

フェルミ衛星による近傍銀河からの
ガンマ線放射の探査

広島大学理学部物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外天文研究室
原尾 達也

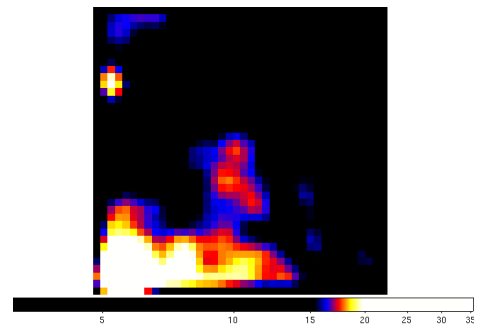
主査:深澤泰司 副査:伊賀文俊

平成22年4月1日

概要

宇宙には様々な銀河が存在している。形で言うと渦巻銀河や楕円銀河などがあり、活動性で言うと、AGN やスターバースト銀河などがある。そして、これらの銀河の中にはガンマ線を放射している銀河が存在していることが分かり始めた。銀河からのガンマ線放射は逆コンプトン散乱、 π^0 崩壊、電子の制動放射からなり、高エネルギーの電子・陽子の宇宙線と星間ガスや低エネルギー光子との相互作用によって放射されている。フェルミ衛星で観測する以前はブレイザー天体しかガンマ線を放射していないと考えられていた。しかし、フェルミ衛星で観測を始めるとブレイザー天体以外にも電波銀河やスターバースト銀河もガンマ線を放射していることが分かった。これはフェルミ衛星が以前の衛星に比べて広いエネルギー領域、広視野、高感度や高い位置分解能を持っているからである。電波銀河ではジェットが発達しているため、ジェットの中で逆コンプトン散乱が起き、スターバースト銀河では宇宙線の密度が高いため、 π^0 崩壊が起こるためガンマ線を放射していると考えられている。

本研究では、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡のデータを解析し、近傍の銀河でどんな種類の銀河がガンマ線を放射しているかを調べた。銀河の選定は電波銀河は電波で明るい銀河と暗い銀河、スターバースト銀河は電波や赤外で明るい銀河、その他の銀河は単純に距離が近い銀河を選んだ。フェルミ衛星で得られたデータを用いて、銀河1つ1つのガンマ線の有意度を求め、銀河の種類との相関を調べた。



NGC4945(中心)の
ガンマ線イメージ

目次

第1章	序論	7
1.1	研究の背景	7
1.2	研究の目的	7
第2章	銀河とガンマ線放射について	8
2.1	銀河の種類について	8
2.1.1	普通の銀河	8
2.1.2	AGN(Active Galactic Nuclei)	9
2.1.3	スターバースト銀河	11
2.2	ガンマ線の放射原理	11
2.2.1	逆コンプトン散乱	11
2.2.2	π^0 崩壊	11
2.2.3	電子の制動放射	12
2.3	ガンマ線の観測例	13
第3章	フェルミ衛星と解析方法について	15
3.1	フェルミ衛星について	15
3.1.1	概要	15
3.1.2	LAT 検出器について	16
3.2	データの解析方法	16
3.2.1	データについて [7]	16
3.2.2	最尤法	18
3.2.3	イベントセレクション	19
3.2.4	解析方法	20
第4章	ガンマ線を放射する銀河の解析	22
4.1	銀河の選定	22
4.2	カウントマップの作成	22
4.3	各天体の TS value	28
4.3.1	モデルフィッティング	28

4.3.2	解析時間を変化させたときの TS value	30
4.4	電波・赤外との相関	33
4.5	星形成率と観測されたガンマ線光度	35
4.6	電波銀河	35
第5章	まとめ	40

目次

2.1	楕円銀河 (NGC4486)	8
2.2	渦巻銀河 (M74)	8
2.3	不規則銀河 (NGC4449)	8
2.4	ハッブルの音叉図	9
2.5	銀河面のガンマ線	9
2.6	AGN	10
2.7	逆コンプトン散乱	12
2.8	π_0 崩壊	12
2.9	電子の制動放射	13
3.1	フェルミ衛星	15
3.2	M84(中心)のガンマ線イメージ	21
3.3	M84(赤)のスペクトル	21
4.1	3C111の CMAP	24
4.2	3C111の histogram	24
4.3	M84の CMAP	24
4.4	M84の histogram	24
4.5	IC1459の CMAP	24
4.6	IC1459の histogram	24
4.7	NGC741の CMAP	24
4.8	NGC741の histogram	24
4.9	NGC1218の CMAP	24
4.10	NGC1218の histogram	24
4.11	NGC1316の CMAP	24
4.12	NGC1316の histogram	24
4.13	NGC4261の CMAP	24
4.14	NGC4261の histogram	24
4.15	NGC4472の CMAP	24
4.16	NGC4472の histogram	24

4.17	NGC1332 の CMAP	25
4.18	NGC1332 の histogram	25
4.19	NGC1404 の CMAP	25
4.20	NGC1404 の hitogram	25
4.21	NGC3379 の CMAP	25
4.22	NGC3379 の histogram	25
4.23	M31 の CMAP	25
4.24	M31 の histogram	25
4.25	NGC247 の CMAP	25
4.26	NGC247 の histogram	25
4.27	NGC1313 の CMAP	25
4.28	NGC1313 の histogram	25
4.29	NGC2403 の CMAP	25
4.30	NGC2403 の histogram	25
4.31	M83 の CMAP	25
4.32	M83 の histogram	25
4.33	IC342 の CMAP	26
4.34	IC342 の histogram	26
4.35	NGC2903 の CMAP	26
4.36	NGC2903 の histogram	26
4.37	NGC4736 の CMAP	26
4.38	NGC4736 の histogram	26
4.39	NGC5457 の CMAP	26
4.40	NGC5457 の histogram	26
4.41	NGC6946 の CMAP	26
4.42	NGC6946 の histogram	26
4.43	Circinus Galaxy の CMAP	26
4.44	Circinus Galaxy の histogram	26
4.45	M51 の CMAP	27
4.46	M51 の histogram	27
4.47	NGC1068 の CMAP	27
4.48	NGC1068 の histogram	27
4.49	NGC4945 の CMAP	27
4.50	NGC4945 の histogram	27
4.51	M81 の CMAP	27
4.52	M81 の histogram	27

4.53	NGC4258 の CMAP	27
4.54	NGC4258 の histogram	27
4.55	NGC1316 の拡大したカウントマップ	28
4.56	M83 の拡大したカウントマップ	28
4.57	NGC741 の TS	30
4.58	NGC1218 の TS	30
4.59	NGC1316 の TS	30
4.60	NGC4472 の TS	30
4.61	NGC1404 の TS	30
4.62	M31 の TS	30
4.63	NGC2403 の TS	30
4.64	M83 の TS	30
4.65	IC342 の TS	30
4.66	NGC6946 の TS	31
4.67	Circinus Galaxy の TS	31
4.68	M51 の TS	31
4.69	NGC1068 の TS	31
4.70	NGC4945 の TS	31
4.71	IC1459 の TS	31
4.72	M84 の TS	31
4.73	NGC4261 の TS	31
4.74	NGC1332 の TS	31
4.75	NGC3379 の TS	31
4.76	NGC247 の TS	31
4.77	NGC1313 の TS	32
4.78	NGC2903 の TS	32
4.79	NGC4736 の TS	32
4.80	M81 の TS	32
4.81	NGC4258 の TS	32
4.82	電波フラックス vs ガンマ線フラックス	34
4.83	赤外線フラックス vs ガンマ線フラックス	34
4.84	銀河の種類別	37
4.85	TS が 25 以上	38

表 目 次

2.1	NGC1275、Cen A、M87 のスペクトル情報 [2] [4]	14
2.2	NGC1275、Cen A、M87 のスペクトル情報 [5]	14
3.1	フェルミ衛星の軌道	15
3.2	LAT と EGRET の性能	16
3.3	観測条件	20
4.1	解析した天体 [8]	23
4.2	天体の TS	29
4.3	有意度が 9 以上の天体のスペクトル情報	32
4.4	有意度が 9 未満の天体のスペクトル情報	33
4.5	ガスの質量、星形成率、ガンマ線光度	36

第1章 序論

1.1 研究の背景

宇宙にある銀河には様々な種類の銀河があり、各々の銀河が様々な波長の電磁波を放射している。例えば、スターバースト銀河である。スターバースト銀河では電波、赤外領域で強い電磁波を放射している。そして、1970年ごろから100MeV以上の高エネルギーガンマ線の観測が衛星を使って行われるようになった。COS-B衛星(1975年~1982年)やコンプトン衛星(1991年~2000年)などで観測を行っていたときは、ガンマ線を放射する銀河はブレーザーばかりであった。ブレーザーとは、活動銀河の中心核から出ているジェットを真正面から観測していると考えられている天体である。その後、2008年に打ち上げられたフェルミガンマ線宇宙望遠鏡(以下フェルミ衛星 旧名GLAST)で観測を開始した。すると、電波銀河やスターバースト銀河もガンマ線を放射していることが判明した。また、電波銀河の一部はTeV領域のガンマ線も放射していることも分かった。これら銀河からの高エネルギーのガンマ線は逆コンプトン散乱、 π^0 崩壊や電子の制動放射によって放射されていると考えられている。フェルミ衛星の主検出器であるLAT検出器(LargeAreaTelescope)は、1991年から活躍したコンプトン衛星搭載のEGRET検出器の数十倍の感度を持ち、広い視野、優れた位置分解能で20MeV~300GeVのエネルギー範囲を持っている検出器で、全天を数時間でサーベイできる。

1.2 研究の目的

本論文では、ガンマ線領域で近傍の様々な種類の銀河付近のフェルミ衛星のデータを解析することで、ガンマ線を放射している銀河はどんな銀河かを明らかにすることを目的としている。本論文ではまず、宇宙にはどんな銀河があり、どのような原理でガンマ線が放射されているのかを述べる。それから、フェルミ衛星で得られたデータを用いて、ガンマ線領域での近傍銀河の解析を行った。

第2章 銀河とガンマ線放射について

2.1 銀河の種類について

銀河とは数百億～数千億個の恒星や星間物質が重力的に集まった天体で、直径はだいたい0.1～10kpcである。銀河には様々な形状があり、楕円銀河(図2.1)、渦巻銀河(図2.2)、不規則銀河(図2.3)などが存在する。これらの分類はハッブルの音叉図によって分類されている(図2.4)。また、銀河は様々な活動性を持っており、AGN(Active Galactic Nuclei)やスターバースト現象がある。



図 2.1: 楕円銀河 (NGC4486)



図 2.2: 渦巻銀河 (M74)

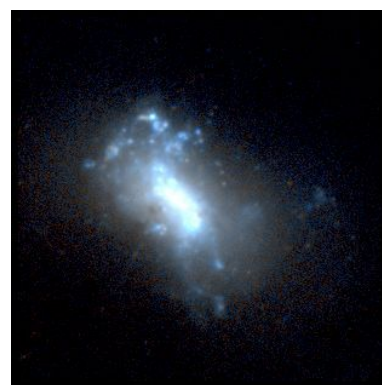


図 2.3: 不規則銀河 (NGC4449)

2.1.1 普通の銀河

銀河には渦巻銀河、楕円銀河などがある。渦巻銀河は明るい中心核を持ち、中心核付近にはバルジと呼ばれる星が密集する領域がある。図2.4の右側にあるほどバルジは小さくなる。バルジの外側にはハローと呼ばれる領域があり、球状星団やダークマターが存在する。楕円銀河は真円に近いものから短軸が長軸の3割しかない楕円のものまである。楕円銀河は星間ガスが少なく、黄色い光を放射する星が多い。これは若い星が少ないことを意味する。普通の銀河も電磁波を放射していて、黒体放射、シンクロトロン放射、熱制動

