

多波長観測による電波で明るい狭輝線セイファート1型銀河
の可視光放射に関する研究

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

M132129 河口 賢至

主査 深澤 泰司 副査 山本 一博

2015年2月10日

概要

宇宙には、銀河中心の狭い領域が非常に明るく輝く銀河が存在しており、これらの天体を活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) と呼ぶ。AGN の中心には太陽質量の $10^5 - 10^9$ 倍もの超巨大質量ブラックホールが存在しており、周辺物質が落ち込む際に解放される重力エネルギーをもとに輝いている。また AGN の中には、ジェットと呼ばれる相対論的速度のプラズマ噴流を持つ天体が存在し、これらの天体は電波で明るい特徴を示す。

本研究の対象天体である狭帯線セイフート 1 型銀河は AGN の 1 種であり、大部分が電波で暗い種族であるが、電波で明るい性質を示す天体が種少数存在することが知られてきた。近年、一部の電波で明るい狭帯線セイフート 1 型銀河から、ガンマ線観測衛星であるフェルミ衛星によって MeV/GeV ガンマ線帯域での放射が検出されたことで、相対論的ジェットからの直接的な証拠が得られたとして注目を集めている。またこの種族は、従来から知られているジェットを持つ AGN とは異なる特徴を持つため (比較的軽いブラックホール質量、高い降着率など)、AGN におけるジェット生成のメカニズム解明の上で重要な天体であると言える。しかし、この種族の天体は、近赤外線から紫外線までの帯域において、ジェットからの放射に加え降着円盤からの放射も卓越して見られる。複数の成分が混ざり合っており、この帯域での放射のメカニズムは未だよくわかっていない。

今回我々は、電波で明るい狭帯線セイフート 1 型銀河の可視光帯域での放射メカニズムを解明するため、可視光及びガンマ線帯域での長期観測を実施した。ガンマ線帯域で明るい天体として知られる PMN J0948+0022、1H 0323+342 の 2 天体に対して可視光、ガンマ線観測を実施した結果、両天体とも可視光、ガンマ線の両帯域で大きな光度変化が見られ、また、可視光、ガンマ線帯域での光度変化は全ての期間で相関するわけではなく、可視光、ガンマ線帯域でよく相関する時期、可視光のみで明るい時期が存在することがわかる。また、ガンマ線帯域で暗い 4 天体に対して可視光モニタリング観測を実施した結果、1 天体から数日スケールでの光度変化が見られた。このような短かい時間スケールでの変動は相対論的ジェットからの放射の可能性はあるものの、決定的な証拠は得られていない。これらの観測結果に基づき、電波で明るい狭帯線セイフート 1 型銀河での、可視光帯域における放射メカニズムについて議論を行った。

目次

第1章 序論	4
1.1 活動銀河核	4
1.1.1 活動銀河核の概要	4
1.1.2 活動銀河核の分類	4
1.2 狭輝線セイファート1型銀河	6
1.2.1 狭輝線セイファート1型銀河の概要	6
1.2.2 電波で明るい狭輝線セイファート1型銀河	7
1.2.3 先行研究	7
1.3 本研究の目的	10
第2章 観測機器	11
2.1 かなた望遠鏡	11
2.1.1 かなた望遠鏡の概要	11
2.1.2 HOWPol	12
2.1.3 HONIR	13
2.2 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡	15
2.2.1 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡の概要	15
2.2.2 Large Area Telescope	15
第3章 解析	18
3.1 可視・近赤外線解析	18
3.1.1 画像の1次処理	18
3.1.2 測光解析	19
3.1.3 偏光解析	20
3.2 ガンマ線解析	25
3.2.1 データセレクション	25
3.2.2 ScienceTools による解析	26
第4章 結果	28
4.1 ガンマ線で明るい狭輝線セイファート1型銀河	28
4.1.1 可視光・ガンマ線光度曲線	28
4.1.2 可視偏光観測	31
4.2 ガンマ線で暗い狭輝線セイファート1型銀河	31

36	第5章 考察
36	5.1 狭輝線セイファート1型銀河の観測結果
36	5.1.1 ガンマ線で明るい狭輝線セイファート1型銀河
36	5.1.2 ガンマ線で暗い狭輝線セイファート1型銀河
36	5.2 ガンマ線フラックス/可視光フラックス比
37	5.3 可視光帯域でのジエット、降着円盤成分の変化
38	第6章 まとめと今後
39	6.1 謝辞

目次

1.1	ブレイザー天体の多波長スペクトル [1]	5
1.2	活動銀河核の統一モデル []	5
1.3	狭輝線セイファート1型銀河の可視光スペクトル [4]	6
1.4	PMN J0948+0022 の VLBI 画像 [8]	8
1.5	PMN J0948+0022 電波長期光度曲線 [24]	8
1.6	PMN J0948+0022 の多波長スペクトル [11]	8
1.7	PMN J0948+0022 の可視光短期変動 (可視フラックス (上)、可視偏光度 (中)、可視偏光方位角 (下)) [15]	9
1.8	1H 0323+342 の可視光-紫外線スペクトル [16]	9
1.9	1H 0323+342 HST 画像 [17]	10
2.1	かなた望遠鏡 [20]	12
2.2	東広島天文台外観 [20]	12
2.3	一露出型広視野偏光撮像装置 HOWPol [22]	13
2.4	可視近赤外線同時カメラ HONIR [21]	14
2.5	フェルミガンマ線宇宙望遠鏡 [19]	15
2.6	フェルミ衛星による5年間のガンマ線全天マップ [19]	15
2.7	Large Area Telescope の構造 [23]	16
2.8	トラックャーによる検出の模式図 [23]	16
2.9	カロリメータの構造 [23]	17
2.10	トラックャーを覆う ACD [23]	17
3.1	観測生画像に乘るノイズの概念図 [?]	18
3.2	HOWPol による広視野撮像観測画像 (視野 15 分 ϕ)	20
3.3	開口測光の概念図 [?]	20
3.4	半波長板回転偏光観測法の概念図	21
3.5	HOWPol による狭視野偏光撮像観測画像	21
3.6	一露出型偏光観測法の概念図	23
4.1	PMN J0948+0022 可視光、ガンマ線光度曲線	29
4.2	PMN J0948+0022 可視光、ガンマ線光度曲線拡大図	29
4.3	PMN J0948+0022 可視光フラックス、ガンマ線フラックス関係	30
4.4	PMN J0948+0022 ガンマ線フラックス、ガンマ線べき指数関係	30
4.5	1H 0323+342 可視光、ガンマ線光度曲線	30

30	4.6	1H 0323+342 可視光、ガンマ線光度曲線拡大図
31	4.7	1H 0323+342 可視光、ガンマ線フラックスと関係
31	4.8	1H 0323+342 ガンマ線フラックス、ガンマ線入りき指数関係
32	4.9	PMN J0948+0022 可視偏光観測結果
32	4.10	1H 0323+342 可視偏光観測結果
32	4.11	PMN J0948+0022 可視等級、可視偏光度関係
32	4.12	1H 0323+342 可視等級、可視偏光度関係
33	4.13	PMN J0948+0022 可視偏光 Q-U 平面
33	4.14	1H 0323+342 可視偏光 Q-U 平面
34	4.15	FBQS J1629+4007 可視光光度曲線
34	4.16	FBQS J1644+2619 可視光光度曲線
34	4.17	SDSS J1722+5654 可視光光度曲線
34	4.18	SDSS J1450+5919 可視光光度曲線
35	4.19	FBQS J1644+2619 増光期間の光度曲線
35	4.20	FBQS J1644+2619 増光日内の光度曲線
37	5.1	可視光帯域での放射成分の変化

表目次

2.1	かなた望遠鏡の仕様 [20]	12
2.2	HOWPol の仕様 [22]	13
2.3	HONIR の仕様 [21]	14
2.4	Large Area Telescope の仕様 [19]	16
3.1	ガンマ線データセレクション条件	26
4.1	観測天体 (ガンマ線で明るい狭輝線セイファート 1 型銀河)	28
4.2	観測天体 (ガンマ線で暗い狭輝線セイファート 1 型銀河)	33
5.1	ガンマ線フラックス/可視光フラックス比	37

第1章 序論

1.1 活動銀河核

本節では、活動銀河核と呼ばれる天体について、その概要と放射機構、分類を説明する。

1.1.1 活動銀河核の概要

宇宙には銀河中心の狭い領域が非常に明るく輝く銀河が存在する。これらの天体を、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei: AGN) と呼ぶ。銀河全体と同程度、もしくはそれ以上の明るさで輝き、電波から TeV 以下の線までの全帯域で観測される特徴を持つ。

AGN の中心には、太陽質量の 10^5 - 10^{10} 倍もの超巨大質量ブラックホールが存在すると考えられており、そこへ物質が落ち込む際に解放される重力エネルギーをエネルギー源として輝いている。

1.1.2 活動銀河核の分類

AGN は観測的特徴から様々な分類がされる。以下では、例として代表的な種族を挙げる。

セイフート銀河

セイフート銀河は、通常の銀河よりも明るい中心核を持つ天体として、1943年に Carl Seyfert にによって発見された。通常の銀河とは明らかに異なり、強い可視光、紫外線放射や高電離輝線が観測される。また、一般的に電波で暗い天体である。セイフート銀河は、可視光帯域での輝線によって、1型セイフートと2型セイフートに分類される。1型セイフートは幅の狭い狭輝線と幅の広い広輝線の両者が見られる一方、2型セイフートには狭輝線しか見られないという特徴がある。

電波銀河

電波銀河は、電波で非常に明るい特徴を持つ天体である。電波ジェットや電波ローブといった構造を持つ。また電波銀河においても、セイフート1型、2型銀河と類似して、可視光スペクトルの特徴から分類がされる。幅の狭い狭輝線と幅の広い広輝線の両者が見られるものを広輝線電波銀河 (BLRG)、幅の狭い狭輝線しか見られないものを狭輝線電波銀河 (NLRG) と呼ぶ。

フレージャー

相対論的ジェットを、ほぼ真正面から見込んでいる天体である。これにより、相対論的ドップラー効果に

よってジェットからの放射が全波長域に渡って卓越して観測される。

数日、数時間といった短いタイムスケールでの光度変化や、可視光域における高い偏光度といった特徴を示す。

図 1.1 に示したのは、ブレイザー天体 3C66A の多波長スペクトルである [1]。ブレイザーの多波長スペクトルには、電波から X 線に渡る低エネルギー成分と、X 線からガンマ線に渡る高エネルギー成分の 2 山構造が見られる。それぞれはジェット中の相対論的電子による、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱による放射である。

クェーサー

遠方宇宙に多く存在し、非常に高い光度で輝く天体である。発見当初は非常に強い準恒星状天体 (QSO) として発見された。その後、電波で暗い quasar も発見され、現在ではこれらを総称してクェーサーと呼ぶ。

AGN の統一モデル

現在では、様々に分類される AGN の特徴を理解するため、統一モデルが提唱されている [2]。

AGN の統一モデルで描かれる描像の概念図を図 1.2 に示す。特徴的な構造として、超巨大ブラックホール、降着円盤、分子トラス、広輝線領域、狭輝線領域が挙げられ、一部の AGN にはジェットと呼ばれる構造も見られる。こうした共通の構造を持つ天体を見込む角度の違いによって観測的特徴を理解しようとするのが、統一モデルの考え方である。

統一モデルによって、セイファート 1 型、2 型銀河の観測的特徴を説明することができる。セイファート 1 型銀河は、AGN を比較的正面から見込むため、広輝線と狭輝線が両方観測されるが、セイファート 2 型銀河の場合は、AGN を横方向から見込むため、広輝線成分が分子トラスに隠され観測されない。

また、ジェットが出ている AGN に関しては、ジェットを真正面から見ている天体がブレイザーであり、側面から見ている天体が電波銀河と説明することもできる。

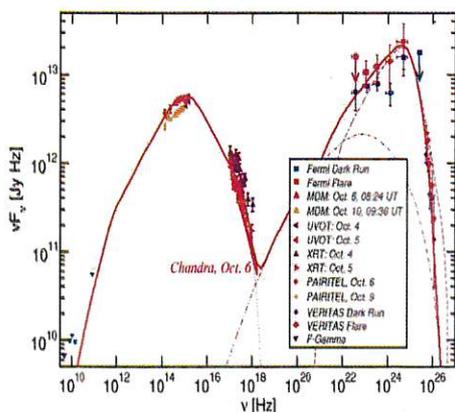


図 1.1: ブレイザー天体の多波長スペクトル [1]

