

# 「すざく」で見た活動銀河核 —遮蔽体の統計的性質の確立

上田 佳宏

〈京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉  
e-mail: ueda@kusastro.kyoto-u.ac.jp



上田



川室

川室 太希

〈京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉  
e-mail: kawamuro@kusastro.kyoto-u.ac.jp

「すざく」は、その広域バンド同時観測能力を生かし、多くの近傍宇宙にある活動銀河核 (AGN) に対して過去最高精度のX線データを提供した。特に、10 keV以上での硬X線全天探査と「すざく」による追求観測という組み合わせは極めて効率的で、ガスや塵に深く埋もれたAGNの発見、近傍宇宙での吸収量分布の決定、光度依存した統一モデルの確立、低光度AGNの中心核構造の解明に、本質的な貢献をした。これらの成果は、銀河中心巨大ブラックホール成長史を理解するための基礎を与える。

## 1. はじめに

「すざく」の最大の特徴の一つは、10 keV以下で優れたエネルギー分解能 (~2% at 6 keV) を確保しつつ、~0.2 keVから~500 keVという広域バンドをカバーした「同時」観測が可能なことであった。HXD/PINは、NuSTARが打ち上げられるまでの7年間、15-40 keVのバンドで過去最高感度を実現した。これらの優れた性能は、広いエネルギー範囲で複雑な時間変動を示す活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) の観測に、大いに威力を発揮した。実際、「すざく」のデータを用いて出版されたAGNに関連する論文数は、現時点で200を超えており、順調に増加し続けている。この数は、他分野の「すざく」論文数と比べて、最大である。

第一筆者の私見では、AGN分野における「す

ざく」の重要な成果として (1) ガスや塵に深く埋もれたAGNの発見<sup>1), 2)</sup> および近傍AGNの統計的性質の確立<sup>3)</sup>, (2) 降着円盤内縁からの相対論的反射成分 (いわゆる「広がった鉄輝線」問題) に関する議論の進展<sup>4)-6)</sup>, (3) 超高速アウトフローに関する研究<sup>7), 8)</sup>, の三つが挙げられる。(2) に関しては、いくつかの異なる解釈が提案されており、激しい議論を呼んでいるが、まだ最終決着には至っていない。(2) と (3) に関しては別の紙面に譲り、本記事では (1) について、われわれの研究成果を中心に紹介したい。

## 2. X線によるAGN観測の意義

近傍宇宙の銀河の中心に、普遍的に太陽の $10^{5-10}$ 倍もの質量をもつ巨大ブラックホールが存在し、その質量が銀河バルジの質量とよく相関している事実<sup>9)</sup> は、銀河とブラックホールがお互いに影

響しあって「共進化」してきたことを強く示唆する。「巨大ブラックホールがどのように形成され、宇宙史においてどのような役割を果たしてきたのか？」という謎は、現代天文学に課された最重要課題の一つである。これは、高エネルギー天文学が最も得意とし、かつ責任をもって答えるべき問題の一つであろう。

AGNとは、質量降着によって巨大ブラックホールが成長する現象である。降着ガスがその重力エネルギーを解放することにより、電波からガンマ線に至る広いエネルギー範囲にわたって電磁波が放射される。巨大ブラックホールの形成史を解明するためには、宇宙に存在するあらゆる種族のAGNを、漏れなく捉える必要がある。AGNの主要種族は、塵やガスに隠されていることがわかっている<sup>3)</sup>。透過力が強く、吸収の影響を受けにくい硬X線を用いた観測は、完全性の高いAGN探査を可能にする。また、ほかの波長帯と異なり、母銀河からの放射に邪魔されないクリーンなAGNサンプルを提供する。

