

# 「ひとみ」衛星によるNGC 1275の観測： X線マイクロカロリメータを用いた 初の活動銀河核Fe-K $\alpha$ 輝線の精密分光



野田博文

〈大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉  
e-mail: noda@ess.sci.osaka-u.ac.jp

活動銀河核が一般に放射する中性Fe-K $\alpha$ 輝線の放射源は未だに論争が絶えない。本研究では、世界で初めて「ひとみ」のX線マイクロカロリメータを用いて、活動銀河核NGC 1275からのFe-K $\alpha$ 輝線を精密分光することに成功した。その結果、速度幅は500–1600 km s<sup>-1</sup>と広輝線より有意に細く、等価幅も~20 eVと小さいことが分かった。さらに、これらとChandraやXMM-Newtonのアーカイブデータ解析の結果を組み合わせたところ、NGC 1275では、Fe-K $\alpha$ 輝線の放射源がダストトーラスか核周分子円盤であることが判明し、ダストトーラスの形が通常とは異なり、平べったい形状を持つ可能性が見えてきた。「ひとみ」の後継機であるXRISM衛星で活動銀河核からのFe-K $\alpha$ 輝線を系統的に観測することで活動銀河核の構造の理解を大きく深められると期待される。

## 1. 活動銀河核Fe-K $\alpha$ 輝線の起源の謎

活動銀河核 (AGN) からのX線スペクトル中で6.4 keVに普遍的に現れる、相対論的效果を受けていない細い中性Fe-K $\alpha$ 輝線は、巨大ブラックホール (BH) 周辺の高温電子雲で生じたX線が、周囲の冷たい物質で光電吸収を受けることで生じる。しかし、その主な放射領域は未だはっきりしておらず、BHから近い順に降着円盤、広輝線領域 (BLR)、ダストトーラス、核周分子円盤 (CND) およびAGNの外に存在する分子雲など、どの領域が最も寄与しているか長年論争が続いてきた。

AGNのFe-K $\alpha$ 輝線の起源を探る有力な手がかりはその速度幅である。降着円盤やBLRで生じる場合には広輝線程度かそれよりも広い~2000 km s<sup>-1</sup>以上の速度幅を持つ一方、トーラスより外側で生じる場合には数百 km s<sup>-1</sup>以下の速度幅が期待される。しかし、よく用いられるX線

CCDのエネルギー分解能では~10,000 km s<sup>-1</sup>の速度幅しか区別できない上、既存の装置で最も分光性能が高いX線回折格子でも、明るい数天体に限り~1000 km s<sup>-1</sup>の速度幅しか区別できなかった。そこで、6 keVで~5 eVというエネルギー分解能を実現し、暗いAGNでもFe-K $\alpha$ 輝線の速度幅を~100 km s<sup>-1</sup>まで見分けられるX線マイクロカロリメータによる観測が長年待ち望まれていた。

## 2. 「ひとみ」によるNGC 1275の結果

### 2.1 SXSによるAGN Fe-K $\alpha$ 輝線の初検出

2016年に打ち上げられた日本の6番目のX線天文衛星「ひとみ」は、ペルセウス座銀河団を、中心のAGN (電波銀河) であるNGC 1275を含めて、約230,000秒間観測した。図1が、「ひとみ」X線マイクロカロリメータ (SXS) による6.4 keV周辺の精密分光スペクトルをFe-K $\alpha_1$ , K $\alpha_2$ 輝線に対応する2つのガウシアンでフィットした結果で

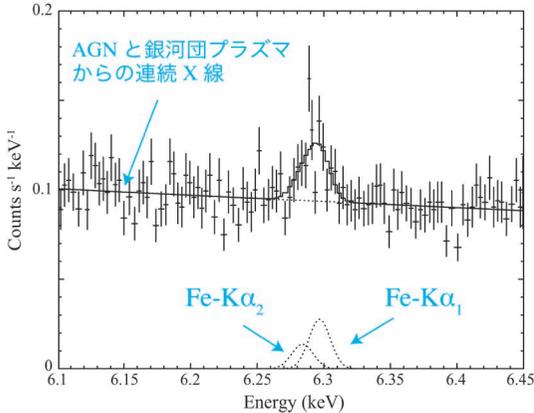


図1 「ひとみ」SXSで得られたNGC 1275からのFe-K $\alpha$ 輝線の周辺帯域の精密分光結果。2つのカウンタはFe-K $\alpha_1$ , K $\alpha_2$ 輝線に相当する。

