

国内望遠鏡で迫るクェーサーアウトフローの時間変動の起源



堀内 貴史

〈国立天文台 水沢 VLBI 観測所 石垣島天文台 〒907-0023 沖縄県石垣市新川 1024〉

e-mail: takashi.horiuchi@nao.ac.jp

クェーサーは宇宙で最大規模の明るさを誇る活動銀河中心核です。クェーサーの降着円盤からは高速度のガス流、すなわちアウトフローが放出されていることがスペクトル上の吸収線解析から知られています。アウトフローの吸収線は時間変動を示すことがわかっていますが、その詳しい原因は明らかになっていません。私たちはその原因として最も有力な、電離状態変動シナリオ（クェーサーの光度変動がアウトフローの電離状態に変化を与えた結果、吸収線強度が変動するという仮説）の検証を行いました。私たちは、東京大学木曾観測所105 cmシュミット望遠鏡／可視広視野カメラKWFCと、国立天文台岡山天体物理観測所188 cm反射望遠鏡／KOOLSを用いて、測光分光同時モニター観測を行いました。本稿では、本モニター観測で得られた興味深い結果を紹介するとともに、アウトフローに見られる時間変動のメカニズムを議論します。

1. はじめに

遠方宇宙に存在する銀河の中には、その中心領域が極端に明るいものが存在します。このような天体を活動銀河中心核（Active Galactic Nuclei; AGN）といいます。なかでもとりわけて明るいものはクェーサー（Quasi-Stellar Object; QSO）と呼ばれ、その光度は太陽光度の1-100兆倍に匹敵します。クェーサーが発見されてから半世紀以上が経ちましたが、内部構造については空間分解が難しく、詳しく解明されていません。そのためクェーサーを含むAGNで観測されるさまざまな時間変動の現象が用いられており、現在では、

- ・中心に大質量ブラックホール（太陽質量の数十万倍から数十億倍）を有し、その周辺にブラックホールの重力で引き寄せられたガスで形成された降着円盤をもつ。
- ・スペクトル上に現れる広い輝線および狭い輝線の輻射源となる領域（それぞれ広輝線領域と狭

輝線領域）が存在する。

- ・一部のクェーサーでは降着円盤の鉛直方向に電波ジェットが放出されている。
- ・降着円盤を取り囲むようにダストが存在する。などの描像¹⁾がAGN全般における内部構造として一般に受け入れられています（図1）。本研究で注目したのはこれらの構造とは別の、降着円盤から放出されている高速度のガス流、すなわちアウトフローです。

2. アウトフローの役割とクェーサー吸収線

2.1 アウトフローの観測

AGNにおいて、降着円盤、電波ジェットやダストは知っていたがアウトフローの存在は知らなかったと天文学を研究していた友人に言われたことがあります。よくよく思い返してしてみれば、私自身も大学院に入学するまでクェーサーのアウトフローの存在を知りませんでした。確かに分野

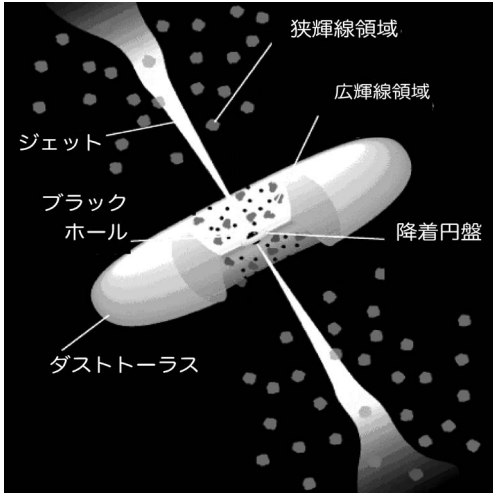


図1 AGNの構造の想像図¹⁾. 中心に大質量ブラックホールと降着円盤を有し、その外側を広輝線領域、狭輝線領域、ダストトーラスが覆います。降着円盤面に垂直な双方向からはジェットが放出されています。

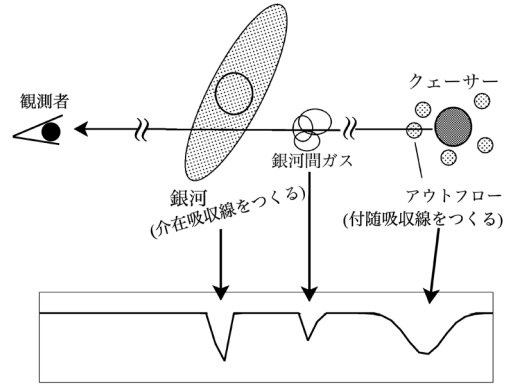


図2 付随吸収線と介在吸収線. クエーサーからの連続光がアウトフロー、銀河間ガス、銀河のディスク等を通ると、スペクトル上にこれらのガスによる吸収線が現れます。クエーサーに付随するアウトフローは付随吸収線をつくり、それ以外の大抵のガスは介在吸収線をつくります。

外の方にはあまり馴染みがないのかもしれませんが。ところが、アウトフローには (i) 質量降着を妨害する角運動量を降着円盤から抜き去り、新たなガスの降着を促進する^{2), 3)}, (ii) 大量の重元素を母銀河や銀河間空間に供給することで化学進化に影響を与える^{4), 5)}, (iii) 大量のエネルギーと運動量の放出により近傍の星間・銀河間領域における星形成を抑制し、銀河進化に影響を与える^{6), 7)} という重要な役割があると考えられています*1。実はアウトフローは中心ブラックホールの成長や銀河進化の様子を探るうえで極めて重要な研究対象だったのです。

