

令和 2 年 4 月 1 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 2018

受付番号 201860015

氏 名 水本 岬希

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地(派遣先国名)用務地: Durham (国名: 英国)

2. 研究課題名(和文) ※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

活動銀河核アウトフローの多波長観測から迫る銀河成長プロセスの解明

3. 派遣期間: 平成 30 年 4 月 1 日 ~ 令和 2 年 3 月 21 日

4. 受入機関名及び部局名

Department of Physics, University of Durham

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意

書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入

も可)

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

現在の天文学が抱える重要な未解決問題の一つが、「銀河バルジとブラックホールの共進化」である。銀河バルジの質量と、銀河核中心に位置するブラックホールの質量には、正の相関があることが知られている。このことから、両者は共に進化してきたと考えられている。しかし、銀河の約0.1%の質量しかないブラックホールが銀河全体の進化を支配していることは驚きであり、その理由は未だわかっていない。

ブラックホールが銀河全体に影響を与える手段として、X線で観測される「超高速アウトフロー（UltraFast Outflow; 以下UFOと略す）」が考えられている。UFOとはブラックホール中心から光速の数十%の速度でガスが吹き出す現象のことである。このシナリオでは、UFOの有する莫大な力学的エネルギーにより銀河に負のフィードバックがかかることで銀河の成長が抑制される。

銀河内を進むUFOは星間物質との間で力学的相互作用を起こして衝撃波を作ると考えられている。UFOが衝撃波の前に放射によって冷えてしまうと、母銀河にエネルギーを十分に伝えられずに共進化に寄与しない（運動量保存衝撃波）。逆に放射冷却が効かない場合は、母銀河に力学的エネルギーがそのまま伝えられるので、共進化に寄与する（エネルギー保存衝撃波）。すなわち、UFOが作る衝撃波の種類を調べることで、共進化への影響を評価することができる。そこで、UFOの作る衝撃波の種類を調べることで、UFOがどのような時に共進化に寄与するのかを明らかにすることを試みた。

X線観測から衝撃波の種類を求めることは困難であるため、UFOが衝撃波を通過した先の姿である「分子アウトフロー」に着目した。分子アウトフローは、低温の分子ガスが数百pc程度の広がりを持って吹き出す現象であり、遠赤外線や電波によって様々な活動銀河核で観測されている。この分子アウトフローが銀河バルジへと届き、星生成を止めることで超新星爆発が作る乱流による角運動量の引き抜きを抑制し、ブラックホールへの質量降着を阻害すると考えられている。そこで、UFOの運動エネルギーと分子アウトフローの運動エネルギーを比較することで、UFOの運動エネルギーがどのような時に分子アウトフローへと効率よく流れ込んでいるか、すなわちどのような時にUFOは銀河進化に寄与しうるかを調べることにした。

分子アウトフローの運動エネルギーは、仏・ミリ波電波天文学研究所（IRAM）の運用するビュール高原電波干渉計（PdBI）によって取得された電波観測データから求めた。PdBIは北天では最高の角度分解能を持っており、比較的近い活動銀河核においてMOを空間的に分離することが可能である。IRAM/PdBIで分子アウトフローが検出された天体に対し、X線衛星XMM-NewtonとSuzakuの観測データを網羅的に調べ、UFOの検出および運動エネルギーの導出を行なった。結果として、6天体で分子アウトフローとUFOの運動エネルギーの比較を行い、エディントン比が大きいほど輸送効率が高いことが明らかになった。このことは、質量降着が激しく起こって明るく輝くブラックホール形成の初期段階において、UFOが共進化により寄与しやすいことを意味している。このような相関は理論的には予測されていた（Riching et al. 2018）が、申請者らによって初めて観測的に示された。また、多くの天体で「UFOの運動エネルギー $\geq$ 分子アウトフローの運動エネルギー」が成立していることが分かった。加えて、エネルギー輸送効率は0.007から1の範囲にあり、これはUFOが作りうる衝撃波の理論予測と一致することも明らかになった。この研究成果は学術誌にて発表した（Mizumoto et al. 2019, *Astrophysical journal*, 871, 156）。

上の研究を行うにあたり、UFOの運動エネルギーを正確に求める必要があった。しかし、UFOがどこから吹いているか、その位置やサイズ（立体角）については、観測・理論の両面からさまざまな研究がなされているものの、確固たる描像はまだ得られていなかった。そこで、

