

2022年度 卒業論文

XRISM衛星による楕円銀河データ解析手法の確立

広島大学 理学部 物理学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B191859 浦田 岬

主査：深澤 泰司
副査：木坂 将大

2023年3月31日

概要

XRISM 衛星は 2023 年度に打ちあがる予定の日本で 7 番目の X 線天文衛星である。XRISM には精密 X 線分光器が搭載されており、広がった天体から放射される X 線に対しても高いエネルギー分解能を持つ。XRISM による精密 X 線分光観測によって、銀河における feedback 効果についての研究が進むことが期待される。楕円銀河は X 線で広がった天体であり、X 線解析の際には点源天体とは異なり、応答関数や背景放射の取り扱いが複雑で、それらを考慮する必要がある。本研究では楕円銀河として過去に別の X 線天文衛星で観測された「NGC4636」「NGC5128」の X 線解析を行い、その後に XRISM のシミュレーションデータを解析することで、XRISM で観測される楕円銀河のデータ解析手法の確立を行った。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の目的	1
第 2 章	楕円銀河と X 線観測	2
2.1	楕円銀河	2
2.2	楕円銀河の高温ガス ISM からの X 線放射	4
第 3 章	X 線天衛星	6
3.1	X 線天文衛星「すざく」	6
3.1.1	X 線望遠鏡 XRT	6
3.1.2	X 線検出器 XIS	7
3.2	X 線天文衛星「XRISM」	9
3.2.1	X 線望遠鏡 XMA	9
3.2.2	X 線検出器 Resolve	11
第 4 章	解析の方法	13
4.1	解析のターゲット天体	13
4.1.1	解析に用いたデータ	13
4.2	解析に用いたソフトウェア	14
4.2.1	HEAsoft	14
4.2.2	ds9	15
4.3	スペクトル解析	15
4.3.1	レスポンス関数	15
4.3.2	解析におけるバックグラウンド	18
4.4	モデルフィッティング	28
4.4.1	用いたモデル	28
4.4.2	最小自乗法	29
第 5 章	解析方法の確立	31
5.1	解析の手順と ARF ファイルの理解	31
5.2	バックグラウンドを考慮する必要がある広がった天体の解析	33

第 6 章	解析手法の実践	37
6.1	すざく衛星によるデータの解析	37
6.2	Chandra 衛星によるデータの解析	44
6.3	XRISM のシミュレーションスペクトル	46
第 7 章	まとめと今後	48

目次

2.1	楕円銀河 UGC10143	2
2.2	渦巻銀河 M33	2
2.3	不規則銀河 M82	2
2.4	すざく衛星で観測した NGC4636 の X 線画像	3
2.5	ブラックホール周辺の降着円盤と吹き出すジェット of のイメージ図 ¹	3
3.1	すざく衛星の概形	6
3.2	XRT の配置	7
3.3	XRT の外観	7
3.4	XIS0 3 の外観	8
3.5	XRISM の外観	9
3.6	XMA の外観	10
3.7	FWM の外観	11
3.8	Resolve の検出器	12
3.9	Resolve の冷却デユワー	12
4.1	高度 800km における 300keV 以上の電子分布	14
4.2	標準 ftool を用いた衛星データ解析の概要	14
4.3	XIS で観測した 3C454.3 の X 線イメージ	15
4.4	XIS で観測した 3C454.3 のスペクトル	15
4.5	X 線検出の様式図	17
4.6	NGC4636 の実スペクトルと NXB スペクトルの比較	18
4.7	CXB 作成用 ARF 情報	19
4.8	NGC4636 の 0-2' での CXB スペクトルフィッティング図	20
4.9	NGC4636-GALACTIC のスペクトルフィッティングに用いた ARF 情報	23
4.10	NGC4636-GALACTIC のスペクトル	23
4.11	CenA_Lobe のスペクトルフィッティングに用いた ARF 情報	24
4.12	CenA_Lobe のスペクトル	25
4.13	CenA_Lobe のスペクトルフィッティングに用いた ARF 情報	26
4.14	CenA_Lobe のスペクトルフィッティング図	27
5.1	3C454.3 の解析領域	31
5.2	3C454.3 の 0-2' (左)、2-4' (右) における ARF 情報	32
5.3	3C454.3 の 0-2' (左)、2-4' (右) におけるスペクトルフィッティング図	32

5.4	NGC4636 の解析領域	33
5.5	NGC4636 の 0-2' (左)、2-4' (右) における ARF 情報	34
5.6	NGC4636 の 0-2' (左)、2-4' (右) におけるスペクトルフィッティング図	35
5.7	アバundance比と VAPEC_norm を掛けた値の比較	36
6.1	Chandra 衛星による NGC5128 の X 線イメージ (約 10'×8')	37
6.2	Centaurus-A の可視光イメージ。(FoV 22.11)'	37
6.3	すざく衛星による NGC5128 の X 線イメージ	37
6.4	NGC5128(0.5-2.0keV) の解析領域	38
6.5	NGC5128 における ARF 情報	39
6.6	NGC5128 のスペクトルフィッティング図	40
6.7	NGC5128 のジェット部分を取り除いた解析領域	41
6.8	ジェット部分を取り除いた NGC5128 のスペクトルフィッティング図	41
6.9	VAPEC モデルを採用した NGC5128 のスペクトルフィッティング図	42
6.10	Chandra の解析領域	44
6.11	Chandra 衛星のスペクトルフィッティング図	44
6.12	XRISM シミュレーションによる NGC5128 のスペクトルフィッティング図	46

表目次

2.1	重元素の 1keV 付近での輝線放射	5
3.1	XRISM/XMA とすざく XRT の性能比較	10
3.2	Resolve のノミナル要求値	11
3.3	FWM の各フィルタの役割	12
4.1	各天体データの情報	13
4.2	CXB 作成用 ARF に入力した情報	19
4.3	CXB モデルのパラメータ	20
4.4	NGC4636 の CXB モデルパラメータ	20
4.5	GXB の見積もりに用いたデータ	22
4.6	GXB 評価用 ARF 作成時に入力した情報	22
4.7	NGC4636 の GXB モデルのパラメータ	24
4.8	CenA-Lobe の GXB モデルのパラメータ	25
4.9	天体の解析に追加で読み込ませる ARF の作成に入力した情報	26
4.10	[.	28
5.1	3C454.3 のスペクトルフィット結果	33
5.2	NGC4636 のスペクトルフィット結果	35
5.3	過去の論文における NGC4636 のスペクトルフィット結果	36
6.1	AGN 成分の ARF 作成に入力した情報	38
6.2	モデルフィッティングにおいて固定したパラメータ ²	39
6.3	NGC5128 のスペクトルフィット結果	40
6.4	ジェット部分を取り除いた NGC5128 のスペクトルフィット結果	42
6.5	VAPEC を採用した NGC5128 のスペクトルフィット結果	43
6.6	Chandra 衛星で観測した NGC5128 のスペクトルフィット結果	45
6.7	NGC5128 の XRISM シミュレーションスペクトルフィット結果	46

第1章 序論

1.1 研究背景

2023年度に打ち上がる予定の XRISM 衛星は非分散型精密 X 線分光器を搭載し、従来の分散型分光器では不可能だった広がった X 線天体に対しても高いエネルギー分解能を持つ。本論文の「ターゲット天体」の銀河から発生する輝線のドップラーシフトやドップラー幅とそれに対応したガス運動及び乱流の速度を高い精度で測定する上で、XRISM の高いエネルギー分解能が必要になる。これらの情報により、銀河中心に存在するブラックホールとその周囲にある銀河を構成する物質が相互的に影響を与え合う feedback 効果についての研究も進むことだろう、楕円銀河の解析結果と銀河団内の feedback 効果の観測を組み合わせることで、異なる質量スケールで feedback 効果がどのように機能するかを調べるのが可能になる。XRISM 衛星は銀河の進化の研究の発展に大きく貢献することになる。このようなモチベーションで、本研究は XRISM 衛星が観測する楕円銀河の X 線解析手法の開発及び確立を行った。

1.2 研究の目的

本研究は広がった天体として、楕円銀河 をターゲット天体としてその X 線解析手法を開発し、いずれ打ち上がる XRISM 衛星が観測し得られたデータを即座に解析を進められるような体制を整えることを第一の目的とする。

第2章 楕円銀河とX線観測

2.1 楕円銀河

可視光観測により、銀河は普通銀河と不規則銀河2つに大別される。不規則銀河は規則的な形を持たない銀河のことである。本研究のターゲットである楕円銀河は普通銀河に分類され、星が球状もしくは楕円状に集まったバルジのみを持つという形態の特徴がある。また、バルジとディスク部分から成る渦巻銀河や、さらに中心部に棒状構造が見える棒渦巻銀河も存在する。

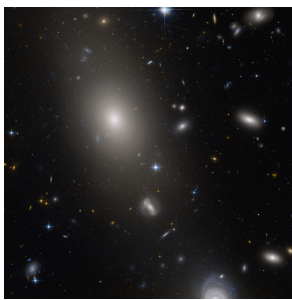


図 2.1: 楕円銀河 UGC10143



図 2.2: 渦巻銀河 M33

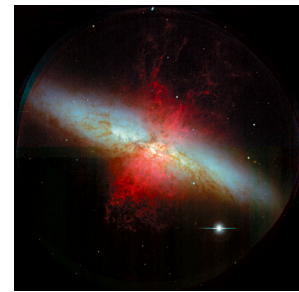


図 2.3: 不規則銀河 M82

楕円銀河の恒星は比較的古いものがほとんどであり、恒星の材料となる冷たい星間ガスも他の銀河よりも少ない。そのため星の生成活動は活発ではなく、楕円銀河が有する恒星の殆どが銀河の進化段階の初期に形成されたものだと考えられている。楕円銀河内には冷たい星間ガスは少ないものの、数百万度以上のX線で明るく輝くプラズマ状態の星間ガス(ISM)が銀河全体を満たしていることが過去に打ち上げられたEinstein衛星によって判明している。ISMのX線光度は $10^{39} \sim 10^{42}$ erg/s程度であり、温度は0.5~1keV程度である。楕円銀河から放射されるソフトなX線はこのISMから放射されたものだと考えられる。ISMは銀河内の星や暗黒物質による重力ポテンシャルによって閉じ込められ、星の運動や質量放出により温度が高められると考えられている。また、楕円銀河のX線放射は三次元的な広がりを持ち、中心から指数関数的に光度が減少していくという特徴を持つ。広がりを持つ天体のスペクトル解析は点源天体のスペクトル解析とは異なり、考慮すべきバックグラウンド等の影響で天体全体のフラックスをもとめる際に注意しなければならない点がいくつか存在する。

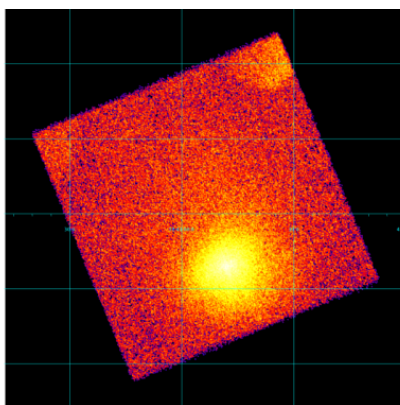


図 2.4: すざく衛星で観測した NGC4636 の X 線画像

楕円銀河に含まれる X 線点源（ブラックホール X 線連星、中性子星 X 線連星、超新星残骸など）からの X 線放射の重ね合わせが 5keV 以上の硬 X 線側で検出されている。銀河の中心には巨大質量ブラックホール（以下 BH）が存在している。このブラックホールには周囲の物質が降着しているだけでなく、BH から外側へ物質が光速に近い速度で放出される。この放出はジェットと呼ばれ、宇宙で最も大きなエネルギーを持つ現象として知られている。これらの BH 降着流およびジェットからも X 線が放射されている。BH とその周辺の物質はジェットと相互的に作用しており、この相互作用によって BH 周辺において高温のガスは乱流している。

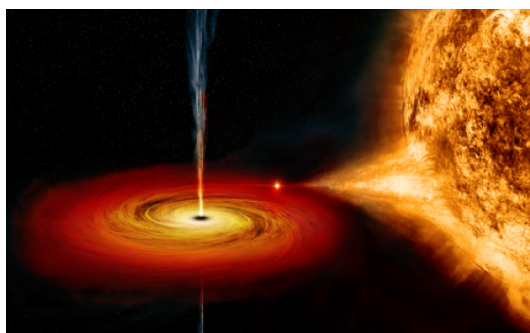


図 2.5: ブラックホール周辺の降着円盤と吹き出すジェットのイメージ図¹

¹画像出典：<https://www.nasa.gov/centers/marshall/about/star/star200610.html>

2.2 楕円銀河の高温ガス ISM からの X 線放射

ISM から放射されるソフトな X 線は、光学的に薄い高温プラズマからの熱的制動放射による連続成分と ISM 中に存在する重元素からの輝線放射の重ね合わせであると言える。熱制動放射による連続成分の放射率は以下のように書ける。

$$\epsilon_v^{ff} = 6.8 \times 10^{-38} \sum_i Z_i^2 n_e n_i T^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{h\nu}{kT}} g(T, \nu) \quad [\text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-3} \text{Hz}^{-1}] \quad (2.1)$$

上式 ((2.1)) における Z_i は n_i はそれぞれ原子番号 i のイオンの電荷と数密度を表している。また、 n_e は電子の数密度、 $g(T, \nu)$ はガウント因子と呼ばれる熱制動放射に於ける量子的補正を表す因子である。楕円銀河内の高温プラズマでは水素・ヘリウムイオンがほぼ完全に電離した状態であり、イオンの数密度は電子の数密度に比例する。よって式 (2.1) を全イオンで足し上げ、全波長領域で積分することで全放射エネルギー ϵ^{ff} が以下のように書ける。

$$\begin{aligned} \epsilon^{ff} &= \int_0^\infty \epsilon_v^{ff} d\nu \\ &= \Lambda(T_e) n_e^2 \quad [\text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-3}] \end{aligned} \quad (2.2)$$

$\Lambda(T_e)$ は熱制動放射における冷却関数であり、 $T_e > 2\text{keV}$ で $\Lambda(T_e) \propto T_e^{\frac{1}{2}}$ という温度依存性を示す。

また、ISM の温度は重元素の K 殻のイオン化ポテンシャルと同程度になる。よって ISM 内の重元素は H、He 状態のイオンもしくは完全電離した状態であり、衝突励起により共鳴 X 線を放射する。以下の表 2.1 に 1keV 付近で放射する重元素イオンをまとめる。

Ion	E(keV)	$\lambda(\text{\AA})$
N^{5+}	0.42 – 0.43	28.9 – 29.6
N^{6+}	0.50	24.9
O^{6+}	0.56	22.2
	0.57	21.9
O^{7+}	0.65	19.0
Fe^{16+}	0.73	17.1
	0.74	16.8
	0.81	15.3
	0.83	15.0
Fe^{17+}	0.77	16.1
	0.85	14.5
	0.86	14.4
	0.87	14.2
Ne^{8+}	0.92	13.5
Ne^{9+}	1.02	12.1
Mg^{10+}	1.35	9.2
Si^{12+}	1.95	6.4
Si^{13+}	2.00	6.2

表 2.1: 重元素の 1keV 付近での輝線放射

ここで、輝線の強度指標としてアバundance A_{Fe} が用いられる。この A_{Fe} は重元素の水素に対する比率が、太陽系に於ける比率の何倍あるかを示すものである。単位は solar で表される。

以上より、輝線放射の放射率を ϵ_V^{line} とおくと、ISM から放射される全 X 線光度は ISM の体積を V とおいて以下のように表せる。

$$L_X = \int dV \int (\epsilon_V^{ff} + \epsilon_V^{line}) dV \quad [\text{erg/s}] \quad (2.3)$$