アウトフロー自身は大きな光度を放つ光源ではないと考えられているので、撮像観測で直接的にその姿を捉えることは困難です。そこでアウトフローは通常、「クエーサー吸収線」という形で検出されています。クエーサー吸収線とは、クエーサーを背景光源として利用することで、視線上に存在するガスをスペクトル上に「吸収線」として

捉える、いわば「影絵」のようなものです。スペクトル上の吸収線の大半は手前の銀河や銀河間ガスなどがもたらしています。このようにクエーサーに直接付随しないガスがもたらす吸収線を介在吸収線といいます。一方、クエーサーに付随する吸収線を付随吸収線といい、この吸収線はアウトフローがもたらすと考えられています(図2)。

付随吸収線は視線速度幅(以下、線幅)によって三つのタイプに分類されます。線幅が最も広い「広吸収線(broad absorption line; BAL)」¹⁰⁾(FWHM $\geq 2,000 \text{ km s}^{-1}$)、線幅が最も狭い「狭吸収線(narrow absorption line; NAL)」(FWHM $\leq 500 \text{ km s}^{-1}$)、そして両者の吸収線の中間の線幅をもつ「準広吸収線(mini-BAL)」です(図3)。

2.2 吸収線界の御三家

BALは、P-Cygniプロファイル(輝線の短波長側にシフトした吸収構造をもつスペクトルの形状)の一部で、典型的に $\sim 10,000 \text{ km s}^{-1}$ もの非常に広い線幅をもつ吸収構造です。BALがもつ広い線幅は、視線上に存在する速度の異なるガス

*1 アウトフローの放出メカニズムは降着円盤からの輻射圧^{2), 3)}、磁気遠心力⁸⁾や、熱輻射⁹⁾などが有力視されています。

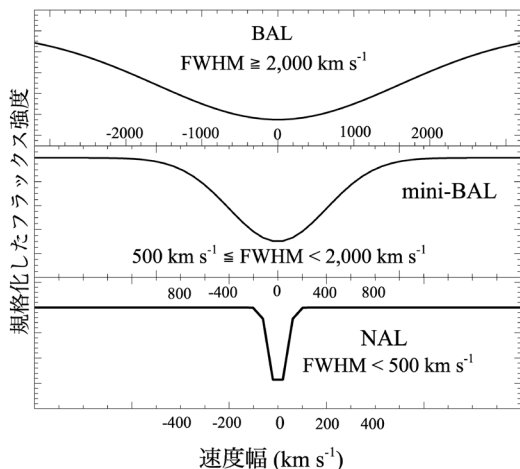


図3 速度幅によるBAL, mini-BALとNALの分類. 横軸は速度幅を表し, 縦軸は規格化したフラックスを表します.

による吸収線が混ざり合っつくられます. このような高速度のガスが生まれる環境としては強力な輻射場をもつクェーサー以外に候補がないため, BALは付随吸収線, すなわちアウトフローによる吸収線であると考えられます. それゆえ, BALを用いることはアウトフロー研究における「王道」となっています. しかしながら, 自身を構成する個々のガスによる微細な吸収構造を分解できないため, モデルフィットによってアウトフローの柱密度^{*2}, 掩蔽率^{*3}, ガス温度などの物理量を評価できないというデメリットがあります.

mini-BALとNALはBALよりも線幅が狭く, 高分散分光観測による吸収線輪郭の分解が可能です^{11), 12)}. ゆえにモデルフィット^{*4}による物理量の評価が可能であることから, 近年注目されています. ところが, NALは自身の吸収線の狭さゆ

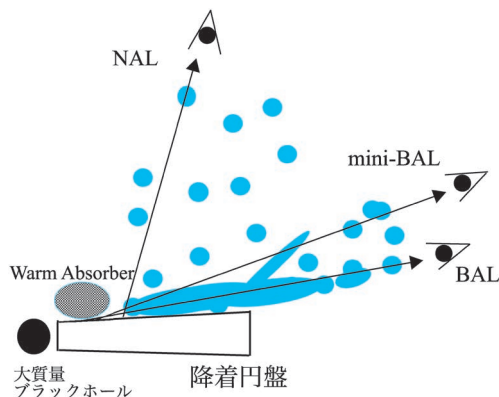


図4 クェーサー断面の概念図. 中心に大質量ブラックホールが存在し, その強い引力で引き寄せられたガスによって降着円盤が形成されます. 降着円盤からはアウトフローが放出されており, 円盤を浅く見込む場合にはBAL, mini-BALが, 深く見込む場合にはNALが観測されると考えられています. 降着円盤内縁にはX線で観測されるWarm Absorberが存在すると考えられています (詳細は「5.1章」を参照).

