

X線観測による電波銀河の系統的研究と ASTRO-Hに向けてのサイエンス

田崎文得 (京都大学)

2012年8月1日 - 4日

1 概要

電波銀河中心核は相対論的ジェットを噴出しており、周辺構造や母銀河に影響を与えると考えられているが、その根元の構造がどのようになっているのか、またジェットを持たない活動銀河核 (AGN) と比べてどのように異なるのかは、未だ解明されていない。そこで我々は、*Swift*/BAT によって検出され、「すぎく」ですでに観測された電波銀河 22 天体の 0.5–200 keV にわたる広帯域 X 線スペクトルを取得し、その中心核構造を調べている。AGN 中心光源からの X 線スペクトルは経験的に指数関数的カットオフのかかったべき乗 ($E^{-\Gamma} \times \exp(-E/E_{\text{cut}})$) で表され、さらに 10–20 keV にピークを持つ連続光と鉄 $K\alpha$ 輝線からなる、周囲の冷たいガスによるコンプトン反射成分が存在していることが知られている。また中心核を分厚いガスやダストによって隠されている 2 型 AGN の場合は、周囲の薄いガスによって散乱された、軟 X 線成分が観測される。本研究では各電波銀河のこれらの成分を定量的に見積もり、ジェットの指標である電波強度との関係や、光度依存性を調べることで、電波銀河中心エンジンの系統的な構造解明を目指す。

2 X線スペクトルを使った AGN 研究

活動銀河核 (AGN) は、銀河の中心核が特に明るく輝いている現象である。中心の超巨大質量ブラックホール (SMBH) へ降着するガスから放射される可視光や紫外線が、周囲の高エネルギー電子雲によって逆コンプトン散乱され、X 線として観測される。AGN の統一描像では、SMBH や降着円盤の周囲に分子雲トーラスが形成され、中心エンジンを隠している場合に 2 型 AGN として観測されると考えられている (図 1)。電波銀河はジェットを相対論的速度で噴出している AGN を持っている。ジェットからのシンクロトロン放射によって電波領域で非常に明るく輝いている。

AGN からの X 線放射は、主に次の 3 成分からなる。コロナからの直接成分、降着円盤やトーラスなどによる反射成分、トーラスの開口部にあると考えられる光学的に薄いガスからの散乱成分である。直接成分のスペクトルは指数的カットオフのかかったべき乗 ($E^{-\Gamma} \times \exp[-E/E_{\text{cut}}]$) で表され、べき Γ やカットオフエネルギー E_{cut} にはコロナの光学的厚みや温度が反映される。反射成分は連続光と輝線放射からなり、それらの強度は反射体の立体角の大きさを表す。1 型 AGN は降着円盤の内側までが隠されること無く観測されるので、円盤からの反射成分は相対論的に幅の広がった放射になる。また 2 型 AGN は、トーラスにより軟 X 線が大きな吸収を受けている。そのため軟 X

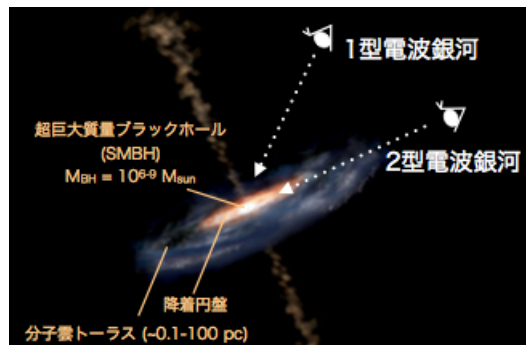


図 1: AGN の統一モデル。中心に超巨大質量ブラックホール (SMBH) を持ち、その周囲に降着円盤、分子雲トーラスを形成している。一部には相対論的速度を持つジェットを噴出しているものもあり、視線方向とジェット軸がずれている場合は電波銀河となる。トーラスの開口部から中心核を観測するか、トーラスを通して観測するかで、1 型と 2 型にわかれる。

