

X 線観測衛星「すざく」を用いた 低光度 AGN (NGC 1566, NGC 4941) の観測

川室 太希 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

銀河中心の巨大ブラックホールを囲むとされているドーナツ状に分布したダスト (ダストトラス) は、降着円盤へのガス供給源であり、活動銀河核 (AGN; Active Galactic Nucleus) の観測的性質を決定する重要な構造物である。また、トラスが中心核からの X 線に照らされて発生するコンプトン反射成分は、10 keV 以上の宇宙 X 線背景放射 (CXB; Cosmic X-ray Background) に大きく寄与することが知られている。CXB の起源を定量的に理解するためには、トラスの形状・水素柱密度が、AGN 光度に対してどのような依存性をもつかを確立する必要がある。X 線観測衛星「すざく」によって得られる AGN の広域同時 X 線スペクトルは、トラスの幾何学構造を探るために非常に有効であるが、低光度 AGN ($L_X \sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$) については、その硬 X 線サンプルの少なさから、これまで十分に調べられてこなかった。今回、我々は、X 線観測衛星 *Swift*/BAT 58 か月カタログの中から、十分な硬 X 線強度をもちながら、これまで広域 X 線スペクトルの取得がされていなかった低光度 AGN NGC 1566 (type 1; $z=0.0050$) と NGC 4941 (type 2; $z=0.0037$) を「すざく」により追求観測し、両天体から過去最高精度のデータを取得した。「すざく」と BAT 70 か月カタログによって得られた 0.5–195 keV のスペクトルは、(吸収を受けた) 直接成分、周辺ガスからの散乱成分、コンプトン反射成分、および星生成起源と考えられる光学的に薄いプラズマからの放射成分の和でよく説明できた。観測されたスペクトルからはトラス起源と考えられる鉄の K 狭輝線が検出され、Ikeda et al. (2009) による数値モデルとの比較から、NGC 4941 においてトラスの開口角が $\theta_{\text{oa}} 60\text{--}70^\circ$ であると推定した。この結果は、統計的に示唆されている低光度 AGN では、トラスが小さくなるという結果と一致している。

1 Introduction

宇宙には数多くの銀河が存在しており、その中央にはバルジと呼ばれる球状に星が集まった領域がある。そのバルジの中心には、もれなく巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) が存在し、バルジの諸性質 (質量、光度) と SMBH の質量には強い相関があることが知られている。この事実は、銀河と SMBH がお互いに強い影響を及ぼしながら「共進化」してきたことを示唆している (e.g., Magorrian et al. 1998)。しかし、バルジと SMBH のサイズには、100 億倍ものスケールギャップがあり、実際にどのような物理過程が働いてきたのかは、謎に包まれている。そこで、銀河進化という究極の問題を理解するために、まず宇宙の歴史の中で巨大ブラックホールがどのように生まれ、成長してきた

かを解明することが、現代天文学の最重要課題の一つになっている。この課題を解決する鍵が、活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) の研究である。AGN は、周囲のガスが SMBH に降着することでその重力エネルギーを解放し、それが放射エネルギーに転化されて明るく輝いている状態 (典型的な 2–10 keV 光度が $L_{2-10 \text{ keV}} \sim 10^{43-44} \text{ erg s}^{-1}$) をさす。すなわち、AGN とは、ガスを飲み込むことで SMBH が成長している現場である。また AGN からの放射やガス放出流による銀河へのフィードバックが、SMBH と銀河との「共進化」の起源を説明する上で、最も重要な物理過程と認識されるようになってきた。

AGN の構造は図 1 に示すように、中心に SMBH があり、その周りをとり囲むようにドーナツ状のダスト (ダストトラス) が存在すると考えられてい

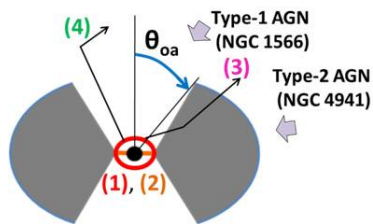


図 1: AGN で一般に考えられている構造の断面図。中心にブラックホールがあり、それを取り囲むようにドーナツ状のダストが存在する。(1)-(4) は、AGN で考えられる放射モデルを表す。また、 θ_{oa} は、トーラスの開口角を表す。

