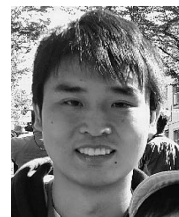


# 3次元放射輸送計算で探る 活動銀河核からの超高速アウトフロー



萩野 浩一

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: hagino@astro.isas.jaxa.jp

近年、光速の数十パーセントという超高速で鉄などの重元素を放出する超高速アウトフローと呼ばれる現象が、多くの活動銀河核で発見されている。超高速アウトフローは、銀河や銀河の中心に在する巨大ブラックホールの進化において重要な役割を果たしている可能性が高いにもかかわらず、その物理的性質や加速メカニズムは明らかになっていない。われわれは、モンテカルロシミュレーションを用いた3次元放射輸送計算により、現実的なアウトフロー形状におけるX線スペクトルモデルを構築した。このモデルを典型的な超高速アウトフロー天体に適用することで、吸収線スペクトルの時間変動が局所的な不安定性もしくは非一様性によって説明できることを明らかにした。さらに、従来はブラックホールのごく近傍からの輝線放射と考えられていたスペクトル構造が超高速アウトフローによって説明できるという新しい解釈を提案し、われわれのX線スペクトルモデルとの比較から超高速アウトフローの加速メカニズムに対する示唆を得ることに成功した。

## 1. はじめに

近年のX線観測によって、光速の数十パーセントという超高速で青方偏移した鉄元素の吸収線が、数多くの活動銀河核（Active Galactic Nuclei; 以降 AGN）で発見されている。これは銀河中心の巨大ブラックホール近傍から  $0.1-0.3c$  ( $c$  は光速) という極めて高速で重元素が放出されていることを示しておりこのような現象は超高速アウトフロー（Ultra-fast outflow）と呼ばれている<sup>1)-5)</sup>。超高速アウトフローは、莫大な運動エネルギーを銀河などの周辺環境に供給している可能性が高いため、銀河とブラックホールの共進化過程において重要な役割を果たしていると考えられる<sup>6)</sup>。

超高速アウトフローは、降着円盤から吹き出す「降着円盤風」であるとされている。超高速アウトフローを構成する吸収体は、吸収線の電離度、柱密度および速度から  $R \sim 10-10^4 R_g$  ( $R_g \equiv GM_{\text{BH}}/c^2$ )

というブラックホール近傍に存在すると考えられる<sup>7)</sup>。このサイズは、 $10^9 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  は太陽質量) の巨大ブラックホールでは  $\sim 0.001-1 \text{ pc}$  ( $\text{pc}$  は  $10^{18} \text{ cm}$ ) という降着円盤と同等のスケールであり、降着円盤風の描像と一致する。さらに、広がった輝線構造から、超高速アウトフローはジェットのように絞られた形状ではなく広範囲に放出されていると考えられる<sup>8)</sup>。

このような極めて高速の降着円盤風を加速・形成するメカニズムは、いくつかのモデルが提案されているものの、現在のところ不明である。有力候補とされているのが、AGNからの電磁放射によって加速される放射圧駆動<sup>9)-11)</sup> と、降着物質の磁場を用いた磁場駆動<sup>12), 13)</sup> の2種類のメカニズムである。これらのメカニズムを、観測データによって区別することは非常に難しい。それは、磁場駆動が観測不能な降着円盤の磁場構造に依存しており、その設定によっては多様な降着円盤風

を形成することができるからである<sup>14)</sup>。すなわち、磁場駆動は観測結果との比較から棄却することが極めて難しい。

超高速アウトフローの加速メカニズムを明らかにする（おそらく）唯一の方法は、放射圧駆動によって観測結果が完全に説明できるかどうかを徹底的に検証することである。放射圧駆動メカニズムでは、観測可能量である電磁波の放射圧によってアウトフローが加速されるため、磁場駆動と比べて自由度が少なく、観測結果と比較・検証することができる。われわれは、モンテカルロシミュレーションによる3次元放射輸送計算を用いることで、放射圧駆動の降着円盤風からのX線スペクトルモデルを構築し、これを観測データに適用した。本稿では、このような3次元放射輸送計算を用いた、われわれの研究結果を紹介する。

## 2. 超高速アウトフローのX線スペクトル

前章で述べたように、本研究では超高速アウトフローのX線スペクトルモデルを構築する。ここでは、実際に観測された超高速アウトフローのX線スペクトルを見ていこう。AGNからのX線放射は、ブラックホール近傍に存在するとされる高温電子によって降着円盤からの可視・紫外光子が逆コンプトン散乱されたものであると考えられている。AGNでは、一般的に光子指数 $I$ が2程度のべき関数型（光子数フラックス $\propto$ エネルギー $^{-I}$ ）のスペクトルとなる。

図1に示したのは、超高速アウトフローの典型的なX線スペクトルである。べき関数型のX線連続スペクトル上に、吸収および輝線の構造が見られる。超高速アウトフローの直接の証拠となるのが、このスペクトルで9-10 keVに見られる高階電離鉄イオンによる青方偏移した吸収線である。イオンの静止系ではそれぞれ6.7, 7.0 keVに見られるはずのヘリウム様および水素様鉄イオンによる吸収線が、光速のおよそ30%の速度で青方偏移

