放射する 0.727keV の輝線と 0.826keV の比  $X = I_{0.826\text{keV}}/I_{0.727\text{keV}}$  というパラメータを仮定する。そして  $X$  の値を実際の観測データ及び vapedc モデルから形成した fake スペクトルの各々に対し測定し、その 2 つの  $X$  の比  $X_{obs}/X_{model}$  が最終的にどの程度共鳴散乱の影響が大きいかを測定する指標とする。以下がフィッティングによるスペクトルの外形であり、このことから連続成分と gaussian で比較的良くフィッティングが出来ることが分かる。この gaussian の normalization から強度比を測定する。

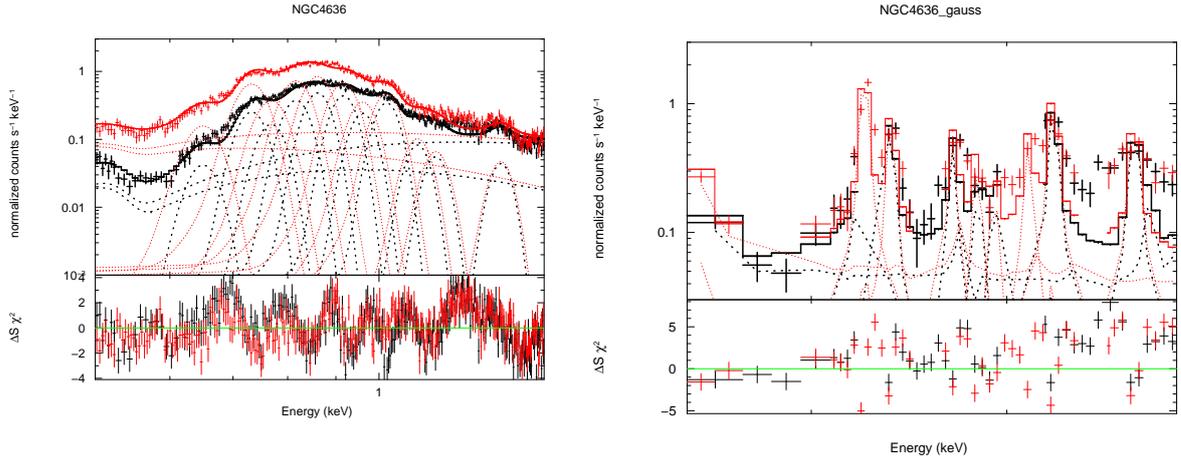


図 5.3: ZGAUSS モデルでフィットした NGC4636 のスペクトル。(左) XIS によるスペクトル。黒 : FI 型、赤 : BI 型検出器であり、山形の点線が gaussian モデル、横に向かって伸びている連続成分が brems model を表している。(右) RGS によるスペクトル。黒 : RGS1、赤 : RGS2 の検出器である。モデルの概略は XIS と同じ。

モデル	モデル内の要素	値
const	factor	1(BI は free)
wabs	$N_H (\times 10^{22})$	VAPEC モデルでの中心での値
brems <sub>1</sub>	kT(keV)	7.0
brems <sub>2</sub>	kT(keV)	各天体の VAPEC モデルで求めた温度
zgauss <sub>1</sub> ~ ...	kT(keV)	各輝線の温度 (表 4.5 参照)
	Sigma	0
	redshift	各天体固有の値
all	normalization	free

表 5.6: ZGAUSS モデルの情報

スペクトルのフィッティング結果、及び各輝線の normalization は appendix に添付することとし、本節では各輝線の強度比の測定結果のみを掲載する。以下の図は NGC4636 び対して 1keV 付近の各輝線の強度比  $I_{xkeV}/I_{0.826keV}$  を実際のデータ (黒) 及び fake スペクトル (赤) の各々でプロットしたものである。なお、RGS に関しては、強度が小さいものは表から除くこととしたため、 $Fe^{16+}$  の 0.727keV、0.739keV、0.812keV、0.826keV の四本の輝線を用いてプロットを行った。各天体の強度比の測定は appendix にまとめた。

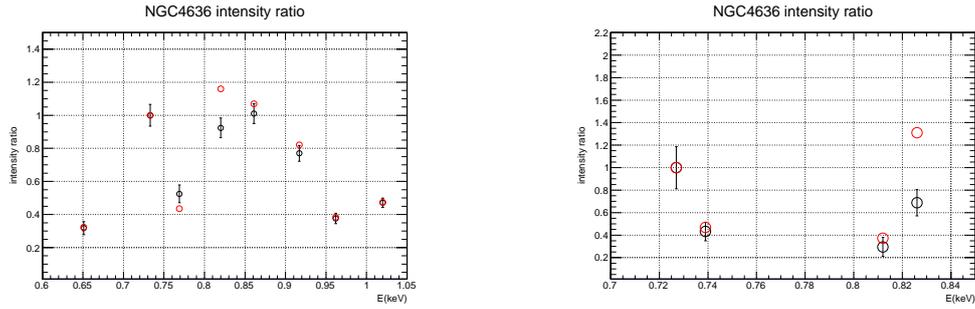


図 5.4: XIS(左)、RGS (右) での ZGAUSS モデルの強度比

共鳴散乱が起きていると想定している 0.826keV の輝線において、実データと fake スペクトルの強度比が誤差込みで一致しなかった場合、共鳴散乱らしき影響が見えていると想定し、また他の輝線の黒い点と赤い点がある程度一致していれば共鳴散乱以外の影響による不定性がある程度消すことが出来ていると考える。NGC4636 に関して見れば、0.826keV 以外の輝線において黒い点と赤い点の位置は概ね一致しており、その上で 0.826keV において 2 つの点の位置が誤差込みで一致していないため、共鳴散乱による値の差異が生じたと考えられることができる。なお、XIS の結果において、NGC4636 を含めた多くの天体で 0.769keV の輝線の強度比が実データとモデルで一致していない。これは 0.769keV の輝線に  $Fe^{17+}$  (0.767keV、0.771keV、0.775keV)、 $Fe^{18+}$  (0.770keV)、 $O^{7+}$  (0.775) の輝線が合体したものを仮定しているため、各々のピークが混ざり合い正しくフィットできなかったと予想される。

全天体に対する  $X_{obs}/X_{model}(X = I_{0.826keV}/I_{0.727keV})$  を測定し、横に並べた図が以下の図である。

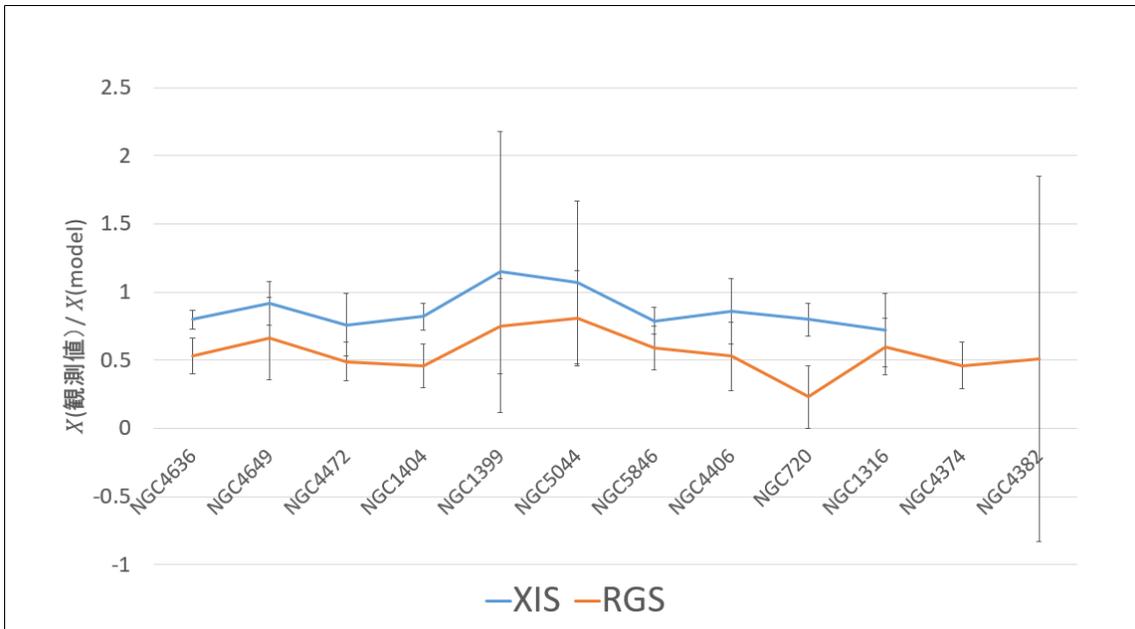


図 5.5: 各天体の  $X_{real}/X_{fake}$ 。青い線が XIS、赤い線が RGS を表す。

結果を見ると、XIS では NGC4636、NGC4472、NGC1404、NGC5846、NGC720、NGC1316 において誤差込みで  $X_{obe}/X_{model}$  の値が 1 より小さくなっているため、共鳴散乱の影響が大きいのではないかと予想される。加えて RGS の結果を見ると、上で挙げた天体に加えて NGC4649、NGC4406、NGC4374 において誤差込みで  $X_{obs}/X_{model}$  の値が 1 より小さくなっている。XIS と RGS の結果に矛盾した点はないため、これらの天体において共鳴散乱が起こっていると考えた。

こうした vapec,zgauss モデルでの各々のフィッティングから、XIS では 6 天体、RGS では 9 天体において、共鳴散乱らしき影響が確認できた、と考察した。

### 5.3 高温ガスの密度分布導出と optical depth の計算

Optical depth とは放射源から観測地点まで届く光の透明度の指標であり、共鳴散乱輝線はこの厚さによって  $e^{-\tau}$  倍程度強度が減少するため、共鳴散乱の起こりやすさと相関を持つと言える。天体半径に依存する Optical depth は以下のような式で求めることができる。

$$\tau(r) = F(T) \int_0^r A_i \sigma_{RS} n_{ion}(x) dx$$

ここで  $F(T)$  は  $Fe^{16+}$  の温度に依存したイオン存在比、 $n_{ion}$  は銀河におけるイオンの密度、 $RS$  は共鳴散乱断面積 (式 (2.3) 参照)、 $A_i$  は太陽基準の重元素アバundanceであり、今回の場合は鉄の輝線に対して行うため  $=4.68 \times 10^{-5}$  とおく。式のように Optical depth は  $RS$  に対し正の相関を持つため、共鳴散乱の程度の指標となる。

$n_{ion}$  に関しては、以下のダブルモデルで表現することとする。

$$n_{ion}(r) = \sqrt{n_{ion1}^2 + n_{ion2}^2}$$

$$n_{ion1,2}(r) = n_c \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}\beta}$$

ここで  $r_c$  がコア半径、 $n_c$  がコアの数密度、 $\beta$  が中心からの温度勾配をそれぞれ表す。

この  $n_{ion}$  の値に関して、4.6 節にて示した手法を用いて 12 の楕円銀河に対して質量の導出を行った。また、先行研究によるガス密度の半径分布が存在する天体に関しては、先行研究と比較した。比較した論文は大戸修論 (2002) (NGC4636、NGC4649、NGC4472、NGC5846、NGC4406、NGC720、NGC1316、NGC4374 の導出結果あり) 及び Shigeyama et al.1997(NGC4472、NGC1399 の導出結果あり) の 2 つである。以下の図は NGC4636 によるガス密度導出結果である。全天体のガス密度分布は appendix に載せた。半径は 0.001 ~ 30 arcmin の範囲であり、縦軸は電子の数密度  $n_e(\text{cm}^{-3})$  である。

以下の図 5.6 が NGC4636 のガス密度に関して本研究で導出した値と大戸修論 (2002) を比較した図であり、黒い線が本研究での導出結果、赤いプロットが大戸修論の結果である。導出に使用した衛星が異なるので (大戸修論では Chandra 衛星の観測データを用いている。) 分解能の差から中心付近のガス密度が全天体においてある程度ズレが生じたが、外側の領域に関してはかなり近い値を取っていたため、ある程度適切な値と判断し、Optical depth の計算に用いる。全 12 天体のプロットは appendix に

添付することとし、本節では  $\beta$  モデル、ダブル  $\beta$  モデルでのパラメータの値を記載する。NGC1316、NGC4374、NGC4382 はシングル モデルで導出、それ以外の天体はダブル モデルで導出した。

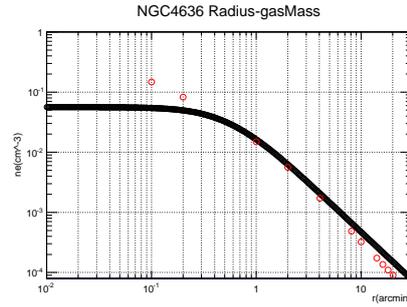


図 5.6: NGC4636 のガス密度分布。NGC4636 は大戸修論 (2002) と比較している。本研究の結果を黒い点、比較論文の値を赤い点にて示している。

天体	$n_{ion1}(\text{cm}^{-3})$	$r_{c1}(\text{kpc})$	$\beta_1$	$n_{ion2}(\text{cm}^{-3})$	$r_{c2}(\text{kpc})$	$\beta_2$
NGC4636	3.85e-2	1.44	0.53	2.29e-2	3.50	0.57
NGC4649	1.15e-1	0.55	0.53	6.27e-2	0.99	0.52
NGC4472	2.01e-2	0.17	0.75	2.06e-2	2.86	0.51
NGC1404	4.88e-2	1.22	0.28	2.12e-2	2.12	0.59
NGC1399	2.51e-2	1.21	0.42	9.96e-3	1.66	0.62
NGC5044	3.59e-2	0.94	0.55	2.36e-2	7.93	0.55
NGC5846	1.84e-2	5.45	0.63	5.41e-2	0.70	0.63
NGC4406	4.41e-2	0.53	0.75	1.85e-2	3.64	0.62
NGC720	4.41e-2	0.43	0.49	1.44e-2	2.63	0.50
NGC1316	2.97e-2	3.18	0.71	×	×	×
NGC4374	3.61e-2	2.76	0.7(fixed)	×	×	×
NGC4382	2.90e-2	0.51	0.42	×	×	×

表 5.7: 全楕円銀河に対するガス密度分布を導出した際の密度分布パラメータ。

表 5.8 が  $M=0$  の Optical depth を導出した際に用いたパラメータである。Optical depth は NGC1399 を除けば一般的なオーダーである 1 ~ 10 程度に値が収束した。この Optical depth の値を横軸、 $X_{obs}/X_{model}$  を縦軸に全天体をプロットした図が以下の図 5.8 である。

このプロットから、やはり NGC1399 は例外的であるが、基本的に  $\text{Optical depth} > 1$  の天体は誤差込みで  $X_{obs}/X_{model}$  の値が 1 より小さくなっており、共鳴散乱が普遍的に起こっていると判断できる。また、あくまで淡い傾向ではあるが、 $X_{obs}/X_{model}$  と Optical depth に負の相関が見られるため、より分解能の良い将来検出器による計算から、はっきりとした負の相関が現われることが期待される。また、X 線イメージから擾乱が起こっている天体と起こっていない天体の色分けを行った所、同程度の Optical depth を有する天体において、各々のプロットにおいて共鳴散乱の規模に差がないことが

見て取れるため、銀河内で起こっている擾乱は銀河内乱流に大きい影響を与えていないことが判明した。この考察は 2.3.3 節で示したペルセウス銀河団におけるひとみの観測結果を用いた考察結果とも一致する。

また、これらの値に乱流速度  $M=0 \sim 1.0$  を与えた場合の Optical depth が表 5.9 である。

天体	温度 (keV)	イオン存在比	$\sigma_{RS}(\times 10^{-15}\text{cm}^2)$	$n_{ion}[\text{cm}^{-2}]$	optical depth( $M=0$ )
NGC4636	0.633	0.249	1.17e-15	4.50e20	6.16
NGC4649	0.774	0.070	1.06e-15	5.38e20	1.88
NGC4472	0.805	0.070	1.04e-15	2.83e20	0.97
NGC1404	0.624	0.249	1.18e-15	6.27e20	8.65
NGC1399	1.012	0.078	9.30e-16	2.26e20	0.08
NGC5044	0.833	0.070	1.02e-15	5.79e20	1.95
NGC5846	0.772	0.070	1.06e-15	3.85e20	1.35
NGC4406	0.649	0.249	1.16e-15	2.81e20	3.81
NGC720	0.474	0.642	1.36e-15	2.29e20	9.33
NGC1316	0.586	0.479	1.22e-15	3.54e20	9.69
NGC4374	0.641	0.249	1.17e-15	3.86e20	5.25
NGC4382	0.37	0.688	1.54e-15	1.23e20	6.10

表 5.8:  $M=0$  時の optical depth 及び各パラメータ

天体	擾乱の有無	AGN の有無
NGC4636	擾乱あり	有
NGC4649	無し	有
NGC4472	無し	無
NGC1404	無し	無
NGC1399	無し	有
NGC5044	弱い擾乱あり	無
NGC5846	無し	無
NGC4406	擾乱あり ( )	無
NGC720	無し	無
NGC1316	擾乱あり	有
NGC4374	激しい擾乱	有
NGC4382	無し	無

表 5.9: 各天体の擾乱及び有する AGN の有無。( ) NGC4406 の擾乱は銀河団との相互作用により引き起こされている。

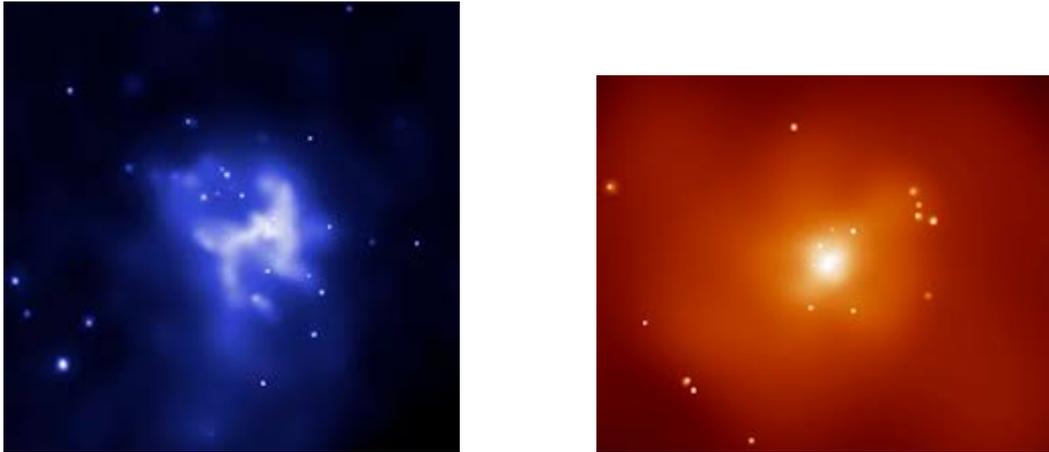


図 5.7: Chandra による NGC4374(左)、及び NGC720(右) の X 線イメージ。比較的等方的な形をしている NGC720 に対して、NGC4374 の高温ガスが擾乱によりかき乱されて不定形をとっているのが分かる。

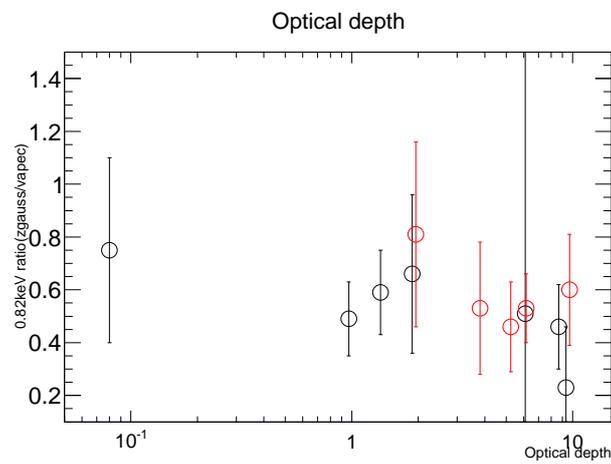


図 5.8:  $M=0$  時の Optical depth と  $X_{obs}/X_{model}$  の関連をプロットした表。黒：天体内に擾乱が確認できない天体、赤：天体内に擾乱が確認された天体。

これらの結果は  $M$  の値によっては決して不適切な値では無いが、その乱流速度が適切という決定もまだ出来ない。次章にて Geant4 の解析を加えることで乱流速度にある程度制限をつけ、適切な Optical depth を考察する。

M	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
NGC4636	6.16	4.35	2.47	1.41	0.82	0.48	0.28	0.16	0.10	0.06	0.03
NGC4649	1.88	1.33	0.75	0.43	0.25	0.15	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01
NGC4472	0.97	0.69	0.39	0.22	0.13	0.08	0.04	0.03	0.02	8.96e-3	5.28e-3
NGC1404	8.65	6.11	3.47	1.98	1.15	0.67	0.39	0.23	0.14	0.08	0.05
NGC1399	0.077	0.054	0.031	0.018	0.010	5.96e-3	3.49e-3	2.05e-3	1.21e-3	7.10e-4	4.19e-4
NGC5044	1.95	1.38	0.78	0.45	0.26	0.15	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01
NGC5846	1.35	0.95	0.54	0.31	0.18	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	7.34e-3
NGC4406	3.81	2.69	1.53	0.87	0.51	0.30	0.17	0.10	0.06	0.04	0.02
NGC720	9.33	6.60	3.75	2.14	1.24	0.72	0.42	0.25	0.15	0.09	0.05
NGC1316	9.69	6.85	3.89	2.22	1.29	0.75	0.44	0.26	0.15	0.09	0.05
NGC4374	5.25	3.71	2.11	1.20	0.70	0.41	0.24	0.14	0.08	0.05	0.03
NGC4382	6.10	4.31	2.45	1.40	0.81	0.47	0.28	0.16	0.10	0.06	0.03

