概 要

ブレーザー天体はジェットを伴った活動銀河核に属し、相対論的速度で飛び出すジェットをほぼ正面から観測した天体である。ブレーザー天体からは電波から X 線領域に渡るシンクロトロン放射と、逆コンプトン散乱成分がガンマ線領域にあるということ、激しい時間変動をしているこが特徴である。また、観測するジオメトリーから、様々な相対論的効果が現れる。この効果により、ブレーザーは非常に明るい天体として観測される。だが、高エネルギー電子のジェット内での加速機構などは、まだ正確にわかっておらず、ブレーザーに関しては、謎が多く存在しているのも事実である。

本研究では、X 線観測衛星 ASCA と RXTE 衛星のデータを用いて、ブレーザー天体の中でも光度が大きい OVV クエーサーと光度が小さい HBL を比べ、これまで時間変動が良く調べられている HBL との比較を行うことで、OVV クエーサーのジェットの加速に迫る。具体的には、X 線領域の power-law スペクトルの傾きが HBL より小さかったり、Structure function を計算することで、時間変動は短時間であれば OVV の方が小さい変動を示すなどの違いが現れた。しかし、長期間経てば OVV も HBL と同程度の変動を示すこともわかった。

目 次

第 1 章　序論 4

第 2 章　ブレーザーとは 6
- 2.1 活動銀河核の分類 . . . 6
- 2.2 ブレーザー . . . 6
  - 2.2.1 HBL と LBL . . . 8
  - 2.2.2 OVV QSO . . . 9
- 2.3 beamig effect . . . 9
- 2.4 ブレーザーの放射モデル . . . 10
  - 2.4.1 多波長スペクトル . . . 10
  - 2.4.2 SSC(Synchrotron-Self-Compton) モデル . . . 10
  - 2.4.3 ERC(External-Radiation-Compton) モデル . . . 11
- 2.5 本論文の目的 . . . 11

第 3 章　観測衛星：RXTE と ASCA 13
- 3.1 RXTE . . . 13
  - 3.1.1 RXTE の概要 . . . 13
  - 3.1.2 PCA . . . 13
- 3.2 ASCA の概要 . . . 15
  - 3.2.1 X 線望遠鏡 (XRT) . . . 15
  - 3.2.2 X 線 CCD カメラ (SIS) . . . 17
  - 3.2.3 撮像型蛍光比例計数管 (GIS) . . . 17

第 4 章　データ解析と観測天体 19
- 4.1 レスポンス関数とスペクトル解析 . . . 19
- 4.2 観測天体とデータ . . . 20

第 5 章　解析結果 27
- 5.1 RXTE のデータ解析 . . . 27
  - 5.1.1 Power-law モデル . . . 27
  - 5.1.2 OVV と HBL の長期的な時間変動の比較 . . . 28
  - 5.1.3 X 線領域のフラックスと photon-index . . . 30

5.2 ASCA のデータ解析 33
5.2.1 ライトカーブ 33
5.2.2 Power spectrum density(PSD) 36
5.2.3 Auto-correlation function(ACF) 36
5.2.4 Structure function(SF) 37
5.3 時系列解析の考察 42
5.4 まとめ 46

図 目 次

2.1 活動銀河核の統一モデル [6] 7
2.2 ブレーザー Mrk421 のエネルギースペクトル [1, 13] 7
2.3 ブレーザーの多波長スペクトル [13] 11
2.4 ブレーザーの放射モデル [1, 2] 12

3.1 PCA：有効断面積 [4] 14
3.2 XRT の有効面積 16
3.3 SIS の有効面積 16
3.4 GIS の有効面積 16

5.1 フラックスの時間変動 29
5.2 ブレーザーの photon-index の時間変動 30
5.3 flux と photon-index の関係 31
5.4 flux と photon-index の模式図 32
5.5 H1426+428 と Mrk421 の同時多波長スペクトル [2, 11] 32
5.6 ライトカーブ 33
5.7 3C273 の NPSD[10] 36
5.8 各天体の SF 39
5.9 片岡氏による 3C273 と Mrk421 の SF[10] 41
5.10 横軸の一定値と絶対光度 42
5.11 縦軸の一定値と絶対光度 42
5.12 時間間隔 1 日の SF と絶対光度 42
5.13 3C273 の BBB[2] 43

第1章　序論

自然界の多くの物質は、熱平衡、つまり構成粒子が Maxwell 分布に従う状態にあり、温度が定義できる。宇宙全体は 3K 放射で満ちており、星生成の源となる超低温の分子雲、銀河間を埋め尽くす 1 千万度以上の高温プラズマなど、多様な温度の物質層が存在することが、電波、赤外、X 線などの新しい手段によって明らかになってきた。一方で、構成粒子が Maxwell 分布に従わず、例えば粒子密度がエネルギーの冪乗に比例するようなことが宇宙ではしばしば見られる。これらは非熱的状態と呼ばれ、その放射は冪型分布で記述される。自然界における最もよい例が宇宙線である。宇宙線は宇宙から一様に降り注ぐ高エネルギー荷電粒子で、フラックスが 10^9eV から 10^{20}eV に至る 10 桁以上の領域で冪型スペクトルとなる。宇宙線の加速現場の有力候補として超新星残骸が考えられているが、特に 10^{15}eV を超えるエネルギーの粒子まで加速するのは難しいとされている。更に効率のよい巨大な加速器が宇宙には存在していると考えるほうが妥当であろう。近年の X 線、ガンマ線天文学の目標の一つは、この巨大加速器を解明することにあるといえる。巨大加速器の一つの候補が活動銀河核 (AGN) である。AGN は、銀河中心の狭い領域から銀河全体と同じあるいはそれ以上の放射を出している天体のことで、放射光度は $\sim 10^{38-47} erg/s$ にわたる。その中でも特にクエーサー (QSO) は、太陽の 1 兆倍を超える放射光度 (L$\geq 10^{45}$erg/s) と激しい変動を示し、一方で強い放射圧のもとで天体が吹き飛ばされず安定に放射を続けるためには、それを引きとめるだけの大質量が必要である。その質量は太陽の約 10 億倍ある超巨大ブラックホールであり、物質がそのブラックホールに落ち込むときに解放される重力エネルギーが放射源であると考えられている。活動銀河核の約 10%が電波の活動が激しく (radio loud) そのいくつかはジェット (ブラックホール中心から対称に超高速で吹き出すプラズマの噴流) を伴っている。AGN はこのような超高速ジェットを加速するものであり、巨大加速器といえよう。世界中でジェットに関する研究が行われてきており、電波による観測では、明るく輝いている点の位置変化を追跡したときに、見かけ上光速を超える現象、「超光速現象」が観測され、プラズマ全体がローレンツファクター $\gamma \approx 10$ の相対論的運動をしているというモデルが信じられている。また、ジェットからの電波放射が冪型スペクトルと強い偏光を示すことは以前より知られていて、シンクロトロン放射によるものだと考えられてきた。このように、ジェットに関して様々なことがわかってはきているが、未だに大きく三つの謎が残っている。

1. ジェット加速機構
2. ジェットの収束問題
3. ジェットの方向性の維持

活動銀河核のジェットを理解する上で理想的な天体が、“ブレーザー” である。ブレーザーは、1991 年に打ち上げられた米国のガンマ線観測衛星 CGRO の観測によりガンマ線を強く出していることがわかった。同衛星に搭載されていた EGRET 検出器で、30MeV∼30GeV の広いエネルギー領域で全天探査を行い 66 個のブレーザーが確認された。ほぼ同時期に、地上の大気チェレンコフ望遠鏡で観測が行われ、5 個以上のブレーザーから更にエネルギーが高い TeV ガンマ線放射が観測された。ブレーザーの特徴あるスペクトルの理解は 2 章でも述べるように多波長観測によって進展した。

第2章　ブレーザーとは

AGN の正体は、巨大なブラックホールであると考えられており、いくつかのものは相対論的な速さで伝搬するジェットを伴っている。本研究の BL LaC 型天体や OVV QSO(これら二つをあわせてブレーザー) は、そのジェットをほぼ正面から観測しているもので、速い時間変動や、エネルギースペクトルの形、銀河中にある放射とは違い、熱的 X 線放射が観測されないといったような特徴を持っている。

2.1　活動銀河核の分類

全宇宙にある全ての銀河のうちの 1 ~ 10%が、活動銀河核 (AGN) であると考えられており、1 型活動銀河核と 2 型活動銀河核とに大別される。1 型活動銀河核のスペクトルには幅の広い輝線と幅の狭い輝線が存在し、2 型には幅の狭い輝線のみが存在する。このような観測的特徴の多くは、我々が分子トーラスを見る角度によって生ると考えられており (AGN の統一モデル)、決して 2 型活動銀河核に広い輝線を出す領域がないということではない。活動銀河核の統一図を図 2.1 に載せている。中心に大質量ブラックホールと降着円盤があり、その周囲に幅の広い輝線を出す多数の雲 (BLR) が分布している。BLR の外側にはダストによる強い吸収領域 (図ではトーラスとして表示) が広がっており、それをのぞむ角度により BLR が見える場合 (1 型 AGN) と見えない場合 (2 型 AGN) に区別される。強い吸収領域の外側には、中心核からの電離放射により円錐上に電離した領域 (NLR) が広がっている。中心からジェットがでている場合、それをほぼ正面からのぞむと活動銀河核はブレーザーとして観測される。

2.2　ブレーザー

ブレーザーは、BL Lac 型天体と OVV QSO をあわせた総称である。図 2.1 のように、ジェットを軸方向から見たものである。特に激しい時間変動と輝線を伴わない連続スペクトル、強い偏光が最大の特徴で、ほぼ全ての波長領域においてフレアーが観測されている。エネルギースペクトルの形にも特徴があり、図 2.2 のように電波 ~ 可視/X 線までの LE 成分 (lowenergy component) と X 線からガンマ線までの HE 成分 (high energy component) の二つの成分を持っている。

LE 成分の起源はシンクロトロン放射が有力であり、HE 成分についてはまだよ

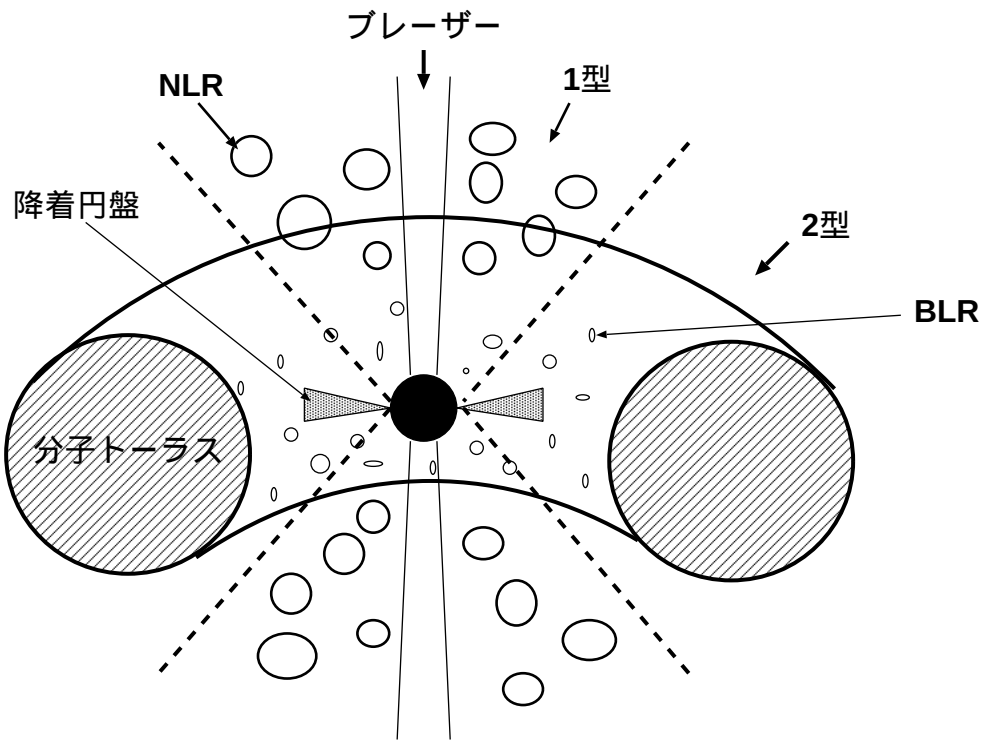


図 2.1: 活動銀河核の統一モデル [6]

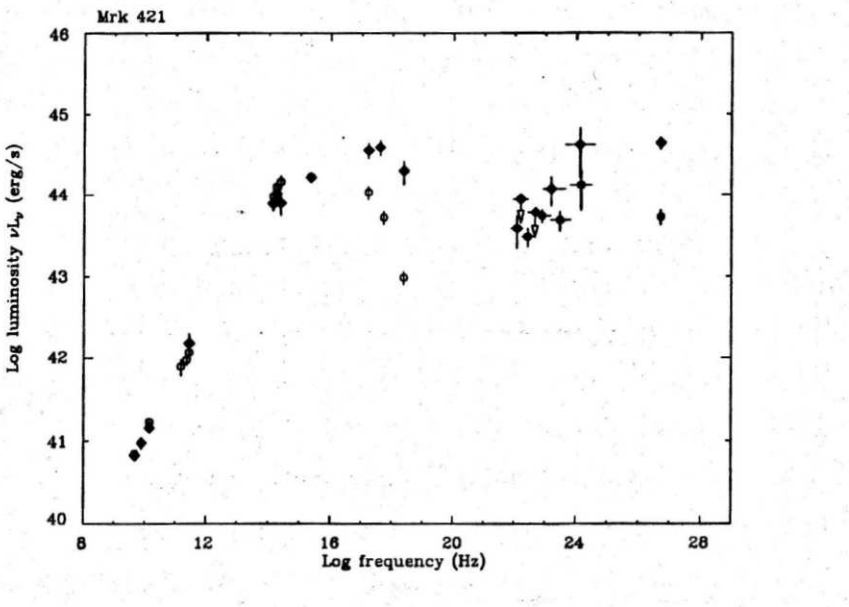


図 2.2: ブレーザー Mrk421 のエネルギースペクトル [1, 13]

くわかっていないが、電子の逆コンプトン散乱ではないかと考えられている。逆コンプトン散乱はエネルギーの高い電子が、種となる光子をより高いエネルギーまで叩きあげる現象である。例えば、10GeV($\gamma \sim 10^4$) の電子が可視光 ($\sim$1eV) を叩きあげることで、100MeV のガンマ線が生まれる。HE 成分の放射モデルについては§ 2.4 で述べる。電波から可視光までは強い偏光を示しており、シンクロトロン放射を支持する。相対論的電子のローレンツファクター γ は約 10^3 ~ 10^6 で、シンクロトロン放射による連続的加速とクーリングが起きており、このような加速とクーリングのプロセスは、ブレーザーの激しい変動に大きく関与しており、ブレーザーは相対論的ジェット内部の物理的情報を与えてくれる唯一の天体である。

ここで、クーリングについて述べる必要がある。クーリングとは、電子がシンクロトロン放射逆コンプトン散乱によって持っているエネルギーを失うことであり、それにかかる時間をクーリングタイムという。クーリングタイムは γ^{-1} に比例している。よって、ジェット内のエネルギーが高い程 (γ が大きい程) クーリングが速いということになる。

2.2.1 HBL と LBL

BL Lac 型天体は活動銀河核の小さなグループを構成していて、楕円銀河を母銀河としている。スペクトル中には強い輝線や吸収線が存在しない。この BL Lac 型天体は更に HBL(high-energy cutoff BL Lac) と LBL(low-energy cutoff BL Lac) という二つに分類することができて、HBL は多波長スペクトル中の LE 成分のピークが紫外線から X 線領域にあり、対して LBL の LE 成分のピークは赤外線から可視光領域にある。窪氏や Ghisellini 氏らはブレーザーの多波長スペクトル解析によって、γ_{max}(ジェット内の相対論的電子の最も大きなローレンツファクター) の違いによって、BL Lac を次のように分類した。