第3章 X線天文衛星

3.1 X線天文衛星「すざく」

「すざく」は日米協力のもと開発が進められた宇宙論的距離にある天体のX線観測や宇宙に存在する高温プラズマのX線分光観測を行うことを目的としたX線天文衛星である。2005年7月10日に内之浦宇宙観測所から打ち上げられた。軌道高度は550kmで、その周期は96分である。内之浦地上局から1日5回約10分程度の追跡オペレーションを行なわれ、2015年に運用が停止した。すざくの主要なミッション機器はX線望遠鏡XRT(X-Ray Telescope)、X線CCDカメラXIS(X-Ray Spectrometer)と硬X線検出器HXD(Hard X-Ray Detector)がある。X線望遠鏡XRTはすざくに5つ搭載されており、そのうちの4つの焦点面X線CCDカメラXISがある。XISは0.4-10keVでのエネルギー領域でX線撮像観測が可能である。また、硬X線検出器HXDは10-600keV領域を観測可能な非撮像検出器であり、XISとHXDの2つの検出器でてすざくは非常に広いエネルギー領域で観測を行うことを可能としている。すざくの軌道は他のX線天文衛星であるchandraやXMM-Newtonよりも低い高度をとっている。これは、宇宙から降り注ぐ低エネルギー陽子による損傷を軽減し、X線バックグラウンドの激しい時間変動の影響を小さくするためである。

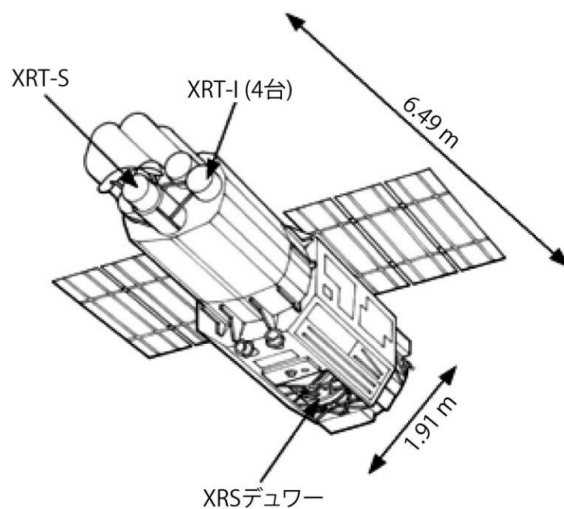


図 3.1: すざく衛星の概形

3.1.1 X線望遠鏡 XRT

XRTはすざくに搭載されたX線望遠鏡である。X線は金属に強く吸収され、屈折率が1より僅かに小さくなる。全反射でX線を集光するにはX線の入射角を鏡面に対してほぼ1度以下である必要がある。すざ

くの XRT の反射鏡はレプリカミラーと呼ばれる鏡面を採用しており、これは母型から抜き出した金の膜を薄い基板に張り付けたものである。鏡面精度の向上により以前日本で打ち上げた X 線天文衛星「あすか」に搭載された XRT よりも角分解能が約 2 倍に上がった。レプリカミラーは基板を直接研磨して作成した鏡面より角分解能が落ちるといった欠点があるものの、小型かつ軽量の望遠鏡を作ることが可能という大きな利点がある。また、あすかの XRT よりも焦点距離を伸ばしたことで高エネルギー側での X 線にたいする感度を上げた。加えて、望遠鏡の前方にプリコリメータを設置し、視野外からやってくる迷光を減少させている。

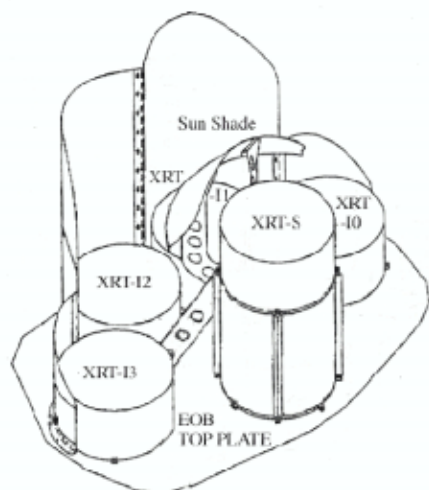


図 3.2: XRT の配置



図 3.3: XRT の外観

3.1.2 X 線検出器 XIS

XIS はすごく搭載された X 線 CCD カメラであり、半導体検出器を格子状に区切ったもので構成されている。優れた位置分解能とエネルギー分解能を有しており、CCD を -100 度程度まで冷却することで熱ノイズを抑制し高い感度での X 線検出を可能にしている。一方、各ピクセルに入射した電荷を一つ一つ読み出す都合上、時間分解能は悪いと言える。

XIS の各画素は金属 (Metal)、酸化膜 (Oxide)、半導体 (Semiconductor) が順に接続された MOS 構造を持っている。半導体の材質はシリコンであり、不純物としてホウ素が混ぜ合わされたホールがキャリアの P 型半導体である。この検出器に電圧をかけると電極下部に空乏層が生じ、かけられた電圧による電場も発生する。Si のギャップエネルギーを超える大きさのエネルギーを持つ電磁波が Si 検出器の或るピクセルに入射した際に、入射した電磁波は空乏層で光電吸収を受ける。この際に生まれた光電子は、光電子自身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、電子と正孔対を作る。この際の正孔対の数は $\sim E/W_{Si}$ で表現される。ここで E/W_{Si} は Si の平均電離エネルギー $\sim 3.65\text{eV}$ である。入射エネルギーが大きいほど、生じる正孔対の数は多くなる。X 線入射で生じる電子は、発生した電場により電極下に集められて電子雲を形成する。この電子雲を検出することで入射 X 線のエネルギーが分かる。



図 3.4: XIS0 3 の外観

すぎくに搭載された XIS は 4 つあり、XIS0 3 までナンバリングされている。しかし、XIS2 は 2006 年 12 月の故障により以降のデータが使用できない。残りの 3 つの XIS の内、XIS0,3 は表面照射型 (FI:Frontside Illuminated) で XIS1 は背面照射型 (BI:Backside Illuminated) と分類される。FI 型の XIS は空乏層が X 線の入射方向から遠い位置にあり、X 線の到達までに電極や絶縁層で X 線が吸収される可能性が高く、低エネルギー X 線に対する検出器の有効面積が減少する。その一方、BI 型は電極側とは逆方向から X 線が入射することになるため電極で X 線が吸収されることなく入射 X 線が空乏層に入る。よって、BI 型は低エネルギー X 線に対する検出器の有効面積は FI 型よりも大きくなる。しかし、BI 型は技術的に加工が困難であり、また X 線が空房層に於いて光電吸収を受ける位置が電極から遠い位置になりやすい。そのため、高エネルギー X 線 (7keV 付近) のデータは FI 型のほうが信頼性が高いと言える。

3.2 X線天文衛星「XRISM」

XRSIM(X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) は 2023 年度に打ち上がる予定の日本で 7 番目の X 線観測衛星である。日本の前天文衛星「ひとみ」(打ち上げ後 2ヶ月で観測停止)のミッションを引き継ぐ形で宇宙の高温プラズマ内の物質循環の歴史やエネルギーの輸送プロセスに加えて天体の進化についての解明を主な目的としている。地球周回低軌道(高度約 550km)に打ち上げられる予定で、主要なミッション機器として X 線望遠鏡 XMA(X-Ray Mirror Assembly)、X 線分光装置のマイクロカロリメータ検出器、X 線撮像装置 Xtend が搭載される。X 線望遠鏡 XMA は XRISM に 2 台搭載されており、それぞれの焦点に各々の検出器が存在する。XMA とマイクロカロリメータ検出器を組み合わせた観測システムは Resolve と呼ばれ、非常に高い分光性能を持った分光撮像器である。

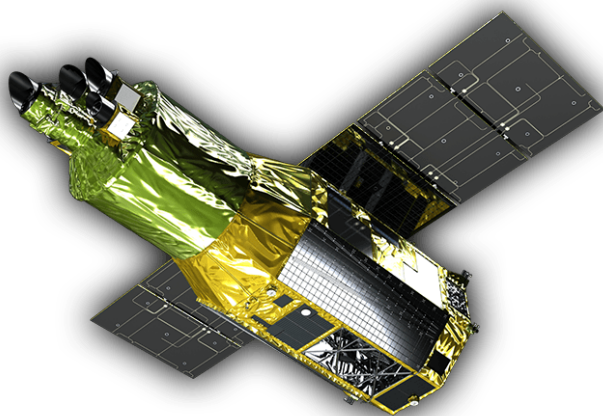


図 3.5: XRISM の外観

3.2.1 X線望遠鏡 XMA

XRISM には 2 つの X 線望遠鏡 Resolve-XMA、Xtend-XMA が搭載される。これらは Resolve と Xtend の 2 つの観測システムの焦点面への集光・結像を行なう。XMA はすざく衛星に搭載された XRT と同様の全反射鏡である。ここでは、主に Resolve-XMA について説明する。XMA は 1624 枚の多膜薄板型望遠鏡を採用し、高い集光能力を有しながら、重量が 42kg と軽量に抑えられている。また、XMA はすざく XRT よりも焦点距離を伸ばしており、高エネルギー側 X 線の反射率を向上させているのに加えて望遠鏡の温度維持のためにサーマルシールドも搭載されている。すざく XRT と同様に、視線方向以外からの迷光を防ぐためのプリコリメータも搭載されており、XMA の有効面積は $425\text{cm}^2 @ \text{keV}$ である。以下に XRISM/XMA とすざく XRT の主な性能についてまとめた表を載せる。

	XMA	XRT
望遠鏡の数	2	4
焦点距離 (m)	5.6	4.75
口径 (cm)	45	40
反射鏡の層の数	203	175
HPD (arcmin)	1.3	2.0
望遠鏡のみの有効面積 (cm ²) @1keV	560	470
望遠鏡のみの有効面積 (cm ²) @6keV	470	320

表 3.1: XRISM/XMA とすざく XRT の性能比較

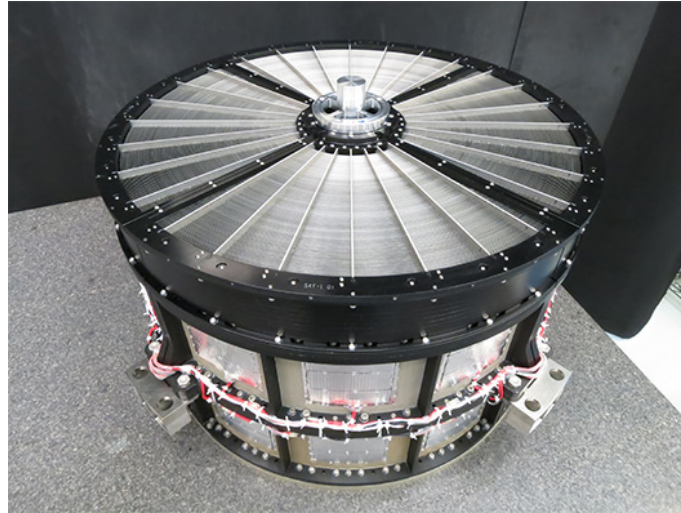


図 3.6: XMA の外観

3.2.2 X線検出器 Resolve

ResolveはX線望遠鏡とX線マイクロカロリメータ検出器を組み合わせた非常に高い分光性能を有した分光撮像機である。以下の表3.2にResolveのノミナル性能要求をまとめる。

分光性能 FWHM (eV)	7(目標 5)
エネルギー範囲 (keV)	0.3-12.0
array 全体の非 X 線ノイズ (counts/s/keV)	$\leq 2 \times 10^{-3}$
エネルギー決定精度 (eV)	≤ 2
視野角 (arcsecond)	$\leq 2.9 \times 2.9$
ピクセル数	6×6 (1つの較正用ピクセルを含む)
角分解能 HPD(arcsecond)	≤ 1.7
有効面積@1keV(cm ²)	≥ 160
有効面積@6keV(cm ²)	≥ 210
観測可能な上限カウントレート (counts/s)	≥ 150 (array 全体)
時刻決定精度 (ms)	≤ 1
寿命 (年)	≥ 3

表 3.2: Resolve のノミナル要求値

Resolveの基本的な性能は前X線天文衛星「ひとみ」に搭載されたSXSと同じである。Resolveでは、XMAによって集光されたX線がフィルタホイール(Filter Wheel Mechanics:FWM)やゲートバルブを通り、デュワー内に入射する。FWMは以下の図3.7のような外観をしており、観測の目的や対象によって適切なフィルタを選択できるように設計されている。以下の表3.3にそれぞれのフィルタの役割をまとめた。



図 3.7: FWM の外観

No.	type	angle	detail
1	Open	30°	
2	可視光遮蔽	90°	厚さ 285nm のポリイミド+開口率 86.5% のメッシュ
3	X 線フラックス減衰	150°	1.49mm ごとに 1mm の穴が空いた厚さ 105 μ m のモリブデン板
4	Open	210°	デフォルト
5	Be フィルタ	270°	厚さ 25 μ m のベリリウム板
6	⁵⁵ Fe	330°	較正 X 線源の ⁵⁵ Fe

表 3.3: FWM の各フィルタの役割

⁵⁵Fe は検出器の 36 ピクセルある内の 1 つの較正用ピクセルに常に照射される較正用 X 線源である。しかし、この線源では各ピクセルごとのゲイン変動等は較正できない。そのため、XRISM に搭載される FWM には線源だけでなく X 線ジェネレーター (Modulated X-Ray Source:MXS) が搭載されている。この MXS はマイクロカロリメータの全てのピクセルに X 線を照射することができる上に、軌道上でも高速で On/ff の切り替えが可能である。これにより、天体観測中でもエネルギースケール較正が可能になる。高いエネルギー分解能を実現するためにデュワー内では多段冷却機構を用いて約 50mK という極低温環境を保っている。この冷却機構が液体ヘリウムの枯渇や機械式冷凍機の経年劣化等の理由で上手く作動しなくなるまでの期間が Resolve の観測寿命だと言える。Resolve では X 線の入射による温度上昇がセンサーによって読み出され、信号処理の後、光子の到来時刻や位置、エネルギーをイベント情報として抽出される。Resolve の検出器は温度変化に対して電気抵抗変化の大きい抵抗体 (サーミスタ) を用いた、半導体サーミスタ型マイクロカロリメータが採用されており、このサーミスタにはシリコン半導体を用いられている。また、化合物半導体である水銀テルル (HgTe) を吸収体とした 6×6 の 2 次元 array 状 (5mm²) のセンサーを搭載することで、3×3arcmin 視野の X 線撮像を可能としている。

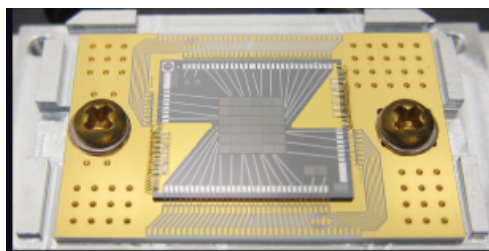


図 3.8: Resolve の検出器

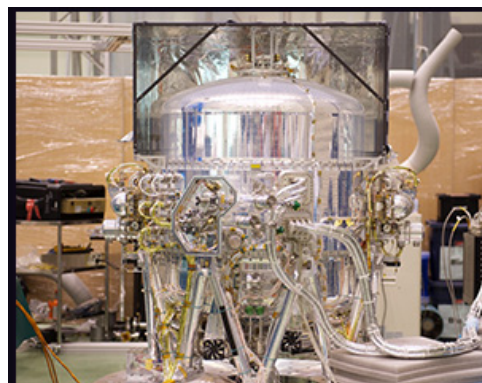


図 3.9: Resolve の冷却デュワー

マイクロカロリメータ自身の固有ノイズによって決まる Resolve のエネルギー分解能は約 2.7eV と見積もられている。検出器固有のノイズはその他の要因によるノイズよりも寄与が大きい、すべてのノイズの影響を考慮した上で、マージン込みの Resolve のエネルギー分解能は表 3.2 のノミナル要求値 7eV を達成するように設計されている。