表 5.10: 全天体での Optical depth の導出結果。

## 第6章 Geant4によるシミュレーション

### 6.1 Geant4の概要

Geant4は粒子が物質を透過する際の相互作用を記述するシミュレーションソフトである。シミュレーション法として、モンテカルロ法と呼ばれる乱数を用いたシミュレーションを用いている。本研究ではこのソフトを用いて、楕円銀河及び球殻状の検出器を仮想的に作成し、実際の楕円銀河及びX線天文衛星と同様の条件で共鳴散乱の観測、解析を行う。この解析の結果とX線天文衛星の観測結果が一致すれば、想定している楕円銀河の周辺環境や共鳴散乱の有無について定量的な考察が出来る。

解析には楕円銀河を仮定する物質やその内容量、及び空間を占める物質等を全てパラメータとして組み込む必要がある。本研究では主に以下の構成要素でGeant4内の環境を構築した。この構成要素は枝廣卒論(2013)を元に作成している。

### 6.2 Geant4の構成要素

- DetectorConstruction

仮想空間内の構築物質を書き込む要素。この要素内に楕円銀河ISMを記入した。楕円銀河は連続成分として表現せず、17層の球殻で表現し、各球殻に温度、ガス密度を設定した。また、楕円銀河と地球との距離の大きさと同様の半径の検出器を作成し、地球周辺で光子を検出した事を仮定した。しかし光子の検出を光電吸収の作用によるものとする、楕円銀河内で光電吸収を受けて単純に検出できる光子が減少してしまうため、光電吸収の作用をプログラムから除外した(PhysicsListにて設定)。故に検出器の成分は真空と同様の成分とし、通過した瞬間に検出する設定とした。

- EventAction,RunAction,SteppingAction

光子が他の物質と相互作用を起こすごと、光子1イベントの終末まで起こった内容を記述する要素。物質との相互作用の際に起こった現象も記述できるようになっているため、共鳴散乱が起こった際にも記述する。

- G4LECSCompton 放射される輝線の設定や共鳴散乱を含む仮想空間内で起こる現象の設定が記述されている要素。本研究ではこの要素内で、放射される輝線を  $Fe^{16+}$  が放射する 0.727keV、0.739keV、0.826keV の三本の輝線のみとしており、またこの要素内で振動子強度を本来の値と  $f \approx 0$  とで切り替えることで共鳴散乱がある場合とない場合を変化させることが出来る。

– PhysicsList.cc

仮想空間内で起こる現象を記述している要素。単純なトムソン散乱等の物理現象もこの中に記述している。このファイル内から光電吸収の要素を消すことで、仮想空間で光電吸収が起こらないように設定した。

– TestBeamGeneration

入射光子の設定を行う要素。粒子の種類、エネルギー、方向、発生位置等を設定できる。本研究では光子の発生位置をランダム関数で振り分け、銀河内の様々な地点から発生するように設定した。

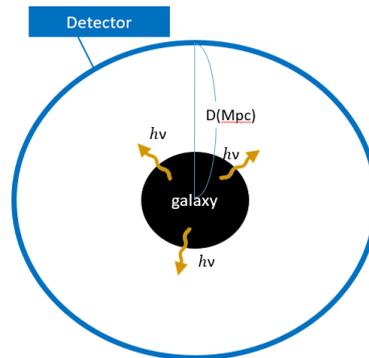


図 6.1: Geant4 で想定している空間内の状況。

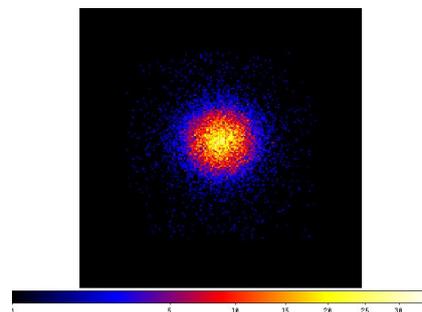


図 6.2: Geant4 による NGC4636 のイメージ。このイメージから解析領域を  $0^{\circ}\text{-}1'$ 、 $2^{\circ}\text{-}4'$  に分ける。

全てのデータを検出器を用いて検出した後、取得したイメージを XIS に対して行ったように  $0^{\circ}\text{-}2'$ 、 $2^{\circ}\text{-}4'$  の各々で区切って解析を行った。全方位を検出器で囲んでいるので共鳴散乱が起こった天体も含めて検出しているが、視野を絞ることで銀河の外側で共鳴散乱が起こった後に検出された光子等を除外している。

ISM の構築に関して、半径ごとのガス密度は前章で自ら求めた結果を代入した。半径温度分布は Fukazawa et al. を参考にしたが、NGC4406 のデータは存在しなかったため、NGC4406 のみ中心の温度のまま全半径にて固定している（中心温度は XIS での観測結果を用いている）。半径ごとのアバUNDANS比は大戸修論 (2002) より抜粋した。前述の通り、本研究では楕円銀河 ISM を 17 層の玉ねぎ

型構造にして表現することとし、各殻に密度、温度、アバundance、重元素存在比を与えた。最外縁の殻半径を 15.5kpc と設定し、そこより外側の空間は検出器に到達するまで全て真空と仮定した。また、実際の ISM の密度を Geant4 に入力すると、ISM の希薄さから、Geant4 で扱える数密度  $n$  を下回ってしまうため、全空間を以下のようにスケールした。

$$R : 1\text{kpc}(= 3.0857 \times 10^{21}[\text{cm}]) \rightarrow 100[\text{cm}]$$

$$n : 1[\text{cm}^{-3}] \rightarrow 3.0857 \times 10^{19}[\text{cm}^{-3}]$$

それに伴い、楕円銀河半径、及び検出器の半径も上記のスケールに従って縮小した。

なお、今回の結果では、 $Fe^{16+}$  のイオン存在比の天体ごとの値を考慮しなかったため、乱流による減少量は正しく獲得できていない可能性が高い。

### 6.3 NGC4636 による解析結果

XIS、RGS の解析と同様、まず NGC4636 をサンプルに行った解析を掲示する。

解析条件を再掲すると、Geant4 にて仮定した構造は、まず楕円銀河を玉ねぎ型のガス殻で再現し、各殻に電子密度、温度を与えた。検出は楕円銀河を大きく囲う真空殻によって行うこととし、輝線の通過によって検出とすることにした。温度分布は Fukazawa et al. を参考にし、ガス密度の半径分布は上記で導出した内容を用いた。解析は XIS での解析と同様、検出したイメージに対して 0-1 分角、2-4 分角の各々に対して行い、また取得データ自体も XIS のレスポンスを用いてなまらせる。発生させる光子は 500000 個とし、これを 2 つのファイルに折りたたみ、250000 発の光子のデータを用いる。存在する原子は水素と鉄のみにし、また発生する輝線は 0.727keV, 0.736keV, 0.826keV の三本を発生させることとし、共鳴散乱の影響を定量的に確認する（なお、0.727keV において  $f = 0.12$ 、0.826keV において  $f = 2.45$ 、0.736keV においては  $f \sim 10^{-5}$ ）。また、本研究においては、光子の減少を防ぐため光電吸収の作用は除外している（検出は上記の通り検出器の通過によって行われる）。乱流の値はマッハ数  $M=v/c_s$  ( $c_s$ :音速) にて表現することとし、 $M=0, 0.5, 1.0$  の三通りを用いた。

まず、Geant4 によって取得したスペクトルは以下のような形となった。

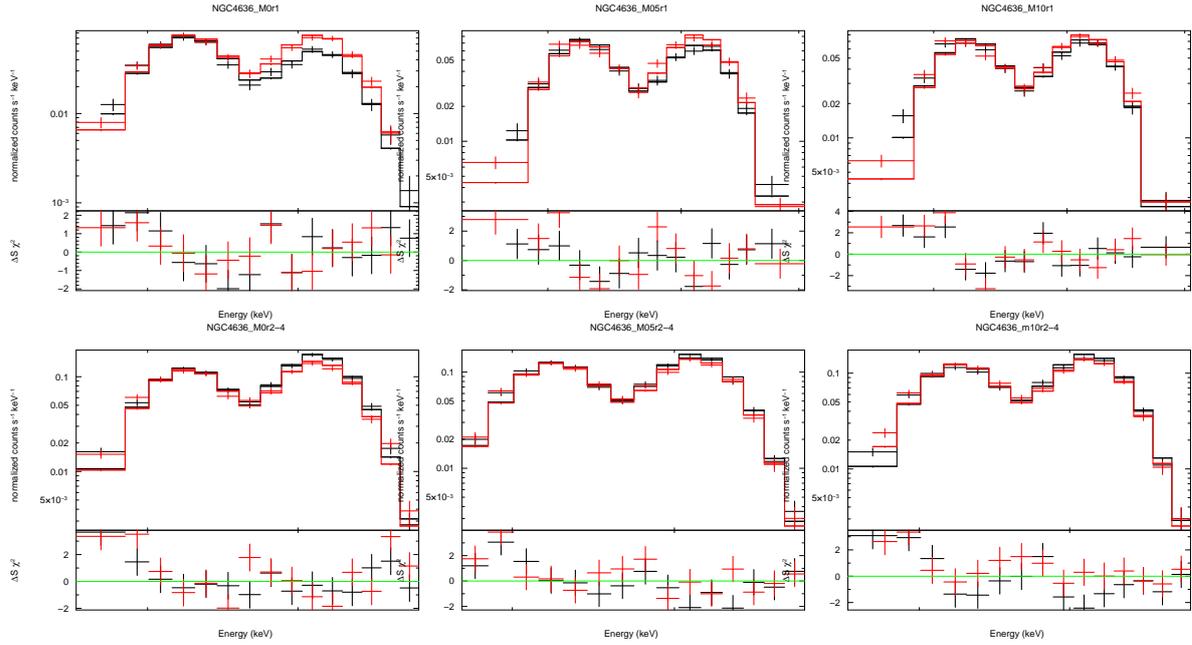


図 6.3: Geant4 を用いて作成した NGC4636 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ , 下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

上の3つのスペクトルが中心から1分角以内の空間のスペクトルであり、 $M=0$ のスペクトルでは共鳴散乱を考慮した場合のデータ(黒いプロット。以降  $r_s$  と呼ぶ)に比べて、共鳴散乱の影響を除外したデータ(赤いプロット。以降  $r_{nors}$  と呼ぶ)の  $0.826\text{keV}$  の輝線の count が多くなっているのが見て取れ、また  $M$  の値を大きくするごとに二つのプロットの count に差がなくなっていくのが分かる。このことから、銀河中心で起こる乱流の規模と共鳴散乱の影響には負の相関があることが分かる。

また、下の3つのスペクトルは中心から  $2' \sim 4'$  のドーナツ状の空間のスペクトルである。設置した検出器の性質上、中心で共鳴散乱を起こして減少した  $0.826\text{keV}$  の輝線がこの領域のスペクトルに含まれているため、 $r_s$  のプロットが外側で増えている。

XIS、RGS の解析と同様、Geant4 における解析でも、共鳴散乱の規模を  $X = I_{0.826\text{keV}} / I_{0.727\text{keV}}$  を用いて表現する。NGC4636 における  $X_{r_s} / X_{nors}$  をまとめた表が以下ようになる。 $X_{r_s} / X_{nors}$  の値が1より誤差込みで小さくなった場合、共鳴散乱の影響が働いていると考える。

天体	$M=0, r=0-1$	$M=0.5, r=0-1$	$M=1.0, r=0-1$	$M=0, r=2-4$	$M=0.5, r=2-4$	$M=1.0, r=2-4$
NGC4636	$0.69 \pm 0.12$	$0.78 \pm 0.14$	$0.88 \pm 0.16$	$1.16 \pm 0.16$	$1.10 \pm 0.15$	$1.17 \pm 0.16$

表 6.1: NGC4636 の各パラメータでの  $X_{r_s} / X_{nors} (X = I_{0.826\text{keV}} / I_{0.727\text{keV}})$ 。

NGC4636 の結果からは矛盾はなく、Geant4 において正しく解析できていると考えることができるので、XIS において解析を行った天体に対して Geant4 による解析を行った。なお、RGS による解析結果しか存在しない NGC4374、NGC4382 に関しては解析を行っていない。

## 6.4 全天体による解析結果

全天体のスペクトルは appendix に記載し、本節では数値上の結果を表にまとめた。書く天体での Geant4 の結果を、 $M=0,0.5,1.0$ 、 $r=0-1,2-4$  の各々に掲載し、また実際の XIS による  $X_{rs}/X_{nors}$  を比較のため掲載した。

天体	$M=0,r=0-1$	$M=0.5,r=0-1$	$M=1.0,r=0-1$	$M=0,r=2-4$	$M=0.5,r=2-4$	$M=1.0,r=2-4$
NGC4636	$0.69\pm0.12$	$0.78\pm0.14$	$0.88\pm0.16$	$1.16\pm0.16$	$1.10\pm0.15$	$1.17\pm0.16$
NGC4649	$0.87\pm0.19$	$0.96\pm0.21$	$1.08\pm0.23$	$1.02\pm0.13$	$1.13\pm0.15$	$1.02\pm0.13$
NGC4472	$0.80\pm0.38$	$0.82\pm0.39$	$0.82\pm0.36$	$0.98\pm0.17$	$1.10\pm0.19$	$0.98\pm0.13$
NGC1404	$0.74\pm0.14$	$0.96\pm0.17$	$1.00\pm0.18$	$1.08\pm0.15$	$0.86\pm0.12$	$1.02\pm0.14$
NGC1399	$0.73\pm0.14$	$0.89\pm0.16$	$1.11\pm0.20$	$1.13\pm0.14$	$0.99\pm0.13$	$1.07\pm0.14$
NGC5044	$0.87\pm0.12$	$0.96\pm0.14$	$0.98\pm0.14$	$0.99\pm0.18$	$0.90\pm0.18$	$1.00\pm0.19$
NGC5846	$0.72\pm0.56$	$0.72\pm0.52$	$0.71\pm0.53$	$1.08\pm0.35$	$1.07\pm0.33$	$1.15\pm0.33$
NGC4406	$0.83\pm0.13$	$0.91\pm0.15$	$0.98\pm0.16$	$1.10\pm0.17$	$1.00\pm0.15$	$0.98\pm0.15$
NGC720	$0.72\pm0.14$	$1.08\pm0.22$	$1.08\pm0.23$	$1.11\pm0.14$	$0.86\pm0.39$	$1.10\pm0.15$
NGC1316	$0.93\pm0.10$	$0.96\pm0.10$	$0.98\pm0.11$	$1.14\pm0.12$	$1.12\pm0.13$	$1.03\pm0.11$

表 6.2: 全天体での各パラメータでの  $X_{rs}/X_{nors}$  ( $X = I_{0.826keV}/I_{0.727keV}$ )。

天体	XIS(real)
NGC4636	$0.80\pm0.07$
NGC4649	$0.92\pm0.16$
NGC4472	$0.76\pm0.23$
NGC1404	$0.82\pm0.10$
NGC1399	$1.15\pm1.03$
NGC5044	$1.07\pm0.60$
NGC5846	$0.79\pm0.10$
NGC4406	$0.86\pm0.24$
NGC720	$0.80\pm0.12$
NGC1316	$0.72\pm0.27$

表 6.3: 全天体での各パラメータでの  $X_{rs}/X_{nors}$  ( $X = I_{0.826keV}/I_{0.727keV}$ )。

0-1 分角内においては  $M$  の増加に比例してほとんどの天体において共鳴散乱の影響が減少しているのが見て取れる。一部の天体 (NGC5846、NGC4472) においてはイメージが楕円形を取らず、非等法に広がったイメージをとった。このような作用は NGC1399 のような温度が極端に高い天体では発生しておらず、また乱流の程度による大きなイメージの変化は無かった。これらの影響は天体自身のガス密度の違いにより現れていると考えられる。appendix に記載のガス密度を比較すると、外側の領

域のガス密度が大きい ( $> 1 \text{ arcmin}$  程度において) 天体は、銀河中心から外に逃げた光子に対し共鳴散乱を含む物理現象が起こりやすいため、中心から離れた領域からも同様に光子が観測されたと考えられる。この影響で NGC5846、NGC4472 の解析においては  $0' \sim 1'$  に十分な光子が残らず、乱流による共鳴散乱の影響の変化が小さくなった。一方、NGC4636 とガス密度が同程度あるいは小さい天体では比較的イメージも比較的球状あるいは楕円形を保っており、結果も共鳴散乱断面積の作用と矛盾していない。

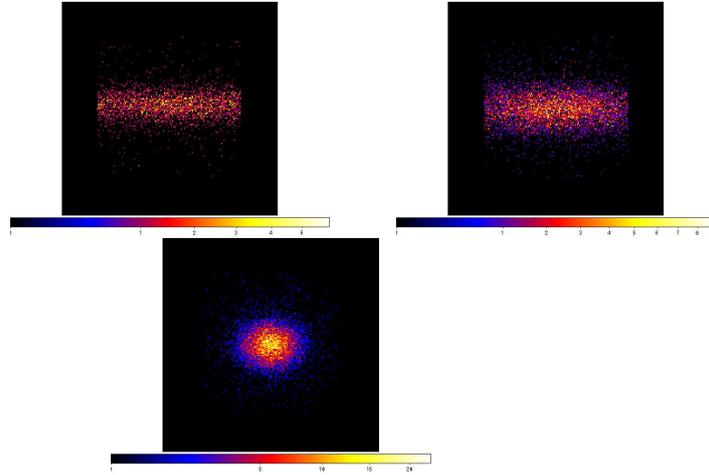


図 6.4: NGC5846(左上)、NGC4472(右上)NGC1399(下)における Geant4 のイメージ。

また、XIS の観測データと比較すると、各天体における乱流の速度の適切な値は、NGC4636、NGC4649、NGC4406 においては  $M=0.5$  程度、NGC4472、NGC1404、NGC720 は  $M=0 \sim 0.5$  の間程度、NGC1399、NGC5044 は  $M=0.5 \sim 1.0$  の間程度が適切な値だと予想される。

また、NGC5846、NGC1316 に関しては誤差を考慮しない場合、適切だと判断できる値は無かったため、本研究で想定したような漢鏡に加え、何らかの他の物理現象の想定が必要だと予想される。

本研究における Geant4 による解析は現状では比較的単純な構造を想定したが、本来は構造を連続的に表現する、正確なイオン存在比を半径ごとに導入することでより正確な結果が得られると予想される。

## 第7章 考察、まとめ

### 7.1 各天体における共鳴散乱と他パラメータの相関

ここまでで示した共鳴散乱の様相は、何らかのパラメータに比例して起こりやすさが決まっていると考えられ、実際に Optical depth と共鳴散乱断面積は式の上では相関があり、他にも温度や軟 X 線光度と相関があるのではないかと考えられる。故に本節では、各天体の共鳴散乱の規模と他パラメータの相関を検証する。温度 ( $kT$ ) 及び中心密度  $n_0$  は本研究で導出した値を用い、軟 X 線光度は Fukazawa et al.2006 を参考にした。また、Optical depth は乱流の速度によって値が変わるため、 $M=0$  での値に対して相関を検証し、また Geant4 を用いて求めた共鳴散乱の規模と Optical depth の相関も検証した。

天体	温度 (keV)	$L_{X,soft}$ (erg/s)	$n_0$ (cm <sup>-3</sup> )
NGC4636	0.633	$2.3 \times 10^{41}$	6.14e-2
NGC4649	0.774	$1.1 \times 10^{41}$	1.78e-1
NGC4472	0.805	$1.8 \times 10^{41}$	4.07e-2
NGC1404	0.624	$1.2 \times 10^{41}$	7.00e-2
NGC1399	0.833	$2.7 \times 10^{41}$	3.51e-2
NGC5044	0.833	$1.9 \times 10^{42}$	5.95e-2
NGC5846	0.772	$2.6 \times 10^{41}$	7.25e-2
NGC4406	0.649	$2.0 \times 10^{40}$	6.26e-2
NGC720	0.474	$3.7 \times 10^{40}$	5.85e-2
NGC1316	0.586	$3.9 \times 10^{40}$	2.97e-2
NGC4374	0.641	$4.5 \times 10^{40}$	3.61e-2
NGC4382	0.37	$1.2 \times 10^{40}$	2.90e-2

表 7.1: 天体の各パラメータと各天体の共鳴散乱の様相の比較。

天体	XIS	RGS
NGC4636	0.80±0.07	0.53±0.13
NGC4649	0.92±0.16	0.66±0.30
NGC4472	0.76±0.23	0.49±0.14
NGC1404	0.82±0.10	0.46±0.16
NGC1399	1.15±1.03	0.75±0.35
NGC5044	1.07±0.60	0.81±0.35
NGC5846	0.79±0.10	0.59±0.16
NGC4406	0.86±0.24	0.53±0.25
NGC720	0.80±0.12	0.23±0.23
NGC1316	0.72±0.27	0.60±0.21
NGC4374	×	0.46±0.17
NGC4382	×	0.51±1.34

