

# 論文内容の要旨

## Probing the Structure of Ultra-fast Outflows in Active Galactic Nuclei with X-ray Spectroscopy

(X線分光を用いた活動銀河核における超高速噴出流の構造の研究)

萩野浩一

### 1 研究の背景 (1-3章)

ブラックホール質量  $M$  と母銀河の速度分散  $\sigma$  との間に存在する強い相関関係 ( $M$ - $\sigma$  関係) は、天体物理学において極めて重要な発見である (e.g., Ferrarese & Merritt, 2000)。この関係はブラックホールと銀河の共進化を示唆しており、そこにはブラックホールから銀河への何らかのエネルギー輸送過程が存在しているはずである。

活動銀河核 (AGN) からの降着円盤風は、銀河へのエネルギー輸送過程の有力候補である。King (2010) などによると、エディントン光度の  $\sim 5\%$  に達する運動エネルギーを持つ円盤風が存在すれば、銀河のガスを吹き飛ばすことで星生成活動を制限し、 $M$ - $\sigma$  関係を定量的に再現することが可能である。AGN の約半数において warm absorbers と呼ばれる吸収線が観測されているが、これらの放出速度は最大数  $1000 \text{ km s}^{-1}$  と小さいため、わずかな運動エネルギーしか輸送することができない (e.g., Blustin et al., 2005)。

近年、X線での高階電離吸収線の観測により、超高速噴出流 (ultra-fast outflow; UFO) と呼ばれる激しい円盤風が発見された。この UFO は最大  $\sim 0.3c$  もの速度で大きな柱密度の物質を放出しており、共進化に対して重要な役割を担っていると考えられる。

しかしながら、現状の検出器の感度不足により、UFO の加速・形成過程は明らかになっていない。Tombesi et al. (2010) や Gofford et al. (2013) による系統解析で見つかった UFO の候補天体のほとんどが  $3\sigma$  以下の有意度に過ぎず、UFO の詳細な物理的性質を探るのには適していない。従って、UFO の物理を探るためには、UFO の特徴が明らかに観測されている少数の天体を徹底的に調べることが必要である。

UFO の特徴が最も明瞭に観測されている PDS 456 では、数日という短い時間で吸収線が大きく変動していることが明らかになっている (e.g., Reeves et al., 2014)。このような時間変動は、多くの UFO の候補天体においても観測されており、UFO という現象に共通する本質的な性質に起因している可能性がある。この変動の起源は、従来行われてきた 1次元放射輸送計算を用いた解析では完全に不明であり、新たな解析方法が不可欠となっている。

本論文では、UFO で見られる多様なスペクトルを統一的に理解できる物理的な描像を得るために、現実的な 3次元形状の円盤風内で矛盾なく電離構造を求め放射輸送を計算することで新たなスペクトルモデルを構築した。このスペクトルモデルを用いて、最も吸収線の明瞭な PDS 456 と、それに次いで強い吸収線が観測されている APM 08279+5255 の複数回の観測データを解析した。さらに、 $\sim 7 \text{ keV}$  以上のスペクトルに奇妙な落ち込みを持ち、そのスペクトル構造の起源が謎とされている 1H 0707-495 に対し、我々のモンテカルロシミュレーションを用いることで、新たに UFO に起因するスペクトルであるとして説明することを試みた。

## 2 モンテカルロシミュレーションによる円盤風内での放射輸送計算 (4章)

UFOにおける様々な吸収線スペクトルの物理的な起源を探るためには、現実的な円盤風の物理状態および形状の中で矛盾なくスペクトルモデルを構築することが不可欠である。従来の1次元放射輸送計算では、速度、柱密度および電離パラメータ ( $\xi \equiv L/nR^2$ ) というスペクトル形状を直接表現する量がパラメータとなっており、スペクトル変動の背後に潜む本質的な物理量の変動にまで踏み込むことは困難である。一方、現実的な3次元形状、質量放出率、速度分布などのもとの放射輸送を計算できれば、異なるスペクトルにおける本質的な物理量の差異を探ることが可能になる。このような現実的な形状と物質分布における放射輸送計算を解くためには、モンテカルロシミュレーションが最適である。

