

輻射流体シミュレーションで迫る 活動銀河核アウトフローの起源



野村 真理子

東北大学理学研究科 天文学教室 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
e-mail: mariko.nomura@astr.tohoku.ac.jp

銀河中心に存在する超巨大ブラックホールは母銀河と互いに影響を及ぼしあいながら形成・進化してきたと考えられています。しかしながら、具体的な成長過程の解明には至っていません。活動銀河核は、星間空間へと放出する強力な輻射やジェットによってこの共進化を促している可能性があり、精力的に研究されてきました。近年の観測的研究によって、ジェットに匹敵する大きなエネルギーで多量のガスを放出する「超高速アウトフロー」が発見され、共進化を促進する重要な機構として注目を集めています。私たちは金属元素に働く輻射力によって加速される「ラインフォース駆動型円盤風」が超高速アウトフローの観測結果を非常によく説明することを明らかにしました。そして、円盤風が、大きな質量放出によってブラックホール成長を抑制していることを突き止めました。本稿では、活動銀河核アウトフローのこれまでの研究を概観したあと、私たちの最新の研究成果を紹介します。

1. はじめに

銀河の中心には、太陽の約百万倍以上の質量をもつ超巨大ブラックホール (supermassive black hole; SMBH) が存在することが観測から知られています。しかしながら、SMBHが宇宙初期に誕生した比較的小質量の種ブラックホールから、どのように形成・進化してきたのか、その過程はいまだに解明されていません。解決の糸口として注目されているのが、SMBHの質量と母銀河のバルジ質量との間の相関関係です^{1), 2)}。これはSMBHと母銀河が互いに影響を及ぼしながら「共進化」してきたことを示唆しています。

共進化を調べるうえで重要な天体が活動銀河核 (active galactic nuclei; AGN) です。AGNとは、銀河全体の明るさを凌駕する強力な輻射や、ジェットと呼ばれる細く絞られた高速プラズマ流を放出している銀河の中心核部分のことを指しま

す³⁾。AGNからの輻射やガス放出によるエネルギーや運動量の注入 (フィードバック) は母銀河の星形成に甚大な影響を与え、共進化を促してきた可能性があり、これまで精力的に研究が進められてきました。

近年の観測により、ジェットとは異なるアウトフローをもつAGNが発見され、フィードバックに大きく貢献している可能性が出てきました。本稿で紹介する研究は、このAGNアウトフローに着目しています。まず次章で、活動銀河核の標準的描像と、アウトフローの観測的特徴について紹介します。

2. 吸収線の発見とアウトフロー

強力な輻射やジェットをはじめとしたAGNの活動性の源は、中心核に存在するSMBHと周囲を取り巻くガス円盤 (降着円盤) であると考えられています。降着円盤の外側には円盤からの輻射

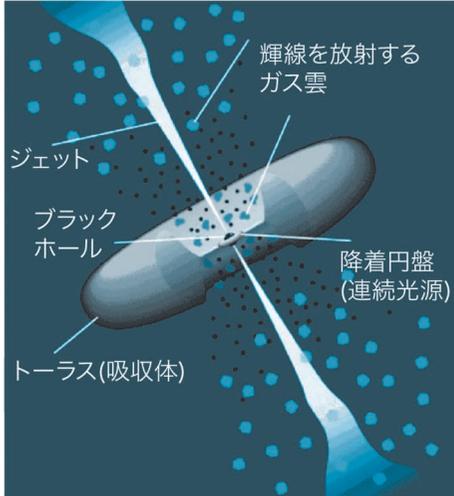


図1 AGNの標準的モデルの模式図³⁾。中心にブラックホールと降着円盤が位置しており、周囲には輝線を放射するガス雲とトーラスが分布しています。一部のAGNでは中心核から細く絞られたジェットが噴出しています。

によって電離され、輝線を放射するガス雲が分布しています。そして、その外側にはダストからなるトーラスが広がり、円盤からの輻射や輝線放射を吸収していると考えられています(図1)。これは現象論的な標準モデルであり、このモデルによって、一般的なAGNの輻射スペクトルに現れる観測的特徴(連続光、輝線、吸収)はよく再現されます。

しかしながら、新たに発見された、青方偏移した金属元素による吸収線は標準モデルのトーラスによる吸収では説明ができず、観測者方向へと加速されたアウトフローの存在を示唆しています(図2)。代表的な吸収線には、可視紫外域の波長帯に観測される青方偏移した幅の広い吸収線(broad absorption line; BAL)があります⁴⁾。この吸収線は主に、CIVやNVなどの中間的な電離状態の金属元素によるものであり、 $2,000 \text{ km s}^{-1}$ 程度の速度幅を示します。

