# ガンマ線を発する電波銀河のX線統計解析による X線放射起源の推定

広島大学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

M192677

眞武 寬人

主查 深澤泰司 副查 石川健一

宇宙には多数の銀河が存在し、その中心にはブラックホール(BH)が存在している。その中でも太陽質量 の10<sup>6</sup>-10<sup>9</sup>倍の質量を持つBHが存在すると、BHへの降着物質により望遠鏡では分解できないほど非常 に明るく輝く。このような天体活動を起こす銀河中心核のことを活動銀河核(AGN)と呼ぶ。AGNの中で約 10%のみが強い電波放射、つまりはジェットを中心から放射するradio-loud AGN として分類され、radio-loud AGN は大きくブレーザーと電波銀河に分類される。この分類はジェット放射と観測者の視線方向のなす角 度で決まり、ブレーザーはジェットを視線方向上に観測し、電波銀河はジェットを斜めから観測しているも のと考えられている。このためブレーザーは、相対論的速度で放射されるジェット放射がビーミング効果を 大きく受けて観測されるため、スペクトル上でジェット放射の成分が卓越する。これに対して、電波銀河は 視線方向上からずれてジェット放射を観測するため、比較的ビーミング効果の影響が小さく、また銀河中心 付近の降着円盤やコロナからの放射も観測できると考えられており、ジェットと降着円盤の関連性の調査を 行う上で重要な天体だと考えられている。

またジェットの放出機構の解明には降着円盤とジェットの関連性の調査が鍵と考えられているが、降着円 盤/コロナからの放射が観測されている X 線では、降着円盤/コロナの他にもジェット放射も観測されている と考えられている。このため X 線放射起源の区分を行わないことには、SED からのジェットの物理量を見 積もることができない。そこで本研究では、Fermi 衛星の 4FGL-DR2 カタログの電波銀河をサンプル天体 としガンマ線と X 線データを比較することで、X 線放射にて、ジェット由来の放射と降着円盤/コロナ由来 の放射のどちらが卓越して観測されているかを調査した。X 線データには Swift/XRT のデータを用い、ガ ンマ線データは 4FGL-DR2 のカタログ値を用いた。

結果として、2つの結果と降着率の大きさを用いることでジェット卓越型、降着円盤卓越型、ジェット降 着円盤混合型の3つのグループに分類することができた。まず、1つ目の結果はX線とガンマ線のflux比 とX線データから求めた Hardness Ratio の傾きを軸とした図である。この図からはジェットの傾向が強く 現れることも有り、降着円盤とジェットの分類を行った。2つ目の結果はX線のPhoton Index とガンマ線の Photon Index を軸とした図である。ジェット放射が強く見られる天体は降着円盤が強く見えている天体に比 べ、ビーミング効果が効いているという考えの基、降着円盤とジェット放射の分類を行った。また降着円盤 が卓越して観測される場合は、降着率の高い標準降着円盤が形成されていると考えられる。従って、降着率 と本研究で得られた2つの結果を用いて複合的に考えることで3つのグループに分類を行った。また、降着 率はX線光度とBH 質量から推定された Eddington 光度の光度比から推定した。推定された降着率は、電 波光度による Fanarof-Riley 分類と可視光輝線を用いた HERG, LERG 分類の示す降着率と同様を示すこと が確認できた。

最後にジェット卓越型の2天体について SSC モデルを用いて SED からのジェットパワー推定を行った。 また比較として、降着円盤卓越型の2天体についても同様の推定を行った。結果として、ジェット卓越型と して分類された天体では適当なジェットパワーが推定されたが、降着円盤卓越型の天体では推定が困難であ り、また推定された値が明らかに適当でない値を示すことが確認できた。

# 目 次

| 第1章 | 序章  | 6  |
|-----|---|----|
| 1.1 | 活動銀河核   | 6  |
|     | 1.1.1 セイファート銀河  | 7  |
|     | 1.1.2 ブレーザー   | 9  |
|     | 1.1.3   電波銀河  | 10 |
| 1.2 | ガンマ線による電波銀河の先行研究..............................          | 12 |
| 1.3 | 本研究の目的  | 13 |
| 第2章 | 観測衛星  | 15 |
| 2.1 | Fermi 衛星  | 15 |
|     | 2.1.1 LAT   | 16 |
|     | 2.1.2 FGL カタログ  | 17 |
| 2.2 | Swift 衛星  | 18 |
|     | 2.2.1 XRT   | 19 |
| 第3章 | 解析方法  | 22 |
| 3.1 | X 線スペクトル解析  | 22 |
| 3.2 | Hardness Ratio による時間変動の調査                               | 24 |
| 3.3 | MCMC 法を用いた SED のモデルフィッティングによるジェットパワーの推定                 | 29 |
|     | 3.3.1 メトロポリス法・適用型メトロポリス法                                | 29 |
|     | 3.3.2 SED モデルとジェットパワーの導出                                | 30 |
| 第4章 | 結果と議論   | 34 |
| 4.1 | X 線の時間変動  | 34 |
| 4.2 | X 線とガンマ線の Photon Index の関係                              | 37 |
| 4.3 | 降着率に基づいた X 線データの変動 .................................... | 38 |
| 4.4 | X 線放射起源の推定まとめ....................................       | 40 |
| 4.5 | MCMC 法を用いたジェットパワーの推定                                    | 42 |
| 第5章 | 考察  | 45 |
| 5.1 | Hardness Ratio による時間変動の調査について                           | 45 |
| 5.2 | X 線とガンマ線の Photon Index の関係                              | 47 |
| 5.3 | X 線放射起源の推定について  | 47 |

| 第6章          | まとめと今後              | 50 |
|--------------|---------------------|----|
| 付録A          | K バンドを用いた BH 質量の計算  | 52 |
| 付 録 B        | 各天体のプロット            | 53 |
| <b>B</b> .1  | 3C 111              | 53 |
| B.2          | 3C 120              | 53 |
| B.3          | 3C 264              | 54 |
| B.4          | 3C 309.1            | 54 |
| B.5          | 3C 380              | 55 |
| B.6          | 3C 380              | 55 |
| B.7          | 4C +40.01           | 56 |
| B.8          | B3 0309+411B        | 56 |
| B.9          | B3 1009+427         | 57 |
| <b>B</b> .10 | IC 310              | 57 |
| <b>B</b> .11 | NGC1218             | 58 |
| B.12         | NGC1316             | 58 |
| B.13         | NGC5128             | 59 |
| B.14         | NGC6251             | 59 |
| B.15         | NGC6328             | 60 |
| B.16         | PKS0521-36          | 60 |
| B.17         | PKS1514+00          | 61 |
| B.18         | PKS2153-69          | 61 |
| B.19         | PKS2331-240         | 62 |
| B.20         | Pictor A            | 62 |
| B.21         | Chandra による観測データの追加 | 62 |
|              |                     |    |
| 付 録 C        | MCMC 法によるプロット       | 66 |
| C.1          | NGC 1218            | 66 |
| C.2          | 3C 264              | 68 |
| C.3          | Pictor A            | 71 |
| C.4          | Cen A               | 77 |

# 図目次

| 1.1  | Radio-loud AGN のイメージ図 [1]   | 6  |
|------|---|----|
| 1.2  | AGN 統一モデル [2]   | 7  |
| 1.3  | AGN からの X 線放射の猫像 [5]  | 8  |
| 1.4  | 標準降着円盤からの X 線放射の猫像 [3]  | 8  |
| 1.5  | ADAF から放射される連続スペクトル [4]   | 9  |
| 1.6  | 平均したデータによるブレーザーの SED[6]   | 10 |
| 1.7  | 電波観測による FR-I の一例 (3C 449)[8]  | 11 |
| 1.8  | 電波観測による FR-II の例 (3C 47)[9]   | 11 |
| 2.1  | Fermi の検出器の位置 [25]  | 16 |
| 2.2  | LAT の構造 [25]  | 16 |
| 2.3  | X 線観測衛星 Swift[28]   | 19 |
| 2.4  | XRT 検出器 [29]  | 19 |
| 2.5  | XRT 検出器 [29]  | 21 |
| 3.1  | ds9 による IC 310 の PC モードデータ  | 23 |
| 3.2  | ds9 $\mathbb{E}$ $\mathbb{L}$ $\mathbb{C}$ 310 $\mathcal{O}$ exposure map | 24 |
| 3.3  | サンプル天体の Hardness Ratio  | 27 |
| 3.4  | Connolly et al.[31] でのセイファート銀河の Hardness Ratio                            | 28 |
| 3.5  | ランダムサンプルのトレースプロット   | 30 |
| 3.6  | トレースプロットのヒストグラム   | 30 |
| 3.7  | 電子スペクトルの broken-power-law 分布  | 31 |
| 4.1  | X 線 flux の最大値と最小値の比と HR の傾きのプロット  | 34 |
| 4.2  | X 線 flux の最大値と最小値の比と HR の傾きのプロット (slope < 50)                             | 34 |
| 4.3  | X 線とガンマ線の flux 比と HR の slope の関係  | 35 |
| 4.4  | X 線とガンマ線の flux 比と HR の slope の関係 (slope < 60)                             | 35 |
| 4.5  | X 線とガンマ線の flux 比と HR の slope の関係に (slope < 60) の両軸にヒストグラムを適用              |    |
|      | した図   | 35 |
| 4.6  | X 線の flux と HR の slope の関係  | 36 |
| 4.7  | ガンマ線の flux と HR の slope の関係   | 36 |
| 4.8  | X 線の光度と HR の slope の関係  | 36 |
| 4.9  | ガンマ線の光度と HR の slope の関係   | 36 |
| 4.10 | X 線とガンマ線の Photon Index の関係  | 38 |

| 4.11         | 傾向を説明する簡易的な SED ................................... | 38 |
|--------------|---|----|
| 4.12         | 降着率と X 線の Photon Index の関係                          | 39 |
| 4.13         | 降着率とガンマ線の Photon Index の関係                          | 39 |
| 4.14         | X 線とガンマ線の光度の関係                                      | 40 |
| 4.15         | 降着率と SED の関連性                                       | 42 |
| <b>C</b> 1   |   | 10 |
| 5.1          | 図 4.4 に stope=10, flux 比=0.5 の目縁を引いた図               | 46 |
| 5.2          | X 緑とカンマ緑の mux の関係性                                  | 49 |
| <b>B</b> .1  | 3C111のライトカーブ  | 53 |
| B.2          | 3C111のPhoton Index と flux の関係                       | 53 |
| B.3          | 3C120 のライトカーブ                                       | 53 |
| B.4          | 3C120のPhoton Index と fluxの関係                        | 53 |
| B.5          | 3C264 のライトカーブ                                       | 54 |
| B.6          | 3C264 の Photon Index と flux の関係                     | 54 |
| B.7          | 3C309.1 のライトカーブ                                     | 54 |
| B.8          | 3C309.1 の Photon Index と flux の関係                   | 54 |
| B.9          | 3C380 のライトカーブ                                       | 55 |
| B.10         | 3C380のPhoton Index と flux の関係                       | 55 |
| <b>B</b> .11 | 3C380 のライトカーブ                                       | 55 |
| B.12         | 3C380のPhoton Index と flux の関係                       | 55 |
| B.13         | 4C40+01 のライトカーブ                                     | 56 |
| <b>B</b> .14 | 4C40+01の Photon Index と flux の関係                    | 56 |
| B.15         | B30309+411B のライトカーブ                                 | 56 |
| B.16         | B30309+411B の Photon Index と flux の関係               | 56 |
| B.17         | B31009+427 のライトカーブ                                  | 57 |
| B.18         | B31009+427 の Photon Index と flux の関係                | 57 |
| B.19         | IC310のライトカーブ  | 57 |
| B.20         | IC310の Photon Index と flux の関係                      | 57 |
| B.21         | NGC1218 のライトカーブ                                     | 58 |
| B.22         | NGC1218の Photon Index と fluxの関係                     | 58 |
| B.23         | NGC1316のライトカーブ                                      | 58 |
| B.24         | NGC1316の Photon Index と flux の関係                    | 58 |
| B.25         | NGC5128 のライトカーブ                                     | 59 |
| B.26         | NGC5128の Photon Index と flux の関係                    | 59 |
| B.27         | NG6251 のライトカーブ                                      | 59 |
| B.28         | NGC6251の Photon Index と fluxの関係                     | 59 |
| B.29         | NG6251 のライトカーブ                                      | 60 |
| B.30         | NGC6251の Photon Index と fluxの関係                     | 60 |
| B.31         | PKS0521-36 のライトカーブ                                  | 60 |

| B.32         | PKS0521-36の Photon Index と flux の関係                 | 60 |
|--------------|---|----|
| B.33         | PKS1514+00 のライトカーブ                                  | 61 |
| B.34         | PKS1514+00の Photon Index と flux の関係                 | 61 |
| B.35         | PKS2153-69 のライトカーブ                                  | 61 |
| B.36         | PKS2153-69の Photon Index と flux の関係                 | 61 |
| B.37         | PKS2331-240 のライトカーブ                                 | 62 |
| B.38         | PKS2331-240の Photon Index と flux の関係                | 62 |
| B.39         | PictorA のライトカーブ                                     | 62 |
| B.40         | PictorAのPhoton Indexとfluxの関係                        | 62 |
| <b>B.4</b> 1 | Chandra の観測データを適用した X 線とガンマ線の luminosity 関係         | 64 |
| B.42         | Chandra の観測データを適用した X 線とガンマ線の Photon Index 関係       | 65 |
| C.1          | NGC1218 の全 SED データ (青色) と選択 SED データ (黄色)            | 66 |
| C.2          | SSC モデルでの推定された SED モデル                              | 66 |
| C.3          | NGC1218の MCMC 法によるトレースプロット                          | 67 |
| C.4          | NGC1218の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム                   | 68 |
| C.5          | 3C264 の全 SED データ (青色) と選択 SED データ (黄色)              | 69 |
| C.6          | SSC モデルでの推定された SED モデル                              | 69 |
| C.7          | 3C264の MCMC 法によるトレースプロット                            | 70 |
| C.8          | 3C264 の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム                    | 71 |
| C.9          | Pictor A の全 SED データ (青色) と選択 SED データ (黄色)           | 72 |
| C.10         | SSC モデルでの推定された低エネルギー側を合わせた SED モデル                  | 72 |
| C.11         | SSC モデルでの推定された高エネルギー側を合わせた SED モデル                  | 72 |
| C.12         | Pictor A の MCMC 法によるトレースプロット (低エネルギー側をフィット)         | 73 |
| C.13         | Pictor A の MCMC 法によるトレースプロット (高エネルギー側をフィット)         | 74 |
| C.14         | Pictor A の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム (高エネルギー側をフィット). | 75 |
| C.15         | Pictor A の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム (低エネルギー側をフィット). | 76 |
| C.16         | Cen A の全 SED データ (青色) と選択 SED データ (黄色)              | 77 |
| C.17         | SSC モデルでの推定された SED モデル                              | 77 |
| C.18         | CenAの MCMC 法によるトレースプロット                             | 78 |
| C.19         | CenA の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム                     | 79 |

# 第1章 序章

以下に記述する内容は、主に参考文献 [2], [3], [4] を参照した。

### 1.1 活動銀河核

銀河の中心にはブラックホール (BH) が存在することが知られており、質量が太陽質量の 10<sup>6</sup> – 10<sup>9</sup> 倍に もなるため超巨大ブラックホール (SMBH) と呼ばれる。SMBH に物質が多く降着している場合は望遠鏡で 分解できないほど非常に明るく輝き、このような天体を活動銀河核 (AGN) と呼ぶ。AGN に分類される銀河 は全銀河の数%程度である。AGN には多くの分類が存在するが、最もメジャーな分類としては電波の放射 強度による分類があり、この分類を適用することで Radio-loud AGN と Radio-quiet AGN の 2 つに分類でき る。Radio-loud AGN は銀河中心付近から強い電波ジェットを持つ天体であり、AGN 全体の約 10%が分類さ れ電波銀河やブレーザーがこれに分類される。一方、大多数の約 90%の AGN は Radio-quiet AGN に分類さ れ、セイファート銀河や Radio-quiet QSO がこれに分類される。またその他の分類としてスペクトルの許容 線の輝線幅を用いた方法もあり、輝線の半値幅が数千 km/s と広い天体が I 型 AGN、半値幅が数百 km/s の 天体を II 型 AGN と分類する。近年ではすべての AGN は一つの AGN を異なる方向から観測していると考 えることで I 型 II 型または電波銀河とブレーザーの分類を統一的に説明する AGN 統一モデルの考えが主流 である [2]。このモデルに基づくことで、次節以降で述べるように、図 1.2 のようにセイファートの 1 型、2 型、電波銀河、ブレーザーを簡潔に表現でき、またその特徴も説明できる。



図 1.1: Radio-loud AGN のイメージ図 [1]



図 1.2: AGN 統一モデル [2]