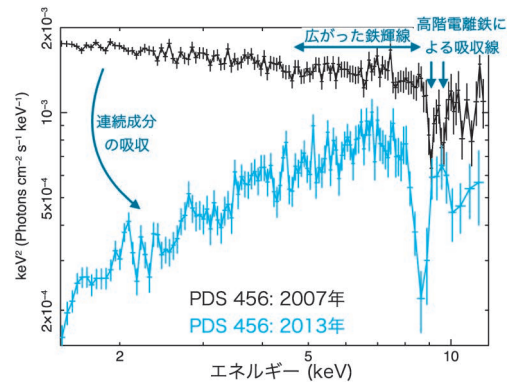


図1 典型的な超高速アウトフロー天体PDS 456のX線スペクトル。すざく衛星によって観測された2007年と2013年のデータを示している。

している。超高速アウトフローによる吸収線は、このように非常に高い電離度と、光速の10-30%という大きな速度が特徴である。

超高速アウトフローのX線スペクトルにおける、もう一つの興味深い特徴は、週から年のスケールで見られるスペクトル形状の変動である。図1に示すように、連続成分の吸収と高階電離鉄の吸収線の形状が、同一の天体であっても観測時期によって全く異なるのである。ここで見られるような連続成分の強い吸収は、吸収線に寄与している高い電離度の物質では説明できないため、吸収線とは異なるより電離度の低い物質によるものと考えられる。この低電離な吸収体の超高速アウトフローとの関連は定かではないが、電離不安定性<sup>15)</sup>や流体力学的不安定性<sup>16), 17)</sup>によって形成された冷たい高密度のクランプ状の構造が、超高速アウトフローの高電離物質の中に存在しているとして解釈されている。そのような解釈では、クランプが視線を横切ることによってこの激しい連続成分の吸収を自然に説明できる<sup>18)</sup>。

一方で、吸収線の変動に関しては、確立した描像は存在していない。その一因として、降着円盤風からの吸収線スペクトルのモデル化、特に吸収線に付随する広がった輝線構造の計算が簡単ではないということが挙げられる。恒星風などの球対

称なアウトフローの場合は、Sobolev近似など適切に近似することで解析的に放射輸送を解くことができる。これに対し、超高速アウトフローのような降着円盤風では、降着円盤があるために球対称形状にはなりえない。このような非対称な形状のもとでは解析的な解を得ることは不可能であり、新たな手法が要求される。

### 3. モンテカルロシミュレーションによるアウトフロー内での放射輸送計算

われわれは、モンテカルロシミュレーションを用いて放射輸送計算を行うことで、放射圧駆動型降着円盤風で自然に予想されるアウトフロー形状のもとでのX線スペクトルを計算した。このモンテカルロシミュレーションでは、光子とアウトフロー物質との各種相互作用の断面積に従って乱数を振ることでシミュレーションし、一つひとつの光子が生成されてから系から出ていく、もしくは光子が吸収されて消滅するまで追跡する。モンテカルロシミュレーションは、一つひとつの光子をシミュレーションする必要があるため、高精度の計算結果を得るためには多くの計算量を要求する一方で、複雑な形状に対しても正確に計算を行うことができるという利点がある。本研究のように、解析的な解法では不可能な計算を行う際には非常に有用である。

モンテカルロ計算によるスペクトルモデルを構築するにあたり、放射圧駆動の中でも、特にUV-line drivingメカニズム<sup>9)-11)</sup>に基づいてアウトフロー形状や速度構造を仮定した。UV-line drivingは、AGNにおいては効率的な加速が可能であるため、超高速アウトフローの加速メカニズムとして最有力である。このメカニズムは、通常のエディントン限界で考慮するトムソン散乱による放射圧ではなく、束縛-束縛遷移による紫外線(UV)光子の吸収反応を用いる。つまり、UV光子を束縛-束縛遷移によって吸収することで、光子の運動量(放射圧)を得て物質が加速される。束縛-束

縛遷移は、物質が適度に電離されていれば、特定のエネルギーでトムソン散乱断面積と比べて3-4桁も大きな反応断面積をもつため、非常に効率の良い加速が可能である。このため、エディントン限界の~10%程度の質量降着率で降着円盤風を形成することができる<sup>11)</sup>。さらに、AGNではUV光子が大量に放射されており、UV-line drivingに適している。

UV-line drivingでは、紫外線が放射される半径や電離状態の条件からある特定の半径のみから降着円盤風が放出される<sup>19), 20)</sup>。これに基づき、図2に示すような単純な双円錐形状のアウトフロー形状<sup>21)</sup>を仮定し、降着円盤風の立体角を $\Omega/4\pi=0.15$ 、放出半径は、脱出速度がアウトフロー速度に等しくなる半径からその1.5倍の半径までとした。アウトフロー内の速度構造は、UV-line drivingによる球対称なアウトフローである恒星風で用いられる速度則<sup>22)</sup>を採用した。この速度則では、円盤風の根元付近で急激に加速し遠方に行くに従って終端速度に漸近していく。アウトフロー内の密度構造は、質量保存を考慮することで速度則から計算でき、速度がほぼ一定になる遠方では半径の-2乗で減少する。

