# 多波長観測で探るガンマ線を放射する

# 電波銀河のジェット放射機構の研究

広島大学理学研究科

高エネルギー宇宙・可視赤外天文学研究室

M154894

志岐 健成

主查 深澤泰司 副查 山本一博

2017年2月

宇宙に存在する銀河は大きく通常銀河 (~90%) と活動銀河 (~10%) の二つに分けられる。高い活動性を 持つ活動銀河は中心部に活動銀河核と呼ばれるコアを持ち、その正体は降着円盤を形成した大質量ブラッ クホールであると考えられている。活動銀河核は放出する光の特徴から様々な種類に分類されるが、特に明 るい電波ジェットを持つ天体は電波銀河と呼ばれる。

宇宙ジェットとはブラックホール等のコンパクトな天体から双方向に吹き出す細く絞られたプラズマの 噴出流のことで、その速度はほぼ光速に達する。ジェットは電波からガンマ線までの幅広いエネルギー帯域 で光っており、これはシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱による非熱的な放射によるものである。この ジェットを正面から見た場合は相対論的ビーミング効果によって増幅される。一部の電波銀河ではジェット からの放射が卓越して強いガンマ線を放射するものがあり、このような電波銀河はジェットの研究に適して いる。その中でも特に強いガンマ線を放出する NGC 1275 はペルセウス銀河団の中に位置する天体であり、 電波からガンマ線領域まで広い帯域で輝いている。ガンマ線領域では短期間の激しい光度変動が報告され る一方で、可視光・X 線の領域では輝線の存在が確認されており、これらの領域では降着円盤からの放射が 支配的であると考えられている。過去の研究では可視光・X 線領域における明確な光度変動はないとされ てきた (e.g. Yamazaki et al. 2013)。

今回私は Fermi ガンマ線衛星が検出した活動銀河核をまとめた'3LAC カタログ' に記載されている天体 の中から電波銀河を選出し、ガンマ線のデータ解析を系統的に行った。その結果、ガンマ線領域の光度が大 きい天体ほどガンマ線スペクトルのべきが大きい傾向があることがわかった。さらに広島大学所有のかな た望遠鏡でモニター観測が行われている NGC 1275 に関しては X 線と可視光のデータ解析を行った。図1 は NGC 1275 のガンマ線領域のスペクトルである。三角点は 7.5 年平均、十字は 2010 年のフレア時のもの を表す。図2 は NGC 1275 の多波長光度曲線である。ガンマ線光度と X 線光度は上昇傾向にあることが見 受けられるが、可視光の等級に明らかな増光は見られなかった。本研究ではガンマ線を放出する電波銀河の 系統的性質と NGC 1275 の多波長での光度変動の結果を報告するとともに、可視光・X 線・ガンマ線との 相関を議論する。



図 1: NGC 1275 のガンマ線領域のスペクトル



図 2: NGC 1275 のガンマ線、X 線、可視光の8年の 光度曲線

# 目 次

第1章	序論	7
1.1	活動銀河核とジェット....................................	7
	1.1.1 活動銀河核	7
	1.1.2 ジェット	12
1.2	NCG 1275 の多波長での研究	12
1.3	本研究の目的	14
第2章	観測機器と解析	15
2.1	Fermi ガンマ線衛星	15
	2.1.1 Large Area Telescope (LAT) 検出器と主要な装置	17
	2.1.2 LAT <b>データの解析方法</b>	19
	2.1.3 最尤法	33
2.2	Swift 衛星	34
	2.2.1 Burst Alert Telescope (BAT)	35
	2.2.2 X-Ray Telescope (XRT)	36
	2.2.3 UV/Optical Telescope (UVOT)	38
	2.2.4 XRT データの解析方法	39
2.3	かなた望遠鏡	41
	2.3.1 HONIR	42
	2.3.2 HOWPol	42
	2.3.3 HONIR 解析方法	43
第3章	解析結果	46
3.1	ガンマ線で検出された電波銀河の系統的な性質...............................	46
	3.1.1 天体の選考条件	46
	3.1.2 解析結果	49
	3.1.3 諸量との相関	52
3.2	NGC 1275 の連続多波長モニター	53
	3.2.1 Fermi 衛星によるガンマ線の結果	53
	3.2.2 Swift 衛星による X 線の結果	57
	3.2.3 かなた望遠鏡による可視光の結果	62
	3.2.4 相関、多波長変動の考察 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	62
笋⊿咅	キレめと今後	66
第4早 (十钟	よこのとう後 私人の他の電池知道のガンフ約般托は用	70
₩₽ĹĹĹ E¢+-V	(AC の他の电/X) 政内のカノミ称肝(1) 加木・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
11」並来 ノートをヨ	(1915) 12/13 の観測ナーマリスト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99
11 球	、 へ 物 と 月 の カ ノ く 緑 成 別 の テ ノ ノ レ ー ト の 「 F 成 力 法 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	103
竹録	1. 小力順をから尤度距離への发換	105
竹録	は AKT テーダの人ペクトル	105
		110

# 図目次

1	NGC 1275 のガンマ線領域のスペクトル	1
2	NGC 1275 のガンマ線、X 線、可視光の 8 年の光度曲線	1
1.1	AGN の統一モデルの模式図 1 [22]	7
1.2	AGN の構造の簡略図 [35]	7
1.3	1 型セイファート銀河である NGC 5548 のハッブル宇宙望遠鏡のアーカイブデータの画像 [36]	8
1.4	NGC5548 の可視光域のスペクトル [37]	8
1.5	2 型セイファート銀河に分類される NGC 4631 の可視光イメージ [38]	9
1.6	NGC 4631 の可視光スペクトル。狭輝線のみが確認できる。[39]	9
1.7	Hewitt and Burbidge 1993 のクエーサーカタログに掲載されている 7236 個のクエーサーの	
	赤方偏移の頻度分布	10
1.8	電波銀河 3C 111 の多波長スペクトル [18]	11
1.9	電波銀河 3C 120 の多波長スペクトル [18]	11
1.10	ブレーザーシークエンスを表した図 [13],[14]	12
1.11	ガンマ線データから得られる Index vs Luminosity 図 [2]	12
1.12	かなた望遠鏡 HOWPol で得られた、NGC 1275 の可視スペクトル [29]	13
1.13	すざく衛星 XIS で得られた、NGC 1275 の X 線スペクトル [29]	13
1.14	NGC 1275 の偏光度の時間変動を表した図 [29]。	13
1.15	NGC 1275 周辺の天体の各偏光度と偏光方位角を示した図 [29]。	13
1.16	2009 年 10 月から 2011 年 2 月までの多波長ライトカーブ。(a) MAGIC の 100GeV 以上のガン	
	マ線一か月ビンライトカーブ。黒い横破線は平均のフラックスを表す。(b)Fermiの100MeV-	
	100GeV のガンマ線1週間ビンぼライトカーブ。(c)KVA の R-band ライトカーブ。(d)VRBA	
	の 15GHz のライトカーブ。[5]	14
1.17	ガンマ線と可視光の光度の相関図。縦軸はガンマ線のフォトンフラックスで横軸は可視光の	
	フラックス密度をとってある。図中の線は観測データをフィッティングしたものである。そ	
	れぞれ、(赤破線) 直線フィット (青破線) 二次関数フィット (黒線) $F_\gamma = lpha (F_{opt})^eta$ でフィット	
	したものである。[5]	14
2.1	フェルミ衛星と二つの検出器。Large Area Telescope (LAT) 検出器は 20MeV 300GeV、	
	Gamma-ray Burst Monitor(GBM) 検出器は 9keV 40MeV のエネルギー帯域をカバーする。	
	LAT の大きさは 1.8m× 1.8m×0.72m。消費電力は 670W で重さは 2789kg。[33] [8]	15
2.2	各エネルギー帯域における 7.5 年データの全天ガンマ線カウントマップ	16
2.3	トラッカーの模式図 [8]	17
2.4	カロリメーターモジュールの模式図 [8]	18
2.5	LAT 内のモジュールの模式図	19
2.6	NGC 1275 の 0.1-300GeV のカウントマップ。半径 20° の領域を示してある。	24
2.7	NGC 1275 の露光マップ	24
2.8	銀河面からのガンマ線放射のモデルテンプレート	25
2.9	銀河系外からの等方的なガンマ線放射のテンプレート	25
2.10	Unbinned 解析結果の TS マップ	30
2.11	Unbinned 解析結果の TS マップのピクセル頻度分布。横軸は TS の値・縦軸は頻度。	30

2.12	Binned 解析の結果を基に作成したモデルマップ	33
2.13	モデルマップのサイズに合わせて作成した CMAP	33
2.14	モデルマップと CMAP の残差マップ ...................................	33
2.15	残差マップの頻度分布。横軸はカウントの値、縦軸は頻度を表す。・・・・・・・・・・・	33
2.16	Swift 衛星外観図 [40]	34
2.17	打ち上げから 2015 年 10 月までに Swift 衛星が発見した GRB を全天マップにプロットした	
	もの [45]	35
2.18	BAT の模式図 [40]	35
2.19	BAT に搭載されている符号化マスク [40]	35
2.20	XRT に搭載されている X 線反射鏡 [46]	36
2.21	金属面での X 線全反射を利用したウォルター 1 型光学系 [47]	36
2.22	WT モードで得られた NGC 1275 データ $\dots$ $\dots$ $\dots$ $\dots$ $\dots$ $\dots$ $\dots$	38
2.23	PC モードで得られた $3C$ 111 のデータ	38
2.24	xselect で切り取った PC モードのソースイベントファイル	40
2.25	xselect で切り取った PC モードのバックグラウンドイベントファイル	40
2.26	xselect で切り取った WT モードのソースイベントファイル	41
2.27	xselect で切り取った WT モードのバックグラウンドイベントファイル	41
2.21		11
3.1	3C 380 $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	51
3.2	3C 380 の 60 日ビンライトカーブ	51
3.3	3C 380 の 10 日ビンライトカーブ	51
3.4	7.5 年データの解析から求めた、各天体の光度とガンマ線のスペクトルインデックスの相関図	53
3.5		54
3.6	2008 年から 2016 年までの 0.1-300GeV の 30 日ビンライトカーブ	55
3.7	239557417 - 371970708 [MET] のガンマ線ライトカーブ	55
3.8	371970708 - 506879017 [MET] のガンマ線ライトカーブ	56
3.9	498788097 - 507255297 [MET] の1日ビンのガンマ線ライトカーブ	57
3.10	Swift 衛星 XRT で撮られた 0.2-10.0 keV の CMAP 右図は XRT の視野全体、左図は中心天	
	体の周囲 10 分角四方をトリミングしたものである。	58
3.11	NGC 1275 の 0.2-10.0 keV の PC モードデータライトカーブ。2007 年から 2016 年末までの	
	データを示している。	61
3.12	NGC 1275 の 0.2-10.0 keV の WT モードデータライトカーブ。2007 年から 2016 年末まで	
	のデータを示している。	61
3.13	各アパーチャーサイズのライトカーブ.................................	61
3.14	HONIR で得られた V、R、J バンドのライトカーブ	62
3.15	2006 年から 2017 年までの Fermi と Swift のライトカーブ	63
3.16	498788097 - 507255297 [MET] の Fermi と Swift のライトカーブ	63
3.17	ガンマ線光度とX線光度の相関図	64
3.18	2015 年 10 月から 2017 年 1 月までの、NGC 1275 の多波長ライトカーブ。上から Fermi 衛	
	星の GeV ガンマ線、Swift 衛星 X 線、かなた望遠鏡 HONIR の R・V バンド、HONIR の J	
	バンドのデータを用いている。	65
1	NGC 1218 $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	71
2	NGC 1218 の 365 日ビンライトカーブ	71
3	NGC1218 の 182 日ビンライトカーブ	71
4	IC 310 $\sigma$ 0.1-300GeV $\sigma$ SED	72
5	1H 0323+342 の 60 日ビンライトカーブ	73
6	1H 0323+342 の 30 日ビンライトカーブ	73

7	4C +39.12 $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	74
8	3C 111 $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	75
9	3C 111 の 60 日ビンライトカーブ	75
10	3C 111 の 30 日ビンライトカーブ	75
11	3C 111 の VLBI によるイメージ	76
12	横軸時間、縦軸がノットのコアからの距離を表した図。各観測点が直線にのることから、ノッ	
	トは等速度でコアから離れて行くことが見て取れる。この図からノットがいつコアから放出	
	されたかが推定できる。[12]	76
13	3C 111 の 2004 年以降の RXTE の X 線ライトカーブ。下の矢印は各ノットの放出時期を示	
	す。[12]	77
14	X 線の減光とノットの放出の相関をとった図 [12]	77
15	3C 120 のガンマ線・電波のライトカーブと電波ノットの関係...........	78
16	3C 111 のガンマ線・電波のライトカーブ	79
17	3C 111 の詳細なガンマ線ライトカーブ	79
18	円錐型のジェット構造を仮定した図	79
19	Pictor A $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	80
20	Pictor A の 365 日ビンライトカーブ	80
21	Pictor A の 180 日ビンライトカーブ	80
22	PKS 0625-354 $\sigma$ 0.1-300GeV $\sigma$ SED	81
23	PKS 0625-354 の 60 日ビンライトカーブ	81
24	NGC 2484 $\sigma$ 0.1-300GeV $\sigma$ SED	82
25	$3C 207 \mathcal{O} 0.1-300 \text{GeV} \mathcal{O} \text{SED} \dots$	83
26	3C 207 の 180 日ビンライトカーブ	83
27	SBS 0846+513 の 60 日ビンライトカーブ	84
28	SBS 0846+513 の 30 日ビンライトカーブ	84
29	SBS 0846+513 の 15 日ビンライトカーブ	84
30	活動的な期間の SBS 0846+513 の 5 日ビンライトカーブ	84
31	$3C 221 \mathcal{O} 0.1-300 \text{GeV} \mathcal{O} \text{SED} \dots$	85
32		85
33	PMN J0948+0022 の15 日ビンライトカーフ	85
34 97	PMN J0948 + 0022  0  5  H E  9 7 1 F 7 - 7	85
35	3C 264 の 0.1-300GeV の SED	87
36 97		87
37	PKS 1203+04 $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	88
38 20	$M87 \oplus 0.1-300 \text{GeV} \oplus \text{SED} \dots \dots$	89
39 40	$M = 87 \oplus 309 \oplus C = 7 + 7 = 7$	09 09
40	M = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 = 0 =	09
41 49	3C 275.1 の 0.1-500GeV の SED	90
42 43	50 273.1  of  100  cm	90 01
40	$CP 1210 + 487 \oplus 10 P E = 7$	91 01
-1-1 // 5	(1) 1010 - 401 (0) 10 ロビンノー・バーン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	01
40 46	Д重加州 (GD 1010+407 の 0 0 0 0 0 0 7 1 7 7 - 7)     任 新聞の CR 1310+487 の 1 日ビンライトカーブ	91 01
$\frac{1}{47}$	Cen A $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	02
48	Cen A の 10 日ビンライトカーブ	92 92
49	$3C 286 \oplus 0.1-300 \text{GeV} \oplus \text{SED}$	92 93
9 50	3C 286 の 365 日ビンライトカーブ	03
50		00

51	CenB $\boldsymbol{\sigma}$ 0.1-300GeV $\boldsymbol{\sigma}$ SED	. 94
52	3C 303 $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	. 95
53	NGC 6251 $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	. 97
54	NGC 6251 の 60 日ビンライトカーブ	. 97
55	NGC 6251 の 30 日ビンライトカーブ	. 97
56	3C 380 $\mathcal{O}$ 0.1-300GeV $\mathcal{O}$ SED	. 98
57	3C 380 の 60 日ビンライトカーブ	. 99
58	3C 380 の 10 日ビンライトカーブ	. 99
59	作成した太陽と月からの放射モデル....................................	. 104
60	ID:00036524001 date:2007-07-13	. 105
61	ID:00036524002 date:2007-12-06	. 105
62	ID:00030354003 date:2009-12-30	. 106
63	ID:00031770001 date:2010-07-22	. 106
64	ID:00031770002 date:2010-07-24	. 106
65	ID:00031770003 date:2010-07-26	. 106
66	ID:00031770004 date:2010-07-28	. 106
67	ID:00031770005 date:2010-07-30	. 106
68	ID:00031770006 date:2010-08-01	. 107
69	ID:00031770007 date:2010-08-03	. 107
70	ID:00031770008 date:2010-08-05	. 107
71	ID:00031770009 date:2010-08-07	. 107
72	ID:00031770010 date:2010-08-09	. 107
73	ID:00091128001 date:2011-07-05	. 107
74	ID:00091128002 date:2011-07-06	. 108
75	ID:00091128003 date:2011-07-07	. 108
76	ID:00091128004 date:2011-07-09	. 108
77	ID:00091128005 date:2011-07-10	. 108
78	ID:00032691001 date:2013-01-21	. 108
79	ID:00049799001 date:2013-04-04	. 108
80	ID:00049799002 date:2013-07-10	. 109
81	ID:00049799003 date:2013-07-12	. 109
82	ID:00049799004 date:2013-07-14	. 109
83	ID:00049799005 date:2013-07-26	. 109
84	ID:00049799006 date:2013-08-01	. 109
85	ID:00092034001 date:2015-02-11	. 109
86	ID:00092034002 date:2015-03-15	. 110
87	ID:00092034003 date:2015-07-25	. 110
88	ID:00092034004 date:2015-08-18	. 110
89	ID:00092034005 date:2015-09-16	. 110
90	ID:00081530001 date:2015-11-03	. 110
91	ID:00034380001 date:2016-02-19	. 110
92	ID:00034380002 date:2016-02-21	. 111
93	ID:00034380004 date:2016-02-23	. 111
94	ID:00034380005 date:2016-02-25	. 111
95	ID:00034380006 date:2016-02-26	. 111
96	ID:00034380007 date:2016-02-29	. 111
97	ID:00034380008 date:2016-03-02	. 111

98	ID:00034380010 date:2016-03-03
99	ID:00034380009 date:2016-03-04
100	ID:00034404001 date:2016-03-05
101	ID:00034380012 date:2016-03-06
102	ID:00034380013 date:2016-03-08
103	ID:00034380014 date:2016-03-10
104	ID:00034380015 date:2016-03-12
105	ID:00034404003 date:2016-03-16
106	ID:00034765001 date:2016-10-30
107	ID:00034765002 date:2016-10-31
108	ID:00034765003 date:2016-11-01
109	ID:00034765004 date:2016-11-02
110	ID:00034765005 date:2016-11-03
111	ID:00034765006 date:2016-11-04
112	ID:00034765007 date:2016-11-05
113	ID:00034765008 date:2016-11-06
114	ID:00034765009 date:2016-11-07
115	ID:00034765010 date:2016-11-08
116	ID:00034765011 date:2016-11-09
117	ID:00034765012 date:2016-11-10
118	ID:00087311001 date:2017-01-01
119	ID:00087311002 date:2017-01-02
120	ID:00030354001 date:2006-01-06
121	ID:00030364001 date:2006-02-03
122	ID:00031763001 date:2010-07-15
123	ID:00031763002 date:2010-07-18
124	ID:00031763003 date:2010-07-20
125	ID:00032691001 date:2013-01-21
126	ID:00032691002 date:2013-01-23
127	ID:00031770011 date:2017-01-01
128	ID:00031770012 date:2017-01-03
129	ID:00031770013 date:2017-01-05
130	ID:00031770014 date:2017-01-07
131	ID:00031770015 date:2017-01-12
132	ID:00031770016 date:2017-01-17
133	ID:00031770017 date:2017-01-20
134	ID:00031770018 date:2017-01-22
135	ID:00031770019 date:2017-01-24
136	ID:00031770020 date:2017-01-26
137	ID:00031770021 date:2017-01-29

# 第1章 序論

# 1.1 活動銀河核とジェット

## 1.1.1 活動銀河核

宇宙に存在する銀河の約90%はアンドロメダ銀河に代表される「通常銀河」と呼ばれ、銀河内に存在す る恒星・星間ガスなどの放射によって輝いている。一方で残りの約10%は「活動銀河」と呼ばれており、通 常銀河では見られないような電波からガンマ線までの幅広い波長帯域で明るく輝く。さらに通常銀河の光度 がおよそ10<sup>43</sup> [erg/s] 程度であるのに対して活動銀河の光度はおよそ10<sup>44</sup> – 10<sup>49</sup> [erg/s] であり、桁違いの エネルギーが放射される。この活動銀河中心部は特に活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) と呼ば れ、その正体は降着円盤と呼ばれる構造を形成した大質量ブラックホールであると考えられている。ブラッ クホールの周辺にあるガスは重力に引かれて落ち込んでいくが、一般的に降着するガスは角運動量を持っ ているため、ブラックホールの周囲を回転しながらゆっくりと落ちてゆく。このような回転ガスがつくる円 盤を降着円盤という。降着円盤中の物質はケプラー運動をしており、内側と外側では運動速度に差がでる。 この速度差と降着円盤の構成物質が持つ粘性により摩擦が生まれ、重力ポテンシャルエネルギーが熱エネ ルギーに、そして放射エネルギーへと転化される。降着円盤の外側には幅の広い輝線を放射する広輝線領 域が存在しており、これらを取り囲む様にガスやダストの不透明なトーラスと呼ばれる構造が形成され、さ らに外側には幅の狭い輝線を放射する狭輝線領域が広がる。AGN 周辺の構造を図 1.1、1.2 に示す。

AGN はそのスペクトルや光度などの特徴から様々な種類に分類される。AGN の種類として、セイファート銀河、クェーサー、電波銀河、ブレーザーなどが例として挙げることができる。近年では AGN の多様性 は少数の物理的なパラメータと観測方向の違いの組み合わせで説明が出き、本質的な違いは小さいとする AGN の統一モデルが一般的に支持されている。このモデルによれば AGN はまず電波の強弱によって分け られ、さらに観測者に対する方向で分類できるとしている。表 1.1 はこのモデルの統一の図式を示す。



図 1.1: AGN の統一モデルの模式図 1 [22]



図 1.2: AGN の構造の簡略図 [35]

電波の特徴	正面から観測	横から観測	
弱い	セイファート1	セイファート2	
	クェーサー	遠赤外線銀河	
強い	BL Lac	$\operatorname{FR1}$	
	広輝線電波銀河	狭輝線電波銀河	
	OVV	FR2	

表 1.1: 統一の図式 [32]

次に AGN の分類について説明する。

セイファート銀河

セイファート銀河は明るい中心核をもつが母銀河は明瞭に見えており、そのほとんどが渦巻き銀河か不 規則銀河である。AGN の中では比較的近傍に位置し、光度も低い傾向がある。アメリカの天文学者カール・ セイファートによって 1940 年代に初めて分類されたことからこの名がつけられた。セイファート銀河は可 視光域に多くの高励起のスペクトルを確認することができるが、幅の広い輝線の有無で二つのサブクラスに 分類できることが 1974 年に提案された [20]。1 型セイファート銀河は広輝線と狭輝線の両方を示す一方で、 2 型セイファート銀河は狭輝線のみを示す。これら二種類の銀河の差異の起源は完全には理解されていない が、2 型セイファート銀河は分子雲トーラスで広輝線を出す領域が隠されて見えない状況にあると考えられ ている。また、フェイファート銀河のサブクラスをさらに 1.5 型、1.8 型、1.9 型に細分化するアイディアも 提案されており、2 に近づくにつれて広輝線が観測されにくい。これらの強い輝線に加えて、セイファート 銀河では母銀河からの弱い吸収線も観測される。しかし AGN からの非熱的な連続放射と混ざってしまうた め、これらの吸収線は非常に弱い。

•1型セイファート銀河

広輝線・狭輝線の両方が観測される。このタイプの銀河は観測者に対して正面を向いており中心部 がトーラスによって遮蔽されないため、広輝線領域・狭輝線領域の両方からの放射を観測される。広 輝線領域は高密度であると考えられており  $(n_e \sim 10^9 cm^{-3})$ 、ここから放射される広輝線の輝線幅は  $10^4$ km/s にも及ぶ。広輝線は禁制線でのみ見られるが、これは高密度な広輝線領域では衝突励起と逆 励起が卓越するため、非電気双極子放射を伴う遷移が起こりにくくなるからである。典型的な1型セ イファート銀河の可視光画像を図 1.3 に、可視光域のスペクトルを図 1.4 に示す。





図 1.3: 1型セイファート銀河である NGC 5548 のハッ ブル宇宙望遠鏡のアーカイブデータの画像 [36]

図 1.4: NGC5548 の可視光域のスペクトル [37]

• 2型セイファート銀河

狭輝線のみが観測される。このタイプの銀河は観測者に対して横を向いているため中心部がトーラスによって遮蔽される。そのため中心部付近に分布する広輝線領域からの放射が散乱されるため、広輝線が観測されないと考えられる。狭輝線は比較的低密度な狭輝線領域から放射され  $(n_e \sim 10^3 - 10^6 cm^{-3})$ 、輝線幅は数百 km/s である。





図 1.5: 2型セイファート銀河に分類される NGC 4631 の可視光イメージ [38]

図 1.6: NGC 4631 の可視光スペクトル。狭輝線のみ が確認できる。[39]