AGN現象の物理的起源を理解するためには、まず、中心核の構造を徹底的に解明しなければならない。広域X線スペクトルは、それに関して独自の豊富な情報をもたらす。一般に、AGNでは、中心の巨大ブラックホールを降着円盤およびダストトーラス（以下、トーラス）と呼ばれる遮蔽体を取り囲んでいると考えられている。AGN統一モデルによれば、直接、中心核を見ている場合に1型AGN、トーラスに視線方向が遮られている場合に2型AGNとなる。ジェット成分以外のX線連続スペクトルは、何らかの種光子が、ブラックホール近傍に存在する高温電子によってコンプトン散乱を受けたものと解釈され、べき関数に指数関数的カットオフのかかった形でよく近似できる。この直接成分に、降着円盤やトーラスからの反射成分が加わり、20 keV付近での強度超過および重元素による蛍光X線を作る。2型AGNでは、光電吸収により、直接成分の低エネ

ルギー側の強度が大きく減衰する。トーラスの外側のガスによる散乱成分は、トーラスによる吸収を受けず、その結果、軟X線放射成分が残る。AGNの型は、本来、可視スペクトル上の広輝線の有無によって定義されるが、本記事ではX線スペクトルによって分類し、吸収体の水素柱密度( $N_{\text{H}}$ )が $10^{22}(\text{cm}^{-2})$ より小さいAGNを「X線1型AGN」、それより大きいAGNを「X線2型AGN」と定義する。

トーラスは、ブラックホールへの質量供給を担う極めて重要な構造物である。しかし、その物理的成因はまだよく理解されていない。例えば、降着円盤からのアウトフロー（円盤風）が寄与しているという可能性も指摘されている<sup>10)</sup>。このためには、X線観測により個々のAGNについてトーラスからの反射成分や吸収量を決定し、その幾何の統計的性質を調べることが必要である。

### 3. 深く埋もれたAGNの発見

「近傍宇宙」は、宇宙進化のすべての議論の参照点であり、そこでのAGNの性質を確立することは極めて重要である。また、距離が近いために詳細な観測データを取得できるという利点がある。2002年に打ち上げられたINTEGRAL衛星と2004年に打ち上げられたSwift衛星は、その広い視野を生かして、10 keV以上の硬X線バンドにおいて、これまでになく高感度の全天探査を開始した<sup>11), 12)</sup>。これら全天探査は、近傍宇宙における「吸収に対してバイアスの最も小さいAGNサンプル」を提供する。「すざく」HXD/PINは、個々の天体に対してはSwift/BATより高い感度を誇るが、広域にわたって無バイアス探査を行うには視野が狭い。そこで、われわれはSwift/BATサンプルを親サンプルと位置づけ、その中から興味深い天体を選んで「すざく」で追求観測する、という戦略をとった。HXD/PINによる検出はほぼ保証されており、効率良く、多くの天体で過去最高精度の広域スペクトルを取得することができ

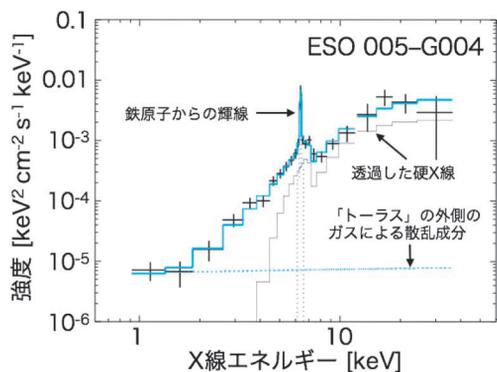


図1 「すぎく」によって得られた、埋もれたAGN (ESO 005-G004) のX線スペクトル (検出器の有効面積は補正済). Swift/BATによる14–195 keVバンドでの硬X線全天探査で発見された. 10 keV以上でのみ中心核からの直接成分が支配的になる.

た. Swift/BATと「すぎく」はまさに理想的な組み合わせといえた.

