

論文内容の要旨

論文題目: *Suzaku* Studies of Time Variable X-ray Spectra of
Edge-On Active Galactic Nuclei

(「すざく」衛星によるエッジオン活動銀河核の
変動 X 線スペクトルの研究)

氏名 伊藤 健

1 はじめに

活動銀河中心核 (Active Galactic Nucleus; AGN) は系外銀河の中心に存在し、 $\lesssim 1$ pc という小さな領域から、 10^{39} – 10^{48} erg s $^{-1}$ にもおよぶエネルギーを放射している。その中心には太陽質量の 10^6 – 10^8 倍にも達する巨大質量ブラックホールが存在し、そこへの質量降着によってその巨大な放射エネルギーをまかなっていると考えられている。AGN は全天に一樣に存在しており、遠方宇宙での無数の AGN の放射は、宇宙背景 X 線放射 (Cosmic X-ray Background; CXB) の起源としてもっとも有力な候補である。AGN は、多くの輝線をもつ光学スペクトル、X 線放射、場合により強い電波放射など、複雑な電磁波スペクトルを示し、その様子は天体ごとに多種多様なため、その現象論的な分類が多くなされてきた。現在もっとも広く受け入れられている AGN の統一描像は、比較的近年になって Antonucci らによって提案されたもの (以降 "Unified Scheme") で、それによると AGN の多様性は、電波放射の強さと、降着円盤を見込む角度という 2 つのパラメータで説明される (e.g., Antonucci & Miller 1985)。円盤をより真上に近い角度から見ることで、中心核からの放射が直接に観測できている場合には、その天体は 1 型 AGN とよばれ、いっぽうで円盤をより真横に近い角度から見ているため、視線方向に降着物質があり、中心核の放射がそれによって隠されている場合には、その天体は 2 型 AGN と分類される。光学観測での 1 型と 2 型の数比 ($\sim 1:4$) から、中心核を隠す物質は回転軸方向に幾何学的に厚い、トーラス状に分布するとされる。

この論文は、最新の「すざく」衛星をもちいて 2 型 AGN からの X 線放射をこれまでにない精度で観測し、それが "Unified Scheme" に基づいて説明できるかを検証すること、また明るい直接成分が遮られることを利用し、より微弱な、周辺からの反射・散乱成分を精度良く観測し、それを通じて

降着物質の分布・形状を探ることを目的とする。2型 AGN の広帯域 X 線スペクトルをより深く理解することは、CXB の表面輝度とスペクトルを、遠方の AGN の重ね合わせで説明する上でも重要である。

2 2 型 AGN のこれまでの観測

2 型 AGN の中でも比較的大きな吸収を受けたものでは、中心核からの放射が X 線領域まで隠されており、上記の目的に適している。このような天体の存在は、日本の X 線衛星「ぎんが」により、初めて明らかになった (e.g., Awaki et al. 1993)。続く「あすか」衛星によって、反射光と考えられるスペクトル成分が一部の明るい 2 型 AGN で発見され (e.g., Ueno et al. 1994)、*Chandra* および *XMM-Newton* 衛星によって、その成分が 2 型 AGN に共通のものであるという認識が確立された。これらの観測が 10 keV 以下に限られていたのに対し、*BeppoSAX* 衛星は ~ 100 keV までの帯域を活かすことで、極端に強い吸収をうけた天体からも直接成分を検出し、2 型 AGN からの放射には、ほぼ普遍的に直接成分と反射成分があることを示した。このように、X 線観測は "Unified Scheme" の土台を築くのに大きな貢献をしてきたと言える。しかし、これまでの衛星はエネルギー帯域が限られている (< 10 keV)、10 keV 以下でのエネルギー分解能が十分でないため、2 つの成分を同時に精度良く観測できるものではなかった。「すぎく」衛星は、この 2 つの性能をあわせもつ初めての衛星である。これによって、2 型 AGN からの放射を成分ごとに分解し、それぞれの特徴およびその関係を詳しく調べられるようになった。本論文の筆者は、「すぎく」の運用や、そこに搭載された硬 X 線検出器の開発・校正に、大きく貢献している。

3 スペクトルと時間変動の解析

我々は「すぎく」衛星の初期観測データ、および筆者自身の観測提案によって得られたデータのうち、5 つの 2 型 AGN (NGC 4388, Mrk 3, Circinus 銀河, NGC 4945 および NGC 4258) を選んで解析を行った。これらの天体からは水メーザーが観測されており、降着円盤をほぼ真横 (エッジオン) の角度から見ていると考えられる。得られたエネルギースペクトルと時間変動から、これらの天体からの放射は明らかに 3 つの成分に分解された。すなわち、(D) 強い吸収を受けた直接成分、(R) 光学的に厚く、ほぼ中性の物質によって反射された成分、(S) 電離された物質によって散乱された成分である。図 1 は実際に得られたスペクトルと、それらを上の 3 つの成分を表すモデルで再現したものである。また図 2 (左) にスペクトルの模式図を示す。全ての天体で、上記の硬 X 線検出器により、数 keV - 10 keV 以上の帯域で、D を検出することができた。吸収の強さは 5 つの天体で異なり、水素柱密度 N_{H} は $10^{23} - 10^{25.5} \text{ cm}^{-2}$ の値をとった。吸収を補正した X 線フラックスから推定した AGN の全光度は $L_{\text{bol}} \simeq 10^{41} - 10^{44.5} \text{ erg s}^{-1}$ という広い範囲に分布したが、直接成分のスペクトル形状はサンプル間でほぼ同じであり、1 型 AGN のものとも良く似ていた。サンプルの中でもっとも

