

# 狭輝線 1 型セイファート銀河から放射される広帯域 X 線 スペクトル変動の解釈

楠 絵莉子 (東京大学大学院 理学系研究科 / 宇宙科学研究所)

## Abstract

活動銀河核 (AGN) には、その X 線放射スペクトル中に「広がったように見える鉄輝線構造」を持つものがある。これは主に相反する 2 つのモデルで説明されている。一つは、ブラックホールごく近傍の降着円盤で反射した放射から生まれた鉄輝線が強い相対論的效果によって歪められているという「ディスクラインモデル」である。もう一つは、ブラックホール周辺に存在する電離吸収体が X 線源を部分的に覆い隠すことで鉄の吸収端を作るという「部分吸収モデル」である。どちらのモデルでも観測されたスペクトル形状を説明することができ、実際にどちらのモデルが正しいのかは明らかになっていない。AGN の X 線放射機構および周辺の物理構造を理解するためには、この論争に決着をつける必要がある。そこで着目されるのが、スペクトルの時間変動に対する整合性である。今回、我々は X 線強度が激しい時間変動を示すことで知られる AGN 天体の狭輝線 1 型セイファート銀河 MCG-6-30-15 について解析を行った。硬 X 線バンドでは過去最高感度を誇る X 線天文衛星 NuSTAR による撮像観測データを使用することで、鉄輝線構造 ( $\sim 7$  keV) よりも高エネルギー側で精度の高いスペクトルを得た。そして、XMM-Newton 衛星との同時観測データを用いることで、これまで活発に議論がなされてきた低エネルギー側を含め、広帯域に渡るスペクトルに対してモデルの整合性を調べることができた。結果として、MCG-6-30-15 の広帯域における X 線スペクトル変動は主に部分吸収による変動と矛盾しないことがわかった。さらに今後は、今回得られたエネルギー帯ごとの強度変動の様子から、このデータに対する部分吸収モデルによる解釈の妥当性を検証する予定である。

## 1 Introduction

狭輝線 1 型セイファート (NLSy1) 銀河 MCG-6-30-15 は、あすか衛星によって初めて X 線スペクトル中の「広がったように見える鉄輝線構造」が検出された天体である (Tanaka et al. 1995)。以来、同様のスペクトルは他の活動銀河核 (AGN) から観測されてきた。この構造を生む物理的描像について、これまで主に 2 つの説明モデルが提唱されている。一つは、これをブラックホールごく近傍の降着円盤から放射され強い相対論的效果によって歪められた鉄輝線であると解釈する「ディスクラインモデル」である (Fabian et al. 1989)。もう一つは、円盤周辺に存在する電離吸収体が放射源からの連続成分を吸収することで生じる鉄吸収端に由来するものだと解釈することができ「部分吸収モデル」と呼ばれる。たとえば Miyakawa et al. (2012) では、すざく衛星の観測した MCG-6-30-15 のデータに対し、柱密度と

電離度の異なる二重構造をした吸収体による部分吸収モデル (Variable double partial covering; VDPC モデル) が提案されている。どちらのモデルでも観測されるスペクトル形状を再現することができるため、この論争は現在も活発な議論が続く問題である。

AGN の中心ブラックホール近傍における放射機構および物理的な構造を理解する上で、このような X 線観測から得られる情報の寄与は大きい。すなわち、ディスクラインが正しい場合にはブラックホールにおける相対論的效果の実証となるし、部分吸収が正しいのならばブラックホール周辺の吸収体の構造、特に円盤からのアウトフローの構造を見ることができる。論争の決着に向け、次に重要になってくるのが、スペクトル強度変動に対する整合性である。強度の時間変動については、部分吸収モデルの場合、視線にある電離吸収体が X 線放射源を覆い隠している割合の変化によって説明される。すなわちカバリングファクターという一つのパラメータを振るだ