アウトフロー内の電離構造は、アウトフローの流線に沿った一次元方向で、XSTAR<sup>23)</sup>と呼ばれる光電離プラズマの電離構造計算コードを使って連続的に計算を行う。XSTARは、与えられた入

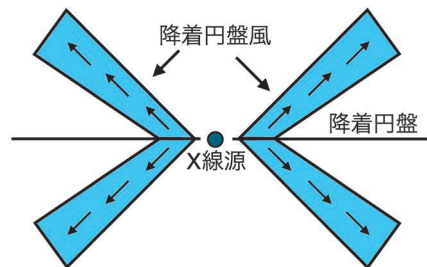


図2 X線スペクトルモデルにおいて仮定したアウトフロー形状。激変星における降着円盤風のスペクトルモデル<sup>21)</sup>で考案された単純な双円錐(biconical)形状を採用した。

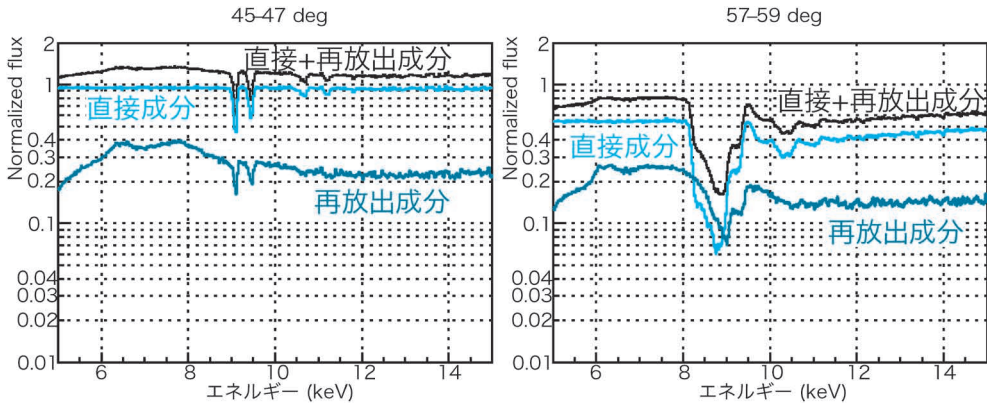


図3 シミュレーションにより得られたX線スペクトル. 左のパネルは、降着円盤の回転軸に対する観測者の角度が45°-47°の場合を示し、右のパネルは57°-59°の場合を示す。ただし、アウトフローの放出角度は45°-56.3°としている。

射スペクトルと電離パラメータ（≡光度/(密度×半径<sup>2</sup>)）、密度、柱密度のもとで、電離と再結合のバランスと加熱と冷却のバランスを考慮することで、電子温度と各イオンの存在割合を求めることができる。以上で決定したアウトフロー内の密度・速度や電子温度、各イオンの割合のもとで、モンテカルロシミュレーションによりスペクトル計算を行う。

モンテカルロシミュレーションにおいては、われわれが開発してきたフレームワーク MONACO を用いる。MONACO は、X線連星の恒星風からのX線スペクトルを計算するために渡辺伸氏らが開発したコード<sup>24)</sup>を、小高裕和氏らがより幅広い天体現象に適用できるように拡張したフレームワークである<sup>25), 26)</sup>。MONACO は、恒星風やAGNにおける光電離プラズマからの放射<sup>24), 27), 28)</sup>だけでなく、中性子星降着流の熱コンプトン放射<sup>29)</sup>や、分子雲やAGN トーラスなどの中性物質からの反射<sup>25), 30), 31)</sup>という幅広い天体現象に適用されている。今回の計算では、光電離・再結合、光励起、コンプトン散乱といった光電離プラズマとX線光子との物理過程に加えて、超高速アウトフローでは欠かすことのできないドップラーシフトなどの相対論的効果も組み込んだ。

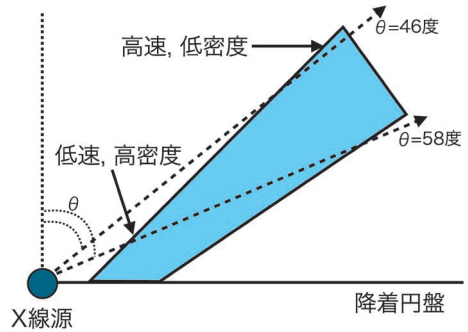


図4 視線方向の変化による吸収線スペクトルの変化の概略図。アウトフローの流線方向に対する観測者の視線方向が変わることで、アウトフローの異なる部分を観測することになる。

モンテカルロ計算によって実際に計算されたスペクトルが、図3である。左のパネルでは、観測データに見られるような鉄の水素様およびヘリウム様イオンによる青方偏移した吸収線と、大きく広がった輝線構造が再現できている。さらに、視線方向を僅かに変えると、興味深い特徴が見えてくる。左のパネルから視線方向を約10度変えるだけで、右のパネルの図のように吸収線が深く、幅広くなるのである。球対称な恒星風とは異なり、観測者の視線方向とアウトフローの流線が必ずしも一致しないために、図4に示すように視線