えに, スペクトル上に大量に存在する介在吸収線との区別が容易ではありません. NALが付随吸収線か, はたまた介在吸収線かを区別するには「掩蔽率解析^{*5)}」^{13), 14)}か「時間変動解析」(後述)を行う必要があります, どちらも手間と時間のかかる作業です. 一方でmini-BALはBAL同様, 十分な広さの線幅があり付随吸収線と判別できるとともに, mini-BALを構成する個々の吸収輪郭を高分散分光観測によって分解できるというたいへん大きなメリットがあります. すなわちmini-BALはアウトフローの物理状態を解明できる「救世主」です.

各吸収線の検出頻度はBALで~10-20%, mini-BALで~5%, NALで~50%です. これらの検出頻度はクェーサーの降着円盤を見込む角度に依存

^{*2} 視線方向に積分した, 単位断面積当たりのガスの数密度. 単位は cm^{-2} .
^{*3} 視線上で吸収体(ガス)が背景光源(クェーサー)を覆う割合.
^{*4} Voigt Profileという, ドップラー成分(熱運動)とローレンツ成分(量子力学的効果)を合わせた関数が用いられます.
^{*5} 掩蔽率の差異を利用して, 吸収体がクェーサー近傍に存在するか否かを決定する解析手法です. クェーサーから十分に離れた位置にあるガス(例えば銀河間ガス)は, ほとんどの場合, 視線上でクェーサーを完全に覆います(掩蔽率は1). 一方でクェーサーの近傍に存在するガスはクェーサーを完全には覆わず, 視線上で背景光の漏れ出しが生じます. その結果掩蔽率は1より小さくなります.

するとする説（角度依存説）があり，特にBALは降着円盤を浅く見込んだ場合に観測されると考えられています¹⁵⁾（図4）。

2.3 時間変動するアウトフローの吸収線

吸収線はその深さ，幅，中心波長の位置が時間変動をすることがあります。ガス密度が小さく，空間スケールが大きい銀河間物質や星間物質は，電離ガスの再結合時間（電子密度に反比例）や，背景光源（キューサー）に対するガスの横断時間が100万から1,000万年程度と，非常に長くなるため，変動を観測することがほとんどできません。一方で，アウトフローの吸収線は上記と同じ計算を行うと，数年未満で変動を示す可能性があります。BAL, mini-BALは数週間から数年以内に時間変動を示すことが知られており，特にBALは10年以内に70-90%の確率で変動することが確認されています¹⁶⁾。さらにBAL, mini-BALには，消失¹⁷⁾や発現¹⁸⁾が確認されることがごくまれにあります。一方で，NALはめったに時間変動を示さず，10年以内に最大25%ほどのサンプルしか変動しないという結果が報告されています¹⁹⁾。

しかしながら，アウトフローの時間変動の起源は詳しく解明されていません。それを解明することが本研究のモチベーションです。現在までに提案されている時間変動の原因は以下の三つです：(1) 角運動量をもつアウトフローがキューサーに対するわれわれの視線を横切ることに伴う吸収線の変動（以下，ガス運動シナリオ），(2) キューサー周辺で生じる（偏光した）散乱光による吸収線の希釈の程度の変動（以下，散乱光増減シナリオ），(3) アウトフローの電離状態の変動にともなう吸収線強度の変動（電離状態変動シナリオ）。

最初の二つのシナリオの検証はHS 1603+3820という3階電離炭素イオン（C IV^{*6)}によるmini-BALをもつキューサーに対して行われてい

ます。すばる望遠鏡+HDSを用いた長期モニター分光観測によって，mini-BALを構成する複数の吸収線の深さが一斉に変動する様子が確認されました^{11), 12)}。この結果によってガス運動シナリオを支持できる可能性が低くなりました。なぜならこのシナリオを適用した場合，異なる速度成分をもつ複数のガスが視線を一斉に横切るという，不自然な状況に陥るからです。この結果を受けて，すばる望遠鏡+FOCASによる偏光分光観測が行われました。HS 1603+3820のC IV mini-BALは最大で20%程度の深さの変動が確認されており²⁰⁾，散乱光増減シナリオを支持するためには偏光度もそれに応じて20%程度変化する必要があります。しかしながら，HS 1603+3820に対する偏光分光観測においては連続光に対する偏光度は僅か0.6%程度しかなく²¹⁾，散乱光増減シナリオを支持するには小さすぎるということがわかりました。そして，最後に残されたのが電離状態変動シナリオです。キューサーには光度変動する（明るさが変わる）という性質があります。このシナリオはキューサーの光度変動がアウトフローの電離状態に変化を与えることで，光電離あるいは電子の再結合によって特定のイオンの存在比が変わり，その結果，吸収線が変動するというものです。アウトフローの電離状態変動シナリオを検証することによって，アウトフローのガス密度や中心光源からの距離に制限をつけることができます^{11), 12)}。すなわち，電離状態変動シナリオの検証はアウトフロー変動メカニズムの解明のみならず，アウトフローの物理状態や幾何学的構造を議論する上でも重要です。しかしながら，このシナリオはBALでは支持する観測結果^{22), 23)}と支持しない観測結果²⁴⁾に分かれており，明確な答えが得られていません。

そこで私たちはmini-BALあるいは付随NALをもつキューサー（以下，mini-BALキューサー，

*6 二重共鳴吸収線という，異なる中心波長1,548, 1,551 Å（紫外域）をもつ二つの吸収線が同時に検出されます。HS 1603+3820の赤方偏移は~2.54であるため，対応するC IVの吸収線は~5,500 Å（可視光帯）で検出されます。

