

Swift 衛星の硬 X 線サーベイデータに基づく
ブレーザーの宇宙論的進化

広島大学理学部物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室
B122946

戸田 皓陽

指導教員 深澤泰司

主査 深澤泰司 副査 山本一博

2016 年 2 月

概要

ブレイザーとはジェットを有する活動銀河核のうち、ジェットが視線方向を向いている天体であり、観測的
分類から FSRQ と BL Lac の二種類のタイプが存在する。ブレイザーは中心に大質量ブラックホールを有
すると考えられているが、その形成進化は未だ謎である。ブレイザーの進化過程を解き明かす手がかりが、
logN-logS 分布や赤方偏移分布・光度分布である。logN-logS 分布とは、ある明るさ以上の天体数をその明
るさに対してプロットしたもので、logN-logS 分布からブレイザーの宇宙論的進化の傾向を調べ、さらに赤
方偏移分布・光度分布を用いることで、ブレイザーの形成時期をより詳細に調べることができる。本研究で
は Swift 衛星の 70 ヶ月間硬 X 線サーベイデータを使用し、FSRQ や BL Lac の LogN-LogS 分布および
赤方偏移分布・光度分布を構築し、その宇宙論的進化を探ることを目的とする。また、22 ヶ月間の Swift
衛星データを使用した過去の研究とも比較し、サンプル数が増加したことの影響も議論する。

目次

第 1 章 序論	6
1.1 宇宙背景放射	6
1.2 プレーザー	8
1.2.1 活動銀河核 (AGN)	8
1.2.2 活動銀河核の分類	9
1.2.3 セイファート銀河と電波銀河の定量的な区別	10
1.3 過去の研究結果	11
1.4 本研究の目的	14
第 2 章 観測衛星・カタログ	15
2.1 <i>Swift</i> 衛星	15
2.1.1 BAT 検出器	16
2.1.2 <i>Swift</i> -BAT 70months catalog	17
2.2 BZCAT カタログ	18
2.3 CRATES カタログ	19
第 3 章 解析方法・解析結果	21
3.1 天体選別	21
3.1.1 BZCAT カタログを用いての天体選別	21
3.1.2 CRATES カタログを用いての天体選別	22
3.2 光度の算出方法	27
3.2.1 光度距離—赤方偏移関係	28
3.3 宇宙論的進化	31
3.3.1 $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析	31
3.3.2 $\log N$ - $\log S$ 分布	33
3.4 sky-coverage 補正	34
3.5 エネルギー帯域の変更— $F_{14\text{keV}-195\text{keV}}$ から $F_{15\text{keV}-55\text{keV}}$ への変換	34
3.6 解析結果— $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析・ $\log N$ - $\log S$ 分布	35
3.7 ガンマ線での FSRQ と X 線での FSRQ は同じ種族のものか	39
3.7.1 光度関数	39
3.7.2 X 線光度関数からの $\log N$ - $\log S$	40
3.7.3 ガンマ線光度関数からの $\log N$ - $\log S$	41
3.7.4 ガンマ線帯域から X 線帯域への変換	43

第 4 章 考察	46
4.1 $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析と $\log N$ - $\log S$ 分布	46
4.1.1 低フラックスでの不定性	46
4.1.2 $\langle V/V_{max} \rangle$ の値と $\log N$ - $\log S$ の傾きについて	47
4.2 ガンマ線での FSRQ と X 線での FSRQ	48
4.3 赤方偏移分布と光度分布	49
4.4 将来衛星の検出ブレーザー数の予想	49
4.4.1 <i>NGHXT</i> 衛星での予想検出数	52
4.4.2 <i>eROSITA</i> 衛星での予想検出数	54
第 5 章 まとめと今後	56
付 録 A 解析で用いた全 68 天体のカタログ値	57

目次

1.1	宇宙背景放射の SED。横軸は電波領域からガンマ線領域までの光子のエネルギーを示す [37]	6
1.2	宇宙 MeV ガンマ線背景放射のスペクトル。従来の AGN のモデル (黒線) では数百 keV でカットオフがかかり、MeV 領域の背景放射を説明できないが、AGN の非熱的電子放射を加えたモデル (赤線) とレーザーからの寄与を考えたモデル (青線) では MeV 領域の背景放射を説明できる。[38]	7
1.3	AGN の模式図 [39]。高温コロナは図中の熱いガス部分に対応する。	8
1.4	電波銀河の予想図 [40]	10
1.5	レーザーシークエンス [41] 図中の 5 つのスペクトルのうち、BL Lac は下側に近く、FSRQ は上側に近いスペクトルになる	11
1.6	$R_{r,X}$ によるヒストグラム [7]。黄色がセイファート銀河、青が電波銀河を表しており、 $R_{r,X} = 10^{-4}$ を境に両者が分布していることが分かる。	12
1.7	X 線とガンマ線での FSRQ の分布の違い。水色線がガンマ線、黄線が X 線での解析結果を示しており、ガンマ線では FSRQ のピークは $z=1\sim 2$ だが、X 線では $z=4$ のあたりに FSRQ のピークがある [42]	13
2.1	Swift 衛星全体図 [44]	15
2.2	BAT 検出器のイメージ図。検出器上部に設置してあるモザイク状の部分が coded mask である。[45]	15
2.3	Swift 衛星の coded mask の開発風景 [45]。作業員の女性が手にしているのが、開発中の coded mask である。	16
2.4	BZCAT カタログに載っている天体の全天マップ。赤点が BL Lac を、青点が FSRQ を、緑点がタイプ不定型のレーザーを、黄色点が BZG を表している。[24]	19
2.5	CRATES カタログにおける形態的分類のサンプルイメージ [25]。左から順に P,S,L,D,C の形態を示している	19
3.1	BZCAT カタログを用いて抜き出した FSRQ・BL Lac の各赤方偏移ごとの天体数。	23
3.2	天体選別のチャート図	24
3.3	赤方偏移ごとの天体数のヒストグラム。赤線が CRATES 天体、青線が BZCAT 天体を示す。	25
3.4	光子指数ごとの天体数のヒストグラム。赤線が CRATES 天体、青線が BZCAT 天体を示す。図中の点線はガウシアンでフィッティングした結果である	25
3.5	光度ごとの天体数のヒストグラム。赤線が CRATES 天体、青線が BZCAT 天体を示す。	25

3.6	図 1.5 の黒線と青線を抜き出した図。ここで図中の赤い帯状の部分は X 線帯域の部分を示し、この部分では FSRQ の SED は右上がりになっているが、BL Lac の SED では右下がりになっているのが分かる。(図中の赤線の部分)	26
3.7	BZCAT カタログを用いて抜き出した FSRQ と BL Lac の光子指数ごとの天体数ヒストグラム。曲線は式 3.2 のガウシアンでフィッティングした結果	26
3.8	BAT の 15-55keV での sky-coverage。横軸がフラックス、左縦軸がそのフラックスでの観測範囲 (deg^2) を表し、黒線が 22ヶ月間観測の sky-coverage[12] で赤線が今回導出した 70ヶ月間観測の sky-coverage を表す。右縦軸は左縦軸の平方度が全天のうちの何%に対応するかを示している。	35
3.9	observed $\log N$ - $\log S$ (黒線) と、corrected $\log N$ - $\log S$ (赤線)	36
3.10	70ヶ月間観測の corrected $\log N$ - $\log S$ (黒線) と、22ヶ月間観測の corrected $\log N$ - $\log S$ [12](赤線)	37
3.11	70ヶ月間観測の corrected $\log N$ - $\log S$ (黒線) と、22ヶ月間観測の corrected $\log N$ - $\log S$ [12](赤線)	38
3.12	先行研究の XLF モデル [12] から計算した FSRQ の $\log N$ - $\log S$ (青線)。黒線は比較のために描写した 22ヶ月間観測による FSRQ の $\log N$ - $\log S$ である。	41
3.13	GLF から計算した 0.1GeV~300GeV 帯域での FSRQ の $\log N$ - $\log S$ 。	43
3.14	FSRQ の平均 SED[11]	44
3.15	GLF モデルから算出した X 線帯域での $\log N$ - $\log S$ (赤線)。また青線は図 3.12 の XLF モデルからの $\log N$ - $\log S$ で、黒線は今回の 70ヶ月間観測からの FSRQ の $\log N$ - $\log S$ である。	45
4.1	低フラックス側で sky-coverage の誤差が大きくなること概念図。フラックスの高いところでの誤差 δS に対する sky-coverage の誤差は $\delta \Omega_0$ になるが、フラックスが低いところでは誤差が大きくなり $\delta \Omega_0$ になっている。	46
4.2	フラックスの誤差を考慮したときの 22month $\log N$ - $\log S$ 。赤線が 22ヶ月観測からの $\log N$ - $\log S$ で、ピンクの領域がフラックスの誤差を考慮したときの $\log N$ - $\log S$ の誤差の部分	48
4.3	赤線が 22ヶ月間観測のデータを、黒線が今回の 70ヶ月間のデータを用いたときの赤方偏移分布図	50
4.4	赤線が 22ヶ月間観測のデータを、黒線が今回の 70ヶ月間のデータを用いたときの光度分布図	50
4.5	ガンマ線での先行研究 [11] の、FSRQ の各種分布図。左下のグラフから時計回りにガンマ線での光子指数分布図・赤方偏移分布図・光度分布図・ $\log N$ - $\log S$ 分布を示している。	51
4.6	NGHXT 衛星の検出感度と露光時間の関係 [50]。緑・赤・黒線はそれぞれ角度分解能が 20 秒角・15 秒角・10 秒角の場合を示している。	53
4.7	FSRQ を 100 個検出するのに必要な領域	54
4.8	FSRQ を 100 個検出するのに必要な露光時間	54
4.9	eROSITA 衛星の全体図 [46]	54

表 目 次

1.1	AGN の各波長における放射の物理過程 [13]	9
1.2	FSRQ と BL Lac の違い	10
2.1	BAT の性能 [43]	16
3.1	$\langle V/V_{max} \rangle$ 解析の結果と $\log N$ - $\log S$ の傾き。比較のために先行研究の結果 [12] も記載している	38
3.2	XLF から $\log N$ - $\log S$ の算出に使用した各種パラメーター	41
3.3	GLF から $\log N$ - $\log S$ の算出に使用した各種パラメーター [11]	42
4.1	NGHXT 衛星の検出目標と性能 [48][49]	53
4.2	eROSITA 衛星の検出目標と性能 [47]	54
4.3	eROSITA 衛星と NGHXT 衛星の予想 FSRQ 検出数	55
A.1	ブレーザーサンプル	57

第1章 序論

1.1 宇宙背景放射

宇宙には全天でほぼ一様に観測される電磁波が存在する。このような電磁波は宇宙背景放射と呼ばれ、その波長はマイクロ波からガンマ線まで様々である。図 1.1 に電波からガンマ線までの背景放射のスペクトルエネルギー分布 (SED; Spectral Energy Distributions) の図を示す。

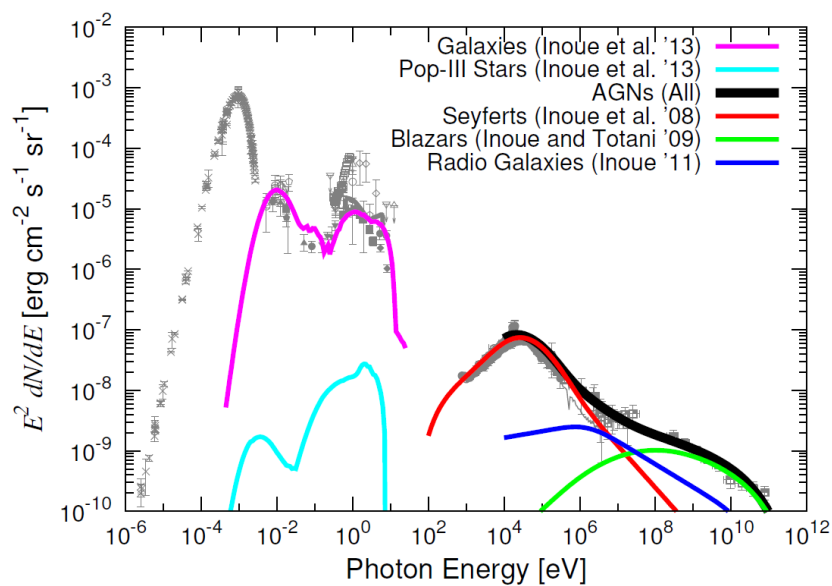


図 1.1: 宇宙背景放射の SED。横軸は電波領域からガンマ線領域までの光子のエネルギーを示す [37]

宇宙背景放射はその波長ごとに起源が異なるが、個々の天体からの放射か、そうではないのかに二分される。宇宙背景放射のうちマイクロ波で観測されるものは、その起源が個々の天体ではないものの一つである。このマイクロ波の背景放射は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB; Cosmic Microwave Background) と呼ばれ、宇宙の始まりであるビッグバンの名残であると考えられている。

それに対し、可視光域で観測される背景放射 (COB; Cosmic Opticalwave Background) や X 線で観測される背景放射 (CXB; Cosmic X-ray Background) などの起源は個々の天体によるものだと考えられている。例えば COB は、その明るさが観測されている全ての系外銀河の可視光を足しあわせた値とほぼ等しいと考えられており [1]、CXB もその起源が活動銀河核 (AGN; Active Galactic Nucleus) からであることが解析的に求められている [2]。現在のところ、マイクロ波以外の波長域では個々の天体からの放射の重ね合わせで宇宙背景放射がほぼ説明できると考えられている。そのためこれら宇宙背景放射の起源を理解すること

は、各波長域における宇宙の支配的種族天体の進化の歴史を紐解くことに対応する。

しかし、宇宙背景放射の起源は全波長域で解明されているわけではない。起源の分かっていない背景放射の一つが宇宙 MeV ガンマ線背景放射である。数 keV~ 数十 keV 範囲の CXB の起源は AGN により説明できるが、現在の AGN のモデルでは数百 keV あたりで指関数的なカットオフがかかってしまうため、MeV 領域の背景放射を説明することができない。また観測精度の問題もあり、MeV 領域の背景放射の起源を直接観測するのも難しく、長い間天文学の謎とされてきた。

現在、宇宙 MeV ガンマ線背景放射の起源の候補として様々なものが考えられている。まず一つが、Ia 型超新星爆発である。Ia 型超新星爆発では爆発中に鉄などの重元素が崩壊するとガンマ線を放射する。このガンマ線が MeV ガンマ線背景放射へ寄与している [3] という考えがある。しかし、Ia 型超新星爆発の爆発頻度を考えると観測されている MeV ガンマ線背景放射より 1 桁程小さい値となってしまう、十分ではない [4]。次に MeV 程度の質量を持つダークマター同士の対消滅によるガンマ線が寄与しているという考えもある [5] が、MeV 質量のダークマターが実際に存在するのかどうかは、未だ分かっていない。現在のところ、MeV ガンマ線背景放射へ寄与として有力と考えられているが、

- (1) AGN コロナからの非熱的電子 [6]
- (2) ブレーザー天体 [12]

の 2 つである。図 1.2 に宇宙 MeV ガンマ線背景放射のスペクトルと (1),(2) のモデルで予想される宇宙 MeV ガンマ線背景放射のスペクトルを示す。

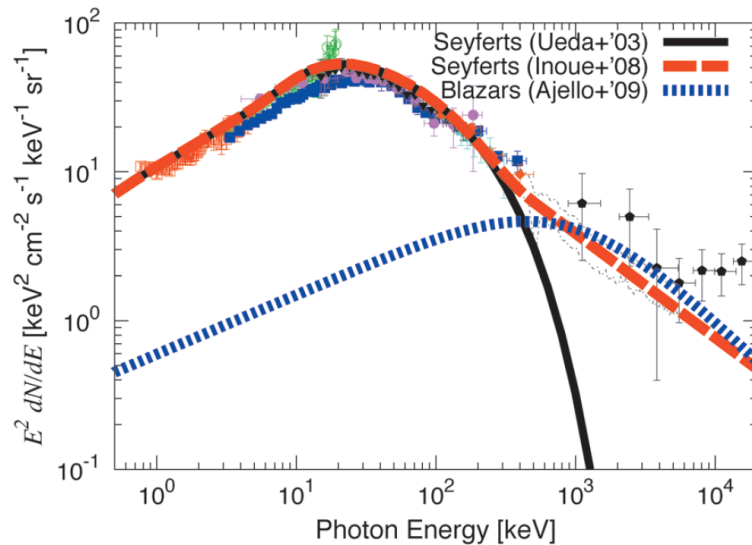


図 1.2: 宇宙 MeV ガンマ線背景放射のスペクトル。従来の AGN のモデル (黒線) では数百 keV でカットオフがかかり、MeV 領域の背景放射を説明できないが、AGN の非熱的電子放射を加えたモデル (赤線) とブレーザーからの寄与を考えたモデル (青線) では MeV 領域の背景放射を説明できる。[38]

AGN はその中心部付近に高温コロナと呼ばれる領域が存在し、この内部は数百 keV 程度の温度を持つ熱的電子に満たされていると考えられている。この熱的電子が数百 keV でのカットオフを引き起こしてい

るのだが、高温コロナ領域に熱的電子のほか非熱的電子も含まれていると仮定すると、熱的電子による数百 keV のカットオフを消滅させることができる。このモデルが (1) である。また、もしこのような非熱的電子が存在しているとする、AGN の高温コロナ内で太陽コロナと同じような磁気リコネクションが発生しているとも考えられている [6]。

(2) は MeV 領域にエネルギーピークを持つブレーザー天体が背景放射に寄与していると考えたものである。このブレーザーとは AGN の一種で、特に X 線・ガンマ線で明るく輝いている天体である。ブレーザーについては次にて詳しく述べる。

1.2 ブレーザー

上述した通り、ブレーザーは AGN の一種である。ここではまず AGN について記述する。

1.2.1 活動銀河核 (AGN)

活動銀河核 (AGN) とは星に由来しない活動的な現象が起こっている銀河の中心領域の事であり、太陽系程度の大きさの領域から銀河全体を上回る光度で輝いている。現在考えられているモデルでは、AGN は図 1.3 のような構成をしている。すなわち、中心部に太陽の 100 万から 10 億倍程度という超大質量ブラックホールが存在し、その周りに降着円盤、高温コロナ、光学的に厚いプラズマトースが存在するものである。またその他にも、中心部からジェットが吹き出ているものもある、このジェットの速度は光速の 99% にも達し、大きいものでは 100 万光年もの距離にわたって宇宙空間に伸びている。

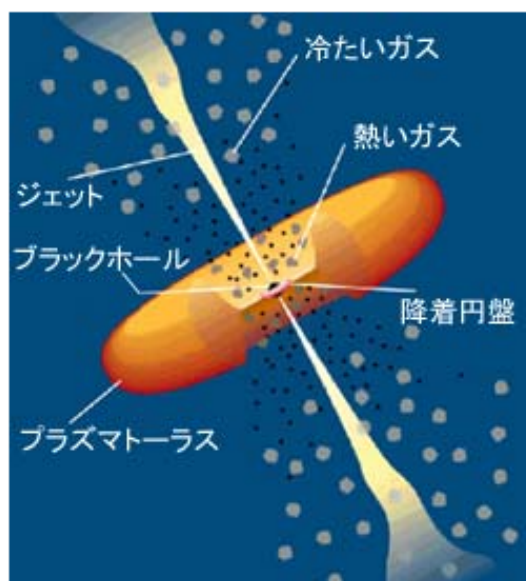


図 1.3: AGN の模式図 [39]。高温コロナは図中の熱いガス部分に対応する。

AGN の特徴の一つとして、電波・可視光・紫外線・X 線などあらゆる波長帯での放射がある。各波長における AGN の放射の主な物理過程をまとめると表 1.1 のようになる。

電波	ジェットと星間ガスの衝突により発生した高エネルギー電子によるシンクロトロン放射	
遠赤外線	AGN からの放射をトーラスが吸収し、再放射したもの	
近赤外線・可視光	AGN からの放射によって電離された周辺ガスからの輝線	
紫外線	降着円盤からの黒体放射	
X 線	【電波の弱い AGN の場合】 降着円盤からの放射 (紫外線) が高温コロナによって逆コンプトン散乱されたもの	【電波の強い AGN の場合】 高エネルギー電子の制動放射、磁場との相互作用によるシンクロトロン放射
ガンマ線	ジェットによって加速・加熱された相対論的電子が他の電子や磁場などによりシンクロトロン放射、逆コンプトン散乱されたもの	

表 1.1: AGN の各波長における放射の物理過程 [13]

1.2.2 活動銀河核の分類

AGN は様々な観測結果によっていくつかの種族に分類されている。ブレイザーもこの種族のうちの一つである。おおまかには以下のような判断基準によって分類される。[14]。

1. 電波の強弱 (強弱の定量的な境界線については後述する)
2. 中心核から放射されるエネルギーの強度 (光度)
3. 輝線の有無

まず、AGN の中でも電波域が暗いものはセイファート銀河と呼ばれる。セイファート銀河は可視光域に幅広い輝線が有る場合とない場合によってセイファート I 型とセイファート II 型に分けることができ、前者が I 型、後者が II 型である。観測的には輝線の幅の大小によって二つに分類できる。

それに対して電波で明るい AGN は電波銀河と呼ばれ、セイファートに比べて 100~1000 倍程強い電波を放射している [13]。また電波銀河で特徴的なのは、図 1.4 のように銀河自体の大きさをはるかに超える電波ジェットという構造を持つことである。このジェットが地球の方向を向いているものがブレイザーに分類されている。

ジェットは光速に近い速度で電波銀河中心から放出しているため、このジェットを真正面から見ると相対論的ビーミング効果によって光度が強まる。そのためブレイザーは他の電波銀河に比べて、電波のみならず X 線やガンマ線でも非常に明るく観測される。

また、ブレイザーは可視域での輝線の強弱によって更に Flat-Spectrum Radio Quasars(FSRQ) と BL Lac の 2 種類に分けることができる [8]。表 1.2 に両者の違いを記述する。またこの表 1.2 にある事柄以外にも、FSRQ は BL Lac に比べて電波域でのスペクトルが平坦であるという違いもある。



図 1.4: 電波銀河の予想図 [40]

	FSRQ	BL Lac
輝線	可視光域の全ての輝線の等価幅が 5\AA 以下	可視光域のいくつかの輝線で等価幅が 5\AA 以上
光度	明るいブレーザー	暗いブレーザー
距離	遠方	近傍

表 1.2: FSRQ と BL Lac の違い

現在までのブレーザーの多波長観測により、ブレーザーのスペクトルはジェットで加速された電子によるシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱の2種類により構成されていることが知られている [9]。また、ブレーザーの光度が下がると、各スペクトル成分のエネルギーピークが高いエネルギー側にシフトすることが知られている [10]。これはブレーザーシークエンスと呼ばれている。図 1.5 にブレーザーのスペクトルを示している。図中には5つのスペクトルが描写されているが、このうち下側のスペクトルが BL Lac を、上側のスペクトルが FSRQ を示している。図中のスペクトルは二つのエネルギーピークを持っており、光度が明るくなればなるほど、つまり BL Lac から FSRQ に移行すればするほど、エネルギーピークが左に移動しているのが分かる。