けで、主な強度変化を再現できることになる。一般に NLSy1 は X 線強度が激しい時間変動を示すことで知られており、Mizumoto et al. (2014) による NLSy1 天体 1H0707-495 の解析では、低エネルギー側の帯域 0.5–3.0 keV に対してこの描像はよく一致している。ただし、あまり吸収の効果を受けない高エネルギー側の帯域 3.0–10.0 keV ではカバリングファクターの変動だけで強度変動を説明することは出来ず、硬 X 線帯域ほど放射源の固有な強度変化が支配的になってくるものと考えられる。

そこで今回、我々は、10 keV 以上の高エネルギー帯域を含む広帯域 X 線スペクトルに対し初めて VDPC モデルを適用し、部分吸収モデルの検証を行った。さらに、エネルギー帯域ごとのライトカーブを描き、強度変動の様子を調査した。

## 2 Instruments and Observations

解析は、NuSTAR 衛星と XMM-Newton 衛星による MCG-6-30-15 のアーカイブデータを用いて行った。使用した NuSTAR データ (ID = 60001047002, 60001047003, 60001047005) および XMM-Newton データ (ID = 0693781201, 0693781301, 0693781401) は、いずれも 2013 年 1 月 29 日から 2 月 2 日にかけて観測されている。実際の解析に使用したのは、このうち観測時間帯が完全に一致する計 155 ksec の時間帯に取得されたデータである。

NuSTAR 衛星は 2012 年に打ち上げられ、硬 X 線バンド (3–80 keV) を連続的に撮像観測することができる。そして、2 つの焦点面 (Focal Plane Module) FPMA, FPMB にそれぞれ搭載されている CdZnTe 検出器は、このエネルギー帯での過去最高感度を誇る。一方の XMM-Newton 衛星は 0.15–15 keV に感度をもつ CCD カメラ EPIC (European Photon Imaging Camera) を搭載しており、今回は明るい点源であるため pn カメラのデータを用いている。このように異なるエネルギー帯域に感度をもった 2 つの衛星の同時観測データを用いることによって、本解析では 0.2–78 keV という非常に広帯域に渡る X 線スペクトルデータの使用を実現した。

## 3 Results

図 1 に強度の時間変動を表したライトカーブを示す。ここでは、観測カウントレートを全時間に渡る平均値で規格化した。NuSTAR による硬 X 線帯域データ (25–78 keV; 黒) と XMM-Newton による軟 X 線帯域データ (0.2–2 keV; 赤, 2–10 keV; 緑) を、1 ビンあたり 2000 秒としてプロットしている。大局的に見て、硬 X 線帯域も軟 X 線帯域も同じような  $10^4$ – $10^5$  秒程度の長時間スケールで強度変動をしている。それに加えて、軟 X 線帯域では  $10^3$ – $10^4$  秒程度の短時間スケールでも細かく変動している様子が確認できる。また 0.2–2 keV と 2–10 keV を比較して、軟 X 線帯

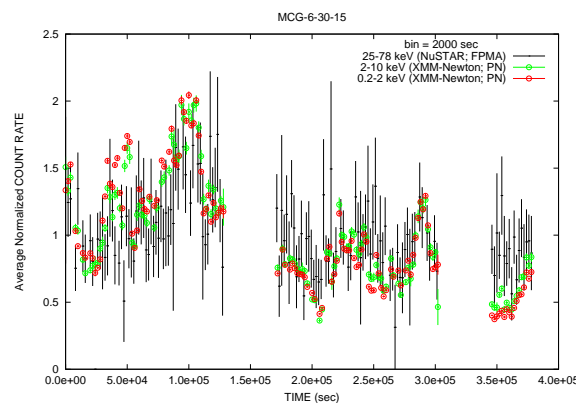


図 1: 3 つの帯域 25–78 keV (黒), 2–10 keV (緑), 0.2–2 keV (赤) の強度変動を示すライトカーブ。それぞれ観測されたカウントレートを平均値で規格化した値について 1 ビン 2000 秒としてプロットしている。

