

# 1 型活動銀河核からの中性鉄 $K\alpha$ 輝線放射スペクトル解析および ASTRO-H 衛星による観測シミュレーション

伊藤 由裕 (東京理科大学大学院 理学研究科)

## Abstract

1 型活動銀河核からの X 線放射スペクトルにみられる中性鉄 (Fe) $K\alpha$  輝線幅の高精度な決定および放射領域の推定を目指し、現在稼働中の X 線天文衛星の中で 6.4 keV 付近のエネルギー分解能に優れる Chandra 衛星の高エネルギー透過型回折格子 (High Energy Transmission Grating; HETG) による観測データを解析した。複数の HETG 観測データを足しあわせることで統計の良いスペクトルを作成し、1 型活動銀河核計 10 天体について X 線光度 (2-10 keV) と半値全幅 (Full Width at Half Maximum; FWHM) を得た。広輝線領域由来と考えられる  $H\beta$  輝線の FWHM と比較したところ、少なくとも 5 天体では Fe  $K\alpha$  輝線の FWHM が  $H\beta$  輝線の FWHM を下回っていた。これは Fe  $K\alpha$  輝線の放射領域の運動速度が広輝線領域の運動速度に比べて低速であることを示しており、Fe  $K\alpha$  輝線の放射領域が広輝線領域よりも中心ブラックホールから遠方に存在することを示唆している。また、天体によっては X 線光度の時間変動によって Fe  $K\alpha$  輝線が影響を受けることがわかり、10 天体中 4 天体では FWHM が大きく変化することが判明した。これは放射領域の場所が観測時期によって変動する可能性を示唆しているが、HETG のエネルギー分解能では Fe  $K\alpha$  輝線の速度幅が異なる成分を区別することは困難である。

2015 年度に打ち上げが予定されている次世代 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載予定の SXS 検出器は HETG に比べて有効面積・エネルギー分解能ともに一桁近い向上が見込まれており、Fe  $K\alpha$  輝線の速度幅が異なる成分を区別できると予想されている。NGC5548 の観測シミュレーションの結果から、HETG では区別できなかった速度幅の異なる成分を明らかに区別することができた。

## 1 活動銀河核と中性鉄 $K\alpha$ 輝線

宇宙に存在する銀河の中心部には活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) とよばれる太陽質量の 100 万倍以上にも匹敵する超巨大ブラックホールが存在し、電波からガンマ線に至る広範囲な波長の電磁波を放射している。多波長による観測から活動銀河核はトーラスモデルとよばれる統一モデルが提唱されており、中心部の超巨大ブラックホールと降着円盤を取り囲むようにダストトーラスとよばれる吸収体が存在し、トーラス開口部付近には広輝線領域や狭輝線領域が広がっている。トーラス開口部方向から降着円盤や広輝線領域からの放射が直接みえる場合を 1 型、トーラス越しに放射をみている場合を 2 型に分類する。活動銀河核と銀河の成長には相関関係があることが近年明らかになっており、このような「共進化」現象の更なる解明のためにも、活動銀河核の研

究はますます重要になっている (e.g. Yaqoob & Padmanabhan 2004)。

活動銀河核からの X 線放射スペクトルにみられる Fe  $K\alpha$  輝線 (6.4 keV) は強度が高く、可視光に比べてダストによる吸収の影響を受けにくいいため、活動銀河核を研究するうえで非常に重要なツールである。しかしながら、Fe  $K\alpha$  輝線の放射領域の場所は未だに不確かであり、その放射メカニズムも不明瞭な点が多い。超巨大ブラックホール周辺の降着円盤外縁部付近やダストトーラス内壁付近などが放射領域の候補として挙げられているが、現状では正確な特定には至っていない。

Fe  $K\alpha$  輝線の速度幅を調べることで、放射領域の運動速度を決定することが可能である。超巨大ブラックホールの質量を  $M_{\text{BH}}$  としてケプラー運動を考えると、放射領域の運動速度  $v$  と超巨大ブラックホー

ルからの距離  $R$  には

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\text{BH}}}{R}} \quad (1)$$

という関係が成り立つ。放射領域の速度を広輝線領域由来と考えられる  $H\beta$  輝線幅から求めた速度と比較することで、広輝線領域に対する放射領域から超巨大ブラックホールまでの距離を推定することが可能である。

本研究においてハッブル定数は  $H_0=70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 、密度パラメータは  $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_M = 0.73$  を用いている。また、特に断わりのない限り誤差はすべて 68%統計誤差を用いた。