#### クエーサー

クエーサーは AGN の中でも最も光度が大きい部類の天体である。もともとは点源のように見える天体 (quasi-stellar object; quasar)という意味の造語であり、日本語では準恒星状天体と訳される。赤方偏移 z=2(~1.6×10<sup>4</sup>Mpc) にピークをもつように分布しており (図 1.7)、遠方に位置するため母銀河が空間的に 分解することが難しい。クエーサーはその電波の強さでクラス分けされ、電波と可視光のフラックス比の パラメータである  $R_{r-o}$ が基準として用いられる。特に波長 5GHz の電波と 4400Å の可視光の連続光強度 比が使われる。電波が強いクエーサーでは  $R_{r-o}$  は 10~1000 程度となり、クエーサー全体の約 10%が属す る。一方で電波が弱いクエーサーでは 0.1 $\leq R_{r-o} \leq 1$ となる。クエーサーはほとんどがこの電波の弱いク エーサーに属する (~90%)



図 1.7: Hewitt and Burbidge 1993 のクエーサーカタログに掲載されている 7236 個のクエーサーの赤方偏 移の頻度分布

#### 電波銀河

電波銀河は母銀河が見えている AGN の中でも特に強い電波放射を放射する天体である。多くの通常銀河 電波フラックスが  $10^{39.3}$  [erg/s] 程度であるのに対して、電波銀河の典型的なフラックスは  $3 \times 10^{40}$  [erg/s] と なる。外側の領域には電波ローブと呼ばれる電波で明るい構造がしばしば見られる。電波ローブの端はホッ トスポットと呼ばれ約 150kpc のサイズとなる。これらの母銀河は楕円銀河であり、電波銀河も可視光のス ペクトルの性質で2種類に分類される。広輝線電波銀河と狭輝線電波銀河の2つである。これは1型・2型 セイファート銀河と同様である。また電波光度でクラス分けすることができ、電波光度が10<sup>32</sup>[erg/s/Hz] 以下の電波銀河を FR1(Fanaroff and Riley Class I)、それ以上の電波銀河を FR2 という。これらには構造 的な特徴にも違いが見られ、FR1 は中央に向かって光度が高くなるという特徴を持つ一方で、FR2 は端に 向かって光度が増していく。電波からガンマ線までの広いスペクトルを持つことが知られており、これら は降着円盤からの熱的放射とジェットからの非熱的放射の2つが起源であると考えられている。図1.8、1.9 は電波銀河 3C 111、3C 120 の多波長スペクトルである [18]。図中の黒点は NED のアーカイブデータ、赤 点は Fermi 衛星のデータである。緑線はセイファート銀河の降着円盤放射由来の放射モデルテンプレート である [21]。青の線はクエーサーの 3C 273 の広波長スペクトルでジェット放射のテンプレートを用いてあ る [25]。実際の観測データにこれら2つのモデルテンプレートを当てはめてみると、図 1.8、1.9 のようにな る。この図を見ると確かに電波・ガンマ線では放射はジェット由来であり、可視・X 線領域では降着円盤由 来の放射が卓越していることがわかる。



図 1.8: 電波銀河 3C 111 の多波長スペクトル [18]

図 1.9: 電波銀河 3C 120 の多波長スペクトル [18]

1012

ブレーザー

ブレーザーとはジェットを持つ活動銀河核のジェット方向が地球を向いているような天体を指す。ジェットの見込み角は数度程度であり、亜光速のジェット放射が相対論的ビーミング効果によって卓越して観測される。ブレーザーからの放射は非常に強く、電波からガンマ線までの広い帯域で激しい光度変動を起こす。 ブレーザーの典型的な光度は10<sup>43</sup>[erg/s]以上である。広帯域スペクトルは特徴的な二山構造を示す。個々のブレーザーの観測から、電波-可視の山はジェット中の高エネルギー電子によるシンクロトロン放射、X線-ガンマ線の山はシンクロトン光などの種光子を高エネルギー電子が逆コンプトン散乱で叩き上げることに起因することが分かっている。ブレーザーを系統的に解析すると、ピークエネルギーが高くなるにつれてbolometric 光度が低下する傾向がみられる。これはブレーザーシークエンスと呼ばれる。強いジェットを持つブレーザーは高いガンマ線光度を持つ一方で、クーリングが強く効くためピークエネルギーが低エネルギー側になる。これに対して、弱いジェットを持つブレザーはピークエネルギーがより高エネルギー側にくる。ブレーザーシークエンスを表したものを図1.10に示す。

図 1.10 のガンマ線帯域のべきを見ると、より光度が高いものはべきがソフトになり、光度が低いものは べきがハードになっていることがわかる。ブレーザーシークエンスは Fermi 衛星のガンマ線データからも 確認することができる。図 1.11 はガンマ線光度とガンマ線スペクトルの相関をとった図である。横軸が 0.1 - 10 GeV のガンマ線光度、縦軸がガンマ線スペクトルのべきである。黒点は FSRQ 型と呼ばれる種族、青 点は BL Lac 型と呼ばれる種族である。FSRQ 型天体は右上に BL Lac 型天体は左下に分布することが見て 取れ、さらに光度が高い天体ほどガンマ線スペクトルのべきがソフトになる傾向があることがわかる。

同様に、赤点は FR1、緑点は FR2 を表している。次節で詳しく説明するが、FR1・FR2 は電波銀河を クラス分けしたもので、電波光度の強弱で特徴付けられる。サンプル数が少ないため確実ではないが、電波 光度で分けられた二つの種族が、FSRQ・BL Lac の場合と同様の傾向があることが示唆される。このよう に、以上で説明した傾向はブレーザー以外のジェット天体にも適用できると考えられている。



図 1.11: ガンマ線データから得られる Index vs Lu-図 1.10: ブレーザーシークエンスを表した図 [13],[14] minosity 図 [2]

## 1.1.2 ジェット

前節までに紹介した AGN の中でも電波銀河とブレーザーのように radio-loud AGN と呼ばれる部類の AGN が存在する。これらの AGN のほとんどが中心ブラックホール近傍からの相対論的ジェットが放出さ れている。これらのジェットは 10pc ほどの大きさを持ち、ローレンツ因子は ~ 10 ほどで亜光速にまで加 速されている。ジェットからは電波からガンマ線までの広い波長帯の放射が放出されるが、電波 ~ 可視域 ではシンクロトロン放射、X線 ~ ガンマ線域では逆コンプトン散乱が放射の起源とされている。しかしこ れらのジェットがどのようにして生成されどのように加速されているのかは未だに議論され続けており、よ く理解されてないのが現状である。以下にジェット放射モデルについて簡単に説明する。

#### Synchrotron Self Compton (SSC) model

シンクロトロン・セルフ・コンプトン モデルは最も簡単なジェット放射モデルである。このモデルでは 相対論的電子がシンクロトロン放射を放出し、そのシンクロトロン光子を相対論的電子が逆コンプトン散 乱で光子を高エネルギーにたたき上げる。

#### **External Radiation Compton model**

SSC モデルによってジェット放射が説明することができるが、一部の AGN にこのモデルを適用すると ジェットのビーミング因子が 100 以上なくてはならないことがある。これらの AGN の電波ノットが起こす 超光速運動を超長基線電波干渉法で観測すると典型的なビーミング因子は 20 程度であるため、この矛盾を 説明するために ERC モデルが提案された。このモデルではジェットの外部から入射した種光子が逆コンプ トン散乱されることを想定している。降着円盤からの紫外線放射が広輝線領域の可視光、分子雲トーラス の赤外線が種光子と考えられる。

# 1.2 NCG 1275 の多波長での研究

NGC 1275 はペルセウス銀河団の中心部に位置する電波銀河である。20 世紀から強い電波源として知られており、電波・可視での研究が盛んに行われてきた。Fermi 衛星もの早期にガンマ線源であることを同定し

ている。さらに MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) や VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) による TeV ガンマ線の研究も行われている。NGC 1275 は 2010 年 10 月に MAGIC によって TeV ガンマ線源として同定された (ATEL #2916)。その後これらの望遠 鏡によって 2016 年 10 月 29 日 (ATEL #9689,#9690)、2017 年 1 月 2 日 (ATEL #9931,#9934) に TeV ガンマ線の増光が報告されている。NGC 1275 の多波長スペクトルはブレーザーによく似た二山構造で、ガンマ線領域で顕著な光度変動示すことで知られる。この特徴から NGC 1275 からのガンマ線放射はジェット放射が支配的であると考えられる。

一方で S. Yamazaki et al 2013 では可視域で複数の輝線と吸収線、X 線領域では 6.4keV 鉄輝線を確認し ている。これらは降着円盤からの熱的な放射だと思われる。図 1.12 はかなた望遠鏡 HOWPol で得られた NGC 1275 の可視域のスペクトル、図 1.13 はすざく衛星 XIS で得られた X 線のスペクトルである。また、 図 1.14 は縦軸 NGC 1275 の偏光度、横軸は時間を示したものである。この図によれば偏光度は長い期間で 誤差の範囲内で一致しており、これは可視の放射起源がジェットのシンクロトロン放射でないことを補強す る結果である。この論文では 2010 年から 2012 年までの可視光と X 線の光度変動と調査しているが、どち らも目立った変動を示さないという結果が得られている。一方でガンマ線と電波の光度は激しく変動して いるため、可視光と X 線領域ではジェット放射の寄与が少ないとしている。



図 1.12: かなた望遠鏡 HOWPol で得られた、NGC 図 1.13: すざく衛星 XIS で得られた、NGC 1275 の 1275 の可視スペクトル [29] X 線スペクトル [29]



図 1.14: NGC 1275 の偏光度の時間変動を表した図 [29]。



10

図 1.15: NGC 1275 周辺の天体の各偏光度と偏光方位 角を示した図 [29]。

一方で違う主張をする先行研究もある。Aleksic et al では NGC 1275 の電波から TeV ガンマ線までの 広い帯域での観測結果について議論を行っている。この論文では 2009 年から 2011 年までに 2 回行われた MAGIC(TeV ガンマ線)・Fermi(MeV・GeV ガンマ線)・KVA(optical R-band)・VLBA(15GHz) のキャン ペーン観測の各波長帯の光度変動を調査している。図 1.16 は各波長帯のライトカーブである。MAGIC の 1ヵ月ビン TeV ガンマ線ライトカーブデータからは 3.6 $\sigma$  で変動の兆候が得られ、Fermi 衛星の MeV-GeV ガンマ線ライトカーブからは激しい変動が見て取れる。激しい光度変動からガンマ線放射領域は非常にコ ンパクトであることが示唆される。この論文によれば、特に可視光とガンマ線の光度変動の間に相関がある ことが示されている。図 1.17 は、ガンマ線フォトンフラックスと可視光フラックス密度の相関をとった図 である。この図によれば両者には正の相関がみられるため、可視光放射はガンマ線放射領域から放出され ていることが強く示唆される。さらにこの論文では NGC 1275 の広帯域スペクトルをワンゾーン SSC モデ ルでフィッティングを行っている。フィッティング結果によればジェットの見込み角度は  $\theta_v \sim 30^\circ$  ほどで、 そのほかのパラメーターから典型的な BL Lac 型天体であると結論付けている。しかしワンゾーン SSC モ デルではパラメーターが不自然になるため、マルチゾーンモデルがより適切であるとしている。



図 1.16: 2009 年 10 月から 2011 年 2 月までの多波長ラ 図 1.17: ガンマ線と可視光の光度の相関図。縦軸はガン イトカーブ。(a) MAGIC の 100GeV 以上のガンマ線 マ線のフォトンフラックスで横軸は可視光のフラックス ーか月ビンライトカーブ。黒い横破線は平均のフラッ密度をとってある。図中の線は観測データをフィッティ クスを表す。(b)Fermi の 100MeV-100GeV のガンマングしたものである。それぞれ、(赤破線) 直線フィッ 線 1 週間ビンぼライトカーブ。(c)KVA の R-band ラ ト (青破線) 二次関数フィット (黒線) $F_{\gamma} = \alpha (F_{opt})^{\beta}$ で イトカーブ。(d)VRBA の 15GHz のライトカーブ。[5] フィットしたものである。[5]

# **1.3**本研究の目的

これまでの節では AGN の特徴やその分類について説明してきた。中でもジェットが増幅して観測され るブレーザーの多波長での観測からジェット機構が理解されつつある。しかし電波銀河に関しては、未だ研 究が進んでいないのが現状である。本研究では先行研究と比べて統計を増やした 7.5 年分のガンマ線デー タを用いて電波銀河の系統的な解析を行う。これにより統計的に有意な結果を得ることが出きるとともに、 強いガンマ線を放射する電波銀河のジェット機構に関する情報を得ることが目的の一つである。加えて、特 にガンマ線で明るい電波銀河である NGC 1275 を多波長で観測することでジェット機構を詳しく調査する。

# 第2章 観測機器と解析

省略

# 2.1 Fermi ガンマ線衛星

Fermi衛星は米日伊などの共同で開発された宇宙ガンマ線観測衛星である。2000年に役目を終えた CGRO 衛星の後継機として 2008年6月11日に打ち上げられ、2008年8月4日に科学観測を開始し現在に至るまで 観測を続けている。Fermi衛星は二つの検出器を搭載している。一つは 20MeV から 500GeV 以上のエネル ギー帯域をカバーする LAT (Large Area Telescope)検出器、もう一つは広い視野で持ち、8keV ~ 30MeV のエネルギー領域でガンマ線バーストなどの突発現象を測定する GBM (Gamma-ray Burst Monitor)検 出器である。フェルミ衛星の LAT 検出器は先代の CGRO 衛星の検出器よりも遥かに大きい有効面積、広 い視野、良い角度分解能、広いエネルギー帯域を持つ。軌道周期は 95 分であり、1 周で全天の 85 %を観測 することができるので、数年スケールの長期変動と数日スケールの短期変動を同時に追うことが可能であ る。Fermi衛星の 7.5 年データの各エネルギー毎の全天カウントマップを 2.2 に示す。



図 2.1: フェルミ衛星と二つの検出器。Large Area Telescope (LAT) 検出器は 20MeV 300GeV、Gammaray Burst Monitor(GBM) 検出器は 9keV 40MeV のエネルギー帯域をカバーする。LAT の大きさは 1.8m× 1.8m×0.72m。消費電力は 670W で重さは 2789kg。[33] [8]





(b) 1 GeV - 10 GeV



図 2.2: 各エネルギー帯域における 7.5 年データの全天ガンマ線カウントマップ

## 2.1.1 Large Area Telescope (LAT) 検出器と主要な装置

ガンマ線のエネルギーが電子の静止質量の2倍(1.02MeV)を超えると、電子-陽電子対生成の過程がエ ネルギー的に可能になる。数 10MeV 以上のガンマ線の物質との相互作用はこの電子-陽電子対生成の過程 が支配的である。光子が十分高いエネルギーを持つ場合その断面積は<sup>7</sup>/<sub>2</sub>A/X<sub>0</sub>N<sub>A</sub>と表すことができる。こ こで A:物質の質量数、 $X_0$ :放射長、 $N_A$ :アボガドロ数である。この式から  $1 \text{cm}^2$  あたりに数 g ~ 数 10 gの物 質を通過するとガンマ線は電子-陽電子対生成反応を起こす [30]。LAT 検出器では入射ガンマ線が対生成を 行った結果発生する電子・陽電子対の飛跡とエネルギーを計測することで、ガンマ線のエネルギーと到来方 向を再構成する。LAT検出器は大きくわけて、電子・陽電子の飛跡を計測するトラッカー(TKR) 電子 陽電子のエネルギーを測定するカロリメーター ( CAL )、バックグラウンドの除去を行う反同時計測検出器 (ACD)の三つの装置からなる。トラッカーとカロリメーターのセットを一つのモジュールとして 4×4の 計16個のモジュールが組み合わさり、そのモジュール群の周りを反同時計測検出器で囲むという構造をし ている。LAT 検出器の構造の模式図と主な性能を以下に示す。

次に LAT 検出器の主要な装置について説明する。

• トラッカー

4×4 個のモジュールからなる。一つのモジュールはガンマ線と対生成反応を起こすためのタングス テンシートと、2枚の電子・陽電子を検出するシリコンストリップセンサーの組を一つの層として、 計 16 層で構成されている。これらは"front","back"という領域で分けられている。"front"は上部 12 枚の層を指し、タングステンが一枚につき 0.03cm であるのに対して、下部に位置する残りの4枚層 ("back") は約6倍厚い0.18cmである。これらは様々なエネルギー帯のガンマ線に対応するための工 夫である。電子・陽電子がシリコンストリップセンサーの中を通過すると電気パルス信号を出す。ス トリップセンサーは狭い帯状のパターンで作られており、どの位置を通過したのかを数百 µm 単位で 知ることができる。トラッカーの模式図を以下の図 2.3 に示す。



カロリメーター

各トラッカーモジュールの下部に搭載されているため、トラッカーと同様 4×4 個のカロリメーター モジュールからなる。各カロリメーターは計96個のヨウ化セシウム結晶シンチレーターから構成さ れ、各結晶の大きさは 2.7cm×2.0cm×32.6cm という細長い形状である。各結晶には大小二つのフォ トダイオードが付けられており、大きいものは 2MeV-1.6GeV、小さいものは 100MeV-70GeV、のエ ネルギー帯域に感度を持つ。この結晶を 12 枚並べることで 32.4cm×2.0cm×32.6cm というおよそ正 方形の層ができる。この層を 8 枚互い違いに 90° ずらしながら重ねたものを一つのカロリメーターモ ジュールとしている。カロリメーターの構造図を図 2.4 に示す。トラッカー部でガンマ線から変換さ れた荷電粒子がカロリメーター部を通過する過程で電子・正孔対が作られ、これがシンチレーター中 の活性化物質を励起させる。これらが基底状態に戻る時に固有のエネルギーを持つ光子が放出され、 これらの光子を計測することで荷電粒子のエネルギーが測定できる。つまり入射してきたガンマ線の エネルギーを測定することができる。



図 2.4: カロリメーターモジュールの模式図 [8]

• Anticoincidence Detector (ACD)

上記した二つの装置だけでもガンマ線の到来方向とそのエネルギーがわかる。しかしこれだけだと視野内の天体からのガンマ線と、視野外からの天体からのガンマ線やバックグラウンドになる宇宙線などの荷電粒子との区別がつかない。そこでトラッカーとカロリメーターを覆うようにしてこの ACD が設置してある。これにより ACD とカロリメーターが同時に反応するようなイベントをバックグラウンドとみなすことでき、約 99.97% 以上のバックグラウンドを排除することができる。ACD は全89枚のプラスチックシンチレータで構成されており、LAT の上面に 5×5、側面には 16枚のタイルが計4面装着されている。ACD を含む LAT モジュールの模式図を図 2.5 に示す。



図 2.5: LAT 内のモジュールの模式図

パラメーター	値または範囲
エネルギー範囲	$\sim 20~{\rm MeV} \sim \geq 300 {\rm GeV}$
エネルギー分解能	
$100 \mathrm{MeV}\text{-}1 \mathrm{GeV}$	15%-9 $%$
1 GeV - 10 GeV	8%-9%
$10 \mathrm{GeV}\text{-}300 \mathrm{GeV}$	8.5% - $18%$
単一光子の角度分解能	
$> 10 \mathrm{GeV}$	$< 0.15^{\circ}$
$1 \mathrm{GeV}$	$0.6^{\circ}$
$100 \mathrm{MeV}$	$3.5^{\circ}$
最大有効面積	$\leq 8,400 \mathrm{cm}^2$
視野	$2.4 \mathrm{sr}$
位置決定精度	$\leq 0.5^{\circ}$
時間精度	$\leq 10^{-6}$ 秒
バックグラウンド除去	$\leq 10\%~(100 {\rm MeV} \sim 300 {\rm GeV})$
デッドタイム	1イベントあたり $\leq 10^{-4}$ 秒

表 2.1: LAT の性能 [23] [8] [34]

# 2.1.2 LAT データの解析方法

次にフェルミ衛星の解析方法について記述する。フェルミ衛星から地球に送られてきたデータを raw data という。これには検出器が捉えた天体からの光子の情報と、衛星自身の姿勢や位置などの全情報が含まれて る。このように raw data は衛星に関する全ての情報が入っているので、解析に使用しにくい。そこで、送 られてきたデータは level0、level1 という過程によって解析に使用できるように処理される。

1. level0

raw data を level0 data にする過程。この過程では raw data に含まれる衛星の情報と検出器ほ情報 とで分離される。 2. level1

level0 data の中の粒子の飛跡を再構築する。これによりガンマ線のエネルギーや到来方向、バックグ ラウンドの識別が得られる。

さらに処理されたデータから解析に必要な情報のみを取りだして、FITS(The Flexible Transport System) 形式に変換する。FITS とは天文分野で使われるファイルの代表的な形式のことである。ここで作られる FITS ファイルは二種類ある。FT1 ファイルとFT2 ファイルである。FT1 ファイルは検出器が捉えた光子 の情報が入っている。一方、FT2 ファイルには衛星の姿勢や位置の情報が入っている。フェルミ衛星の解 析はまず膨大な量のFT1 データから、中心天体の位置、解析領域(Region Of Interest; ROI とよばれる)、 解析する期間、エネルギー範囲を指定して切り出す所から始まる。次にガンマ線イベントの絞込みを行う。 前の章でも述べた通り、フェルミ衛星は全天をサーベイ観測しているので、特定の天体の観測時間は正確 に定められていない。そこで FT2 の衛星の情報を用いて FT1 ファイルの情報をガンマ線イベントのみに 絞り込む。ガンマ線イベントを絞り込んだ後に最尤法によりフィッティングを行う。一連の解析を行うため に、フェルミ衛星専用の解析ソフトである Science Tools を使用した。使用した Science Tols のバージョン は v10r0p5 である。このソフトはガンマ線イベントの選考からに最尤法によるフィッティングなどの解析 を行うことができる。次に今回の Binned 解析,Unbinned 解析で用いた Science Tools のコマンドと解析の 流れを説明する。

#### Unbinned 解析

光子を一つ一つに対して尤度を計算してフィッティングを行う。数か月単位の長期間のデータを解析す る場合に適用すると解析に時間がかかり過ぎるという欠点があるため、数時間から数週間程度の短期間の データで用いることが多い。一方で、同じ条件の解析の場合は Unbinned 解析のほうが TS の値が大きくな り、エラーも小さくなる傾向がある。

まず初めは解析するデータをダウンロードしなければならない。全天・全期間のデータをダウンロード し、そのデータを任意の解析条件で絞り込む方法が最も便利であるが、今回はより手軽な方法であるウェブ サイトから期間・解析領域・エネルギー範囲などの解析条件を指定してダウンロードする方法を紹介する。 まず、'http://fermi.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/ssc/LAT/LATDataQuery.cgi' にアクセスする。以下のような画 面がでてくるはずである。ページ上部の空欄に解析条件を埋めて [Start Search] を押し、案内通りに進め ば Pass8(P8R2) のデータをダウンロードすることができる。ウェブサイトから直接ダウンロードすること も可能であるが、wget コマンドを使用したスクリプトを作成することを推奨する。データの末尾が'PH(番 号).fits' が FT1 のデータ、'SC(番号).fits' が FT2 のデータである。以下では表 2.2 の様な解析条件で、実際 の解析例を説明する。

Data Set	Pass8	
Event Selection	SOURCE class	
Energy range	$0.1\text{-}300\mathrm{GeV}$	
Time Interval	239557417-241285417	
ROI size	20 degree	
Science Tools Version	v10r0p5	
IRFs	P8R2_SOURCE_V6	

表 2.2: Fermi 衛星データ解析例の解析条件

• gtselect

大元の FT1 ファイルから解析するデータを絞り込み、フィルタリングされた新しい FT1 ファイルを 作成するツール。ここで指定するのは天体の赤経・赤緯、解析領域の広さ、観測期間、ガンマ線のエ ネルギー範囲、ガンマ線の入射方向などである。フェルミ衛星は MET(Mission Elapsed Time) とよ ばれる時刻系を使用している。よって解析する期間を指定する際は、全てこの MET 方式で入力する 必要がある。MET は 2001 年 1 月 1 日の 0 時からの経過秒数で定義される、フェルミ衛星が科学観測 を開始した 2008 年 8 月 4 日 15 時 43 分 36 秒は、MET 方式で表すと 239557417 [MET] となる。以 下は実際の入力例である。

prompt> gtselect evclass=128 evtype=3 Input FT1 file[ ] @events.txt Output FT1 file[ ] NGC1275\_gtselect.fits RA for new search center (degrees) (0:360) [ ] 49.9507 Dec for new search center (degrees) (-90:90) [ ] 41.5117 radius of new search region (degrees) (0:180) [ ] 20 start time (MET in s) (0:) [ ]239557417 end time (MET in s) (0:) [ ] 241285417 lower energy limit (MeV) (0:) [ ] 100 upper energy limit (MeV) (0:) [ ] 300000 maximum zenith angle value (degrees) (0:180) [ ] 90

gtselect の引数である evclass,evtype は隠しパラメータである。これらの値は解析の種類によって変 更される値である。今回のように SOURCE class のイベントデータを解析する場合は evclass=128, evtype=3 と指定することが推奨されている。通常の解析では特別な理由がない限りこれらの値を変更 する必要はない。また、エネルギ範囲が 100MeV 以上の場合は zenith angle は 90° とすることが推奨 されている。参考として、各解析において推奨されるイベントセレクションを以下の表 2.3 に示す。今 回はインプットするデータが複数個あるため、中にデータの場所と名前を書き込んだ event.txt をイン プットしている。その場合は"@"を付け入力することに注意する。また上記の入力例の中に"INDEF" と入力しているものがあるが、これはウェブからダウンロードする際にエネルギー範囲や解析領域の 範囲を既に指定しているので、これらの条件が重複して指定されることを防ぐための策である。