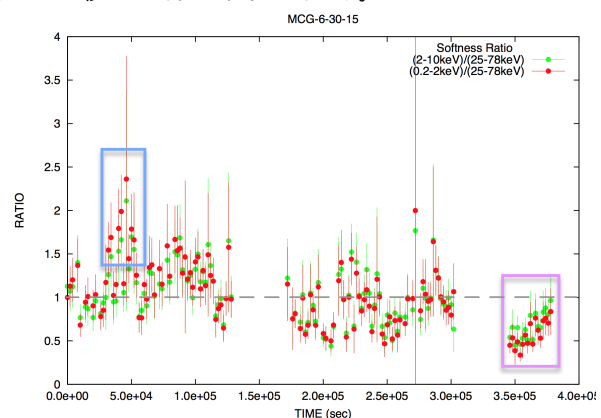


図 2: 硬 X 線帯域 (25–78 keV) に対する軟 X 線帯域 (2–10 keV, 0.2–2 keV) の強度比変動。比の計算は図 1 での値を用いた。四角の囲みは、硬 X 線帯域に対し軟 X 線帯域が特に明るいフェーズ (青) および暗いフェーズ (桃) を示す。

域ほど強度変化の振幅が大きく、激しい変動になっていることがわかる。

図 2 では硬 X 線帯域に対する軟 X 線帯域の強度比の変動を示す。ここでは、上記の規格化したカウントレートを用いて強度比を算出している。特に、およそ  $3.5 \times 10^5$  秒以降の時期では、硬 X 線帯域に対して軟 X 線帯域が明らかに暗いフェーズ（桃色の囲み）である。一方で  $4 \times 10^4$  秒付近のように、2 倍近く明るいフェーズとなる時期（青色の囲み）も存在していることがわかる。

次に、時間平均スペクトルに対し VDPC モデルを用いたフィットを行った。これまでに 1–10 keV 程度の狭帯域に対し整合性のあった VDPC モデルを、そのまま 0.2–78 keV の広帯域に適用したところ、残差が大きい。そこで、補助的に 0.7 keV に吸収端の構造（高階電離した酸素の K-または鉄の L-吸収端と考えられる）を付加すると、従来モデルを支持する結果となった（図 3）。このときのモデルフィットは、電離吸収体の吸収テーブル `mtable` を用意し、カットオフをもったべき型関数で表される放射の直接成分 (`cutoffpl`) と、降着円盤からの放射 (`diskbb`) に、2 つの電離した部分吸収体による吸収をかけ (`partcov*mtable*edge`) (`partcov*mtable`)、さらに円盤の遠方における反射成分 (`pexrav`) と細い蛍光

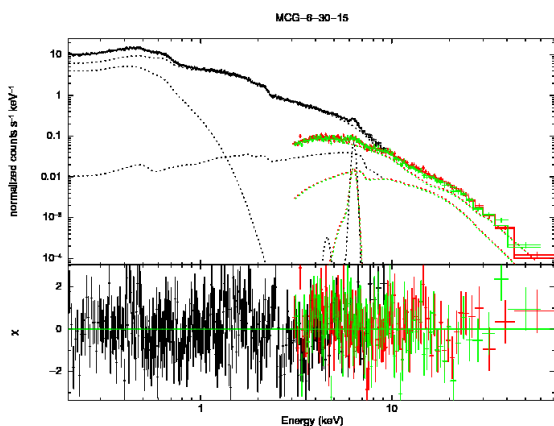


図 3: 時間平均スペクトルに対する VDPC モデルフィットの結果。XMM データ 0.2–10 keV (黒) と、NuSTAR データ 3–78 keV (赤: FPMA/緑: FPMB) による広帯域 X 線領域をカバーしている。下段はモデルとの残差を示す。

鉄輝線および吸収線を含め全体に星間吸収 (`phabs`) をかけたものを用いている。すなわち `xspec` 上で `phabs*((partcov*mtable*edge)(partcov*mtable)(diskbb+cutoffpl)+pexrav+gauss+gauss)` である。