表 7.2: 全天体での各パラメータでの  $X_{rs}/X_{nors}$  ( $X = I_{0.826keV}/I_{0.727keV}$ )。

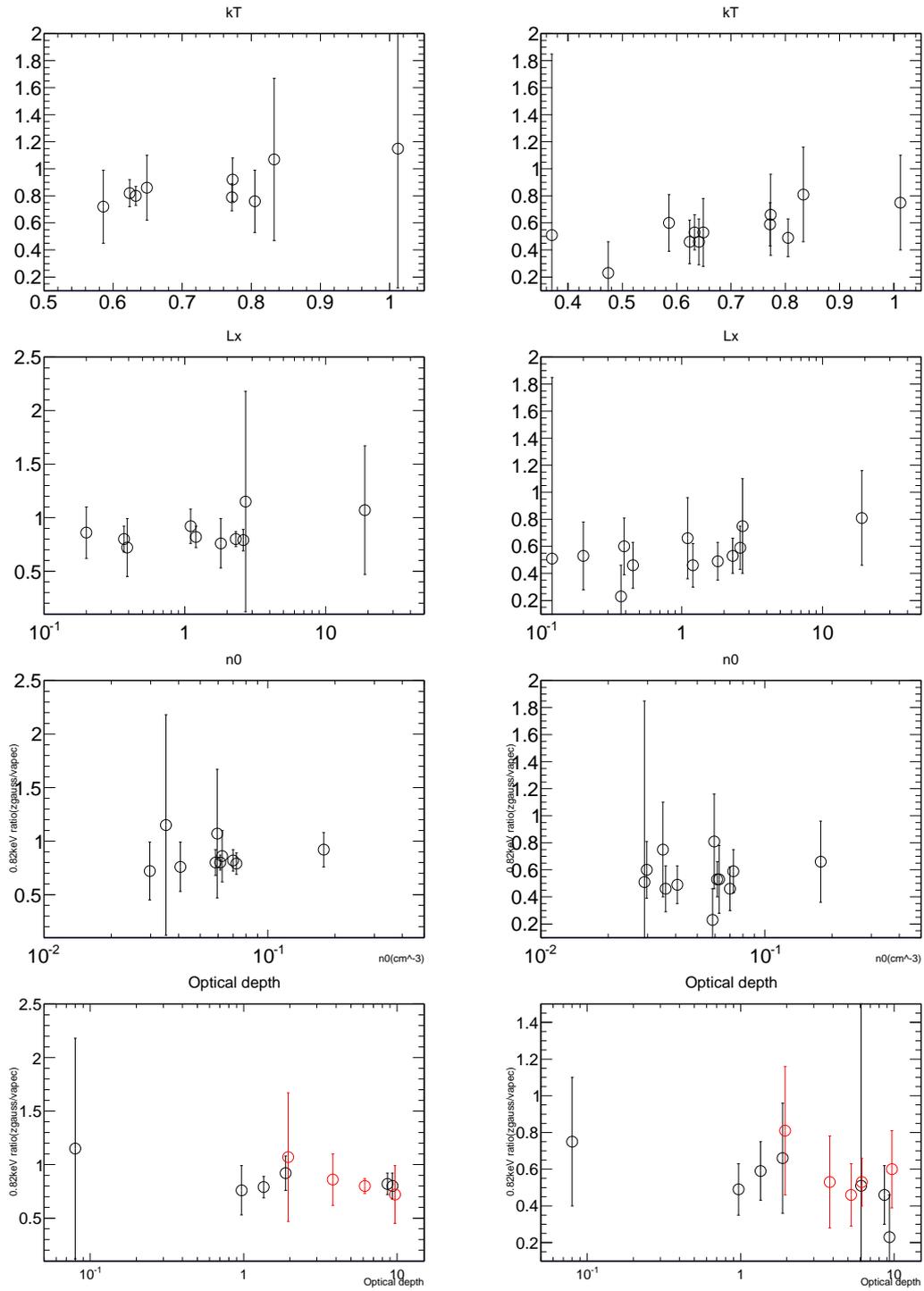


図 7.1: 各天体の共鳴散乱の様相とパラメータの関係性。左の図が XIS、右の図が RGS の結果である。縦軸は  $X_{rs}/X_{nors}$ 、横軸は上から順に温度  $kT$ (keV)、軟 X 線光度  $L_x$ (erg/s)、中心密度  $n_0$ ( $\text{cm}^{-3}$ )、Optical depth である。温度以外の図は、横軸は log プロットとしている。

図 7.1 及び図 7.2 は各々縦軸は  $X_{rs}/X_{nors}$ 、横軸は図のタイトルに記載したパラメータである。XIS、Geant4 の図に関しては NGC4374、NGC4382 を除いた 10 天体としており、RGS の図では全 12 天体をプロットしている。

上の図からは、温度に関してはやや右肩上がりの相関が見られるものの、はっきりとした相関は見られなかった。特に温度や軟 X 線光度に関しては、大きすぎると逆に対象の輝線が見えづらくなるという点も含まれるため、単純な右肩上がりで共鳴散乱の起こりやすさを表記することは難しいと考えられる。しかし、将来検出器によるより精度の良い共鳴散乱の観測結果が得られれば、より明確な相関が得られる可能性を示唆した。

## 7.2 まとめ

本研究では X 線天文衛星「すざく」XIS、「XMM-Newton」EPIC、RGS、またシミュレーションプログラム「Geant4」を用いた楕円銀河 ISM 内部で起こる共鳴散乱に対して様々な角度からの研究を行った。

12 の楕円銀河に対し解析を行った結果、XIS、RGS の結果を鑑みて、内 9 つの楕円銀河に対して共鳴散乱らしき様相を確認することが出来た。先行論文にも記載の通り、NGC4636 に似た光度や温度を持つ天体において特に共鳴散乱が起こりやすいことが判断できたが、軟 X 線光度が一桁ほど低い天体に対しても同様に共鳴散乱らしき影響を確認することが出来、より分解能の高い検出器が将来開発されれば、これらの天体に対しても正確に共鳴散乱の影響を定量的に確認できると考えられる。

また、銀河内乱流について考察を行った所、Optical depth の値との兼ね合いから、Optical depth が一般的な値をとるのは  $M=0.3 \sim 0.7$  程度の領域であり、更に Geant4 での解析から、天体ごとにある程度適切な  $M$  の値を導出した。Geant4 による解析はまだ簡易的な内容であり、より正確に銀河周辺環境を再現すると、乱流速度に関してもより正確な値が得られるかもしれない。

# appendix

## VAPEC モデルによるフィッティング結果

### NGC4649

- XIS

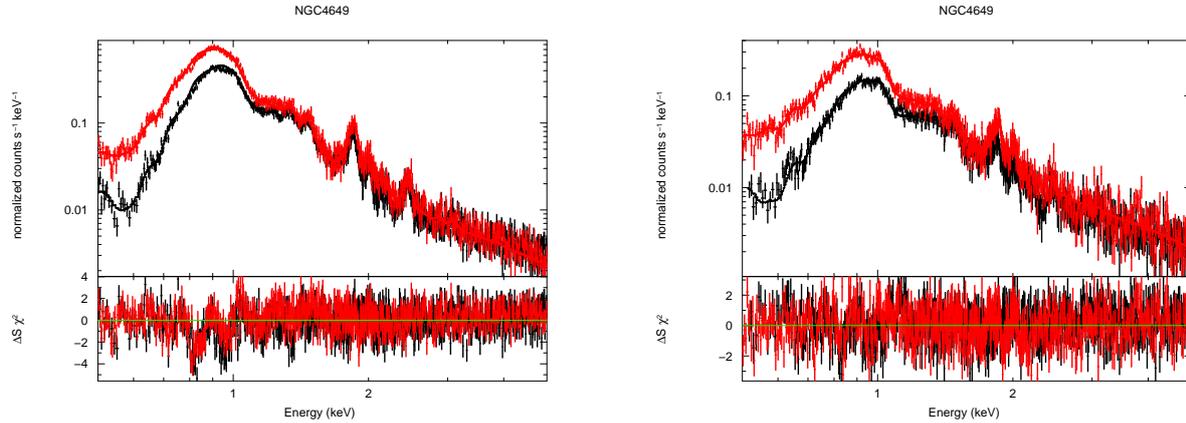


図 7.2: NGC4649 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC4649	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{ cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{ norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{ norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.772 \pm 0.034$	×	$6.84 \pm 0.21$	$1.006 \pm 0.015$	$1.93 \pm 0.45$	×
2'-4'	$0.766 \pm 0.006$	×	$6.77 \pm 1.35$	$0.339 \pm 0.028$	$1.69 \pm 0.274$	×

表 7.3: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{ norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

XIS のスペクトルには 0.8 ~ 1.0 keV に不自然な残差が存在するが、共鳴散乱輝線以外の部分のフィットも同様に安定していないため、共鳴散乱による影響と断定は出来ない。この天体は一温度モデルで表され、温度や地球との距離  $D$  も NGC4636 に近いことから、比較的 NGC4636 に近い天体なので、共鳴散乱の影響が大きく見られないのは別の要因が存在すると思われる。

- RGS

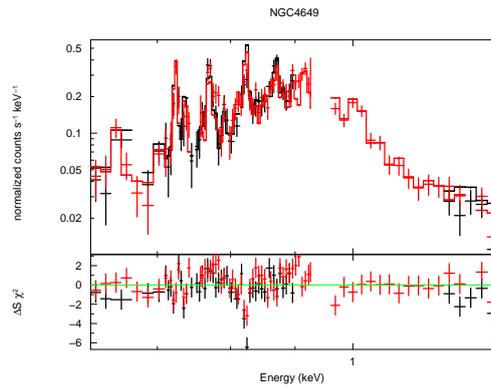


図 7.3: RGS による NGC4649 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC4649	$0.774 \pm 0.225$	$5.79 \pm 26.1$	$1.539 \pm 0.119$	$0.64 \pm 0.45$

表 7.4: RGS におけるフィッティング結果。

RGS でのフィッティング結果は XIS と比較しても、0.826keV 付近に共鳴散乱らしき残差が明確に見えているため、この天体においても共鳴散乱が起こっていると判断した。先行研究である Werner et al.2009 においても同様に RGS による NGC4649 の解析が行われたが、その結果では NGC4649 における共鳴散乱らしき影響は小さい、と記載されていた。Werner et al. のスペクトルを見ても比較的よくフィットできているように見受けられるため、結果が異なった原因は見解決である。

## NGC4472

- XIS

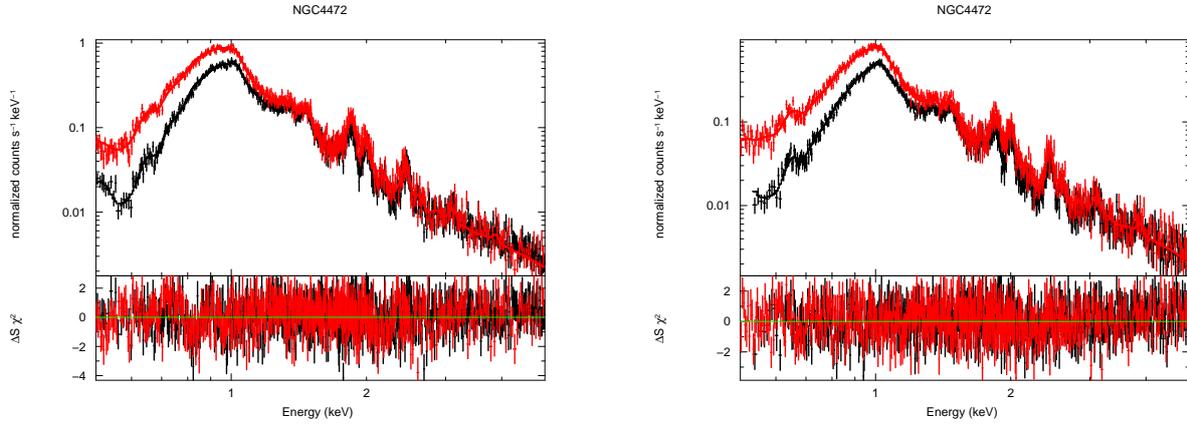


図 7.4: NGC4472 の 0-2 分角でのスペクトル (左)、2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC4472	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.778 \pm 0.005$	$1.314 \pm 0.185$	$3.02 \pm 1.02$	$1.055 \pm 0.053$	$1.57 \pm 0.22$	$1.01 \pm 0.15$
2'-4'	$0.826 \pm 0.007$	$1.42 \pm 0.08$	$3.85 \pm 1.27$	$1.22 \pm 0.09$	$0.96 \pm 0.14$	$1.38 \pm 0.15$

表 7.5: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

この天体は NGC4636 と似た特徴を持つものの、一温度モデルでは正しくフィッティングされなかったため、二温度モデルを用いてフィッティングを行った。このフィッティングにより 0'-2' の領域に 0.8keV 付近の成分と 1.4keV 付近の成分が同居しているのが見て取れる。

また、共鳴散乱らしき残差が 0.826keV 付近に確認されるが、NGC4636 と比較すると外見上は軽微である。NGC4636 と同じ Virgo 銀河団にいながらこういった差が出るのは、単純に NGC4636 より温度が高いことから乱流が活発化していることが原因と予想される。

- RGS

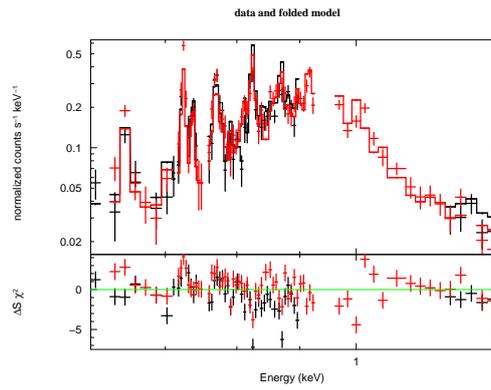


図 7.5: RGS による NGC4472 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC4472	$0.805 \pm 0.210$	$2.12 \pm 44.6$	$3.699 \pm 0.191$	$0.34 \pm 0.52$

表 7.6: RGS におけるフィッティング結果。

RGS での結果はやや  $\Delta S\chi^2$  が荒れるものの、共鳴散乱輝線付近に共鳴散乱の影響らしき残差が見えている。NGC4472 に関して、Werner et al.2009 では共鳴散乱の影響が大きく現われる天体として挙げられており、この点での結果は先行研究と一致した。

## NGC1404

- XIS

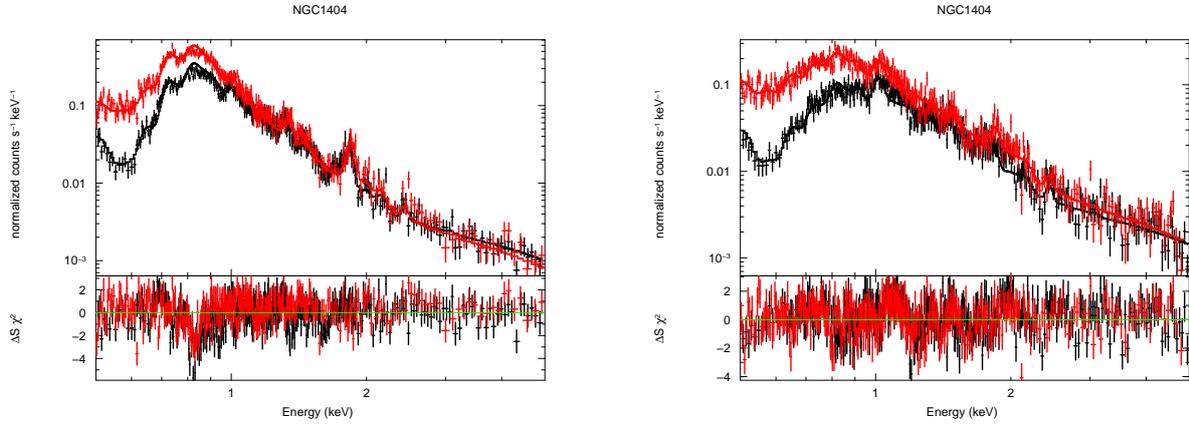


図 7.6: NGC1404 の 0-2 分角でのスペクトル (左) 2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC1404	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.589 \pm 0.004$	×	$1.31 \pm 1.20$	$0.527 \pm 0.02$	$2.79 \pm 0.44$	×
2'-4'	$0.593 \pm 0.013$	$1.59 \pm 0.07$	$1.41 \pm 0.53$	$0.48 \pm 0.08$	$0.57 \pm 0.15$	$1.16 \pm 0.18$

表 7.7: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

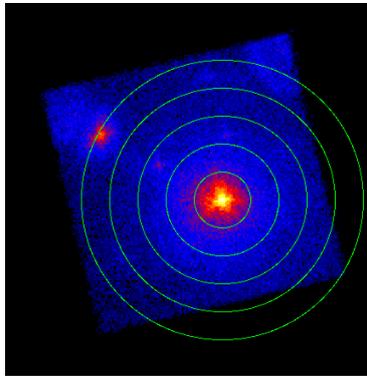


図 7.7: XIS で撮像した NGC1399 のイメージ。画像の左上に写り込んでいる天体が NGC1404 である。

NGC1404 はすざくによる単体での観測結果は存在せず、NGC1399 の観測データの隅に写り込んでいるものしかデータはない。なので本研究でも NGC1399 の観測データから NGC1404 に着眼して解析を行ったが、2'-4' での観測結果に NGC1399 の成分が混ざってしまっている。故に本研究では 2'-4' の NGC1399 の成分を考慮して二温度モデルでフィッティングしている。

共鳴散乱の成分は、天体自身の温度が低いいためか共鳴散乱の影響がとても良く見えている。

- RGS

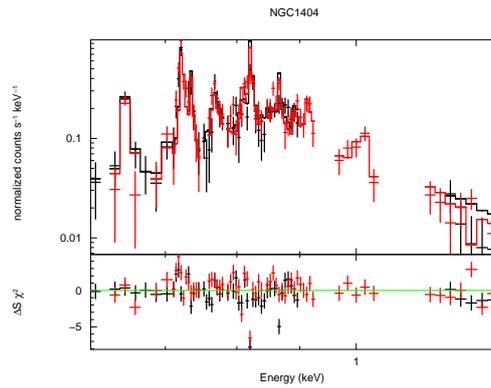


図 7.8: RGS による NGC1404 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC1404	$0.624 \pm 0.317$	$3.74 \pm 64.1$	$0.629 \pm 0.048$	$1.34 \pm 0.879$

表 7.8: RGS におけるフィッティング結果。

RGS でも XIS と同様、0.826keV 帯域に共鳴散乱らしき残差が大きく見えており、同時に周りのエネルギー帯域のフィッティングも比較的安定している。

Werner et al.2009 の結果では、本研究と同様共鳴散乱らしき影響が見受けられたと記述があり、最終的には NGC4649 を除いた結果はこの先行論文とほぼ一致するという結果が得られた。

## NGC1399

- XIS

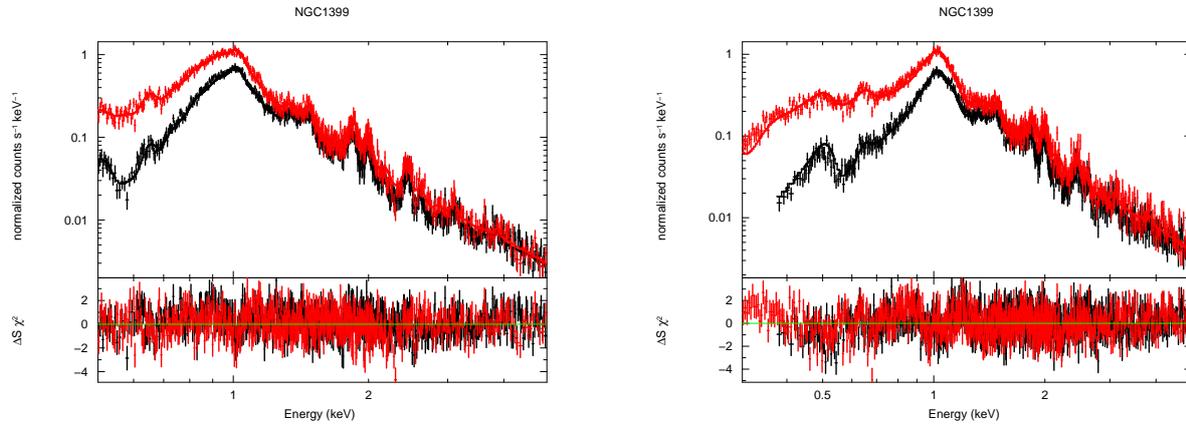


図 7.9: NGC1399 の 0-2 分角でのスペクトル (左)、2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC1399	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.810 \pm 0.007$	$1.41 \pm 0.04$	$5.79 \pm 0.83$	$0.84 \pm 0.07$	$1.29 \pm 0.15$	$1.78 \pm 0.16$
2'-4'	$0.871 \pm 0.088$	$1.49 \pm 0.05$	$4.07 \pm 0.67$	$0.68 \pm 0.04$	$0.75 \pm 0.37$	$3.55 \pm 0.32$

