

論文の内容の要旨

論文題目

X-ray Studies of the Central Engine in Active Galactic Nuclei with *Suzaku*
(X線衛星「すざく」による活動銀河核セントラルエンジンの研究)

野田 博文

1. 研究の背景と目的

活動銀河核(AGN)からの一次 X 線放射は、超巨大ブラックホール(BH)の周囲に形成された降着円盤の黒体光子が、円盤の内縁部に生じた高温の電子雲において、逆コンプトン散乱されることにより生成されると考えられる。さらにこの一次放射が、降着円盤や周囲のガスにより光電吸収およびコンプトン散乱を受けることで、反射成分や鉄輝線などの二次的な X 線放射が生じる。AGN の X 線放射は大きく、これら一次成分と二次成分によって構成されると考えられている。さらに両者の中間に、一次放射の一部が吸収を受けた「部分吸収」成分も存在しうるが、ここではその吸収を受けた部分についても便宜的に、二次成分と呼んでおく。一般に、一次成分と二次成分を切り分けることは、容易ではない。

1995年に「あすか」により、I型セイファート銀河 MCG-6-30-15 の X 線スペクトル中に、相対論的効果により広げられた鉄輝線のような構造が発見された(Tanaka et al. 1995)。それ以来、AGN の X 線観測は一般相対論の検証の場として大きな注目を集め、特に二次成分に着目した数多くの研究がなされた。しかし、そのほとんどにおいて、一次放射のスペクトルは単一のべき関数型成分(PL; 図 1 緑)で近似され、それを差し引いて決めた二次放射(図 1 青)のスペクトル構造から、BH スピンや周辺のガスのジオメトリを決定するなど、過剰とも言える議論が進められてきた。それとは対照的に、一次放射のスペクトルそのものに対する研究はほとんど進展せず、AGN セントラルエンジンの描像は、単一 PL スペクトルを生じる、均一な電子温度と光学的厚みの単領域のコロナだという粗い仮定のまま、現在に至っている。この状況では、セントラルエンジンの正しい理解が得られないという、単一 PL から逸脱するスペクトル構造はすべて二次成分とみなすなど、二次成分の理解にも潜在的に大きな不定性をもたらす危険性があった。

そこで本論文では、「すざく」による、AGN の 0.5-50 keV という広帯域のデータを用い、異なるエネルギーバンド間の時間変動の相関を利用してモデルに依らずにスペクトルを成分に分解する新たな手法を開発した。それを用いて、一次 X 線放射を正しく決定し、それらのスペクトルと時間変動の情報から、AGN セントラルエンジンの描像に迫る。これが本論文の目的である。

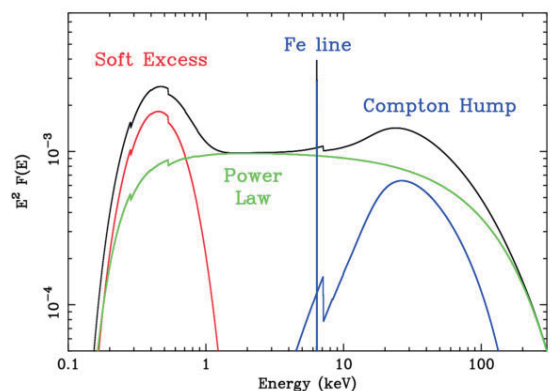


図 1:従来の I 型 AGN の X 線スペクトル描像(Fabian & Miniutti 2005)。緑、青、赤のスペクトル成分はそれぞれ、折れ曲がりを持つ単一 PL 型の一次成分、鉄の $K\alpha$ 輝線を伴った反射成分、起源の分かっていない軟 X 線超過成分。

2. 軟 X 線帯域の解析

我々はまず、軟 X 線帯域(0.5–3 keV)に着目した。この帯域には、未だに起源が分かっていない軟 X 線超過構造(図 1 赤)が存在するうえ、AGN の母銀河のプラズマによる X 線放射など、複数の成分が混在している。そこで AGN の放射だけに焦点を当てるため、母銀河からの放射(0.5–3 keV の X 線の光度 $L_X \lesssim 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$)が無視できる、 $L_X \gtrsim 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ の AGN で、かつ時間変動が激しいものに限定した。

「すざく」のアーカイブにおいてこれらを満たすのは、2013 年 3 月 20 日までに得られた I 型 AGN 126 観測中、13 観測(13 天体)あり、そのうち時間変動を用いたスペクトル成分の分解手法を適用できる天体は、Mrk 509、Fairall 9、MCG-2-58-22 (I 型セイファート銀河)、3C382 (広輝線電波銀河)、4C+74.26 (強電波クエーサー)および MR 2251-178 (弱電波クエーサー)の 7 天体であった。