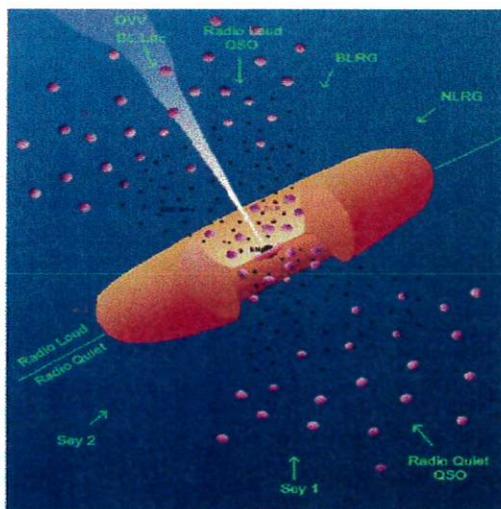


図 1.2: 活動銀河核の統一モデル [2]

図 1.3: 狭輝線セイフオート1型銀河の可視光スペクトル [4]

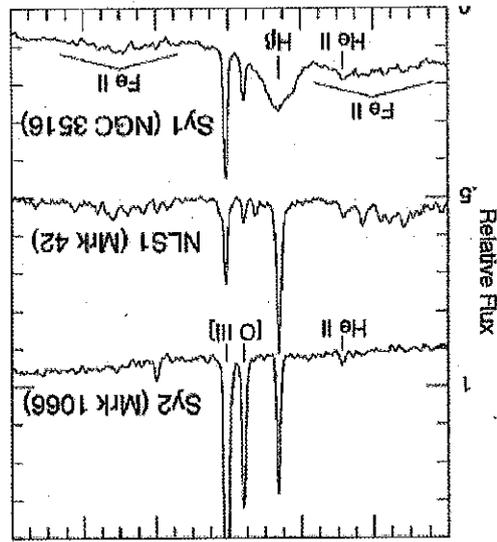


図 1.3は、セイフオート1型、2型銀河、狭輝線セイフオート1型銀河の可視光スペクトルの例である。H β 輝線を見ると、セイフオート1型銀河は幅の広い輝線成分が見られるが、狭輝線セイフオート1型銀河 輝線は比較的狭いことがわかる。セイフオート2型銀河にもH β 輝線は見られるが、これは狭輝線 成分である。このような幅の狭い広輝線から、狭輝線セイフオート1型銀河は比較的軽い質量のブロック ホールを持つことが示唆される。

また、高降着率、高エレクトロニウム光度比、渦巻銀河を母銀河とするなどの特徴が知られている。

3. Fe(III) 輝線が存在する

2. [OIII] λ 5000/H β < 3

1. FWHM(H β) < 1500 km s $^{-1}$

て、以下のようなものが存在する [3]。

狭輝線セイフオート1型銀河は、セイフオート1型銀河のサブクラスに分類される。一般的なセイフオート1型銀河に比べ、比較的幅の狭い広輝線成分を持つことが大きな特徴である。よく用いられる定義とし

1.2.1 狭輝線セイフオート1型銀河の概要

本節では、本研究の対象天体である、狭輝線セイフオート1型銀河に関する概要と、近年注目を集める電波で明るい狭輝線セイフオート1型銀河について説明する。

1.2 狭輝線セイフオート1型銀河

1.2.2 電波で明るい狭輝線セイファート1型銀河

AGNを分類する上で、電波の明るさというのが1つの大きな指標となる。電波の明るさを評価するパラメータとして radio loudness があり、

$$\text{radioloudness} R = \frac{F_{1.4\text{GHz}}}{F_{440\text{nm}}}$$

の形で、電波フラックスと可視光フラックスの比で表される。

radio loudness が10以上程度のものを電波で明るい (radio-loud) AGN と呼び、これより小さいものを電波で暗い (radio-quiet) AGN と呼ぶ。電波で明るい AGN としては、ブレイザー、電波銀河などが知られている。電波帯域での放射はジェットからのシンクロトロン放射が卓越しているため、電波で明るい AGN はジェットを持つ AGN であると言える。一方で電波で暗い AGN としては、セイファート銀河などが分類される。

狭輝線セイファート1型銀河はセイファート銀河のサブクラスに分類されるため、その大部分が電波で暗い天体であるが、一部(7%程度)の天体が電波で明るい天体であることが知られている。また、電波観測からも高い輝度温度、細く伸びた電波構造や、卓越した電波コアが観測されており、これら電波で明るい狭輝線セイファート1型銀河のうち一部の天体においては、ブレイザーや電波銀河のような相対論的ジェットを持つことが示唆されてきた。

近年、電波で明るい狭輝線セイファート1型銀河のうち一部の天体から、フェルミ衛星によって MeV/GeV ガンマ線が検出された。ガンマ線放射は相対論的ジェットの強い証拠であり、ガンマ線を放射している AGN としてよく知られてきた電波銀河、ブレイザー天体に次ぐ、新たなガンマ線源 AGN として注目を集めている。

また、相対論的ジェットを持つ AGN は、その多くが中心ブラックホールの質量が太陽質量の 10^8 倍以上程度と AGN の中でも比較的重いブラックホールを持つこと、楕円銀河を母銀河としているということが知られてきた。それに対し電波で明るい狭輝線セイファート1型銀河は、比較的低質量なブラックホール質量、渦巻銀河を母銀河としているなど、従来のジェットを持つ AGN とは異なる特徴を示す。以上のような理由からこの天体は、ブラックホールの成長と、活動銀河核ジェットの形成の機構を解明する上で重要な天体であると言える。

1.2.3 先行研究

電波で明るい狭輝線セイファート1型銀河に対する系統的な研究は、Zhou & Wang et al.2002 [5]、Komossa et al.2006 [7]、Whalen et al.2006 [12]、Yuan et al.2008 [6] などがあり、50天体程度が発見されている。

電波で明るい狭輝線セイファート1型銀河は、電波帯域での観測から相対論的ジェットの存在が強く示唆されてきた。Doi et al.2006 [8]、Doi et al.2007 [9] では、電波帯域での超高空間分解能観測 (VLBI) を実

ガンマ線で検出された狭輝線セイファート 1 型銀河の中には、可視光観測による短期変動が観測された例も存在する。

図 1.7 は、同天体の可視偏光観測の結果である [15]。3 日間の観測結果を示しており、横軸は時間、縦軸は可視フラックス (図上)、可視偏光度 (図中)、可視偏光方位角 (図下) を表している。観測初日 (MJD=56281) に一日以下の短いタイムスケールでの、偏光度と同期した光度変化が確認された。最大偏光度は 40%にも達しており、この観測時期ではジェットからのシンクロトロン放射が見えていると考えられる。別の時期においても、Ikejiri et al.2010 [13] では同天体において 18% もの高い偏光度を検出しているものの、Eggen et al.2011 [14] では 1.8%を示しており、偏光度の変動が確認できる。

一方で、ガンマ線狭輝線セイファート 1 型銀河の 1 天体である 1H 0323+342 にして実施した可視偏光観測では、上記のような短期変動、高偏光度は観測されなかった。図 1.8 に示したのは、同時期の連続成分のスペクトルを表したもので、横軸は周波数、縦軸は周波数 × フラックスを取り、近赤外線から紫外線までの観測結果を表している。ジェットからのシンクロトロン放射が支配的であれば、この波長帯では右下がりのスペクトル形状になることが予想されるが、観測結果からは右上がりのスペクトルが見られ、降着円盤からの放射が卓越していると考えられる [16]。

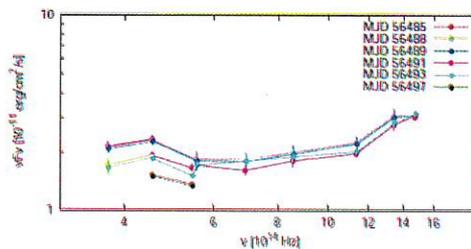
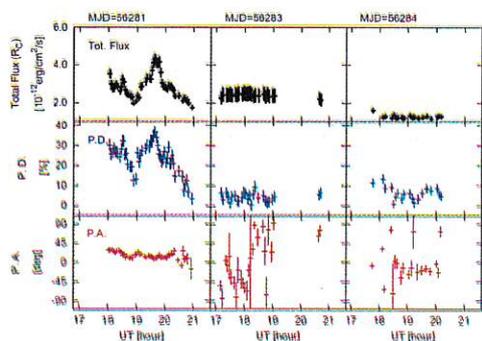


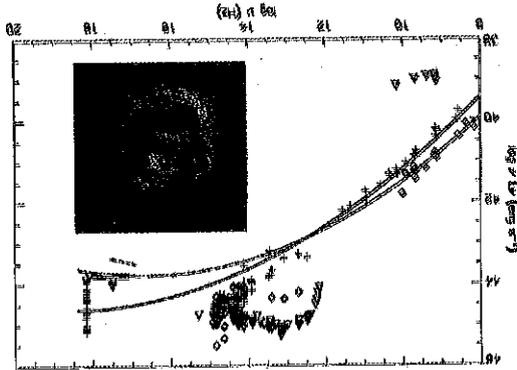
図 1.7: PMN J0948+0022 の可視光短期変動 (可視フラックス (上)、可視偏光度 (中)、可視偏光方位角 (下)) [15]

また、狭輝線セイファート 1 型銀河の母銀河が渦巻銀河である証拠が確認された例も存在する。図 1.9 は、1H 0323+342 の Hubble Space Telescope による画像である。この天体はガンマ線狭輝線セイファート 1 型銀河の中でも最も近くに位置しており、はっきりとした渦巻構造が確認できる。ジェットを持つ AGN はほとんどが楕円銀河を母銀河とすることが知られており、渦巻銀河でありながらジェットを持つ AGN は珍しい。このように、電波で明るい狭輝線セイファート 1 型銀河は従来から知られているジェットを持つ AGN とは異なる性質を示すため、AGN ジェットの研究において重要な天体であると言える。

先行研究から、ガンマ線が検出された電波で明るい狭帯線セインフォート1型銀河では、いずれの天体も近赤外線から紫外線までの帯域はジェットからの放射だけでなく降着円盤からの放射も卓越することがわか
る。新たなガンマ線源 AGN として注目を集めている、電波で明るい狭帯線セインフォート1型銀河の可視
光、ガンマ線放射の相関の様子を調べること、降着円盤による放射とジェットによる放射を切り分け、こ
の天体における可視光帯域での放射のメカニズムを解明することを目的とする。

1.3 本研究の目的

図 1.9: 1H 0323+342 HST 画像 [17]



第2章 観測機器

この章では、本研究に用いた観測機器について述べる。

2.1 かなた望遠鏡

2.1.1 かなた望遠鏡の概要

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た、可視・近赤外線光学望遠鏡である(図 2.1)。東広島天文台は、広島大学東広島キャンパスからおよそ 7km 離れた山の上(標高 503m)に位置し、平均シーイングサイズ 1.1-1.2 秒角程度と国内でも有数の環境下にある(図 2.2)。主鏡の有効口径は 1.54m あり、国内の望遠鏡の中では 4 番目の大きさを誇る。望遠鏡の光学系にはリッチー・クレティアン系が採用されており、現在望遠鏡の 3 つの焦点には、第一ナスミス焦点に一露出型広視野偏光撮像装置 HOWPol、第二ナスミス焦点に高速カメラ、カセグレン焦点に可視近赤外同時カメラ HONIR が搭載されている。

かなた望遠鏡の大きな特徴として、その高い機動力が挙げられる。1m 級の望遠鏡としては非常に速い、方位角方向 5 度/s、高度方向 2 度/s の移動速度を誇り、任意の天体に対して 50 秒以内に向くことができる。この機動力を生かしたガンマ線バーストの即時観測のため、自動観測システムを備えている。ガンマ線バーストを検出した人工衛星のアラートを、アラートシステム(Gamma-ray burst Coordinate Network; GCN)を通じていち早く受け取り、自動的に可視偏光観測を開始する。