1.2.3 セイファート銀河と電波銀河の定量的な区別

活動銀河核が電波域の強弱によりセイファート銀河と電波銀河に分類されることは上述したとおりだが、その定量的な境界線は定義されていない。過去の研究 [7] では以下のように電波域 (1.4GHz) と硬 X 線帯域 (14-195keV) のエネルギーフラックス密度との強度比 R_{rX} を求めることにより両者を定量的に分類する方法が提案されている。以下の式において ν は周波数を、 F_ν は単位周波数あたりのエネルギーフラックスを表している。

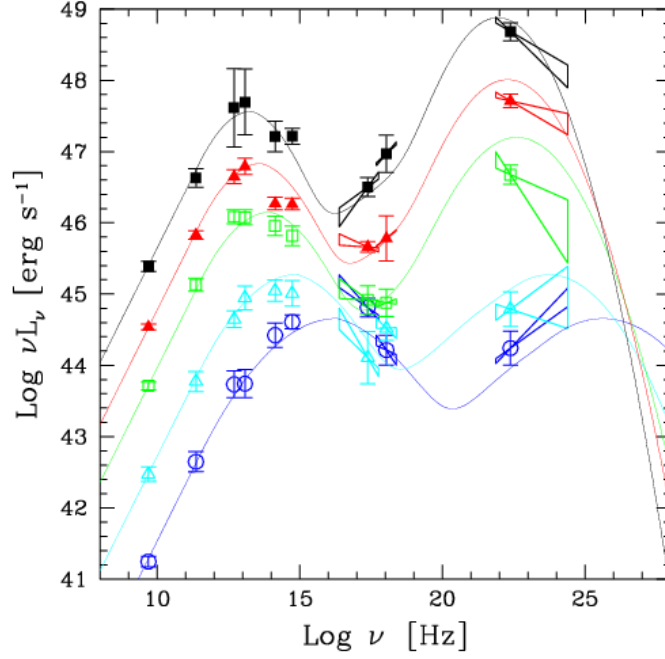


図 1.5: ブレーザーシーケンス [41] 図中の5つのスペクトルのうち、BL Lac は下側に近く、FSRQ は上側に近いスペクトルになる

$$R_{rX} = \frac{[\nu F_\nu]_{1.4\text{GHz}}}{F_{14-195\text{keV}}} \quad (1.1)$$

この過去の研究では、120個のセイファート銀河と *Swift* 衛星の BAT 検出器で検出された電波銀河 (もしくはブレーザー) の R_{rX} を算出し、その数のヒストグラムを比較した結果、 $R_{rX} < 10^{-4}$ では主にセイファート銀河が、 $R_{rX} > 10^{-4}$ では電波銀河が支配していることが分かった。図 1.6 にそのヒストグラムを示す。これより $R_{rX} = 10^{-4}$ を境界線とすることにより活動銀河核をセイファート銀河と電波銀河に分類することができる。

上記の方法以外にも電波と可視光 (B バンド) の強度比から分類する方法もあるが [29]、上記の方法では *Swift*-BAT のエネルギーフラックスをそのまま使用して強度比を算出できるので、*Swift*-BAT のデータを用いる本研究では有用である。

1.3 過去の研究結果

ブレーザーの観測は現在も盛んに行われているが、未だ謎が多い。その一つがブレーザーの進化過程である。ブレーザーの中心部分には大質量ブラックホールが存在し、そこからジェットが噴出しているので、ブレーザーの進化過程を解明することにより、ブラックホールが進化と共にどのようにしてジェットを出すようになるかが理解できると考えられている。

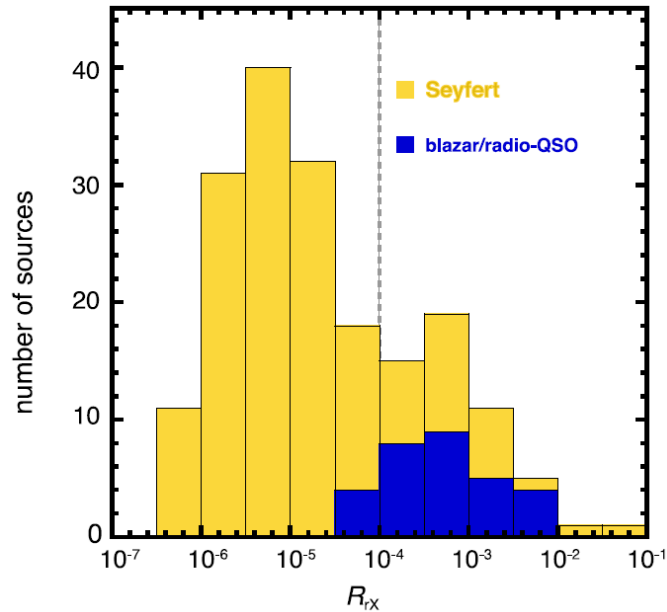


図 1.6: R_{rX} によるヒストグラム [7]。黄色がセイファート銀河、青が電波銀河を表しており、 $R_{rX} = 10^{-4}$ を境に両者が分布していることが分かる。

ブレーザーの進化過程を解明する一つの手がかりとして、ブレーザーの赤方偏移分布を理解することが重要である。赤方偏移分布を理解するとブレーザーが遠方または近傍のどちらに多く分布しているかが分かる。宇宙空間において地球より遠い場所から来る光は、現在よりも昔に放射された光なので、例えばブレーザーが遠方に多く分布しているならば、ブレーザーは宇宙初期に多く生成されたこと言うことができ、ブレーザーの進化のタイムスケールが議論できる。そのためブレーザーの赤方偏移分布から宇宙論的進化を議論することができる。

赤方偏移分布を調べるには光度関数を求める必要がある。光度関数とは単位光度、単位赤方偏移あたりに含まれる天体数を表したものであり、光度と赤方偏移の 2 変数で表される。そのため光度関数を光度で積分すれば赤方偏移 z を変数とする天体数の関数を導くことができ、これをプロットすることで天体数の赤方偏移分布図を作成できる。この光度関数を導出するためには、まず LogN-LogS プロットを作成する必要がある。LogN-LogS プロットとはあるフラックス以上の天体の個数をそのフラックスに対して描写したものである。詳しくは第 3 章にて記述する。

ブレーザーの宇宙論的進化については X 線とガンマ線による解析結果がそれぞれ 2009 年と 2012 年に出されている。図 1.7 はその解析結果である FSRQ の赤方偏移分布図を示しており、黄線が X 線による観測結果からの FSRQ の赤方偏移分布 [12]、水色線がガンマ線による FSRQ の赤方偏移分布 [11] の曲線を表しており、縦軸は光度関数を光度で積分して算出した赤方偏移毎の天体数密度を表している。

しかし両線を見ると一致はしておらず、X 線では $z=4$ あたりに FSRQ が多いのに対し、ガンマ線では $z=1\sim 2$ の位置に FSRQ のピークがある。ガンマ線と X 線でそれぞれ見ている天体は同じだと仮定すると、これはおかしな結果である。しかしこの先行研究のうち X 線での解析結果には、サンプル数の少なさによる不定性の問題を抱えている。ガンマ線での解析では *Fermi* 衛星で受かっている FSRQ 天体 183 個をサン

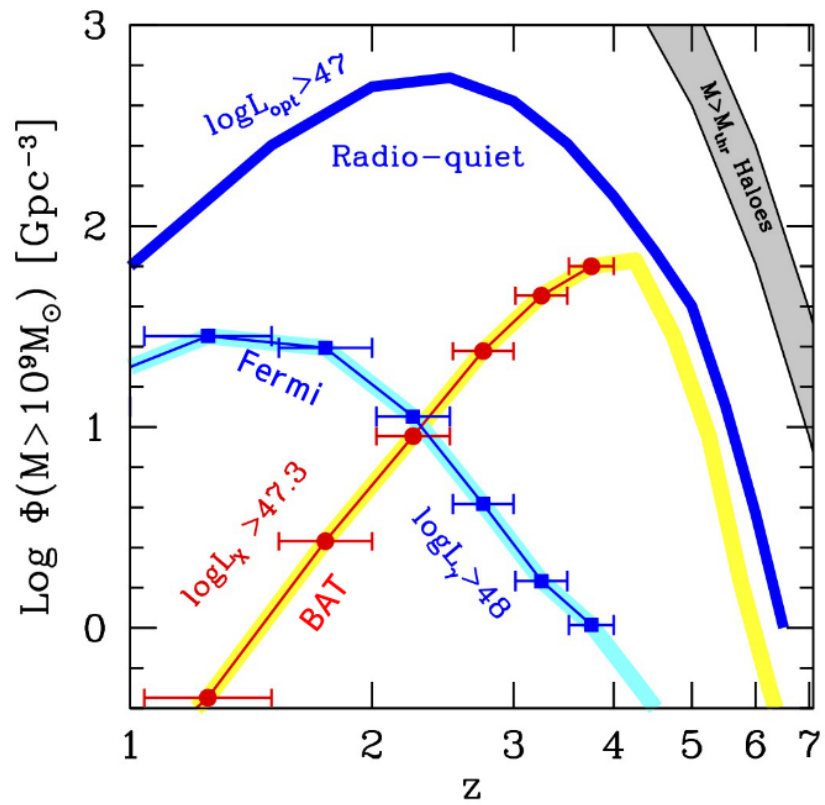


図 1.7: X 線とガンマ線での FSRQ の分布の違い。水色線がガンマ線、黄線が X 線での解析結果を示しており、ガンマ線では FSRQ のピークは $z=1\sim 2$ だが、X 線では $z=4$ のあたりに FSRQ のピークがある [42]

プルとして解析をしているが、X線の解析で用いた天体数は *Swift* 衛星で受かった FSRQ 天体 26 個と、ガンマ線で解析した天体数の 1/7 程度しかブレーザーサンプルとして使用していない。この天体数の少なから不定性が大きく、ガンマ線の結果と X 線の結果が大きく異なる一つの原因ではないかと考えられる。よってサンプル数を増やして解析することが重要となってくる。

しかし、もともとガンマ線で見ているブレーザーの種族と X 線で見ているブレーザーの種族が異なっている可能性もある。そのためガンマ線での FSRQ と X 線での FSRQ が同じ種族のものなのかどうかも議論する必要がある。

1.4 本研究の目的

上記のとおり、2009 年の段階では *Swift* 衛星が運用を開始してから 5 年程度しか経過しておらず、先行研究は衛星の露光時間が合計 22ヶ月間のデータを使っていたので、見つかったブレーザーの天体数が少なく、解析結果に不定性を残してしまった可能性がある。しかし、最新のデータでは露光時間が 3 倍に増加した 70ヶ月間のデータが存在し、当時よりも多くのブレーザーが見つかっているため、サンプル数の少なさによる不定性は小さくなると予想される。よって本研究では、FSRQ と BL Lac の 2 種類について *Swift* 衛星によって得られた最新のデータの解析をして、LogN-LogS プロット及び、ブレーザーの赤方偏移分布・光度分布を構築することにより、過去の研究結果と比較しながらブレーザーの宇宙論的進化を探ることを目的とする。また上述した通り、ガンマ線で見ている FSRQ と X 線で見ている FSRQ が同じ種族のものなのかどうかも調査・議論する。

第2章 観測衛星・カタログ

2.1 *Swift* 衛星

Swift 衛星はアメリカ・イギリス・イタリア・日本によって共同開発された X 線観測衛星であり、ガンマ線バーストとその残光観測を主な役目とする。ガンマ線バーストとはガンマ線領域で光り輝く突発的な天体現象であり、その詳しいメカニズムは未だ分かっていない。これまで *BeppoSAX* 衛星や *HETE-2* 衛星などの観測により、ガンマ線バーストの残光に関して多くの研究がなされてきたが、さらに多くの残光を精度良く観測するために開発されたのが *Swift* 衛星である。*Swift* 衛星は 2004 年 11 月 20 日に打ち上げられ、現在に至るまで約 12 年もの間、観測を続けている。*Swift* 衛星にはガンマ線イメージャー (BAT; Burst Alert Telescope)、X 線望遠鏡 (XRT; X-ray Telescope)、UV 可視光望遠鏡 (UVOT; UV/Optical Telescope) の 3 つの検出器が搭載されている。図 2.1 に *Swift* 衛星の概観図を示す。それぞれの検出器の役割は、約 2 ステラジアンという広い視野を持つ BAT が常時監視し、ガンマ線バーストを検出次第衛星をその方向に自動で向け、XRT と UVOT で X 線 (0.3~10keV) と可視・紫外線 (170~600nm) による残光を観測するというものである。これにより、ガンマ線バースト検出後約 1 分から、数時間後あるいは数日後まで残光観測を続けることができる。今回の解析で使用したデータはこのうち BAT 検出器で観測されたものなので、この BAT 検出器について次に詳しく説明する。

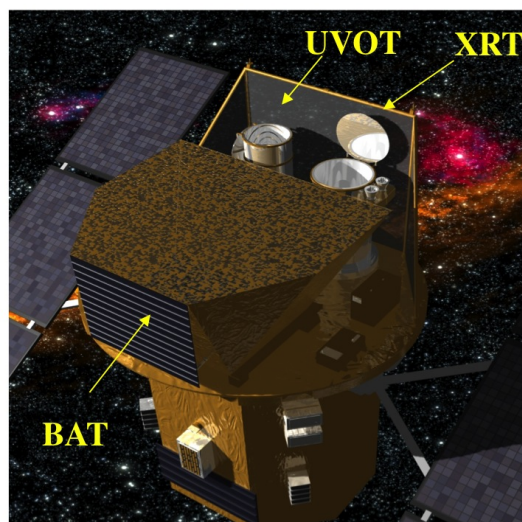


図 2.1: *Swift* 衛星全体図 [44]

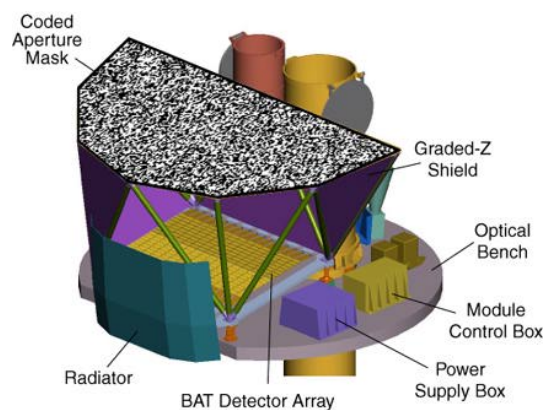


図 2.2: BAT 検出器のイメージ図。検出器上部に設置してあるモザイク状の部分が coded mask である。[45]

2.1.1 BAT 検出器

BAT 検出器には $4 \times 4 \times 2\text{mm}^3$ の大きさの CdZnTe 半導体が 32768 個敷き詰められており、一つ一つの素子がピクセルとして働く。BAT 検出器の大きな特徴の一つは 2 ステラジアンという広い視野を持つことであり、これは全天の約 1/6 に相当する。BAT が監視するエネルギー領域は 15 keV から 150 keV と比較的高いのも特徴である。しかし、このような高エネルギーの硬 X 線は物質を透過する能力が非常に強いいため、集光鏡など反射・屈折を地用した撮像は難しい。そのため、BAT 検出器では coded mask という撮像装置を利用し、硬 X 線の撮像を行っている。



図 2.3: Swift 衛星の coded mask の開発風景 [45]。作業員の女性が手にしているのが、開発中の coded mask である。

エネルギー領域	15-150keV
エネルギー分解能	~5keV @60keV
検出面積	5240cm ²
視野	1.4sr (> 50%coded)
検出素材	CdZnTe 半導体 (CZT)
検出器素子	256 Modules of 128 elements/Module
検出器素子のサイズ	4.00 × 4.00 × 2.00mm ³
coded mask のセルサイズ	5.00 × 5.00 × 1.00mm ³ (Pb Tiles)
寸法	2.4m×1.2m×1.2m
望遠鏡 PSF	22arcmin(FWHM)
位置決定精度	1 arcmin から 3 arcmin

表 2.1: BAT の性能 [43]

coded mask とは、X 線を通さない金属板 (鉛タイル) を基板の目に区切り、その半数に穴をあけたものである。図 2.3 の写真が製作中の *Swift* 衛星の coded mask である。穴の位置は一見ランダムに配置されているが、ある符号化規則にもとづき配置されているので、X 線が coded mask を通過した後につくる影のパターンと既知のマスクパターンの相関をとることで、X 線の点源の位置を決定することができる [17]。しかし、硬 X 線のエネルギーが 150 keV を超えてくると coded mask も透過してしまうため、撮像が難しくなる。そのため、検出器自体は 150 keV 以上のエネルギーも観測できるが、以上の理由から BAT のエネルギー領域は 150 keV までとなっている。図 2.2 に BAT の概念図を、表 2.1 に BAT の各種パラメーターを示す。

BAT はガンマ線バーストを観測するのが主たる目的だが、ガンマ線バーストが発生していないときは、その広い視野を活かして硬 X 線での全天サーベイを行っている。*Swift* 衛星は約 90 分で地球を一周しているので、90 分に一回全天を観測することができる。この BAT による観測は現在硬 X 線帯域で最も深い全天観測であり、運用開始から 10 年以上経過した現在でもガンマ線バーストのみならず、数々の硬 X 線天体を BAT は発見している。

2.1.2 Swift-BAT 70months catalog

BAT の全天サーベイにより見つかったガンマ線バースト以外の天体は”Swift-BAT all-sky hard X-ray survey” の source catalog に記載されている。現在このカタログの最新版は 70ヶ月間の観測結果を載せたカタログ [18] であり、計 1210 個の天体が記載されている。(以降、本論文ではこのカタログを「70month カタログ」と呼称する) このカタログにはそれぞれの天体の名前や座標だけでなく、光子指数・14 keV から 195 keV でのエネルギーフラックス・SN 比・天体の種類などの情報も載っており、また天体のオンラインデータベースである NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) や the Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data (SIMBAD) の情報を用いてそれぞれの天体の赤方偏移の値も併せて記載している。NED とは NASA が系外天体の様々な電磁波のデータをまとめた情報サイトのことであり [20]、SIMBAD はランスのストラスプール天文データセンターによって維持管理されている太陽系外の天体の目録をまとめた情報サイトである [21]。

このカタログ上での天体のエネルギーフラックスは、BAT により得られた 14 keV から 195 keV の X 線スペクトルを powerlaw モデル ($F(E) = AE^{-\Gamma}$) でフィットし、得られたパラメータを用いて

$$\text{Flux} = \int_{14\text{keV}}^{195\text{keV}} AE^{-\Gamma} \times EdE \quad (2.1)$$

のように計算して得られている [19]。

本研究ではこの 70month カタログの情報を用いて FSRQ と BL Lac の解析を行うが、この 70ヶ月カタログだけではどの天体が FRSQ/BL Lac かを判別することができない。そのためブレーザーに関するカタログを別に用意して、それと比較し天体を選別する必要がある。先行論文 [12] では、ブレーザーを選別するために BZCAT と CRATES の 2 つのカタログを用いていた。そのため本研究でも先行論文を踏まえ、この 2 つのカタログを使用し天体選別を行う。

2.2 BZCAT カタログ

BZCAT カタログ [22] は多波長観測をベースとしたブレーザーのカタログである。今までに行われた電波や可視・X 線などでのブレーザーサーベイの結果、ほぼ全天の範囲内でこれまでにブレーザーだと判明している天体が載っており、最新版 [23](Edition 5.0.0, January 2015) には 3561 個のブレーザーについての記載がある。また BZCAT カタログでは、ブレーザーを FSRQ/BL Lac/タイプ不定型/BL Lac-Galaxy diminated (BZG) の四種類に分けられている。BZG とは基本的には BL Lac に分類されるが、SED を見ると銀河中心からの放射が有意に支配しているようなタイプの天体である。図 2.4 に示しているのが BZCAT カタログに載っている天体が全天のどこに存在するかをハンメル図法で表したものである。この図中で赤点が BL Lac を、青点が FSRQ を、緑点がタイプ不定型のブレーザーを、黄色点が BZG を表している。これを見ると、天の川銀河が存在する領域(銀緯の小さいところ)では天の川銀河からの放射による影響で、ちゃんと観測できないこともあり、天体数は少ないが、それ以外の領域はほぼ全天カバーしているのが分かる。

このカタログには天体の座標・赤方偏移・電波域 (1.4 GHz と 0.843 GHz) のフラックス密度・X 線 (0.1 keV から 2.4 keV) のフラックス・ガンマ線 (1 GeV から 100 GeV) のフラックスが載っている。また上述した四種類のブレーザータイプは、以下のようないくつかの判断基準をもとに、各天体ごとに決定されている。

1. 1.4GHz または 0.84GHz の電波域で検出されているか
2. 可視光域でのスペクトルの形が既知のブレーザーのスペクトルと比べて同じか異なっているか
3. X 線光度が 10^{43} erg/s に近い、またはそれ以上か
4. 1.4GHz から 5GHz までで計測されたスペクトルインデックス α ($F(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$) の値が 0.5 に比べて大きい (これは FSRQ のみについての判断基準)
5. 電波での撮像の結果、活動銀河の形態として一つの核とジェットを有しているか

このブレーザータイプで FSRQ が BL Lac に分類されているブレーザーは、最低でも電波・可視・X 線での観測結果が存在する天体で、その種族がはっきりと分かっているものである。それに対し、電波などでの観測結果はあるが可視光スペクトルなどが十分に観測されていないブレーザーは、タイプ不定型に分類されているか、BZCAT 自体に記載されていない。したがって BZCAT カタログは検出された全てのブレーザーを網羅しているわけではない。そのため、70month カタログからブレーザーを見つける際に BZCAT カタログのみを使用するのは不十分であり、BZCAT 以外のカタログとも追加比較してみる必要がある。本研究では追加カタログとして、CRATES カタログを使用した。CRATES カタログとは電波で観測された系外天体のうち、電波スペクトルが平坦 (スペクトルインデックスが $\alpha < 0.5$) な天体 (全 11131 個) を集めたカタログである [25]。