NALクェーサー)をターゲットにし、電離状態変動シナリオの検証に着手しました。本研究では、具体的に(i)クェーサーの光度変動とアウトフローの吸収線の変動が同期するか否か、あるいは(ii)頻繁に吸収線の変動を示すmini-BALのみに激しく頻繁な光度変動が確認されるか否か、を通して電離状態変動シナリオの可能性を検証することにしました。

3. ターゲット選択と観測

3.1 ターゲット選択とターゲットの物理的特徴

本研究では、先行研究²⁵⁾によってすばる望遠鏡をはじめとする世界の10メートル級望遠鏡を用いて最長12年に及ぶ高分散分光モニター観測が行われた11天体のうち、日本国内で観測が可能なmini-BALクェーサー4天体(HS 1603+3820, Q 1157+014, Q 2343+125, およびUM 675)と、NALクェーサー5個(Q 0450-1310, Q 0940-1050, Q 1009+2956, Q 1700+6416, Q 1946+7658)を可視測光分光同時モニター観測のターゲット(以下、ターゲットクェーサー)にしました。これらのmini-BALクェーサーは吸収線が数カ月から数年のタイムスケールで時間変動を示すことが確認されていますが、一方でNALの変動は確認されていません²⁴⁾。本研究でNALクェーサーも観測ターゲットとして加える理由は、もし頻繁に吸収線が変動するmini-BALをもつクェーサーのみが激しい光度変動を示せば、電離状態変動シナリオを支持する結果になるからです。ターゲットクェーサーの等級は $V=16-17$ 、赤方偏移は2-3です。スローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)で発見された一般的なクェーサーと比較すると、ターゲットクェーサーは極めて明るいグループに属しています。

3.2 観測は体力勝負

電離状態変動シナリオの正当性は、撮像観測と低分散分光モニター観測を同時期に行うことによっても(高分散分光観測でなくても)、すなわち国内の1-2 m級の小口径望遠鏡を用いても十分に検証可能です。そこで私たちはアウトフローの電離状態変動シナリオをターゲットクェーサーに対して検証すべく、可視測光分光同時モニター観測を国内で行いました。ターゲットクェーサーの光度変動を探る測光モニター観測は、東京大学木曾観測所105 cmシュミット望遠鏡および木曾広視野カメラ(Kiso Wide Field Camera; KWFC²⁶⁾)を三つのフィルター*u, g, i*バンド(中心波長はそれぞれ3,509, 4,675および, 7,582 Å)を用いて行いました。一方、アウトフローによる吸収線の変動を探る分光モニター観測は国立天文台岡山天体物理観測所188 cm反射望遠鏡および京都岡山可視低分散分光撮像装置(Kyoto Okayama Optical Low-dispersion Spectrograph; KOOLS²⁷⁾)を用いて行いました。KOOLSの波長分解能は約1,100で、吸収線のモデルフィットが可能なほど分散の高いデータは得られませんが、各観測での等価幅^{*7}を評価し吸収線の変動を調べることができます。

私たちはこの上記の測光、分光モニター観測を2012年4月から2015年5月までの3年以上にわたり同時期に行いました。モニター観測なので、観測所には頻繁に出かける必要がありました。二つの観測所における総観測夜数は64夜に及び、これはほぼ月に1回のペースで観測をしたこととなります。さらに岡山天体物理観測所での分光モニター観測においては天候に恵まれなかったため、やむをえず観測対象をmini-BALクェーサーHS 1603+3820に絞ってモニター観測を進めることになりました。なお、観測に関わる苦労話につきましては信州大学のウェブ上の記事^{*8}をご覧ください。

*7 背景光源からのフラックスを1に規格化したときの吸収線の面積を、高さ1の長方形に変換したときの波長方向の幅で単位はÅになります。等価幅は吸収強度の指標となる量です。

*8 <http://www.shinshu-u.ac.jp/zukan/report/post-4.html>

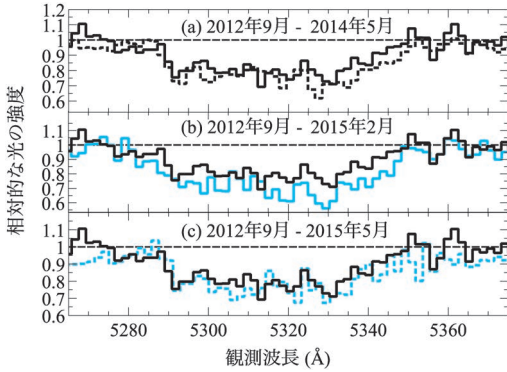


図5 188 cm 反射望遠鏡 / KOOLS で取得した、mini-BAL クェーサー HS 1603+3820 の C iv mini-BAL 周辺のスペクトル。横軸は観測者系での波長、縦軸は規格化したフラックスを表します。また、2012年9月19日に取得された C iv mini-BAL (黒実線) の形状を、(a) 2014年5月30日 (黒破線)、(b) 2015年2月23日 (青実線)、(c) 2015年5月21日 (青破線) に取得した C iv mini-BAL とそれぞれ比較しています。平行破線は規格化フラックスの基準値を表します。