その他にもかなた望遠鏡では、X 線、ガンマ線観測衛星と連携した、レーザーやガンマ線バーストなどの高エネルギー天体の同時観測も積極的に行っている。

かなた望遠鏡は広島大学が専有的に使用できるという利点がある。これによって長期に渡るモニター観測や突発的な増光に対応した即時観測が可能であり、AGN 観測において非常に有効であると言える。また、搭載されている HOWPol、HONIR に搭載されている偏光観測モードは、可視光帯域でシンクロトン放射による偏光成分が期待されるレーザー観測において強みとなる。

かなた望遠鏡の仕様を表 2.1 に示す。

HOWPol はダブルウオラストシステムと呼ばれる光学素子を用いることで、一度の露出で偏光/パラメータを測定することが可能な、一露出型偏光撮像モードを備えている。これにより、複数回の露出が必要な通常の偏光観測に比べ、より短いタイムスケールでの変動を観測することができる。発生直後から急激な減光を見せるガンマ線バーストや、非常に早いタイムスケールでの変動を見せることが知られている。レーザー天体などの観測に真価を発揮する。先に述べたガンマ線バースト自動観測システムでは、現在では HOWPol による一露出型偏光撮像モードで観測を実施している。

かなた望遠鏡の第一ナミアミ焦点には、一露出型広視野偏光撮像装置 HOWPol (Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter; HOWPol) が設置されている (図 2.3)。

HOWPol は可視撮像・分光・偏光観測モードを搭載し、CCD による可視光の検出を行う。

2.1.2 HOWPol

図 2.1: かなた望遠鏡 [20]



図 2.2: 東広島天文台外観 [20]

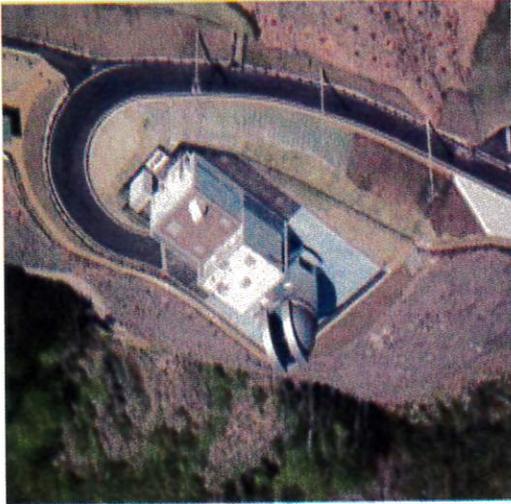


表 2.1: かなた望遠鏡の仕様 [20]

項目	仕様
光学系	リッチー・クレティアン系
主鏡	有効径 1.54m
合計 F 値	F/12.01 (ナミアミ・カセグレン)
合計焦点距離	18501.7mm (ナミアミ・カセグレン)
視野	15 分 φ
最大駆動速度	方位角方向 5 度/sec、高度軸方向 2 度/sec
駆動方式	経緯台

観測においても非常に適している。図 1.7 の観測結果も、この一露出型偏光撮像モードによるものであり、この観測モードの利点を生かすことで、1 時間以下のタイムスケールでの変動を確認することを可能としている。HOWPol の仕様を表 2.2 に示す。

項目	仕様
観測波長帯	0.45–1.0 μm
視野	15 分 ϕ
フィルター	B, V, R, I, z', 偏光
ピクセルスケール	0.29428 秒/pixel
限界等級	撮像モード 19.2 等 (R バンド、10 分露出、 $\Delta R=0.02$) 偏光撮像 16.0 等 (R バンド、10 分露出、 $\Delta P=0.5\%$)

表 2.2: HOWPol の仕様 [22]



図 2.3: 一露出型広視野偏光撮像装置 HOWPol [22]

2.1.3 HONIR

可視赤外線同時カメラ HONIR (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された、可視・近赤外線検出器である (図 2.4)。可視光、近赤外線それぞれの帯域での撮像・分光・偏光撮像・偏光分光モードを搭載している。

ダイクロイックミラーと呼ばれる波長帯の異なる光を分離する光学素子を 2 つ用いることで、可視 1 バンド近赤外 2 バンドの合計 3 バンドでの同時観測を可能とする。現在は赤外線検出器が 1 つ搭載されており、可視 1 バンド近赤外 1 バンドの 2 バンド同時観測が可能となっている。

HONIR によって複数バンドでの同時観測が可能になることによって、光度変化と同時に色の情報を得ることができることは、ブレーザー天体の観測においても重要である。

また現在 HONIR は長期的運用を開始しているものの、まだ立ち上げ段階にある装置である。HONIR の仕

図 2.4: 可視近赤外線同時カメラ HONIR [21]

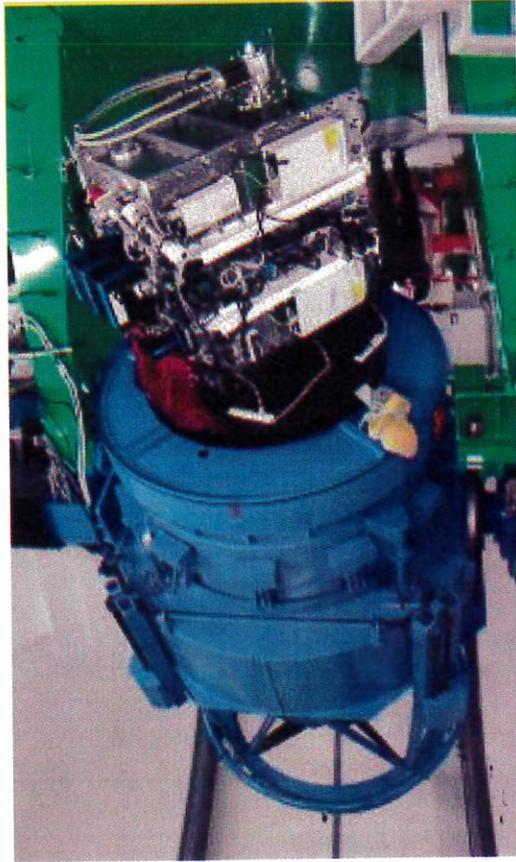


表 2.3: HONIR の仕様 [21]

項目	可視	近赤外
観測波長帯	0.4-1.0 μ m	1.45-2.40 μ m
視野	10分 × 10分	10分 × 10分
フィルター	B, V, R, I, z', Y	Y, J, H, Ks
検出器	CCD	HgCdTe(VIRGO)
ピクセルサイズ	0.29 秒/pixel	0.29 秒/pixel

様を表 2.3 に示す。

2.2 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡

2.2.1 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡の概要

フェルミガンマ線宇宙望遠鏡 (旧 GLAST 衛星) は、2008 年に打ち上げられたガンマ線観測衛星である (図 2.5)。アメリカ、日本、イタリア、フランス、スウェーデン、ドイツによって国際協力開発された。1990 年代に運用されたガンマ線観測衛星 CGRO 衛星の後継機にあたる。

主検出器である Large Area Telescope (LAT) は 100MeV–300GeV のガンマ線帯域に高い感度を持ち、広い視野を生かした全天サーベイ観測を行なっている。打上げから 3 か月で前衛星である CGRO 衛星を大きく上回る 500 天体以上を発見し、4 年間の観測結果を用いた 3FGL カタログでは 3033 天体を検出している [18]。図 2.6 はフェルミ衛星の 5 年間の観測データによるガンマ線全天マップである。画像中央に細く広がった銀河面放射と、いくつかの明るい点源が確認できる。

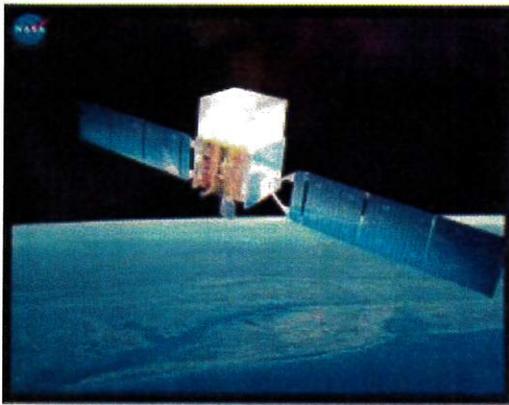


図 2.5: フェルミガンマ線宇宙望遠鏡 [19]

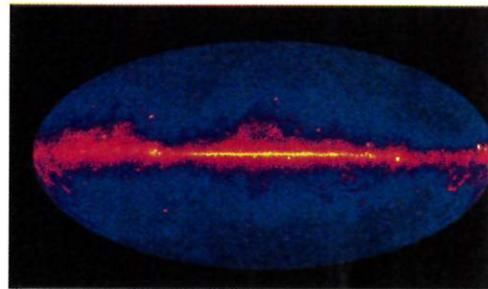


図 2.6: フェルミ衛星による 5 年間のガンマ線全天マップ [19]

2.2.2 Large Area Telescope

Large Area Telescope (LAT) 検出器は、フェルミ衛星に搭載する主検出器である (図 2.7)。20MeV–300GeV のガンマ線帯域に感度を持ち、瞬間視野 2str 以上の広い視野を生かした全天をサーベイ観測している。95 分で全天の 85% をカバーすることができるため、長期のモニター観測や、ブレーザー天体等の短い時間変動を示す天体の研究に適していると言える。

LAT 検出器の仕様を表 2.4 に示す。

トワッカーは、入射光子の到来方向を決定するためのモジュールである。トワッカーは、シリコンストリッパを示す。トワッカーは、シリコンストリッパで電子陽電子対を生成反応を起こし、シリコンストリッパで電子、陽電子の飛跡を検出することで、入射光子の到来

LAT 検出器は、入射光子の到来方向を追跡するトワッカー、入射光子のエネルギーを測定するカロリメータ、バックグラウンドとなる宇宙線イベントを除去する Anti Coincidence Detector (ACD) に分けられる。図 2.7 に LAT 検出器の構造を示す。このように LAT 検出器は、トワッカーの最下部にカロリメータが設置されたタレットと呼ばれるモジュールを 4×4 の合計 16 モジュール並べ、トワッカー部分の全面を ACD で覆った構造をしている。入射したガンマ線はトワッカー一部で電子陽電子対生成反応を起こし、カロリメータ部分で吸収されることでガンマ線の到来方向、エネルギーを測定している。

図 2.8: トワッカーによる検出の模式図 [23]

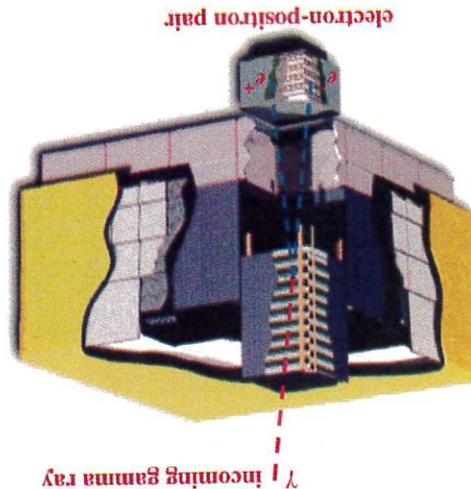
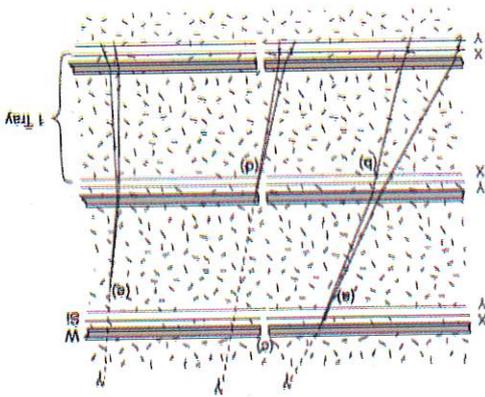


図 2.7: Large Area Telescope の構造 [23]

表 2.4: Large Area Telescope の仕様 [19]

項目	仕様
エネルギー帯域	20MeV-300GeV
視野	2.4sr (全天の 20%)
角度分解能	< 3.5 度 (100MeV)
エネルギー分解能	< 10%
位置決定精度 ($1-\sigma, 10^{-7} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	< 0.5 秒
感度 (点源、>100MeV)	$6 \times 10^{-9} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

