平成 30 年度 修士論文

Swift 衛星による電波銀河 NGC 1275 の可視光から X 線帯域の変動解析

広島大学大学院理学研究科 物理科学学専攻 高エネルギー宇宙可視赤外線天文学研究室

> 博士課程(前期課程)2年 学籍番号 M176196

> > 今里 郁弥

2019年1月23日

電波銀河は電波からガンマ線帯域までの広いエネルギー帯域で放射をする活動銀河核 (AGN) であり、ジェットを斜めから見ている為ジェットの外側の放射や構造、ジェット と降着円盤の関係を知るのに適している。NGC 1275 はペルセウス銀河団の中心に位置す る GeV ガンマ線で最も明るい電波銀河である。近年 GeV ガンマ線と電波で増光が確認さ れており、これらの帯域はジェット放射だと考えられている。しかし可視光/紫外線から X 線帯域の放射起源がジェット放射と降着円盤やその周辺なのか分かっていない。そこで 我々は NGC 1275 の可視光から X 線帯域の放射起源を調べ、ジェットの放射機構や降着 円盤との関係を理解することを目的とする。そのためには AGN 放射 (ジェット、降着円 盤などの放射)を抽出する必要がある。これは可視光・紫外線帯域では母銀河の放射が、X 線帯域ではペルセウス銀河団の放射が混入するためである。そこで我々は可視光・紫外線 は Swift/UVOT の 2007 年 7 月2017 年 3 月までのデータを用いて、PSF 測光を行なって AGN 放射を抽出した。X 線は 2006 年 1 月2017 年 3 月までの Swift/XRT のデータを用い て 2 種類の観測モードとペルセウス銀河団の放射の差し引きに注意し、観測データを無駄 にすることなく AGN 放射の抽出を行った。そしてこれらの可視光から X 線データの GeV ガンマ線 (ジェット放射) データとの比較や、変動の特徴を調べた。その結果、図 0.0.1 に 示すように GeV ガンマ線の増光に伴って可視光から X 線帯域も長期的に増光しているこ とが分かった。更に図 0.0.2 に示すように color-magnitude diagram を調べたところ可視光 と紫外線の2つのエネルギー帯域で光度の変動の仕方が異なっていることが分かった。

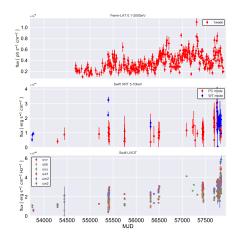
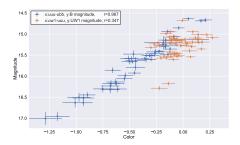


図 0.0.1 NGC 1275 の多波長ライトカーブ。上からガンマ線 (Fermi-LAT)、X 線 (Swift/XRT)、可視光・紫外線 (Swift/UVOT)。



目次

第1章	序論	1
1.1	活動銀河核	1
1.2	NGC 1275 の多波長の観測	5
1.3	研究の目的	8
第 2 章	観測衛星と解析	11
2.1	Swift 衛星	11
2.2	Fermi 衛星とデータ	19
第3章	結果	21
3.1	ライトカーブ	21
3.2	NGC 1275 の可視光から X 線のスペクトル	23
3.3	ガンマ線フラックスと X 線のフラックスの相関 \dots	24
3.4	ガンマ線フラックスと可視光・紫外線のフラックスの相関	25
3.5	可視光・紫外線の color-magnitude ダイアグラム	25
第 4 章	議論	27
4.1	color-magnitude diagram の再現	27
4.2	可視光・紫外線の放射起源	29
4.3	X 線の放射起源	29
引用文献		31

図目次

0.0.1	NGC 1275 の多波長ライトカーブ。上からガンマ線 (Fermi-LAT)、X 線	
	(Swift/XRT)、可視光・紫外線 (Swift/UVOT)。	v
0.0.2	NGC 1275 ∅ Color-Magnitude diagram。	vi
1.1.1	母銀河を超えるスケールでジェットが伸びている電波銀河 hercules A。	
	可視光と電波のイメージを重ねてある。Credit: NASA, ESA, S. Baum	
	and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the	
	Hubble Heritage Team (STScI/AURA)。	2
1.1.2	AGN 統一モデルの略図 [8]。ジェットに対する角度によってブレーザー/	
	電波銀河、Seyfert 1型/Seyfert 2型に見えるが本質は1つの同じ天体であ	
	るという考え方。	3
1.2.1	電波銀河 NGC 1275 の電波 (VLA)、可視光 (Hubble 望遠鏡)、X 線 (chan-	
	dra 衛星) を重ねたイメージ。Credit: NASA, ESA, NRAO and L. Frattare	
	(STScI). Science Credit: X-ray: NASA/CXC/IoA/A.Fabian et al.; Ra-	
	dio: NRAO/VLA/G. Taylor; Optical: NASA, ESA, the Hubble Heritage	
	(STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, and A. Fabian (Institute of	
	Astronomy, University of Cambridge, UK)	5
1.2.2	電波銀河 NGC 1275 の AGN の電波 (14.5 GHz) とガンマ線 (> 100 MeV)	
	のライトカーブ [5]。	6
1.2.3	(1)VLBI を用いた 2006 年から 2009 年の NGC 1275 のイメージ [23]。	
	(a) は JVN の 8 GHz の等高線イメージ。(b)-(o) は VLBA の 22 GHz の	
	等高線イメージ。(2)VLVA を用いた 1994 年から 2010 年のライトカーブ	
	[23]。	7

x 図目次

1.2.4	(1)(a)100 GeV 以上の MAGIC の 1 ヶ月ビンのガンマ線、(b)100 MeV 以上の Fermi-LAT の 1 週間ビンのガンマ線、(c)KVA の可視光 (R バンド) の連続光、(d)VLBA の 15 GHz の電波のライトカーブ [7]。(2)NGC 1275 のガンマ線(> 100 MeV)と可視光の連続光フラックス (KVA) の 23 週間分 (23 点)の相関図 [7]。 黒線と赤破線と青破線はそれぞれ $F_{\gamma} = \alpha(F_{opt})^{\beta}$ 、線形、 2 次関数でフィットしたものである。	8
1.2.5	NGC 1275 の多波長 SED と One-zone SSC jet model の例。 それぞれの図は (1)[5]。(2)[7]。	9
2.1.1 2.1.2 2.1.3	Swift 衛星。BAT、XRT、UVOT の 3 つの検出器が搭載されている。[15] UVOT フィルターに対する有効面積 [24]。 (1)AGN 放射モデル (オレンジ色) と母銀河放射モデル (ピンク) とバックグラウンド (緑) を用いて NGC 1275 の 1 次元カウントプロファイル (青十字点) のフィットの様子。 (2) 今回の解析で得られる SED の例。緑点:AGN+ 母銀河放射、青点:母銀河放射、赤点:AGN 放射。	12 13
2.1.4 2.1.5	(1)WT mode の 1 次元イメージ (2)PC mode の 2 次元イメージ。[1] (1)PC mode のスペクトルフィットの様子。赤破線が AGN 成分、青破線が銀河団成分。 (2)WT mode のスペクトルフィットの様子。赤破線が AGN 成分、青破線が WT mode の arf を用いた銀河団成分、緑実線が PC mode の arf を修正したものを用いた銀河団成分。	
2.1.6 2.1.7	WT mode の arr を修正したものを用いた銀河団成分。 WT mode の解析	17 18 19
2.2.1	Fermi 衛星	19
3.1.1	NGC 1275 の多波長ライトカーブ。上からガンマ線 (Fermi-LAT)、X 線 (Swift/XRT)、可視光・紫外線 (Swift/UVOT)。左のライトカーブの赤色 の領域をズームしたものが真ん中と右の列のライトカーブ。上の数字は	22
3.2.1	MJD に対応する年。	22
3.3.1	黒体放射のモデルのフィッティングの結果である。	2324

3.4.1	NGC 1275 のガンマ線 (Fermi-LAT) と可視光・紫外線 (Swift/UVOT) の	
	フラックスの相関図。縦軸は左上:V バンド、真ん中上:B バンド、右上:U	
	バンド、左下:UVW1 バンド、真ん中下:UVM2 バンド、右下:UVW2 バン	
	ド。	25
3.5.1	NGC 1275 の可視光・紫外線 (Swift/UVOT) の color と magnitude のプ	
	ロット図。赤点:可視光 (B バンド)、青点:紫外線 (UVW1 バンド)。	26
4.1.1	NGC 1275 の SED 上の可視光・紫外線に 4 点以上あるデータを単一温度	
	黒体放射でフィッティングした結果。	28
4.1.2	(1)Power law の normalization のみを変化させた (2) 単一温度降着円盤の	
	温度のみを変化させた (3) 単一温度降着円盤の Bolometric Flux のみを変	
	化させた	29
4.3.1	左:NGC 1275 の X 線と可視光のフラックスのプロット図、右:NGC 1275	
	の X 線と紫外線のフラックスのプロット図。	30