最初にわれわれが目にしたのは、Swift/BAT探査によって初めて見つかったAGN (これまで他波長でAGNと同定されていなかった天体) である. 「すぎく」によるX線スペクトルを調べると、その多くは、10 keV以上で放射が卓越する、大きな吸収を受けたAGNであることが判明した. とくに、軟X線で観測される散乱成分の強度が、これまでに知られている典型値と比べて小さい (<0.5%) 天体が多く含まれていた. そのスペクトルの例を図1に示す. 弱い散乱強度は、トラス開口角が小さい (トラスの覆う立体角が大きい) ことを示唆する. われわれは、これらの巨大ブラックホールがトラスに深く埋もれていると解釈し、「ニュータイプAGN」と名づけた<sup>1)</sup> (このプレスリリースは大いに注目され、JAXAを通して池下章裕氏に製作していただいた想像図は、その後、至る場面で使われることとなった). その後、われわれはSwift/BAT AGNの可視スペクトルを系統的に調べ、これらの軟X線散乱強度の小さいAGNが、弱い [O III]  $\lambda$ 5007輝線強度を示す傾向にあることを発見した<sup>13)</sup>. この事実は、

これらの種族の多くが確かにトラスに深く埋もれているという描像を支持し、また、可視分光探査だけではAGNの完全探査が困難であることを示唆している.

#### 4. 吸収量分布

近傍AGNの最も重要な統計量の 하나가、その吸収量 (水素柱密度) の分布である. これは1型AGNと2型AGNの割合を決定し、トラスの平均立体角についての情報を与える. さらに、さまざまな光度や吸収をもつAGN種族の足し合わせでX線背景放射のスペクトルを説明する「種族合成モデル」を構築するための基礎情報となる. 吸収量分布を求めるためには、統計的に完全なサンプルについて、個々の天体の吸収を精度よく決定する必要がある. 特に大事なのが、水素柱密度が  $10^{24} \text{ cm}^{-2}$  を超える「コンプトン厚AGN」 (Compton-thick AGN) の存在比である. 先述した軟X線散乱強度の小さいAGNの割合は、吸収量が大きくなるほど増える傾向があり<sup>13)</sup>、その一部もコンプトン厚AGNである. コンプトン厚AGNは銀河の星生成に深く関連しているという理論的予想もあり、銀河とブラックホールの「共進化」の理解の鍵となる種族である. ところが、近傍宇宙においてさえ、コンプトン厚AGNの存在比はほとんどわかっていなかった. それを硬X線探査のX線スペクトル追求観測によって決定することは、「すぎく」によるAGN研究の大きな目標の一つであった.

図2に、Swift/BAT 9カ月カタログにある84のAGNについての吸収量分布を示す. 吸収の測定には、「すぎく」、XMM-Newton, Swift/XRTが使われている. コンプトン厚AGNの数の割合は全体の6%であるものの、コンプトン厚AGNに対する吸収・散乱に対する観測バイアスを補正し、かつ  $N_{\text{H}}=10^{24-25} \text{ cm}^{-2}$  と  $N_{\text{H}}=10^{25-26} \text{ cm}^{-2}$  の範囲に同数のAGNがあると仮定すると、全AGNに対するコンプトン厚AGNの真の存在比は、

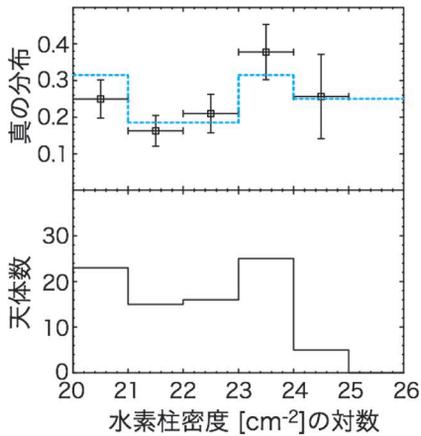


図2 Swift/BAT 9カ月硬X線探索のX線追観測で求めた近傍AGNの吸収量分布(文献3より)。(上)観測バイアスを補正して得られる真の吸収量分布。青点線は、X線背景放射の種族合成モデル<sup>3)</sup>で採用されたモデル。(下)観測されたヒストグラム。