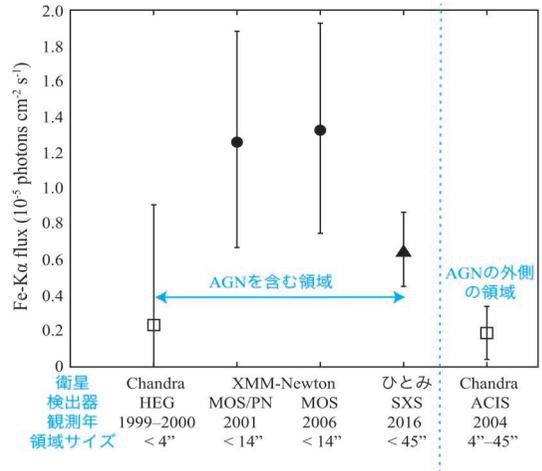


図2 「ひとみ」, Chandra, XMM-Newtonで得られたNGC1275のFe-K $\alpha$ 強度の比較。

ある<sup>1)</sup>。AGNの連続X線に対する等価幅が $\sim 20$  eVと微弱であったが、高い分光性能のおかげで5.4 $\sigma$ の有意度で検出することに成功した。そして、その速度幅に90%エラーの範囲で500-1600 km s<sup>-1</sup>と、これまでで最も強い制限を与えることができた。これは、広輝線の速度幅<sup>2)</sup>  $\sim 2750$  km s<sup>-1</sup>より有意に狭いため、降着円盤やBLRがFe-K $\alpha$ 輝線の主な放射源である説は棄却された。

次に「ひとみ」軟X線望遠鏡のPSF<sup>3)</sup> (HPD $\sim 1.2'$ )を考慮しFe-K $\alpha$ 放射源の空間的な広がりを調べたところ、45" ( $\sim 14$  kpc) 未満の領域から生じていることが分かった。加えて、Chandraで1999, 2000, 2004年に合計10回以上、XMM-Newtonで2001, 2006年に合計2回高い空間分解能で観測されたアーカイブデータも系統的に解析した。図2の通り、AGNを含む領域のFe-K $\alpha$ 強度は16年間に有意な変化は無く、狭い速度幅と無矛盾であった。また、Chandraデータを用いてAGNの外側の4-45" ( $\sim 1.4-14$  kpc)の円環領域から放射されるFe-K $\alpha$ 強度を調べたところ、「ひとみ」で得られた強度より有意に小さく、AGNの外の領域が放射源である説も棄却できた。これらにより、NGC 1275のFe-K $\alpha$ 輝線の放射源はダストトーラスかCNDであることが判明した。

## 2.2 SXSによるNGC 1275連続X線の観測

NGC 1275のFe-K $\alpha$ 輝線の等価幅は $\sim 20$  eVと、一般的なAGNの典型値 $\sim 150$  eV<sup>4)</sup>より $\sim 1$ 桁小さかった。これが観測時の連続X線が特段に明るかったためなのか、それともFe-K $\alpha$ 強度が一般的なAGNよりも弱かったのかを切り分けるため、SXSで得られた広帯域スペクトルを解析した。ゲートバルブが閉じていたため低エネルギー側は $\sim 2$  keVまでの検出にとどまったが、バックグラウンドが極めて低く抑えられているおかげで高エネルギー側は $\sim 20$  keVまで検出できた。

図3に広帯域スペクトルフィットの結果を示す。AGNと銀河団プラズマからの連続X線を正確に切り分けることに成功し、AGNの明るさが過去40年間の平均程度であることを突き止めた<sup>5)</sup>。エディントン比に換算すると $\sim 10^{-4}$ であった。このことから、AGNの連続X線が特別に明るかったのではなく、Fe-K $\alpha$ 輝線が通常のAGNで考えられているトーラスの立体角から計算されるほどの強度を持っていなかったのだと判明した。