第4章 解析の方法

4.1 解析のターゲット天体

本研究で X 線解析の対象にしたのは、「3C454.3」「NGC4636」「NGC5128」の3つである。「3C454.3」はブレーザー天体であり、点源天体として扱われるが、本研究ではデータの解析方法や解析に必要な知識を身につけることを目的として解析を行った。「NGC4636」「NGC5128」は楕円銀河であり、X 線で広がった天体として扱う。

4.1.1 解析に用いたデータ

3つのターゲット天体の解析には、いずれも NASA がインターネット上に公開しているデータアーカイブにあるすざく衛星が観測したデータを使用した。以下表 4.1 に使用したデータをまとめる。

天体名	ra	dec	z	観測日付	exposure(sec)
3C454.3	22 54 04.34	16 05 17.5	0.859	2009-12-09T02:40:43	40477.20000
NGC4636	12 42 53.83	02 45 20.2	0.003129	2005-12-06T02:34:37	79201.00000
NGC5128	13 25 21.86	-43 04 19.2	0.001825	2009-07-20T08:55:29	62432.80000

表 4.1: 各天体データの情報

観測データには all event と呼ばれるものと cleaned event がある。all event は天体を観測した時間帯のデータだけでなく、地球を見ている時間帯、南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly:SAA) 観測、さらに解析に使えないイベント等の質の悪い観測データなども含まれている。一方の cleaned event はこれらの不要なデータが破棄された (data reduction) データである。本研究にはデータリダクションが行われた cleaned event を使用した。

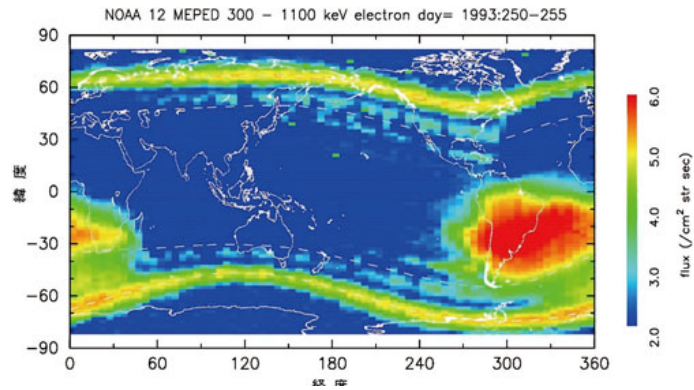


図 4.1: 高度 800km における 300keV 以上の電子分布。南アフリカ周辺の赤い領域で地場が弱くなっている

4.2 解析に用いたソフトウェア

4.2.1 HEAsoft

HEAsoft は NASA を中心に開発された、X 線データ解析に必要な一連のソフトウェアがパッケージ化されたものである。本研究では HEAsoft ver6.30.1 を用いた。この HEAsoft に含まれるソフトウェアの内、主に XSELECT と XSPEC を使用した。XSELECT は event ファイルに様々なフィルタをかけてライトカーブやイメージ、スペクトルを抽出することを目的としたソフトウェアであり、本研究では event ファイルに領域でフィルタをかけてイメージ・スペクトル情報を抽出する工程を XSELECT で行った。イメージ・スペクトルファイルは FITS(Flexible Image Transport System) 形式で保存した。また XSPEC は衛星や検出器に依存しない X 線スペクトル解析ソフトウェアであり、本研究ではバージョン 12.12.1 を使用した。

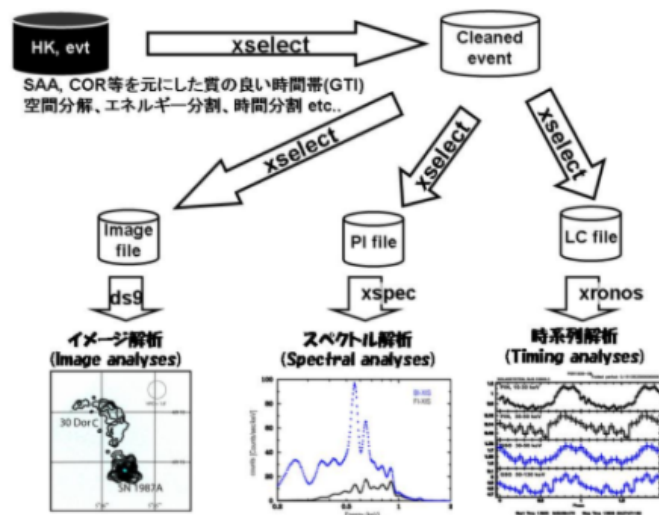


図 4.2: 標準 ftool を用いた衛星データ解析の概要

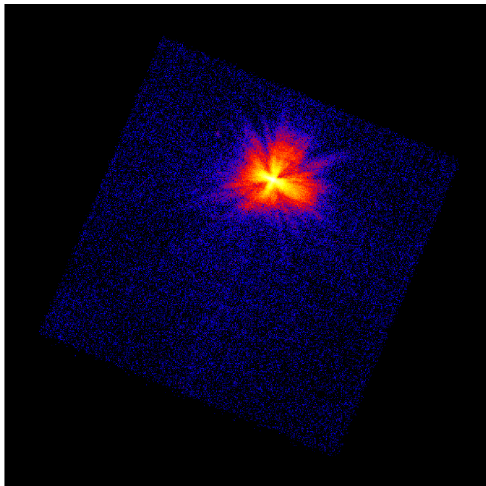


図 4.3: XIS で観測した 3C454.3 の X 線イメージ

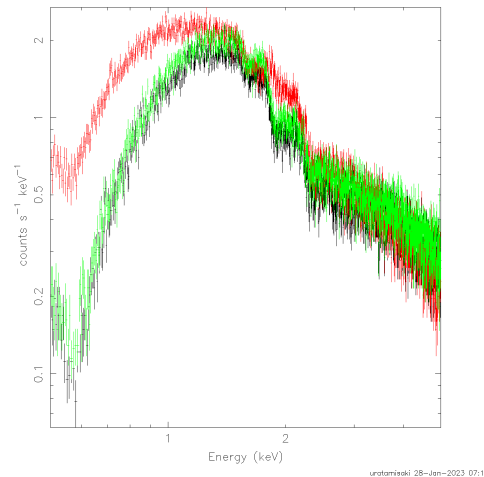


図 4.4: XIS で観測した 3C454.3 のスペクトル

4.2.2 ds9

ds9 は Harvard 大学の付属天文台である SAO(Smithsonian Astronomical Observatory) で開発されている、天文学全般で広く用いられる画像解析ソフトウェアである。本研究では主に以下の目的で使用し、天体の中心を決定したり、領域情報を作成・保存を行った。

FITS の可視化

FITS ファイルを可視化する。イメージに対して、線形・対数スケール、カラーマップの調整や座標・領域を書き込むことも可能である。

region (領域) の作成

スペクトル解析に用いる領域 (region file) を作成、保存する。作成した region file を領域のフィルタとして、XSELECT 上で event ファイルからスペクトル情報を抽出した。

4.3 スペクトル解析

本研究ではスペクトル解析として、天体の観測から得られたスペクトルとモデルスペクトルを比較し最適化を行なうことで、天体の物理パラメータを求めるモデルフィッティングと呼ばれる手法をとった。モデルスペクトルとは物理過程の理論的描像であり、様々な物理パラメータが含まれている。モデルフィッティング行なうには天体観測から得られたスペクトルだけを考えるのではなく、レスポンス関数を考慮したりターゲット天体以外からの放射をバックグラウンドとして差し引く必要がある。

4.3.1 レスポンス関数

XSELECT で抽出したスペクトルは検出器の性質が反映されたデータであり、検出器の性質を合わせて解析する必要があるため、レスポンス関数を適用させる。レスポンス関数には 2 種類あり、それぞれエネルギー

ギー再分配ファイル RMF (Redistribution Matrix File) とレスポンスファイル ARF (Ancillary Response File) である。RMF は検出 ch をエネルギーに変換する 2次元行列関数 $R(P,E)$ の形を持っており、エネルギー分解能の情報も含まれる。一方、ARF は検出器の検出効率や望遠鏡の有効面積情報を持つエネルギーの関数 $A(E)$ である。モデルスペクトルを $M(E)$ とすると、XSELECT で得られるスペクトル $M(P)$ は以下の式 4.1 で表すことができる

$$M(P) = \int R(P,E)A(E)M(E)dE \quad (4.1)$$

RMF

スペクトルファイルとエネルギーは必ずしも 1:1 の対応関係を持っている訳ではなく、エネルギー分解能や検出器の劣化に伴う検出効率の低下は時間により異なる。そのため、XSELECT で event ファイルからスペクトルを抽出した段階では、観測されたイベント光子は検出器の ch 波高値によって記述されている。RMF はある単一エネルギーを持つ光子に対するパルスハイトの確率分布で、検出 ch をエネルギーに変換する役割を持つ。本研究では、この RMF の作成に xisrmfgen と呼ばれるソフトウェアを用いた。この xisrmfgen は XSELECT で抽出して作成したスペクトルファイル (pha ファイル) を入力することで、エネルギー分解能・XIS の検出効率の時間変化を考慮し、天体観測時のエネルギーレスポンスを作成する。

ARF

望遠鏡に入射する X 線のエネルギーや入射角度によって、検出確率や望遠鏡の有効面積は変化する。さらに、望遠鏡によって反射されて検出器に焦点に集められた X 線は望遠鏡の角分解能に応じて、XIS 上で広がりを持つ。この広がり、天体の分布・検出される光子を抽出する範囲指定に依存する。これらの情報を与えるものが ARF であり、本研究では xissimarfgen と呼ばれるソフトを用いて作成した。この xissimarfgen は、観測状況を指定し、検出され得る様々なエネルギーの光子の検出をシミュレートすることによって ARF を作成する。点源天体と X 線で広がった天体では、arf 作成時に入力する情報が異なる。以下表に xissimarfgen に入力する情報について一部記載する。

- sorce mode: ターゲット天体の分布
 - SKYFITS/DEZTFITS
FITS 形式のイメージファイルを用いて入射 X 線分布情報を指定。広がった天体の解析に用いる。
 - SKYXY/DETX/DETXY/J2000
天体の座標の種類を指定。点源天体の解析に用いる。
 - UNIFORM
ある円形領域から一様に光子がやってくる状況を仮定し、分布を指定。本研究ではバックグラウンド (後述) の見積もりに用いる。
- region mode: 検出器の抽出する範囲
 - SKYFITS/DETFITS
FITS 形式のイメージファイルを用いて抽出範囲を指定。

- SKYREG/DETREG
region file を用いて抽出範囲を指定。
- limit mode: 検出するシミュレート光子の情報
 - NUM-PHOTON
シミュレートを行なう光子の数を指定する。数が多いほど ARF の精度は高くなるが、作成に時間を要する。

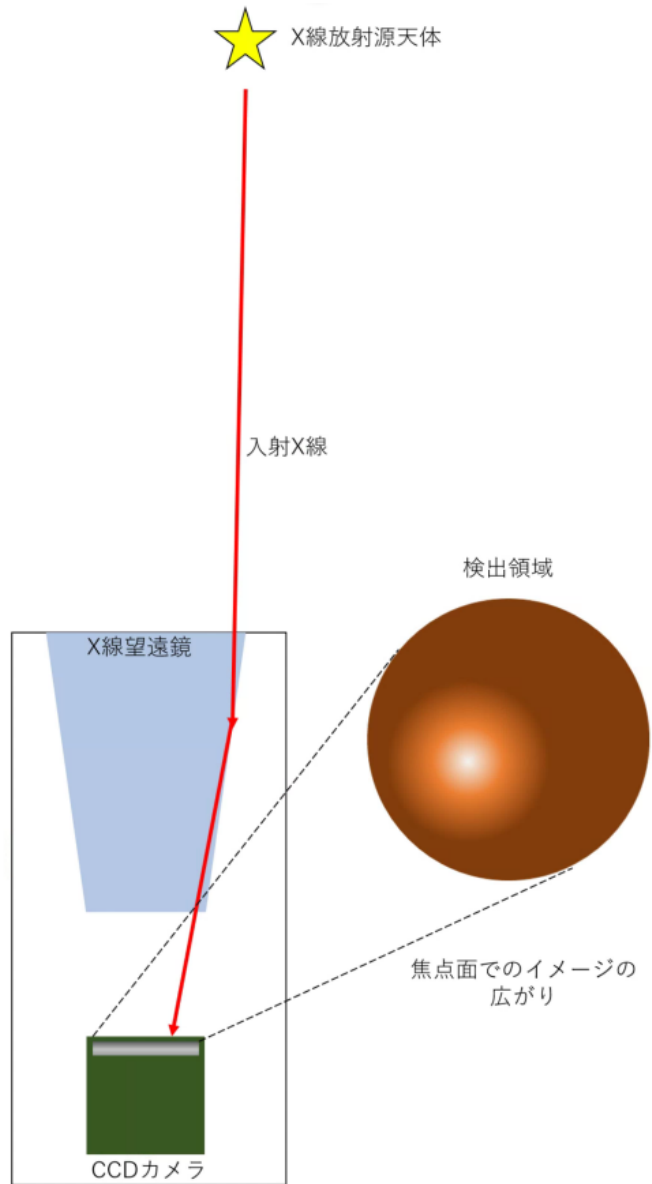


図 4.5: X 線検出の様式図

4.3.2 解析におけるバックグラウンド

event ファイルから抽出したスペクトルにはターゲット天体以外の X 線が存在するため、スペクトル解析にはそれらをバックグラウンドとして考慮する必要がある。このバックグラウンドには3種類が存在し、それぞれ非 X 線放射 (Non X-Ray Background: NXB)、宇宙 X 線背景放射 (Cosmic X-Ray Background: CXB)、天の川銀河 X 線放射 (Galactic X-Ray Background: GXB) と呼ばれる。

Non X-Ray Background: NXB

NXB は X 線以外のバックグラウンドのことで、その起源は荷電粒子・宇宙線である。荷電粒子が検出器を直接反応して生じたものと、荷電粒子が衛星を構成する物質と反応して生じた X 線が検出器に検出されるものがある。この NXB の評価には xisnxbgen というソフトを用いた。NXB の値は地球へやってくる宇宙線を曲げる地磁気の強さを示す COR (Cut Off Rigidity) と呼ばれる指標によって変化する。また、xis の night earth と呼ばれる太陽からの照り返しのない地球を見ている観測データは天体からの X 線が含まれず、ほぼ NXB である。xisnxbgen は night earth をデータベースとして、ターゲット天体のデータと共に COR ごとに区切ったファイルを作成し、観測時間によって COR 範囲を積み付けすることで NXB スペクトルファイルを作成する。そのため、xisnxbgen にはターゲット天体のスペクトルファイル・region ファイル・衛星の軌道・姿勢データを持つファイルを入力する必要がある。以下に NGC4636 を観測した際のスペクトルと、NGC4636 スペクトルから xisnxbgen を用いて作成した NXB スペクトルを比較した図を示す。

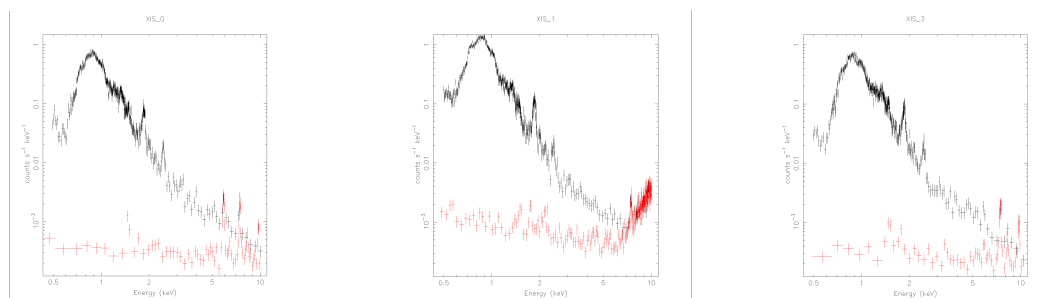


図 4.6: すざくで観測した NGC4636 の実スペクトル (黒) と NXB スペクトル (赤)。左から XIS0、XIS1、XIS3。

NGC4636 以外からの放射が主となる 7keV 付近で、観測から得られたスペクトルと NXB が一致していることが分かる。本研究では、観測で得られた実スペクトルから差引くことで NXB 以外の X 線イベントを以下で述べるように解析した。