表目次

1.1	AGN の分類 [32]	3
2.1	UVOT の性能 [2]。	12
2.2	AGN 放射モデルと母銀河放射モデルの固定するパラメータ	15
2.3	XRT の性能 [3]。	15
2.4	Fermi-LAT の性能と EGRET 衛星との比較 [4]	20
4 1	単一温度里休放射と Power law のパラメータ範囲	29

第1章

序論

1.1 活動銀河核

ほぼ全ての銀河の中心には $10^6 \rm M_\odot$ 以上の大質量ブラックホールがあると考えられており、この中の約 1% は中心が明るく活動銀河核または active galactic nucleus(以後、AGN) と呼ばれている [31]。AGN の約 10% は相対論的な速度のジェットを持っており、母銀河より大きいスケールに達する天体もある (例、図 1.1.1)。

2 第 1 章 序論

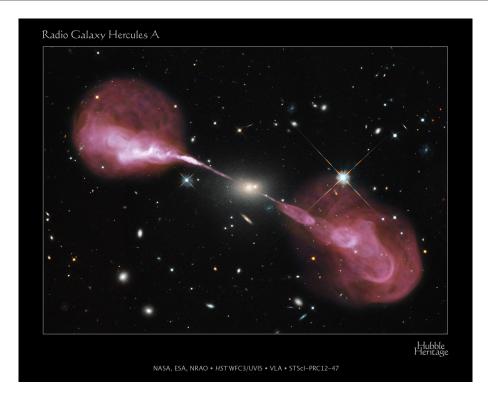


図 1.1.1 母銀河を超えるスケールでジェットが伸びている電波銀河 hercules A。可 視光と電波のイメージを重ねてある。Credit: NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)。

現在、AGN は表 1.1 でまとめるように中心核を見込む角度やジェットの有無などで大きく分類されている。電波の強い AGN の起源は中心核やジェットや広がったローブであり、楕円銀河によく見られる [31]。この種族の中でも広/狭輝線が見えるもの電波銀河という。そして輝線が見えないものをブレーザー (BL Lac 天体) という。これらの違いはジェット軸と視線方向の角度によるものである。ジェット軸と視線方向の角度が小さいブレーザーは相対論的効果でジェット放射が明るく他の放射が見えないが、電波銀河はこの角度が大きいためジェットの相対論的効果があまり効かない。

電波の弱い AGN はジェットが見えないほど弱く渦巻銀河で多く見られる。この種族の中で更に輝線幅で分類する事ができる。数 $10^3km\ s^{-1}$ を超えるものを Seyfert 1 型銀河、数 $100km\ s^{-1}$ のものを Seyfert 2 型銀河という [31]。これは現在広く受け入れられている AGN 統一理論で考えると中心核を見込む角度の違いによるものである。AGN 統一理論を 図 1.1.2 に示した。AGN の中心核の外側にはドーナツ状のトーラスと呼ばれるものがある と考えられている。見込み角が大きいと幅の広い輝線がトーラスに吸収され見えない。このため Seyfert 2 型銀河は幅の狭い輝線のみしか見えない。一方、Seyfert 1 型銀河は見込み角が小さいため中心核からの放射を直接見込んでおり、幅の広い輝線も観測される。

1.1 活動銀河核 3

表 1.1	AGN の分類 [32]
-------	--------------

AGN のタイプ	赤方偏移	L_x	母銀河 a	空間密度 b	輝線幅 c
電波の弱い AGN					
Seyfert1 型銀河	< 0.1	10^{42-44}	S	$4*10^{4}$	広+狭
Seyfert2 型銀河	< 0.1	10^{42-44}	S	$1*10^{5}$	狭
RQ, QSO	> 0.1	10^{44-47}	E,S	100	広
電波の強い AGN					
電波銀河	< 0.3	10^{43-45}	E	$3 * 10^{3}$	広/狭
ブレーザー (BL Lact 天体)	< 0.3	10^{43-45}	E	$3*10^{2}$	輝線なし
RL,QSO	> 0.1	10^{44-48}	E,S	3	広

 $^{^{\}rm a}$ S:渦巻銀河、E:楕円銀河; $^{\rm b}\,h=H_0(50)~{\rm km~s^{-1}~Mpc^{-1}}$; $^{\rm c}$ 広 幅の広い輝線、狭 幅の狭い輝線

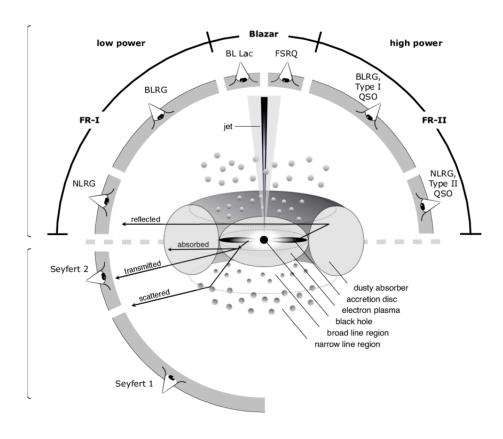


図 1.1.2 AGN 統一モデルの略図 [8]。ジェットに対する角度によってブレーザー/電波銀河、Seyfert 1 型/Seyfert 2 型に見えるが本質は 1 つの同じ天体であるという考え方。

4 第 1 章 序論

1.1.1 ジェット

宇宙にはジェットを持っている (見えている) 天体がいくつかある。我々の人生のタイムスケールに対して長期的にジェットを噴出しているものに原始星やコンパクト天体や AGNがあり、特に AGN のジェットは相対論的速度で母銀河を超えるスケールで広がるものもあり宇宙最大のジェットである。しかしジェットの生成機構や放射機構にはまだ謎が多い。この節では今後の議論に出てくるジェットの放射モデルについて紹介する。

synchrotron self-Compton (SSC) model

ある相対論的速度を持った電子が磁場によってシンクロトロン放射をし、光子を放出する。 その光子をまた相対論的速度を持った電子によって逆コンプトン散乱され高エネルギー光 子となる。これがジェットの中で起こっているというモデルである。

External Radiation Compton (EC) model

ジェット以外の場所 (例えば降着円盤やトーラス) からの光子がジェット中の相対論的速度を持つ電子によって逆コンプトン散乱され高エネルギー光子となる。

1.1.2 降着円盤

(時間があまりそうなら書きます。)

1.2 NGC 1275 の多波長の観測



図 1.2.1 電波銀河 NGC 1275 の電波 (VLA)、可視光 (Hubble 望遠鏡)、X 線 (chandra 衛星) を重ねたイメージ。Credit: NASA, ESA, NRAO and L. Frattare (STScI). Science Credit: X-ray: NASA/CXC/IoA/A.Fabian et al.; Radio: NRAO/VLA/G. Taylor; Optical: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, and A. Fabian (Institute of Astronomy, University of Cambridge, UK)

NGC 1275(3C 84), z=0.0176, はペルセウス銀河団の中心に位置する巨大楕円銀河であり、電波銀河や radio loud seyfert 1 型銀河としても有名である。図 1.2.1 の中心に明るく輝いている天体が NGC1275 で、その周りには青く示されたペルセウス銀河団のプラズマの放射、赤色の複雑なフィラメントや電波ローブ、中心に落ち込んでいると考えられている他の銀河 [29] が吸収体として見えているなど、様々な物理現象が起こっているバラエティ豊かな天体である。更にこの天体は 2008 年に打ち上げられた Fermi 衛星によってガンマ線 (> 100MeV) で検出され [5]、数ヶ月のフラックスの変動タイムスケール [18] やフレア [11, 10, 27] が観測された。これはガンマ線のメインの放射起源がペルセウス銀河団ではなく NGC 1275 のジェットであることを強く示唆している。これから NGC 1275 のジェットについてガンマ線と電波のこれまでの観測についてまとめる。

6 第1章 序論

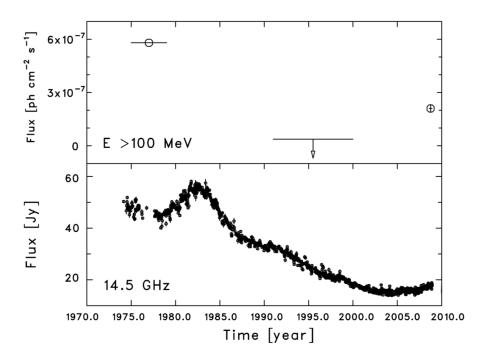
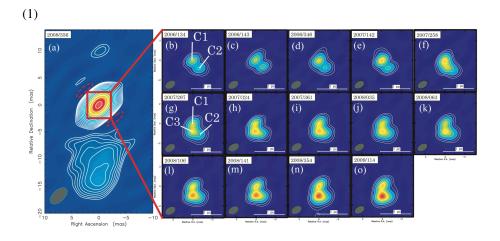