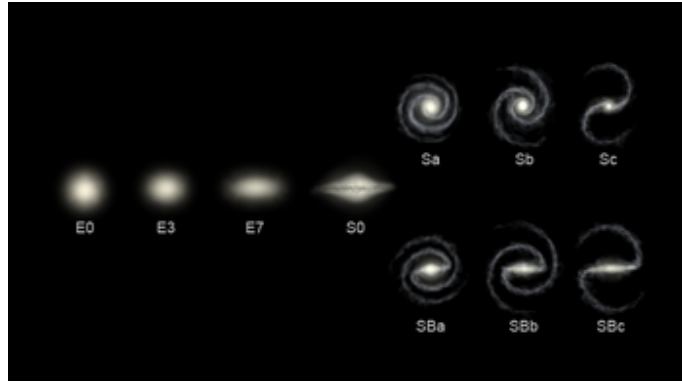


図 2.4: ハッブルの音叉図

放射などがある。黒体放射が主要で銀河に存在する数十億の星から放射されていて赤外線～可視光を放射する。シンクロトロン放射は大質量の超新星残骸から放射され電波領域を放射する。熱制動放射は HII 領域 (水素ガスがイオン化したもの) から放射されていて硬 X 線などを放射する。また超新星爆発やパルサーなどで生成された宇宙線が星間ガスの原子と相互作用しガンマ線を放射する。例えば、我々のいる天の川銀河も普通の銀河に分類され、銀河面に沿って明るいガンマ線が放射されている。(図 2.5)

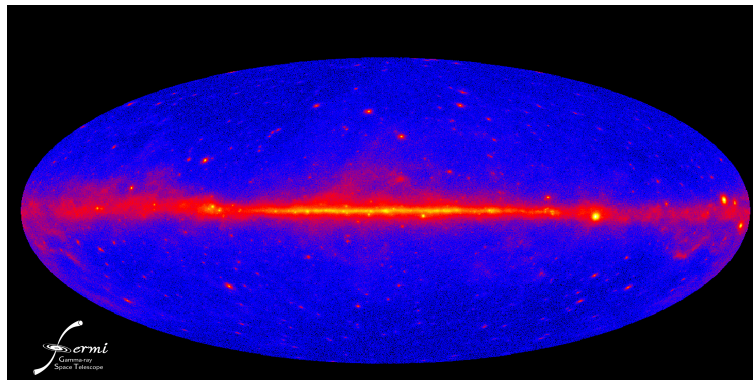


図 2.5: 銀河面のガンマ線

2.1.2 AGN(Active Galactic Nuclei)

銀河の中には銀河中心核が可視光で非常に明るく、時間変動が非常に激しい銀河がある。これは AGN と呼ばれ、太陽の 100 万倍の質量を持つ巨大ブラックホールが中心に存在している。その外側に降着円盤があり、さらに外側にトラス状のガスがある。このガスがブラックホールに引き寄せられ、角運動量を持っているので降着円盤に落ち込み、重力エネルギーを失い高速で回転し始める。そうするとガス同士が激しく衝突し高温になり、

可視から紫外線までの激しい放射をする。また、図 2.6 のように AGN の中にはジェットを伴う銀河もあり、大きいもので 1Mpc に達するジェットを出している銀河がある。ジェットとは中心の巨大ブラックホールから高速の電子などが放出されているもので、中心付近のプラズマの電子などがブラックホールの磁場により加速されたものである。

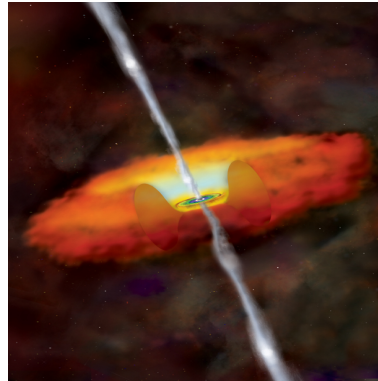


図 2.6: AGN

電波銀河

電波銀河は、普通の銀河に比べ数千倍の光度の電波を放射していて、主に楕円銀河の形状をしている。電波銀河では多くはジェットを伴っていて、ジェットの中を高速で運動する電子が磁場により運動の方向を変えられ、シンクロトロン放射により電波を放射している。これにより電波の光度が高くなっている。銀河の外側から電波放射の鮮明な‘ローブ’が観測され、細いジェットが銀河の中心からローブまで出ているように観測された。例えば、Cygnus A や Centaurus A などが有名である。ジェットの電波はシンクロトロン放射と考えられ、相対論的な電子がたくさん存在することが必要となる。宇宙線が銀河系外由来ならば、これらの天体は宇宙線放射の有力な候補となった。これらの天体は、電波だけでなく可視、X線領域で明るく輝いている。そして、ジェットが発達しているためジェット中の高エネルギーの電子と光子が衝突し、逆コンプトン散乱が起き、ガンマ線が放射されていると考えられている。

セイファート銀河

セイファート銀河は電波銀河と同じ AGN の一種であるが、ジェットが発達していないため、電波ではそれほど明るくないが、可視から X 線で明るい。形状は渦巻銀河や不規則銀河が多く、水素、ヘリウム、窒素や酸素などの輝線が非常に明るく観測される。セイファート銀河がガンマ線を放射しているかどうかはまだ解明されていない。

2.1.3 スターバースト銀河

スターバースト銀河は二つの銀河が相互作用し、星形成が他の銀河に比べて著しく活発になっている銀河である。二つの銀河が相互作用すると、もう一方の銀河から潮汐力を受け、ガスが圧縮されやすいためである。こうした銀河では星が次々と生成されやすく、超新星爆発も次々を起こっている。電波、赤外領域で高い光度を持つことが特徴である。赤外線は活発な星形成によって作られた、大質量星などが周りの星間ガスを暖めることにより放射される。また、電波は銀河の磁場により宇宙線から、シンクロトロン放射で放射されている。超新星爆発が次々と起こると、宇宙線の密度が増加すると考えられる。宇宙線の密度が増加することにより、宇宙線と星間ガスの原子が衝突し、電波、硬 X 線やガンマ線を放射する。実際、スターバースト銀河は電波で明るく、同じようにスターバースト銀河はガンマ線で明るいと予想されていた。

2.2 ガンマ線の放射原理

銀河からガンマ線が放射される主な過程は逆コンプトン散乱・ π^0 崩壊・電子の制動放射の3つであり、高エネルギー電子・陽子の宇宙線と星間ガスや、低エネルギー光子との相互作用で放射される。宇宙線は高エネルギーまで加速された電子や陽子のことで、その起源は熱的なものではなく、超新星残骸によるものだと考えられている。星間ガスは宇宙空間に存在する水素、ヘリウムを主成分としたガスであり、高密度に凝縮すると核融合を起こし、恒星へとになっていく。

2.2.1 逆コンプトン散乱

逆コンプトン散乱とは、高エネルギーの電子が低エネルギーの光子と非弾性散乱し、高エネルギーの光子を放射する現象である。放射されるガンマ線は元の光子のエネルギーの γ_e^2 倍のエネルギー程度になる。ここで γ_e は電子のローレンツ因子である。そして、電波や赤外などの光子と非弾性散乱し、X 線やガンマ線として放射するとき、散乱電子が $I_e(E_e) = K_e E^{-\Gamma_e}$ のべき分布スペクトルを持っているとすると、放射されるガンマ線のスペクトルは $E_\gamma^{-(\Gamma_e+1)/2}$ のようになる。

2.2.2 π^0 崩壊

高エネルギーの陽子と星間ガスの原子が衝突したときに、以下の反応のように π^0 粒子が放出される。

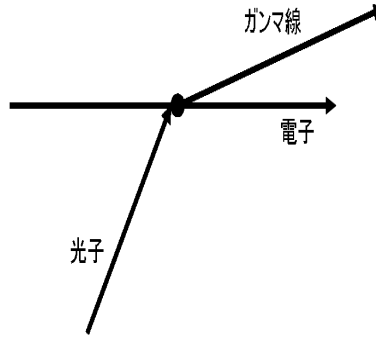


図 2.7: 逆コンプトン散乱

$$p + p \rightarrow N + N + n_1(\pi^+ + \pi^-) + n_2(\pi^0)$$

ここで p は陽子、 N は陽子や中性子、 π は π 中間子を表す。 n_1 と n_2 は整数を表し、1GeV 程度の陽子同士の場合 $n_1 = n_2 = 1$ となる。そして π^0 粒子は寿命が極めて短く、 8.4×10^{-17} 秒で崩壊する。 π^0 粒子が崩壊するときに、以下の反応のように 2 つのガンマ線が放射される。

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

π^0 粒子の静止質量は約 135MeV なので約 68MeV のエネルギーを持つガンマ線が放射される。

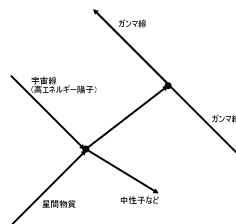


図 2.8: π_0 崩壊

2.2.3 電子の制動放射

高エネルギーの電子が原子核などが作り出す電場によって進行方向が変化するとき、その加速度の 2 乗に比例した光子を放射する。この放射は制動放射と呼ばれている。電子のスペクトルがインデックス Γ_e のべきによって特徴づけられるとき、ガンマ線のスペクト

ルは Γ_γ で $\Gamma_e \simeq \Gamma_\gamma$ のインデックスを持つ。制動放射からのガンマ線は放射電子と同じ程度、もしくはそれよりも低いエネルギーを持つ。

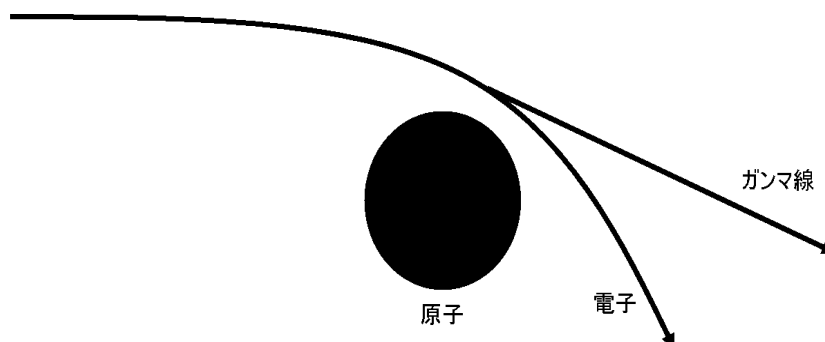


図 2.9: 電子の制動放射

2.3 ガンマ線の観測例

1991年～2000年に活躍したコンプトン衛星の EGRET 検出器によりガンマ線を放射する銀河が約 300 個発見された。これらの銀河は全てブレイザー天体であり、中心核から出ているジェットからの逆コンプトン散乱によりガンマ線が放射されている。ブレイザー天体とは中心核から出ているジェットが我々の視線方向に向いている銀河である。しかし、フェルミ衛星で観測を開始すると 11ヶ月で出されたカタログでは約 500 個のブレイザーを検出した。

EGRET 検出器によりブレイザー以外の天体で Cen A、3C111、NGC6251 などの付近でガンマ線源が発見された。この発見で、ジェットが正面を向いていなくても、逆コンプトン散乱によって電波銀河からガンマ線が放射されている可能性があることを示唆した。しかし、観測されたどの銀河も有意度が小さかった。[2] その後 2000 年代に入り、M87 では TeV 領域のガンマ線が観測された。M87 は Virgo 銀河団の中に位置し、中心のブラックホールが 3.2×10^9 太陽質量の銀河である。中心核から 2kpc のプラズマのジェットが出ていて、我々の視線方向から約 30° 程傾いている。ジェットが視線方向とずれているので M87 はブレイザーではないので、新しい TeV ガンマ線の放射線源となった。電波銀河で TeV ガンマ線を放射するので、超高エネルギー宇宙線 (10^{20} eV) を生成するような加速機構があることが示唆された。[3] そして、2008 年にフェルミ衛星では NGC1275、Cen A、M87 において高い有意度でガンマ線が検出された。M87 では $TS=108.5$ で 10.4σ 、NGC1275 においては $TS=1206.6$ で 35σ で検出された。NGC1275 と M87 のスペクトル情報を表 2.1 に示す。