個々の観測で、異なるエネルギー帯域の間での強度変動の相関を調べたところ、いずれの天体でもその 0.5–3 keV の放射は、基準にとった 3–10 keV のカウント数に直接に比例して強度変動するスペクトル(図 2 緑)と、3–10 keV の強度が変わっても、数日間にわたり強度が一定のままのスペクトル(図 2 赤)と、モデルに依存することく分解することに成功した。この時間変動を用いてスペクトルを成分に分解する手法をこれから Count-Count Correlation with Positive Offset (C3PO)法と呼ぶ。C3PO 法で得られた変動成分は光子指数 $\Gamma \sim 1.8$ の PL 型をしているため、従来の描像の通り、広帯域にわたって広がる変動の激しい一次コンプトン成分だと考えられる。一方、変動しないソフトな成分は、軟 X 線超過そのものと考えられ、本研究では世界で初めて、そのモデルに依らないスペクトル抽出に成功した。

Mrk 509 の異なる 5 つの観測で、軟 X 線帯域の比較を行ったところ、ソフトな成分(図 2 赤)は、 $\gtrsim 2$ 週間のタイムスケールでは強度や形を変えており、しかもその変動は、PL 成分(図 2 緑)とは独立であった。このことから、Mrk 509 の長期的に変動するソフトな成分は、母銀河放射の混入でもなければ、PL に付随する二次放射でもなく、速く変動する PL 成分とは異なる一次成分であることが分かった。したがって、軟 X 線超過放射は、実は一次放射の一部であることが判明した。これにより、長年の謎であった軟 X 線超過の起源が明らかになると同時に、AGN セントラルエンジンからの軟 X 線一次放射は単一 PL では近似できず、複数の一次成分で構成されていることが明らかになった。

7 つの AGN から導かれたソフト成分(図 2 赤など)を、統一的に記述できる物理的な放射モデルを検討したところ、電子温度が $\sim 0.5 \text{ keV}$ 、光学的厚みが 10–15 という、低温で濃いコロナからの逆コンプトン放射と考えるのが、最も自然であると分かった。このコロナは、速く変動する PL 型主成分(図 2 緑)を生み出すコロナとは、かなり物理状態が異なる。

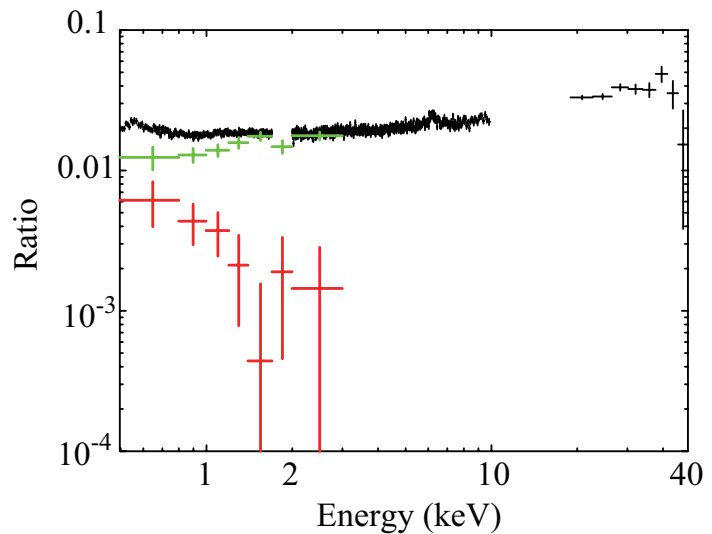


図 2: I 型セイファート銀河 Mrk 509 の時間平均スペクトル(黒)と、我々の手法によって得られた、観測の間に速く変動した成分(緑)と変動しなかった成分(赤)。全て vF_ν 表示。

7 天体であった。

3. 硬 X 線帯域の解析

次に我々は、一次成分と二次成分がより強く混じり合うと考えられる(図 1)、硬 X 線帯域(3–45 keV)に着目した。この帯域は、軟 X 線帯域と比べて統計が稼げないことから、我々の手法を適用するためには、軟 X 線帯域よりもさらに天体が X 線で明るく変動が激しいとともに、観測の露光時間が長いことが条件として求められる。「すざく」アーカイブの AGN データの中で、これらを満たすのは、NGC 3516、NGC 3227、MGC4051、MCG-6-30-15、Mrk 841、NGC 5548、IC4329A (全て I 型セイファート銀河)の 7 天体(31 観測)であった。軟 X 線帯域と同様に C3PO 法で、スペクトルを成分に分解したところ、観測期間中に短期変動する成分は、7 天体のいずれにおいても、弱い吸収を受けた光子指数 ~ 1.7 - 2.2 の単一 PL 型成分だった(図 3 緑)。