図 1.2.2 電波銀河 NGC 1275 の AGN の電波 (14.5 GHz) とガンマ線 (> 100 MeV) の ライトカーブ [5]。

NGC 1275 の過去の AGN の活動を電波とガンマ線のフラックスで示したものが図 1.2.2 である。これを見ると 1985 年あたりから電波のフラックスが暗くなり始め、2005 年あたりからまたフラックスが明るくなっている。[5] は 2005 年辺りからのフラックス上昇について、ジェットの新しいコンポーネントの噴出だと解釈できるとした。[23] は 2006 年から 2009 年の間の VLBI のデータで NGC 1275 を調べ、2007 年まで中心コアが明るく増光し (図 1.2.3(2))、その後新たなジェットのコンポーネント (以後 C3 と呼ぶ、図 1.2.3(1)) が見え始めフラックスが急上昇している事が分かり、2005 年からの増光がこの C3 と関係あることを見つけた。



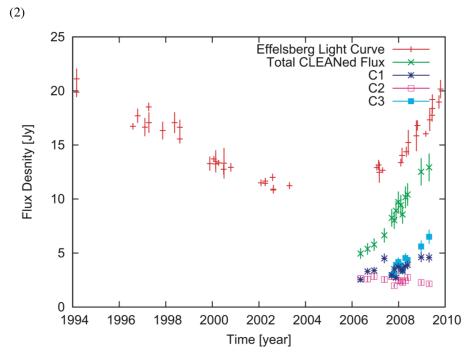


図 1.2.3 (1)VLBI を用いた 2006 年から 2009 年の NGC 1275 のイメージ [23]。(a) は JVN の 8 GHz の等高線イメージ。(b)-(o) は VLBA の 22 GHz の等高線イメージ。(2)VLVA を用いた 1994 年から 2010 年のライトカーブ [23]。

NGC 1275 は 100 GeV を超えるガンマ線帯域でも MAGIC 望遠鏡 [6,7] や VERITAS[9] で検出された。MAGIC チームは 2009 年 10 月-2010 年 2 月と 2010 年 8 月から 2011 年 2 月の 2 回の観測期間で 1 ヶ月のタイムスケールのライトカーブの弱い変動 (3.6 σ) を報告した。また以前のフラックスより 50 倍明るいアウトバーストが 2016 年 12 月 31 日-2017 年 1 月 1 日の間で MAGIC[19, 21] と VERITAS[22] で報告された。

次に NGC 1275 の可視光紫外線の過去の観測についてまとめる。可視光と紫外線帯域の連続光のフラックスの短期変動は過去に発見されている [30, 25, 7, 19]。[7] では可視光 (R

8 第 1 章 序論

バンド) とガンマ線 (> 100 MeV) に $4-5\sigma$ で正の相関があると報告した (図 1.2.4(2))。これは可視光とガンマ線の放射起源が同じ、つまり可視光でジェット放射が支配的、であることを強く示唆している。 [20] は 1976 年 1 月 4-7 日にかけて可視偏光を測定し、1 日のタイムスケールの変動を発見した。しかしその後 [28] がかなた望遠鏡による観測を行ったが有意な可視偏光の変動は検出できなかった。

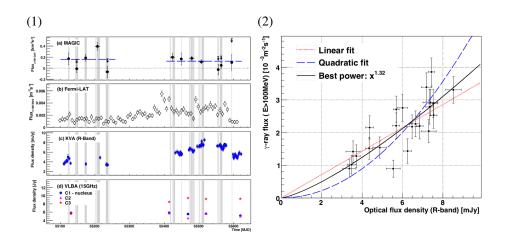


図 1.2.4 (1)(a)100 GeV 以上の MAGIC の 1 ヶ月ビンのガンマ線、(b)100 MeV 以上の Fermi-LAT の 1 週間ビンのガンマ線、(c)KVA の可視光 (R バンド) の連続光、(d)VLBA の 15 GHz の電波のライトカーブ [7]。(2)NGC 1275 のガンマ線(> 100 MeV)と可視 光の連続光フラックス (KVA) の 23 週間分 (23 点) の相関図 [7]。 黒線と赤破線と青破線 はそれぞれ $F_{\gamma} = \alpha(F_{opt})^{\beta}$ 、線形、2 次関数でフィットしたものである。

NGC 1275 の AGN 放射について X 線観測での議論が少ない。この理由の一つはペルセウス銀河団の非常に明るいプラズマ放射が NGC 1275 の X 線放射に混入しているためである。過去の研究では、電波やガンマ線と特徴が似た X 線の長期的な変動が観測されている [13, 12]。これらから NGC 1275 の X 線帯域ではジェット放射の寄与が見えている可能性がある。

NGC 1275 の SED フィッティングでは One-zone SSC ジェットモデル (節 1.1.1) がよく用いられる [5,6,26]。しかし NGC 1275 は可視光・紫外線から X 線帯域の放射起源がジェット放射と降着円盤周辺の放射のどちらが支配的なのか分かっていない。これは NGC 1275 に限らず一般的な電波銀河の問題である。

1.3 研究の目的

本研究の目的は NGC 1275 の可視光から X 線帯域の放射起源を理解し、ジェットの放射機構や降着円盤周辺の放射との関係を理解することである。そこでまず [13] で解析された Swift 衛星の XRT の X 線データの期間を 2017 年 3 月 31 日まで延ばし解析を行う。また

1.3 研究の目的 9

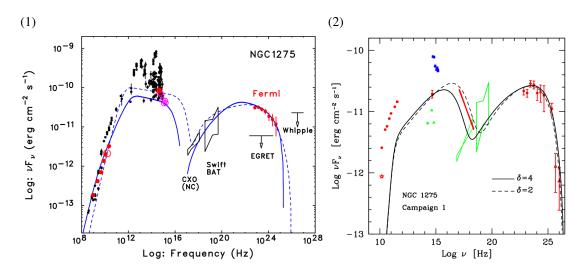


図 1.2.5 NGC 1275 の多波長 SED と One-zone SSC jet model の例。 それぞれの図は (1)[5]。(2)[7]。

我々は Swift 衛星の UVOT の可視光紫外線の 2007 年 7 月 13 日から 2017 年 3 月 31 日までのデータを用い PSF 測光を行った。これによって今までで最も長い可視光紫外線の変動を調べる事になる。更にこれら可視光紫外線から X 線のデータとジェット放射を比較するため、Goddard Space Flight Center*1の Fermi 衛星の LAT の GeV ガンマ線データを用いた。本論文では、Swift/XRT と Fermi-LAT のデータのエラーは 90% 信頼区間に対応しており、Swift/UVOT のデータのエラーは 1σ 統計誤差に対応している。

 $^{^{*1}\} https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl_lc/$

第2章

観測衛星と解析

2.1 Swift 衛星

Swift 衛星 (図 2.1.1) は NASA の medium-sized explorer ミッションに採択され、2004年 11月 20日に打ち上げられた天文衛星である。Swift の主要な目的は Gamma-Ray Burst(GRB) の起源を特定することである [15]。GRB とは宇宙で最も明るい爆発現象 (数秒で $M_{\odot}c^2=10^{54}$ erg に匹敵するエネルギーを解放する)である [31]。GRB は 1960年代後半に発見されてから現在までに様々な観測が行われてきたが今だにその起源がはっきりと分かっていない。Swift には硬 X 線 (15 - 150keV) 帯域に感度を持つ Burst Alert Telescope (BAT)、軟 X 線 (0.2 - 10keV) 帯域に感度を持つ X-Ray Telescope (XRT)、可視光から紫外線 (170 - 60nm) 帯域に感度を持つ Ultraviolet/Optical Telescope (UVOT) の 3 つの検出器が搭載されている [15]。以下では本研究に用いた XRT と UVOT について説明し、解析方法も記載する。

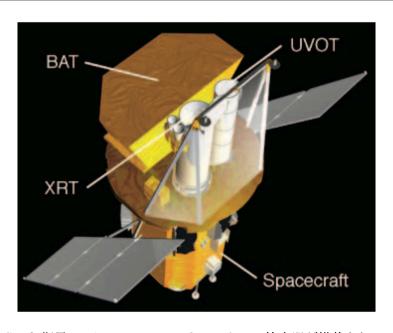


図 2.1.1 Swift 衛星。BAT、XRT、UVOT の 3 つの検出器が搭載されている。[15]

2.1.1 UVOT について

表 2.1 に UVOT の特徴をまとめた。UVOT には図 2.1.2 に示すように可視光から紫外線の 6 個のフィルター (長波長側から順に V, B, U, UVW1, UVW2, UVW2) と 6 バンド分の波長をカバーする white-light フィルターで観測することができる。UVOT と他の望遠鏡の違いは紫外線を 4 バンドで観測できる、宇宙空間に打ち上げているため大気吸収などの影響を受けない点である。また UVOT が観測している時期は XRT も観測していることが多く、多波長観測を行いやすい。