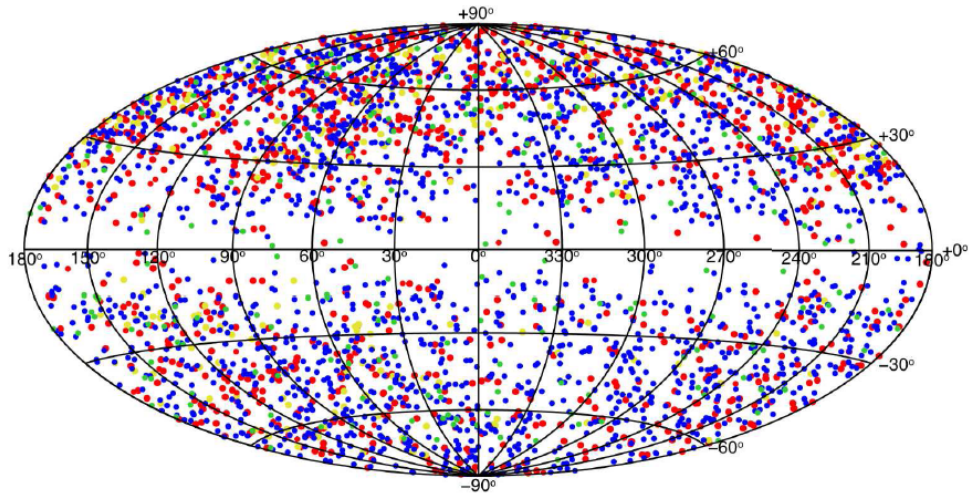


図 2.4: BZCAT カタログに載っている天体の全天マップ。赤点が BL Lac を、青点が FSRQ を、緑点がタイプ不定型のブレーザーを、黄色点が BZG を表している。[24]

2.3 CRATES カタログ

CRATES カタログとは、4.8 GHz のカタログである S5 カタログ [26]・Green Bank 6cm カタログ [27]・Parkes-MIT-NRAO survey カタログ [28] の 3 つのカタログから電波スペクトルが平坦な系外天体を抜き出したカタログである。これら 3 つのカタログを組み合わせることにより、ほぼ全天の範囲をカバーしている。

また、超大型干渉電波望遠鏡群 (VLA; Very Large Array)、オーストラリアコンパクト電波干渉計 (ATCA; Australia Telescope Compact Array) の再プロセステータなどを使用することにより、これらの対象天体の 8.4 GHz における情報も得られている。そのため、このカタログには 8.4 GHz と 4.8 GHz それぞれにおける、天体の座標・フラックス密度・スペクトルインデックスが記載されている。CRATES カタログでは電波イメージを用いて、その形態から、P(=Point source)、S(=Short jet)、L(=Long jet)、D(=Double)、C(=Complex) の 5 つに分類をしている。図 2.5 に示しているのは CRATES カタログにおける形態的分類のサンプルイメージであり、左から順に P,S,L,D,C の形態を示している。CRATES カタログでは全天体のうち、約 85% が P、約 9% が S または L、約 1% が D または C に分類されている。

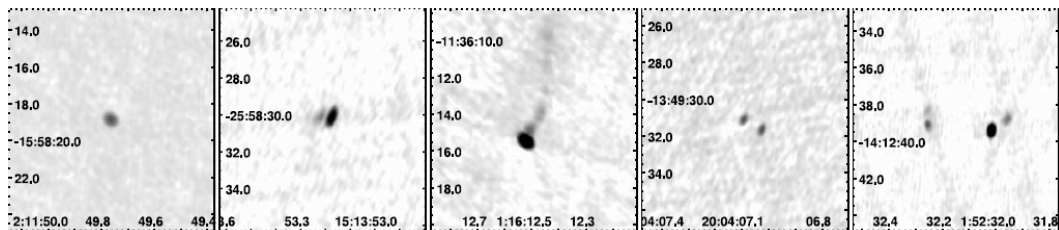


図 2.5: CRATES カタログにおける形態的分類のサンプルイメージ [25]。左から順に P,S,L,D,C の形態を示している

系外天体の電波カタログはこの CRATES カタログ以外にも存在するが、CRATES カタログでは電波スペクトルが平坦なものを集めているため、本研究にとっては有用である。なぜなら、この CRATES カタログからいくつかのスレッシュホールドを用いてブレーザー天体だと判断したものは、BL Lac ではなく FSRQ のブレーザーであると考えることができるからだ。本研究では CRATES カタログに載っているブレーザーは全て FSRQ であると考えて解析を進める。これについての検討・考察は次章にて述べる。

第3章 解析方法・解析結果

3.1 天体選別

この節では、70month カタログから BZCAT カタログと CRATES カタログのそれぞれを使い、解析対象天体である FSRQ と BL Lac を抜き出す方法について記述する。

3.1.1 BZCAT カタログを用いての天体選別

まず BZCAT カタログを用いて天体選別を行う場合だが、70month カタログと BZCAT カタログそれぞれには天体の座標が記載されているので、この値を比較することにより、70month カタログに載っている天体で、BZCAT カタログにも記載されている天体なのかどうか判断できる。BZCAT カタログにも記載がある天体についてはブレーザーであると判断し、そのブレーザーのタイプが FSRQ か BL Lac かは、BZCAT カタログ上での分類をそのまま使用した。BZCAT カタログに記載されているが、そのブレーザータイプが不明になっているものについては今回は除外した。また 70month カタログには赤方偏移の値が 0 となっているような、十分に観測されていない天体も含まれている。このような天体はそもそもどんな種類の天体なのか判断することができないので、今回は除外する。

定量的には、座標 (赤経・赤緯それぞれ) が $\pm 0.3^\circ$ 以内で一致しているものは、同じ天体であると断定し、70month カタログと BZCAT カタログを比較した。ここで座標の判断基準として $\pm 0.3^\circ$ としたのは、Swift 衛星 BAT 検出器の点像関数 (PSF; Point Spread Function) の値を参考にしているからである。望遠鏡が点光源を観測すると、光学系の品質や検出器内での光の回折などによる影響で像が拡散してしまい、ボケた画像になってしまう。この像の拡散はどのような検出器でも発生してしまい、原理上完全に取り除くことはできない。PSF はその拡散度を表す指標である。BAT 検出器の PSF は表 2.1 より $22 \text{ arcmin} (\approx 0.3^\circ)$ であるので、観測した点光源は $\pm 0.3^\circ$ 分広がっていることになる。そのため BAT 検出器が特定した天体座標には $\pm 0.3^\circ$ の誤差が含まれている。なので今回の天体選別において、座標で BZCAT カタログと比較する際は $\pm 0.3^\circ$ 以内のものは同じ座標であると断定した。今回の解析では、Swift-BAT の天体のうち、赤経赤緯が $\pm 0.3^\circ$ 以内に BZCAT からの候補天体が複数存在することはほぼ無かった。複数存在しているとしても、一方の天体は赤方偏移の値が 0 になっていたりと正しく観測されていないものだったので、結果この座標を用いた選別で、1 個の BAT 天体に対応する BZCAT カタログの天体は 1 個のみとなった。また BAT 天体とそれに対応する BZCAT カタログの天体の赤方偏移の値も比較したところ、赤方偏移が全く異なる天体は含まれておらず、概ね赤方偏移は一致していた。

このような選別方法によって得られた天体のうち、銀緯が $\pm 15^\circ$ 以内に存在する天体は私達の銀河の放射による影響が出てくるので、それらは今回の解析天体からは除外し、最終的には BZCAT カタログを使用することにより、70months カタログから 41 個の FSRQ と、27 個の BL Lac を抜き出した。図 3.2 に BZCAT カタログを用いた場合の天体選別方法のチャート図を示す。

3.1.2 CRATES カタログを用いての天体選別

CRATES カタログはBZCAT カタログとは異なり、ブレーザー以外の天体も含まれているので、70month カタログと CRATES カタログの両方に記載されている天体を見つけた後に、ブレーザー以外の天体を除去する必要がある。まず、BZCAT カタログでの天体選別と同様に、70month カタログと CRATES カタログを比較して座標が $\pm 0.3^\circ$ 以内の天体は同じものであると判断し、両方のカタログに記載されている天体を見つけた。次にここからブレーザーを選出するために、以下のような判断基準を設けた。

- (i) CRATES 上の形態的分類において、点源に分類されているもの
- (ii) 電波フラックスと X 線フラックスの比が $R_{tX} \geq 10^{-4}$ のもの
- (iii) 赤方偏移の値が 0.1 以上のもの

まず (i) についてだが、ブレーザー天体は活動銀河核から放出されるジェットが視線方向に向いているものであると考えられているため、点源として観測されるはずである。なので CRATES カタログ上での形態的分類で点源に分類されているものを選択した。(i) の段階だけでは、ブレーザーなどの電波銀河以外にもセイファート銀河なども含まれているので、電波域で暗い天体を取り除く必要がある。その方法としては式 1.1 の電波 (1.4GHz) と X 線 (14-195keV) のフラックス比 R_{rX} を比較する方法を用いる。これが (ii) の判断基準である。X 線のフラックスは 70month カタログの値をそのまま用いることができるが、CRATES カタログ上での電波フラックスは 4.8GHz での値なので、式 1.1 を使用するには 1.4GHz でのフラックスに変換しなければならない。変換方法は先行研究 [7] より、

$$[\nu F_\nu]_{1.4\text{GHz}} = \left(\frac{\nu_{1.4\text{GHz}}}{\nu_{4.8\text{GHz}}} \right)^{1-\alpha} [\nu F_\nu]_{4.8\text{GHz}} \quad (3.1)$$

として変換している。ここで式 3.1 中の α は非ブレーザータイプ AGN の電波スペクトルインデックスを仮定して 0.7 としている [7]。

最後に (iii) についてだが、CRATES カタログは電波域でのスペクトルが平坦な系外天体を集めたカタログであるので、ここに記載されているブレーザーは BL Lac ではなく FSRQ であると考えた。そのため FSRQ の性質とは異なる天体は除く必要がある。今回は天体までの距離を判断基準として用いた。FSRQ は BL Lac など、他の電波銀河と比べても、とりわけ明るい天体である。そのため FSRQ は比較的遠方で観測される。なので、(ii) までの段階で CRATES カタログを用いて抜き出された天体のうち、近傍に存在する天体は除外する。距離の指標を表すものとして、赤方偏移の値が使えるが、定量的に距離の境界線を設定するために、BZCAT カタログを用いて抜き出した FSRQ 天体 41 個と BL Lac 天体 27 個の赤方偏移を用い、天体数のヒストグラムを作成してみた。図 3.1 がそのヒストグラムである。

ここで図 3.1 の赤方偏移の値は、70month カタログの値を用いている。これを見ると、BL Lac は主に $z < 0.1$ のところで多く分布しているのに対し、FSRQ はより遠方に分布していることが分かる。そのため本研究では距離の境界線を $z = 0.1$ に設定し、 $z < 0.1$ の天体は除外することにした。

こうして得られた天体で、BZCAT カタログを用いて天体選別を行った結果得られた天体と異なる FSRQ を、新たに 17 個見つけた。図 3.2 には CRATES カタログを用いた場合の天体選別方法のチャート図も示

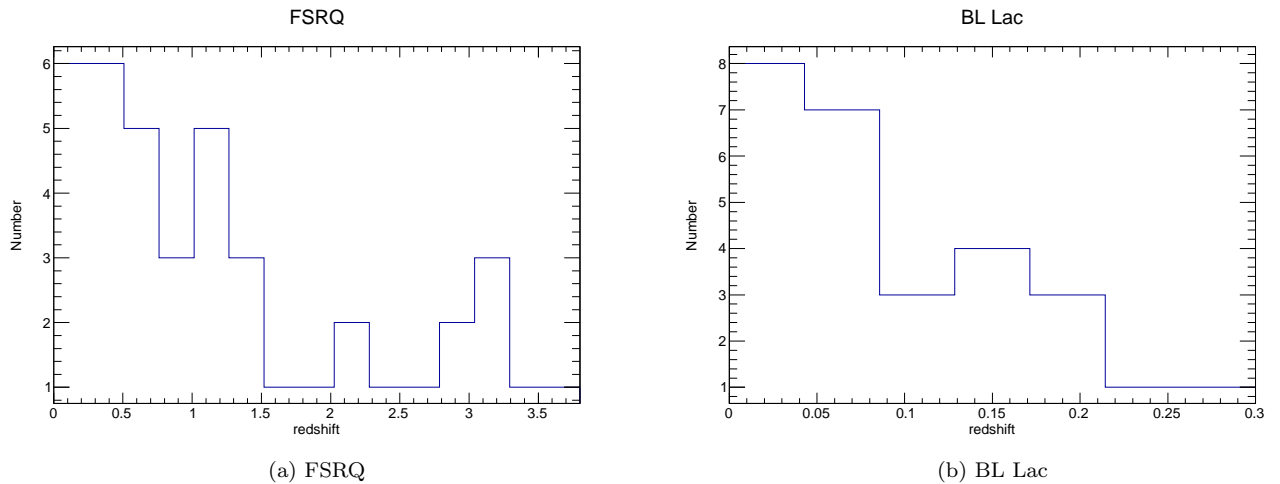


図 3.1: BZCAT カタログを用いて抜き出した FSRQ・BL Lac の各赤方偏移ごとの天体数。

している。

このようにして計 58 天体の FSRQ と、27 天体の BL Lac を 70month カタログから見つけ出した。*Swift* 衛星の 22ヶ月間のデータを用いていた先行研究 [12] で使用していた天体数 (FSRQ : 26 天体、BL Lac : 12 天体) と比較すると、約 2 倍に増加している。

しかし、この段階では CRATES カタログから抜き出した 17 天体が全て FSRQ 天体であると完全に断定することはできない。そのため、この 17 天体が FSRQ なのかどうかを確認する必要がある。今回は CRATES カタログを用いて選別した 17 天体の赤方偏移・光度・光子指数における天体数の分布図を作成し、BZCAT カタログを用いて選別した 41 天体と比較することにより、CRATES カタログの 17 天体が FSRQ のブレイザータイプと言えるかどうか考察する。(以降、本論文では BZCAT カタログを用いて選別した 41 個の FSRQ のことを「BZCAT 天体」、CRATES カタログを用いて選別した 17 個の FSRQ のことを「CRATES 天体」と呼称する) ここでは BZCAT 天体は全て FSRQ であると断定し比較している。

70month カタログに記載されている X 線でのフラックス・光子指数の値と赤方偏移の値を利用し、比較すると以下のような結果になった。図 3.3 が赤方偏移ごとの天体数ヒストグラム、図 3.4 が光子指数ごとの天体数ヒストグラム、図 3.5 が光度ごとの天体数ヒストグラムであり、それぞれ赤線が CRATES 天体を、青線が BZCAT 天体のヒストグラムを示している。ここではそれぞれの天体の光度を算出しているが、その算出方法は 3.3 章に後述する。

まず図 3.3 を見てみると、BZCAT 天体は $z \sim 3$ までの幅広い値で分布しているが、CRATES 天体は主に $z < 0.5$ までに分布が偏っているのが分かる。次に図 3.5 を見てみると、BZCAT 天体は $L = 10^{45.5}[\text{erg/s}]$ から $L = 10^{48.5}[\text{erg/s}]$ の範囲に多く分布しているのに対し、CRATES 天体はそれよりも暗い光度である、 $L = 10^{44.5}[\text{erg/s}]$ から $L = 10^{45.5}[\text{erg/s}]$ の間に多くが分布している。これらの結果から、CRATES 天体は BZCAT 天体に比べて暗い天体が多く集合しており、その距離も BZCAT 天体に比べて近傍に分布していることが分かる。これら CRATES 天体が BZCAT 天体と異なる分布になっている結果は、CRATES 天体が FSRQ ではない種族の天体であることを支持していると言える。

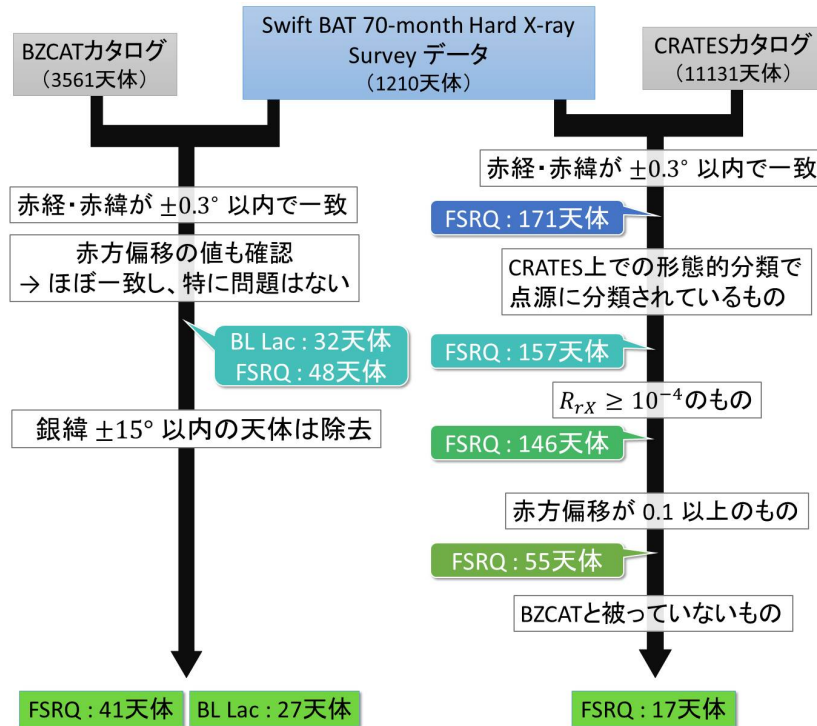


図 3.2: 天体選別のチャート図

また光子指数のヒストグラムについては、得られた図 3.4 の結果を以下のようなガウシアン³の式 3.2 でフィッティングを行い、BZCAT 天体・CRATES 天体それぞれの光子指数の平均 μ を算出した。

$$f(x) = A \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.2)$$

この結果、BZCAT 天体の光子指数の平均 μ は 1.63、CRATES 天体の μ は 2.05 となった。ここで注目すべき点は、BZCAT 天体の光子指数の平均が 2 以下のところにあるのに対して、CRATES 天体はだいたい 2 のところに光子指数の平均がきていることである。1.2.2 節でも記述したが、FSRQ と BL Lac はその SED の形が異なり、FSRQ の SED は BL Lac の SED を左にずらしたような形をしている。図 3.6 に示しているのは、図 1.5 から黒線と青線の SED を抜き出したものであり、ここでは青線が BL Lac の、黒線が FSRQ の代表的な SED を表している。また図中の赤い帯状の部分はだいたい X 線帯域の部分 ($\nu = 10^{17} \sim 10^{19}$ [Hz]) を示している。

この図を見てみると、BL Lac では X 線帯域での SED は右下がりになっているが、対して FSRQ では SED は右上がりになっている。ここで SED の縦軸は放射のエネルギーの二乗に比例するので、光子指数が 2 だ SED 上では平坦な直線、すなわち傾き 0 の直線になる。よって X 線での場合、SED 上で右上がりになっている FSRQ の光子指数は 2 以下、右下がりになっている BL Lac の光子指数は 2 以上となるはずである。実際 BZCAT を用いて抜き出した FSRQ と BL Lac の光子指数ごとのヒストグラムを作成し、式

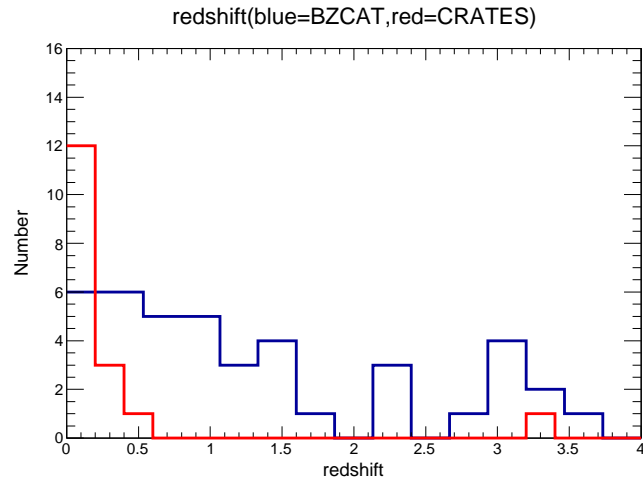


図 3.3: 赤方偏移ごとの天体数のヒストグラム。赤線が CRATES 天体、青線が BZCAT 天体を示す。

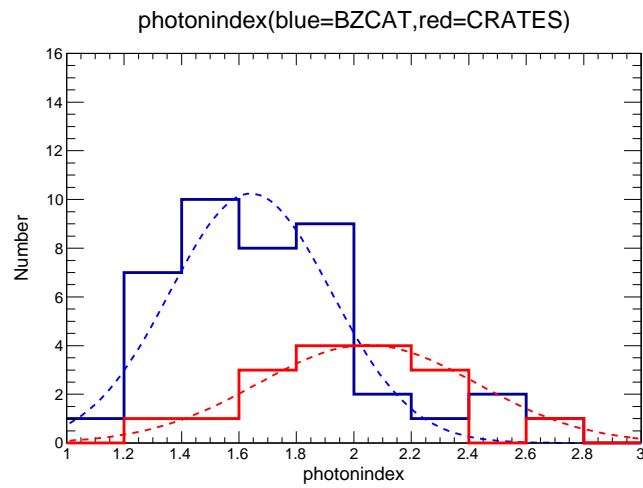


図 3.4: 光子指数ごとの天体数のヒストグラム。赤線が CRATES 天体、青線が BZCAT 天体を示す。図中の点線はガウシアンでフィッティングした結果である

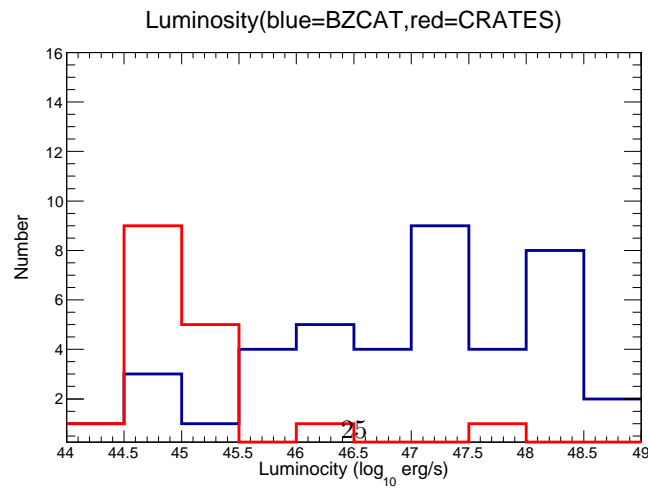


図 3.5: 光度ごとの天体数のヒストグラム。赤線が CRATES 天体、青線が BZCAT 天体を示す。

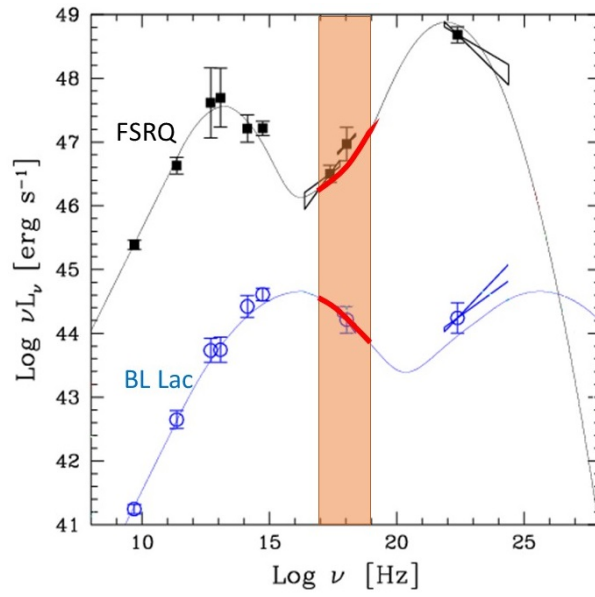


図 3.6: 図 1.5 の黒線と青線を抜き出した図。ここで図中の赤い帯状の部分は X 線帯域の部分を示し、この部分では FSRQ の SED は右上がりになっているが、BL Lac の SED では右下がりになっているのが分かる。(図中の赤線の部分)