一方、変動しない成分には、AGN ごと、または同じ天体の中でも観測ごとに違いが見られた。図 3 に示す NGC 3516 の場合、観測の間に変動しなかった成分(赤)は、2009 年には、 ~ 6.4 keV と ~ 7 - 10 keV にそれぞれ顕著な鉄の $K\alpha$ 輝線と K 吸収端を持つ、硬いスペクトルを示した。これは図 1 青で示すように、BH 近傍からの一次放射が $\sim 2\pi$ の立体角を持つ遠方のガスで吸収と散乱を受けて生じる反射成分(図 3b 青)としてみごとに解釈できた。それとは対照的に、2005 年の変動しない成分は、反射成分(図 3a 青)のみでは説明できず、変動成分よりも強い吸収($N_H \sim 10^{23}$ cm $^{-2}$)を受けた光子指数 ~ 1.5 の新たな硬い連続成分(図 3a 紫)が重なっていることがわかった。この成分には鉄の吸収端が見られることがあるが、鉄の輝線は付随しない。図 3 の(a)と(b)において、緑の PL 成分の強度は同程度なのに対し、新たな硬 X 成分(図 3a 紫)は 2005 年から 2009 年にかけて大きく減少していることから、その強度は PL 成分(図 3 緑)とは独立にゆっくりと変動することも明らかとなった。

さらに我々は、NGC 3227 の 6 回の観測データを C3PO 法で解析したところ、明るい時は図 3(a)と良く似た結果となったが、暗くなると、短期変動する PL 成分(図 3a では緑に対応)が消え、スペクトル全体が図 3(a)の赤い成分とほぼ同じ顔つきになることが発見された。その時間帯のデータを用いてスペクトル解析を行ったところ、やはり反射成分(図 3 青に対応)だけでは説明できず、光子指数 ~ 1.5 で強い吸収($N_H \sim 10^{23}$ cm $^{-2}$)を受けた硬い成分が必要となることが分かった。スペクトルの特徴が類似していることから、これは 2005 年の NGC 3516 の変動しない成分に含まれる、新しいハード成分(図 3a 紫)と同一

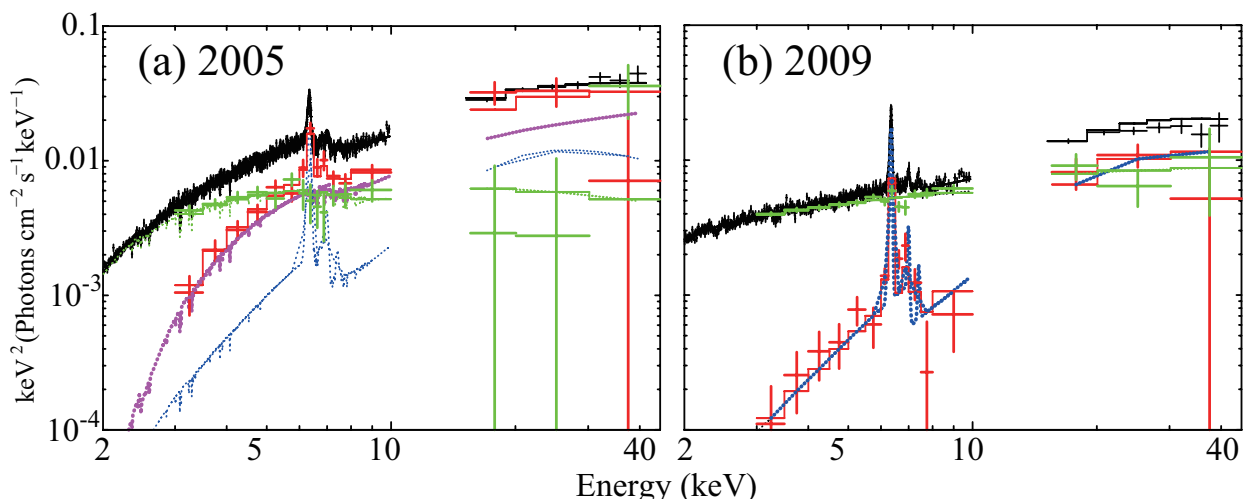


図 3:(a)2005 年と(b)2009 年に観測された、I 型セイファート銀河 NGC 3516 の時間平均スペクトル(黒)。C3PO 法で得られた変動する成分を緑で、また変動しない成分を赤で示す。それらのフィットに用いられたモデルは、ややソフトな PL 成分(緑線)、鉄輝線を伴う反射モデル(青線)、および吸収を受けたハードな PL(紫線)である。全て vF_ν 表示。