	NGC1275	M87
Flux (potons cm ⁻² s ⁻¹)	$(2.10 \pm 0.23) \times 10^{-7}$ (>100MeV)	$(2.45 \pm 0.63) \times 10^{-8}$ (>100MeV)
Index	2.17 ± 0.04	2.26 ± 0.13

表 2.1: NGC1275、Cen A、M87 のスペクトル情報 [2] [4]

フェルミ衛星は新たなガンマ線源としてスターバースト銀河 (M82、NGC253) を検出し、これらの有意度はそれぞれ 4.8σ と 6.8σ で検出された。[5] また、この2つの銀河は最近になって TeV 領域のガンマ線も検出された。VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) で 4.8σ で 100GeV 以上のガンマ線を検出し、700GeV 以上の光度が $2 \times 10^{32} \text{W}$ であった。[6] M82 と NGC253 スペクトル情報を表 2.2 に示す。

	M82	NGC253
Flux (potons cm ⁻² s ⁻¹)	$(1.6 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}}) \times 10^{-8}$ (>100MeV)	$(0.6 \pm 0.4_{\text{stat}} \pm 0.4_{\text{sys}}) \times 10^{-8}$ (>100MeV)
Index	$2.2 \pm 0.2_{\text{stat}} \pm 0.05_{\text{sys}}$	$1.95 \pm 0.4_{\text{stat}} \pm 0.05_{\text{sys}}$

表 2.2: NGC1275、Cen A、M87 のスペクトル情報 [5]

上記のようにコンプトン衛星ではブレイザーだけがガンマ線を放射していたが、フェルミ衛星の観測によりブレイザーだけでなく、電波銀河やスターバースト銀河もガンマ線を放射していることを示し、さらに他の銀河もガンマ線を放射している可能性を示した。

第3章 フェルミ衛星と解析方法について

3.1 フェルミ衛星について

3.1.1 概要

これまでにガンマ線天文衛星はOSO-III(1967~1968年)からEGRET検出器搭載のコンプトン衛星(1991年~2000年)まで数機の衛星が打ち上げられ、約300個のガンマ線点源を検出した。また、位置決定の精度が低かったため、他波長において同定されていない天体も多かった。しかし、2008年6月11日にフロリダ州ケープ・カナベラルから打ち上げられたフェルミ衛星(図3.1)では11ヶ月で出されたカタログで、これまでの検出ガンマ線点源数を大きく上回る約1400個の点源を検出した。このフェルミ衛星はアメリカ、日本、イタリア、フランス、スウェーデン、ドイツの国際協力開発のガンマ線天文衛星である。フェルミ衛星の軌道を表3.1に示す。

軌道高度	560km
軌道傾斜角	28.5°
周回周期	95分

表 3.1: フェルミ衛星の軌道



図 3.1: フェルミ衛星

フェルミ衛星にはLAT(Large Area Telescope)とGBM(GLAST Burst Monitor)の2つの検出器が搭載されている。LATはフェルミ衛星の主検出器で、20MeV~300GeV広いエネルギー領域、広視野、優れた位置分解能を持っている。GBMは12個のNaIと2個のBGOシンチレーターから構成されている。地球の方向以外に感度を持っており、ガンマ線バーストなどの突発的な現象を即座に感知し、アラートを出す。また、場合によってはLATを突発現象の方向に向けるトリガーを発生させる。

3.1.2 LAT 検出器について

LAT 検出器は電子・陽電子対生成型ガンマ線検出器で、ガンマ線の到来方向を決定するトラッカー部と、エネルギーを測定するカロリメーター部が垂直に置かれている。これら2つで1つのモジュールとして 4×4 のアレイ構造となっている。さらに、それらを囲むようにACD(Anti Coincidence Detector)があり、バックグラウンドを取り除いている。表3.2に1991年~2000年に活躍したコンプトン衛星に搭載されていたEGRET検出器とLAT検出器の性能の比較を示す。LATがEGRET検出器に比べて約30倍感度がよ

	LAT(フェルミ衛星)	EGRET(コンプトン衛星)
エネルギー領域	20MeV ~ 300GeV	20MeV ~ 30GeV
有効面積	$\sim 9000\text{cm}^2(1 \sim 10\text{GeV})$	1500cm^2
視野	$> 2\text{sr}$	0.5sr
角度分解能	$3.2^\circ(100\text{MeV})$ $0.1^\circ(10\text{GeV})$	$5.8^\circ(100\text{MeV})$
エネルギー分解能	$6\%(10\text{GeV})$	10%
位置決定精度	$< 0.4'$	$15'$
感度	$4 \times 10^{-9}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$10^{-7}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

表 3.2: LAT と EGRET の性能

くなったのは、トラッカー部にあるSSD(Silicon Strip Detector)のおかげである。デッドストリップ率が0.01%以下で、 2.5nAcm^{-2} という低いリーク電流がLATの高感度を生み出している。このSSDは広島大学と浜松ホトニクスが開発・製造を行った検出器で、約1万枚のSSDがLATに使用されている。

3.2 データの解析方法

ここではフェルミ衛星で得られたデータの解析方法について説明する。今回の解析にはScienceToolsと呼ばれる解析ツールを用いた。

3.2.1 データについて [7]

フェルミ衛星から送られてきたデータはraw dataと呼ばれ、2つの過程を経て解析しやすい形式にされる。

- level 0 プロセス (raw data→level 0 data)
raw data を衛星情報と検出器情報に分離する。衛星情報は衛星の位置や姿勢など、検出器情報は全粒子のイベント到来時間、エネルギーなどを含んでいる。
- level 1 プロセス (level 0 data→level 1 data)
level 0 data の粒子飛跡の再構築を行い、イベント粒子を特定する。

これらの過程で作られたデータは多くの情報を持っており、サイズも膨大で解析には不便である。そこで、荷電粒子の情報などを取り除いた、必要な情報を FITS(Flexible Image Transport System) という形式に変換して用いる。FITS ファイルには 2 種類あり、FT1 ファイルと FT2 ファイルに分けられる。

- FT1 ファイル
1 つの光子ごとのエネルギー、到来方向や時間などが時系列で並べられている。
- FT2 ファイル
衛星の位置や livetime などの情報を持っている。

FT1 ファイルには CTB_CLASS_LEVEL という情報があり、これはイベントがガンマ線である確かさである。CTB_CLASS_LEVEL には三段階あり、それぞれ Transient Class、Saource Class、Diffuse Class である。TransientClass がガンマ線である確率が一番低く、Diffuse Class が一番高い。今回は不定性を避けるために、ガンマ線である確率が一番高い Diffuse Class のみを用いて解析を行った。

ScienceTools

今回、フェルミ衛星から得られたデータを解析するソフトとしてフェルミ衛星用解析ツール ScienceTools を用いた。このソフトは SLAC(Stanford Linear Accelerator Center) で開発されたソフトであり、イベントのセレクションからモデルフィッティングまで一連の解析を行うことができる。今回解析に用いた ScienceTools のバージョンは v9r15p2、レスポンスは P6_V3_DIFFUSE である。以下に各コマンドについて説明する。

- gtselect
FT1 ファイルから必要な領域を切り出し、FT1 ファイル形式で出力される。切り出す条件は座標 (赤道系座標)、切り出す半径、時間 (MET)、エネルギー領域、入射方向などがある。MET(Mission Elapsed Time) とは 2001 年 1 月 1 日 0 時 0 分 0 秒 (UTC) からの経過時間で単位は秒で表される。

- gtmktime
FT2 ファイルにある衛星の位置などを元にイベントをセレクションする。また、FT1 ファイルの GTI を新たに作成する。
- gtlcube
FT2 ファイルの livetime と FT1 ファイルの GTI を使って、トータルの livetime を計算する。また exposure cube という、いくつかのエネルギーごとに観測時間の積分値を検出器の入射角の関数で計算したものを作成する。
- gtexpmap
unbinned likelihood 解析専用の exposure map を作成する。exposure map は exposure cube、FT1 ファイル、FT2 ファイルを元に作成される。また、FT1 ファイルの切り出した範囲より外側から放射が入り込むことも考慮されるので、イベントの切り出し半径よりも 10 °大きい領域で作成する。
- gtdiffrsp
銀河面や系外放射からの diffuse 成分のレスポンス関数を likelihood 解析の前に計算する。これにより、likelihood 解析の計算が速くなる。レスポンス関数はイベントのエネルギーや入射角から推定量などへ変換する関数である。
- gtlike
likelihood によるフィッティングを行う。このフィッティングでは xml ファイルに銀河と diffuse 成分のモデルを書き込み、ガンマ線の空間分布とエネルギー分布情報の 3 次元でフィッティングを行う。
- gtbin
FT1 ファイルをイメージ、ライトカーブ、スペクトルに変換する。
- gtsrcmaps
モデルファイルを元にレスポンス関数を銀河ごとに割り振り、PSF(Point Spread Function) を考慮して、source map を作成する。
- gtmodel
モデルファイルと source map を元にカウントマップのモデルを作成する。

3.2.2 最尤法

一般的に観測値から放射モデルの変数をフィッティングによって決定するときは、光子の到来頻度の分布が正規分布になることを仮定している。このときは最小二乗法が使われ

る。しかし、ガンマ線のように観測光子数が少ない場合、正規分布ではなくポアソン分布になるので最小二乗法が使えない。この場合放射モデルの変数の決定には最尤法が使われる。最尤法とは尤度関数を用いて最尤推定量 (Maximum Likelihood Estimator:MLE) を求める方法である。

尤度関数 L はある測定値を $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 、モデルの変数を θ 、モデルの分布関数を $f(x|\theta)$ とすると

$$L(\theta|x) = f(x_1|\theta)f(x_2|\theta)f(x_3|\theta)\dots f(x_n|\theta) \quad (3.1)$$

となる。これは測定の結果が $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ となる確率を表している。

$$\frac{dL}{d\theta} = 0 \quad (3.2)$$

一般的に式 3.2 を用いて L が最大となる θ を探するのが最尤法である。最尤法ではポアソン分布を仮定しているため χ^2 検定による有意度の評価ができない。そこで、 χ^2 検定の代わりに TS(Test Statistic) が用いられる。

TS value

TS は有意度を表し、 $\sqrt{\text{TS}} = \sigma$ となる値である。この σ はガウス分布の σ に相当する。TS は

$$\text{TS} = 2(\log L - \log L_0)$$

で表され、例えば L は目的的天体を含めたときのモデルの尤度で L_0 は目的的天体を除いたときのモデルの尤度である。

3.2.3 イベントセレクション

今回用いたフェルミ衛星のデータの選択条件を表 3.3 に示す。さらに、フェルミ衛星が SAA(South Atlantic Anomaly) と呼ばれるブラジル上空の荷電粒子が多く存在している領域も除いている。

また、解析した期間は表 3.3 の他に、2008 年 8 月 3 日から 2ヶ月ずつ解析する時間を延ばしていき 2009 年 10 月 3 日までの解析も行った。Zenith Angle とは LAT が向いている方向とガンマ線の到来方向の成す角である。地球の大気と宇宙線の相互作用により地球の大気からはガンマ線が放射されている。このガンマ線の観測を避けるために Zenith Angle > 105° のイベントは解析するときに排除している。

全解析期間 (MET)	2008/08/03 ~ 2009/11/11 (239557417 ~ 279807739)
エネルギー範囲	100MeV ~ 300GeV
CTB_CLASS_LEVEL	Diffuse Class
Zenith Angle	<105 °
切り出し半径	15 °
レスポンス	P6_V3_DIFFUSE
ScienceTools のバージョン	v9r15p2

