

論文の内容の要旨

論文題目 X-ray study of accretion flow in Galactic superluminal sources
(X線観測による、銀河系内超光速天体における降着流の研究)

氏名山岡和貴

宇宙ジェットは、活動銀河核などで見られる普遍的現象であるにも関わらず、その生成機構や起源については謎である。ここ数年、銀河系内でもマイクロクエーサーと呼ばれる、相対論的ジェットを放出するブラックホール候補天体が続々と発見されている。これらは近傍に位置し明るいこと、かつ短いタイムスケールで変動することから、詳細な観測を通して、ジェット生成機構や降着流とジェットの関連を探ることができる絶好の天体である。本論文では2つの系内超光速天体(GRS 1915+105とGRO J1655-40)のASCA衛星とRXTE衛星によるX線観測データを用いた研究を行なった。ASCAは0.5-10 keVの軟X線に感度をもち、エネルギー分解能に優れる。一方、RXTEは2-250 keVの広いエネルギー帯に感度をもち、その大きな有効面積から短い時間変動を追うことに威力を発揮する。さらにRXTEは1996年3月打ち上げ以来、アウトバースト中にあるこれらの天体を少なくとも週に1度は観測している。これら同時期に活躍する衛星を組み合わせることで、マイクロクエーサーについて統一的描像を与えることが期待される。我々が取り扱ったのはASCAが観測した全てのデータ(GRO J1655-40計5回、GRS 1915+105計7回)と、RXTEによるGRS 1915+105の1999年1月から2000年5月までの164観測のデータである。系内超光速天体について、このような系統的解析を行なったのは本研究が初めてである。

GRO J1655-40については、1997年2月にASCAによって行なわれた軌道周期2.6日を網羅する観測を中心に解析を行なった。この観測の目的は、上田ら(1998)が過去の観測で発見した、高電離した鉄による共鳴吸収線の起源を突き止めることにあった。我々は、得られたスペクトルを軌道位相で4等分し、その全てから鉄のK吸収線構造を検出した。これは共鳴吸収をするプラズマがブラックホールの周りにほぼ軸対称的に分布していることを示唆する。吸収線の見かけの幅(160 eV)が広いことから、我々は水素様およびヘリウム様の鉄イオンが混合していると結論づけた。

得られた水素様の鉄の吸収線の等価幅は40 eVと大きく、成長曲線(吸収線の等価幅を柱密度

の関数として表したもの)で説明するには、鉄の運動速度にして 30 keV 以上の速度分散が必要となる。プラズマがこの熱温度なら鉄イオンは完全電離しているはずなので、この速度分散はバルク運動によるものであると結論される。考察の結果、吸収線を生み出すプラズマは、400–1300 km s⁻¹ の速度の乱流を伴った降着円盤の一部であるという解釈が最も自然であることが分かった。軌道傾斜角が 70° であることから、その円盤は幾何学的に厚くなければならない。さらに、成長曲線の解析と静水圧平衡の条件から、プラズマの距離は $\sim 10^{10}$ cm と制限される。我々は本観測により、降着円盤の中に大きな乱流が存在することを始めて実証した。多分これが、 α ディスクモデルの必要とする効率良い角運動輸送に重要な役割を果たしていると考えられる。

GRS 1915+105 については、主に ASCA を用いた鉄 K バンドの構造と、主に RXTE を用いた連続成分の起源の解明を行なった。ASCA は毎年 1 回ずつ観測している。2000 年には、一週間に渡る多波長観測キャンペーンを行なった。1994、1995 年のデータに高電離した鉄による吸収線が存在することは小谷ら (2000) によって報告されていた。解析の結果、それ以外の時期では吸収線構造は有意には検出されなかった。吸収線が検出された上の 2 つの時期は 20–100 keV でのフラックスが小さい時に対応し、硬 X 線照射による光電離がプラズマの電離状態を決めている可能性を示唆する。さらに我々は、2000 年の長期観測のデータを用いて、 ~ 6.5 keV に見られる鉄輝線の起源を調べた。鉄輝線は中心からの X 線照射によって発生していると考えられるため、時間変動を利用して照射体と反射体の距離に制限を与えることができる。つまり、X 線照射の時間変動が、反射体と照射体の距離を光が伝わる時間よりも短い場合、蛍光輝線の強度は連続成分の変動を追従できず、等価幅が変化するはずである。我々は、様々なタイムスケールでの鉄輝線構造の変動を解析することで、反射体までの距離を $10^{11} \sim 10^{13}$ cm と制限した。その起源として、吸収線を作るプラズマと同一の降着流を考えて矛盾はない。