表 7.9: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

NGC1399 は本研究で選定した楕円銀河の中で最も温度が高く、他の銀河のスペクトルと比較しても高エネルギー側のデータがよくとれており、発達している。

共鳴散乱の影響は、NGC4636 と似たガス密度、地球からの距離であるにも関わらず全く見受けられない。この原因も NGC1399 の温度が非常に高く、乱流速度が大きくなったため共鳴散乱が起こりづらいと予想される。

- RGS

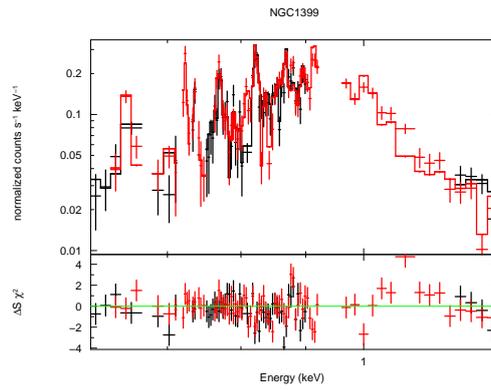


図 7.10: RGS による NGC1399 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC1399	$0.833 \pm 0.262$	$2.36 \pm 0.312$	$4.21 \pm 0.33$	$0.17 \pm 0.25$

表 7.10: RGS におけるフィッティング結果。

RGS の分解能でもやはり共鳴散乱らしき影響は外見上は見受けられない。観測の exposure time 自体は十分な量であるため、共鳴散乱はこの天体では殆ど起こっていないと判断できる。

## NGC5044

- XIS

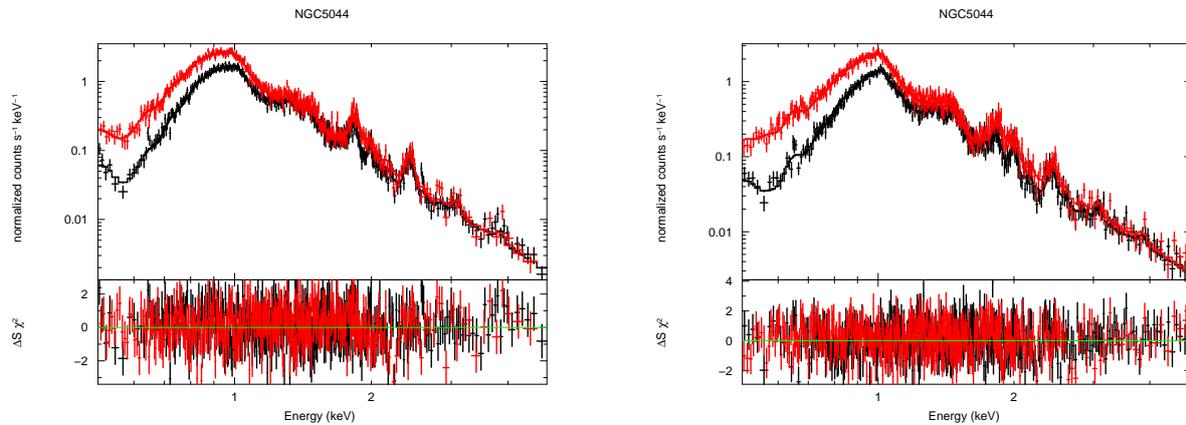


図 7.11: NGC5044 の 0-2 分角でのスペクトル (左)、2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC5044	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.748 \pm 0.017$	$1.101 \pm 0.059$	$8.60 \pm 1.45$	$0.58 \pm 0.05$	$8.45 \pm 0.69$	$4.96 \pm 0.89$
2'-4'	$0.797 \pm 0.022$	$1.27 \pm 0.04$	$9.38 \pm 1.81$	$0.82 \pm 0.08$	$3.84 \pm 0.55$	$5.50 \pm 0.80$

表 7.11: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

NGC5044 は前章に記載の通り、NGC4636 等の楕円銀河と比較して光度が 1 オーダーほど高く、スペクトル自身も normalization が他の天体に比べて高いのがスペクトル及び表から見て取れる。

中心部、外縁部共によくフィッティングされており、共鳴散乱らしき影響は外見からは存在しないように判断できる。

- RGS

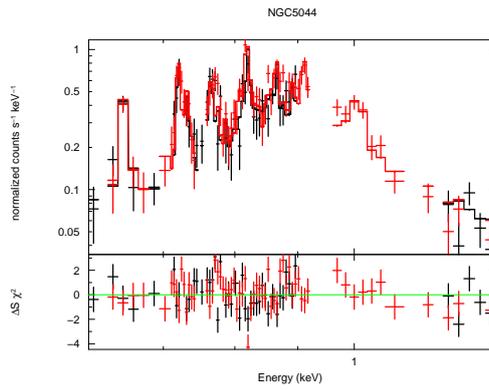


図 7.12: RGS による NGC5044 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC5044	$0.771 \pm 0.294$	$7.82 \pm 27.2$	$2.095 \pm 0.141$	$1.10 \pm 0.93$

表 7.12: RGS におけるフィッティング結果。

RGS のフィッティング結果からは NGC4649 と同様、XIS の観測では見えなかった 0.826keV の残差が生まれていますが、共鳴散乱による  $\Delta S\chi^2$  の値が他の天体より小さい。Werner et al.2009 では、NGC5044 や M87 のような熱く巨大な系では  $Fe^{16+}$  の輝線が弱くなり、共鳴散乱が測定できなかったと記述があり、この点も Werner et al. と矛盾はない。

## NGC5846

- XIS

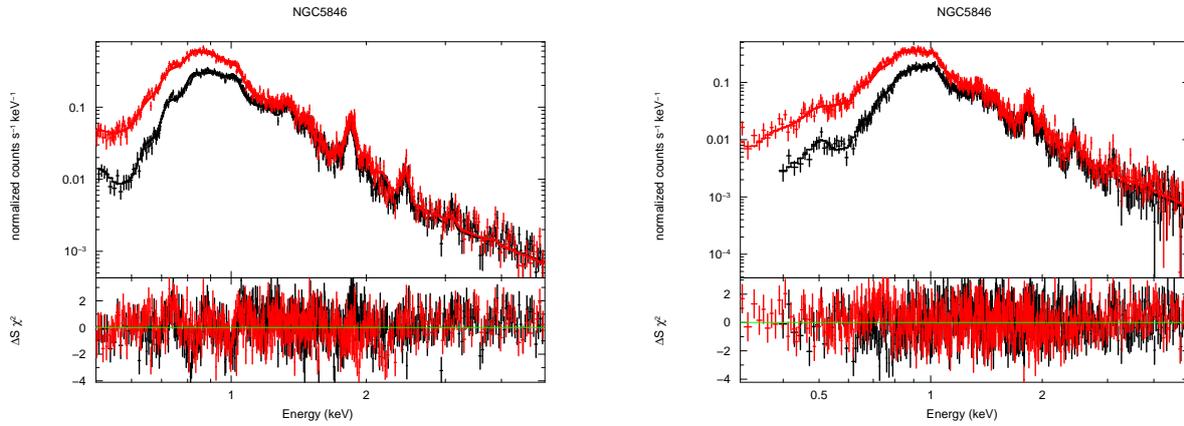


図 7.13: NGC5846 の 0-2 分角でのスペクトル (左)、2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC5846	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.571 \pm 0.339$	$0.784 \pm 0.397$	$4.85 \pm 1.17$	$0.665 \pm 0.041$	$1.16 \pm 0.20$	$1.07 \pm 0.21$
2'-4'	$0.678 \pm 0.008$	$1.15 \pm 0.04$	$3.23 \pm 0.81$	$0.66 \pm 0.07$	$0.88 \pm 0.14$	$0.58 \pm 0.10$

表 7.13: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

NGC5846 でも NGC4649 と同様、共鳴散乱輝線付近のフィッティングがやや荒れており、外見のみで共鳴散乱だと断言することは難しい。NGC4636 と比較すると、温度や軟 X 線光度等のパラメータはかなり性質に近いが、地球からの距離が NGC4636 と比べてやや遠いため共鳴散乱の影響を含めて観測データはやや精度が悪くなっていると予想される。

- RGS

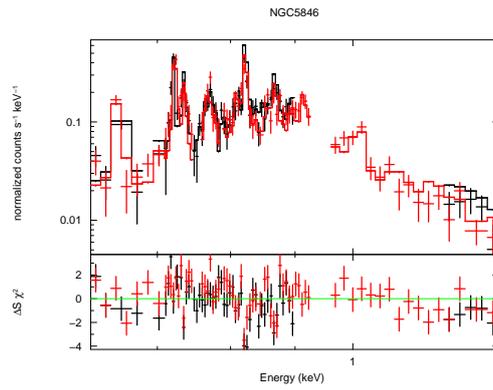


図 7.14: RGS による NGC5846 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC5846	$0.65 \pm 0.25$	$4.61 \pm 53$	$1.84 \pm 0.094$	$0.37 \pm 0.28$

表 7.14: RGS におけるフィッティング結果。

RGS の結果では明確な共鳴散乱らしき残差が生まれている。NGC4636 等と比較するとやはり  $\Delta S\chi^2$  の値は小さくなっているため、地球からの距離が離れることで単純に共鳴散乱の影響が見えづらくなっていると予想される。

# NGC4406

- XIS

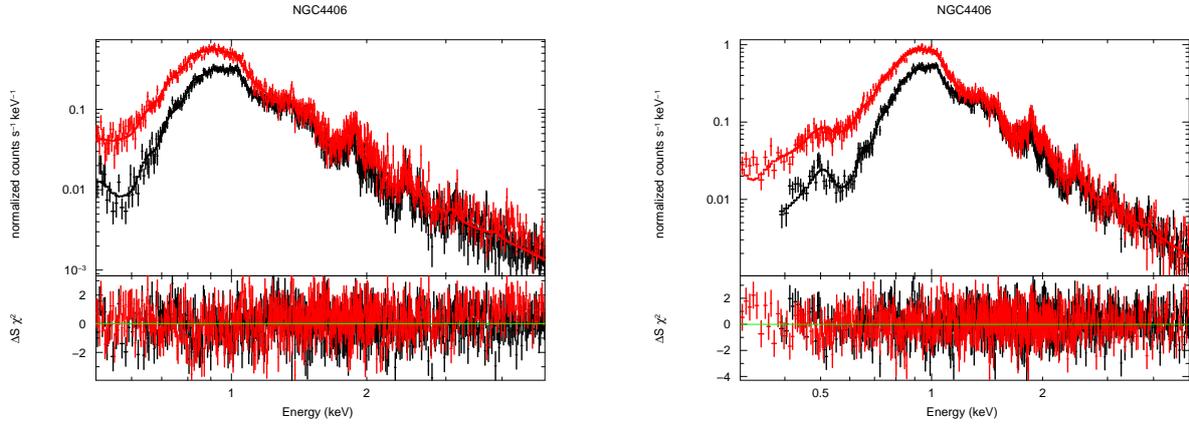


図 7.15: NGC4406 の 0-2 分角でのスペクトル (左)、2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC4406	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20}cm^{-2})$	Fe	$V_1norm(\times 10^{-3})$	$V_2norm(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.723\pm 0.019$	$1.341\pm 0.107$	$5.85\pm 1.77$	$0.87\pm 0.07$	$1.45\pm 0.28$	$0.63\pm 0.21$
2'-4'	$0.756\pm 0.007$	$1.45\pm 0.07$	$2.64\pm 0.60$	$0.69\pm 0.06$	$2.67\pm 0.29$	$1.57\pm 0.13$

表 7.15: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1norm$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

NGC4406 及び、以降掲載する 4 天体を含めた 5 天体は NGC4636 等と比較して光度オーダーが一桁低いものを選定している。スペクトル上では共鳴散らしき影響ははっきりとは見られない。

NGC4636 とパラメータを比較しても光度以外のパラメータ (温度、地球との距離) は非常に近い値をとるため、共鳴散乱に光度の影響もある程度存在するか、あるいは XIS の分解能では光度オーダーが低い天体からの共鳴散乱の観測は難しいと判断できる。

- RGS

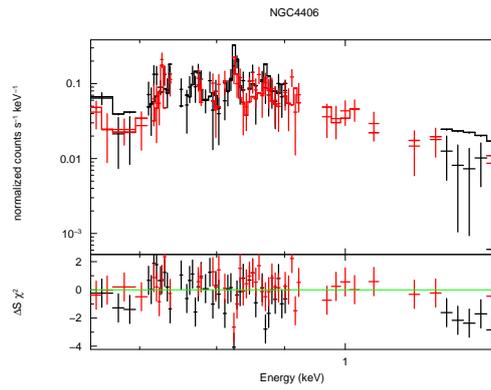


図 7.16: RGS による NGC4406 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC4406	$0.662 \pm 1.05$	$1.46 \pm 1.21$	$4.887 \pm 0.593$	$0.063 \pm 0.302$

表 7.16: RGS におけるフィッティング結果。

天体自体の光度が低いため、観測した光子が Bad Event になる確率が非常に高い。故にスペクトルに実用的なイベントを可能な限り残したが、データ点が非常に少なくなっている。

しかし 0.826keV 付近に残差は生じているため、共鳴散乱らしき存在は確認できたと言える。

## NGC720

- XIS

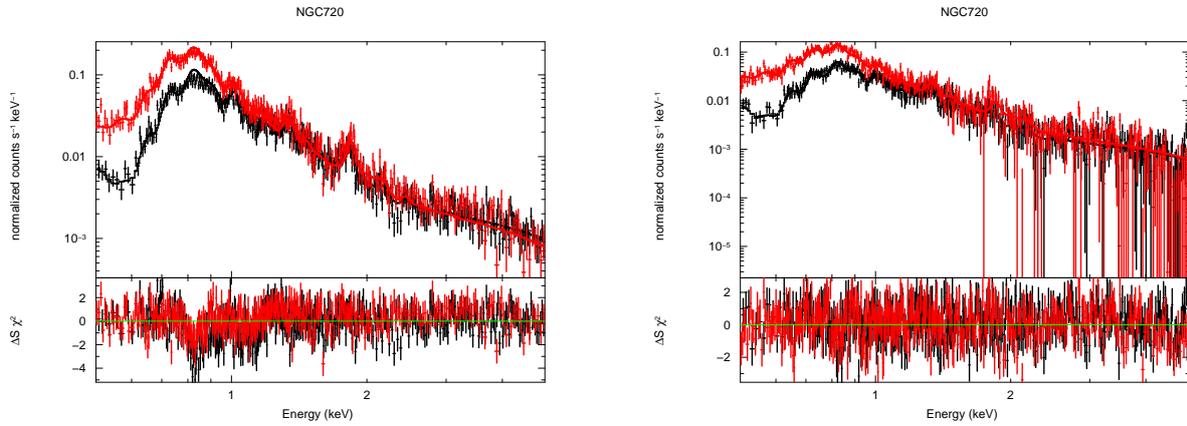


図 7.17: NGC720 の 0-2 分角でのスペクトル (左)、2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC720	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.557 \pm 0.004$	×	$1.58 \pm 1.67$	$1.08 \pm 0.027$	$0.26 \pm 0.13$	×
2'-4'	$0.32 \pm 0.08$	$0.57 \pm 0.02$	1.50(freeze)	$0.46 \pm 0.11$	$0.31 \pm 0.22$	$0.24 \pm 0.14$

表 7.17: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

ここまでで挙げた選定天体と比較すると、温度も比較的冷たく光度も低いため、normalization が他の天体と比較して非常に低い値を取っており、また 2'-4' のデータに関しては、高エネルギー領域のデータのエラーが大きくなった。エラーの影響で 2'-4' に関しては吸収係数  $N_H$  が安定しなかったため、中心と同様の値で固定してフィッティングを行った。

共鳴散乱らしき残差は大きく見えているため、共鳴散乱は強く起こっていると判断した。

- RGS

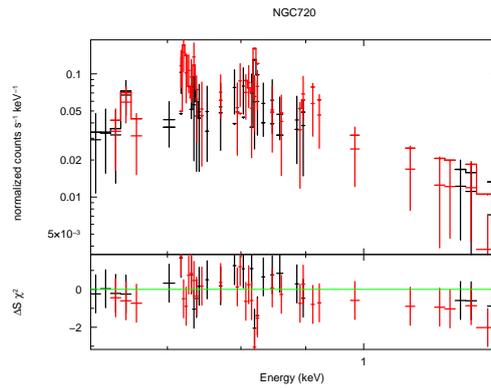


図 7.18: RGS による NGC720 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC720	$0.495 \pm 1.731$	$1.58 \pm 22.7$	$3.283 \pm 0.608$	$0.035 \pm 0.165$

表 7.18: RGS におけるフィッティング結果。

RGS の観測結果は、XMM-Newton が観測した際の exposure (露光時間) がやや短かったため、エラーがデータ全体を通して大きく、信頼性の高い結果は得られなかった。共鳴散乱らしき残差は生まれているが、この結果からは共鳴散乱が起っていると断定は出来ない。しかし XIS の結果からは共鳴散乱が起こっているという結果が得られているため、観測精度が高いデータを用いればよりはっきりと共鳴散乱の影響が観測できる可能性はある。

## NGC1316

- XIS

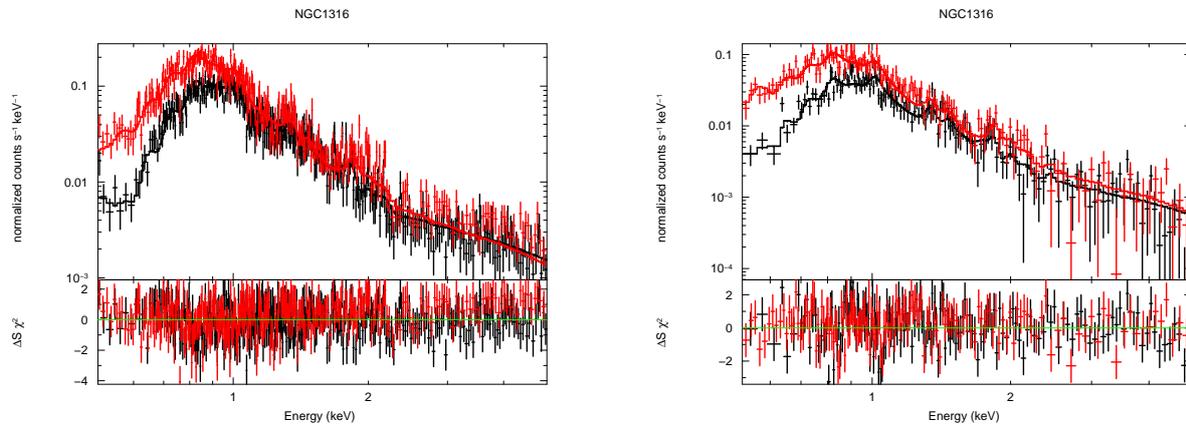


図 7.19: NGC1316 の 0-2 分角でのスペクトル (左)、2-4 分角でのスペクトル (右)

NGC1316	$kT_1$ (keV)	$kT_2$ (keV)	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1 \text{norm}(\times 10^{-3})$	$V_2 \text{norm}(\times 10^{-3})$
0'-2'	$0.499 \pm 0.031$	$0.899 \pm 0.34$	$1.17 \pm 0.80$	$1.27 \pm 0.62$	$0.23 \pm 0.38$	$0.16 \pm 0.24$
2'-4'	$0.51 \pm 0.04$	$1.05 \pm 0.71$	$0.83 \pm 1.90$	$1.06 \pm 0.64$	$0.12 \pm 0.38$	$0.10 \pm 0.27$

表 7.19: XIS におけるフィッティング結果。 $V_1 \text{norm}$  は VAPEC モデルの各 normalization である。

天体の光度が低いためか、特に 2'-4' においては表からも分かるように、データ自身のエラーが非常に大きくなっている。しかしフィッティングには二温度モデルを要し、ある程度熱いガスを有する天体である。

共鳴散らしき残差は外見上ははっきりとは見えないが、0.826keV 付近のデータ群が負の方向に凹んでいるのが外見から見受けられ、共鳴散らしき影響が確認できる。

- RGS

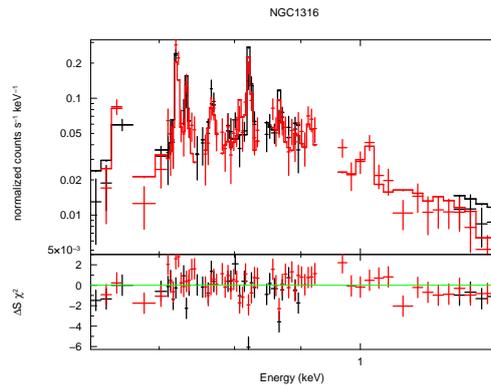


図 7.20: RGS による NGC1316 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC1316	$0.635 \pm 0.414$	$2.0 \pm 72.8$	$2.217 \pm 0.156$	$0.11 \pm 0.13$

表 7.20: RGS におけるフィッティング結果。

共鳴散らしき残差がはっきりと見えており、フィッティングも精度よくできているため共鳴散乱の存在にある程度の信憑性が持てる。フィッティングで得られた温度も比較的 NGC4636 に近く、NGC4636 に光度以外の特徴は近い天体だと判断できる。