2-10 keVでの光度 $10^{43.75} \text{ erg s}^{-1}$ において $\sim 30\%$ であると推定される。これらの結果は、最新のX線光度関数と組み合わせられ、X線背景放射の種族合成モデル<sup>3)</sup>の構築に利用された。われわれはさらに統計を増やすべく、現在、Swift/BAT 70カ月カタログを用いて、コンプトン厚AGNの同定作業を進めている。今後、NuSTAR、ASTRO-H、それよりさらに感度の高い硬X線バンドの観測により、コンプトン厚AGNの数密度(光度関数)の宇宙論的進化を決定することは、高エネルギー天文学に残された重要な課題の一つである<sup>14)</sup>。

## 5. 光度依存した統一モデル

これまでに行われたX線探索により、一般に、吸収を受けたAGNの割合が、光度とともに減ることが知られていた。この事実は、トーラスの覆う立体角が光度とともに減少することを意味する(「光度依存したAGN統一モデル」)。この関係を確立することは、トーラス構造を決定する要因を理解するうえで極めて重要である。われわれは、X線スペクトルの統計解析という独立な方法で、

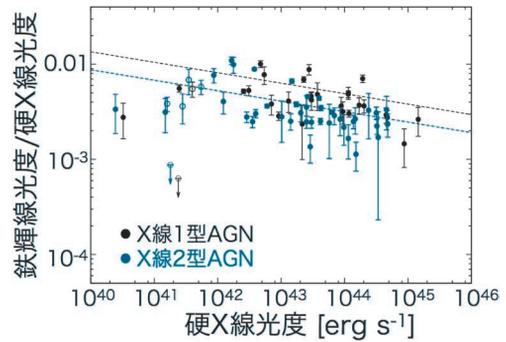


図3 「すざく」サンプル<sup>15)</sup>を用いた、10-50 keVバンドの硬X線光度と、それに対する鉄 $K\alpha$ 輝線光度の比の相関(文献16よりコンプトン厚AGNを除いて抜粋)。黒破線および青破線は、それぞれX線1型AGNおよびX線2型AGNに対する線形回帰分析の結果。中抜き丸は、6章で言及されている低光度AGNを表す。

この検証を試みた。

「すざく」が成果を上げた理由の一つは、メインカメラがやられた後も、優れたエネルギー分解能と大有効面積をもつXISが、経年劣化の影響を大きく受けず安定して稼働し続けたことにある。X線CCD検出器の分解能があれば、中性鉄からの蛍光 $K\alpha$ 輝線(6.4 keV)と高電離した鉄による輝線を楽々、分離することが可能である。深沢ら<sup>15)</sup>は、2011年にこれまで「すざく」で観測された88のセイファート銀河のデータを系統的に解析し、各鉄輝線の強度をカタログとしてまとめた。リッチら<sup>16)</sup>はそれを用い、6.4 keV輝線の相対強度(硬X線光度に対する鉄輝線光度の比)と、硬X線光度との関係を調べた(図3)。ここで、鉄輝線の「等価幅」を用いないのは、2型AGNにおいて吸収による連続成分の減衰の影響を避けるためである。X線光度が $\sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ 以上の範囲では、1型AGNと2型AGNの両方について、鉄輝線の相対強度と光度の間には有意な反相関があることがわかる。この傾向は、1型AGNについて過去に岩澤と谷口によって指摘された「X-ray Baldwin効果」<sup>17)</sup>(鉄輝線の等価幅と光度との反相関)とも合致する。単純には、中心からの放射