「X線スペクトルの時間変動を鍵にして UFO のジオメトリに制限をつける」ことを試みた。

中心ブラックホール近傍の X 線放射領域から放射された X 線光子は、降着円盤や円盤風といった周囲の物質と相互作用する。主な作用は光電吸収であり、確率的に蛍光輝線を伴う。そのうち、宇宙組成と K 殻蛍光収率の大きさから、鉄 K 輝線 (6.4~keV) が最も顕著に現れる。また、この輝線は相互作用を起こす物質の運動によって広がる。そのため、多くの活動銀河核の X 線スペクトルでは、幅の広い鉄 K 輝線が観測される。最近になり、鉄 K 輝線周辺の X 線光子が、周囲のエネルギーバンドの光子よりも遅れて観測されることが観測的に明らかになった。これは、反射成分が直接成分よりも長い光路を通ることに起因する時間遅れ (reverberation lag) と解釈される。この時間遅れのタイムスケールは数 R_g/c から数十 R_g/c 程度 (R_g は重力半径、 c は光速) であり、このことは反射体がブラックホールの近くに存在することを示している。また、時間遅れスペクトル (時間遅れのエネルギー依存性) を調べると、エネルギースペクトルと同様に広がった輝線的構造が観測されることが分かった。これらの時間変動を手掛かりに、中心ブラックホール近傍の反射体のジオメトリを調べることを試みた。

そこで、円盤風が X 線を反射した時にどのような時間遅れが起こるかを、モンテカルロ法によるシミュレーションを用いて計算した。時間変動のタイムスケールから、反射体は中心から $100R_g$ 以内の位置に存在する必要があるが、光電離した円盤風モデルを用いて計算をしたところ、中心から $100R_g$ 以内の円盤風には水素様、ヘリウム様の鉄イオンが多く存在しているため、これらの鉄イオンが共鳴散乱を起こし、6.7-7.0 keV に輝線が作られることがわかった。この共鳴散乱が光速の 20% ほどの速度を持つ円盤風で起こるため、輝線はドップラー効果で広がる。結果として、円盤風での反射によって、時間遅れがもつ観測的特徴が綺麗に説明できることが分かった。

我々の構築した「円盤風反射モデル」を、Ark 564 と 1H 0707-495 という二つの天体に適用させた。まず、Ark 564 のエネルギースペクトルには幅の広い鉄輝線が見受けられ、これは円盤風の反射によってよく説明できる。鉄輝線の等価幅が小さいことから、円盤風の立体角も小さいことがわかる。また、吸収線が見受けられないことから、視線上に円盤風は存在せず、face-on に近い角度からこの天体を見ていることがわかる。続いて、6-9 keV の光子が周囲のエネルギーバンドに比べて数十秒程度遅れてやってくる「時間遅れ」は、直接届く成分に対して円盤風の反射成分が遅れてやって来ることによって説明される。Ark 564 においては、エネルギースペクトルと同様に立体角の小さい円盤風で説明できる。一方、1H 0707-495 のエネルギースペクトルには、幅の広い鉄輝線に加えて深い吸収線が見えている。そのため、この天体は edge-on に近い角度から見ていることがわかる。鉄輝線の等価幅は大きいため、円盤風の立体角も大きい。時間遅れのエネルギー依存性も同様に大きな立体角を必要とする。このように、申請者の構築したモデルを使えば、見た目が異なる二つの活動銀河核のエネルギースペクトルと時間遅れスペクトルを、視線角度と円盤風の立体角を変えることで説明することが可能である。本結果は学術誌 (Mizumoto et al. 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 482, 5316) および国際学会にて発表した。

いっぽう、このモデルによって観測事実のすべてを説明できない天体があることも明らかとなった。NGC5506 という天体にこのモデルを当てはめたみたところ、円盤風による吸収構造はうまく説明できたものの、エネルギースペクトルと時間遅れの両方において、円盤風での散乱による鉄輝線が観測結果より 10 倍程度小さくなることがわかった。この問題を解決するために、鉄輝線とその時間遅れが降着円盤最内縁での相対論的反射によるものではないかという対立シナリオの検証を行ったが、同じく鉄輝線の強度を再現するには至らなかった。このことから、本天体においては円盤風による相互作用と降着円盤最内縁での相対論的反射の両方が起

こっている可能性が高いと結論づけた。このように、本研究課題にはまだ今後の発展の余地が残されている。本結果は学術誌 (Zoghbi, Kalli, Miller, Mizumoto 2020, *Astrophysical journal*, accepted) にて発表した。

上の研究では、簡単な数式で表される単純な円盤風ジオメトリを仮定していた。だが、円盤風の輻射流体シミュレーションは、細かな粗密構造を持つ複雑な円盤風ジオメトリを要求している。そこで、実際に輻射流体シミュレーションから得られた円盤風の空間構造に基づいてX線スペクトルを合成することを試みた。結果として、このような円盤風は複数の速度構造を持つ複雑な吸収線プロファイルをX線エネルギー上に作ることを示した。加えて、現在使われている（エネルギー分解能の悪い）CCD検出器ではこの複雑な構造は分解することができず一つの大きな吸収線としてしか見ることができないが、次世代X線望遠鏡（XRISMやAthena）で使われる（エネルギー分解能の良い）マイクロカロリメータを使えばこの複雑な構造は一つ一つ分解することができることを示した。我々の構築したX線スペクトルモデルは観測を良く再現でき、しかも円盤風の質量損失率や運動エネルギーを正確に導出することができることが判明した。将来的なマイクロカロリメータ観測に我々の構築したモデルを適用することで、UFOの運動エネルギーが正確に求まり、分子アウトフローへのエネルギー輸送の様子も正確に描写することが可能となる。本結果は学術誌に投稿しており、現在査読結果を待っている。