- HBL : $\gamma_{max} \sim 10^5 - 10^6$
- LBL : $\gamma_{max} \sim 10^4 - 10^5$

前節に書いたように、γ が大きい HBL のほうが変動の周期が短いということになる。

また、HBL の X 線領域のスペクトルの傾きが LBL の傾きより急である。これは、ジェットの放射メカニズムが違うからで、HBL にとって X 線領域は LE 成分の高エネルギー側の電子のシンクロトロン放射であり、LBL にとって X 線領域は HE 成分の低エネルギー側の電子にあたるためその放射メカニズムの最有力候補として逆コンプトン散乱があげられるが、それだけにとどまらず、様々な放射によってスペクトルがフラットになると考えられている。だが、まだその理由は議論の中にある。

更に、HBL は 1991 年までは GeV 領域のガンマ線までしか観測されていなかったが、1992 年に地上大気チェレンコフ望遠鏡により、Mrk421 で銀河系外初の TeV

領域の放射が観測された (以後 TeV ブレーザーと表記)。この TeV 領域の放射を可能にするためには、電子のローレンツファクター $\gamma_{max} \geq 10^6$ である必要がある。よって、ブレーザーのなかでは TeV ブレーザーが最も速く変動する。

2.2.2 OVV QSO

QSO とは準恒星状天体 (Quasi-Stellar Object) のことで、クェーサーとも呼ばれる。その中でも可視光と電波領域で激しい変動を示すクエーサーを、OVV(optically violent variable)QSO(以後 OVV と表記) と呼ぶ。OVV は BL Lac とは違いスペクトル中に輝線や吸収線が見られる。このことから、ジェット以外からの放射の寄与があるということがわかり、放射のメカニズムも BL Lac とは違うということもわかる。また、窪氏や Ghisellini 氏らによると OVV の γ_{max} は次のようになる。

- OVV : $\gamma_{max} \sim 10^3 - 10^4$

よって変動の激しさは、HBL > LBL > OVV である。HBL の変動の周期は数時間より長く、OVV は数時間から数ヵ月に及ぶ。しかし、放射光度についてみると、観測事実から OVV > LBL > HBL となっている。このことから、OVV も LBL と同じような理由で、X 線のスペクトルはフラットになると考えられている。OVV や LBL についてはまだ多くの議論すべき点が残っているが、観測事実として次のことはわかっている。それは、時間変動が HBL に比べて遅く、そして小さいということである。LE のピークが低いエネルギー領域にあるのは、これら種光子の密度が高く、電子の最大加速エネルギーが低く抑えられるためであると考えられいる。一方で HBL のような「暗い」ブレーザーでは、シンクロトロン光子のエネルギー密度が小さい ので、放射冷却が効きにくく、結果として高いエネルギーまで粒子を加速することが可能であると考えられている。

2.3 beamig effect

ブレーザーは、ジェットが観測者のほぼ正面を向いており、このようなジオメトリにおいては、様々な相対論的効果が期待される。ローレンツファクター Γ で動くジェットの固有系で測った時間間隔、光子周波数と観測の間には次のような関係があり、観測される時間間隔は短く、光子周波数は大きくなる。

$$t_{obs} = t_{jet}/\delta \qquad \nu_{obs} = \nu_{jet}\delta$$

δ とは、ビーミング因子と呼ばれるもので以下の式のように書ける。

$$\delta = \Gamma^{-1}(1 - \beta\cos\theta)^{-1}$$

θ はジェットと視線方向のなす角度、β はジェットの速度 (v/c) である。ブレーザーの場合 $\theta \sim 1/\Gamma$ と考えられるので、$\delta \sim \Gamma$ となる。電波の観測結果を用いると、$\delta \sim 10$ となる。更にジェット内部から等方的に放射された光子は、観測系では立体角 $\Omega \propto \delta^{-2}$ の領域に集中するので、ブレーザー天体ではジェットからの放射フラックス $F \propto \nu t^{-1}\Omega^{-1}$ が δ^4 倍に強められて観測される。これを beaming effect という。

2.4 ブレーザーの放射モデル

ブレーザーの放射モデルについては、様々なモデルがこれまで考えられてきた。ここではその中の代表的な二つのモデルを述べる。しかし、その前にブレーザーの多波長スペクトルについて述べる必要がある。

2.4.1 多波長スペクトル

図 2.3 はブレーザーを様々な光度ごとに大別した、多波長スペクトルである。これを見てもわかるように、ブレーザーのスペクトルには LE 成分と HE 成分があることがわかる。更にこの図からわかることは、暗い天体程、HE と LE のピークが高いエネルギーに位置しているということである。

LE 成分を放射するメカニズムは、§ 2.2 でも述べたように、偏光などの観測からシンクロトロン放射 (冪型スペクトル) が有力である、HE 成分についてはシンクロトロンとは別のメカニズムで放射が生じていることが示唆される。HE 成分の放射のモデルはいくつか考えられており、ここでは、SSC モデルと ERC モデルについて述べる。

2.4.2 SSC(Synchrotron-Self-Compton) モデル

SSC モデルとは、シンクロトロン放射している高エネルギー電子が同じ領域からでたシンクロトロン光子を逆コンプトン散乱して X 線やガンマ線領域まで叩きあげるというモデルである。この SSC モデルは HBL の放射スペクトルを解釈する上で有効であるが、OVV のような「明るい」ブレーザーでは、HBL よりも光度が約三桁大きいので、SSC で予想される光度ではその明るさを説明するには足りず、よって OVV については SSC モデルは適用できないと言われており、別のモデルが必要となる。

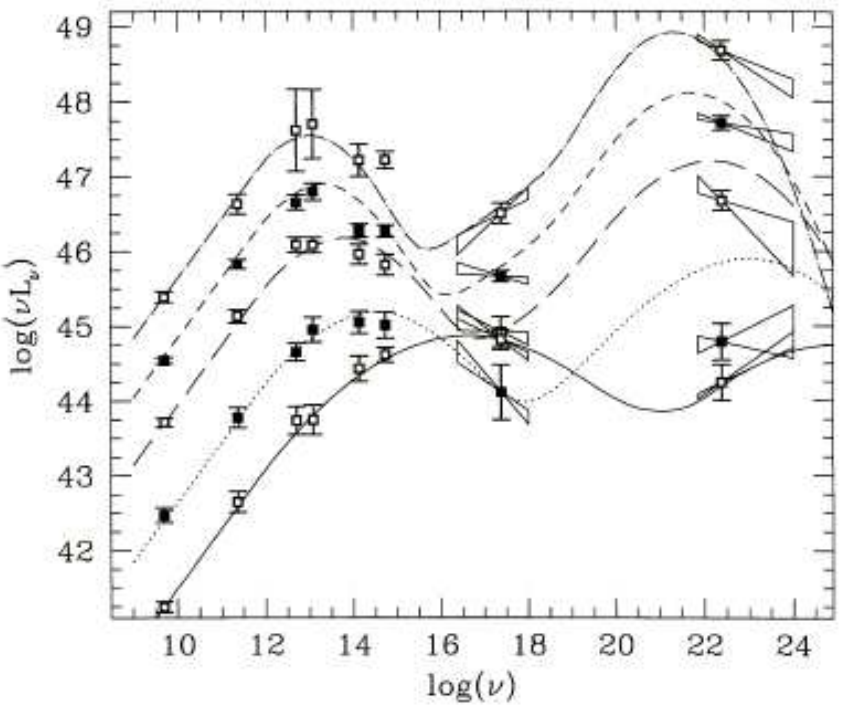


図 2.3: ブレーザーの多波長スペクトル [13]

2.4.3 ERC(External-Radiation-Compton) モデル

OVV のような明るいブレーザーには、スペクトルに広い輝線が卓越して観測され、ジェット以外の放射も明るく、中心のブラックホールの降着円盤からでた光子や、ジェット周辺の物質によってブラックホール周辺からの光子が散乱したものが考えられている。そのためジェット外部からジェットに入射する光子を考えて、それらの光子の逆コンプトン散乱を考慮したものが ERC モデルである。OVV の放射スペクトルは SSC モデルと ERC モデルの複合でうまく説明できる。SSC と ERC の放射モデルを図 2.4 に示す。

2.5 本論文の目的

HBL についてはこれまで時間変動の研究が詳しくなされてきているが、OVV は HBL に比べて変動が小さく、天体までの距離も HBL に比べると遠いものがほとんどであるため暗く、放射メカニズムもわかりづらいので、OVV についての時間変動を詳しく研究した例は少ない。

本研究では、ASCA と RXTE 衛星とのデータを用いて、ブレーザーの時間変動を解析することによって、OVV と HBL の比較を行い、OVV の放射メカニズムに迫ることを目的とする。

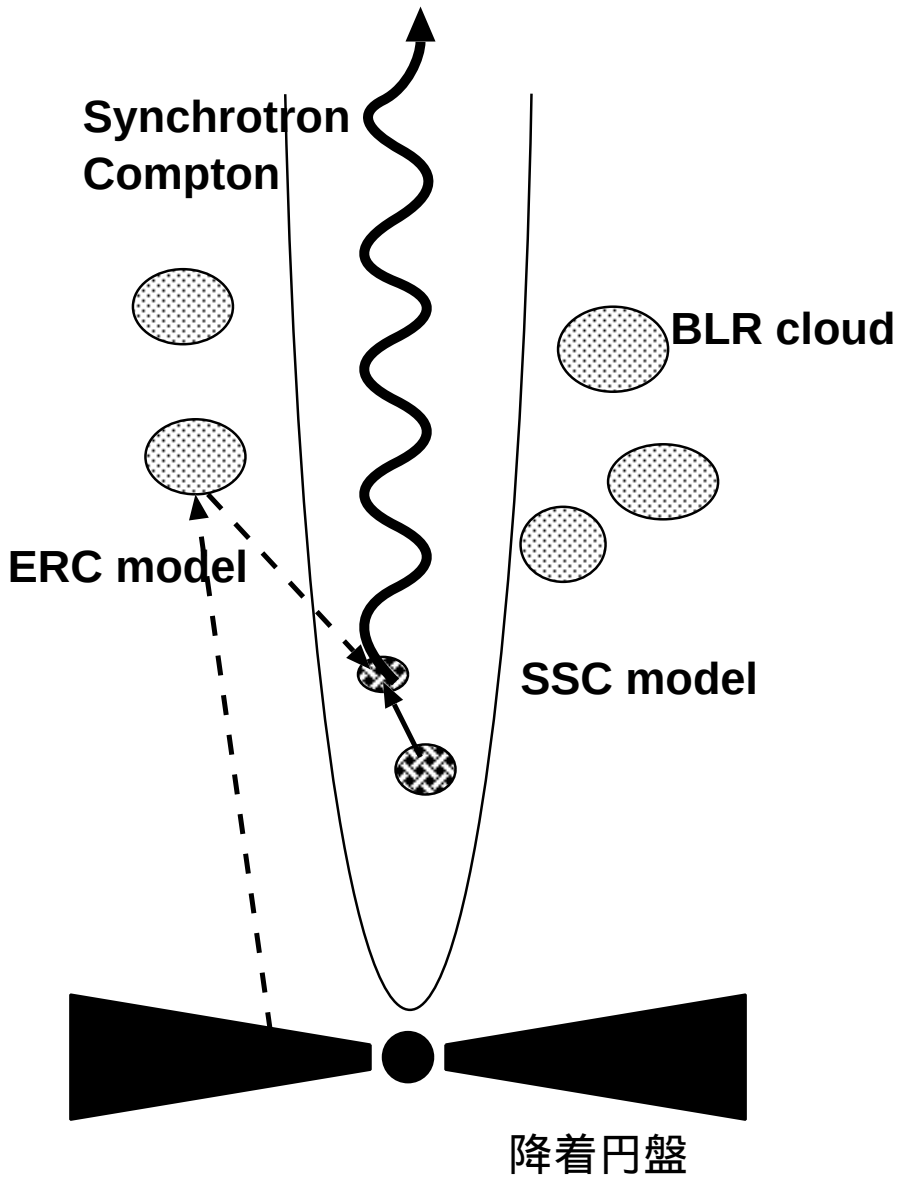


図 2.4: ブレーザーの放射モデル [1, 2]

第3章　観測衛星：RXTEとASCA

3.1　RXTE

3.1.1　RXTEの概要

RXTE衛星は天文学者のBruno Rossiにちなんで名付けられRossi-X-ray Timing Explorerの頭文字をとったもので、NASAのX線衛星として、1995年12月30日にDelta IIロケットによって打ち上げられた。

RXTEの軌道は遠地点が約580km、近地点が560kmで傾斜角は23°で軌道周期は約90分である。RXTEはtransientやX線バーストなどが検出された特定の天体のみを観測するように設計されている。1つの天体を数年の間ほぼ毎日観測するので長期的変動を見ることができ、時間変動を特徴にもつブレーザーは勿論、ブラックホール連星等の観測にも適している。RXTEには3つの観測装置、Proportional Counter Array(PCA)とHigh Energy X-ray Timing Experiment(HEXTE)とALL Sky Monitor(ASM)が搭載されているが、「ASCA」や「BeppoSAX」等のようにイメージ観測をすることはできない。PCAとHEXTEのエネルギー範囲はそれぞれ2-60keV、20-100keVである。ASMは1.5-12keVの範囲で90分かけて全天の80%をスキャンしている。

3.1.2　PCA

PCAは既知のX線源の精密な観測を主な目的としており、Goddard Space Flight Center(GSFC)によって開発された。5つのproportional couter unit(PCU)からなり、全てをあわせたcollecting areaは6250cm^{2}で過去最大である。

それぞれのPCUにはキセノンを用いたガス比例計数管と視野を1°に絞るコリメーターがある。ガス比例計数管はプロパン層とキセノン層(シグナル層)に分かれており、その周りにはveto層と呼ばれるものがある。キセノン層とveto層の反同時計数法をとることでバックグラウンドをある程度除去できる。プロパン層はバックグラウンドである荷電粒子を除去するが3keV以上のphotonは通す。プロパン層の下にあるキセノン層は更に3つに分かれており、一番上の層で10keV以下の光子の約90%が検出される。表3.1にPCAの諸元を示す。

PCAで得られたデータはまずEDS(Event Data Selector)に送られる。EDSは8つのEvent Analyzer(EA)があって、データを加工する。6つのEAがPCAデータ

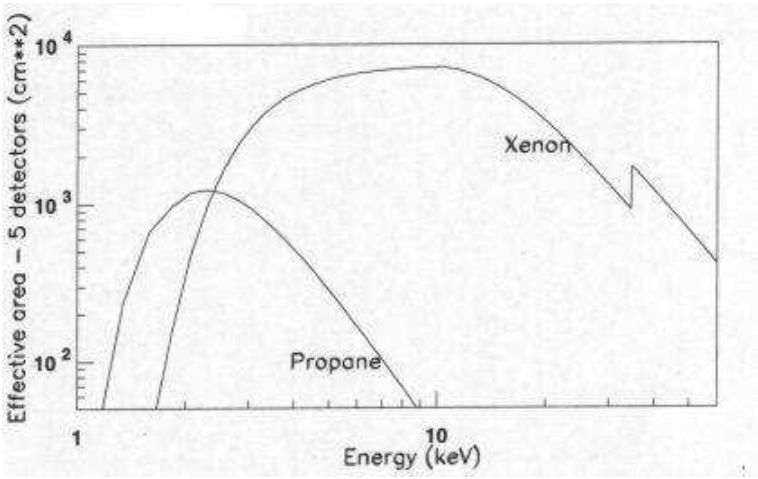


図 3.1: PCA：有効断面積 [4]

表 3.1: PCA の諸元 [4]

エネルギー範囲	2-60 keV
エネルギー分解能	< 18 % at 6keV
時間分解能	1 μs
視野	1 ° (FWHM)
Collecting area	6500 cm^2
Effective area	3000 cm^2 at 3keV
	6000 cm^2 at 6keV (図 3.1 も参照)
Layers	1 プロパン (veto) + 3 キセノン + 1 キセノン (veto)
Sensitivity	0.1 mCrab
バックグラウンド	90 mCrab
Telemetry	18 kb/s

を、残りの二つがASMデータを扱う。PCAを扱うもののうちの二つはstandard modeでスペクトルデータを作る。PCAのstandard modeは二つあり、Standard-1は時間分解能0.125sでStandard-2は16sの時間分解能と129 energy channelをもつ。今回はStandard-2を使って解析している。また、ASMのデータは取り扱っていない。