さらに、一部のAGNのX線スペクトルには、高階電離状態の鉄(FeXXVやFeXXVI)による吸

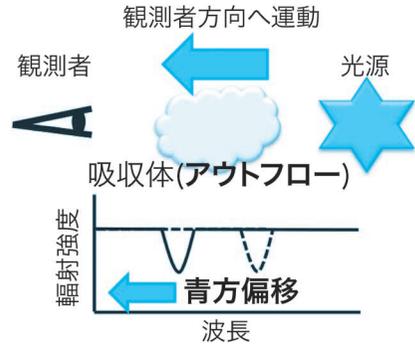


図2 アウトフローと青方偏移した吸収線の関係。光源から観測者方向へと運動するアウトフローは、ドップラー効果により、運動速度に応じて青方偏移した吸収線を生成します。

収線が発見されており^{5), 6)}、光速の0.1-0.3倍程度($\sim 30,000 \text{ km s}^{-1}$)に相当する非常に大きな青方偏移を示します。この吸収線によって示唆されるアウトフローは超高速アウトフロー(ultra-fast outflow; UFO)と呼ばれ、近傍のAGNの約半数に存在すると見積もられています。観測結果から、超高速アウトフローは、ジェットに匹敵する大きなエネルギーと膨大な質量を星間空間に排出していると考えられます⁷⁾。そのために、降着円盤からの多量なガスの引き抜きや、星間ガスの加熱、圧縮によってSMBHへのガス降着過程や、母銀河の星形成に影響を及ぼし、フィードバックに大きく寄与していることが期待されます。

以上のように、アウトフローは現状の標準モデルだけでは説明のつかない中心核構造を理解すると同時に、SMBHと母銀河の共進化過程を解明するうえでも非常に重要な現象であり、大きな注目を集めているのです。

3. ラインフォース駆動型円盤風

ここからは、前章で述べた超高速アウトフローに焦点を絞り、解説を進めたいと思います。超高速アウトフローの起源は降着円盤表面から噴出する円盤風であると考えられていますが、その加速

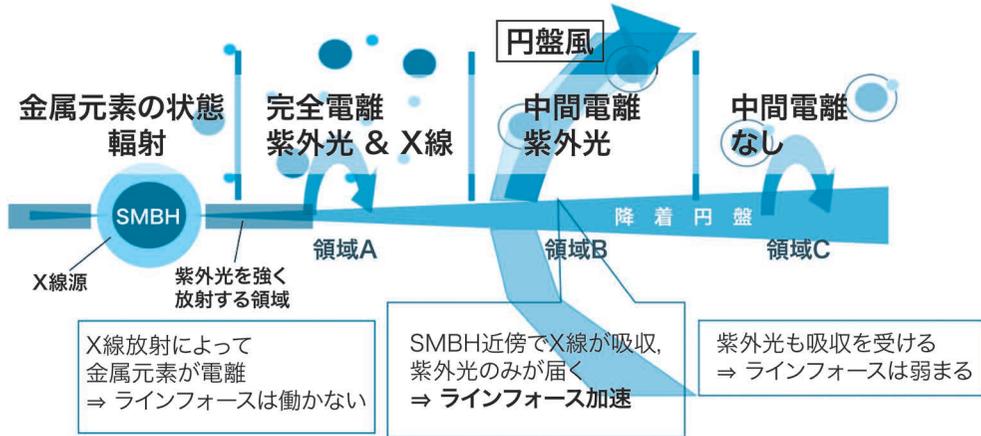


図3 ラインフォース駆動型円盤風の模式図. ラインフォース加速が起こりうるか否かは、金属元素の電離状態および紫外光の有無によって決まっており、円盤風は金属が完全電離しておらず（中間的な電離状態にあり）、紫外光が十分に届く領域（図中の領域B）から噴出すると期待されます。

メカニズムは何か、という論争には決着がついていないのが現状です。有力な加速メカニズムには、磁気圧、あるいは磁気遠心力で噴出する磁気駆動型円盤風⁸⁾⁻¹⁰⁾や、降着円盤からの強い輻射による輻射駆動型円盤風が考えられます。特に私たちが着目しているのが、金属元素が紫外光を束縛-束縛遷移吸収をする際に受ける「ラインフォース」と呼ばれる力によって加速される「ラインフォース駆動型円盤風」です。