#### 1.1.1 セイファート銀河

Radio-quiet AGN に分類される天体の一つであり、中心からのジェット放射が弱いと考えられいる。可視 光スペクトルで複数の輝線を持ち、輝線幅の広がりを速度に換算した速度幅により I 型と II 型の 2 つのサ ブクラスに分類される。I 型は数 1000km/s に相当する広い速度幅を持ち、II 型は 500 km/s 程度の狭い速度 幅を持つ。この速度の違いは輝線放射領域と BH との距離が関係しており、BH に近い広輝線領域 (BLR) か ら広い速度幅の輝線がスペクトル上に現れ、これに対して BH から離れた狭輝線領域 (NLR) から狭い速度 幅の輝線がスペクトル上に現れると考えられている。またこのような放射領域ではガス密度 (電子密度) も 異なる。結果として NRL からは禁制線、BLR からは許容線が観測される。さらに BH の周りには降着円盤 が形成されており、その回りを光学的に厚い分子雲トーラスが囲んでおり、トーラス越しでは放射が大きく 吸収されてしまう。このため AGN 統一モデルに基づくと (図 1.2 参照)、I 型は比較的 BH 近傍にある BLR からの放射と NLR からの放射を観測できるが、II 型はトーラスにより BLR からの放射が吸収されてしま い NLR からの放射のみが観測され、スペクトル上では幅の狭い狭輝線スペクトルのみが観測されることに なる。また、AGN の X 線放射は大きくジェット放射と降着円盤/コロナからの放射が考えられているが、セ イファート銀河からの X 線放射はジェット放射が弱いため、X 線放射は降着円盤/コロナから放出されてい ると考えられている。

BHの周りに形成されている降着円盤では、ガスが回転しながらBHに落ちるが、降着ガスの異なる半径の間では速度が異なるため、粘性により降着円盤外側に向けて角運動量が輸送され、中心に向かうほど角運動量は失われる。粘性により角運動量が輸送される際に生じる粘性摩擦により降着円盤は加熱され、この熱エネルギーは放射エネルギーとして外部へ放出される。この放射は熱的放射であり、円盤黒体放射スペクトルとして観測され、粘性摩擦はBH中心に近づくほど強くなるため、BH近傍ではより高エネルギーな紫外線のエネルギーでの放射として観測される。この紫外線の放射を降着円盤の周りに存在する、降着円盤よりも高温である薄いガス体(コロナ)が逆コンプトン散乱することによりX線エネルギーの放射として観測される(図 1.3 左図)。また、このコロナからのX線放射が降着円盤に反射されて、同様にX線放射が起こる。このような降着円盤からの放射機構は標準降着円盤からの放射として考えられており、図1.4 は標



図 1.3: AGN からの X 線放射の猫像 [5]



図 1.4: 標準降着円盤からの X 線放射の猫像 [3]

しかし、降着物質の量が非常に少ない、もしくは多い場合はそれぞれ移流優勢降着円盤 (ADAF)、超臨界 降着円盤が形成されて、放射モデルは標準降着円盤とは異なる。特にジェット放射が優勢的に観測されてい る場合、ADAF が形成されていることが多いと考えられている。ADAF では、降着物質が少ないため光学 的に薄い降着円盤となる。また粘性加熱により ADAF もまた熱エネルギーを持つが、降着物質 (ガス) が希 薄であるため放射冷却が十分に働かず、ガスはより高温まで加熱され幾何学的に非常に厚い円盤が形成さ れ、この熱エネルギーは放射ではなく BH へ吸い込まれる。またガスが希薄であることから、この円盤から の放射は黒体放射ではなく主にイオン周りで高エネルギー電子の軌道が曲げられることで生じる熱制動放 射、磁場周りで高エネルギー電子の軌道が曲げられて生じるシンクロトロン放射、低エネルギー光子の高 エネルギー電子による逆コンプトン散乱の3つが考えられる [4]。従って、ADAF からは非熱的放射の特徴 である冪型のスペクトルが観測され、図 1.5 に示すようなスペクトルが観測される。図 1.5 では3つのピー クが見られるが、左からシンクロトロン放射による赤外線光子、赤外線光子の逆コンプトン散乱による紫 外線光子、逆コンプトン散乱や熱制動放射による X 線光子によるものであり、全体として右肩下がりの冪 型分布の放射となっていることがわかる。



図 1.5: ADAF から放射される連続スペクトル [4]

ジェット放射については、その放射・発生機構は解明されていないが、理論的には、磁場により回転す る BH のスピン (回転エネルギー)を取り出すことでジェットのエネルギーを供給する Blandford-Znajek(BZ) 機構が中心エンジンとして有力視されている。ジェット内部での放射機構としては、後述のブレーザーに て詳細に説明するが、シンクロトロン放射とそのシンクロトロン放射を種光子として逆コンプトン散乱が 生じていると考えられおり、これにより電波からガンマ線の広いエネルギー領域で放射が観測されている。 ジェットのモデルの一例として、Spine Sheath モデルがあり、このモデルではジェットを筒状の流れの速い Spine(軸) と流れの遅い Sheath(鞘)の2つの速度の異なる流れとして定義し、電波放射は Sheath からのシン クロトロン放射として、ガンマ線放射は Spine と Sheath の両方で生じた種光子を Spine でコンプトン散乱 することで生じるとしている。

#### 1.1.2 ブレーザー

Radio-loud AGN に分類され、銀河中心から放射されるジェットをほぼ正面から観測されているものがブレーザーと考えられている。また電波からガンマ線までの広いエネルギー帯域で放射が観測されるため、近年では多波長を用いた研究が盛んである。ジェットは相対論的速度で放出され、これをほぼ正面から観測するため、観測される放射は相対論的ビーミング効果を大きく受ける。この結果、広いエネルギー帯域でコアからの放射が卓越して観測されるだけでなく、TeV や GeV といったガンマ線の中でも高いエネルギー帯域でも放射が観測される。

ブレーザーの多波長スペクトル (SED) は特徴的であり、「周波数 v」と「フラックスに周波数を掛けたパ ラメータ vFv」を軸として作成すると、スペクトル分布上で2つの山が表れる (図 1.6)。この SED 上での山 はそれぞれ異なる機構による放射が観測されていると考えられており、低周波数側の山に関してはシンクロ トロン放射によるものという考えが認められている。しかしながら、高周波数側の山に関してはいくつか の放射モデルが考えられている。主なモデルとして leptonic モデルと hadronic モデル、そして 2 つを合わ せた lepthadronic モデルがある。以下にまとめる。

#### • leptnic モデル

加速粒子は lepton(電子・陽電子) により構成されており、lepton のみが加速されて放射をし、hadron は高エネルギーまで加速しないという仮定に基づいたモデル。低周波数側のシンクロトロン放射にて

生じた電子が、低エネルギー光子をコンプトン散乱する Syncrotron Self-Compton(SSC) モデルにより 高周波数側の山が作られると考える。また、光度の高いブレーザーでは、降着円盤、BLR、トーラス からの可視赤外線がジェットの中で電子に逆コンプトンされる External Compton(EC) モデルも考えら れる。

hadronic モデル

電子と陽子の両方が相対論的エネルギーまで加速される。加速された陽子は3種類のパイオン( $\pi^0, \pi^+, \pi^-$ )を生成する。高周波数側の山は陽子のシンクロトロン放射と $\pi^0$ の崩壊によるガンマ線放射、 $\pi^+, \pi^-$ の2次崩壊に伴うシンクロトロン放射とコンプトン散乱、そしてガンマ線 cascade により構成されていると考えられている。また $\pi^+, \pi^-$ の崩壊の際に、ニュートリノが生じることから、ジェット放射と関連づいたニュートリノの観測が成功することがこのモデルの確証となる。



図 1.6: 平均したデータによるブレーザーの SED[6]

lept-hadronic モデルは、lepton による SSC と hadron よる陽子のシンクロトロン放射を組み合わせたモデ ルである。放射モデルの議論は、最初期では leptonic モデルが殆どであったが、近年の IceCube によりブ レーザー (TXS 0506+056) から放射と関連付けられたニュートリノが観測されたことを皮切りに hadronic モ デルや lepto-hadronic モデルも受け入れられ始めている。

またブレーザーは可視光スペクトル観測により BL Lac と FSRQ の 2 つの種類に分類することができ、 BL lac はより光度の低い天体、FSRQ がより光度が高い天体と考えられる。図 1.6 では、低エネルギー側の シンクロトロン放射のピークがより低周波数にある破線のスペクトルが FSRQ を、より高エネルギー側に ある直線のスペクトルが BL lac を表している。また統一モデルを用いると、ジェットを正面から観測して いるのがブレーザーであり、斜めから観測しているのが電波銀河である。

#### 1.1.3 電波銀河

ブレーザー同様 Radio-loud AGN に分類され、電波観測で、中心コアとともに、ジェットが観測される天体である。ブレーザーとの大きな違いとして、観測者は電波銀河からのジェットを視線方向上からずれた角度で観測する。このため、電波銀河はジェット放射が受けるビーミング効果の影響が小さくコアからの放射がブレーザーに比べ弱いため、観測される放射はジェットのコア以外からの放射の他に中心付近の降着円盤

やコロナからの放射も含まれる。このような放射が観測されるため、電波銀河は降着円盤とジェットの関係 性や、ジェットの構造の解明において重要な役割を担う天体であると考えられている。また、降着円盤やコ ロナからの放射が見えていると考えられている反面、ジェットが受けるビーミング効果の影響が弱いため、 ガンマ線での検出数は少ないということも事実である。

電波銀河はいくつかのサブクラスを持つ。ここでは AGN 統一モデルに基づく BLRG/NLRG 分類と電波 光度による FR-I/FR-II 分類、そして可視光輝線による HERG/LERG 分類について記述する。

• BLRG/NLRG

セイファート銀河の I 型と II 型の分類の電波銀河版と考えることができる。BLR からの放射が観測 される I 型セイファートに対応するのが Bload Line Radio Galaxy(BLRG)、BLR からの放射が見えず NLR からの放射のみが観測される II 型セイファートに対応するのが Narrow Line Radio Galaxy(NLRG) である。ただし、セイファート銀河のようにトーラスによって BLR が隠されているため NLR しか見 えない、というわけではなく、特に低光度のものでは BLR 自体が存在しない可能性もある。

• FR-I/FR-II

1974 年に B. L. Fanaroff と J. M. Riley によって発表された論文が元となった Fanaroff-Riley(FR) 分類 により電波銀河を分類できる。この分類では電波銀河の電波観測での光度を利用する。178 MHz の 電波光度を用いた場合、 $10^{26}$  [W Hz<sup>-1</sup>] より低い光度を示した天体は FR-I、高い光度を示した天体は FR-II に分類される [11]。また FR-I/FR-II に分類された天体は、以下のような特徴を持つ。

– FR-I

BH 近傍の中心部が電波観測で明るく、中心から外側に向かって暗くなる電波構造を持つ(図1.7)。 低い降着率を示す。

– FR-II

BH 中心部は暗く、電波ジェットの末端に電波観測で明るく輝くホットスポットをもつ電波構造 (図 1.8)。高い降着率を示す。





図 1.7: 電波観測による FR-I の一例 (3C 449)[8]

図 1.8: 電波観測による FR-II の例 (3C 47)[9]

• HERG/LERG

可視光観測により得られた輝線強度により電波銀河を分類できる。方法はいくつかあるが、主にバロ マー系列の H $\alpha$ や H $\beta$ に対する禁制線の輝線強度により分類が行われる。[OIII] 輝線を用いた場合、輝 線強度比 [OIII] / H $\alpha$  > 0.2 かつ [OIII] 輝線の等価幅 (EW:Equivalent Width) が EW<sub>[OIII]</sub> > 3 Å を示す天 体は High Excitation Radio Galaxy(HERG) に分類され、これに対して相対的に弱い [OIII] 輝線を示す 天体は Low Excitation Radio Galaxy(LERG) に分類される [7]。このように分類に禁制線や許容線を用 いており、また禁制線と許容線は NLR と BLR から放射されているため、AGN 統一モデルに基づい た分類 (BLRG/NLRG) と関連を持つと思われる。またこれらの天体も FR-I/FR-II 同様に降着率と関連 を持ち、HERG/LERG はそれぞれ高い降着率と低い降着率に対応すると考えられている。これは降着 率が高くなるほど降着円盤からの放射が増加するため、この放射により励起する輝線の量も増加する ためである。また 1 つの指標として HERG は全光度 L が Eddington 光度  $L_{Edd}$  に対して  $L > 0.01L_{Edd}$ を示し、LERG は  $L < 0.01L_{Edd}$  を示すとされており、このため HERG は標準降着円盤をもち、LERG は ADAF のような降着円盤を持つと考えられている。近年では複数の禁制線を用いて励起度合いを表 す指標 Excitation Index(EI) による分類方法も提唱されており、この分類法を採用している論文も存在 する [7]。

上述したように、FR-I/II 分類と HERG/LERG 分類は降着率と関連を持つ。このため、これらの分類の 組み合わせ方にはある程度傾向が表れることが知られている。第3ケンブリッジカタログ (3C) の赤方偏 移 z < 0.3 を示す電波銀河を用いた研究では、HERG は2天体を除いたすべての天体が FR-II に分類され、 LERG は FR-I と FR-II に分類された [7]。また FR-I/HERG(FR-I かつ HERG を意味する。以降この表記を用 いる) は非常にまれなケースであり、代表的な天体として本研究のサンプルにも含まれている Cen A(NGC 5128) が挙げられる。

## 1.2 ガンマ線による電波銀河の先行研究

2015 年までに検出された電波銀河 8 天体を対象にガンマ線観測衛星 Fermi の約1 年の観測で検出された 8 個の電波銀河について、ガンマ線データと X 線データの関連性の調査が行われた (Fukazawa et al. 2015)。 この論文では、X 線において放射起源が熱的な disk/corona からの放射であるのか、または非熱的な jet から の放射であるのかの区分として、時間変動、X 線スペクトルの Fe-Kα 線、[OIII] 輝線、X 線スペクトル指 数を用いて議論を行い、以下に示す表 1.1 の結果が得られた。

| Source              | Fe-K line   | X-ray spectral index | X-ray variability | [O III] line | Type [ref.]             |
|---------------------|-------------|----------------------|-------------------|--------------|-------------------------|
| 3C78                | jet         | jet                  | inconclusive      | jet          | LERG [B10]              |
| 3C84                | disk/corona | inconclusive         | inconclusive      | disk/corona  | $HERG/LERG^{\dagger}$   |
| 3C111               | disk/corona | inconclusive         | inconclusive      | disk/corona  | $HERG^{\ddagger}$ [E00] |
| 3C120               | disk/corona | inconclusive         | inconclusive      | disk/corona  | $HERG^{\ddagger}$ [E00] |
| $\rm PKS0625{-}354$ | jet         | jet                  | inconclusive      | jet          | LERG [M14]              |
| M 87                | jet         | jet                  | jet               | jet          | LERG [G13]              |
| Cen A               | disk/corona | inconclusive         | jet               | inconclusive | HERG [E04]              |
| NGC6251             | jet         | inconclusive         | inconclusive      | jet          | LERG [E11]              |

表 1.1: Fukazawa et al. 2015 の結果 [10]

これより、M87 に加え PKS 0625-354 と 3C 78 は X 線の放射起源がジェット放射と推定され、これらの 天体については多波長スペクトル (SED) からジェットパワー推定も行われている。また HERG/LERG の分 類が適応されており、X 線放射起源との関係性は HERG が disk/corona、LERG が jet に対応する傾向がある ことがわかる。

## **1.3** 本研究の目的

高エネルギー現象の一つであるブラックホール(BH)から放出される宇宙ジェットの放射・発生機構は未 だに解明されていない。ジェットの発生機構については、理論的には磁場中で回転するBHからエネルギー を受けて駆動するBZメカニズムが有力視されている。しかし、観測的には理解が進んでおらず、解明には スピンまたは降着円盤とジェットとの関連性を調査が鍵となっていると考えられている。スピンの観測は観 測精度が十分でないため不確定とされる一方で、AGNジェットと降着円盤の関連性については近年研究が 行われてきている。そこで本研究では、AGNの中でジェットを持ち、ブレーザーに比べ相対論的ビーミン グ効果が弱く、降着円盤やジェットの暗い部分からの放射も見えていると考えられている電波銀河に着目し た。しかし、電波銀河のX線放射はジェットと降着円盤の両方が観測されていると考えられており、このた めX線の放射起源を見極めなければ多波長スペクトルからジェットの物理量を得ることができない。