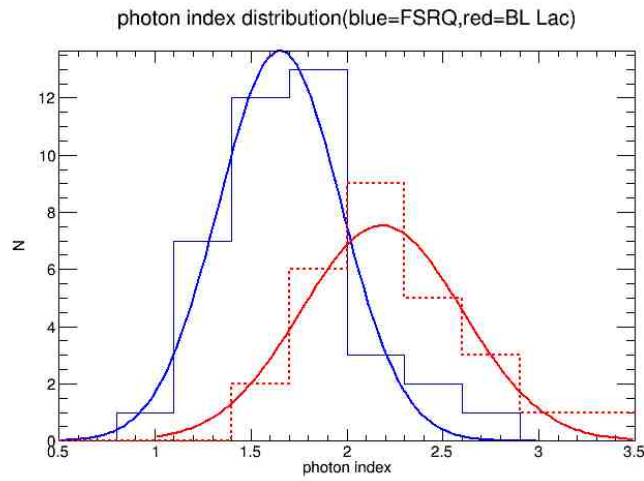


図 3.7: BZCAT カタログを用いて抜き出した FSRQ と BL Lac の光子指数ごとの天体数ヒストグラム。曲線は式 3.2 のガウシアンでフィッティングした結果

3.2 のガウシアンでフィッティングしたところ、FSRQ の光子指数の平均は 1.7、BL Lac では 2.2 となっていた (図 3.7 を参照)。これから考えると、CRATES 天体が FSRQ だと考えるなら、その光子指数のピークは 2 以下の位置に来るべきだが、図 3.4 及びそのフィッティング結果から、CRATES 天体の光子指数が 2 以下となっていない。

以上の赤方偏移・光度・光子指数の比較による結果から、CRATES 天体は少なくとも FSRQ であるとは言えず、近傍に存在する電波銀河である可能性が高い。よって今回の解析ではこの 17 個の CRATES 天体は使用しないこととし、最終的に BZCAT カタログを用いて抜き出した 41 個の FSRQ と 27 個の BL Lac を今回の解析で使用する天体とした。この計 68 個の天体の座標・赤方偏移・フラックスなどの情報は付録の表 A.1 に記載している。

3.2 光度の算出方法

本研究ではブレーザーの宇宙論的進化の傾向を調査するために、天体のフラックス値や赤方偏移の値などを使用して様々な解析を行うが、その過程で天体の光度を算出する必要が出てくる。天体の光度は赤方偏移の値とフラックス値、光子指数の値を用いることにより算出できる。この節ではその算出方法について記述する。

一般的に光度 L はフラックス S と天体までの光度距離 D_L を用いて、

$$L = 4\pi D_L^2 S \quad (3.3)$$

とすることで求められる。光度距離については次節にて説明する。この式 3.3 中のフラックスは静止系での値であるが、今回対象とするブレーザーは非常に遠方に存在する天体のため、宇宙膨張により後退している。そのため衛星が観測したフラックスなどは静止系ではなく観測系での値になっているので、式 3.3 を観測系での形に変換する必要がある。一般に宇宙の大きさが α 倍になると、光の波長は α 倍に、周波数は $1/\alpha$ 倍になるため、観測系での波長 λ' と光のエネルギー E' は静止系での波長 λ とエネルギー E を用いて、

$$\lambda \rightarrow \lambda' = \lambda\alpha \quad E \rightarrow E' = \frac{E}{\alpha} \quad (3.4)$$

となる。ここで赤方偏移 z は定義より、もとの波長 λ と観測された波長 λ' を用いて、

$$z \equiv \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} \quad (3.5)$$

となるので、式 3.4 を用いると、

$$\alpha = 1 + z \quad (3.6)$$

となる。よって観測系と静止系の対応を示すと以下ようになる。ここで S_{rest} は静止系でのフラックス、 S_{obs} は観測系でのフラックスを表す。

$$S_{\text{obs}} \rightarrow S_{\text{rest}} \quad (3.7)$$

$$E \rightarrow \frac{E}{1+z} \quad (3.8)$$

$$dE \rightarrow \frac{dE}{1+z} \quad (3.9)$$

ここで、エネルギー Spektral が powerlaw モデルであるとすると、フラックスは光子指数 Γ を用いて

$$S_{\text{obs}} \propto E^{1-\Gamma} dE \quad (3.10)$$

となるので、静止系のフラックスは、

$$\begin{aligned} S_{\text{rest}} &\propto \left(\frac{E}{1+z} \right)^{1-\Gamma} \times \frac{dE}{1+z} = E^{1-\Gamma} \times dE \times (1+z)^{\Gamma-2} \\ &= S_{\text{obs}} \times (1+z)^{\Gamma-2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

これを式 3.3 に代入すると、以下のように光度と観測系のフラックスの対応式を得ることができる。

$$L = 4\pi D_L^2 S_{\text{rest}} = 4\pi D_L^2 S_{\text{obs}} \times (1+z)^{\Gamma-2} \quad (3.12)$$

この式 3.12 を用いてフラックスを光度に変換するには、さらに天体までの光度距離 D_L を算出する必要がある。

3.2.1 光度距離—赤方偏移関係

光度距離とは真の明るさが分かっている天体が、どのくらい暗く見えているかで定義される距離であり、赤方偏移 z と対応する [32]。光度距離は式 3.3 を用いて以下のように定義される。

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi S}} \quad (3.13)$$

フラックスは単位時間・単位面積あたりを通過するエネルギーとして定義されるが、宇宙の膨張を考慮すると、エネルギー式 3.4 のように $1/\alpha$ 倍になる。また同様に、単位時間も宇宙膨張により α 倍になってしまうので、フラックスは $\alpha^{-2} = (1+z)^{-2}$ 倍になる。ここで $A(r)$ が宇宙膨張により光が広がった領域の表面積だとすると、

$$S = \frac{L}{A(r)(1+z)^2} \quad (3.14)$$

となる。ここでロバートソン・ウォーカー計量と呼ばれる一様・等方膨張宇宙を表す計量の表現を使用すると、ロバートソン・ウォーカー座標での動経距離 r を用いて $A(r) = 4\pi r^2$ となるので、式 3.13 と式 3.14 から以下ようになる。

$$D_L = (1+z)r \quad (3.15)$$

ここで共動距離というものを考える。共動距離とは変動する座標系（ここでは膨張する宇宙空間の観測系）とともに、その値が変動するような距離指標であり、赤方偏移 z と対応する。ロバートソン・ウォーカー計量の場合、共動座標 χ は曲率パラメーター K を用いて、

$$\chi = \int_0^r \frac{dr}{\sqrt{1-Kr^2}} \quad (3.16)$$

となるので、これを計算することにより

$$r = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{K}} \sin(\sqrt{K}\chi) & (K > 0) \\ \chi & (K = 0) \\ \frac{1}{\sqrt{-K}} \sinh(\sqrt{-K}\chi) & (K < 0) \end{cases} \quad (3.17)$$

と、共動距離と動経距離の関係式を得ることができる。

ロバートソン・ウォーカー計量は

$$ds^2 = -cdt^2 + a(t)^2[d\chi^2 + r(\chi)^2 d\Omega^2] \quad (3.18)$$

のように書けるので、遠方の天体から光が届くとき、おのおのの光に沿って $ds^2 = 0$ が成り立つから、光の進行方向を同経方向として光の経路に沿って $cdt = -ad\chi$ （ここでマイナス符号は、我々の場所を動経座標の原点としているので、光の進む時間に沿って時間の進む向きと動経座標の大きくなる向きが反対になっているため）が成り立つ。よって、光の経路に沿って積分すると、

$$\chi = \int_0^x d\chi = c \int_t^{t_0} \frac{dt}{a(t)} \quad (3.19)$$

ここでスケール因子 $a(t)$ は、時刻 t での宇宙の大きさを相対的に示す量である。またここでは現在の宇宙の時刻を t_0 と定義しているが、そのときのスケール因子を $a_0 \equiv a_0(t_0) = 1$ と定義すると、式 3.19 は $\dot{a} = da/dt$ を用いて、

$$\chi = c \int_a^1 \frac{da}{a\dot{a}} \quad (\because a(t) = a) \quad (3.20)$$

スケール因子 $a(t)$ を用いると、宇宙の膨張と共に動く共動座標上での実際の距離を表すことができる。例

えば、ある二つの銀河間の共動座標の差 $\Delta\chi$ は時間が経過しても変わらないが、実際の距離は宇宙の膨張とともに変化する。その実際の距離 d を表すのにスケール因子が用いられ、以下のような

$$d(t) = a(t)\Delta\chi \quad (3.21)$$

よってハッブルの法則は、スケール因子を用いて表すと、

$$H(t)d = v = \dot{d}(t) = \dot{a}\Delta\chi = \frac{\dot{a}}{a}a\Delta\chi = \frac{\dot{a}}{a}d \quad (3.22)$$

となるので、ハッブルパラメーター $H(t)$ はスケール因子を用いて $H(t) = \dot{a}/a$ と表される。これを式 3.20 に代入して、

$$\chi = c \int_a^1 \frac{da}{a^2 H(a)} \quad (3.23)$$

ここで、スケール因子と赤方偏移には

$$1 + z = \frac{1}{a(t)} \quad (3.24)$$

の関係があるので、式 3.23 の変数を a から z に変換すると、以下のようになる。

$$\chi = c \int_0^z \frac{dz}{H(z)} \quad (3.25)$$

ハッブルパラメーターは密度パラメーター Ω_m と曲率パラメーター K 、宇宙定数 Ω_Λ 、ハッブル定数 H_0 を用いて、

$$H(z) = H_0 \sqrt{(1+z)^3 \Omega_m + \Omega_\Lambda - (1+z)^2 K} \quad (3.26)$$

と表される。今回は簡単のために、 $\Omega_m = 0.3$ $\Omega_\Lambda = 0.7$ とすると、曲率パラメーターは $K = 1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda$ で表されるので $K=0$ になり、

$$\chi = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{0.3(1+z)^3 + 0.7}} \quad (3.27)$$

となり、式 3.17 より $K=0$ のとき $r = \chi$ なので、光度距離 D_L は式 3.15 から以下のようになる。

$$D_L = \frac{c(1+z)}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{0.3(1+z)^3 + 0.7}} \quad (3.28)$$

こうして光度距離を赤方偏移 z で表すことができた。これにより式 3.12 と式 3.28 を用いることで、赤方

偏移・光度指数・天体のフラックスから天体の光度を求めることができる。今回、ハッブル定数の値は、 $H_0 = 70 \text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ としている。

3.3 宇宙論的進化

この節ではブレーザーの宇宙論的進化の傾向を調べるための手法について述べる。今回の研究では $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析と LogN-LogS 分布の 2 種類の方法を使用した。

3.3.1 $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析

$\langle V/V_{max} \rangle$ 解析とは、地球からある光度 L の天体までの空間体積 V と、その光度 L の天体が観測できる最大領域の体積 V_{max} の比 V/V_{max} をとり、その全天体での平均をとった値によって宇宙論的進化の傾向を調べる方法である [31]。必ず $V_{max} > V$ となるので、 V/V_{max} の値は 0 から 1 までの間の値をとることになる。天体の宇宙論的進化の傾向を調べるためには、天体が距離に対して一様に分布している場合からどれだけ遠方もしくは近傍に偏っているかを調べる必要があるので、天体が一様分布しているときの $\langle V/V_{max} \rangle$ の値が必要である。

観測できる最大の距離を r_{max} とすると、 $\langle V_{max} \rangle$ は、

$$\langle V_{max} \rangle = \frac{4}{3} \pi r_{max}^3 \quad (3.29)$$

となる。対して $\langle V \rangle$ は、 $r = 0$ から $r = r_{max}$ までの間での平均をとった値なので、

$$\langle V \rangle = \frac{\int_0^{r_{max}} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) n(r) r^2 dr}{\int_0^{r_{max}} n(r) r^2 dr} \quad (3.30)$$

ここで $n(r)$ は天体の個数密度である。今、天体は宇宙一様に分布していると仮定しているため、個数密度は定数となる。よって $n(r) = n_0$ とすると、

$$\begin{aligned} \langle V \rangle &= \frac{\int_0^{r_{max}} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) n_0 r^2 dr}{\int_0^{r_{max}} n_0 r^2 dr} = \frac{4}{3} \pi r_{max}^3 \times \frac{1}{2} = \frac{\langle V_{max} \rangle}{2} \\ \therefore \langle V/V_{max} \rangle &= \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (3.31)$$

よって天体が一様分布しているときは、 $\langle V/V_{max} \rangle$ の値は 0.5 になる [15]。そのため、 $\langle V/V_{max} \rangle$ の値が 0.5 より大きいときは、体積 V が大きな天体が多く占めているということなので、天体までの距離 r が大きな天体が多いことになる。すなわち天体は遠方に多くが分布していると言える。逆に $\langle V/V_{max} \rangle$ の値が 0.5 より小さいときは天体は近傍に分布していると言える。

今回の研究では FSRQ と BL Lac それぞれでの $\langle V/V_{max} \rangle$ を算出するが、観測できる最大距離 r_{max} を決めるために観測できる最低フラックス S_{min} を設定し、天体を遠ざけてフラックスが S_{min} になるところの距離を r_{max} と決めた。最低フラックス S_{min} は 3.5 節で説明する sky-coverage の図 3.8 より、Swift 衛星の

70ヶ月間観測での限界フラックスである $4.13 \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$ とした。そして今回解析するブレーザー天体の一つ一つについて、そのフラックスを用いてそれぞれの V/V_{max} を以下のように求める。

r_{max} は、天体までの距離を変化させても光度は変化しないことを利用して、

$$L = 4\pi D_L(z)^2 S \times (1+z)^{\Gamma-2} = 4\pi D_L(z_{max})^2 S_{min} \times (1+z_{max})^{\Gamma-2} \quad (3.32)$$

の方程式を解き z_{max} を求め、式 3.28 から距離 r_{max} を算出した。よって V/V_{max} は以下のようにかける。

$$\frac{V}{V_{max}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{\frac{4}{3}\pi r_{max}^3} = \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^3 \quad (3.33)$$

ここで、ある値 a と b の間に x が連続一様に分布するときの確率密度関数は

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{for } a \leq x \leq b, \\ 0 & \text{for } x \leq a, \text{ or } b \leq x, \end{cases} \quad (3.34)$$

X を $f(x)$ に対応する連続型確率変数とすると、確率変数 X の期待値は、

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (3.35)$$

X が平均 μ を持つランダムな数である場合は、 $E[X] = \mu$ になり、標準偏差は、

$$\sigma = \sqrt{E[(X - \mu)^2]} = \sqrt{E[X^2] - 2\mu E[X] + \mu^2} = \sqrt{E[X^2] - \mu^2} = \sqrt{E[X^2] - (E[X])^2} \quad (3.36)$$

よって今回の場合、

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \int_a^b \frac{x dx}{b-a} = \frac{b+a}{2} \quad (3.37)$$

$$E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx = \int_a^b \frac{x^2 dx}{b-a} = \frac{b^2 + ab + a^2}{3} \quad (3.38)$$

となり、これらを式 3.36 に代入すると、標準偏差 σ は以下ようになる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{b^2 + ab + a^2}{3} - \left(\frac{b+a}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{b^2 - 2ab + a^2}{12}} = \frac{(b-a)}{\sqrt{12}} \quad (3.39)$$

よって、 V/V_{max} が 0 から 1 の間に一様に分布しているときの標準偏差は $\sigma_0 = 1/\sqrt{12}$ になる。また天体数 N が大きいときは $\langle V/V_{max} \rangle$ は標準偏差 $1/\sqrt{N}$ のガウス分布をすると考えられることから、 $\langle V/V_{max} \rangle$ の誤差は、

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{12N}} \quad (3.40)$$

となる。今回の解析より得られた、FSRQ と BL Lac それぞれの $\langle V/V_{max} \rangle$ は表 3.1 に示している。また、個々の天体の V/V_{max} の値は付録の表 A.1 に記載している。

3.3.2 logN-logS 分布

logN-logS 分布とは、あるフラックス S より明るい天体の個数 $N(> S)$ を調べ、そのフラックスごとに両対数グラフにプロットしたものである。天体が一様に分布している場合、ある宇宙空間内に存在する天体数はその空間体積に比例するので、距離 D 内に N 個の天体が存在するとすと、

$$N \propto D^3 \quad (3.41)$$

また、フラックスは距離の二乗に反比例し、

$$S \propto D^{-2} \quad (3.42)$$

よって式 3.41 と式 3.42 から、天体が一様分布しているときのフラックスと天体数には以下のような比例関係が存在する。

$$N \propto S^{-1.5} \quad (3.43)$$

つまり、logN-logS 上では天体が一様分布しているときは傾き -1.5 の直線となる。なので、この -1.5 の傾きを基準にして天体の宇宙論的進化の傾向をつかむことができる。例えば、ある種族の天体の logN-logS 分布を作成し、その傾きが -1.5 より緩やかであるなら、その種族の天体は一様分布を仮定した場合に比べて明るい天体が多く、暗い天体が少ないということになる。天体の見かけの明るさはそのまま距離の指標として置き換えられるので、これは天体が近傍に偏っていることを意味する。同様に logN-logS 分布の傾きが -1.5 より急ならば、天体は遠方に分布していることになる。

logN-logS 分布図を作成するには、観測された天体をその明るさ順に並べ直し、その数を数えていきプロットすればよい。この方法では観測されている範囲内のフラックスだけで logN-logS を作成するので、観測されていない暗いフラックス側まで logN-logS を伸ばしてしまうと不定性が大きくなってしまいが、天体種族ごとの logN-logS を作成することができる。今回はこの方法でブレーザーの logN-logS 分布図を導出する。

しかし、これを導出するには衛星の感度や観測時間、観測領域による影響を考慮する必要がある。今回用いた *Swift* 衛星も全天サーベイを行なっているとはいえ、全天を正確に同じ時間だけ観測した訳ではない。そのため空の異なる観測領域ごとに感度が異なるので、特に検出感度ギリギリの明るさの天体は全天で一様に検出できるとは限らない。logN-logS を作る際には、そのような衛星の観測による影響を排除しなければならない。そこで行うのが sky-coverage 補正である。

3.4 sky-coverage 補正

sky-coverage とは、あるフラックスの天体を検出できる観測領域の大きさを表したものである [33]。この sky-coverage が分かれば、あるフラックスで観測した領域は全天の何%に対応するかが分かるので、これを用いて $\log N$ - $\log S$ を補正することで衛星の観測領域の差による影響を取り除くことができる。

しかし、sky-coverage を構築するには、衛星の観測した領域をいくつかのブロックに区切り、各ブロックごとに検出感度を導出して最終的にそれらを足し合わせる必要があり、一から構築するのは難しい。だが、既に同じ観測機器のある露光時間における sky-coverage が得られている場合は、それを基にして目的の露光時間における sky-coverage を構築することができる [34]。今回は、エネルギー帯域が 15keV から 55keV で、観測時間が 22ヶ月間の BAT 検出器の sky-coverage が既に得られているので [12]、これを利用する。露光時間が 22ヶ月間で得られている sky-coverage を $\Omega_{22\text{month}}(S)$ とし、70ヶ月間の sky-coverage を $\Omega_{70\text{month}}(S)$ とすると、Swift-BAT のサーベイの場合は露光時間の平方根に反比例して感度が良くなるので、以下の計算により $\Omega_{70\text{month}}(S)$ が求められる。

$$\Omega_{70\text{month}}(S) = \Omega_{22\text{month}} \left(\sqrt{\frac{22}{70}} S \right) \quad (3.44)$$

図 3.8 に今回使用した 22ヶ月間の sky-coverage (図中の黒線) と式 3.44 で求めた 70ヶ月間の sky-coverage (図中の赤線) を示している。ここで横軸はフラックス (10^{12} erg/s/cm²) で左縦軸はそのフラックスでの Swift-BAT の観測領域を平方度 (deg²) で表したもので、右縦軸はその平方度が全天の何%に対応するかを表している。この図から 70ヶ月間の観測の場合では、フラックスが 10^{-11} [erg/s/cm²] 以上では全天のほぼ全てを観測できていると言えるが、それ以下のフラックス、例えば 6×10^{-12} [erg/s/cm²] のフラックスでは全天の半分以下しか観測できていないことが分かる。またこの図より、先行研究である 22ヶ月間の観測では、検出限界フラックスが $\sim 7.3 \times 10^{-12}$ [erg/s/cm²] であるのに対し、70ヶ月間の観測では $\sim 4.13 \times 10^{-12}$ [erg/s/cm²] が検出限界フラックスになっているので、22ヶ月間の観測では受からなかった暗い天体も、今回の観測では検出できていると思われる。

今回の解析では私達の銀河からの放射による影響を無視するために銀緯が $\pm 15^\circ$ 以内を排除しているが、その効果も図 3.8 の sky-coverage には含めている。そのため実際の全天の平方度は 41253 [deg²] だが、sky-coverage の最大は $|b| < 15^\circ$ を除いた約 30000 [deg²] になっている。

ただし、この sky-coverage はエネルギー帯域が 15keV から 55keV のものである。70month カタログに載っている天体のフラックス値は 14keV から 195keV での値なので、この sky-coverage を使うには、エネルギー帯域を 15keV から 55keV に合わせる必要がある。

3.5 エネルギー帯域の変更— $F_{14\text{keV}-195\text{keV}}$ から $F_{15\text{keV}-55\text{keV}}$ への変換

70month カタログに載っている天体の 14keV から 195keV までのフラックスは、式 2.1 のように single powerlaw を仮定した SED を積分することで求められているので、15keV から 55keV までのフラックスも同様に以下のように求められる。