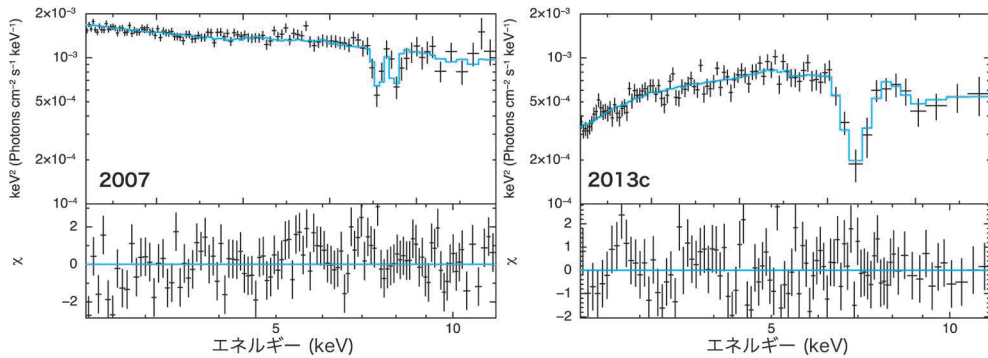


図5 すざく衛星によって観測されたPDS 456のスペクトル. 上段には観測データとモンテカルロシミュレーションによるX線スペクトルモデルを示し, 下段にはモデルと観測データとの残差を示した.

方向の変化によってアウトフローの異なる場所を観測することになるからである. より具体的に, 図3は以下のように理解できる. アウトフローの流線方向に近い角度から観測すると, 高速かつ低密度な部分のみを観測するため, 図3の左図のような細い吸収線となる. これに対し, より大きな角度から観測すると, 高速・低密度な部分に加えて低速かつ高密度な部分も観測することになり, 図3の右図のような深く広がった吸収線となる.

#### 4. 典型的な超高速アウトフロー天体 PDS 456への適用

##### 4.1 PDS 456の観測データへの適用

本節では, 前章で構築したモンテカルロシミュレーションによるX線スペクトルモデルを, 実際の観測データに適用する. 最初に, 最も顕著に吸収線を示す典型的な超高速アウトフロー天体PDS 456の, 「すざく」による計5回の観測データを対象とする.  $z=0.184$ に位置するPDS 456は, 近傍宇宙では, 3C 273と並んで最も光度の大きなAGNの一つである. この天体は, 速度が光速の約30%, 柱密度が $\sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ という, 超高速アウトフロー天体の中でも最も激しいアウトフローをもっている<sup>32),33)</sup>.

すざくによる5回の観測データのうち, まずは, 最も光子指数が大きく吸収の影響が少ない2007年

の観測データにモンテカルロによるスペクトルモデルを適用した. また, このデータは, 最も長時間の観測であり, ヘリウム様・水素様の2本の吸収線が明確に見えている. われわれのスペクトルモデルを適用した結果, アウトフローの終端速度を $v_{\infty} \approx 0.308c$ , 質量放出率を $\dot{M}_{\text{wind}} = 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ とし, アウトフローの放出角度 $45^{\circ} - 56.3^{\circ}$ に対し観測者の視線方向を $\approx 47.3^{\circ}$ とすることで, 図5の左図のように観測データを非常によく再現することに成功した.

さらに, このスペクトルモデルをすざく衛星による全観測データに適用した結果, われわれは, 超高速アウトフローの質量放出率をほぼ変えずに, 終端速度と, 観測者の視線方向に対するアウトフローの放出角度のみを変えるだけで, すべての観測データをよく再現できることを見いだした. その一例として, 図5の右図には, 全5回の観測の中で最も深く広い吸収線を示す2013年3月8日の観測データを解析した結果を示した. 2007年の観測データと大きく異なる吸収線スペクトルを, アウトフローに対する観測者の視線方向を僅か $5.5^{\circ}$ ずらすだけで説明することができる. われわれの結果は, 質量放出率という大局的なパラメータを変えずに, 局所的な変動によって激しい吸収線スペクトルの変化を説明できることを示す.

## 4.2 吸収線スペクトル変動の起源

このように吸収線の変動を非常によく説明できる「視線方向の変化」とは、一体何を示しているのだろうか。われわれは、これは降着円盤風の形状の不安定性、もしくは物質分布の非一様性を示していると考えている。降着円盤風の流体シミュレーションでも類似した特徴が見られており、アウトフローがバタバタと波打つような変動をしたり、密度に濃淡が生成されたりしている<sup>10), 11)</sup>。これらは、流体力学的な不安定性に起因するものと考えられ、本研究はこの不安定性を観測的に示唆するものである。