Cosmic X-Ray Background: CXB

CXB は全天一様に分布している X 線放射である。CXB は日本の全 X 線天文衛星「あすか」によって無数の点源の重ね合わせであることが判明している。過去の衛星の観測により、CXB の放射式は以下 4.2 で表せる。

$$CXB(E) = 9.412 \times 10^{-3} (E/1\text{keV})^{-1.29} \times \exp(-E/40\text{keV}) \text{ photons/cm}^2/\text{s}/4\text{deg}^2/\text{keV} (\text{erg/cm}^2/\text{s}/\text{deg}^2/\text{keV}) \quad (4.2)$$

本研究では、過去の観測で得られた物理パラメータを用いて解析時に CXB を考慮するための準備を行った。以下に具体的な方法を記載する。まず、ターゲット天体の解析に用いる ARF とは別にシミュレーション時に用いる CXB 作成用 ARF を作成した。これは、解析したい天体の X 線放射の分布が一様分布の CXB とは異なるためである。この際に xissimarfgen に入力した情報を以下の表 4.2 にまとめる。

source mode	UNIFORM
source min(arcmin)	0
source max(arcmin)	20
region mode	SKYREG
region file	天体解析に用いる region ファイル
limit mode	NUM-PHOTON
number of photon	1000000
data-obs	2007-06-17 19:54:00
ea1,ea2,ea3	192.5138,84.5393,149.9535
rmf	天体解析用の rmf

表 4.2: CXB 作成用 ARF に入力した情報

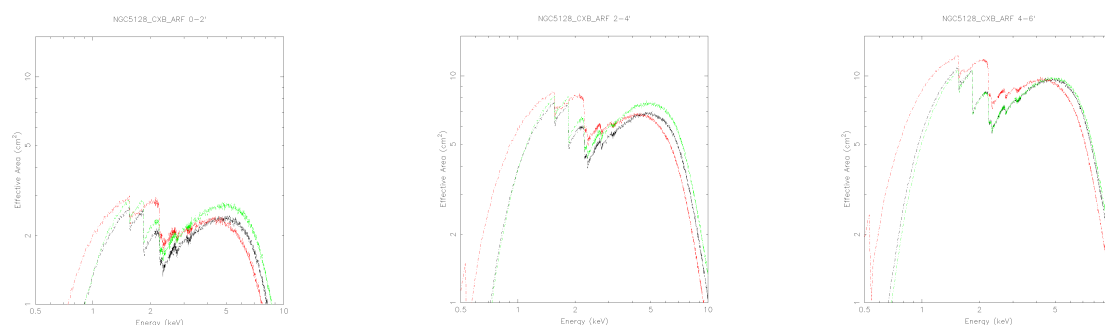


図 4.7: CXB 評価用 ARF 情報。左から順に NGC5128 の中心から 0-2'、2-4'、4-6' の領域でとった。黒・赤・緑の実線がそれぞれ XIS0、1、3 を示す。

次に XSPEC で CXB のモデルとパラメータを入力し、fakeit コマンドでシミュレーションスペクトルを作成した。シミュレーションスペクトルの作成にはレスポンス関数が必要になるため、先述の CXB

作成用 ARF と天体解析用 RMF を入力した。シミュレーションスペクトル作成に使用したモデルのパラメータを以下 4.3 に示す。

$N_H(10^{22}\text{cm}^{-2})$	1.0×10^{-2}
photon-index	1.29
normalization(photon/cm ⁻² /s/keV)@1keV	8.21×10^{-4}
cut-off energy(keV)	1.0×10^{-4}
e-folding energy(keV)	40.0

表 4.3: CXB モデルのパラメータ

上の表 4.3 に示した norm は面積比で 2 0 分角にスケールされた値である。NGC4636 では、このシミュレーションスペクトルファイルに天体解析用 ARF を適用し、再度 XSPEC でモデルフィッティングを行い、CXB モデルの norm を求め直した。求め直した CXB モデルのパラメータを含むモデル関数をターゲット天体の解析時に天体のモデル関数に付加することで CXB を考慮した解析を行った。

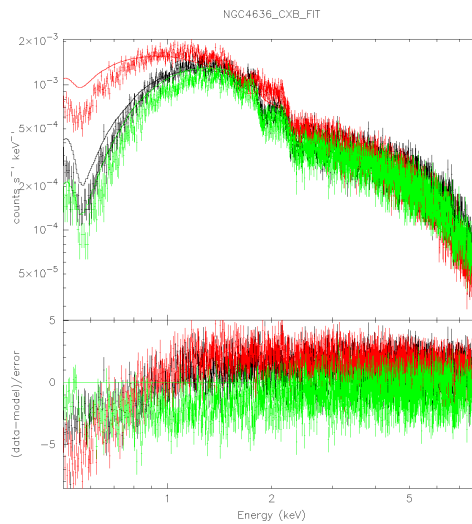


図 4.8: NGC4636 の 0-2' でのシミュレーション CXB スペクトルの天体解析用 ARF によるフィッティング図
黒・赤・緑の十字はそれぞれ XIS0、1、3 の観測スペクトル。黒・赤・緑の実線はそれぞれ XIS0、1、3 のモデル

	0-2'	2-4'
normalization(10^{-5})	1.30	3.47

表 4.4: NGC4636 の CXB モデルパラメータ

NGC5128 の CXB は後述の CXB/GXB 用の ARF (表 4.9) を別途作成し、GXB のパラメータと一緒に NGC5128 の解析時にモデルとして付加した。

Galactic X-Ray Background:GXB

GXB は我々がいる天の川銀河から放射される X 線バックグラウンド成分である。主に銀河面（天の川）に沿った X 線放射成分と太陽近傍を取り囲むように存在する高温プラズマ線成分の和である。NGC4636 と NGC5128 の GXB の解析にはそれぞれ NGC5128-GALACTIC と CenA-Lobe の観測データを用いた。これらはターゲット天体から少し離れた、明るい天体が存在しない場所の観測データである。以下に NGC5128-GALACTIC と CenA-Lobe についてまとめる。

天体名	ra	dec	観測日付	exposure(sec)
NGC4636-GALACTIC	12 50 03.12	05 27 20.9	2007-06-17T20:11:45	41499.70000
CEN_A_LOBE	13 20 03.58	-42 04 41.2	2014-07-26T06:31:29	49421.50000

表 4.5: GXB の見積りに用いたデータ

これらの観測データは NXB と CXB、GXB のスペクトルの和であると言える。検出器の視野のほぼ全体を覆う領域からスペクトルを抽出し、モデルフィッティングを行うことで GXB の解析を行った。NXB と CXB は先述と同様の手法で評価を行った。NXB は実スペクトルから差し引き、CXB は得られたパラメータを固定し、GXB のモデル関数に付加した。以下に NGC5128-GALACTIC と CenA-Lobe のモデルフィッティングに使用したモデルを示す。

$$\text{WABS} * (\text{APEC} + \text{GAUSS} + \text{POWERLAW} * \text{HIGHECUT}) \quad (4.3)$$

GAUSS モデルは、 O^{6+} 輝線を考慮して上式 4.3 のモデルに挿入した。GXB のモデルフィッティングを行う際の ARF 作成には NGC5128-GALACTIC では半径 $8'$ 、CenA-Lobe では半径 $7'$ の円形領域から一様に検出器にやってくる状況を指定した。以下に GXB の ARF 作成時に xissimarfgen へ入力した情報をまとめる。

source mode	SKYFITS
region mode	SKYREG
region file	各 GXB 成分解析に用いる region ファイル
limit mode	NUM-PHOTON
number of photon	50000
data-obs	各観測データの event ファイル
attitude	各観測データの att ファイル
rmf	各 GXB 成分解析用の rmf

表 4.6: GXB 評価用 ARF 作成時に入力した情報

また、以下に NGC4636-GALACTIC の ARF 情報とスペクトルフィッティング図を載せる。

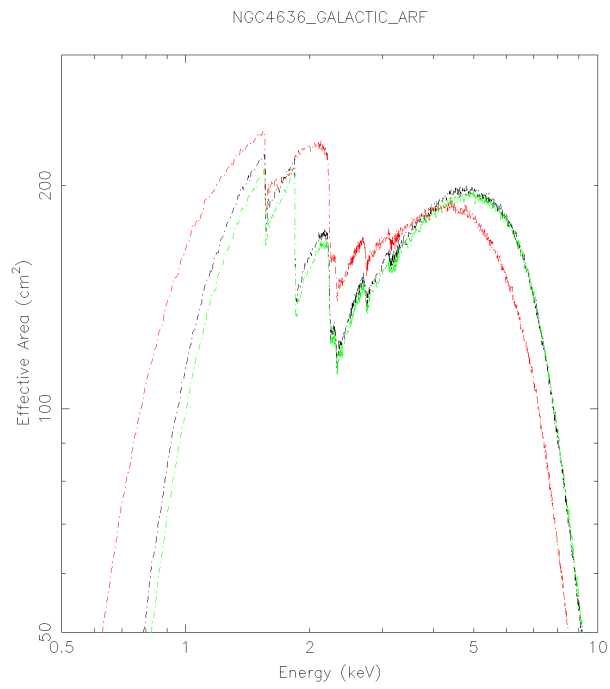


図 4.9: NGC4636-GALACTIC のスペクトルフィッティングに用いた ARF 情報

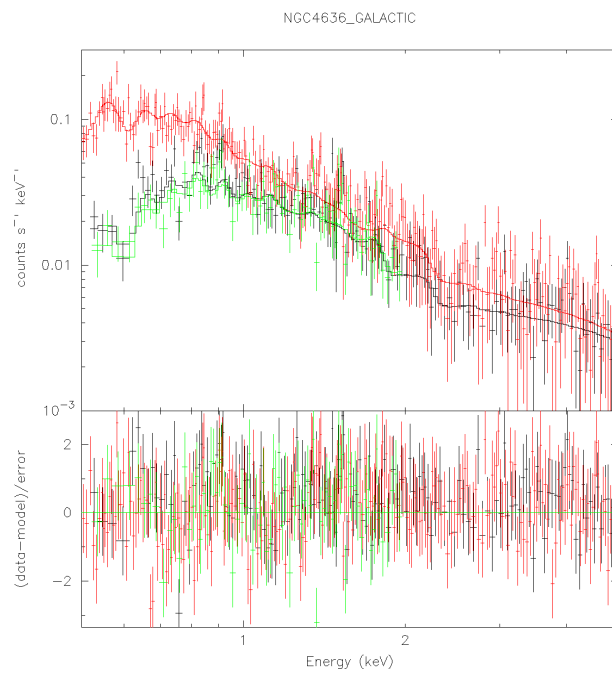


図 4.10: NGC4636-GALACTIC のスペクトル

このままでは求めた NGC4636-GALACTIC の解析領域と NGC4636 の解析領域が異なったままである。よって CXB のときと同様に、8' で求めた NGC4636-GALACTIC のモデルパラメータの内、CXB のパラメータ全てと、GXB モデル (APEC,GAUSS) パラメータの normalization 以外を固定し、再度フィッティングを行った。以下にその結果を示す。

	0-2'	2-4'
kT(keV)	0.281 ± 0.015	
$A_{Fe}(\times 10^{-2})$	4.21 ± 1.7	
APEC norm($\times 10^{-3}$)	0.522 ± 0.095	1.44 ± 0.25
GAUSS norm($\times 10^{-5}$)	2.33 ± 0.47	6.13 ± 1.25

表 4.7: NGC4636 の GXB モデルのパラメータ

以下に CenA-Lobe の ARF 情報とスペクトルフィッティング図、そして得られたパラメータについてまとめる。ただし、XIS1 で観測した CenA-Lobe の NXB のスペクトルを xisnxbgen で作成できなかったため (原因は不明)、下記の CenA-Lobe の解析は XIS0、3 の観測データを用いた。

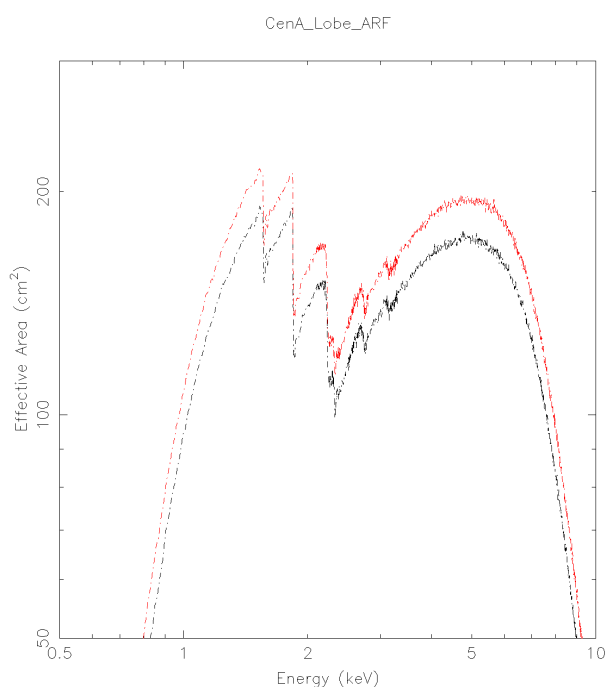


図 4.11: CenA_Lobe のスペクトルフィッティングに用いた ARF 情報

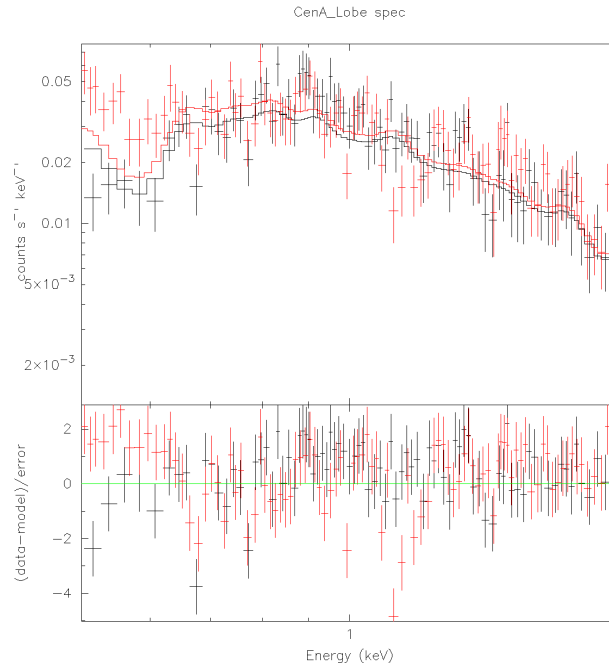


図 4.12: CenA.Lobe のスペクトル

0-7'	
kT(keV)	0.267 ± 0.01
$A_{Fe}(\times 10^{-2})$	3.97 ± 1.34
APEC norm($\times 10^{-3}$)	4.90 ± 1.23
GAUSS norm($\times 10^{-4}$)	3.58 ± 1.4

表 4.8: CenA-Lobe の GXB モデルのパラメータ

以上で得られた CenA-Lobe のパラメータを用いて CXB/GXB を天体解析時にモデルとして取り入れるが、NGC4636 の手法とは異なり、NGC5128 の解析の際に XSPEC 上で、天体用 ARF とは別に CXB/GXB 用 ARF を追加で読み込ませる方法で適用させた。この追加した ARF は GXB の X 線放射分布が NGC5128 と異なることを考慮して xissimarfgen で作成したものである。GXB と CXB が 8' の領域から一様に検出器へやってくる状況を指定し、解析したい領域の外側から漏れこんでくる光子の影響を考慮した。以下に CXB・GXB の値を NGC5128 の解析に適用させる際に用いた ARF についての情報をまとめる。

source mode	UNIFORM
source min(arcmin)	0
source max(arcmin)	7
region mode	SKYREG
region file	NGC5128 の解析に用いる region ファイル
limit mode	NUM-PHOTON
number of photon	50000
data-obs	NGC5128 の event ファイル
attitude	NGC5128 の att ファイル
rmf	NGC5128 解析用の rmf