表 2.1 UVOT の性能 [2]。

Instrumentation	Description
望遠鏡	リッチー・クレチアン式望遠鏡
検出器	MCP Intensified CCD
視野	17 x 17 arcmin
フィルター	7
波長	170-650 nm
ピクセル数	2048 x 2048 pixels
PSF	2.5 arcsec@350 nm
ピクセルスケール	0.502 arcsec
カメラスピード	11 ms

2.1 Swift 衛星 13

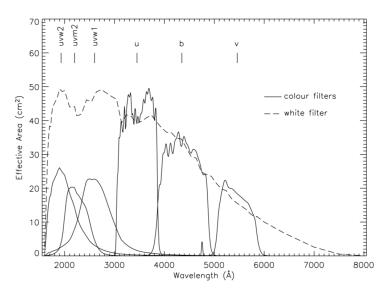


図 2.1.2 UVOT フィルターに対する有効面積 [24]。

2.1.2 UVOT のデータ解析

UK Science Data Centre*¹から Swift/UVOT のイメージデータを取得した。今回扱った UVOT のデータは全て aspect 補正、mod8 補正がなされており、DATA MODE=IMAGE のものを選んだ。aspect 補正とは、個々の露出を足し合わせる時やカタログを参照する時に画像上の位置がズレないように補正するものである。mod8 補正とはイメージ上にのった mod-8 noise pattern を補正するものである。

NGC 1275 は可視紫外線帯域で欲しい AGN 放射に母銀河からの放射が混入するため、単純な解析ができない。そこで我々は PSF 測光を行った。PSF 測光とは 2 つ以上の天体の光を切り分ける手法であり、今回は NGC 1275 の AGN 放射と母銀河の放射を切り分ける。まず解析の流れを書く。最初にそれぞれのフィルターで同一観測 ID の露出をUVOTIMSUM を用いて全て足し合わせた。NGC 1275 の中心のピクセルから北と南に 90 pixel ずつ、東と西に 5 pixel ずつの 181×11 pixels の領域を切り取る。ここから東西方向に光子を積分し、1 次元の光子のカウントプロファイルを作成する。その後 AGN 放射モデルと母銀河放射モデルを参照)、母銀河放射モデルのみを用いて NGC 1275 の母銀河のみの領域 (85 <= pixel <= 95 は AGN 放射があるため除外、0 <= pixel <= 30 は他の星が見えているため除外)のカウントプロファイルをフィッティングする。そのフィッティングで求まった母銀河放射モデルのパラ

 $^{^{*1}}$ http://www.swift.ac.uk/archive/

メータを固定し、次に NGC 1275 のカウントプロファイルを AGN 放射モデルと固定した 母銀河放射モデルでフィッティングする (図 2.1.3(1))。得られた AGN と母銀河の明るさに 対して、Swift チームが提供している打ち上げから落ち続けている UVOT の感度の補正式 で補正する。最後に、各波長ごとに得られた様々な期間の母銀河の明るさで最も明るい時期のデータに他の時期の母銀河と AGN の明るさをスケーリングする。これは母銀河の明るさは本質的には不変であり、観測の影響で変わって見える影響を抑えるためである。母銀河が最も明るい時期が最も理想的な観測ができていると仮定している。このようにして NGC 1275 の AGN 放射を見積もる (図 2.1.3(2))。

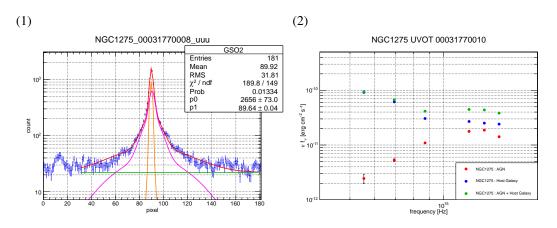


図 2.1.3 (1)AGN 放射モデル (オレンジ色) と母銀河放射モデル (ピンク) とバックグラウンド (緑) を用いて NGC 1275 の 1 次元カウントプロファイル (青十字点) のフィットの様子。 (2) 今回の解析で得られる SED の例。緑点:AGN+ 母銀河放射、青点:母銀河放射、赤点:AGN 放射。

AGN 放射モデルと母銀河放射モデル

PSF 測光を行うにあたって AGN 放射モデルと母銀河放射モデルが必要となる。NGC 1275 の近くにある星 Pul -3 270315(03:19:41.7424431803, +41:30:36.688759005[14]) を AGN 放射モデル用に、NGC 1275 の近くに位置する形が似た楕円銀河 NGC 1272 を母銀河放射モデル用に選び、上記した方法でそれぞれの 1 次元カウントプロファイルを作成した。星の 1 次元カウントプロファイルに対しては 1 つのガウス関数とコンスタント成分で、楕円銀河の 1 次元カウントプロファイルに対しては 3 つのガウス関数とコンスタント成分でフィッティングを行った。得られた標準偏差とノーマリゼーションの比(ノーマリゼーションの比は銀河の場合のみ)を固定した 1 つまたは 3 つのガウス関数のみを抽出し、これをAGN 放射モデル、母銀河放射モデルとした。固定した標準偏差とノーマリゼーションの比を表 2.2 に示す。

2.1 Swift 衛星 **15**

表 2.2 AGN 放射モデルと母銀河放射モデルの固定するパラメータ

標準偏差	ノーマリゼーションの高さ (この比を固定した)
AGN 放射モデル	
1.144	
母銀河放射モデル	
2.006	4277
6.953	5701
28.77	5393

2.1.3 XRT の検出器

XRT の性能を表 2.3 にまとめた。XRT には 3 つの読み出しモードがあり、最も時間分解能が短いものから Photodiode (PD) mode(約 0.14ms)、Windowed Timing (WT) mode(1.8ms)、Photon-counting (PC) mode(2.5s) がある。PD mode は 2005 年 5 月に流星塵に当たってしまい使用できなくなり、現在は PC mode と WT mode のみ使用できる。XRT には GRB 用に位置情報のみを取得する Imaging (IM) mode もある。図 2.1.4 に PC mode と WT mode のイメージを示す。図 2.1.4 のように WT mode は時間分解能は良いがイメージが 1 次元情報しか持たない。一方、PC mode は時間分解能は WT mode に比べると悪いが 2 次元のイメージを得ることができ、解析しやすいという特徴がある。

表 2.3 XRT の性能 [3]。

Instrumentation	Description
望遠鏡	ヴォルター式望遠鏡
検出器	EEV CCD-22
視野	23.6 x 23.6 arcmin
エネルギー範囲	0.2-10 keV
ピクセル数	600 x 602 pixels
PSF	18 arcsec HPD @ 1.5 keV
ピクセルスケール	2.36 arcsec

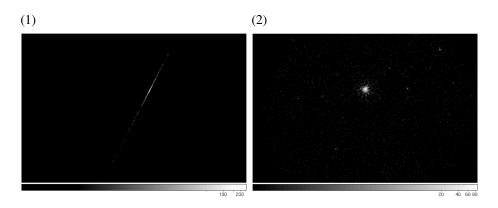


図 2.1.4 (1)WT mode の 1 次元イメージ (2)PC mode の 2 次元イメージ。[1]

2.1.4 XRT のデータ解析

2.1.4.1 PC mode

X 線解析で使用した HEADAS のバージョンは HEADAS 6.19 である。上記したよう に PC mode のイメージは 2 次元の情報を持っている。 PC mode は時間分解能が良くな く、NGC 1275 の場合 pile-up していることが確認されている (例えば [16]、[13])。そ こで NGC 1275 を中心とした内径 12 arcsec、外径 27 arcsec の円環をソース領域とし た。またバックグラウンド領域はソース領域と同じ中心を持つ内径 50 arcsec、外径 60 arcsec の円環にした。XSELECT を用いてソース領域とバックグラウンド領域のスペク トルを作成した。arf ファイルは HEADAS の xrtmkarf を使用して作り、オプションは psf=yes、expofile=None とした。rmf ファイルは xrtmkarf が指定するものを使用した。 NGC 1275 の場合はペルセウス銀河団のプラズマ放射が X 線帯域で非常に明るく不均一 な分布であるため、ソース領域のスペクトルからバックグラウンド領域のスペクトルを 差し引いた後も銀河団のプラズマ放射が残ってしまう。今回我々は NGC 1275 が写って いる全てのイベントファイルを足し合わせた物に対しても同様の処理をし、XSPEC で wabs × (pegpwrlw + apec) でスペクトルフィッティングをした。その結果の apec パラ メータをそれぞれの XRT の PC mode スペクトルのフィッティングに対して同様のフィッ ティングモデルの apec に使用した。図 2.1.5(1) に PC mode のスペクトルフィットの様子 を示す。