そこで本研究の目的は、Fermi 衛星第4カタログ第2リリース版 (4FGL-DR2カタログ、以下4FGL と略 す [12]) により検出数が大幅に増加した電波銀河をサンプルとして、X線放射起源がジェット放射か降着円 盤からの放射かをX線のスペクトル指数と時間変動などを調べて区別することとした。ガンマ線で明るい電 波銀河では、ガンマ線の他に高エネルギー光子の情報としてX線放射があり、その放射機構の区分はジェッ ト放射の理解のために重要である。4FGL カタログは Fermi 衛星の4番目のカタログであり、1st カタログ で検出された電波銀河 10天体に対して61天体と検出数を大幅に増加させた。また本研究ではX線データ として時間変動を調べるのに好都合なSwift衛星のXRT検出器のデータを用いた。これより、サンプル天 体はSwift/XRTで4観測以上行われている28天体(内8天体は質が悪く使えない)となり、従来の研究では 行えなかった統計的な解析が可能となった(表1.2参照)。また、X線放射起源の分離によりジェット放射と 推定された天体に対しては、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC法)を用いて多波長スペクトルフィット を行い、推定されて物理量からジェットパワーの推定も行い、議論に用いた。

| 4FGL name          | Common name          | type | z     | $F_{\gamma}$       | $F_{err}$               | $\Gamma_{\gamma}$ | $\Gamma_{err}$ | FR class | HERG/LERG | ref              |
|--------------------|----------------------|------|-------|--------------------|-------------------------|-------------------|----------------|----------|-----------|------------------|
|                    |                      |      |       | $[10^{-12} erg/s]$ | $[10^{-13} { m erg/s}]$ |                   |                |          |           |                  |
| 4FGL J0013.6+4051  | 4C +40.01            | AGN  | 0.260 | 2.08               | 4.21                    | 2.21              | 0.145          | 1        | 1         |                  |
| 4FGL J0308.4+0407  | NGC 1218             | RDG  | 0.030 | 7.78               | 7.11                    | 2.00              | 0.0641         | Ι        | LERG      | [16], [20]       |
| 4FGL J0312.9+4119  | B3 0309+411B         | RDG  | 0.134 | 4.10               | 10.3                    | 2.47              | 0.193          | Π        | HERG      | [17], [23]       |
| 4FGL J0316.8+4120  | IC 310               | RDG  | 0.019 | 2.85               | 6.76                    | 1.78              | 0.178          | Ι        | LERG      | [13], [20]       |
| 4FGL J0322.6-3712e | NGC 1316/Fornax A    | RDG  | 0.006 | 6.14               | 5.76                    | 2.05              | 0.0659         | Ι        | LERG      | [13], [20]       |
| 4FGL J0418.2+3807  | 3C 111               | RDG  | 0.050 | 16.0               | 13.3                    | 2.71              | 0.0577         | Π        | HERG      | [13], [19]       |
| 4FGL J0433.0+0522  | 3C 120               | RDG  | 0.034 | 13.0               | 11.3                    | 2.72              | 0.0504         | Ι        | HERG      | [13], [17], [19] |
| 4FGL J0519.6-4544  | PKS 0518-45/Pictor A | RDG  | 0.034 | 4.67               | 7.79                    | 2.46              | 0.133          | Π        | HERG      | [13], [20]       |
| 4FGL J0522.9-3628  | PKS 0521-36          | AGN  | 0.055 | 58.1               | 10.7                    | 2.45              | 0.0141         | Π        | HERG      | [15], [20]       |
| 4FGL J1012.7+4228  | B3 1009+427          | AGN  | 0.365 | 3.74               | 5.11                    | 1.76              | 0.0879         | Π        |           | [13]             |
| 4FGL J1144.9+1937  | 3C 264               | RDG  | 0.022 | 3.25               | 4.63                    | 1.94              | 0.102          | I        | LERG      | [13], [21]       |
| 4FGL J1325.5-4300  | NGC 5128/Cen A       | RDG  | 0.002 | 63.8               | 15.8                    | 2.65              | 0.0230         | I        | HERG      | [13], [10]       |
| 4FGL J1459.0+7140  | 3C 309.1             | CSS  | 0.904 | 2.96               | 3.38                    | 2.45              | 0.0936         | Π        | HERG      | [18], [20]       |
| 4FGL J1516.5+0015  | PKS 1514+00          | RDG  | 0.053 | 4.48               | 6.49                    | 2.59              | 0.114          | I        | LERG      | [13], [22]       |
| 4FGL J1630.6+8234  | NGC 6251             | RDG  | 0.020 | 12.6               | 69.9                    | 2.35              | 0.0320         | I        | LERG      | [13], [20]       |
| 4FGL J1724.2-6501  | NGC 6328             | RDG  | 0.015 | 2.70               | 6.23                    | 2.49              | 0.181          | Ι        |           |                  |
| 4FGL J1829.5+4845  | 3C 380               | CSS  | 0.692 | 19.6               | 6.83                    | 2.43              | 0.0295         | Π        | HERG      | [14], [20]       |
| 4FGL J2156.0-6942  | PKS 2153-69          | RDG  | 0.028 | 3.54               | 5.78                    | 2.83              | 0.110          | Π        | HERG      | [13], [22]       |
| 4FGL J2334.9-2346  | PKS 2331-240         | AGN  | 0.050 | 3.90               | 5.14                    | 2.42              | 0.116          |          | HERG      | [24]             |

# 第2章 観測衛星

この章では、本研究で用いた X 線とガンマ線のデータを取得している衛星について説明する。

# 2.1 Fermi 衛星

ガンマ線観測衛星 Fermi は主に 20 MeV から 300 GeV のガンマ線のエネルギー帯域を広い視野で観測す る衛星であり、宇宙の高エネルギー現象を解き明かすことを目的として打ち上げられた。打ち上げは 2008 年であり、現在も稼働中である。The Large Area Telescope(LAT) と The Gamma-ray Burst Monitor(GBM) の 2 つの検出器を搭載しており、LAT がメインの検出器であり、GBM が補完的な検出器である。低エネルギー 側は GBM により、8 keV から検出され、高エネルギー側は 20 MeV から 300 GeV まで検出する LAT によっ て観測される。LAT と GBM の主な性能は以下の表 2.1 にまとめる。また LAT については次節にて観測方 法について記述する。その後、LAT 観測による FGL(Fermi Gamma-ray LAT) カタログについて記述する。

|         | Large Area Telescope | Gamma-ray Burst Monitor |
|---------|----------------------|-------------------------|
| 検出エネルギー | 20 MeV - 300 GeV     | 8 keV - 40 MeV          |
| 視野      | 2.4 sr               | 9.5 sr                  |
| 角度分解能   | $<1^{\circ}$ (1 GeV) | 3° (ガンマ線バースト)           |
| 時間分解能   | $1 \mu \text{sec}$   | 2 µsec                  |

表 2.1: LAT と GBM の性能 [25]



図 2.1: Fermi の検出器の位置 [25]

### 2.1.1 LAT

前節でも述べたように、LAT は 20 MeV から 300 GeV のエネルギー帯域を観測し、特に 1 GeV から 100 GeV にて高い感度を持つ。検出器は図 2.2 に示すように 4 つのサブシステムで構成されており、これらによりガンマ線の検出と宇宙線と荷電粒子の除去が行われている。そして最終的に Data Acuisition System(DAQ) によりデータが地上へ送信・取得される。以下に 4 つのサブシステムについて記述する。



図 2.2: LAT の構造 [25]

• Tracker, Conversion foil

タングステンシートとシリコンストリップ検出器の層によりガンマ線を検出する。この層は16層あ り、シリコンストリップ検出器は各タングステンシートの上下に位置する。16層のタングステンシー トのどこかで入射ガンマ線と相互作用し、電子陽電子対生成が生じる。対生成により生じた荷電粒子 をシリコンストリップ検出器で検出することで、通過位置を精密に測定することができる。

• Calorimeter

対生成により生じた荷電粒子が最終的にカロリメーターに入射し、全エネルギーを吸収し粒子のエネ ルギーを測定する。ヨウ化セシウム (CsI) シンチレータで構成されている。

#### • Anticoincidence Detector

99.97%の宇宙線とガンマ線により生成された荷電粒子の信号を除去する。また地球大気方向からのガ ンマ線放射も除去する。プラスチックシンチレータのタイルで構成されている。

• DAQ

データ収集装置。Anticoincidence Detector, Tracker, Calorimeter からの情報を収集し、宇宙線とガンマ 線の情報を区分して地上へ送信する。

#### 2.1.2 FGL カタログ

Fermi-LAT によるカタログはいくつか存在するが、カタログごとにエネルギー領域や検出天体数など色々 と異なる。特に FGL(Fermi Gamma-ray LAT) カタログは、LAT の検出エネルギー帯域である 0.02 - 300GeV でガンマ線放射をする天体をカタログ化したものである。1FGL カタログから始まり、解析方法、較正方法、 銀河系放射 (Galactic diffuse) モデル、イベントの再構成など改善が加えられることで、カタログの検出天体 数が向上してきた。本研究で用いる 4FGL-DR2 カタログは FGL(Fermi Gamma-ray LAT) カタログの4 番目 のカタログであり、ミッション当初 (2008 年頃) からの 10 年間 (2018) のデータを用いて検出された天体が 含まれている。3 番目の 3FGL カタログに対して、4FGL カタログでは解析方法、較正方法、銀河系放射モ デル、イベントの再構成のすべてが一新され、総検出天体数も 3033 から 5787 と大幅に増加した。

4FGL カタログの天体は、解析した全期間における統計的検出有意性に基づいた天体が含まれており、一時的なガンマ線現象であるガンマ線バーストや太陽フレア、また殆どの新星は含まれていない。4FGL のカタログの特徴としては、一つ前のカタログである 3FGL カタログに比べ露出時間が2倍になった点が挙げられる。またその他の 3FGL カタログとの相違点としては、IRFs や銀河系放射モデルが新しくなったことなどが挙げられる。IRFs(Instrument Response Functions) はその名の通り検出機器の応答関数であり、入射フラックスと検出イベント間のマッピング情報により、LAT の解析に用いる。銀河系放射モデルは銀河系の星間ガスと宇宙線の相互作用によるガンマ線の放射を考慮するモデルであり、空間とスペクトルのテンプレートとして LAT の解析時に与える。またこのモデルは HI と CO の輝線の情報を用いることで改良が加えられる。LAT によって作成されたカタログは FGL の他に、広がった天体だけのカタログである FGES(Fermi Gamma-ray Extended Source) と FHES(Fermi High-Latitude Extended Source Catalog)、高エネルギー帯だけで検出された FHL カタログ (Fermi-LAT Catalog of Hard-Energy Source) がある。これらのカタログは、含まれる天体の種類が異なるだけでなく、使っている IRFs や銀河系放射モデル、期間などの点においても異なる。表 2.2 にこれまでの FGL カタログと、その他の Fermi-LAT によって作られたカタログの特徴をまとめる。

| カタログ名    | IRFs / 銀河分散モデル   | エネルギー / 期間       | 天体数     | 解析                               |
|----------|------------------|------------------|---------|----------------------------------|
| 1FGL     | P6_V3_DIFFUSE    | 0.1 - 100 GeV    | 1451(P) | Unbinned, F/B                    |
|          | gll_iem_v02      | 11 months        |         |                                  |
| 2FGL     | P7SOURCE_V6      | 0.1 - 100 GeV    | 1873(P) | Binned, F/B                      |
|          | gal_2yearp7v6_v0 | 2 years          |         |                                  |
| 3FGL     | P7REP_SOURCE_V15 | 0.1 - 300 GeV    | 3033(P) | Binned, F/B                      |
|          | gll_iem_v06      | 4years           |         |                                  |
| FGES     | P8R2_SOURCE_V6   | 10 GeV - 2 TeV   | 46(E)   | Binned, PSF,  b < 7 $^\circ$     |
|          | gll_iem_v06      | 6 years          |         |                                  |
| 3FHL     | P8R2_SOURCE_V6   | 10 GeV - 2 TeV   | 1556(P) | Unbinned, PSF                    |
|          | gll_iem_v06      | 7 years          |         |                                  |
| FHES     | P8R2_SOURCE_V6   | 1 GeV - 1 TeV    | 24(E)   | Binned, PSF, $ b \!>$ 5 $^\circ$ |
|          | gll_iem_v06      | 7.5 years        |         |                                  |
| 4FGL     | P8R3_SOURCE_V2   | 0.05 GeV - 1 TeV | 5064(P) | Binned, PSF                      |
|          | gll_iem_v07      | 8 years          |         |                                  |
| 4FGL-DR2 | P8R3_SOURCE_V2   | 0.05 GeV - 1 TeV | 5787(P) | Binned, PSF                      |
|          | gll_iem_v07      | 10 years         |         |                                  |

表 2.2: Fermi-LAT によるカタログ [27]

## 2.2 Swift 衛星

X線観測衛星 Swift は高エネルギー現象であるガンマ線バーストを見つけて即時観測し、また初の感度 の良い硬 X線探査を行うことを期待され 2004 年に打ち上げられた。このため広い視野を持ち、柔軟かつ迅 速に観測を行うことができる。検出器は UVOT, BAT, XRT の 3 つあり、それぞれ検出エネルギー帯域が異 なる。UVOT は紫外・可視光のエネルギー帯域 (170-650 nm)を観測し、ガンマ線バーストの可視光残光を 観測することを目的としている。BAT(Burst Alert Telescope) は硬 X線である 15-150 keV のエネルギー帯域 を測定する。検出方法には Coded mask 法を採用しており、高感度での検出と広い視野 (2sr)を持つ。この ため BAT では、ガンマ線バーストを検出してから数秒以内に約 3 arcmin の精度でガンマ線バーストの位置 を提供することができる。そして最後の一つが XRT(X-ray Telescope) であり、本研究では XRT により得ら れたデータの解析を行なっている。XRT ついては次節にて詳細な説明を行う。



図 2.3: X 線観測衛星 Swift[28]

#### 2.2.1 XRT

ガンマ線バーストの後に X 線残光が生じる確率は 84%以上だと考えられており、XRT はこの残光を観測 することを目的とした検出器である。また、ガンマ線バーストを観測していないときは、時間変動を示す 天体を何度も柔軟に観測することができる。検出エネルギー帯域は 0.2-10.0 keV である。視野は BAT に比 べ、XRT と UVOT は狭い。XRT の場合は、検出器が X 線望遠鏡と CCD の組み合わせであるため、視野は 狭く 23.6 arcmin である。XRT の GRB 観測の役割としては、BAT により数分角の精度で提供されたガンマ 線バーストの位置を再度観測し、100 数秒以内に 5 arcsec まで絞り込むことである。性能については以下の 表 2.3 にまとめる。



図 2.4: XRT 検出器 [29]

Swift 衛星はガンマ線バーストを対象天体としているため、迅速にターゲット天体の方向に向くことが求 められる。このためデータ取得プロセスは自動化されており(図 2.5)、ターゲット天体の観測が行われた後4 つのモードで構成されたフローチャートに従う。まずターゲット天体が観測されると、はじめに Image(IM) モードにより、GRBの正確な位置情報が取得される。その後 PD(Photodiode) モード、WT(Windowed Timing) モード、PC(Photon counting) モードの順に実行される。PD モードでは空間情報は得られないが、PC、TW モードより精度の良い 0.14 ms の時間分解能で観測データが得られる。画像データは、WT モードと PC モー ドによりそれぞれ一次元イメージと 2 次元イメージを作成する。PD, PC, WT モードはフラックスの大きさ

| 望遠鏡           | Wolter I (焦点距離 3.5 m)   |
|---------------|---|
| 検出器           | e2v CCD-22  |
| 検出器フォーマット     | $600 \times 600$ pixels   |
| ピクセルサイズ       | $40 \mu \mathrm{m} 	imes 40 \mu \mathrm{m}$   |
| Readout Modes | Image(IM) mode  |
|               | Photodiode(PD) mode   |
|               | Windowed Timing(WT) mode  |
|               | Photon Counting(PC) mode  |
| ピクセルスケール      | 2.36 arcsec / pixel   |
| 視野            | $23.6 \times 23.6$ arcmin   |
| PSF           | 18 arcsec HPD @ 1.5 keV   |
|               | 22 arcsec HPD @ 8.1 keV   |
| 位置決定精度        | 3 arcsec  |
| 時間分解能         | 0.14 µsec(PD), 1.8 µsec(WT), 2.5 sec(PC)  |
| エネルギー幅        | 0.2 - 10 keV  |
| エネルギー分解能      | 140 eV @ 5.9 keV(打ち上げ時)   |
| 有効面積          | 約 125 cm <sup>2</sup> @ 1.5 keV   |
|               | 約 20 cm <sup>2</sup> @ 8.1 keV  |
| 感度            | $2 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ in } 10^4 \text{ sec}$ |

表 2.3: XRT の性能 [29]

に応じて変更されるため、WT モードでは PC モードでパイルアップしてしまう天体の観測も可能である。 本研究で用いた電波銀河の X 線データは PC モードデータで取得されたものである。



図 2.5: XRT 検出器 [29]

# 第3章 解析方法

この章ではX線データの解析方法について記述する。ガンマ線データについては、前章にて記述の通りカタ ログ値を用いている。X線データの解析はHEAsoftという解析ツールを用いて行った。Swift/XRTのX線デー タは観測後 FITS 型式のファイルが生成され、その後いくつかの較正やスクリーニングを行い、クリーンデー タが生成される。このデータは Swift のアーカイブデータとしてサイト (https://www.swift.ac.uk/index.php) からダウンロードできる。

まず、個々の天体のX線スペクトルを特徴づけるパラメータ (Photon Index、flux)を求めるため、ここの 天体の複数の観測のX線スペクトルの解析を行った。また、ジェットの時間変動を調べるため、Hardness Ratio というパラメータを導入した。最後に SED から MCMC 法を用いてジェットパワーの推定を行った。 個々の天体の解析結果は付録 A にて載録した。

## 3.1 X線スペクトル解析

X線スペクトル解析(モデルフィッティング)は、HEAsoftの中のXspec で行った。Xspec はどの検出器に も依存しないため、全てのX線検出器により観測が行われたデータに対しても用いることができる。Xspec にてスペクトル解析を行うためには、天体のスペクトルファイル、バックグラウンド(bkg)のスペクトル ファイル、そしてレスポンスファイルの大きく3つのファイルを準備する必要がある。スペクトルファイル の作成のため、FITSファイルのデータ処理を行う必要があり、これには HEAsoftの中の FTOOLS ツール 群を用いた。またレスポンスファイルとは、検出器により得られたスペクトルデータと入射 X線のエネル ギーの関係を記述したファイルであり、データ処理にて得られたスペクトルファイルの較正に必要である。 レスポンスファイルは主に ARF(ancillary response file)ファイルと RMF(redistribution matrix file)ファイルの 二種類が存在する。ARFファイルは望遠鏡の有効面積や検出効率など入射 X線のエネルギーや入射位置に 関数る効率が記述されたファイルである。RMFファイルは検出器の応答を表す行列が記述されたファイル であり、入射 X線の波高値とエネルギーの変換などの情報が含まれている。これらの3種のファイルの作 成を以下に順に説明する。またここでは、HEAsoft バージョン 6.28、Xspec バージョン 12.11.1を用いた。