表 4.9: 天体の解析に追加で読み込ませる ARF の作成に入力した情報

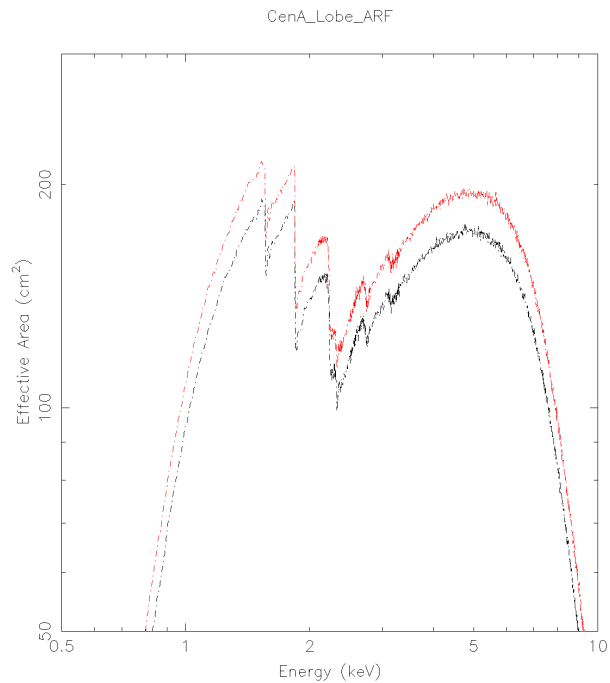


図 4.13: CenA.Lobe のスペクトルフィッティングに用いた ARF 情報

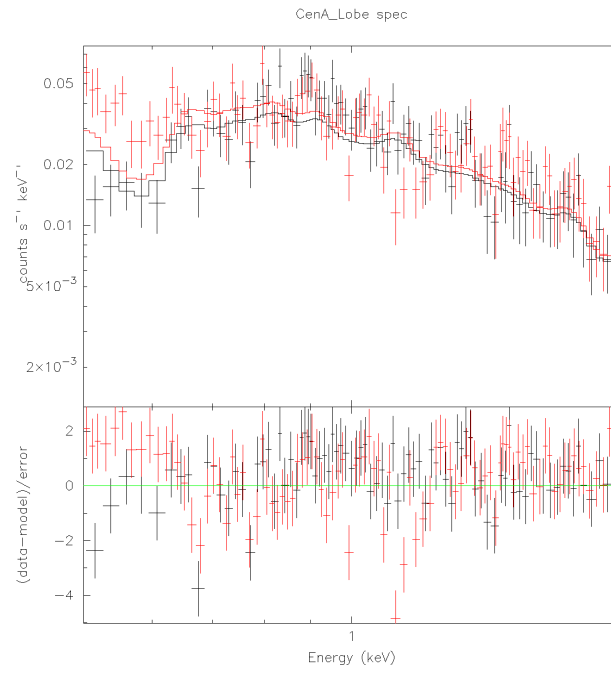


図 4.14: CenA_Lobe のスペクトルフィッティング図。

十字の点が観測されたスペクトル、実線がモデルスペクトルを表す。黒・赤はそれぞれ検出器 XIS0,3 を表す。

4.4 モデルフィッティング

4.4.1 用いたモデル

WABS

WABS モデルは、銀河系内に存在する星間ガスにより天体から放射された電磁波が地球に到達する前に光電吸収を受ける度合いを示したものである。光電吸収の程度を表す式を以下に示す。

$$A(E) = \exp\left(-\sum_i n f_i \sigma_i(E) d\right) \quad (4.4)$$

n は水素の数密度、 f_i は元素 i の割合、 σ_i は元素 i の吸収断面積、 d は吸収する物体の厚さを表す。光電吸収は 1keV 以下の低エネルギー側で強くなる。単位は水素柱密度 $N_H(\text{cm}^{-2}) = nd$ がモデルパラメータであり、一般に $\approx 10^{22} \text{cm}^{-2}$ のオーダーを持つ。

APEC

apec モデルは光学的に薄いプラズマを起源とする電磁波の放射を表すモデルである。この放射率は以下の式 4.5 で表せる。

$$L_X = (10^{-14}/4\pi(D_A(1+z)^2)) \int n_e n_H \epsilon(kT, A_{Fe}, E) dV \quad (4.5)$$

D_A は天体からの距離、 n_e と n_i はそれぞれ電子と水素の数密度である。このモデルの free パラメータはプラズマ温度 (keV) kT と重元素アバundance比 (A_{Fe}) と赤方偏移 z 、normalization である。apec モデルでは重元素アバundance比は太陽の元素組成比で固定されている。以下に重元素の組成比をまとめる。

H	1.00	Si	3.55×10^{-5}
He	9.77×10^{-2}	S	1.62×10^{-5}
C	3.63×10^{-4}	Cl	1.88×10^{-7}
N	1.12×10^{-4}	Ar	3.63×10^{-6}
O	8.51×10^{-4}	Ca	2.29×10^{-6}
Ne	1.23×10^{-4}	Cr	4.84×10^{-7}
Na	2.14×10^{-6}	Fe	4.68×10^{-5}
Mg	3.80×10^{-5}	Ni	1.78×10^{-6}
Al	2.95×10^{-6}	Co	8.60×10^{-8}

表 4.10: [太陽の重元素比] 太陽の重元素比。水素の原子数との比を表す

VAPEC

vapcc は apec と同じく、光学的に薄いプラズマからの電磁波放射のモデルである。しかし、vapcc は apec とは重元素アバundance比が free パラメータである点で異なっている。本研究では簡単のため、アバundance比を $\text{He} = \text{C} = \text{N} = 1\text{solar}$ 、 $\text{Al} = \text{Mg}$ 、 $\text{Ar} = \text{Ca} = \text{S}$ 、 $\text{Ni} = \text{Fe}$ に固定して解析を行った。

BREMSS

bremms モデルは熱平衡に達した天体を起源とする熱制動放射による連続成分を表す。本研究では、銀河中にある低質量 X 線連星 (LMXB) からの放射の連続成分を表すために使用した。free パラメータは温度 (kT)、normalization だが、本研究では LMXB からの放射を再現するため温度を 7keV に固定した。

GAUSS

GAUSS モデルは、輝線放射を表すガウス関数である。式は以下のように書ける。

$$A(E) = \frac{K}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(E - E_{line})^2}{\sigma^2}\right) \quad (4.6)$$

ここで、free パラメータは normalization(K) と輝線のエネルギー E_{line} 、輝線の幅 σ である。

POWERLAW

powerlaw モデルはべき乗関数であり、以下の式のように書ける。

$$A(E) = Ke^{-\alpha} \quad (\text{photon/keV/cm}^2/\text{s}) \quad (4.7)$$

α は光子指数、 K は単位時間・単位面積・単位エネルギーあたりの放射光子数を表す。光子指数 α が大きいほど低エネルギー側での光子の数が大きくなる。

HIGHECUT

powerlaw モデルは両対数グラフ上で直線状で表される。しかし powerlaw のみを CXB のモデルとして用いる場合、光子指数の変化により生じる折れ曲がり表現できない。highcut はこの折れ曲がりを表すモデルであり、折れ曲がり起きるエネルギーを cutoff エネルギーと呼ぶ。以下に highcut モデルの式を示す。

$$A(E) = \begin{cases} \exp\left(\frac{E_{cut} - E}{E_{e-folding}}\right) & (E > E_{cut}) \\ 1 & (E < E_{cut}) \end{cases} \quad (4.8)$$

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

4.4.2 最小自乗法

スペクトルにモデル関数をフィッティングさせる際、最小自乗法が用いられる。ここで、観測データから得られる実スペクトルを $D_P(P)$ 、バックグラウンドのスペクトルを B_P とすると、天体のみから放射される電磁波スペクトル D_P は以下のように表される。

$$D_P = D_{PI}(P) - B_P \quad (4.9)$$

スペクトルとモデルは χ^2 検定を用いて比較される。式 4.1 と同様にモデルスペクトルを $M(E)$ とすると、その比較は以下のように行われる。

$$\chi^2 = \frac{(D(P) - M(P))^2}{\Delta D(P)^2} \quad (4.10)$$

ここで、 $\Delta D(P)$ は測定誤差を表す。測定誤差は

$$\Delta D(P) = \sqrt{(\sqrt{D(P)})^2 + (\Delta B(P))^2} \quad (4.11)$$

のように表され、観測天体とバックグラウンドの統計誤差が含まれる。スペクトル解析では、モデル関数のパラメータが上式 4.10 の χ^2 を最小にするように定められる。

第5章 解析方法の確立

5.1 解析の手順と ARF ファイルの理解

まずはじめに X 線解析の流れとレスポンスファイルについて理解するために点源天体 3C454.3 のスペクトル解析を行った。解析領域については以下に示すように、天体の中心から 0-2'、2-4' で分けて解析を行った。目的は両方のスペクトル解析において、適切なレスポンスを用いることで同じ結果が得られることを確認することである。

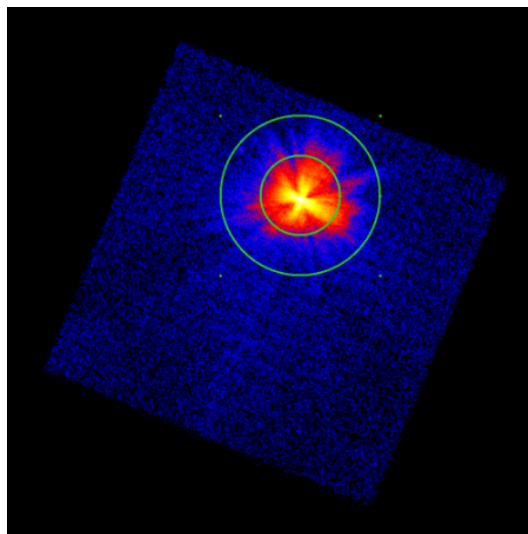


図 5.1: 3C454.3 の解析領域

3C454.3 のスペクトルフィッティングに用いたモデル関数は以下である。この天体は、過去の観測でこのモデルでフィットできることが示されている。

$$\text{WABS * POWERLAW} \quad (5.1)$$

各領域における、有効面積、スペクトルフィッティング図及び解析結果のパラメータをまとめる。

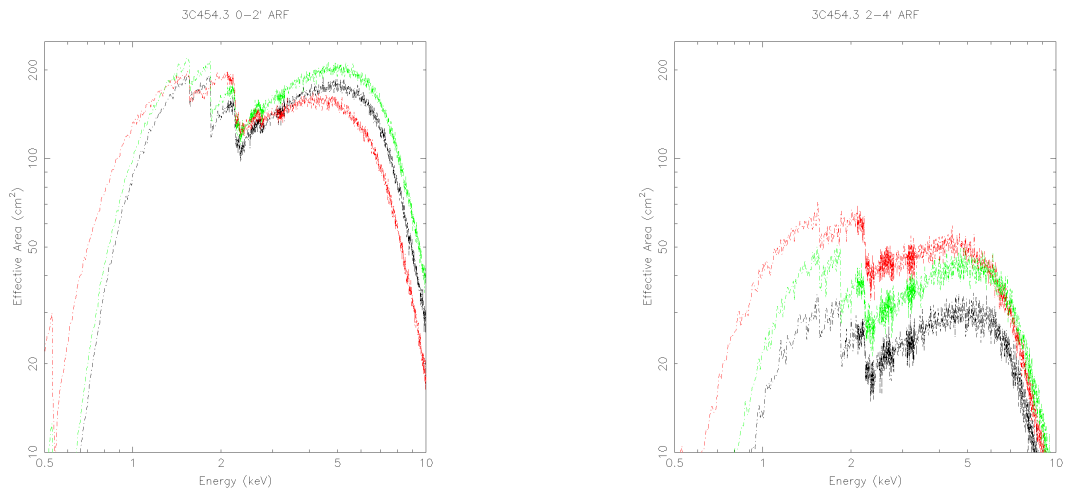


図 5.2: 0-2' (左)、2-4' (右) における ARF 情報黒・赤・緑の実線はそれぞれ XIS0、1、3 を表す。

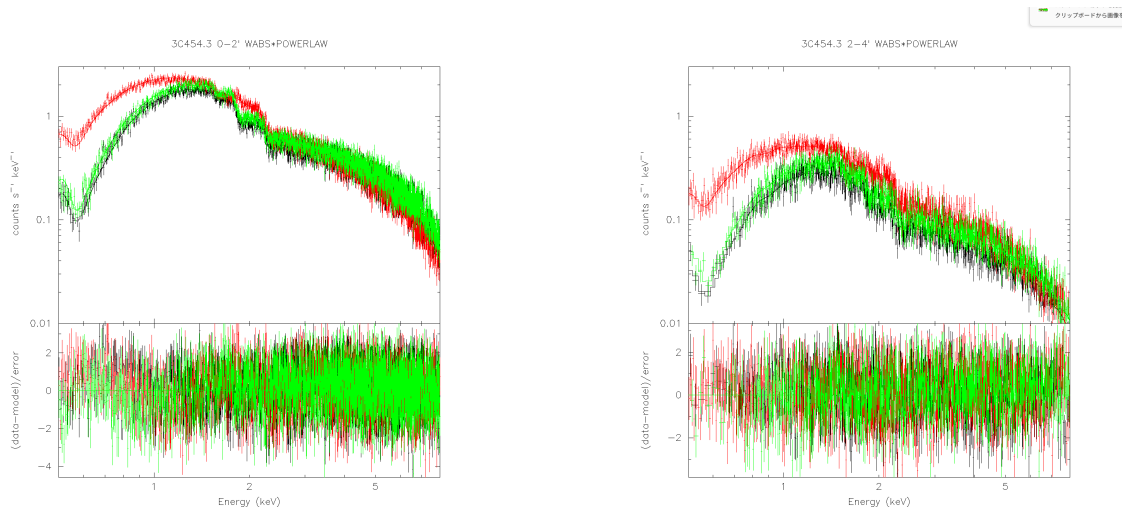


図 5.3: 3C454.3 の 0-2' (左)、2-4' (右) におけるスペクトルフィッティング図

十字の点は観測されたスペクトル、実線はモデルスペクトルを表す。黒・赤・緑はそれぞれ検出器 XIS0、1、3 を表す

	0-2'	2-4'
nH(10^{22}cm^{-2})	0.108 ± 0.003	0.088 ± 0.004
PhoIndex	1.682 ± 0.006	1.642 ± 0.009
Powerlaw_norm(XIS0)(10^{-2})	2.046 ± 0.002	1.913 ± 0.02
Powerlaw_norm(XIS1)(10^{-2})	2.257 ± 0.002	1.50 ± 0.004
Powerlaw_norm(XIS3)(10^{-2})	1.986 ± 0.002	1.56 ± 0.004

表 5.1: 3C454.3 のスペクトルフィット結果

点源天体である 3C454.3 から検出器へ到達する光子は本来点として観測されるはずだが、望遠鏡の精度によって広がったイメージとして観測される。ここでは、広がったイメージ像に対して、半径 0-2'、2-4' でスペクトルを抽出してフィッティングを行ったが、同じ結果が得られるのが理想である。しかし表 5.1 を見ると、nh と PhoIndex は概ね合っているが、norm が 0-2' では約 10%以内の、2-4' では約 20%の違いが生じている。この違いが生じる原因は、2-4' の領域で望遠鏡の有効面積が小さくなることによりパラメータの ARF 作成精度が外側の領域で悪くなり、表 5.1 にまとめた norm の値が検出器ごとでばらつくためであると考えられる。天体の X 線分布情報をきちんと把握し、適切な ARF を選択・作成することがスペクトル解析において重要であることが理解できた。