## NGC4374

- RGS

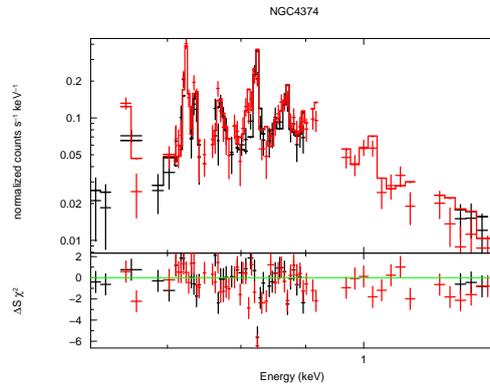


図 7.21: RGS による NGC4374 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC4374	$0.641 \pm 0.507$	$2.30 \pm 86.4$	$1.703 \pm 0.131$	$0.21 \pm 0.26$

表 7.21: RGS におけるフィッティング結果。

NGC4374、NGC4382 は「すざく」による観測結果が存在しないため RGS による結果のみになる。データ自体は比較的是っきりと取得ができており、また共鳴散乱らしき残差が明確に見えている。フィッティングも外見からは精度良くできていると判断できるため、共鳴散乱の影響が分かりやすく現れていると言える。

## NGC4382

- RGS

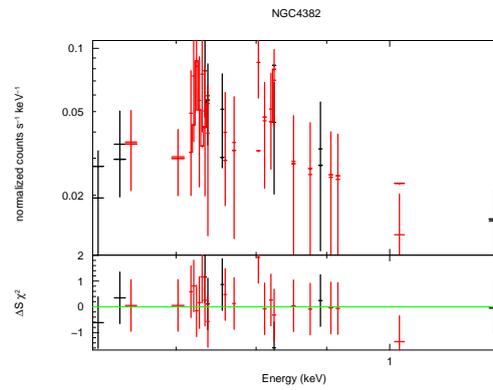


図 7.22: RGS による NGC4382 の VAPEC モデルでフィットしたスペクトル。

天体	$kT(\text{keV})$	$N_H(\times 10^{20} \text{cm}^{-2})$	Fe	$V_1(\times 10^{-3})$
NGC4382	$0.37 \pm$	2.5(freeze)	$0.522 \pm 0.325$	$0.10 \pm 4.36$

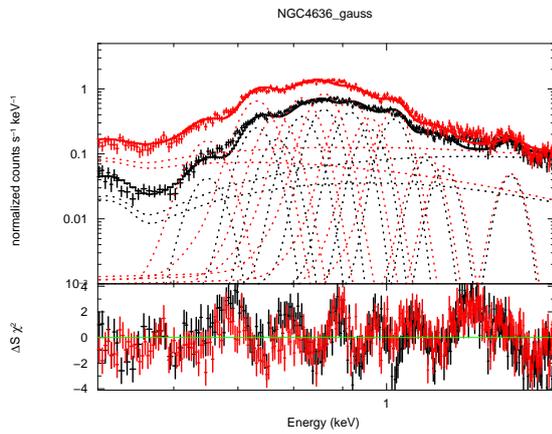
表 7.22: RGS におけるフィッティング結果。

他の天体と比較して観測の exposure が非常に小さいため、データのエラーバーが大きくなってしまった。共鳴散乱の影響は外見上は判断できないため、fake スペクトルへのフィッティングから判断する形になるが、正確な結果が得られるかは難しい。

# ZGAUSS モデルによるフィッティング結果

NGC4636

- XIS



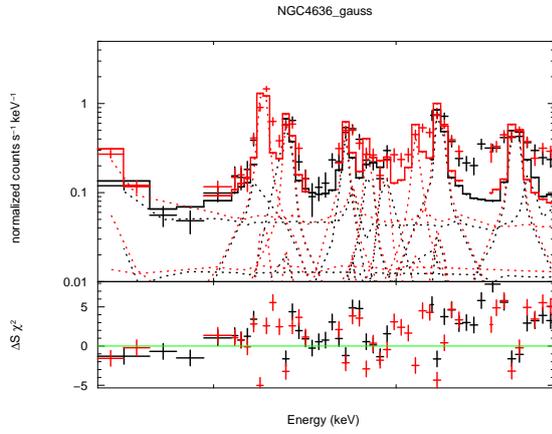
元素	E(keV)	flux
$O^{7+}$	0.651	$1.58 \pm 0.18$
$Fe^{16+}$	0.733	$4.97 \pm 0.23$
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$2.61 \pm 0.24$
$Fe^{16+}$	0.817	$4.59 \pm 0.21$
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$5.00 \pm 0.19$
$Ne^{8+}$	0.917	$3.83 \pm 0.16$
$Fe^{19+}$	0.962	$1.87 \pm 0.13$
$Ne^{9+}$	1.02	$2.34 \pm 0.09$
$Fe^{16+}$	1.10	$0.48 \pm 0.60$
$Mg^{10+}$	1.35	$0.23 \pm 0.04$

図 7.23: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右) を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.32 \pm 0.04$	0.32
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.07$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$0.53 \pm 0.05$	0.54
$Fe^{16+}$	0.817	$0.92 \pm 0.06$	1.16
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$1.01 \pm 0.06$	1.07
$Ne^{8+}$	0.917	$0.77 \pm 0.050$	0.82
$Fe^{19+}$	0.962	$0.38 \pm 0.03$	0.38
$Ne^{9+}$	1.02	$0.469 \pm 0.030$	0.509
$Fe^{16+}$	1.10	$0.10 \pm 0.01$	0.09
$Mg^{10+}$	1.35	$0.05 \pm 0.01$	0.04

図 7.24: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$1.86 \pm 0.25$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.80 \pm 0.11$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.55 \pm 0.14$
$Fe^{16+}$	0.826	$1.28 \pm 0.14$

図 7.25: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。 flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.19$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.43 \pm 0.08$	0.47
$Fe^{16+}$	0.812	$0.30 \pm 0.08$	0.37
$Fe^{16+}$	0.826	$0.69 \pm 0.12$	1.31

図 7.26: 各輝線の強度比

NGC4649

- XIS

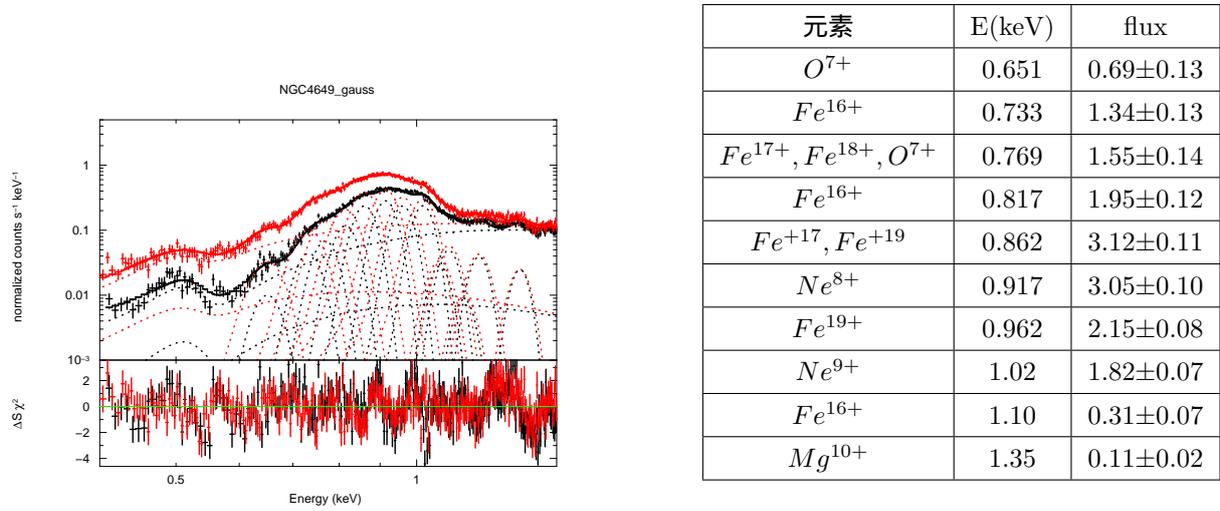
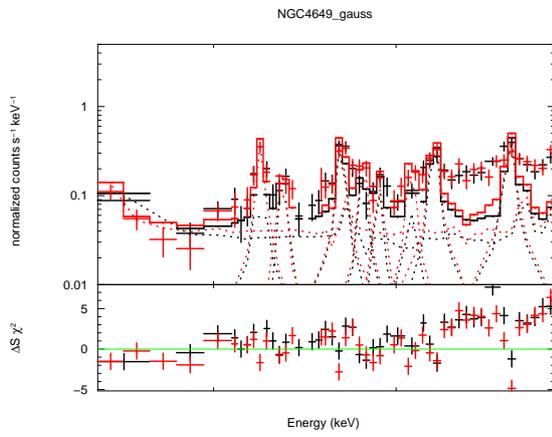


図 7.27: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.52 \pm 0.11$	0.45
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.14$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$1.16 \pm 0.15$	0.70
$Fe^{16+}$	0.817	$1.46 \pm 0.17$	1.59
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$2.33 \pm 0.24$	2.03
$Ne^{8+}$	0.917	$2.28 \pm 0.23$	1.91
$Fe^{19+}$	0.962	$1.60 \pm 0.17$	1.74
$Ne^{9+}$	1.02	$1.36 \pm 0.14$	1.19
$Fe^{16+}$	1.10	$0.23 \pm 0.06$	0.21
$Mg^{10+}$	1.35	$0.08 \pm 0.02$	0.10

図 7.28: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.48 \pm 0.12$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.19 \pm 0.07$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.28 \pm 0.09$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.60 \pm 0.10$

図 7.29: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.35$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.41 \pm 0.18$	0.55
$Fe^{16+}$	0.812	$0.59 \pm 0.23$	0.54
$Fe^{16+}$	0.826	$1.25 \pm 0.37$	1.89

図 7.30: 各輝線の強度比。

NGC4472

- XIS

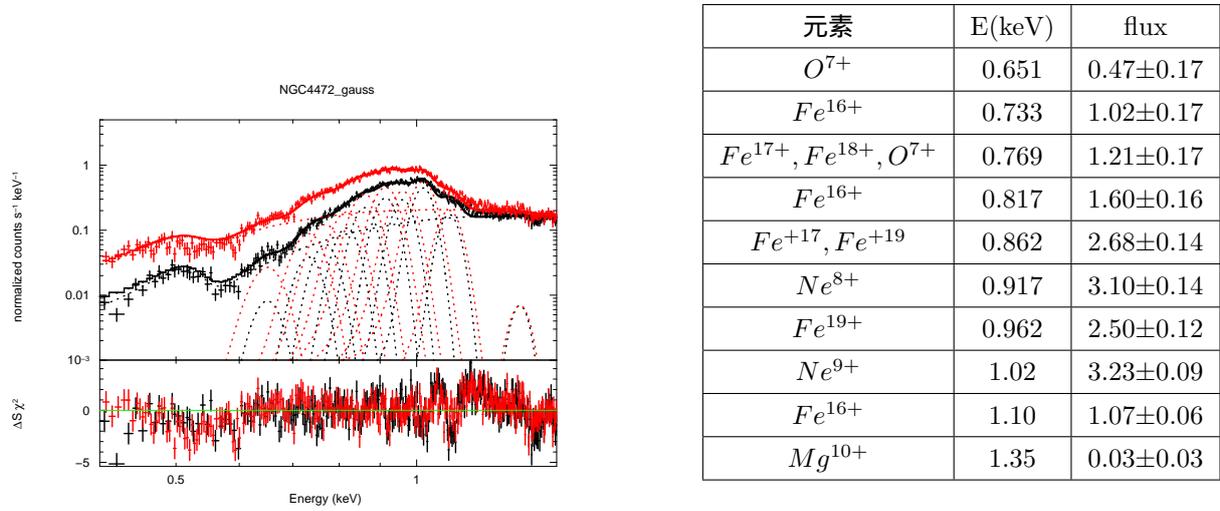
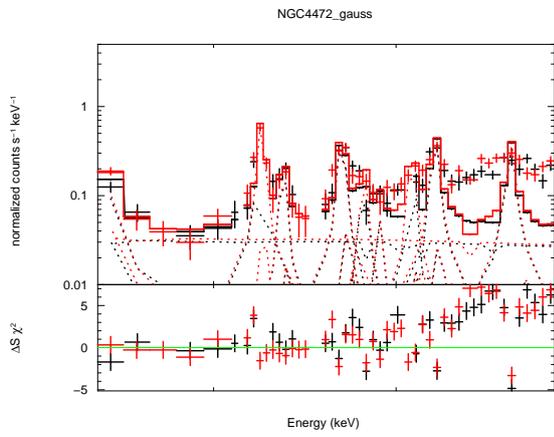


図 7.31: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.46 \pm 0.18$	0.49
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.23$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$1.19 \pm 0.26$	1.04
$Fe^{16+}$	0.817	$1.57 \pm 0.30$	2.08
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$2.64 \pm 0.46$	2.76
$Ne^{8+}$	0.917	$3.05 \pm 0.52$	3.08
$Fe^{19+}$	0.962	$2.46 \pm 0.42$	2.76
$Ne^{9+}$	1.02	$3.18 \pm 0.53$	3.38
$Fe^{16+}$	1.10	$1.05 \pm 0.18$	1.14
$Mg^{10+}$	1.35	$0.03 \pm 0.03$	0.05

図 7.32: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.59 \pm 0.10$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.18 \pm 0.05$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.25 \pm 0.07$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.52 \pm 0.07$

図 7.33: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.24$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.30 \pm 0.10$	0.49
$Fe^{16+}$	0.812	$0.43 \pm 0.14$	0.56
$Fe^{16+}$	0.826	$0.89 \pm 0.19$	1.82

図 7.34: 各輝線の強度比。

# NGC1404

- XIS

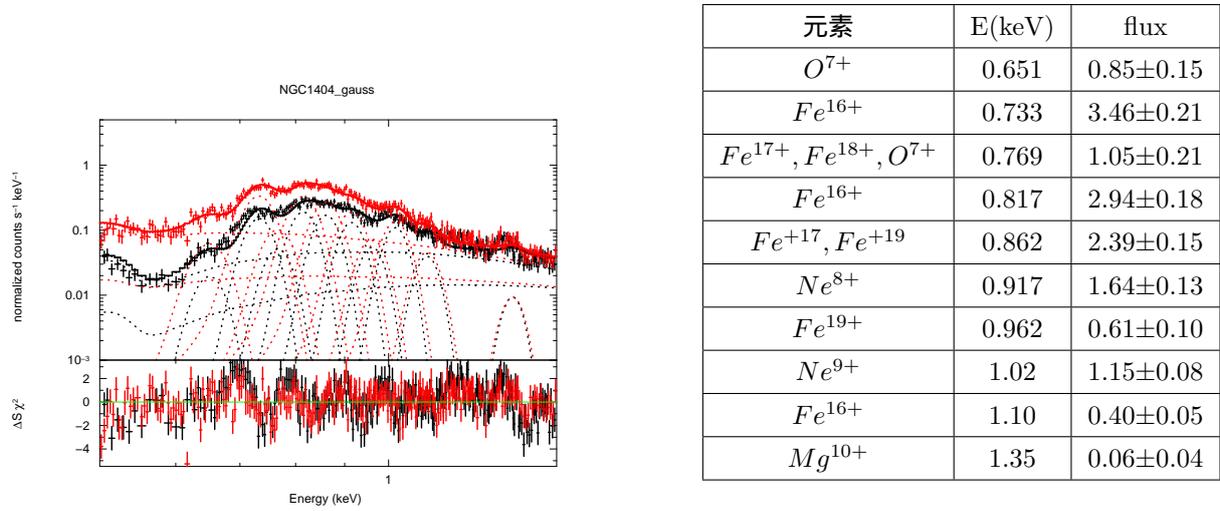
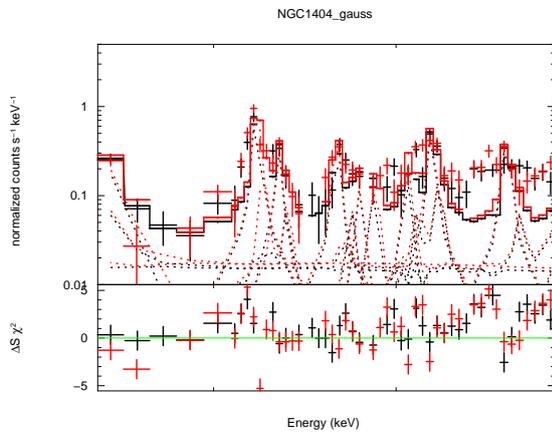


図 7.35: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右) を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.25 \pm 0.05$	0.25
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.09$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$0.31 \pm 0.06$	0.27
$Fe^{16+}$	0.817	$0.85 \pm 0.07$	1.03
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$0.69 \pm 0.06$	0.80
$Ne^{8+}$	0.917	$0.47 \pm 0.05$	0.48
$Fe^{19+}$	0.962	$0.18 \pm 0.03$	0.20
$Ne^{9+}$	1.02	$0.33 \pm 0.03$	0.31
$Fe^{16+}$	1.10	$0.12 \pm 0.02$	0.11
$Mg^{10+}$	1.35	$0.02 \pm 0.01$	0.03

図 7.36: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$1.17 \pm 0.20$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.42 \pm 0.11$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.31 \pm 0.10$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.72 \pm 0.13$

図 7.37: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.25$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.36 \pm 0.11$	0.52
$Fe^{16+}$	0.812	$0.26 \pm 0.10$	0.45
$Fe^{16+}$	0.826	$0.62 \pm 0.15$	1.35

図 7.38: 各輝線の強度比。

NGC1399

- XIS

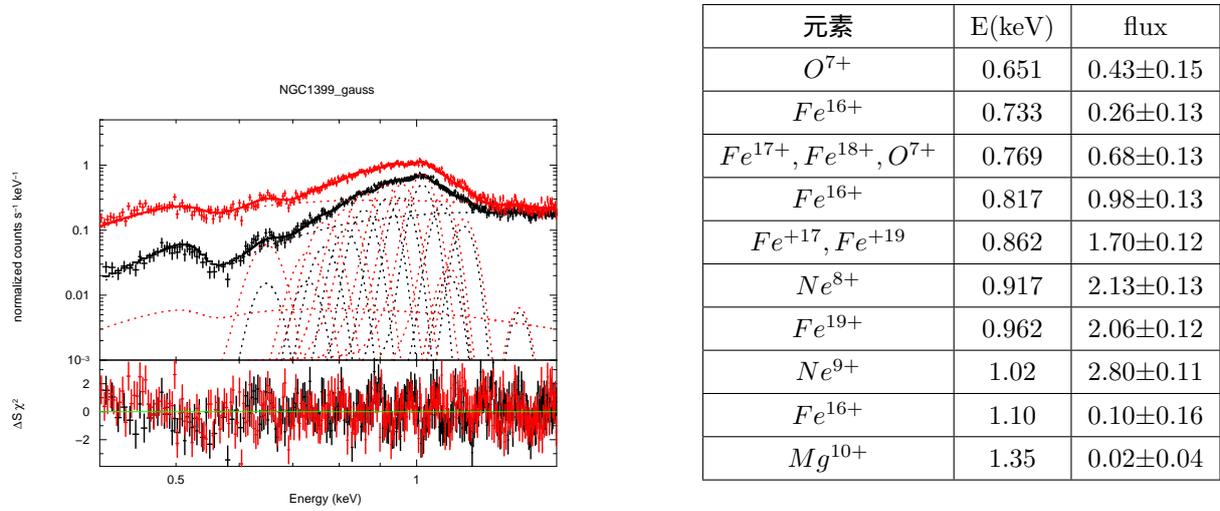
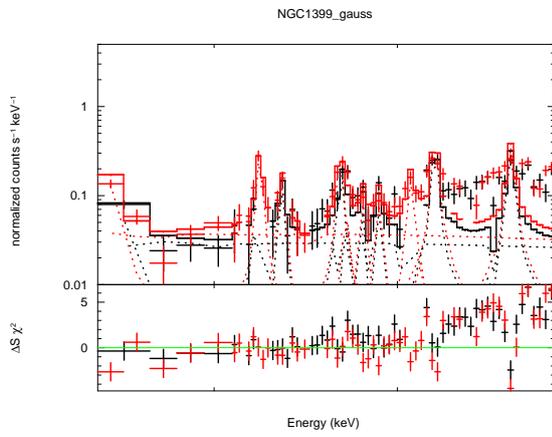


図 7.39: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$1.70 \pm 1.03$	1.66
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.73$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$2.67 \pm 1.46$	1.86
$Fe^{16+}$	0.817	$3.83 \pm 2.03$	3.34
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$6.67 \pm 3.46$	5.43
$Ne^{8+}$	0.917	$8.35 \pm 4.32$	6.70
$Fe^{19+}$	0.962	$8.08 \pm 4.18$	6.70
$Ne^{9+}$	1.02	$11.00 \pm 5.66$	10.20
$Fe^{16+}$	1.10	$0.38 \pm 0.64$	0.68
$Mg^{10+}$	1.35	$0.09 \pm 0.16$	0.04

図 7.40: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.24 \pm 0.06$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.13 \pm 0.04$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.15 \pm 0.05$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.39 \pm 0.05$