Analysis Type	Minimum Energy	Maximum Energy	Max Zenith Angle	Event Class	IRF Name
	(emin)	(emax)	(zmax)	(evclass)	
Galactic Point	100 (MeV)	500000 (MeV)	90 (degrees)	128	P8R2_SOURCE_V6
Source Analysis					
Off-plane Point	100 (MeV)	500000 (MeV)	90 (degrees)	128	P8R2_SOURCE_V6
Source Analysis					
Burst and	100 (MeV)	500000 (MeV)	100 (degrees)	16	P8R2_TRANSIENT020_V6
Transient Analysis					
(j200s)					
Galactic Diffuse	100 (MeV)	500000 (MeV)	90 (degrees)	128	P8R2_SOURCE_V6
Analysis					
Extra-Galactic	100 (MeV)	500000 (MeV)	90 (degrees)	1024	P8R2_ULTRACLEANVETO_V6
Diffuse Analysis					
Impulsive Solar	100 (MeV)	500000 (MeV)	100 (degrees)	65536	P8R2_TRANSIENT015S_V6
Flare Analysis					

表 2.3: 推奨されるイベントセレクション (P8R2)

• gtmktime

これは FT2 のデータから FT1 中の GTI(Good Time Interval) を作成するツールである。GTI とは データが有効だとみなすことができる時間範囲のことであある。gtselect と gtmktime の二つのツー ルを使うことでコンタミネーションを除き、天体からのガンマ線だけを得ることができる。以下に入 力例を示す。 prompt> gtmktime
Spacecraft data file[ ] spacecraft.fits
Filter expression[ ] (DATA\_QUAL>0)&&(LAT\_CONFIG==1)
Apply ROI-based zenith angle cut[ ] no
Event data file[ ] NGC1275\_gtselect.fits
Output event file name[ ] NGC1275\_gtmktime.fits

今回の場合、Filter expression は (DATA\_QUAL>0)&&(LAT\_CONFIG==1) と指定することが推奨 されている。その他のタイムセレクションは表 2.4 に示してある。

Analysis Type	ROI-Based Zenith Angle Cut	Relational Filter Expression	
	(roicut)	(filter)	
Galactic Point Source Analysis	no	(DATA_QUAL>0)&&(LAT_CONFIG==1)	
Off-plane Point Source Analysis	no	(DATA_QUAL>0)&&(LAT_CONFIG==1)	
Burst and Transient Analysis	yes	(DATA_QUAL>0)&&(LAT_CONFIG==1)	
Galactic Diffuse Analysis	no	(DATA_QUAL>0)&&(LAT_CONFIG==1)	
Extra-Galactic Diffuse Analysis	no	(DATA_QUAL>0)&&(LAT_CONFIG==1)	
Burst and Transient Analysis	yes	$(DATA_QUAL>0    DATA_QUAL==-1)$	
		&&(LAT_CONFIG==1)	

## 表 2.4: 推奨されるタイムセレクション

• gtbin

これは FT1 のデータを他のツール (ds9,fv,xspec 等) で使用できる形式に変換するツールである。CMAP ファイル、CCUBE ファイル、LC ファイル、HEALPIX ファイルなどに変換することが可能である。 以下は CMAP を作成する際のコマンドの入力例である。

```
prompt> gtbin
(CCUBE|CMAP|LC|PHA1|PHA2) [ ] CMAP
Event data file name[] NGC1275_gtmktime.fit
Output file name[] NGC1275_cmap.fits
Spacecraft data file name[NONE]
Size of the X axis in pixels[ ] 200
Size of the Y axis in pixels[ ] 200
Image scale (in degrees/pixel)[ ] 0.1
Coordinate system (CEL - celestial, GAL -galactic) (CEL|GAL)[ ] CEL
First coordinate of image center in degrees (RA or galactic 1)[ ] 49.9507
Second coordinate of image center in degrees (DEC or galactic b)[ ]41.5117
Rotation angle of image axis, in degrees[ ] 0.0
Projection method e.g. AIT|ARC|CAR|GLS|MER|NCP|SIN|STG|TAN:[ ] AIT
```

スペースクラフトデータを入力しない場合、"gtbin: WARNING: No spacecraft file: EXPOSURE keyword will be set equal to ontime."とでるが、その後の解析に全く影響がない。

以上の様にしてできた CMAP を図 2.6 に示す。

 $\bullet~{\rm gtltcube}$ 

これは FT1 と FT2 ファイルから全 live time を計算するツールである。live time とは衛星の位置と 傾斜角を含む 3 次元空間の関数である。このツールにより作られたファイルは'livetime cube' と呼ば れる。最尤法での計算を容易にするためにこのツールで計算をおこなう。

prompt> gtltcube zmax=90
Event data file[ ] NGC1275\_gtmktime.fits
Spacecraft data file[ ] spacecraft.fits
Output file[ ] NGC1275\_gtltcube.fits
Step size in cos(theta) (0.:1.) [ ] 0.025
Pixel size (degrees)[ ] 1

• gtexpmap

最尤法で使用される露光マップは、一般的な露光マップと著しく異なる。Unbinned 解析で使用する 露光マップは ROI 内の全レスポンス (有効面積 × エネルギー分散 × 点広がり関数 (Point Spread Function:PSF)) で計算される。gtexpmap は ROI 内の露光時間マップを作成する。LAT の PSF は低 エネルギー側で特に大きく、100MeV では 68% の光子が入る範囲が 3.5° 以内になる。これにより中 心天体の近くに別の天体がある場合は放射が大きく重なることもある。このような PSF の広がりを 考慮するため、ROI の範囲外からの放射も含めて露光マップを作る。そのため gtselect で指定した半 径よりも ~ 10° 程度広く指定する必要がある。フェルミ衛星の PSF は大雑把に 2°  $\left(\frac{E}{10GeV}\right)^{-0.8}$ とあ らわされるので、高エネルギー側で解析を行う際は指定した半径よりも 1° ~ 2° 広く指定すればよい。 以下にコマンドの入力例を示す。

```
prompt> gtexpmap
Event data file[ ] NGC1275_gtmktime.fits
Spacecraft data file[ ] spacecraft.fits
Exposure hypercube file[ ] NGC1275_ltcube.fits
output file name[ ] NGC1275_gtexpmap.fits
Response functions[ ] P8R2_SOURCE_V6
Radius of the source region (in degrees)[ ] 30
Number of longitude points (2:1000) [ ] 120
Number of latitude points (2:1000) [ ] 120
Number of energies (2:100) [ ] 20
```





図 2.6: NGC 1275 の 0.1-300GeV のカウントマップ。 半径 20° の領域を示してある。

図 2.7: NGC 1275 の露光マップ

ここまではデータのセレクションとカウントマップの作成、livetime cube,露光マップの作成について説 明した。続いて最尤法でスペクトルフィットを行う際に必要となるソースモデルの作成方法について説明す る。ソースモデルには点源である天体のモデルと広がりをもつ放射のモデルをいれる必要がある。ソース モデルを作成する際に参考となる天体カタログに3 FGL カタログがある。このカタログは Fermi 衛星 LAT |検出器が4年間のサーベイ観測で検出したガンマ線源をまとめたものである。3FGLカタログの他に、3ヵ 月の観測で10 σ検出以上の天体をまとめた0 FGL、11ヵ月の観測で有意に検出されたガンマ線源をまとめ た1 FGL、2 年間の観測で有意に検出されたガンマ線源をまとめた 2 FGL などがある。3 FGL カタログに 記載されているガンマ線源で ROI内に存在する天体をソースモデルに含める。先述の通り、LAT は空間分 解能が広いので、特に低エネルギーイベントは ROI 内の天体から放射されたのか判別が付かない。そのた め ROI 外部の円環状の領域に含まれる天体もソースモデルに含めるが、これらのスペクトルモデルはパラ メータを固定するのが一般的である。天体広がったバックグラウンド放射については、全天に広がる銀河面 からの放射と銀河系外からのバックグラウンドの二つが非常明るいため、解析の際は必ずソースモデルに含 める。フェルミチームがモデルテンプレートを用意しているので、それを使用する。銀河面放射はfits形式 のデータ、系外の等方的な放射はテキストデータである。銀河面のガンマ線放射テンプレートは58.5MeV から 513GeV までのエネルギー帯域でのみ有効であるので、このエネルギー範囲外の解析では使用するこ とができない。銀河面からのガンマ線放射のモデルテンプレートを図 2.8 に、系外からのガンマ線放射のテ ンプレートを図 2.9 に示す。また広がったガンマ線放射する天体が ROI 内に存在する場合はその天体もモ デルに含める。広がった放射線源はバックグラウンドと同様に、モデルのテンプレートが一般公開されてい るのでそれを使用する。今回はフェルミチームが用意している銀河面放射テンプレート"gll\_iem\_v06.fits"と 系外放射テンプレート"iso\_P8R2\_SOURCE\_V6\_v06.txt"を含めて解析を行った。加えて天体の天球上の位 置によっては太陽や月からのガンマ線放射の影響を受ける可能性があるため、太陽と月の放射モデルテン プレートを作成して、モデルに含める。



図 2.8: 銀河面からのガンマ線放射のモデルテンプレート



図 2.9: 銀河系外からの等方的なガンマ線放射のテンプレート

以上のようにして含めた天体は、それぞれスペクトルモデルと天球上での位置を定義する必要がある。ス ペクトルモデルは PowerLaw、BrokenPowerLaw,LogParabola、ExpCutoff、など 14 種類が用意されてい る。今回は解析する際によく用いられる PowerLaw、BrokenPoewrLaw、LogParabola の 3 つのモデルと、 ソースモデル内での記述の方法について説明する。これらのモデルの次元は [cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>MeV<sup>-1</sup>] で定義され ている。

• PowerLaw

最もシンプルかつ一般的に用いられるモデルである。PowerLaw モデルの関数は以下の式 2.1 で定義

される。

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\gamma} \tag{2.1}$$

実際の xml モデル内ではこれらのパラメータは以下のように定義される。

- Prefactor =  $N_0$
- Index =  $\gamma$
- Scale =  $E_0$

```
次に例として実際に使用する PowerLaw モデルファイルの例を以下に示す。
```

```
<source name="PowerLaw_source" type="PointSource">
<source name="PowerLaw_source" type="PointSource">
<source name="PowerLaw_source" type="PointSource">
<spectrum type="PowerLaw">
<spectrum type="PowerLaw">
<spectrum type="1" max="1000.0" min="0.001" name="Prefactor" scale="1e-09" value="1"/>
<parameter free="1" max="-1.0" min="-5." name="Index" scale="1.0" value="-2.1"/>
<parameter free="0" max="2000.0" min="30.0" name="Scale" scale="1.0" value="100.0"/>
</spectrum>
<spatialModel type="SkyDirFunction">
<parameter free="0" max="360." min="-360." name="RA" scale="1.0" value="83.45"/>
<parameter free="0" max="90." min="-90." name="DEC" scale="1.0" value="21.72"/>
<parameter free="0" max="90." min="-90." name="DEC" scale="1.0" value="21.72"/>
</parameter free="0" max="360." min="-90." name="DEC" scale="1.0" value="21.72"/>
</parameter free="0" max="90." min="-90." name="DEC" scale="1.0" value="21.72"/>
</parameter free="0" max="90." min="-90." name="DEC" scale="1.0" value="21.72"/>
</parameter free="0" max="90." min="-90." name="DEC" scale="1.0" value="21.72"/>
</parameter free="0" value="21.72"/>
</pa
```

 BrokenPowerLaw 二つの傾きを持つモデル。ある値 (break energy) でべきが変わるようスペクトルをフィッティングする際はこの モデルを使用する。BrokenPowerLaw モデルの式を以下に示す。

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \times \begin{cases} \left(\frac{E}{E_b}\right)^{\gamma 1} & \text{if } E < E_b \\ \left(\frac{E}{E_b}\right)^{\gamma 2} & \text{otherwise} \end{cases}$$
(2.2)

- Prefactor =  $N_0$ 

- Index1 =  $\gamma_1$
- Index2 =  $\gamma_2$
- BreakValue =  $E_b$

```
<source name="BrokenPowerLaw_source" type="PointSource">
   <spectrum type="BrokenPowerLaw">
```

</source>

LogParabola

前述の PowerLaw モデルと比べて丸みをもつスペクトルを表す。明るくて統計がよく、スペクトルの丸みが見え ている天体のモデルにしばしば用いられる。LogParabola モデルの関数は以下で与えられる。

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_b}\right)^{\alpha + \beta \log(E/E_b)}$$
(2.3)

- norm =  $N_0$
- alpha =  $\alpha$
- beta =  $\beta$

```
- E_b = E_b
```

```
<source name="LogParabola_source" type="PointSource">
<!-- point source units are cm^-2 s^-1 MeV^-1 -->
<spectrum type="LogParabola">
<parameter free="1" max="1000.0" min="0.001" name="norm" scale="1e-9" value="1"/>
<parameter free="1" max="10" min="0" name="alpha" scale="1.0" value="1"/>
<parameter free="0" max="1e4" min="20" name="Eb" scale="1" value="300."/>
<parameter free="1" max="10" min="0" name="beta" scale="1.0" value="2"/>
</parameter free="1" max="10" min="0" name="beta" scale="1" value="300."/>
<parameter free="1" max="10" min="0" name="beta" scale="1.0" value="2"/>
</parameter free="1" max="10" min="0" name="beta" scale="1" value="300."/>
</parameter free="1" max="10" min="0" name="beta" scale="1.0" value="2"/>
```

```
<spatialModel type="SkyDirFunction">
cparameter free="0" max="360." min="-360." name="RA" scale="1.0" value="83.45"/>
cparameter free="0" max="90." min="-90." name="DEC" scale="1.0" value="21.72"/>
</spatialModel>
</source>
```

ソースモデルはフェルミチームが用意している make3FGLxml.py というスクリプトを利用すれば簡単 に作成が可能である。このスクリプトは"http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/user/"で入手が可 能である。基本的にはこのスクリプトを走らせる際に参照するカタログと作成したイベントファイルを引 数を与えることでソースモデルが作成される。まずイベントファイルから中心の座標と ROI の大きさを読 み込み、その情報を基にしてカタログから選択した範囲にある天体を抽出する。加えて様々なオプションの 引数を与えることで、さらに複雑なソースモデルの作成が可能である。以下に make3FGLxml.py の主なオ プションの引数を説明する。

- make3FGLxml.pyの主なオプション
  - o OUTPUTXML
     アウトプットされるソースモデルの名前を指定できる。同じ名前のモデルがある場合は上書きされる。
  - -G GALFILE
     ソースモデルに含める銀河面放射テンプレートデータの場所を指定する。
  - -g GALNAME
    - ソースモデルに書き込まれる銀河面放射テンプレートの名前を指定する。デフォルトは'gll\_iem\_v06'
  - -I ISOFILE
    - ソースモデルに含める銀河系外放射テンプレートデータの場所を指定する。
  - -i ISONAME

ソースモデルに書き込まれる銀河系外放射テンプレートの名前を指定する。デフォルトは'iso\_source\_v05'

– -N

ソースモデルに書き込まれるスペクトルモデルの normalization 以外を fix する。

- e EXTDIR
   広がった天体のモデルテンプレートがあるディレクトリ名を指定する。
- r RADLIM
   この引数で与えた値 (degree) よりも外側にある天体のパラメータを固定する。
- ER EXTRARAD
   イベントファイルの ROI の外側の領域にある天体をソースモデルに含める事ができる。追加で
   含めたスペクトルモデルは全ての値が固定されている。デフォルトの値は 10°。
- -s SIGFREE
   3FGL カタログには各天体の有意度 (TS) が記載されている。このオプションで指定した値より
   も有意度が低い天体のスペクトルモデルを fix することができる。

#### 例えば次の様にコマンドを入力する。

prompt> python make3FGLxml.py gll\_psc\_v16.xml NGC1275\_gtmktime.fits -ER 5 -N -s 100 引数に与える 3FGL カタログには xml 形式と fits 形式がある。記載される天体のデータはほとんど違いは ないが、出力される xml モデルに若干の違いがある。以上のようにして作成したソースモデルを用いてこ の後の解析を行う。

 gtdiffrsp gtdiffrsp は銀河面放射などの広がった天体成分のレスポンスを計算するツールである。gtmktimeを用 いて作成したイベントデータファイルに広がった天体の放射成分をそれぞれ追加する。広がった成分の レスポンスは機器応答関数 (instrument response function:IRF) に依存している。SOURCE class を 選択している場合、IRF は"P8R2\_SOURCE\_V6"を使用する。最尤法でフィットを行う前にこのツー ルを使用することで、後の計算が早く終わらせることができる。追加したデータを消したい場合は FTOOL の fdelcol コマンド使用すればその項を削除できる。以下に入力コマンド例を示す。

prompt\$\textgreater\$ gtdiffrsp Event data file[ ] NGC1275\_gtmktime.fits Spacecraft data file[ ] spacecraft.fits Source model file[ ] NGC1275\_model.xml Response functions to use[ ] P8R2\_SOURCE\_V6

### • gtlike

gtlike は前述したツールで作成したファイル群をもとに実際に最尤法でフィッティングを行うツールで ある。xml 形式で記述された中心天体と ROI 内に含まれる天体のモデルファイルを予め用意しておく。 そのモデルとデータを比較して、最適な値を計算する。最適化ルーチンには DRMNGB・DRMNFB・ NEWMINUIT・MINUI・LBFGS という5種類があるが、主に DRMNFB と NEWMINUIT が使用 される。DRMNFB はモデルのパラメーターの大まかな値を求め、NEWMINUIT はパラメーターの 詳細を解析する際に用いられる。通常は先に DRMNFB で大まかな値を計算し、その結果を用いて NEWMINUIT で再びフィッティングを行って詳細なパラメーターの値を求めることが推奨されてい る。以下に入力コマンドの例を示す。

prompt> gtlike sfile="NGC1275\_model\_DRMNFB.xml" results="NGC1275\_result\_DRMNFB.dat"
Statistic to use (BINNED|UNBINNED) [ ] UNBINNED
Spacecraft file[ ] spacecraft.fits
Event file[ ] NGC1275\_gtmktime.fits
Unbinned exposure map[ ] NGC1275\_gtexpmap.fits
Exposure hypercube file[ ] NGC1275\_gtltcube.fits
Source model file[ ] NGC1275\_model.xml
Response functions to use[ ] P8R2\_SOURCE\_V6
Optimizer (DRMNFB|NEWMINUIT|MINUIT|DRMNGB|LBFGS) [ ] DRMNFB

gtlike の引数である sfile と results は隠しパラメータである。results コマンドで任意の名前で結果を 出力することができる。また、sfile コマンドを用いればフィッティング結果を反映した xml モデルファ イルを作成することが出来る。以上で説明した Unbinned 解析の結果を以下に示す。以下では中心天 体の NGC 1275 とバックグラウンド放射のフィット結果のみを示し、その他の点源は省略している。

'NGC1275': 'norm': '1.02244 +/- 0.0790896',
'alpha': '2.1438 +/- 0.0736114',
'beta': '0.0647643',
'Eb': '0.530198',
'Npred': '416.387',
'ROI distance': '0',
'TS value': '457.446',
'Flux': '2.931e-07 +/- 2.74084e-08',

'gll\_iem\_v06.fits': 'Prefactor': '0.956536 +/- 0.00908843', 'Index': '0', 'Scale': '100', 'Npred': '30774.5', 'Flux': '0.000467412 +/- 4.4407e-06',

'iso\_P8R2\_SOURCE\_V6\_v06.txt': 'Normalization': '1.34827 +/- 0.0479167', 'Npred': '8119.2', 'Flux': '0.000201706 +/- 7.16216e-06',

銀河面と銀河系外からのガンマ線放射の結果はおよそ1になるように設計されているため、著しく異 なる値 (Prefactor ~ 0 など) が出力された場合はフィッティングがうまくいっていない可能性が高い ので注意する。Fermi データの解析ではスペクトルパラメータ以外に Npred と TS value という値が 返される。Npred は Unbinned 解析の時のみ計算される値であり、当てはめられたモデルに基づいて 予測される到来光子数を意味する。TS(Test Statistics; 検定統計量) は天体の有意度を表す。TS につ いては後で詳しく説明する。

• gttsmap

このツールは xml モデルを基に解析領域内の TS を計算し有意度マップを作成する。有意度マップを 作成することで隠れたガンマ線源を探すことができる。gttsmap は計算に非常に時間がかかる。入力 するモデルのパラメータが固定されていない場合は再び最尤法でフィットを行おうとするため、モデ ルは全て値を固定する (free="0"にする)。以下に実際のコマンドラインを示す。以下の例では 10° 四 方の領域で 1600 回の尤度計算が行われる。

```
prompt> gttsmap
```

```
Statistic to use (BINNED|UNBINNED) [ ] UNBINNED
Spacecraft file[ ] spacecraft.fits
Event file[ ] NGC1275_gtmktime.fits
Unbinned exposure map[ ] NGC1275_gtexpmap.fits
Exposure hypercube file[ ] NGC1275_gtltcube.fits
Source model file[] NGC1275_model_NEWMINUIT_parameter_fix.xml
Response functions to use[ ] P8R2_SOURCE_V6
Optimizer (DRMNFB|NEWMINUIT|MINUIT|DRMNGB|LBFGS) [ ] NEWMINUIT
TS map file name[] NGC1275_gttsmap.fits
Number of X axis pixels[] 40
Number of Y axis pixels[] 40
Image scale (in degrees/pixel)[ ] 0.25
Coordinate system (CEL|GAL) [CEL]CEL
X-coordinate of image center in degrees (RA or 1)[] 49.9507
Y-coordinate of image center in degrees (Dec or b)[] 41.5117
Projection method (AIT|ARC|CAR|GLS|MER|NCP|SIN|STG|TAN) [STG] AIT
```

以上の様にして作成した TS マップを図 2.10 に示す。図 2.11 は TS マップのピクセル頻度分布を示したものである。これを見ると TS の値が 6 以上になるピクセルが存在しないことがわかり、gtlike のフィット結果が実データをよく再現している(=フィットがうまくいっている)ことを表している。





図 2.11: Unbinned 解析結果の TS マップのピクセル 頻度分布。横軸は TS の値・縦軸は頻度。

図 2.10: Unbinned 解析結果の TS マップ

#### Binned 解析

光子を任意の大きさの単位ピクセルで四角形のビンと有限のビン幅のエネルギービンで区切り、それ ぞれのビンに対して尤度を計算してフィッティングを行う。低銀緯など銀河面のバックグラウンドが 大きい領域や、データ数が大きくなる長時間データの解析を行う際によく用いられる解析方法である。 Unbinned 解析の解析領域は円形であるのに対し、Binned 解析では正方形のピクセルの集積であるた め解析領域は必ず四角形になる。使用するツールは Unbinned 解析で用いたものとある程度同じであ る。まずは gtselect,gtmktime のツールを用いてイベントファイルを作成する。このイベントファイ ルを基にして、gtbin を用いて CCUBE と呼ばれるファイルを作成する。CCBUE は CMAP にエネ ルギーの次元を加えた三次元の CMAP である。実際のコマンドラインを以下に示す。

```
prompt> gtbin
Type of output file (CCUBE|CMAP|LC|PHA1|PHA2|HEALPIX) [CMAP] CCUBE
Event data file name[] NGC1275\_gtmktime.fits
Output file name[] NGC1275\_ccube.fits
Spacecraft data file name[] NONE
Size of the X axis in pixels[] 266
Size of the Y axis in pixels[] 266
Image scale (in degrees/pixel)[] 0.1
Coordinate system (CEL - celestial, GAL -galactic) (CEL|GAL)[] CEL
First coordinate of image center in degrees (RA or galactic 1)[] 49.9507
Second coordinate of image center in degrees (DEC or galactic b)[] 41.5117
Rotation angle of image axis, in degrees[] 0.0
Projection method Projection method eg AIT|ARC|CAR|GLS|MER|NCP|SIN|STG|TAN: [] AIT
Algorithm for defining energy bins (FILE|LIN|LOG)[] LOG
Start value for first energy bin in MeV[] 100
Stop value for last energy bin in MeV[] 300000
Number of logarithmically uniform energy bins[] 30
```

この例では 100MeV から w300GeV までのエネルギー範囲を対数空間で 30 分割している。ここで解

析領域を  $26.6^{\circ} \times 26.6^{\circ}$  としたのは次の様な理由がある。先述のように、Binned 解析では解析領域が 正方形になるが、gtselect では解析領域の指定が円形であるため、円形の解析領域に収まるように正 方形のサイズを指定する必要がある。具体的には gtselect で指定したサイズの直径を  $\sqrt{2}$  で割り算す る。今回野解析では 1.5 で割った値を採用した。以降で作成されるファイルのサイズは  $26.6^{\circ} \times 26.6^{\circ}$ である。次に Unbinned 解析の場合と同様に gtltcube ツールを使って livetime cube を作成する。そ の次は以下の gtexpcube2 を用いて露光マップを作成する。