5.2 バックグラウンドを考慮する必要がある広がった天体の解析

次は、X 線放射の分布が広がった天体の X 線解析を行った。解析領域を以下のように 0-2'、2-4' で切り取った。

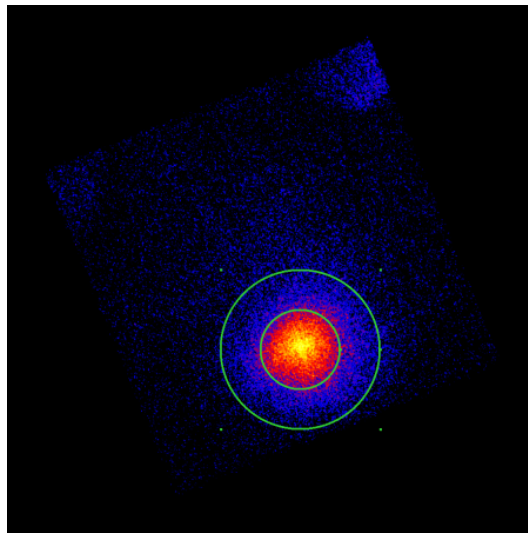


図 5.4: NGC4636 の解析領域

楕円銀河からの放射に CXB と GXB からの X 線放射を含めることでモデルフィッティングを行った。以下にモデル関数を示す。

$$\text{WABS} * (\text{VAPEC} + \text{BREMSS} + \text{POWERLAW} * \text{HIGHECT} + \text{APEC} + \text{GAUSS}) \quad (5.2)$$

APEC と BREMSS が楕円銀河から放射される X 線成分、POWERLAW*HIGECT と APEC+GAUSS がそれぞれ CXB と GXB 成分を表す。用いた ARF は本天体解析用に作成した ARF (図 5.2) であり、CXB/GXB のパラメータは表 4.4.4.7 の値に固定した。

各領域における、有効面積、スペクトルフィッティング図及び解析結果のパラメータをまとめる。

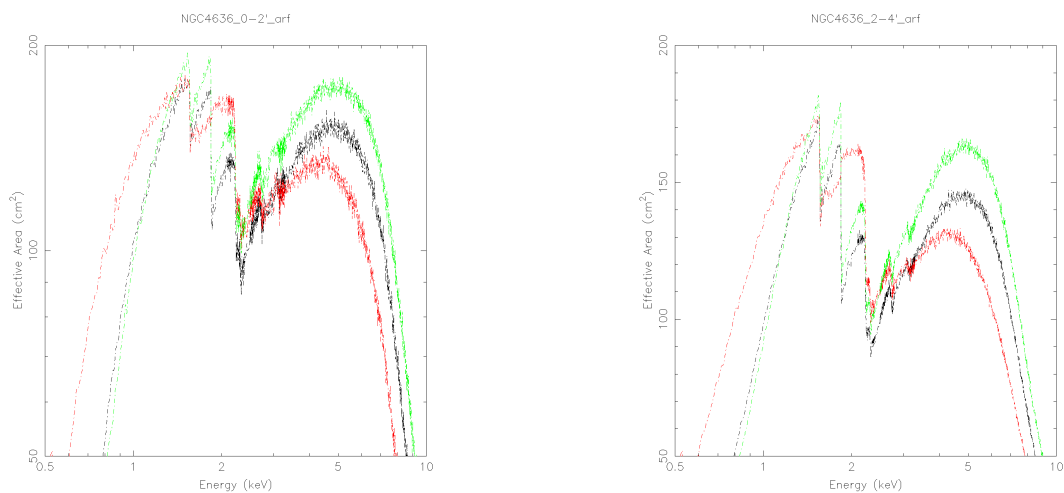


図 5.5: 0-2' (左)、2-4' (右) における ARF 情報。黒・赤・緑の実線はそれぞれ XIS0、1、3 を表す。

楕円銀河として広がった X 線放射分布をしているため、点源天体 3C454.3 で見られたような 0-2' と 2-4' での有効面積の変化は小さくなっていることが分かる。

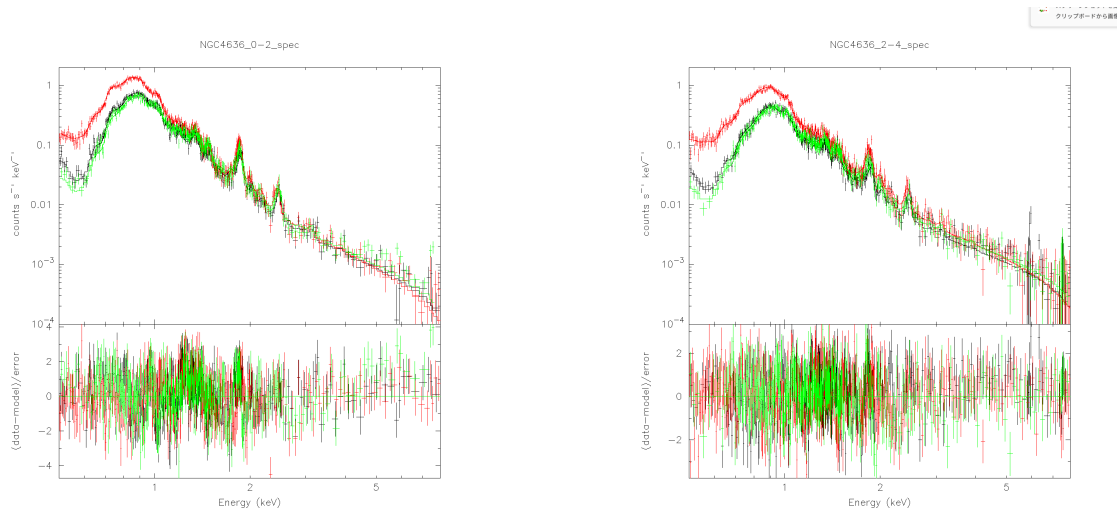


図 5.6: NGC4636 の 0-2' (左)、2-4' (右) におけるスペクトルフィッティング図
 十字の点は観測されたスペクトル、実線はモデルスペクトルを表す。黒・赤・緑はそれぞれ検出器 XIS0、1、3 を表す

	0-2'		2-4'	
nH(10^{20}cm^{-2})	0.108	+0.04 -1.6e-4	4.7	± 0.07
kT(keV)	0.748		0.82	± 0.01
O(solar)	0.59	+0.10 -0.05	0.43	+0.14 -0.12
Ne(solar)	1.9	± 0.02	1.5	± 0.2
Mg(solar)	1.00	± 0.008	0.82	+0.15 -0.13
Si(solar)	0.99	± 0.1	0.69	+0.11 -0.09
S(solar)	1.3	± 0.2	0.86	+0.18 -0.16
Fe(solar)	0.67	+0.07 -0.06	0.54	+0.07 -0.05
VAPEC_norm(10^{-3})	2.25	± 0.02	2.2	± 0.2
BREMSS_norm(10^{-4})	0.75	± 0.07	0.54	± 0.10
GAUSS_norm(10^{-5})	1.4	± 1.00	3.3	+2.5 -2.9

表 5.2: NGC4636 のスペクトルフィット結果

中心領域の 0-2' よりも外側の 2-4' の方が高い温度を有していることが分かる。また、重元素のアバダンスも外側の方が低くなっていることが分かる。これは高い温度により重元素が電離されたことによるものだと考えられる。また、以下に過去にすざく衛星で観測した NGC4636 の解析を行った論文の結果をまとめる (林克洋 卒業論文 広島大学 2007)。

	0-2'		2-4'	
nH(10^{20}cm^{-2})	2.2	± 0.1	1.6	± 0.2
kT(keV)	0.641	± 0.002	0.732	± 0.004
O(solar)	0.64	± 0.06	0.80	± 0.10
Ne(solar)	1.3	± 0.1	1.7	± 0.2
Mg(solar)	1.3	± 0.1	1.9	± 0.2
Si(solar)	01.3	± 0.1	1.5	± 0.2
S(solar)	2.0	± 0.3	1.9	0.3
Fe(solar)	1.00	± 0.6	1.2	± 0.1
VAPEC_norm(10^{-3})	2.4	± 0.3	1.3	± 0.2
BREMSS_norm(10^{-4})	0.97	± 0.09	1.1	± 0.1
GAUSS_norm(10^{-5})	1.6	± 2.5	3.2	± 2.0

表 5.3: 過去の論文における NGC4636 のスペクトルフィット結果

本研究での解析結果表 5.2 と 5.3 を比較すると、アバダンス比がある程度合っているものが一部確認できるものの、その他アバダンスや温度は合致していない。しかし、過去の研究で用いられた VAPEC は 2023 年現在で用いられている VAPEC とラインのデータベースが異なるモデルとなっており、フィッティングで得られるパラメータが変わってしまう。よって、本研究で得られた解析結果は過去の研究での解析結果とは違う結果になった。本研究と過去の研究のそれぞれで各元素のアバダンス比と APEC モデルの norm を掛けた値の平均を求めた。その結果は以下であり、これらの数値が各領域でおおよそ合っていると判断し、本研究の解析手法が問題ないものとした。

	0-2'(本研究)	0-2'(過去の研究)	2-4'((本研究)	2-4'(過去の研究)
Abundanc \times VAPEC_norm	0.0024	0.0030	0.0018	0.0020

図 5.7: アバダンス比と VAPEC_norm を掛けた値の比較

以上で、X 線スペクトル解析手順の理解と確立を行った。

第6章 解析手法の実践

最後に、NGC5128 の X 線解析を行った。NGC5128 は中心に高エネルギー側での活動銀河核 (Active Galactic Nucleus:AGN) が点源のように見えており (図 6.1、図 6.3)、Centaurus-A として知られている。NGC5128 は我々の天の川銀河から約 3.8Mpc の距離に存在し、早期銀河の中では最も近傍にある巨大質量銀河である。形態分類としては S0 pec に相当し、様々な波長の電磁波観測によって銀河中心付近にダストで構成されたリングが存在していることが明らかになっている。また、AGN からはジェットも吹き出しており、電波で明るく輝いている。

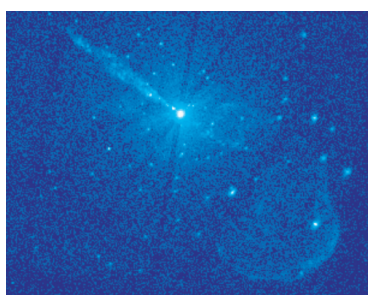


図 6.1: Chandra 衛星による NGC5128 の X 線イメージ (約 10'×8')



図 6.2: Centaurus-A の可視光イメージ。(FoV 22.11)'

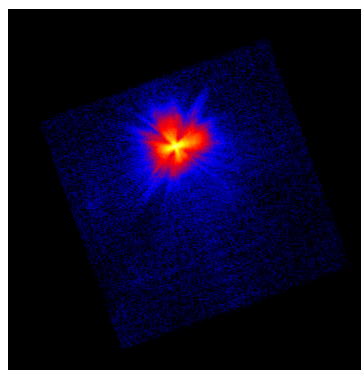
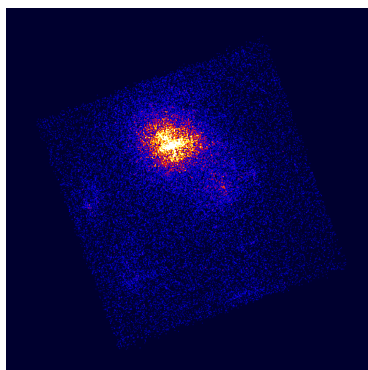


図 6.3: すざく衛星による NGC5128 の X 線イメージ (約 17'×17')。左が 0.5-2.0keV、3.0-10keV

6.1 すざく衛星によるデータの解析

6.3 にすざく XIS の画像を示す。Chandra に比べて角度分解能が悪いため Chandra で見られる細かい構造は見えないが、低エネルギー側では広がっていて楕円銀河の高温ガスが見えている。一方、高エネルギー側

では 3C454.3 のイメージ同様に AGN が点源として見えている。本研究では高温ガスが研究対象であるため、軟 X 線として 0.5-2.0keV を解析対象としており、以下に 0.5-2.0keV 範囲での解析領域を載せる。NGC5128 は天体中心から 0-2'、2-4'、4-6' の 3 つに分けて解析を行った。

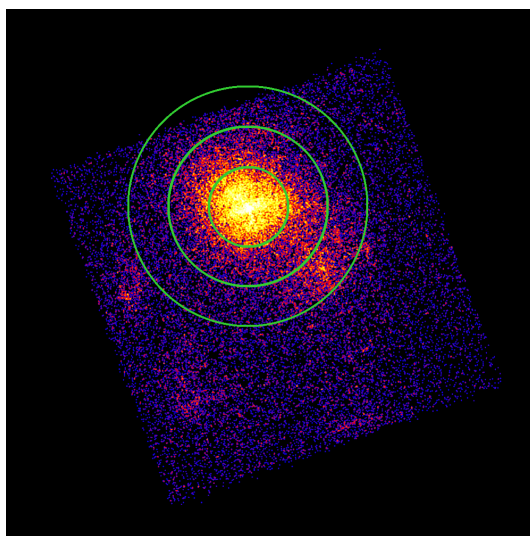


図 6.4: NGC5128(0.5-2.0keV) の解析領域

本研究では NGC5128 において、1つのスペクトルデータに対して3つのレスポンスを XSPEC 上で適用させて解析を行った。NGC5128 の楕円銀河成分と AGN から放射される X 線成分、バックグラウンド (CXB と GXB) 成分の3つに対して異なる ARF を用いた。これは、それぞれの X 線成分で異なる X 線放射分布をしているためである。ここでは、AGN から放射される X 線成分に対して適用させる ARF の作成に xissimarfgen に入力した情報をまとめる。

source mode	SKYXY
region mode	SKYREG
region file	NGC5128 の解析に用いる region ファイル
limit mode	NUM-PHOTON
number of photon	50000
data-obs	NGC5128 の event ファイル
attitude	NGC5128 の att ファイル
rmf	NGC5128 解析用の rmf

表 6.1: AGN 成分の ARF 作成に入力した情報

楕円銀河成分とバックグラウンド成分に適用させる ARF はそれぞれ図 6.1 であり、用いたバックグラウンドのパラメータは表 4.8 にまとめた。フィッティングに用いた関数は以下の3つである。

$$\text{WABS} * (\text{APEC} + \text{BREMSS}) \quad (6.1)$$

$$\text{WABS} * (\text{WABS} * \text{POWERLAW}) \quad (6.2)$$

$$\text{WABS} * (\text{APEC} + \text{GAUSS} + \text{POWERLAW} * \text{HIGHECT}) \quad (6.3)$$

式 6.1 が楕円銀河から放射される成分、式 6.2 が AGN から放射される成分、式 6.3 が CXB と GXB 成分を表すモデルである。本解析において固定したパラメータを以下にまとめる

Model		
WABS	$nH(10^{22}\text{cm}^{-2})$	0.16
BREMSS	kT(KeV)	7.0
WABS(AGN 成分)	$nH(10^{22}\text{cm}^{-2})$	10.7
POWERLW (AGN 成分)	PhoIndex	1.73
	norm	0.128