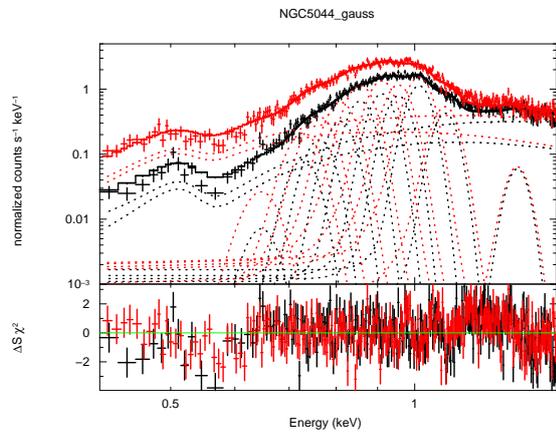
図 7.41: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.36$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.56 \pm 0.21$	0.55
$Fe^{16+}$	0.812	$0.63 \pm 0.26$	0.66
$Fe^{16+}$	0.826	$1.65 \pm 0.48$	2.20

図 7.42: 各輝線の強度比。

NGC5044

- XIS



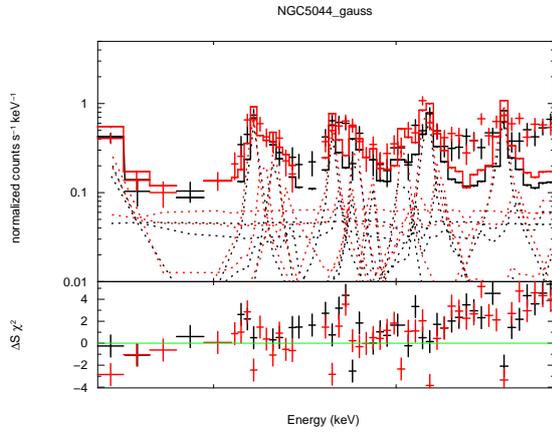
元素	E(keV)	flux
$O^{7+}$	0.651	$0.58 \pm 0.86$
$Fe^{16+}$	0.733	$2.95 \pm 0.92$
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$4.45 \pm 0.97$
$Fe^{16+}$	0.817	$6.17 \pm 0.82$
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$9.87 \pm 0.73$
$Ne^{8+}$	0.917	$10.50 \pm 0.71$
$Fe^{19+}$	0.962	$8.27 \pm 0.61$
$Ne^{9+}$	1.02	$9.91 \pm 0.42$
$Fe^{16+}$	1.10	$3.11 \pm 0.29$
$Mg^{10+}$	1.35	$0.32 \pm 0.16$

図 7.43: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.20 \pm 0.30$	0.16
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.44$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$1.51 \pm 0.57$	0.86
$Fe^{16+}$	0.817	$2.09 \pm 0.71$	1.95
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$3.35 \pm 1.07$	2.66
$Ne^{8+}$	0.917	$3.56 \pm 1.14$	2.62
$Fe^{19+}$	0.962	$2.80 \pm 0.90$	2.43
$Ne^{9+}$	1.02	$3.36 \pm 1.06$	2.72
$Fe^{16+}$	1.10	$1.05 \pm 0.34$	0.81
$Mg^{10+}$	1.35	$0.11 \pm 0.06$	0.09

図 7.44: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.96 \pm 0.22$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.42 \pm 0.18$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.51 \pm 0.19$
$Fe^{16+}$	0.826	$1.43 \pm 0.25$

図 7.45: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.32$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.44 \pm 0.21$	0.54
$Fe^{16+}$	0.812	$0.53 \pm 0.23$	0.51
$Fe^{16+}$	0.826	$1.49 \pm 0.43$	1.85

図 7.46: 各輝線の強度比。

NGC5846

- XIS

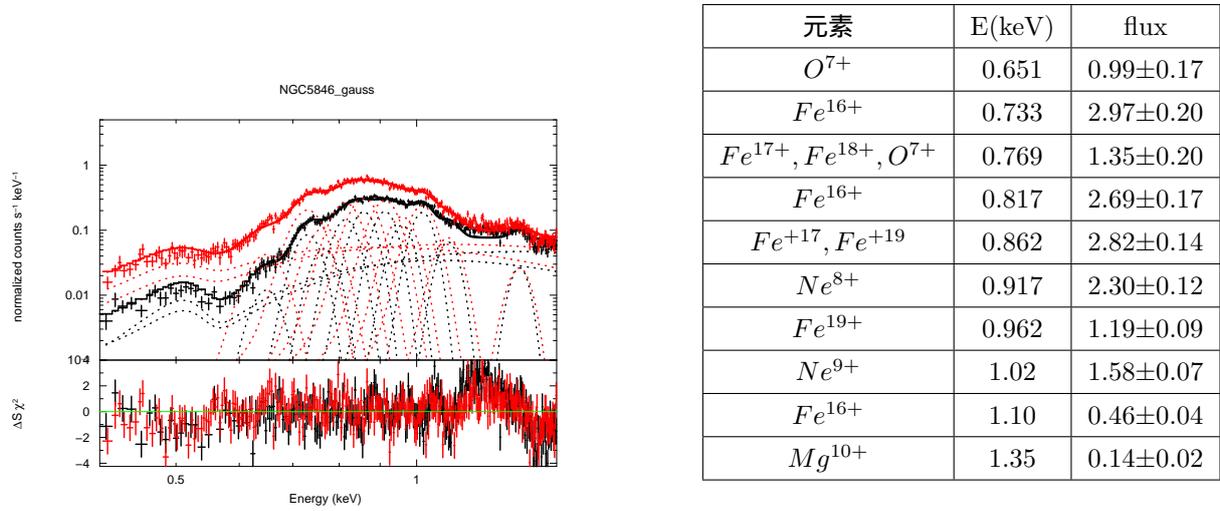
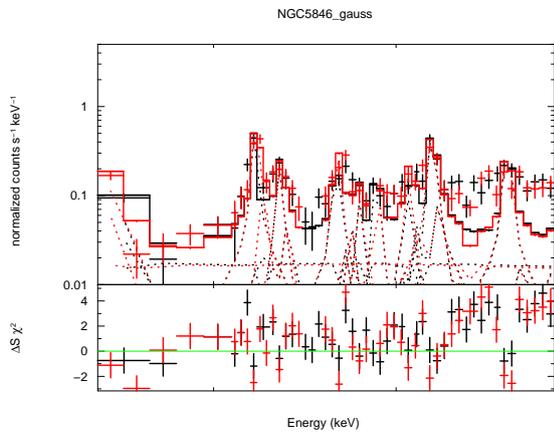


図 7.47: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右) を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.33 \pm 0.06$	0.35
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.09$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$0.45 \pm 0.07$	0.34
$Fe^{16+}$	0.817	$0.91 \pm 0.08$	1.14
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$0.95 \pm 0.08$	0.92
$Ne^{8+}$	0.917	$0.77 \pm 0.06$	0.79
$Fe^{19+}$	0.962	$0.40 \pm 0.04$	0.47
$Ne^{9+}$	1.02	$0.53 \pm 0.04$	0.57
$Fe^{16+}$	1.10	$0.16 \pm 0.02$	0.13
$Mg^{10+}$	1.35	$0.05 \pm 0.01$	0.04

図 7.48: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.86 \pm 0.12$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.31 \pm 0.08$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.26 \pm 0.08$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.73 \pm 0.10$

図 7.49: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.20$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.36 \pm 0.10$	0.54
$Fe^{16+}$	0.812	$0.31 \pm 0.10$	0.44
$Fe^{16+}$	0.826	$0.85 \pm 0.17$	1.44

図 7.50: 各輝線の強度比。

NGC4406

- XIS

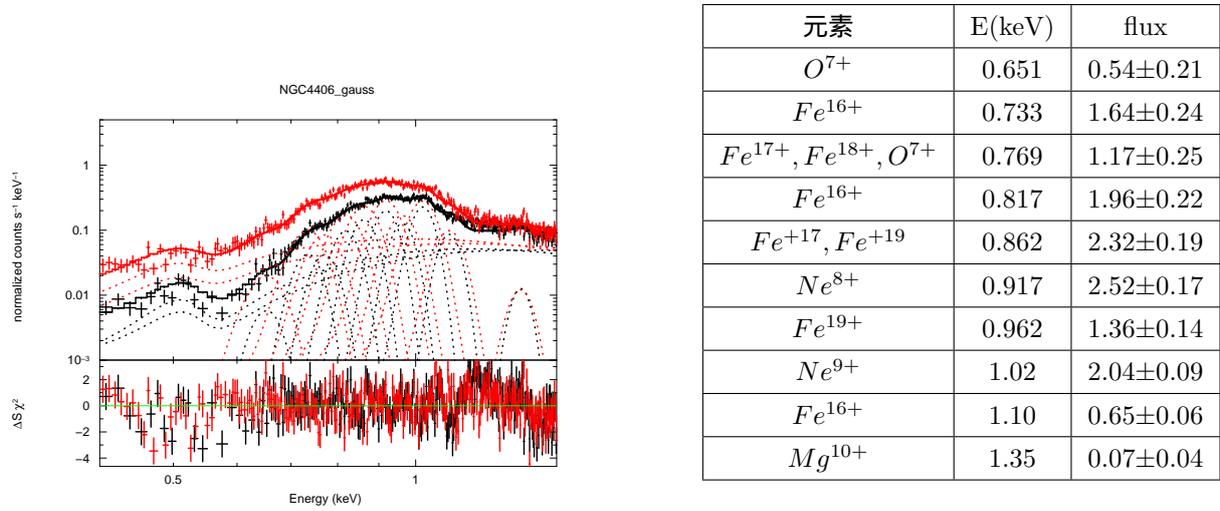
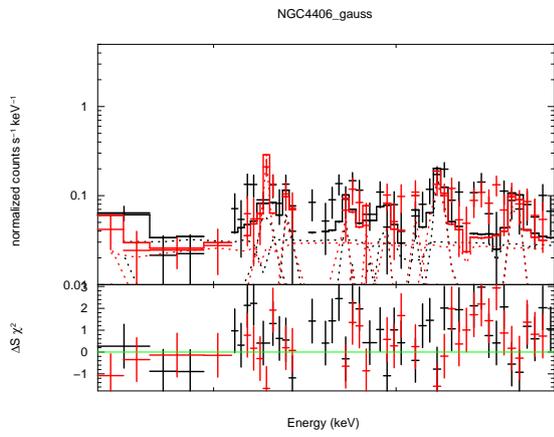


図 7.51: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.33 \pm 0.14$	0.35
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.21$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$0.72 \pm 0.19$	0.54
$Fe^{16+}$	0.817	$1.20 \pm 0.22$	1.39
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$1.42 \pm 0.24$	1.49
$Ne^{8+}$	0.917	$1.54 \pm 0.25$	1.45
$Fe^{19+}$	0.962	$0.83 \pm 0.15$	0.92
$Ne^{9+}$	1.02	$1.25 \pm 0.19$	1.20
$Fe^{16+}$	1.10	$0.39 \pm 0.07$	0.41
$Mg^{10+}$	1.35	$0.04 \pm 0.02$	0.03

図 7.52: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.39 \pm 0.14$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.09 \pm 0.08$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.08 \pm 0.09$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.27 \pm 0.09$

図 7.53: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.49$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.22 \pm 0.21$	0.41
$Fe^{16+}$	0.812	$0.20 \pm 0.23$	0.36
$Fe^{16+}$	0.826	$0.67 \pm 0.33$	1.27

図 7.54: 各輝線の強度比。

# NGC720

- XIS

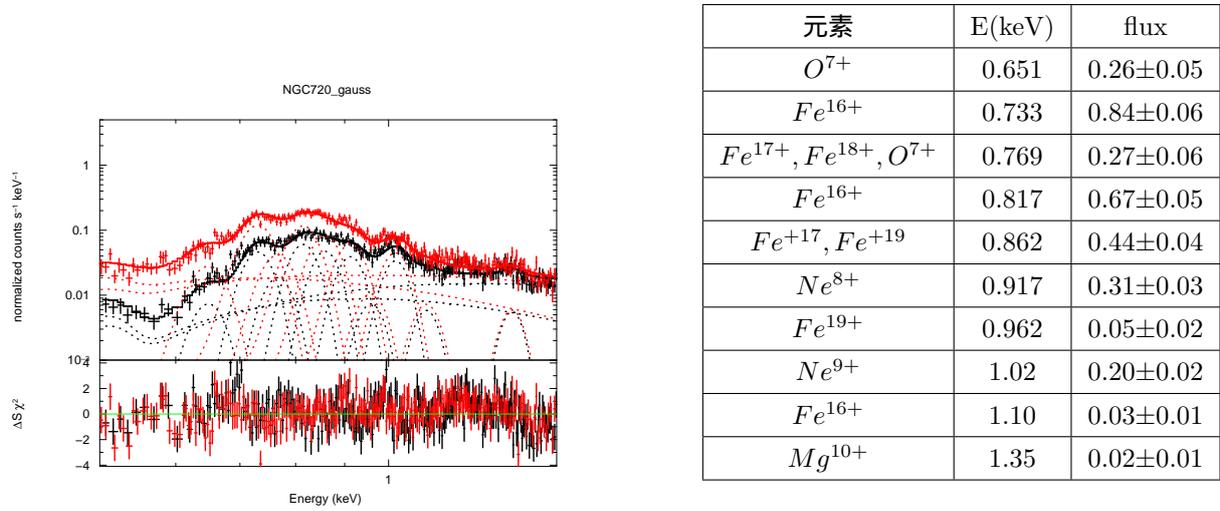
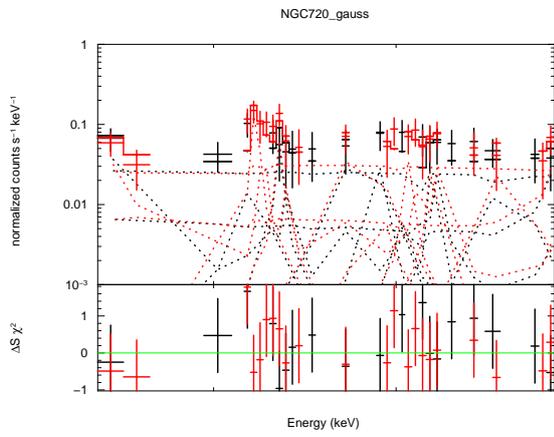


図 7.55: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$ photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.31 \pm 0.07$	0.32
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.11$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$0.32 \pm 0.07$	0.22
$Fe^{16+}$	0.817	$0.80 \pm 0.09$	1.00
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$0.52 \pm 0.06$	0.60
$Ne^{8+}$	0.917	$0.37 \pm 0.05$	0.39
$Fe^{19+}$	0.962	$0.06 \pm 0.03$	0.10
$Ne^{9+}$	1.02	$0.24 \pm 0.03$	0.27
$Fe^{16+}$	1.10	$0.04 \pm 0.02$	0.09
$Mg^{10+}$	1.35	$0.03 \pm 0.01$	0.03

図 7.56: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.14 \pm 0.11$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.06 \pm 0.06$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.04 \pm 0.07$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.04 \pm 0.06$

図 7.57: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 1.06$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.46 \pm 0.48$	0.49
$Fe^{16+}$	0.812	$0.29 \pm 0.52$	0.35
$Fe^{16+}$	0.826	$0.25 \pm 0.46$	1.12

図 7.58: 各輝線の強度比。

# NGC1316

- XIS

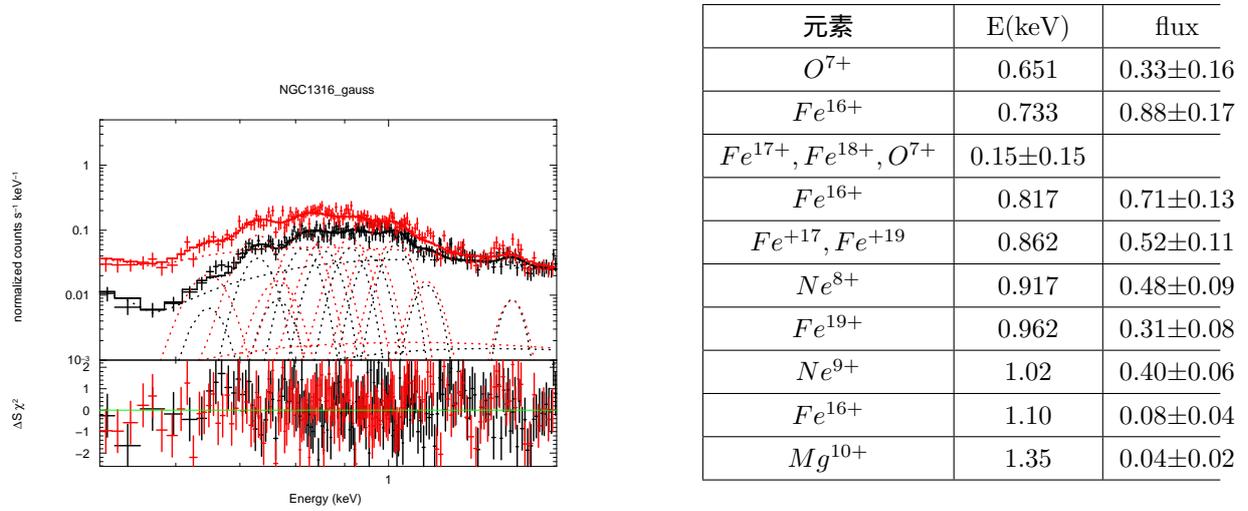
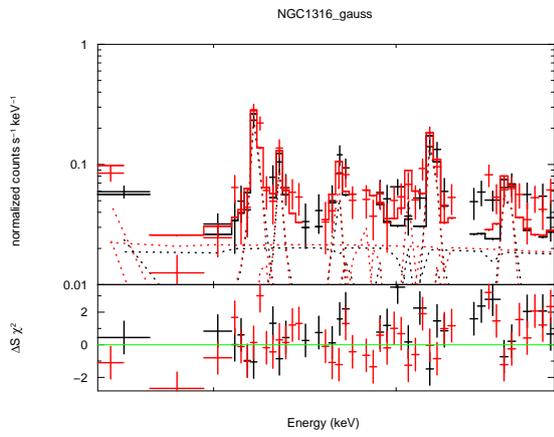


図 7.59: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右) を再現している。  
flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$O^{7+}$	0.651	$0.37 \pm 0.20$	0.53
$Fe^{16+}$	0.733	$1 \pm 0.27$	1
$Fe^{17+}, Fe^{18+}, O^{7+}$	0.769	$0.17 \pm 0.17$	0.26
$Fe^{16+}$	0.817	$0.81 \pm 0.21$	1.13
$Fe^{+17}, Fe^{+19}$	0.862	$0.59 \pm 0.17$	0.75
$Ne^{8+}$	0.917	$0.55 \pm 0.15$	0.60
$Fe^{19+}$	0.962	$0.35 \pm 0.11$	0.45
$Ne^{9+}$	1.02	$0.46 \pm 0.11$	0.56
$Fe^{16+}$	1.10	$0.09 \pm 0.05$	0.14
$Mg^{10+}$	1.35	$0.04 \pm 0.03$	0.04

図 7.60: 各輝線の強度比。

• RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.34 \pm 0.06$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.12 \pm 0.04$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.07 \pm 0.04$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.25 \pm 0.05$

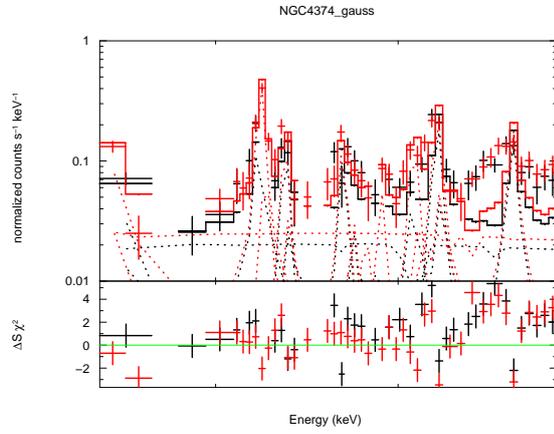
図 7.61: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.24$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.35 \pm 0.13$	0.51
$Fe^{16+}$	0.812	$0.22 \pm 0.12$	0.41
$Fe^{16+}$	0.826	$0.73 \pm 0.18$	1.22

図 7.62: 各輝線の強度比。

# NGC4374

- RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.47 \pm 0.09$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.15 \pm 0.05$
$Fe^{16+}$	0.812	$0.17 \pm 0.05$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.29 \pm 0.05$

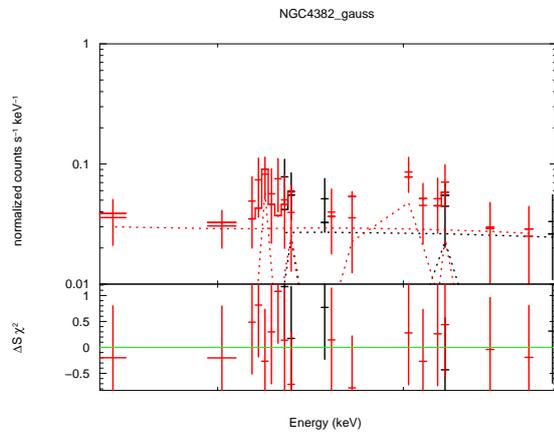
図 7.63: ZGAUSS モデルによるスペクトル(左)及び各パラメータ(右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 0.26$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.32 \pm 0.11$	0.46
$Fe^{16+}$	0.812	$0.35 \pm 0.13$	0.39
$Fe^{16+}$	0.826	$0.61 \pm 0.16$	1.32