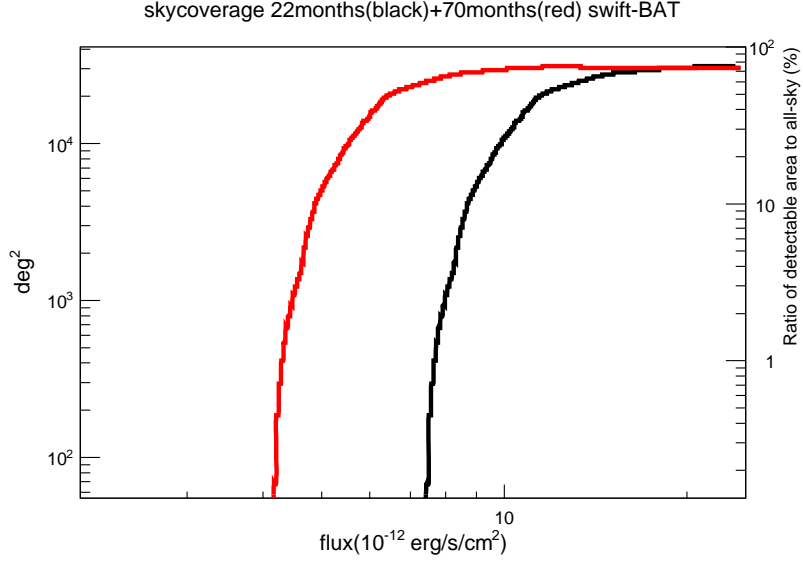


図 3.8: BAT の 15-55keV での sky-coverage。横軸がフラックス、左縦軸がそのフラックスでの観測範囲 (deg^2) を表し、黒線が 22ヶ月間観測の sky-coverage[12] で赤線が今回導出した 70ヶ月間観測の sky-coverage を表す。右縦軸は左縦軸の平方度が全天のうちの何%に対応するかを示している。

$$F_{15\text{keV}-55\text{keV}} = A \int_{15\text{keV}}^{55\text{keV}} E^{-\Gamma} \times E dE = \frac{A}{2-\Gamma} \left(55^{(2-\Gamma)} - 15^{(2-\Gamma)} \right) \quad (3.45)$$

式 2.1 より、比例定数 A は、

$$A = \frac{F_{14\text{keV}-195\text{keV}}}{\int_{14}^{195} A E^{-\Gamma} \times E dE} = \frac{F_{14\text{keV}-195\text{keV}}(2-\Gamma)}{195^{(2-\Gamma)} - 14^{(2-\Gamma)}} \quad (3.46)$$

であるので、これより $F_{15\text{keV}-55\text{keV}}$ は $F_{14\text{keV}-195\text{keV}}$ と光子指数 Γ を用いて以下のように書ける。

$$F_{15\text{keV}-55\text{keV}} = \frac{55^{(2-\Gamma)} - 15^{(2-\Gamma)}}{195^{(2-\Gamma)} - 14^{(2-\Gamma)}} F_{14\text{keV}-195\text{keV}} \quad (3.47)$$

よって式 3.47 を使うことで、14keV から 195keV までのフラックスを 15keV から 55keV までに変換した。また、この式中の Γ は天体それぞれの光子指数の値であるが、 $\Gamma = 2$ のときは式 3.45 の $A/(\Gamma - 2)$ の分母が 0 になってしまい、フラックス値が発散してしまう。今回の解析天体の中に光子指数が完全に 2 になっているものは無かったので、今回は特にフラックスが発散することにはならなかった。

3.6 解析結果— $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析・logN-logS 分布

今回の 70ヶ月間観測における FSRQ と BL Lac で logN-logS を作成した結果を図 3.9 に示す。ここで図 3.9 の黒線は、sky-coverage 補正をかける前の logN-logS(以下、本論文ではこれを observed logN-logS と呼

ぶ) で、赤線は sky-coverage 補正をかけた後の logN-logS(以下、本論文ではこれを corrected logN-logS と呼ぶ) であり、横軸がフラックス、縦軸は単位平方度あたりの累積天体 $N(> S)$ を表す。

ここで、logN-logS 中のそれぞれのエラーバーはポアソン分布エラーを仮定している。 $N(S)$ をあるフラックス S での天体数 (累積ではない) とすると、logN-logS のポアソン分布エラー dN は、標準偏差を考えて、

$$dN(S) = \sqrt{\frac{1}{N(S)} \times \frac{1}{\Omega(S)}} \quad (3.48)$$

となる。ここで $\Omega(S)$ はフラックス S に対応する観測領域 (deg^2) であり、sky-coverage による補正項である。今、 n 個の天体があり、明るい方から順にフラックスが $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ であるとする。このとき、あるフラックス S_a より明るい天体数 $N(> S_a)$ の誤差は累積を考えて、

$$\begin{aligned} dN(> S_a) &= \sqrt{dN(S_1)^2 + dN(S_2)^2 + \dots + dN(S_a)^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{N(S_1)} \left(\frac{1}{\Omega(S_1)}\right)^2 + \frac{1}{N(S_2)} \left(\frac{1}{\Omega(S_2)}\right)^2 + \dots + \frac{1}{N(S_a)} \left(\frac{1}{\Omega(S_a)}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.49)$$

ここで、あるフラックス S に対応する天体は必ず 1 つだけなので、 $\frac{1}{N(S)}$ は 1 になる。よって、logN-logS のポアソン分布エラーは以下ようになる。

$$dN(> S_a) = \sqrt{\left(\frac{1}{\Omega_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Omega_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{\Omega_a}\right)^2} \quad (3.50)$$

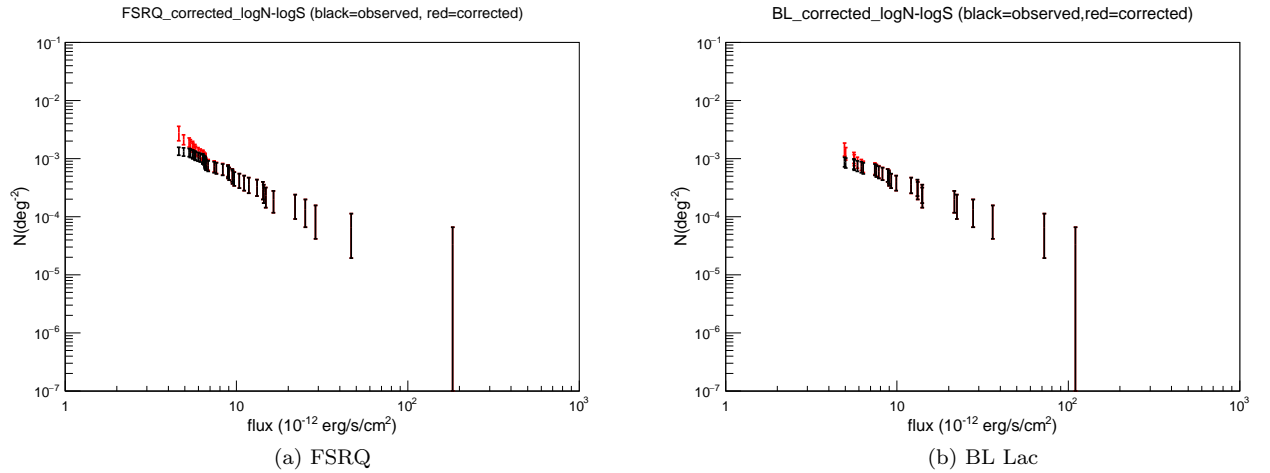


図 3.9: observed logN-logS (黒線) と、corrected logN-logS (赤線)

図 3.9 より、observed logN-logS も corrected logN-logS も高いフラックスのところでは差は特に無いが、フラックスが低くなってくると logN-logS に差が生じ、corrected logN-logS が observed logN-logS に比べ

て、暗い天体数が多くなっている。これは検出限界フラックスよりも明るい、観測時間や観測領域の影響により検出されなかった天体の数を sky-coverage が補正したからである。

また、得られた corrected logN-logS と先行研究 [12] の 22ヶ月間観測の logN-logS と比較したものを図 3.10 に示す。図 3.10 で黒線は今回の 70ヶ月間観測の corrected logN-logS、赤線が先行研究の 22ヶ月間観測の corrected logN-logS である。

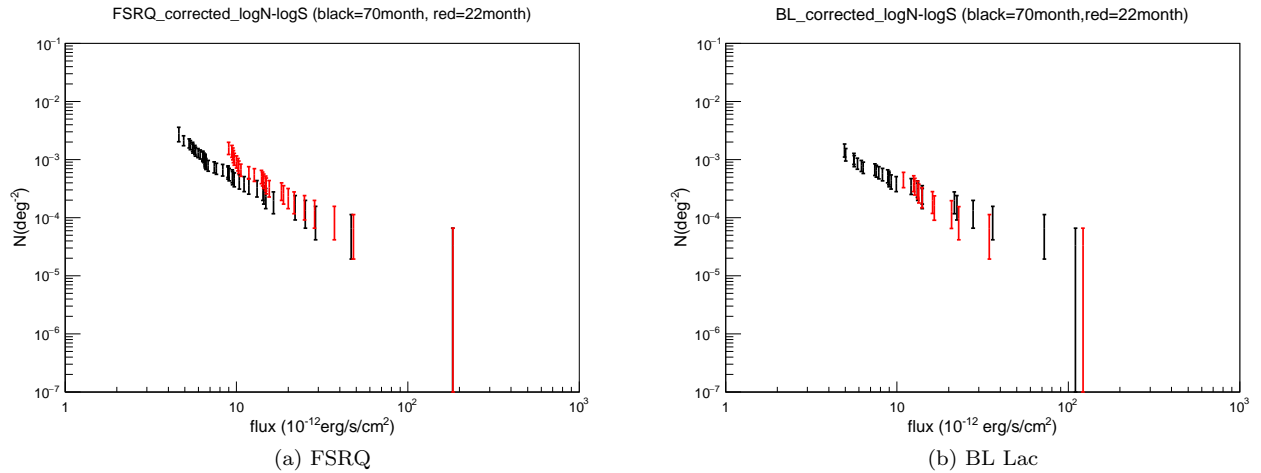


図 3.10: 70ヶ月間観測の corrected logN-logS (黒線) と、22ヶ月間観測の corrected logN-logS [12](赤線)

図 3.10 より、今回の 70ヶ月間観測での logN-logS と先行研究の 22ヶ月間観測の logN-logS を比べると、フラックスの高い側はほぼ同じだが、フラックスの低い側に 22ヶ月間観測では無かったプロット点が、70ヶ月間観測での logN-logS では追加されている。これは観測時間が上昇したことで、暗い方の天体も検出できるようになり、22ヶ月間観測では分からなかったより暗いフラックス側での結果が得られたからである。また、図 3.10(a) の FSRQ を見てみると、フラックスが $12 \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$ より高いところでは、赤線も黒線も特に差はないが、 $10 \sim 12 \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$ のところでは黒線と赤線に差が生じ、赤線が黒線より上部に存在する。これについては原因については 4 章にて考察する。

次に、今回得られた corrected logN-logS を powerlaw モデル ($N(> S) = AS^{-\beta}$) でフィッティングしてみる。フィッティングした図を図 3.11 に示す。またそのフィッティングの結果得られた logN-logS の傾き β を表 3.1 に示す。この表 3.1 には比較のために、22ヶ月間観測による同様のフィッティング結果も記載している。また、 $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析の結果も同様に記載している。

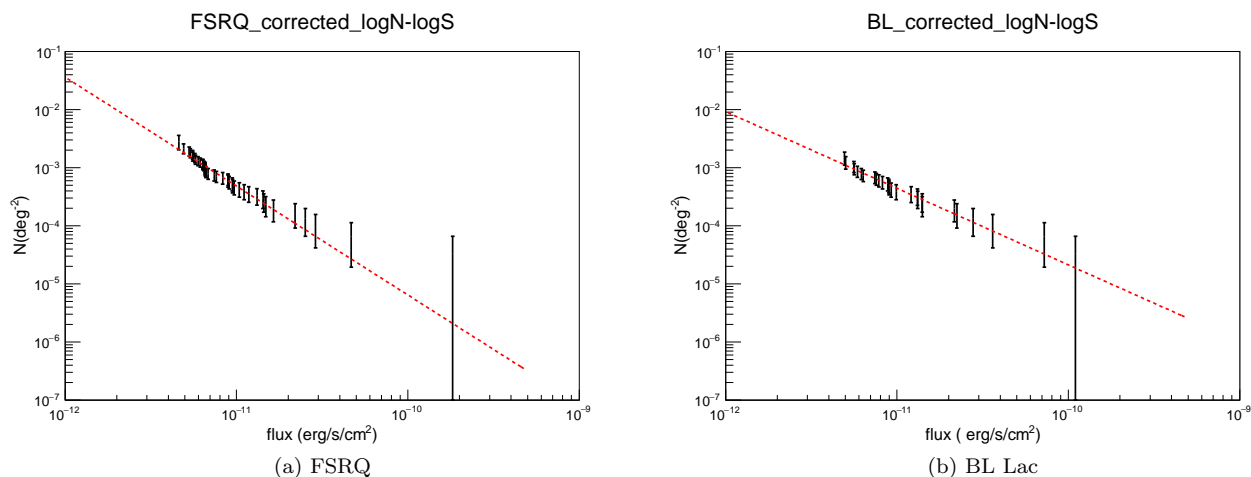


図 3.11: 70ヶ月間観測の corrected logN-logS (黒線) と、22ヶ月間観測の corrected logN-logS [12](赤線)

表 3.1: $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析の結果と logN-logS の傾き。比較のために先行研究の結果 [12] も記載している

サンプル	$\langle V/V_{max} \rangle$	β	天体サンプル数
FSRQ (22month)	0.728 ± 0.056	2.077 ± 0.269	26
FSRQ (70month)	0.52 ± 0.05	1.87 ± 0.07	41
BL Lac (22month)	0.576 ± 0.083	1.694 ± 0.316	12
BL Lac (70month)	0.32 ± 0.06	1.32 ± 0.13	27

Notes.

(70month) は今回の解析結果、(22month) は先行研究の 22ヶ月間観測で解析結果 [12] である。

表 3.1 より、FSRQ は $\langle V/V_{max} \rangle$ の値が 0.5 より大きく、logN-logS の傾きも -1.5 より急である。また BL Lac の場合、 $\langle V/V_{max} \rangle$ の値は 0.5 より小さく、logN-logS の傾きは -1.5 よりも緩やかになっているのが分かる。また、先行研究の結果と比較してみると、FSRQ と BL Lac の両方とも $\langle V/V_{max} \rangle$ 、 β の値が下がっているのが分かる。これらの考察は第 4 章に記述する。

3.7 ガンマ線での FSRQ と X 線での FSRQ は同じ種族のものか

本研究の意義は、最新のデータを用いてブレーザーのサンプル数を増加させれば、天体数の少なさによる不定性はいくらか解消され、図 1.7 のようにガンマ線と X 線での結果が無矛盾になるのではないかといいところにあるが、そもそもガンマ線で見ついているブレーザーと X 線で見ついているブレーザーが全く異なる種族のものである可能性もある。そのため、X 線でのブレーザーとガンマ線でのブレーザーが同じ種族のものかどうかを検証する。まず初めに、今回の対象とする FSRQ : 41 天体と BL Lac : 27 天体のうち、ガンマ線でも観測されている天体が何個あるか調べる。今回はガンマ線で検出されているかどうかを調べるため、“LAT 4-year Point Source Catalog” [35] を使用した。このカタログは *Fermi* 衛星-LAT 検出器の 48ヶ月間のガンマ線サーベイにより見つかった天体を記載したカタログであり、0.1GeV から 300GeV の帯域で見つかったガンマ線天体 3033 個の情報が記載されている [36]。このカタログと今回の FSRQ と BL Lac を比較し、NED を利用しながら同じ天体かどうかを確認した。その結果、FSRQ : 26 個、BL Lac : 15 個が LAT 4-year Point Source Catalog にも記載されていた。つまり FSRQ・BL Lac のどちらとも半分以上がガンマ線でも観測されていたことになるので、ガンマ線で見えてるブレーザーと X 線で見えてるブレーザーが全く異なる種族のものであるとは考えにくい。どの天体が *Fermi* 衛星で検出されていたかについては、付録の表 A.1 に載せている。

また別の方法でもガンマ線のブレーザーと X 線のブレーザーが同じ種族なのかどうかを確認してみる。その方法とは既に得られているガンマ線の光度関数から X 線の $\log N$ - $\log S$ を導出し、今回得られた corrected $\log N$ - $\log S$ と比較する方法である。詳しい計算方法の前に、まず光度関数について記述する。

3.7.1 光度関数

光度関数とは、ある光度あたり、ある共動体積あたりに含まれる天体数を光度と赤方偏移を変数として表した関数である。よって、ある共動体積 dV 中に含まれる、光度が L から $L + dL$ の間にある天体の数 N は光度関数 $\Phi(L, z)$ を使うと以下のように表される。

$$N = \Phi(L, z)dLdV \quad (3.51)$$

この光度関数を用いれば、天体の各赤方偏移あたりにどのような明るさの天体が何個あるかがわかるので、観測結果からその天体の光度関数モデルを構築できれば、天体の赤方偏移分布の様子を求めることができ、ここから宇宙論的進化の傾向をより詳しく知ることができる。また、この光度関数を赤方偏移と光度で積分することにより、その天体の $\log N$ - $\log S$ を導出することもできる。今、天体の光度関数が $\Phi(L, z)$ のとき、この天体のあるフラックス S_0 よりも明るい天体数 ($N(> S_0)$) は、全天で

$$N(> S_0) = \int_{z_{min}}^{z_{max}} dz \frac{dV}{dzd\Omega} \int_{L_0}^{L_{max}} \Phi(L, z)dL \quad (3.52)$$

ここで L_0 はフラックス S_0 に対応した光度で、

$$L_0 = 4\pi D_L(z)^2 S_0 (1+z)^{\Gamma-2} \quad (3.53)$$

である。また式 3.52 中の $dV/dzd\Omega$ は単位赤方偏移あたり単位立体角あたりの共動体積要素である。共動体積とは共動座標上での体積であり、ある微小共動距離 $d\chi$ と、宇宙を半径 χ の球と仮定したときの微小表面積 dA を仮定すると、微小共動体積は、

$$dV = dAd\chi \quad (3.54)$$

となる。ここで dA を微小立体角 $d\Omega$ を用いて表すと、 $dA = \chi^2 d\Omega$ になるので、上式は

$$dV = \chi^2 d\Omega d\chi \quad (3.55)$$

になる。微小共動距離 χ は、式 3.25 の両辺を微分することにより、

$$d\chi = \frac{cdz}{H(z)} = \frac{cdz}{H_0 \sqrt{(1+z)^3 \Omega_m + \Omega_\Lambda - (1+z)^2 K}} \quad (3.56)$$

となり、また共動距離 χ と光度距離 $d_L(z)$ には

$$\chi = \frac{d_L(z)}{1+z} \quad (3.57)$$

の関係があるので、これより式 3.55 を書きなおすと、共動体積要素として、

$$\frac{dV}{dzd\Omega} = \frac{cd_L(z)^2}{(1+z)^2 H_0 \sqrt{(1+z)^3 \Omega_m + \Omega_\Lambda - (1+z)^2 K}} \quad (3.58)$$

が得られる。

この式 3.52 で、フラックス S_0 の値をいくつか変えていき、それに対する累積天体数 ($N(> S_0)$) をプロットしていけば、その天体の $\log N$ - $\log S$ が作れる。以下では先行研究である、*Swift* 衛星の 22ヶ月間のデータから得られた FSRQ の X 線光度関数 (XLF ; X-ray Luminosity Function) と、*Fermi* 衛星のデータから得られた FSRQ のガンマ線光度関数 (GLF ; Gamma-ray Luminosity Function) から $\log N$ - $\log S$ を求め、今回の corrected $\log N$ - $\log S$ と比較している。

3.7.2 X 線光度関数からの $\log N$ - $\log S$

Swift 衛星の 22ヶ月間観測の結果から得られた FSRQ 天体の解析結果によると、X 線での FSRQ は以下のような XLF モデルで表せられる [11]。

$$\Phi(L_X, z) = \frac{A}{(\ln 10)L_X} \left[\left(\frac{L_X}{L_* (1+z)^{k+\gamma z}} \right)^{\gamma_1} + \left(\frac{L_X}{L_* (1+z)^{k+\gamma z}} \right)^{\gamma_2} \right] \quad (3.59)$$

これを式 3.52 の積分式に代入し、適当なフラックスにおける累積天体数 $N(> S)$ を算出すれば、22ヶ月間観

測の結果得られる FSRQ の $\log N$ - $\log S$ が求まる。図 3.12 にその計算から算出された $\log N$ - $\log S$ を示しており (図中の青線)、比較として実際に 22ヶ月間観測から得られた FSRQ の $\log N$ - $\log S$ も描写している [12](図中の黒線)。また、計算に使用したそれぞれのパラメーターの値を表 3.2 に示す。このパラメーターは先行研究より、式 3.59 のモデルを用いた時の FSRQ のベストフィットなパラメーターである。

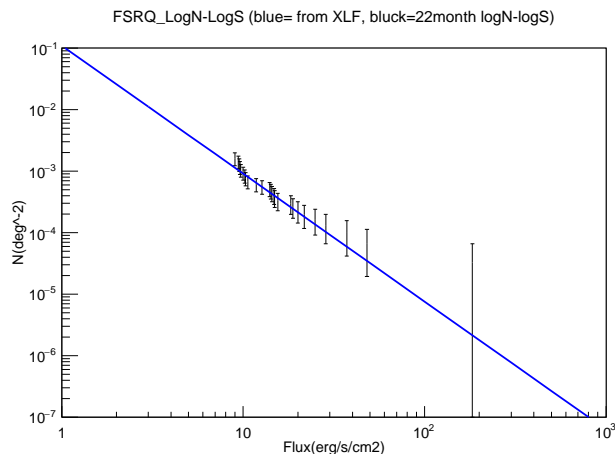


図 3.12: 先行研究の XLF モデル [12] から計算した FSRQ の $\log N$ - $\log S$ (青線)。黒線は比較のために描写した 22ヶ月間観測による FSRQ の $\log N$ - $\log S$ である。

表 3.2: XLF から $\log N$ - $\log S$ の算出に使用した各種パラメーター

A	$0.175(\pm 0.034) \times 10^{-7}$
γ_1	< -50
γ_2	2.49 ± 0.37
L_*	$2.42(\pm 0.19) \times 10^{44}$
k	3.67 ± 0.48
γ	-0.30 ± 0.08
z_{min}	0
z_{max}	6
L_{max}	∞

3.7.3 ガンマ線光度関数からの $\log N$ - $\log S$

Fermi-LAT の 1 年間の観測結果から得られた FSRQ 天体の解析結果によると、ガンマ線での FSRQ は以下のような GLF モデルで表せられる [11]。

$$\Phi(L_\gamma, z) = \frac{A}{(\log 10) \times L_\gamma} \left[\left(\frac{L_\gamma}{L_*} \right)^{\gamma_1} + \left(\frac{L_\gamma}{L_*} \right)^{\gamma_2} \right]^{-1} \times e(z, L_\gamma) \quad (3.60)$$

ここで、

$$e(z, L_\gamma) = \left[\left(\frac{1+z}{1+z_c(L_\gamma)} \right)^{p_1} + \left(\frac{1+z}{1+z_c(L_\gamma)} \right)^{p_2} \right]^{-1} \quad (3.61)$$

かつ、

$$z_c(L_\gamma) = z_c^* \times \left(\frac{L_\gamma}{10^{48}} \right)^\alpha \quad (3.62)$$