次に、GRS 1915+105 の連続成分を起源を調べるため、4–10 keV と 25–50 keV の強度相関図を作り、3 つの状態 (very high state, high state, low state) に分類した。一般に、ブラックホール候補天体の X 線スペクトルにはソフト成分とハード成分の 2 つがある。very high state はソフト・ハード成分とも高いフラックスを示す状態で、high state はソフト成分が卓越、low state はハード成分が卓越した状態である。ソフト成分は光学的に厚い降着円盤からの熱的放射 (Multi Color Disk=MCD モデル)、ハード成分はべき関数 (power law) で近似されることが知られている。しかし、ハード成分が広いエネルギー範囲に渡って単一のべき関数である物理的根拠はなく、ソフト成分と切り分けることは容易ではない。

時間変動は、X 線放射の基礎過程を最も直接的に反映していると考えられる。そこで我々は、エネルギーバンドごとにパワースペクトルを作成し、ある周波数成分の変動を作っているエネルギースペクトルを調べた。その結果、1–10 Hz 程度の早いタイムスケールの変動スペクトルは、状態によらず普遍的に、特徴的な broken power law の形で表されることを突き止めた。それは 5–10 keV 程度のエネルギーに折れ曲がりを持ち、それより低エネルギー側で光子指数 ~ 1.8 を示す。一方 0.1 Hz 以下の遅いタイムスケールでは、ソフト成分の変動が顕著になる。我々は、この時間変動の違いを利用し、最もモデルに依存しない仮定としてハード成分を上記の broken power law の形で表したところ、全てのスペクトルがそれと MCD モデルとの和でよく再現できることがわかった。

強度変動が小さいデータに対し、MCD モデルによって得られた内縁半径、温度のパラメータ (R_{in} , T_{in}) をプロットすると、2 つのブランチにはっきりと分かれる (図 1)。高温ブランチ (HTB: $T_{in} \sim 2.0$ keV, $R_{in} \sim 20$ km) は high state に対応し、低温ブランチ (LTB: $T_{in} \sim 1.0$ keV, $R_{in} \sim$

50 km) は very high および low state に対応する。HTB の温度は高く、光度がエディントン光度だとしても、内縁半径が 3 倍のシュワルツシルド半径となっているような標準円盤では説明できない。また、光度は R_{in} に寄らずほぼ一定となっている。この観測事実を自然に説明するものとして、光学的に厚い移流優勢円盤 (optically thick ADAF あるいは slim disk) がある。これは質量降着率が十分大きい場合に存在し、度会ら (2000) の計算によると、見かけの内縁半径は最内安定軌道よりも小さく、光度はエディントン光度付近で飽和することが知られている。さらに、HTB の円盤成分のスペクトルは、温度が半径の -0.5 乗に比例していると考えて矛盾はなく、理論の予言とよく一致する。一方、LTB の結果は、標準円盤モデルでよく説明できる。 R_{in} が質量降着率とともに増加する事実は、円盤が熱的に不安定になる半径が質量降着率とともに変化することを表している。

ハード成分の特徴は以下のようにまとめられる。very high state の 20–30 keV の範囲の光子指数は 2.6–3.2 に分布し、low state のそれは 2.0–2.6 に分布する。光子指数と円盤成分の光度との間に正の相関が見られる。また、very high state ではハード成分の全光度が円盤成分の光度にほぼ比例するが、low state では円盤成分の光度によらずファクター 2 の範囲でほぼ一定である。ハード成分の起源は、標準円盤が何らかの不安定性を生じて光学的に薄い ADAF がブラックホール近傍で形成され、その中の高エネルギー電子が、降着円盤からの軟光子を逆コンプトン散乱することによって生じたものと考えられる。光子指数と円盤光度との正相関は、逆コンプトン散乱による冷却とイオンによる重力エネルギー供給のバランスが電子温度、すなわち光子指数を決定していると考えて矛盾がない。一方、ハード成分の光度と円盤成分の光度との関係は、very high state では円盤の質量降着率と ADAF の質量降着率が同一だが、low state では両者が異なることを暗示している。