表 3.3: 観測条件

3.2.4 解析方法

本研究では、まず各銀河のガンマ線イメージ (図 3.2) を作成し、フェルミチームから出されている 11ヶ月カタログを元にモデルに入れる点源リストを決めて、xml 形式のファイルを作成した。モデルファイルの例を下記に示す。

```
<source_library title="source library" >
```

```
  <source name="M84" type="PointSource" >
```

```
    <spectrum type="PowerLaw2" >
```

```
      <parameter free="1" max="1000.0" min="1e-5" name="Integral" scale="1e-8" value="1.0" />
```

```
      <parameter free="1" max="0.0" min="-5.0" name="Index" scale="1.0" value="-2.0" />
```

```
      <parameter free="0" max="2000.0" min="20.0" name="LowerLimit" scale="1.0" value="100.0" />
```

```
      <parameter free="0" max="200000.0" min="20.0" name="UpperLimit" scale="1.0" value="100000" />
```

```
    </spectrum >
```

```
  <spatialModel type="SkyDirFunction" >
```

```
    <parameter free="0" max="360.0" min="-360.0" name="RA" scale="1.0" value="186.2655971" />
```

```
    <parameter free="0" max="90.0" min="-90.0" name="DEC" scale="1.0" value="12.8869831" />
```

```
  </spatialModel >
```

```
</source >
```

```
<source name="Galactic_Diffuse" type="DiffuseSource" >
```

```
  <spectrum type="ConstantValue" >
```

```
    <parameter free="1" max="10.0" min="0.0" name="Value" scale="1.0" value="1.0" />
```

```
  </spectrum >
```

```
<spatialModel file="/net/cluster341/users/harao/fermi/gll_iem_v01r01_modify.fit" type="MapCubeFunction" >
```

```
  <parameter free="0" max="1000.0" min="0.001" name="Normalization" scale="1.0" value="1.0" />
```

```
</spatialModel >
```

```
</source >
```

```
<source name="Extragalactic_Diffuse" type="DiffuseSource" >
```

```
  <spectrum type="PowerLaw" >
```

```
    <parameter free="1" max="100.0" min="1e-05" name="Prefactor" scale="1e-07" value="2.0" />
```

```
    <parameter free="1" max="0.0" min="-5.0" name="Index" scale="1.0" value="-2.1" />
```

```

<parameter free="0" max="200.0" min="20.0" name="Scale" scale="1.0" value="100.0"/>
</spectrum>

```

```

<spatialModel type="ConstantValue">

```

```

  <parameter free="0" max="10.0" min="0.0" name="Value" scale="1.0" value="1.0"/>
</spatialModel>

```

```

</source>

```

```

</source_library>

```

上記の例では、1つの点源 (M84) と2つの拡散放射 (Galactic_Diffuse と Extragalactic_Diffuse) をモデルとしている。実際には、11ヶ月カタログに載っている、切り出し半径の中にある全ての天体をモデルには入れて解析した。点源については、スペクトルは冪分布を仮定して、PowerLaw2 というモデルを使用している。銀河面からの広がった放射は GALPROP モデルという、フェルミチームが一般的に使っているモデルを用いた。系外銀河からの背景放射は全方向から一様に放射する冪分布を仮定している。その後 2008 年 8 月 3 日から 2ヶ月ずつ解析時間を延ばしながら 2009 年 10 月 3 日まで解析を行った。この解析で TS の値が解析時間と共に増加しているかを見た。その後全時間で解析し、スペクトル情報 (図 3.3) を得た。

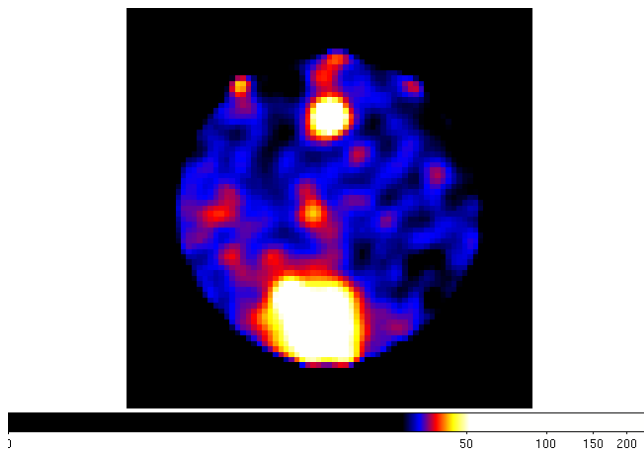


図 3.2: M84(中心) のガンマ線イメージ

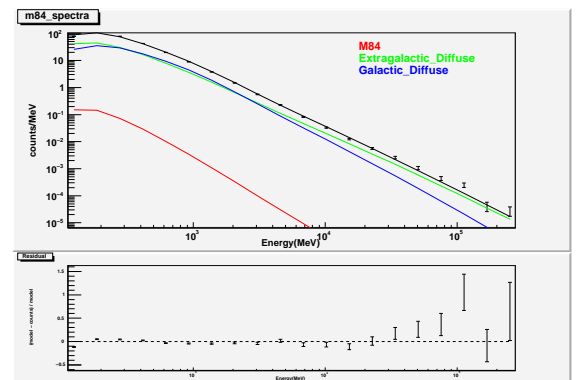


図 3.3: M84(赤) のスペクトル

第4章 ガンマ線を放射する銀河の解析

4.1 銀河の選定

本研究では、電波銀河、スターバースト銀河、普通の銀河、セイファート銀河の4つの銀河を解析した。電波銀河とスターバースト銀河はガンマ線が放射されている観測例が見つかり始めたのでこれらの銀河を選んだ。セイファート銀河はまだ放射機構などが不明でガンマ線を放射している定かではないので選んだ。普通の銀河は比較対象として解析した。

天体は距離と電波や赤外線の強度を目安に選んだ。電波銀河は距離が数 Mpc のところがないため距離 35Mpc 未満 (3C111、NGC741、NGC1218 を除く) にある楕円銀河の中から、電波の強度が強い天体と弱い天体を選んだ。スターバースト銀河は距離が 10Mpc 未満で、電波・赤外の強度が強い天体を選んだ。セイファート銀河と普通の銀河は単純に距離が近い天体を選んだ。選んだ天体を距離、電波と赤外線の強度と共に表 4.1 に示す。また、今回解析した銀河のうち 3C111、NGC1218、NGC4945 の3つはフェルミの 11ヶ月カタログに載っていた。

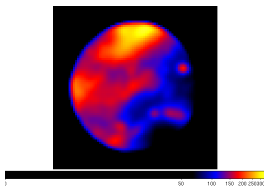
4.2 カウントマップの作成

カウントマップ (CMAP) とは実際にフェルミ衛星が観測したガンマ線イベントの空での分布をそのまま図にしたものである。作成したカウントマップではエネルギー範囲は 100MeV ~ 300GeV で、サイズは x、y 方向にそれぞれ 75pixel とり、スケールは 5[degrees/pixel] で作成した。ただし、IC342、NGC6946、Circinus Galaxy、NGC4945 は周りの天体のガンマ線放射が強いため、それぞれの各天体のカウントマップの下に書かれたサイズとスケールを使用して作成した。カウントマップにある明るい領域は、我々の銀河面からのガンマ線で明るいところである。また、カウントマップと共に、カウントマップの中心から赤緯方向に $\pm 1.5^\circ$ 切り出しカウントのヒストグラムも作成した。ヒストグラムは黒線が 0.1 ~ 1GeV で赤線が 1 ~ 10GeV のカウントを表している。作成した各銀河のカウントマップを図 4.1 ~ 4.54 に示す。

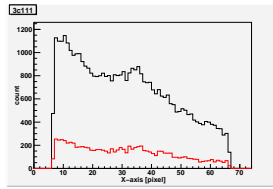
11ヶ月カタログに載っていた3つの銀河のカウントマップを見ると NGC4945 は光っているように見えるが、他の2つはあまり光っていないさそうである。しかし、ヒストグラム

銀河の種類	天体名	距離 (Mpc)	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	電波強度 (1.4GHz) (mJy)	赤外線強度 (60 μ m) (Jy)
電波 銀河	3C111	204	64.7726	38.0372	14400	0.321
	IC1459	26.771	344.2941950	-36.4622222	1260	0.499
	M84	17.463	186.2655971	12.8869831	6134	0.492
	NGC741	62.752	29.087639	5.628938	1018	0.202
	NGC1218	120	47.0821	4.0465	7388	<0.024
	NGC1316	19.067	50.673825	-37.208227	169000 (843MHz)	3.030
	NGC4261	32.233	184.8467517	5.8252153	18610	0.067
	NGC4472	15.694	187.4448412	8.0004758	436	<0.065
普通の 楕円銀河	NGC1332	18.867	51.572167	-21.335361	4.8	0.502
	NGC1404	18.934	54.716333	-35.594389	4.3	<0.028
	NGC3379	10.602	161.956667	12.581639	2.4	<0.041
普通の 渦巻銀河	M31	0.834	10.6846833	41.2690361	8600	273.5
	NGC247	3.448	11.785625	-20.760389		5.889
	NGC1313	3.910	49.566875	-66.498250	530 (408MHz)	27.08
	NGC2403	3.625	114.214167	65.602556	339	40.75
スター バースト 銀河	M83	4.564	204.2539583	-29.8654167	2600	195.04
	IC342	3.350	56.702125	68.096111	1689	173.7
	NGC2903	9.099	143.042125	21.500833	442	52.23
	NGC4736	5.125	192.721088	41.120458	172.7	67.72
	NGC5457	7.6	210.802458	54.349094	686.0	31.94
	NGC6946	7.028	308.718068	60.153946	1411	98.09
スター バースト and セイファート 銀河	Circinus Galaxy	4.2	213.291292	-65.339028	1500	291.4
	M51	7.893	202.4822	47.2315	11000 (57.5MHz)	71.79
	NGC1068	14.4	40.6696292	-0.0132806	4929	187.2
	NGC4945	4.280	196.3206	-49.3674	4200	537.5
セイファート 銀河	M81	3.654	148.8882208	69.0652947	452.0	25.77
	NGC4258	7.902	184.7396025	47.3039731	727.9	21.60

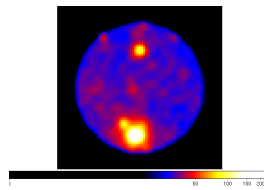
表 4.1: 解析した天体 [8]