まず天体からの信号と bkg からの放射のスペクトルファイルの作成について説明する。スペクトルファ イルの作成には FTOOLS 中の Xselect を用いるが、この際にスペクトルを切り出す領域の指定を行う必要が ある。このため初めに領域ファイルの作成を行なった。ds9 というソフトを用いることで 2 次元の PC モー ドデータを画像化し、イメージを確認しながら対象天体と bkg の領域を設定した。また本解析には PC モー ドデータのみを用いている。ds9 でのイメージは 3.1 のように表示され、緑の線が指定した領域を表してい る。本研究の解析では天体の領域を半径 5 秒角の円、bkg 領域を天体の領域と中心を同じとする半径 105 秒 から 135 秒角の中抜き円と設定した。この際、対象天体の座標には SIMBAT というウェブサイトを用いた [33]。



図 3.1: ds9 による IC 310 の PC モードデータ

次に xselect を用いて、ds9 で指定した領域のスペクトルファイル (PI ファイル) を作成する。xselect では イベントファイルにフィルタを掛けることで、イメージ、スペクトル、ライトカーブを抽出するソフトウェ アであり、ds9 で指定した領域をフィルターとして用いて、2 つの PI(Pulse height invariant) ファイルを作成 した。またこの際、フライトカーブの作成も行なった。この PI ファイルは最終的に xspec によりスペクト ル情報に変換される。

最終的に xspec にてスペクトルデータとモデルのフィッティング精度の指標としては  $\chi$  二乗検定が通常用 いられている。このため少なくとも 1 bin あたり 20 以上のイベントが含まれるように bin まとめすることが 推奨されており、本研究のサンプル天体については可能な天体に対しては最小を 20bin と設定した。しかし、 多くの天体では検出された光子数が少なく、 $\chi$  二乗検定を用いることが難しい場合が多くみられた。この場 合に関しては、モデルのフィッティング精度には C stat(C 統計)を採用して、尤度を用いた検定を行った。

次にレスポンスファイルの作成を行なった。先に記述の通りレスポンスファイルには2種類あり、これ らの作成には FTOOLS 中の xrtmkarf を用いて行う。xrtmkarf は arf ファイルを作成するためのコマンドで あり、スペクトル情報に変換するために必要なファイルである。このため xrtmkarf では CCD による flux の 損失を較正する必要が有り、このため exposure map の情報を使用した。この flux の損失は CCD ピクセル の故障などにより適切にデータを収集できない場合に発生し、XRT に関しては 2005 年 3 月末に微小隕石に よる CCD ピクセルの故障が確認されている。exposure map には、3.2 に示される様に CCD のピクセル情報 が画像データとして記録されている。このように、較正された情報を元に天体の PI ファイルから arf ファ イルを作成する。またこの際に必要とされるその他のパラメータは CALDB から提供され、rmf ファイルは xrtmkarf 内部で指定されているもの (例えば swxpc0to12s0\_20010101v012.rmf)を使用した。



図 3.2: ds9 による IC 310 の exposure map

以上の手順により xspec に必要なファイルが作成できた。xspec では FTOOLS 中の grppha で bin まとめ した天体の PI ファイルと、bkg ファイル、2 種のレスポンスファイルを読み込ませることで波高値情報から スペクトルへの変換が行われ、スペクトルと指定した X 線放射モデルとのフィッティングを行い、フィット 精度とベストフィットのモデルのパラメータの値が得られる。本研究の解析では複雑なモデルは用いず、多 くの天体では光電吸収を表す phabs と AGN の放射を表す pegpwrlw をモデルとして用いた。phabs は (3.1) 式で表されるモデルであり、 $\sigma(E)$  はトムソン散乱を考慮しない光電吸収の散乱断面積である。また  $\eta_H$  は 水素柱密度であり、これがパラメータとなる。

$$M(E) = \exp[-\eta_H \sigma(E)] \tag{3.1}$$

光電吸収は、我々の銀河の中、及び AGN の母銀河の中にある星間物質によって起こる。また AGN の放射 は冪型分布 (冪乗則:power law) で表されることが多く、放射モデルは (3.2) 式のように書かれる。入力パラ メータは power law の冪指数  $\alpha$ (光子指数 photon index) と flux 値である。flux を計算するエネルギー帯は 0.5 - 10.0 keV とした。

$$A(E) = KE^{-\alpha} \tag{3.2}$$

またサンプル天体の内、NGC1316のみ銀河の中の高温ガスの放射を表す apec モデルを追加した。このモデ ルの入力パラメータは、プラズマ温度、金属量 (C, N, O, Ne, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni)、赤方偏移、flux である。また xspec 内でのコマンドを用いて、赤方偏移から光度 (luminosity)の推定も行った。これらの解 析は各天体の各観測データごとに行い、解析で得らた個々の観測データの示すパラメータの値を平均して 各天体の代表値とした。解析結果は以下の表 3.1 にまとめる。また Eddington 降着率の計算に用いた BH 質 量を引用した論文も表に記載した。引用元の記載されていない数天体については、近赤外線観測のプロジェ クト 2MASS により作成された 2MASS All-Sky Point Source Catalog(PSC)を用いることで、K バンドデー タから BH 質量を計算した。詳細な計算については付録を参照。

### **3.2 Hardness Ratio**による時間変動の調査

Xspec によるスペクトル解析では、光子統計が少ない場合にパラメータの誤差が大きくなってしまい、スペクトルの変化がわかりにくいことがある。この場合、多回数の観測が行われている天体に対しても時間変

| Name                 | number of OBS | $F_X$                                | Ferr                        | $\Gamma_X$ | $\Gamma_{err}$ | slope  | $L/L_{edd}$ | ref        |
|----------------------|---------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------|----------------|--------|-------------|------------|
|                      |               | $[10^{-12} \mathrm{erg}/\mathrm{s}]$ | $[10^{-13} \mathrm{erg/s}]$ |            |                |        |             |            |
| 4C +40.01            | 23            | 3.39                                 | 1.92                        | 1.62       | 0.102          | 21.9   | 0.120       | appendix A |
| NGC 1218             | 11            | 2.48                                 | 1.52                        | 2.19       | 0.0860         | 17.9   | 0.000865    | [38]       |
| B3 0309+411B         | 8             | 10.0                                 | 2.02                        | 0.58       | 0.0540         | 2.09   | 0.0857      | appendix A |
| IC 310               | 18            | 10.5                                 | 1.40                        | 2.00       | 0.0214         | 4.84   | 0.00157     | [37]       |
| NGC 1316/Fornax A    | 45            | 0.599                                | 0.0440                      | 3.18       | 0.162          | 212    | 9.29e-06    | [41]       |
| 3C 111               | 14            | 63.4                                 | 7.39                        | 1.49       | 0.0220         | 0.329  | 0.0564      | [34]       |
| 3C 120               | 187           | 52.0                                 | 6.55                        | 1.59       | 0.0170         | 0.294  | 0.294       | [34]       |
| PKS 0518-45/Pictor A | 11            | 18.8                                 | 8.31                        | 1.63       | 0.0518         | 2.50   | 0.0106      | [39]       |
| PKS 0521-36          | 37            | 22.4                                 | 4.00                        | 1.56       | 0.0237         | 2.45   | 0.0340      | [42]       |
| B3 1009+427          | 8             | 3.89                                 | 4.61                        | 2.23       | 0.259          | 28.6   | 0.345       | appendix A |
| 3C 264               | 28            | 2.93                                 | 12.1                        | 2.12       | 0.0383         | 14.2   | 0.000669    | [35]       |
| NGC 5128/Cen A       | 135           | 212.3                                | 44.7                        | 1.91       | 0.0811         | 0.0156 | 0.0146      | [37]       |
| 3C 309.1             | 9             | 1.36                                 | 0.801                       | 1.62       | 0.0698         | 17.1   | 0.831       | [36]       |
| PKS 1514+00          | 7             | 4.53                                 | 4.69                        | 1.64       | 0.142          | 8.52   | 0.00627     | [39]       |
| NGC 6251             | 4             | 3.16                                 | 1.24                        | 1.69       | 0.0496         | 21.1   | 0.000859    | [37]       |
| NGC 6328             | 11            | 0.839                                | 0.902                       | 2.06       | 0.293          | 131    | 6.20e-05    | [40]       |
| 3C 380               | 13            | 3.37                                 | 2.11                        | 1.64       | 0.0695         | 13.9   | 3.51        | [36]       |
| PKS 2153-69          | 10            | 10.0                                 | 5.12                        | 1.74       | 0.0663         | 1.14   | 0.00407     | appendix A |
| PKS 2331-240         | 31            | 14.2                                 | 2.04                        | 1.64       | 0.0308         | 1.82   | 0.0167      | appendix A |

表 3.1: xspec によるサンプル天体の解析結果

動の情報を正確に得ることができない。本研究で用いた天体も、上記のように光子数が少ない天体が多かった。このため、本研究では高エネルギー側と低エネルギー側の各観測でのスペクトル情報として、Hardness Ratio(HR)を用いた。算出方法は Swift/XRT で観測されたセイファート銀河をサンプルとした X 線スペクトルの時間変動の研究 (Connolly et al. 2016[31])を踏襲し、高エネルギー側を 2.0 - 10.0 keV、低エネルギー 側を 0.5 - 2.0 keV として、それぞれのエネルギー幅で観測された光子数を Hard Count rate(H) と Soft Count rate(S) と定義することで、HR は以下の (3.3) 式により定義する。

$$HR = \frac{H-S}{H+S}$$
(3.3)

それぞれのカウント数は、Xspec を用いてそれぞれのエネルギー幅を指定することで取得した。全サンプル 天体に対して解析を行ったが、低エネルギー側または高エネルギー側にて光子のカウント数がないために、 HR を算出できないデータもあり、結果として図 3.3 に示すように 19 天体となった。図 3.3 では、Connolly et al. 2016[31]にならい、横軸が Hard Count rate を、縦軸が Hardness Ratio を表している。プロットされている データ点は、それぞれの天体の1 観測を表しており、多くの回数観測されている天体はデータ点が多くなっ ている。ここでは、この図の傾向を定量的に評価するために回帰直線を用いた。図 3.3 の各天体のプロット 中の直線は、回帰直線でありオレンジ色の領域が 95%信頼区間を表している。この回帰直線の傾きは表 3.1 に示した。この回帰直線を用いることで天体の時間変動の物理的傾向を調査することができ、この回帰直 線が正の傾きを示す場合は高エネルギー側ほど明るくなる Harder-when-brighter な傾向を示す。これに対し て、回帰直線が負の傾きを示す場合は、高エネルギー側ほど暗くなる Softer-when-brighter な傾向を示す。表 3.1 を確認すると、すべてのサンプル天体(電波銀河)は正の傾きを示すことがわかり、Harder-when-brighter な傾向を示すことがわかる。









# **3.3 MCMC**法を用いた SED のモデルフィッティングによるジェットパワー の推定

SED からのジェットパワーの推定のために、MCMC(マルコフ連鎖モンテカルロ) 法により SED をジェットの放射モデルの一つである SSC モデル (後述) でフィットを行い、得られたパラメータからジェットパワーを推定する。MCMC 法では、MCMC アルゴリズムに従い統計モデルとデータとのフィッティングを行い、結果として各パラメータの確率分布を得ることができる。また MCMC 法はベイズ統計学に基づいており、得られた確率分布は事後分布と呼ばれる。ベイズ統計では、事後分布の推定に尤度と事前分布を元に推定を行う。n 個のデータ  $y_i$ の組みを  $Y = y_1, y_2, ..., y_n$ 、推定したいパラメータを q、Y が得られたときの q の確率分布 (つまり事後分布) を p(q|Y)、q が与えられているときの Y の確率分布 (尤度に相当) を p(Y|q)、そしてパラメータ qの事前分布を p(q) と置くことで事後分布は以下の式のように書ける。

$$p(q|Y) = \frac{p(Y|q)p(q)}{\sum_{q} (p(Y|q)p(q))}$$
(3.4)

MCMC メカニズムでは、この事後分布をもとにランダムサンプリングを行い、次の事後分布を求め、最終的に確率分布が得られる。

MCMC アルゴリズムは、最尤推定によるパラメータ推定であり、いくつかの種類が存在する。本研究では MCMC アルゴリズムに適用的メトロポリス法を採用している。このため基本となっているメトロポリス 法について説明した後、適用的メトロポリス法について説明する。

#### 3.3.1 メトロポリス法・適用型メトロポリス法

先にも記述した通り、メトロポリス法は MCMC アルゴリズムの一つであり、ランダムサンプリングのア ルゴリズムは以下の通りである [30]。

- 1. パラメータ Q の初期値を決める。ここでは初期値に q を与える。
- 2. *q*を増やすか減らすかをランダムに決定し、新しく選んだパラメータを*q*とする。増減値は提案分布 によって与えられる。
- 3. *q*による尤度  $L(q) \ge \hat{q}$ による尤度  $L(\hat{q})$  を用いて尤度比  $p = \frac{L(\hat{q})}{L(q)}$  を計算する。尤度比 p を確率とし、 この確率で *q* は  $\hat{q}$  に変更される。
- 4. 手順3にて、qに変更があった場合はその値を初期値として手順2に戻る。これを設定したステップ 数だけ繰り返す。

上記の手順より、変更される確率は尤度比 p に比例するため、ランダムサンプリングに伴う尤度の変化が 小さくなると、変更されにくくなる。このメトロポリス法によるパラメータ推定の様子はトレースプロット として図 3.5 のようにプロットされる。また図 3.6 はトレースプロットをヒストグラムにしたものであり、 赤い実線は推定された確率分布を表しており、この分布からパラメータの誤差を求められる。



図 3.5 では、ステップ数を 10<sup>6</sup> 回とした。メトロポリス法では初期値が最終的な収束値と大きく異なる 場合、初期のステップにおけるサンプリングされたパラメータの値は収束値から大きく外れてしまうため、 初期のステップは使わないことが多い。また複数のパラメータを用いた場合、収束するためには全てのパラ メータで最適な提案分布によるパラメータの更新が必要となり、このため十分なサンプリングには多くの ステップ数が必要となり効率が悪い。このため複数のパラメータを推定が必要な SED モデルではかなりの 時間を要する。従って、より効率的なモデルとして用いたのが適応的メトロポリス法である。この方法で は提案分布を工夫することにより、比較的短時間でサンプリングを行うことが可能となる。用いたコード は山田修論 (2019) で開発されたものを広島大学宇宙科学センターの植村氏が公開しているものを利用した (https://home.hiroshima-u.ac.jp/uemuram/?p=648)。

#### 3.3.2 SED モデルとジェットパワーの導出

本研究にて、SED をフィットする為のモデルとして SSC モデルを用いた。SSC モデルの式は Finke et al. 2008[32] を用いている。このモデルで用いている主要なパラメータは、以下の表 3.2 に示す。時間変動のタ

| В  | 磁場                        |
|----|---------------------------|
| D  | ドップラー因子                   |
| Κ  | 電子スペクトルの nomalization     |
| Т  | 時間変動のタイムスケール              |
| LC | カットオフローレンツ因子              |
| p0 | 電子スペクトルのスペクトル指数 (低エネルギー側) |
| p1 | 電子スペクトルのスペクトル指数(高エネルギー側)  |
| r1 | ローレンツ因子 (最小値)             |
| r2 | ローレンツ因子 (最大値)             |
| z  | 赤方偏移                      |

表 3.2: SSC モデルの主要パラメータ

イムスケール T とは、観測者の系で観測される最小の時間変動のタイムスケールである。共動座標系での タイムスケール T' は、光速 c と放射領域の広がりの半径 R'<sub>b</sub> を用いて以下の (3.5) 式のように制限できる。

$$T' \geqq \frac{R'_b}{c} \tag{3.5}$$

従って、観測者系での時間変動のタイムスケールTは、(3.6)式の様に制限される。

$$T' \geqq T = \frac{(1+z)R'_b}{\delta_D c} \tag{3.6}$$

よって、タイムスケールは放射領域の大きさを表すと言って良い。

電子スペクトルは (3.7) 式のように、あるローレンツ因子の値 γ<sub>break</sub> で冪指数が p0 から p1 に変化するような broken power law 分布に従うとし、ローレンツ因子の最小値 γ<sub>1</sub> と最大値 γ<sub>2</sub> における電子スペクトルは、Heaviside 関数を用いることで以下の (3.7) 式の様に書くことができる。

$$N_e(\gamma) = K_e \left[ \left( \frac{\gamma}{\gamma_{break}} \right)^{-p0} H(\gamma_{break} - \gamma) + \left( \frac{\gamma}{\gamma_{break}} \right)^{-p1} H(\gamma - \gamma_{break}) \right] H(\gamma; \gamma_1, \gamma_2)$$
(3.7)

ここで  $K_e$  は電子スペクトルの normalization、 $\gamma_{break}$  は 3.2 での LC に対応する。また Heaviside 関数とはス テップ関数に類似した関数であり、以下のような性質を示す。

