

## 論文内容の要旨

# Multi-frequency Study of the Jet Activity in Blazars (ブレイザー天体の多波長観測によるジェットの活動性の研究)

谷畑 千春

活動銀河核のもつジェットは宇宙における相対論的速度までの粒子加速の現場である。ジェットのエネルギーは、中心にある巨大ブラックホールに質量が落ち込むときの重力エネルギーが源になっているとされているが、実際のジェット生成や加速機構といった根本的な問題の解明は依然大きな課題である。ブレイザーとよばれる天体は、活動銀河核の中でもジェットが視線方向に位置するため、ビーミング効果により加速された電子からの非熱的放射だけを増幅して観測することができる。それゆえ、ジェット内の加速機構を探るうえで最適な実験環境といえる。

ブレイザーに特徴的な激しい時間変動は、こうした加速機構と密接に関係しており、ジェット内部で起きている現象を直接反映すると考えられている。本研究は、この時間変動に着目する。そして特に、ブレイザーの中でも粒子加速が効率的に働くことにより、TeVガンマ線領域までスペクトルがのびる天体 (TeVブレイザー) に対する、過去に例のないX線長期観測の結果を用いて、時間変動を支配する機構を探ることを目的とする。

ブレイザーからの放射は、電波からガンマ線という20桁にもわたるエネルギー範囲に及ぶ。多くの多波長観測やそれにもとづく理論研究から、ブレイザーの放射スペクトルはジェット内で加速された電子からのシンクロトロン放射及び逆コンプトン放射で説明できることがわかってきた。一方で、時間変動についてはこれまでも多く観測されているものの、観測時間が短いことや統計が乏しいなどの理由から、それらから導かれる観測量はほとんどなかった。そのため、これまでの議論は多くが一様な領域からの定常的な放射を仮定しており、時間変動について言及するもの

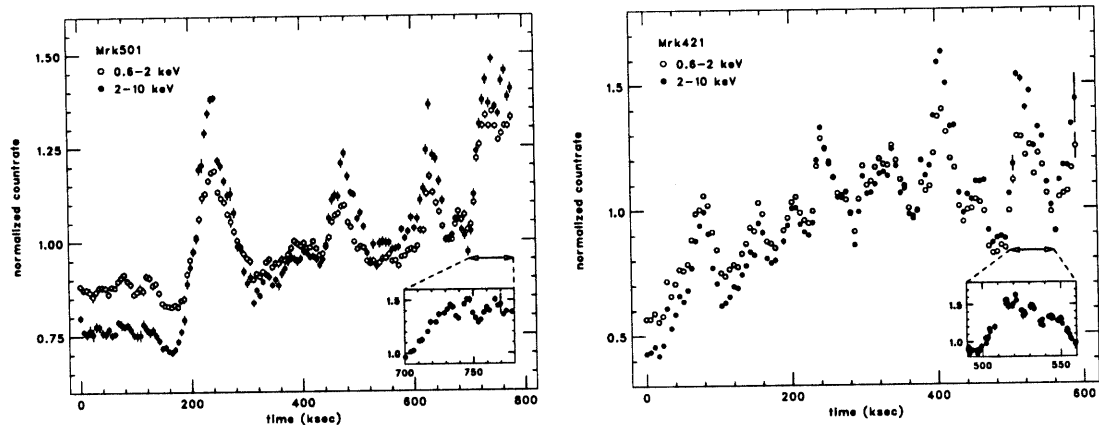


図 1: ASCA 衛星を用いて観測した TeV ブレーザー、Mrk 501 (左) と Mrk 421 (右) の光度曲線

は数少ない。

本研究では、まず ASCA 衛星を用いて、最も明るい 3 つの TeV ブレーザーに対してそれぞれ 7-10 日間という長時間におよぶ X 線連続観測を行った。この結果、3 つのブレーザー全てにおいてフレアと呼ばれる現象が毎日のように連続的におきているということをはじめて実際に示す結果を得ることに成功した。観測された光度曲線を図 1 に示す。

光度曲線と構造関数を用いた解析から、これらのブレーザーにはみな一日程度の典型的な変動のタイムスケールがあり、それより早い変動のパワーが非常に少ないことが明らかになった。このことは過去の断片的な観測から示唆はされていたが、単独の連続観測によりこれを実証したのは始めてである。また、ジェット内で考えられるさまざまなプロセスの変動時間を比較し、このような一日程度というブレーザーの変動のタイムスケールは、これまで考えられていたような電子の加速や冷却の時間よりもむしろ、領域の大きさや衝撃波の通過といったジオメトリに支配された変動時間によって決まっているということを示した。