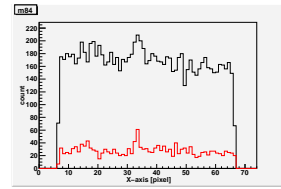
☒ 4.1: 3C111 の CMAP



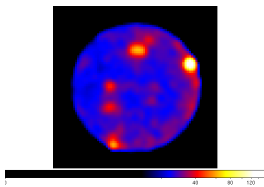
☒ 4.2: 3C111 の histogram



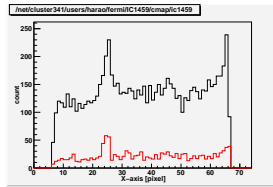
☒ 4.3: M84 の CMAP



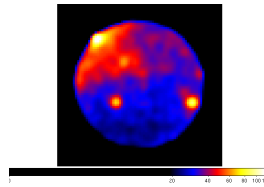
☒ 4.4: M84 の histogram



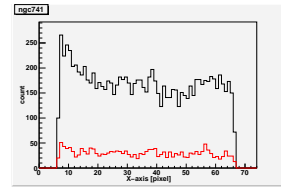
☒ 4.5: IC1459 の CMAP



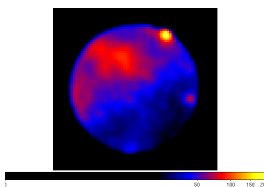
☒ 4.6: IC1459 の histogram



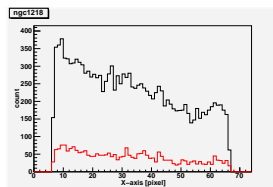
☒ 4.7: NGC741 の CMAP



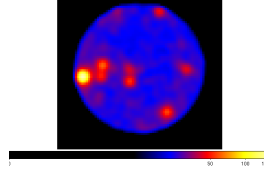
☒ 4.8: NGC741 の histogram



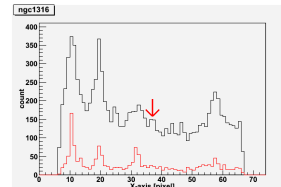
☒ 4.9: NGC1218 の CMAP



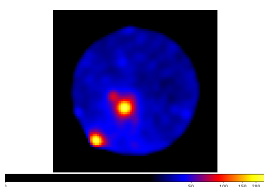
☒ 4.10: NGC1218 の histogram



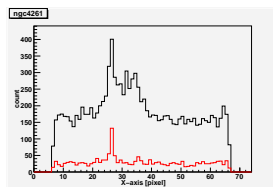
☒ 4.11: NGC1316 の CMAP



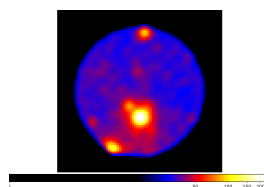
☒ 4.12: NGC1316 の histogram



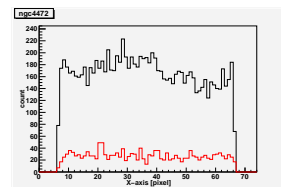
☒ 4.13: NGC4261 の CMAP



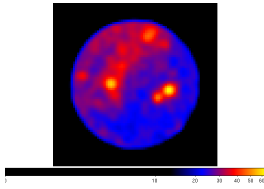
☒ 4.14: NGC4261 の histogram



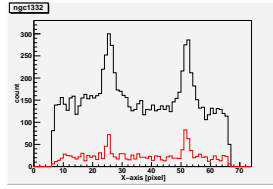
☒ 4.15: NGC4472 の CMAP



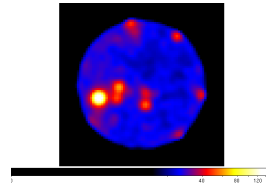
☒ 4.16: NGC4472 の histogram



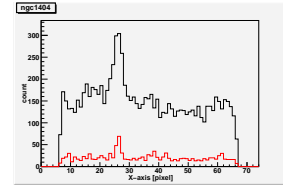
☒ 4.17: NGC1332 の CMAP



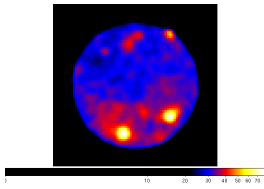
☒ 4.18: NGC1332 の histogram



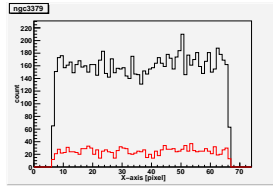
☒ 4.19: NGC1404 の CMAP



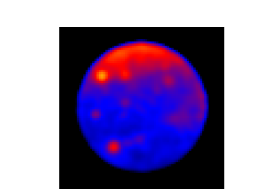
☒ 4.20: NGC1404 の histogram



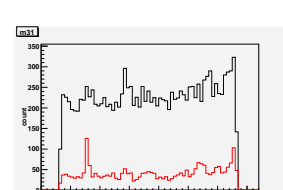
☒ 4.21: NGC3379 の CMAP



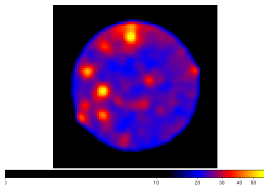
☒ 4.22: NGC3379 の histogram



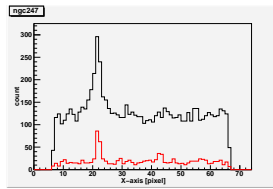
☒ 4.23: M31 の CMAP



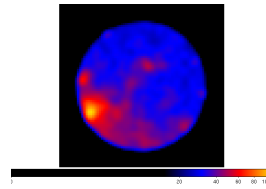
☒ 4.24: M31 の histogram



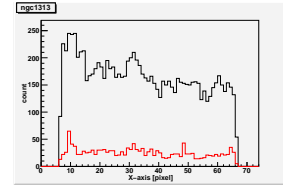
☒ 4.25: NGC247 の CMAP



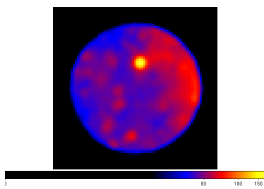
☒ 4.26: NGC247 の histogram



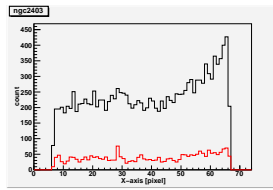
☒ 4.27: NGC1313 の CMAP



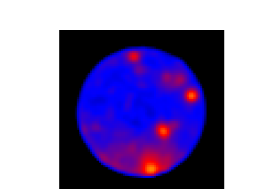
☒ 4.28: NGC1313 の histogram



☒ 4.29: NGC2403 の CMAP



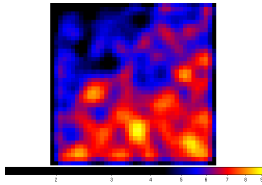
☒ 4.30: NGC2403 の histogram



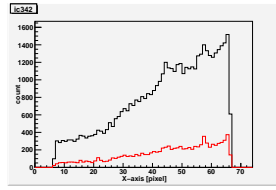
☒ 4.31: M83 の CMAP



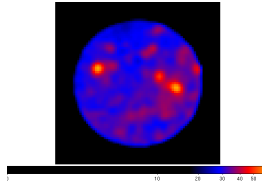
☒ 4.32: M83 の histogram



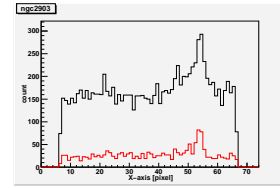
☒ 4.33: IC342 の CMAP (40pixel×40pixel ×0.1degrees/pixel)



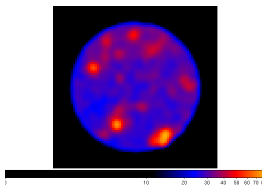
☒ 4.34: IC342 の histogram



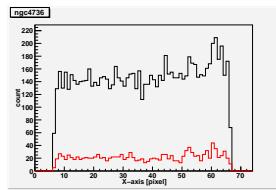
☒ 4.35: NGC2903 の CMAP



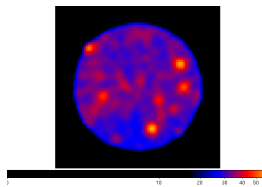
☒ 4.36: NGC2903 の histogram



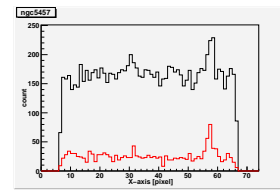
☒ 4.37: NGC4736 の CMAP



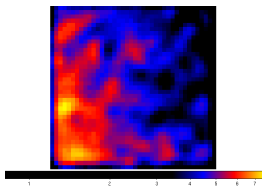
☒ 4.38: NGC4736 の histogram



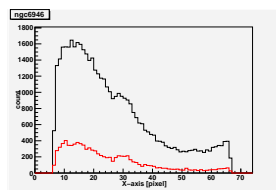
☒ 4.39: NGC5457 の CMAP



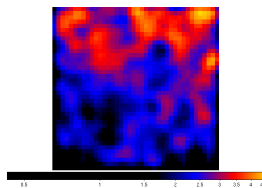
☒ 4.40: NGC5457 の histogram



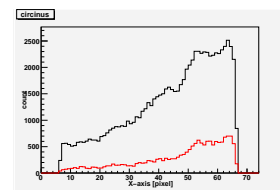
☒ 4.41: NGC6946 の CMAP (40pixel×40pixel ×0.1degrees/pixel)



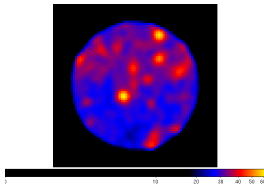
☒ 4.42: NGC6946 の histogram



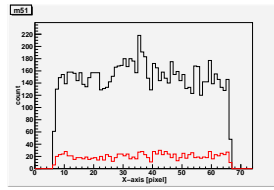
☒ 4.43: Circinus Galaxy の CMAP (40pixel×40pixel ×0.1degrees/pixel)



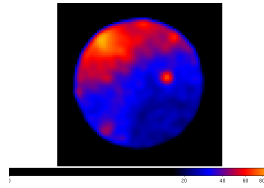
☒ 4.44: Circinus Galaxy の histogram



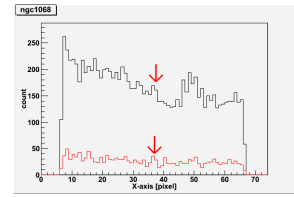
☒ 4.45: M51 の CMAP



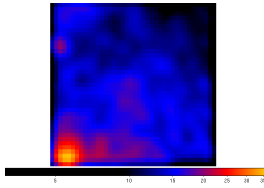
☒ 4.46: M51 の histogram



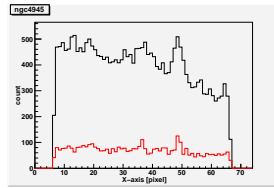
☒ 4.47: NGC1068 の CMAP



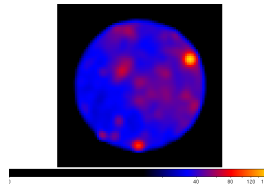
☒ 4.48: NGC1068 の histogram



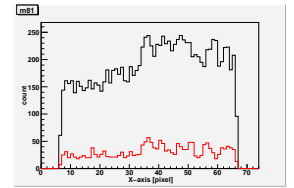
☒ 4.49: NGC4945 の CMAP (40pixel×40pixel ×0.2degrees/pixel)



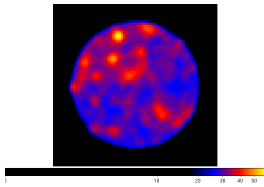
☒ 4.50: NGC4945 の histogram



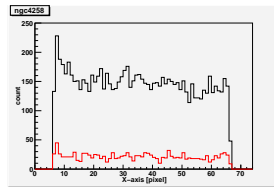
☒ 4.51: M81 の CMAP



☒ 4.52: M81 の histogram



☒ 4.53: NGC4258 の CMAP



☒ 4.54: NGC4258 の histogram

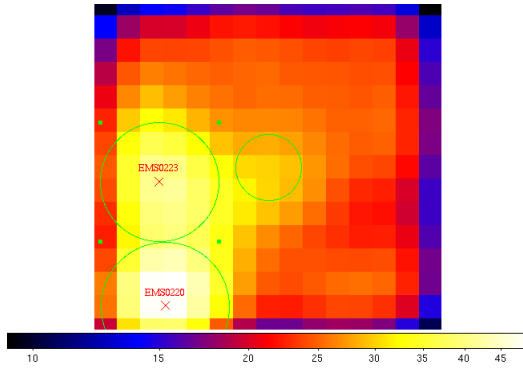


図 4.55: NGC1316 の拡大したカウントマップ

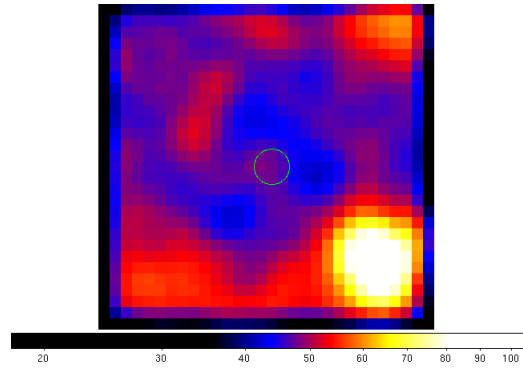


図 4.56: M83 の拡大したカウントマップ

を見ると、この3つの銀河はどれも中心(37pixel付近)でカウント数が周りより多くなっていることが分かる。他の銀河もカウントマップだけを見ると、どれもあまりガンマ線で光っているにはあまり見えない。カウントマップにおいて、ガンマ線で光っている天体はNGC1316、M83、NGC4945の3つである。NGC1316はすぐ左と左下にガンマ線で光っている天体があるので見づらいがNGC1316とM83の拡大したカウントマップを図4.55と4.56に示す。NGC1316は $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 、M83は $15^\circ \times 15^\circ$ のサイズで作成した。また、3C111とNGC5457はカウントマップを見ると、明らかに点源ではないのでこれ以降は扱わないことにする。