• gtexpcube2

Unbinned 解析でいう gtexpmap と同様のツール。このツールを使うことで Binned 解析での最尤法 で必要となるビニングされた露光マップを作成することができる。Fermi チームは Unbinned 解析の 場合と同様に、指定の解析領域よりも 10°大きいサイズで露光マップを作成することを推奨している が経験上うまくいかないことが多い為、解析領域の 3 倍のサイズで露光マップを作成している。以下 の例では 26.6°の 3 倍のサイズである 79.8°×79.8°のサイズで露光マップを作成している。

prompt> gtexpcube2

Livetime cube file[] NGC1275\\_gtltcube.fits Counts map file[] none Output file name[] NGC1275\\_gtexpcube.fits Response functions to use[CALDB] P8R2\\_SOURCE\\_V6 Size of the X axis in pixels[INDEF] 798 Size of the Y axis in pixels[INDEF] 798 Image scale (in degrees/pixel)[INDEF] 0.1 Coordinate system (CEL - celestial, GAL -galactic) (CELGAL)[GAL]CEL| First coordinate of image center in degrees (RA or galactic 1)[INDEF] 49.9507 Second coordinate of image center in degrees (DEC or galactic b)[INDEF] 41.5117 Rotation angle of image axis, in degrees[0.] 0 Projection method e.g. AIT|ARC|CAR|GLS|MER|NCP|SIN|STG|TAN[CAR] AIT Start energy (MeV) of first bin[INDEF] 100 Stop energy (MeV) of last bin[INDEF] 300000 Number of logarithmically-spaced energy bins[INDEF] 30

Image Scale とエネルギービンの区切り方は CCUBE 作成時と統一する。

• gtsrcmap

これは Binned 解析の最尤法フィッティングで使用するモデルカウントマップを作成するツールであ る。このツールで作成されたモデルカウントマップは解析期間に依らずある程度の容量を持つので、 短期間ビンのライトカーブを作成する際は注意する必要がある。以下に gtsrcmap の入力コマンド例 を示す。広がった放射成分のみのモデルカウントマップを作成したい場合は引数に'ptsrc=no'を与え る。

prompt> gtsrcmaps Exposure hypercube file[ ] NGC1275\_gtltcube.fits Counts map file[ ] NGC1275\_ccube.fits Source model file[ ] NGC1275\_model.xml Binned exposure map[ ] NGC1275\_gtexpcube.fits Source maps output file[ ] NGC1275\_gtsrcmap.fits Response functions[CALDB]P8R2\_SOURCE\_V6 次に Unbinned 解析の時と同様に gtlike を用いてフィッティングを行う。gtlike を用いて得られたフィット結果を以下に示す。

'NGC1275': 'norm': '1.04265 +/- 0.0680253', 'alpha': '2.18399 +/- 0.0631963', 'beta': '0.0647643', 'Eb': '0.530198',

'TS value': '442.422', 'Flux': '3.08713e-07 +/- 2.45816e-08',

'gll\_iem\_v06': 'Prefactor': '0.971608 +/- 0.00888382', 'Index': '0', 'Scale': '100', 'Flux': '0.000474777 +/- 4.34072e-06',

'iso\_P8R2\_SOURCE\_V6\_v06': 'Normalization': '1.23196 +/- 0.0521544', 'Flux': '0.000184306 +/- 7.79557e-06',

 $\bullet$  gtmodel

入力した xml モデルに基づいて解析領域内のモデルマップを作成するツール。このモデルマップと gtbin で作成した CMAP を比較することで正しいフィットが出来ているかどうかの確認が可能である。 以下に入力例を示す。

prompt> gtmodel
Source maps file [ ] NGC1275\_srcmaps.fits
Source model file [ ] NGC1275\_model\_NEWMINUIT.xml
Output file [ ] NGC1275\_gtmodel.fits
Response functions [ ] P8R2\_SOURCE\\_V6
Exposure cube [ ] NGC1275\_gtltcube.fits
Binned exposure map [ ] NGC1275\_gtexpcube.fits

このツールを使用して作成したモデルマップを図 2.12 に示す。図の 2.13 はモデルマップのサイズと 同じ 26.6°×26.6°の大きさの CMAP である。これらを差し引くことで残差マップを作成することが 出来る。残差マップを作成する際は FTOOL の"farith"ツールを用いる。図 2.14 は二つのファイルを 引き算して作成した残差マップである。残差マップの頻度分布を図 2.15 に示す。図 2.15 は 0 をピー クとしたヒストグラムとなっており、正常なフィッティングができていることが分かる。



図 2.12: Binned 解析の結果を基に作成したモデルマッ図 2.13: モデルマップのサイズに合わせて作成した プ CMAP





図 2.15: 残差マップの頻度分布。横軸はカウントの値、 縦軸は頻度を表す。

図 2.14: モデルマップと CMAP の残差マップ

2.1.3 最尤法

あるデータの組 X と、データに対応したモデルパラメータの組  $\Theta$  があるとする。X、 $\Theta$  は次のように表される。

$$X = \{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$$
$$\Theta = \{\theta_i\} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M\}$$

ここで X が観測される確率を  $P(X - \Theta)$  とするこれは天体のスペクトルや放射分布によって定まる。ここで  $x_1, x_2, \ldots, x_N$  は独立なので以下のようになる。

$$P(X|\Theta) = P(\{x_i\}|\Theta)$$
  
=  $P(x_1|\Theta)P(x_2,...,x_N|\Theta)$   
=  $P(x_1|\Theta)P(x_2|\Theta)...P(x_N|\Theta) = \prod_i^N P(x_i|\Theta)$  (2.4)

式2.4より尤度関数は次のように定義される。

$$L(\Theta|X) = \Pi_i^N P(x_i|\Theta) \tag{2.5}$$

 $x_i$ を固定した場合に L の最大値を求めるような手法を最尤法という。尤度関数を $\theta$ で微分すればに L の最 大値が求められる。実際に計算する時は式 (3.5)の両辺の対数をとった形で微分される。

$$\frac{\partial lnL}{\partial \theta_i} = 0 \tag{2.6}$$

ー般的にガンマ線は X 線などの低エネルギー側の光子に比べて到来数が少ない。そのため、 $\chi^2$ 検定を行うことができない。そこで尤度比検定を行った結果求められる TS(Test Statistics) という値を用いる。TS は次の式で定義される。

$$TS = -2 \left( ln($$
中心天体を含めないモデルの尤度 $\right) - ln($ 中心天体を含めるモデルの尤度 $) 
ight)$   $(2.7)$ 

ここで $\sqrt{TS}$ はガウス分布の $\sigma$ に対応する有意度を表す。つまり天体の検出の有意度を判断する指標になる。

# 2.2 Swift 衛星

Swift 衛星はガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst;GRB) などの突発天体の観測に特化した衛星で、2004 年 11 月 20 日に打ち上げられた。図 2.16 に示すように、異なる波長帯の検出器を複数搭載することで発生直 後の GRB とその可視残光を観測することが可能である。搭載されている観測装置は3つあり、Burst Alert Telescope(BAT) は15-150keV、X-Ray Telescope(XRT) は0.3-10.0keV、UV and Optical Telecope(UVOT) は 170-600nm にそれぞれ感度を持つ。通常は 3 つの観測機器の中で最も広い視野を持つ BAT が常時観測 を続けており、BAT が GRB を検出するとその後に XRT と UVOT のより詳細な観測によって正確な位置 を特定する。これらの位置情報は TDRSS システムを経由して Gamma-Ray Coordination Network(GCN) に送信される。打ち上げ以降、約 10 年間で 1000 イベント以上の GRB を発見・観測してきた (図 2.17)。



図 2.16: Swift 衛星外観図 [40]


図 2.17: 打ち上げから 2015 年 10 月までに Swift 衛星が発見した GRB を全天マップにプロットしたもの [45]

## 2.2.1 Burst Alert Telescope (BAT)

BAT は GRB の発生を捉えるために設計された高感度・広視野の符号化式望遠鏡である。BAT が GRB を検出すると即座に位置を特定し追観測にふさわしいかを機上で判断し、観測可能であれば衛星本体に情報を送信する。図 2.18 は BAT の構造を示した模式図である。また、図 2.19 は BAT の符号化マスクを示したものである。BAT の上部にこの符号化マスクが設置されている。符号化マスクは上部が穴が開いた金属板、下部は二次元位置検出器カウンターで構成されている。穴が開いた金属板を通過してきた X 線が検出カウンターに入射すると金属板に遮蔽された部分は影となり、結果としてモザイク状のデータが得られる。この検出された影パターンと事前に得られているマスクパターンの相互相関を計算することで天体の位置を検出する。







図 2.19: BAT に搭載されている符号化マスク [40]

特性	説明
エネルギー範囲	15-150  keV
エネルギー分解能	$\sim 7 {\rm ~keV}$
開口部	ランダムパターンの符号化マスク
検出領域	$5240 \mathrm{cm}^2$
視野	$1.4 \mathrm{\ sr}$
検出素子	256 Modules of 128 elements/Module
検出素子サイズ	$4.00 \times 4.00 \times 2.00 \text{ mm}^3$
符号化マスクのセルサイズ	$5.00~\times 5.00~\times 1.00~\mathrm{mm^3}$ Pb tiles
機器のサイズ	$2.4\mathrm{m} \times 1.2\mathrm{m} \times 1.2\mathrm{m}$
望遠鏡 PSF	17 arcmin
位置決定精度	1-4 arcmin

表 2.5: Swift 衛星 BAT の性能・仕様 [9]

## 2.2.2 X-Ray Telescope (XRT)

XRT は 100cm<sup>2</sup> の有効面積、23.6×23.6 arcmin の視野、18arcsec の角度分解能、0.2-10.0keV のエネル ギー範囲を有する X 線反射望遠鏡である。X 線は可視光と同様にある臨界角で全反射を起こす。可視光の 臨界角は数 10°となる一方で、X 線の臨界角は 1°以下という非常に小さい値をとるためレンズで集光する ことができない。そこで反射鏡を回転放物面と回転双曲面上に固定し二回全反射させて結像させるウォル ター 1 型光学系という設計がしばしば用いられる。二回反射させることにより光軸外での像の収差をでき るだけ小さくしている。図 2.20、2.21 は XRT の X 線反射鏡とその仕組みを示している。XRT はこの光学 系を用いられて作られた。CCD は 600×602 画素で、CCD のエネルギー分解能は 10keV で約 190eV だが、 0.1keV では 50eV になる。打ち上げ時の XRT の分解能は 6keV で約 140eV であったが、経年劣化によって 最悪で 300eV にまで分解能が落ちることが予想されている。



<u>内面を使って2回反射</u> <u>第入射角</u> <u>第入射角</u> <u>第入射角</u> <u>入射大線</u> <u>小射大線</u> <u>小射大線</u> <u>小射大線</u> <u>小射大線</u> <u>小射大線</u> <u>小射大線</u>

図 2.20: XRT に搭載されている X 線反射鏡 [46]

図 2.21: 金属面での X 線全反射を利用したウォルター 1 型光学系 [47]

表 2	2.6:	Swift	衛星	$\mathbf{XRT}$	の性能	•	仕様
-----	------	-------	----	----------------	-----	---	----

特性	説明
望遠鏡	JET-X Wolter I
焦点距離	$3.5\mathrm{m}$
有効面積	$110 cm^2 @ 1.5 keV$
望遠鏡の PSF	$18 \operatorname{arcsec} @ 1.5 \mathrm{keV}$
検出器	EEV CCD-22 600 × 600 ピクセル
観測モード	Imaging, Timing, Photon-counting
ピクセルスケール	2.36 arcsec/pixel
エネルギー範囲	$0.2-10.0 { m ~keV}$
感度	$4 \times 10^{-14} \mathrm{erg} \mathrm{cm}^{-2} \mathrm{s}^{-1}$

XRT は以下のようなモードで観測を行う。

• Image  $\mathbf{E} - \mathbf{F}$  (IM)

このモードは BAT が検知した GRB の位置を即座に決定するためのモードである。このモードでは CCD は可視光観測の CCD と同じように動作し、検出器上に蓄積した電子を読み出す。GRB の放射 強度に応じて、IM モードの露出時間はは自動的に 0.1 秒もしくは 2.5 秒に自動で設定される。

• Photodiode  $\mathbf{\Xi}-\mathbf{F}$ 

極めて明るい天体を撮る場合に用いられるモードである。このモードで得られたデータには空間情報 がないが、高い時間分解能 (0.14m 秒) を有するため極めて詳細な光度曲線やスペクトルが得られる。 このモードは 2005 年 5 月末から利用不可能となった。

- Windowed Timing(WT) 視野の中心 200×200 pixel (~8分角)四方を一次元に圧縮した形のデータ が得られる。このモードの時間分解能は 1.7m 秒であり、1-600mCrab の放射強度の天体に使用可能 である。WT モードで得られたデータを図 2.22 に示す。
- Photon Counting(PC) PC モードで得られるデータは 600×600 pixel(約 24×24 分角)の二次元画像 となる。このモードの時間分解能は 2.5 秒であり、1mCrab 以下の放射強度の天体に有効となる。PC モードで得られたデータを図 2.23 に示す。

以下の表 2.7 は XRT 観測モードの特徴をまとめたものである。



図 2.22: WT モードで得られた NGC 1275 データ



図 2.23: PC モードで得られた 3C 111 のデータ

表 2.7: XRT 観測モードの特性まとめ [48]

モード	イメージ情報	スペクトル情報	時間分解能	適した放射強度
Image モード	2次元	なし	0.1 秒 or 2.5 秒	>140m Crab
Photodiode モード	なし	あり	0.14m <b>秒</b>	0.6-60 Crab
Windowed Timing $\mathbf{E} - \mathbf{F}$	1 次元	あり	1.7m <b>秒</b>	1-600m Crab
Photon Counting	2 次元	あり	2.5 <b>秒</b>	<1m Crab

# 2.2.3 UV/Optical Telescope (UVOT)

UVOT は 170-650 nm に感度を持つ 30cm のリッチー・クレティエン式望遠鏡である。GRB の可視光残 光のべきは典型的に t<sup>-1.1</sup>~t<sup>-2.1</sup> となるため早く減光してしまう。GRB の可視対応天体を明るい間に観測 して赤方偏移を決定するには迅速な反応が必要とされる。UVOT は GRB の可視残光観測に適した観測装 置である。地球大気による減光を受けないため非常に感度がよく、1000 秒露出での限界等級は 22.3 等級と なる。また地上では観測不可能な強い紫外線も観測できる。表 2.8 に UVOT の基本的な性能をまとめる。

特性	説明
望遠鏡	修正リッチー・クレティエン式
焦点比	12.7
検出器	CDD
視野	$17 \times 17$ arcmin
検出素子	$2048 \times 2048$ ピクセル
望遠鏡 PSF	$2.5~{\rm arcsec}$ @ $350~{\rm nm}$
波長範囲	$170\text{-}650~\mathrm{nm}$
フィルター	7
ピクセルスケール	$0.502  \operatorname{arcsec}$
検出上限	V=7.4 等

表 2.8: Swift 衛星 XRT の性能・仕様 [41]

#### 2.2.4 XRT データの解析方法

ここでは実際に行った X 線スペクトルデータ解析の手順を説明する。得られた X 線データを切り取り、 天体からの X 線スペクトルデータ(ソースイベント)とバックグラウンドの X 線スペクトルデータ(バッ クグラウンドイベント)を作成する。これらのスペクトルデータを xspec という解析ソフトを用いて詳細に 解析する。本研究では PC モードと WT モードの解析を行った。

PC モード解析

xselect xselect は入力されたイベントファイルに対して様々な条件のフィルターをかけることで、光度曲線・イメージ画像・スペクトルを作成するソフトウェアである。コマンドラインインタフェースによって必要なタスクを行うことが出来る。xselect を使って元のデータををソースイベントとバックグラウンドイベントに分ける。まず、領域ファイルを準備する。以下はソースイベントの領域ファイルの例である。

```
NGC1275_source.reg ______
global color=green dashlist=8 3 width=1 font="helvetica 10 normal roman" select=1 highlite=1
dash=0 fixed=0 edit=1 move=1 delete=1 include=1 source=1
fk5
circle(3:19:48.168,+41:30:42.12,18")
```

NGC1275\_back.reg \_

```
global color=green dashlist=8 3 width=1 font="helvetica 10 normal roman" select=1 highlite=1
dash=0 fixed=0 edit=1 move=1 delete=1 include=1 source=1
fk5
circle(3:19:48.168,+41:30:42.12,65")
-circle(3:19:48.168,+41:30:42.12,60")
```

NGC1275\_source.reg は赤道座標 (49.9507, 41.5117) を中心に 18 秒角の円形領域を指定することを意 味する。また、NGC1275\_back.reg は内径 60 秒角・外径 65 秒角の円環領域指定している。xselect と これらの領域ファイルを用いて各イベントファイルを作成する。

prompt> xselect
> Enter session name >[xsel] xsel

```
xsel:SUZAKU > read eve
> Enter the Event file dir >[./] ./
> Enter Event file list >[ ] ./sw00034380012xpcw3po_cl.evt.gz
Got new mission: SWIFT
> Reset the mission ? >[yes] yes
xsel:SWIFT-XRT-PHOTON > filter region NGC1275_source.reg
xsel:SWIFT-XRT-PHOTON > bin eve
xsel:SWIFT-XRT-PHOTON >save eve NGC1275_00034380012_source.evt
> Use filtered events as input data file ? >[yes] yes
xsel:SWIFT-XRT-PHOTON > bin spec
xsel:SWIFT-XRT-PHOTON > save spec NGC1275_00034380012_source.pha
xsel:SWIFT-XRT-PHOTON > exit
> Save this session? > [no] no
ここで'NGC1275_00034380012_source.evt'は切り取った後のイベントファイル、'NGC1275_00034380012_source.pha'
はスペクトルファイルである。同様にしてバックグラウンドファイルを作成する。図 2.24、2.25 は
xselect によって切り取られたイベントファイルを示す。緑の円形と色調は2画像間であわせている。
同様にして xselect で各スペクトルファイルも作成する。
```



図 2.24: xselect で切り取った PC モードのソースイ 図 2.25: xselect で切り取った PC モードのバックグラ ベントファイル ウンドイベントファイル



図 2.26: xselect で切り取った WT モードのソースイ 図 2.27: xselect で切り取った WT モードのバックグ ベントファイル ラウンドイベントファイル

• grapha

xspec では  $\chi^2$  統計でスペクトル解析を行う。この場合モデルとデータを比較する際に 1bin あたり 20 イベント以上の統計が必要とされる。またフィッティングを行った時に図を見やすくするのにも効果 的である。

prompt> grppha
Please enter PHA filename[ ] NGC1275\_00034380012\_source.pha
Please enter output filename[ ] NGC1275\_00034380012\_source\_grp50.pha
GRPPHA[] group min 50
GRPPHA[] exit

• xrtmkarf

xspec に適した OGIP 形式の ARF ファイルを作成するソフト。ARF ファイルにはスペクトル解析を 行う際に必要となる望遠鏡の有効面積の情報が含まれる。

prompt> xrtmkarf Name of the input PHA FITS file[ ] NGC1275\_00034380012\_circle.pha
Apply PSF correction (used if extended=no)?(yes/no)[yes]
Name of the output ARF FITS file[ ] NGC1275\_00034380012\_circle.arf
Source X coordinate (SKY for PC and WT modes, DET for PD mode)(used if extended=no):[-1]
Source Y coordinate (SKY for PC and WT modes, DET for PD mode)(used if extended=no):[-1]

# 2.3 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡は広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台に設置されているリッチー・クレチアン式 望遠鏡である。前身となる国立天文台所有の「赤外シュミレータ」は主にすばる望遠鏡の検出器の試験用望 遠鏡として用いられ、2006年に国立天文台から東広島天文台に移設された。主鏡の有効径は1.5mであり、 これは国内で4番目に大きい。機動性が高く、方位5°/sec・高度2°/secという駆動速度を持ち、ガンマ 線バースト・ブレーザー・X線トランジェントのような突発的な天文現象に特化する望遠鏡である。2017 年現在ではカセグレン焦点に HONIR、ナスミス焦点には HOWPol が搭載されている。

## 2.3.1 HONIR

可視近赤外同時撮像カメラ (Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera; HONIR) はかなた望遠鏡の カセグレン焦点に設置している検出器であり、撮像・分光・偏光・偏光分光などの多モードな方法で可視・ 近赤外線の二つの異なる波長帯を同時に観測することが可能である。視野は 10'×10' でピクセルスケール は 0.293[arcsec/pixel] である。

	可視	近赤外
<b>波長</b> [µm]	0.5-1.0	1.45-2.40
FOV	$10' \times 10'$	$10' \times 10'$
pixel scale	0.294"/pixel	0.295"/pixel
Filter	B,V,R,I,Y	Y,J,H,Ks
Detector	CCD	HgCdTe VIRGO
(Vender)	(Hamamatsu Photonics)	(Raytheon)
Detector Format	$2048 \times 4096$ pixel	$2048 \times 2048$ pixel
Detector size [mm]	$30.72\times61.44$	$40.96 \times 40.96$

表 2.10: かなた望遠鏡 HONIR の	性能・	仕様	4
------------------------	-----	----	---

### 2.3.2 HOWPol

HOWPol(Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) はダブルウォラストンプリズムを搭載しており、 1回の露出で偏光度を得ることが可能である。そのためブレーザー等の偏光度が短時間で変化するような 天体の偏光観測に特化した装置である。今回は系統誤差の小さいシングルウォラストンプリズムを用いた4 露出観測を行った。HOWPol の性能をまとめた表を 2.11 に示す。

パラメーター	説明
波長	450nm - 1100nm
可視フィルター	B,V,R,I
ウォラストンプリズム	広視野用ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム
	狭視野用ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム
	シングルウォラストンプリズム
CCD	2k-4k
CCD ピクセルスケール	0.2943 [arcsec/pixel]
製造者	浜松ホトニクス
限界等級 (撮像)	R:19.2 等級 (10 分露出)
限界等級(偏光撮像)	R:16.0 等級 (10 分露出)

表 2.11: かなた望遠鏡 HOWPol の性能・仕様 [19]

#### 2.3.3 HONIR 解析方法

この節では HONIR の解析方法について解説を行う。今回のデータ解析には可視光データ解析専用ソフト表 *refHONIR*<sub>N</sub>*GC*1275 はかなた望遠鏡 HONIR で取得したデータをリストしたものである。

			撮	像			偏	光	
Ī	年	V	R	J	$\mathbf{Ks}$	V	R	J	$\mathbf{Ks}$
ĺ	2015	42	36	42	36	0	236	248	0
Ì	2016	150	141	151	141	0	132	132	0

表 2.12: HONIR で得られた NGC 1275 のデータリスト

#### 一次処理

観測で得られた生のデータは補正無しには天体の情報を得ることができない。望遠鏡に入射する天体の 光子は主鏡・副鏡で反射・収束し最終的に検出器に入る。これを読み出す際のノイズ(読み出しノイズ) や CCD の感度ムラ、さらにはダークと呼ばれる熱的に発生するノイズが重なった状態で画像が得られるた め、最低でもこれらのノイズの補正を行わなくてはならない。このため読み出しのみのデータ(バイアス) シャッターを開けずに撮像したデータ(ダーク)、一様な強さの光をあてたデータ(フラット)の3種類の データを観測とは別個に取得する必要がある。理想的にはダーク・バイアス・フラットは1データ毎に取 得すべきであるが、効率的ではないため実際には観測終了時に撮った補正用データを用いてその日の天体 データを補正することが一般的である。かなた望遠鏡 HONIR の場合はフラットのパターンは安定してい るため、一ヶ月に一度のペースでフラットデータを取得している。

#### 測光解析

今回はアパーチャー測光と呼ばれる方法で測光解析を行った。この方法は円形領域とその周りの円環領 域を切り出し、それぞれをソースイベントとバックグラウンドイベントとして天体の明るさを見積もる。中 心天体付近にある光度変動がなく等級が既知である天体と比較することで中心天体の等級を見積もる。天 候・湿度・気温などの観測条件によってシーイングが日によって違うため、解析領域もシーイングによって 変更することが一般的な解析手法である。今回はペルセウス銀河団の寄与があるため、ある値で解析領域 を固定した。こうすることことで相対的な光度変動を探査することが可能である。

#### 偏光解析

古典的には光は電磁波であり横波である。電場の振動方向が様々なものが混ざり合っているものは自然 光と呼び、全体として偏りを持つようなものを偏光と呼ぶ。偏光を示す天体には AGN などのジェット天体 がある。ジェットの強い磁場によるシンクロトロン放射によって方向が揃った放射が出る為、可視領域で強 い偏光がしばしば観測される。その他にも天体構造の非対称性による偏光が観測される天体も存在する。木 星でも偏光が観測されているが、これは非対称な二回散乱によって説明される。また皆既月食も偏光が観測 されることで知られる。偏光はストークスパラメータを導入することでよく説明される。これを用いるこ とで偏光をI,Q,U,Vというパラメーターで記述することができる。偏光度(PD)と偏光方位角(PA) はストークスパラメーターI,Q,Uを用いて以下の式で表すことができる。

$$PD = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \tag{2.8}$$

$$PA = \frac{1}{2}\arctan(\frac{U}{Q}) \tag{2.9}$$

ー般的に偏光は半波長板とウォラストンプリズムという特殊な光学機器を用いることで観測が可能である。半波長板は偏光方向を変えることができ、ウォラストンプリズムは偏光光を常光と異常光に分ける役割を持つ。半波長板を 0°、45°、22.5°、67.5°と回転させ計 4 回偏光撮像を行うことで偏光度を導出する。常 光  $I_o(\phi)$ 、異常光  $I_e(\phi)$  は以下の式で表される。

$$I_{o}(\phi) = \frac{I}{2} \left( 1 + \frac{Q}{I} \cos 4\phi + \frac{U}{I} \sin 4\phi \right) k_{o}\xi(t) v I_{e}(\phi) = \frac{I}{2} \left( 1 - \frac{Q}{I} \cos 4\phi - \frac{U}{I} \sin 4\phi \right) k_{e}\xi(t)$$
(2.10)