の成分であると解釈できる。NGC 3227 の解析から、この硬い成分は、数週間程度のタイムスケールで変動しており、なおかつ短期変動する PL 成分が消えても存在していることから、PL 成分とは別の、独立して変動する一次成分であることが明らかになった。この成分はこれまでのスペクトル描像(図 1)では、認識さえされていなかった成分であり、本論文にて世界で初めてその存在を認識するとともに、そのスペクトル形および時間変動の特徴を知ることになった。

他の 5 天体にも同様の手法を適用したところ、NGC 4051、MCG-6-30-15、Mrk 841 および IC4329A は、NGC 3516 の 2005 年のように、速く変動する PL 成分(図 3 緑)と新たな硬い成分(図 3a 紫)の双方を持っていた。したがって、新しく見つかった硬い成分は、NGC 3516 や NGC 3227 などの特定の I 型セファート銀河に限らず、一般に存在している成分であるという示唆を得た。また NGC 5548 では、NGC 3516 の 2009 年のように、新たなハード成分は認められなかったため、全ての AGN に常に見られる成分ではないことも確かめられた。

4. AGN セントラルエンジンの X 線スペクトルの新たな描像

以上の研究の結果、AGN セントラルエンジンからの X 線放射には、

1. 広帯域で速く変動する光子指数 $\sim 1.7-2.2$ の PL 型のコンプトン成分(緑)
2. 軟 X 線帯域に存在する、電子温度が低く光学的に厚いコロナで生じるコンプトンでよく再現でき、緩やかな時間変動を持つソフトな一次成分(赤)
3. 硬 X 線帯域に存在する、光子指数 ~ 1.5 で、1.よりも強い吸収を受けた、時間変動が緩やかな一次成分(紫)
4. BH から遠方で生じる、鉄輝線を伴った反射成分(青)

という、独立な時間変動を持つ、4 つの X 線成分が存在していることを突きとめた。この新しい描像を、図 1 と対比させ、図 4 に示す。この 4 成分のうち、4.のみが二次成分であり、1-3 はすべて一次成分と考えられる。すなわち、AGN からの一次放射は図 1(緑)のような単一 PL ではなく、少なくとも三つの傾きの異なる成分を含み、それらを足し合わせると下に凸な形を持っているという新たな描像が明らかになった。これは、AGN セントラルエンジンは、これまで考えられてきた、単一の電子温度と光学的厚みを持った、単領域のコロナではなく、複数の異なる物理パラメータを持った複数の X 線放射領域で構成されていることを示す。さらに図 1 と図 4 の比較でわかるように、従来は 15-45 keV に見られる盛り上がりすべて、4.の二次成分と解釈していたのに対し、実はその一部は、3.の一次放射であることも明らかになった。今後は、これら複数の一次放射領域が、BH の周辺で具体的にどのように配置しているかを明らかにすることが課題である。

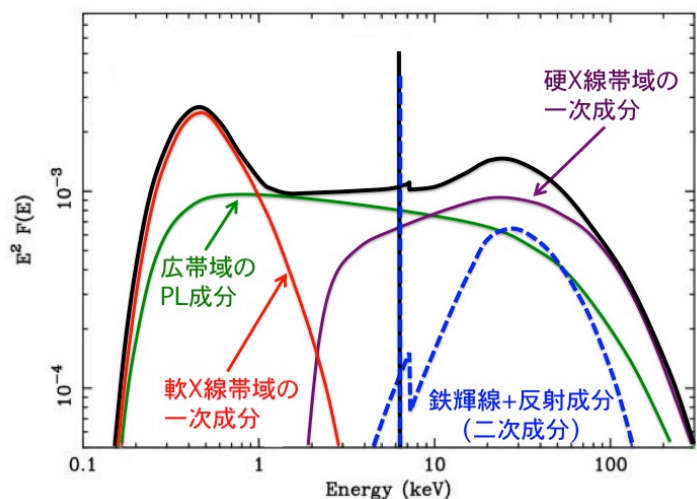


図 4: 本研究により到達した、AGN の X 線スペクトルの新たな描像。PL 成分(緑)だけではなく、ソフト成分(赤)と新たなハード成分(紫)も、一次 X 線成分である。