我々は、降着円盤風の現実的な3次元形状と物理状態のもとで放射輸送を計算するモンテカルロシミュレーションを新たに開発した。このシミュレーションコードでは、1次元放射輸送計算に基づいて電離状態を放射源近傍から遠方へ順に決定し、その得られた電離状態のもとで3次元放射輸送を計算することで、降着円盤風のスペクトルを効率よく求めている。この取り扱い、X線連星における光電離した恒星風でのX線スペクトルをモデル化するために確立された方法であり (Watanabe et al., 2006)、放射源からの直接光および透過光が再放出された放射よりも支配的な状況では有効である。

モンテカルロシミュレーションによる放射輸送計算には、我々が様々な天体への適用を通じて開発を進めている MONACO (Odaka et al., 2011) を用いる。MONACO では、光電離プラズマにおける主要な物理過程だけでなく、高速の円盤風における相対論的効果も組み込まれている。そのため、UFOにおける放射輸送を適切に取り扱うことができる。

## 3 UFO を強く示す PDS 456 および APM 08279+5255 の解析 (5-7章)

我々は UFO で見られる多様なスペクトルを統一的に理解するために、新たに構築したモンテカルロシミュレーションを用いて、UFO による吸収線が最も強く観測される PDS 456 の *Suzaku* 衛星による複数回の観測データを解析した。最初に、全観測中で最も明るく、連続スペクトルが単純なべき関数でよく表せる 2007 年の観測データを解析し、スペクトル形状のパラメータから円盤風の物理パラメータを見積もった。このパラメータ付近でモンテカルロシミュレーションによってスペクトルモデルを構築し、鉄イオンによる吸収線だけでなく、輝線もよく再現できるようにパラメータを最適化した結果、質量放出率  $\dot{M}_{\text{wind}} = 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 、速度  $v_{\infty} = 0.308c$ 、円盤風の噴出角度  $\theta_{\text{min}} = 35^{\circ} - 55^{\circ}$ 、円盤風と視線方向の角度差  $\Delta\theta \simeq 2.3^{\circ}$  というパラメータで観測データを良く再現できることがわかった。

以上で得られたモデルをもとに、2007年から2013年に計5回観測されたスペクトル全てを、我々のシミュレーションによって解析した。その結果、質量放出率を変えずに終端速度と円盤風の放出角度を変化させることで、図1に示したように観測データで見られる吸収線の深さや中心値の大きな変動を再現することができた。得られた最適パラメータは円盤風の放出角度が  $38_{-2.0}^{+2.7}$  から  $\sim 46^{\circ}$  ( $> 45.4$ )、終端速度が  $0.24c$  ( $< 0.254c$ ) から  $0.31_{-0.008}^{+0.004}c$  という変動を示している。これは、円盤風のガス密度の非一様性などの他の時間変動要因を棄却することはできないが、Proga & Kallman (2004) などの紫外線加速を仮定した流体計算により予言されていた放出角度の不安定性を観測的に示唆するものである。

このような降着円盤風の幾何学的な変化によるスペクトル変動が UFO に普遍的な性質であるかを調べるために、PDS 456 に次いで吸収線が強く、*XMM-Newton* により複数回の観測されている APM 08279+5255 についても、モンテカルロシミュレーションを用いて解析した。その結果、この天体についても降着円盤風と視線方向の間の角度だけを変化させることで、*XMM-Newton* による計4回の観測データを再現することがわかった。従って、UFO による吸収線に見られる時間変動においては、円盤風の放出角度の変化が本質的に重要であることが示唆される。また、APM 08279+5255 のスペクトルを良く再現する質量放出率と速度は、PDS 456 で得られた値とほぼ一致しており、これら2つの天体に存在する降着円盤風が共通のメカニズムによって形成されている可能性が高い。