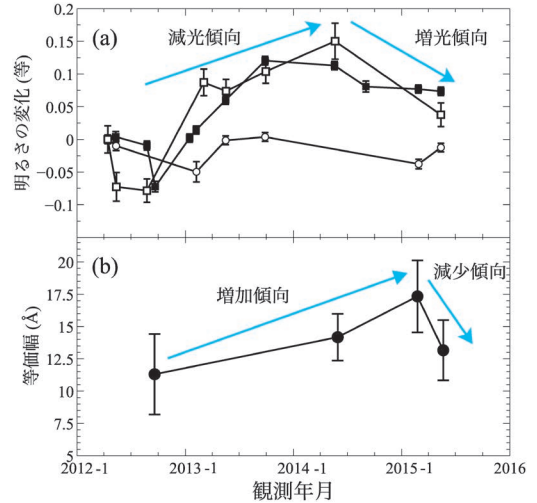


図6 (a) mini-BAL クェーサー HS 1603+3830 の SDSS *u*- (白四角), *g* (黒四角) および *i*-バンド (白丸) の光度曲線。横軸は観測時期 (year-month), 縦軸は初回観測からの光度変動 (等) を表します。 (b) 同クェーサーの C iv mini-BAL の観測者系でみた等価幅の変動です。

4. 観測結果と電離状態変動シナリオの検証

4.1 測光分光同時モニター観測

測光分光同時モニター観測を行った HS 1603+3820 の 12 回の測光観測, 4 回の分光観測の結果 (図5) について考えてみます。

図6は HS 1603+3820 の (a) 光度曲線と (b) C iv mini-BAL の等価幅時間変動傾向 (観測系) を同じ時間軸でプロットしたものです。光度曲線の全体的な傾向として 2014 年 5 月までは減光し, それ以降は増光に転じていることがわかります。光度変動幅の最大値は 2012 年 8 月から 2014 年 5 月までのもので 0.23 等 (*u* バンド) です。一方等価幅の変動傾向としては, 2012 年 9 月 (1 回目) から 2015 年 2 月 (3 回目) までは増加し (この間, 等価幅の変動は $6.0 \pm 4.1 \text{ \AA}$), それ以降は減少に転じていることがわかります。これよりクェーサー光度と C iv mini-BAL の等価幅の変動パターンには 9 カ月程度の時間差がありますが, 同期してい

る傾向が確認できます。その原因は, クェーサーの光度変動によるイオンの再結合や光電離によって C iv 吸収強度に寄与する C^{3+} イオンが増減したからだと考えるのが自然です。また, この 9 カ月の時間差は吸収体の反応時間, すなわちアウトフローに含まれる炭素イオンの再結合時間であると解釈できます。つまり私たちの観測により, 一部の BAL クェーサーに加えて, mini-BAL をもつクェーサーに対しても電離状態変動シナリオが適用できる可能性があることが確認されたわけです。大型望遠鏡ではモニター観測のようなフレキシブルな運用が難しいです。この結果は大型望遠鏡では解決が困難だった問題を, 国内の小口径望遠鏡によって解決に近づけた成果といえるでしょう。

4.2 mini-BAL/NAL クェーサーの光度変動傾向

次に, 全ターゲットクェーサーの光度変動傾向について考えてみます。あるタイムスケールにおける典型的な光度変動の大きさの評価には, 構造関数 (Structure Function; SF) が可視光帯でよく用いられます。ここで構造関数は測光誤差に対する光度変

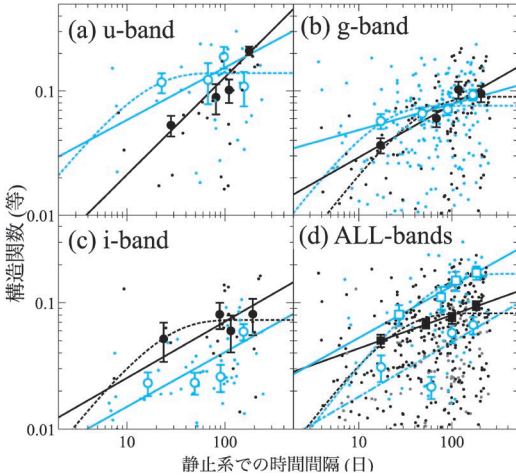


図7 mini-BAL (黒丸), NALクェーサー (青白丸) の (a) *u*, (b) *g*, (c) *i*バンドの構造関数. 全観測期間の組み合わせで比較した mini-BAL と NALクェーサーの光度変動 (それぞれ黒ドットと青ドット) も合わせてプロットしました. また, mini-BAL, NALクェーサーの構造関数に対してべき乗則フィッティング (それぞれ黒と青の直線) と漸近関数フィッティング (それぞれ黒と青破線) を施しました. (d) 全ターゲットクェーサーの *u* (青四角), *g* (黒四角), *i*バンド (青丸) の構造関数. 全観測期間のターゲットクェーサーの光度変動 (*u* (青ドット), *g* (黒ドット), *i*バンド (灰ドット)) もプロットしました.