この円盤風の加速メカニズムについて、模式図(図3)を用いて概観します。AGNでは、円盤コロナ(降着円盤上空に形成される高温低密度プラズマ)から放射される強いX線によって、SMBH近傍の金属元素はほぼ完全電離状態にあると考えられます。そのため、この領域では束縛-束縛遷移吸収は生じず、ラインフォースは働きません(図3中の領域A)。SMBHからやや離れると、X線が近傍の物質による吸収を受け弱められるために、金属元素の電離度は低くなります。したがって、この領域では束縛-束縛遷移吸収が起きやすく、ラインフォース加速によって円盤風が噴出すると期待されます(図3中の領域B)。さらに遠方では、紫外光も円盤風自身による吸収を受

け弱められるため、電離度は十分に低いものの、円盤風の噴出は起きないと考えられます(図3中の領域C)。以上のように、ラインフォースは低電離-中間的な電離状態にある金属元素を選択的に加速するため、円盤風の加速と、吸収線の生成を同時に説明できる可能性があります。これはほかのモデルにはない大きな特徴です。

ラインフォースは、金属元素の電離状態に加えて、速度勾配にも依存します。金属元素ガスが静止している場合、束縛-束縛遷移吸収では、ある決まった波長をもつ輻射しか吸収することができません。しかし、ガスが速度勾配をもつ場合(加速されている場合)ドップラー効果によって広い波長域の輻射を吸収することが可能です。

金属元素が低電離、かつ速度勾配が大きな場合、ラインフォースはトムソン散乱による輻射力の~100-1,000倍の大きさに達します。AGNの光度(AGNの放射の大部分は降着円盤からの放射であるため、円盤光度に相当します)は多くの場合エディントン光度(重力とトムソン散乱による輻射力が釣り合うときの光度)未満です。この場合、電子散乱による輻射力では、SMBHの重力を振り切って、円盤風を加速することは難しく

なりますが、ラインフォースであれば十分な加速が期待できるのです。

これまで、輻射流体計算を用いてラインフォース駆動型円盤風の加速メカニズムや構造が調べられてきました¹¹⁾⁻¹⁴⁾。しかしながら、円盤風の構造や質量放出率のブラックホール質量やエディントン比に対する依存性や、円盤風の噴出条件に関しては詳しく調査されていませんでした。

そこで、私たちはラインフォース駆動型円盤風の輻射流体シミュレーションをさまざまなブラックホール質量やエディントン比をもつAGNに対して行い、円盤風の有無や、その特徴を詳細に調べました。エディントン比とは、天体の光度（ここでは降着円盤の光度）をエディントン光度で割った量であり、質量降着率に比例します。降着円盤の温度や密度、輻射強度はブラックホール質量と質量降着率（エディントン比）で特徴づけられるため、この2つの量を変化させた計算を行うことで、さまざまな降着円盤に対して円盤風の様子を調べます。さらに、計算結果を観測結果と照らし合わせ、超高速アウトフローがラインフォース駆動型円盤風によって再現可能か否かを検証しました^{15), 16)}。次章では、私たちの用いた計算方法を概説し、シミュレーションによって明らかになった結果を紹介していきます。

4. 輻射流体シミュレーション

4.1 計算方法

本計算では、SMBHの重力、ラインフォースを含む輻射力、および輻射による加熱・冷却を考慮し流体のダイナミクスを計算していきます。境界条件として、極角 $\theta=90^\circ$ 平面は標準降着円盤¹⁷⁾の表面に対応すると仮定し、温度分布及び密度分布を与えます（つまり、本計算では降着円盤の構造や進化は解きません）。このような方法で、円盤表面から噴出する円盤風に着目したシミュレーションを行います。

ラインフォース駆動型円盤風を計算するうえで

特に重要となるのが輻射の取り扱い方です。本来、ラインフォースを求めるためには、さまざまな金属元素の電離状態や振動数に依存する輻射輸送を解く必要があります。しかしながらそれらを流体のダイナミクスと同時に計算することは非常に高度かつ計算コストの高い課題であり、現実的ではありません。そこで本計算では、先行研究に倣い、以下のような工夫を行っています。

まず、輻射の振動数を細かく分割せず、ラインフォースに寄与する紫外光と、金属元素を電離してラインフォース加速を妨げるX線の2色のみに分割することとします。紫外光 ($300 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 3,200 \text{ \AA}$) は標準降着円盤から、X線はSMBH近傍の円盤コロナから放出されていると考え、X線源は原点に位置する点光源として近似します。