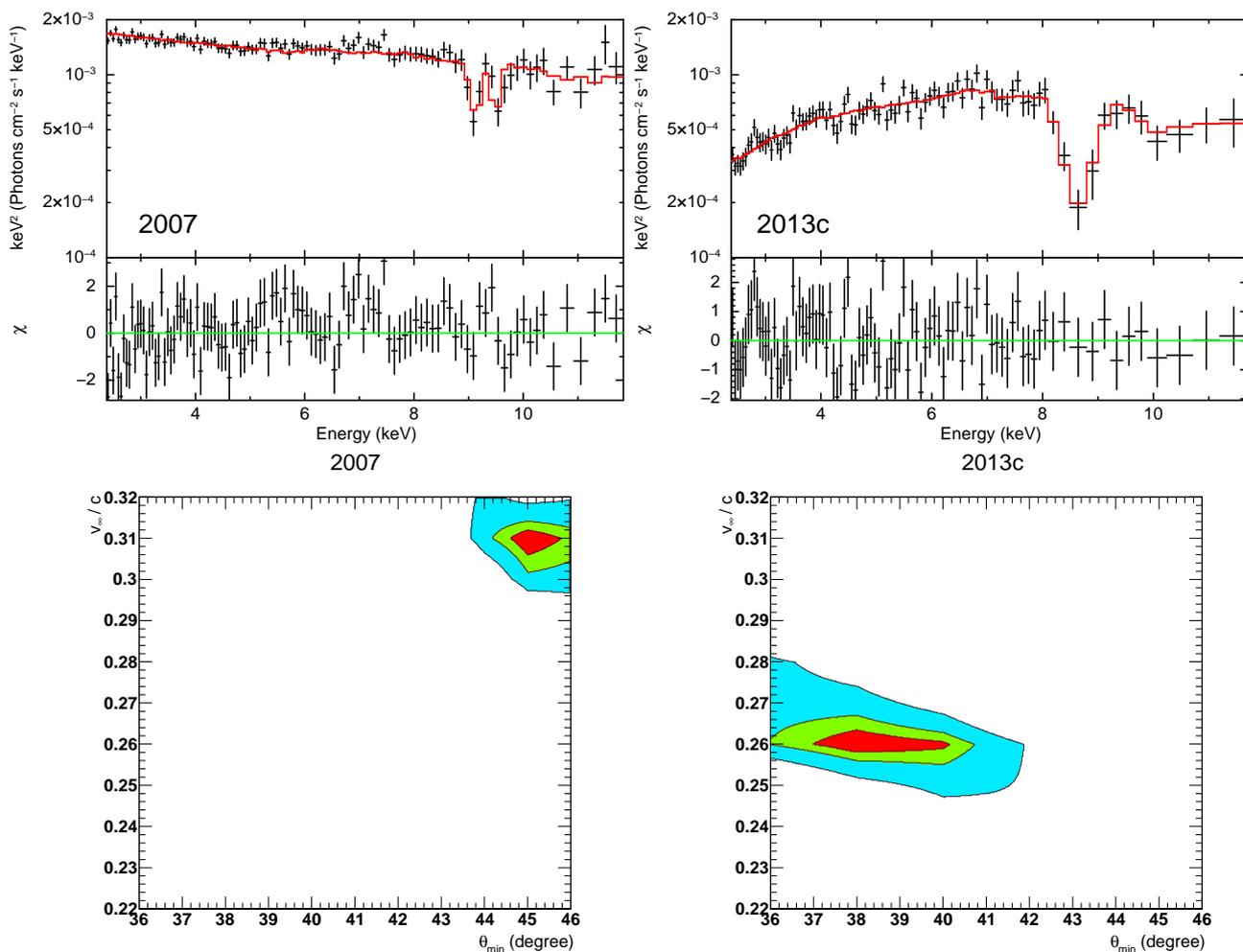


図 1: 上段: *Suzaku* 衛星によって観測された PDS 456 のスペクトル (黒のデータ点) とモンテカルロシミュレーションによるスペクトルモデル (赤線)。下段: 上段のスペクトルモデルでのフィットで得られた終端速度  $v_\infty$  と放出角度  $\theta_{\min}$  の Contour (赤:68%, 緑:90%, シアン:99%)。2007 年から 2013 年の間に計 5 回観測された全てのスペクトルを主に円盤風の放出角度の違いで説明した。例として、2007 年の細かい吸収線構造を持つスペクトルおよびその Contour (左) と、2013 年に観測された広く深い吸収線を持つスペクトルとその Contour (右) をここに示す。

#### 4 奇妙なスペクトル構造を持つ 1H 0707-495 への円盤風モデルの適用 (8 章)

1H 0707-495 は  $\sim 7$  keV 以上でスペクトルの急激な落ち込みを示し、その奇妙なスペクトル構造は 2002 年に発見されて以来、多くの議論がなされてきた。最も主要な説としては、ブラックホールのごく近傍の降着円盤からの重力赤方偏移した輝線によるとするものと、部分的に中心放射源を掩蔽している吸収体によるとするものがある。これらのどちらも未だに決定的とは言えず、奇妙なスペクトル構造の起源は謎とされている。