方向を高い精度で決定することができる。

位置決定精度を上げるためにタングステン層の厚さはトラッカー内で変えており、タワー上部 12 層では低エネルギー光子の多重散乱による影響を少なくするため薄い層を (0.095mm)、タワー下部 4 層では対生成反応の有効面積を上げるため厚い層を (0.72mm) 搭載している。

カロリメータ

カロリメータは、入射光子のエネルギーを測定するためのモジュールである。

図 2.9 にカロリメータの構造を示す。カロリメータは、CsI(Tl) シンチレータのアレイで構成されており、トラッカーで生成した電子陽電子にシンチレータ内で電磁カスケードを発生させ、シンチレータで発生した蛍光をフォトダイオードで検出することで到来光子のエネルギーを測定する。

また各シンチレータは分割されており、電磁カスケードの 3 次元構造を構成することができる。これにより、カロリメータ内で吸収しきれない高エネルギー光子のエネルギーもカスケードの構造から推定することが可能となっている。

ACD

ACD は、バックグラウンドとなる宇宙線イベントを除去するためのモジュールである。

図 2.10 に ACD の全体図を示す。このように ACD はトラッカー全体を覆っており、上面部に 25 枚、各側面に 16 枚の合計 89 枚に分割されている。ACD のプラスチックシンチレータが宇宙線と反応した信号と検出器の信号の反同時係数を取ることで、バックグラウンドとなる宇宙線イベントを除去している。

ACD は、全体を分割することで、self-veto(カロリメータ内で発生する電磁カスケードのうち、一部がシャワー方向と逆向きに出ることで ACD によって検出され、本来の天体からの信号がバックグラウンドとして除去されてしまう現象)と呼ばれる現象を抑えている。これにより、前 CGRO 衛星では 10GeV 程度までしか感度がなかったのに対して、300GeV までの高エネルギーまで感度を持つ。

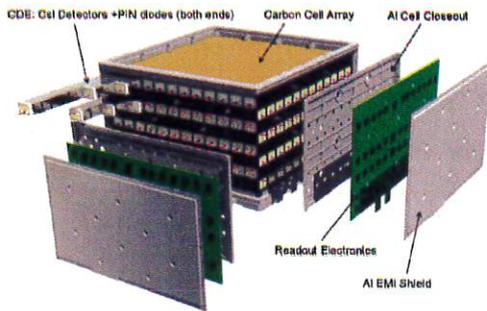


図 2.9: カロリメータの構造 [23]

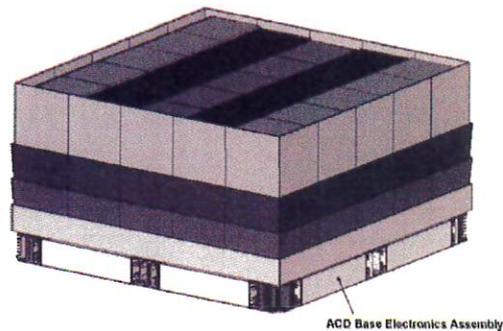


図 2.10: トラッカーを覆う ACD [23]

第3章 解析

本章では、本研究に使用した各データの解析方法を説明する。

3.1 可視・近赤外線解析

かなた望遠鏡 HOWPOL/HONIR で得られたデータは、可視近赤外線汎用解析用ツール群 iraf を用いて解析を行なった [26]。

3.1.1 画像の1次処理

取得した画像を解析する際、まず最初に1次処理と呼ばれる作業を行なう必要がある。図3.1に示したのは、観測した画像に乗るノイズ源を説明した模式図である。このように観測した生の画像には様々なノイズ、感度むら等が存在するため、正確な解析のためにはこれらを除去する必要がある。この工程を1次処理と呼び、一般的に以下のようなノイズ除去からフラット処理までの工程のことを指す。

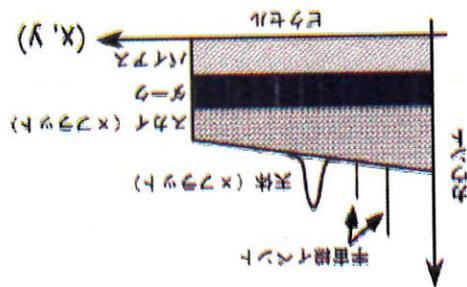


図 3.1: 観測生画像に乗るノイズの概念図 [?]

ノイズ差し引き

半導体検出器を読み出した際に発生するノイズは、ノイズと呼べ、露出時間に寄らず一定の量のノイズが乗る。0秒露出で読み出したノイズを、観測画像から差し引くことで除去する。本研究では、観測画像のノイズキャン、オーバーキヤン領域のカウントをノイズ値としてサンプリングし、この値を差し引くことで除去している。

ダーク差し引き

検出器には、熱により発生した微量の電流によってノイズが発生する。これを暗電流と呼ぶ。暗電流は露出時間、検出器温度に依存して増加する。このため通常検出器は十分な冷却下で運用される。

可視光観測用の CCD の場合は、十分な冷却下であれば暗電流によるノイズは微量であるためほぼ無視することができる。かなた望遠鏡 HOWPol の CCD はおよそ 173K に冷却されているため、暗電流によるノイズは十分に無視することができる。

近赤外線暗電流によるノイズは、観測画像と同じ露出時間で光を完全に遮断し読み出したダークテンプレート画像を、観測画像から差し引くことで除去する。

フラット処理

検出器上の各ピクセルには感度のむらが存在し、また望遠鏡や検出器で生じる収差、検出器上の天体の位置によって異なる結果が得られてしまう。そこで、フラット処理と呼ばれる工程によって、各ピクセルの相対的な感度を求めて補正する。

フラット処理は、検出器に平行で一様な光を当てて読み出したフラット画像で観測画像を割ることで行なう。フラット画像は、フラット板と呼ばれる天文台ドーム内に設置された平板に一様に光を当て、その反射光を読み出すことで作成する。

以上が 1 次処理の全工程である。1 次処理は、撮像、偏光、分光などの観測モードによらず、解析する全画像に対して行なう必要がある。

3.1.2 測光解析

図 3.2 は、HOWPol によって得られた広視野撮像観測画像 (1 次処理済) である。このように得られた画像の視野内には多数の天体が写り込んでおり、これらの天体からのカウントを積分することで、明るさを測定 (測光) することができる。撮像観測、偏光観測のいずれにおいても、天体からのカウントは最も基本的な観測量であるため、測光解析が不可欠となる。天体の明るさを測定する手法としては、開口測光と PSF 測光が存在する。

開口測光

図 3.3 は、開口測光の概念図である。開口測光とは、観測画像上で、天体を囲むある領域内 (アパーチャ領域) にあるカウントが天体からの光であるとしてその積分値を求め、天体の明るさを測定する方法である。さらに、アパーチャ範囲より外側の領域にあるカウントを測定することで、バックグラウンドである空からの光 (スカイバックグラウンド) の量を見積もる。

本研究では、アパーチャ領域として半径が星像の半値幅 (Full Width Half Maximum;FWHM) の 2.5 倍の円形領域を取り、スカイ領域としてアパーチャ領域の外側幅 5 ピクセル (3.0 秒角) のドーナツ状の領域から見積もった。

$$I = \langle \epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 \rangle \tag{3.1}$$

それぞれの偏光は、電磁波の振幅 ϵ_x 、 ϵ_y 、位相差 δ として
 又偏光は加算性がある量で、複数の光源がある場合に有利である。
 そこで、1852年にストークスによって導入されたストークスパラメータ (I, Q, U, V) を使用する。ストーク
 光は、進行方向と垂直な方向に電場、磁場が振動する横波である。自然界に存在する光は全方向に一樣に振
 動しているが、特定の偏光成分の割合を示す偏光度 P と、振動が偏っている方向を示す偏光方位角 θ で表
 される。しかし、これら2つの量は加算性無く、複数の光源がある状況下での偏光を議論することができ
 ない。

3.1.3 偏光解析

上記のような方法で天体からのカウントを求めるとはできるが、地上観測では地球大気による減光の影
 響があるため、その天体単体から本来の明るさを測定することはできない。そのため、地上観測においては
 相対測光と呼ばれる方法によって星の明るさを測定する。相対測光とは、周囲にある明るさが既知の天体の
 明るさと目標天体の明るさの相対値を測定することで、天体の本来の明るさを決定する方法である。

PSF 測光
 天体からの光は複数の要因によって散乱され、検出器上では有限の広がりをもって観測される。この画像
 上で天体の広がり形状を、PSF(点広がり関数; Point Spread Function) によってモデル化して、この画像
 することで、天体からのカウントの総和を測定する方法である。フーリエ変換測光に比べ、精度よく測光する
 ことができるが、空間的に広がった天体や星像がゆがんだ画像では PSF を上手くモデル化することができ
 ず、正確な測光をすることができない。

図 3.2: HOWPOL による広視野撮像観測画像 (視野 15

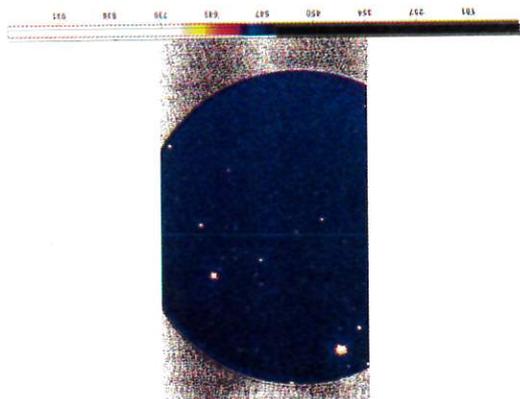
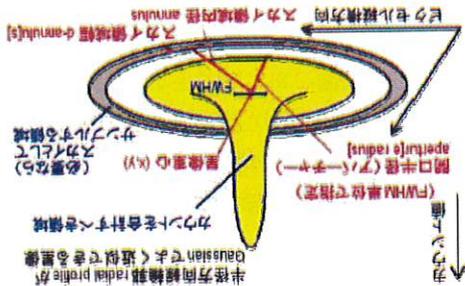


図 3.3: 開口測光の概念図 [?]



$$Q = \langle \epsilon_x^2 - \epsilon_y^2 \rangle \quad (3.2)$$

$$U = 2 \langle \epsilon_x \epsilon_y \cos \delta \rangle \quad (3.3)$$

$$V = 2 \langle \epsilon_x \epsilon_y \sin \delta \rangle \quad (3.4)$$

と表わされる。ここで、 I は電磁波の振幅、 Q, U は直線偏光、 V は円偏光に関するパラメータである。以下、円偏光は除き直線偏光についてのみ説明する。

偏光度 P 、偏光方位角 θ は、上記のパラメータと以下のような関係にある。

$$P = \sqrt{\frac{Q^2 + U^2}{I^2}} \quad (3.5)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (3.6)$$

HOWPol には、半波長板回転偏光観測法と、一露出型偏光観測法の2種類の偏光観測モードが備わっている。いずれの観測モードでも、このストークスパラメータ Q, U を求めることで、偏光成分を導出している。

ここで、半波長板回転偏光観測法と、一露出型偏光観測法それぞれでの、ストークスパラメータの導出原理を説明する。

半波長板回転偏光観測法

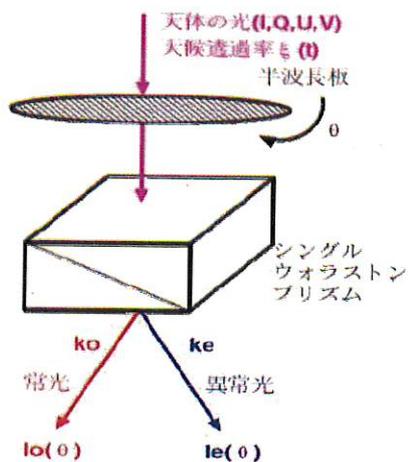


図 3.4: 半波長板回転偏光観測法の概念図

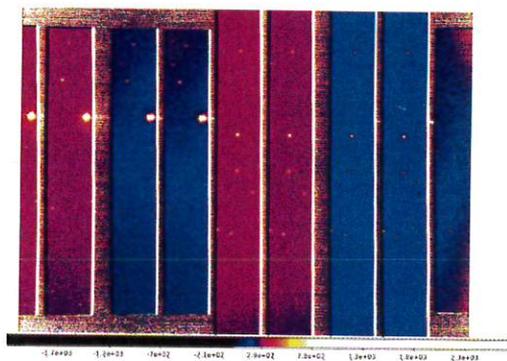


図 3.5: HOWPol による狭視野偏光撮像観測画像

図 3.4 は、半波長板回転偏光観測法における偏光観測の概念図である。入射した光は、角度 θ 回転した半波長板を通過し、ウォラストンプリズムで常光、異常光に分けられ、CCD 上で検出される。概念図では