次に、フォースマルチプライア^{18), 19)} と呼ばれる関数を用いることでラインフォースを近似的に評価します。ラインフォースを含む輻射力は

$$f_{\text{rad}} = \frac{\sigma_e F_D}{c} + \frac{\sigma_e F_{UV}}{c} M \quad (1)$$

と表されます (σ_e はトムソン散乱係数、 c は光速、 F_D は降着円盤からの輻射フラックス、 F_{UV} は $300 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 3,200 \text{ \AA}$ を満たす降着円盤からの輻射フラックス)。ここで、1項目はトムソン散乱による輻射力、2項目はラインフォースであり、係数 M がフォースマルチプライアです。フォースマルチプライアは電離パラメータ ($\xi = 4\pi F_X/n$, F_X はX線のフラックス、 n は個数密度) と密度、光線に沿った速度勾配の関数であり、ラインフォースが電子散乱のみを考慮した輻射力と比べ、何倍大きいかを示す量になっています。これを用いることで、個々の元素の電離状態や振動数に依存する複雑な輻射輸送過程を近似的に扱い、ラインフォースの評価をすることが可能になります。先に述べたように、ラインフォースは低電離-中間的な電離状態の金属元素に作用する力であり、物質の運動に伴うドップラー効果によって幅広い波長域の輻射を吸収し、効率の良い加速を実現していま

す。そのため、フォースマルチプライアは、電離パラメータ ξ が小さく、速度勾配が大きいほど、大きな値をもつ傾向にあります。

4.2 計算結果

シミュレーション結果を紹介します。まず、ブラックホール質量 $M_{BH}=10^8 M_{\odot}$ 、エディントン比 $\epsilon=0.5$ を適用した場合の結果を例に、円盤風の構造を見ていきます。密度および速度ベクトルの空間分布(図4)をみると、SMBHからおよそ40-50シュワルツシルト半径(R_S)離れた降着円盤の表面から、開口角70-80°のすり鉢状の円盤風が噴出している様子がわかります。ここで、円盤風の速度は光速のおよそ10%に達しています。

円盤風を構成する物質は、まず、自身の足元(〜40-50 R_S)に広がる円盤からの放射によっておよそ鉛直方向に加速されます。その後、中心近傍(≦40 R_S)に広がる円盤の高温領域からの強い放射と遠心力によって、物質は動径方向へと加速されていきます。加速領域では、紫外光の放射フラックスが大きいことに加えて、電離パラメータが小さく、フォースマルチプライアの値は100程度に達しています。このことから、ライン

フォース加速によってすり鉢状の高速円盤風が発生することがわかりました。

ここからは、計算結果をX線観測と照らし合わせ、ラインフォース駆動型円盤風モデルの検証を進めていきます。まず、アウトフローの視線方向の速度、電離状態、柱密度に着目して観測との比較を行います。具体的には、X線観測の結果⁶⁾に基づき、超高速アウトフローの特徴が示す二つの条件、(1) 中間電離状態の物質の最高速度が10,000 km s⁻¹以上であること。(2) 柱密度が10²² cm⁻²以上であることをシミュレーション結果が満たすか否かを、観測角度 $\theta=0$ (z軸の方向)から90°(円盤の方向)までの視線方向について検証しました。

その結果、観測角度 $75^\circ \leq \theta \leq 86^\circ$ の範囲で条件(1) および(2) が満たされ、超高速アウトフローの観測的特徴が再現されることがわかりました。この領域は、円盤表面付近で脱出速度を超えるまで加速された円盤風が、中心核からのX線放射によって高階電離されている領域に対応しています。観測角度 $\theta \leq 75^\circ$ では、高速で噴出するアウトフローは存在せず、物質はほぼ完全電離状態にあるため、条件は満たされません。円盤表面付近($\theta \geq 86^\circ$)は、物質が鉛直方向に打ち上げられ、徐々に動径方向へと加速していく領域に対応しているため、動径方向(視線方向)の速度成分が小さいこと、および電離パラメータが小さいことから、条件は満たされません。条件を満たす立体角を Ω_{UFO} として、超高速アウトフローの検出確率 $\Omega_{UFO}/4\pi$ を求めると、およそ20%となります。

同様な計算をさまざまなブラックホール質量およびエディントン比をもつAGNに適用した結果、 $M_{BH}=10^6-10^9 M_{\odot}$ および $\epsilon \geq 0.1$ の広い範囲のエディントン比で、超高速アウトフローを検出する確率が13-28%となることがわかりました。