3.2 ASCAの概要

X線天文衛星「ASCA」(Astro-D)は、「はくちょう」(1979年2月)、「てんま」(1983年2月)、「ぎんが」(1987年2月)に継ぐ我が国4番目のX線天文衛星であると同時に、宇宙研の第15号科学衛星でもある。1993年2月20日午前11時に鹿児島宇宙空間測所(KSC)により、M-3SII型ロケット7号機により打ち上げられ、近地点高度は約520km、遠地点高度が約620kmの楕円軌道に投入された。衛星重量は約420kg、軌道上でオプティカルベンチを伸展たときの長さは約4.7mである。「ASCA」は天体からのX線像とX線スペクトルを同時にとることができる観測装置を搭載しており、その装置は、約0.5keV-10keVの広いエネルギー範囲で大きな有効面積を持ち、その性能は当時世界最高であった。

「ASCA」を特徴づけるのは、「多重薄膜による、軽量でかつ大面積のX線鏡」と「高いエネルギー分解能を持つ焦点検出器」である。同衛星は4台のX線望遠鏡(XRT)を用い、その焦点面に2種類の異なったタイプの検出器、X線CCDカメラ(SIS)と撮像型蛍光比例計数管(GIS)が配置されている。これら二つの検出器は、X線分光と撮像を相補的に行う撮像センサーである。4つのX線望遠鏡のうち二つはSISと組み合わされ、他二つはGISと組み合わされている。

3.2.1 X線望遠鏡(XRT)

当時のX線衛星では、搭載されたX線望遠鏡の撮像能力が4keV以下のX線に限られていたが、「ASCA」では先にも述べたように、約0.5keV-10keVまで集光できるので、多くの天体から高いエネルギーのX線像が得られることがはじめて可能となった。4keV以上のX線は非常に透過力が強いので、厚いガスに遮られて観測することができなかった天体もASCAを使えば、精密に観測できる。このXRTの元となる技術は、NASAのゴダード飛行センターのSerlemitsos博士によって考案され、ゴダード飛行センターと名古屋大学の研究者を中心とするグループによってASCAではじめて人工衛星で実現された。このXRTに使われている光学系は多層薄膜型斜入射光学系とよばれ、非情に薄いアルミニウムの板に金を精密にコーティングした反射鏡を沢山集めたものである。鏡面基板を極限まで薄くすることで反射鏡の積層数を増やし開口効率と有効面積を高めている。表3.2にXRTの諸元を示す。

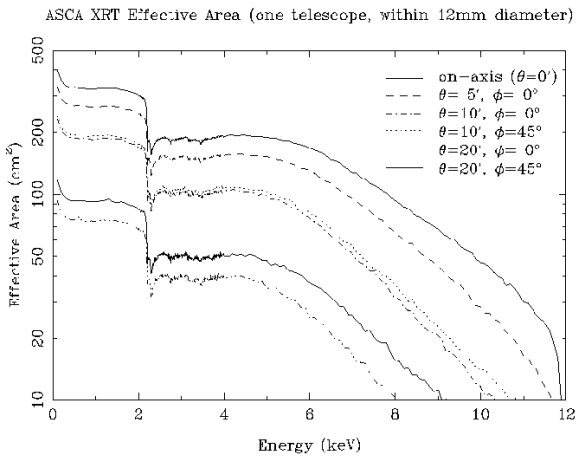


図 3.2: XRT の有効面積

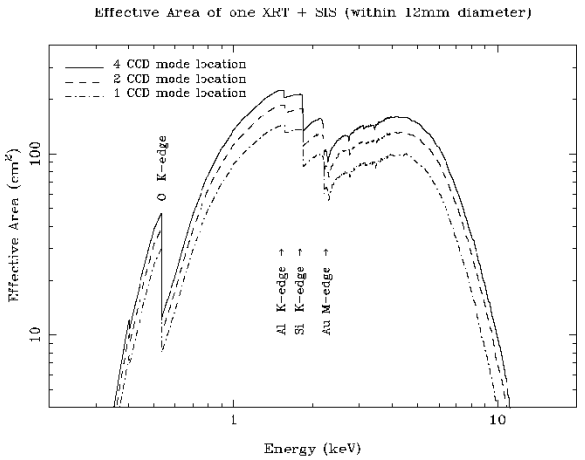


図 3.3: SIS の有効面積

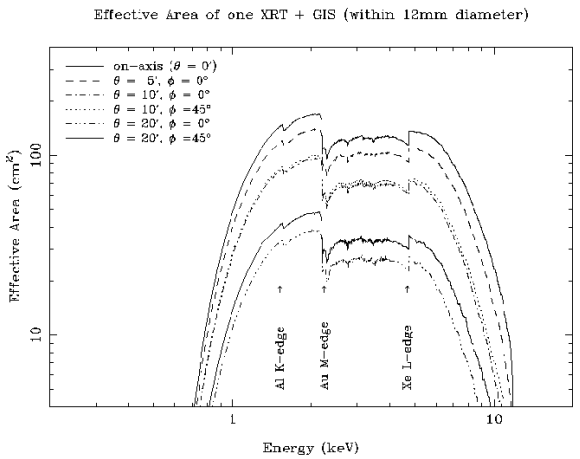


図 3.4: GIS の有効面積

表 3.2: XRT の諸元

エネルギー範囲	0.5-10keV
エネルギー分解能	SIS;∼2.2%(@5.9keV)
	GIS;∼8.0%(@5.9keV)
焦点距離	3.5m
視野	24 分角 (@1keV)
	16 分角 (@7keV)
空間分解能	180 秒角
有効面積	図 3.2.1 参照

3.2.2 X 線 CCD カメラ (SIS)

SIS(Solidstate Imaging Spectrometer) は、世界ではじめて X 線を光子計測する CCD カメラである。その特徴として、厚い空乏層、低い読みだしノイズ、高い耐放射線構造である。

二つの SIS(SIS0 と SIS1) が XRT の焦点面に搭載されており、一つのセンサーは 11mm 角のチップ 4 枚で構成されている。また、チップ間には大小の溝があり、SIS0 の chip1(s0c1) と SIS1 の chip3(s1c3) をノミナルチップと呼ぶ。

SIS は入射してきた X 線のエネルギーに対応して、電子雲を空乏層に作る。Si の平均電離エネルギーが ~ 3.65eV とガス (~ 30eV) と比べて小さいこと、ファノ因子が小さいこと、ノイズが小さいことから、エネルギー分解能が 2.2%(@5.9keV, 打ち上げ当初の性能) を達成している。この性質を引き出すためには、検出器を-60 ℃まで低温にしなければならず、「ASCA」ではペルチエ素子による電子冷却と放射冷却によって、CCD を-70 ℃まで冷却している。

SIS の動作モードは大別して二種類あり、観測モードと診断モードである。通常観測は観測モードである。しかし、今回の解析では SIS のデータはライトカーブを作ったときに、data gap が多かったため用いなかった。

3.2.3 撮像型蛍光比例計数管 (GIS)

GIS(Gas Imaging Spectrometer) は広い視野、良い時間分解能、高エネルギー領域での高い量子効率を持っており、SIS と相補的関係にある。エネルギー分解能は ∼8%(@5.9keV) である。二つの GIS が XRT の焦点面に配置されている。この GIS は「てんま」衛星に搭載された装置を基にして更に改良を加えたものである。

GIS には観測モードとメモリチェックモードがある。観測モードには、PH(Pulse Height) モード、PH PCAL(Positon Calibration) モード、MPC モードがあり、通

常の観測ではPHモードが使われる。今回の解析でもPHモードを使った。PHモードでの観測可能な最大強度と時間分解能を表3.3に示す。

表 3.3: GIS PHモードの諸元

ビットレート	count/s (GIS2,3 合計)	時間分解能 タイミングビット数	
		0 ビット	10 ビット
High	256	62.5ms	61μs
Med	32	500ms	488μs
Low	8	2s	1.95ms

二台のGISにはそれぞれキャリブレーションソースとして、Fe(5.895keV)が載せてあり、これが500chになるようにゲインが補正されている。

第4章　データ解析と観測天体

4.1　レスポンス関数とスペクトル解析

スペクトル解析とは、いくつかのパラメータをもつ理論的なモデルを検出器のレスポンス関数を通してモデルスペクトルを作り、実際得られたデータと比較し、χ^2 統計の最小値を見つけることである。スペクトル解析には、イベントファイル、バックグラウンドファイル、Ancillary Rexponse File(ARF ファイル)、Redistribution Matrix Function(RMF ファイル) が必要である。ARF ファイルとは関数 A(E) がベクトルの形で表されており、検出器の量子効率と有効面積のエネルギー依存性を表している。ここで、E とはエネルギーである。、RMF ファイルとは関数 R(P;E) が行列の形で表されており、エネルギーをチャンネル分布に変化するファイルである。ここで、P はチャンネルを表している。RMF ファイルは検出器の 1 センサーのどの場所でもほとんど同じであると考えられるので、各センサーそれぞれに一つだけファイルを作れば良いが、ARF ファイルは観測する天体の検出器上での位置や、取り出す領域の大きさ等によって異なるので、全ての観測に対応したファイルを作らなければならない。

モデルスペクトルを作るには、ARF ファイル A(E) と RMF ファイル R(P,E) を掛け合わせてレスポンス関数を作り、入射エネルギースペクトルモデル S(E) を用いる。するとモデルスペクトル M(P) は以下の式のように表せる。

$$M(P) = \int R(P,E)A(E)S(E)dE$$

実際観測されたスペクトル D(P) は、イベントファイルからバックグランドファイルをひいたもので、モデルスペクトルと実際のスペクトルの比較を行うことで、スペクトルフィッティングすることができる。この比較で χ^2 は

$$\chi^2 = \sum_P \left(\frac{D(P) - M(P)}{\sigma(P)} \right)^2$$

であり、ここで $\sigma(P)$ は統計誤差と系統誤差を用いて $\sqrt{\sigma^2_{poisson} + \sigma^2_{sys}}$ と表される。ただ、多くの場合、系統誤差は統計誤差に比べて非常に小さいので無視できる。

4.2 観測天体とデータ

この節では、実際解析した天体のなかでも、代表的な天体 Mrk421、Mrk501、3C273、3C279 の説明と、その他の天体についての性質を表にまとめたものと、RXTE と ASCA 両方の全解析データのリストを載せている。ここで、解析したデータに HBL が入っている理由は、HBL と OVV の比較を行うためである。

Mrk421

Mrk421 は BL Lac 型天体の HBL であり、どのエネルギー領域においても明るく、特に X 線領域において激しい変動を示し、その周期は 1 日より短い。X 線領域のスペクトルは急勾配で、その photon-index は $2.5 - 3$ である。だが、変動が激しいのでスペクトルの形も一意には決まらない。EGRET による観測で、GeV 領域のガンマ線が検出され、更にチェレンコフ望遠鏡により、銀河系外初の TeV ガンマ線天体とわかった。ガンマ線領域でのスペクトルの photon-index は 3 であり、ガンマ線フラックスは蟹星雲の約 30%程度である。

Mrk501

Mrk501 も Mrk421 同様 HBL である。Mrk421 ほどではないが、X 線領域で明るく変動も激しい。変動の周期は一日よりも長く、X 線のスペクトルは急勾配で、その photon-index は $2.0 - 2.6$ である。1995 年には銀河系外二番目の TeV ガンマ線源となった。TeV 領域のスペクトルも X 線と同様に急勾配である。その photon-index は 2.5 で、ガンマ線フラックスは蟹星雲の 10%程である。

3C273

OVV であり、歴史上はじめて観測されたクエーサーである。この天体までの距離は約 25 億光年で見かけの明るさが約 13 等もの明るさで光っている。

ASCA の観測によれば、photon-index もフラックスも少ししか変化していないということがわかっている。変動も HBL に比べたら極端に少なく、周期も長い。X 線の photon-index は $1.5 - 1.7$ である。

3C279

OVV であり、1991 年 1993 年に ASCA による多波長観測が行われた。3C273 には及ばないにしても非常に明るい天体である。X 線の photon-index は $\sim 1.6 - 1.8$ で 3C273 より若干急であるが、HBL に比べるとフラットであり、変動も少なく、周期も長い。

以下の表には、観測した全天体の性質を載せている。ただ、Mrk501 についての photon-index やフラックスの値は、1997 年の大フレアーの値は入れていない。また、RXTE 衛星の photon-index や絶対光度の値は私の解析結果であり、ASCA の photon-index の値は窪氏によるもので、絶対光度は窪氏のフラックスの結果から計算したものである。

表 4.1: ブレーザー天体の性質

Objectname	赤方偏移	観測衛星	タイプ	X 線の photon-index	X 線の絶対光度 (erg/s)
Mrk421	0.031	RXTE	HBL	$2.5 - 3.2$	$3.5 \times 10^{43} - 7.0 \times 10^{44}$
	同上	ASCA	同上	$2.3 - 2.9$	$4.4 \times 10^{43} - 4.4 \times 10^{44}$
Mrk501	0.034	RXTE	HBL	$2.0 - 2.6$	$4.2 \times 10^{43} - 1.7 \times 10^{44}$
H1426+428	0.129	RXTE	HBL	$1.6 - 2.2$	$2.9 \times 10^{44} - 1.2 \times 10^{45}$
3C273	0.158	RXTE	OVV	$1.5 - 1.7$	$1.5 \times 10^{45} - 5.7 \times 10^{45}$
	同上	ASCA	同上	$1.5 - 1.6$	$5.0 \times 10^{45} - 7.7 \times 10^{45}$
3C279	0.538	ASCA	OVV	$1.6 - 1.8$	$2.0 \times 10^{45} - 4.6 \times 10^{45}$
PKS0208-512	1.003	ASCA	OVV	$1.6 - 1.9$	$1.8 \times 10^{45} - 5.9 \times 10^{45}$
PKS0528+134	2.060	ASCA	OVV	$1.6 - 1.7$	$5.3 \times 10^{45} - 1.8 \times 10^{46}$
CTA102	1.037	ASCA	OVV	1.5	2.2×10^{45}
NRAO140	1.258	ASCA	OVV	1.6	8.2×10^{45}
4C38.41	1.814	ASCA	OVV	$1.5 - 1.6$	$1.7 \times 10^{45} - 2.7 \times 10^{45}$