1999 年と 2000 年の ASCA と RXTE の同時観測中に見られた特徴的な時間変動 (図 2) は、光学的に厚い ADAF と標準円盤の間の遷移によって引き起こされていると考えられる。これらは降着円盤の熱平衡曲線によってよく説明される。さらに、こうした ADAF と標準円盤との間の遷移によってジェット放出が引き起こされている可能性がある。その証拠として、我々は 2000 年の多波長キャンペーンの観測で、この遷移に伴う赤外線でのフレアを観測した。標準円盤に溜った物質が ADAF となって自由落下に近い速度で中心付近に流れ落ちるとともに、膨大な重力エネルギーが解放されて、ジェットが放射されるのかもしれない。

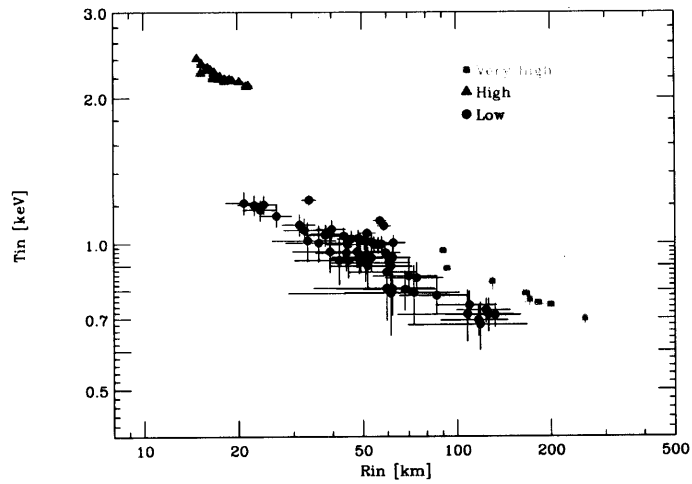


図 1: 標準円盤モデルによって得られた内縁半径、温度の関係。2つの領域(高温と低温)にはっきりと分かれる。これらは RXTE のモニタ観測データから得られた。

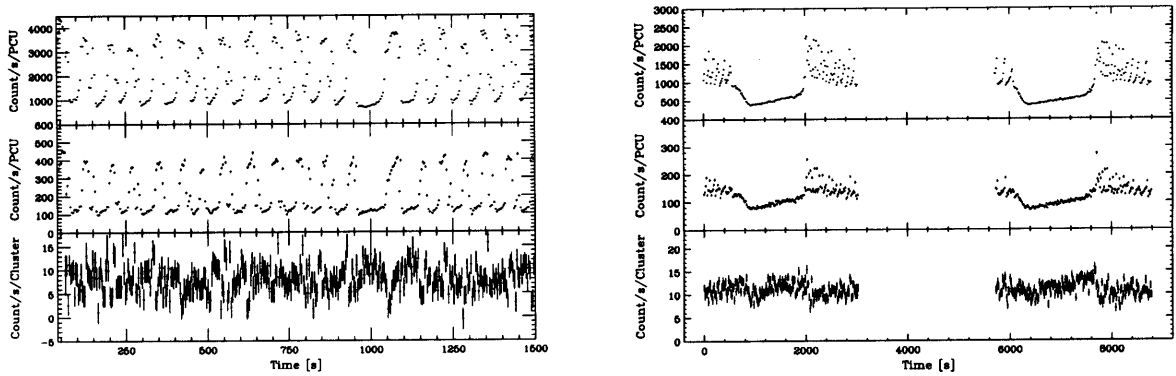


図 2: 超光速天体 GRS 1915+105 の特徴的な時間変動。左が 1999 年で右が 2000 年の ASCA と RXTE の同時観測中に得られた。