である。またそれぞれのパラメーターは以下の表 3.3 に示している。またこの先行研究での GLF は、単位光度、単位共動体積、単位光子指数あたりの天体数を表した関数になっているので、GLF から logN-logS を導出するには光子指数でも積分する必要がある。したがって、この GLF から logN-logS を求める積分式は、

$$N(> S) = \int_{\Gamma_{min}}^{\Gamma_{max}} \frac{dN}{d\Gamma} d\Gamma \int_{z_{min}}^{z_{max}} \frac{dV}{dz d\Omega} dz \int_{L(z,S)}^{L_{\gamma,max}} \Phi(L_\gamma, z) dL_\gamma \quad (3.63)$$

ここで $dN/d\Gamma$ は、光子指数に対する天体数がガウス分布に従うとして、

$$\frac{dN}{d\Gamma} = e^{-\frac{(\Gamma-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.64)$$

としている。この分散 σ と平均 μ の値も表 3.3 に載せている。

表 3.3: GLF から logN-logS の算出に使用した各種パラメーター [11]

parameter	value	parameter	value
A	$3.06(\pm 0.23) \times 10^{-9}$	μ	2.44 ± 0.01
γ_1	0.21 ± 0.12	σ	0.18 ± 0.01
L_*	$0.84(\pm 0.49) \times 10^{48}$	Γ_{max}	3.0
γ_2	1.58 ± 0.27	Γ_{min}	1.8
z_c^*	1.47 ± 0.16	z_{max}	6
α	0.21 ± 0.03	z_{min}	0.01
p_1	7.35 ± 1.74	$L_{\gamma,max}$	$10^{52}(\text{erg/s})$
p_1	-6.51 ± 1.97		

この式 3.63 の積分から 0.1GeV から 300GeV のガンマ線帯域での $\log N$ - $\log S$ を計算すると、図 3.13 が得られた。この図を見ると、フラックスが小さくなればなるほど $N(> S)$ が大きくなるわけではなく、あるフラックスより暗いところで $\log N$ - $\log S$ は頭打ちになっている。この $\log N$ - $\log S$ と自分が今回求めた corrected $\log N$ - $\log S$ はエネルギー帯域が異なる $\log N$ - $\log S$ なので、比較するにはエネルギー帯域を合わせる必要がある。そのため、この図 3.13 の $\log N$ - $\log S$ を 15keV から 55keV の $\log N$ - $\log S$ に変換する。その変換の方法を次に記述する。

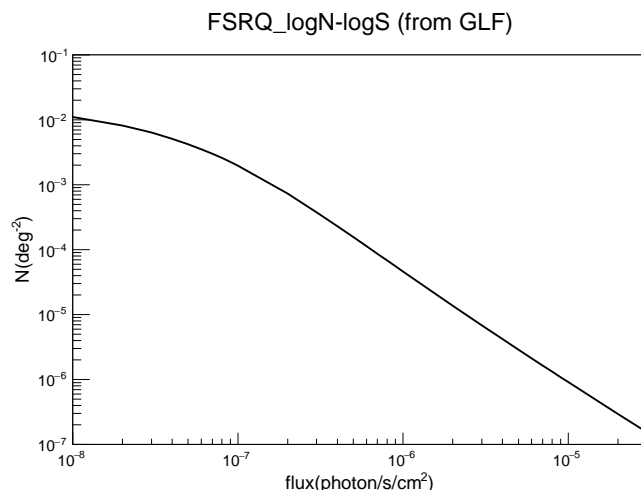


図 3.13: GLF から計算した 0.1GeV~300GeV 帯域での FSRQ の $\log N$ - $\log S$ 。

3.7.4 ガンマ線帯域から X 線帯域への変換

これまでエネルギー帯域の変換は式 3.47 のように、エネルギースペクトルとして powerlaw モデル ($F(E) = AE^\Gamma$) を仮定し、エネルギー帯域が異なってもこのスペクトルの形は変わらないとして変換してきた。しかし、ガンマ線のスペクトルと X 線のスペクトルは同じ一つの powerlaw モデルでは表せられないので、この仮定を基にした変換式は使用できない。ガンマ線と X 線の変換を行うには、両者の平均 SED を求めて、それをスペクトルの形として適用する必要がある。X 線とガンマ線の FSRQ の平均 SED については先行研究 [11] より求められている。図 3.14 がその平均 SED である。

この図では FSRQ のガンマ線での光度が $10^{45.9} \sim 10^{47.6}$ [erg/s] なら黒線、 $10^{47.6} \sim 10^{47.9}$ [erg/s] なら赤線、 $10^{47.9} \sim 10^{48.5}$ [erg/s] なら緑線、 $10^{48.5} \sim 10^{49.3}$ [erg/s] なら青線の帯上の SED になることを示している。このグラフの平均 SED だけでは、変動する光度に対して 4 つの SED しか描けないので、それぞれの 4 つの SED のグラフを数値化したのち、重み付き平均で平均 SED を作成する。グラフを数値化する際は SED が帯状になっているので、その中心を通るようにグラフ数値化し、得られた曲線が、それぞれ 4 つの SED が対応する光度範囲の平均光度の SED であるとした。すなわちこのグラフ数値化の段階で、FSRQ の光度が $L = 10^{46.8}, 10^{47.8}, 10^{48.2}, 10^{48.9}$ に対応する 4 つの SED が求めた。これらの重み付き平均 SED は以下のように計算する。例えば L_A と L_B の間の光度 L_a に対応する SED を求めるなら、

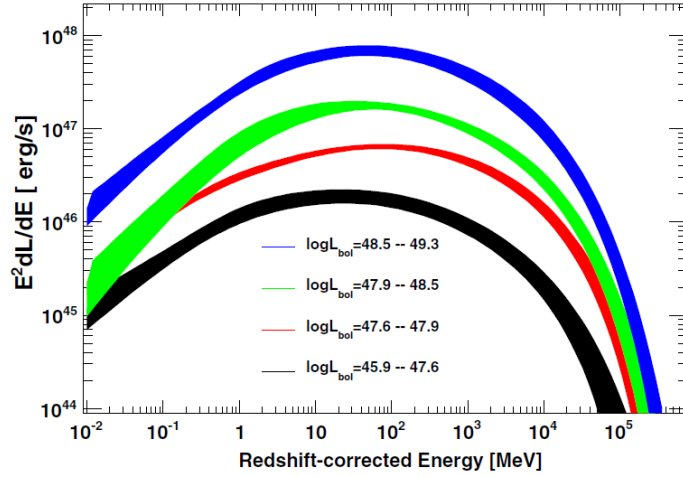


図 3.14: FSRQ の平均 SED[11]

$$\log_{10} (SED_{L_a}) = \frac{|L - L_A| \log_{10} (SED_{L_B}) + |L - L_B| \log_{10} (SED_{L_A})}{|L_A - L_B|} \quad (3.65)$$

で重み付き平均 SED を求められる。ここで SED_{L_A} は光度 L_A に対応する SED で、 SED_{L_B} は光度 L_B に対応する SED を表す。このようにして得られた、ある光度 L のときの重み付き平均 SED を $f_L(E)$ とする。SED は $E^2 dN/dE$ で表されるので、ここからあるエネルギー帯域でのフラックスを算出するには、

$$F = \int_{E_0}^{E_1} \frac{dN}{dE} \times E dE = \int_{E_0}^{E_1} SED(E) \frac{1}{E} dE \quad (3.66)$$

よってガンマ線 (0.1-300GeV)、X 線 (15-55keV) でのフラックスは、

$$F_{L,\gamma}(E) = \int_{0.1\text{GeV}}^{300\text{GeV}} f_L(E) \times \frac{1}{E} dE \quad (3.67)$$

$$F_{L,X}(E) = \int_{15\text{keV}}^{55\text{keV}} f_L(E) \times \frac{1}{E} dE \quad (3.68)$$

となる。フラックスと光度には式 3.12 より 1 対 1 の関係があるので、ガンマ線の光度と X 線の光度には以下のような関係があると言える。

$$L_\gamma = \frac{\int_{0.1\text{GeV}}^{300\text{GeV}} f_{L_X}(E) \times \frac{1}{E} dE}{\int_{15\text{keV}}^{55\text{keV}} f_{L_X}(E) \times \frac{1}{E} dE} L_X = \alpha(L_X) \quad (3.69)$$

これを用いて、式 3.63 を X 線帯域の $\log N$ - $\log S$ を導出する式に変換すると、以下ようになる。

$$N(> S) = \int_{\Gamma_{min}}^{\Gamma_{max}} \frac{dN}{d\Gamma} d\Gamma \int_{z_{min}}^{z_{max}} \frac{dV}{dz d\Omega} dz \int_{\alpha^{-1}(L_X(z,S))}^{\alpha^{-1}(L_{X,min})} \Phi(L_\gamma, z) dL_\gamma \quad (3.70)$$

これにより、FSRQ の GLF を X 線帯域 logN-logS に変換すると図 3.15 の赤線のようにになった。ここでは比較として今回自分が導出した 70month カタログによる FSRQ の corrected logN-logS (黒線) と図 3.12 の XLF モデルから計算した FSRQ の logN-logS (青線) も一緒に描写している。図 3.15 を見てみると、70month カタログによる FSRQ の corrected logN-logS は青線の XLF モデルとは低フラック側で違いが見られるが、赤線の GLF モデルにはおおむね合致しているように見える。

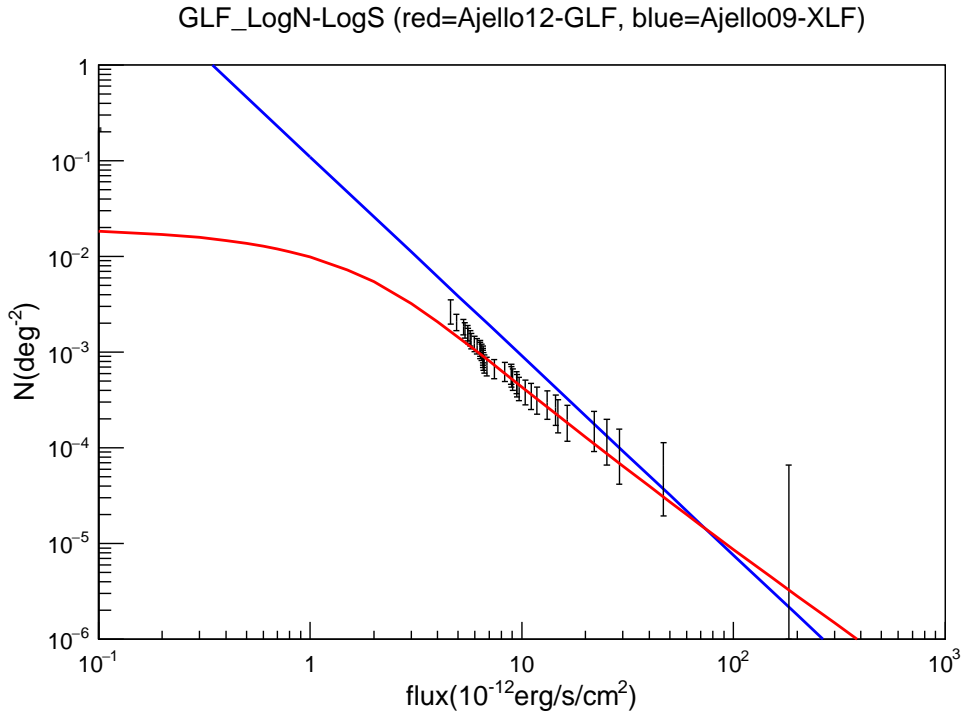


図 3.15: GLF モデルから算出した X 線帯域での logN-logS (赤線)。また青線は図 3.12 の XLF モデルからの logN-logS で、黒線は今回の 70ヶ月間観測からの FSRQ の logN-logS である。

第4章 考察

4.1 $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析と logN-logS 分布

4.1.1 低フラックスでの不定性

図 3.10 より、FSRQ の 70ヶ月間観測での logN-logS と 22ヶ月間観測の logN-logS を比べると、フラックスの高い側 ($\text{Flux} > 12 \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$) ではほぼ一致するが、低い側 ($\text{Flux} = (10 \sim 12) \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$) では両者に差が生じることが確認された。22ヶ月間観測と 70ヶ月間観測では違いは露光時間だけなので、22ヶ月間観測に比べて 70ヶ月間観測でプロット点は増えても、logN-logS の形は大きく変化しないはずである。この差が生じた一つの原因として考えられるのは、sky-coverage 補正での系統誤差である。図 3.8 の sky-coverage を構築するまでの計算過程において、計算手法や計算ソフトなどにより系統誤差が発生する。通常は、最終的にそのような誤差も含めて計算するのだが、この図 3.8 ではその系統誤差は無視して作られている。そのため、もしこの系統誤差を考慮して sky-coverage 補正を行えば、logN-logS 分布図上でのそれぞれのエラーバーにその系統誤差が現れてくる。なので、系統誤差も考慮した上での 22ヶ月間観測と 70ヶ月間観測の比較が重要になる。

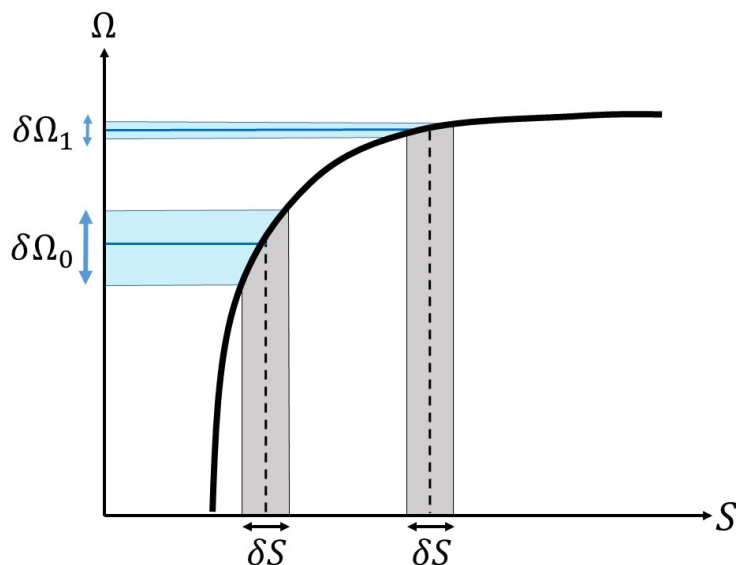


図 4.1: 低フラックス側で sky-coverage の誤差が大きくなること概念図。フラックスの高いところでの誤差 δS に対する sky-coverage の誤差は $\delta\Omega_0$ になるが、フラックスが低いところでは誤差が大きくなり $\delta\Omega_1$ になっている。

別の原因として考えられるのは、観測されたフラックス自体の誤差である。付録 A の表 A.1 に今回解析を行った全 68 天体のフラックスのカタログ値を載せているが、70month カタログではそれぞれのフラックス値に 90% の信頼区間を設けている。そのため平均的に $\pm(4 \sim 5) \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$ の誤差が付いている。この誤差は、特に低フラックスの場合で、sky-coverage 補正をする際に問題になってくる。例えば図 4.1 のような sky-coverage を仮定する。フラックスの高いところでは δS の誤差に対して sky-coverage の誤差は $\delta\Omega_1$ だが、フラックスの低いところでは同じ誤差 δS でも、それに対する sky-coverage の誤差は $\delta\Omega_0$ と、 $\delta\Omega_1$ よりも大きな誤差になる。これは sky-coverage があるフラックスのところでは折れ曲がるような形をしているためである。今回の解析ではこのフラックスの誤差は無視しているが、この誤差も考慮すると、特に低フラック側での $\log N\text{-}\log S$ のエラーバーが現状のものより大きくなる。よって 22ヶ月間観測の低フラック側でこの誤差も考慮してみれば、70ヶ月間観測の $\log N\text{-}\log S$ が誤差の範囲で一致すると思われる。これを実際に確認してみる。ここでは簡単のために、全ての天体のフラックスの誤差は $\pm 4.5 \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$ であると仮定した。これは 70month カタログ上での誤差なので、エネルギー帯域が 14keV から 195keV でのフラックス誤差である。これを式 3.47 を用いて 15-55keV の帯域のフラックスに変換すると、 $\pm 1.7 \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$ の誤差になった。変換の際の光子指数の値としては、FSRQ の平均的な光子指数 $\Gamma = 1.6$ を用いている。

このフラックスの誤差による $\log N\text{-}\log S$ への影響を図 4.2 に示す。この図 4.2 の赤線が 22ヶ月観測からの $\log N\text{-}\log S$ で、ピンクの領域がフラックスの誤差を考慮したときの 22month $\log N\text{-}\log S$ の誤差である。22month $\log N\text{-}\log S$ のそれぞれのプロット線 (赤線) に、x 軸の誤差として ± 1.7 を付加し、また y 軸の誤差は誤差も考慮した sky-coverage ($\Omega + \delta\Omega$, $\Omega - \delta\Omega$) に対応する $\log N\text{-}\log S$ を描写して、その値を y 軸の誤差 ($+\delta y$, $-\delta y$) としている。そうして得られた x 軸・y 軸の誤差範囲を長方形として描写したものがピンクの誤差領域である。これを見るとフラックスの高いところでは赤線とピンクの領域はほぼ同じだが、フラックスが低くなるにつれてピンクの領域が広がっており、黒線と重なっている。よってこのピンクの誤差領域も考慮すると、フラックスが $(10 \sim 12) \times 10^{-12} [\text{erg/s/cm}^2]$ のところでは一致しなかった FSRQ の 70ヶ月間観測での $\log N\text{-}\log S$ (黒線) と 22ヶ月間観測の $\log N\text{-}\log S$ (赤線) が誤差の範囲内で一致することになる。

4.1.2 $\langle V/V_{max} \rangle$ の値と $\log N\text{-}\log S$ の傾きについて

ここでは今回の解析の結果得られた、FSRQ と BL Lac の $\langle V/V_{max} \rangle$ の値と $\log N\text{-}\log S$ の傾きについて考察を行う。

まず FSRQ についてだが、 $\langle V/V_{max} \rangle$ の値は 0.52 ± 0.05 となった。これは一様分布を仮定した場合の値、 $\langle V/V_{max} \rangle = 0.5$ よりも大きな値であるため、FSRQ は遠方に分布していると言える。また $\log N\text{-}\log S$ の傾きも $\beta = 1.88$ と、一様分布の場合の $\beta = 1.5$ より急である。すなわち明るい天体より暗い天体の方が多く、遠方に FSRQ が多く存在していると言える。よって、この $\langle V/V_{max} \rangle$ の解析結果と $\log N\text{-}\log S$ の傾きは、どちらとも FSRQ が遠方に分布が偏っていることを支持している。FSRQ はクェーサーの一種と考えられており、クェーサーは他の観測により、一般的に $z > 0.1$ の遠方にしか存在しないことが知られているので、この結果はその事実とつじつまが合う。

次に BL Lac についてだが、 $\langle V/V_{max} \rangle$ の値は 0.32 ± 0.06 となり、0.5 よりも小さな値であるので、一様分布に比べると BL Lac は近傍に分布していると言える。また、 $\log N\text{-}\log S$ の傾きも $\beta = 1.318$ と、一様分布の場合の $\beta = 1.5$ より緩やかであるので、これも同じく BL Lac は近傍に分布していることを意味する。

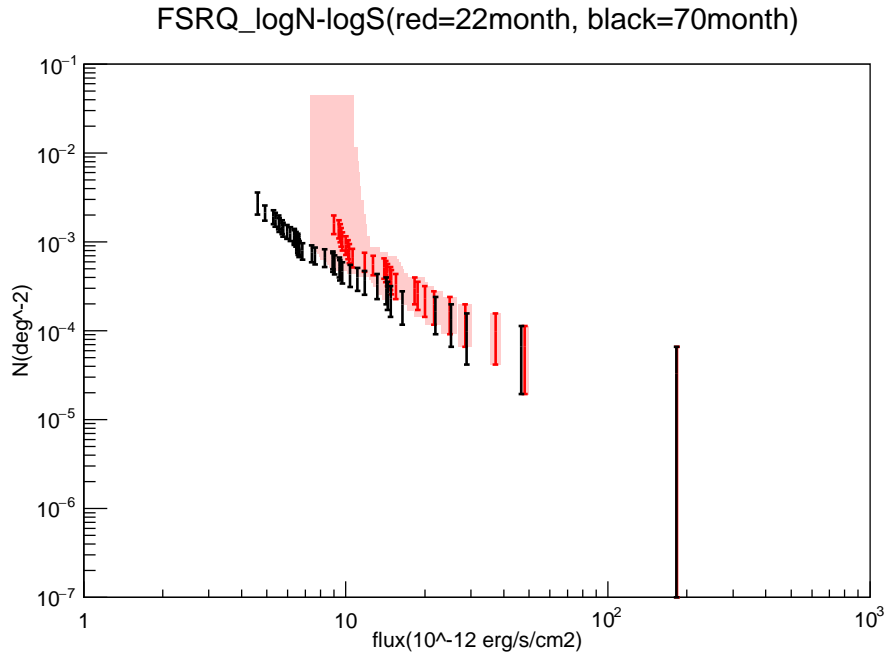


図 4.2: フラックスの誤差を考慮したときの 22month logN-logS。赤線が 22ヶ月観測からの logN-logS で、ピンクの領域がフラックスの誤差を考慮したときの logN-logS の誤差の部分

よってこの $\langle V/V_{max} \rangle$ の解析結果と logN-logS の傾きは、どちらも BL Lac が近傍に分布が偏っていることを支持している。

また、FSRQ の結果を先行研究である 22ヶ月間観測での結果と比較してみると、 $\langle V/V_{max} \rangle$ の値は先行研究が 0.728 だったのに対し、今回は 0.52 なので、値が 0.5 に近づいているのが分かる。また logN-logS の傾きも先行研究が $\beta = 2.077$ だったのに対して今回は $\beta = 1.88$ と傾きが緩やかになっている。以上の特徴はどちらも、今回の結果は先行研究のときほどは遠方に分布していない結果になっていることを表している。なので今回の結果を基に、より詳細に FSRQ の宇宙論的進化の傾向を調べれば、図 1.7 のように X 線での FSRQ がガンマ線での FSRQ よりはるかに遠方に分布するような結果にはならないのではないと思われる。

4.2 ガンマ線での FSRQ と X 線での FSRQ

図 3.15 の結果から、GLF モデルから算出した X 線帯域での logN-logS(図 3.15 の赤線) と今回の corrected-logN-logS に大きな差が無く、また今回天体サンプルとして用いた FSRQ/BL Lac の計 68 天体のうち、半分以上が *Fermi* 衛星で観測されていることから、今回の *Swift* 衛星が観測した FSRQ は *Fermi* 衛星が観測したものと同一種族のものであると言える。そのため図 1.7 のように、ガンマ線と X 線での結果が大きく異なるのは、ガンマ線と X 線で見ている天体が違う種族のものだという考えは棄却できる。