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases}$$
(3.8)

$$H(x;x_1,x_2) = \begin{cases} 1 & (x_1 < x < x_2) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}$$
(3.9)



図 3.7: 電子スペクトルの broken-power-law 分布

SSC モデルは、シンクロトロン放射の光子を高エネルギー光子により逆コンプトン散乱するモデルである。このため、SSC モデルでのジェットパワーの推定にはシンクロトロン放射の全放射エネルギーと観測さ

れる flux を用いる。共動座標系での値にはプライム記号をつけることで、これらの式は以下の (3.10), (3.11) 式のように表すことができる。

$$I_{syn} = \int_{\delta_D \varepsilon_B \gamma'_1/(1+z)}^{\delta_D \varepsilon_B \gamma'_2/(1+z)} d\varepsilon \frac{f_{\varepsilon}^{syn}}{\varepsilon^{3/2}}$$
(3.10)

$$f_{\varepsilon}^{syn} = \frac{\sqrt{3}\delta_D^4 \varepsilon' e^3 B}{4\pi h d_L^2} \int_1^\infty d\gamma' N'_e(\gamma') R(x)$$
(3.11)

 $d_L$ は光度距離、hはプランク定数、eは電荷、 $\delta_D$ はSSCモデルのパラメータのDに対応するドップラー因 子を表している。 $\varepsilon$ は1光子のエネルギーであり $\varepsilon = hv/m_ec^2$ である。またR(x)はBessel 関数を含む式で 定義される式であり、xは以下の(3.12)式で定義される。

$$x = \frac{4\pi\varepsilon' m_e^2 c^3}{3eBh\gamma'^2}$$
(3.12)

R(x) は近似を用いることで値を求めることができるが、xの値に応じて近似は変化する。

$$\log(R) = A_0 + A_1y + A_2y + A_3y + A_4y + A_5y \quad (10^{-2} < x < 10, \ y = \log(x))$$
(3.13)

$$R(x) = \begin{cases} 1.808242x^{1/3} & (x \ll 1) \\ \frac{\pi}{2}e^{-2}\left(1 - \frac{99}{162x}\right) & (x \gg 1) \end{cases}$$
(3.14)

(3.14) 式は Crusius & Schlickeiser(1986) による近似である。また (3.13) 式の係数 [*A*<sub>0</sub>,*A*<sub>1</sub>,*A*<sub>2</sub>,*A*<sub>3</sub>,*A*<sub>4</sub>,*A*<sub>5</sub>] の値 は以下の表 (3.3) にまとめる。

| 係数    | $10^{-2} < x < 10^{0}$ | $10^0 < x < 10^1$ |
|-------|------------------------|-------------------|
| $A_0$ | -0.35775237            | -0.35842494       |
| $A_1$ | -0.83695385            | -0.79652041       |
| $A_2$ | -1.1449608             | -1.6113032        |
| $A_3$ | -0.68137283            | 0.26055213        |
| $A_4$ | -0.22754737            | -1.6979017        |
| $A_5$ | -0.031967334           | 0.032955035       |

表 3.3: (3.13) 式の係数 [32]

そしてジェットの全エネルギー放射率は、全粒子のエネルギー放射率と磁場のエネルギー放射率の和とし て求めることができる。ここで、電子と磁場のそれぞれのエネルギーはそれぞれ以下の (3.15), (3.16) 式の 様に書くことができ、電子のエネルギーについてはシンクロトロン放射の全放射エネルギーの (3.10), (3.11) 式を用いて (3.17) 式のように式変形できる。

$$W'_B = \frac{R'^3 B^2}{6} \tag{3.15}$$

$$W'_{e} = m_{e}c^{2} \int_{\gamma_{1}}^{\gamma_{2}'} d\gamma' \gamma' N'_{e}(\gamma')$$
(3.16)

$$= m_e c^2 \frac{6\pi d_L^2}{c\sigma_T \varepsilon_B^2 U_{B,cr} \delta_D^4} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\delta_D \varepsilon_B}{1+z}} I_{syn}$$
(3.17)

全粒子と電子の割合は $\xi \equiv W'_{par}/W'_{e}$ と表すことで、全粒子のエネルギーは以下の (3.18) 式の様に書くことができる。

$$W'_{par} = \frac{3\pi d_L^2 \xi m_e c^2}{c \sigma_T \epsilon_B^{3/2} U_{B,cr} \delta_D^{7/2}} I_{syn}$$
(3.18)

 $U_{B,cr}$ は共動座標系でのクリティカル磁場  $B_{cr}$ のエネルギー密度  $U_{B,cr} = B_{cr}^2/8\pi$  を表しており、ここでのクリティカル磁場は  $B_{cr} = 4.414 \times 10^{13}$ G である [32]。これらのエネルギーからジェットパワーは以下の (3.19), (3.20), (3.21) 式で推定される。

$$P_{tot} = 2\pi R_b^{\prime 2} \beta \Gamma^2 c \frac{W_{par}' + W_B'}{V_b'}$$
(3.19)

$$P_B = 2\pi R_b^{\prime 2} \beta \Gamma^2 c \frac{W_B^{\prime}}{V_b^{\prime}}$$
(3.20)

$$P_e = 2\pi R_b^{\prime 2} \beta \Gamma^2 c \frac{W_e^{\prime}}{V_b^{\prime}}$$
(3.21)

 $V'_b$ は共動座標系での放射領域の広がり (blob)の半径  $R'_b$  での体積  $V'_b = \frac{4\pi R_b^3}{3}$  を表している。また  $\Gamma$  はローレンツ因子であり、 $\Gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  である。

# 第4章 結果と議論

# 4.1 X線の時間変動

以降の図では、3章で説明した X 線解析により得られたパラメータを用いて作成した。この際、銀河からの放射が強く、また AGN であるか定かではない NGC 1316 については図中から除いている。

まず X 線の時間変動を調べるために HR の傾き (slope) と flux を軸としていくつかの図を作成した。図 4.1 では X 線 flux の最大値と最小値の比と slope の大きさの関係を示している。またこの図では電波銀河を 青丸で、比較としてセイファート銀河を緑丸で表した。セイファート銀河には、NGC 4051, NGC 4151 を用 いた。この図より、slope の特出した 2 天体を除いた場合でも、X 線 flux の変動と slope の間に関連性がな いことがわかった。また図 4.2 より、セイファート銀河と比べると電波銀河の slope の値が大きい値を示し ている天体が存在することがわかった。



図 4.1: X 線 flux の最大値と最小値の比と HR の傾き 図 4.2: X 線 flux の最大値と最小値の比と HR の傾き のプロット のプロット (slope < 50)

次に X 線とガンマ線の flux 比と slope の関係性を図 4.3 と図 4.4 にて示した。また図 4.3 では未分類の NGC 6328 の slope が 100 以上の値を示し 50 以下の傾向がわからないため、図 4.4 では slope の値が 60 以 下となる領域のみを表示した。以降の図では、電波銀河の分類である FR 分類と HERG/LERG 分類を適用 し、プロットの色とマークを組み合わせることで表した。赤色が FR-I、青色が FR-II で表し、 $\bullet$  が HERG、  $\circ$  が LERG で表している。また FR 分類にて未分類とした天体は黒色で表し、HERG/LERG 分類にて未分類 とした天体は  $\bigtriangledown$  で表した。先行研究である Fukazawa et al. 2015 では、前述の通り電波銀河 8 天体について X 線放射起源の推定を行っており (表 1.1)、8 天体のうち 5 天体は本研究のサンプル天体に含まれるため、 それらの天体名を図中の該当点のそばに表示した。
図 4.4 を見ると X 線とガンマ線の flux 比が 0.5 を境に 2 つのグループが形成されている傾向があるよう に見える。これは、図 4.5 に示すように両軸にヒストグラムを適用させることで、flux 比の値が 0.5 以下、 slope が 10 以下の範囲に視覚的に確かに天体群が存在することが確認できる。従って、flux 比の値が 0.5 以 下かつ slope が 10 以下を示す天体群を 1 つのグループとして認識し、その他の天体群を一纏めにしもう 1 つのグループとしてここでは扱うこととする。このヒストグラムでは両軸とも 25bins とし、図 4.4 と同様 に slope が 60 以下の天体で行っている。



図 4.3: X 線とガンマ線の flux 比と HR の slope の関係 34.4: X 線とガンマ線の flux 比と HR の slope の関係 (slope < 60)



図 4.5: X 線とガンマ線の flux 比と HR の slope の関係に (slope < 60) の両軸にヒストグラムを適用した図

従って、2つのグループに見られる傾向を纏める。まず図 4.4 にて flux 比の値が 0.5 以下かつ slope が 10 以下を示す天体群は X 線に比べてガンマ線が暗く、また slope の値が小さいことから Harder-when-brighter の傾向が弱いことがわかる。従って、このグループでは X 線放射にて降着円盤からの放射が観測されてい

ると考えられる。そしてもう一方の flux 比の値が 0.5 以上を示す天体群は、X 線に対してガンマ線が比較 的明るく、また slope が大きい値を示すことから Harder-when-brighter の傾向が強いことがわかる。従って、 このグループで X 線放射にてジェット放射が観測されていると考えられる。

次に、X線とガンマ線のそれぞれの flux と slope との関係性を調べた。図 4.6 は X線の flux と slope の 関係、図 4.7 ではガンマ線の flux と slope の関係を示した。まず図 4.6 では、FR-I/LERG を示す天体の大半 がおよそ  $3 \times 10^{-12}$  と低い値の位置に密集していることがわかる。また FR-II/HERG の天体は 1 天体を除き FR-I/LERG より高い flux を示し、全体に広く分布し、FR-I/HERG の天体は 2 天体とも比較的高い値を示し た。また slop の高い天体は X線での flux が小さい値を示すことがわかる。次に図 4.7 では、FR-I/LERG を 示す天体はプロットの中心まで分布し、また低い値を示す天体も FR-II/HERG の示す flux とほぼ同等の位 置に分布した。これより、図 4.4 にて 2 つに分かれたグループは X線で高い値を示す天体と、ガンマ線に て高い値を示す天体が集まっていることがわかる。

60

50

40

30

20 sobe

10

c

-10

-20

-30



図 4.6: X 線の flux と HR の slope の関係

図 4.7: ガンマ線の flux と HR の slope の関係

10-1

flux(Gamma-ray)

/ 3C120

flux(Gamma-ray) vs slope

FRI/LERG

FRI/HERG

unk/unk

¢ I Cen#

0

٠

また、X線とガンマ線の luminosity と slope の関係性を示した図 4.8, 4.9 を見ると、どちらの luminosity においても FR-II/HERG の天体が高い値を示していることがわかる。これは距離を考慮した場合、FR-II 天体のほうが遠方にあり光度が高いという既知の事実と一致する。



図 4.8: X 線の光度と HR の slope の関係



図 4.9: ガンマ線の光度と HR の slope の関係

#### **4.2 X**線とガンマ線の Photon Index の関係

次に X 線とガンマ線の Photon Index を軸として用いて図 4.10 を作成し、これまで同様に FR-I/II 分類、 HERG/LERG 分類を適用した。この図を見ると天体が左上と右下に分かれて分布している様に見られる。右 下の天体群は FR-II/HERG が集まっており、また FR-I/HERG もまた右下に集まっている。これに対して、 FR-I/LERG を示す天体は左下と右上の両方に分布しているが、左上のみを見ると FR-I/LERG に分類されて いる天体が多く集まる傾向があることが見てわかる。Photon Index は小さい値を示すほど、より高エネル ギー帯域にて放射が観測されると期待される Harder-when-brighter な傾向を示す。このため左上の天体群は ガンマ線で強い Harder-when-brighter な傾向を示し、X線では Harder-when-brighter な傾向が弱い。これに対 して、左下の天体群は X 線で強い Harder-when-brighter な傾向を示し、ガンマ線では Harder-when-brighter な傾向が弱い。この推定される X 線放射起源と Photon Index の振る舞いとの関連性は、図 4.11 の簡易的な Spectral Energy Distribution(SED) から説明できる。ここで SED を用いた説明の前に、まず SED と Photon Index の関係性について簡潔に説明する。Photon Index は横軸にエネルギー、縦軸に単位時間単位エネルギー あたりのカウント数を用いた両対数グラフでのスペクトルデータが示す傾きに対応するパラメータである。 これに対して、SED は横軸を同様にエネルギーと考えた場合、縦軸は単位時間あたりのエネルギーに対応 する。従って、これらのパラメータ間では単位がエネルギーの2乗分異なるため、Photon Index の値に2を 加算した値が SED の傾きに相当する。また SED では正の傾きを持つ場合 Hard、負の傾きを持つ場合 Soft と状態を分けて扱い、これはここまで扱ってきた Harder-when-brighter (Softer-when-brighter) と同様の考え 方に基づいた分け方であり、Hard ほど高エネルギー側まで放射が観測されることが期待されることを意味 する。これを基に図4.11では、降着円盤/コロナから放射とジェットからのシンクロトロン放射とシンクロ トロン自己コンプトン (SSC) 放射のスペクトルを用いて X 線とガンマ線帯域にてどの放射が観測されてい るのかを簡易的に示している。

まず、図4.10にて右下に集まった天体群では、図4.11上図のようにX線では降着円盤/コロナの放射と ジェットの放射がPhoton Index がHard な状態で観測され、ガンマ線ではジェット放射がSoft な状態で観測 されると考えられる。次に、図4.10にて左上に集まった天体群では、図4.11下図のようにジェット放射の スペクトルが高エネルギー側にシフトしていると考えられ、これによりX線ではジェット放射がSoft な状 態で観測され、ガンマ線では同じくジェット放射がHard な状態で観測されると考えられる。従って、纏め ると左上の天体群ではX線にてジェット放射が観測されている考えられ、右下の天体群ではX線で降着円 盤かジェットのどちらか、もしくは両方の放射が観測されていると考えられる。



図 4.10: X 線とガンマ線の Photon Index の関係



図 4.11: 傾向を説明する簡易的な SED

## 4.3 降着率に基づいた X 線データの変動

前節まででは、X線データとガンマ線データを用いることで2つのプロットにて、ジェットと降着円盤 のどちらが卓越して観測されているかのグループ分けを行った。X線にて降着円盤からの放射が卓越して 観測される場合、降着率はジェットが卓越して観測されている天体に比べ高い値を示すと考えられる。従っ て、この節では X 線光度と Eddington 光度との光度比を用いることで、X 線とガンマ線の Photon Index と 降着率の対応関係を調べた。図 4.12, 4.13 では X 線ガンマ線それぞれについて、光度比との関連性をプロットした。磁気流体シミュレーションを用いた降着円盤の研究では、標準降着円盤の光度比はおよそ  $10^{-2}$  を示すという結果が知られている [3]。図 4.12 を見ると  $10^{-2}$  付近を境に電波銀河の分類が分離する傾向にあることがわかる。また、ガンマ線の Photon Index を用いた図 4.13 と X 線の Photon Index を用いた図 4.12 を見比べることで、FR-II/HERG を示す天体は同等の Photon Index を示す FR-I/LERG に比べより高い降着率を示し、また FR-I/LERG は他の分類に比べ低い降着率を示した。また FR-I/HERG 天体は FR-I/LERG と FR-II/HERG の中間の降着率を示した。

本研究のサンプルではNGC5128(Cen A) と 3C120 の 2 天体が FR-I/HERG に分類されている。D. Garofalo et al. 2010 では、FR 分類と HERG/LERG の分類は BH スピンの変化に伴い変化し、降着円盤とジェット 放射の関係を Blandford-Znajek(BZ) 機構と Blandford-Payne(BP) 効果で説明している。この論文によると FR-I/HERG は FR-II/HERG が効率的に降着する冷たいガスを排出することで、ADAF のような非効率的な 降着円盤 (FR-I/LERG) へと変化する過程に生じるものとして説明している。





図 4.12: 降着率と X 線の Photon Index の関係

図 4.13: 降着率とガンマ線の Photon Index の関係

また図 4.14 では、X 線とガンマ線の luminosity の関係を示している。FRII を示す天体は遠方にあり、明 るく輝く特徴を持ち、図 4.14 においても X 線ガンマ線共に高い値を示している。また FR-I/LERG 天体は これに対して、X 線ガンマ線共に低い値を示しており、また FR-I/HERG 天体については図 4.12, 4.13 同様 に FR-I/LERG と FR-II/HERG の中間の値を X 線ガンマ線共に示している。