次ページの表は、実際解析に用いた天体の全データである。

表 4.2: RXTE:Mrk501 の全データリスト

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
20340-01-01-00	1997-03-18	50525	976.0	20340-04-14-00	1997-04-09	50547	832.0
20340-01-02-00	1997-05-02	50570	816.0	20340-04-15-00	1997-04-10	50548	640.0
20340-01-03-00	1997-05-02	50570	864.0	20340-04-16-00	1997-04-10	50548	864.0
20340-01-04-00	1997-05-03	50571	16.0	20340-04-17-00	1997-04-11	50549	560.0
20340-01-05-00	1997-05-04	50572	496.0	20340-04-18-00	1997-04-11	50549	816.0
20340-01-06-00	1997-05-04	50572	704.0	20340-04-19-00	1997-04-12	50550	864.0
20340-01-07-00	1997-05-05	50573	1008.0	20340-04-20-00	1997-04-12	50550	1056.0
20340-01-08-00	1997-05-05	50573	832.0	20340-04-21-00	1997-04-13	50551	816.0
20340-01-09-00	1997-05-06	50574	528.0	20340-04-22-00	1997-04-13	50551	912.0
20340-01-10-00	1997-05-06	50574	1488.0	20340-04-23-00	1997-04-14	50552	800.0
20340-01-11-00	1997-05-07	50575	1632.0	20340-04-24-00	1997-04-14	50552	1056.0
20340-01-12-00	1997-05-07	50575	880.0	20340-04-25-00	1997-04-15	50553	1072.0
20340-01-13-00	1997-05-08	50576	224.0	20340-04-26-00	1997-04-15	50553	928.0
20340-01-14-00	1997-05-08	50576	1152.0	20340-04-27-00	1997-04-16	50554	1040.0
20340-01-15-00	1997-05-09	50577	304.0	20340-04-28-00	1997-04-16	50554	720.0
20340-01-16-00	1997-05-09	50577	384.0	40182-01-01-00	1999-05-07	51305	752.0
20340-01-17-00	1997-05-10	50578	608.0	40182-01-01-02	1999-05-07	51305	3408.0
20340-01-18-00	1997-05-10	50578	992.0	40182-01-01-03	1999-05-08	51306	3440.0
20340-01-19-00	1997-05-11	50579	784.0	40182-01-01-04	1999-05-09	51307	3200.0
20340-01-20-00	1997-05-11	50579	896.0	40182-01-01-05	1999-05-10	51308	1424.0
20340-01-21-00	1997-05-12	50580	960.0	40182-01-01-06	1999-05-11	51309	1712.0
20340-01-22-00	1997-05-12	50580	336.0	40182-01-01-07	1999-05-10	51308	3344.0
20340-01-23-00	1997-05-13	50581	528.0	40182-01-01-08	1999-05-09	51307	2256.0
20340-01-24-00	1997-05-13	50581	464.0	40182-01-01-09	1999-05-08	51306	1344.0
20340-01-25-00	1997-05-14	50582	672.0	40182-01-02-00	1999-05-11	51309	2352.0
20340-01-26-00	1997-05-14	50582	944.0	40182-01-02-01	1999-05-12	51310	2256.0
20340-01-27-00	1997-05-15	50583	800.0	40182-01-02-02	1999-05-13	51311	1040.0
20340-01-28-00	1997-05-15	50583	704.0	40182-01-02-03	1999-05-12	51310	1152.0
20340-04-01-00	1997-04-03	50541	1616.0	40182-01-02-04	1999-05-13	51311	512.0
20340-04-02-00	1997-04-03	50541	928.0	40182-01-02-05	1999-05-11	51309	1264.0
20340-04-03-00	1997-04-04	50542	928.0	40182-01-03-00	1999-05-16	51314	1088.0
20340-04-04-00	1997-04-04	50542	832.0	40182-01-03-01	1999-05-16	51314	736.0
20340-04-05-00	1997-04-05	50543	1856.0	40182-01-03-02	1999-05-17	51315	1152.0
20340-04-06-00	1997-04-05	50543	768.0	40182-01-03-03	1999-05-17	51315	800.0
20340-04-07-00	1997-04-06	50544	784.0	40182-01-03-04	1999-05-17	51315	608.0
20340-04-08-00	1997-04-06	50544	848.0	40182-01-03-05	1999-05-18	51316	1232.0
20340-04-09-00	1997-04-07	50545	816.0	40182-01-03-06	1999-05-18	51316	672.0
20340-04-10-00	1997-04-07	50545	896.0	40182-01-03-07	1999-05-19	51317	1328.0
20340-04-11-00	1997-04-08	50546	880.0	40182-01-03-08	1999-05-19	51317	1040.0
20340-04-12-00	1997-04-08	50546	896.0	40182-01-03-09	1999-05-19	51317	768.0
20340-04-13-00	1997-04-09	50547	1008.0	40182-01-03-10	1999-05-20	51318	1360.0

表 4.3: RXTE:Mrk501 の全データリスト (続き)

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
40182-01-03-11	1999-05-20	51318	1280.0	40182-01-09-12	2000-07-25	51750	752.0
40182-01-03-12	1999-05-20	51318	832.0	40182-01-09-13	2000-07-26	51751	2096.0
40182-01-03-13	1999-05-14	51312	1024.0	40182-01-10-00	2000-07-28	51753	2432.0
40182-01-03-14	1999-05-15	51313	160.0	40182-01-10-01	2000-07-28	51753	352.0
40182-01-03-16	1999-05-16	51314	480.0	40182-01-10-02	2000-07-29	51754	784.0
40182-01-04-00	1999-05-21	51319	304.0	40182-01-10-03	2000-07-29	51754	1360.0
40182-01-04-01	1999-05-22	51320	1328.0	40182-01-10-04	2000-07-29	51754	2176.0
40182-01-04-02	1999-05-23	51321	2640.0	40182-01-10-05	2000-07-31	51756	2192.0
40182-01-04-03	1999-05-24	51322	1216.0	40182-01-10-06	2000-07-31	51756	3904.0
40182-01-04-04	1999-05-25	51323	2016.0	40182-01-10-07	2000-08-01	51757	1888.0
40182-01-04-05	1999-05-26	51324	784.0	40182-01-10-08	2000-08-01	51757	2736.0
40182-01-04-06	1999-05-21	51319	1120.0	40182-01-10-09	2000-08-02	51758	448.0
40182-01-04-07	1999-05-22	51320	992.0	40182-01-10-10	2000-08-02	51758	880.0
40182-01-04-08	1999-05-21	51319	704.0	40182-01-10-11	2000-08-03	51759	1088.0
40182-01-04-09	1999-05-24	51322	1152.0	40182-01-10-12	2000-07-30	51755	2064.0
40182-01-05-00	1999-06-04	51333	2080.0	40182-01-10-13	2000-08-03	51759	800.0
40182-01-05-01	1999-06-05	51334	2016.0	40182-01-11-00	2000-08-04	51760	3312.0
40182-01-05-02	1999-06-05	51334	1936.0	40182-01-11-01	2000-08-04	51760	2096.0
40182-01-05-03	1999-06-06	51335	2064.0	40182-01-12-00	2000-08-18	51774	256.0
40182-01-05-04	1999-06-06	51335	1872.0	40182-01-12-01	2000-08-19	51775	1760.0
40182-01-05-05	1999-06-07	51336	1952.0	40182-01-12-02	2000-08-20	51776	1696.0
40182-01-05-06	1999-06-08	51337	2096.0	40182-01-12-03	2000-08-21	51777	1632.0
40182-01-05-07	1999-06-09	51338	2176.0	40182-01-12-04	2000-08-22	51778	1536.0
40182-01-05-08	1999-06-09	51338	2160.0	40182-01-12-05	2000-08-23	51779	1408.0
40182-01-05-10	1999-06-10	51339	1088.0	40182-01-12-06	2000-08-24	51780	1328.0
40182-01-06-00	1999-06-08	51337	2048.0	40182-01-12-07	2000-08-29	51785	1728.0
40182-01-06-01	1999-07-05	51364	880.0	40182-01-13-00	2000-08-25	51781	1248.0
40182-01-07-00	1999-07-04	51363	1008.0	40182-01-13-01	2000-08-26	51782	1264.0
40182-01-08-00	2000-07-20	51745	1456.0	40182-01-13-02	2000-08-27	51783	1312.0
40182-01-09-00	2000-07-21	51746	1440.0	40182-01-13-03	2000-08-28	51784	1328.0
40182-01-09-01	2000-07-22	51747	1424.0	40182-01-13-04	2000-08-30	51786	1296.0
40182-01-09-02	2000-07-22	51747	1200.0	40182-01-13-05	2000-08-31	51787	1296.0
40182-01-09-03	2000-07-23	51748	1472.0	40182-01-14-00	2000-09-01	51788	1632.0
40182-01-09-04	2000-07-23	51748	1728.0	40182-01-15-00	2000-09-17	51804	832.0
40182-01-09-05	2000-07-24	51749	1552.0	40182-01-15-01	2000-09-18	51805	896.0
40182-01-09-06	2000-07-24	51749	1776.0	40182-01-15-02	2000-09-19	51806	864.0
40182-01-09-07	2000-07-25	51750	1616.0	40182-01-15-03	2000-09-20	51807	912.0
40182-01-09-08	2000-07-25	51750	1440.0	40182-01-15-04	2000-09-21	51808	1808.0
40182-01-09-09	2000-07-27	51752	752.0	40182-01-16-00	2000-09-22	51809	2256.0
40182-01-09-10	2000-07-27	51752	1648.0	40182-01-16-01	2000-09-23	51810	2432.0
40182-01-09-11	2000-07-27	51752	2000.0	40182-01-16-02	2000-09-24	51811	3296.0

表 4.4: RXTE:Mrk421 の全データリスト

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
20341-01-01-00	1997-04-04	50542	4400.0	30269-01-05-00	1998-04-25	50928	7088.0
20341-01-01-01	1997-04-05	50543	2480.0	30269-01-04-00	1998-04-05	50908	4544.0
20341-01-01-02	1997-04-05	50543	2496.0	30269-01-05-00	1998-04-25	50928	7088.0
20341-01-01-03	1997-04-10	50548	1984.0	30269-01-05-01	1998-04-25	50928	1744.0
20341-01-01-04	1997-04-10	50548	1936.0	30269-01-06-00	1998-04-29	50932	8976.0
20341-01-02-00	1997-04-03	50541	4336.0	30269-01-07-00	1998-05-18	50951	1264.0
20341-01-02-01	1997-04-02	50540	9392.0	30269-01-07-01	1998-05-18	50951	1568.0
20341-01-03-00	1997-04-11	50549	6336.0	30269-01-07-02	1998-05-19	50952	1968.0
20341-01-03-01	1997-04-12	50550	8256.0	30269-01-07-03	1998-05-21	50954	1200.0
20341-01-04-00	1997-04-29	50567	1264.0	30269-01-08-00	1998-06-03	50967	4832.0
20341-01-04-01	1997-04-30	50568	2416.0	30269-01-08-01	1998-06-03	50967	1856.0
20341-01-04-02	1997-05-01	50569	2112.0	30269-01-08-02	1998-06-03	50967	1104.0
20341-01-05-00	1997-05-02	50570	2512.0	30269-01-09-00	1998-06-12	50976	6000.0
20341-01-05-01	1997-05-03	50571	880.0	30269-01-09-01	1998-06-12	50976	1536.0
20341-01-05-02	1997-05-03	50571	2624.0	30269-01-10-00	1998-06-30	50994	1808.0
20341-01-05-03	1997-05-04	50572	1008.0	30269-01-10-01	1998-06-30	50994	1840.0
20341-01-05-04	1997-05-04	50572	1184.0	30269-01-10-02	1998-06-30	50994	2064.0
20341-01-05-05	1997-05-06	50574	4144.0	30269-01-10-03	1998-06-30	50994	1840.0
20341-01-05-06	1997-05-06	50574	960.0	30269-01-11-00	1998-07-22	51016	7200.0
20341-01-06-00	1997-06-03	50602	2048.0	30269-01-11-01	1998-07-23	51017	1792.0
30269-01-01-00	1998-02-26	50870	6416.0	30269-01-11-02	1998-07-23	51017	896.0
30269-01-02-00	1998-03-10	50882	2736.0	30269-01-11-03	1998-07-24	51018	480.0
30269-01-03-00	1998-03-20	50892	8448.0	30269-01-11-04	1998-07-24	51018	1792.0
30269-01-04-00	1998-04-05	50908	4544.0	30269-01-11-05	1998-07-25	51019	1744.0
30269-01-05-00	1998-04-25	50928	7088.0	30269-01-11-06	1998-07-22	51016	640.0

表 4.5: RXTE:3C273 の全データリスト

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
20349-02-01-00	1996-11-03	50390	816.0	20349-02-11-01	1997-01-10	50458	528.0
20349-02-02-00	1996-11-13	50400	992.0	20349-02-11-02	1997-01-10	50458	528.0
20349-02-03-00	1996-11-18	50405	800.0	20349-02-11-03	1997-01-11	50459	1072.0
20349-02-04-00	1996-11-24	50411	896.0	20349-02-11-04	1997-01-11	50459	576.0
20349-02-05-00	1996-12-02	50419	768.0	20349-02-11-05	1997-01-12	50460	992.0
20349-02-06-00	1996-12-10	50427	944.0	20349-02-11-06	1997-01-12	50460	528.0
20349-02-07-00	1996-12-15	50432	1136.0	20349-02-11-07	1997-01-13	50461	928.0
20349-02-08-00	1996-12-26	50443	528.0	20349-02-11-08	1997-01-14	50462	528.0
20349-02-08-01	1996-12-26	50443	560.0	20349-02-11-09	1997-01-14	50462	464.0
20349-02-08-02	1996-12-25	50442	528.0	20349-02-11-10	1997-01-15	50463	528.0
20349-02-08-03	1996-12-25	50442	544.0	20349-02-11-11	1997-01-15	50463	544.0
20349-02-08-04	1996-12-24	50441	576.0	20349-02-11-12	1997-01-16	50464	496.0
20349-02-08-05	1996-12-23	50440	528.0	20349-02-11-13	1997-01-16	50464	528.0
20349-02-09-00	1996-12-30	50447	544.0	20349-02-12-00	1997-01-17	50465	528.0
20349-02-09-01	1997-01-02	50450	272.0	20349-02-12-01	1997-01-17	50465	688.0
20349-02-09-02	1997-01-02	50450	560.0	20349-02-12-02	1997-01-18	50466	512.0
20349-02-09-03	1997-01-01	50449	400.0	20349-02-12-03	1997-01-18	50466	528.0
20349-02-09-04	1997-01-01	50449	544.0	20349-02-12-04	1997-01-19	50467	560.0
20349-02-09-05	1996-12-31	50448	544.0	20349-02-12-05	1997-01-19	50467	544.0
20349-02-09-06	1996-12-31	50448	528.0	20349-02-12-06	1997-01-20	50468	528.0
20349-02-09-07	1996-12-30	50447	544.0	20349-02-12-07	1997-01-21	50469	480.0
20349-02-09-10	1996-12-28	50445	528.0	20349-02-12-08	1997-01-21	50469	496.0
20349-02-09-11	1996-12-28	50445	512.0	20349-02-12-09	1997-01-20	50468	544.0
20349-02-09-12	1996-12-27	50444	544.0	20349-02-12-10	1997-01-22	50470	512.0
20349-02-09-13	1996-12-27	50444	576.0	20349-02-12-11	1997-01-22	50470	480.0
20349-02-10-00	1997-01-06	50454	544.0	20349-02-12-12	1997-01-23	50471	560.0
20349-02-10-01	1997-01-03	50451	544.0	20349-02-12-13	1997-01-23	50471	496.0
20349-02-10-02	1997-01-03	50451	528.0	20349-02-13-00	1997-01-29	50477	624.0
20349-02-10-03	1997-01-04	50452	528.0	20349-02-13-01	1997-01-24	50472	544.0
20349-02-10-04	1997-01-04	50452	512.0	20349-02-13-02	1997-01-24	50472	608.0
20349-02-10-05	1997-01-05	50453	544.0	20349-02-13-03	1997-01-25	50473	912.0
20349-02-10-06	1997-01-05	50453	496.0	20349-02-13-04	1997-01-25	50473	544.0
20349-02-10-07	1997-01-06	50454	480.0	20349-02-13-05	1997-01-26	50474	528.0
20349-02-10-08	1997-01-07	50455	672.0	20349-02-13-06	1997-01-26	50474	656.0
20349-02-10-09	1997-01-07	50455	544.0	20349-02-13-07	1997-01-27	50475	720.0
20349-02-10-10	1997-01-08	50456	528.0	20349-02-13-08	1997-01-27	50475	544.0
20349-02-10-11	1997-01-08	50456	528.0	20349-02-13-09	1997-01-28	50476	624.0
20349-02-10-12	1997-01-09	50457	528.0	20349-02-13-10	1997-01-28	50476	544.0
20349-02-10-13	1997-01-09	50457	512.0	20349-02-13-11	1997-01-30	50478	320.0
20349-02-11-00	1997-01-13	50461	864.0	20349-02-13-12	1997-01-30	50478	528.0