次に、超高速アウトフローの質量・運動量・エネルギーの放出率を観測と比較します。近年のX線観測によって、超高速アウトフローの質量・

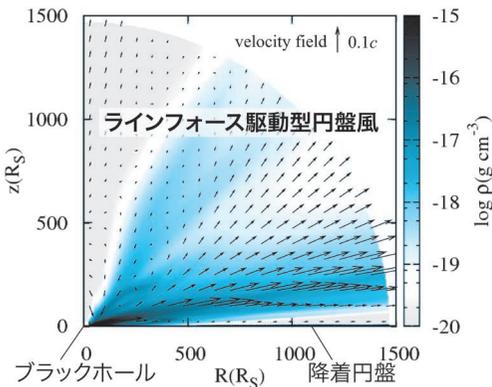


図4 ブラックホール質量 $M_{BH}=10^8 M_{\odot}$ およびエディントン比 $\epsilon=0.5$ のAGNに対するシミュレーション結果。色は密度分布を、ベクトルは速度場を表しています。図中のz軸は降着円盤の回転軸に対応し、Rは回転軸からの距離を表しています。

運動量・エネルギー放出率がAGN光度に依存するという重要な特徴が発見されました²⁰⁾。ここでは、速度・電離状態・柱密度の基本的な物理量に加えて、この特徴がラインフォース駆動型円盤風によって再現可能か否かを調べていきます。

質量・運動量・エネルギーの放出率は、計算領域の外縁において、

$$\dot{M}_w = 4\pi r^2 \int_0^{89^\circ} \rho v_r \sin\theta d\theta \quad (2)$$

$$\dot{p}_w = 4\pi r^2 \int_0^{89^\circ} \rho v_r^2 \sin\theta d\theta \quad (3)$$

$$\dot{E}_w = 4\pi r^2 \int_0^{89^\circ} \frac{1}{2} \rho v_r^3 \sin\theta d\theta \quad (4)$$

と評価しています。ブラックホール質量 $M_{BH} = 10^6 - 10^9 M_\odot$ 、エディントン比 $\epsilon = 0.1 - 0.5$ を用いたシミュレーション結果について、これらの物理量を求め、降着円盤の光度（観測結果のAGN光度に対応）に対してプロットしたものが図5です。

質量・運動量・エネルギー放出率のすべてのプロットにおいて、計算結果（黒実線および黒破線）は、観測結果（青の一点鎖線で示したベストフィット直線および水色で示した90%信頼区間）とよく重なっていることがわかります。特に、エディントン比一定の黒実線の傾きは、観測に基づくベストフィット直線の傾きと非常に近い値を示しており、光度依存性の起源がブラックホール質量依存性で説明できることを示唆しています。

以上の観測の結果をまとめると、ラインフォース駆動型円盤風は、 $M_{BH} = 10^6 - 10^9 M_\odot$ および $\epsilon \geq 0.1$ の範囲で、超高速アウトフローを特徴づける、速度、電離パラメータ、柱密度、および質量・運動量・エネルギー放出率の光度依存性という観測結果を再現していることがわかります。シミュレーションに基づく観測確率の見積もり（13-28%）は現在までに超高速アウトフローの有無が調べられたAGNの総数が少ないことを考えると、観測結果（~40%）と矛盾しない値であると言えます。加えて、質量・運動量・エネルギー放出率の

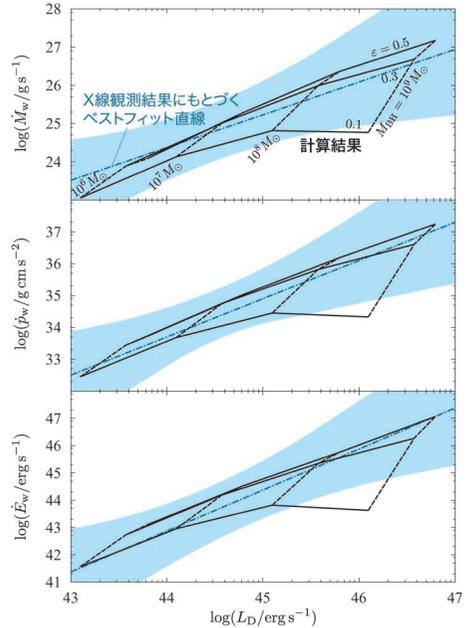


図5 質量放出率（上）、運動量放出率（中央）、エネルギー放出率（下）の光度依存性。各々の図において、黒実線はエディントン比を $\epsilon = 0.1, 0.3, 0.5$ で一定とした場合の計算結果を、黒破線はブラックホール質量を $M_{BH} = 10^6 M_\odot, 10^7 M_\odot, 10^8 M_\odot, 10^9 M_\odot$ で一定とした場合の計算結果を示しています。青の一点鎖線および水色で示した領域は、X線観測結果²⁰⁾のベストフィット直線および90%信頼区間を表しています。

