

# NuSTAR 衛星による活動銀河核の硬 X 線放射機構の研究

Hard X-ray study of active galactic nuclei with nustar satellite

X 線天文学研究室 BP16084 松岡 知樹

指導教員：久保田 あや 准教授

## 1 背景と目的

ブラックホールとは、強い重力により光さえも抜け出せない宇宙空間に存在する天体である。30 $M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  は太陽質量) 以上の恒星が進化の最終段階で重力崩壊を起こして生まれるものが恒星質量ブラックホール、ほぼ全ての銀河の中心に存在する  $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$  の質量をもつものが巨大質量ブラックホールである [1]。活動銀河中心核 (AGN) は、中心の巨大質量ブラックホールが大量のガスを吸い込み明るく輝いている天体である。本研究では、X 線天文衛星 NuSTAR の観測によって得られた AGN から放出される硬 X 線を解析し、硬 X 線のスペクトルが、光度やブラックホール質量に対して、どのように変化するか探り、硬 X 線放射のメカニズムに迫ることを目指す。

## 2 NuSTAR 衛星による AGN の観測とデータリダクション

NuSTAR 衛星は、高エネルギー X 線を観測するための X 線宇宙望遠鏡である。ヴォルター式望遠鏡の機構を採用しており、反射面に対する角度定義した時の入射角が微小な角度の反射を用いる。観測エネルギー帯域は 3.0-78.0 keV で、空間分解能は 1 分角、エネルギー分解能は 10keV で 400eV, 60keV で 900eV である [2]。本研究では、AGN データベースによってブラックホール質量が正確に推定されている 18 個の AGN のうち、NuSTAR による 43 回の観測データの解析を行なった [3]。

ここでは Mrk335 を例にデータリダクションの手順を示す。Mrk335 (マルカリアン 335) はペガサス座の方向に位置する巨大質量ブラックホールで、質量は  $1.7 \times 10^7 M_{\odot}$  の AGN である [3]。今回のデータは、NuSTAR による Mrk335 の観測で、2014 年 9 月 20 日に約 19 時間かけて行われた。図 1 に、FPMA で得られた Mrk335 の X 線画像を示す。小さい丸をソース領域としてデータを抽出した。大きい丸がバックグラウンド領域である。この領域に基づいて NuSTAR チームにより提供された NuSTAR データ解析ソフトを用いてソース及びバックグラウンド領域のスペクトルを抽出し、応答関数を作成した [4][5]。図 2 は、ソースからバックグラウンド (背景放射及び検出器の雑音) を引いた天体のみのスペクトルである。

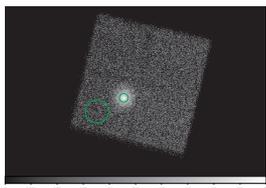


図 1: FPMA による Mrk335 の硬 X 線画像

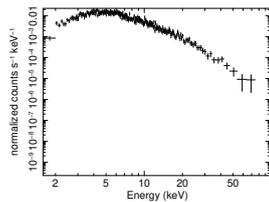


図 2: ソースからバックグラウンドを引いたスペクトル

## 3 スペクトル解析

天体からバックグラウンドのスペクトルを差し引いたものに基づき、スペクトル解析を行う。スペクトル解析をすることによって、どのような放射を行なっているのかを知ることができる。

### 3.1 power-law によるスペクトル解析

まず、X 線強度  $F(E)$  が X 線光子のエネルギー  $E$  に対して  $F(E) = C \cdot E^{-\Gamma}$  で記述される power-law モデルで再現した [6]。C を normalization、 $\Gamma$  を光子指数と呼ぶ。例に出した Mrk335 の解析結果を図 3 に載せる。データは  $\Gamma = 1.84^{+0.028}_{-0.027}$  の power-law でよく再現できた。また、3-79keV の X 線光度  $L_X$  は  $L_X = 2.57 \times 10^{36}$  W と求まった。モデルの妥当性を検証する為にカイ二乗を行なった結果、自由度 615.52 に対し、 $\chi^2_{\nu} = 1.33$  となった。この値が 1 に近いほどモデルがデータをよく再現できているという事となる。1 より大きいとそのモデルがデータを再現できていないことを意味し、1 より小さい場合は誤差が大きいことを意味する。