ここで  $\phi$  は半波長板の回転角、 $k_o$ 、 $k_e$  は常光・異常光の光学系を通過する際の減光効率、 $\xi(t)$  は大気吸収 量を意味する。各回転角をそれぞれ代入すると以下の式が得られる。

$$I_{o}(0^{\circ}) = \frac{I}{2} \left( 1 + \frac{Q}{I} \right) k_{o} \xi(t_{0^{\circ}})$$
(2.11)

$$I_e(0^\circ) = \frac{I}{2} \left( 1 - \frac{Q}{I} \right) k_e \xi(t_{0^\circ})$$
(2.12)

$$I_o(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left( 1 + \frac{Q}{I} \right) k_o \xi(t_{22.5^\circ})$$
(2.13)

$$I_e(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left( 1 - \frac{Q}{I} \right) k_e \xi(t_{22.5^\circ})$$
(2.14)

$$I_o(45^{\circ}) = \frac{I}{2} \left( 1 + \frac{Q}{I} \right) k_o \xi(t_{45^{\circ}})$$
(2.15)

$$I_e(45^{\circ}) = \frac{I}{2} \left( 1 - \frac{Q}{I} \right) k_e \xi(t_{45^{\circ}})$$
(2.16)

$$I_o(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left( 1 + \frac{Q}{I} \right) k_o \xi(t_{67.5^\circ})$$
(2.17)

$$I_e(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left( 1 - \frac{Q}{I} \right) k_e \xi(t_{67.5^\circ})$$
(2.18)

#### ξを打ち消すように式変形をするとと以下の様になる。

$$\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)} = \left(\frac{1-\frac{Q}{I}}{1+\frac{Q}{I}}\right) \frac{k_e}{k_o}$$
(2.19)

$$\frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)} = \left(\frac{1-\frac{Q}{I}}{1+\frac{Q}{I}}\right)\frac{k_e}{k_o}$$
(2.20)

$$\frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)} = \left(\frac{1-\frac{U}{I}}{1+\frac{U}{I}}\right) \frac{k_e}{k_o}$$
(2.21)

$$\frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)} = \left(\frac{1-\frac{U}{I}}{1+\frac{U}{I}}\right)\frac{k_e}{k_o}$$

$$(2.22)$$

さらに  $a_1$ 、 $a_2$ を以下のように定義する。

$$a_1 = \sqrt{\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)} / \frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)}}, \qquad a_2 = \sqrt{\frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)} / \frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)}}$$
(2.23)

*a*<sub>1</sub>、*a*<sub>2</sub>を変形すると以下のように表せる。

$$a_1 = \frac{1 - \frac{Q}{I}}{1 + \frac{Q}{I}}, \quad a_2 = \frac{1 - \frac{U}{I}}{1 + \frac{U}{I}}$$
(2.24)

これらの式を用いることで結果としてストークスパラメーターは以下のような式で表すことができる。

$$I = \Sigma_{\theta} (I_o(\theta) + I_e(\theta)) \tag{2.25}$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{1-a_1}{1+a_1}, \qquad \frac{U}{I} = \frac{1-a_2}{1+a_2}$$
 (2.26)

以上の式から4回の偏光観測で偏光度・偏光方位角を計算することができる。

# 第3章 解析結果

# 3.1 ガンマ線で検出された電波銀河の系統的な性質

### 3.1.1 天体の選考条件

今回は Fermi 衛星 LAT の4年間のデータをまとめた"3LAC カタログ"を参考に、ガンマ線を放射する 電波銀河の選考を行った [3]。表 3.1 は 3LAC に記載されている天体の中で非ブレーザー天体をまとめたも のである。全部で 34 天体がリストされている。3LAC カタログに記載されている天体は有意度の指標であ る TS 値が 25 以上 (~5 $\sigma$ )を示す。表 3.1 では 3LAC カタログに記載されている情報の他に、各天体の距離 を追加して示してある。これは Simbad、NED といった無料で公開されているデータベースや、その他の 選考研究を参考にして赤方偏移を調査した [43][44]。一部の天体については赤方偏移が未同定だったため記 載していない。これらで調べた赤方偏移を光度距離  $D_L$  に変換した。変換方法は T. Wickramasinghe and T. N. Ukwatta 2010 を参考にした。具体的な変換式を以下に示す。

$$\alpha = \alpha(z, \Omega_{\Lambda}) = 1 + 2 \frac{\Omega_{\Lambda}}{1 - \Omega_{\Lambda}} \frac{1}{(1+z)^3}$$
(3.1)

$$x = x(z, \Omega_{\Lambda}) = \ln\left(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1}\right)$$
(3.2)

$$\Psi(x) = 3x^{1/3}2^{2/3} \left[ 1 - \frac{x^2}{252} + \frac{x^4}{21060} \right]$$
(3.3)

$$d_L = \frac{c}{3H_0} \frac{1+z}{\Omega_{\Lambda}^{1/6} (1-\Omega_{\Lambda})^{1/3}} [\Psi(x(0,\Omega_{\Lambda})) - \Psi(x(z,\Omega_{\Lambda}))]$$
(3.4)

ここで *H*<sub>0</sub> はハッブル定数、c は光速である。

⊥
$\sim$
17
6
¥
1
Ж
Ť
+'
Į.
レ
ĥ
ш
π
た
れ
hi
4
llet.
띪
jJ
ň
$\geq$
ш
Ŕ
R
5
$\subseteq$
Ľ
33
••
ŝ
表

	RA [ ° ]	DEC [ ° ]	3FGL 名	type	Index	TS value	red shift	$D_L[Mpc]$
47.11		4.11	$J0308.6 \pm 0408$	FR1	2.07 + / - 0.11	77.84	0.028833	126.74
49.18		41.32	$J0316.6 {+} 4119$	FR1	1.90 + - 0.14	74.26	0.01888	82.37
49.95		41.51	$J0319.8 {+}4130$	FR1	2.07 + / - 0.01	11807.67	0.01756	76.53
51.17		34.18	J0325.2 + 3410	NLSy1	2.44 + / - 0.12	376.58	0.0629	283.53
53.58		39.36	J0334.2 + 3915	FRI	2.11 + - 0.17	34.58	0.020341	88.84
57.74		1.52	$J0351.1 {\pm} 0128$	SSRQ	2.43 + / - 0.18	25.91	·	'
64.59		38.03	J0418.5 + 3813	FRII	2.79 + / - 0.08	126.60	0.048500	216.34
79.96		-45.78	J0519.2-4542	FRII	2.49 + / - 0.18	31.87	0.0340	150.04
96.78		-35.49	J0627.0-3529	FR1	1.87 + / - 0.06	442.06	0.054594	244.61
113.4	_	51.94	J0733.5 + 5153	AGN	1.74 + / - 0.16	49.75	·	I
119.6	2	37.79	J0758.7 + 3747	FR1	2.16 + / - 0.16	29.95	0.04082	181.05
126.3!	20	39.33	J0824.9 + 3916	CSS	2.44 + / - 0.10	96.73	1.21	8545.67
130.2(	0	13.21	$J0840.8{+}1315$	SSRQ	2.47 + / - 0.09	97.77	$0.684 \ [10]$	4202.77
132.4	6	51.14	J0849.9 + 5108	NLSy1	2.28 + / - 0.04	1067.09	0.5835 $[6]$	3458.33
143.7	x	39.70	J0934.1 + 3933	SSRQ	2.28 + / - 0.12	57.13	ı	·
$147.2^{\circ}$	<del></del>	0.37	J0948.8 + 0021	NLSy1	2.32 + / - 0.05	1572.77	0.58384	3460.79
169.53	ŝ	-4.23	J1118.2-0411	AGN	2.56 + - 0.08	150.12	ı	ı
172.2'	2	37.09	J1129.0 + 3705	AGN	2.08 + / - 0.13	88.60	ı	I
176.2	1	19.61	J1145.1 + 1935	FR1	1.98 + / - 0.20	42.15	0.021718	94.95
181.5	$\infty$	4.10	$J1205.4 \pm 0412$	SSRQ	2.64 + / - 0.16	34.38	0.628500	3787.49
187.7	H	12.39	J1230.9 + 1224	FRI	2.04 + / - 0.07	373.20	0.004283	18.48
190.9	6	16.38	$J1244.1 {+}1615$	SSRQ	2.43 + - 0.17	39.91	$0.557 \ [10]$	3267.81
198.19	6	48.47	J1312.7 + 4828	AGN	2.04 + / - 0.03	4385.97	0.638 [24]	3857.86
201.3	$\sim$	-43.02	J1325.4-4301	FRI	2.70 + - 0.03	1945.10	0.001825	7.86
202.79	<u> </u>	30.51	J1330.5 + 3023	SSRQ	2.60 + - 0.16	37.35	0.849934	5499.72
206.7(		-60.41	J1346.6-6027	FR1	2.32 + / - 0.01	121.74	0.012916	56.09
213.26	_	-65.34	J1413.2-6518	Seyfert	2.43 + / - 0.10	61.62	0.001448	6.23

リスト	TDC 1
ィーザー天体の	T
載された非ブレ	
臣	¢
りタログに	
3.1: 3LAC 7.	
表	[0]

天体名	RA [ ° ]	DEC [°]	3FGL 名	type	Index	TS value	red shift	$D_L[\mathrm{Mpc}]$
3C $303$	220.76	52.03	J1442.6 + 5156	FRII	1.92 + / - 0.18	26.87	0.141186	671.41
PKS 1502+036	226.28	3.44	$J1505.1 {+} 0326$	NLSy1	2.61 + / - 0.05	500.49	0.407882	2245.85
TXS 1613-251	244.35	-25.33	J1617.3-2519	AGN	2.59 + / - 0.10	52.61		'
PKS 1617-235	245.28	-23.52	J1621.1-2331	AGN	2.50 + - 0.23	68.95		'
NGC 6251	248.13	82.54	J1630.6 + 8232	FRI	2.22 + / - 0.08	456.41	0.024710	108.28
$3C \ 380$	277.38	48.75	J1829.6 + 4844	SSRQ	2.37 + / - 0.04	599.27	$0.691 \ [10]$	4255.84
PKS 2004-447	301.97	-44.50	J2007.8-4429	NLSy1	2.47 + / - 0.09	106.72	0.24	1212.07

天体のクラス	数
FR1	11
FR2	3
NLsy1	5
SSRQ	7
$\mathbf{CSS}$	1
Seyfert	1
AGN	6

#### 表 3.2: ガンマ線で明るい非ブレーザー天体の各天体クラスの数

#### 3.1.2 解析結果

前節の天体を以下の表 3.3 の様な解析条件で解析を行った。さらにこれらの解析結果をまとめたものを、 表 3.4 に示す。解析の際、PL Index を求めるために中心天体に適用するモデルは PowerLaw モデルを適用 した。Prefactor のスケール合わせるため、PowerLaw モデルのパラメーターの Scale は全て 5477.23[MeV] を指定した。今回のの結果は、4 年データをまとめた 3LAC カタログに記載されている各カタログ値と誤 差の範囲内でほとんど一致した。一部の天体では 5 $\sigma$ 検出以下 (TS 値が 25 以下)の結果が得られた。Fermi 衛星は 2017 年 1 月現在、約 8 年半分のデータをサーベイ観測している。5 $\sigma$ 検出以下の有意度となった天 体は、後半の 3 年半ではほとんどガンマ線を放出せずにバックグラウンドに埋もれてしまったため、結果 として有意度が低下したと考えられる。

Data Set	Pass8
Event Selection	SOURCE class
Energy range	$0.1 -300 { m GeV}$
Zenith Angle	90 degree
Science Tools Version	v10r0p5
IRFs	P8R2_SOURCE_V6
Glactic Diffuse	gll_iem_v06.fits
Extragalactic Diffuse	iso_P8R2_SOURCE_V6_vv06.txt
Catalog	ROI 内の 3FGL 天体をパラメーターフリーで含めた。
	それ以外で ROI+5° 以内の天体はパラメータを固定してモデルに含めた。

表 3.3: Fermi 衛星データ解析の解析条件

表 3.4: 7.5 年データの解析結果リスト

天体名	Prefactor	PL Index	TS value	Photon $Flux[photon/cm2/s]$
NGC 1218	(0.203 + - 0.024)1e-13	2.020 + / - 0.076	215.597	6.488e-09 + /- 1.247e-09
IC 310	(0.850 + - 0.380)1e-14	2.664 + - 0.102	123.326	2.366e-08 + /- 0.343e-08
NGC 1275	(0.854 + - 0.011)1e-12	2.093 + - 0.006	75708.1	3.403e-07 + /- 0.036e-07
1H 0323 + 342	(0.144 + - 0.012)1e-13	2.867 + - 0.028	1373.49	7.479e-08 + - 0.278e-09
4C + 39.12	(0.697 + - 0.167)1e-14	1.866 + / - 0.173	38.5878	1.411e-09 + - 0.779e-10
TXS $0348 + 013$	(0.684 + - 2.536)1e-16	3.730 + / - 1.285	11.4073	8.262e-09 + /- 2.718e-09
3C 111	(0.939 + - 0.220)1e-14	2.851 + - 0.065	310.176	4.606e-08 + /- 0.327e-09
Pictor A	(0.748 + - 0.173)1e-14	2.454 + - 0.137	114.265	9.524e-09 + / - 2.894e-09

表 3.4: 7.5 年データの解析結果リスト

天体名	Prefactor	PL Index	TS value	Photon Flux[photon/cm2/s]
PKS 0625-354	(0.498 + - 0.033)1e-13	1.883 +/- 0.040	959.478	1.060e-08 +/- 0.102e-08
4C + 52.17	(0.781 + - 0.150)1e-14	1.607 + - 0.125	91.9007	7.950e-10 + /- 3.159e-10
NGC 2484	(0.406 + - 0.125)1e-14	2.138 + - 0.196	24.838	1.858e-09 + - 0.942e-9
4C + 39.23B	(0.122 + - 0.016)1e-13	2.512 + / - 0.055	419.49	1.880e-08 + - 0.181e-08
3C 207	(0.538 + - 0.128)1e-14	2.631 + - 0.097	111.26	1.238e-08 + /- 0.191e-08
SBS $0846 + 513$	(0.571 + - 0.031)1e-13	2.256 + / - 0.023	3063.62	3.801e-08 + - 0.149e-08
3C 221	(0.573 + - 0.085)1e-14	2.480 + - 0.087	110.754	7.950e-09 + - 1.288e-09
PMN J0948+0022	(0.492 + - 0.030)1e-13	2.675 + / - 0.020	6056.47	1.315e-07 + - 0.028e-07
PMN J1118-0413	(0.671 + - 0.152)1e-14	2.682 + / - 0.089	167.69	1.840e-08 + - 0.251e-08
B2 1126 $+37$	(0.111 + - 0.004)1e-13	2.161 + - 0.019	144.086	5.490e-09 + /- 0.368e-9
3C $264$	(0.910 + - 0.159)1e-14	1.948 + / - 0.136	91.159	2.336e-09 + /- 0.889e-9
PKS $1203 + 04$	(0.202 + - 0.109)1e-14	2.696 + / - 0.213	22.6283	5.797e-09 + /- 2.074e-09
M 87	(0.469 + - 0.034)1e-13	2.053 + - 0.041	1045.48	1.652e-08 + /- 0.152e-08
3C275.1	(0.652 + - 0.162)1e-14	2.481 + - 0.126	99.9292	9.079e-09 + /- 2.038e-09
GB $1310 + 487$	(0.778 + - 0.004)1e-13	2.157 + - 0.002	4200.67	3.783e-08 + /- 0.033e-8
Cen A	(0.530 + - 0.020)1e-13	2.680 + - 0.021	6206.96	1.595e-07 + - 0.046e-07
3C 286	(0.242 + - 0.089)1e-14	2.777 + - 0.145	62.8041	9.167e-09 + /- 2.049e-09
Cen B	(0.440 + - 0.021)1e-13	2.456 + / - 0.044	277.039	5.632e-08 +/- 0.572e-08
Circinus	(0.111 + - 0.082)1e-13	2.743 + - 0.109	150.547	3.755e-08 + /- 0.597e-08
3C 303	(0.375 + - 0.125)1e-14	2.124 + - 0.211	27.8589	1.646e-09 + - 0.814e-9
PKS $1502 + 036$	(0.189 + - 0.020)1e-13	2.648 + / - 0.041	1005.36	4.605e-08 + /- 0.245e-08
TXS 1613-251	(0.779 + - 0.194)1e-14	2.729 + / - 0.089	107.44	2.503e-08 + /- 0.355e-08
PKS 1617-235	(0.104 + - 0.241)1e-14	2.531 + - 0.087	59.6094	1.711e-08 + - 0.339e-08
NGC 6251	(0.253 + - 0.022)1e-13	2.369 + - 0.038	1076.91	2.427e-08 + /- 0.157e-08
3C 380	(0.301 + - 0.021)1e-13	2.425 + / - 0.029	1326.78	3.477e-08 + /- 0.160e-08
PKS 2004-447	(0.108 + - 0.017)1e-13	2.595 + / - 0.062	337.224	2.191e-08 + /- 0.204e-08

続いて各天体の詳細な解析結果の一例を示す。一部の有意度が高い天体に関しては任意の時間幅でライトカーブの作成を行った。また SED も追加して作成した。一部の天体の SED には折れ曲がりのような構造が見られた。ライトカーブは多くの天体で強い変動が見られる一方で、あまり変動を見せずに定常的に輝くものも見られた。各天体のライトカーブは、上図が各天体のフォトンフラックスの光度変化を意味し、下図は各時間ビンの有意度を表す TS 値を示している。上図は各時間ビンのフォトンフラックスを表で示し、7.5 年平均のフラックスを黒線で示している。黒線の上下の緑色の点線はそのフラックスの誤差を示す。SED は縦軸  $\nu F_{\nu}$ [erg/cm<sup>2</sup>/s]、横軸はエネルギー [MeV] である。SED の高エネルギー側ほどプロット点の誤差が大きいのは、低エネルギーガンマ線に比べて高エネルギーガンマ線は統計量が非常に少ないためである。以下に各天体のライトカーブと SED の例として、3C 380 の解析結果を示す。その他の天体の詳細な解析結果は付録に示す。

• 3C380
'Prefactor': '0.488611 +/- 0.0162641',
'Index': '2.4254 +/- 0.0291702',
'Scale': '0.671341',
'TS value': '1326.78',

```
'Flux': '3.47674e-08 +/- 1.60014e-09',
    'gll_iem_v06
'Prefactor': '1.00445 +/- 0.00529052',
'Flux': '0.000490824 +/- 2.585e-06',
    iso_P8R2_SOURCE_V6_v06 'Normalization': '1.08168 +/- 0.00910593',
'Flux': '0.000161824 +/- 1.36107e-06',
```



図 3.1: 3C 380 の 0.1-300GeV の SED



図 3.2: 3C 380 の 60 日ビンライトカーブ

図 3.3: 3C 380 の 10 日ビンライトカーブ

#### 3.1.3 諸量との相関

先行研究である Abdo et al と同様にこれらの解析結果から各天体の光度を求めた。今回光度の単位は [erg s<sup>-1</sup>] とした。二章で説明しているが、中心天体のモデルは PowerLaw を選んでおり、これらのスペクトル モデルは [cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>MeV<sup>-1</sup>] という単位である。これにエネルギーを 2 回かけることで  $\nu F \nu$  [MeV cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] となる。さらに MeV を erg に変換して [erg cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] となる。これは天体からの単位面積・単位時間あた リのエネルギーを意味する。距離が既知の天体に対してはエネルギーフラックス [MeV cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] から光度 [erg s<sup>-1</sup>] に変換することができる。天体の光度距離を  $d_L$  とすれば  $4\pi d_L^2$  をかければ光度を導出できる。以 上のようにして求めた光度を表 3.5 にまとめた。さらにこの結果を図にまとめたものを図 3.4 に示す。先行 研究と同様に、SSRQ 型の天体を FR2 とみなして示している。距離がわかっている天体は計 27 天体である。

天体名	Luminosity	Luminosity Error	object Type
NGC1218	1.875e + 42	0.217e + 42	FR1
IC310	$3.316e{+}41$	1.483e + 41	FR1
NGC1275	2.876e + 43	0.037e + 43	FR1
1H0323+342	$6.657e{+}42$	0.555e + 42	NLSy1
4C+39.12	3.163e+41	0.758e + 41	FR1
3C111	$2.527e{+}42$	0.592e + 42	FR2
PictorA	$9.683e{+}41$	2.240e+41	FR2
PKS0625-354	1.713e+43	0.114e + 43	FR1
NGC2484	$7.653e{+}41$	2.356e + 41	FR1
4C+39.23B	$5.123e{+}45$	0.672e + 45	CSS
3C207	5.464e + 44	1.300e + 44	SSRQ
SBS0846+513	$3.927e{+}45$	0.213e + 45	NLSy1
PMNJ0948+0022	$3.389e{+}45$	0.207e+45	NLSy1
3C264	4.718e + 41	0.824e + 40	FR1
PKS1203+04	$1.666e{+}44$	0.899e + 44	SSRQ
M87	$9.210e{+40}$	0.668e + 40	FR1
3C275.1	4.004e+44	0.995e + 44	SSRQ
GB1310+487	$6.658e{+}45$	0.034e + 45	AGN
CenA	1.883e+40	0.071e + 40	FR1
3C286	4.209e + 44	1.548e + 44	SSRQ
CenB	7.960e+41	0.380e + 41	FR1
Circinus	2.477e + 39	1.830e + 39	Seyfert
3C303	$9.721e{+}42$	3.240e + 42	FR2
PKS1502 + 0.036	5.482e + 44	0.580e + 44	NLSy1
NGC6251	1.706e+42	0.148e + 42	FR1
3C380	3.135e + 45	0.219e + 45	SSRQ
PKS2004-447	9.124e + 43	1.436e + 43	NLSy1

表 3.5: 距離が既知の天体のガンマ線光度



図 3.4: 7.5 年データの解析から求めた、各天体の光度とガンマ線のスペクトルインデックスの相関図

この図から光度が高い天体ほどガンマ線のスペクトルインデックスがソフトになる傾向があり、種族ご とにある程度かたまって分布するようである。また、先行研究と同様に FR1 が図の左下、FR2 が図の右上 に分布する傾向がみられた。さらにその他の種族の天体は FR2 に近い位置に分布することがわかった。一 方で、Seyfert にクラスされる Circinus galaxy は図 3.4 では若干外れた左上に位置している。今回はスペ クトルインデックスが 2.743 +/- 0.109 という解析結果を得たが、 Hayashida et al 2013 では 0.1-100 GeV の解析で 2.19+/-0.12 という解析結果を示している [16]。Circinus galaxy は今回選んだ天体の中でも特に 銀緯が低く、銀河面からの強いバックグラウンドを受けるため解析が難しい。そのため今回の解析結果が間 違っている可能性も否定できない。

# 3.2 NGC 1275 の連続多波長モニター

## 3.2.1 Fermi 衛星によるガンマ線の結果

まず 7.5 年間データを解析した。さらに SED も作成した。gtselect の際、ROI は 10° を指定した。その 他の解析条件は表 3.3 と同様である。3FGL カタログでは NGC 1275 に LogParabola が適用されている。 以下に解析結果を示す。

• NGC1275 norm: (1.192 +/- 0.015)e-10 alpha: 2.015 +/- 0.014 beta: 0.053 +/- 0.005 Eb: 530.198 TS value: 78997.3, Flux: 3.150e-07 +/- 0.075e-07



図 3.5

次にライトカーブを作成した。中心天体を除いて ROI 内の天体のスペクトルインデックスが時間によっ て変わらないと仮定する。この仮定のもとで中心天体周辺のスペクトルインデックスを固定したモデルを 作成し、そのモデルを用いてライトカーブを作成した。

この時、NGC 1275 のインデックスは free にしている。インデックスを free にして解析した 30 日ビン のライトカーブを図 3.6 に示す。図 3.6 は上からフォトンフラックス、スペクトルインデックス、各 TS 値 を意味する。図中の緑の横線は 7.5 年データから求めた平均のフラックス・インデックスである。特にフォ トンフラックスが高い時期には縦の赤破線を入れてある。二つのフレアを見てみると、次のような似かよう ポイントがいくつか存在する。(1) 両者とも一ヶ月以上のタイムスエールで急激に増光している (2) フレア が起きる半年前から徐々にインデックスがハードになっている。

これらのフレア期に関してはより高エネルギー側の成分が盛り上がることでインデックスがハードになり、さらにフラックスが上がっていることが考えられる。

フレアの原因は定かではないが、2つのフレアは期限が図 3.7 と図 3.8 はより詳細に解析を行った、全期 間の1週間ビンのライトカーブである。図 3.7 は前半期、図 3.8 は後半期を示している。



図 3.6: 2008 年から 2016 年までの 0.1-300GeV の 30 日ビンライトカーブ



図 3.7: 239557417 - 371970708 [MET] のガンマ線ライトカーブ



図 3.8: 371970708 - 506879017 [MET] のガンマ線ライトカーブ

さらに TeV フレアが報告された期間の前後をさらに詳細に解析した。図 3.9 は 2016-10-22 から 2017-01-28 までの 1 日ビンのライトカーブである。図中の縦線は MAGIC・VERITAS で TeV ガンマ線の増光が報告 された日時である。これらの TeV フレアはそれぞれ、2016-10-29 と 2016-01-01 に報告された。2016-10-29 の TeV ガンマ線の増光に伴った GeV ガンマ線の明確な増光は見られなかった。しかし、2016-01-01 の TeV ガンマ線フレア時付近の GeV ガンマ線光度に顕著な光度変動がみられる。このライトカーブは 1 日ビンで 作成しているため、GeV ガンマ線放射領域は 1 光日 (~2.590×10<sup>15</sup> cm) 以下の非常にコンパクトなサイズで あることがわかる。