## 2 観測衛星と解析方法

### 2.1 Chandra 衛星 HETG 観測

Fe  $K\alpha$  輝線の速度幅から放射領域の正確な速度を得るためには、Fe  $K\alpha$  輝線の高精度な観測が必要である。Chandra 衛星に搭載されている HETG は現在稼働中の X 線天文衛星の中で最もエネルギー分解能にすぐれ、Fe  $K\alpha$  輝線が存在する 6.4 keV 付近のエネルギー分解能は 35 eV にも達するため、本研究に最も適している。表 1 に今回解析した 1 型活動銀河核計 10 天体の名称と解析に用いた HETG 観測データ数、および合計の観測時間を掲載した。

表 1: 解析した 1 型活動銀河核

名称	HETG 観測数	観測時間 (合計) (ksec)
3C120	1	58.16
Mkn509	3	326.93
NGC3516	8	386.18
NGC3783	8	1049.35
NGC4051	13	388.17
NGC4593	1	79.90
NGC5548	2	233.46
NGC7314	2	95.67
MCG-6-30-15	5	653.18
Mrk279	1	116.06

### 2.2 解析方法

複数の HETG 観測データが存在する場合はデータを足しあわせることで統計の良いスペクトルを作成した。ただし、X 線光度の時間変動による Fe  $K\alpha$  輝線幅の変化が大きい天体については、全データを全て足し合わせるのではなく、X 線光度によってデータを 2-3 グループに分けて足し合わせた。スペクトルフィットでは 2-7 keV の範囲を使用し、X 線連続成分をあらわすべき関数モデルと Fe  $K\alpha$  輝線をあらわすガウス関数モデルを用いてフィッティングをおこなった。

## 3 解析結果

### 3.1 スペクトル

解析結果の一例として NGC3783 のスペクトルを示す (図 1)。NGC3783 の HETG 観測は計 8 観測存在し、各観測データの X 線光度は最大で 2 倍程度の変動がみられた。しかしながら、Fe  $K\alpha$  輝線幅にはほとんど変動がみられなかったため、全データを全て足し合わせてスペクトルを作成した。解析により Fe  $K\alpha$  輝線の FWHM と X 線光度 (2-10 keV) を求めた。

### 3.2 X 線光度の時間変動による Fe $K\alpha$ 輝線への影響

NGC4051 や NGC5548 など一部の天体では、X 線光度の時間変動によって Fe  $K\alpha$  輝線幅が大きく変化することがわかった。図 2 は NGC4051 の 13 観測を (赤)  $2.0 \times 10^{41} \text{ ergs s}^{-1}$ 、(緑)  $3.0 \times 10^{41} \text{ ergs s}^{-1}$ 、(青)  $4.0 \times 10^{41} \text{ ergs s}^{-1}$  の 3 グループに分けて解析し、X 線光度 (2-10 keV) と Fe  $K\alpha$  輝線の FWHM の相関を調べた結果である。図 2 のとおり、NGC4051 は X 線光度によって Fe  $K\alpha$  輝線の FWHM が最大で 8 倍以上にも変化していることがわかる。このため、以下の議論において NGC4051 のように X 線光度の時間変動によって Fe  $K\alpha$  輝線幅が大きく変化する天体については、X 線光度ごとにデータをグループ分けして解析した結果を用いている。

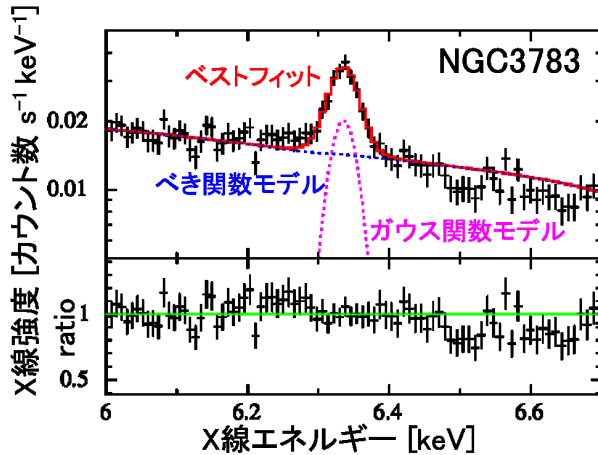


図 1: NGC3783 のスペクトル。下段はベストフィットに対するデータのズレをあらわす。黒: データ、赤: ベストフィット、青: 連続成分をあらわすべき関数モデル、マゼンタ: Fe K $\alpha$  輝線をあらわすガウス関数モデル。

