

博士論文審査の結果の要旨

氏名	伊東 大輔
学位名	博士 (理学)
学位番号	甲 第 1 3 3 号
論文題目	キューサーアウトフローに対する幾何学的分布の調査
論文審査委員	主査 三澤 透 加藤 千尋 長谷川 庸司 青木 賢太郎 (すばる望遠鏡) 川口 俊宏 (尾道市立大学)

(博士論文審査の結果の要旨)

本論文は、銀河と銀河中心巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) の共進化において重要な役割を果たすことが期待されるガス流 (アウトフロー) について、その幾何学的分布を統計的に調査したものである。従来アウトフローの研究には、線幅の大きい吸収線 (Broad Absorption Line; BAL) が用いられてきたが、本研究では線幅の狭い吸収線 (Narrow Absorption Line; NAL) を対象としているところがユニークな点である。特殊な解析により、アウトフローに起源をもつ NAL (intrinsic NAL) のみを同定し、それらが角度方向、動径方向ともに従来考えられていたよりも広く分布していることを確認した。アウトフローの幾何学的モデルに修正を加えるとともに、共進化に対するアウトフローの重要性を確認した研究である。

SMBH の重力ポテンシャルによって引き込まれたガスは、降着円盤の形成を通してもともと保持していた重力エネルギーを、運動、熱、そして輻射エネルギーへと変換することにより、莫大な光度を放つ。このフェーズにある天体のうち、特に明るいものがキューサーである。キューサーからの強烈な輻射圧によって加速されたアウトフローが、どの方向にどの距離まで広がっているのかは、銀河と SMBH の共進化を探るうえで欠かせない情報である。しかし従来のアウトフロー研究は、BAL を有する少数派のキューサーをターゲットとしていたため、統計量が限られるだけでなく、サンプリングにバイアスがかかることが指摘されていた。第 1 章では、このような研究背景とともに、キューサーの放射メカニズム、吸収線の物理、吸収線から得られる物理量の評価方法などについて丁寧にまとめられている。

第 2 章ではデータの解析手法について詳細に述べられている。NAL の中にはアウトフローに起源を持つもの (intrinsic NAL) だけでなく、手前にある銀河、あるいは銀河間物質に起源をもつもの (intervening NAL) が含まれている。このうち前者のみを効率よく同定する手法が部分掩蔽解析とよばれるものであり、その原理や考慮すべき不定性も含めて詳しく説明されている。次いで実際に解析に用いた各種コード (autovp, MINFIT, pixel-by-pixel 法) について触れられており、解析結果から得られるアウトフローとの関連の強さに応じて、NAL を 3 つのクラスに分類する手法が提案されている。

サンプル選定についてまとめているのが第 3 章である。本研究は BAL をもつキューサーを対象としているため、Gibson et al. (2009) が作成した BAL キューサーカタログから、過去に 8-10m 級望遠鏡 (Very Large Telescope, Keck Telescope) で高分散分光スペクトルが取得されている 20 天体を選定している。現時点で公開されているアーカイブデータをほぼ完全に網羅したサンプリングであるといえる。傾向的に BAL キューサーは電波強度が弱いことが指摘されているため、本研究においても FIRST サーベイのカタログを用いた電波強度の評価を行っている。データ解析の流れ、吸収線探査のアルゴリズム等についても曖昧さを残さずに記載されている。

第 4 章では検出された 115 個の CIV, NV, SiIV NAL に対する部分掩蔽解析の結果がまとめられている。統計的に有効なサンプルのみを用いた結果、およそ半数の BAL キューサーが少なくとも一つの intrinsic NAL を有することを確認した。この割合は BAL を持たないキューサーに対する先行研究の結果と同程度であることから、intrinsic NAL の検出の有無は BAL の有無とは関係がないことを示している。すなわち、両者を角度方向だけで区別できるとする「角度依存モデル」

を否定するものであり、本研究の重要な成果の一つとなっている。他に intrinsic NAL の掩蔽率分布、放出速度分布、等価幅分布についてもまとめられているが、これらに対する考察は次章で行われる。

結果の考察は第 5 章で行われている。先行研究の結果と比較しつつ、前章の結果に基づいて、従来の「角度依存モデル」は単純化し過ぎたモデルであることをあらためて主張している。立体角にして 2 割程度の指向性を有する BAL アウトフローに対し、intrinsic NAL をもたらすガスは強い指向性は持たず、幅広い方向に広がっているといえる。また、本章では、動径方向に対する NAL アウトフローの広がりも調査している。光源からの距離測定にはガス密度の情報が不可欠であるが、第 4 章で部分掩蔽解析を行った CIV, NV, SiIV NAL からは密度情報を得ることができない。そこで代わりに、SIV, SiII, CII などの微細構造線を有するイオンの基底状態と励起状態の吸収線強度比から評価する方法を採用している。この解析には、キューサーが放つ電離光子数密度 Q と、アウトフローガスの電離パラメータ U に対する正確な見積もりが求められるが、それぞれ先行研究を引用しつつ適切な仮定のもとで評価している。解析可能な微細構造線を有するキューサー SDSS J1215-0034 に対する結果は、より内側に存在する BAL アウトフローによる電離光子の減衰効果を考慮に入れたとしても、NAL アウトフローが 100kpc スケールにまで広がっているというものであった。これが、本研究のふたつめの重要な結果である。なお 100kpc というスケールは、銀河と銀河間空間の物質循環を担う銀河周辺物質 (Circum-Galactic Medium; CGM) が存在する領域であり、アウトフローの到達距離としてはやや大きすぎる印象がある。しかし、もしこれが事実であれば、銀河と SMBH の共進化にアウトフローが貢献していることを強く示唆する結果となる。最後に BAL と intrinsic NAL 両方のアウトフローを考慮に入れた幾何学的モデルを提案して本研究のまとめとしている。なお、これらの結果については、申請者を筆頭著者とする査読付き論文として報告されている (Itoh et al. 2020, MNRAS, 499, 3094-3110)。

本研究をさらに発展させるためには、1) 統計的信頼度を向上させるためのサンプル数の増加、2) 100kpc スケールに及ぶ NAL アウトフローに対する他の解釈の可能性の検証、3) 多波長観測に基づく各種物理量との相関関係の調査、などが求められる。これらに対する具体的な研究計画は将来的展望として第 6 章にまとめられている。

このように本研究は、intrinsic NAL をもたらすアウトフローの検出角度分布を統計的に調査するとともに、動径方向への広がりも考慮に入れた新しい幾何学的モデルを提案するという重要な結果をもたらしている。その結果が申請者を筆頭著者とする査読付き学術論文として報告されていることから、論文内容、体裁共に学位論文に充分相当するものと判断できる。

(公表主要論文名)

- [Daisuke Itoh](#), Toru Misawa, Takashi Horiuchi, Kentaro Aoki “Search for intrinsic NALs in BAL/mini-BAL quasar spectra”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol.499, Issue. 3, pp.3094-3110 (2020)