光度依存性がラインフォース加速に由来するブラックホール質量依存性で説明できることは、超高速アウトフローの起源がラインフォース駆動型円盤風であることを強く示唆しています。

5. SMBH進化過程への影響

これまで紹介してきた研究成果により、ラインフォース駆動型円盤風が超高速アウトフローを良く再現する有力モデルであることがわかってきました。ここでは、このモデルを用いて、超高速アウトフローがSMBHの進化過程に及ぼす影響を議論したいと思います。

これまでの計算では、エディントン比が比較的小さなAGNに着目してきました。しかし、

SMBHの成長を議論するためには、エディントン比が大きなAGN、すなわち、多量のガスが中心核へと供給されている場合も考える必要があります。降着率が大きい場合には、円盤風による質量放出率が非常に大きいため、降着率の減少とそれに伴う円盤の温度や密度の変化は無視できません。そこで、ここでは現状のモデルを発展させ、円盤風噴出による降着率の変化を考慮した新モデルを構築し、SMBHの進化過程において円盤風が担う役割を定量的に議論します。

新しいモデルでは、ブラックホール質量と円盤への質量供給率 (\dot{M}_{sup}) を仮定し、円盤風の構造、質量放出率 (\dot{M}_w)、質量降着率 (\dot{M}_{acc})、そしてそれによって決まる円盤の温度および密度を、自己矛盾がないように計算しています。この計算によって得られた質量降着率および放出率の質量供給率依存性を図6に示しました。これを見ると、円盤風による質量放出率、およびSMBHへと落下する質量降着率共に質量供給率の上昇とともに増加している様子がわかります。質量供給率が低い場合には、質量放出率は小さく、円盤に供給された質量のほとんどがSMBHへ降着していることがわかります。一方で、質量供給率が高い場合は、質量放出率は、供給率のおよそ半分以上となっており、それに応じてSMBHへの質量

降着率は半分以下に減少しています。これは、ラインフォース駆動型円盤風が、SMBHへの質量降着を抑制していることを示しています。

ラインフォース駆動型円盤風による降着抑制は、進化のどの段階で起きるのでしょうか。図7はSMBHと母銀河の共進化を、縦軸に金属量の進化、横軸にブラックホール質量をとって模式的に示したものです。金属量の増加は、銀河進化に対応しています。ラインフォースが働くためには、十分な金属量と、紫外光で明るく輝く円盤が必要不可欠です。したがって、まず、母銀河では星形成が進み、金属元素が十分に作られていなければなりません。そして、円盤が紫外光で明るく輝くためには、およそ $10^7 M_{\odot}$ 以上の大きなブラックホールが必要となります。つまり、ラインフォース駆動型円盤風は母銀河、SMBH共に成長が進んだ、進化の最終段階で発生し、降着率を減少させることで、SMBHの成長にブレーキをかける役割を担っている可能性があります。

ラインフォース駆動型円盤風は、SMBHへの質量降着に直接影響を及ぼすのみならず、母銀河へのフィードバックにも寄与していると考えられます。計算結果から、円盤風による星間空間へのエネルギー放出率は、円盤光度 (AGN光度) の ~4-30% と見積もられます。AGN光度の0.5%以上のエネルギー放出があれば、母銀河の環境に影響を与えると予想されていることから²¹⁾ 私たちの見積もった値は、ラインフォース駆動型円盤風が、フィードバックに大きく寄与していることを示唆しています。加えて、最近のシミュレーションによって、円盤風が星間物質にフィードバックを及ぼす様子がわかってきています²²⁾。

6. まとめと今後の展望

私たちは、ラインフォース駆動型円盤風の輻射流体シミュレーションを行い、さまざまなブラックホール質量およびエディントン比をもつAGNについて、超高速アウトフローのX線観測との比