暗いもの (NGC 4258) を除いた 4 つのスペクトルには、R がはっきりと観測された。この成分はひじょうに硬い連続成分と鋭い鉄吸収端、中性物質からの幅の狭い輝線、および 20 keV 付近の盛り上がりで特徴づけられる。広帯域でのモデリングおよび輝線の等価幅などから、こうしたスペクトルの特徴はすべて、同じ反射体がコンプトン散乱や蛍光過程により作り出しているとして説明できることが確認できた。

図 2 (右) は、R の D に対する見かけ上の強度比 ($f_{\text{refl}} \equiv$ 反射体の立体角/ 2π) に対して、硬 X 線領域 (15–50 keV) での時間変動の大きさ (中心ブラックホール質量から予想される値で規格化したもの) を、個々の天体についてプロットしたものである。NGC 4388 および Mrk 3 では、光学的に厚い反射体が中心核から見て大きな立体角をもつ ($f_{\text{refl}} \sim 1$) と同時に、NGC 4388 では時間変動もほぼ予想されるオーダーで検出できている。これらは、図 1 (右) のように、時間変動する D と変動しない R が、硬 X 線領域でほぼ同程度の強度であるとして理解できる。(Mrk 3 ではブラックホール質量が大きいため観測期間中の時間変動は期待されず、実測も上限値のみ。) それらに対して Circinus 銀河は f_{refl} は小さいので強い変動が期待できるが、図ではそうになっていない。この他にも問題がある。それは視線方向に $N_{\text{H}} \sim 7 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ という柱密度の大きな吸収体があり、直接成分が視線方向の外へとコンプトン散乱 (Scatter-out) されていると考えられるので、スペクトル解析で得られた D のフラックスに、この補正— $\exp(N_{\text{H}}\sigma_{\text{T}}) \sim 130$ 倍—を施してみると、全光度がエディントン光度の ~ 8 倍にも達してしまうことである。以上の 2 つの矛盾を解くには、得られた成分 D の大部分は、実は視線方向外からの散乱成分 (Scattered-in 成分) であると解釈し直すことが必要である。この成分は図 3 (左) で紫で示されたようなもので、スペクトルの形は成分 D と良く似るが (e.g., Yaqoob 1996)、R と同様に時間変動しないと考えられる。直接成分のうち大部分が Scatter-out されている場合に、硬 X 線領域で Scattered-in 成分が支配的になることは、図 3 (左) のような立体角の大きな吸収体を考えれば自然なことである (e.g., Matt et al. 1999b)。

いっぽう、NGC 4945 は Circinus 銀河とほとんど同じブラックホール質量 ($M_{\text{BH}} \approx 1.4 \times 10^6 M_{\odot}$) および吸収量 ($N_{\text{H}} \approx 5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$) を持つが、硬 X 線領域での時間変動が全くなまされていない。つまりこちらの天体では、成分 D には Scattered-in 成分はほとんど含まれておらず、ひいては、光学的に厚い吸収体は中心核に対して大きな立体角を持ち得ないことが分かった (Itoh et al. 2008)。これは f_{refl} の値が小さいこととも良く合致する。NGC 4258 のスペクトルには反射成分の兆候が見られず ($f_{\text{refl}} < 0.1$)、この場合も、光学的に厚い反射体は存在しないか、存在しても中心核にたいしてわずかな立体角しかもたないことを示唆している。

以上より我々は、これまでの統一描像が想定していた「幾何学的に厚い」トーラスは、少なくとも一部の天体には存在しないということを結論づける。図 3 に、通常の Unified Scheme で想定されるトーラス (左) と、NGC 4945 および NGC 4258 で上記の結果から推測される降着物質の形状 (右) の模式図を示す。今回、2 型 AGN の中でも反射成分がひじょうに少ないものが見付かったことは、CXB を遠方 AGN の積算スペクトルで説明する試みに、おおきな影響を与えたと考えられる。