表 6.2: モデルフィッティングにおいて固定したパラメータ²

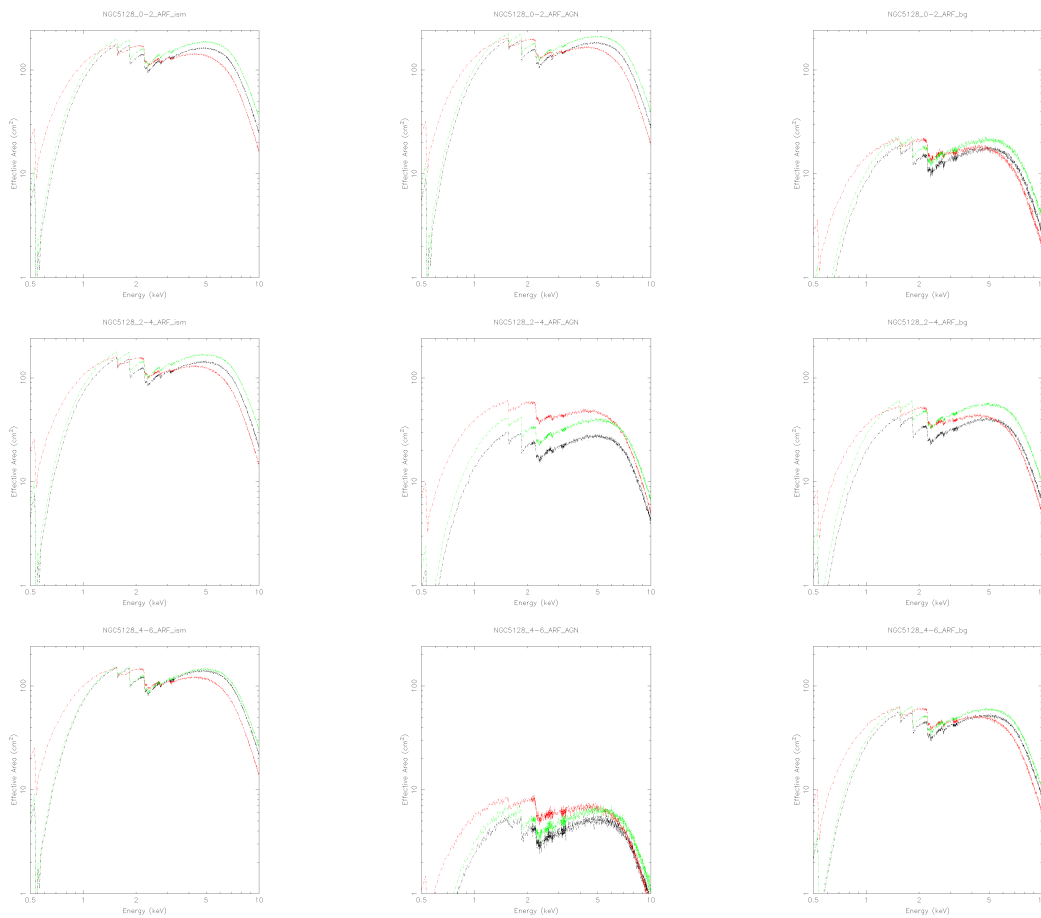


図 6.5: NGC5128 における ARF 情報。

上・中・下段がそれぞれ 0-2', 2-4', 4-6' での有効面積を示している。左列が楕円銀河成分、中央の列が AGN 成分、右列がバックグラウンド成分を示している。黒・赤・緑の実線はそれぞれ XIS0、1、3 を表す。

²参考文献：Yasushi,Fukazawa, et al.,2011,The Astrophysical Journal, 743:124

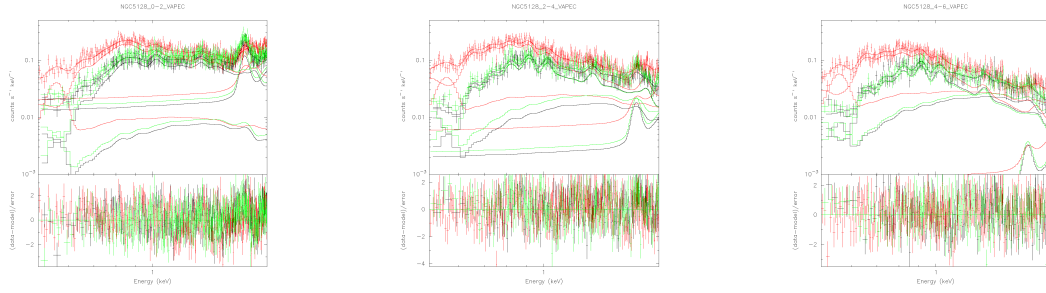


図 6.6: NGC5128 の 0-2' (左)、2-4' (中央)、4-6' (右) におけるスペクトルフィッティング図
 十字の点は観測されたスペクトル、実線はモデルスペクトルを表す。黒・赤・緑はそれぞれ検出器 XIS0、
 1、3 を表す

以下にフィッティングによって得られたパラメータをまとめる。

	0-2'		2-4'		4-6'	
kT(KeV)	0.666	± 0.02	0.593	$+0.02$ -0.03	0.298	± 0.01
A_{Fe}	5.00	± 64.3	0.109	$+0.03$ -0.02	0.084	$+0.03$ -0.02
APEC_norm(10^{-3})	0.079	$+0.189$ -0.003	4.377	$+0.82$ -0.81	10.5	$+0.23$ -0.22
BREMSS_norm(10^{-3})	1.25	± 0.04	0.595	± 0.05	0.607	± 0.03
GAUSS_norm(10^{-3})	1.22	± 0.04	0.983	± 0.13	0.499	± 0.12
χ^2/dof	1.198		1.515		1.159	
(χ^2, dof)	(1240.75, 1036)		(1128.68, 745)		(691.83, 597)	

表 6.3: NGC5128 のスペクトルフィット結果

表 6.3 において、0-2' という中心領域ではアバンダンスや APEC、BREMSS の norm が上手く定まらず、モデルフィッティングが不十分になった。考えられる要因として、図 6.2 に見られるように 0-2' では AGN 成分 (水平にまっすぐ伸びる成分) の与える影響が大きくなっており、相対的に連続成分に対する輝線が弱くなった結果として APEC のアバンダンスと norm がカップルし独立にパラメータが定まらなかったことが考えられる。これはさすが XIS のエネルギー分解能では、輝線が広がってしまい、連続成分との区別がつかなくなるためである。

加えて、2-4' 領域において 0.6-0.7keV でモデルとスペクトルに大きな違いが見られる (図 6.1)。この違いは、0-2' でも僅かに見られる。この違いが NGC5128 の中心から吹き出すジェットによるものと仮定し、ジェットが吹き出している領域を 0-2', 2-4', 4-6' 部分から取り除いた領域 (図 6.7) でも同じ手順で解析を行った。結果を以下に示す。

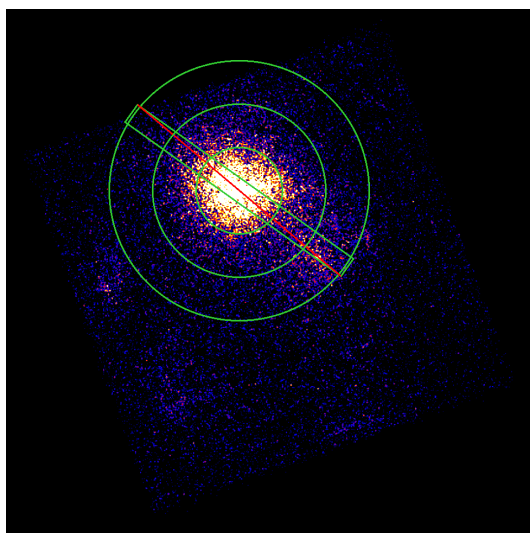


図 6.7: NGC5128 のジェット部分を取り除いた解析領域

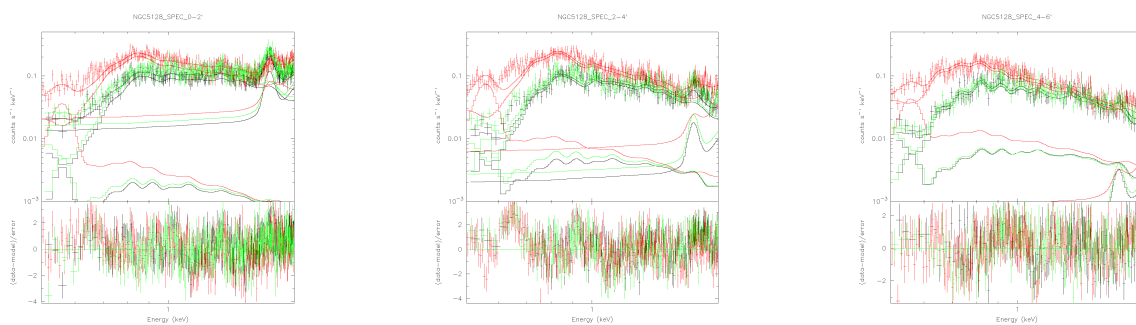


図 6.8: ジェット部分を取り除いた NGC4636 の 0-2' (左)、2-4' (中央)、4-6' (右) におけるスペクトルフィッティング図

十字の点は観測されたスペクトル、実線はモデルスペクトルを表す。黒・赤・緑はそれぞれ検出器 XIS0、1、3を表す

	0-2'		2-4'		4-6'	
kT(KeV)	0.700	±0.02	0.592	±0.03	0.303	±0.01
A_{Fe}	4.00	±64.3	0.0983	+0.03 -0.02	0.152	+0.10 -0.04
APEC_norm(10^{-3})	0.094	+0.189 -0.003	4.275	+0.79 -0.78	5.84	+2.13 -2.0
BREMSS_norm(10^{-3})	0.794	+0.03 -0.07	0.351	±0.05	0.667	±0.03
GAUSS_norm(10^{-3})	1.34	±0.28	0.880	±0.12	0.550	±0.14
χ^2/dof	1.254		1.504		1.346	
(χ^2, dof)	(1062.14, 847)		(1021.08, 679)		(802.20, 596)	

表 6.4: ジェット部分を取り除いた NGC5128 のスペクトルフィット結果

図 6.8 より、ジェット部分を取り除いても 0.6-0.7keV 付近でのモデルとスペクトルの差の改善には至らなかった。この差が生じる原因が解析に用いたモデルが最適なものではないためだと考えた。本研究では楢円銀河からの放射について APEC と BREMSS というモデルを採用したが、APEC の free パラメータであるアバンダンスは太陽の重元素比で固定されているため今回のターゲット天体である NGC5128 の重元素比とは合わないと考えられる。APEC モデルの代わりに、重元素の比率が個々に決定できる VAPEC モデルを用いた解析を行ない、モデルフィッティング結果を比較した。VAPEC の重元素比率は NGC4636 と同様に $\text{He} = \text{C} = \text{N} = 1\text{solar}$ 、 $\text{Al} = \text{Mg}$ 、 $\text{Ar} = \text{Ca} = \text{S}$ 、 $\text{Ni} = \text{Fe}$ に固定した。以下にモデルフィッティング図及び解析結果を示す。

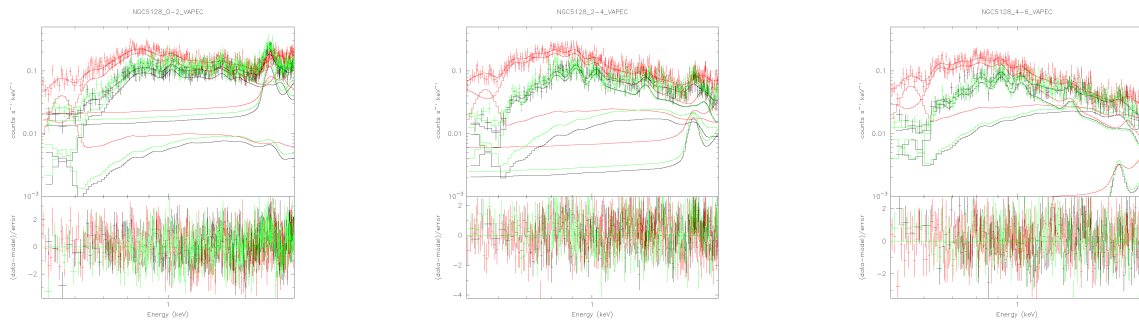


図 6.9: VAPEC を採用した NGC5128 の 0-2' (左)、2-4' (中央)、4-6' (右) におけるスペクトルフィッティング図

十字の点は観測されたスペクトル、実線はモデルスペクトルを表す。黒・赤・緑はそれぞれ検出器 XIS0、1、3 を表す

	0-2'		2-4'		4-6'	
kT(keV)	0.695	±0.03	0.365	+0.015 -0.014	0.341	±0.02
O(solar)	371	±7.66e5	104	+276 -0.83	1.33	+243 -0.95
Ne(solar)	197	+171 -306	207	+353 -1.06	1.75	+311 -1.21
Mg(solar)	110	+142 -194	185	+262 -0.81	1.48	+254 -1.00
Si(solar)	237	±3.26e5	822	±4.93	5.97	/pm6.81
S(solar)	988	±8.57e-12	1.15e-8	+201 -0.40	6.22	+873 -5.16
Fe(solar)	55	+44.3 -143	57.2	+133 -0.40	0.679	+119 -0.46
VAPEC_norm(10 ⁻³)	6.11e-3	+0.69 -0.05	8.03e-3	+2.25 -1.31	9.86	+1.99 -0.96
BREMSS_norm(10 ⁻⁴)	9.67	+0.63 -0.54	5.26	+0.44 -0.47	3.60	+0.40 -0.42
GAUSS_norm(10 ⁻⁴)	11.3	+3.45 -3.02	11.7	+1.65 -1.67	5.15	+1.61 -1.59
χ^2/dof	1.143		1.143		1.010	
(χ^2, dof)	(962.43, 842)		(962.79, 842)		(648.77, 590)	

表 6.5: VAPEC を採用した NGC5128 のスペクトルフィット結果

上の表 6.5 より、楕円銀河の 2-4' から 4-6' 領域で温度勾配が緩やかになっていることが分かる。また、図 6.9 から分かるように、VAPEC モデルを採用することで、APEC モデルで見えていた 0.6-0.7keV でのモデルとスペクトルの差が消えており、フィッティングの精度を表すパラメータである χ^2/dof が 1 に近づいている、即ち精度の高いフィッティングが行えていることも分かる。しかし、それぞれの重元素アバンドンス比は有意に定まらず、物理的に適切な重元素比が得られたとは言い難い。本研究では重元素比を NGC4636 と NGC5128 とで同じような固定パラメータを設定したが、NGC5128 ではまた別の固定パラメータの設定の必要があると考えられる。

6.2 Chandra 衛星によるデータの解析

また、すざく衛星の解析に加えて位置分解能に優れた Chandra 衛星の観測したデータを用いて楕円銀河の温度分布を調べた。用いたモデル関数は以下である。

$$\text{WABS} * (\text{APEC} + \text{BREMS}) \quad (6.4)$$

観測に用いられた検出器は ACIS(Advanced CCD Imaging Spectrometer) と呼ばれる CCD カメラである。解析の対象は観測で得られたイメージ (図 6.1) において天体中心から約 1.1', 1.1-2.2', 2.2-3.3' で取り出し、AGN が見える部分とジェット部分を更に取り除いた領域である。以下にその解析領域を示す。

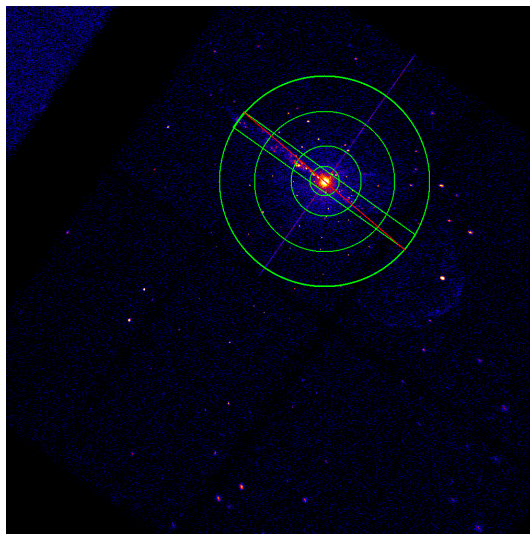


図 6.10: Chandra の解析領域。中心の明るい AGN が見えている領域は解析の対象から外した

モデルフィッティング図と解析結果を以下にまとめる。

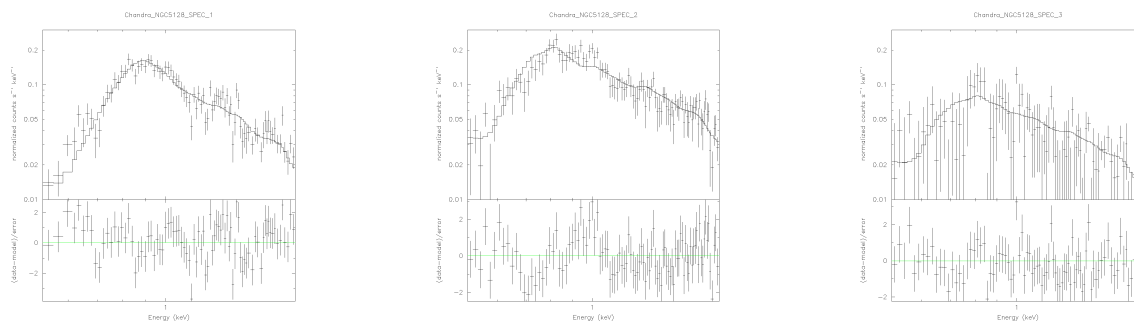


図 6.11: Chandra 衛星で観測した NGC51283 の中心 (左)、1.1-2.2' (中央)、2.2-3.3' (右) におけるスペクトルフィッティング図