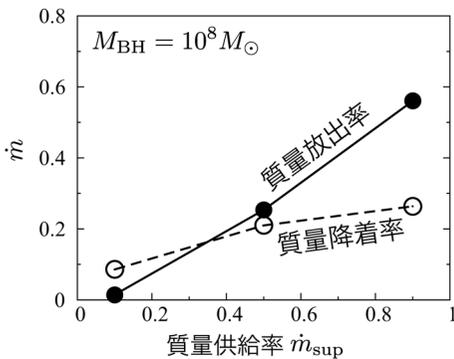


図6 質量放出率および降着率の質量供給率依存性。実線は質量放出率を、破線は質量降着率を示しています。値はそれぞれ、エディントン光度の定数倍で規格化しています。

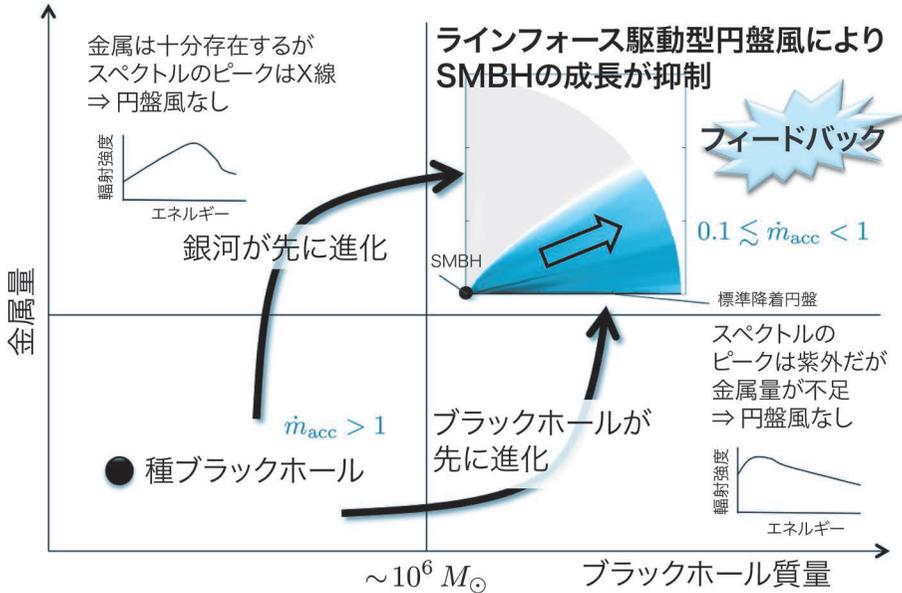


図7 SMBHと銀河の進化過程におけるラインフォース駆動型円盤風の役割。縦軸は金属量、横軸はブラックホール質量を示しています。進化過程（SMBHと銀河のどちらが先に進化するか）によらず、進化の最終段階でラインフォース駆動型円盤風が発生し、質量降着率を減少させることで、SMBHの成長を抑制すると考えられます。

較を行いました。その結果、 $M_{BH}=10^6-10^9 M_{\odot}$ 、および $\epsilon \geq 0.1$ の広い範囲でラインフォース駆動型円盤風が噴出することがわかりました。シミュレーション結果は、超高速アウトフローの速度、電離状態、柱密度、および質量・運動量・エネルギー放出率の光度依存性を非常によく再現しており、これは、超高速アウトフローの起源がラインフォース駆動型円盤風であることを強く支持する結果です。

さらに、ラインフォース駆動型円盤風がSMBHの進化過程に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを目的に、エディントン比が大きなAGNに計算を適用するためモデルを改良しました。その結果、円盤への質量供給が小さい場合には、供給されたほぼ全ての質量がSMBHへと降着しますが、質量供給が大きい場合には、供給された質量の半分以上がアウトフローとして噴出されるということを明らかにしました。これはラインフォース駆動型円盤風によるSMBH成長の抑制効果を

示すものであり、この効果は十分な金属量と紫外光で明るく輝く降着円盤をもつSMBH進化の最終段階で起こると考えられます。以上のように、超高速アウトフローがSMBH進化の過程で担う役割が、徐々に明らかになってきています。

今回私たちは、計算結果と吸収線観測から得られた様々な観測の特徴とを比較しました。さらなる理論モデルの検証のためには、実際に観測されている鉄吸収線を再現できるか否かを、シミュレーション結果にもとづいた輻射輸送計算によって明らかにすることが必要です。

また、今回は触れなかったアウトフローの重要な性質として、時間変動が挙げられます^{23), 24)}。時間変動の起源はまだ明らかになっていませんが、有力な起源の一つとして、アウトフローの非軸対象構造やクランピー構造が考えられています。これまでに、1次元や2次元計算によって、ラインフォース駆動型円盤風の密度の非一様構造の生成が報告されています^{11), 25)}。また、3次元計