我々は 1H 0707-495 の奇妙なスペクトル構造が UFO に起因するものであると考え、我々のモンテカルロシミュレーションを用いて解析した。PDS 456 と同様に、全観測中最も明るく、単純なべき関数で表される観測データ (Obs12) についてパラメータを最適化し、全ての観測データに適用した。その結果、質量放出率  $\dot{M}_{\text{wind}} = 0.04 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ 、速度  $v_\infty = 0.2c$  で、円盤風と視線方向との角度を変えることにより、全ての観測データを概ね再現できた (図 2 の左図; Obs12)。また、得られたパラメータは、ブラックホール質量に関連する量で規格化すれば PDS 456 と APM 08279+5255 と近い値であった。これらのことから、

1H 0707-495 に見られるスペクトル構造は PDS 456 と APM 08279+5255 で見られるものと同様の降着円盤風でも説明できることが明らかになった。

## 5 結論 (9章)

我々は、UFO における多様なスペクトル構造を説明する統一的な物理的描像を得るために、現実的な降着円盤風の形状および物理状態もとで矛盾なく放射輸送を計算するシミュレーションコードを構築し、最も顕著に UFO の吸収線が見られる PDS 456 と APM 08279+5255 の観測データを解析した。その結果、吸収線スペクトルの変動は、終端速度と円盤風の角度の変化のみによって説明できた。これは、円盤風の放出角度が変動しているという一つの可能性を観測データに基づいて初めて示唆した結果である。

さらに我々は、 $\sim 7$  keV 以上で起源の不明なスペクトルの落ち込みを示す 1H 0707-495 に対し、我々のシミュレーションを用いることで、UFO として解釈できることを初めて示した。これは、1H 0707-495 のようにこれまで見逃されていた UFO 天体が存在することを意味するものである。また、ブラックホール質量の小さい 1H 0707-495 においても、PDS 456 などの大質量のブラックホールを持つ天体と同様に高速の UFO が存在するとすれば、UFO の加速メカニズムがブラックホール質量に依存しないことが示唆され、加速メカニズムの理論モデルに新たな制限を与える。

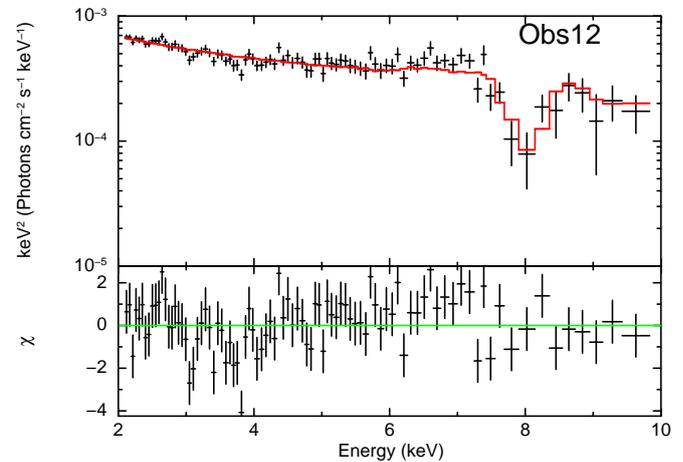


図 2: *XMM-Newton* 衛星によって観測された 1H 0707-495 のスペクトル (黒のデータ点) とモンテカルロシミュレーションによるスペクトルモデル (赤線)。

## 参考文献

- Blustin A. J., Page M. J., Fuerst S. V., Branduardi-Raymont G., Ashton C. E., 2005, *A&A*, 431, 111
- Ferrarese L., Merritt D., 2000, *ApJ*, 539, L9
- Gofford J., Reeves J. N., Tombesi F., Braitto V., Turner T. J., Miller L., Cappi M., 2013, *MNRAS*, 430, 60
- King A. R., 2010, *MNRAS*, 402, 1516
- Odaka H., Aharonian F., Watanabe S., Tanaka Y., Khangulyan D., Takahashi T., 2011, *ApJ*, 740, 103
- Proga D., Kallman T. R., 2004, *ApJ*, 616, 688
- Reeves J. N. et al., 2014, *ApJ*, 780, 45
- Tombesi F., Cappi M., Reeves J. N., Palumbo G. G. C., Yaqoob T., Braitto V., Dadina M., 2010, *A&A*, 521, A57
- Watanabe S. et al., 2006, *ApJ*, 651, 421