る (Antonucci & Miller 1985)。ダストトーラスは、銀河中心における星生成と、SMBH への質量供給を担っており (e.g., Krolik & Begelman 1988)、銀河との共進化を理解する鍵となる重要な構造である。近年まで、ダストトーラスの基本的性質 (中心からの距離、立体角) についての議論は、明るい AGN ($L_{2-10} > 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$) を中心に行われてきた。そして、AGN が高光度になるほどダストが昇華されてトーラスが小さくなるという、負の相関が報告されていた (図 2 参照; Burlon et al. 2011)。一方、低光度な AGN は高感度な観測が必要なために、そのトーラス構造についてはほとんど理解されていなかった。低光度 AGN には、1) SMBH 質量が小さく相対的な質量降着率の高い、まさに「急激な成長段階」にある場合と 2) SMBH 質量が大きく相対的な質量降着率が低い、「進化の最終段階」にある場合がある。これら種族がそれぞれどのような中心核構造をもつかということは、AGN 進化の「始まり」と「終り」の状態を理解するために、極めて興味深い問題である。そこで、我々は「進化の最終段階」にある低光度 AGN ($L_{2-10 \text{ keV}} \sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$) に注目し、X 線衛星「すざく」と *Swift*/BAT による過去最高精度の広域 X 線スペクトル (0.5–195 keV) を取得し、トーラス構造への制限を行った。

2 Observation

AGN の中心核構造を理解するには、X 線観測が極めて有効である。X 線観測は、1) ダストで隠され

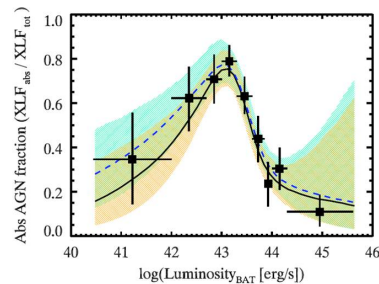


図 2: *Swift*/BAT サーベイによるサンプルをもとに、横軸に 15–55 keV における光度、縦軸に吸収を受けた AGN の割合を表す。吸収を受けた割合が大きほど、中心核がトーラスに隠されている割合が高いことを示唆する。

ている AGN を見つけ、2) 鉄輝線を用いた診断でダストトーラスの大きさを決定し、3) ブラックホール最近傍のガスの状態と超重力場の物理を検証できる、というユニークな特長をもつ。特に、広帯域エネルギーバンドによる観測は、AGN のダストトーラスの幾何学的構造を制限する上で特に有用である。観測的に、ダストトーラスの反射による 1) 鉄の K 輝線や 2) ハンプ成分といった特徴が、6.4 keV や 10 keV 以上で見られるためである。そこで、我々は X 線観測衛星「すざく」を用いて、低光度 AGN NGC 1566 (type 1; $z=0.0050$) と NGC 4941 (type 2; $z=0.0037$) について観測を行った。「すざく」は、他の X 線衛星である *Chandra* や *XMM-Newton* の観測帯域 ($\sim 0.1\text{--}10 \text{ keV}$) と比較して広帯域 (0.3–600 keV) に感度を持ち、ダストトーラスの両方の特徴を同時に捉えることができる。今回の観測では、有意に 30 keV までスペクトルの取得に成功した (図 3 参照)。

また、観測を行った低光度 AGN は、*Swift*/BAT 58 か月カタログでうかつているものを選択している。そのため、*Swift*/BAT の観測帯域である 15–195 keV のスペクトルデータを同時に用いることができる。このおかげで、過去最高の広帯域 X 線バンド (0.5–195 keV) のデータを用いた解析を行うことが可能となる。観測を行った天体の情報を表 1 にまとめる。

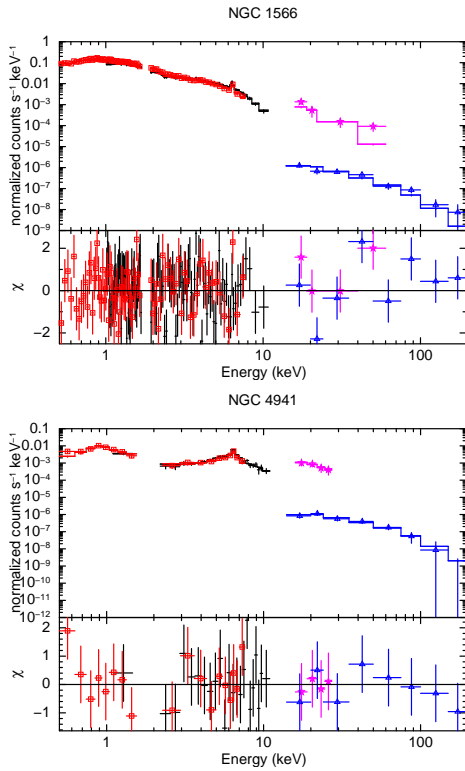


図 3: 赤、黒と紫は「すざく」によって、青は *Swift*/BAT によって取得されたスペクトルを表す。下の段は、スペクトルデータとベストフィットモデルの偏差を χ の単位によって表したものである。