算によって、激変星で発生するラインフォース駆動型円盤風の非軸対象構造について研究が始まっています²⁶⁾。今後、AGNで発生するラインフォース駆動型円盤風に対しても3次元計算を行い、クランピー構造の有無を明らかにするとともに、観測されている吸収線の時間変動の起源となりうるのか、検証が必要です。

最後に、SMBHの成長・進化過程をより深く追求するため、質量降着率がさらに大きい場合（エディントン限界以上）に計算を適用することも重要です。エディントン限界を超えた降着率をもつ明るい天体においては、電子散乱による輻射力が主たる加速力を担うと考えられます²⁷⁾⁻²⁹⁾。これまで、超臨界降着流の研究では、ラインフォースは考慮されていませんでしたが、ブラックホールから離れた紫外光で明るい領域では、ラインフォースの寄与が重要である可能性があります。広い降着率の範囲でアウトフローを包括的に捉えるため、ラインフォースを考慮した超臨界降着流のシミュレーションは重要な課題の一つです。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、2016年と2017年に筆者らが発表した投稿論文^{15), 16)}および現在投稿準備中の論文に基づいています。本稿で紹介した研究成果が得られるまでに、共同研究者である、大須賀健氏、高橋博之氏、和田桂一氏、吉田鉄生氏、Chris Done氏には、繰り返し議論の機会を設けていただき、有益なコメントをたくさんいただきました。改めて御礼申し上げます。また、原稿執筆の機会をくださった富永望氏、滝脇知也氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Magorrian, J., et al. 1998, AJ, 115, 2285
- 2) Marconi, A., & Hunt, L. K., 2003, ApJ, 589, L21
- 3) Urry, C. M., & Padovani, P., 1995, PASP, 107, 803
- 4) Weymann, R. J., et al. 1991, ApJ, 373, 23
- 5) Tombesi, F., et al. 2010, A&A, 521, A57

- 6) Tombesi, F., et al. 2011, ApJ, 742, 44
- 7) Tombesi, F., et al. 2012, MNRAS, 422, L1
- 8) Blandford, R. D., & Payne, D. G., 1982, MNRAS, 199, 883
- 9) Everett, J. E., & Murray, N., 2007, ApJ, 656, 93
- 10) Fukumura, K., et al. 2015, ApJ, 805, 17
- 11) Proga, D., & Kallman, T. R., 2004, ApJ, 616, 688
- 12) Proga, D., et al. 2000, ApJ, 543, 686
- 13) Risaliti, G., & Elvis, M., 2010, A&A, 516, A89
- 14) Nomura, M., et al. 2013, PASJ, 65, 40
- 15) Nomura, M., et al. 2016, PASJ, 68, 16
- 16) Nomura, M., & Ohsuga, K., 2017, MNRAS, 465, 2873
- 17) Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A., 1973, A&A, 24, 337
- 18) Castor, J. I., et al. 1975, ApJ, 195, 157
- 19) Stevens, I. R., & Kallman, T. R., 1990, ApJ, 365, 321
- 20) Gofford, J., et al. 2015, MNRAS, 451, 4169
- 21) Hopkins, P. F., & Elvis, M., 2010, MNRAS, 401, 7
- 22) Asahina, Y., et al. 2017, ApJ, 840, 25
- 23) Misawa, T., et al. 2007, ApJ, 660, 152
- 24) Tombesi, F., et al. 2012, MNRAS, 424, 754
- 25) Owocki, S. P., & Puls, J., 1999, ApJ, 510, 355
- 26) Dyda, S., & Proga, D., 2018, MNRAS, 475, 3786
- 27) Ohsuga, K., et al. 2009, PASJ, 61, L7
- 28) Ohsuga, K., & Mineshige, S., 2011, ApJ, 736, 2
- 29) Kobayashi, H., et al. 2018, PASJ, 70, 22

Radiation Hydrodynamics Simulations for AGNs: Origin of Ultra-Fast Outflows

Mariko NOMURA

Astronomical Institute, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: Supermassive black holes located in the center of galaxies are thought to evolve under strong interaction with their host galaxies. Their detailed evolution process is, however, still unknown. Active galactic nuclei, which may enhance “co-evolution” via the energetic radiation and the jet, have been actively researched. Recent observations found “ultra-fast outflows” that ejects a large amount of gas and energy comparable to the jet, and these outflows attract a lot of attention. With radiation hydrodynamics simulations, we revealed that one of the plausible models, “line-driven disk winds,” well reproduces the observations of the ultra-fast outflows and emits a sufficient amount of gas and energy to affect the evolution process of black holes.