図 4.14: X 線とガンマ線の光度の関係

## 4.4 X線放射起源の推定まとめ

ここで、X線放射について分類を行った結果を表 4.1 にまとめる。この表では、図 4.4 での slope と X線

| 天体名                  | slope vs flux ratio(G/X) | photon Index     | $L_X/L_{Edd}$ | FR 分類/HELE 分類 |
|----------------------|--------------------------|------------------|---------------|---------------|
| NGC 1218             | ジェット                     | ジェット             | 小             | FR-I / LERG   |
| 3C 264               | ジェット                     | ジェット             | 小             | FR-I / LERG   |
| B3 1009+427          | ジェット                     | ジェット             | 大             | FR-II / unk   |
| 3C 111               | 降着円盤                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | FR-II / HERG  |
| PKS 0518-45/Pictor A | 降着円盤                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | FR-II / HERG  |
| NGC 5128/Cen A       | 降着円盤                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | FR-I / HERG   |
| 3C 120               | 降着円盤                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | FR-I / HERG   |
| B3 0309+411B         | 降着円盤                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | FR-II / HERG  |
| PKS 2153-69          | 降着円盤                     | 降着円盤 and/or ジェット | 小             | FR-II / HERG  |
| PKS 2331-240         | 降着円盤                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | unk / HERG    |
| NGC 1316/Fornax A    | ジェット                     | 降着円盤 and/or ジェット | 小             | FR-I / LERG   |
| PKS 1514+00          | ジェット                     | 降着円盤 and/or ジェット | 小             | FR-I / LERG   |
| NGC 6251             | ジェット                     | 降着円盤 and/or ジェット | 小             | FR-I / LERG   |
| NGC 6328             | ジェット                     | 降着円盤 and/or ジェット | 小             | unk / unk     |
| 3C 380               | ジェット                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | FR-II / HERG  |
| 3C 309.1             | ジェット                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | FR-II / HERG  |
| PKS 0521-36          | ジェット                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | FR-II / HERG  |
| 4C +40.01            | ジェット                     | 降着円盤 and/or ジェット | 大             | unk / unk     |
| IC 310               | 降着円盤                     | ジェット             | 小             | FR-I / LERG   |

表 4.1: X 線放射起源のまとめ

ガンマ線の flux 比の関係性による分類 (以降、結果 1)、図 4.10 での X 線とガンマ線の Photon Index の関係 性による分類 (以降、結果 2)、図 4.12 での X 線光度と Eddington 光度の光度比の関係性による分類 (以降、 結果 3)、そして FR、HERG/LERG 分類をまとめてある。光度比の大小の判別には、10<sup>-2</sup> を境界としこの 値以上を示す天体を「大」、この値以下を示す天体を「小」とした (表 3.1 参照)。

表4.1 より、X 線放射について大きく「ジェット卓越型」、「降着円盤卓越型」、「ジェット・降着円盤混在 型」の3つのグループに分けて考える。まず、1つめのグループとして結果1,2の両方でX 線放射がジェッ ト放射と分類された天体のグループは、X 線にてジェット放射が卓越して観測されている「ジェット卓越型」 の天体だと考えられる。またこれらの天体は降着率が小さい値を示し、FR, HERG/LERG 分類が示す降着率 と同じ関係性があることがわかった。2つ目のグループは結果1にて降着円盤として分類され、結果2に て降着円盤またはジェット放射もしくはその両方として分類された天体のグループであり、これらの天体で は1天体を除き降着率が大きい値を示したことから、X 線では降着円盤/コロナからの放射が卓越して観測 されている「降着円盤卓越型」の天体だと考えられる。またこのグループでもFR, HERG/LERG 分類が示 す降着率と同じ関係性があることがわかった。そして3つの目のグループは結果1にてジェット放射として 分類され、結果2にて降着円盤またはジェット放射もしくはその両方として分類された天体のグループであ り、これらの天体では降着率の大きい天体と小さい天体が混在している。従って、このグループではX 線 放射がジェット放射と降着円盤放射の両方が観測されており、どちらの放射も卓越して観測されているわけ ではない「ジェット・降着円盤混在型」の天体と考えられる。

以上の結果から図 4.15 のような SED が観測されていると推測できる。図 4.15 では降着率の大小関係に よりジェットと降着円盤の光度が変化している。特に降着円盤については、降着率が低い場合は ADAF が 形成されていると考えられ、この場合降着円盤からの光度は降着物質の質量 (*M*)の時間微分 (*M*)の二乗に 比例して変化する。図 4.15 左では降着率が低い場合を示しており、従って ADAF が形成され降着円盤の光 度は大きく下がり、さらに X 線とガンマ線の Photon Index の関係性の結果よりビーミング効果によりジェッ トのスペクトルが高エネルギー側にシフトすることにより、結果的に X 線ではジェット放射が卓越して観測 されていると考えられる。図 4.15 右では降着率が高い場合を示しており、この場合標準降着円盤が形成さ れていると考えられる。図 4.15 右では降着率が高い場合を示しており、この場合標準降着円盤が形成さ れていると考えられ、結果として X 線では降着円盤が卓越して観測されていると考えられる。従ってこれ らはそれぞれ、ジェット卓越型と降着円盤卓越型を表している。またジェット・降着円盤混在型では、降着 率が高い天体と低い天体が混在しているが、降着率が高い天体では十分に降着円盤の光度がジェット以上に 上がっていない可能性が考えられ、また降着率が低い場合は降着率の光度がジェットと同程度である、もし くはジェットのビーミング効果によるシフト量が比較的小さいなどが考えられる。

41



図 4.15: 降着率と SED の関連性

#### 4.5 MCMC 法を用いたジェットパワーの推定

表 4.1 より、X 線放射がジェット卓越型と推定された NGC 1218 と 3C 264 の 2 天体とについて、ジェッ トパワーの推定を行った。また比較として、X線放射にて降着円盤卓越型と推定された Cen A と Pictor A の2天体についても同様にジェットパワーの推定を行った。ステップ数は105回とし、推定するパラメー タは表 3.2 より [B, D, K, LC] とした。[T, p0, p1, r1, r2] は本研究で用いたデータでは、制限ができなかっ たため固定した。電子のスペクトルの光子指数 p0, p1 は 2.4, 4.8 に固定し、ローレンツ因子の最大値 r1 と 最小値 r2 は 10<sup>2</sup>,10<sup>8</sup> に固定した。また広島大学の山田修論より、[B, D, T, K] のパラメータは強い相関を示 しモデル縮退を起こしてしまい、この内一つのパラメータを制限した場合に限り最適解を決定できる [44]。 このため、本研究では時間変動のパラメータTを10<sup>5</sup>秒に固定した。また赤方偏移zはX線の解析同様に SIMBAD から引用した [33]。ステップ数は 10<sup>5</sup> 回とし、局所解に収束している可能性を考慮し、最初の 10<sup>4</sup> ステップは burn-in として切り捨てた。多波長データは、NASA/IPAC[45] から電波から紫外までのデータを 取得し、これに本研究で解析した Swift/XRTのX線データと Fermiのガンマ線データを加え SED データと して使用した。MCMC 法でモデル推定するためのデータ点として全データを使用すると時間対効率が悪い ため、NASA/IPACから取得した多波長データからは十数点を選択し、Swift/XRTの3点とFermiの7点を 加え、計約20点をSEDデータとした。選択の際、可視光波長のデータは銀河からの放射成分が十分に引け ていない可能性があるため、10<sup>13</sup> Hz 付近のデータでは比較的低い vFv を示すデータを採用した。また作成 した SED データのうち、明らかに外れ値として表れる点はモデルの尤度が大きく悪化するため目視で確認 しデータから除いた。また X 線放射にて降着円盤卓越型として分類した Cen A と Pictor A については、X 線放射の半分の値は降着円盤からの放射が観測されているものとし、X線にて hard として観測される SSC 放射のピークの低エネルギー側の裾のデータ点の vFv の値を元の値の半分の値として用いた。また Pictor A については、低エネルギー側のシンクロトロンピークと高エネルギー側のピークが近すぎるため、低エネ ルギーピークと高エネルギーピークの両方を合わせることができなかった。このためLCのパラメータを固 定することで低エネルギー側のピークに合わせた場合と、高エネルギー側のピークに合わせた場合の2パ

#### ターンでパラメータ推定を行った。

ジェットパワー推定については、磁場のエネルギー $W'_{B}$ から推定されるジェットパワー $P_{B}$ と電子のエネル ギー $W'_{e}$ から推定されるジェットパワー $P_{e}$ の推定を行った。算出されたジェットパワーの値は以下の表 4.2 にまとめた。PictorA は低エネルギー側のシンクロトロンピークに合わせた場合を fit-low、高エネルギー側 の SSC ピークに合わせた場合を fit-high と定義し、以降この表記を用いる。固定値には数値の右上に\*をつ けた。またジェットパワー推定に必要とされるパラメータも以下に示し、 $\Gamma_{j}$ はバルクローレンツ因子を示 している。本研究では比較がしやすいよう  $\Gamma_{j} = 10$ に固定した。先に述べた通り、パラメータ B, D, K, T は 強く相関していることが確認されており、このため本解析では T を固定し、またパラメータ間の相関関係 を用いて T の値が 10<sup>5</sup> を示すように、B, D, K のパラメータの修正を行った。

| 物理量          | NGC 1218              | 3C 264                | Cen A               | Picto                 | or A                 |
|--------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
|              |                       |                       |                     | fit-high              | fit-low              |
| <i>B</i> [G] | 0.0492                | 0.00258               | $5.09 	imes 10^3$   | 0.0130                | 0.0129               |
| D            | 23.368                | 63.407                | 0.165               | 11.6                  | 25.0                 |
| $\Gamma_j$   | 10*                   | 10*                   | 10*                 | 10*                   | 10*                  |
| Κ            | $7.322\times 10^{42}$ | $1.052\times 10^{41}$ | $7.02\times10^{45}$ | $1.426\times 10^{47}$ | $2.29\times 10^{45}$ |
| <i>T</i> [s] | 10 <sup>5</sup> *     | 10 <sup>5</sup> *     | $10^{5*}$           | 10 <sup>5</sup> *     | $10^{5*}$            |
| p0           | 2.4*                  | 2.4*                  | 2.4*                | 2.4*                  | 2.4*                 |
| <i>p</i> 1   | $4.8^{*}$             | $4.8^{*}$             | $4.8^{*}$           | $4.8^{*}$             | $4.8^{*}$            |
| <i>r</i> 1   | $10^{2.0*}$           | $10^{2.0*}$           | $10^{2.0*}$         | $10^{2.0*}$           | $10^{2.0*}$          |
| <i>r</i> 2   | $10^{8.0*}$           | $10^{8.0*}$           | $10^{8.0*}$         | $10^{8.0*}$           | $10^{8.0*}$          |
| LC           | 38292                 | 260264                | 500*                | 5000*                 | $10^{4*}$            |
| z            | 0.03                  | 0.02160               | 0.001826            | 0.0340                | 0.0340               |
| $P_e[erg/s]$ | $1.44\times10^{43}$   | $7.85 \times 10^{42}$ | $3.40\times10^{43}$ | $2.12\times10^{46}$   | $1.58\times10^{44}$  |
| $P_B[erg/s]$ | $8.37 \times 10^{42}$ | $1.72 \times 10^{41}$ | $4.75\times10^{48}$ | $1.42\times10^{41}$   | $6.53\times10^{41}$  |

表 4.2: 算出されたジェットパワー

表 4.2 より分かる様に、X 線にてジェット卓越型と推定された天体は LC を固定せずにフィットを行い、 結果として LC の値が 10<sup>4,5</sup> のオーダーの値を示すことがわかった。また X 線にて降着円盤卓越型と推定さ れた天体では目視でピークの位置を合わせ、10<sup>2,3</sup> のオーダーの値を固定値として用い、ジェット卓越型と 推定された天体に比べ数桁小さい値を示すことがわかった。LC は broken-power-law の冪が変化する周波数 であり、このため 2 つのピーク位置の周波数の大きさとして考えることができる。従って、この結果は X 線でジェット卓越型の天体の SED が、図 4.11 で示したように、2 つのピーク位置が高エネルギー側にシフ トしていることを示している。磁場 B については、X 線放射起源とパラメータの関連性は見られず、NGC 1218 と PictorA は 10<sup>-2</sup> のオーダーの値が得られ、3C 264 ではこれより 1 桁小さい 10<sup>-3</sup> のオーダーの値が 得られた。ドップラー因子 D についても B 同様に、X 線放射起源とパラメータの間に有意な関連性は見ら れなかった。これに対して、電子スペクトル K については、降着円盤卓越型の天体は、ジェット卓越型の 天体に対して 3,4 桁高い値として推定された。

各天体のジェットパワーについては、まず全体の傾向として X 線の放射起源と電子と磁場のどちらのジェッ

トパワーについても、特に関連性は見られなかった。ジェット卓越型の天体については、NGC 1218 は fukazawa et al.2015 にて用いられている天体であり、この論文では  $P_e = 0.6 \times 10^{42}, 1.3 \times 10^{43}, P_B = 0.3 \times 10^{42}, 2.5 \times 10^{42}$  という結果を示し、本研究の  $P_e = 1.44 \times 10^{43}, P_B = 8.37 \times 10^{42}$  に比較的近い値を示した。3C 264 について は、NGC 1218 より磁場が 1 桁小さく、また電子スペクトルの normalization も 1 桁小さいことから、NGC 1218 での  $P_e, P_B$  の値よりひと桁小さい値を示した。

次に降着円盤卓越型と推定された2天体について、まずPictor A については、fit-low、fit-high ともに電 子スペクトルの normalization がジェット卓越型と推定された2天体より非常に大きな値を示した。このた め、Pictor A は4天体の中でも高い電子のジェットパワーを示した。Cen A については、非常に高い磁場を 示し、このため磁場のジェットパワーは4天体の中での最も高い値を示した。Cen A は fukazawa et al.2015 でもジェットパワーの推定が行われており、このときのジェットパワーは $P_e = 3.1 \times 10^{43}$ ,  $P_B = 6.5 \times 10^{43}$  で あり、本解析による磁場のジェットパワーの推定値は非常に大きく推定されていることが分かる。またこの ときの磁場の値は 6.2 G と fukazawa et al.2015 のサンプル天体の中でも高い値を示しているが、本解析によ る推定値はこの値より遥かに高い値となった。

従って、纏めると、まず LC の値から4章の図4.10の説明として簡易的な SED のピーク位置についての 図4.11 は正しいものであったと考えられる。また SED データへの SSC モデルのフィットは、X 線でシンク ロトロン放射が観測されていると考えられる、X 線でジェット卓越型と推定された天体では SED フィット がうまくいき、パラメータも尤もらしい値が得られた。これに対して X 線で降着円盤卓越型と推定された 天体では、フィット自体が簡単ではなく、フィットできたとしても得られるパラメータが適当でないと考え られる場合が多かった。

## 第5章 考察

#### 5.1 Hardness Ratio による時間変動の調査について

Connolly et al.[31] のサンプルであるセイファート銀河は、図 3.4 のような傾向を示す。この図では、harderwhen-brighter な傾向を示す天体と softer-when-brighter な傾向を示す天体があることを示す。これらの違い は降着率と関連しており、harder-when-brighter な傾向を示す天体は低い降着率を示し、softer-when-brighter な傾向を示す天体は高い降着率を示す天体であると報告されている。セイファート銀河では降着率が高い 場合は降着円盤が BH 近傍まで近づき、高温コロナからの放射が X 線では支配的である一方、低い降着率 では降着円盤は BH 近傍まで近づいておらず、BH 近傍では ADAF が形成され、放射率の低い X 線放射が 観測されていると考えられている。従って、この論文で softer-when-brighter の傾向は高温コロナからの放 射の特徴を表し、harder-when-brighter の傾向は ADAF の特徴を表すと考えられる。

しかし、本研究のサンプル天体である電波銀河のX線観測では、降着円盤以外にもジェットからの放射も 観測されていると考えられている。従って、電波銀河ではジェット放射を持つことにより高エネルギー側の Hard Count rate が大きくなり、X線で降着円盤からの放射が強く観測されているであろう天体も含め全ての 天体で harder-when-brighter な傾向が強くなると考えられ、実際全ての天体で harder-when-brihgter な傾向が 得られた。ジェット放射は可視光やガンマ線で harder-when-brighter の特徴を示すこと、そしてセイファー ト銀河の結果を考慮すると電波銀河の中で弱い harder-when-brighter の特徴を示す天体は、高温コロナから の放射の softer-when-brighter な傾向に多少のジェット放射の成分が加わった結果であると考えられる。

一方、強い harder-when-brighter を示す天体は、ジェット放射が支配的であるとも言えるが、ADAFの放 射である可能性も棄却できない。そこで X 線放射がジェット放射なのかを考えるため、Hardness ratio の傾 き (slope) と電波・可視光による電波銀河の分類を用いて X 線放射がジェット放射か ADAF からの放射かを 考える。X 線とガンマ線の flux 比と slope の関係を示した図 4.3、4.4 を見ると、図全体の傾向として右肩 上がりに天体が分布していることがわかる。また、このプロットでは FR-I/LERG に分類される 5 天体のう ち、4 天体が slope の値が 10 以上の高い値を示し flux 比が 0.5 以上の高い値を示す傾向にあることがわかっ た。また FR-II/HERG に分類される天体については、6 天体のうち 3 天体が slope の値が 10 以上の高い値を 示し flux 比が 0.5 以上の高い値を示す天体であり、もう 3 天体は slope が 10 以下の低い値を示し flux 比が 0.5 以下の低い値を示した。FR-I/HERG を示す 2 天体については slope が 10 以下の低い値を示し flux 比が 0.5 以下の低い値を示した。従って、flux 比が 0.5 以下の低い値を示す天体は 1 天体を除き FR-II/HERG と FR-I/LERG で構成されており、HERG 天体は slope が 10 以下の低い値を示し flux 比が 0.5 以下の低い値を 示す傾向にあることがわかる。また図 5.1 にて flux 比が 0.5 以上を示しているが、slope が 10 以下の低い値 を示す天体が 2 天体あり、そのうち FR-I/LERG を示す天体が PKS 1514+00 であり、FR-II/HERG を示す天 体が PKS 0521-36 である。