表 1: Information of Targets

Target Name	NGC 1566	NGC 4941
Redshift	0.0050	0.0037
Classification	Seyfert 1.5	Seyfert 2
$\text{Log } L_{2-10 \text{ keV}} \text{ erg s}^{-1}$	40.96	41.30
$\text{Log } L_{15-55 \text{ keV}} \text{ erg s}^{-1}$	41.52	41.65

3 Analysis and Results

AGN を特徴付ける主なモデルとして次の 4 つを考慮することで、観測された AGN のスペクトルを説明することに成功した。1) 中心核からの X 線放射、2) 降着円盤からの反射成分、3) ダストトーラスからの反射成分、4) 吸収を受けた AGN に対しては、周りに存在するガスによる散乱成分。また、母銀河由来と考えられる光学的に薄いプラズマからの放射も考慮した。この成分は、低光度 AGN の 1 keV 以下で典型的に見られることが知られている (e.g., Terashima

et al. 2002)。ベストフィットモデルを図 4 に示す。

我々は、「すざく」と *Swift*/BAT によって観測されたスペクトルを同時に用いてスペクトルフィッティングを行っている。このとき、AGN の X 線放射は時間変動するということを考慮する必要がある。今回、1) と 2) の成分に対してだけその時間変動を考慮し、一方、3) と 4) の成分に関しては放射領域が大きい ($\sim 1 \text{ pc}$) ために、時間変動は有意に起こらないと仮定した。この仮定の正当性を確かめるために、トーラス由来の鉄のラインフラックスを過去数回の観測結果を比較した。これによると、有意にラインフラックスは時間変動しておらず、我々の仮定が正しいことが示唆される。

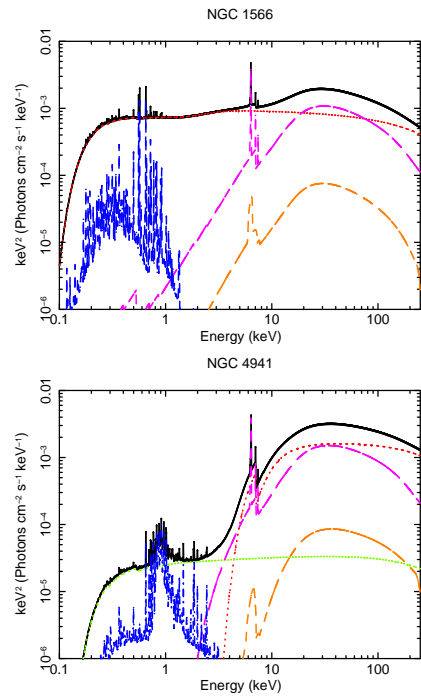


図 4: 赤、黄、紫、緑、そして青は、それぞれ、中心核からの X 線放射、降着円盤からの反射成分、トーラスからの反射成分、周辺ガスからの反射成分、光学的に薄いプラズマからの放射成分を表す。

我々は、ダストトーラスの幾何構造を制限するために、Monte Carlo Simulation によって予測される EW (Ikeda et al. 2009) と観測的に得られた等価幅 (EW; Equivalent Width) の比較を行った (図 5 参照)。今回の観測によって、トーラス由来の鉄の K

輝線の EW が NGC 1566 では、 60 ± 10 eV, そして NGC 4941 では、 230 ± 50 eV と求まった。数値モデルによって予測される EW は、トーラスの水平方向の柱密度 (N_{H}^{eq})、見込み角度 (θ_{inc})、トーラスに入射する X 線源の光子指数、そして、トーラスの開口角 (θ_{op}) を仮定することで求められる。1 型 AGN である NGC 1566 は、スペクトル解析により柱密度を観測的に制限できなかったため、 N_{H}^{eq} に不定性が残る。そのため、数値モデルによって有意に開口角を制限することはできないが、スペクトル解析により得られた反射強度 $R_{\text{torus}} = \Omega/2\pi = 0.45_{-0.10}^{+0.13}$ を開口角に換算 ($R \sim \cos(\theta_{\text{oa}})$) すると $50\text{-}70^\circ$ であると示唆される。ここでの反射強度とは、X 線源から見た反射体の立体角 (Ω) の割合として定義される。2 型 AGN の NGC 4941 に関しては、スペクトル解析より得られた柱密度 $N_{\text{H}} \sim 7 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ を N_{H}^{eq} と仮定することで、 $60\text{-}70^\circ$ の制限がつけられる。この値は、トーラスからの反射強度 $R_{\text{torus}} = 0.64_{-0.27}^{+0.69}$ と矛盾しない結果となっている。