図 3.9: 498788097 - 507255297 [MET] の1日ビンのガンマ線ライトカーブ

## 3.2.2 Swift 衛星による X 線の結果

先述のとおりペルセウス銀河団は X 線を出しており、その中心部に位置する NCG 1275 はそのコンタミ ネーションを受ける。図 3.10 は XRT の PC モードで得られた CMAP を示してある。右図は XRT の視野 全体を示し、左図は中心天体付近をズームアップして示している。右図中に示している緑線の正方形の大 きさは 10'×10'であり、各画像でそれぞれ色調を変えている。右図からペルセウス銀河団に由来する広がっ た放射、さらに左図からは中心部に明るい点源がそれぞれ確認することができる。まず、各データを表 3.6 の様な解析条件で解析を行った。解析に用いたモデルは wabs\*pegpwrlw である。また質の悪いデータや露 光時間が極端に短いデータは任意で除いている。パラメーターは nH・PhoIndex・norm を free にしてい フィッティングを行った。解析結果をまとめたものを表 3.2.2 に示す。



図 3.10: Swift 衛星 XRT で撮られた 0.2-10.0 keV の CMAP 右図は XRT の視野全体、左図は中心天体の周囲 10 分角四方をトリミングしたものである。

Energy range	0.2-10.0 keV					
heasoft Version	6.16					
PC mode source region	半径 0.4arcmin の円形領域 (図 2.24)					
PC mode background region	内径 60arcmin、外径 65arcmin の円環領域 (図 2.25)					
WT mode source region	データの roll angle と並行な縦 3 arcmin、横 0.8 arcmin の矩形領域 (図 2.26)					
WT mode source region	データの roll angle と並行な縦 3 arcmin、横 5 arcmin					
	の矩形領域を左右1つづつ (図 2.27)					
model	wabs*pegpwrlw					

表 3.6: Swift 衛星 各データの解析の解析条件

表 3.7: Swift 衛星の PC モ-	・ドデータの解析結果リスト
------------------------	---------------

観測日時	<b>観測日時</b> [MJD]	<b>露光時間</b> [s]	ID	Flux $[10^{12} \text{ erg/cm}2/\text{s}]$	Index
2007-07-13	54294.667	5846.164	00036524001	$25.733^{+1.587}_{-2.373}$	1.656 + / - 0.093
2007-12-06	54440.667	3546.164	00036524002	$26.539^{+2.721}_{-3.389}$	1.866 +/- 0.118
2009-12-30	55195.084	4305.403	00030354003	$22.751^{+2.219}_{-2.801}$	1.872 + / - 0.122
2010-07-22	55399.834	2180.131	00031770001	$42.616_{-4.856}^{+3.414}$	1.989 + - 0.11
2010-07-24	55401.875	2042.782	00031770002	$53.072_{-4.762}^{+4.648}$	1.585 + / - 0.095
2010-07-26	55403.542	2040.285	00031770003	$36.138_{-4.588}^{+3.752}$	1.956 + / - 0.127
2010-07-28	55405.875	2172.64	00031770004	$38.822_{-4.652}^{+2.888}$	1.814 + - 0.119
2010-07-30	55407.667	2105.214	00031770005	$29.798^{+3.362}_{-5.528}$	2.154 + - 0.151
2010-08-01	55409.167	2118.694	00031770006	$29.927^{+3.263}_{-3.717}$	1.84 + - 0.137
2010-08-03	55411.083	2412.377	00031770007	$36.972^{+3.598}_{-3.722}$	1.626 + / - 0.104
2010-08-05	55413.542	1985.345	00031770008	$32.761_{-4.341}^{+4.709}$	1.726 +/- 0.135
2010-08-07	55415.042	2090.23	00031770009	$46.392^{+5.748}_{-5.142}$	1.654 + / - 0.103

2010-08-09	55417.708	2112.705	00031770010	$39.551_{-5.531}^{+3.659}$	1.661 +/- 0.116
2011-07-05	55747.126	1003.91	00091128001	$25.382_{-6.322}^{+4.178}$	2.02 +/- 0.264
2011-07-06	55748.0	1326.077	00091128002	$22.424_{-5.614}^{+5.186}$	1.487 +/- 0.314
2011-07-07	55749.209	1758.104	00091128003	$30.109_{-4.209}^{+3.551}$	1.719 +/- 0.166
2011-07-09	55751.209	3471.286	00091128004	$26.007^{+3.413}_{-2.647}$	1.699 +/- 0.123
2011-07-10	55752.083	4922.187	00091128005	$26.951^{+2.259}_{-2.571}$	1.609 + - 0.096
2013-01-21	56313.792	422.047	00032691001	$15.921_{-15.0254}^{+4.629}$	1.705 + / - 1.018
2013-04-04	56386.459	789.145	00049799001	$31.265_{-12.695}^{+7.725}$	1.755 + / - 0.324
2013-07-10	56483.667	651.796	00049799002	$0.0^{+0}_{0}$	1.712 + - 0.476
2013-07-12	56485.917	939.001	00049799003	$26.574_{-8.604}^{+5.496}$	1.856 + / - 0.338
2013-07-14	56487.334	5271.814	00049799004	$38.768^{+3.252}_{-2.568}$	1.512 + - 0.07
2013-07-26	56499.959	3054.193	00049799005	$39.305\substack{+3.585\\-3.855}$	1.739 + - 0.093
2013-08-01	56505.042	1565.824	00049799006	$41.052_{-7.132}^{+5.048}$	1.687 +/- 0.141
2015-02-11	57064.333	2000.338	00092034001	$47.906_{-5.056}^{+5.004}$	1.796 +/- 0.108
2015-03-15	57096.0	2137.698	00092034002	$47.501_{-4.771}^{+4.089}$	1.493 +/- 0.105
2015-07-25	57228.083	1985.345	00092034003	$43.359_{-5.079}^{+4.521}$	1.864 + - 0.12
2015-08-18	57252.042	2000.338	00092034004	$25.002^{+4.668}_{-5.182}$	1.542 + - 0.194
2015-09-16	57281.542	1358.531	00092034005	$16.422_{-6.912}^{+4.088}$	1.69 + - 0.424
2015-11-03	57329.126	6415.023	00081530001	$38.232^{+2.308}_{-2.552}$	1.695 + / - 0.062
2016-02-19	57437.833	2449.845	00034380001	$43.654_{-4.324}^{+3.526}$	1.596 + / - 0.097
2016-02-21	57439.709	2472.311	00034380002	$35.995^{+3.735}_{-3.305}$	1.726 + / - 0.116
2016-02-23	57441.376	2399.89	00034380004	$42.578_{-5.208}^{+4.152}$	1.507 + - 0.11
2016-02-25	57443.708	2749.527	00034380005	$27.89^{+3.94}_{-3.62}$	1.417 +/- 0.131
2016-02-26	57444.709	2774.51	00034380006	$42.053_{-3.963}^{+2.957}$	1.693 + - 0.108
2016-02-29	57447.875	1698.159	00034380007	$41.116_{-6.346}^{+4.424}$	1.648 + / - 0.133
2016-03-02	57449.417	2367.426	00034380008	$32.689_{-4.749}^{+3.261}$	1.721 +/- 0.136
2016-03-03	57450.792	2022.804	00034380010	$44.44_{-3.82}^{+5.02}$	1.421 +/- 0.106
2016-03-04	57451.0	2487.295	00034380009	$40.866_{-4.826}^{+4.114}$	1.448 +/- 0.114
2016-03-05	57452.084	3973.167	00034404001	$28.068^{+2.202}_{-3.038}$	1.65 + / - 0.106
2016-03-06	57453.792	2344.961	00034380012	$46.348_{-4.418}^{+4.242}$	1.493 + - 0.098
2016-03-08	57455.333	2914.337	00034380013	$36.289^{+3.551}_{-3.559}$	1.674 + - 0.106
2016-03-10	57457.209	2240.075	00034380014	$45.32_{-4.32}^{+4.43}$	1.513 + - 0.103
2016-03-12	57459.0	2267.545	00034380015	$45.929^{+4.801}_{-5.409}$	1.487 +/- 0.114
2016-03-16	57463.458	2185.126	00034404003	$44.332_{-5.302}^{+4.698}$	1.212 +/- 0.121
2016-10-30	57691.0	1972.878	00034765001	$39.229_{-4.359}^{+3.951}$	1.761 + - 0.125
2016-10-31	57692.084	1960.372	00034765002	$48.482^{+3.258}_{-5.712}$	1.641 +/- 0.104
2016-11-01	57693.084	1860.481	00034765003	$50.776_{-5.206}^{+6.084}$	1.56 + / - 0.104
2016-11-02	57694.084	1615.739	00034765004	$41.225_{-5.585}^{+4.835}$	1.427 + - 0.123
2016-11-03	57695.084	1588.27	00034765005	$19.578\substack{+4.192\\-4.468}$	1.727 + - 0.25
2016-11-04	57696.084	1675.674	00034765006	$46.741_{-4.871}^{+4.759}$	1.855 + - 0.122
2016-11-05	57697.084	1795.553	00034765007	$54.862_{-4.092}^{+4.558}$	1.556 + / - 0.089
2016-11-06	57698.083	2007.82	00034765008	$44.675_{-4.515}^{+4.955}$	1.392 + / - 0.119
2016-11-07	57699.084	1942.891	00034765009	$51.031_{-4.601}^{+4.589}$	1.654 + / - 0.099
2016-11-08	57700.083	1605.761	00034765010	$55.829^{+4.571}_{-5.669}$	1.557 +/- 0.103
2016-11-09	57701.083	1525.848	00034765011	$44.393_{-5.663}^{+4.097}$	1.746 + / - 0.127

2016-11-10	57702.084	1912.934	00034765012	$48.981\substack{+4.019\\-5.891}$	1.763 + - 0.102
2017-01-01	57754.25	619.331	00087311001	$78.305\substack{+10.055\\-13.935}$	1.601 + - 0.15
2017-01-02	57755.167	781.653	00087311002	$77.56^{+10.48}_{-10.04}$	1.456 + - 0.145

表 3.8: Swift 衛星の WT モードデータの解析結果リスト

観測日時	<b>観測日時</b> [MJD]	<b>露光時間</b> [s]	ID	Flux $[10^{12} \text{ erg/cm}2/\text{s}]$	Index
2006-01-06	53741.834	1660.11	00030354001	$19.193^{+4.197}_{-17.725}$	2.39 +/- 0.787
2006-02-03	49.972	53769.875	00030364001	$55.929_{-6.459}^{+6.711}$	2.308 +/- 0.172
2010-07-15	55392.625	1988.085	00031763001	$113.9^{+9.2}_{-12.2}$	2.14 + - 0.112
2010-07-18	55395.834	4057.722	00031763002	$146.06^{+7.74}_{-7.76}$	1.908 + / - 0.061
2010-07-20	55397.167	4119.933	00031763003	$129.11_{-8.21}^{+7.19}$	2.047 + - 0.063
2013-01-21	56313.75	1155.487	00032691001	$55.159^{+13.071}_{-20.079}$	1.909 + / - 0.33
2013-01-23	56315.417	2679.306	00032691002	$37.753_{-12.833}^{+8.167}$	2.165 + / - 0.339
2017-01-01	57754.875	983.962	00031770011	$136.28^{+15.12}_{-19.48}$	1.771 + - 0.145
2017-01-03	57756.542	996.97	00031770012	$127.37^{+11.73}_{-22.47}$	2.184 + - 0.153
2017-01-05	57758.5	288.149	00031770013	$85.207_{-69.057}^{+8.893}$	2.692 + - 0.442
2017-01-07	57760.542	198.799	00031770014	$154.32_{-54.52}^{+29.98}$	2.205 + / - 0.324
2017-01-12	57765.876	238.562	00031770015	$74.297^{+11.203}_{-66.29}$	1.986 + / - 0.807
2017-01-17	57770.792	573.169	00031770016	$73.463^{+9.587}_{-56.623}$	2.353 + / - 0.501
2017-01-20	57773.333	751.107	00031770017	$141.49^{+15.51}_{-17.19}$	1.701 + - 0.126
2017-01-22	57775.959	1006.481	00031770018	$99.275_{-21.655}^{+14.125}$	2.062 +/- 0.188
2017-01-24	57777.292	669.123	00031770019	$124.86^{+13.04}_{-19.96}$	$1.9\overline{61} + - 0.174$
2017-01-26	57779.084	909.452	00031770020	$126.36_{-20.36}^{+18.54}$	$1.8\overline{34} + - 0.152$
2017-01-29	57782.959	1017.548	00031770021	$140.6^{+10.4}_{-13.6}$	1.997 + /- 0.105

これらの解析結果を図 3.11、3.12 にまとめた。これらの解析結果から短期間で変動しているフレア期があることがわかる。さらに PC モードの長期間ライトカーブから長いタイムスケールで徐々に増光していることがわかる。



図 3.11: NGC 1275 の 0.2-10.0 keV の PC モードデー 図 3.12: NGC 1275 の 0.2-10.0 keV の WT モードデー タライトカーブ。2007 年から 2016 年末までのデータ タライトカーブ。2007 年から 2016 年末までのデータ を示している。 を示している。

次にペルセウス銀河団によるコンタミネーションについて調べた。様々な値のアパーチャーサイズを指定して解析を行い、各サイズに対してライトカーブを作成した。図 3.13 は様々なアパーチャーサイズで作成した XRT の PC モードデータのライトカーブである。それぞれ、緑:0.1 arcmin、赤:0.4 arcmin、青:0.7 arcmin のサイズでの解析結果を示している。この結果から、アパーチャーサイズによって多少のコンタミネーションの影響を受けるものの、アパーチャーサイズによらず光度は倍以上の変化がみられなかった。



図 3.13: 各アパーチャーサイズのライトカーブ

#### 3.2.3 かなた望遠鏡による可視光の結果

本研究では 2015 年から 2017 年までの NGC 1275 の可視近赤同時撮像を行った。詳しい解析リストは付録に掲載する。図 3.14 は HONIR で得られた NGC 1275 の可視・近赤外のライトカーブである。ペルセウス銀河団によるコンタミネーションを切り分けることが困難であるため、アパーチャーサイズはシーイングによらず 4.7arcmin に固定して解析を行った。Ks バンドでの撮像も行っているが、S/N が悪く誤差が非常に大きいため、今回は Ks バンドの解析結果を掲載していない。これらの結果を見ると、各波長帯で同様の光度変動を示していることがわかる。さらに短いタイムスケールでの光度変動も特に見られなかった。



図 3.14: HONIR で得られた V、R、J バンドのライトカーブ

#### 3.2.4 相関、多波長変動の考察

まず、X線-GeV ガンマ線間の相関について述べる。初めに 2006 年から 2017 年までの Fermi 衛星の 30 日ビンのガンマ線ライトカーブと、Swift 衛星 X線ライトカーブを同時に表したものを図 3.15 に示す。こ れらのライトカーブを見ると、ガンマ線光度・X線光度ともに継続した増光傾向があることが見て取れる。 このことからジェット放射が X線領域に影響を及ぼしていることが示唆される。

さらにこれらのライトカーブを詳細にみていく。図 3.18 は TeV フレアが起きた期間を拡大したものであ る。図 3.18 のガンマ線ライトカーブは1日ビンで表示している。縦の黒線は MAGIC と VERITAS で TeV ガンマ線の増光がみられた時期を示している。特に 2016 年 12 月 31 日から 2017 年 1 月 1 日にかけて起きた TeV ガンマ線フレアは、2016 年 10 月 29 日のフレアの 10 倍ものフラックスを示すことが報告されている。 Fermi データのガンマ線ライトカーブを見ると、1 月 1 日の TeV ガンマ線フレアに同期した明確な GeV ガ ンマ線フレアがみられる。さらに X 線ライトカーブも、2016 年 11 月の光度と 2017 年 1 月の光度を比較す ると後者が明確に増光していることがわかる。このことから TeV フレア時には、ジェット起源の非熱的な 放射が GeV-TeV ガンマ線領域だけではなく X 線領域にも卓越していることが示唆される結果がえられた。



図 3.15: 2006 年から 2017 年までの Fermi と Swift のライトカーブ



図 3.16: 498788097 - 507255297 [MET] の Fermi と Swift のライトカーブ

ガンマ線光度とX線光度の相関を探るため、X線のデータが得られた時期に対して同様の期間のガンマ線 データを解析して比較を行った。具体的には、XRTのX線データのヘッダーから、"TSTART"・"TSTOP" の情報を抜き出す。これらは観測開始から終了までの時間を記録したもので、METの単位で示されている。 しかしXRTの露光時間の典型的な値は10004000秒であるため、全く同じような期間でガンマ線の解析は できない。ガンマ線は比較的統計が悪いため、1時間分のデータでは有意な解析結果が得られないためで ある。そこでTSTARTとTSTOPの中心の時間から前後12時間分の期間でガンマ線の解析を行った。こ れはX線の観測頻度が最高でも1日であることを踏まえて設定したものである。このような条件で解析を 行い、ガンマ線光度とX線光度の相関を調べた。図3.17は横軸ガンマ線フラックス・縦軸X線フラックス で各データ毎にプロットしたものである。この図からガンマ線で明るい時はX線でも明るいという傾向が あることがわかった。



#### 図 3.17: ガンマ線光度とX線光度の相関図

さらに、GeV ガンマ線・X 線・可視・近赤外の多波長ライトカーブを図に示す。先述の通り、GeV ガン マ線と X 線の光度変動には同期した相関が見受けられるが、可視・近赤外ではほとんど変動がみられない。 可視・近赤外では 57600[MJD] 付近で増光がみられるが、同期間でのガンマ線の増光は見受けられなかっ た。このことから可視・近赤外の領域ではジェットの放射成分の寄与が極めて少ない可能性が高いことがわ かった。



図 3.18: 2015 年 10 月から 2017 年 1 月までの、NGC 1275 の多波長ライトカーブ。上から Fermi 衛星の GeV ガンマ線、Swift 衛星 X 線、かなた望遠鏡 HONIR の R・V バンド、HONIR の J バンドのデータを用 いている。

以上の結果からジェットの非熱的な放射は X 線に影響を及ぼしているが、可視・近赤外に対する寄与は 希薄であることがわかった。

# 第4章 まとめと今後

今回私は、Fermi 衛星で検出された AGN をまとめた 3LAC カタログの中から強いガンマ線放射をする 非ブレーザー天体を選出し、各天体の 7.5 年分のガンマ線データを用いて解析を行った。各天体の光度とガ ンマ線領域のスペクトルインデックスを求めた結果、ガンマ線光度が低い天体ほどスペクトルインデック スがよりハードになる傾向がみられた。これらの相関図を作り電波銀河に着目した結果、FR1型の天体は 低光度・ハードなべき、FR2型の天体は比較的に高い光度・ソフトなべきを持つことが分かった。これは abdo et al 2010 で指摘されている点と矛盾しない結果である。その他の AGN・NLSy1・Seyfert にクラス される天体は FR2 と似た高光度でソフトなべきを持つことが判明した。これらの傾向から、ブレーザー以 外のジェットを持つ天体にもブレーザーシークエンスと同様の傾向があることが分かった。

さらに、特にガンマ線で明るい NGC 1275 対して多波長での調査を行った。かなた望遠鏡 HONIR では 2015 年 10 月以降に継続して NGC 1275 の観測を行っている。HONIR、Swift 衛星・Fermi 衛星の多波長 のデータを用いて光度変動を探査した。その結果、ガンマ線と X 線の同期した光度変動が見られたが、可 視・近赤外の顕著な光度変動は見られなかった。これらの結果から、ジェットの非熱的な放射はガンマ線・ X 線で卓越するが、可視・近赤外の波長帯ではジェットの影響が少ないことが示唆される。

今回はガンマ線フレア時の Swift 衛星のデータを用いて X 線光度をを探査したが、Swift 衛星のエネル ギー分解能では 6.4keV 鉄輝線などの輝線を観測することができない。そのためよりエネルギー分解能がよ い NuSTAR 衛星や XMM-Newton 衛星等でフレア時のスペクトルが得られれば、よりジェット放射の寄与 について議論が出来るだろう。また、ジェットからのシンクロトロン放射は可視光領域で偏光として観測さ れることが知られているため、静穏期とフレア期の偏光度を比較することが重要であると思う。

謝辞

今回の修士論文を作成するに当たって様々な方にお世話になりました。深沢先生にはいろいろな面で指 導をいただき感謝しております。現在は東京工業大学に所属されている伊藤さんには、かなた望遠鏡で観測 を行う際の観測方法を詳しく教えていただきました。Fermiの解析や Swift の解析もとっかかりはいつもご 指導いただきました。中岡さんとm川端さんには可視光の解析を行うにあたって様々なアドバイスをいた だきました。その他、研究室のスタッフの皆様、学生の皆様、物理事務の皆様など本当にお世話になりまし た。ありがとうございました。

# 関連図書

- [1] Abdo, A. A., et al. "FERMIOBSERVATIONS OF -RAY EMISSION FROM THE MOONFERMI
   "The Astrophysical Journal, 758:140 (8pp), 2012 October 20
- [2] Abdo, A. A., et al. "FERMI LARGE AREA TELESCOPE OBSERVATIONS OF MISALIGNED ACTIVE GALACTIC NUCLEI" 1 September 2010
- [3] Ackermann, M., et al. "The Third Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope" arXiv:1501.06054
- [4] Akitaya, H., et al. "HONIR: an optical and near-infrared simultaneous imager, spectrograph, and polarimeter for the 1.5-m Kanata telescope"
- [5] Aleksic, J., et al. "Contemporaneous observations of the radio galaxy NGC 1275 from radio to very high energy gamma-rays" 5 May 2014
- [6] Ammando, F. D., et al. "SBS 0846+513: a new gamma-ray emitting Narrow-Line Seyfert 1 galaxy" 2012
- [7] Atwood, W., et al. 'Pass 8: Toward the Full Realization of the Fermi-LAT Scientific Potential' ,arXiv:1303.3514, 2013
- [8] Atwood, W. B. et al. 'THE LARGE AREA TELESCOPE ON THE FERMI GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE MISSION', arXiv:0902.1089v1, 2009
- [9] Barthelmy, S. D., et al. "The Burst Alert Telescope (BAT) on the Swift MIDEX mission"
- [10] Belsole, E., Worrall, D. M., Hardcastle, M. J., Croston J. H., "High redshift FRII radio sources: large-scale X-ray environment" 2007
- [11] Burrows, D. N., et al. 2004 'The Swift X-Ray Telescope'
- [12] Chatterjee, R., et al. "CONNECTION BETWEEN THE ACCRETION DISK AND JET IN THE RADIO GALAXY 3C 111" 2011 May 24
- [13] Donato, D., et al "Hard X?ray properties of blazars" 11 May 2001
- [14] Fossati, G., et al. "A Unifying View of the Spectral Energy Distributions of Blazars" 9 April 1998
- [15] Fukazawa, Y.; Shiki, K.; Tanaka, Y.; Itoh, R. and Nagai, H., "X-ray and GeV gamma-ray variability of radio galaxy NGC 1275"
- [16] Hayashida, M., et al. "DISCOVERY OF GEV EMISSION FROM THE CIRCINUS GALAXY WITH THE FERMI-LAT" 7 October 2013
- [17] Jorstad, S. G., et al. "POLARIMETRIC OBSERVATIONS OF 15 ACTIVE GALACTIC NUCLEI AT HIGH FREQUENCIES: JET KINEMATICS FROM BIMONTHLY MONITORING WITH THE VERY LONG BASELINE ARRAY" 2005

- [18] Kataoka, J., et al. "BROAD LINE RADIO GALAXIES OBSERVED WITH FERMI-LAT:THE ORIGIN OF THE GEV  $\gamma$ -RAY EMISSION" 19 July 2011
- [19] Kawabata, K., et al. 2008, SPIE, 7014, 4
- [20] Khachikian, E. Y.; Weedman, D. W. "An atlas of Seyfert galaxies"
- [21] Koratkar, A. & Blaes, O., "Emission in Active Galactic Nuclei" 1999
- [22] MEGAN URRY, M. and PAOLO, PADOVANI 'Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei'
- [23] Michelson, P. F.; Atwood, W. B.; Ritz, S. 'Fermi Gamma-ray Space Telescope: High-Energy Results from the First Year'
- [24] Sokolovsky, K. V., et al. "Two active states of the narrow-line gamma-ray-loud AGN GB 1310+487" 2014
- [25] Soldi, S., et al "The multiwavelength variability of 3C 273" 22 May 2008
- [26] Tanaka, Y. T., et al. "Six Years of Fermi-LAT and Multi-Wavelength Monitoring of the Broad-Line Radio Galaxy 3c 120: Jet Dissipation At Sub-Parsec Scales from the Central Engine" 2015 The Astrophysical Journal Letters 799 L18
- [27] Wickramasinghe, T., and Ukwatta, T. N., "nalytical Approach for the Determination of the Luminosity Distance in a Flat Universe with Dark Energy" 2010
- [28] Wright, E. L., "A Cosmology Calculator for the World Wide Web" Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 118: 1711 1715, 2006 December
- [29] Yamazaki, S., et al. "X-Ray and Optical Monitoring of a Gamma-Ray-Emitting Radio Galaxy, NGC1275" 25 April 2013
- [30] シリーズ現代の天文学17巻:宇宙の観測 高エネルギー天文学
- [31] シリーズ現代の天文学4巻:銀河 銀河と宇宙の階層構造
- [32] Bradley M.Peterson 著'An Introduction to ActiveGalacticNuclei'
- [33] https://www-glast.stanford.edu/instrument.html
- [34] http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/ Cicerone\_Introduction/LAT\_overview.html
- [35] http://www.isdc.unige.ch/~ricci/Website/Active\_Galactic\_Nuclei.html
- [36] "Swiftly moving gas streamer eclipses supermassive black hole". ESA/Hubble Press Release. Retrieved 20 June 2014.
- [37] http://astro.wku.edu/101-bin/hubble/measurespec.cgi?NGC5548
- [38] https://apod.nasa.gov/apod/ap040123.html
- [39] http://astro.wku.edu/101-bin/hubble/measurespec.cgi?NGC4631
- [40] https://www.swift.psu.edu/
- [41] https://swift.gsfc.nasa.gov/about\_swift/uvot\_desc.html