線領域では、周囲の光学的に薄いガスによる散乱成分が見られる (図 2)。したがって、X 線スペクトルをモデルフィットすることで、コロナの物理状態や降着円盤・トーラス・散乱ガスの構造に制限をつけることができる。

3 「すぎく」から ASTRO-H へ

日本で 5 番目の X 線天文衛星「すぎく」(*ASTRO-E2*) は、2005 年 7 月に打ち上げられた。X 線 CCD カメラ (XIS) は 0.5 – 12 keV に感度を持ち、6 keV で 130 eV のエネルギー分解能を実現した。硬 X 線検出

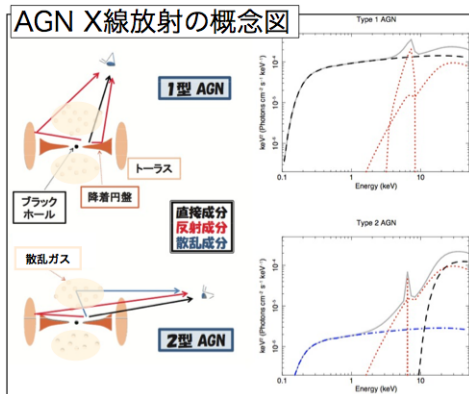


図 2: AGN からの X 線放射の概念図。SMBH 付近の高温コロナから放射された X 線は、直接観測者に届く成分 (黒) と、降着円盤や分子雲トーラスによって反射された成分 (赤) を持つ。反射成分は、主に連続光と鉄の $K\alpha$ 輝線からなる。また 2 型 AGN の場合は、光学的に薄いガスによって散乱された成分 (青) も見られる。

器 (HXD) は 15 – 600 keV のエネルギー帯域を観測することができ、CCD と合わせて 0.5 – 600 keV の広帯域を同時観測することを可能にした。

ASTRO-H は 2013 年度打ち上げ予定の、日本の次期 X 線天文衛星である。その特徴はなんといっても、5 eV のエネルギー分解能を持つ、マイクロカロリメータ (SXS; 0.3 – 12 keV) を搭載していることである。また 5 – 80 keV の硬 X 線帯域での撮像分光が可能となるのも、世界初である。さらに 0.3 – 600 keV の広帯域観測が過去最高の感度で実現される。

4 電波銀河の系統的研究

これまで行ってきた電波銀河の X 線を使った観測的研究から、電波銀河について下のような示唆が与えられた。

- ホットコロナの電子温度が低い
- 小さな分子雲トーラスを持つ
- 散乱ガスの量が少ない (?)

1 型電波銀河 4C 50.55 の「すぎく」と *Swift*/BAT による観測から得られたスペクトル (図 3) は、ジェットを持たない AGN の典型的なカットオフエネルギー ($E_{\text{cut}} \sim 200$ keV; [1]) と比べて低めであることがわかった ($E_{\text{cut}} \sim 100$ keV; [6])。経験的な指数的カットオフのカットオフのかかったべき乗モデルではなく、物理的なコンプトンモデルを適用すると、電子温度 $kT_e \sim 30$ keV、光学的厚み $\tau \sim 3$ と比較的低温で光学的に厚いコロナを持つということがわかった。硬 X 線でより感度のよい *ASTRO-H* で系統的に AGN