図 7.64: 各輝線の強度比。

# NGC4382

- RGS



元素	E(keV)	flux
$Fe^{16+}$	0.727	$0.07 \pm 0.09$
$Fe^{16+}$	0.739	$0.04 \pm 0.05$
$Fe^{16+}$	0.812	$0 \pm 0.01$
$Fe^{16+}$	0.826	$0.04 \pm 0.06$

図 7.65: ZGAUSS モデルによるスペクトル (左) 及び各パラメータ (右)。 flux( $\times 10^{-4}$  photons/cm<sup>2</sup>/s)

元素	E(keV)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (実データ)	$I_{XkeV}/I_{0.733keV}$ (vapec)
$Fe^{16+}$	0.727	$1.0 \pm 1.72$	1.0
$Fe^{16+}$	0.739	$0.50 \pm 0.93$	0.44
$Fe^{16+}$	0.812	$0.39 \pm 1.34$	0.35
$Fe^{16+}$	0.826	$0.48 \pm 0.96$	0.94

図 7.66: 各輝線の強度比。

## ZGAUSS モデルによるスペクトル、及び強度比

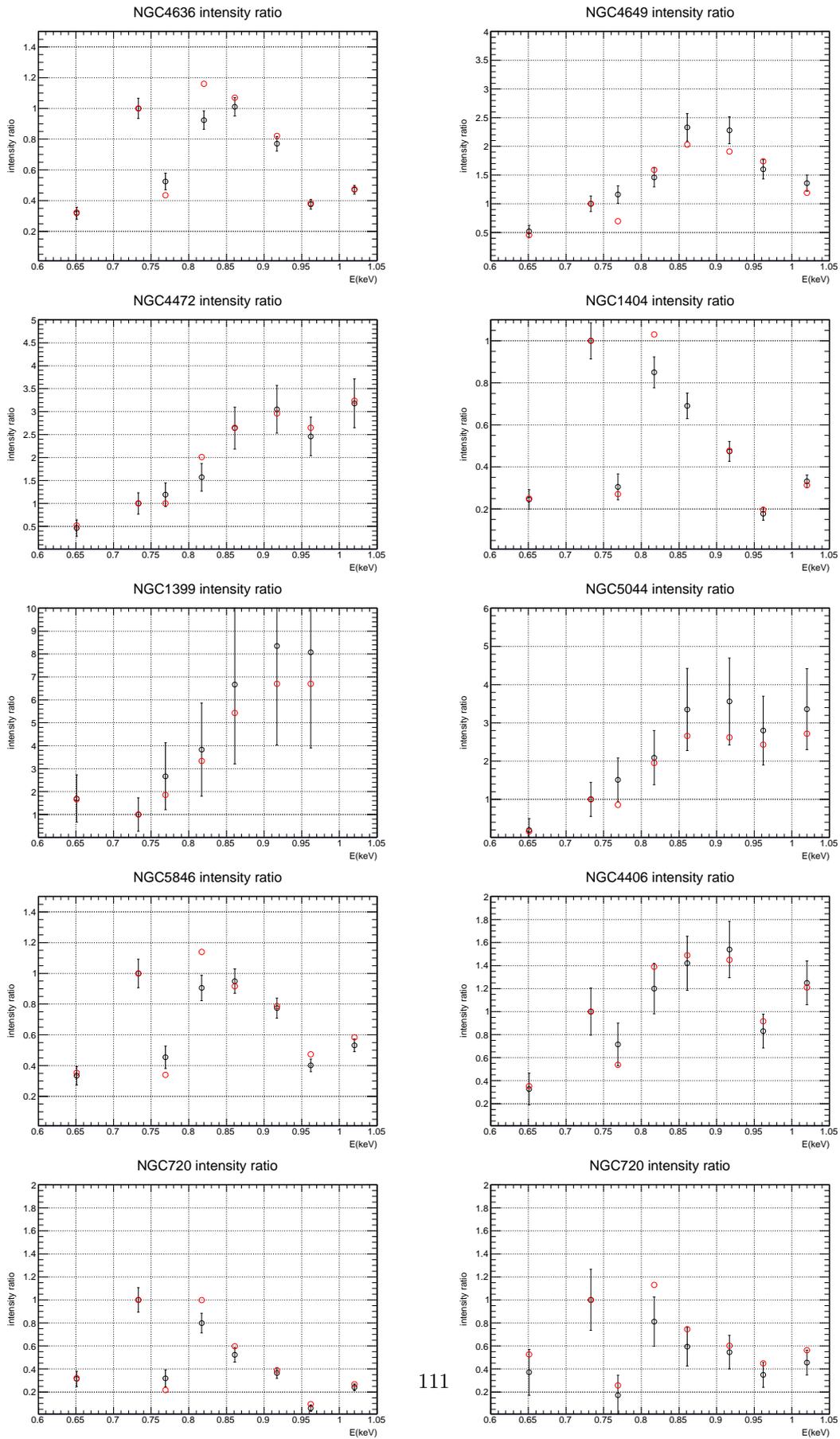


図 7.67: XIS での ZGAUSS モデルの強度比

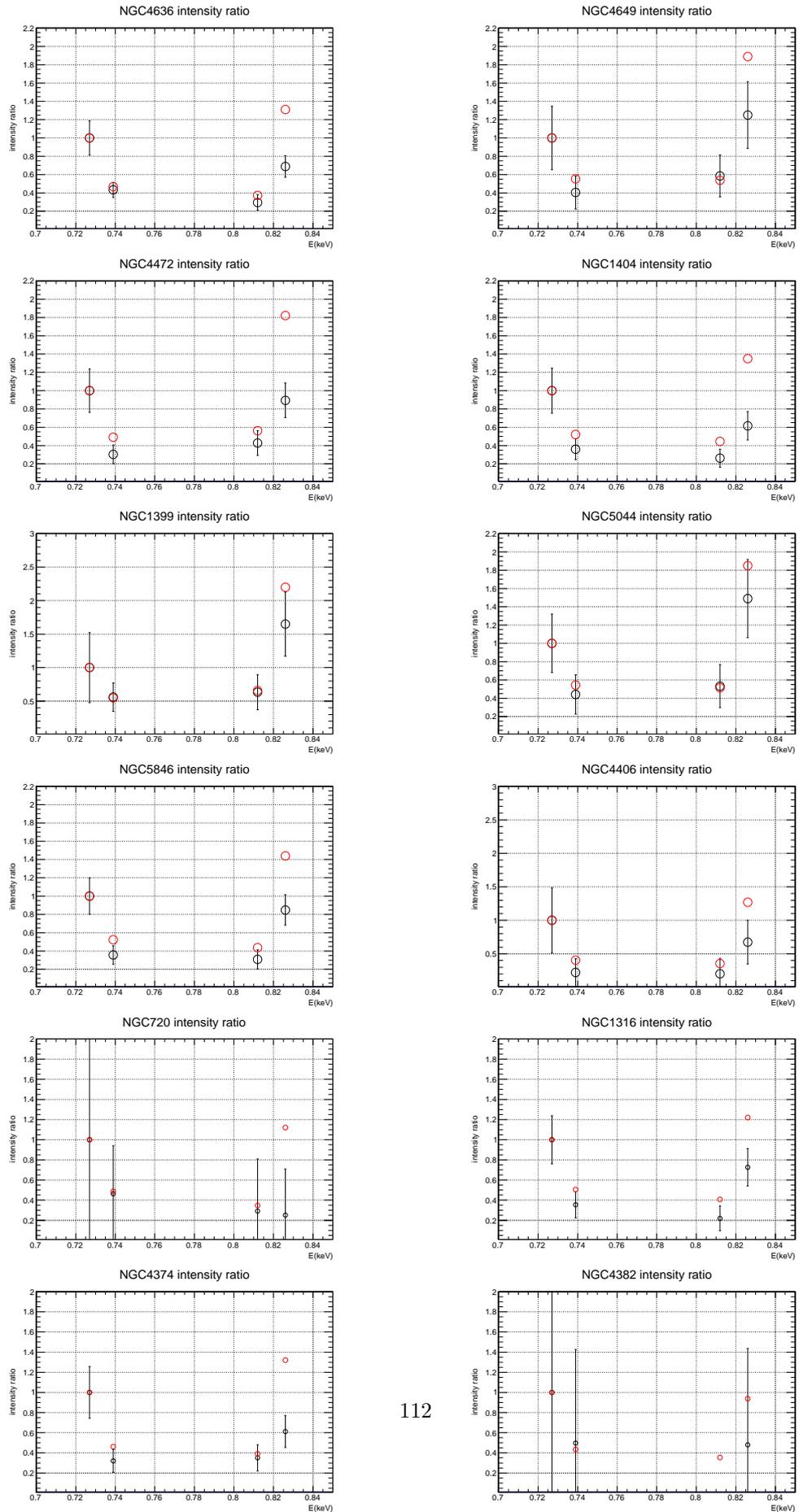


図 7.68: RGS での ZGAUSS モデルの強度比

## 楕円銀河ごとの半径-ガス密度分布

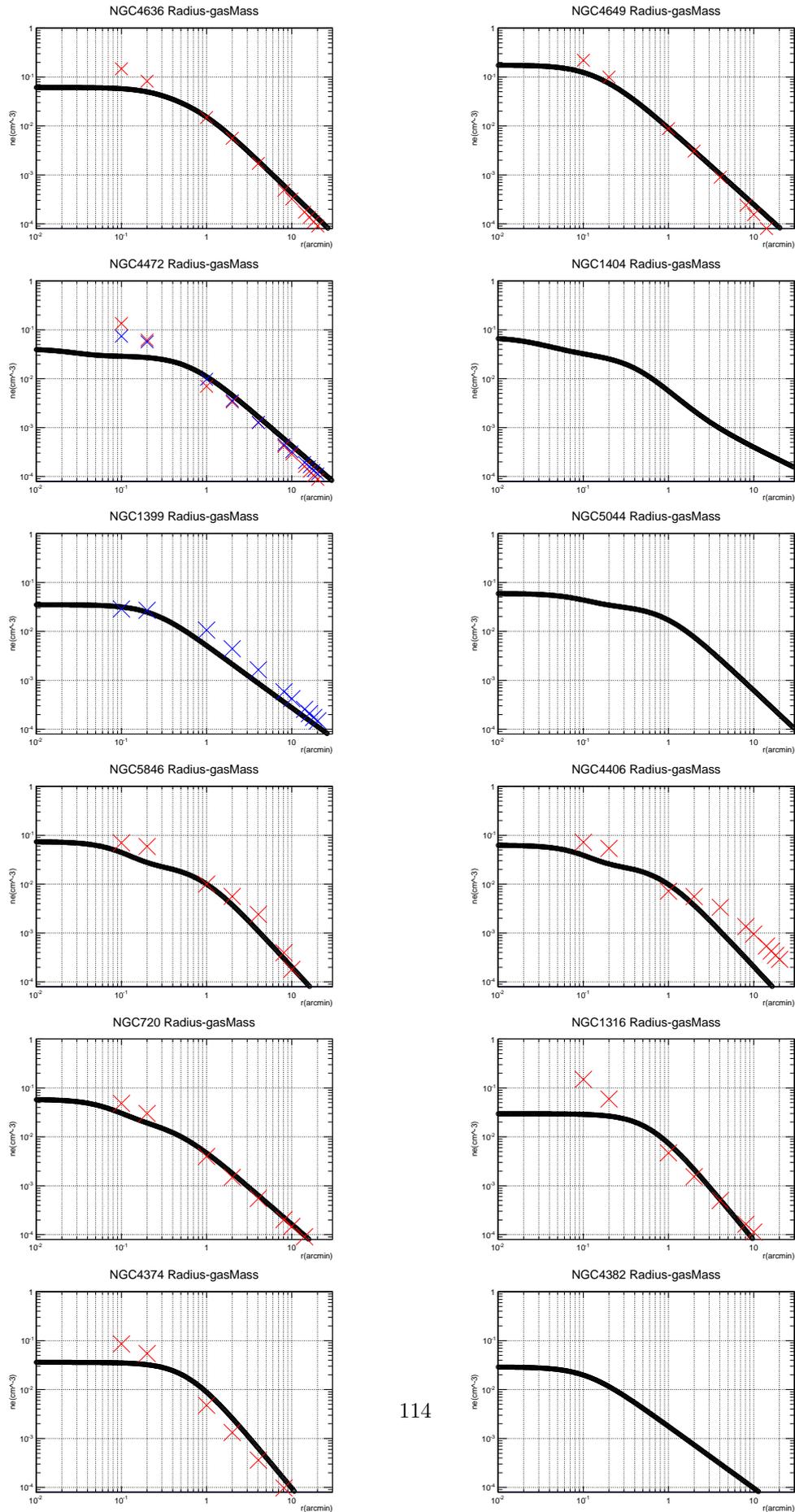


図 7.69: 各天体の半径ごとのガス密度分布。黒いプロットが本研究の結果、赤い点が大戸修論、青い点が Shigeyama et al.1997 を各々表す。

## Geant4 によって取得したスペクトル

- NGC4649、NGC4472

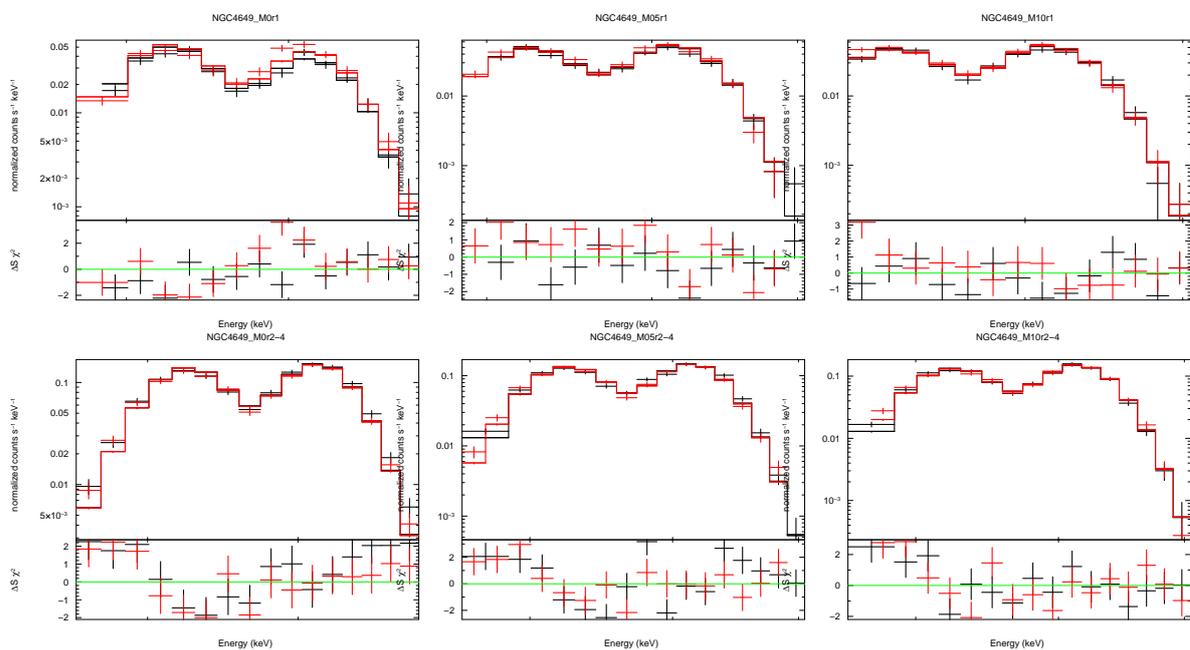


図 7.70: Geant4 を用いて作成した NGC4649 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ 、下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

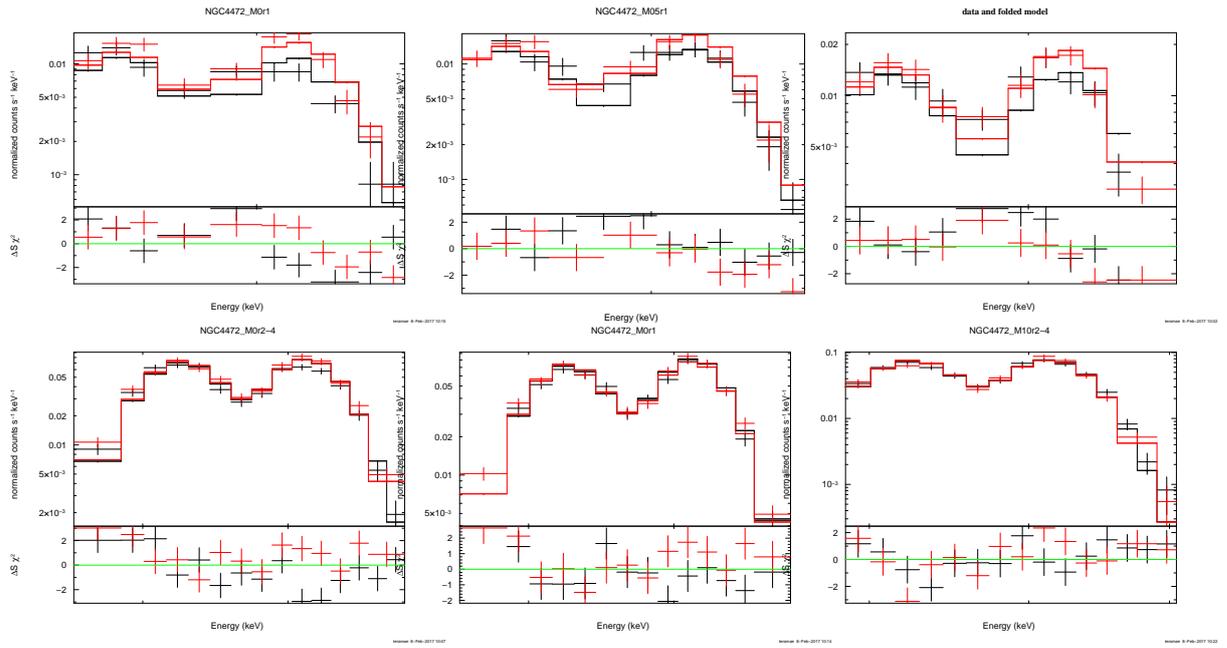


図 7.71: Geant4 を用いて作成した NGC4472 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ , 下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

● NGC1404、NGC1399

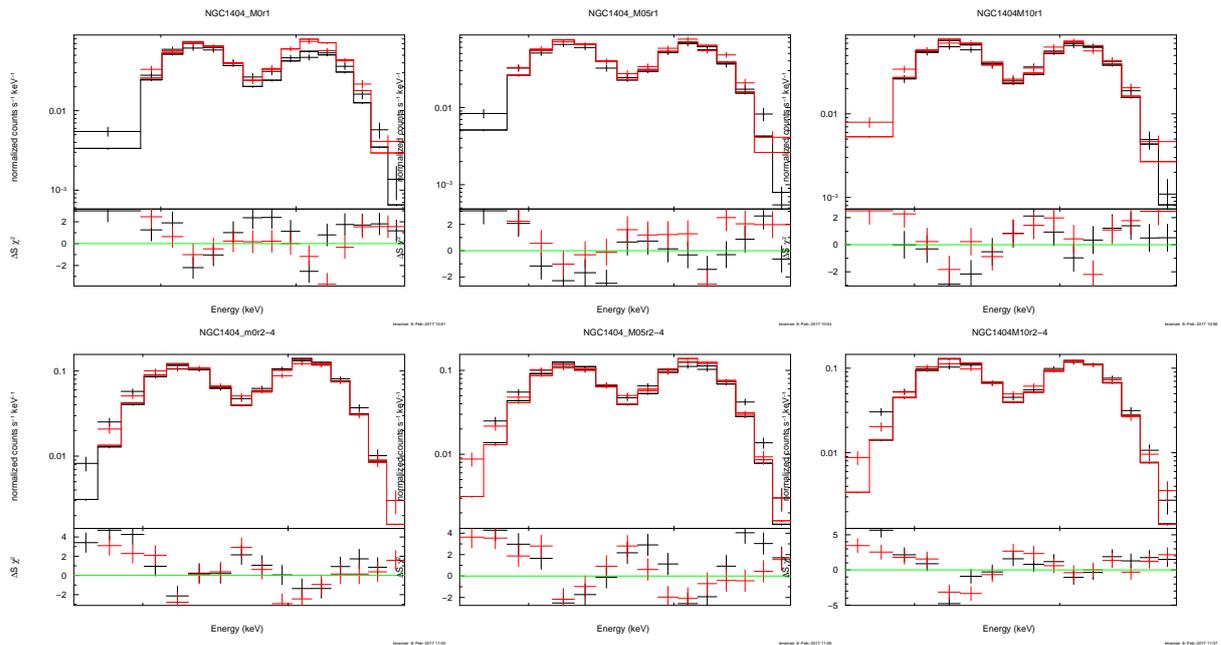


図 7.72: Geant4 を用いて作成した NGC1404 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ 、下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