長期観測の中でもとくに、Mrk421 という天体に関しては (図 1 の右の光度曲線に対応)、ASCA 衛星の長期連続観測を中心として、電波や可視光、他の X 線衛星や地上 TeV 望遠鏡を含む多波長で同時観測する大キャンペーンの中で観測が行われた。本論文では、SAX、ASCA、RXTE、という 3 つの X 線衛星間の詳細なキャリブレーションを行い、極紫外領域のデータを与える EUVE 衛星のデータを合わせることで、0.1-25 keV という広いエネルギー範囲での放射スペクトルを求めた。得られた X 線スペクトルとそれを含めた多波長スペクトルを図 2 に示す。図中の 2 つの山が、ジェット中で加速された電子分布からのシンクロトロン放射 (低い方)、また逆コンプトン放射 (高い方) に対応するが、シンクロトロンスペクトルの高エネルギーピークの形がこれまでにない精度できまっているのがわかる。

また、このように広いエネルギー範囲にわたるスペクトルの時間発展を長期にわたりモニターできたのも始めてである。この中で特に、フレア時のスペクトル変化を詳細にたどることにより高エネルギー側から増光するフレアを発見した。このような現象は、フレアはある電子分布による

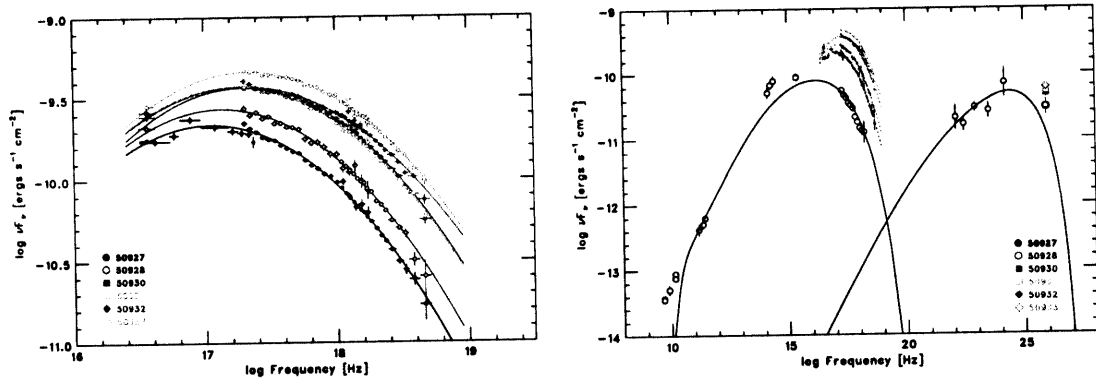


図 2: TeV ブレーザー Mrk 421 の X 線スペクトル (左) とそれを含めた多波長スペクトル (右)

放射の継続的な変化ではなく、新たな放射成分が表れることによっているということを強く示唆する。これは、これまでに考えられていたような単一の領域からの放射だけではブレーザーの時間変動は説明できないということを示して示した重要な結果である。

図 2 にも示したように、ブレーザーのシンクロトロンスペクトルは高エネルギー側にピークをもち、ここでのフラックスがシンクロトロン放射のほぼ全パワーを決める。また、ピークエネルギーはその時の電子の最大エネルギーを反映するという非常に重要な意味を持つ。本研究では、シンクロトロンスペクトルのピークエネルギーに注目し、ピークエネルギーとピークフラックスの関係性を求めた。その結果、ピークフラックスは、ピークエネルギーの 0.5 乗で増えるという関係が示され、今後の時間発展の理論はこの関係を説明しなければならないことを提示した。これも広いエネルギー範囲で統計のよいスペクトルがあってはじめて可能な結果である。

最後に、以上のように観測から示されたブレーザーの時間変動の性質を説明できる機構について議論を行った。ここで説明すべき主な観測結果は、フレアが日々繰り返し起るということ、オフセットがあること、典型的なタイムスケールがありそれ以下の変動が非常に抑制されていること、およびフレア成分の方がオフセット成分より加速限界が高いこと、である。