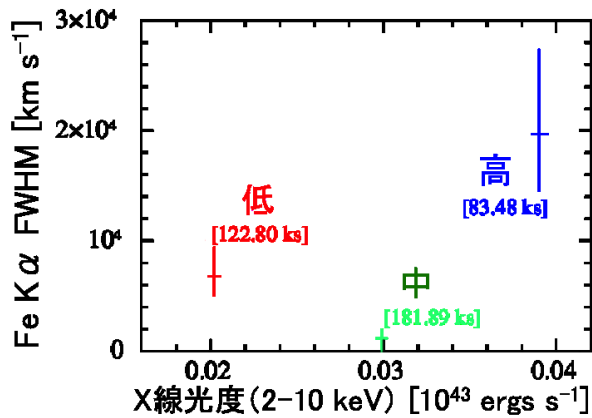


図 2: NGC4051(計 13 観測) を X 線光度によって 3 グループに分けた時の X 線光度 (2-10 keV) と Fe K $\alpha$  輝線の FWHM の相関。赤:  $2.0 \times 10^{41}$  ergs s $^{-1}$  程度 (3 観測)、緑:  $3.0 \times 10^{41}$  ergs s $^{-1}$  程度 (7 観測)、青:  $4.0 \times 10^{41}$  ergs s $^{-1}$  程度 (3 観測)。

## 4 議論

### 4.1 X 線光度 (2-10 keV) と Fe K $\alpha$ 輝線の FWHM の相関

今回解析した 1 型活動銀河核全 10 天体の X 線光度 (2-10 keV) と Fe K $\alpha$  輝線の FWHM の相関を調べた

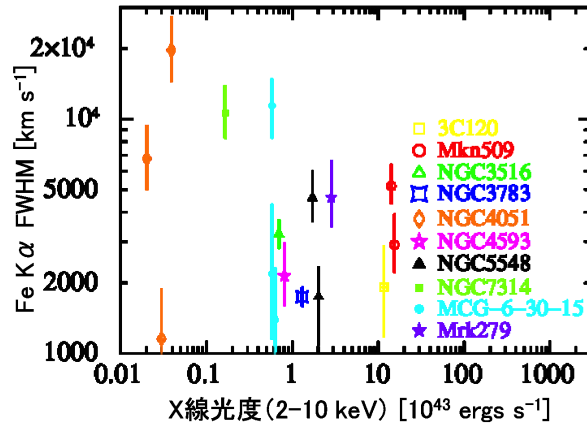


図 3: 解析した 1 型活動銀河核計 10 天体の X 線光度 (2-10 keV) と Fe K $\alpha$  輝線の FWHM の相関。

結果を図 3 に示す。全 10 天体の X 線光度は  $0.01-10 \times 10^{43}$  ergs s $^{-1}$ 、Fe K $\alpha$  輝線の FWHM は  $1000-20000$  km s $^{-1}$  と非常に広範囲に分布しているが、X 線光度と FWHM に有意な相関はみられなかった。

### 4.2 H $\beta$ 輝線の FWHM と Fe K $\alpha$ 輝線の FWHM の相関

図 4 は解析した 1 型活動銀河核計 9 天体について、H $\beta$  輝線の FWHM (Shu, Yaqoob, & Wang 2010) と Fe K $\alpha$  輝線の FWHM を比較した結果である。図 4 の破線は Fe K $\alpha$  輝線の FWHM と H $\beta$  輝線の FWHM が等しいラインを示している。NGC3783 や NGC4593 では破線より下方に位置していることから、Fe K $\alpha$  輝線の放射領域の運動速度が H $\beta$  輝線を放射する広輝線領域の速度に比べて低速であると考えられる。この結果は NGC3783 や NGC4593 では広輝線領域に比べて Fe K $\alpha$  輝線の放射領域が超巨大ブラックホールから遠方に位置していることを示唆している。また、NGC4051 のような X 線光度の時間変動によって Fe K $\alpha$  輝線幅が大きく変動する天体では Fe K $\alpha$  輝線の FWHM が大きく変動していることから、観測時期によって Fe K $\alpha$  輝線の放射領域が変動する可能性を示唆している。しかしながら、HETG のエネルギー分解能では Fe K $\alpha$  輝線の速度幅が異なる成分を区別することは困難である。