2.1 Swift 衛星 17

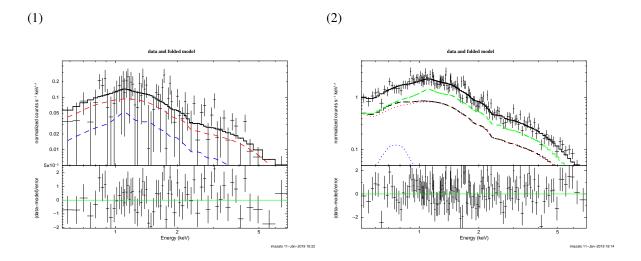


図 2.1.5 (1)PC mode のスペクトルフィットの様子。赤破線が AGN 成分、青破線が銀河団成分。 (2)WT mode のスペクトルフィットの様子。赤破線が AGN 成分、青破線が WT mode の arf を用いた銀河団成分、緑実線が PC mode の arf を修正したものを用いた銀河団成分。

2.1.4.2 WT mode

WT mode のイメージは 1 次元の情報しか持たない。NGC 1275 は X 線で明るく広がっ ているペルセウス銀河団の中心に位置するため、2次元のイメージを1次元に積分したよ うな WT mode のイメージでは銀河団放射が卓越し AGN 放射が埋もれてしまい単純な解 析ができない。そこで我々は PC mode のデータを用いてバックグラウンドである銀河団 放射を見積もり WT mode のデータ解析を行った。最初に 2.1.4.1 節で述べたように NGC 1275 が写っている PC mode の全てのイベントファイルを足し合わせたものを作った。そ して図 2.1.6 の左下の青色領域のスペクトルと arf ファイルを作った。図 2.1.7 で示すよう に PC mode と WT mode ではレスポンスが違うため [17]、このスペクトルから求めたバッ クグラウンドの情報を直接 WT mode のデータの図 2.1.6 の右下の赤色領域のスペクトル に使用することはできない。そこで我々は以下のような方法で WT mode の解析を行った。 最初に XSPEC のモデルで PC mode から作ったバックグラウンドスペクトルを wabs \times apec でフィットし、apec のパラメータ (温度と abundance) を求める。次に PC mode の arf ファイルを PC mode と WT mode の違いを考慮し修正する。そして求めた apec パラ メータと修正した arf ファイルを使って WT mode における図 2.1.6 の左下の青色領域の バックグラウンドのモデルを作り、WT mode のスペクトルフィッティングの際に使用す る。arf ファイルを修正するために、PC mode と WT mode の有効面積の比をエネルギー の関数として導出した。まず図 2.1.6 の左上 (PC mode:PC mode の全イベントファイルを 積分したもの) と右上 (WT mode) の赤色の同じ領域のスペクトルから PC mode と WT

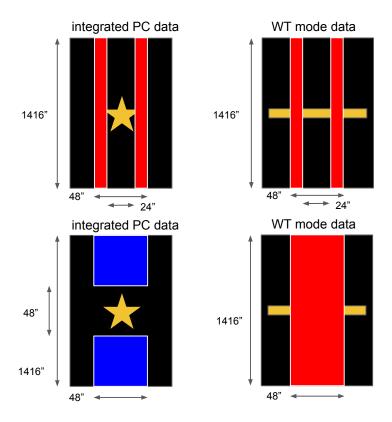


図 2.1.6 WT mode の解析

mode の arf ファイルを作成した。そして WT mode の arf ファイルの有効面積を PC mode の arf ファイルの有効面積で割り、PC mode から WT mode の arf ファイルへ修正した。解析する WT mode のスペクトルと arf ファイルは図 2.1.6 の右下の赤色領域から作成した。スペクトルフィットではこの領域で作成した arf ファイルと wabs \times (pegpwrlw + apec) を使用し、バックグラウンド領域 (図 2.1.6 左下青色領域) のために修正した arf ファイルとパラメータを固定した apec を加えた。

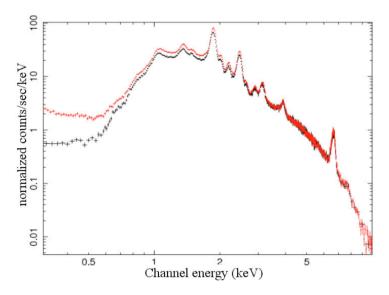


図 2.1.7 同じ天体 (remnant Cas A)、同じ領域の PC mode(黒線) と WT mode(赤線) の スペクトル [17]。

2.2 Fermi 衛星とデータ



図 2.2.1 Fermi 衛星

Fermi(Fermi Gamma-ray Space Telescope) は 2008 年に打ち上げられた 10 keV から 300 GeV に感度を持つガンマ線衛星である。Fermi はこれまでのガンマ線衛星の検出器より広視野で良い角度解能と感度を持つ Large Area Telescope (LAT) と全天で GRB を探索する Gamma-ray Burst Monitor (GBM) を搭載している。表 2.4 に Fermi-LAT の性能と EGRET 衛星との比較を示した。

	LAT	EGRET
エネルギー範囲	20 MeV - 300 GeV	20 MeV - 30 GeV
ピーク有効面積	$> 8000 cm^2$	$1500\mathrm{cm}^2$
視野	> 2 sr	0.5 sr
角度分解能	$< 3.5^{\circ} (100 \text{ MeV})$	$5.8^{\circ}(100 \text{ MeV})$
	$< 0.15^{\circ} (> 10 \text{ GeV})$	
エネルギー分解能	< 10%	10%

表 2.4 Fermi-LAT の性能と EGRET 衛星との比較 [4]

本研究では NGC 1275 の他のエネルギー帯域の観測データと比較するために、ジェット 放射である GeV ガンマ線のデータを Fermi チームが提供している 4 日ビンのライトカー ブから取得した $*^2$ 。このデータは系統誤差や absolute flux calibration がなされておらず、 SED フィッティングなどのフラックスの絶対値が必要な場合には使用が推奨されていない。 本研究では Fermi データのフラックスの絶対値は使用せずフラックスの変化を使用する。

^{*2} https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl_lc/

第3章

結果

3.1 ライトカーブ

図 3.1.1(左列) に可視光・紫外線 (Swift/UVOT)、X 線 (Swift/XRT)、GeV ガンマ線 (LAT Instrument Science Operations center、1 週間ビン) の長期間 (2007 年 ~ 2018 年) のライトカーブを示す。これを見ると可視光・紫外線と X 線フラックスが GeV ガンマ線フラックスと共に増光していることが分かる。X 線の GeV ガンマ線に伴う増光は Fukazawa et al[13](Suzaku/XIS) でも報告されている。図 3.1.1(真ん中と右列) に示すように短期変動も調べた。その結果、55390 < MJD < 55400(2010 年 7 月) 辺りで、Fukazawa et al[13] でも報告されているように X 線の短期的なフレアが見えているが、可視光・紫外線ではそのようなフレアは見えていない。57740 < MJD < 57850(2016 年 12 月) 辺りでは、GeV ガンマ線と X 線フラックス間で似たフラックスの変動が見えるが可視光・紫外線ではそのような変動は見えない。

22 第 3 章 結果

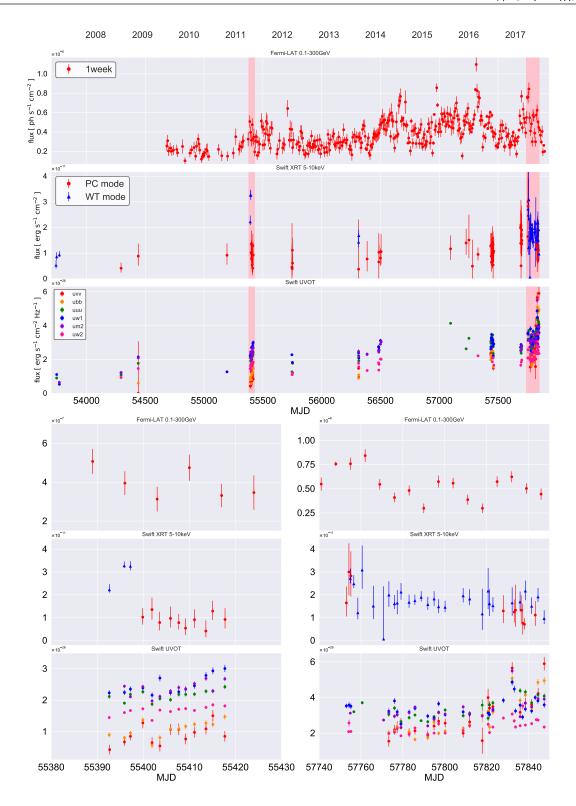


図 3.1.1 NGC 1275 の多波長ライトカーブ。上からガンマ線 (Fermi-LAT)、X 線 (Swift/XRT)、可視光・紫外線 (Swift/UVOT)。左のライトカーブの赤色の領域をズーム したものが真ん中と右の列のライトカーブ。上の数字は MJD に対応する年。