- [42] https://swift.gsfc.nasa.gov/about\_swift/bat\_desc.html
- [43] SIMBAD Astronomical Database http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/
- [44] NASA/IPAC Extragalactic Database NED https://ned.ipac.caltech.edu/
- [45] NASA's Goddard Space Flight Center and 2MASS/J. Carpenter, T. H. Jarrett, and R. Hurt
- [46] https://swift.gsfc.nasa.gov/about\_swift/xrt\_desc.html
- [47] 松本浩典、國枝秀世 'X 線天文学新展開のための次世代 X 線望遠鏡システム評価技術の開発'
- [48] M. Capalbi, M. Perri, B. Saija, F. Tamburelli "The SWIFT XRT Data Reduction Guid"

# 付録 A その他の電波銀河のガンマ線解析結果

```
• NGC 1218

• NGC1218

'Prefactor': '1.41057 +/- 0.142429',

'Index': '2.02027 +/- 0.0758439',

'Scale': '2.10021',

'TS value': '215.597',

'Flux': '6.48829e-09 +/- 1.24659e-09',

• gll_iem_v06

'Prefactor': '1.0347 +/- 0.00590203',

'Flux': '0.000505605 +/- 2.88379e-06',

• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06

'Normalization': '1.023 +/- 0.0154815',

'Flux': '0.000153045 +/- 2.31403e-06',
```






図 2: NGC 1218 の 365 日ビンライトカーブ

図 3: NGC1218 の 182 日ビンライトカーブ

SED の最も高エネルギー側のビンは統計が悪く、有意度が非常に低いた省略してある。ライトカーブ も顕著なフレア等は確認できず、定常的に輝いていることがわかった。

次に8年データの解析結果を載せる。'NGC1218': {'Prefactor': '1.46181 +/- 0.140912', 'Index': '1.99893 'Scale': '2.10021', 'TS value': '245.158', 'Flux': '6.43521e-09 +/- 1.1709e-09',

• IC 310

```
IC310
'Prefactor': '0.492697 +/- 0.247251',
```





 $\bullet~$  NGC 1275

NGC 1275 について次節で詳しく説明する。

• 1H0323+342

• 1H0323+342 'norm': '0.959144 +/- 0.0362693', 'alpha': '2.74732 +/- 0.0544619', 'beta': '0.10525 +/- 0.0377321', 'Eb': '0.260515', 'TS value': '1384.91', 'Flux': '7.27272e-08 +/- 2.99404e-09', •gll\_iem\_v06 'Prefactor': '1.02234 +/- 0.00438174',



図 5: 1H 0323+342 の 60 日ビンライトカーブ

```
• 4C +39.12

• 4C +39.12

'Prefactor': '0.229605 +/- 0.0608564',

'Index': '1.86622 +/- 0.173221',

'Scale': '2890.27',

'TS value': '38.5878',

'Flux': '1.41103e-09 +/- 7.78735e-10',

• gll_iem_v06

'Prefactor': '1.00429 +/- 0.00435902',

'Flux': '0.000490749 +/- 2.12986e-06',

• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06

'Normalization': '1.14238 +/- 0.0246242',

'Flux': '0.000170906 +/- 3.6806e-06',
```



図 6: 1H 0323+342 の 30 日ビンライトカーブ



図 7: 4C +39.12 の 0.1-300GeV の SED

```
• TXS 0348+013
```

```
• TXS_0348+013
'Prefactor': '0.00639555 +/- 0.00971373',
'Index': '3.73007 +/- 1.28475',
'Scale': '481.342',
'TS value': '11.4073',
'Flux': '8.26155e-09 +/- 2.71755e-09',
• gll_iem_v06
'Prefactor': '1.06121 +/- 0.00674761',
'Flux': '0.000518559 +/- 3.29695e-06',
• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.00674 +/- 0.0194375',
'Flux': '0.000150613 +/- 2.90534e-06',
```

```
3C 111
3C111
'Prefactor': '3.02552 +/- 0.191084',
'Index': '2.85134 +/- 0.0650066',
'Scale': '322.301',
'TS value': '310.176',
'Flux': '4.60628e-08 +/- 3.27026e-09',
gll_iem_v06
'Prefactor': '0.98129 +/- 0.00320254',
```



3C111 SED 0.1-300GeV

図 9: 3C 111 の 60 日ビンライトカーブ

図 10: 3C 111 の 30 日ビンライトカーブ

以上が今回の Fermi 衛星データの解析結果である。全く別の研究だが、3C 111 に関しては別の研究を 行っていたので、少し追加する。付録なので構わないだろう。実は 3C 111 のガンマ線ライトカーブか らガンマ線の放射位置が推定できる。電波観測の中でも VLBI (Very Long Baseline Interferometry: 超長基線電波干渉法)は非常に角度分解能がよいことが知られている。図 11 は VLBI 観測による 3C 111 の電波イメージである。軸のスケールが mas(milli arc sec) であることから VLBI の角度分解能 のよさが窺える。VLBI 観測から、3C 111 にはノット(電波ジェットの中でも密度が濃く、塊のよう な構造を示すもの)の放出が確認されている。これらは相対論的ビーミング効果による超光速運動が 起こるため、ノットをわずか数年のタイムスケールで移動量を観測することができる。この観測から ノットがどのタイミングで中心部の電波コアから放出されたのかが推定出来る。図12は横軸時間、 縦軸コアからの距離で、各ノットについてプロットした図である。この図から各ノットの観測点を直 線でフィットし、電波コアからの距離が0となる時期を精密に求めることが可能となる。図13は3C 111 の 200 年から 2010 年中頃までの RXTE 衛星の X 線ライトカーブである。各点が観測点であり、 図中の線はガウシアンでスムージングをかけたものである。図中の矢印は電波ノットが放出された時 期を示している。X 線減光とノットの放出の相関をとったのが図 14 である。これらの図から電波ノッ トの放出の前に必ず X 線減光が観測されることがわかるため、これらの間には何らかの関係がある ことがわかる。これらの関係性は現在では次の様に解釈されている。降着円盤からは熱的な黒体放射 が出ている。これはケプラー運動する粘性を持った粒子が内側と外側で差動回転することで摩擦が起 き、粒子自身を加熱するためである。回転は内側ほど激しく加熱されるため外縁部では赤外線・内縁 部では X 線が放射される。何らかの原因で X 線を放射する内側の物質が崩壊しブラックホールに落 ちると仮定する。この時 X 線放射領域が減少するため X 線放射は減光する。落ち込んだ物質の一部 は外側に吹き飛ばされ電波コアと干渉し、電波ノットが形成される。X 線放射と電波ノットの関係性 はこのような描像で理解される。



図 11: 3C 111 の VLBI によるイメージ



図 12: 横軸時間、縦軸がノットのコアからの距離を 表した図。各観測点が直線にのることから、ノットは 等速度でコアから離れて行くことが見て取れる。この 図からノットがいつコアから放出されたかが推定でき る。[12]



図 13: 3C 111 の 2004 年以降の RXTE の X 線ライト 図 14: X 線の減光とノットの放出の相関をとった図 カープ。下の矢印は各ノットの放出時期を示す。[12]<sup>[12]</sup>

これらの様な現象が起きる 3C 111 であるが、実は 3C 120 でも同じ現象が確認されている。さらに 3C 120 には電波ノットの放出とガンマ線放射の相関からガンマ線放射領域の推定が行われている。図 15 は上からガンマ線のライトカーブ、電波コアフラックス、ノットと電波コアの距離を表しでいる。 この図を見るとガンマ線の増光の直後に電波コアのフラックスが上がり、さらにその後に電波ノット の放出が起きている。このことから外部に吹き飛ばされた物質がガンマ線放射領域と相互作用するこ とによりガンマ線光度が上がり、その後に電波コアと相互作用することで電波ノットが外に向かって 放出されたと考えられる。3C 120 の場合、X 線ディップと電波ノット放出時期の時間差と電波ノット の速度から、X 線放射領域(=中心ブラックホール近傍)と電波コアの距離が 0.5pc であると分かっ ている。この考えと同様にしてガンマ線増光時期・電波ノット放出時期の時間差に加えて電波ノット の速度から、ガンマ線放射領域と電波コアの距離が 0.4pc と 0.2pc であることがわかった。先述の通 り電波コアとブラックホールの距離は 0.5pc であることがわかっているので、ガンマ線放射領域は中 心ブラックホールから 0.1pc、0.3pc の距離に位置していることがわかる。

このこと同様の議論が 3C 111 にも適用できると考え、ガンマ線光度の変動を調査した。ちなみにこ れらの議論を行うことができる天体は次のような条件を満たす必要がある。(1) 電波コアの位置が正 確にわかっている。(2)X 線ディップとノットの放出に相関が認められている。(3) ガンマ線で検出さ れている。実は、これらの条件を満たす天体は 3C 120 と 3C 111 の 2 天体のみである。3C 120 で行 われた議論を 3C 111 でもやってみようというモチベーションのもとにこの研究を行った。



図 15: 3C 120 のガンマ線・電波のライトカーブと電波ノットの関係

図 16 は 3C 111 のガンマ線・43GHz・230GHz の多波長ライトカーブである。Fermi データは 30 日 ビンで作成した。VLBA と SMA のデータはアーカイブデータを使用した。図には TS 値が 16 以上 の期間のみデータ点としてプロットしている。16 以下の期間はアッパーリミットで表示している。 まず、VLBA のライトカーブのピークから電波ノットの放出時期を推定した。図中の縦線は VLBA 光度の山の時期に合わせて引いてある。この線とガンマ線ライトカーブを見ると、相関がありそう な時期が複数見つかった。特に 56600 付近では、電波コアフラックスの増加以前に強いガンマ線フ レアを発見した。このことからガンマ線放射領域は電波コアの内側にあることが示唆される。今回 のガンマ線の詳細解析により、1 日スケールでの変動が確認できた (図 17)。さらに電波観測から ジェットの開口角は 2.8+/-0.8[deg]、ドップラーファクターは 3.4+/-1.1 であることがわかっている [17]。ガンマ線放射領域のサイズを R、ブラックホールまでの距離を r とすると次の式が成り立つ。 R $\leq c \delta t_{var} \sim 8.9 \times 10^{15} (delta/3.4)(t_{var}/1day)[cm]$ となる。円錐型のジェットを想定するとブラック ホールとガンマ線放射領域の距離は 0.1pc であることがわかった (18)。



図 16: 3C 111 のガンマ線・電波のライトカーブ



図 17: 3C 111 の詳細なガンマ線ライトカーブ

非常に簡潔にまとめたが、以上が M1 のときにやっていた研究である。

```
Pictor A

Pictor A
Prefactor': '2.41992 +/- 0.331995',
'Index': '2.45449 +/- 0.137144',
'Scale': '1328.43',
'TS value': '114.265',
'Flux': '9.52377e-09 +/- 2.89432e-09',
gll_iem_v06.fits
'Prefactor': '0.960271 +/- 0.0149821',
```



• PKS 0625-354

• PKS0625-354

```
'Prefactor': '1.94526 +/- 0.107435',
'Index': '-1.88331 +/- 0.039981',
'Scale': '2.65735',
'TS value': '959.478',
'Flux': '1.06013e-08 +/- 1.01687e-09',
    'gll_iem_v06
'Prefactor': '0.960396 +/- 0.00983534',
'Flux': '0.000469298 +/- 4.80564e-06',
    iso_P8R2_SOURCE_V6_v06 'Normalization': '1.21157 +/- 0.0172075',
'Flux': '0.000181256 +/- 2.57203e-06',
```





図 22: PKS 0625-354 の 0.1-300GeV の SED

図 23: PKS 0625-354 の 60 日ビンライトカーブ

```
• 4C +52.17
  • 4C+52.17
  'Prefactor': '0.781166 +/- 0.15043',
  'Index': '1.60697 +/- 0.124788',
  'Scale': '5479.23',
  'TS value': '91.9007',
  'Flux': '7.94974e-10 +/- 3.15851e-10',
  • gll_iem_v06
  'Prefactor': '1.07448 +/- 0.0113814',
  'Flux': '0.000525048 +/- 5.56107e-06',
  'iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
  'Normalization': '0.909363 +/- 0.0203425',
  'Flux': '0.000136045 +/- 3.04061e-06',
• NGC 2484
  • NGC2484
  'Prefactor': '0.457588 +/- 0.118891',
  'Index': '2.1376 +/- 0.195559',
  'Scale': '1763.8',
```

```
'TS value': '24.838',
```

1e-11 1e-12 1e-12 1e-13 1e-13 1e-13 1e-13 1e-13 1e-13 1e-12 1e

NGC2484 SED 0.1-300GeV

図 24: NGC 2484 の 0.1-300GeV の SED

• 4C +39.23B

```
•4C+39.23B
'Prefactor': '0.0121704 +/- 0.00156051',
'Index': '-2.51239 +/- 0.054646',
'Scale': '5477.23',
'TS value': '419.49',
'Flux': '1.87982e-08 +/- 1.80804e-09',
'gll_iem_v06
'Prefactor': '1.00463 +/- 0.0114427',
'Flux': '0.000490911 +/- 5.59103e-06',
. iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.0352 +/- 0.0154029',
'Flux': '0.00015487 +/- 2.30229e-06',
```

• 3C 207

```
· 3C207
'Prefactor': '1.50447 +/- 0.16471',
'Index': '2.63072 +/- 0.0974691',
'Scale': '643.454',
'TS value': '111.26',
'Flux': '1.23769e-08 +/- 1.90646e-09',
'gll_iem_v06
'Prefactor': '1.04043 +/- 0.0131418',
'Flux': '0.000508407 +/- 6.42121e-06',
. iso_P8R2_S0URCE_V6_v06
'Normalization': '1.21656 +/- 0.0157968',
'Flux': '0.000182003 +/- 2.36116e-06',
```



図 25: 3C 207 の 0.1-300GeV の SED

図 26: 3C 207 の 180 日ビンライトカーブ

```
• SBS 0846+513
```

```
• SBS0846+513
'Prefactor': '0.00571186 +/- 0.000312741',
'Index': '-2.25567 +/- 0.0234559',
'Scale': '5477.23',
'TS value': '3063.62',
'Flux': '3.80086e-08 +/- 1.48534e-09',
•gll_iem_v06
'Prefactor': '1.03594 +/- 0.013411',
'Flux': '0.000506215 +/- 6.55275e-06',
•iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '0.922077 +/- 0.0158482',
'Flux': '0.000137947 +/- 2.36884e-06',
```



図 27: SBS 0846+513 の 60 日ビンライトカーブ

図 28: SBS 0846+513 の 30 日ビンライトカーブ



図 29: SBS 0846+513 の 15 日ビンライトカーブ

図 30: 活動的な期間の SBS 0846+513 の 5 日ビンラ イトカーブ

```
• 3C 221
3C221
'Prefactor': '0.376586 +/- 0.0408264',
'Index': '2.4803 +/- 0.0865668',
'Scale': '1013.13',
'TS value': '110.754',
'Flux': '7.95027e-09 +/- 1.2879e-09',
    gll_iem_v06
'Prefactor': '1.00317 +/- 0.0114026',
'Flux': '0.000490201 +/- 5.57143e-06',
    iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.04425 +/- 0.00759184',
'Flux': '0.000156224 +/- 1.13476e-06',
```



図 31: 3C 221 の 0.1-300GeV の SED

図 32: 3C 221 の 180 日ビンライトカーブ

• PMN J0948+0022

```
• PMNJ0948+0022
'norm': '1.69585 +/- 0.0295713',
'alpha': '2.48693 +/- 0.0238357',
'beta': '0.146773 +/- 0.0151391',
'Eb': '0.268052',
'TS value': '6129.88',
'Flux': '1.23189e-07 +/- 2.42152e-09',
• gll_iem_v06
'Prefactor': '1.07222 +/- 0.00828349',
'Flux': '0.000523942 +/- 4.0474e-06',
• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.07686 +/- 0.0101776',
'Flux': '0.000161103 +/- 1.52125e-06',
```



図 33: PMN J0948+0022 の 15 日ビンライトカーブ 図 34: PMN J0948+0022 の 5 日ビンライトカーブ

```
• PMN J1118-0413
  • PMNJ1118-0413
  'Prefactor': '0.0006709 +/- 0.000152074',
  'Index': '2.68241 +/- 0.0892122',
  'Scale': '5477.23',
  'TS value': '167.69',
  'Flux': '1.84048e-08 +/- 2.5129e-09',
  • gll_iem_v06
  'Prefactor': '1.0631 +/- 0.0155358',
  'Flux': '0.000519485 +/- 7.59096e-06',
  • iso_P8R2_SOURCE_V6_v06 'Normalization': '1.22148 +/- 0.0209397',
  'Flux': '0.000182739 +/- 3.12987e-06',
• B2 1126+37
  • B21126+37
  'Prefactor': '0.111403 +/- 0.00393567',
  'Index': '2.16117 +/- 0.0187696',
  'Scale': '5477.23',
  'TS value': '144.086',
  'Flux': '5.49048e-09 +/- 3.679e-10',
  •gll_iem_v06
  'Prefactor': '1.02425 +/- 0.0019746',
  'Flux': '0.000500498 +/- 9.64808e-07',
  • iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
  'Normalization': '1.04882 +/- 0.00141237',
  'Flux': '0.000156908 +/- 2.11108e-07',
• 3C 264
  • 3C264
  'Prefactor': '1.64465 +/- 0.273019',
  'Index': '1.94777 +/- 0.13581',
  'Scale': '4041.4',
  'TS value': '91.159',
  'Flux': '2.33626e-09 +/- 8.8915e-10',
  •gll_iem_v06
  'Prefactor': '1.07956 +/- 0.0173454',
  'Flux': '0.000527526 +/- 8.47513e-06',
  • iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
  'Normalization': '1.12356 +/- 0.0175867',
  'Flux': '0.00016809 +/- 2.62871e-06',
```



図 35: 3C 264 の 0.1-300GeV の SED

図 36: 3C 221 の 180 日ビンライトカーブ

• PKS 1203+04

• PKS1203+04
'Prefactor': '0.811206 +/- 0.190308',
'Index': '2.69557 +/- 0.213253',
'Scale': '592.447',
'TS value': '22.6283',
'Flux': '5.79726e-09 +/- 2.07362e-09',
• gll\_iem\_v06
'Prefactor': '1.03557 +/- 0.0163911',
'Flux': '0.000506034 +/- 8.00885e-06',
• iso\_P8R2\_S0URCE\_V6\_v06
'Normalization': '1.27388 +/- 0.0175991',
'Flux': '0.000190578 +/- 2.63056e-06',



図 37: PKS 1203+04 の 0.1-300GeV の SED

• M 87

```
• M87
'Prefactor': '0.533004 +/- 0.0273274',
'Index': '2.05274 +/- 0.041233',
'Scale': '1.67636',
'TS value': '1045.48',
'Flux': '1.65152e-08 +/- 1.51829e-09',
• gll_iem_v06
Prefactor': '1.07909 +/- 0.0191513',
'Flux': '0.000527299 +/- 9.35751e-06',
• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.15557 +/- 0.0235023',
'Flux': '0.000172878 +/- 3.51291e-06',
```







図 39: M 87 の 365 日ビンライトカーブ

図 40: M 87 の 30 日ビンライトカーブ

ー見、M 87 の SED には 10GeV 付近で折れ曲がりの様な構造が見られる。この折れ曲がりに見える 構造が本当かどうか確かめるために broken powerlaw モデルによる解析を行った。broken powerlaw モデルは 2 つのべきを与えるモデルである。このモデルではべきが変わる境目を break energy と言 うが、この break energy を固定し、二つのべきを free にする。様々な break energy で解析を行い、 最も有意度が高くなるような break energy がベストフィットとなる。broken powerlaw による解析と powerlaw に解析の有意度を比較することで、この折れ曲がりのように見える構造が偶然得られたも のかどうか判断することができる。 • 3C275.1



図 41: 3C 275.1 の 0.1-300GeV の SED



図 42: 3C 275.1 の 180 日ビンライトカーブ

```
• GB 1310+487
```

```
- PowerLaw model • GB1310+487

'Prefactor': '0.0778405 +/- 0.000420442',

'Index': '2.15669 +/- 0.00228805',

'Scale': '5477.23',

'TS value': '4200.67',

'Flux': '3.78273e-08 +/- 3.32652e-10',

• gll_iem_v06

'Prefactor': '0.932846 +/- 0.00143509',

'Flux': '0.000455836 +/- 7.01198e-07',

• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06

'Normalization': '1.0821 +/- 0.00096149',

'Flux': '0.000161887 +/- 1.43715e-07',
```



図 43: GB 1310+487 の 30 日ビンライトカーブ

Flux (0.1-300GeV)[ph/cm<sup>2</sup>/s] 1.4e-06 т 1.2e-06 1e-06 8e-07 6e-07 4e-07 2e-07 0 1000 value 100 ŢS 10 57500 55000 56000 56500 57000 Time[MJD]

図 44: GB 1310+487 の 10 日ビンライトカーブ



図 45: 活動期の GB 1310+487 の 5 日ビンライトカー 図 46: 活動期の GB 1310+487 の 1 日ビンライトカー プ プ

Cen A
 CenA



図 47: Cen A の 0.1-300GeV の SED

図 48: Cen A の 10 日ビンライトカーブ

• 3C 286





図 50: 3C 286 の 365 日ビンライトカーブ

 $\bullet~{\rm Cen}~{\rm B}$ 

• CenB 'Prefactor': '0.630463 +/- 0.039737', 'Index': '2.45609 +/- 0.044154', 'Scale': '1852.56', 'TS value': '277.039', 'Flux': '5.63287e-08 +/- 5.7165e-09', •gll\_iem\_v06 'Prefactor': '0.984238 +/- 0.00101715', 'Flux': '0.000480949 +/- 4.96987e-07', • iso\_P8R2\_SOURCE\_V6\_v06 'Normalization': '1.73099 +/- 0.0193756', 'Flux': '0.000258963 +/- 2.89609e-06',



図 51: CenB の 0.1-300GeV の SED

• Circinus

```
• Circinus
'Prefactor': '0.595217 +/- 0.0771809',
'Index': '2.74304 +/- 0.109198',
'Scale': '1.28372',
'TS value': '150.547',
'Flux': '3.75549e-08 +/- 5.97398e-09',
• gll_iem_v06
'Prefactor': '0.992792 +/- 0.00160902',
'Flux': '0.000485129 +/- 7.86185e-07',
• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.15486 +/- 0.021676',
'Flux': '0.000172772 +/- 3.23993e-06',
```

3C 303
3C303
'Prefactor': '0.0037464 +/- 0.00124887', 'Index': '2.12441 +/- 0.211316',
'Scale': '5477.23',
'TS value': '27.8589',
'Flux': '1.64571e-09 +/- 8.14273e-10',
gll\_iem\_v06
'Prefactor': '0.913479 +/- 0.0143853',

```
'Flux': '0.000446372 +/- 7.0288e-06',
    iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.08892 +/- 0.0116769',
'Flux': '0.000162907 +/- 1.74536e-06',
```



```
• PKS 1502+036
```

```
• PKS1502+036
'Prefactor': '0.00189003 +/- 0.000204914',
'Index': '2.64758 +/- 0.0403339',
'Scale': '5477.23',
'TS value': '1005.36',
'Flux': '4.60509e-08 +/- 2.44783e-09',
• gll_iem_v06
'Prefactor': '1.04767 +/- 0.0093707',
'Flux': '0.000511947 +/- 4.57862e-06',
• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.13222 +/- 0.0176354',
'Flux': '0.000169385 +/- 2.63597e-06',
```

```
TXS 1613-251
TXS1613-251
'Prefactor': '1.36745 +/- 0.167918',
'Index': '2.72908 +/- 0.0889992',
```

```
'Scale': '823.955',
'TS value': '106.147',
'Flux': '2.50251e-08 +/- 3.54586e-09',
    •gll_iem_v06
'Prefactor': '1.05258 +/- 0.00341713',
'Flux': '0.000514344 +/- 1.66964e-06',
    •iso_P8R2_SOURCE_V6_v06
'Normalization': '1.06456 +/- 0.023765',
'Flux': '0.000159263 +/- 3.55218e-06',
```