ブラックホール近傍から吹き出すガスとして、UFOの他に「暖かい吸収体 (Warm Absorber; 以下WAと略す)」があげられる。WAはUFOより低電離かつ低速なアウトフローであり、UFOほどの運動エネルギーはないと考えられているが、UFOよりも多くの天体で普遍的に見られているものであり、それが銀河進化にどのような影響を与えるかは詳しく調べられていなかった。また、WAの駆動源はわかっていなかった。我々は、ブラックホールからの輻射が周辺のガスを温めることで駆動される「熱駆動型アウトフロー」がWAの正体ではないかと考えた。輻射がガスを温めることで、ガスにエネルギーが蓄えられ、それがブラックホールの束縛エネルギーを超えるとアウトフローが吹く、というシナリオである。だが、このシナリオには一つ致命的な問題点が存在していた。このシナリオに沿った場合、温められるガスは中心から $10^4 R_g$ 程度離れている必要がある、しかし、降着円盤の半径は一声 $10^3 R_g$ 程度であるため、温められなくてはならないガスが存在しないことになる。そこで我々は、温められるガスは降着円盤ではなく、より外側にある広輝線領域雲 (Broad line region cloud; BLR cloud) あるいはトーラスであると考えた。そこで、BLR cloudやトーラスから熱駆動型アウトフローがどの程度生じるかを理論的に計算して求めることを試みた。

熱駆動型アウトフローを計算するためには、ブラックホールからの輻射を広帯域（可視光から硬X線まで）でモデリングする必要がある。我々はKubota & Done (2018)によって構築されたSpectral Energy Distribution (SED)モデルを用いることで、ブラックホールからの輻射のブラックホール質量と質量降着率の依存性を組み込んだ熱駆動型アウトフローの理論計算を行うことに成功した。結果として、観測されているWAの柱密度、電離パラメータ、速度はBLR cloudやトーラスからの熱駆動型アウトフローで上手く再現できることを試みた。また、WAは比較的暗くて軽いブラックホールによく見つかることが知られていたが、その性質も説明することに成功した。これによりWAの観測事実をすべて説明できる駆動機構を提唱することに成功した。また、質量が軽いブラックホールにおいては、ブラックホールへの質量降着率に匹敵するほどの大量のガスがWAとしてブラックホール近傍から流出していることがわかった。一方で、WAの速度は遅いため運動エネルギーはやはり小さく、銀河進化に影響を及ぼさないこ

とが明らかとなった。本結果は学術誌（Mizumoto et al. 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 489, 1152）にて発表した。

以下、本研究成果のまとめを記す。

銀河中心にあるブラックホールは、アウトフローの形で銀河に力学的エネルギーを受け渡すことで銀河の物理的・化学的進化を制御していると考えられている。しかし、このシナリオを検証するためには、アウトフローの力学的エネルギーを定量的に評価する必要がある。そのためには、アウトフローの加速機構を解明し、そのジオメトリを知ることが不可欠である。我々は多波長観測および観測と理論の比較といった手段によってこの問題を解決することを試みた。

まず、ブラックホールの近くから吹き出す超高速アウトフロー（UltraFast Outflow; UFO）が、銀河スケールの大きなサイズを持つ分子アウトフローへといたるまでの道筋を、X線と電波（ミリ波サブミリ波）の観測によって調べた。結果として、UFOが分子アウトフローを駆動していると考えて矛盾しないことが明らかとなった。次に、UFOの加速機構とジオメトリを知るために、円盤風がUFOの正体であると仮定して、その仮定に基づいた単純なジオメトリを想定したモンテカルロシミュレーションを行うことで、X線エネルギースペクトルと時間遅れを計算した。その結果を観測と比較した結果、仮定は妥当であるという結論を得た。続けて、用いたジオメトリを単純なものから輻射流体シミュレーションによって得られた複雑なものに置き換えて再度計算をし、観測結果と一致することを確認した。本計算によりUFOが作る吸収線構造は複数の速度構造を持つ複雑なものであることが示唆されたが、その構造は次世代X線望遠鏡で分解可能であることが明らかとなった。これにより、UFOの運動エネルギーを正確に求めるための手法を確立した。加えて、UFOのほかにブラックホール近傍から吹き出すアウトフローである「暖かい吸収体（Warm Absorber; WA）」の駆動機構は熱駆動であることを明らかにし、WAが銀河進化に影響を及ぼさないことを示した。以上の結果により、アウトフローの銀河進化への寄与を定量的に評価することが可能となった。