3.2 NGC 1275 の可視光から X 線のスペクトル

図 3.2.1 に可視光から X 線帯域の特徴的な時期の NGC 1275 の多波長スペクトル (Spectral Energy Distributions; SEDs) を示す。それぞれ、観測 ID 00031763003(2010 年7月20日、青点):X 線が短期的に明るくなっている時期、00031770010(2010 年8月9日、オレンジ点):可視光・紫外線が短期的に最も明るい時期、00031770035(2017 年3月24日、緑点):可視光・紫外線で長期的な変動で明るい時期、00032691002(2013 年1月23日、赤点):可視光・紫外線と X 線であまり変動していない時期である。紫外線に鋭いピークを持つ放射が可視光・紫外線帯域に見えて見えている。この鋭いピークは SSC jet model のみでは再現できず、降着円盤の放射が支配的である可能性がある。そこで単一温度の黒体放射のモデルでフィットしたものを図 3.2.1 の実線で示す。その結果、図 3.2.1 にある観測 ID:00031770035 を含む数個の観測 ID では黒体放射で上手くフィットできたが、それ以外の時期のデータではあまり上手くフィットできなかった。

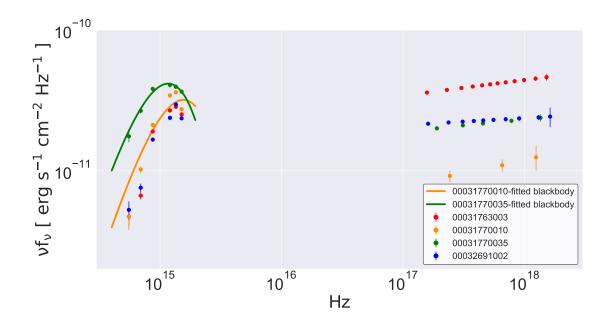


図 3.2.1 NGC 1275 の X 線 (Swift/XRT) と可視光・紫外線 (Swift/UVOT) の SED。緑線とオレンジ線は観測 ID:00031770010 と 00031770035 の単一温度の黒体放射のモデルのフィッティングの結果である。

24 第 3 章 結果

3.3 ガンマ線フラックスと X 線のフラックスの相関

X 線の放射起源を探るため、GeV ガンマ線と X 線フラックスの相関を取ったものを図 3.3.1 に示す。今回 Swift/XRT WT mode の解析は精度が悪いため、X 線は Swift/XRT PC mode を参照する。X 線と GeV ガンマ線のフラックスの相関は相関係数 0.57 の弱い正の相関を示した。Fukazawa et al[13] では Suzaku X 線と GeV ガンマ線のフラックスの相関係数が 0.84 と報告されている。NGC 1275 を半年間隔で観測する Suzaku と異なり Swift の観測時期にはムラがあり、そのため我々の結果の相関係数は彼らより小さくはなったが、X 線放射の一部はジェットから来ていることが考えられる。

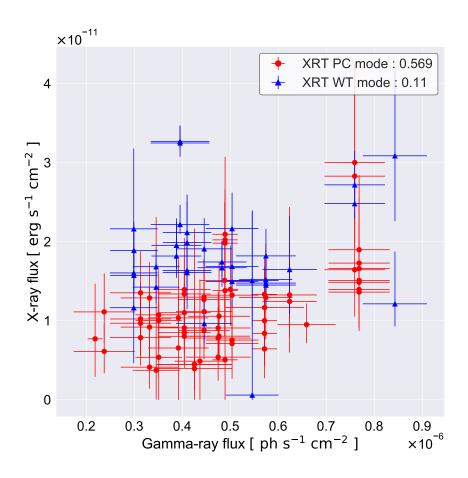


図 3.3.1 NGC 1275 のガンマ線 (Fermi-LAT) と X 線 (Swift/XRT) のフラックスの相関図。

3.4 ガンマ線フラックスと可視光・紫外線のフラックスの 相関

可視光・紫外線の放射起源を探るため、GeV ガンマ線と可視光 (B バンド)・紫外線 (UVW1 バンド) フラックスの相関を取ったものを図 3.4.1 に示す (可視光・紫外線で全てのバンドで作った相関図は Appendex にある)。相関係数は可視光から紫外線の計 <math>6 バンド で 0.396-0.548 で、GeV ガンマ線と UVW1(紫外線) バンド (図 3.4.1 の青点) が最も強い相関 (0.548) を示したが全体的に相関が弱く、可視光・紫外線帯域ではジェットの寄与はあるが支配的ではない可能性がある。

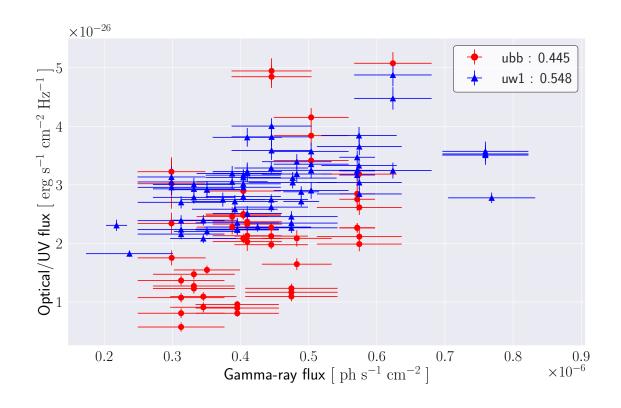


図 3.4.1 NGC 1275 のガンマ線 (Fermi-LAT) と可視光・紫外線 (Swift/UVOT) のフラックスの相関図。縦軸は左上:V バンド、真ん中上:B バンド、右上:U バンド、左下:UVW1 バンド、真ん中下:UVM2 バンド、右下:UVW2 バンド。

3.5 可視光・紫外線の color-magnitude ダイアグラム

図 3.5.1 に可視光・紫外線の横軸に色 (color) を、縦軸に見かけの等級 (magnitude) に取ったものを可視光と紫外線帯域でそれぞれ 1 つずつ示す (Appendex に全てのバンドの

26 第 3 章 結果

データあり)。色は凡例で示すように SED 上の急なピーク (図 3.2.1) であることが多い UW1 バンドと可視光側 (B) のバンド、UW1 バンドと紫外線側 (UVW2) のバンドの色である。可視光側 (B バンド、図 3.5.1 の赤点) の特徴として、color と magnitude は強く相関しており (相関係数 0.964)、color の変動幅も大きい (\sim 2)。一方で紫外線 (UVW2 バンド、図 3.5.1 の青点) の特徴は、color と magnitude があまり相関しておらず (相関係数-0.341)、color の変動幅は可視光に比べると小さい (\sim 0.5)。

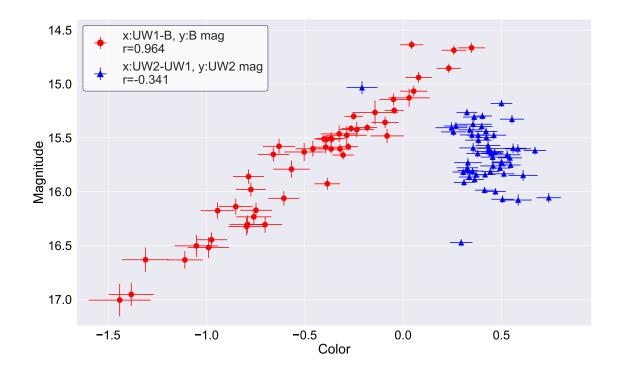


図 3.5.1 NGC 1275 の可視光・紫外線 (Swift/UVOT) の color と magnitude のプロット図。赤点:可視光 (B バンド)、青点:紫外線 (UVW1 バンド)。

第 4 章

議論

4.1 color-magnitude diagram の再現

図 3.5.1 を単一温度の黒体放射で再現できるか確認するために、単一温度黒体放射で NGC 1275 の可視光・紫外線帯域に 4 点以上持つ SED をフィッティングし、単一温度黒体放射のパラメータのおおよその範囲を求めた結果、温度が $13000-23000[\,\mathrm{K}\,]$ 、Bolometric Flux が $2\times10^{-11}-8\times10^{-11}[\,\mathrm{erg}\,\mathrm{s}^{-1}\,\mathrm{cm}^{-2}\,]$ であった。このパラメータ範囲で単一温度 黒体放射から color-magnitude diagram を作り、図 3.5.1 の特徴を再現できるか確かめたが、放射が単一温度黒体放射のみでは可視光の redder-when-brighter を再現できなかった。