45



図 5.1: 図 4.4 に slope=10, flux 比=0.5 の直線を引いた図

ジェット放射は高エネルギー電子がジェット内に注入されるほど hard になる傾向があり、このため X 線 にてジェット放射が観測されている天体は高エネルギーなガンマ線の flux がより高い値で観測されると考 えられる。これに対して ADAF の場合、ガンマ線 flux の値はジェット放射が観測されている場合に比べ、 降着円盤が観測されている場合と同等に小さい値を示すと考えられる。これより、flux 比が 0.5 以上を示 しているが slope が 10 以下の低い値を示す 2 天体は、X 線にてジェット放射が観測されていると考えられ る。従って、flux 比が 0.5 以上を示す天体群は X 線にてジェット放射が卓越して観測されていると考えら れ、またflux比が0.5以下を示す天体群はX線にて降着円盤/コロナからの放射が卓越して観測されている 天体だと考えられる。一般的に FR-I/II と HERG/LERG の分類は降着円盤の降着率に関連を持っており、放 射的に効率的な降着円盤を持つ FR-II/HERG と非効率的な hot な降着流 (ADAF) を持つ FR-I/LERG のよう に分類されると解釈されてきた。しかしながら近年の研究によると、FR-II の電波構造を持ちながら、可視 光輝線では非効率な降着を示す LERG として分類される天体が無視できない数が存在することも報告され ている (Macconi et al. 2020[43])。この論文で用いているサンプル天体では、データの見つからなかった天体 と FR-I/HERG の組み合わせに分類された 2 天体を除くと残りの全ての天体は FR-I/LERG, FR-II/HERG の 組み合わせに分類され、FR-II/LERGの天体は含まれなかった。従って X 線放射について FR-II/HERG を示 す天体は降着円盤/コロナからの放射、FR-I/LERG を示す天体はジェットからの放射が来ていると考えられ る。また、この電波・可視光での分類と降着率が示す対応関係の傾向は図中に記した Fukazawa et al. 2015 で用いられた天体が示すと報告された X 線放射起源と同様の傾向であることがわかった。

slopeとflux比が共に大きい値を示したFR-II/HERGの天体 (PKS 0521-36, 3C 309.1, 3C 380) は、図 4.6, 4.7 のようにそれぞれのflux値を確認すると、PKS 0521-36 は X 線でのfluxが他のFR-II/HERG 天体に比べ 小さく出ていること、そして 3C 309.1, 3C 380 についてはガンマ線のfluxが他のFR-II/HERG 天体に比べ大 きな値を示していることがわかり、このためflux比が大きな値を示している。上記の考察に従うと、これ らのFR-II/HERG 天体はジェット放射が観測されている天体と推測される。しかし、FR-II/HERG 天体は降 着率が高い天体であることを考えると、降着円盤からの放射が観測されておりFR-II/HERG 天体は slope と flux比が小さな値を示すと考えられる。このような高い値をを示す理由としては、slope と flux比のプロッ トではジェット放射がある程度含まれている天体は、降着円盤からの放射の方が強く観測されていたとして もジェット放射の傾向が色濃く現れてしまうことが原因であると考えられる。また、その他にも X 線放射 が観測された期間と Fermi 衛星がガンマ線で検出した期間が異なること、また Swift/XRT で観測された天 体が暗い、観測数が少ないなどの観測と統計的な精度の不十分さが挙げられる。このため、詳細な放射起源の分類を行うには、X線とガンマ線のPhoton Indexの関係性の調査、降着率の関係性の2つを加え複合的に解釈する必要がある。

#### 5.2 X線とガンマ線の Photon Index の関係

図 4.10 より、X 線の放射起源について、X 線で Photon Index が 2.0 以上を示しガンマ線で Photon Index が 2.0 以下を示す天体群は X 線でジェット放射が観測され、X 線で Photon Index が 2.0 以下と低い値を示 しガンマ線で Photon Index が 2.2 以上と高い値を示す天体群は降着円盤/コロナからの放射が観測される傾 向にあると推定された。2つのグループは、それぞれ主な構成天体としてジェット放射を示すと考えられる FR-I/LERG、降着円盤からの放射が観測されていると考えられる FR-II/HERG 天体により構成されており、 天体群が示す Photon Index と X 線放射の関係性については、図 4.11 の簡易的な SED により説明すること ができることを示した。しかし、図 4.10 では降着円盤からの放射と考えられる天体群に FR-I/LERG を示 す NGC 6251, PKS 1514+00 の 2 天体が含まれていることがわかる。まず PKS 1514+00 については図 4.12, 4.13 より、他の FR-I/LERG 天体に比べ高い降着率を示すことがわかり、このため FR-I/HERG, FR-II/HERG に近い状態が考えられ、従って X線では降着円盤からの放射が観測されていると考えられる。次に NGC 6251 に関しては、先行研究である Fukazawa et al. 2015 では Fe-K 輝線による調査と [OIII] 輝線による調査か らX線でジェット放射が観測されていることを示したが、X線の変動とスペクトル指数(光子指数、Photon Index) についての調査では判断ができないという結果となっている。Fe-K 輝線は降着円盤から生じた紫外 放射をコロナが逆コンプトン散乱し、X線となった放射が降着円盤の物質を励起させることで生じる輝線と 考えられている。fukazawa+15 では、NGC 6251 は Fe-K 輝線が明確に現れないことを示している。また本 研究では図 4.4 に示したガンマ線と X 線の flux 比の関係に置いては、比較的高い slope, flux 比を示し、強い harder-when-brighter の傾向にあることからジェット放射だと推測される。また降着率についても、図 4.12、 4.13 のように他の FR-I/LERG 天体と同程度でおよそ 10<sup>-3</sup> と降着円盤からの放射だと考えるには低い光度 比を示している。以上の結果より、この天体では降着円盤が標準降着円盤から ADAF のような非効率な降 着を行う円盤に変化し、これに伴い X 線では ADAF からの放射が観測されていると考えられる。この考え は、これまでの傾向から強いジェット放射を示す天体は降着率が低い値を示すことがわかっており、この天 体では降着円盤の変化が比較的最近起こったことにより、ジェットのパワーが十分に大きくならず、ガンマ 線の Photon Index の値が小さい値を示しているのではないかと考察に基づいている。X 線の Photon Index がFR-II/HERGの標準降着円盤からの放射とジェットからの放射の中間の値を示すことについては、降着円 盤が標準降着円盤から ADAF へと比較的最近変化したことにより、降着円盤/コロナからの放射から ADAF からの非熱的放射に変化することにより X 線スペクトルが soft になったというシナリオが考えられる。

#### 5.3 X線放射起源の推定について

表 4.1 にてジェット卓越型、降着円盤卓越型、ジェット・降着円盤混在型の3つのグループに分けることができることを示した。しかし、実際これらのグループには結果と降着率の関係性が一致していない天体が存在する。まず、ジェット卓越型では B3 1009+427 が本研究で得られた2つの結果でX線にてジェット放射を強く観測している傾向を示しているのに対して、降着率が「大」として分類されている。また降着率と

電波・可視光観測による分類が一致していることから、降着率の値は正確なものだと考えられる。従って、 この天体はジェットの傾向を強く示すが、高い降着率を示すような blazar 天体であり、特に高い光度を示す FSRQ 型ではないかと考えられる。またこの天体は電波光度を用いた分類にて FR-II を示しており、FR – II 天体は AGN 統一モデルに基づくと FSRQ が視線方向上からずれて観測されている天体だと考えられてい るため、この可能性は高い。

次に、降着円盤卓越型を示す天体の中で光度比が 10<sup>-2</sup> 以下の傾向を示す PKS 2153-69 については、光度 比では「小」に分類されているが、降着円盤卓越型としての分類は正しいと考えられる。まず光度比の基準 として用いた 10<sup>-2</sup> という値は、[3] にて紹介された、大須賀健氏により初めて成功した、磁気流体 (MHD) シミュレーションを用いた降着円盤の再現 (Ohosuga et al. 2008) により得られた標準降着円盤の放射光度比 を参考にし、私の一存で決定した値である。しかし、このシミュレーションでは、降着円盤周辺に存在する コロナの生成に必要な熱伝導効果が取り入れられておらず、降着円盤とコロナを組み合わせた構造の再現は 行えていない。また標準降着円盤からの X 線放射は 1 章で説明したように、コロナによる反射により生成 される。従って、10<sup>-2</sup> という値は、分類の最適値ではない可能性が考えられる。また PKS 2153-69 は光度 比が 0.00407 と 10<sup>-2</sup> から大きく外れた値というわけではないことも考慮すると、降着円盤卓越型としての 分類は間違いではないと考えられる。

ジェット・降着円盤混在型の天体として分類した天体では、IC 310 のみが他の天体とは異なる研究結果に より分類されている。この天体では slope と X 線とガンマ線の flux 比の関係性にて降着円盤として分類さ れており、また X 線とガンマ線の Photon Index の関係ではジェット放射として分類されているため、ジェッ ト・降着円盤混在型として分類されている。しかし、IC 310 はガンマ線の中でも高エネルギー側である TeV 領域での観測も行われており、高エネルギーのジェットを持っていると一般的に考えられている電波銀河で あり、このようなことを考慮するとジェット卓越型に分類されることが適切であると考えられる。このため、 slope と X 線とガンマ線の flux 比の関係性の図にてジェット放射として分類されることが適当だと考えられ る。図 5.2 では、X 線とガンマ線の flux の関係を示している。IC310 とジェット卓越型として分類された天 体名を図中に記載した。これを見ると IC 310 はガンマ線の flux が比較的小さく、また X 線の flux が比較的 大きい値を示していることが分かる。今回ガンマ線データとして Fermi 衛星により作成された 4FGL カタ ログの値を用いているが、このときの値は全観測の平均値を用いている。また Fermi 衛星は 7 バンドでの データ取得が行われているため、カタログ値として用いている平均データではなく、高エネルギー側のバン ドを選択することで X 線とガンマ線の flux 比は大きくなる可能性がある。この天体については、現在調査 中である。



図 5.2: X 線とガンマ線の flux の関係性

## 第6章 まとめと今後

本研究ではガンマ線検出衛星 Fermi で観測された電波銀河を対象とし、Fermi のガンマ線データとともに Swift/XRT の X 線データを用いることで、X 線データとガンマ線データの様々なパラメータ間の関係性か ら電波銀河の X 線放射がジェット放射か降着円盤/コロナからの放射かを区分することを目的に研究を行っ た。結果として、電波銀河は2つ研究結果と各天体の示す降着率を組み合わせることで、3つのグループ、 「ジェット卓越型」、「降着円盤卓越型」、「ジェット・降着円盤混在型」に分類することができることがわ かった。

X線放射の分類に用いた2つの研究結果は、Hardness Ratio の傾き (slope)とX線/ガンマ線のflux比の関 係性(以降、結果1)と、X線とガンマ線のPhoton Indexの関係性(以降、結果2)である。まず結果1は、図 4.3, 4.4, 4.5 で示されるように slope と flux比が明らかに小さい値を示す天体が存在しており、この天体群を 一つのグループとし、その他の天体群をもう一つのグループとして分類を行った。これより、slope と flux 比が小さい値を示す天体群はX線 flux に対するガンマ線 flux が低く、harder-when-brighter な傾向が弱いこ とから、X線では降着円盤が観測されていると考えられる。これに対して slope が大きく flux の値が大きい 値を示す天体群はX線 flux に対するガンマ線 flux が高く、harder-when-brighter な傾向が強いため、X線で はジェット放射が観測されていると考えられる。これに対して slope が大きく flux の値が大きい flux い力・プに分かれていると考えられる。次に結果2では、図4.10に示すような結果となり、視覚的 に2つのグループに分かれている傾向が見られるため、この図でも2つのグループに分けて考えた。2つの グループはそれぞれ、Photon Index がX線で高い値を示し、ガンマ線で低い値を示すグループと、Photon Index がX線で低い値を示し、ガンマ線で高い値を示すグループの2つのグループである。この2つのグ ループは図4.11に示したような簡易的な SED を用いることで、Photon Index がX線で低く、ガンマ線で低 いグループはX線でジェット放射が観測されていると考え、また Photon Index がX線で低く、ガンマ線で 高い値を示したグループではX線で降着円盤もしくはジェット、または降着円盤とジェットの両方が観測さ れていると考えられる。

そしてこれらの結果に X 線光度と BH の質量から計算した Eddington 光度の光度比による降着率の関係 性を加えることで、3 つのグループ分けた。この際、光度比の境界は MHD シミュレーションに習い 10<sup>-2</sup> を境界として設定し、この境界に基づいた降着率の分類は PKS 2153-69 を除き電波・可視光観測による分 類と同様の結果を示すことが確認できた。「ジェット卓越型」では、2 つの研究結果にてジェット放射として 分類された天体であり、またこれらの天体は降着率が 10<sup>-2</sup> 以下の小さい値を示す天体であることがわかっ た。「降着円盤卓越型」では、結果 1 で X 線放射が降着円盤として分類され、結果 2 で X 線放射が降着円 盤またはジェットもしくはその両方として分類された天体が高い降着率を示すことから降着円盤卓越型とし て分類した。そして、結果 1 で X 線放射がジェットとして分類され、結果 2 で X 線放射が降着円盤または ジェットもしくはその両方として分類された天体はジェットと降着円盤の両方が観測されているジェット・ 降着円盤混在型として分類した。この 3 つの分類には、それぞれの分類中に例外が含まれており、ジェット 卓越型では B3 1009+427 が降着率が高い値を示すことがわかっており、この天体はブレーザー天体の FSRQ ではないかと考えられる。またジェット・降着円盤混在型では IC 310 が含まれており、この天体では先行 研究からジェットがガンマ線でも高エネルギーな TeV の領域で観測されていることから、結果1にて降着 円盤として分類されたことが問題だと考えられる。この天体については現在調査中である。ここで用いた 降着率の境界値10<sup>-2</sup>は、MHDシミュレーションの結果の値から独断で決定した値であり、適切に設定で きていない可能性が考えられる。降着円盤卓越型にて、PKS 2153-69 が低い降着率示したため降着円盤卓越 型の例外的な存在となっているが、この天体の光度比が0.00407と10<sup>-2</sup>から大きく外れた値でないことを 考えると、降着円盤卓越型としての分類は間違いではないと考えられる。

また結果2にて、FR-I/LERGに分類されていながら、Photon Index の値がX線で低く、ガンマ線で高い 値を示したNGC 6251 は、X線放射がジェットや標準降着円盤からの放射ではなく、ADAF からの放射の可 能性が考えられる。

MCMC 法による SSC モデルのパラメータ推定では、ジェット卓越型の天体にて、図 4.15 での降着率が 低い天体はピークが高エネルギー側にシフトするという説明の裏付けとなる結果が得られた。また、降着 円盤卓越型の天体では、ジェットのモデルである SSC モデルではうまくフィットが行えず、X 線領域に工夫 を凝らす必要があるのではないかと考えられる。従って、ここでは4天体についてのみの解析であったが、 表 4.1 による X 線放射の分類の信憑性が高くなったと考えられる。今後は降着円盤卓越型やジェット・降着 円盤混在型の天体に対する SED フィットの方法の確立とフィット精度の向上を目指す。

## 付録A Kバンドを用いたBH質量の計算

BH 質量の計算には、BH 周辺の星の速度分さんや母銀河の光度を用いる方法など、いくつかの方法が存在する。先行研究にて BH 質量が推定されている天体についてはその値を引用して用いたが、推定が行われていない天体については近赤外線の K バンドの絶対等級 *M<sub>K</sub>*を用いた方法を採用した。計算式は Graham et al. 2007 を参照した。

$$\log\left(\frac{M_{BH}}{M_{\odot}}\right) = -0.37(\pm 0.04)(M_{K} + 24) + 8.29(\pm 0.08)$$
(A.1)

M<sub>☉</sub>は太陽質量を表している。

## 付録B 各天体のプロット

結果や議論で用いた各天体のデータは、それぞれの観測データを Xspec で解析した結果を平均した値である。以下にはそれぞれの天体にて作成したライトカーブ、Photon Index と flux の関係の 2 つの図を載せる。