がトーラス内壁を後退させる結果、立体角が減少するという描像で解釈できる。

## 6. 低光度AGNの性質

X線光度が $\sim 10^{42}$  erg s $^{-1}$ 以下の「低光度AGN」の性質の解明は、巨大ブラックホールのダウンサイジング現象<sup>18)</sup>(より低光度のAGNほどより最近になって出現した)の起源の理解にも関係する、たいへん興味深い研究テーマである。前の節で、これより高光度側では、トーラスの立体角が光度の減少とともに増加することを述べた。しかし、SwiftやINTEGRALによる全天硬X線探査によると、それより低光度側では、吸収されたAGNの割合が単調増加せず、 $\sim 10^{42-43}$  erg s $^{-1}$ でいったんピークを迎えた後、また減少するという結果が報告された<sup>19)</sup>。このことは、低光度AGNでは、トーラス形状を決定する要因が放射以外にもあることを示唆する。

われわれは最近、Swift/BAT硬X線探査で検出された低光度AGN 8天体を「すざく」で追求観測し、それぞれのトーラス構造を調査した(うち2天体の結果については川室らによる報告<sup>20)</sup>を参照)。Swift/BATのスペクトルと合わせることで、0.5-200 keVにわたるかつてない精度の広域スペクトルを得ることに成功した。われわれのサンプルの中で、ほぼ同じ光度( $L \sim 10^{41}$  erg s $^{-1}$  (10-50 keV))および吸収量( $N_H \sim 10^{22}$  cm $^{-2}$ )を示すNGC 3718とNGC 5273のスペクトルを図4に示した。ここで明白なのが、NGC 3718では、6.4 keV辺りに輝線構造は見られないが、NGC 5273では強い輝線が検出されていることである。細い鉄輝線はトーラスからの反射成分と考えられ、その連続成分に対する相対強度は、トーラスの立体角の大きさを反映していると考えられる。つまり、低光度AGN中には、トーラスの立体角が大きく異なる種族が含まれているとわかった。X線探査によって得られる「吸収されたAGNの割合」は、ばらつきが大きいトーラス立

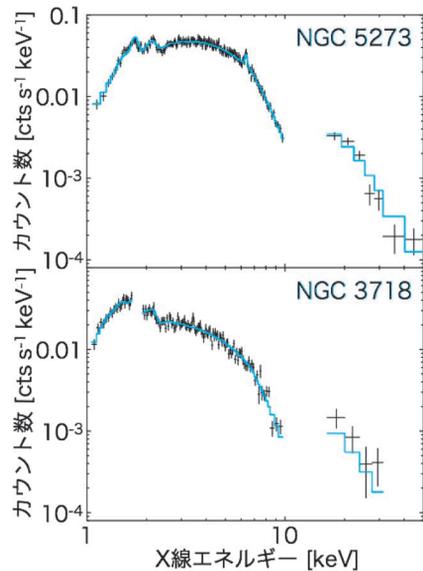


図4 「すざく」XISおよびHXD/PINで得られたNGC 5273(上)およびNGC 3718(下)のX線スペクトル。応答関数は補正していない。十字がデータ、実線がベストフィットモデル。

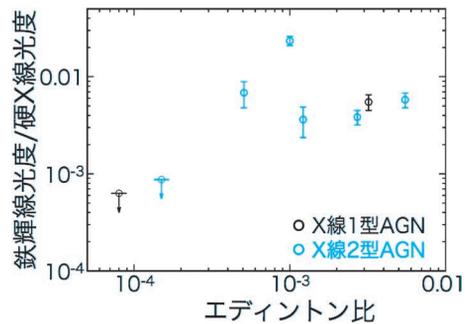


図5 「すざく」で観測した低光度AGNの、エディントン比に対する鉄K $\alpha$ 輝線/硬X線(10-50 keV)光度比の関係。

体角の平均値を表していると考えられる。また、いずれの天体からも、ブラックホール近傍の降着円盤由来の広がった鉄輝線成分を有意に検出することはできなかった。このことは、低光度AGNでは標準降着円盤がブラックホール近傍まで伸びておらず、中心部が放射非効率降着流になっているという描像と合致する。