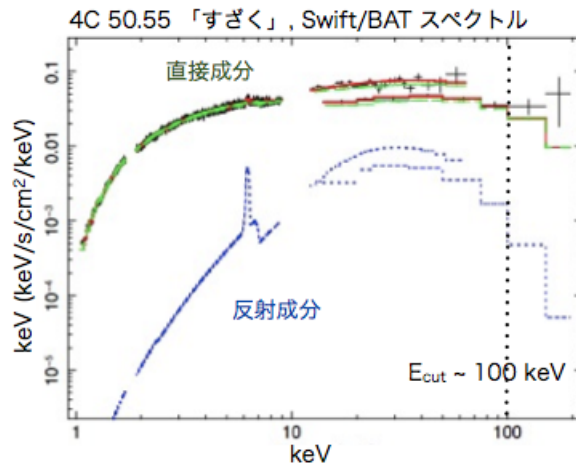


図 3: 4C 50.55 の「すぎく」と *Swift*/BAT によるスペクトル (十字)。検出器の応答は補正されている。スペクトルは指数的カットオフのかかったべき関数 ($E^{-\Gamma} \times \exp[E/E_{\text{cut}}]$) で表されており、直接成分 (緑)、反射成分 (青) の和が赤線である。

を観測すれば、カットオフエネルギーが精度よく決まり、電波銀河コロナの電子温度がジェットを持たない AGN と比べて優位に低いかがわかる。

セイファート銀河のトーラス構造は 2 種類にわけられることが知られているが (new/classical type トーラス; 図 4; [9, 2])、電波銀河のトーラス構造がどのようなになっているのかはほとんど調べられていない。そこでトーラス構造を仮定したモンテ・カルロ シミュレーションモデル (図 5; [5]) を使って、電波銀河 3C 403 と IC 5063 のトーラス構造を調べた。その結果、両電波銀河とも開口角が $\theta_{\text{oa}} = 50^\circ$ のトーラスからの反射で説明できた ([7])。さらにこのトーラスモデルを使って、様々な開口角・柱密度を持ったトーラスからの輝線放射の等価幅を計算した。その結果と電波銀河 3C 206 と PKS 0707-35 の等価幅から、両電波銀河ともにトーラスが開口角 $\theta_{\text{oa}} > 50^\circ$ 、または柱密度 $N_{\text{H}}^{\text{eq}} \lesssim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ の小さい構造を持つことがわかった ([8])。トーラスの構造については、エネルギー分解能の優れた *ASTRO-H*/SXS を使って、トーラスの内縁半径を調べることができる。図 6 はトーラスの内縁が $2 \times 10^4 r_g$ ($M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\text{sun}}$ のとき 0.1 pc) と $2 \times 10^5 r_g$ ($M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\text{sun}}$ のとき 1 pc) の場合のシ

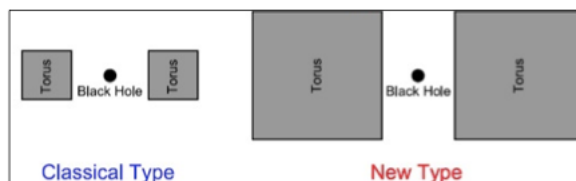


図 4: AGN トーラスの模式図 ([2])。New Type トーラスは Classical Type トーラスと比べて、背が高く、開口角が小さくなっている。

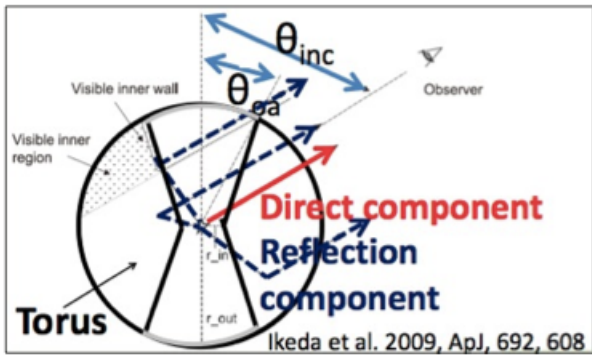


図 5: モンテ・カルロ シミュレーションで使用されたトーラス形状 ([5])。フリーパラメータはトーラスの開口角 θ_{0a} 、視線方向の向き θ_{inc} 、赤道方向の柱密度 N_H^{eq} 、内縁半径と外縁半径の比 r_{in}/r_{out} である。