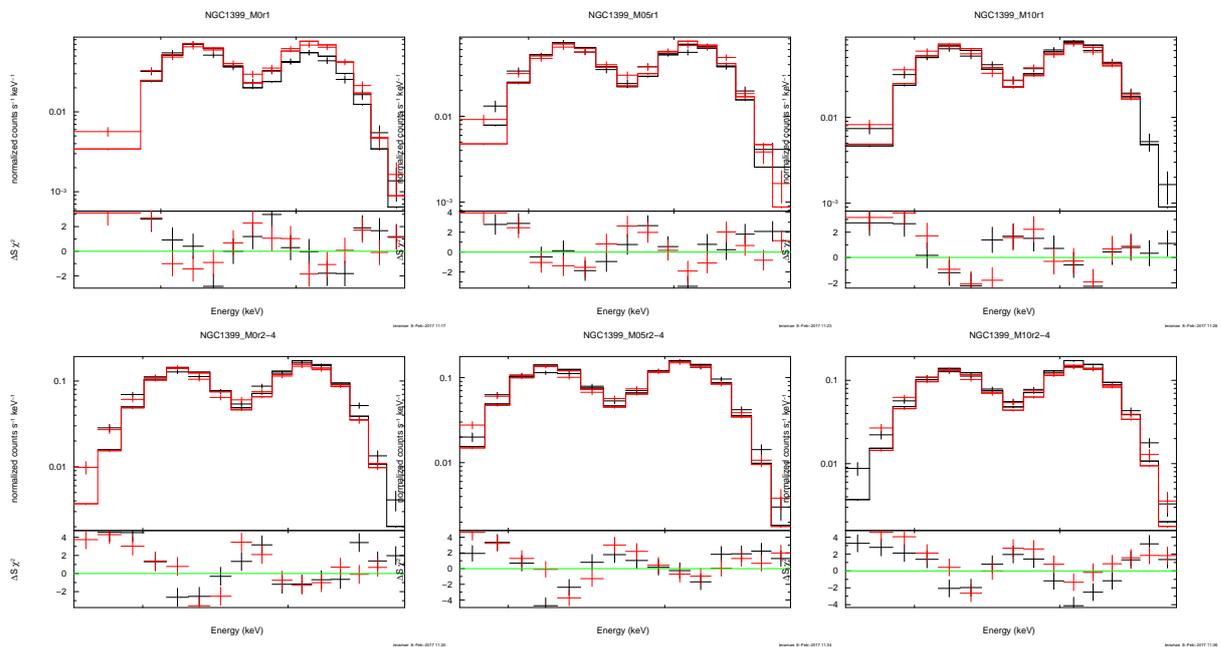


図 7.73: Geant4 を用いて作成した NGC1399 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ 、下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

● NGC5044、NGC5846

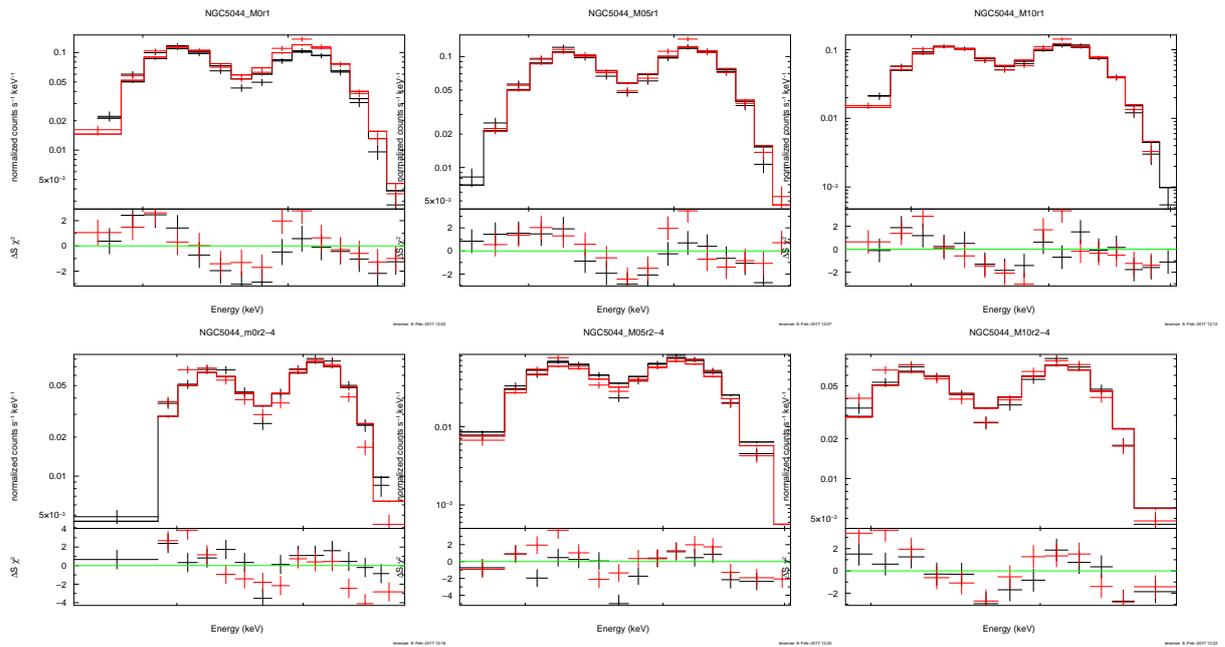


図 7.74: Geant4 を用いて作成した NGC5044 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ 、下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

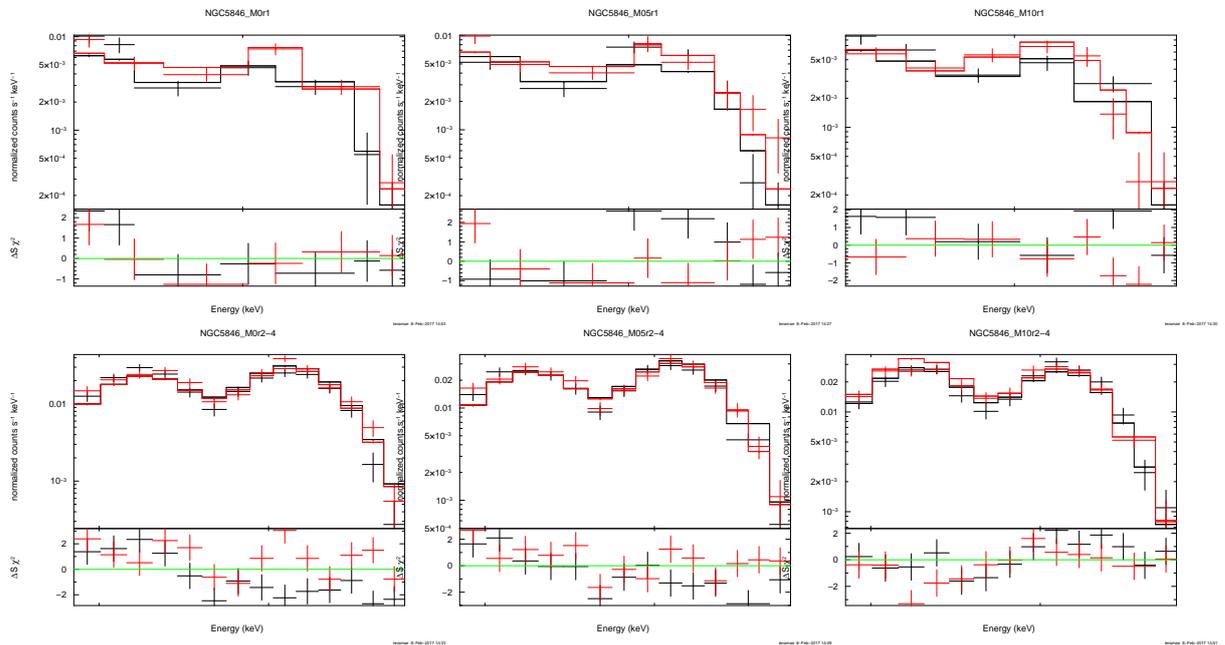


図 7.75: Geant4 を用いて作成した NGC5846 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ 、下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

● NGC4406、NGC720

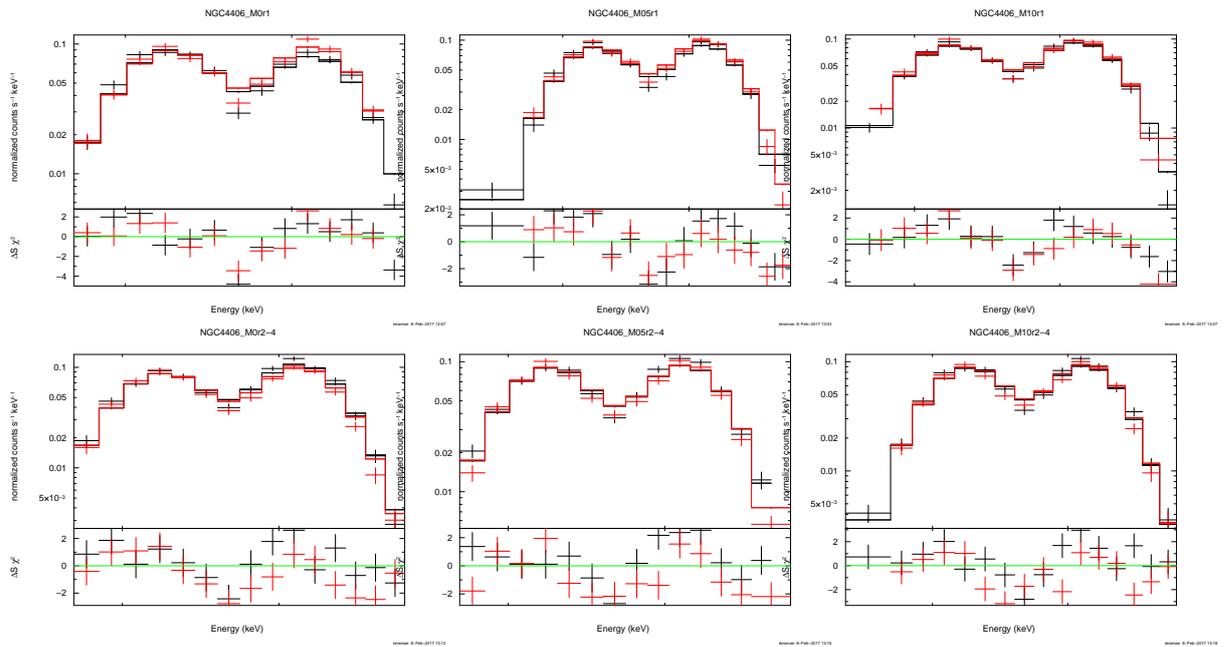


図 7.76: Geant4 を用いて作成した NGC4406 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ 、下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

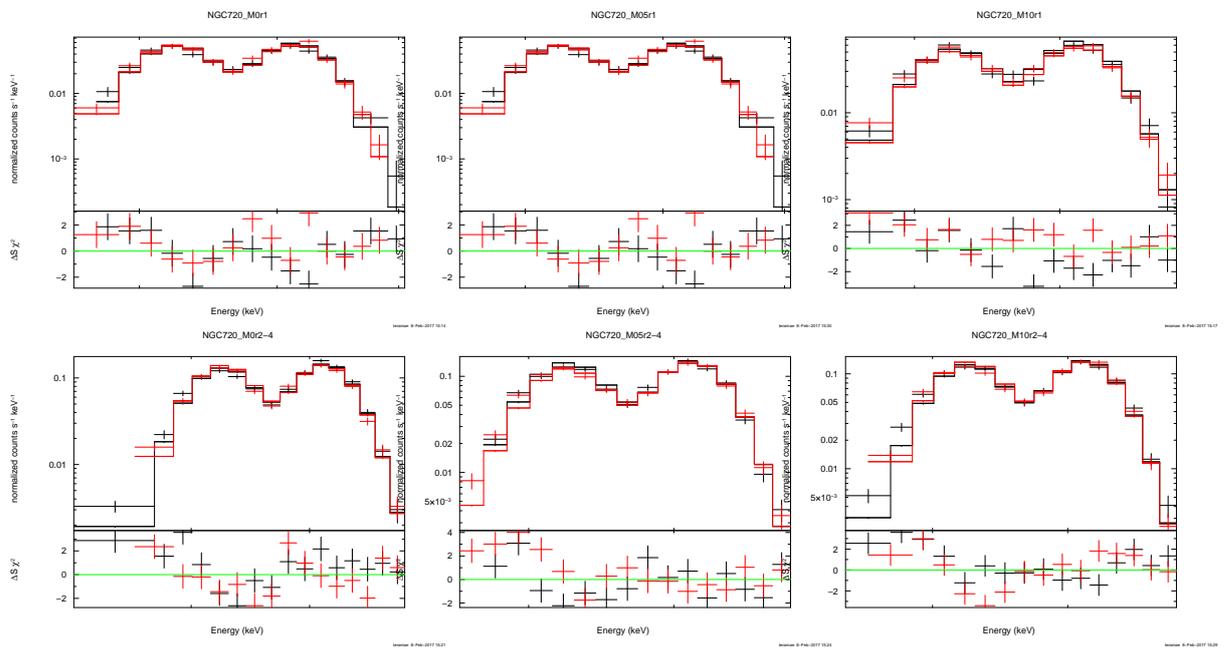


図 7.77: Geant4 を用いて作成した NGC720 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ 、下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

● NGC1316

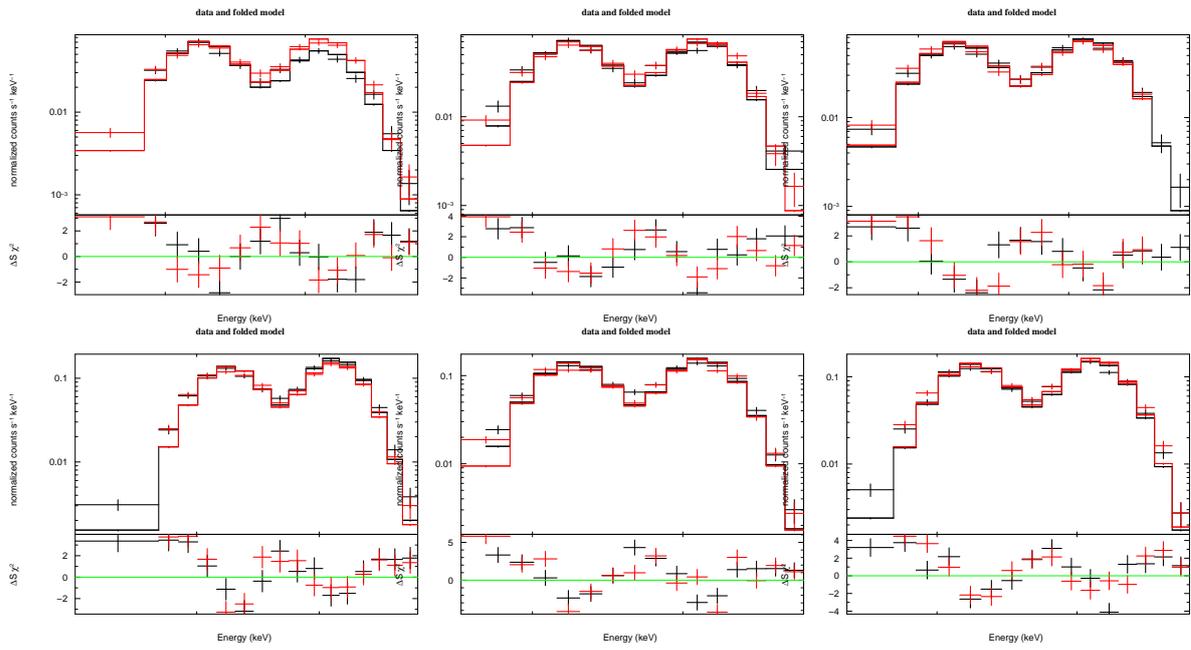


図 7.78: Geant4 を用いて作成した NGC1316 のシミュレーションスペクトル。上段が  $r=1$ , 下段が  $r=2-4$  であり、左から順に  $M=0, 0.5, 1.0$  である。黒いデータが共鳴散乱を考慮した場合、赤いデータが共鳴散乱の影響を除外した場合

# 謝辞

まずは、この論文の執筆にあたり、担当教官である深澤先生を筆頭に、非常に多くの方のご援助をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

私は基本的にマイペースな人間だったので、なんかしらのメ切がせまるまで頑張ることをせず、今回の修士論文の作成もギリギリに完成しました。そうした僕を基本的に放任してくれて、概ね好きなように研究を進めさせて下さった深澤先生には感謝しています。また、この研究に関して半年ほど宮岡の世話になりました。無報酬なのに快く教えてくれてありがとう。

思えば三年間この研究室にいたという事は、中学生時代や高校生時代と同等の期間属していたという事になり、そう考えると感慨深くもあります。M 2 生とも三年間一緒にいたことになると思うとあんがい長い期間一緒にいたなって気持ちです。3 年間で逆に仲が悪くなった説があるバズ、就活中にスプラトゥーンやってた岡ちゃん、空飛ぶ毒舌のんさん、マイペースの塊幅田くんの4人にはいろんな面でお世話になりました(?)。

学生からは他にもアクの強い M 1 生やこの研究室らしからぬ社会性にあふれた B 4 生ともそこそこ話し、退屈しない研究室生活を過ごしました。

そして教授陣の皆様に変にお世話になりました。多くの方にお世話になりましたが、特に X 線の教授陣の中で、担当教官だった深澤先生、理論性を重視するスタイルが好きだった水野さん、大体一緒に食堂に行っていたひろたかさん、小部屋の主大野さんの4人にはセミナーや研究を通して大きくお世話になりました。

これらの人達に感謝の念をこめて、改めてこの紙面で言葉にしたいと思います。

研究室の色にいまいち適合していない寺前でしたが、今日まで折れること無く歩き続けてこれたのは皆様のおかげです。本当にありがとうございました。

平成 28 年度卒業生 寺前拓人

## 関連図書

- [1] 林 克洋 卒業論文 (広島大学、2008)
- [2] 枝廣 育実 卒業論文 (広島大学、2014)
- [3] 宮岡 敬太 卒業論文 (広島大学、2016)
- [4] 大戸 彰三 修士論文 (広島大学、2003)
- [5] 杉本 樹信 修士論文 (埼玉大学、2014)
- [6] H.Xu et.al.,2001,ApJ,579,601-579
- [7] K. Hayashi et.al.,PASJ 61,1185-1196,2009
- [8] M.Komiyama et al.,2009 PASJ, 61, S337
- [9] Y Fukazawa et al.,AJ,636,636,2006
- [10] I.Zhuravleva et al.2013MNRAS.435.3111Z
- [11] Forman,W., Jones,C., & Tucker,W., 1985, ApJ, 293, 102
- [12] N.Werner et al.,Soc.398,23-32 2009
- [13] Canizares,C.R., Fabbiano,G., & Trinchieri,G., 1987, ApJ, 312, 503
- [14] Kaastra, J. S.; Mewe, R.; Nieuwenhuijzen, H., 1996, ARI ,411-414
- [15] 銀河 I-銀河と宇宙の階層構造 シリーズ現代の天文学 第4巻 2007 著
- [16] 天体物理学の基礎 II シリーズ現代の天文学 第12巻 2008 著
- [17] 「すざく」ファーストステップガイド 第 4.0.3 版 (Process Version 2.1-2.3)([http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep\\_web/fstep.html](http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep_web/fstep.html))
- [18] XMM-Newton ¿ XMM-Newton SOC Home page(<http://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton>)
- [19] SRON-SPEX data analysis(<https://www.sron.nl/astrophysics-spex>)
- [20] Suzaku ABC Guide (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/analysis/abc/>)
- [21] PLAIN Center News 第115号 ([http://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews/115\\_contents/115\\_1.html](http://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews/115_contents/115_1.html))
- [22] (<http://ads.nao.ac.jp/abs/1996uxsa.conf..411K>)

- [23] Astro Arts (<http://www.astroarts.co.jp/news/2010/12/07red-dwarfs/index-j.shtml>)
- [24] HongoWiki ([http://www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~yuasa/wiki/index.php/Main\\_Page](http://www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~yuasa/wiki/index.php/Main_Page))
- [25] HubbleSite([hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2001/10/image/a/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2001/10/image/a/))
- [26] JAXA 宇宙情報センター ([http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/irregular\\_galaxy.html](http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/irregular_galaxy.html))
- [27] Suzaku XRT (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/gallery/instruments/xrt.html>)
- [28] HongoWiki ([http://www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~yuasa/wiki/index.php/Main\\_Page](http://www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~yuasa/wiki/index.php/Main_Page))
- [29] Nasa/IPAC Extragalactic Database (<http://ned.ipac.caltech.edu/>)
- [30] DARTS ([http://www.darts.isas.jaxa.jp/astro/suzaku/public\\_seq.html](http://www.darts.isas.jaxa.jp/astro/suzaku/public_seq.html))
- [31] ISAS — X線天文衛星「すざく」ASTRO-EII/科学衛星 (<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/suzaku/>)
- [32] ATOMDB (<http://www.atomdb.org/Webguide/webguide.php>)
- [33] XISSIMARFGEN (<http://lheawww.gsfc.nasa.gov/kenji/suzakugof/XISanalysis/xissimarfgen/>)
- [34] XISRMFGEN (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/analysis/xisrmfgen.html>)
- [35] APEC ([http://cxc.harvard.edu/atomdb/sources\\_apec.html](http://cxc.harvard.edu/atomdb/sources_apec.html))
- [36] XSPEC manual in PDF (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xanadu/xspec/>)
- [37] 「すざく」ホームページ (<http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/>)
- [38] Cosmic X-ray Background in HXD/PIN data ([http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/analysis/pin\\_cxb.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/analysis/pin_cxb.html))