また図 3.15 より、今回の FSRQ の観測された logN-logS と GLF・XLF から求めた logN-logS を比較したところ、観測の結果は XLF ではなく GLF のモデルの方に合致しているように見える。先行研究 [11][12]

では、この GLF・XLF それぞれから FSRQ の赤方偏移分布図を作成すると、GLF からは図 1.7 の水色線が、XLF からは図 1.7 の黄色線が導かれている。今回用いた FSRQ 天体が GLF モデルと同じような光度関数モデルで表せれるとするならば、FSRQ の赤方偏移ピークは $z=4$ のような遠方ではなく、もっと近傍である可能性が高い。つまり XLF モデルから導いた図 1.7 の黄色線は正しくない可能性が高い。これらをより詳しく調べるためには、今回の 70ヶ月間観測のデータから X 線光度関数を導出し、比較する必要がある。光度関数は赤方偏移と光度の 2 変数関数であるので、X 線光度関数を構築するには天体の赤方偏移分布と光度分布の情報を得る必要がある。

4.3 赤方偏移分布と光度分布

今回の 70month カタログの情報から FSRQ・BL Lac それぞれの赤方偏移分布図のヒストグラムを作成すると、図 4.3 のようになった。また天体の光度を式 3.12 と式 3.28 を用いて計算し、同様に光度分布図のヒストグラムを作成すると、図 4.4 のようになった。ここで縦軸のエラーバーはポアソン分布エラーを表している。またここでは比較のために、先行研究 [12] の 22ヶ月間観測での FSRQ/BL Lac それぞれの赤方偏移分布と光度分布 (図 4.3、図 4.4 の赤線) と、図 4.5 にガンマ線での先行研究 [11] の FSRQ の各種分布も示している。この図 4.3、図 4.4 では、両対数プロット上でピン幅が等間隔になるようにピン幅を変更しているため、縦軸はそれぞれのピン幅で割って規格化した値になっている。この赤方偏移分布と光度分布をいくつかの光度関数モデルでフィッティングすることにより、FSRQ と BL Lac の光度関数を決定することができる。この光度関数が定まれば、それぞれの宇宙論的進化の詳細な特徴を捉えることができる。

4.4 将来衛星の検出レーザー数の予想

今回の解析結果から、レーザーサンプル数が増加したことで FSRQ は先行研究の XLF モデルとは異なり、GLF モデルに近い光度関数になることが示唆された。そのため、今よりもサンプル数が増えれば、より定量的にレーザーの宇宙論的進化について議論できると思われる。サンプル数を増やすにはまだ検出されていないレーザーを見つけなければならないが、未だ検出されていないレーザーは既存衛星の検出感度よりも暗い天体がほぼである。このような暗い天体を既存衛星で検出するには、今よりも長期間観測をして検出感度を向上させる必要がある。しかし、今回解析に用いた *Swift* 衛星は運用開始から既に 12 年経過しており、今後も現在と同じように観測し続けられるとは限らない。そのため X 線帯域での次世代天文衛星の活躍が期待される。そこで重要となってくるのが、将来衛星がどれぐらいのレーザーを検出できるかの予想値である。これは $\log N$ - $\log S$ 分布図を使えば将来衛星の最大検出天体数を大まかに計算することができる。例えば、ある天体の $\log N$ - $\log S$ が $N(> S) = f(S)$ で表されているとき、将来衛星の感度 S_0 であるならば、検出できる天体の最大数は $f(S_0)$ で算出できる。

ここでは今回自分が導出した $\log N$ - $\log S$ 分布図及び先行研究である GLF モデルからの $\log N$ - $\log S$ から、将来衛星の予想検出を大まかに計算し議論する。将来衛星としては *NGHXT* 衛星と *eROSITA* 衛星を想定した。

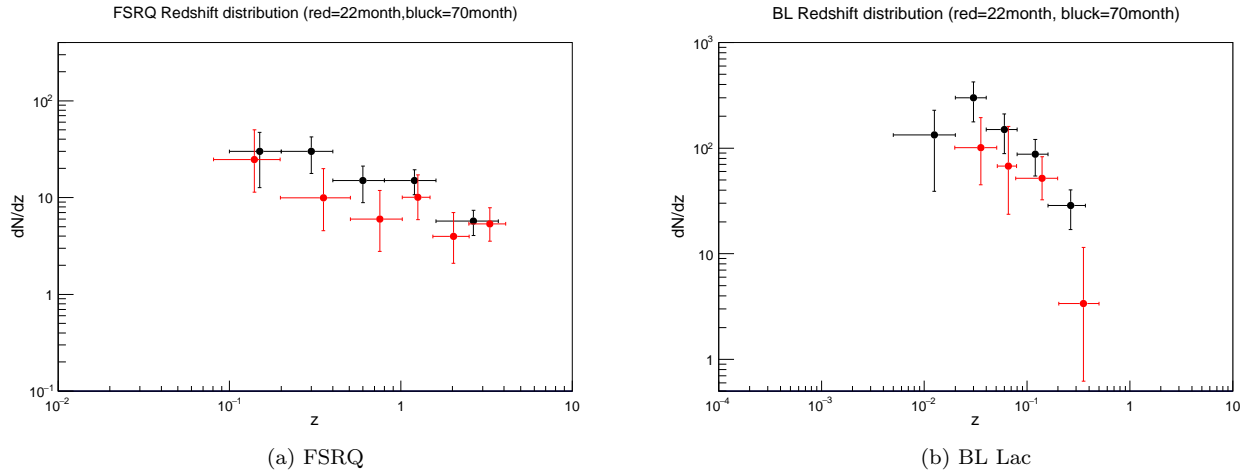


図 4.3: 赤線が 22ヶ月間観測のデータを、黒線が今回の 70ヶ月間のデータを用いたときの赤方偏移分布図

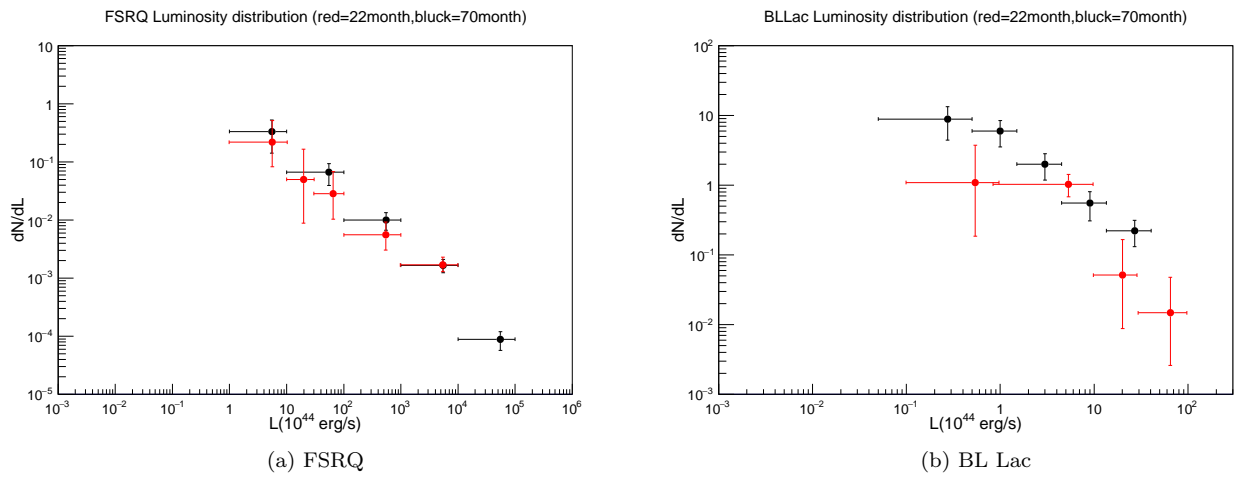


図 4.4: 赤線が 22ヶ月間観測のデータを、黒線が今回の 70ヶ月間のデータを用いたときの光度分布図

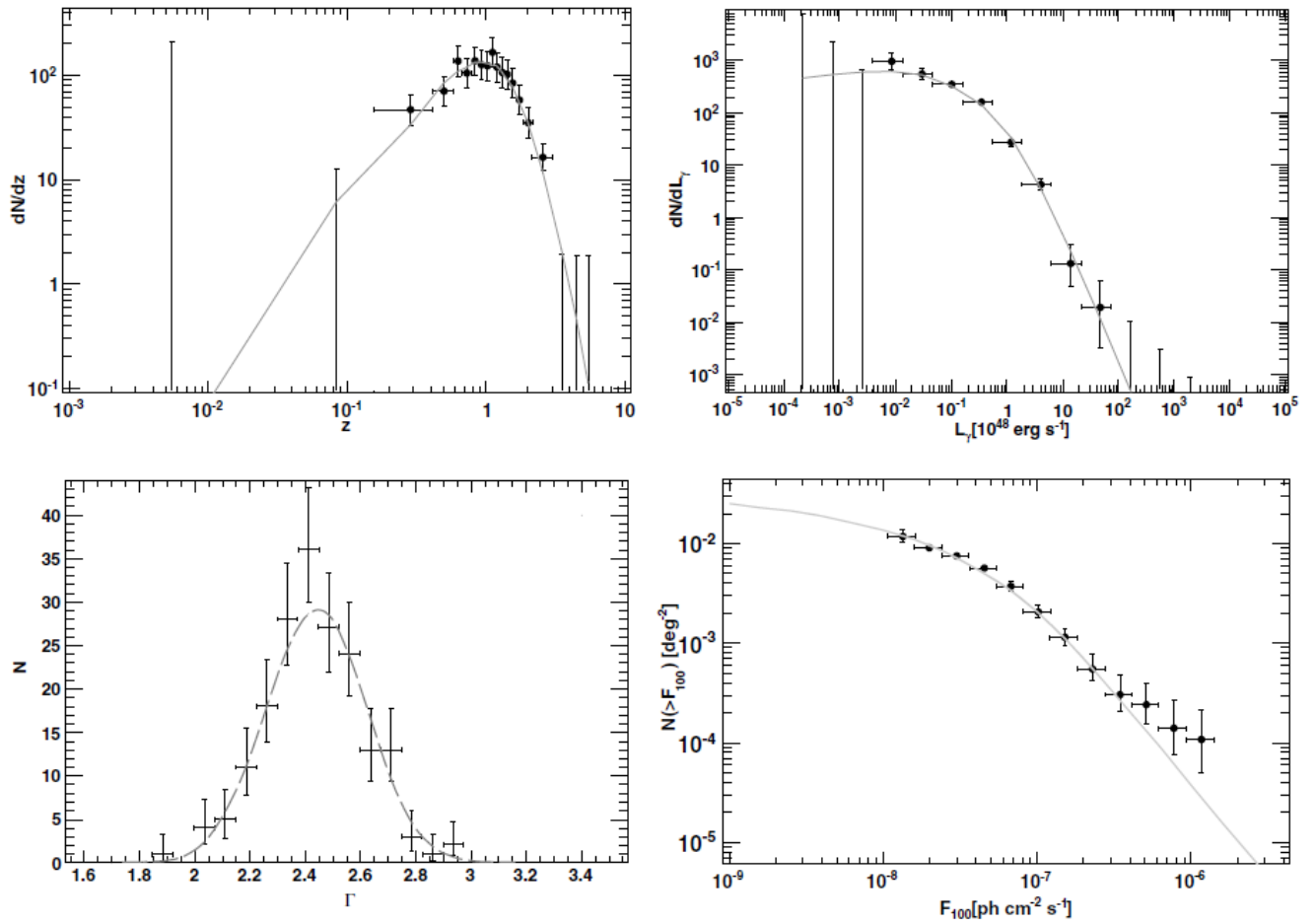


図 4.5: ガンマ線での先行研究 [11] の、FSRQ の各種分布図。左下のグラフから時計回りにガンマ線での光子指数分布図・赤方偏移分布図・光度分布図・logN-logS 分布を示している。

4.4.1 NGHXT 衛星での予想検出数

NGHXT 衛星は広島大学も含め現在日本で計画中の天文衛星であり、2020 年台初頭の実現を目指している [48][49]。NGHXT 衛星は 10keV 以上の硬 X 線領域で、既存の検出器よりも 1 桁以上感度良く観測することにより、まだ発見されていないブラックホールや AGN を見つけることを目標としている。

現代天文学において AGN 中心に存在する巨大ブラックホールの形成過程は未だ謎に包まれているが、銀河同士が合体して爆発的に星形成とガス降着が発生し、その星間ダスト内でブラックホールが急成長するというシナリオが、現在広く提唱されている。これを確認するためにはこのダストに埋もれたブラックホール・AGN を検出する必要があり、NGHXT 衛星はそれら埋もれた AGN を数密度がピークになるところまでカバーして検出する能力を持つ。また埋もれた AGN を観測することで、AGN が起源とされている CXB の本質の起源が分かるのではないかと期待されている。

表 4.1 に示しているのが NGHXT 衛星の性能とその検出目標である。NGHXT 衛星は Wolter I 型ミラーと呼ばれる集光鏡を用いて 10keV 以上の硬 X 線を集光する衛星で、プロジェクトの一環として 360arcmin² の狭い領域を感度 3×10^{-15} [erg/s/cm²] で深く観測する計画が現在立ち上げられている。

この NGHXT 衛星の予想感度とエネルギー帯域から FSRQ の予想最大検出数を見積もると、表 4.3 のようになった。ここでは 70ヶ月間観測から得られた今回の FSRQ の logN-logS を powerlaw モデル ($N(>S) = AS^{-\beta}$) でフィッティングしたモデルと、先行研究の GLF/XLF モデルから導いた logN-logS を用いて、NGHXT 衛星の観測範囲を基に、それぞれの logN-logS から FSRQ の予想検出数を算出している。またこの表 4.3 には比較のために、今回の Swift 衛星の 70ヶ月間観測での感度を基に、Swift 衛星-BAT 検出器の予想最大検出数も記載している。実際の Swift 衛星-BAT 検出器のエネルギー範囲は 14keV から 150keV だが、予想検出数を見積もるときのエネルギー範囲は、作成した logN-logS のエネルギー帯である 15-55keV で計算している。NGHXT 衛星の予想検出数を見てみると、XLF モデルからの結果では単位平方度あたり 22000 個、GLF モデルからの結果では単位平方度あたりに 0.021 個見つかる予想となり、2つのモデル両方で単位平方度あたりに検出する FSRQ 数は Swift 衛星の検出数よりも多くなっている。FSRQ の光度関数モデルとして XLF モデルが正しいとすれば、NGHXT 衛星は 2200 個の FSRQ を検出することになるが、4.2 章から今回の FSRQ が GLF モデルに一致していると仮定すると、NGHXT 衛星の観測範囲では計算上 0.002 個しか検出できないことになり、実質この NGHXT 衛星は FSRQ を観測できないことになる。これは現在の計画では、360arcmin² の狭い領域をより感度良く観測するのが目的であるため、もっと広い領域をサーベイするなら既存の衛星より多くの FSRQ が検出されると思われる。

そこで例として、GLF モデルを仮定したときに、NGHXT 衛星で 100 個の FSRQ を検出するために必要な観測領域とその露光時間を、いくつかの感度ごとに算出してみた。NGHXT 衛星の検出感度と露光時間の関係は図 4.6 に示されている [50]。この図中の緑・赤・黒線はそれぞれ衛星の角度分解能が 20 秒角・15 秒角・10 秒角の場合を示しており、NGHXT 衛星は 15 秒角以下の角度分解能を目指しているため、今回はこの赤線を検出感度と露光時間の関係として使用した。いくつかの感度ごとに FSRQ 検出数を算出し、100 個の FSRQ を検出するのに必要な観測領域を導出したところ図 4.7 の結果が得られた。この図から、あまり感度を良くしても、100 個検出するのに必要な観測領域はそれほど変化しないことが見てとれる。これは GLF モデルでの logN-logS が暗いフラックス側で頭打ちになってくるため、フラックスが暗いところでの天体数がさほど変化しないためである。

次に、検出に必要な露光時間を算出すると図 4.8 の結果が得られた。前述した通り、感度を上昇させて

主な検出目標	◇まだ見つからない埋もれたブラックホール・AGN
エネルギー範囲	1keV から 80keV
想定感度	3×10^{-15} [erg/s/cm ²] (10-40keV)
有効面積	> 250cm ² @ 30keV
角度分解能	< 15''
視野	> 7' × 7' @ 30keV
観測領域	360 arcmin ² (≈0.1[deg ²])
光学系原理	Wolter I 型斜入射光学系

表 4.1: NGHXT 衛星の検出目標と性能 [48][49]

も検出するのに必要な領域はほとんど変化しないので、NGHXT 衛星で FSRQ を検出するなら、時間をかけて感度を良くしなくても、 1×10^{-12} [erg/s/cm²] 程度の感度で広く観測したほうが、観測時間は少なくて済むことが分かる。以上より、仮に 1×10^{-12} [erg/s/cm²] の感度で観測するならば、約 10000[deg²] の領域を 700Ms かけて観測すれば、NGHXT 衛星で FSRQ が約 100 個見つかる予想される。

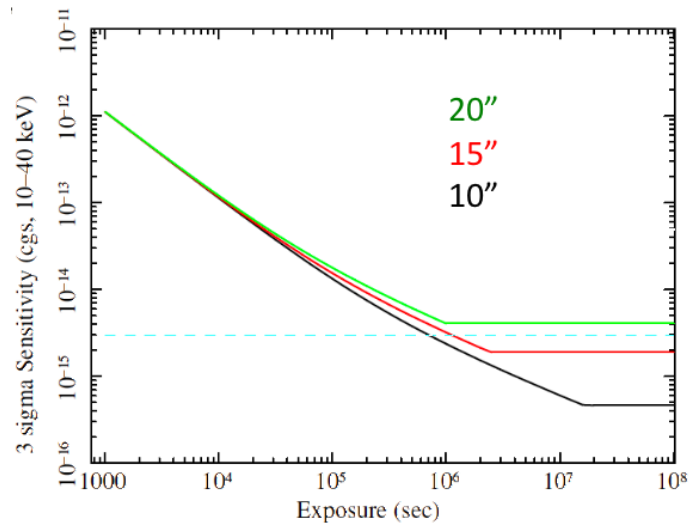


図 4.6: NGHXT 衛星の検出感度と露光時間の関係 [50]。緑・赤・黒線はそれぞれ角度分解能が 20 秒角・15 秒角・10 秒角の場合を示している。

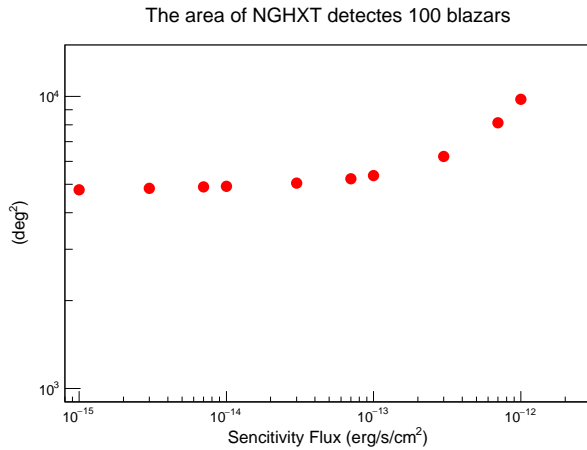


図 4.7: FSRQ を 100 個検出するのに必要な領域

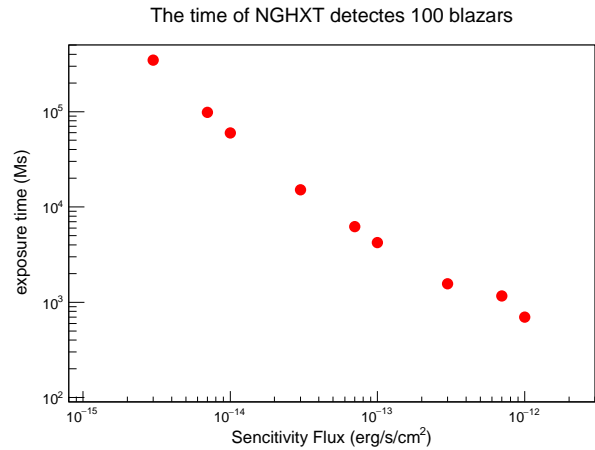


図 4.8: FSRQ を 100 個検出するのに必要な露光時間

4.4.2 eROSITA 衛星での予想検出数

eROSITA 衛星とはドイツとロシアが開発中の天文衛星で、2017 年に打ち上げ予定の衛星である。eROSITA 衛星は X 線で銀河の集合体である銀河団を観測し、その観測結果から宇宙の膨張率や、現在見えている物質の質量変動の情報を得ることを目的としている [46]。このような情報が得られれば、銀河団形成の起源を解明できるのではないかと期待されている。図 4.9 に eROSITA 衛星の全体図を、表 4.2 に eROSITA 衛星の検出目標とその性能を示す。この eROSITA 衛星は 4 年間の全天サーベイを行う予定で、2keV から 10keV の帯域では 2×10^{-13} [erg/s/cm²] の感度を達成できる。そのため現在の Swift 衛星よりも多くの天体を検出できるはずである。

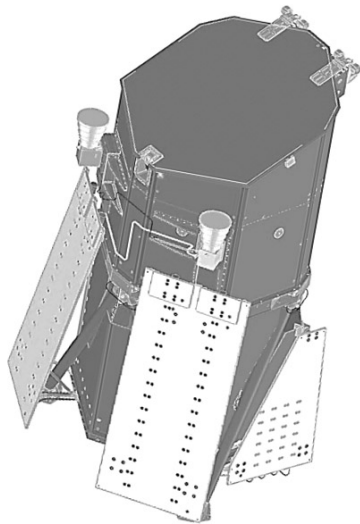


図 4.9: eROSITA 衛星の全体図 [46]

表 4.2: eROSITA 衛星の検出目標と性能 [47]

主な検出目標	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 銀河間や銀河団に存在する高温ガス ◇ まだ見つからない遠方の AGN ◇ 超新星残骸や X 線連星などの X 線源天体
エネルギー範囲	0.5keV から 10keV
想定感度	(4 年間観測で) 2×10^{-13} [erg/s/cm ²] @ 2-10keV
有効面積	1365cm ² @ 1keV (0.5~2keV バンド) 139cm ² @ 5keV (2~10keV バンド)
視野	1.03° (diameter)=54.8' × 54.8'
観測領域	全天サーベイ
検出原理	PN CCD

先ほどと同様に、powerlaw モデル・先行研究の GLF/XLF モデルから導いた logN-logS を用いて、eROSITA 衛星の観測範囲を基に、それぞれの logN-logS から FSRQ の予想検出数を算出した結果を表 4.3 に示して

いる。ここで、*eROSITA* 衛星は全天を観測するので、*Swift* 衛星と同じぐらいの領域を観測すると考え、*eROSITA* 衛星の観測領域は *Swift* 衛星と同じ約 30000[deg²] として計算した。この値は全天のうち銀緯が ±15° 以内の領域を除いた部分の平方度におおよそ等しい。

XLF モデルの結果から、*eROSITA* 衛星は単位平方度あたりに 7.6 個、GLF モデルからの結果では単位平方度あたりに 0.018 個の FSRQ を検出することになる。両者の結果のうち、特に GLF モデルでの結果に着目すると、単位平方度あたりに検出する FSRQ 数は *NGHXT* 衛星の予想検出数 0.021[個/deg²] とほぼ同じであるが、*eROSITA* 衛星は全天サーベイの予定なので、4 年間の全天サーベイで FSRQ は 540 個見つかる予想となる。すなわちこの *eROSITA* 衛星ならば GLF のモデルを仮定したときに、現在の *Swift* 衛星の 9 倍程度 FSRQ が観測されると予想できる。なので *eROSITA* 衛星ならより暗い FSRQ を多く検出でき、その宇宙論的進化をより詳しく調べることができるのでは、と期待できる。

しかしあくまでここでの計算は大まかなものなので、より正確に予想検出数を算出するには今回の logN-logS から光度関数を導出する必要がある。

表 4.3: *eROSITA* 衛星と *NGHXT* 衛星の予想 FSRQ 検出数

	<i>eROSITA</i> 衛星	<i>NGHXT</i> 衛星	<i>Swift</i> 衛星-BAT 検出器
観測範囲	≈30000[deg ²]	360 arcmin ² (≈0.1[deg ²])	≈30000[deg ²]
エネルギー範囲 (keV)	2~10	10~40	15~55 ^a
感度 (erg/s/cm ²)	2 × 10 ⁻¹³ (@ 4 年間観測)	3 × 10 ⁻¹⁵	4.2 × 10 ⁻¹² (@ 70 ヶ月間観測)
best-fit powerlaw ^b (個)	45000(1.5[deg ⁻²])	200 (2000[deg ⁻²])	60 (2 × 10 ⁻³ [deg ⁻²])
GLF/XLF からの 予想検出数 (個) ^c	540~230000 (0.018~7.6[deg ⁻²])	0.002~2200 (0.021~22000[deg ⁻²])	60~150 ((2 ~ 5) × 10 ⁻³ [deg ⁻²])

Note.