28 第 4 章 議論

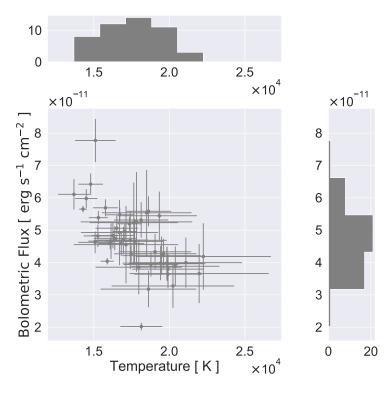


図 4.1.1 NGC 1275 の SED 上の可視光・紫外線に 4 点以上あるデータを単一温度黒体放射でフィッティングした結果。

そこで次に単一温度黒体放射に非熱的放射の Power law の放射を加え、表 4.1 に示すパラメータ範囲で color-magnitude diagram を作ったものを図 4.1.2 に示す。図 4.1.2(1)(Power law の normalization ののみを変化させたもの) は NGC 1275 の color-magnitude diagram の可視光側の redder-when-brighter と可視光と紫外線で color の変動幅の違いの特徴を良く再現していることが分かる。しかし紫外線の color と magnitude の弱い負の相関もしくは無相関は再現できていない。現実ではあるパラメータのみが変化しているのではなく、Power law の normalization 以外にも降着円盤の温度や Bolometric Flux のパラメータも変動している可能性もある。特に降着円盤の温度変化は可視光に比べ紫外線の方がcolor-magnitude に影響していることから、Power law の normalization と降着円盤の温度の変化によって、紫外線の color と magnitude の弱い負の相関もしくは無相関を再現できる可能性がある。

表 4.1 単一温度黒体放射と Power law のパラメータ範囲。

パラメータ名	図 3.5.1 を再現するために用いたパラメータ範囲
温度	$13000 - 23000 [ext{ K }]$
Bolometric Flux	$2 \times 10^{-11} - 8 \times 10^{-11} [\text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}]$
Power law normalization	$1.0 \times 10^{14} - 1.6 \times 10^{15}$
Power law ベキ	2.8

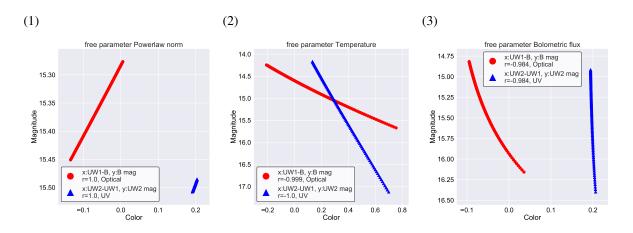


図 4.1.2 (1)Power law の normalization のみを変化させた (2) 単一温度降着円盤の温度 のみを変化させた (3) 単一温度降着円盤の Bolometric Flux のみを変化させた

4.2 可視光・紫外線の放射起源

過去の one-zone SSC モデルで SED フィッティングを行った先行研究 ([5]、[6]、[26]) では、NGC 1275 は紫外線より可視光側の方がジェットの放射強度が強いフィッティング 結果が得られている。このことと SSC model では再現できない SED 上の紫外線にピークを持つ放射が見えていること (図 3.2.1) と議論 4.1 を合わせて考えると、紫外線では降着円盤の放射が支配的、可視光では降着円盤放射に加えジェット放射の寄与も紫外線より見えている状態である可能性がある。

4.3 X線の放射起源

Fukazawa et al[13] の結果や結果 3.3 から、X 線帯域でジェットの寄与が見えている可能性が分かった。X 線のメインの放射起源がジェットである、かつ議論 4.2 が正しいと考えた場合、X 線 vs 可視光のフラックスの相関の方が X 線 vs 紫外線の相関より強い相関を示

30 第4章 議論

すことが期待される。そこでこれらの相関を取ったものを図 4.3.1 に示す。可視光・紫外線で X 線との相関はどちらも小さい結果となった。この原因の 1 つに、X 線帯域ではジェット放射以外にコロナからの放射が考えられ、このコロナ放射が支配的もしくはジェットと同程度寄与している可能性がある。

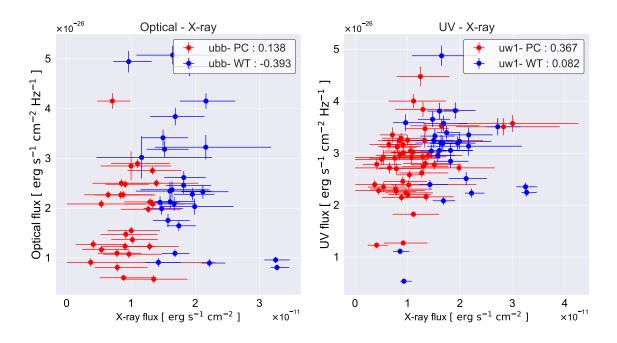


図 4.3.1 左:NGC 1275 の X 線と可視光のフラックスのプロット図、右:NGC 1275 の X 線と紫外線のフラックスのプロット図。

引用文献

- [1] http://www.swift.ac.uk/analysis/xrt/modes.php.
- [2] https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/uvot_desc.html.
- [3] https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/xrt_desc.html.
- [4] https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/instruments/table11.html.
- [5] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, K. Asano, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, B. M. Baughman, K. Bechtol, R. Bellazzini, R. D. Blandford, E. D. Bloom, E. Bonamente, A. W. Borgland, J. Bregeon, A. Brez, M. Brigida, P. Bruel, T. H. Burnett, G. A. Caliandro, R. A. Cameron, P. A. Caraveo, J. M. Casandjian, E. Cavazzuti, C. Cecchi, A. Celotti, A. Chekhtman, C. C. Cheung, J. Chiang, S. Ciprini, R. Claus, J. Cohen-Tanugi, S. Colafrancesco, L. R. Cominsky, J. Conrad, L. Costamante, C. D. Dermer, A. de Angelis, F. de Palma, S. W. Digel, D. Donato, E. do Couto e Silva, P. S. Drell, R. Dubois, D. Dumora, C. Farnier, C. Favuzzi, J. Finke, W. B. Focke, M. Frailis, Y. Fukazawa, S. Funk, P. Fusco, F. Gargano, M. Georganopoulos, S. Germani, B. Giebels, N. Giglietto, F. Giordano, T. Glanzman, I. A. Grenier, M.-H. Grondin, J. E. Grove, L. Guillemot, S. Guiriec, Y. Hanabata, A. K. Harding, R. C. Hartman, M. Hayashida, E. Hays, R. E. Hughes, G. Jóhannesson, A. S. Johnson, R. P. Johnson, W. N. Johnson, M. Kadler, T. Kamae, Y. Kanai, H. Katagiri, J. Kataoka, N. Kawai, M. Kerr, J. Knödlseder, F. Kuehn, M. Kuss, L. Latronico, M. Lemoine-Goumard, F. Longo, F. Loparco, B. Lott, M. N. Lovellette, P. Lubrano, G. M. Madejski, A. Makeev, M. N. Mazziotta, J. E. McEnery, C. Meurer, P. F. Michelson, W. Mitthumsiri, T. Mizuno, A. A. Moiseev, C. Monte, M. E. Monzani, A. Morselli, I. V. Moskalenko, S. Murgia, T. Nakamori, P. L. Nolan, J. P. Norris, E. Nuss, T. Ohsugi, N. Omodei, E. Orlando, J. F. Ormes, D. Paneque, J. H. Panetta, D. Parent, M. Pepe, M. Pesce-Rollins, F. Piron, T. A. Porter, S. Rainò, M. Razzano, A. Reimer, O. Reimer, T. Reposeur, S. Ritz, A. Y. Rodriguez, R. W. Romani, F. Ryde, H. F.-W. Sadrozinski, R. Sambruna, D. Sanchez, A. Sander, R. Sato,

32 引用文献

P. M. S. Parkinson, C. Sgrò, D. A. Smith, P. D. Smith, G. Spandre, P. Spinelli, J.-L. Starck, M. S. Strickman, A. W. Strong, D. J. Suson, H. Tajima, H. Takahashi, T. Takahashi, T. Tanaka, G. B. Taylor, J. G. Thayer, D. J. Thompson, D. F. Torres, G. Tosti, Y. Uchiyama, T. L. Usher, N. Vilchez, V. Vitale, A. P. Waite, K. S. Wood, T. Ylinen, M. Ziegler, H. D. Aller, M. F. Aller, K. I. Kellermann, Y. Y. Kovalev, Y. A. Kovalev, M. L. Lister, and A. B. Pushkarev. Fermi Discovery of Gamma-ray Emission from NGC 1275. *apj*, Vol. 699, pp. 31–39, July 2009.