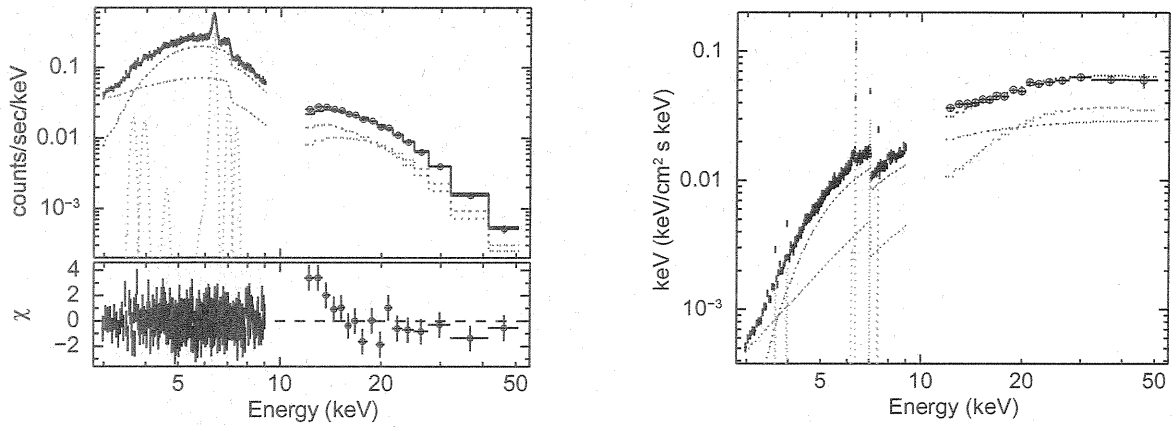


図 1: 「すざく」で観測された 2 型 AGN (NGC 4388) のエネルギースペクトルと、ベストフィットモデル。赤、青、緑の点線がそれぞれ D, R, S の放射成分に対応する。(左) 縦軸は検出器のカウントレート。下のパネルに残差をしめす。(右) 検出器のレスポンスを除いた νF_ν プロット。

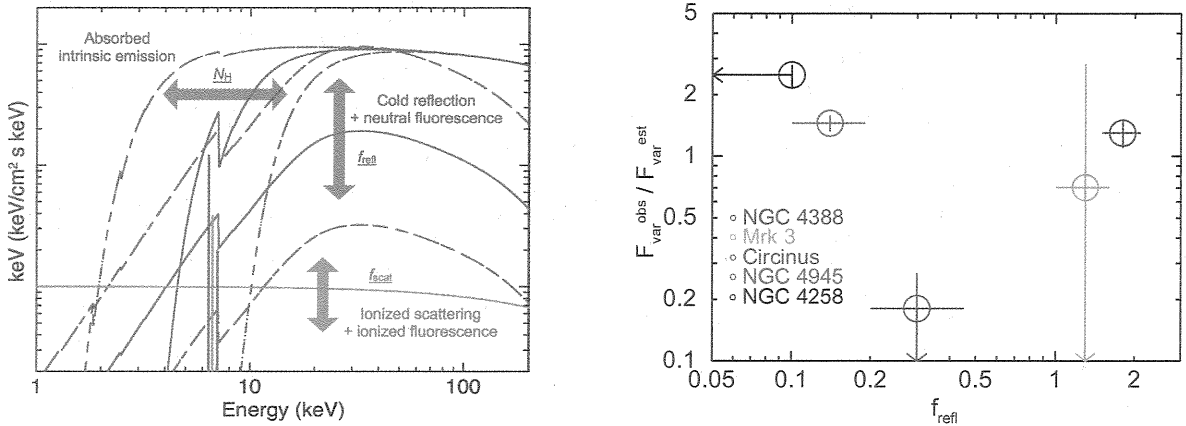


図 2: (左) 2 型 AGN からのエネルギースペクトルの模式図。赤、青、緑がそれぞれの放射成分に対応する。(右) 個々の天体について、ブラックホール質量から予想される値で規格化した時間変動の大きさを、反射成分の強さに対してプロットしたもの。

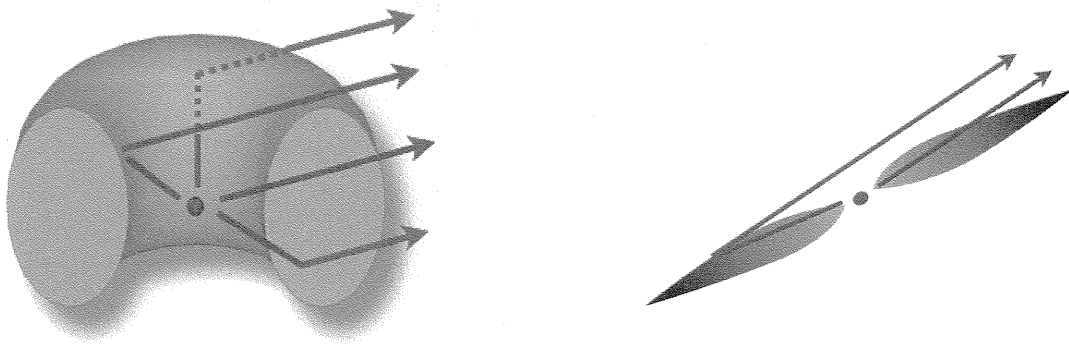


図 3: 得られた 2 種類の反射体の描像。赤、青、紫の矢印はそれぞれ観測される直接成分、反射成分および Scattered-in 成分を模式的に示す。従来の Unified Scheme では左側のような厚い反射・吸収体が想定され、NGC 4388、Mrk 3、および Circinus 銀河では実際にこのようになっていると考えられる。いっぽう右の反射・吸収体は幾何学的に薄く、NGC 4945 および NGC 4258 に当てはまると考えられる。