質量放出率という大局的なパラメータを変えずに、局所的な変動によって激しい吸収線スペクトルの変化を説明したことは、銀河とブラックホールの共進化を考えるうえでも意義があると考えられる。超高速アウトフローは、多くの天体で発見が報告されているが、観測時期によって検出されなくなることも多々ある<sup>5)</sup>。われわれの結果が示すように局所的な変動が吸収線スペクトルの変動の起源であるとする、吸収線が見えなくなっても、質量放出率は変化せずに常にアウトフローを放出している可能性がある。この場合、周辺環境へ絶えず莫大なエネルギーを供給していると考えられ、共進化への寄与は非常に大きなものとなる。

## 5. 広がった鉄輝線構造をもつ天体 1H 0707-495 への適用

### 5.1 1H 0707-495 の観測データへの適用

典型的な超高速アウトフロー天体である PDS 456 のスペクトルをよく再現することに成功したわれわれは、次のターゲットとして、極端に広がった鉄輝線構造をもつとされている 1H 0707-495 という天体を選んだ。この天体は、図6のような 7 keV 付近でスペクトルが急激に落ち込む特徴的なスペクトルを示し、その起源はブラックホール近傍の降着円盤からの反射によって説明さ

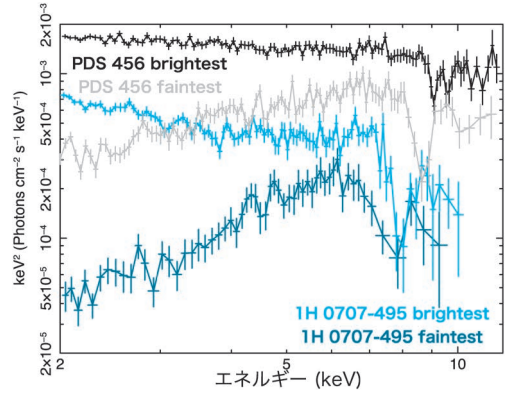


図6 広がった鉄輝線構造をもつとされる 1H 0707-495 と典型的な超高速アウトフロー天体である PDS 456 のスペクトル。

れている<sup>34), 35)</sup>。この解釈では、重力赤方偏移の効果によって低エネルギー側に極端に広がった鉄輝線（いわゆる“ディスクライン”）の高エネルギー側の端が、このスペクトルの落ち込みであるとされる。

しかしながら、この広がった鉄輝線による解釈は、にわかには信じがたい極端な状況を要求する。まず、非常に広がった輝線構造を作り出すために、理論的に許される最大値に近いブラックホールスピンの必要である。さらに、反射成分が直接成分に対して卓越していなければならないため、点源としてモデル化されている X 線放射領域はほぼ事象の地平面に存在していなければならない。これらに加えて、非常に強い鉄輝線を説明するために、太陽の元素組成比に対して 7-20 倍もの量の鉄の存在が要求される。このような極限状態が要求されるため、代替解釈としてスペクトルの落ち込みを鉄元素による吸収エッジで説明するモデル<sup>36)-38)</sup>も提唱されているが、この解釈でも大きな鉄の組成比が要求されている。

筆者は Chris Done、小高裕和の両氏と英国のダラム大学にて前節で述べた PDS 456 の研究を進めている中で、この 1H 0707-495 のスペクトル構造が超高速アウトフローのスペクトルによく似ているということに気がついた。図6には、

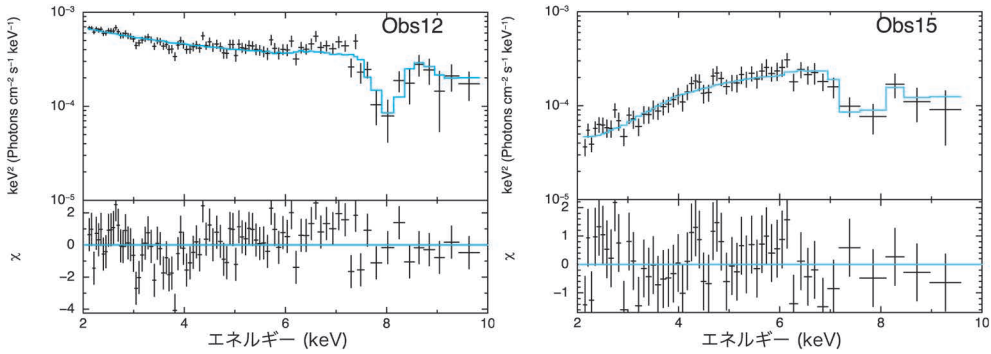


図7 XMM-Newton衛星によって観測された1H 0707-495のスペクトル。上段には観測データとモンテカルロシミュレーションによるX線スペクトルモデルを示し、下段にはモデルと観測データとの残差を示した。

1H 0707-495とPDS 456の最も明るい時期と最も暗い時期のスペクトルを重ねて表示した。連続成分の吸収と7-10 keV付近の構造が、この2天体で非常によく似ていることがわかる。さらに、1H 0707-495の7 keV付近のスペクトル構造は、図3の右図のような視線方向が大きいときのスペクトルモデルによく似た形状である。