と表わされる。よって

$$a_2 = \frac{1 - U/I}{1 + U/I} \quad (3.16)$$

$$a_1 = \frac{1 - Q/I}{1 + Q/I} \quad (3.15)$$

と a_1, a_2 をおくと

$$a_2 = \sqrt{\frac{I_e(22.5^\circ) / I_o(22.5^\circ)}{I_e(67.5^\circ) / I_o(67.5^\circ)}} \quad (3.14)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{I_e(0^\circ) / I_o(0^\circ)}{I_e(45^\circ) / I_o(45^\circ)}} \quad (3.13)$$

ここで

のように、大気による吸収係数 $\xi(t)$ を消すことができる。

$$\frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ) k_e} = \frac{1 + Q/I}{1 - Q/I} \quad (3.12)$$

$$\frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ) k_e} = \frac{1 + Q/I}{1 - Q/I} \quad (3.11)$$

$$\frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ) k_e} = \frac{1 + Q/I}{1 - Q/I} \quad (3.10)$$

$$\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ) k_e} = \frac{1 + Q/I}{1 - Q/I} \quad (3.9)$$

それぞれ角度での常光、異常光の強度から $I_e(67.5^\circ)$ までを観測する。

半波長板を回転させて、 $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ の 4 角度で観測することと、 $I_o(0^\circ), I_e(0^\circ)$ から $I_o(67.5^\circ), I_e(67.5^\circ)$ までの減光係数である。大気による吸収の係数は時間に依存する関数となるため、 $\xi(t)$ となっている。ここで、 I は天体の光の強度、 ξ は大気による吸収係数、 k_o, k_e はそれぞれオオラツトソで観測される。ここで、 I は天体の光の強度、 ξ は大気による吸収係数、 k_o, k_e はそれぞれオオラツトソ

$$I_e(\theta) = \frac{I}{2} (1 - \frac{Q}{I} \cos 4\theta - \frac{1}{U} \sin 4\theta) k_e \xi(t) \quad (3.8)$$

$$I_o(\theta) = \frac{I}{2} (1 + \frac{Q}{I} \cos 4\theta + \frac{1}{U} \sin 4\theta) k_o \xi(t) \quad (3.7)$$

図 3.4 のように分けられたそれぞれの光の強度は

型偏光観測では 1 枚の画像から偏光/ラマータを導出する。

もこのような狭視野画像が得られ、半波長板回転偏光観測では半波長板の回転角度を変えて 4 枚、一露出分離した光がそれぞれ重なり合ってしまったため、このような視野ラマータを使用する。いずれの偏光観測法で分けられた 4 つの光が、狭視野にそれぞれ収まっている。偏光観測では、広視野ラマータではオオラツトソで得られた狭視野偏光画像観測画像である。オオラツトソラマータによる観測である。実際に HOWPOL で得られた狭視野偏光画像観測画像である。オオラツトソラマータによる観測である。

2 つに分けられているが、HOWPOL では実際にはオオラツトソラマータによって 4 つに分けられて

$$I = \Sigma_{\theta}(I_o(\theta) + I_e(\theta)) \quad (3.17)$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{1 - a_1}{1 + a_1} \quad (3.18)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{1 - a_2}{1 + a_2} \quad (3.19)$$

と表わされる。

このようにして、半波長板観測法においては、半波長板 4 角度での観測データからストークスパラメータ Q 、 U が導出される。

一露出型偏光観測法

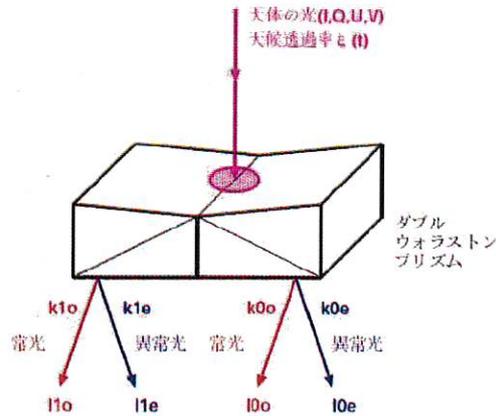


図 3.6: 一露出型偏光観測法の概念図

図 3.6 は、一露出型偏光観測法による偏光観測の概念図である。入射した光はダブルウォラストンプリズムによって 4 つの光に分けられ、CCD によって検出される。

4 つに分けられたそれぞれの光は

$$I_{1o} = I(0^\circ)k_{1o}\xi(t) \quad (3.20)$$

$$I_{1e} = I(90^\circ)k_{1e}\xi(t) \quad (3.21)$$

$$I_{0o} = I(45^\circ)k_{0o}\xi(t) \quad (3.22)$$

$$I_{0e} = I(135^\circ)k_{0e}\xi(t) \quad (3.23)$$

と表わされる。 k 、 $\xi(t)$ は半波長板回転偏光観測法と同様に、それぞれウォラストンプリズムによる吸収係数と、大気による吸収係数を表わす。

ストークスパラメータ Q 、 U は

偏光方位角補正
偏光の方位角は通常地球上で北を原点に座標系を取るが、検出器系での原点の取り方は観測の条件によって変化するため、そのずれを修正する必要がある。偏光方位角の補正についても先行研究で調査されているため、この値を用いて補正を行った [7]。

器械消偏光補正
器械消偏光とは、直線偏光が一部円偏光となり、直線偏光成分が弱まるというものである。この影響については先行研究 [7] によって調査されており、HOWPOL では無視できるほど小さいということが知られているため本研究では考慮していない。

器械偏光補正
主鏡や副鏡は反射光が光軸に対して軸対称となっているため、光が反射することによって生じる偏光成分は互いに打ち消しあう。しかし HOWPOL はかなた望遠鏡のナミア焦点に搭載されているため、入射軸と垂直に反射させる第3鏡による反射で、最大3.4%程度の器械偏光(装置に起因する偏光成分)が生じることが知られている。ここで生じる偏光量は、先行研究 [25] で既にモデル化されているため、これを用いて補正を行った。

一露出型偏光観測法による最大のメリットは、より短い時間分解能を發揮することができる点である。一度露出からスタートーク又はI₁₀、Q、Uを導出することができるため、プルーサー-天体のように急激な変動を見せる天体の観測に有用である。
しかし式(3.27)、(3.28)からわかるように、ウォラストンプリズムによる減光係数のI₁₀、Q、Uが入ることで不定性が生じる。最大で数%程度の不定性が生じるため、正確な偏光度を測定したい場合には不利である。一方で半波長板偏光観測法では、4つの半波長板角度で観測することによってこれらのI₁₀、Q、Uを消去することができるため、より正確な偏光度の測定を行うことができるという利点を持つ。

となる。一露出型偏光観測法では、以上のように1度の露出からスタートーク又はI₁₀、Q、Uを導出することができる。

$$I = I_{10} + I_{1e} + I_{0e} + I_{0e} \quad (3.26)$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{I_{10} \left(\frac{R_{10}}{R_{1e}} \right) - I_{1e}}{I_{10} \left(\frac{R_{10}}{R_{0e}} \right) - I_{0e}} + I_{1e} \quad (3.27)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{I_{0e} \left(\frac{R_{0e}}{R_{10}} \right) + I_{0e}}{I_{10} \left(\frac{R_{10}}{R_{0e}} \right) - I_{0e}} + I_{0e} \quad (3.28)$$

と表わされるため、以上より

$$\frac{Q}{I} = \frac{I(0^\circ) - I(90^\circ)}{I(0^\circ) + I(90^\circ)} \quad (3.24)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{I(45^\circ) - I(135^\circ)}{I(45^\circ) + I(135^\circ)} \quad (3.25)$$

3.2 ガンマ線解析

この節では、フェルミ衛星によるガンマ線観測データの解析方法について記述する。フェルミ衛星のデータ解析には、運営チームにより開発されたフェルミ衛星解析用ツール ScienceTools を用いる [19]。

3.2.1 データセレクション

フェルミ衛星による観測データは、ガンマ線光子の到来時間、方向、エネルギーなどの情報を含んだ FT1 ファイルと、時間ごとの衛星の姿勢に関する情報を含んだ FT2 ファイルにわけられている。

データセレクション条件

本研究では、表 3.1 に示すような条件によってデータのセレクションを行なった。以下に、表中で使われる用語について述べる。

event class

フェルミ衛星では、到来した各ガンマ線に天体からのものである確率が計算されており、その精度によって event class と呼ばれる階級付けを行なっている。event class を上げることでよって扱う光子の精度は上がるものの、光子の統計数は下がる。系外点源の解析には source class を用いることが推奨されている。

Zenith Angle Cut

Zenith Angle とは、検出器の天頂角と到来光子との角度を指す。LAT 検出器は全天をくまなくサーベイ観測するため、地球のへりの部分が視野内に入り込むことで、バックグラウンドレベルが上がるということが起こる。このような地球大気からの放射を除去するため、Zenith Angle の小さい(天頂付近のみ)到来光子のみを選択する必要がある。LAT 検出器の開発チームによって Zenith Angle は 100° 以下が推奨されている。

データセット

ガンマ線観測データの再構成アルゴリズムやイベントの分類は、LAT 検出器の開発チームによって順次更新されており、バックグラウンドイベントと天体からのイベントの取捨選択の方法等が高度化することで、検出感度等の性能の向上が実現される。更新されたアルゴリズムはフェルミ衛星の過去のデータ全てに適用され、打ち上げからの全期間で使用することができる。現在は Reprocessed Pass 7 データが最新のデータセットとして公開されている。

天体モデルの作成
 解析領域周辺の放射のモデルは、XML形式で入力する。解析領域周辺の各天体の放射モデルと、系内背景放射、系外背景放射に関する放射モデルを入力する。
 系内背景放射は、我々の銀河に起因する広がった放射で、図??のように銀河面上に特に強く見られ、銀河面から離れるほど弱まる。系外背景放射は、銀河系外に起因する背景放射で、全天から一様な強度、

gttdiffmap
 UNBINNED 解析専用のツール。広がった放射に対するレスポンスを、最尤法でのコッテナインジに先立つて計算する。

gtexpmap
 作成された exposure map から、最尤法でのコッテナインジに使用される exposure map を作成する。
 gtcube
 視野内の各位置での合計の livetime を計算する。イベントファイル、衛星ファイルの入力から exposure cube を作成する。

gtmtime
 衛星ファイルに書かれた衛星の姿勢や状態の情報をもとに、イベントが good である期間 (Good Time Intervals; GTI) を新たに生成する。生成した GTI をもとにして gtselect で切り出したイベントファイルからイベントのセレクションを行ない、新たにイベントファイルを生成する。
 gtselect
 解析に用いるイベントファイルから、解析領域、期間、エネルギー帯域、event class、到来光子の Zenith Angle 等の条件でデータの切出しを行なう。

ScienceTools を用いた解析は、以下のようなツールを用いて行なった。
 また、系外天体からの放射は到来光子の統計数が少ないため、一連の解析は UNBINNED(到来光子のビニングを行わない) で行なっている。

3.2.2 ScienceTools による解析

表 3.1: ガンマ線データセレクション条件

ScienceTools / イベント	ScienceTools / イベント
選択領域	15°φ
エネルギー帯域	100MeV-100GeV
event class	source class
Zenith Angle	< 100°
レスポンス	P7_SOURCE_V15
データセット	Reprocessed Pass 7
ScienceTools / イベント	v9r34p01

エネルギー分布で放射が見られる。背景放射に関する放射モデルは、どちらもフェルミチームによって作成されている。本研究では、系内背景放射のモデルファイルとして `gll_iem_v06_trim` を、系外背景放射のモデルファイルとして `p8_p300x_isotropic_source_v1` を使用した。

gtlike

以上で生成したイベントファイル、衛星ファイル、天体モデルファイル、視野内の livetime、exposure map 等をもとに、最尤法によるフィッティングを行なう。