動の大きさを表し, 以下のように定義されます²⁸⁾.

$$SF = \sqrt{\frac{\pi}{2} \langle |\Delta m(\Delta\tau)|^2 \rangle - \langle \sigma_n^2 \rangle}, \quad (1)$$

このとき σ_n は異なる二つの観測時期 t_i, t_j における測光ノイズの平方和 ($\sigma_n = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$), $\langle |\Delta m(\Delta\tau)| \rangle$ は i 番目と j 番目の観測の静止系の時間間隔 $\Delta\tau (= t_j - t_i)$ での光度変動の絶対値の平均, $\pi/2$ はあるタイムスケールにおける光度変動幅の分布をガウス分布と仮定した場合に現れる定数です. 図7に全ターゲットクェーサーの (a) *u*, (b) *g*, (c) *i* バンドの構造関数および, (d) mini-BALクェーサーとNALクェーサーの光度変動幅のサンプルを合わせた構造関数を示します. 各々の構造関数は以下のべき関数^{29), 30)}と漸近関数^{29), 31)}でフィッ

トしました.

$$SF_p(\Delta\tau) = \left(\frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_p} \right)^\gamma, \quad (2)$$

$$SF_a(\Delta\tau) = V_a(1 - e^{-\Delta\tau/\Delta\tau_a}), \quad (3)$$

ここで γ はべき指数, $\Delta\tau_p$ は $SF_p(\Delta\tau_p)$ が1等級になるようなタイムスケール, V_a は $\Delta\tau = \infty$ における SF_a の漸近値, $\Delta\tau_a$ は漸近関数の特徴づけるタイムスケールで, すべてフィッティングパラメータになります. さらに先行研究³⁰⁾で用いられている $\Delta\tau = 100$ 日におけるべき関数 $SF_p(100d)$ も評価しました. 表1にべき関数と漸近関数対するフィッティングパラメータをまとめました.

表1よりmini-BALクェーサーとNALクェーサーの間には SF_p と V_a における有意な差が見られないことから, 光度変動は同程度であることがわかります. mini-BALクェーサーのみに特別に大きな光度変動がみられるわけではないということは, アウトフローの電離状態を決めているのは光度変動だけではないということになります.

5. 電離状態変動の正統性の検証

HS 1603+3820に対する可視測光分光同時モニター観測は, 電離状態変動シナリオを支持するものでした. これにて電離状態変動シナリオの検証は終わり, と思いたいところですがそうはいきません. 観測された光度変動はアウトフローの変動に十分に寄与するかどうかを定量的に確認しなければならないからです. そこでこの章では, 光学的に薄い平行板ガスに, 典型的なクェーサーのスペクトルエネルギー分布 (以下, SED) を入射光として用いて, 光電離モデル³²⁾に基づく考察を行います. 具体的には, 観測した最大の光度変動 $\Delta u = 0.23$ 等が C IV mini-BAL の変動 ($EW = 11.3 \text{ \AA} \rightarrow 17.3 \text{ \AA}$) を再現できるかどうかを検証します. 吸収線の深さ (正確には光学的厚さ) の変動は吸収をもたらす物質の存在比の変動を表しま

表1 SFのべき関数と漸近関数フィッティングのパラメータ.

クェーサー	SF _p		SF _a	
	γ	S (Δτ=100d) (等)	Δτ _a (漸近値) (days)	V _a (等)
SDSS <i>u</i> バンド				
mini-BALクェーサー	0.785±0.109	0.129±0.037	— ²	— ²
NALクェーサー	0.422±0.345	— ¹	12.282±10.090	0.139±0.026
SDSS <i>g</i> バンド				
mini-BALクェーサー	0.426±0.078	0.078±0.036	37.980±15.640	0.090±0.016
NALクェーサー	0.210±0.071	0.078±0.067	13.537±6.981	0.076±0.008
SDSS <i>i</i> バンド				
mini-BALクェーサー	0.446±0.263	— ¹	18.870±9.088	0.073±0.008
NALクェーサー	0.432±0.111	— ¹	— ¹	— ¹

¹ 誤差が大きいため省略.

² 漸近関数によるフィッティングが困難.

すが、光電離モデルではさまざまなイオンの存在比は電離パラメータ

$$U \equiv \frac{1}{4\pi r^2 c n_e} \int_{\nu_{LL}}^{\infty} \frac{L_\nu}{h\nu} d\nu = \frac{Q}{4\pi r^2 c n_e} = \frac{n_\gamma}{n_e}, \quad (4)$$

に依存することが確認できます。ここで、 $\nu_{LL} = 3.28 \times 10^{16}$ Hzは水素の電離光子の最小周波数（ライマンリミット, 912 Åに対応）、 Q は1秒 당 光線から放射される水素の電離光子数、 r は光源から吸収体までの距離、 n_γ と n_e はそれぞれ電離光子と電子の数密度です。少なくともmini-BALクェーサーHS 1603+3820においては、アウトフローの変動の原因としてガス運動シナリオの可能性は低いという結論が下されているので、ここでは視線上の電子密度 n_e は一定と仮定します。したがって、電離パラメータの変動値 $\Delta \log U$ 、電離光子密度 n_γ 、光度変動値 Δm との関係はクェーサーのSEDの形状が不変であると仮定すると*⁹

$$\Delta m = -2.5 \Delta \log U = -2.5 \log \frac{n'_\gamma}{n_\gamma} \quad (5)$$