そこでわれわれは、XMM-Newtonおよびすざく衛星による計15回の観測データすべてに対して、モンテカルロ計算によるX線スペクトルモデルを適用した。その結果、アウトフローの終端速度を $v_{\infty}=0.2c$ 、質量放出率を $\dot{M}_{\text{wind}}=0.04 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  (PDS 456のブラックホール質量では $15 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ に相当する) とすることで、15回の観測すべてで $\sim 7 \text{ keV}$ 以上の特徴的なスペクトル構造を再現することに成功した(図7)。さらに、図7の右図に示した観測データ(Obs15)の最適モデルによって、NuSTARによる10 keV以上の硬X線スペクトル<sup>39)</sup>まで自然に説明することができる。この解析でも前節と同様に、アウトフローの放出角度に対する視線方向のみを観測ごとに変えることで、すべての観測を説明できている。また、われわれの降着円盤風モデルでは、鉄元素の量は太陽の元素組成比に固定してあることも強調しておきたい。以上のように、従来はディスクラインと考えられていたスペクトル構造を、降着円盤風によ

る吸収構造として説明することができる。

### 5.2 鉄輝線状の残差の解釈

われわれのスペクトルモデルによって観測データをよく再現することができたが、モデルとデータとの間の残差を注意深く見てみると、特に連続成分の吸収の影響の小さい図7の左図(Obs12)において、6-7 keV付近に輝線のような構造が残っていることがわかる。投稿論文<sup>28)</sup>のレフェリーは、この構造は従来の解釈のおおりのディスクラインではないかと強く主張していたが、われわれはこの構造は超高速アウトフローの構造についての示唆を与えてくれているのではないかと考えた。

この残差の正体を調べるために、われわれはレフェリーの要望どおり、われわれの降着円盤風のモデルにディスクラインのスペクトルモデルを加えてみた。その結果、ディスクラインを加えることでObs12の観測データに対する $\chi^2$ は有意に改善し、X線源の高度 $h \sim 1R_g$ 、降着円盤の内縁半径 $R_{\text{in}} \sim 3R_g$ という従来解釈どおりの極端なパラメータで $\chi^2$ は最小値をとった。

やはり、極端なディスクラインが必要なのだろうか。われわれは、ディスクラインモデルにおいて、より広範囲のパラメータ空間を探索した。その結果、図8に示すように、 $R_{\text{in}} \sim 30R_g$ という大きな内縁半径に、極端なディスクラインと統計的

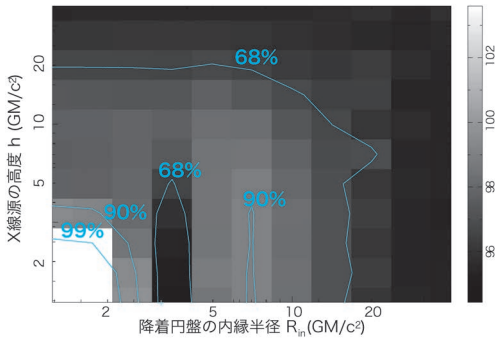


図8 ディスクラインモデルの降着円盤内縁半径  $R_{in}$  と X線源高度  $h$  に対する  $\chi^2$  の分布. 等高線は 68, 90, 99% の信頼区間を示す. 降着円盤風のモデルにディスクラインのモデルも加えて, 図7の左図 (Obs12) のデータをフィットした. 黒色の濃い ( $R_{in}, h$ )  $\sim (3R_g, 1R_g)$  付近と  $R_{in} \sim 30R_g$  の領域がよく観測データを説明できる解である.

に同程度によくデータを再現できる解が存在することが明らかになった. この  $\sim 30R_g$  は脱出速度  $v_{esc} \simeq 0.25c$  となる半径であり, まさに降着円盤風の内縁半径として理解できる. すなわち, この輝線状の残差は, 降着円盤風からの反射成分と考えて矛盾はない.

降着円盤風からの反射成分を強めるためには, 視線方向以外の物質の量を増やせば良い. これは, われわれが仮定した UV-line driving で特徴的な仰角方向に細い形状の降着円盤風ではなく, より広い方向に物質を放出する形状を示唆している. このような形状は, UV 光子による束縛-束縛遷移の放射圧ではなく連続スペクトルによるトムソン散乱の放射圧を用いた “continuum driving” メカニズムで予想される. この輝線状の残差は, 降着円盤風の加速メカニズムという非常に興味深い示唆を与えてくれているのである.

## 6. 加速メカニズム

前章および前々章の解析では, PDS 456 のスペクトルは UV-line driving に基づく X線スペクトルモデルでよく再現できたのに対し, 1H 0707-495 では僅かな輝線状の残差が残り, 連続スペクトル

の放射圧による continuum driving が働いている可能性が示唆された. ここで示唆された加速メカニズムの違いは, ブラックホール質量および質量降着率によって自然に理解できる.

continuum driving メカニズムはエディントン限界の定義そのものであるため, エディントン限界を超えた質量降着が必要である. 多くの AGN はエディントン限界以下であると考えられており, 比較的質量降着率の大きな PDS 456 においても, エディントン限界の数%程度である<sup>18)</sup>. つまり, UV-line driving であれば降着円盤風を形成可能であるが, continuum driving は機能しないと考えられる. しかしながら, 実はこの 1H 0707-495 は, 可視光のスペクトルからエディントン限界を超えた質量降着が示唆されている数少ない AGN の一つである<sup>40)</sup>. このため, この天体では continuum driving が働いているとして矛盾なく理解できる.