同様の作業を全ての AGN でも行なった。7keV 付近に構造があり、これは鉄元素由来と考えられる。

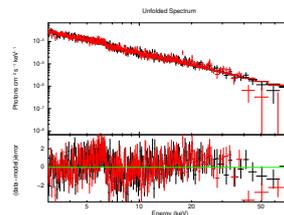


図 3: power-law で再現した光子数スペクトル & データとモデルの誤差

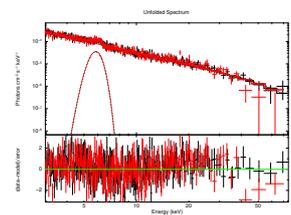


図 4: nthcomp+zgauss で再現した光子数スペクトル & データとモデルの誤差

### 3.2 nthcomp+zgauss によるスペクトル解析

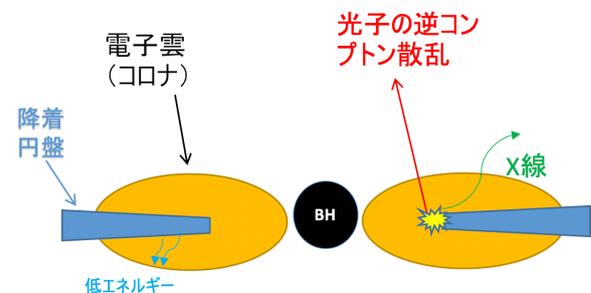


図 5: 逆コンプトン散乱の模式図

全ての観測データを power-law で再現し、 $\chi^2$  検定を行なった結果、1 に近いデータが少ない為棄却された。そこで、熱的な逆コンプトン散乱を表した nthcomp モデルと鉄輝線を考慮する為の zgauss モデルを組み合わせたモデルで再現を行なった [6][7]。nthcomp モデ

ルは、熱的逆コンプトン散乱を power-law と高エネルギー側の熱的カットオフで再現したモデルである。高エネルギーのカットオフは電子温度、低エネルギーのカットオフは降着円盤の温度によって決まる。スペクトルは逆コンプトン散乱の光学的厚み $\tau$ と電子温度の組み合わせによって決まる。zgauss モデルは、輝線スペクトルを再現するための gaussian 分布に赤方偏移を考慮したモデルである。解析結果を図 4 に載せる。データは  $\Gamma = 1.79^{+0.027}_{-0.026}$ 、電子温度  $kTe = 18.1^{+13.2}_{-4.2}$  でよく再現できた。また、3-79keV の X 線光度  $L_X$  は  $L_X = 2.56 \times 10^{36}$  W と求まり、自由度 510.01 に対し、 $\chi^2_{\nu} = 1.11$  となった。同様の作業を全ての AGN でも行なった。