となります。ここで n'_γ は光度変動後の電離光子密度です。電離パラメータは光源から吸収体まで

の距離 r と電子密度 n_e に依存するため、直接測定することができません。しかしながら、どのイオンの吸収線が強いのか、あるいは弱いかを見ることで電離パラメータにある程度の制限をつけることができます。HS 1603+3820のmini-BALにおいてはC ivとN v（窒素の4階電離イオン）の吸収線が強く、Si iv（ケイ素の3階電離イオン）の吸収線はほとんど検出されていません。この特徴をもとに、光電離モデルによって電離パラメータに制限をつけるとおおむね $\log U \geq -1.7$ ($U \geq 0.02$)となります^{19),34)}。

観測したC iv mini-BALの等価幅変動は C^{3+} イオンの存在比 f の変動値 $\Delta \log f$ に換算すると ~ 0.18 となります。電離パラメータ $\log U \geq -1.7$ のもと、存在比 f の変動値0.18をもたらすには電離パラメータの変動値として0.4を要することが光電離モデルによる見積もりからわかりました。この値は1.0等程度の光度変動に相当します。そのような大きな光度変動を示すクェーサーは、今回私たちがターゲットとした明るいクェーサーにおいては（少なくとも数年程度の時間スケールにおいては

*⁹ 実際には短波長側のほうが光度変動が大きいこと、いわゆるbluer-when-brighter（明るくなると青くなる；BWB）効果が知られているため³³⁾、可視光変動に対する電離光子密度の変動は、式(5)の見積もりよりも数十%大きくなります。

は) ほぼ期待できません。実際に私たちが観測した光度変動 $\Delta u=0.23$ 等(減光)を電離パラメータの変動値に換算すると $\Delta \log U \sim -0.1$ となり、観測されたC IV mini-BALの変動を再現するには電離パラメータの変動値が0.3(光度変動値で約0.8等)足りないことがわかりました。やはり、キューサーの光度変動だけで吸収線の変動を説明することは困難なようです。

5.1 X線遮蔽ガスによる補助機構

前節では、電離状態変動シナリオは光度変動単独でアウトフローの時間変動を説明するのは難しいという結論に達しました。ほかに有力なシナリオはないかと模索するなか、一筋の光が差し込みました。それは、電離状態変動シナリオには補助機構が存在する可能性です。その補助機構とは、降着円盤内縁に存在すると考えられている遮蔽ガスの光学的厚さの変動です。遮蔽ガスは降着円盤内縁あるいは大質量ブラックホール近傍のコロナからのX線をブロックし、下流のアウトフローが過剰に電離されることを防ぐ役割を果たします^{2), 3)}。遮蔽ガスの光学的厚さが変動すればアウトフローに注ぐX線の量が調節されるので、結果的にアウトフローの電離状態の変動に寄与するかもしれません(図8)。

遮蔽ガスの候補としては、X線観測で検出されるWarm Absorber³⁵⁾が挙げられますが、これは本来アウトフローの過電離を防ぐためにその存在が予想されてきたものです。先行研究によるX線分光モニター観測で、Warm Absorberは有意な時間変動を示すことが明らかになったので^{36), 37)}、光源からの入射光が遮蔽されることにより下流にある(すなわち光源からより離れた場所にある)UVで検出されるアウトフローの電離状態が変動する可能性があります。実際に、Rózańskaら³⁸⁾の光電離モデルではHS 1603+3820のC IV mini-BAL吸収体はキューサー中心から0.1 pc程度の距離に存在することが示唆されており、この値はWarm Absorberの位置関係と整合性があります。

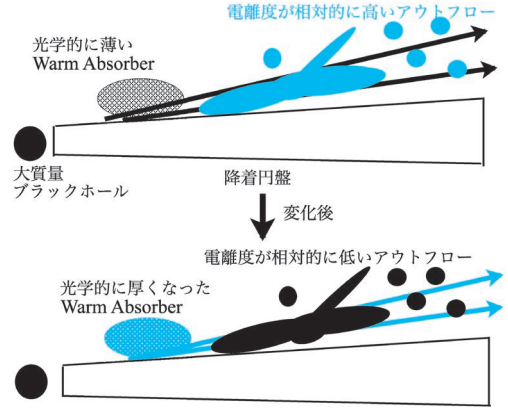


図8 Warm Absorber (遮蔽ガスの候補)の変動に応じたアウトフローの電離度の変化の例。光学的に厚いWarm Absorberは光学的に薄いものと比べて、そこを通過する電離光子の量を減少させるので、下流のアウトフローの電離度は相対的に低くなります。

6. まとめと今後の展望

本研究では、アウトフローの時間変動の原因として最も有力な電離状態変動シナリオを検証するため、i) mini-BALキューサー HS 1603+3820に対する分光モニター観測と、ii) ターゲットキューサー9天体に対する可視測光モニター観測を3年以上にわたって行いました。

測光分光同時モニター観測を行ったHS 1603+3820に対しては、キューサーの光度とC IV mini-BALの吸収強度の変動が約9カ月のタイムラグを伴って同期する傾向が見られました。HS 1603+3820に付随するmini-BALに許容される電離パラメータ ($\log U \geq -1.7$) においては、この電離パラメータの範囲で電離状態変動シナリオを支持するための光度変動幅は1.0等級程度となります。HS 1603+3820における光度変動の最大値は0.23等(uバンド)なので、光度変動のみで電離状態変動シナリオを支持できる可能性は低いことがわかりました。さらに構造関数解析から、mini-BALキューサーとNALキューサーの光度変動幅・傾向には有意な差は確認できず、mini-BAL