#### **B.1 3C 111**



図 B.1: 3C111 のライトカーブ



図 B.2: 3C111 の Photon Index と flux の関係

B.2 3C 120



図 B.3: 3C120 のライトカーブ



図 B.4: 3C120 の Photon Index と flux の関係

### B.3 3C 264





図 B.6: 3C264 の Photon Index と flux の関係

B.4 3C 309.1



図 B.7: 3C309.1 のライトカーブ



図 B.8: 3C309.1 の Photon Index と flux の関係





図 B.10: 3C380 の Photon Index と flux の関係

B.6 3C 380



図 B.11: 3C380 のライトカーブ



図 B.12: 3C380 の Photon Index と flux の関係



図 B.13: 4C40+01 のライトカーブ



図 B.14: 4C40+01 の Photon Index と flux の関係

#### B.8 B3 0309+411B



図 B.15: B30309+411B のライトカーブ



図 B.16: B30309+411B の Photon Index と flux の関係





図 B.18: B31009+427 の Photon Index と flux の関係

B.10 IC 310



図 B.19: IC310 のライトカーブ



図 B.20: IC310 の Photon Index と flux の関係

### B.11 NGC1218





図 B.22: NGC1218 の Photon Index と flux の関係

### B.12 NGC1316



図 B.23: NGC1316 のライトカーブ



図 B.24: NGC1316の Photon Index と flux の関係

### B.13 NGC5128



図 B.25: NGC5128 のライトカーブ



図 B.26: NGC5128 の Photon Index と flux の関係

## B.14 NGC6251



図 B.27: NG6251 のライトカーブ



図 B.28: NGC6251 の Photon Index と flux の関係

### B.15 NGC6328





図 B.30: NGC6251 の Photon Index と flux の関係

## B.16 PKS0521-36



図 B.31: PKS0521-36 のライトカーブ



図 B.32: PKS0521-36の Photon Index と flux の関係

### B.17 PKS1514+00



図 B.33: PKS1514+00 のライトカーブ



図 B.34: PKS1514+00の Photon Index と flux の関係

#### B.18 PKS2153-69



図 B.35: PKS2153-69 のライトカーブ



図 B.36: PKS2153-69の Photon Index と flux の関係

#### B.19 PKS2331-240





図 B.38: PKS2331-240の Photon Index と flux の関係





図 B.39: PictorA のライトカーブ



## B.21 Chandra による観測データの追加

今回、Swift/XRT で観測されていない天体のうち、数天体については Chandra による解析データを X 線 解析した天体もいくつかある。Chandra の電波銀河の観測データは、基本的に少なく、今回解析した天体は すべて1 データである。このため、時間変動についての調査を行う事はできない。また、これらの天体の 分類を調査するだけの時間はなかったため分類も行えていない。以下表 *B*.2 に、X 線の解析データと Fermi によるカタログ値をまとめる。

|                  |                |                        |                        | 表 B.]                   | l: サンプル天体                    |                   |                       |                    |                    |            |                |
|------------------|----------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|------------|----------------|
| 4FGL name        | Common name    | type                   | 12                     | $F_{\gamma}$            | $F_{\gamma} err$             | $\Gamma_{\gamma}$ | $\Gamma_{\gamma} err$ | $F_X$              | F <sub>X</sub> err | $\Gamma_X$ | $\Gamma_X err$ |
|                  |                |                        |                        | $[10^{-12} \text{erg}/$ | s] $[10^{-13} \text{erg/s}]$ |                   |                       | $[10^{-12} erg/s]$ | $[10^{-13} erg/s]$ |            |                |
| 4FGLJ0038.7-0204 | 3C17           | RDG                    | 0.220                  | 3.15                    | 6.12                         | 2.81              | 0.113                 | 2.24               | 0.924              | 1.31       | 0.0430         |
| 4FGLJ0521.2+1637 | 3C138          | CSS                    | 0.759                  | 4.04                    | 7.93                         | 2.37              | 0.134                 | 2.73               | 2.07               | 1.41       | 0.105          |
| 4FGLJ0708.9+4839 | NGC2329        | RDG                    | 0.0197                 | 1.27                    | 3.50                         | 1.95              | 0.182                 | 0.980              | 0.961              | 2.03       | 0.223          |
| 4FGLJ0758.7+3746 | NGC2484        | RDG                    | 0.0408                 | 1.44                    | 3.58                         | 2.01              | 0.163                 | 0.425              | 0.262              | 2.21       | 0.165          |
| 4FGLJ0840.8+1317 | 3C207          | SSRQ                   | 0.684                  | 3.89                    | 5.11                         | 2.48              | 0.099                 | 2.02               | 0.420              | 1.16       | 0.0195         |
| 4FGLJ0858.1+1405 | 3C212          | SSRQ                   | 1.05                   | 2.21                    | 4.81                         | 2.52              | 0.152                 | 1.94               | 0.500              | 1.49       | 0.0251         |
| 4FGLJ0910.0+4257 | 3C216          | CSS                    | 0.668                  | 3.62                    | 4.85                         | 2.52              | 0.107                 | 1.33               | 1.28               | 1.60       | 0.129          |
| 4FGLJ1331.0+3032 | 3C286          | CSS                    | 0.849                  | 2.23                    | 4.31                         | 2.41              | 0.141                 | 0.497              | 0.793              | 2.04       | 0.243          |
| 4FGLJ1443.1+5201 | 3C303          | RDG                    | 0.141                  | 1.48                    | 3.06                         | 1.98              | 0.148                 | 2.07               | 0.661              | 1.20       | 0.0296         |
| 4FGLJ1843.4-4835 | PKS1839-48     | RDG                    | 0.112                  | 1.56                    | 4.21                         | 1.99              | 0.173                 | 0.0995             | 0.158              | 1.54       | 0.187          |
| 4FGLJ2227.9-3031 | PKS225-308     | RDG                    | 0.0577                 | 1.47                    | 3.51                         | 1.99              | 0.173                 | 2.20               | 0.470              | 1.90       | 0.0483         |
| 4FGL name        | Common name    | $L_{\gamma}$           | $L_{j}$                | err                     |                              |                   |                       |                    |                    |            |                |
|                  |                | $[10^{45} \text{erg}]$ | [/s] [10 <sup>4/</sup> | terg/s] [1              | $0^{45} \mathrm{erg/s}]$     |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ0038.7-0204 | 3C 17          | 0.386                  | 0                      | 749                     | 0.274                        |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ0521.2+1637 | 3C 138         | 60.9                   | 1                      | 2.0                     | 4.11                         |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ0708.9+4839 | NGC 2329       | 0.011                  | 1 0.0                  | 0306 (                  | 000858                       |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ0758.7+3746 | NGC 2484       | 0.053                  | 3 0.0                  | )133 (                  | 0.00157                      |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ0840.8+1317 | 3C 207         | 5.01                   | 9                      | .58                     | 2.61                         |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ0858.1+1405 | 3C 212         | 8.31                   | 1                      | 8.0                     | 7.30                         |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ0910.0+4257 | 3C 216         | 5.66                   | 7                      | .59                     | 2.08                         |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ1331.0+3032 | 3C 286         | 7.50                   | 1                      | 4.5                     | 1.67                         |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ1443.1+5201 | 3C 303         | 0.070                  | 5 0.                   | 146                     | 0.0990                       |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ1843.4-4835 | PKS 1839-48    | 0.045                  | 7 0.                   | 123                     | 0.00291                      |                   |                       |                    |                    |            |                |
| 4FGLJ2227.9-3031 | PKS 2225-308   | 0.011                  | 5 0.(                  | )273                    | 0.0171                       |                   |                       |                    |                    |            |                |
|                  | 表 B.2: Chandra | による)                   | 自加解析                   |                         |                              |                   |                       |                    |                    |            |                |

これらのデータを、Swift/XRT による解析データに追加し図を作成する。また追加データの分類は、最も よく分類の分離傾向が現れている Swift/XRT でのサンプル天体を用いた X 線とガンマ線の光度の図を用い て簡易的な分類を行う。X 線ガンマ線の光度で共に10<sup>44</sup>[erg/s] 以上の値を示す天体を FR-II/HERG と想定し 一つのグループとし、10<sup>43</sup>[erg/s] 以上 10<sup>44</sup>[erg/s] 以下を示す天体を FR-I/HERG を想定して一つのグループ とし、そしてそれ以外の比較的低い値を示す天体を FR-I/LERG を想定して一つのグループとした。これら のグループは以下の図 *B*.41 のように分類し、それぞれシアン (FR-II/HERG を想定)、グリーン (FR-I/HERG を想定)、マゼンタ (FR-I/LERG を想定)の色を用いて分類した。



図 B.41: Chandra の観測データを適用した X 線とガンマ線の luminosity 関係

この分類を、X線とガンマ線の Photon Index の図に適用したのが以下の図 B.42 である。この図を見る と、シアンの天体は FR-II/HERG に近い位置に現れ、またマゼンタの天体は FR-I/LERG の天体に近い位置 に現れる傾向にあることがわかり、この分類が正しいと仮定すると、Swift/XRT と同様の結果が得られたこ とがわかる。またグリーンの天体は Swift/XRT の結果にて想定された中間領域に位置しており、またマゼ ンタとシアンの天体に右下と左上の天体軍から外れるものもあり、これらの天体が中間領域の天体と考え られる。さらにシアンの天体は上方向 (X線の Photon Index が上がる方向) への広がりを見せ、マゼンタの 天体とグリーンの天体は下方向 (X線の Photon Index が下がる方向) への広がりを見せた。Swift/XRT での 天体には FR-I/LERG に分類される天体の中に FR-II/LERG を示す天体群中に存在する天体も見受けられた が、マゼンタの天体の中にはこのような天体は見られなかった。



図 B.42: Chandra の観測データを適用した X 線とガンマ線の Photon Index 関係

# 付録C MCMC法によるプロット

#### C.1 NGC 1218

NASA/IPAC から取得した全 SED データと選択した SED データを以下の図 *C*.1 に示す。青が全 SED デー タ、黄色が選択した SED データである。またその SED データを用いて、MCMC 法により推定された SSC モデルを隣に示す (図 *C*.2)。





図 C.1: NGC1218 の全 SED データ (青色) と選択 SED データ (黄色)

図 C.2: SSC モデルでの推定された SED モデル

このデータを元に SSC モデルに対して MCMC 法を用いてパラメータ推定した結果のトレースプロット を以下に示す。



図 C.3: NGC1218 の MCMC 法によるトレースプロット

またヒストグラムは以下の図 C.4 ようになった。またヒストグラムによる推定値を表??にまとめる。



図 C.4: NGC1218 の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム

### C.2 3C 264

NASA/IPAC から取得した全 SED データと選択した SED データを以下の図 C.5 に示す。青が全 SED デー タ、黄色が選択した SED データである。またその SED データを用いて、MCMC 法により推定された SSC





図 C.5: 3C264 の全 SED データ (青色) と選択 SED データ (黄色)

図 C.6: SSC モデルでの推定された SED モデル

このデータを元に SSC モデルに対して MCMC 法を用いてパラメータ推定した結果のトレースプロット を以下に示す。



図 C.7: 3C264 の MCMC 法によるトレースプロット

またヒストグラムは以下の図 C.8 ようになった。


図 C.8: 3C264 の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム

## C.3 Pictor A

NASA/IPAC から取得した全 SED データと選択した SED データを以下の図 C.9 に示す。青が全 SED デー タ、黄色が選択した SED データである。またその SED データを用いて、MCMC 法により推定された低工 ネルギー側のピークに合わせたモデルと高エネルギー側のピークに合わせたモデルの2つの SSC モデルを 隣に示す (図 *C*.10, *C*.11)。



図 C.9: Pictor A の全 SED データ (青色) と選択 SED データ (黄色)



図 C.10: SSC モデルでの推定された低エネルギー側を 図 C.11: SSC モデルでの推定された高エネルギー側を 合わせた SED モデル 合わせた SED モデル

このデータを元に SSC モデルに対して MCMC 法を用いてパラメータ推定した結果のトレースプロット を以下に示す。



図 C.12: Pictor A の MCMC 法によるトレースプロット (低エネルギー側をフィット)



図 C.13: Pictor Aの MCMC 法によるトレースプロット (高エネルギー側をフィット)

また fit-low, fit-high のヒストグラムはそれぞれ以下の図 C.14, C.15 ようになった。



図 C.14: Pictor A の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム (高エネルギー側をフィット)



図 C.15: Pictor A の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム (低エネルギー側をフィット)

## C.4 Cen A

NASA/IPAC から取得した全 SED データと選択した SED データを以下の図 *C*.16 に示す。青が全 SED データ、黄色が選択した SED データである。またその SED データを用いて、MCMC 法により推定された SSC モデルを隣に示す (図 *C*.17)。





図 C.16: Cen A の全 SED データ (青色) と選択 SED データ (黄色)

図 C.17: SSC モデルでの推定された SED モデル

このデータを元に SSC モデルに対して MCMC 法を用いてパラメータ推定した結果のトレースプロット を以下に示す。



図 C.18: CenAの MCMC 法によるトレースプロット

またヒストグラムは以下の図 C.19 ようになった。



図 C.19: CenA の MCMC 法によるトレースプロットのヒストグラム

謝辞

まず、第一に深澤先生、私の研究についてご指導ご鞭撻のほどありがとうございました。質問のたびに 時間を作り丁寧に教えて頂き大変助かりました。また、検出器についての研究では、高橋先生、大野先生、 内田悠介先生にも大変お世話になりました。AGN につきましては、笹田先生には論文回を主催して頂き、 大変勉強になりました。ありがとうございました。また、小部屋の民の皆様にも大変お世話になりました。 プログラミングについて多くのことを教えてくださった今里さん、M1の頃に筋トレやランニング、就活の 相談など色々とお世話になった平出さん高木さんには大変感謝しております。あと、デスク周りが日々進化 していく濱田さん、人間性が日々喪失していく今澤さんは日頃から与太話に付き合ってくれてありがとう。 また B4 のみなさんも中々の個性派揃いで大変面白く研究生活が送れました。ありがとう。

## 参考文献

- [1] http://www.jaxa.jp/article/special/astro/mitsuda01\_j.html
- [2] Bradley M. Peterson 「ピーターソン活動銀河核」
- [3] 嶺重 慎「新天文学ライブラリー ブラックホール天文学」
- [4] 福江純「輝くブラックホール降着円盤 一降着円盤の観測と理論ー」
- [5] https://kipac.stanford.edu/highlights/gigantic-x-rays-flares-offer-new-insight-whirling-maelstrom-justoutside-supermassive
- [6] G.Fossati, L.Maraschi, A.Celotti, A.Comastri, and G.Ghisellini, 1998, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 299, Issue 2, September 1998, Pages 433 UTF2013448
- [7] S.Buttiglione, A.Capetti, A.Celotti, D.J.Axon, M.Chiaberge, F.D.Macchetto, and W.B.Sparks, 2010, A&A Volume 509, A6
- [8] R.A.Perley, A.G.Willis and J.S.Scott, 1979, Nature volume 281, pages437 UTF2013442(1979)
- [9] Bridle, A. H., Hough, D. H., Lonsdale, C. J., Burns, J. O., and Laing, R. A., 1994, The Astronomical Journal, vol. 108, no. 3, p. 766-820
- [10] Yasushi Fukazawa, Justic Finke, Lukasz Stawarz, Yasuyuki Tanaka, Ryosuke Itoh, and Shin'ya Tokuda, 2014, arXiv:1410.2733
- [11] B.L.Fanaroff and J.M.Riley, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 167, p. 31P-36P (1974)
- [12] https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/10yr\_catalog/
- [13] Angioni R, Astroparticle Physics, Volume 116, March 2020, 102393
- [14] N.Sahakyan, V.Baghmanyan and D.Zargaryan, A&A Volume 614, June 2018, A6, 11, Astrophysical processes
- [15] F.D'Ammando et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 450, Issue 4, 11 July 2015, Pages 39753990
- [16] G.Chiaro et al., arXiv:1808.05881 [astro-ph.HE]

- [17] L. Bassani et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 461, Issue 3, 21 September 2016, Pages 31653171
- [18] Jin Zhang et al., The Astrophysical Journal, Volume 899, Number 1
- [19] Christian Westhues et al., The Astronomical Journal, Volume 151, Number 5
- [20] Floyd W. Stecker et al., The Astrophysical Journal, Volume 879, Number 2
- [21] Shuang-Liang Li and Minfeng Gu, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 481, Issue 1, p.L45-L48
- [22] I. J. Danziger and W. M. Goss, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 202, Issue 3, March 1983, Pages 703715
- [23] F Ursini et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 481, Issue 3, December 2018, Pages 42504260
- [24] Baldwin J.A. et al., Astrophysical Journal, Vol. 243, p. 76-80, 1981
- [25] https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/about/
- [26] https://www.nasa.gov/content/goddard/fermi-spacecraft-and-instruments
- [27] The Fermi-LAT collaboration, ApJS 247, 33 (2020), DOI:10.3847/1538-4365/ab6bcb, arXiv:1902.10045
- [28] https://www.swift.ac.uk/about/instruments.php
- [29] David N. Burrows et al. 2005, DOI:10.1007/s11214-005-5097-2, arXiv:astro-ph/0508071
- [30] 久保 拓弥 「データ解析のための統計モデリング入門」
- [31] S.D.Connolly, I.M.McHardy, C.J.Skipper and D.Emmanoulopoulos, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 459, Issue 4, 11 July 2016, Pages 39633985
- [32] J.D.Finke, C.D.Dermer, and M.Böttcher, The Astrophysical Journal, Volume 686, Number 1, 2008
- [33] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/
- [34] Y.Y.Kovalev et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 495, Issue 4, pp.3576-3591
- [35] Xinwo Cao and Steve Rawlings, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 349, Issue 4, April 2004, Pages 14191427
- [36] Qingwen Wu, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 398, Issue 4, October 2009, Pages 19051914
- [37] Kayhan Gultekin et al., 2009 ApJ 698 198
- [38] H. Falcke, E. Krding and S. Markoff, A&A Volume 414, Number 3, February II 2004 895 903 Extragalactic astronomy

- [39] Marek Sikora, ukasz Stawarz, and Jean-Pierre Lasota, 2007 ApJ 658 815
- [40] Qingwen Wu, 2009 ApJ 701 L95
- [41] N. Nowak et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 391, Issue 4, December 2008, Pages 16291649
- [42] T. Sbarrato, G. Ghisellini, L. Maraschi, M. Colpi Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 421, Issue 2, April 2012, Pages 17641778
- [43] D.Macconi, E.Torresi, P.Grandi, B.Boccardi and C.Vignali, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 493, Issue 3, April 2020, Pages 43554366
- [44] http://www-heaf.astro.hiroshima-u.ac.jp/thesis/yurika2018.pdf
- [45] https://ned.ipac.caltech.edu/