4.3 各天体の TS value

4.3.1 モデルフィッティング

サーベイ観測モードでの2008年8月3日~2009年11月11日までのデータを用いて、全時間積分でgtlikeによるモデルフィッティングを行い、スペクトル情報を得た。モデルフィッティングは3回行った。最初のフィッティングのOptimizerはDRMNFBという大雑把に最適値を求める方法である。2、3回目のフィッティングのOptimizerはNEWMINUITという最適値に見当がついている場合に有効で、最終的な最適値を求める。モデルファイルには目的の天体の他に切り出し半径内にある他の天体とバックグラウンド(銀河面放射と系外放射)が入っている。今回、天体のモデルはそれぞれ点源と仮定してスペクトルモデルにはPowerLaw2を使用した。PowerLaw2はスペクトルが

$$\frac{dN}{dE} = \frac{N(\gamma + 1)E^\gamma}{E^{\gamma_{max}} - E^{\gamma_{min}}}$$

天体名	TS value	天体名	TS value
IC1459	2.48372	M83	38.0786
M84	2.41604	IC342	26.0352
NGC741	12.756	NGC2903	6.15392
NGC1218	34.1205	NGC4736	0.404292
NGC1316	26.2991	NGC6946	38.6591
NGC4261	8.05862	Circinus Galaxy	20.9734
NGC4472	9.00855	M51	9.29266
NGC1332	3.20244	NGC1068	14.1469
NGC1404	9.36467	NGC4945	79.7872
NGC3379	3.77382	M81	-1.27165
M31	47.0209	NGC4258	-0.140689
NGC247	2.42191		
NGC1313	6.11215		
NGC2403	16.8638		

表 4.2: 天体の TS

で表される。ここで N は Integral、 γ は Index と呼ばれる。Integral は E_{max} から E_{nim} ま
で積分したときの光子のフラックスで Index は冪の傾きにあたる。3 回モデルフィッティ
ングを行った後の TS value を表 4.2 に示す。TS が 9 以上あれば 3σ 以上で検出されたこと
に相当する。 3σ は約 99.7% の確率でガンマ線が到来していることを示しているので、表
4.2 において TS が 9 以上の天体はガンマ線を放射している可能性が高いと思われ、イメー
ジと共に考察する。表 4.2 の有意度が 9 以上の銀河では、ヒストグラムにおいては大体の
銀河で中心のカウント数が増加傾向にあるが、有意度が 9 未満の銀河はヒストグラムにお
いては、そこまでカウント数は増加していない。カウントマップで光っていた NGC1316、
M83 のヒストグラムを見ると中心の低エネルギー側のカウント数が飛び出ているのが分
かる。また NGC1068 でも低エネルギー側のカウント数が増加していて、さらに高エネル
ギー側でもカウント数が増加しているのが分かる。この 3 つの天体は有意度はそれぞれ
NGC1316 が 26.2991 で約 5.1σ 、M83 が 38.0786 で約 6.2σ 、NGC1068 が 13.145 で約 3.6σ
と高い有意度を示していてこれら 3 つの天体はガンマ線を放射していると思われる。ま
た、TS が高いにもかかわらずカウントマップで見えないのは、銀河面からの放射や系外
からの放射が目的の天体に比べて、強いためである。

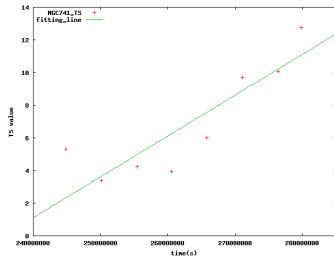


図 4.57: NGC741 の TS

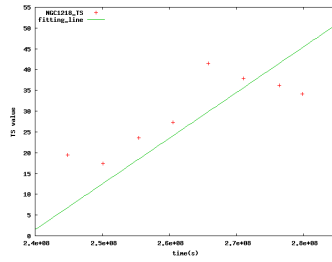


図 4.58: NGC1218 の TS

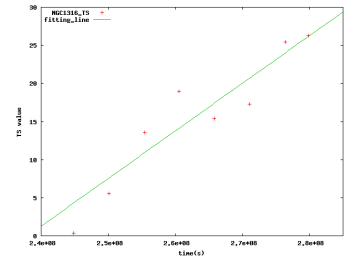


図 4.59: NGC1316 の TS

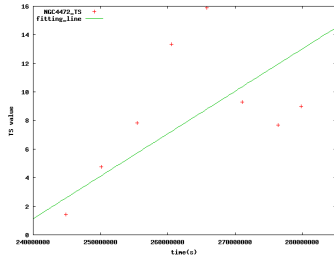


図 4.60: NGC4472 の TS

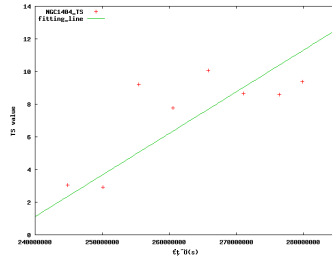


図 4.61: NGC1404 の TS

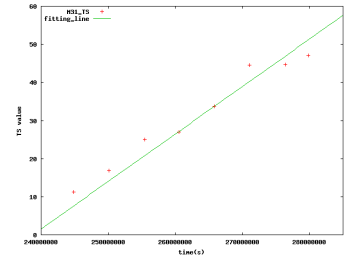


図 4.62: M31 の TS

4.3.2 解析時間を変化させたときの TS value

次に、解析時間を2008年8月3日から2ヶ月、4ヶ月、6ヶ月、...、14ヶ月と2ヶ月ずつ時間を長くしていき、TSの変化を追った。TSはガンマ線イベントが多くなれば増加していくので、解析時間を長くしていくことによりTSが増加していくと考えられる。まずは、§4.3.1で有意度が9以上だった天体のグラフを示す。

図4.57～4.70を見るとほとんど全てのグラフが解析時間と共にTSも大きくなっていることがわかる。やはり、表4.2で有意度が9以上の天体は、ガンマ線を放射している可能性が高いと思われ、統計がもっと増えればさらに有意になると思われる。また、これらの天体の14ヶ月積分でのスペクトル情報を表4.3に示す。

次に有意度が9未満の天体のTSのグラフを図4.71～4.81に示す。

有意度が9以上の天体よりも点のばらつきが大きく、スターバースト銀河やセイファ-

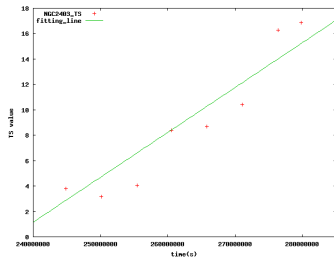


図 4.63: NGC2403 の TS

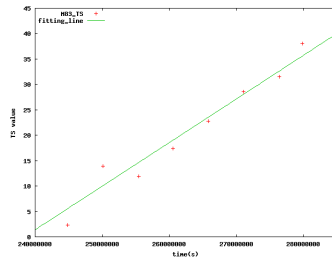


図 4.64: M83 の TS

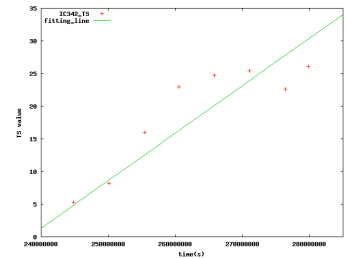


図 4.65: IC342 の TS

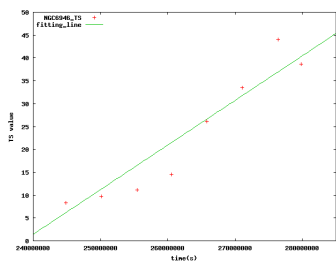


図 4.66: NGC6946 の TS

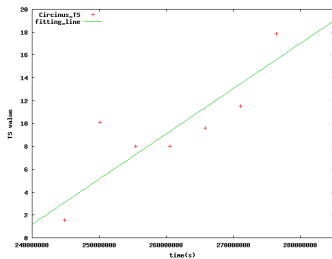


図 4.67: Circinus Galaxy の TS

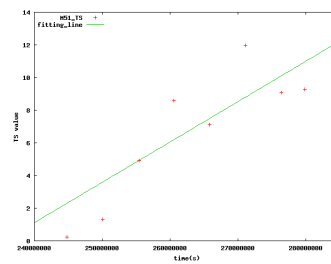


図 4.68: M51 の TS

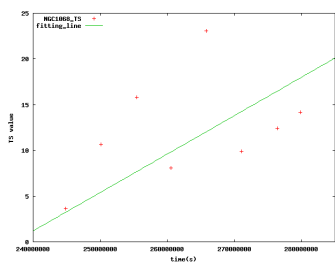


図 4.69: NGC1068 の TS

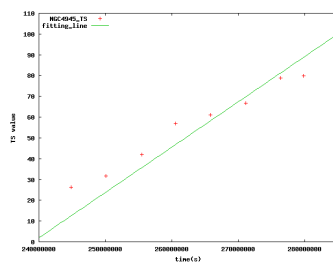


図 4.70: NGC4945 の TS

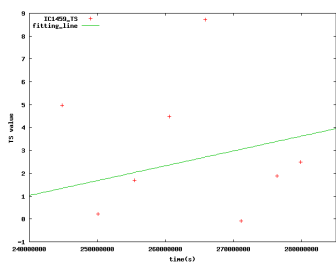


図 4.71: IC1459 の TS

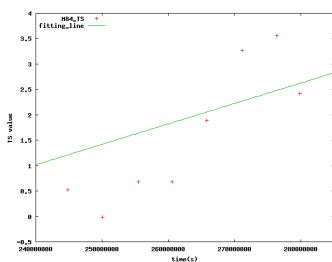


図 4.72: M84 の TS

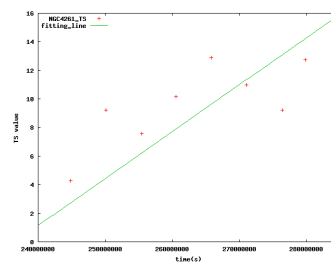


図 4.73: NGC4261 の TS

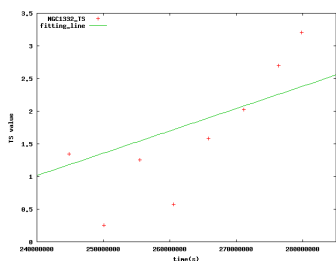


図 4.74: NGC1332 の TS

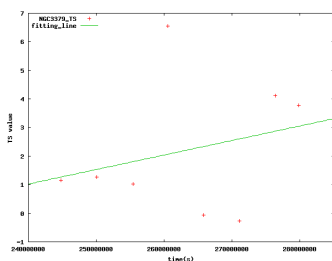


図 4.75: NGC3379 の TS

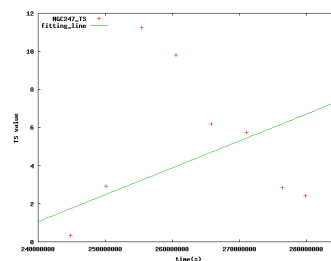


図 4.76: NGC247 の TS

天体名	Flux($\times 10^{-8}$) (photon $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Index
NGC741	< 3.2	-3.6 ± 0.4
NGC1218	0.3 ± 0.2	-1.9 ± 0.2
NGC1316	0.8 ± 0.4	-2.9 ± 0.1
NGC4472	< 2.6	-3.3 ± 0.3
NGC1404	< 2.3	-3.2 ± 0.4
M31	3.3 ± 0.7	-2.9 ± 0.2
NGC2403	< 0.9	-2.2 ± 0.3
M83	2.4 ± 0.9	-2.7 ± 0.2
IC342	6 ± 1	-4.1 ± 0.4
NGC6946	7 ± 3	-3.9 ± 0.3
Circinus Galaxy	< 2.0	-2.1 ± 0.2
M51	< 1.5	-2.4 ± 0.6
NGC1068	< 2.3	-2.1 ± 1.0
NGC4945	3.9 ± 0.8	-2.5 ± 0.1