質量降着率に加えて, ブラックホール質量 ( $M_{BH}$ ) も降着円盤風の加速メカニズムに影響を与える. 束縛-束縛遷移の反応断面積は, 物質の電離状態に強く依存するため, 電離源である AGN スペクトルを決定するブラックホール質量によって, UV-line driving の効率が変化する. UV-line driving は, 電磁放射の実効温度が 30,000-50,000 K であるときに効率良く働き<sup>41)</sup>, これは AGN スペクトルが  $\sim 10$  eV にピークをもつことに対応する.  $M_{BH} \sim 10^9 M_\odot$  である PDS 456 では, 図9に示すように  $\sim 10$  eV にピークをもち, UV-line driving に理想的な環境である. 一方で,  $M_{BH} \sim 10^6 M_\odot$  である 1H 0707-495 は,  $\sim 100$  eV にピークをもつため, 物質が過剰に電離されてしまい UV-line driving が働きにくくなる. そのため, 1H 0707-495 でも PDS 456 のように激しい降着円盤風を形成するには, continuum driving が働くことが必要である. これは, 前章で得られた示唆と一致する.

このように, 超高速アウトフローを放射圧駆動



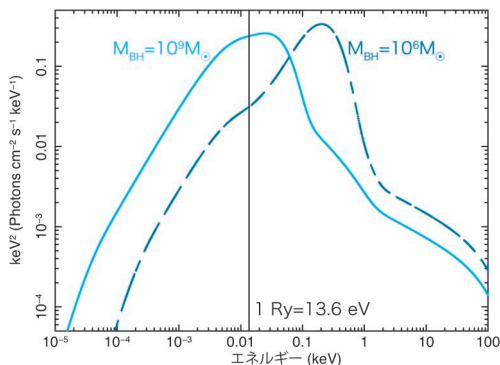


図9 ブラックホール質量による他波長スペクトルの違い。スペクトルモデルはoptxagnl<sup>(42)</sup>を使用し、 $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}=1$ とした。

型降着円盤風と考えることでわれわれの解析結果をよく理解できる。もちろん、continuum drivingに基づいたモンテカルロシミュレーションを行わなければ、1H 0707-495の加速メカニズムを結論づけることはできず、これは今後の課題である。また、この結果は決して磁場駆動の可能性を棄却するものでもない。しかし、従来のスペクトルモデルより格段に現実的なわれわれのモデルによって多くの観測データを説明でき、さらにその結果を放射圧駆動によって自然に理解できたことは、超高速アウトフローの加速メカニズムの理解に向けて着実な進展であると言って良いだろう。

## 7. まとめと今後の展望

本稿では、モンテカルロシミュレーションによる3次元放射輸送計算を用いることで、UV-line drivingで自然に予想されるアウトフロー形状もとのX線スペクトルモデルを構築し、超高速アウトフローの実際の観測データの解析を行った。典型的な超高速アウトフロー天体であるPDS 456に対しては、激しい吸収線スペクトル変動を主にアウトフローの放出角度の変化によって説明した。この結果は、降着円盤風の局所的な不安定性や非一様性を示すものである。さらに、同様の解析を極端な“ディスクライン”で知られる1H

0707-495に適用し、そのスペクトルが超高速アウトフローによって解釈できることを示した。この天体に関しては、輝線構造の僅かな残差によって、降着円盤風の加速メカニズムがPDS 456とは異なる可能性が示唆されている。この2天体における加速メカニズムの差異は、ブラックホール質量と質量降着率によってよく理解できる。

一方で、1章で述べた磁場駆動メカニズムが必要であるかどうかという議論に決着をつけるには程遠い状況である。この解決のためには、スペクトルモデルのさらなる精密化に加えて、観測データの質的な向上が不可欠である。その期待を背負っていたのが、従来よりはるかに精密な吸収線スペクトルの観測を可能にするASTRO-H（ひとみ）衛星<sup>(43)</sup>であったが、残念ながら超高速アウトフローの観測目前で通信途絶に至ってしまった。2020年代には、ひとみ衛星の代替として計画されている「X線天文衛星代替機」による吸収線の精密観測が実現する見込みである。それに加えて、次世代の高感度硬X線ミッションとして提案されているFORCEが実現すれば、吸収線だけでなく超高速アウトフローによる硬X線反射成分の精密観測も可能になる。これらの実現によって、超高速アウトフローの理解が飛躍的に進むことを期待する。