最尤法とは、尤度と呼ばれる関数を計算し、この値が最大になる解を求める方法である。尤度関数 L は、 n 個の測定値を x_1, x_2, \dots, x_n 、モデルの変数を θ 、モデルの分布関数を $f(x_n|\theta)$ とすると

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n|\theta) = f(x_1|\theta)f(x_2|\theta)\dots f(x_n|\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \quad (3.29)$$

と表わされる。尤度が最大値を取る際は、尤度関数が極値を取るため

$$\frac{dL}{d\theta} = 0 \quad (3.30)$$

となる θ を探す。一般に尤度は非常に大きい値を取るため

$$\log L(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \log f(x_i|\theta) \quad (3.31)$$

のように対数を取る。

統計的有意度は、Test Statistic(TS) と呼ばれる値によって表わされる。TS とは、対象天体のモデルを入れた場合でのフィッティング結果と、モデルを入れない場合でのフィッティング結果の尤度の差で表わされる値で

$$TS = 2(\log L - \log L_0) \quad (3.32)$$

と表わされる。ここで L は対象天体のモデルを入れた場合での尤度、 L_0 は対象天体のモデルを入れない場合での尤度である。TS 値が大きいほど天体の検出が有意である。一般によく用いられる σ とは $\sqrt{TS} = \sigma$ の関係があり、TS=25 以上 (5σ 以上) の天体が検出とされる。

第4章 結果

この章では、本研究の観測結果について述べる。
 本研究では、電波で明るい狭輝線セイフート1型銀河のうち、ガンマ線で明るい天体に対する可視測光、偏光、ガンマ線観測と、ガンマ線で暗い天体に対する可視光モニタ一観測を実施した。

4.1 ガンマ線で明るい狭輝線セイフート1型銀河

本節では、ガンマ線で明るい狭輝線セイフート1型銀河は、表4.1に示した2天体に対して、可視測光・偏光、ガンマ線観測を実施した。

PMN J0948+0022は、電波で明るい狭輝線セイフート1型銀河の中で最初にガンマ線放射が検出された天体であり、ガンマ線帯域で最も明るい。そのため、多波長観測が最も盛んに行われている天体である。IH 0323+342は、赤方偏移 $z=0.0610$ とガンマ線狭輝線セイフート1型銀河の中で最も近傍に位置する天体である。またX線で非常に明るい特徴を持つ。

いずれの天体も日本から観測可能な位置にあり、かなた望遠鏡で長期モニタ一観測が可能な天体であることから、この2天体を選択した。

天体名	redshift	log(radio-loudness)	1.4GHz radio flux(mJy)	FWHM(H β)
PMN J0948+0022*1*2	0.584	2.73	111.5	1432
IH 0323+342*1*2	0.0610	2.39	614.3	1520

*1 Yuan et al.2008 [6]

*2 Doi et al.2012 [27]

表 4.1: 観測天体(ガンマ線で明るい狭輝線セイフート1型銀河)

4.1.1 可視光・ガンマ線光度曲線

本節では、観測を実施した2天体それぞれについて、可視光測光、ガンマ線の観測結果を述べる。

PMN J0948+0022

図 4.1 は、PMN J0948+0022 の可視光、ガンマ線光度曲線である。図 4.1 の上図は可視光 R / バンド光度曲線、下図は 100MeV から 100GeV までのガンマ線光度曲線を示す。ガンマ線光度曲線のうち、TS>10 で検出されている点を青色、TS<10 である点を緑色で示している。

可視光、ガンマ線の両帯域で光度変化が見られる。ここから、ガンマ線での増光が見られた期間 (MJD=56250–56400) に着目し、拡大したのが図 4.2 である。MJD=56300 付近にガンマ線での増光が見られ、同時期に可視光での増光が確認できる。一方で、MJD=56350 付近には可視光での増光が見られるが、同時期のガンマ線光度曲線からは大きな増光は確認できない。

以下、それぞれの期間を term-1(MJD=56260–56310)、term-2(MJD=56320–56370) として、各期間でのふるまいを調べる。

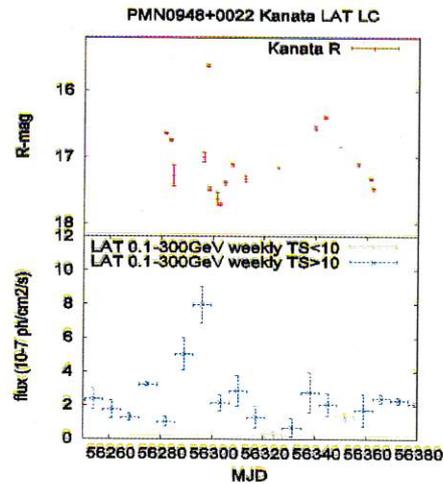
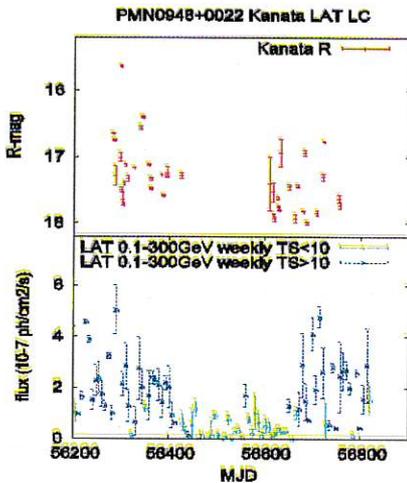


図 4.1: PMN J0948+0022 可視光、ガンマ線光度曲線 図 4.2: PMN J0948+0022 可視光、ガンマ線光度曲線拡大図

図 4.3 は、解析期間中の PMN J0948+0022 の可視光フラックス、ガンマ線フラックスの関係を示した図である。図の横軸は可視光 R バンドフラックス、縦軸は 100MeV–100GeV ガンマ線のフラックスをとり、同時期の観測点をプロットしている。図中の赤点は全期間の観測点、緑点は term-1 の観測点、青点は term-2 の観測点を示す。

図のように、可視光とガンマ線の光度は単純な相関関係には無いことがわかる。term-1 では可視光とガンマ線の両帯域で増光が見えるが、term-2 では可視光のみが大きく増光を見せている。

図 4.4 は、PMN J0948+0022 のガンマ線フラックスとガンマ線べき指数の関係を示した図である。図中の赤点は全期間の観測点、緑点は term-1 の観測点、青点は term-2 の観測点を示している。

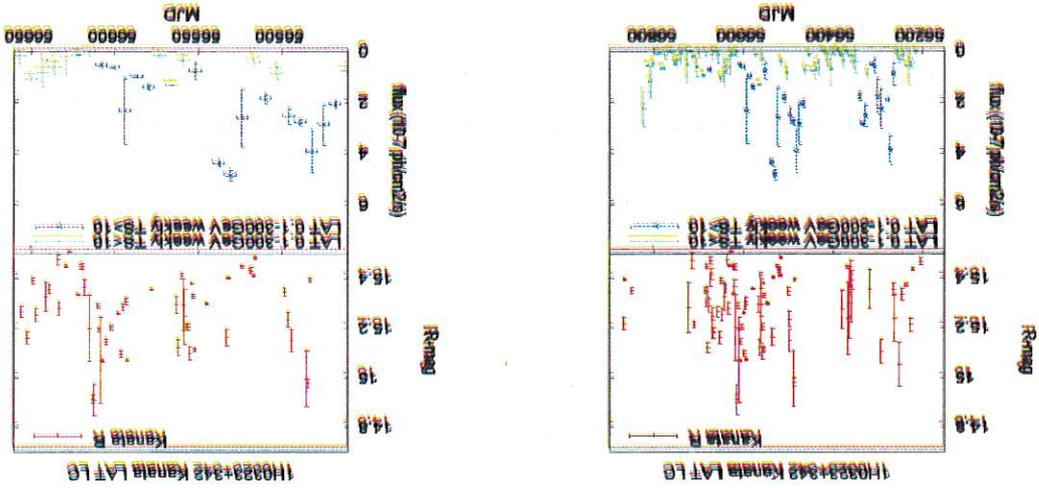
term-1 で示した点はガンマ線、可視光の両帯域で増光が見られた時期であるが、この期間中でガンマ線べき指数に大きな変化は見られない。可視光のみの増光が見られた term-2 の点でのふるまいは、ガンマ線で暗く、べき指数が正確に定まらないため、変動があるかどうかはわからない。

1H 0323+342

図 4.5 は、1H 0323+342 の可視光、ガンマ線光度曲線である。図 4.5 の上図は可視光 R バンド光度曲線、下図は 100MeV から 100GeV までのガンマ線光度曲線を示し、ガンマ線光度曲線の青色の点は TS>10 で検

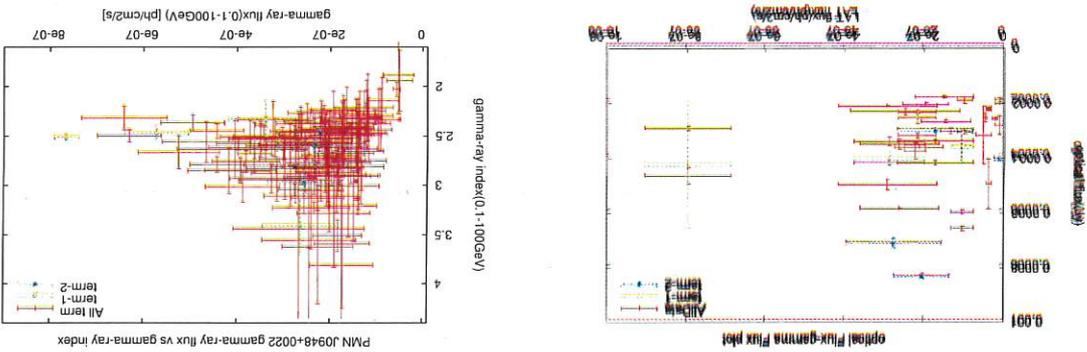
図 4.7 は、解析期間中の 1H 0323+342 の可視光ツウクス、ガンマ線ツウクスの関係を示した図である。図の横軸は可視光 R バンドツウクス、縦軸は 100MeV-100GeV ガンマ線のツウクスをとり、同時期の観測点をプロットしている。図中の赤点は全期間の観測点、緑点は term-1 の観測点、青点は term-2 の

図 4.5: 1H 0323+342 可視光、ガンマ線光度曲線 図 4.6: 1H 0323+342 可視光、ガンマ線光度曲線拡大図



出されている点を、緑色の点は $TS < 10$ である点を示す。この天体においても同様に、ガンマ線での増光が見られた期間 (MJD=56450-56650) に着目し、図 4.6 に拡大図を示した。MJD=56480 付近でガンマ線、可視光の両帯域で増光が見える一方、MJD=56600 付近では可視光帯域でのみ増光し、同時期のガンマ線帯域に大きな変動は見られない。以下、先程と同様に、それぞれの期間を term-1 (MJD=56450-56520)、term-2 (MJD=56580-56630) として、各期間でのふるまいを調べる。

図 4.3: PMN J0948+0022 可視光ツウクス、ガンマ線ツウクス関係 図 4.4: PMN J0948+0022 ガンマ線ツウクス、ガンマ線へき指数関係



観測点を示す。PMN J0948+0022 と同様に、この天体でも可視光フラックスとガンマ線フラックスは単純な相関関係には無いことがわかる。

図 4.8 は、1H 0323+342 のガンマ線フラックスとガンマ線べき指数の関係を示した図である。図中の赤点は全期間の観測点、緑点は term-1 の観測点、青点は term-2 の観測点を示している。term-1 の期間内では、明るくなるほどべきがハードになる傾向が見える。