表 4.6: RXTE:3C273 の全データリスト

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
20349-02-13-13	1997-01-29	50477	448.0	20349-02-28-00	1997-05-10	50578	1056.0
20349-02-14-00	1997-02-05	50484	656.0	20349-02-29-00	1997-05-18	50586	896.0
20349-02-14-01	1997-01-31	50479	560.0	20349-02-30-00	1997-05-28	50596	1056.0
20349-02-14-02	1997-01-31	50479	432.0	20349-02-31-00	1997-06-03	50602	896.0
20349-02-14-03	1997-02-01	50480	656.0	20349-02-32-00	1997-06-08	50607	832.0
20349-02-14-04	1997-02-01	50480	496.0	20349-02-33-00	1997-06-18	50617	976.0
20349-02-14-06	1997-02-03	50482	544.0	20349-02-34-00	1997-06-22	50621	976.0
20349-02-14-07	1997-02-03	50482	1024.0	20349-02-35-00	1997-06-28	50627	720.0
20349-02-14-08	1997-02-04	50483	400.0	20349-02-36-00	1997-07-06	50635	1088.0
20349-02-14-09	1997-02-04	50483	960.0	20349-02-37-00	1997-07-13	50642	928.0
20349-02-14-10	1997-02-05	50484	560.0	20349-02-38-00	1997-07-21	50650	592.0
20349-02-15-00	1997-02-10	50489	1168.0	20349-02-39-00	1997-07-28	50657	832.0
20349-02-16-00	1997-02-15	50494	1072.0	20349-02-40-00	1997-08-03	50663	768.0
20349-02-17-00	1997-02-23	50502	896.0	20349-02-41-00	1997-08-12	50672	544.0
20349-02-18-00	1997-03-05	50512	816.0	20349-02-42-00	1997-08-20	50680	656.0
20349-02-19-00	1997-03-09	50516	784.0	20349-02-43-00	1997-08-24	50684	640.0
20349-02-20-00	1997-03-18	50525	784.0	20349-02-44-00	1997-10-30	50751	688.0
20349-02-21-00	1997-03-21	50528	704.0	20349-02-45-00	1997-11-03	50755	800.0
20349-02-22-00	1997-03-29	50536	688.0	20349-02-46-00	1997-11-12	50764	976.0
20349-02-23-00	1997-04-05	50543	1392.0	20349-02-47-00	1997-11-17	50769	928.0
20349-02-24-00	1997-04-11	50549	768.0	20349-02-48-00	1997-11-25	50777	992.0
20349-02-25-00	1997-04-19	50557	864.0	20349-02-49-00	1997-12-02	50784	928.0
20349-02-26-00	1997-04-26	50564	976.0	20349-02-50-00	1997-12-11	50793	816.0
20349-02-27-00	1997-05-04	50572	1168.0	20349-02-51-00	1997-12-18	50800	880.0
20349-02-28-00	1997-05-10	50578	1056.0	20349-02-52-00	1997-12-23	50805	864.0

表 4.7: ASCA:全データリスト

Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)	Observation ID	UT	MJD	観測時間 (sec)
73012000	1994-12-20	49706	9776.0	73084000	1995-12-06	50057	11580.1
73012010	1995-01-08	49706	3900.0	71047000	1994-02-01	49384	24813.6
73012020	1995-01-05	49725	7582.0	73086010	1995-07-26	49924	7644.2
73012030	1995-06-27	49706	8352.1	74084000	1996-01-07	49924	6450.0
73012040	1995-07-08	49725	9828.1	72030000	1994-08-28	49592	12457.8
74020010	1996-03-21	50163	9497.9	73054000	1995-03-14	49592	7039.9
74020020	1996-03-25	50163	8762.1	73090000	1995-03-19	49790	8862.0
74020030	1996-03-27	50167	8092.0	71038000	1993-12-21	49342	6046.1
75015020	1997-05-01	50569	6840.1	71038010	1993-12-16	49342	10735.9
75015030	1997-05-03	50569	8864.1	71038020	1993-12-24	49337	5870.0
75015050	1997-05-06	50571	8543.9				

この表の Observation ID は左側は 3C279,4C38.41,Mrk421 右側は CTA102,NRAO140, PKS0208-512,PKS0528+134,3C273 である。

第5章　解析結果

ここでは、二つの衛星のデータを用いてそれぞれの衛星の特徴を生かした解析を行った。RXTE 衛星は同じ天体を何度も観測するためブレーザーの長期的な時間変動を研究する上で適している。一方で、OVV のような遠い天体は、暗いために RXTE の観測回数が少ないので、より感度の良い ASCA のデータを用いて解析した。

5.1　RXTE のデータ解析

この節では始めに、スペクトル解析に用いた power-law モデルについて述べ、次に RXTE のデータ (Mrk421、Mrk501、H1426+428、3C273) を用いた解析結果であるフラックスと photon-index の時間変動の結果と考察を述べる。HBL について Mrk421 と Mrk501 を選んだのは、前章にも述べたが HBL の代表格であるためで、H1426+428 については窪氏らが解析した HBL の中で、公開されているデータが最も多かったからで、OVV については、3C273 のデータ以外は公開されているものが少なかったからである。

5.1.1　Power-law モデル

power-law モデルのスペクトルは以下のような式で与えられるものである。

$$N(E) = KE^{-\alpha}$$

ここで K は normalilzation、つまり単位エネルギー・単位時間・単位面積あたりの放射光子数で、α は photon-index とよばれる定数で、エネルギー E は、1keV を基準にしている。このスペクトルは log-log スケールにすると傾き α の直線となる。大まかな特徴をあげると、α が大きければ、低エネルギー側の光子が多く、高エネルギー側の光子は少ないことを意味し、α が小さければ光エネルギー側までスペクトルが延びていることを示す。シンクロトロン放射や、逆コンプトン散乱によるスペクトルは、このモデルで近似できる。

5.1.2 OVV と HBL の長期的な時間変動の比較

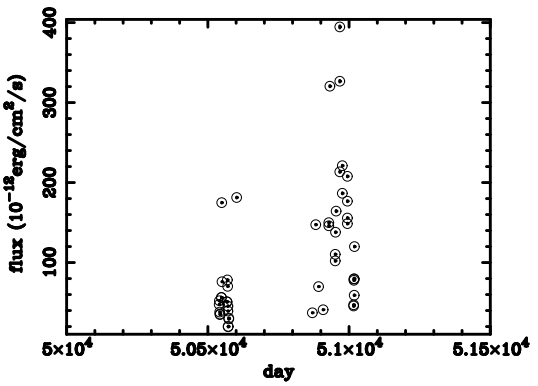
フラックスの時間変動

HBL である Mrk421、Mrk501、H1426+428 と OVV である 3C273 のフラックス (4-10keV) の時間変動の様子を図 5.1 に示す。縦軸はフラックスで横軸は時間 (MJD) を表している。Mrk421 は 1997 年、1998 年のデータで、Mrk501 は 1997 年、1999 年、2000 年のデータで、3C273 は 1996 年、1997 年のデータである。これを見ると明らかに HBL である Mrk421 と Mrk501 の方が激しく時間変動していることがわかる。H1426+428 は 2000 年、2001 年のデータなのだが、データ数が他の三つに比べて極端に少ないために、この図からは時間変動が激しいかどうか結論づけることは難しい。更にこの図からフラックスの値を見ると、Mrk421、Mrk501 の方が大きく、実際の明るさも HBL (H1426+428 は除く) の方が大きいように思われるが、3C273 までの距離と Mrk421、Mrk501 までの距離を比べると、3C273 の赤方偏移 $z \sim 0.158$、Mrk421 の赤方偏移 $z \sim 0.031$、Mrk501 の赤方偏移は $z \sim 0.034$ なので、ハッブルの法則とドップラー効果の式から、3C273 は ∼566Mpc、Mrk421 は ∼121Mpc、Mrk501 は ∼133Mpc で、3C273(566Mpc) の方が約 5 倍遠い位置にあるということがわかる。また、フラックスは以下の式のように距離の二乗に反比例するので、

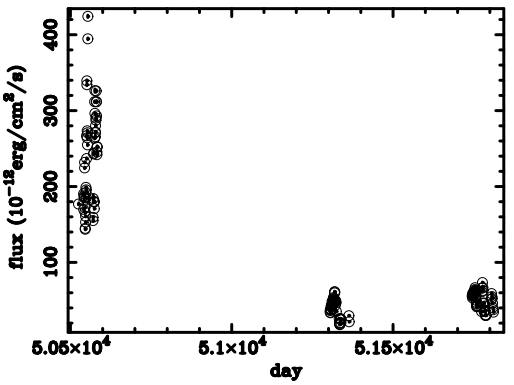
$$F = L/4\pi d^2$$

(ここで、L は絶対光度、F はフラックス、d は天体までの距離である。)

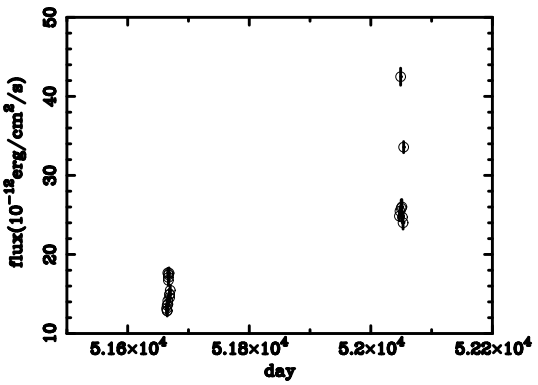
このことを考慮にいれると、実際の光度は 3C273 の方が数十倍大きいことがわかる。また、Mrk501 の 1997 年のフラックスが、他の年に比べて約 4 倍 ~ 8 倍大きいことがわかる。これは Mrk501 が 1997 年に歴史的大フレアーを起こしたためである。この大フレアーは、ブレーザーの中でも最も激しいものであり、LE 成分のピークの値が 100 倍になったことが、Pian 氏らにより示されている。



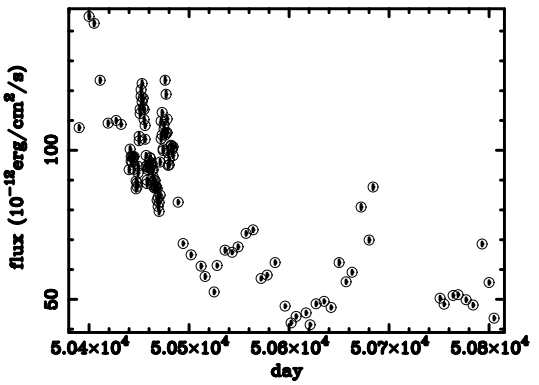
Mrk421



Mrk501



H1426+428

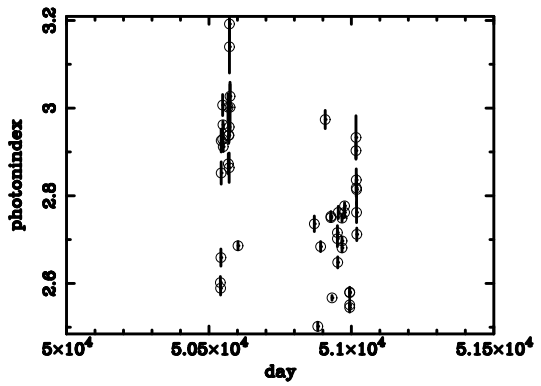


3C273

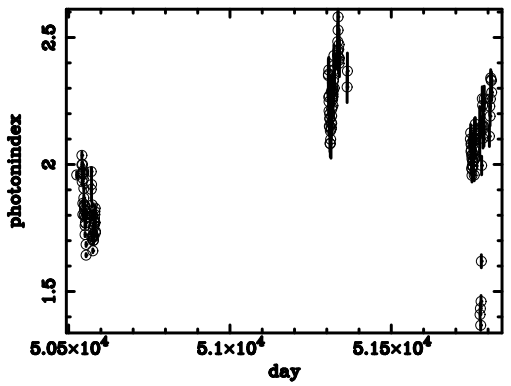
図 5.1: フラックスの時間変動

photon-index の時間変動

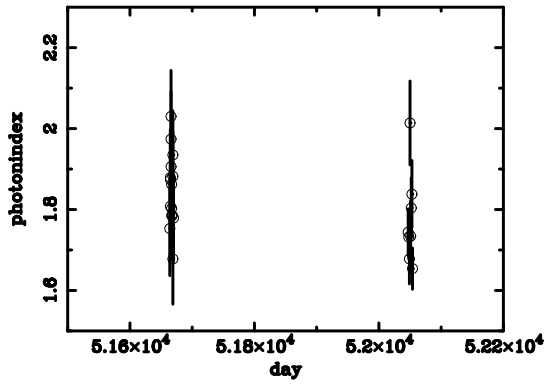
図 5.1 と同じように Mrk421、Mrk501、H1426+428、3C273 の photon-index(2-10keV) の時間変動の様子を図 5.2 に示す。横軸は図 5.1 と同じで、縦軸は photon-index である。この図から photon-index も HBL の方が、激しく変動していることがわかる。また、HBL の方が OVV よりも photon-index が大きいことから、X 線領域のスペクトルは、HBL の方が急であることもわかる。更に図 5.1 と見比べると、興味深い傾向があることがうかがえる。Mrk421 と Mrk501 に関しては、フラックスが小さいときは photon-index は大きくなり、逆にフラックスが大きくなると photon-index は小さくなる。1997 年の Mrk501 の結果はそれを最も良く示している。H1426+428 と 3C273 に関しては、フラックスが大きくなろうが小さくなろうが、photon-index はそれに応じて変化しているとは言えない。このことについて、次の§ 5.1.3 で詳しく議論する。



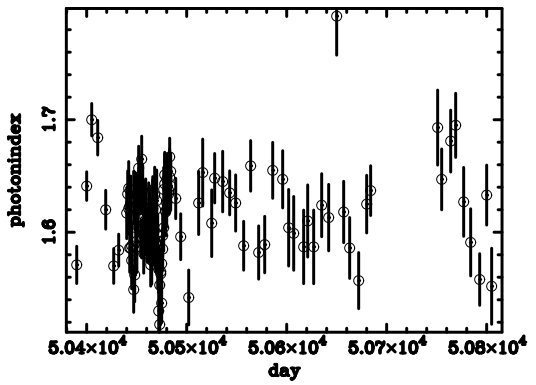
Mrk421



Mrk501



H1426+428



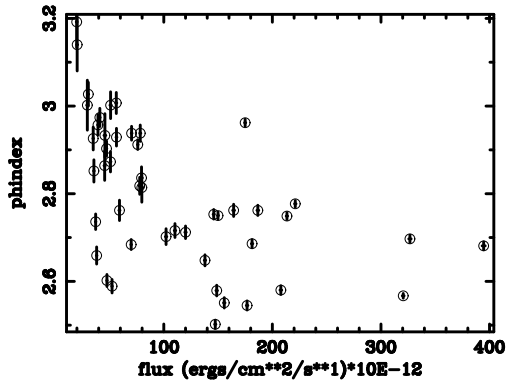
3C273

図 5.2: ブレーザーの photon-index の時間変動

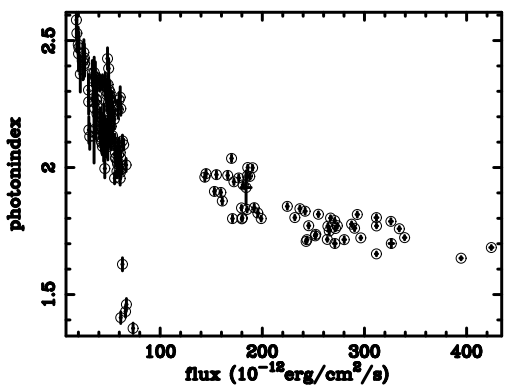
5.1.3 X 線領域のフラックスと photon-index

図 5.3 は横軸をフラックス (4-10keV)、縦軸を photon-index(2-10keV) とし、二つの関係を表したものである。§ 5.1.2 に述べたことが、Mrk501 は顕著に現れている。また、Mrk421 についても同様の傾向が見られる。ただ、3C273 についてはフラックスが変化しても、photon-index は変化せず、ほぼ一定であることが明らかで、H1426+428 については 3C273 ほど一定とまではいかないが、Mrk421 と Mrk501 のような傾向にあるともいいがたく、ブレーザーのタイプでは H1426+428 は HBL に属するのだが、Mrk421 や Mrk501 と様々な点において違う傾向を示しているといえよう。以後§ 5.1.3 では HBL と表記した場合、Mrk421 と Mrk501 を示すことにする。

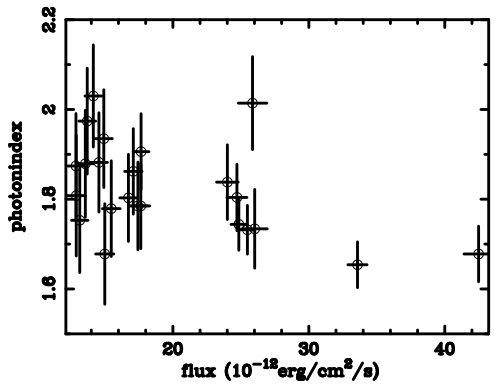
HBL に関して、このような関係になるのは次のように考えることができる。HBL にとって 2-10keV は、LE 成分の高エネルギー側に相当する。よってその放射メカニズムはシンクロトロン放射で、スペクトルの形は power-law 型である。よって、4-10keV のフラックスが大きくなることは、ジェット内のシンクロトロン放射をし