- [6] J. Aleksić, E. A. Alvarez, L. A. Antonelli, P. Antoranz, M. Asensio, M. Backes, and U. Barres de Almeida. Detection of very-high energy γ-ray emission from <ASTROBJ>NGC 1275</ASTROBJ> by the MAGIC telescopes. *aap*, Vol. 539, p. L2, March 2012.
- [7] J. Aleksić, S. Ansoldi, L. A. Antonelli, P. Antoranz, A. Babic, P. Bangale, U. Barres de Almeida, J. A. Barrio, J. Becerra González, and W. Bednarek. Contemporaneous observations of the radio galaxy NGC 1275 from radio to very high energy γ -rays. *aap*, Vol. 564, p. A5, April 2014.
- [8] V. Beckmann and C. Shrader. The AGN phenomenon: open issues. In *Proceedings* of "An INTEGRAL view of the high-energy sky (the first 10 years)" 9th INTEGRAL Workshop and celebration of the 10th anniversary of the launch (INTEGRAL 2012). 15-19 October 2012. Bibliotheque Nationale de France, p. 69, January 2012.
- [9] W. Benbow and VERITAS Collaboration. Highlights from the VERITAS AGN Observation Program. In *34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015)*, Vol. 34, p. 821, July 2015.
- [10] Anthony M. Brown and Jenni Adams. High-energy γ -ray properties of the Fanaroff-Riley type I radio galaxy NGC 1275. *mnras*, Vol. 413, pp. 2785–2790, June 2011.
- [11] D. Donato, D. Wood, and C. C. Cheung. Fermi LAT detection of gamma-ray flaring activity from the radio galaxy NGC 1275. *The Astronomer's Telegram*, Vol. 2737, p. 1, July 2010.
- [12] A. C. Fabian, S. A. Walker, C. Pinto, H. R. Russell, and A. C. Edge. Effects of the variability of the nucleus of NGC 1275 on X-ray observations of the surrounding intracluster medium. *mnras*, Vol. 451, pp. 3061–3067, August 2015.
- [13] Yasushi Fukazawa, Kensei Shiki, Yasuyuki Tanaka, Ryosuke Itoh, Hiromitsu Takahashi, Fumiya Imazato, Filippo D'Ammando, Roopesh Ojha, and Hiroshi Nagai. X-Ray and GeV Gamma-Ray Variability of the Radio Galaxy NGC 1275. *apj*, Vol. 855, p. 93, March 2018.
- [14] Gaia Collaboration. VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2 (Gaia Collaboration,

- 2018). VizieR Online Data Catalog, p. I/345, April 2018.
- [15] N. Gehrels. The Swift Gamma-Ray Burst Mission. *apj*, Vol. 611, pp. 1005–1020, August 2004.
- [16] P. Giommi, G. Polenta, A. Lähteenmäki, D. J. Thompson, M. Capalbi, S. Cutini, D. Gasparrini, J. González-Nuevo, J. León-Tavares, M. López-Caniego, M. N. Mazziotta, C. Monte, M. Perri, S. Rainò, G. Tosti, A. Tramacere, F. Verrecchia, H. D. Aller, M. F. Aller, E. Angelakis, D. Bastieri, A. Berdyugin, A. Bonaldi, L. Bonavera, C. Burigana, D. N. Burrows, S. Buson, E. Cavazzuti, G. Chincarini, S. Colafrancesco, L. Costamante, F. Cuttaia, F. D'Ammando, G. de Zotti, M. Frailis, L. Fuhrmann, S. Galeotta, F. Gargano, N. Gehrels, N. Giglietto, F. Giordano, M. Giroletti, E. Keihänen, O. King, T. P. Krichbaum, A. Lasenby, N. Lavonen, C. R. Lawrence, C. Leto, E. Lindfors, N. Mandolesi, M. Massardi, W. Max-Moerbeck, P. F. Michelson, M. Mingaliev, P. Natoli, I. Nestoras, E. Nieppola, K. Nilsson, B. Partridge, V. Pavlidou, T. J. Pearson, P. Procopio, J. P. Rachen, A. Readhead, R. Reeves, A. Reimer, R. Reinthal, S. Ricciardi, J. Richards, D. Riquelme, J. Saarinen, A. Sajina, M. Sandri, P. Savolainen, A. Sievers, A. Sillanpää, Y. Sotnikova, M. Stevenson, G. Tagliaferri, L. Takalo, J. Tammi, D. Tavagnacco, L. Terenzi, L. Toffolatti, M. Tornikoski, C. Trigilio, M. Turunen, G. Umana, H. Ungerechts, F. Villa, J. Wu, A. Zacchei, J. A. Zensus, and X. Zhou. Simultaneous Planck, Swift, and Fermi observations of X-ray and γ -ray selected blazars. aap, Vol. 541, p. A160, May 2012.
- [17] O. Godet, A. P. Beardmore, A. F. Abbey, J. P. Osborne, G. Cusumano, C. Pagani, M. Capalbi, M. Perri, K. L. Page, D. N. Burrows, S. Campana, J. E. Hill, J. A. Kennea, and A. Moretti. Modelling the spectral response of the Swift-XRT CCD camera: experience learnt from in-flight calibration. *aap*, Vol. 494, pp. 775–797, February 2009.
- [18] J. Kataoka, Ł. Stawarz, C. C. Cheung, G. Tosti, E. Cavazzuti, A. Celotti, S. Nishino, Y. Fukazawa, D. J. Thompson, and W. F. McConville. γ-ray Spectral Evolution of NGC 1275 Observed with Fermi Large Area Telescope. *apj*, Vol. 715, pp. 554–560, May 2010.
- [19] MAGIC Collaboration, S. Ansoldi, L. A. Antonelli, C. Arcaro, D. Baack, A. Babić, B. Banerjee, and P. Bangale. Gamma-ray flaring activity of NGC1275 in 2016-2017 measured by MAGIC. *aap*, Vol. 617, p. A91, September 2018.
- [20] P. G. Martin, J. R. P. Angel, and J. Maza. Night-To Variations in the Optical Polarization of the Nucleuis of NGC 1275. *apj*, Vol. 209, p. L21, October 1976.
- [21] Razmik Mirzoyan. MAGIC detection of a giant flaring activity from NGC 1275 at

34 引用文献

very-high-energy gamma rays. *The Astronomer's Telegram*, Vol. 9929, p. 1, January 2017.

- [22] Reshmi Mukherjee and VERITAS Collaboration. VERITAS detection of the radio galaxy NGC 1275 with elevated very-high-energy gamma-ray emission. *The Astronomer's Telegram*, Vol. 9931, p. 1, January 2017.
- [23] Hiroshi Nagai, Kenta Suzuki, Keiichi Asada, Motoki Kino, Seiji Kameno, Akihiro Doi, Makoto Inoue, Jun Kataoka, Uwe Bach, Tomoya Hirota, Naoko Matsumoto, Mareki Honma, Hideyuki Kobayashi, and Kenta Fujisawa. VLBI Monitoring of 3C 84 (NGC 1275) in Early Phase of the 2005 Outburst. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 62, p. L11, April 2010.
- [24] T. S. Poole. Photometric calibration of the Swift ultraviolet/optical telescope. *mnras*, Vol. 383, pp. 627–645, January 2008.
- [25] I. I. Pronik, N. I. Merkulova, and L. P. Metik. UBVRI Observations of the Nucleus of NGC 1275 from 1989 to 1994: Microvariability. *aj*, Vol. 117, pp. 2141–2151, May 1999.
- [26] Kenta Suzuki, Hiroshi Nagai, Motoki Kino, Jun Kataoka, Keiichi Asada, Akihiro Doi, Makoto Inoue, Monica Orienti, Gabriele Giovannini, Marcello Giroletti, Anne Lähteenmäki, Merja Tornikoski, Jonathan León-Tavares, Uwe Bach, Seiji Kameno, and Hideyuki Kobayashi. Exploring the Central Sub-parsec Region of the γ-Ray Bright Radio Galaxy 3C 84 with VLBA at 43 GHz in the Period of 2002-2008. apj, Vol. 746, p. 140, February 2012.
- [27] K. Tanada, J. Kataoka, M. Arimoto, M. Akita, C. C. Cheung, S. W. Digel, and Y. Fukazawa. The Origins of the Gamma-Ray Flux Variations of NGC 1275 Based on Eight Years of Fermi-LAT Observations. *apj*, Vol. 860, p. 74, June 2018.
- [28] Syoko Yamazaki, Yasushi Fukazawa, Mahito Sasada, Ryosuke Itoh, Sho Nishino, Hiromitsu Takahashi, Katsutoshi Takaki, Koji S. Kawabata, Michitoshi Yoshida, and Makoto Uemura. X-Ray and Optical Monitoring of a Gamma-Ray-Emitting Radio Galaxy, NGC 1275. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 65, p. 30, April 2013.
- [29] Alice P. Y. Yu, Jeremy Lim, Youichi Ohyama, Jeffrey C. C. Chan, and T. Broadhurst. The High-velocity System: Infall of a Giant Low-surface-brightness Galaxy toward the Center of the Perseus Cluster. *apj*, Vol. 814, p. 101, December 2015.
- [30] Y. H. Yuan, J. H. Fan, H. J. Pan, Z. Y. Peng, Y. Liu, and H. B. Xiao. Optical monitoring and spectral analysis of the Seyfert galaxy NGC1275. *apss*, Vol. 360, p. 9, November 2015.

- [31] 英雄小玉, 邦仁井岡, 和範郡. 宇宙物理学. 共立出版, 2015.
- [32] 裕一矢治. X 線観測による電波銀河 cygnus a のジェット活動の研究. Master's thesis, 埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程物理機能専攻物理学コース, 2008.