十字の点は観測されたスペクトル、実線はモデルスペクトルを表す

	中心		1.1-2.2'		2.2-3.3'	
kT(KeV)	0.800	+0.04 -0.03	0.362	+0.06 -0.03	0.299	+0.17 -0.08
A_{Fe}	0.164	+0.20 -0.07	0.164	+0.57 -0.08	0.06	± 0.06
APEC_norm(10^{-3})	7.82	± 0.39	1.83	+1.30 -1.33	2.07	+7.41 -2.04
BREMSS_norm(10^{-3})	0.132	± 0.04	0.340	+0.03 -0.04	0.145	+0.03 -0.04
χ^2/dof	1.523		1.175		0.962	
(χ^2, dof)	(129.44,85)		(116.35,99)		(81.80,85)	

表 6.6: Chandra 衛星で観測した NGC5128 のスペクトルフィット結果

上の表 6.6 とすざく XIS の結果 (表 6.5) を比較すると、温度分布はきまるものの、アバんだンスは誤差が大きく定まていない。

6.3 XRISM のシミュレーションスペクトル

また、JAXA の XRISM 研究者向け Web サイトに公開されている XRISM のシミュレーション用 RMF/ARF を用いて XRISM シミュレーションスペクトルを作成した。このスペクトル作成には表 6.4 の 0-2' におけるモデル関数及びパラメータを用いた。この作成したシミュレーションスペクトルに XSPEC 上で再度 XRISM のシミュレーション用 RMF/ARF を適用し、同じ free パラメータでフィッティングを行った。以下に結果を示す。

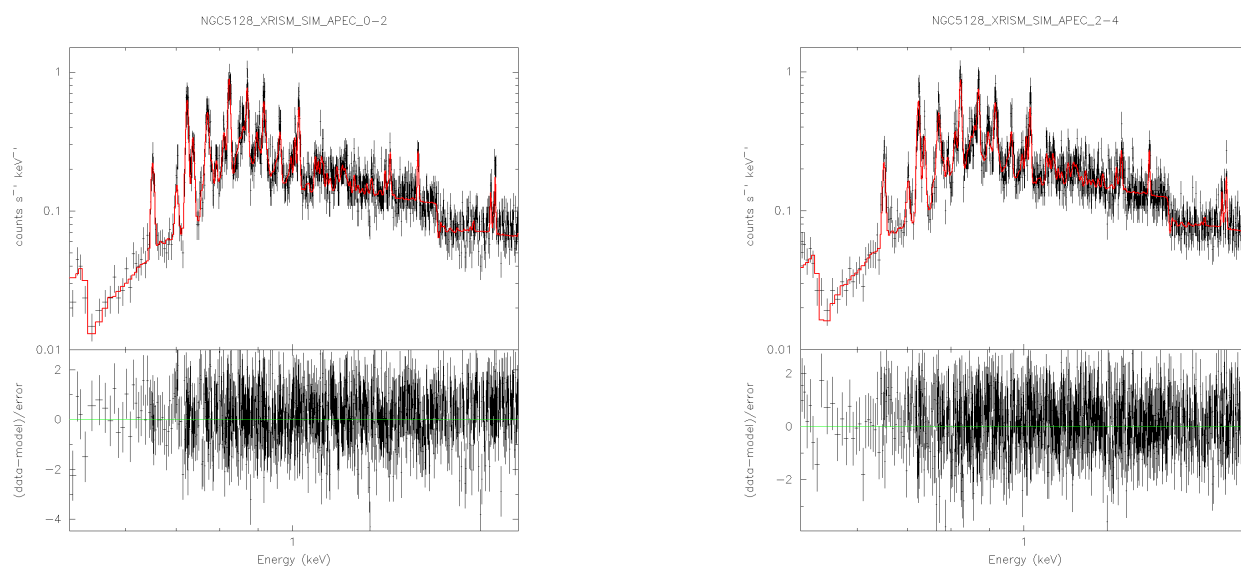


図 6.12: XRISM シミュレーションによる NGC5128 のスペクトルフィッティング図

十字の黒点は XRISM シミュレーションスペクトル、赤の実線はモデルスペクトルを表す。左から 0-2', 2-4'

	0-2'		2-4'	
kT(keV)	0.706	±0.01	0.704	±0.01
A_{Fe}	5.0	±18.7	0.59	+0.41 -0.17
APEC_norm(10^{-4})	0.75	+0.21 -0.02	6.06	±2.4
BREMSS_norm(10^{-4})	8.86	±1.75	9.36	±0.32
χ^2/dof	0.940		0.992	
(χ^2, dof)	(874.65, 930)		(866.74, 874)	

表 6.7: NGC5128 の XRISM シミュレーションスペクトルフィット結果

すぎくの XIS の解析結果を用いてスペクトルを作成したために、アバンダンスは有意な値が得られなかったが、XIS の解析よりも χ^2/dof が小さくなっており、高い精度でのモデルフィッティングができていると言

える。スペクトルフィッティング(図 6.3)からは、すざくと Chandra の観測したスペクトルでは輝線として判別できなかった成分が確認できる。XRISM では多数の輝線がきれいに分離して見えることが分かり、シミュレーションに用いたモデルでフィッティングすると、温度が定まるもののアバundanceと norm がカップルして決まらなかった。この点は今後のフィッティング方法に関する課題であると考ええる。

第7章 まとめと今後

本研究では楕円銀河をターゲットとして、主にすざく衛星 XIS が観測した NGC5128 の X 線スペクトル解析を行った。X 線放射が広がって分布しており、点源天体 3C454.3 とは異なるバックグラウンド・レスポンスを考慮・作成する必要があることが理解できた。解析の対象となる天体の X 線分布情報・検出器における解析領域等を、`xissimarfgen` に対して入力し、検出器の有効面積の情報 (ARF) を取得した。また、バックグラウンドはそれぞれ NXB, CXB, GXB がそれぞれ観測されたスペクトルに対して与える影響を考慮し、差し引き・モデルの付加という形でスペクトル解析に適用させた。以上の手法により、NGC5128 の温度分布を求めることができ (6.5)、「X 線スペクトル解析手法の確立」という本研究の目的を達成することができた。本研究では NGC5128 のスペクトルデータに対して複数のデータを読み込ませる手法を取ったが、これは複数の X 線放射源からの X 線放射分布状態がことなるためである。さらに精確な X 線スペクトル解析を行うためには、解析したい領域より外側の領域から漏れこんでくる光子の影響を考慮する必要がある。よって、このような状況を想定したレスポンスを別途用意し、解析の際に追加で読み込ませるという手法が求められる。XRISM ではすざくよりも高い分光性能を持った分光器が用いられ、図 6.3 のように楕円銀河についてこれまでの衛星による観測では得られなかった X 線スペクトルの精確な情報が得られることが期待される。近い将来の XRISM の観測スペクトルからより詳細な楕円銀河の物理情報を得るために、先に述べたレスポンスの最適化についてこれからも理解を深めると共に解析に適用させていきたい。

謝辞

本論文の執筆及び卒業研究活動全般において関わった全ての方々に対して感謝を申し上げます。指導教員の深沢先生には感謝してもしきれません。深沢先生は研究に関して、理解力に乏しく何度も同じようなことを訊くような私に対しても何度も丁寧な説明をしてくださり、幾度となく救われました。加えて、卒業論文やコロキウム発表用のスライドに対しても的確なアドバイスを下さったことも数えきれないほどありました。深沢先生の助け無しでは、私の研究活動は全く進まなかったと確信できます。本当にありがとうございました。また、ひろたかさんには解析の際の誤差推定について何度もアドバイスを頂き、大変参考になりました。ひろたかさんから頂いた数々のご指摘により、私の研究活動がより一層充実したものになりました。深く感謝申し上げます。水野先生並びに須田先生にも、多くの助言を頂きました。それらは間違いなく私の研究活動の支えとなっており、根幹となっています。本当に感謝しています。そして、この場を借りて高エネ側の先生方に謝罪したいと思います。寝坊等の理由により何度も何度もステータス報告会を欠席してしまい、申し訳ございませんでした。

また、研究室の先輩方にも多大な感謝を申し上げます。自身の机を私物で埋め尽くす救いようの無い性格をした僕に対しても優しく、気さくに接してくださり、とても楽しい1年間を過ごすことができました。特に高エネ側の先輩方には数えきれないほど助言を頂き、研究面でも非常に助けられました。先輩方と同じ研究室で活動できたことは僕にとって大きな幸運でした。

D学生先輩方には、何度も食事や遊びに誘っていただきました。同じ時間を過ごせたことも勿論、誘っていただけたこと自体も凄く嬉しかったです。そして、変わった性格をした僕に対しても（良い意味で）容赦の無いイジリをされましたが、D学生の方々には僕以上に個性の強い面子が揃っていると個人的には思います。それでも個性的な先輩方と過ごせた時間は本当の本当に楽しかったです。

M学生先輩方にも多大な感謝を申し上げます。M2の先輩方にはフットサルや大掃除の時に優しく接してくれたことを覚えています。僕がこの研究室に配属される前の研究室の様子について教えてくださったり、センスのあるボケやツッコミを交えた会話は僕にとって凄く面白いものでした。特に榎木さんにはX線スペクトル解析の面でも非常にお世話になりました。解析の基礎から、ツールの使い方・解析結果の評価といったアドバイスの数々に僕の研究は支えられました。本当にありがとうございました。あと、ケーキ美味しかったです。

そして、M1の先輩方とは関わる機会が特に多かった気がします。研究活動全般について尋ねるたびに何度も優しく説明して頂いたこと、本当に感謝しています。そして、僕個人だけでなく、B4全員に気を遣っていただいたことも強く印象に残っています。小部屋で、さらに席の近い森下さん・丹羽さんからは研究やそれ以外のことについても数えきれない位沢山のことを教えていただき、加えて僕の取り留めの無い話にも耳を傾けてくださったことについても深く感謝しています。御二方のおかげで、僕にとって小部屋はとても居心地の良い空間でした。同じく、小部屋の佐崎さんにも大変お世話になりました。消耗品の買い出の際に何度も車を出していただいたことや可視近赤外天文学の概要についても丁寧に説明して頂いたことは、今でも深く感謝しています。大部屋の阪本さん・橋爪さん・堀さんにも感謝申し上げます。阪本さんには、よく大部屋の消耗品に関して話しかけられた記憶があります。僕が大部屋の方の消耗品やプリンタ機器についてあまり把握をしていなかったため、阪本さんからの報告は本当に有難かったです。橋爪さんは、特に僕たちB4を気にかけていただいた印象があります。研究室に配属された始めの頃から、後輩である僕

たちに気をかけていただき、研究室の一員として認められたような気がして凄く嬉しかったです。そして、堀さんにも研究活動、特に先輩方の過去の研究活動について多くのことを教えていただきました。（佐崎さんも同様ですが）同じ趣味に傾倒しているという点で、個人的に凄く親しみやすく感じており、僕のボケに逐一ツッコミを入れてくださる堀さんとの会話はとても楽しかったです。

最後に B4 のみんなへ。この約 1 年、君たちと共に天文学に触れたことはこれから忘れることの出来ない思い出になりました。「研究が進まない」だの「卒論全然書けてない」だの言いながら苦勞したことを、いつか笑い話に出来たらいいなと思っています。卒業してからは僕たちは其々の道を歩いていくことになるけど、共に頑張って行こう。あと足立クン、君と一緒に先輩に連れられて行った牡蠣小屋で食べた焼牡蠣は滅茶苦茶美味しかった。そして深田クン、これからも同じ研究室の同学年の学生として一緒に天文学に励んでいこう。

最後に、今一度私の研究活動に於いて関わった全ての方々に深く感謝申し上げます。この「高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室」の一員として活動できたことそのものが幸せでした。これからの天文学の発展への祈りを以て、私からの謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 林克洋 卒業論文 (広島大学 2007)
- [2] 中本創 卒業論文 (広島大学 2005)
- [3] 寺前拓人 修士論文 (広島大学 2017)
- [4] 御堂岡拓哉 修士論文 (東京大学 2020)
- [5] ソラエ HP (<https://sorae.info/astrometry/20220517-ugc10143.html>)
- [6] 「X-RAY EMISSION FROM THE HOT INTERSTELLAR MEDIUM AND SOUTHWEST RADIO LOBE OF THE NEARBY RADIO GALAXY CENTAURUS A」 R.P.Kraft,S.E.Vázquez,W.R.Forman,C.Jones,and S.S.Murray,The Astrophysical Journal, 592:129–146, 2003 July 20
- [7] 「The Study of X-Ray Flux Variability of M87」 Ryo Imazawa , Yasushi Fukazawa , and Hiromitsu Takahashi, The Astrophysical Journal, 919:110 (8pp), 2021 October 1
- [8] 「Mapping Dark Matter with Extragalactic Stellar Streams: The Case of Centaurus A」 Adrian M. Price-Whelan, David W. Hogg,Anil C.Seth,David J.Sand,Jason A. S. Hunt, and Denija Crnojević, The Astrophysical Journal, 941:19 (17pp), 2022 December 10
- [9] NASA ホームページ「The Marshall Star」(<https://www.nasa.gov/centers/marshall/about/star/star200610.html>)
- [10] The Suzaku Data Reduction Guide-also known as the ABC Guide- Version 5.0 (<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/suzaku/analysis/abc/abc.html>)
- [11] 「CHANDRA OBSERVATIONS OF THE X-RAY JET IN CENTAURUS A」 R. P. Kraft, W. R. Forman, C. Jones, and S. S. Murray,The Astrophysical Journal, 569:54–71, 2002 April 10
- [12] JAXA ホームページ (<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/developing/xrism.html>)
- [13] JAXA XRISM プロジェクトサイト (<https://xrism.isas.jaxa.jp/>)
- [14] XRISM Quick Reference
- [15] 「X 線天文衛星「すざく」一打ち上げから現在までの経緯」石田学
- [16] すばる望遠鏡 HP (<https://subarutelescope.org/jp/>)

- [17] SRON ホームページ (<https://www.sron.nl/missions-astrophysics/xrism-resolve>)
- [18] 「放射線帯 50 のなぜ」名古屋大学 (<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/50naze/housha/index.html>)
- [19] JAXA XRISM 研究者向け HP (<https://xrism.isas.jaxa.jp/research/proposer/obsplan/response/index.html>)
- [20] 「X線観測衛星の公開データを利用した銀河団画像の制作」石坂千春 大阪市立科学館研究報告 18, 35-39 (2008)
- [21] NASA/IPAC Extragalactic Database (https://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=CenA&hconst=67.8&omegam=0.308&omegav=0.692&wmap=4&corr_z=1)
- [22] 「SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg)」(<https://simbad.unistra.fr/simbad/>)
- [23] 「「すざく」ファーストステップガイド 第 4.0.3 版」(http://www.heal.phy.saitama-u.ac.jp/~terada/web_archive/cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep_web/fstep.html)