クエーサーのみが大きな光度変動を示すわけではないこともわかりました。

電離状態変動シナリオの検証をさらに進めるために今後は、電離状態変動シナリオをサポートする補助的な機構 (Warm Absorber の変動) の検証を試みる予定です。例えば XMM-Newton などの集光力の高い X 線望遠鏡と可視光 2-4 m 級望遠鏡での同時モニター観測を行うことが考えられます。

謝 辞

本稿の研究成果³⁹⁾ が得られるまでに信州大学の三澤透氏をはじめ、同じ研究室の小山田涼香さん、伊東大輔君、東京大学の諸隈智貴氏ならびに非常に多くの方にお世話になりました。奇しくも mini-BAL クエーサー HS 1603+3820 との出会いによって人生が大きく変わった三澤透氏と同様に、私の研究生活もこのクエーサーの存在によって救われ、博士論文⁴⁰⁾ を執筆できました。また国立天文台天文情報センター普及室長の縣秀彦氏、石垣島天文台の花山秀和氏ならびに前職場の皆さんに感謝の意を申し上げます。なお本研究は科学研究費補助金 (15K05020) によるサポートを受けて行われました。

参考文献

- 1) Urry C. M., Padovani P., 1995, PASP 107, 803
- 2) Murray N., et al., 1995, ApJ 451, 498
- 3) Proga D., et al., 2000, ApJ 543, 686
- 4) Di Matteo T., et al., 2005, Nature 433, 604
- 5) Moll R., et al., 2007, A&A 463, 513
- 6) Granato G. L., et al., 2004, ApJ 600, 580
- 7) Chartas G., et al., 2007, AJ 133, 1849
- 8) Everett J. E., 2005, ApJ 631, 689
- 9) Chelouche D., Netzer, H., 2005, ApJ 625, 95
- 10) Weymann R. J., et al., 1991, ApJ 373, 23
- 11) Misawa T., et al., 2007, ApJ 660, 152
- 12) 三澤透, 2007, 天文月報 103, 340
- 13) Misawa T., et al., 2007, ApJS 171, 1
- 14) Wampler E.J., et al., 1995, ApJ 443, 586
- 15) Hamann F., et al., 2012, AGN Winds in Charleston 460, 47
- 16) Capellupo D. M., et al., 2013, MNRAS 429, 1872
- 17) Filiz Ak N., et al., 2012, ApJ 757, 114

- 18) Rodríguez, H. P., et al., 2013, ApJ 775, 14
- 19) Narayanan D., et al., 2004, ApJ 601, 715
- 20) Misawa T., et al., 2005, ApJ 629, 115
- 21) Misawa T., et al., 2010, ApJ 719, 1890
- 22) Trévese D., et al., 2013, A&A 557, A91
- 23) Wang T., et al., 2015, ApJ 814, 150
- 24) Gibson R. R., et al., 2008, ApJ 675, 985
- 25) Misawa T., et al., 2014, ApJ 792, 77
- 26) Sako S., et al., 2012, SPIE 8446, 6
- 27) Yoshida M., 2005, Journal of Korean Astronomical Society 38, 117
- 28) di Clemente A., et al., 1996, ApJ 463, 466
- 29) Vanden Berk D. E., et al., ApJ 601, 692
- 30) Wilhite B. C., et al., MNRAS 383, 1232
- 31) Trévese D., et al., 1994, ApJ 433, 494
- 32) Hamann F., 1997, ApJS 109, 279
- 33) Giveon U., et al., 1999, MNRAS 306, 637
- 34) Hamann F., et al., 1995, ApJ 443, 606
- 35) Krongold Y., et al., 2007, ApJ 659, 1022
- 36) Chartas G., et al., 2007, AJ 133, 1849
- 37) Giustini M., et al., 2011, A&A 536, 49
- 38) Róžańska A., et al., 2014, New Astron 28, 70
- 39) Horiuchi T., et al., 2016, PASJ 68, 48
- 40) 堀内貴史, 2017, 博士論文 (信州大学)

A Possible Correlation of Time Variability between Quasar Luminosity and Outflows Seen in Mini-BAL and NAL Quasars

Takashi HORIUCHI

Ishigakijima Astronomical observatory, 1024-1 Arakawa, Ishigaki, Okinawa 907-0024, Japan

Abstract: Quasi-Stellar Objects (QSOs) are the brightest category of active galactic nuclei (AGNs). QSO accretion disks eject outflow gas, whose typical velocity reaches $\sim 10,000 \text{ km s}^{-1}$. Outflow gas is usually studied with absorption lines on the rest-frame UV spectra of QSOs. Broad absorption lines (BALs), mini-BALs, and intrinsic narrow absorption lines (NALs) originate from QSOs and, they are useful tool to study outflow gas. Especially, observations of mini-BALs and intrinsic NALs enable us to estimate physical parameters by fitting the profiles with theoretical models. Absorption lines given by outflow gas show time variation, however, this mechanism is not well understood. As a plausible hypothesis, it is proposed that changes in QSO luminosity change ionization levels in the outflow gas. In this article, we report a possible correlation between optical variability and outflow variability in mini-BAL and intrinsic NAL QSOs. We also give some interpretation on our observational results and future prospects.