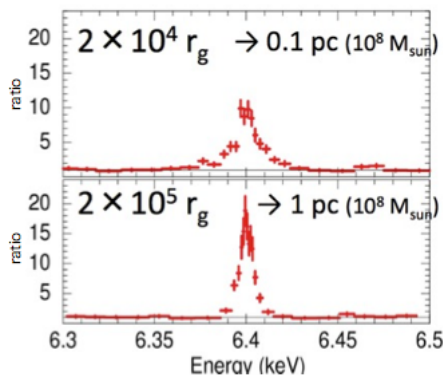


図 6: 露出 100 ks で *ASTRO-H/SXS* シミュレーションした鉄 $K\alpha$ 輝線。XSPEC の *diskline* モデルを使い、 $r_{in} = 2 \times 10^4$ と $2 \times 10^5 r_g$ の 2 つの場合について計算した。等価幅は $EW = 160$ eV。

ミュレーション結果である。マイクロカロリーメータを使えば、トーラスの (ブラックホール質量に依存した) 内縁半径を求めることができる。

散乱ガスの量は、散乱強度からトーラスの開口部の大きさの依存性を除くことで得られる。ここではそのガスの量を $f_{scat,0} = f_{scat}(1 - \cos 45^\circ)/(1 - \cos \theta_{0a})$ で表す (f_{scat} は直接成分に対する散乱成分の割合)。4 つの電波銀河について散乱ガスの量を調べたところ、 $f_{scat,0} < 0.7\%$ (3C 403; [7])、 $0.4\text{--}0.6\%$ (IC 5063; [7])、 $< 0.19\%$ (NGC 612; [3])、 $> 1.0\%$ (PKS 0707-35; [8]) が得られた。また先行研究からセイファート銀河については、 $> 2.0\%$ (NGC 3081; [3])、 $0.9\text{--}1.6\%$ (SWIFT J0255.2-0011; [4]) がわかっているので、多くの電波銀河がセイファート銀河と比べて散乱ガスの量が少ないということがわかった。ただし、PKS 0707-35 にはセイファート銀河と同程度の散乱ガスが存在していると考えられ、この天体に特有な性質なのか、それとも本当に電波銀河とセイファート銀河の散乱ガスの量には違いがないのか、今後サンプルを大きくして調査する必要がある。

5 まとめ

ジェットの有無によって AGN 構造が異なるのかどうかを解明するために、電波銀河の X 線観測のデータを系統的に調べる研究を行っている。これまで行った 4C 50.55、3C 403、IC 5063、3C 206、PKS 0707-35 の「すぎく」による観測からは、電波銀河はセイファート銀河 (ジェットを持たない AGN) と比べて、ホットコロナの電子温度が低く、分子雲トーラスの大きさが小さいことが示唆された。また、3C 403、IC 5063、NGC 612 は散乱ガスの量がセイファート銀河と比べて少ないが、PKS 0707-35 は散乱ガス量が多い可能性があることがわかった。今後は「すぎく」のアーカイブデータを使って、他の電波銀河についても同様に調べ、電波銀河の中心核構造を系統的に研究する。また、2014 年度打ち上げ予定の *ASTRO-H* の観測から、より精度よくカットオフエネルギーを決定し、トーラスの内縁半径にも制限を与えていきたい。

参考文献

- [1] Dadina (2008), *A&A*, 485, 417
- [2] Eguchi et al. (2009), *ApJ*, 696, 1657
- [3] Eguchi et al. (2011), *ApJ*, 729, 31
- [4] Eguchi (2011), PhD thesis, Kyoto University
- [5] Ikeda et al. (2009), *ApJ*, 692, 608
- [6] Tazaki et al. (2010), *ApJ*, 721, 1340
- [7] Tazaki et al. (2011), *ApJ*, 738, 70
- [8] Tazaki et al. (2012), preparing for submission to *ApJ*
- [9] Ueda et al. (2007), *ApJ*, 664, L79