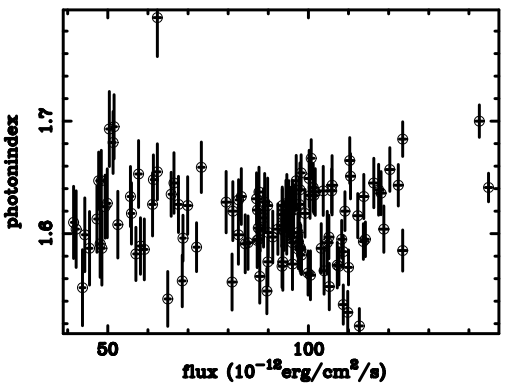
Mrk421



Mrk501



H1426+428



3C273

図 5.3: flux と photon-index の関係

ている電子が加速されて、高エネルギー側の photon 数が増えることを意味しており、スペクトルの高エネルギー側のカウントレートが大きくなる。その結果スペクトルはフラットになり、photon-index は小さくなる。フラックスが小さくなるときは、先程とは逆の考えから、photon-index は大きくなる。このことを模式的に表したものが、図 5.4 である。また、一般的に、高エネルギー側の電子ほど、その持っているエネルギーを失う時間が短い。よって、電子が加速されたときはスペクトルはフラットになり、ある程度時間が経つと、高エネルギー側の電子が減少するので、必然的に高エネルギー側の photon も減少する。よってスペクトルは急勾配になり、その後、低エネルギー側の電子もその持っているエネルギーを失い、スペクトルの傾きはもとに戻るということが、高橋氏らの研究などによりわかっている。

一方、OVV に関して、フラックスが変化しても photon-index がほぼ一定に保たれるのは、おそらく、放射メカニズムがなんであろうと 2-10keV は、OVV にとって HE 成分の低エネルギ-側であり、あまり粒子加速に敏感ではない電子がその放射を出しているからであろう。

最後に H1426+428 についてだが、フラックスが変化すると photon-index が HBL

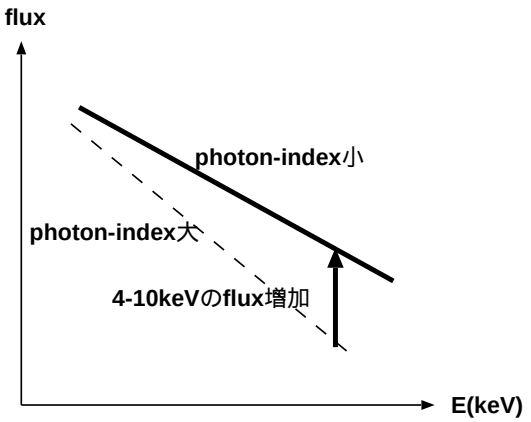


図 5.4: flux と photon-index の模式図

ほど相関を示さず、3C273 ほど一定に保たれるわけでもないことについて、考えられることを述べる。図 5.5 は片岡氏らが H1426+428 と Mrk421 の ASCA による同時多波長観測のスペクトルを多項式近似したものである。これより 2-10keV あたり (図では 10^{17-18}Hz あたりに相当) が H1426+428 は Mrk421 に比べて LE 成分のピークに近いところにあることがわかり、これが原因で 4-10keV のフラックスが変わっても photon-index がそれほど変化しないのであろうと考えられる。H1426+428 は HBL のなかでも LE 成分のピークエネルギーが高いので、軟ガンマ線領域で激しい変動を示すであろう。

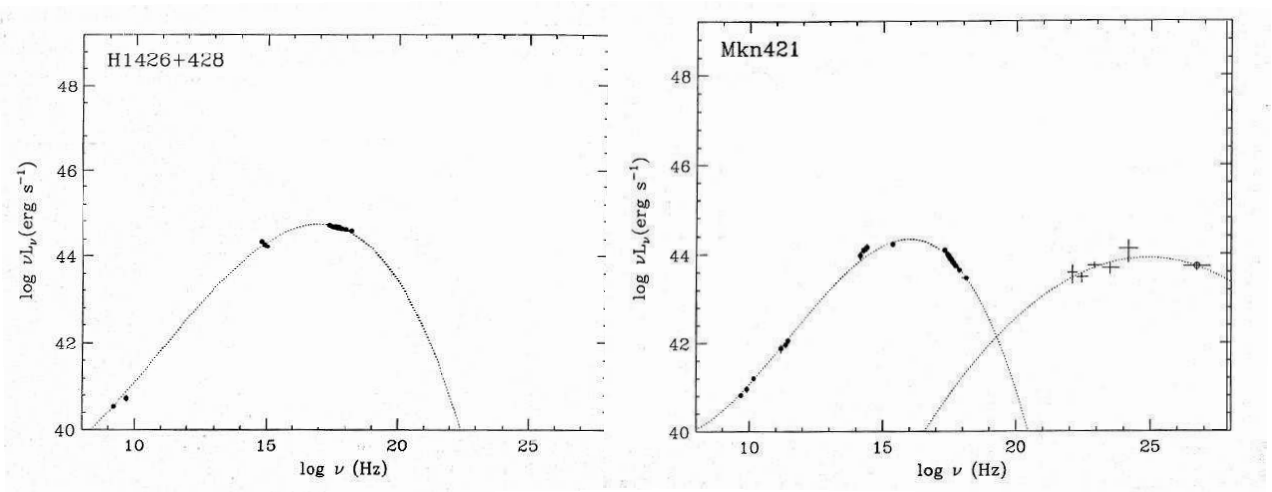


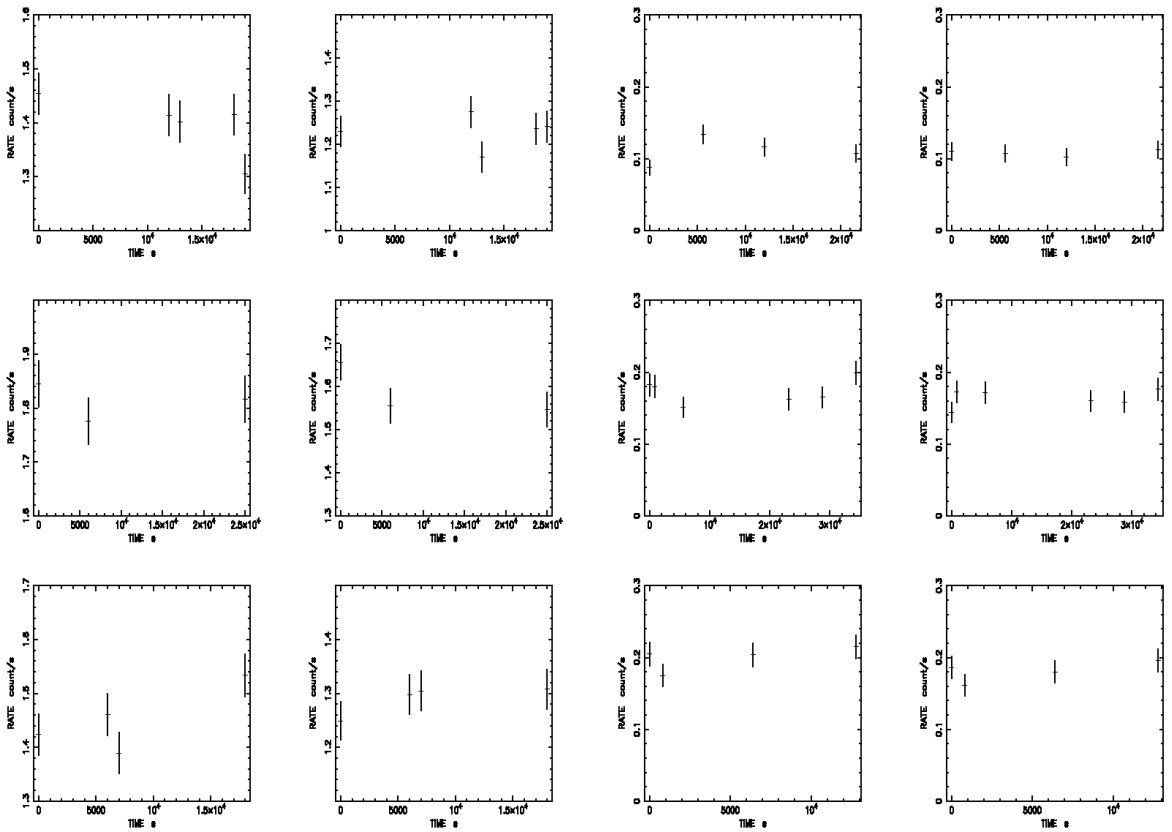
図 5.5: H1426+428 と Mrk421 の同時多波長スペクトル [2, 11]

5.2 ASCA のデータ解析

この節では、ASCA のデータを用いた解析、主にライトカーブについての結果とそのライトカーブを時系列解析する方法として、Power spectrum density(PSD)、Auto-correlation function(ACF)、Structure function(SF) について紹介し、最後に結果と考察を述べる。

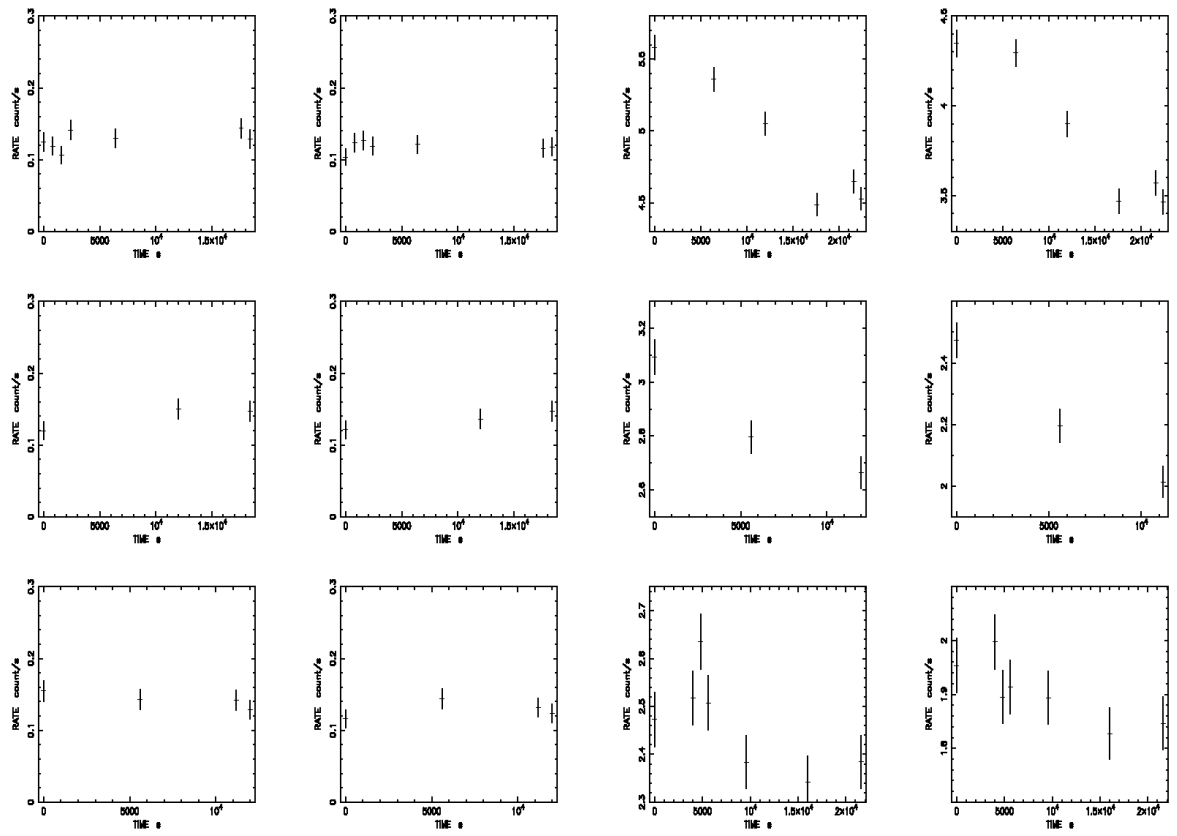
5.2.1 ライトカーブ

ASCA では、3C273,3C279,4C38.41,PKS0528+134,CTA102,NRAO140,PKS0208-512,(OVV) と、OVV と比較するために Mrk421(HBL) について解析した。そのライトカーブ (1keV∼8keV) を図 5.6 に示す。これらの図は時間をそれぞれビンまとめしている。そのビンまとめした時間幅については、図に表示したとおりである。ビンまとめする理由は、統計を良くするためである。ライトカーブからも HBL の変動は OVV に比べて大きい傾向にある。



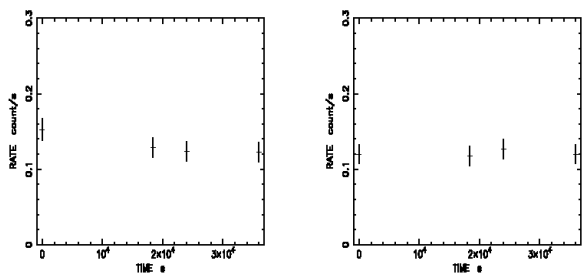
3C273:binsize1000 秒　　PKS0528+134:binsize800 秒

図 5.6: ライトカーブ

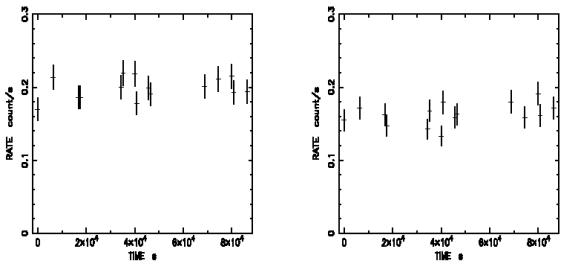


4C38.41:binsize:800 秒

Mrk421:binsize800 秒

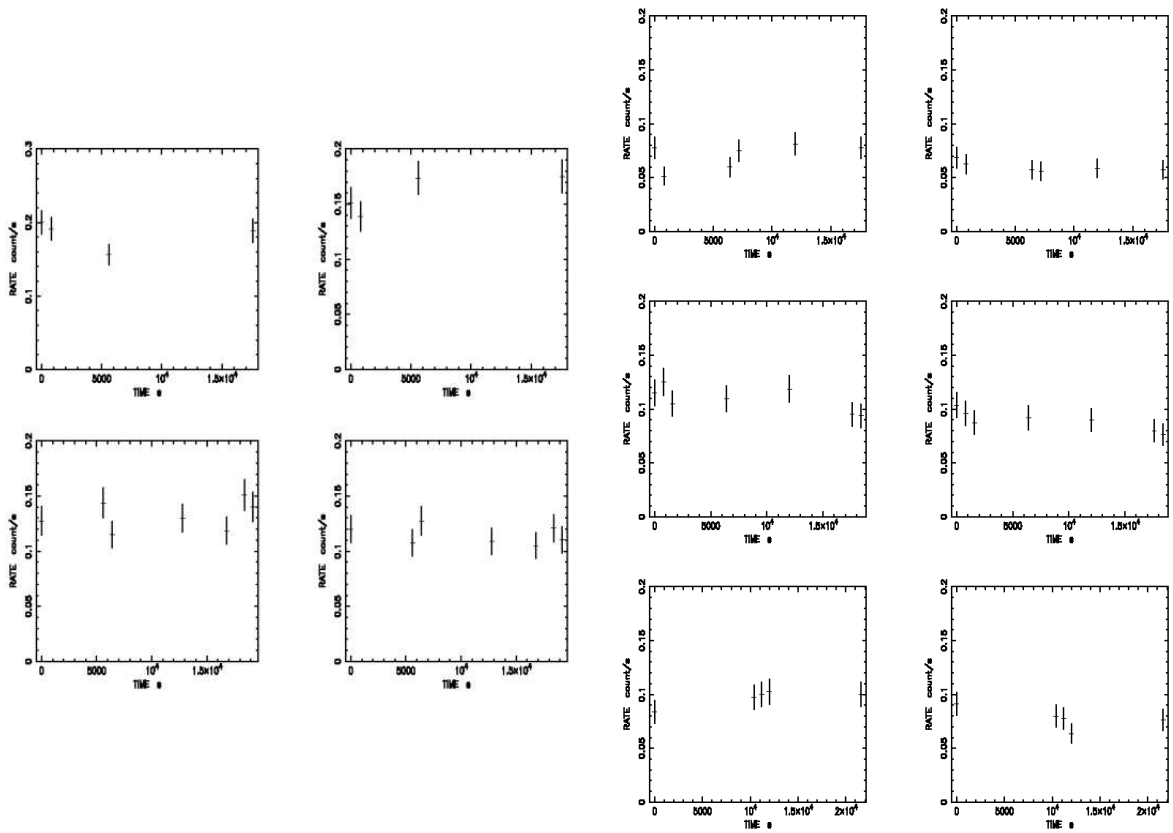


CTA102:binsize800 秒

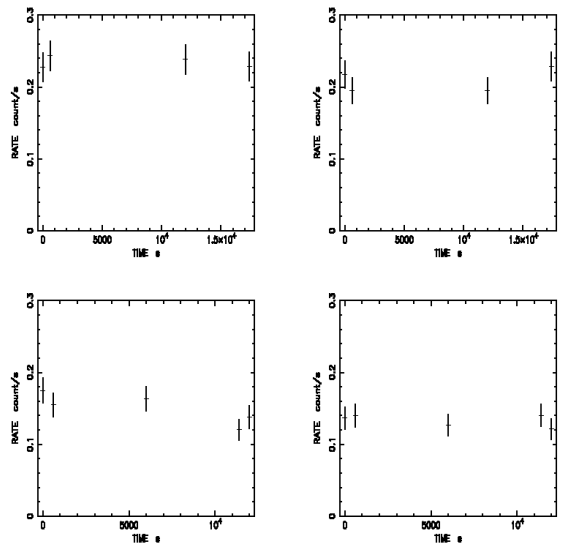


NRAO140:binsize1300 秒

ライトカーブ続き



3C279:binsize800 秒



ライトカーブ続き

PKS0208-512:binsize600 秒

5.2.2 Power spectrum density(PSD)

PSD 解析は、時系列解析を行うときに最も一般的に使われる解析法である。振動数 f における PSD は以下の式で定義される。

$$P(f) = (1/N \sum_{n=0}^{N-1} l_n exp(2\pi i f t_n))^2$$

ここで、t_n は時刻、N は時系列の数、l は時刻 t_n におけるライトカーブの縦軸値である。P(f) をライトカーブの平均値の自乗で規格化した NPSD を図 5.7 に示す。これは片岡氏らによる 3C273 の NPSD である。この図から、$f = (4.7 \pm 1.5) \times 10^{-6}$Hz