## 3. NGC 1275のFe-K $\alpha$ 輝線の起源

小さい等価幅から、高温電子雲に対するFe-K $\alpha$

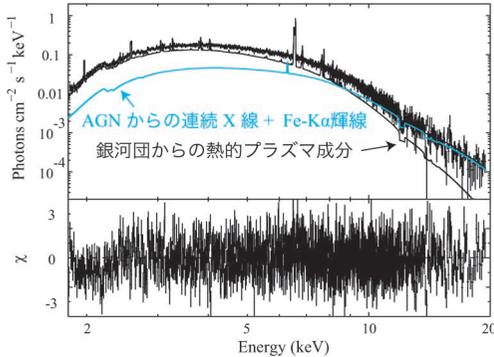


図3 「ひとみ」SXSの広帯域スペクトルを、銀河団プラズマモデル(黒)、AGNの連続X線モデルおよびFe-K $\alpha$ モデル(青)でフィットした結果。

放射源の立体角は一般的なAGNよりも桁で小さいことが示唆される。言い換えると、NGC 1275はBLRが発達しておらず、トーラスも、開口角が大きく平べったい奇妙な形であることが期待される。最近、エディントン比がトーラス形状と関係する結果が報告され、エディントン比が $\sim 0.5$ より大きいAGN、および $\sim 10^{-4}$ より小さいAGNでは、トーラスの開口率が上がるという新しい描像が見えて来た<sup>6)</sup>。NGC 1275のエディントン比は $\sim 10^{-4}$ であり、まさにこの描像をFe-K $\alpha$ 輝線の幅と強度から検証できた初めての結果と言える。

トーラスが平べったいことで連続X線がCNDまで吸収されずに到達できるため、CNDもFe-K $\alpha$ 輝線の起源として十分に考えられる。赤外線観測によりCNDからの[Fe II]輝線の速度幅が380–1000 km s<sup>-1</sup>と測定され<sup>7)</sup>、これがFe-K $\alpha$ 輝線の速度幅と近いことや、16年間Fe-K $\alpha$ 強度に有意な変動が見られず、数pcを超える大きさの起源が必要なことから、CNDが主な起源である可能性が否定できない。これらの議論から、NGC 1275は中心の高温電子雲からの連続X線で平べったいトーラスとCNDが照射されるという、AGNの構造についての新しい描像が見えてきた。

本研究により、X線マイクロカロリメータによるAGNからの非相対論的な細いFe-K $\alpha$ 輝線の観測が、ダストトーラスやCNDといったBHへの

“質量供給源”の構造を探る極めて有効な手段と判明した。2022年打ち上げ予定の「ひとみ」の後継機XRISM<sup>8)</sup>のX線マイクロカロリメータを用いて、AGNの細いFe-K $\alpha$ 輝線を系統的に観測すれば、AGNの構造や光度・エディントン比ごとの構造の違いを詳細に調べることができ、AGNの理解を格段に進めることができるだろう。

## 謝辞

本稿は投稿論文<sup>1)</sup>に基づくため、そちらもご参照いただきたい。衛星を作り上げ、X線マイクロカロリメータによる天体観測を実現させた「ひとみ」関係者の皆さまに心から感謝を申し上げます。また本稿に助言をいただいた深沢泰司氏、川室太希氏、中島真也氏、松下恭子氏に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Hitomi collaboration, 2018, PASJ, 70, 13
- 2) Ho, L. C., et al., 1997, ApJS, 112, 391
- 3) Okajima, T., et al., 2016, Proc. SPIE, 9905, 99050Z
- 4) Nandra, K., & Pounds, K. A., 1994, MNRAS, 268, 405
- 5) Fabian, A. C., et al., 2015, MNRAS, 451, 3061
- 6) Ricci, C., et al., 2017, Nature, 549, 488
- 7) Scharwächter, J., et al., 2013, MNRAS, 429, 2315
- 8) Tashiro, M., et al., 2018, Proc. SPIE, 10699, 1069922

## Hitomi Result of Fe-K $\alpha$ Line Emission from NGC 1275

Hirofumi Noda

Department of Earth and Space Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

Abstract: We performed the first X-ray microcalorimeter spectroscopy of the Fe-K $\alpha$  line emission from an AGN NGC 1275. As a result, its velocity width and equivalent width are 500–1600 km s<sup>-1</sup> and  $\sim 20$  eV respectively, showing that it is produced by a large-opening angle dusty torus and/or a circumnuclear disk. AGN observations with the next X-ray satellite XRISM will enable us to establish our knowledge of their structures.