最後に、ここまで触れてこなかったが、実は放射圧駆動では説明できない観測結果を示すとされている天体が一つだけある。APM 08279+5255と呼ばれる重力レンズ天体である。このAGNには、光速の70%もの速度の降着円盤風が存在するとされている<sup>(44)</sup>。放射圧駆動では、radiation dragによって光速の30%程度までしか加速できないため<sup>(45)</sup>、このような高速の降着円盤風は磁場駆動でしか説明できないとされていた<sup>(13)</sup>。われわれは、この天体のデータを再解析した論文<sup>(46)</sup>を執筆し、現在MNRAS誌に投稿中であるので、興味のある方は是非ご一読いただきたい。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容は、2015年と2016年に筆者らが発表した投稿論文<sup>27), 28)</sup>に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。これらの投稿論文のベースとなった博士論文<sup>47)</sup>の指導教員である高橋忠幸氏、共同研究者のChris Done氏、小高裕和氏、渡辺伸氏には深く感謝いたします。また、本稿の執筆を助めてくださった馬場彩氏にも御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Chartas G., et al., 2002, ApJ 579, 169
- 2) Reeves J. N., et al., 2003, ApJ 593, L65
- 3) Pounds K. A., et al., 2003, MNRAS 345, 705
- 4) Pounds K. A., et al., 2003, MNRAS 346, 1025
- 5) Tombesi F., et al., 2010, A&A 521, A57
- 6) King A., Pounds K. A., 2015, ARAA 53, 115
- 7) Tombesi F., et al., 2012, MNRAS 422, L1
- 8) Nardini E., et al., 2015, Science 347, 860
- 9) Stevens I. R., Kallman T. R., 1990, ApJ 365, 321
- 10) Proga D., et al., 2000, ApJ 543, 686
- 11) Nomura M., et al., 2016, PASJ 68, 16
- 12) Blandford R. D., Payne D. G., 1982, MNRAS 199, 883
- 13) Fukumura K., et al., 2010, ApJ 723, L228
- 14) Proga D., 2007, Proc. of the Central Engine of Active Galactic Nuclei 373, 267
- 15) Krolik J. H., et al., 1981, ApJ 249, 422
- 16) Takeuchi S., et al., 2014, PASJ 66, 48
- 17) 竹内駿, 2015, 天文月報 108, 666
- 18) Matzeu G. A., et al., 2016, MNRAS 458, 1311
- 19) Risaliti G., Elvis M., 2010, A&A 516, A89
- 20) Nomura M., et al., 2013, PASJ 65, 40
- 21) Knigge C., et al., 1995, MNRAS 273, 225
- 22) Castor J. I., et al., 1975, ApJ 195, 157
- 23) Kallman T., Bautista M., 2001, ApJS 133, 221
- 24) Watanabe S., et al., 2006, ApJ 651, 421
- 25) Odaka H., et al., 2011, ApJ 740, 103
- 26) 小高裕和, 2014, 天文月報 107, 544
- 27) Hagino K., et al., 2015, MNRAS 446, 663
- 28) Hagino K., et al., 2016, MNRAS 461, 3954
- 29) Odaka H., et al., 2014, ApJ 780, 38
- 30) Furui S., et al., 2016, ApJ 818, 164
- 31) Odaka H., et al., 2016, MNRAS 462, 2366
- 32) Reeves J. N., et al., 2009, ApJ 701, 493
- 33) Gofford J., et al., 2014, ApJ 784, 77
- 34) Fabian A. C., et al., 2004, MNRAS 353, 1071
- 35) Fabian A. C., et al., 2009, Nature 459, 540
- 36) Gallo L. C., et al., 2004, MNRAS 353, 1064
- 37) Mizumoto M., et al., 2014, PASJ 66, 122
- 38) 海老沢研, 2010, 天文月報 103, 445
- 39) Kara E., et al., 2015, MNRAS 449, 234
- 40) Done C., Jin C., 2016, MNRAS 460, 1716
- 41) Laor A., Davis S. W., 2014, MNRAS 438, 3024
- 42) Done C., et al., 2012, MNRAS 420, 1848
- 43) Takahashi T., et al., 2016, Proc. of SPIE 9905, 99050U
- 44) Chartas G., et al., 2009, ApJ 706, 644
- 45) Takahashi H. R., Ohsuga K., 2015, PASJ 67, 60
- 46) Hagino K., et al., 2016, astro-ph, arXiv:1611.00512
- 47) Hagino K., 2015, 博士論文 (東京大学)

### Investigating the Physics in the Ultra-Fast Outflows with the 3-Dimensional Radiation Transfer Calculations

**Kouichi HAGINO**

*ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara 252-5210, Japan*

Abstract: Recent X-ray observations revealed an existence of the ultra-fast outflows (UFO) in local active galactic nuclei. Although they would have a significant contribution to the coevolution of black holes and galaxies, their physical properties and acceleration mechanisms are still unclear. We constructed a new X-ray spectral model from the realistic outflow geometry by utilizing the 3-dimensional Monte Carlo radiation transfer simulations. By applying this model to an archetypal UFO source, we find that the strong variability in the blueshifted absorption lines are explained by the local instability or the inhomogeneity of the outflow. Moreover, we propose a new interpretation with the UFOs for the spectral shape which previously explained with the extremely smeared disk reflection. By using our spectral model, we have successfully reproduce the observed spectra of the extreme "disk-line" source, and obtain a hint on the acceleration mechanism of the UFOs.