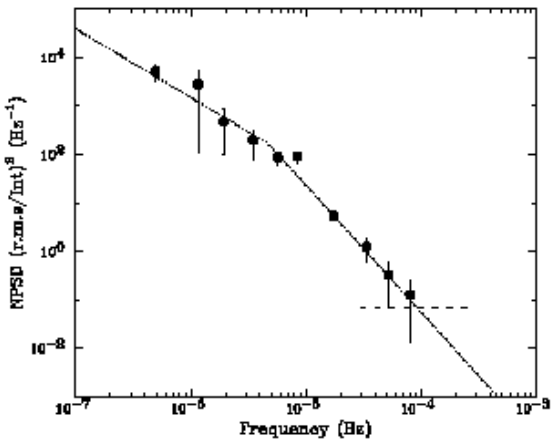


図 5.7: 3C273 の NPSD[10]

あたりで折れ曲がっているのがわかる。この f から変動のスケールを求めることができ、この場合はほぼ 3 日だと見積もれる。だが、X 線天文衛星は軌道が低いためライトカーブに data gap ができてしまう。この gap が大きいと PSD の連続性に影響し、変動のタイムスケールを見積もることができなくなるという欠点を持っている。今回のデータはライトカーブに大きなギャップがあり不連続だったため PSD 解析は用いなかった。

5.2.3 Auto-correlation function(ACF)

$$A(\tau_k) = 1/N(\tau_k) \sum_{m=0}^{N-1-n} l_m l_{n+m}$$

$$P(f) = \sum_{k=-m}^{k=m} A(\tau_k) exp(2\pi i \tau_k f)$$

ここで、A(τ_k) は Auto-correlation function である。Auto-correlation function はデータが不連続であっても見積もることができる点において直接 PSD を求める方法よりも優れてはいるが、今回のようにライトカーブのデータが極端に不連続なときは ACF は時系列解析には向いていないため用いなかった。

5.2.4 Structure function(SF)

今回時系列解析をする上で用いたものは、Structure function(SF) と呼ばれるもので、これは§ 5.2.1 のライトカーブのように、不連続で多くのデータギャップがあり、ライトカーブのデータの量が少ない場合でも、観測時間が短すぎなければ天体の変動を見積もることができる。SF は以下のような式で定義される。

$$SF(\tau) = 1/N_\tau \sum_{n=0}^{N-\tau} (l_n - l_{n+\tau})^2$$

ここで、l_n はライトカーブの縦軸値、τ は時間間隔、N_τ は時間間隔が τ であるデータのペアーの数である。この SF は一般的には右あがりのグラフになり、時間間隔が天体の変動のタイムスケールより短すぎると、ライトカーブの値自身のポアッソン揺らぎによってある値を持ち、SF はフラットな形になる。また、タイムスケールより長すぎるとライトカーブの差が様々な値を持つため、畳み込まれて、SF はフラットな形になる。つまり、変動のタイムスケールまで SF の縦軸の値は大きくなれる。よって傾きがほぼ一定になったところの τ が、変動のタイムスケールであると見積もることができる。実際解析するときは、gis2 と gis3 のライトカーブの値を足しあわせ、誤差の伝搬も考慮にいれて SF を計算した。図に示した SF は求めた値をライトカーブの平均値の自乗で normalize したものである。また、完全に周期的な変動ではないため、一番速い変動のタイムスケールを見積もった。

ここで、誤差の伝搬について述べる。実際に誤差の伝搬を考慮する上では以下の手順で行った。

1. gis2 と gis3 のデータを足しあわせるときの誤差。gis2 の誤差を g2、gis3 の誤差を g3 とし、以下の計算を施す。

$$\delta_1(t) = \sqrt{g2^2 + g3^2}$$

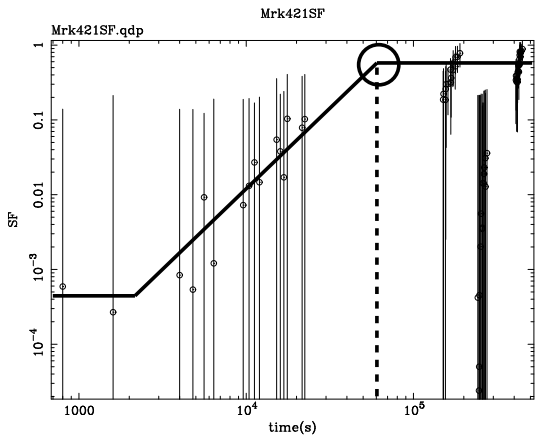
2. ライトカーブの値 $l(t)$ と $l(t+\tau)$ の引くので次の計算を施す。

$$\delta_2(t) = \sqrt{\delta_1(t)^2 + \delta_1(t+\tau)^2}$$

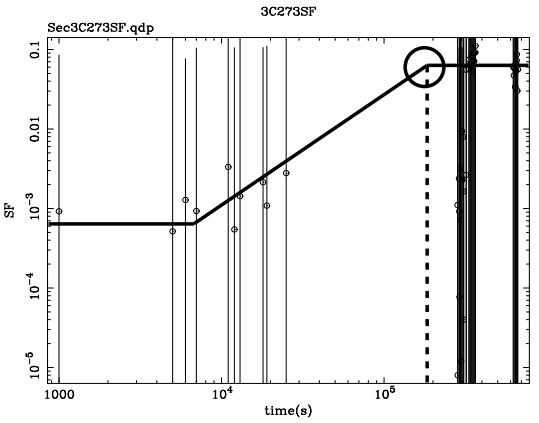
3. 引き算して自乗をとり、同じ時間間隔のものをすべて足しそのペアーの数 N で割るので、最終的な誤差は以下の式で表される。

$$\delta_3 = 1/N\sqrt{\sum_t (2 \times \delta_2(t))^2}$$

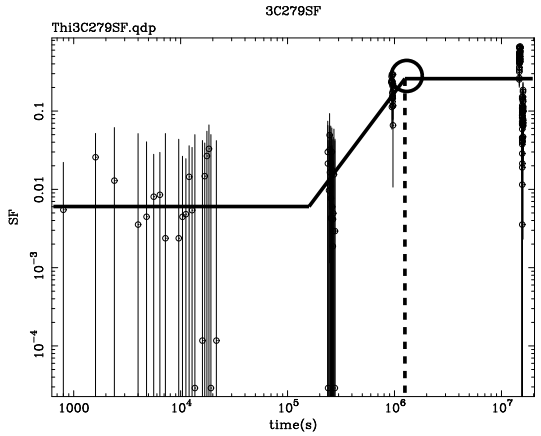
実際に Structure function を用いて時系列解析したものを図 5.8 に示す。また、片岡氏らが SF を用いて RXTE のデータを用いて 3C273 と Mrk421 を時系列解析したものを図 5.9 に示す。図 5.9 は実線が Mrk421 の SF で、プロットされた点が 3C273 の SF を表している。



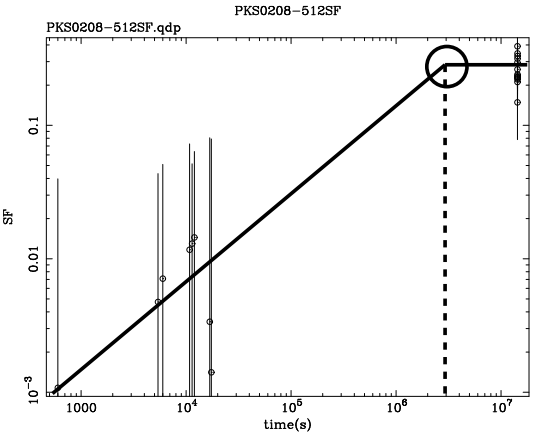
Mrk421



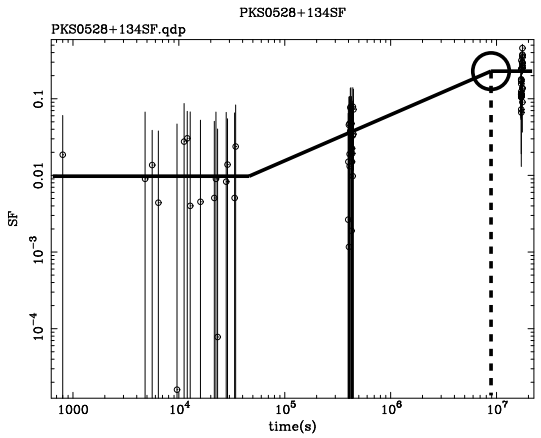
3C273SF



3C279SF

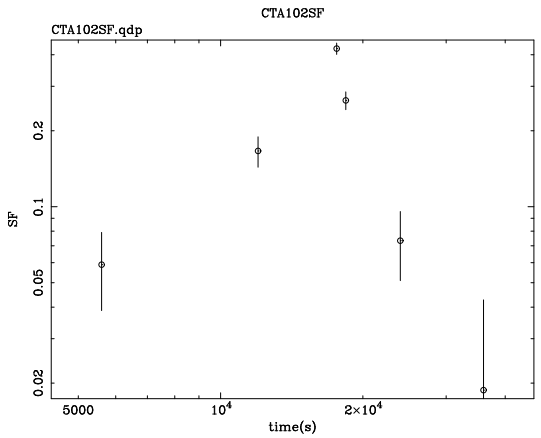


PKS0208-512SF

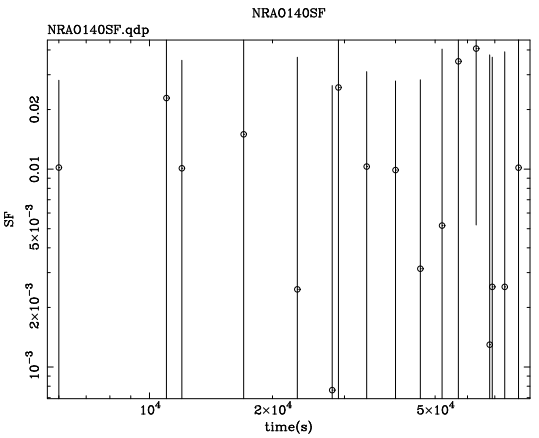


PKS0528+134SF

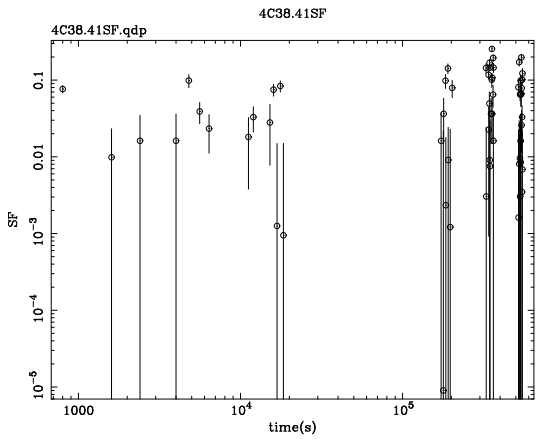
図 5.8: 各天体の SF



CTA102SF



NRAO140SF



4C38.41

SF の続き

図 5.8 から Mrk421、3C273、3C279 は SF がほぼ一定になる τ が容易に見積もることができる。Mrk421 は約 $5\times10^4 \sim 9\times10^4$ 秒で 1 日以内のタイムスケールで変動していることがわかり、§ 4.2 で述べたことと一 致する。3C273 は約 $10^5 \sim 2.5\times10^5$ 秒で 1 ~ 3 日程度で変動し ていることがわかり、片岡氏らによる図 5.9 は Mrk421 ほぼ 1 日のところで、3C273 はほぼ 3 日のところで SF が一定になっていることがわかる。よって今回の解析はこれとほぼ一致している。3C279 は約 $9\times10^5 \sim 2\times10^6$ 秒で 10 日 ~ 20 日程度で変動していることがわかる。PKS0208-512 はデータ数が先に述べた天体よりも少ないので見積もりが難しいが、図の最初の点から右あがりであると考えると、変動スケールは $2\times10^6 \sim 5\times10^6$ 秒で 20 日 ~ 60 日程度で

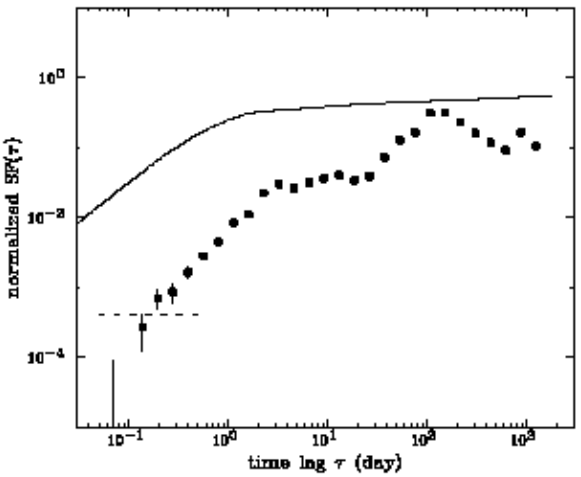


図 5.9: 片岡氏による 3C273 と Mrk421 の SF[10]

あると考えられ、PKS0528+134 についてもデータ数が少なく、図の 3.5×10^4 あたりまでのデータを右あがりのデータと解釈するか、フラットなデータとして解釈するかで、見積もりが非常に難しい。ここでは、約 3.5×10^4 から右あがりになると考えると、その変動スケールは $7 \times 10^6 \sim 10^7$ 秒で 80 日 ~ 115 日程度になる。3C273 は変動のタイムスケールが Mrk421 とよく似ており、一般的な OVV とは違う性質を示していることが示唆される。それ以外の OVV は Mrk421 より変動のタイムスケールも長いことがわかる。

一方 CTA102、NRAO140、4C38.41 は見積もることが難しい。これらは、変動のタイムスケールを見積もるには観測時間が短すぎて SF が右あがりになっていないため不適切である。更に、CTA102 や NRAO140 は公開されているデータも一つしかなくて他の天体のようにいくつかのデータを用いて解析することができなかった。