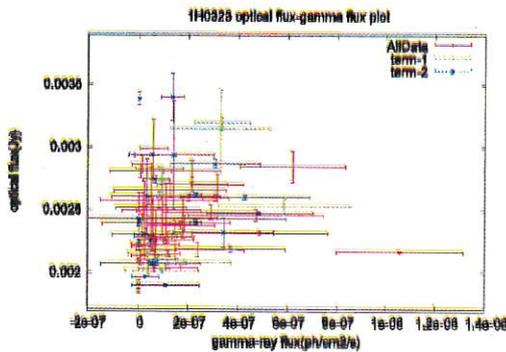


図 4.7: 1H 0323+342 可視光フラックス、ガンマ線フラックス関係

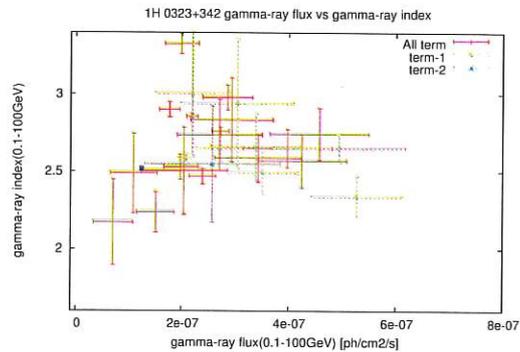


図 4.8: 1H 0323+342 ガンマ線フラックス、ガンマ線べき指数関係

4.1.2 可視偏光観測

図 4.9、図 4.10 は、それぞれ PMN J0948+0022、1H 0323+342 の可視偏光観測による結果である。図上段は可視 R バンド等級、図下段は可視 R バンド偏光度を示している。

PMN J0948+0022 は先行研究でも報告されているように、偏光度に変動が見られ、高い時期で 10%以上の偏光度を示している。一方で 1H 0323+342 は偏光度が高い時期でも最大 5%程度と、比較的低い値をとる。

図 4.11 と図 4.12 は、それぞれ PMN J0948+0022、1H 0323+342 の可視光等級と、可視偏光度の関係を示した図である。横軸に可視 R バンド等級、縦軸に可視 R バンド偏光度をとり、同時期の観測点をプロットしている。

PMN J0948+0022 は観測点が少なく全体の傾向がわからないが、可視光フラックスが低い場合でも高い偏光度を示す時期が存在している。1H 0323+342 については可視光フラックスと可視偏光度とが相関する傾向が見える。両者の相関係数を計算したところ、相関係数 $\alpha = 0.5553$ との結果が得られた。

全期間中での、2 天体の Q-U 平面上でのふるまいを図 4.13、図 4.14 に示した。それぞれ横軸が Q/I(%), 縦軸が U/I(%) をとっている。

4.2 ガンマ線で暗い狭輝線セイファート 1 型銀河

本節では、ガンマ線で暗い狭輝線セイファート 1 型銀河の観測結果を示す。

以下に示す天体は、ガンマ線で検出されていないが、電波で明るく、相対論的ジェットを持つ可能性が示唆

されている天体である。観測天体の情報を表 4.2 に示す。天体の選出については、電波で明るい狭線銀河のうち、かなた望遠鏡から観測可能な位置にあり、かつ電波観測から相対論的ジェットが存在が示唆される天体(高輝度温度、直線状に広がった電波構造等)を、Komossa et al.2006 [7]、Yuan et al.2008 [6]、Doi et al.2011 [28] の論文から選出した。

関係

図 4.11: PMN J0948+0022 可視等級、可視偏光度 図 4.12: 1H 0323+342 可視等級、可視偏光度関係

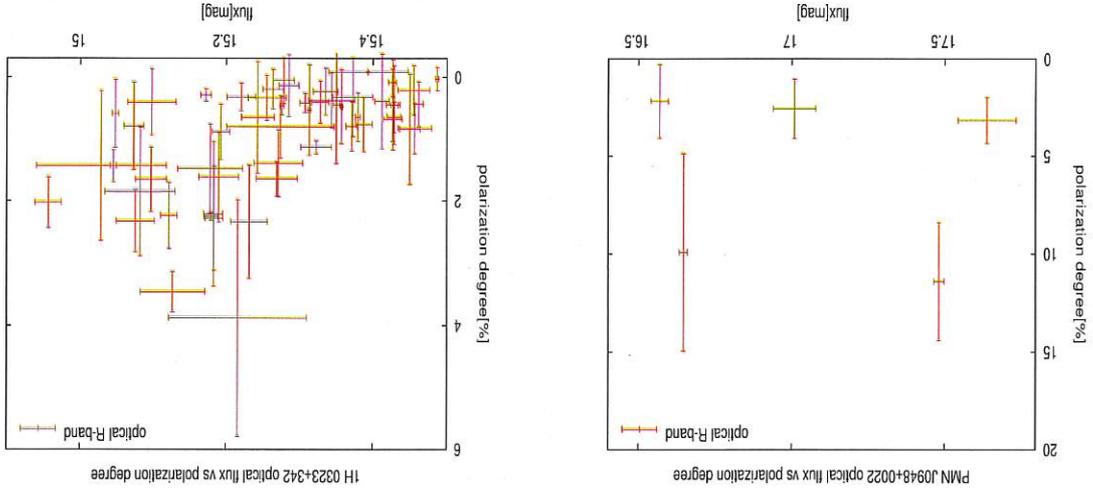
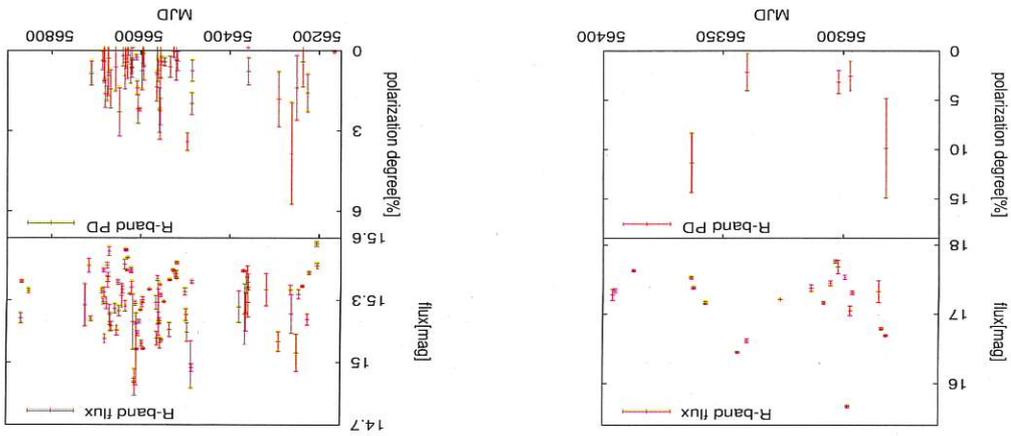


図 4.9: PMN J0948+0022 可視偏光観測結果 図 4.10: 1H 0323+342 可視偏光観測結果



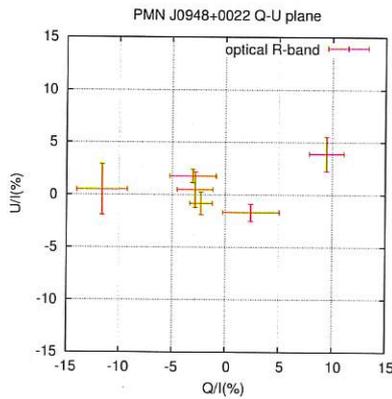


図 4.13: PMN J0948+0022 可視偏光 Q-U 平面

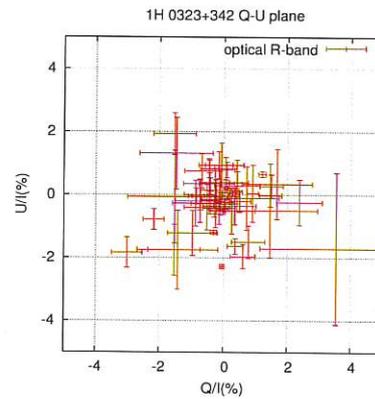


図 4.14: 1H 0323+342 可視偏光 Q-U 平面

天体名	redshift	log(radio-loudness)	1.4GHz radio flux(mJy)	FWHM(H β)
FBQS J1629+4007 ^{*3}	0.272	2.15	20	—
FBQS J1644+2619 ^{*3}	0.145	2.97	99	1507
SDSS J1722+5654 ^{*1}	0.425	2.37	—	1385
SDSS J1450+5919 ^{*2}	0.202	1.33	3.4	1159

*1 Yuan et al.2008 [6]

*2 Doi et al.2012 [27]

*3 Doi et al.2011 [28]

表 4.2: 観測天体 (ガンマ線で暗い狭輝線セイファート 1 型銀河)

図 4.15–4.18 は、ガンマ線で暗い狭輝線セイファート 1 型銀河の、可視光観測結果である。それぞれ、図上段は可視光 R バンド、図下段は可視光 V バンドの光度曲線を示している。

4 天体のモニター観測を実施した結果、FBQS J1644+2619 の MJD=56570 付近で、数日スケールの増光が確認された。この期間を拡大したものが図 4.19 である。先程と同様、図上段は可視 R バンド、図下段は可視 V バンドの光度曲線を示している。図中の*点と*点は、それぞれ天体の R バンド、V バンドの光度曲線を示し、*点と*点は、相対測光に使用した比較星同士の相対測光値を示している。

MJD=56562 と、その 4 日後の MJD=56566 の観測間で、天体の等級が R バンドでおよそ 0.4 等、V バンドでおよそ 0.2 等増光しているのが確認できる。期間内の比較星同士の相対測光値はほぼ一定値をとっており、増光が天体によるものであることがわかる。

また、図 4.20 は、増光した MJD=56566 中での光度曲線である。横軸は MJD=56566 内での UT(hour) を表しており、R バンドで 3 点、V バンドで 3 点の測光観測を実施している。図中の赤点と緑点はそれぞれ R バンドでの天体の等級と比較星の相対測光値、青点と水色点はそれぞれ V バンドでの天体の等級と比較星の相対測光値を示す。いずれの波長帯でも、3 点の観測期間内では大きな変動は確認できない。

圖 4.17: SDSS J1722+5654 可視光光度曲線

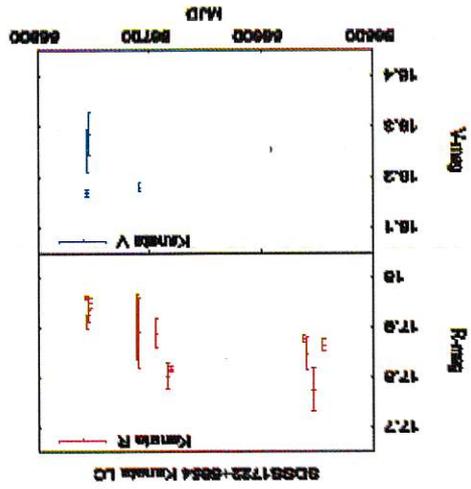


圖 4.18: SDSS J1450+5919 可視光光度曲線

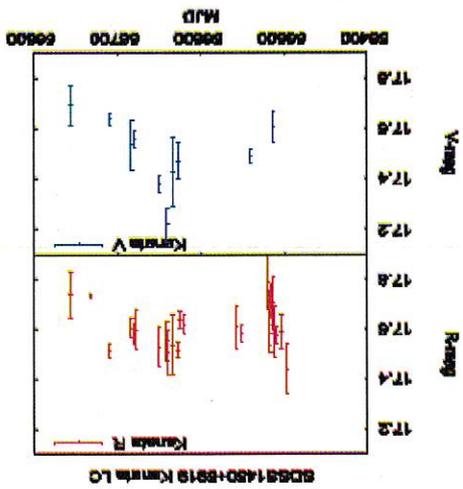


圖 4.15: FBQS J1629+4007 可視光光度曲線

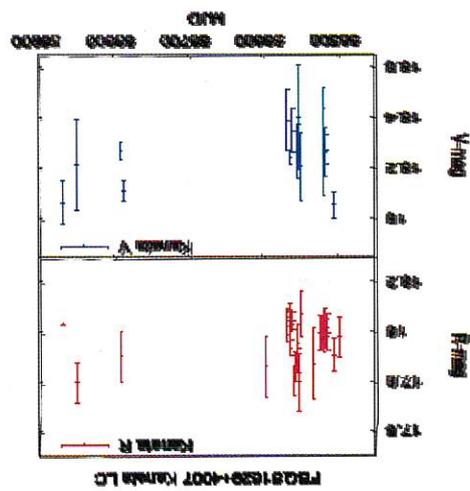
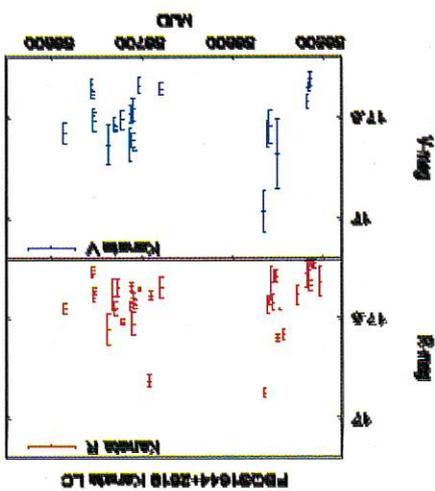