## 4 結果と考察

power-law モデルと nthcomp+zgauss モデルで再現して得られたパラメータ間の相関を調べた。

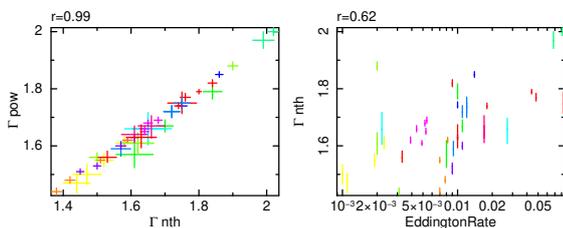


図 6: power-law フィットで得られた  $\Gamma$  と nthcomp+zgauss フィットで得られた  $\Gamma$

図 7: nthcomp+zgauss フィットで得られたエディントン比と  $\Gamma$

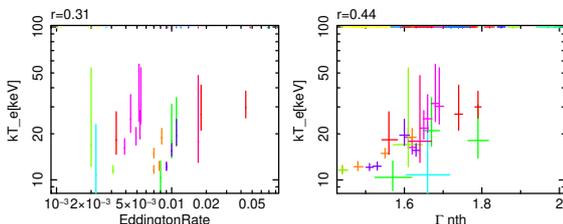


図 8: nthcomp+zgauss フィットで得られたエディントン比と電子温度

図 9: nthcomp+zgauss フィットで得られた  $\Gamma$  と電子温度

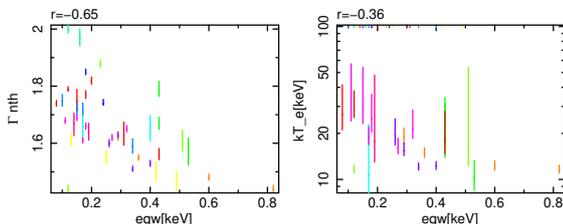


図 10: eqw と nthcomp+zgauss フィットで得られた  $\Gamma$

図 11: eqw と nthcomp+zgauss フィットで得られた電子温度

図 6 からモデルを変えてもほぼ  $\Gamma$  の値に変化がないことが分かる。以後は nthcomp+zgauss モデルに絞って相関を見ていく。

図 7 はエディントン比と  $\Gamma$  の相関図である。エディ

ントン比は限界光度からどれほどの割合で天体が輝いているかを示したもので、 $\Gamma$  は逆コンプトン散乱による X 線放射の様子を表す。 $\Gamma$  の値が大きいと低エネルギー側に光子が多くあるということ。エディントン比が大きいと  $\Gamma$  も大きいことがグラフから読み取れるので、降着円盤からの逆コンプトン散乱が少なく光子が低い領域にとどまっているほど天体の限界光度に対する割合が高いことが分かる。

図 8 はエディントン比と電子温度の相関図である。相関係数は 0.31 なので弱い相関はあると判断できるが今回は電子温度の誤差を考慮せずに相関係数を出したので本当に相関があるかは分からなかった。

図 9 は  $\Gamma$  と電子温度の相関図である。逆コンプトン散乱は電子が光子にエネルギーを与える現象なので  $\Gamma$  の値が大きいと逆コンプトン散乱があまり起きていないので電子温度は高い。その為、相関があると考えられる。

図 10 は鉄輝線の等価幅 (eqw) と  $\Gamma$  の相関図である。eqw とはスペクトル線の強度を連続光強度との比較で表す観測量である。今回は zgauss モデルの強度を調べる為に使用した。比較には天体のスペクトルのエネルギー流束量である flux を用いる。この eqw の値が大きいと鉄輝線を表す強度が強いということなので降着円盤からの X 線放射の解析に役立つ。図から負の相関があることが分かる。つまり逆コンプトン散乱で光子が高い領域まで叩き上げられている程、鉄輝線の強度も強くなっている。鉄輝線の強度が強いということは、降着円盤から反射する鉄輝線が大きいことを示す。以上のことから降着円盤から反射する鉄輝線が大きい AGN 程幾何学的に厚い高温コロナがあることが考えられる。

図 11 は eqw と電子温度の相関図である。こちらも負の相関がある。eqw が高い程電子温度が低いことから降着円盤から反射する鉄輝線が大きい AGN 程幾何学的に厚い高温コロナがあることが考えられる。

## 5 まとめ

スペクトル解析の結果から、power-law モデルは棄却されて、nthcomp+zgauss でよく再現できたとと言える。このことから硬 X 線放射は降着円盤を覆う電子雲からの高温コロナと降着円盤からの低エネルギー光子が衝突して光子が電子からエネルギーをもらう逆コンプトン散乱が原因と分かる。また AGN の特徴として、逆コンプトン散乱によって光子が高いエネルギーまで叩き上げられていると、光度と電子温度は低く、eqw が高いことから高温コロナは幾何学的に厚い可能性が示唆される。逆に光子が低いエネルギー帯で留まっていると光度と電子温度は高く、eqw が低いことから高温コロナは幾何学的に薄い可能性が示唆される。

## References

- [1] Antonucci, Robert. 1993 Unified Models for Active Galactic Nuclei and Quasars
- [2] Stephen et al. 2007 ApJ 38, 76
- [3] The AGN Black Hole Mass Database (<http://www.astro.gsu.edu/AGNmass/>)
- [4] Karl Forster, Brian Grefenstette · Kristin Madsen. 2014 NuSTAR DATA ANALYSIS Quickstart Guide
- [5] 「すぎく」ファーストステップガイド
- [6] Keith Arnaud, Craig Gordon & Ben Dorman An X-Ray Spectral Fitting Package Users Guide for version 12.10.1
- [7] Zdziarski, Johnson et al. 1996, MNARS, 283, 193