ジェット内の粒子加速は、衝撃波加速によるとするものがほとんど唯一のシナリオであるが、そのためには速度差のあるものが衝突する必要がある。そこで、ジェット中で光速に近い速度で運動する物質が衝突する理論として提唱されている内部衝撃波を考慮した解析を行った。これは、中心核から断続的に吹き出されるジェットの物質（シェル）が速度差をもち、それらが衝突することにより衝撃波が生じ、粒子が加速されフレアが発生するという描像である。本論文では、これを TeV ブレーザーに適応した単純化したモデルを提示し、新しく開発したシュミレーションコードを用いて、実際の観測と比較を行った。これは、時間変動を個々のフレアでなく、フレアのシリーズとしてとらえ、これを説明するという初めての試みである。

この結果、中心からの吹き出し速度のゆらぎが小さいという条件のみで、ブレーザーの時間変動の性質をスペクトル変化も含めて、ジェットの根元から放射の部分まで非常に自然に再現することに成功した。図 3 にシュミレーション結果の一例を示す。(a) は、ジェット内の物質が衝突し衝

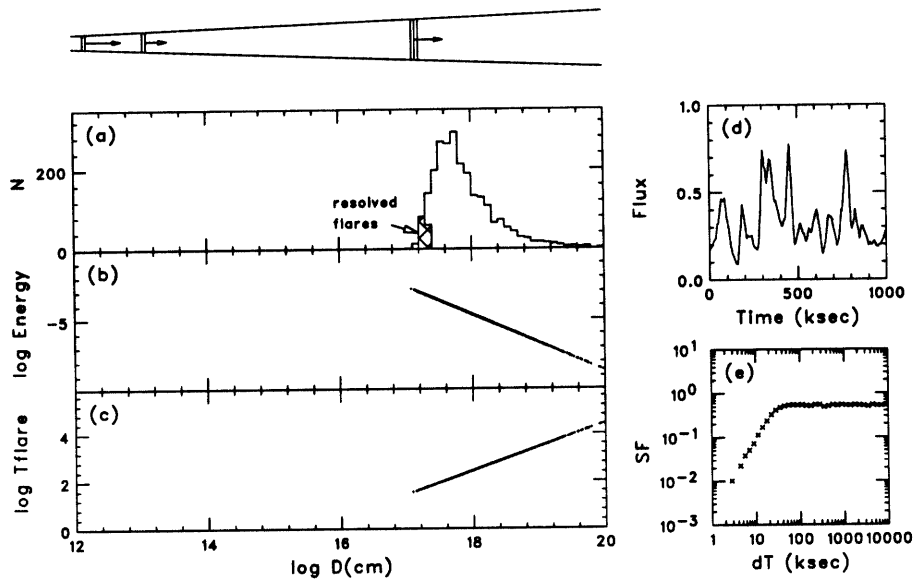


図 3: 内部衝撃波モデルのシュミレーション結果の例。横軸は中心核からの距離で、縦軸は (a) 衝突位置の分布、(b) 解放されるエネルギー、(c) フレアのタイムスケール。また (d) 光度曲線、とそれから計算される (e) 構造関数。

衝撃波が生成する中心核の距離の頻度分布である。また、中心核の距離の関数として、その時の衝突で生じるエネルギーとフレアのタイムスケールを示したのが (b) と (c) である。(d) と (e) に結果として観測される光度曲線とそれから計算した構造関数を示した。初期速度の差 ( $\Delta\Gamma$ ) が大きいシェルの衝突は、散逸されるエネルギーが大きく、また生じる衝撃波の速度が早いために放射時間も短くなる。つまり、フレアとして観測されるものは、 $\Delta\Gamma$  が最も大きく手前で起きる一部の衝突のみであり、それ以外の衝突による放射が重なり合うことで光度曲線のオフセットをつくることになる。またこのように非常にせまい範囲の変動時間を持つフレアが光度曲線に表れることになり、典型的なタイムスケール以下の変動が少ないという構造関数の性質も非常によく説明する。

また、時間変動から導かれる観測量として、フレアのタイムスケールだけでなく、フレアと定常成分の相対的な振幅などが非常に有用であることを提案した。これらを用いることで、中心核から噴出される物質は  $10^{13}$  cm 程度の大きさを持ち、それが 5 分に 1 度程度の頻度で次々と噴出し、中心核から  $10^{17}$  cm 程度のところから衝突がおきはじめる、などのジェット内の活動性を反映する量のいくつかが見積もれることを示した。