表 4.3: 有意度が9以上の天体のスペクトル情報

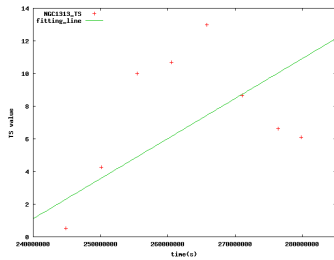


図 4.77: NGC1313 の TS

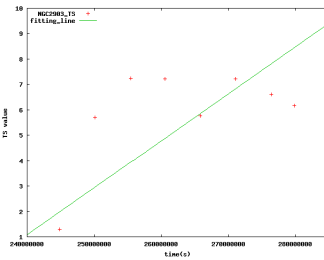


図 4.78: NGC2903 の TS

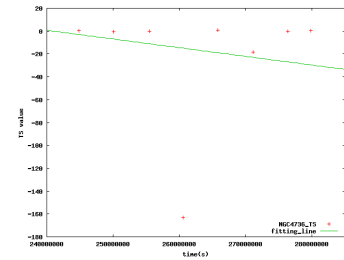


図 4.79: NGC4736 の TS

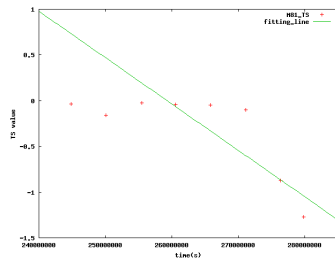


図 4.80: M81 の TS

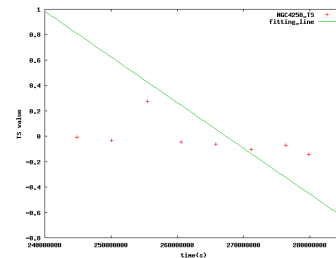


図 4.81: NGC4258 の TS

天体名	Flux($\times 10^{-8}$) (photon cm $^{-2}$ s $^{-1}$)	Index
IC1459	< 1.8	-3.3 ± 0.8
M84	< 2.0	-3.0 ± 0.9
NGC4261	< 1.4	-2.5 ± 0.4
NGC1332	< 1.4	-2.7 ± 0.7
NGC3379	< 0.06	-1.0 ± 1.8
NGC247	< 1.4	-3.1 ± 0.6
NGC1313	< 2	-2.9 ± 0.7
NGC2903	< 0.10	-1.5 ± 0.5
NGC4736	< 1.0	-3.2 ± 0.9
M81	< 0.014	-1 ± 29
NGC4258	< 0.00014	-0.5 ± 143.0

表 4.4: 有意度が 9 未満の天体のスペクトル情報

ト銀河では減少している天体もある。しかし、電波銀河や楕円銀河では増加傾向にあるように見える。これらの天体のスペクトル情報を表 4.4 に示す。有意度が 9 未満の天体は 9 以上の天体に比べて、ばたつきが大きい天体がいくつかある。有意度が小さいということは、到来光子数が少ないのでこれがばたつきを大きくしている原因だと考えられる。

4.4 電波・赤外との相関

今回の解析で有意度が 5σ (約 99.9999427%) 以上で検出されたとと思われる天体は NGC1218、NGC1316、M31、M83、IC342、NGC6946、NGC4945 の全部で 7 個であった。これらの天体の電波または赤外のみかけの強度を見てみると、電波では 1.4GHz の強度が 1000mJy 以上で、赤外では 100Jy を越える天体ばかりであった。また有意度が 3σ 以上で検出された天体を見ると、これらも電波の強度が 1000mJy 以上、赤外線強度が 100Jy 以上の天体が多い。しかし NGC4472、NGC1404、NGC2403 では電波、赤外線強度が高くないにもかかわらず有意度が 3σ 以上で検出された。逆に、IC1459、M84 のように電波強度が高いにもかかわらず、有意度が低い天体もあった。次に電波銀河と楕円銀河のガンマ線のフラックスと電波のフラックスと、全天体のガンマ線のフラックスと赤外線のフラックスとの相関を見た。 $3\sigma \sim 5\sigma$ の天体は でアッパーリミットを示し、 3σ 以下の天体は でアッパーリミットを示している。

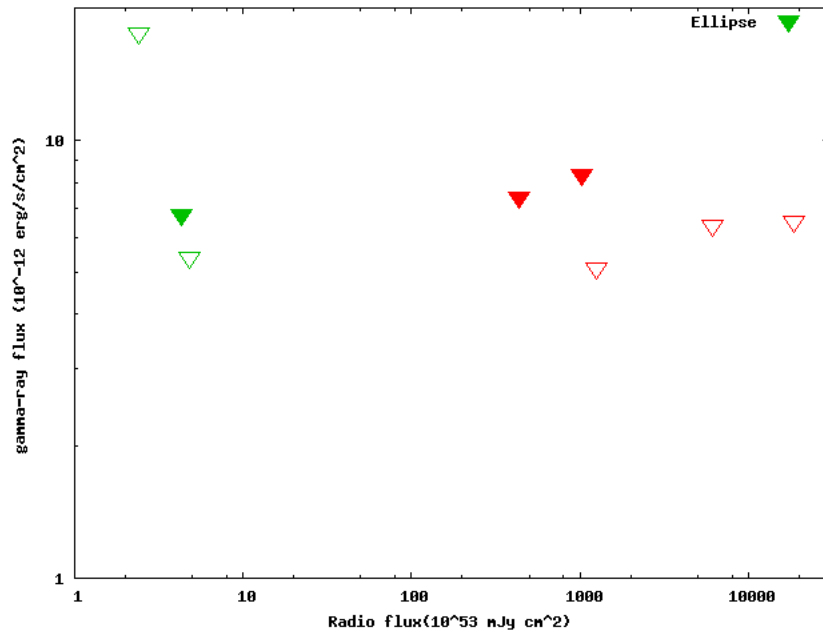


図 4.82: 電波フラックス vs ガンマ線フラックス

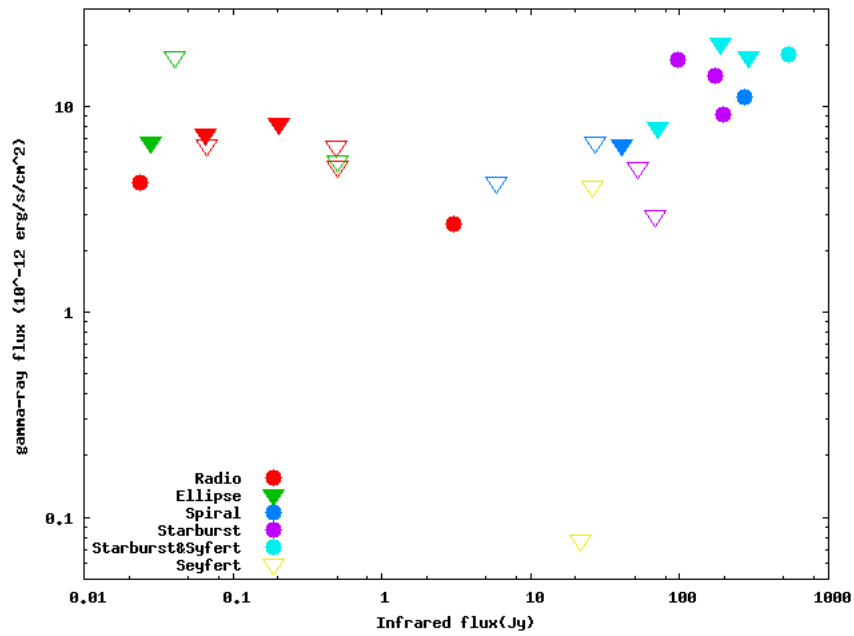


図 4.83: 赤外線フラックス vs ガンマ線フラックス

(TS>25) では赤外線フラックスも高い。では電波、赤外のフラックスが高いものもあるが、多くは電波、赤外で暗い。このことから、電波、赤外線フラックスが高いとガンマ線を放射している傾向があると考えられる。

4.5 星形成率と観測されたガンマ線光度

ガンマ線光度(もしくは上限値)にそれぞれの銀河のガンマ線放射の予想と比べてみる。ガンマ線は主に π^0 崩壊によって生成されると考えられている。 π^0 崩壊は宇宙線と星間ガスの原子との相互作用によって起きるので、宇宙線の量と星間ガスの質量が分かれば、ガンマ線の光度の指標となる。宇宙線は超新星爆発により密度が増加すると考えられ、超新星爆発の頻度は星生成効率 SN rate にほぼ比例すると考えられるので、予想されるガンマ線光度の指標は

$$\text{予想されるガンマ線光度の指標} = SNrate \times M_{gas}(M_{\odot}) \quad (4.1)$$

で表される。 M_{gas} は銀河のガスの質量を表す。星形成率は M82 と各天体の赤外線強度の比から導く。M82 の星形成率は $0.2 \pm 0.1(yr^{-1})$ である [5]。ガスの質量は各銀河の星の質量の 10% がガスの質量と仮定する。各天体の絶対等級 M から天体の光度 L を式 4.2 から

$$L = 10^{4(M_{sun} - M)} \quad (4.2)$$

導出し、質量光度比

$$\frac{M_{star}}{L} = 3 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \quad (4.3)$$

を仮定して各銀河の星の質量導出する。各天体のガスの質量と星形成率と光度を表 4.5 に示す。

表 4.5 の値から予想されるガンマ線光度の指標を出す。スターバースト銀河のように星形成効率が高い銀河や、銀河の中の星の質量が大きい銀河ではガンマ線光度の指標が高くなると思われる。予想されるガンマ線光度の指標とガンマ線光度のグラフを図 4.84 に示す。はアップーリミットを示している。図 4.84 を見ると、やはりスターバースト銀河やスターバースト&セイファート銀河では星形成効率が高いため、ガンマ線光度の指標が高いことが分かる。ここで、TS が 25 以上の天体のガンマ線光度の指標と光度の関係(図 4.85)を見ると、どの天体もガンマ線光度の指標は約 $10^7 \sim 10^8 M_{\odot} yr^{-1}$ と高い値が出ている。

4.6 電波銀河

ここでは、電波銀河とガンマ線光度について考察する。そのため、電波銀河である楕円銀河のみを図 4.82 に載せているが、図より電波の強い銀河がガンマ線光度が僅かに大き