圖 4.16: FBQS J1644+2619 可視光光度曲線



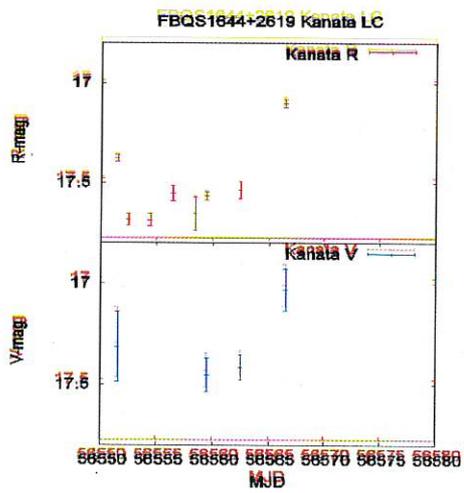


図 4.19: FBQS J1644+2619 増光期間の光度曲線

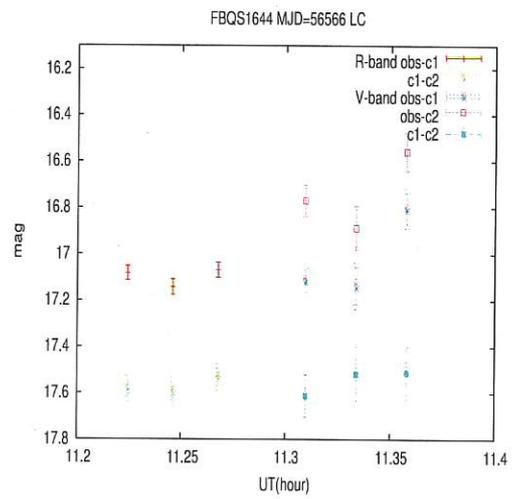


図 4.20: FBQS J1644+2619 増光日内の光度曲線

第5章 考察

本章では、前章の観測結果をふまえ、電波で明るい狭輝線セイフート1型銀河の可視光放射について、考察を行う。

5.1 狭輝線セイフート1型銀河の観測結果

ガンマ線で明るい/暗い狭輝線セイフート1型銀河それぞれの観測から、その特徴について述べる。

5.1.1 ガンマ線で明るい狭輝線セイフート1型銀河

2天体に対して可視光、偏光、ガンマ線観測を実施したところ、両天体とも可視光光度とガンマ線光度の間には明確な相関関係は見られず、複数の放射成分の寄与が入り交じっていると考えられる。

可視光観測においては、PMN J0948+0022からは、高い偏光度を示す時期が見られた。10%以上の高い偏光度を示す時期が存在し、この時期は可視光帯域においてジェットからの放射が卓越していると考えられる。しかし、可視光度と可視偏光度との間には相関が見られず、単純に可視光で明るい=ジェット放射が卓越している、という放射モデルでは考えにくい。

IH 0323+342からは可視光度と可視偏光度との間に相関関係が見られた。フレア期にジェットからの寄与が増加することで、可視光帯域でジェット放射が見られたと考えられる。しかし、偏光度は最大でも5%以下と低い値を示し、フレア期においても、依然として可視光帯域の放射は、降着円盤が支配的だと考えられる。

5.1.2 ガンマ線で暗い狭輝線セイフート1型銀河

4天体に対して可視光モニタ—観測を行ったところ、FBQS J1644+0022のみが、数日スケールでの短期変動を示した。

この天体は、過去の電波観測からも高い輝度温度が検出されており [28]、相対論的ジェットの存在が示唆されている。

また、フェルミ衛星4年間の観測結果による、最新の3FGLカテゴリー [18] においてもガンマ線対応天体が検出されており、今回検出された可視光帯域での短期変動はジェットからの放射であると考えられる。

5.2 ガンマ線フラックス/可視光フラックス比

表5.1は、本研究の観測天体のガンマ線フラックス/可視光フラックス比を示す。それぞれの天体の天体名、可視光フラックス、ガンマ線フラックスを示している。ガンマ線が検出されていない天体については、

ガンマ線フラックスとしてフェルミ衛星 3FGL カタログでのおおよその上限値を使用している。

表 5.1 の結果から、ガンマ線フラックス/可視光フラックス比が高い天体が検出される傾向が考えられる。

天体名	可視光フラックス [mJy]	ガンマ線フラックス (100MeV-100GeV)[10^{-9} ph/cm ² /s]	ガンマ線フラックス 可視光フラックス比
PMN J0948+0022	0.19-0.75	150	20-79
1H 0323+342	2.0-3.6	57	1.6-2.85
FBQS J1644+0022	0.2-0.5	1.0	0.2-0.5
FBQS J1629+4007	0.2	< 1.0	< 0.5
SDSS J1450+5919	0.2	< 1.0	< 0.5
SDSS J1722+5654	0.15	< 1.0	< 0.7

表 5.1: ガンマ線フラックス/可視光フラックス比

5.3 可視光帯域でのジェット、降着円盤成分の変化

図 5.1 は、電波で明るい狭輝線セイファート 1 型銀河の放射成分の変化を示した模式図である。図中の 3 つの模式図は、全て横軸に光の波長、縦軸に放射強度を示した多波長スペクトルを示しており、左から順にそれぞれ (1) 静穏期、(2) ジェットからの放射が増光する時期、(3) 降着円盤からの放射が増光する時期を示している。また、青色で網掛けをした部分は可視光帯域を示す。

電波で明るい狭輝線セイファート 1 型銀河の可視光放射は、静穏期には (1) のように降着円盤からの放射が支配的だと考えられる。そして、突発的なフレア時には (2) のように、ジェットからの放射が増光し、可視光帯域でジェット放射の成分が検出される。この期間は突発的に、数日スケールでの現象である。

一方で、(3) のように降着円盤からの放射も変動する。そのため、可視光帯域での増光によって、ジェット成分の寄与を議論することは難しく、可視光帯域での放射モデルを構築する際には、偏光や変動のタイムスケールを調べることによって、放射機構を議論する必要がある。

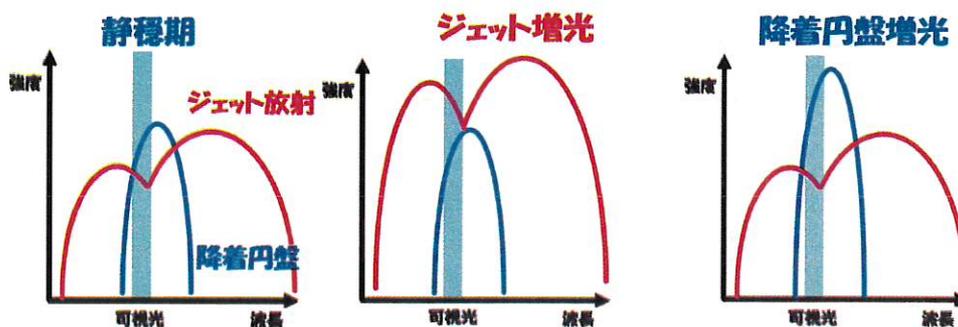


図 5.1: 可視光帯域での放射成分の変化

第6章 まとめと今後

本研究では、新たなガンマ線活動銀河核として近年注目を集める、電波で明るい狭輝線セイフート1型銀河に対して、広島大学所有かみなた望遠鏡とガンマ線観測衛星であるフェルミ衛星による、可視光、ガンマ線観測を実施した。

ガンマ線で明るい2天体に対して観測を行なった結果、いずれの天体も可視光度、ガンマ線光度には明確な相関関係が見られなかった。また、偏光度が上昇する時期が見られ、このような時期には可視光帯域でジェットからの放射が卓越していると考えられる。

ガンマ線で暗い4天体に対して観測を行なった結果、1天体で数日スケールでの光度変化が見られた。電波帯域、ガンマ線帯域での先行研究からも、可視光帯域での短いタイムスケールの光度変化は、相対論的ジェットからの放射であることを支持する。

以上の観測結果から、電波で明るい狭輝線セイフート1型銀河の可視光放射は、(1) 静穏期には降着円盤からの放射が卓越して見られるもの、(2) 突発的なフラッシュ時には可視光帯域でジェットからの放射が見える時期が存在する。しかし、(3) ジェットからの放射が卓越する時期かどうかは、可視光度のみからは判断できず、降着円盤の変動も考慮しなければいけない。そのため、可視光帯域での放射モデルを構築する際には、可視偏光、変動のタイムスケールを考慮しなければいけない。

今後は、2014年から本格的な観測を開始した、かみなた望遠鏡カセグレン焦点に取り付けられた装置 HONIR による近赤外線帯域での観測が期待される。よりジェットからの寄与が強まり、降着円盤からの寄与が弱まる短波長側での観測によって、新たな情報が得られると考えられる。

6.1 謝辞

本論文を書き上げるにあたって、深沢先生、田中さん、伊藤さんを始め、本当に多くの方々のご指導をいただきました。本当にありがとうございました。

私はこの3年間で、研究活動以外にも数多くのことを学ぶことができました。この研究室での3年間の経験は、来年以降の社会人生活の中でも必ず生きるものだと思っています。

同期の皆にも、これまでいろいろとお世話になりました。来年からはばらばらになりますが、それぞれの行く先で活躍することを願っています。今のM1、B4の皆や、これから来る後輩達も、この研究室がさらに発展するように頑張ってください。

最後に、遠く広島の大学への進学を支えてくれた両親に御礼を言いたいと思います。本当にありがとうございました。

以上で、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] A. A. Abdo, et al.2011, *Astrophysical Journal*, 726, 43
- [2] Antonucci, R. et al.1993, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 31,473,521
- [3] Osterbrock,D.E.,& Pogge,R.W.1985,*ApJ*,297,166
- [4] Peterson,B.M.1997, [An introduction to active galactic nuclei]
- [5] Zhou,H.,Wang,T.2002, *Chin.J.Astron.Astrophys*, 2,501
- [6] Yuan, W. et al.2008, *ApJ*, 685,801
- [7] Komossa,S et al.2006, *AJ*, 132,531
- [8] Doi,A. et al.2006, *PASJ*, 58,829D
- [9] Doi,A. et al.2007, *PASJ*, 59,703D
- [10] A.A.Abdo et al.2009, *ApJ*, 699,976A
- [11] A.A.Abdo et al.2009, *ApJ*, 707L.142A
- [12] Whalen,D.J et al.2006, *AJ*, 131,1948
- [13] Ikejiri et al.2011, *PASJ*, 63,639I
- [14] Eggen,J.R. et al.2011, *nlsg.confE,49E*
- [15] Itoh,R et al.2013, *ApJ*, 775L,26I
- [16] Itoh,R et al.2014, *PASJ*,tmp, 99I
- [17] Zhou H. et al.2007, *ApJ*, 658L,13Z
- [18] Fermi-LAT Collaboration.2015, arXiv:1501.02003
- [19] NASA web site <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [20] 広島大学宇宙科学センター web site <http://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/>
- [21] HONIR web site <http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/honir/index-j.html>
- [22] HOWPOL web site <http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/howpol/>

- [23] Atwood et al.2009, Apj, 697,1071
- [24] Angelakis.E, et al.2014, Astronomy & Astrophysics manuscript, no.AA,2014,25081
- [25] 高木勝俊「かなた望遠鏡用1露出型偏光撮像器 HOWPol の器械偏光に関する研究」広島大学 2011 年度卒業論文
- [26] IRAF web site <http://iraf.noao.edu/>
- [27] Doi et al.2012, ApJ,760.41D
- [28] Doi et al.2011, ApJ,738.126