ここで、2 つの電離吸収体は柱密度  $N_H$  と電離度  $\xi$  の 2 つのパラメータで記述されている。その結果、 $\sim 7$  keV にある鉄の K 吸収端と、 $\sim 1$  keV にある鉄の L 吸収端に由来する構造が、それぞれ「厚く冷たい」吸収体 ( $N_H \sim 10^{25} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\log \xi \sim 0.6$ ) と、「薄く熱い」吸収体 ( $N_H \sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\log \xi \sim 2$ ) によって説明できた。この時、カバリングファクターは  $\alpha \sim 0.6$  であった。

## 4 Discussion

強度の時間変動について、エネルギー帯域によって変動の様子が異なっていることは、先で述べた Mizumoto et al. (2014) による解釈を支持するものである。すなわち、硬 X 線帯域では電離吸収体による吸収を無視できるため、この強度変動は放射源それ自体に固有な強度変動であると考えられる。一方の軟 X 線帯域では、部分吸収体が視線上で放射源を覆い隠す割合の変動がさらに上乘せられることにより、観測される強度変動は激しくなる。これに基づけば、硬 X 線帯域に対する軟 X 線帯域の強度比が小さい場合、すなわち軟 X 線帯域が暗いフェーズの時は、それだけ部分吸収体に覆われている状態と考えられ、カバリングファクター  $\alpha \approx 1$  である。逆に明るいフェーズの時は、その前後の時間帯に対してカバリングファクターが相対的に小さくなることにより説明される。よって、図 2 は  $1 - \alpha$  の時間変動に対応しているはずである。より軟 X 線帯域であるほど吸収が顕著なため、 $1 - \alpha$  の変動も軟 X 線帯域ほど大きくなるはずであり、実際に図 2 はそのことを示唆している。これを確認するために、今後は、放射源の強度変動を NuSTAR による硬 X 線帯域データから仮定し、カバリングファクターの変動によって様々なエネルギー帯域の観測ライトカーブを再現できるかどうか、詳細な検証を行う。

強度の短時間変動は、部分吸収モデルによる視線上の電離吸収体が放射源を覆い隠す割合の変動を考

えることで、このように自然に説明できる。つまりライトカーブ解析から部分吸収による解釈が支持され、基本的には「厚く冷たい」吸収層と「薄く熱い」吸収層からなる電離吸収体が単一のカバリングファクターをもった描像を考えることにより、スペクトルの鉄構造が部分吸収による吸収端で説明される。これにより、考えている AGN 中心部の物理的描像をより制限することができるかと期待する。

## 5 Conclusion

本解析では、部分吸収モデルを検証するために、NLSy1 銀河 MCG-6-30-15 に対する NuSTAR 衛星と XMM-Newton 衛星の同時観測データを用いた。これにより、0.2-78 keV という非常に広い X 線エネルギー帯域に渡るスペクトルを精度良く得られた。これまで鉄輝線構造の周辺帯域のみでは整合性の高かった VDPC モデルを用いたスペクトルフィットの結果、鉄の吸収端を担うような成分構造が得られた。ライトカーブからは、強度変動の様子がエネルギー帯域によって異なっていることが示された。これらの結果は、問題の鉄構造が部分吸収による吸収端由来であることを支持し、吸収体の変動が強度変動に対応するという解釈を与えた。今後は、広帯域に対応した VDPC モデルの改良と、カバリングファクターの変動とライトカーブとの整合性の確認を行う。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## References

- Fabian, A. C., Rees, M. J., Stella, L., & White, N. E.: 1989, MNRAS 238, 729.
- Miyakawa, T., Ebisawa, K., & Inoue, H.: 2012, PASJ 64, 140.
- Mizumoto, M., Ebisawa, K., & Sameshima, H.: 2014, PASJ 66, 122.
- Tanaka, Y., et al.: 1995, Nature 375, 659.