天体名	ガスの質量 ($\times 10^9 M_{\odot}$)	星形成率 (yr^{-1})	ガンマ線光度 ($\times 10^{39} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$)
IC1459	7.41	0.00007	<413
M84	7.14	0.00007	<221
NGC741	13.2	0.00003	<3710
NGC1218	10.2	<0.000004	7020
NGC1316	15.8	0.0005	111
NGC4261	7.27	0.00001	<765
NGC4472	11.2	<0.00001	<205
NGC1332	1.58	0.00007	<217
NGC1404	3.78	<0.000004	<273
NGC3379	3.51	<0.000006	<222
M31	3.00	0.04	0.875
NGC247	0.335	0.0009	<5.75
NGC1313	0.827	0.004	<11.7
NGC2403	0.874	0.006	<0.962
M83	2.79	0.03	21.8
IC342	0.651	0.03	18.0
NGC2903	2.79	0.008	<47.4
NGC4736	1.55	0.01	<8.71
NGC6946	1.64	0.01	95.5
Circinus Galaxy	0.0651	0.04	<35.0
M51	5.78	0.01	<55.5
NGC1068	7.68	0.03	<474
NGC4945	0.866	0.08	37.6
M81	2.30	0.004	<6.16
NGC4258	3.51	0.003	<0.544

表 4.5: ガスの質量、星形成率、ガンマ線光度

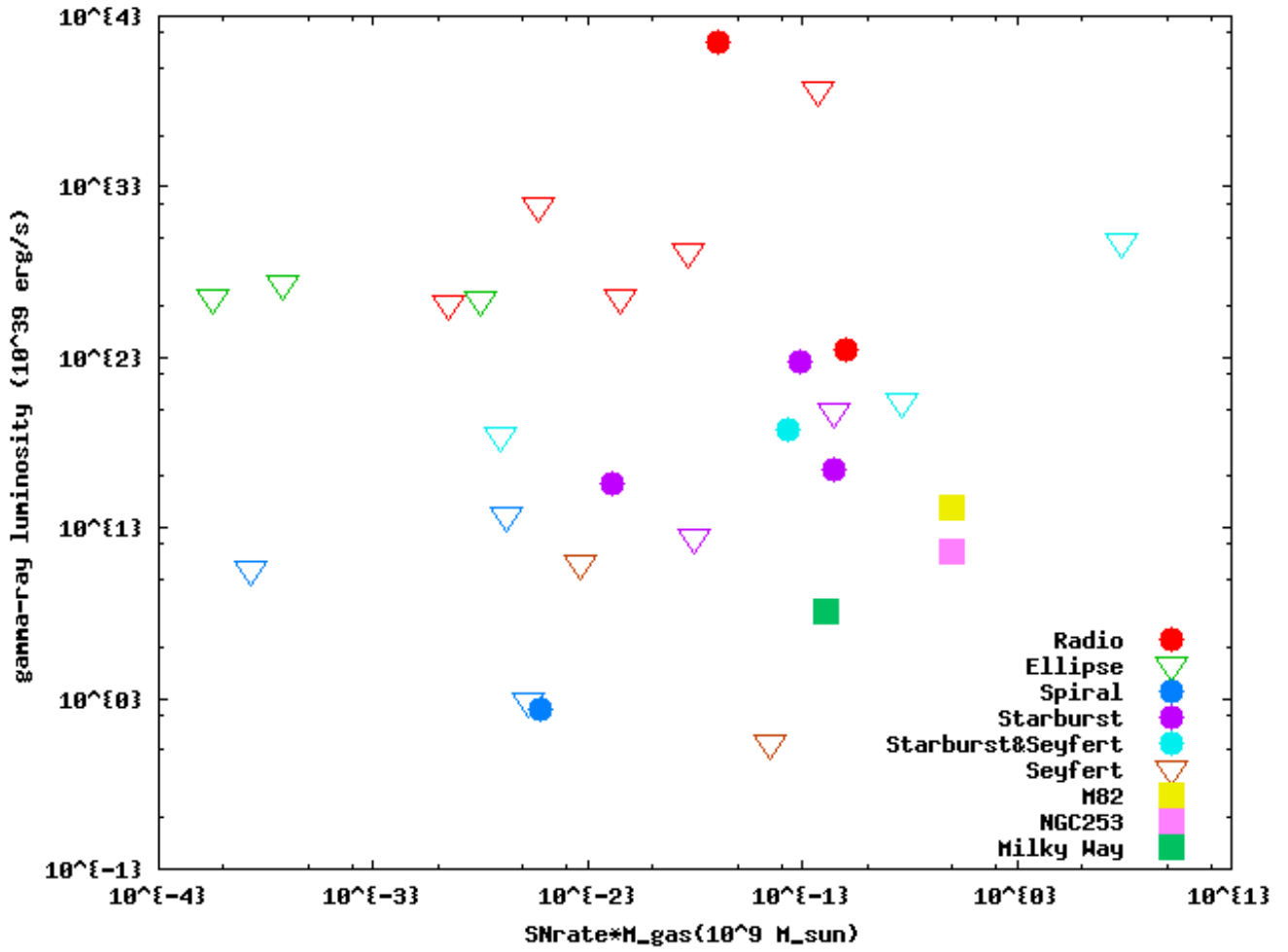


図 4.84: 銀河の種類別

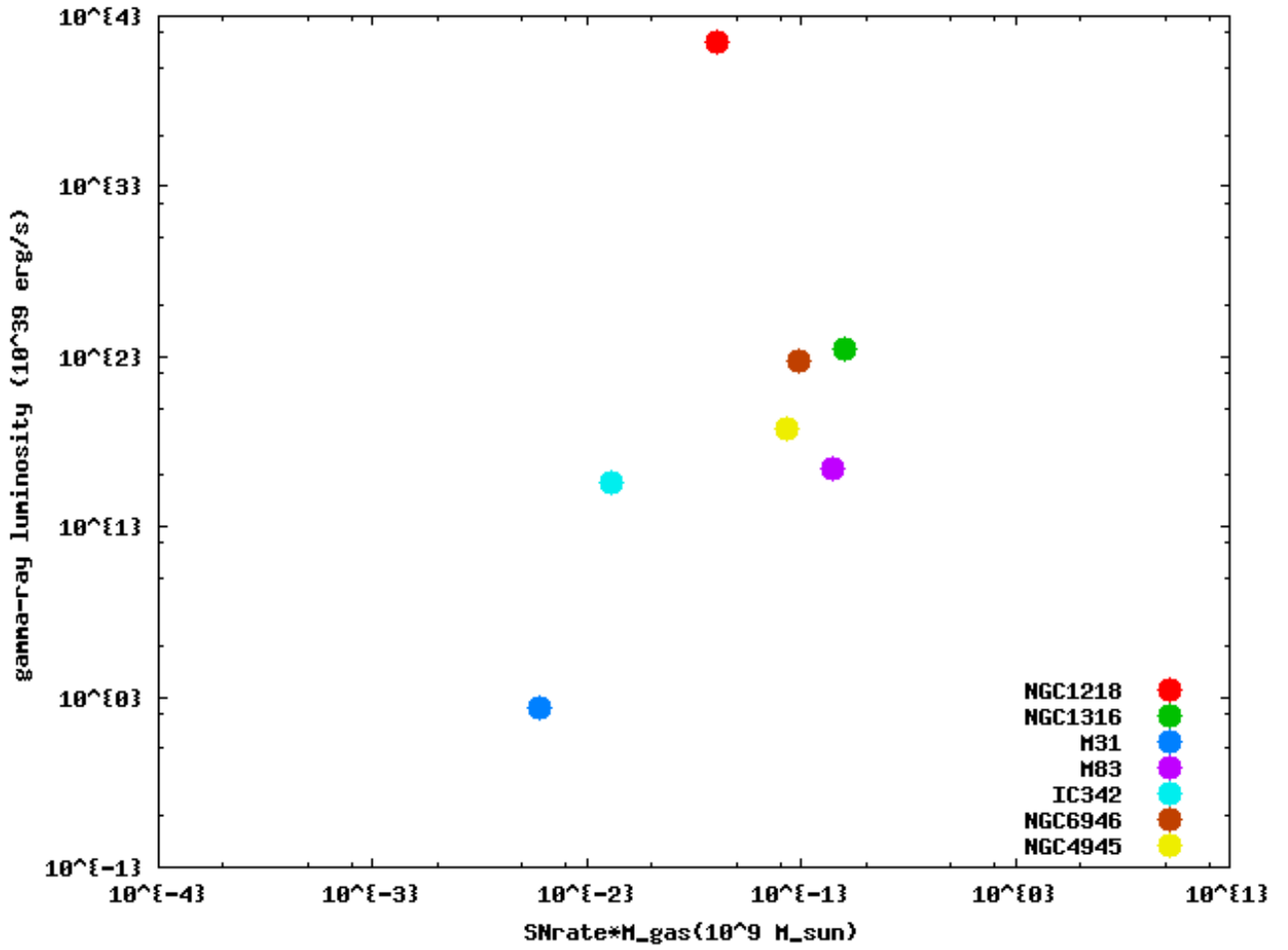


図 4.85: TS が 25 以上

い傾向があることがわかる。ただし、必ずしも電波強度が強いからといってガンマ線光度が大きいとは限らないようであり、さらなるサンプルが必要である。

第5章 まとめ

本研究ではフェルミ衛星を用いて、近傍銀河のガンマ線放射の探査を行った。そのために銀河の種類、ガンマ線の放射原理、過去の観測例を述べた。

フェルミ衛星以前ではブレーザー天体のみで、ガンマ線を放射していると考えられていたが、フェルミ衛星により電波銀河やスターバースト銀河でもガンマ線を放射していることが発見された。このことによりその他の銀河でもガンマ線が放射されている可能性を示した。

解析はまずカウントマップと1次元のヒストグラムを作成し、目で見てガンマ線を放射している天体を探した。NGC1316とM83では目で見てガンマ線を放射している可能性を示した。また、全時間で行いTSやフラックスを求めた。TSが25以上で検出された天体が7個あり、電波と赤外線強度を調べると、どの天体も高い強度を持っていることが分かった。有意度が低い天体でも上限値として示すことができた。さらに、解析時間を徐々に長くしていきTSの変化を追った。この解析では有意度が高い天体では比例的にTSが大きくなることを確認した。有意度が低い天体でもTSが比例的に増加している天体もあり、今後統計を増やしていくと有意になる可能性を示した。そして、各天体の宇宙線の量を調べ、光度との相関をとったが特に相関は見られなかった。TSが25以上の宇宙線の量を見ると、どの天体でも宇宙線の量は多いことが分かった。

今後は統計を増やして、TSが25未満で時間と共に増加していた天体についてさらに解析をし、ガンマ線を放射している天体をさらに見つけることを目指す。さらにジェットの加速効率なども導出し、ガンマ線放射の天体を探していきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、指導教官である深澤先生には銀河の基本的な知識から解析方法や考察など色々と丁寧に御指導していただき、感謝致します。また、フェルミ衛星解析チームである、ひろたかさん、西野さん、伊藤さんにはPCのこと、ScienceToolsの使い方や解析についてなど様々なことを教えてくださり、ありがとうございます。そして、後期からこの研究室に移動し歓迎してくださった、研究室のみなさま、助けていただいたり、楽しませていただきありがとうございます。

参考文献

- [1] Dermer C D 'The Gamma-ray Sky' 1994
- [2] A.A.ABDO, et al. 'FERMI DISCOVERY OF γ -RAY EMISSION FROM NGC 1275' 2009
- [3] F.Aharonian, et al. 'Fast Variability of Tera-Electron Volt γ Rays from the Radio Galaxy M87' 2006
- [4] A.A.ABDO, et al. 'FERMI LARGE AREA TELESCOPE GAMMA-RAY DETECTION OF THE RADIO GALAXY M87' 2009
- [5] A.A.ABDO, et al. 'DETECTION OF GAMMA-RAY EMISSION FROM THE STARBURST GALAXIES M82 AND NGC 253 WITH THE LARGE AREA TELESCOPE ON FERMI' 2010
- [6] V.A.Acciari, et al. 'A connection between star formation activity and cosmic ray in the starburst galaxy M 82' 2009
- [7] 伊藤亮介 広島大学 卒業論文 2009
- [8] <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>