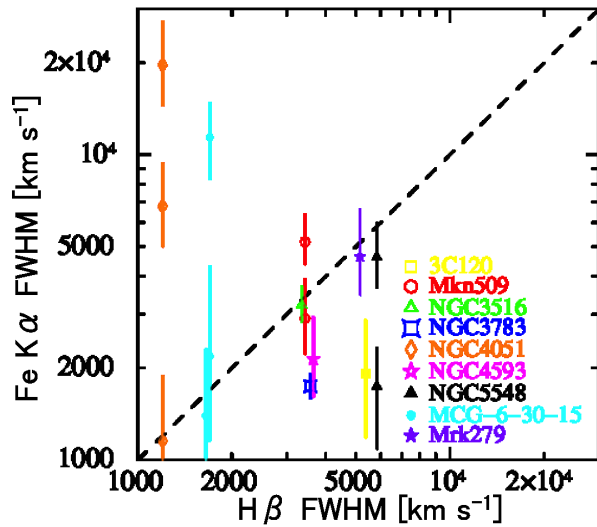


図 4: 解析した 1 型活動銀河核計 9 天体の Fe K $\alpha$  輝線の FWHM と H $\beta$  輝線の FWHM を比較した結果。NGC7314 は H $\beta$  輝線の FWHM が得られず掲載していない。両輝線の FWHM が等しいラインを破線で示した。

## 5 ASTRO-H 衛星による観測シミュレーション

2015 年度に打ち上げ予定の X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される軟 X 線分光検出器 SXS(Mitsuda et al. 2010) は HETG に比べて有効面積・エネルギー分解能が一桁程度向上することが見込まれており、HETG では区別できなかった Fe K $\alpha$  輝線の速度幅が異なる成分を明確に区別できる。NGC5548 について Fe K $\alpha$  輝線の FWHM が 2000 km s $^{-1}$  の成分と 10000 km s $^{-1}$  の成分を仮定し、SXS のエネルギー分解能を 5 eV、観測時間を 100 ksec に設定シミュレーションをおこなった。作成したスペクトルを 2 本のガウス関数モデルでフィットした結果を図 5 に示す。図 5 のとおり、SXS ならば Fe K $\alpha$  輝線の速度幅が異なる成分を明確に区別できることがわかった。

## 6 結論

1 型活動銀河核計 10 天体について H $\beta$  輝線の FWHM と Fe K $\alpha$  輝線の FWHM を比較した結果、

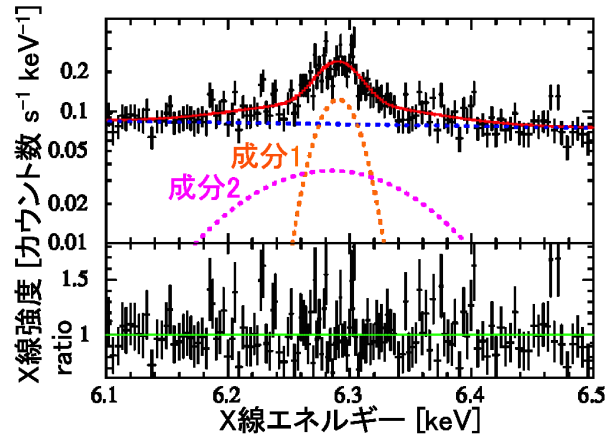


図 5: SXS による NGC5548 の観測シミュレーション結果。成分 1(橙)は FWHM が 2000 km s $^{-1}$  のラインを示し、成分 2(マゼンタ)は FWHM が 10000 km s $^{-1}$  のラインを示す。

少なくとも 5 天体では Fe K $\alpha$  輝線の放射領域が広輝線領域よりも外側に存在し、Fe K $\alpha$  輝線の放射領域が観測時期によって変動する可能性があることが分かった。ASTRO-H 衛星による NGC5548 の観測シミュレーションでは Fe K $\alpha$  輝線の速度幅が異なる成分を明確に区別できたことから、ASTRO-H 衛星打ち上げ後は放射領域の更なる特定が期待される。

## Reference

- Yaqoob, T., & Padmanabhan, U. 2004, ApJ, 604, 63  
 Shu, X. W., Yaqoob, T., & Wang, J. X. 2010, ApJS, 187, 581  
 Mitsuda, K., Kelley, R. L., Boyce, K. R., et al. 2010, SPIE, 7732,