次に、絶対光度と SF が一定になる縦軸の値との関係を図 5.10 に、絶対光度と SF が一定になる横軸の値との関係を図 5.11 に、絶対光度とタイムスケールがほぼ一日の SF の縦軸の値との関係を図 5.12 に示す。両図とも左の点から、Mrk421, 3C279, PKS0208-512,3C273, PKS0528+134 である。図 5.10 から (3C273 は除く) 絶対光度が大きくなると SF が一定になる横軸の値も大きくなることより、絶対光度が小さいほど速く変動していることがわかる。一方図 5.11 からは、SF が一定になる縦軸の値は絶対光度に関わらず一定であるといえる。この図 5.11 の縦軸が表すものは変動の大きさである。また、図 5.12 からは Mrk421 の SF の値以外はほぼゼロである。よってこれら三つの図から、OVV は一日以内の変動はしてないが、数週間あるいは数ヵ月経つと、HBL と同じくらい変動していることが示唆される。

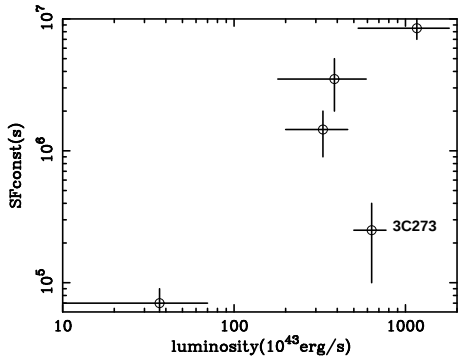


図 5.10: 横軸の一定値と絶対光度

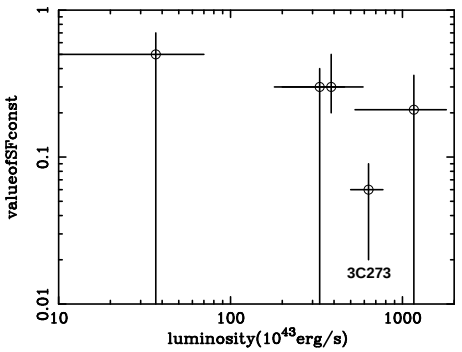


図 5.11: 縦軸の一定値と絶対光度

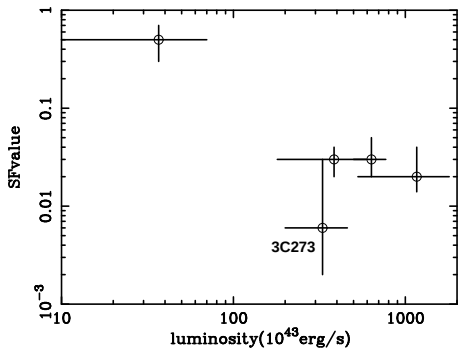


図 5.12: 時間間隔 1 日の SF と絶対光度

5.3 時系列解析の考察

図 5.8 や図 5.10 から、Mrk421(HBL) が OVV(3C273 は除く) よりも速く変動していることがわかった。両者の変動タイムスケールの違いについて二通りの可能性が考えられる。一つめは、OVV の放射がエネルギースペクトルが power-law モデルによくあうことから、今まで何度か述べてきたように OVV は、ビーミングされたジェットをほぼ真正面から見ている、純粋なブレーザーであると仮定する。変動は様々な要因が重なりあって起こると考えられ、例えば、電子の加速とクーリング、磁場の強さ、ビーミング因子などがそうである。その中でも最も大きな要因は、電子の加速とクーリングだと考えられる。つまりフレアーが起こっている間は、より高いエネルギーまで電子が加速されており、HBL と OVV の X 線の変動の違いはこの加速された電子によって発生する光子の物理課程の違いによるものであると考えられる。同時多波長解析によると HBL の X 線放射は高エネル

ギー側の電子のシンクロトロン放射が見えており、一方 OVV は HE 成分の低エネルギー成分の放射が見えている。§ 2.2 や§ 5.1.3 でも述べたように、高エネルギー電子ほどその持っているエネルギーを失うまでの時間が速く、それが原因で HBL は OVV より短いタイムスケールでも大きな変動を示すと考えられる。

二つめは、OVV が完全なブレーザーとして観測されておらず、1 型 AGN とブレーザーの判断が難しいサブブレーザーであると仮定する。このように仮定する理由は、観測上 3C273 を初めとする多波長観測の結果から、OVV のいくつかにはビーミングされたジェットの非熱的な放射 (シンクロトロン放射や逆コンプトン散乱) だけではなく、降着円盤やジェットの周りからの熱的な放射も観測されており、エネルギースペクトルには低エネルギー領域に soft excess とよばれる power-law モデルにあわないものがあるからである。さらに、3C273 だけは 5-6keV あたりに big blue bump(BBB) とよばれる広い輝線が観測されたことが報告されている。図 5.13 にその図を示す。この考えに基づくと観測される放射は、非熱的放射と熱的放射の複合で説明できると考えられる。これら違った放射課程を X 線のデータだけで識別することは困難であるが、soft excess や BBB は OVV の放射課程に迫るには重要な手がかりである。OVV が HBL よりも変動が小さいのはこれらの放射が、変動が大きいビーミングされたジェットの放射を緩和して、結果的に数日間で観測される放射は変動が小さく、タイムスケールも長いものになっている可能性もある。

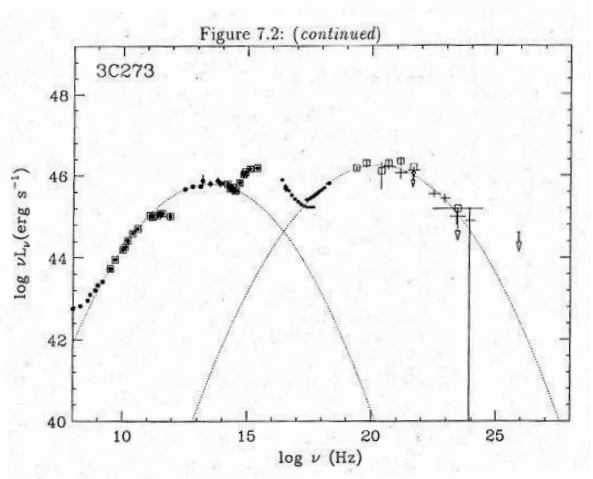


図 5.13: 3C273 の BBB[2]

また、今回解析した変動のタイムスケールについて定量的考察を述べる。加速を受けエネルギーを得た電子は様々な放射によりクーリングを受ける。HBL や OVV の X 線放射は主にシンクロトロンと逆コンプトンであるとされているが、ここでは更に制動放射も比較のために考えにいれた。ただし、一般的なブレーザーの場合制動放射によるクーリングはシンクロトロンや逆コンプトンに比べて小さい。で

はまず最初に、解析した 1keV∼8keV の放射が HBL と OVV ともにシンクロトロン放射であると仮定して、理論的なクーリングタイムと解析した変動のタイムスケールを比較する。シンクロトロン放射のエネルギー損失率は以下の式で表される。ただし MKS 単位系である。

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right)_{synch} = \frac{4}{3}\sigma_T c\gamma^2 U_{mag} = 6.6\times10^4\gamma^2 B^2 \ \ (eVs^{-1}) \tag{5.1}$$

ここで、σ_T はトムソン散乱断面積、U_{mag} は磁場のエネルギー密度 $(B^2/2\mu_0)$ 、c は光速、γ はローレンツファクターである。式 (5.1) より、シンクロトロン放射の電子のクーリングタイムは次式である。

$$\tau_{synch} = \frac{E}{dE/dt} = \frac{E}{\frac{4}{3}\sigma_T c\gamma^2 U_{mag}} \ \ (s) = 7.74\times\gamma^{-1}B^{-2} \tag{5.2}$$

ジェット内の磁場のエネルギー密度や、電子のローレンツファクターは天体によって違っており、これまでの過去の多波長観測で、だいたいの平均的な値が求められており、表 5.1 ようになっている。この表からわかるように HBL の計算結果は解析結果のオーダーと一致しているので、1-8keV の放射メカニズムはシンクロトロンであるといえる。しかし、OVV は計算結果と解析結果のオーダーが一致してないだけではなく、それぞれの結果は、大きさの順番すら一致しておらず、シンクロトロンの傾向は全く見えないといえる。

表 5.1: HBL も OVV もシンクロトロン放射と仮定した場合

Objectname	磁場 B$(10^{-4}$T)	γ	計算結果 (s)	解析結果 (s)
Mrk421	0.2	$10^{5.7}$	3.9×10^4	$5^4 \sim 9\times10^4$
3C273	0.2	$10^{4.5}$	6.1×10^5	$10^5 \sim 2.5\times10^5$
3C279	0.6	$10^{4.3}$	1.1×10^5	$9\times10^5 \sim 2\times10^6$
PKS0208-512	0.5	$10^{4.1}$	2.5×10^5	$2\times10^6 \sim 5\times10^6$
PKS0528+134	2.3	$10^{3.2}$	9.2×10^4	$7\times10^6 \sim 10^7$

よって、次に OVV の放射メカニズムは逆コンプトン散乱であると仮定して議論する。逆コンプトン散乱によるエネルギー損失率は以下の式である。

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right)_{IC} = \frac{4}{3}\sigma_T c\gamma^2 U_{IC} = 2.66\times10^{-20}\gamma^2 U_{IC} \tag{5.3}$$

ここで U_{IC} は逆コンプトンされる光子の密度である。その他は式 (5.1) と同じである。逆コンプトン散乱を受ける電子のクーリングタイムは式 (5.2) と同様の形になる。

$$\tau_{IC} = \frac{E}{dE/dt} = \frac{E}{\frac{4}{3}\sigma_T c\gamma^2 U_{IC}}\ (s) = 1.92\times10^{25}\gamma^{-1}U_{IC}^{-1} \tag{5.4}$$

式 (5.4) も同じく γ、U_{IC} はそれぞれの天体によって違う。γ は表 5.1 の値を代入し、U_{IC} は表 5.3 の値を代入する。この表からもわかるように OVV の計算結果が解析結果に比べオーダーが一桁小さい。これは、放射メカニズムを逆コンプトン散乱と仮定したことや、先にも述べたが様々な放射がジェットの放射を緩和していることなどが考えられる。また、計算に使用した γ はジェット内の電子の中でも最高エネルギーを示す γ_{max} であり、1-8keV を放射する電子の γ はそれより小さいと考えられ、それを考慮にいれると計算結果もより解析結果に近づくと考えられるが、その γ の値は正確にわからない。しかし、それぞれの大きさの順番は、SF から変動を見積もることが最も困難だった PKS0528+134 を除いて、一致している。このことから、逆コンプトン散乱は 1-8keV の範囲では、OVV の放射メカニズムの一つではないかと推察される。

表 5.2: OVV が逆コンプトン散乱と仮定した場合

Objectname	$U_{IC}(0.625\mathrm{eV}/m^3)$	計算結果 (s)	解析結果 (s)
3C273	10^{16}	3.8×10^4	$10^5 \sim 2.5\times10^5$
3C279	$10^{15.9}$	7.6×10^4	$9\times10^5 \sim 2\times10^6$
PKS0208-512	10^{15}	9.5×10^5	$2\times10^6 \sim 5\times10^6$
PKS0528+134	$10^{16.8}$	1.2×10^5	$7\times10^6 \sim 10^7$

次に 1-8keV の OVV の放射が制動放射によるものであると仮定する。制動放射によるクーリングタイムは以下の式である。

$$\tau_{brems} = 1.5\times10^{-16} n_e \gamma(ln\gamma + 0.36)(s) \tag{5.5}$$

ここで、n_e はブレーザー内の制動放射をする電子密度である。この値も天体ごとに違う。この表からもPKS0528+134を除いて計算値と解析結果の順番が一致していることから、制動放射も1-8keVではOVVの放射メカニズムの一つであると推察される。また、3C273と3C279は、計算結果と解析結果が非常に近い値であり、この二つは制動放射が大きいOVVであると考えらる。3C273はBBBが最も強く見えており、X線領域に制動放射の寄与が大きいのかも知れない。

表 5.3: OVVが制動放射と仮定した場合

Objectname	$n_e(cm^{-3})$	計算結果 (s)	解析結果 (s)
3C273	$10^{4.9}$	2.5×10^5	$10^5 \sim 2.5 \times 10^5$
3C279	$10^{4.2}$	2.0×10^6	$9 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$
PKS0208-512	$10^{3.4}$	2.1×10^7	$2 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$
PKS0528+134	$10^{4.9}$	6.9×10^6	$7 \times 10^6 \sim 10^7$

表5.1 ~ 表5.3のγ、B、U_{IC}、n_eは参考文献[2]の値を用いた。

ただし、今回解析で見積もった変動のタイムスケールは、最も短いタイムスケールであると考えられ、ブレーザーがある特定の変動だけを繰り返しているとは考えにくく、もっと長いタイムスケールを持った変動もある可能性は十分考えられる。

5.4 まとめ

電波からGeV ~ TeVに至るまでのブレーザー天体の非熱的放射は、加速された荷電粒子がシンクロトロン放射や、逆コンプトン散乱したものであり、全波長領域のエネルギースペクトルはLEとHEの二つのピークを持つ。エネルギー領域の中でもX線領域はブレーザーの性質を調べる上で最も重要である。HBLの放射はシンクロトロンの高エネルギー側であり、photon-indexはfluxが変わるとそれとは逆相関の関係になった。OVVは逆コンプトン散乱の低エネルギー側であり、fluxの値はHBLより三桁ほど大きいがfluxが変化しても、それに応じたphton-indexの変化はなかった。更にOVVとMrk421のSFを計算し、一番速い変動のタイムスケールを見積もったところ3C273を除いた全てのOVVがMrk421に比べてそれが大きいことがわかった。OVVは、完全なブレーザーとして観測されていないのではないかと思われ、降着円盤やジェットの周りからの放射などにより、変動が緩和されている可能性もある。また、3C273には他のOVVには見られないBBBがあり、OVVの中でも特質した性質を示すのであろう。具体的には図5.10から明ら

かなように変動のタイムスケールが他の OVV と比べると極端に小さいことからも示唆される。

現段階ではジェット内部の構造や粒子加速の機構をはじめとする問題に終止符を打つことはまだ先のことになりそうである。しかし、現在急速に開発が進んでおり、2005 年 2 月に打ち上げ予定の X 線天文衛星”ASTROE2” や、MeV/GeV を観測エネルギーバンドとしており、位置分解能が従来の衛星よりはるかに良い、ガンマ線天文衛星”GLAST” の観測が開始されれば、より多くのジェットの内部の物理が明らかになるだけではなく、宇宙に隠されていると考えられている巨大加速器等の様々な謎に迫ることができるようになるであろう。

[1]

本研究を行うにあたり、お忙しい中様々な指導にあたってくださった深沢先生に深く感謝します。また、RXTE 衛星の解析法を基礎から教えてくださった阿部さん、ASCA の解析をはじめとして、多大なる助言をしてくださった大野さん、論文の構成を手伝ってくださった富永さん、河嶋さん、その他の諸先輩方に感謝します。その他の高エネルギー宇宙素粒子実験研究室の皆様ありがとうございました。最後に事務処理などでお世話になった物理科学科事務の方々に感謝します。

参考文献

[1] 窪 秀利 博士論文 (東京大学)1997

[2] 片岡 淳 博士論文 (東京大学)2000

[3] 伊予本直子 博士論文 (東京大学)1999

[4] 阿部由紀子 卒業論文 (広島大学)2003

[5] 佐藤桂子 卒業論文 (広島大学)2002

[6] 活動する銀河 -天体現象の物理-
柴田一成、福江純、松本亮治、嶺重 慎 共編

[7] はじめての表街道 2000
～ ASCA データ解析の" いろは" 第 7.00 版
薗部 敬、青木貴史、藤本龍一、渡部 学

[8] 計測における誤差解析入門
JOHN R・TAYLOR 著
林 茂雄・馬場 涼 訳

[9] High Enegy Astrophysics volume2
Malmoolm S.Longair

[10] J.Kataoka,C.Tanihata,N.Kawai,F.Takahara,T.Takahashi,
PhilipG.Edwards,&F.Makino.2002,MNRAS,336,932

[11] H.Kubo,T.Takahashi,G.Madejiski,M.Tashiro,F.Makino,S.Inoue,
&F.Takahara.1998,ApJ,504,693

[12] 片岡 淳 高橋忠幸 谷畑千春 窪 秀利 2002, 天文月報,1

[13] G.Fossati et al.1998,MNRAS,299,433

[14] Rita M.Samburna et al.1994,ApJ,95,371