4 Summary and Discussion

「すざく」と *Swift*/BAT による広帯域 X 線バンド ($0.5\text{-}195$ keV) を用いて、ダストトーラスの開口角 (θ_{oa}) が $50\text{-}70^\circ$ であると制限をつけた。これは、吸収された割合に換算 ($R \sim \cos(\theta_{\text{oa}})$) すると $0.34\text{-}0.64$ となる。この結果は、Burlon et al. (2011) の結果 $0.1\text{-}0.6$ (図 2 参照) とよく一致している。すなわち、高光度 AGN で従来考えられていた予想と反して、低光度 AGN のトーラス構造は小さくなる傾向があることを確かめた。このことは、高光度 AGN と低光度 AGN では、ダストトーラスの構造を決定する主な要因が異なることを示唆する。

ダストトーラスの構造を主に決定するメカニズムには様々考えられている。例えば、Receding Torus Model と呼ばれるものがある。これは、中心光度の上昇に応じてダストがより遠方まで昇華され、トーラス構造が中心領域から後退していくという考えである。これにより、中心核が吸収される割合が減るという考えがある。また、中心からの放射によって物質が運ばれトーラスは形成されるため、光度が小さ

くなるとトーラス構造が発達しないということも示唆されている。しかし、これらのメカニズムがトーラスの構造形成に如何に関わってきたかを精査するためにも、低光度から高光度に至るよりサンプル数の大きな無バイアスな解析が必要となる。

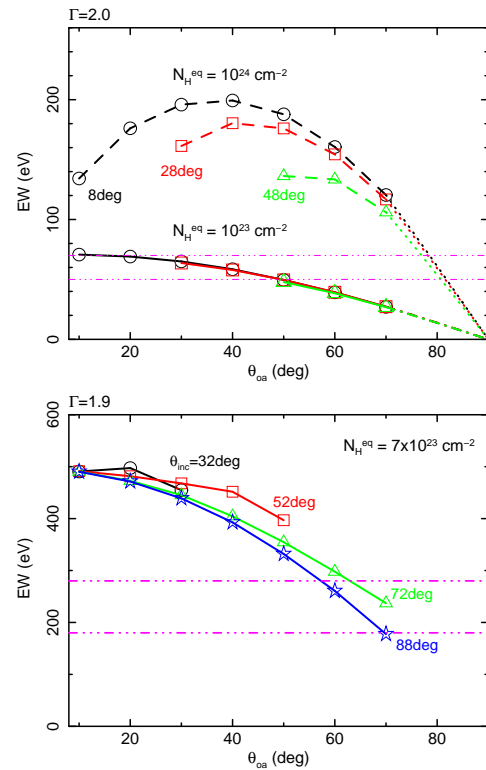


図 5: 上図: 1 型 AGN において、Ikeda et al. (2009) がある見込み角 (θ_{inc})、開口角 (θ_{oa}) 毎に予測する EW がプロットされている。また、ピンクの線は NGC 1566 においてとりうる EW を表している。下図: 上図と同様にして 2 型 AGN の場合に予測される EW と NGC 4941 で求められた EW がプロットされている。

Reference

Antonucci, R. R. J., & Miller, J. S. 1985, *ApJ*, 297, 621
 Burlon, D., Ajello, M., Greiner, J., et al. 2011, *ApJ*, 728, 58
 Ikeda, S., Awaki, H., & Terashima, Y. 2009, *ApJ*, 692, 608
 Kawamuro, T., Ueda, Y., Tazaki, F., & Terashima, Y. 2013, accepted for publication in *ApJ*.
 Krolik, J. H., & Begelman, M. C. 1988, *ApJ*, 329, 702
 Terashima, Y., Iyomoto, N., Ho, L. C., & Ptak, A. F. 2002, *ApJS*, 139, 1