• PKS 1617-235

```
- LogParabola model

• PKS1617-235

'norm': '0.786834 +/- 0.0691151',

'alpha': '2.5239 +/- 0.180923',

'beta': '9.99734',

'Eb': '0.55828',

'TS value': '105.447',

'Flux': '1.26916e-08 +/- 1.79572e-09',

• gll_iem_v06

'Prefactor': '1.0409 +/- 0.00157151',

'Flux': '0.000508636 +/- 7.67856e-07',

• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06

'Normalization': '1.1954 +/- 0.0098242',

'Flux': '0.000178838 +/- 1.46843e-06',
```

```
- PowerLaw model

• PKS1617-235

'Prefactor': '0.103994 +/- 0.0240917',

'Index': '2.53129 +/- 0.0872123',

'Scale': '5477.23',

'TS value': '59.6094',

'Flux': '1.71122e-08 +/- 3.38637e-09',

• gll_iem_v06

'Prefactor': '1.04429 +/- 0.00339389',

'Flux': '0.000510293 +/- 1.65829e-06',

iso_P8R2_SOURCE_V6_v06

'Normalization': '1.17762 +/- 0.0247893',

'Flux': '0.000176178 +/- 3.70528e-06',
```

```
NGC 6251
NGC6251 'Prefactor': '0.0252925 +/- 0.00218523',
'Index': '2.36859 +/- 0.0378273',
'Scale': '5477.23',
'TS value': '1076.91',
'Flux': '2.4271e-08 +/- 1.57444e-09',
```

```
•gll_iem_v06 'Prefactor': '1.03258 +/- 0.011481',
'Flux': '0.000504569 +/- 5.60975e-06',
• iso_P8R2_SOURCE_V6_v06 'Normalization': '0.867446 +/- 0.025208',
'Flux': '0.000129774 +/- 3.76787e-06',
```



図 54: NGC 6251 の 60 日ビンライトカーブ

図 55: NGC 6251 の 30 日ビンライトカーブ

- 3C 380
  - 3C380 'Prefactor': '0.488611 +/- 0.0162641',



3C380 SED 0.1-300GeV







図 57: 3C 380 の 60 日ビンライトカーブ

図 58: 3C 380 の 10 日ビンライトカーブ

```
• PKS 2004-447
```

• PKS2004-447
'Prefactor': '0.0107568 +/- 0.00171013',
'Index': '2.59464 +/- 0.0623327',
'Scale': '5477.23',
'TS value': '337.224',
'Flux': '2.19056e-08 +/- 2.03518e-09',
• gll\_iem\_v06'
'Prefactor': '0.997702 +/- 0.0081783',
'Flux': '0.000487528 +/- 3.996e-06',
• iso\_P8R2\_SOURCE\_V6\_v06
'Normalization': '1.08181 +/- 0.0192319',
'Flux': '0.000161844 +/- 2.87461e-06',

## 付録 B NGC 1275 の観測データリスト

表 1: Swift 衛星 XRT で取得された NGC 1275 のデータ

日付	日付 [MJD]	データ ID	RA	DEC	roll angle	露光時間
2007-07-13 16:09:47	54294.667	00036524001	49.958	41.505	82.241	5846.164
2007-12-06 16:21:01	54440.667	00036524002	49.958	41.505	288.115	3546.164
$2009\text{-}12\text{-}30\ 02\text{:}02\text{:}54$	55195.084	00030354003	49.958	41.505	289.185	4305.403
$2010\text{-}07\text{-}22 \ 20\text{:}57\text{:}34$	55399.834	00031770001	49.951	41.512	77.205	2180.131
2010-07-24 21:04:18	55401.875	00031770002	49.951	41.512	79.518	2042.782
2010-07-26 13:17:03	55403.542	00031770003	49.951	41.512	81.885	2040.285
2010-07-28 21:28:41	55405.875	00031770004	49.951	41.512	74.173	2172.64
2010-07-30 16:44:41	55407.667	00031770005	49.951	41.512	73.472	2105.214
2010-08-01 04:02:41	55409.167	00031770006	49.951	41.512	73.664	2118.694
2010-08-03 02:31:15	55411.083	00031770007	49.951	41.512	72.475	2412.377
2010-08-05 13:50:44	55413.542	00031770008	49.951	41.512	78.328	1985.345

表 1: Swift 衛星 XRT で取得された NGC 1275 のデータ

日付	日付 [MJD]	データ ID	RA	DEC	roll angle	露光時間
2010-08-07 01:26:14	55415.042	00031770009	49.951	41.512	72.786	2090.23
2010-08-09 17:39:15	55417.708	00031770010	49.951	41.512	70.343	2112.705
2011-07-05 03:18:53	55747.126	00091128001	49.917	41.539	85.016	1003.91
2011-07-06 00:03:32	55748.0	00091128002	49.924	41.538	82.72	1326.077
2011-07-07 05:04:53	55749.209	00091128003	49.92	41.533	87.633	1758.104
2011-07-09 $05:14:52$	55751.209	00091128004	49.919	41.538	83.892	3471.286
2011-07-10 02:10:03	55752.083	00091128005	49.915	41.555	83.17	4922.187
2013-01-21 19:47:33	56313.792	00032691001	49.896	41.495	274.515	422.047
2013-04-04 11:10:41	56386.459	00049799001	49.951	41.512	241.154	789.145
2013-07-10 16:22:39	56483.667	00049799002	49.951	41.512	83.398	651.796
2013-07-12 $22:56:32$	56485.917	00049799003	49.951	41.512	80.519	939.001
$2013\text{-}07\text{-}14\ 08\text{:}35\text{:}24$	56487.334	00049799004	49.951	41.512	84.022	5271.814
$2013\text{-}07\text{-}26\ 23\text{:}08\text{:}54$	56499.959	00049799005	49.951	41.512	80.767	3054.193
2013-08-01 01:11:39	56505.042	00049799006	49.951	41.512	75.358	1565.824
2015-02-11 08:29:04	57064.333	00092034001	49.951	41.512	258.497	2000.338
$2015 - 03 - 15 \ 00:50:31$	57096.0	00092034002	49.951	41.512	248.734	2137.698
2015-07-25 02:20:09	57228.083	00092034003	49.951	41.512	74.806	1985.345
2015-08-18 01:03:03	57252.042	00092034004	49.951	41.512	68.88	2000.338
2015-09-16 13:25:02	57281.542	00092034005	49.951	41.512	54.669	1358.531
2015-11-03 03:59:59	57329.126	00081530001	49.951	41.512	43.608	6415.023
2016-02-19 20:43:04	57437.833	00034380001	49.977	41.565	253.258	2449.845
$2016\text{-}02\text{-}21\ 17\text{:}21\text{:}54$	57439.709	00034380002	49.977	41.565	262.499	2472.311
2016-02-23 09:24:53	57441.376	00034380004	49.977	41.565	254.76	2399.89
2016-02-25 17:15:07	57443.708	00034380005	49.977	41.565	257.532	2749.527
2016-02-26 17:09:58	57444.709	00034380006	49.977	41.565	242.126	2774.51
2016-02-29 21:36:24	57447.875	00034380007	49.977	41.565	252.868	1698.159
2016-03-02 10:20:31	57449.417	00034380008	49.977	41.565	256.212	2367.426
2016-03-03 19:45:20	57450.792	00034380010	49.977	41.565	238.131	2022.804
2016-03-04 00:40:00	57451.0	00034380009	49.977	41.565	251.922	2487.295
2016-03-05 02:05:30	57452.084	00034404001	49.839	41.49	257.576	3973.167
2016-03-06 19:39:53	57453.792	00034380012	49.977	41.565	252.608	2344.961
2016-03-08 08:31:22	57455.333	00034380013	49.977	41.565	255.667	2914.337
2016-03-10 05:10:26	57457.209	00034380014	49.977	41.565	247.807	2240.075
2016-03-12 00:12:16	57459.0	00034380015	49.977	41.565	250.118	2267.545
2016-03-16 11:06:02	57463.458	00034404003	49.839	41.49	247.146	2185.126
2016-10-30 00:30:12	57691.0	00034765001	49.951	41.512	30.395	1972.878
2016-10-31 02:04:35	57692.084	00034765002	49.951	41.512	29.024	1960.372
2016-11-01 02:59:46	57693.084	00034765003	49.951	41.512	41.745	1860.481
2016-11-02 02:55:32	57694.084	00034765004	49.951	41.512	38.384	1615.739
2016-11-03 02:50:54	57695.084	00034765005	49.951	41.512	37.948	1588.27
2016-11-04 02:44:31	57696.084	00034765006	49.951	41.512	38.252	1675.674
2016-11-05 02:40:43	57697.084	00034765007	49.951	41.512	37.267	1795.553
2016-11-06 02:35:19	57698.083	00034765008	49.951	41.512	34.173	2007.82
2016-11-07 02:30:59	57699.084	00034765009	49.951	41.512	31.689	1942.891

表 1: Swift 衛星 XRT で取得された NGC 1275 のデータ

日付	日付 [MJD]	データ ID	RA	DEC	roll angle	露光時間
2016-11-08 02:26:04	57700.083	00034765010	49.951	41.512	31.012	1605.761
2016-11-09 02:21:06	57701.083	00034765011	49.951	41.512	29.473	1525.848

表 2: かなた望遠鏡 HONIR で取得された NGC 1275 のデータ

date	name	mode	OPT filt	$OPT \exp [s]$	IR filt	$IR \exp [s]$	Num
20150213	ngc1275	Imaging	V	115	J	100	3
20150213	ngc1275	ImPol	V	115	J	100	12
20150302	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20150302	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20150302	ngc1275	ImPol	R	55	J	40	12
20150424	ngc1275	Imaging	V	115	J	100	3
20150424	ngc1275	Imaging	R	85	Ks	70	3
20150424	ngc1275	ImPol	R	75	J	60	4
20151024	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	9
20151024	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	6
20151024	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20151028	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20151028	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20151028	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	124
20151030	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20151030	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20151030	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20151031	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20151031	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20151031	ngc1275	ImPol	R	45	J	30	12
20151102	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20151102	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20151102	ngc1275	ImPol	R	50	J	35	12
20151103	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20151103	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20151103	ngc1275	ImPol	R	45	J	30	12
20151104	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20151104	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20151104	ngc1275	ImPol	R	50	J	35	12
20151106	ngc1275	Imaging	V	40	J	25	3
20151106	ngc1275	Imaging	R	40	Ks	25	3
20151106	ngc1275	ImPol	R	55	J	40	12
20151115	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20151115	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20151115	ngc1275	ImPol	R	50	J	35	12
20151120	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20151120	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20151120	ngc1275	ImPol	R	50	J	35	12
20160116	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160116	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160116	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20160211	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160211	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160211	ngc1275	ImPol	R	35	J	20	12
20160730	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160730	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20160801	ngc1275	Imaging	V	55	J	40	3
20160801	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3

date	name	mode	OPT filt	$OPT \exp [s]$	IR filt	$IR \exp [s]$	Num
20160802	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160802	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160803	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160803	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160804	ngc1275	Imaging	V	105	J	90	3
20160804	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20160805	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160805	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160809	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160809	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160810	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160810	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160818	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	6
20160818	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160818	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20160818	ngc1275	ImPol	R	35	J	20	12
20160819	ngc1275	Imaging	V	115	J	100	3
20160819	ngc1275	Imaging	B.	25	Ks	10	3
20160819	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20160820	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160820	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160820	ngc1275	ImPol	R.	25	J	10	12
20160821	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160821	ngc1275	Imaging	 	25	Ks	10	3
20160821	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20160822	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20160822	ngc1275	Imaging	B	25	Ks	10	3
20160822	ngc1275	ImPol	B	25	J	10	12
20160823	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160823	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160823	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20160829	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160829	ngc1275	Imaging	 B	25	Ks	10	3
20160829	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20160831	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160831	ngc1275	Imaging	 B.	25	Ks	10	3
20160831	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20160902	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160902	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160902	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20160909	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20160909	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20160909	ngc1275	ImPol	R	25	J	10	12
20161006	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161006	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161009	ngc1275	Imaging	V	85	J	70	3
20161009	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	6
20161009	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161011	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161011	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161012	ngc1275	Imaging	V	30	J	15	4
20161012	ngc1275	Imaging	R	30	Ks	15	3
20161012	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161012	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161014	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161014	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161023	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	6
20161023	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	6
20161101	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	6

### 表 2: かなた望遠鏡 HONIR で取得された NGC 1275 のデータ

date	name	mode	OPT filt	$OPT \exp [s]$	IR filt	IR exp $[s]$	Num
20161101	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161102	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	15
20161102	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	9
20161102	ngc1275	Imaging	R	55	Ks	40	3
20161104	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161104	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161106	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161106	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161111	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161111	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161115	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161115	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161117	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20161117	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161122	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161122	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161124	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161129	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161129	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161201	ngc1275	Imaging	V	35	J	20	3
20161201	ngc1275	Imaging	R	35	Ks	20	3
20161210	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161210	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161215	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161215	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161216	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161216	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161228	ngc1275	Imaging	V	25	J	10	3
20161228	ngc1275	Imaging	R	25	Ks	10	3
20161229	ngc1275	Imaging	V	65	J	50	3
20161229	ngc1275	Imaging	R	65	$\mathbf{Ks}$	50	3

表 2: かなた望遠鏡 HONIR で取得された NGC 1275 のデータ

## 付録 C 太陽と月のガンマ線放射のテンプレートの作成方法

太陽がガンマ線放射をしていることはよく知られているが、月がガンマ線放射していることはあまり知 られていないだろう。月には大気がほぼないため宇宙線が月の表面まで達する。月の表面の物質と高エネ ルギー宇宙線が相互作用を起こすことでガンマ線が放射される。Fermi 衛星 LAT 検出器はサーベイ観測を 行っているため、場合によっては太陽と月からのガンマ線放射の影響を強く受ける事がある。具体的には黄 道と白道に近い座標の天体の解析を行う際は銀河面からの放射テンプレートと同様に太陽と月のガンマ線 放射テンプレートをソースもデルに含める。ここではこれらの太陽と月のガンマ線放射のテンプレートの 作成方法を説明する。以下で説明するテンプレートは通常状態の太陽放射のテンプレートであり、太陽フレ ア等は考慮されていない。

sun template

#### moon template

以上の様にして作成した、太陽と月の放射のテンプレートを以下の図に示す。



⇒-09 1.8e-09 2.1e-09 2.4e-09 2.7e-09 3e-09 3.3e-09 3.5e-09 3.9e-09 4.1e-09 4.4∉ (a) 太陽からのガンマ線放射のモデルテンプレート



e+00 5.92e-09 1.18e-08 1.78e-08 2.37e-08 2.97e-08 3.57e-08 4.16e-08 4.76e-08 5.35e-08 5.94 (b) 月からのガンマ線放射のモデルテンプレート

### 図 59: 作成した太陽と月からの放射モデル

## 付録 D 赤方偏移から光度距離への変換

赤方偏移から光度距離は以下の式で変換する

$$\alpha = \alpha(z, \Omega_{\Lambda}) = 1 + 2 \frac{\Omega_{\Lambda}}{1 - \Omega_{\Lambda}} \frac{1}{(1+z)^3}$$
(1)

$$x = x(z, \Omega_{\Lambda}) = \ln\left(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1}\right) \tag{2}$$

$$\Psi(x) = 3x^{1/3}2^{2/3} \left[ 1 - \frac{x^2}{252} + \frac{x^4}{21060} \right]$$
(3)

$$d_L = \frac{c}{3H_0} \frac{1+z}{\Omega_{\Lambda}^{1/6} (1-\Omega_{\Lambda})^{1/3}} [\Psi(x(0,\Omega_{\Lambda})) - \Psi(x(z,\Omega_{\Lambda}))]$$
(4)

ここで H<sub>0</sub> はハッブル定数、c は光速である。

# 付録 E 各 XRT データのスペクトル

• PC mode data





🛛 61: ID:00036524002 date:2007-12-06









🗷 64: ID:00031770002 date:2010-07-24





00031770005





🛛 67: ID:00031770005 date:2010-07-30

Energy (keV)

shiki 8-Feb-2017 05:35






⊠ 70: ID:00031770008 date:2010-08-05



⊠ 71: ID:00031770009 date:2010-08-07





⊠ 73: ID:00091128001 date:2011-07-05









⊠ 76: ID:00091128004 date:2011-07-09







































🗷 88: ID:00092034004 date:2015-08-18



🛛 89: ID:00092034005 date:2015-09-16

2 Energy (keV)





**2** 91: ID:00034380001 date:2016-02-19









**2** 94: ID:00034380005 date:2016-02-25





00034380008





⊠ 97: ID:00034380008 date:2016-03-02

2 Energy (keV)

















00034380014







2 Energy (keV)









⊠ 106: ID:00034765001 date:2016-10-30



🗵 107: ID:00034765002 date:2016-10-31















🗵 111: ID:00034765006 date:2016-11-04



⊠ 113: ID:00034765008 date:2016-11-06









## 🕱 116: ID:00034765011 date:2016-11-09





⊠ 118: ID:00087311001 date:2017-01-01



⊠ 119: ID:00087311002 date:2017-01-02

<sup>•</sup> WT mode data



## $\boxtimes$ 120: ID:00030354001 date:2006-01-06





⊠ 122: ID:00031763001 date:2010-07-15









 $\boxtimes$  125: ID:00032691001 date:2013-01-21









⊠ 128: ID:00031770012 date:2017-01-03



⊠ 129: ID:00031770013 date:2017-01-05

00031770015







2 Energy (keV)





















🗵 137: ID:00031770021 date:2017-01-29

## 付録 F Fermi 解析に役立ったらいいな

ここでは Fermi データを解析するにあたって 3 年間で色々試行錯誤した結果を記述する。ほぼ日記みた いなもんである。付録なのでよかろ。

誤差の求め方

以下の話はなんとも文章で表現が難しく、分かりにくいかもしれないのでよろしく。ここでは Fermi 解析における誤差の求め方を記述する。gtlike を走らせると results.dat が出力され、特に optimizer NEWMINUIT では天体のスペクトル情報が誤差付きで出力される。誤差は+/-の形 (例えば 4.10123 +/- 1.81526 とか)で表されるが、厳密に誤差を計算すると上側誤差と下側誤差が必ずしも同じ値を とらない。(統計が少ないから左右非対称になる?詳しくは分かりませんすみません。)では誤差の評 価方法を説明する。

gtlike を走らせ終わった際に、以下の様な数値が画面上に出力される。 WARNING: Fit may be bad in range [1442.25, 1883.41] (MeV) WARNING: Fit may be bad in range [20800.8, 27163.4] (MeV)

Total number of observed counts: 8981 Total number of model events: 8980.92

-log(Likelihood): 37267.59828

これらの数値は results.dat には出力されない。これらは書いてあるとおりの意味だが一応説明して おくと、このエネルギー範囲でフィットがうまくいってない、トータルのカウント数とフィットした 後の理論的なカウント数、フィッティングの際に計算された尤度、を意味する。この尤度に着目す る。この値は xml モデル内の全てのフリーパラメータがベストフィットである場合の尤度である。 それでは中心天体の Prefactor の値を固定し、ベストフィットの値から数値を変えて gtlike を走らせ るとどうなるだろうか?実際にやってみるとわかるが、-log(Likelihood)の値は大きくなる。最尤法 は-log(Likelihood)を最小になるようなパラメータをベストフィットとしているため、当然だ。次は各 解析結果の-log(Likelihood)の差を見ていく。例えばPrefactorの値をベストから 1.0 増やした時、ベス トフィットの-log(Likelihood)の値から 0.5 増加したとする (上記に習えば 37268.09828 という値が出力 されたとする)。この時、Prefactor の +1.0 という値は  $1\sigma$  誤差を意味する。同様に、-log(Likelihood) の値が1.35、1.92だけ増加するような Prefactor の値が、それぞれ $2\sigma$ 誤差、 $3\sigma$ 誤差を表す。これらの 操作で上側誤差を求めることが出来る。同じようにして、ベストな Prefactor の値から適当に減らした 値で固定したモデル解析するとある値で-log(Likelihood)の差が0.5となる。これが下側のPrefactor の誤差である。Prefactor の値を増やそうが減らそうが、ベストフィットから離れるセンスであるた め、-log(Likelihood) は必ず上昇する。このようにして上下の誤差を正確に見積もる。results.dat に 書かれているデフォルトの誤差は、おそらく上側の 1σ 誤差を両方につけていると思われる ( 経験則、 本当かどうか検証してないのでわかりません。

## この方法で厳密に誤差をつけている人がどれだけいるかはわからない … 、やっている人はいないかも

pylikelihood でアッパーリミットを求める

数日スケールの短い時間ビンでの解析を行う場合、中心天体の TS が 25 以下になってしまうことがあ る。中には TS がほぼ 0 になってしまうことも。この様な場合は検出点ではなく、アッパーリミット としてライトカーブに表すのが一般的である。(例えば Tanaka et al. では TS が 9 以下の時期はアッ パーリミットとしてライトカーブに示している。) アッパーリミットの計算は上記の"誤差の求め方" の方法で計算してもよいが、Science tools 内の python モジュールである pylikelihood 等を用いれば サクっと計算してくれる。Unbinned 解析と Binned 解析では手順が違うので各々の解析手順を説明 する。以下では Science tools をソースしていることを前提とする。

```
- Unbinned 解析
```

容易するもの:gtmktime.fits、gtexpmap.fits、gtltcube.fits、SC.fits、gtlikeの隠しコマンド sfile で出力したフィット済みの xml モデル (中心天体の Index は fix しており、Prefactor のみ free と する)

以下は python 内での記述方法である。 import gt\_apps

import pyLikelihood

import UpperLimits

import UnbinnedAnalysis

import os

```
obs = UnbinnedAnalysis.UnbinnedObs("gtmktime.fits","SC.fits",
expMap="gtexpmap.fits",expCube="gtltcube.fits",irfs="P8R2_SOURCE_V6")
like = UnbinnedAnalysis.UnbinnedAnalysis(obs,"model.xml",optimizer='NEWMINUIT')
likeobj = pyLikelihood.NewMinuit(like.logLike)
like.fit(verbosity=0,covar=True,optObject=likeobj)
results = like.model["天体名"]
like.Ts("天体名")
flux = like.flux("天体名",emin=100)
flux_error =like.fluxError("天体名",emin=100)
ul = UpperLimits.UpperLimits(like)
sigma1 = str(ul["天体名"].compute(emin=100,emax=300000,delta=0.5 ))
sigma3 = str(ul["天体名"].compute(emin=100,emax=300000,delta=1.35 ))
```

```
変数 flux、flux_err の中には gtlike で出力された results.dat 内に出力される値とほぼ一致する。何
をしているかは変数名でざっくりと察して欲しい (わかるっしょ、なんか疲れてきた 2017/02/21)。
```

```
delta=0.5 としている sigma1~の行を打ち込むと以下のような数字の列がでる。
```

```
0 3.994536218 3.87800755561e-05 5.91541276409e-08
```

- 1 4.244536218 0.00902034260798 6.28563176082e-08
- 2 4.494536218 0.0388078067626 6.65585075755e-08

```
3 4.744536218 0.0889669374737 7.02606975428e-08
```

4 4.994536218 0.159133053232 7.39628875101e-08

```
5 5.244536218 0.248957091877 7.76650774774e-08
```

6 5.494536218 0.358104348539 8.13672674446e-08

```
7 5.744536218 0.486253423391 8.50694574119e-08
```

```
8 5.994536218 0.633095281257 8.87716473792e-08
```

ここでアッパーリミットの計算をしている。左から、通し番号、Prefactor の値、この Prefactor の場合の-log(Likelihood) とベストフィットの場合の-log(Likelihood) の差、この Prefactor の場合のフラックスの値、である。これは、Prefactor を適当に変える ⇒ ベストフィット との-log(Likelihood) の差を求める ⇒ 指定されている delta=0.5 よりも値が小さい ⇒ もうー 回計算、という流れだと思われる。最後の 7 番と 8 番のところに注目すると、ここで始めて 0.486253423391→0.633095281257 となり、0.5 を越えている。つまり、-log(Likelihood) の差が 0.5 となる Prefactor の値は 5.744536218 と 5.994536218 の間にあることがわかる。7 番と 8 番 から-log(Likelihood) が 0.5 になる (=1 $\sigma$  アッパーリミット) ような Prefactor とフラックスを求

めていると思う。多分。知らんけど。これで sigma1 という変数に何らかの数値が入ったわけだ が、実際に print してみると print sigma1 (8.771445977731983e-08, 5.9231468774183034) こんな感じでフラックスと Prefactor の 1 $\sigma$  アッパーリミットが詰まっている。同様に変数 sigma2、 sigma3 にはフラックスと Prefactor の 2 $\sigma$  アッパーリミットと 3 $\sigma$  アッパーリミットが詰まって いる。 print sigma2, sigma3 (1.0568958928480381e-07, 7.1369642170420811) (1.1478684946968799e-07, 7.7512803559541226) このようにして、68% confidence level、90% confidence level、95% confidence level のアッパー リミットを計算していた。

- Binned 解析
   基本的には Unbinned の時と操作は変わらないが、入れるデータが違う。
- 知っているとたまに役立つ gt コマンド
  - gtfindsrc
  - gtexposure

DSVAL5: 0:100

- gtvcut

gtmktime で作成したイベントファイルに対して使用すると、gtselect で指定した選考条件等が 見れるコマンド。使うと以下の様な情報が出力される。 DSTYP1: TIME DSUNI1: s DSVAL1: TABLE DSREF1: :GTI GTIs: (suppressed) DSTYP2: POS(RA,DEC) DSUNI2: deg DSVAL2: CIRCLE(64.5887,38.0266,15) DSTYP3: BIT\_MASK(EVENT\_CLASS, 128, P8R2) DSUNI3: DIMENSIONLESS DSVAL3: 1:1 DSTYP4: ENERGY DSUNI4: MeV DSVAL4: 100:300000 DSTYP5: ZENITH\_ANGLE DSUNI5: deg