われわれは、低光度AGNで見られるトーラス

構造の違いが、エディントン比（エディントン光度に対するボロメトリック光度の比）の違いによって説明しうることを見つけた。図5は、鉄輝線光度と硬X線光度の比を、エディントン比に対してプロットしたものである。エディントン比がある閾値（ $\sim 2 \times 10^{-4}$ ）より小さくなると、トーラスからの鉄輝線が見られなくなる傾向が見える。このことは、低光度AGNにおいては、光度ではなくエディントン比がトーラス構造を決定する重要パラメーターであることを示唆する。ある程度の値のエディントン比（ブラックホール質量で規格化した質量降着率）を維持するには、質量供給源であるトーラスが十分に発達する必要があるのかもしれない。逆に、質量降着に伴って生じる円盤風が原因で、エディントン比の高いAGNのトーラス構造が大きくなっている可能性もあり、今後の研究の進展が待たれる。

## 7. おわりに

以上、特にAGNの遮蔽体の性質に注目し、「すざく」によって得られた成果を概説した。過去10年間におけるX線観測により、近傍AGNの統計的性質はほぼ確立したといえるであろう。しかし、それを説明する「物理的起源」の理解は、重要な未解決問題として残っている。この課題は、まさにASTRO-Hに引き継がれることになる。X線スペクトル線の精密分光観測は、遮蔽体やアウトフロー物質の位置、幾何、物理的起源について決定的な情報をもたらすと期待される。また、これまでにない高精度で取得される軟X線から軟 $\gamma$ 線の広域同時スペクトルは、中心エンジンの放射機構の理解を大いに進めるであろう。これからの数年間、ASTRO-Hから発信される科学成果に、大いに期待していただきたい。

## 謝辞

Swift/BAT硬X線探査の「すざく」追求観測プロジェクトの主な共同研究者である、田崎文得氏、寺島雄一氏に感謝する。

## 参考文献

- 1) Ueda Y., et al., 2007, ApJ 664, L79
- 2) Eguchi S., et al., 2009, ApJ 696, 1657
- 3) Ueda Y., et al., 2014, ApJ 786, 104
- 4) Miniutti G., et al., 2007, PASJ 59, S315
- 5) Noda H., et al., 2011, PASJ 63, 449
- 6) Miyakawa T., et al., 2012, PASJ 64, 140
- 7) Tombesi F., et al., 2014, MNRAS 443, 2154
- 8) Tombesi F., et al., 2015, Nature 519, 436
- 9) Kormendy J., Ho L. C., 2013, ARA&A 51, 511
- 10) Elitzur M., Shlosman I., 2006, ApJ 648, L101
- 11) Beckmann V., et al., 2006, ApJ 638, 642
- 12) Tueller J., et al., 2008, ApJ 681, 113
- 13) Ueda Y., et al., 2015, ApJ, in press
- 14) Ueda Y., 2015, Proc. of the Japan Academy, Ser. B 91, 5
- 15) Fukazawa Y., et al., 2011, ApJ 727, 19
- 16) Ricci C., et al., 2014, MNRAS 441, 3622
- 17) Iwasawa K., Taniguchi Y., 1993, ApJ 413, L15
- 18) Ueda Y., et al., 2003, ApJ 598, 886
- 19) Burlon D., et al., 2011, ApJ 728, 58
- 20) Kawamuro T., et al., 2013, ApJ 770, 157

## Active Galactic Nuclei as Observed with Suzaku

Yoshihiro UEDA and Taiki KAWAMURO

*Department of Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan*

Abstract: Suzaku has provided the best quality wide-band X-ray spectra of many active galactic nuclei (AGN) in the local universe. Suzaku follow-up observations of AGN detected in the all sky hard X-ray surveys have led us to discover deeply buried AGN, determine the column density distribution, establish the luminosity-dependent unified scheme, and reveal the nature of low luminosity AGN. These results will serve as the basis to understand the growth history of supermassive black holes in galactic centers.