^a これは *Swift* 衛星自体の帯域ではなく、今回導出した logN-logS の帯域である。

^b 今回の 70 ヶ月間観測から作成した FSRQ の logN-logS を $N(> S) = S^{-\beta}$ でフィットしたモデルからの予想最大検出数。() 内は単位平方度あたりの個数

^c GLF/XLF モデルから算出した FSRQ の予想最大検出数。() 内は単位平方度あたりの個数。

第5章 まとめと今後

今回、*Swift* 衛星の 70ヶ月間観測のデータを用いてブレイザーの $\langle V/V_{max} \rangle$ 解析を行い、 $\log N$ - $\log S$ 分布図を作成したところ、一様分布を仮定した場合に比べて FSRQ は遠方に分布が偏り、BL Lac は近傍に分布が偏っていることが分かった。また *Swift* 衛星の 22ヶ月間観測のデータを用いた先行研究の結果と比較したところ、今回の $\log N$ - $\log S$ は先行研究の X 線での光度関数に一致するような結果ではなく、*Fermi* 衛星の観測結果から得られた、ガンマ線での光度関数モデルに近いモデルであることが示唆された。そのため、先行研究のときと比べて天体サンプル数が増えている今回の 70ヶ月間観測のデータを基に、FSRQ の赤方偏移分布図を構築すれば、FSRQ の数密度ピークは先行研究の結果より z の小さいところ、つまりより近傍のところにピークがきて、ガンマ線での FSRQ の赤方偏移分布の結果と無矛盾になるのことが示唆された。

今後は修士課程にて、今回の FSRQ のデータから 70ヶ月間観測での FSRQ-XLF を構築し、実際に FSRQ の赤方偏移分布を作成してこれを確認する。また XLF が導出できれば、これから宇宙 MeV ガンマ線背景放射への寄与も算出できるため、ブレイザーが宇宙 MeV ガンマ線背景放射の起源なのかどうかも議論できる。FSRQ・BL Lac 両者の宇宙背景放射への寄与も今後明らかにしていきたいと考えている。

付録 A 解析で用いた全 68 天体のカタログ値

ここには付録として、今回の解析に用いた FSRQ・BL Lac の計 68 天体の 70month カタログにおけるカタログ値の表を記載する。

表 A.1: プレーザーサンプル

Swift NAME	赤経 (J2000.0)	赤緯 (J2000.0)	赤方偏移	フラックス β	光子指数	V/V_{max}	タイプ	LAT? ^{α}
J0010.5+1057	2.612	10.953	0.0893	$31.37^{+4.71}_{-4.48}$	$1.87^{+.20}_{-.19}$	0.154	FSRQ	
J0017.1+8134	4.268	81.567	3.3660	$10.12^{+3.46}_{-2.96}$	$2.53^{+.61}_{-.49}$	0.738	FSRQ	
J0021.2-1909	5.305	-19.151	0.0956	$17.28^{+4.36}_{-3.95}$	$2.06^{+.35}_{-.30}$	0.321	BLLac	
J0048.8+3155	12.217	31.961	0.0150	$156.04^{+4.21}_{-4.17}$	$1.90^{+.03}_{-.04}$	0.014	BLLac	
J0113.8+1313	18.457	13.239	0.0496	$16.54^{+4.79}_{-4.30}$	$1.88^{+.40}_{-.36}$	0.403	BLLac	
J0122.9+3420	20.783	34.380	0.2720	$13.36^{+3.56}_{-3.15}$	$2.67^{+.52}_{-.40}$	0.339	BLLac	y
J0208.2+4452	31.980	44.822	0.0217	$10.48^{+4.00}_{-3.49}$	$2.15^{+.56}_{-.46}$	0.626	BLLac	
J0225.0+1847	36.272	18.807	2.6900	$31.66^{+5.10}_{-4.84}$	$1.74^{+.21}_{-.21}$	0.684	FSRQ	
J0232.8+2020	38.193	20.333	0.1396	$24.46^{+4.54}_{-4.23}$	$2.16^{+.28}_{-.25}$	0.179	BLLac	y
J0235.3-2934	38.850	-29.598	0.0592	$22.98^{+4.69}_{-4.41}$	$1.54^{+.27}_{-.27}$	0.351	BLLac	
J0311.8-7653	47.961	-76.882	0.2230	$12.97^{+4.01}_{-3.60}$	$1.99^{+.44}_{-.39}$	0.523	FSRQ	
J0336.6+3217	54.134	32.299	1.2580	$43.76^{+5.55}_{-5.33}$	$1.60^{+.16}_{-.17}$	0.456	FSRQ	y
J0349.2-1159	57.370	-11.989	0.1800	$16.56^{+4.09}_{-3.70}$	$2.17^{+.36}_{-.32}$	0.316	BLLac	y
J0404.0-3604	60.991	-36.065	1.4170	$11.38^{+3.87}_{-3.44}$	$1.98^{+.49}_{-.42}$	0.641	FSRQ	y
J0405.5-1307	61.373	-13.121	0.5706	$9.90^{+4.49}_{-3.78}$	$2.24^{+.79}_{-.57}$	0.65	FSRQ	y
J0525.1-2339	81.269	-23.649	3.1000	$16.75^{+5.11}_{-4.68}$	$1.57^{+.41}_{-.39}$	0.719	FSRQ	
J0525.3-4600	81.324	-46.004	1.4790	$19.68^{+4.91}_{-4.58}$	$1.29^{+.34}_{-.34}$	0.554	FSRQ	y
J0539.9-2839	84.979	-28.679	3.1040	$27.49^{+5.12}_{-4.86}$	$1.49^{+.26}_{-.25}$	0.719	FSRQ	y
J0550.7-3212A	87.669	-32.250	0.0690	15.88^0_0	3.22^0_0	0.215	BLLac	y
J0623.3-6438	95.819	-64.629	0.1289	$10.98^{+3.86}_{-3.45}$	$1.99^{+.52}_{-.44}$	0.671	FSRQ	
J0635.8-7514	98.951	-75.235	0.6510	$17.57^{+3.84}_{-3.56}$	$1.93^{+.29}_{-.27}$	0.347	FSRQ	y
J0710.3+5908	107.579	59.134	0.1250	$23.18^{+3.75}_{-3.50}$	$2.26^{+.23}_{-.22}$	0.181	BLLac	y
J0746.3+2548	116.607	25.807	2.9793	$48.89^{+6.30}_{-6.08}$	$1.34^{+.18}_{-.17}$	0.71	FSRQ	y
J0800.1+2638	120.086	26.633	0.0269	$32.16^{+5.18}_{-4.92}$	$1.81^{+.21}_{-.21}$	0.159	BLLac	
J0805.2+6145	121.307	61.753	3.0330	$20.60^{+5.12}_{-4.78}$	$1.36^{+.33}_{-.33}$	0.714	FSRQ	y
J0830.1+4154	127.458	41.903	0.1263	$13.03^{+4.41}_{-3.92}$	$1.94^{+.47}_{-.41}$	0.544	BLLac	

表は次ページに続く

前ページからの続き

Swift NAME	赤経 (J2000.0)	赤緯 (J2000.0)	赤方偏移	フラックス β	光子指数	V/V_{max}	タイプ	LAT? ^{α}
J0841.4+7052	130.341	70.899	2.1720	$67.74^{+4.40}_{-4.31}$	$1.59^{+.09}_{-.08}$	0.626	FSRQ	y
J1103.5-2329	165.868	-23.488	0.1860	$12.94^{+4.36}_{-3.79}$	$2.40^{+.55}_{-.44}$	0.394	BLLac	y
J1104.4+3812	166.111	38.231	0.0300	$158.44^{+2.65}_{-2.62}$	$2.79^{+.03}_{-.03}$	0.008	BLLac	y
J1130.1-1447	172.535	-14.798	1.1840	$34.44^{+5.80}_{-5.48}$	$1.75^{+.23}_{-.23}$	0.436	FSRQ	y
J1136.7+6738	174.128	67.641	0.1342	$10.73^{+3.05}_{-2.70}$	$2.35^{+.44}_{-.36}$	0.531	BLLac	y
J1153.6+4931	178.392	49.514	0.3340	$13.51^{+4.29}_{-3.89}$	$1.56^{+.44}_{-.41}$	0.761	FSRQ	y
J1221.3+3012	185.330	30.195	0.1836	$7.87^{+2.76}_{-2.30}$	$3.10^{+.92}_{-.62}$	0.614	BLLac	y
J1222.4+0414	185.590	4.236	0.9650	$35.45^{+5.64}_{-5.41}$	$1.30^{+.21}_{-.21}$	0.37	FSRQ	y
J1224.9+2122	186.215	21.361	0.4320	$22.48^{+4.19}_{-3.93}$	$1.76^{+.25}_{-.23}$	0.275	FSRQ	y
J1229.1+0202	187.285	2.057	0.1583	$444.81^{+4.89}_{-4.87}$	$1.72^{+.01}_{-.02}$	0.027	FSRQ	y
J1240.2+3457A	190.039	34.946	0.0431	$9.00^{+3.60}_{-3.07}$	$2.19^{+.63}_{-.50}$	0.765	BLLac	
J1256.2-0551	194.047	-5.760	0.5362	$34.30^{+5.95}_{-5.66}$	$1.49^{+.23}_{-.23}$	0.2	FSRQ	y
J1305.4-1034	196.347	-10.567	0.2784	13.21^0_0	2.01^0_0	0.501	FSRQ	
J1309.2+1139	197.283	11.617	0.0251	$53.47^{+4.50}_{-4.38}$	$1.70^{+.10}_{-.11}$	0.082	BLLac	
J1331.6-0504	202.965	-5.175	2.1500	$20.23^{+7.13}_{-6.47}$	$1.03^{+.52}_{-.58}$	0.799	FSRQ	y
J1337.7-1253	204.430	-12.878	0.5390	$8.77^{+4.21}_{-3.43}$	$2.72^{+1.04}_{-.68}$	0.609	FSRQ	y
J1417.7+2539	214.466	25.713	0.2370	$7.46^{+3.05}_{-2.54}$	$2.68^{+.80}_{-.57}$	0.761	BLLac	y
J1428.7+4234	217.157	42.662	0.1290	$21.98^{+2.97}_{-2.78}$	$2.53^{+.23}_{-.20}$	0.17	BLLac	y
J1512.8-0906	228.192	-9.100	0.3600	$70.03^{+7.25}_{-7.04}$	$1.38^{+.15}_{-.15}$	0.115	FSRQ	y
J1557.8-7913	239.444	-79.222	0.1501	$14.88^{+3.80}_{-3.42}$	$2.41^{+.43}_{-.37}$	0.319	FSRQ	
J1625.9+4349	246.480	43.809	1.0480	$13.22^{+4.03}_{-3.62}$	$2.01^{+.45}_{-.38}$	0.501	FSRQ	
J1643.1+3951	250.814	39.809	0.5928	$23.01^{+5.57}_{-5.16}$	$1.27^{+.35}_{-.36}$	0.455	FSRQ	y
J1654.0+3946	253.476	39.780	0.0337	$44.26^{+3.44}_{-3.31}$	$2.49^{+.13}_{-.12}$	0.059	BLLac	y
J1719.7+4900	259.850	48.959	0.0242	$18.20^{+3.96}_{-3.65}$	$2.05^{+.31}_{-.28}$	0.299	BLLac	
J1928.0+7356	291.990	73.940	0.3021	$12.50^{+4.05}_{-3.64}$	$1.89^{+.44}_{-.40}$	0.604	FSRQ	
J1959.6+6507	299.992	65.138	0.0470	$34.26^{+3.16}_{-3.03}$	$2.59^{+.16}_{-.15}$	0.083	BLLac	y
J2009.6-4851	302.396	-48.845	0.0710	$10.38^{+4.72}_{-4.05}$	$2.16^{+.73}_{-.56}$	0.635	BLLac	y
J2011.5-1544	302.865	-15.734	1.1800	$19.23^{+7.08}_{-6.36}$	$1.53^{+.57}_{-.53}$	0.435	FSRQ	
J2056.0-4713	313.991	-47.213	1.4890	$16.06^{+5.71}_{-5.12}$	$1.73^{+.50}_{-.46}$	0.511	FSRQ	y
J2129.1-1538	322.286	-15.628	3.2680	$27.39^{+6.30}_{-5.86}$	$1.70^{+.31}_{-.30}$	0.731	FSRQ	
J2148.0+0657	327.009	6.943	0.9900	$22.65^{+5.59}_{-5.16}$	$1.78^{+.35}_{-.33}$	0.378	FSRQ	y
J2152.0-3030	327.964	-30.466	2.3450	$83.39^{+6.29}_{-6.14}$	$1.50^{+.10}_{-.10}$	0.647	FSRQ	y
J2203.0+3146	330.746	31.767	0.2950	$14.26^{+4.39}_{-3.98}$	$1.89^{+.43}_{-.38}$	0.495	FSRQ	y
J2211.7+1843	332.955	18.717	0.0700	$17.09^{+4.63}_{-4.27}$	$1.84^{+.35}_{-.32}$	0.398	FSRQ	
J2219.7+2614	334.907	26.230	0.0850	$16.65^{+4.54}_{-4.18}$	$1.84^{+.37}_{-.35}$	0.412	BLLac	

表は次ページに続く

前ページからの続き

Swift NAME	赤経 (J2000.0)	赤緯 (J2000.0)	赤方偏移	フラックス β	光子指数	V/V_{max}	タイプ	LAT? ^{α}
J2229.7-0831	337.429	-8.524	1.5595	$19.91^{+5.94}_{-5.51}$	$1.59^{+.41}_{-.38}$	0.526	FSRQ	y
J2232.5+1141	338.177	11.721	1.0370	$24.37^{+5.74}_{-5.33}$	$1.57^{+.32}_{-.31}$	0.393	FSRQ	y
J2251.9+2215	342.917	22.277	3.6680	$11.06^{+4.48}_{-3.95}$	$1.95^{+.58}_{-.49}$	0.757	FSRQ	
J2253.9+1608	343.514	16.138	0.8590	$132.55^{+5.33}_{-5.22}$	$1.52^{+.05}_{-.06}$	0.333	FSRQ	y
J2318.4-4223	349.588	-42.384	0.0052	$80.65^{+4.36}_{-4.28}$	$1.85^{+.07}_{-.07}$	0.038	BLLac	
J2327.5+0938	351.885	9.629	1.8430	$30.71^{+6.08}_{-5.76}$	$1.29^{+.28}_{-.28}$	0.578	FSRQ	
J2359.0-3038	359.756	-30.633	0.1651	$19.04^{+4.28}_{-3.93}$	$2.09^{+.32}_{-.28}$	0.272	BLLac	y

これで終わり

Notes.

α "y" の印がある天体は、LAT 4-year Point Source Catalog[35] にも記載されているものである。

β ここでのフラックスの単位は、 10^{-12} erg/s/cm²

謝辞

今回の卒業研究を行うにあたって、様々な方にお世話になりました。宇宙開発研究機構宇宙科学研究所の井上芳幸さんには物理的な考察やプログラミングなど様々な場面で補助して頂いたのみならず、私の稚拙な文章を添削してくださいました。今回の研究が論文としての形を成せたのも、ひとえに井上さんのご助力の賜物と深く感謝いたします。本当にありがとうございました。また田中康之さんには、井上さんとの Skype 会議のセッティングや、今回の研究にとって非常に有意義な文献や先行論文などをご教示頂きました。ありがとうございました。植村誠先生、伊藤亮介さんには毎週のブレーザー会議で自分の研究結果に対して様々な意見、アドバイスを頂きました。私とは異なる目線での見解、ご指摘は本研究をより深く理解する手助けとなりました。ありがとうございました。その他、研究室のスタッフの皆様、先輩方、4年生の皆さんには多くの場面でお世話になりました。特に4年生の内田和海くん、宮岡敬太くん、M1の幅田翔先輩には、パソコンやプログラミング関係で多くのアドバイスを頂きました。プログラムの右も左も分からない自分が今回の解析を行えたのも、こちらの方々のお力添えがあったからこそです。ありがとうございました。

最後にはなりませんが、指導教員の深沢泰司先生には今回の研究は勿論のこと、普段からあらゆる場面で助けて頂きました。感謝致します。本当にありがとうございました。

関連図書

- [1] Matsuoka, Y., Ienaka, N., Kawara, K., & Oyabu, S. 2011, *apj*, 736, 119
- [2] Ueda, Y., Akiyama, M., Ohta, K., & Miyaji, T. 2003, *apj*, 598, 886
- [3] Watanabe, K., Hartmann, D. H., Leising, M. D., & The, L.-S. 1999, *apj*, 516, 285
- [4] Strigari, L. E., Beacom, J. F., Walker, T. P., & Zhang, P. 2005, *jcap*, 4, 017
- [5] Ahn, K., & Komatsu, E. 2005, *prd*, 71, 021303
- [6] Inoue, Y. 2008, *Astronomical Herald*, 101, 391
- [7] Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., et al. 2012, *apj*, 747, 104
- [8] http://fermi.gsfc.nasa.gov/science/mtgs/fermi_jansky/slides/PPadovani.pdf
- [9] 片岡 淳, 2002年8月, *天文月報* 95, 373
- [10] Fossati, G., Maraschi, L., Celotti, A., Comastri, A., & Ghisellini, G. 1998, *mnras*, 299, 433
- [11] Ajello, M., Shaw, M. S., Romani, R. W., et al. 2012, *apj*, 751, 108
- [12] Ajello, M., Costamante, L., Sambruna, R. M., et al. 2009, *apj*, 699, 603
- [13] 小山勝二、嶺重慎 『シリーズ現代の天文学 8巻：ブラックホールと高エネルギー現象』 日本評論社、2007年
- [14] 谷口義明 『クェーサーの謎 宇宙で最もミステリアスな天体』 講談社、2004年
- [15] Malcolm S. Longair(2007) “ Galaxy Formation ”, Springer
- [16] <http://www.astro.isas.jaxa.jp/~takahasi/Download/HEAPA2003-Sato-Swift.pdf>
- [17] http://www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~yuasa/wiki/images/Optomechatronics_maxima_jan12.pdf
- [18] <http://swift.gsfc.nasa.gov/results/bs70mon/>
- [19] Baumgartner, W. H., Tueller, J., Markwardt, C. B., et al. 2013, *apjs*, 207, 19
- [20] <https://ned.ipac.caltech.edu/>
- [21] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- [22] Massaro, E., Giommi, P., Leto, C., et al. 2009, *aap*, 495, 691

- [23] <http://www.asdc.asi.it/bzcat>
- [24] Massaro, E., Maselli, A., Leto, C., et al. 2015, *apss*, 357, 75
- [25] Healey, S. E., Romani, R. W., Taylor, G. B., et al. 2007, *apjs*, 171, 61
- [26] Kuehr, H., Pauliny-Toth, I. I. K., Witzel, A., & Schmidt, J. 1981, *aj*, 86, 854
- [27] Gregory, P. C., Scott, W. K., Douglas, K., & Condon, J. J. 1996, *apjs*, 103, 427
- [28] Griffith, M. R., & Wright, A. E. 1993, *aj*, 105, 1666
- [29] Kellermann, K. I., Sramek, R., Schmidt, M., Shaffer, D. B., & Green, R. 1989, *aj*, 98, 1195
- [30] Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., et al. 2011, *apj*, 743, 171
- [31] 1968ApJ...151..393S Schmidt, M. 1968, *apj*, 151, 393
- [32] 二間瀬敏史、池内了、千葉柁司 『シリーズ現代の天文学 3 巻：宇宙論 II 宇宙の進化』 日本評論社、2007 年
- [33] Ajello, M., Greiner, J., Kanbach, G., et al. 2008, *apj*, 678, 102
- [34] Ajello, M., Alexander, D. M., Greiner, J., et al. 2012, *apj*, 749, 21
- [35] http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/4yr_catalog/
- [36] Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2015, *apjs*, 218, 23
- [37] Inoue, Y. 2014, arXiv:1412.3886
- [38] 日本物理学会誌 Vol.70 No.10 2015
- [39] http://wwwj.vsop.isas.jaxa.jp/yougo/k01_agn.html
- [40] http://www.nasa.gov/mission_pages/swift/bursts/active_galaxies.html
- [41] <http://inspirehep.net/record/790922/plots>
- [42] barrato, T., Ghisellini, G., Tagliaferri, G., et al. 2015, *mnras*, 446, 2483
- [43] <http://www.astro.isas.jaxa.jp/~takahasi/DownLoad/HEAPA2003-Sato-Swift.pdf>
- [44] <http://www.yoshida-agu.net/research/swift>
- [45] http://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/bat_desc.html
- [46] <http://www.mpe.mpg.de/eROSITA>
- [47] Merloni, A., Predehl, P., Becker, W., et al. 2012, arXiv:1209.3114
- [48] http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/heapa-ws2014/slides/NGHXT_XRT.pdf
- [49] <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/548562/1/SA6000034036.pdf>
- [50] http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/heapa-ws2014/slides/2015-03-11_NGHXT-kouuren.pdf